

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

## **DOKTORSKÁ DISERTAČNÍ PRÁCE**

Nestandardní případy vypínání zkratů – interakce elektrických a mechanických dějů

Autor práce: Ing. Vladimír Vajnar  
Vedoucí práce: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c

Plzeň 2019

# Abstrakt

VAJNAR, Vladimír. *Nestandardní případy vypínání zkratů – interakce elektrických a mechanických dějů* [Nonstandard cases of short circuit interruptions – interaction of electrical and mechanical processes]. Plzeň, 2019. Doktorská disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c

---

Tato disertační práce je zaměřena na problematiku mimořádných spínacích operací vysokonapěťových výkonových vypínačů s důrazem kladeným na případy vypínání zkratů s nesymetrickým průběhem a rizikem výskytu oddálené proudové nuly. Klíčovým aspektem práce je posouzení vypínací schopnosti vypínačů umístěných v různých místech elektrizační soustavy. V první polovině práce je uveden důsledný popis vypínačů pro distribuční a přenosové sítě včetně popisů fyzikálních jevů a analýzy mezinárodní standardizace této oblasti. Druhá polovina práce obsahuje vlastní výzkum zaměřený na průběhy zkratových proudů, namáhání vypínače při generátorových zkratech, nebezpečí oddálené proudové nuly a propojení pasivních parametrů soustavy s rizikem selhání vypínače vlivem nedostatečné vypínací schopnosti.

## Klíčová slova

vypínač; narušené vypínání; proudová nula; vypínací schopnost; spolehlivost

# Abstract

VAJNAR, Vladimír. *Nonstandard cases of short circuit interruptions – interaction of electrical and mechanical processes* [Nestandardní případy vypínání zkratů – interakce elektrických a mechanických dějů]. Pilsen, 2019. Dissertation thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electric Power Engineering. Supervisor: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c

---

The thesis deals with the topic of nonstandard cases of high voltage circuit breakers' operations, emphasizing short circuits with asymmetrical currents and the danger of delayed current zeros occurrence. The key aspect is the assessment of breaking capability of circuit breakers located in various applications in the electric power system. The first half of the thesis contains the detailed description of circuit breakers for distribution and transmission systems, with the description of physical processes and international standardization. The second half consists of the research itself aimed at the short circuit currents waveforms, breaker stressing within the generator-fed faults, danger of the delayed current zeros and the connection between passive parameters of the grid with the risk of breaker failure caused by the insufficient breaking capability.

## Keywords

circuit breaker; interrupted breaking; current zero; breaking capability; reliability

# Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci, zpracovanou na závěr doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svoji závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením školitele a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Prohlašuji, že tato práce byla zpracována dle obvyklých zásad pro tvorbu vědeckých prací. Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných právních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této práce je legální.

Plzeň 8. dubna 2019

Ing. Vladimír Vajnar

.....

## Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval těm, kteří podstatnou měrou přispěli k existenci této práce.

V první řadě děkuji svému odbornému vedení, panu prof. Zdeňkovi Vostrackému a panu dr. Janovi Sedláčkovi, za jejich odborné a metodické vedení, rady, konzultace a přístup, který mne ovlivnil i nad rámec vědeckých disciplín.

Dále děkuji svým kolegům, s nimiž jsem se v průběhu studia setkal a kteří tvořili profesionální, produktivní a přátelský kolektiv, v jehož rámci vznikla spousta nápadů důležitých pro tuto práci a díky němuž byl průběh doktorského studia, zejména v jeho počátcích, mnohem snazší. Za toto děkuji zejména ing. Václavovi Mužíkovi, dr. Tomášovi Nazarčíkovi, dr. Alešovi Krutinovi, dr. Janě Jiříčkové a dr. Jaroslavovi Šnajdrovi.

Děkuji též celému kolektivu Katedry elektroenergetiky a ekologie na FEL ZČU v Plzni za poskytnutí znalostní základny a odbornou přípravu po celou dobu univerzitního studia.

Závěrečný dík ale patří mé nejbližší rodině, bez jejichž nekončící podpory a víry by tato práce nikdy nedosáhla své finální podoby.

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Seznam obrázků</b>  | <b>ix</b> |
| <b>Seznam tabulek</b>  | <b>x</b>  |
| <b>Seznam symbolů a zkratk</b>   | <b>xi</b> |
| <b>1 Úvodní část</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivace k řešení tématu . . . . .   | 1         |
| 1.2 Současný stav problematiky . . . . .   | 2         |
| 1.3 Cíle disertační práce . . . . .  | 3         |
| 1.4 Členění práce . . . . .  | 3         |
| <b>2 Vypínače na úrovních vn až zvn</b>  | <b>4</b>  |
| 2.1 Definice vypínače a jeho úloha v síti . . . . .                                | 4         |
| 2.2 Standardizace ve vysokonapěťové spínací technice . . . . .                     | 9         |
| 2.3 Technologie zhášení oblouku . . . . .  | 12        |
| 2.3.1 Vzduchové a tlakovzdušné vypínače . . . . .                                  | 13        |
| 2.3.2 Olejové a máloolejové vypínače . . . . .                                     | 14        |
| 2.3.3 Vakuové vypínače . . . . .   | 16        |
| 2.3.4 Tlakoplynové vypínače s plynem $SF_6$ . . . . .                              | 17        |
| 2.3.5 Tlakoplynové vypínače využívající alternativní směsi . . . . .               | 18        |
| 2.4 Princip tlakoplynových vypínačů s plynem $SF_6$ . . . . .                      | 25        |
| 2.5 Generátorové vypínače . . . . .  | 28        |
| <b>3 Vypínání zkratů a průběh vypínacího procesu</b>                               | <b>31</b> |
| 3.1 Vypínání symetrických a asymetrických zkratů . . . . .                         | 31        |
| 3.2 Základní časové intervaly vypínacího procesu . . . . .                         | 34        |
| 3.2.1 Silnoproudý interval . . . . .   | 34        |
| 3.2.2 Interakční interval . . . . .  | 35        |
| 3.2.3 Dielektrický interval . . . . .  | 36        |
| 3.2.4 Požadovaná vypínací schopnost v interakčním intervalu . . . . .              | 37        |
| 3.2.5 Porovnání intervalů z hlediska spolehlivosti a vypínací schopnosti . . . . . | 37        |
| 3.3 Vypínací interval . . . . .  | 38        |
| 3.4 Zotavené napětí . . . . .  | 39        |
| <b>4 Elektrický spínací oblouk</b>   | <b>50</b> |
| 4.1 Teoretický popis elektrického spínacího oblouku . . . . .                      | 50        |
| 4.1.1 Ionizační procesy v plynech . . . . .  | 50        |
| 4.1.2 Popis a kategorizace plazmatu obloukového sloupce . . . . .                  | 51        |
| 4.1.3 Stacionární a dynamický oblouk . . . . .                                     | 52        |
| 4.2 Metodika modelování spínacího oblouku . . . . .                                | 54        |
| 4.2.1 Obvodové black-box modely oblouku . . . . .                                  | 55        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.2.2    | Fyzikální modely oblouku . . . . .  | 59         |
| 4.3      | Realizované modely elektrického oblouku . . . . .   | 62         |
| 4.3.1    | Obvodové black-box modely v prostředí Simulink . . . . .                                  | 62         |
| <b>5</b> | <b>Generátorový zkrat</b>   | <b>70</b>  |
| 5.1      | Dohertyho zákon a zavedení Parkovy transformace . . . . .                                 | 70         |
| 5.2      | Třífázový zkrat na svorkách generátoru . . . . .  | 71         |
| 5.2.1    | Projevy statoru a rotoru a odvození analytického řešení . . . . .                         | 71         |
| 5.2.2    | Popis jednotlivých složek zkratového proudu . . . . .                                     | 74         |
| 5.3      | Namáhání generátorového vypínače při vypínání 3f zkratu na svorkách alternátoru . . . . . | 78         |
| 5.3.1    | Definice úlohy, postup a parametrické zadání . . . . .                                    | 78         |
| 5.3.2    | Vyhodnocení dílčích výsledků . . . . .  | 81         |
| 5.3.3    | Rozšířený analytický model . . . . .  | 86         |
| 5.3.4    | Shrnutí dílčích výsledků analytického modelu . . . . .                                    | 92         |
| <b>6</b> | <b>Modelování zkratů v sítích s alternátorem</b>  | <b>93</b>  |
| 6.1      | Metodika modelování částí a prvků elektrizační soustavy . . . . .                         | 93         |
| 6.2      | Zkrat na svorkách alternátoru . . . . .   | 96         |
| 6.3      | Zkrat na vyvedení výkonu z elektrárny . . . . .   | 99         |
| 6.4      | Zkrat v náhodném místě soustavy . . . . .   | 108        |
| 6.4.1    | Zkrat na konci vedení V4 . . . . .  | 108        |
| 6.4.2    | Zkrat na začátku vedení V4 . . . . .  | 110        |
| 6.4.3    | Zkrat na primární straně transformátoru T1.2 . . . . .                                    | 111        |
| 6.4.4    | Jednofázový zkrat na začátku vedení V4 . . . . .  | 111        |
| 6.5      | Vyhodnocení provedených modelů . . . . .  | 121        |
| <b>7</b> | <b>Hodnocení asymetrie zkratových proudů na základě posouzení matice soustavy</b>         | <b>122</b> |
| 7.1      | Metodika úlohy . . . . .  | 122        |
| 7.2      | Popis použitého software a výpočetního skriptu . . . . .                                  | 125        |
| 7.3      | Případové studie dílčích schémat . . . . .  | 126        |
| 7.3.1    | IEEE 14-Bus Case – síť se 14ti uzly . . . . .   | 126        |
| 7.3.2    | IEEE 30-Bus Case – síť se 30ti uzly . . . . .   | 128        |
| 7.3.3    | RTE 2848-Bus – Francouzská vn a vvn soustava s 2848 uzly . . . . .                        | 130        |
| 7.4      | Vyhodnocení dílčích výsledků . . . . .  | 131        |
| <b>8</b> | <b>Závěrečná část</b>   | <b>134</b> |
| 8.1      | Zhodnocení provedené práce a vlastní přínos . . . . .                                     | 134        |
| 8.2      | Směr dalšího zkoumání tématu . . . . .  | 135        |
| 8.3      | Seznam publikovaných prací . . . . .  | 136        |
|          | <b>Reference, použitá literatura</b>  | <b>139</b> |
|          | <b>Přílohy</b>  | <b>144</b> |
| <b>A</b> | <b>Skript pro výpočet namáhání vypínače při generátorových zkratech</b>                   | <b>144</b> |
| <b>B</b> | <b>Rozšířený model namáhání vypínače při generátorových zkratech</b>                      | <b>147</b> |
| <b>C</b> | <b>Skript pro analýzu impedanční matice soustavy</b>                                      | <b>151</b> |

# Seznam obrázků

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Klasifikace vypínačů . . . . .  | 4  |
| 2.2  | Příklad umístění vypínače v rozvodně . . . . .  | 5  |
| 2.3  | Historický nárůst vypínací schopnosti jedné zhášecí komory vypínače s plynem $SF_6$ . . . . .                               | 6  |
| 2.4  | Vypínače zvn s plynem $SF_6$ . . . . .  | 8  |
| 2.5  | Tlakovzdušný vypínač Škoda VVR 400 . . . . .  | 14 |
| 2.6  | Maloolejový vypínač Škoda VVM 110 . . . . .   | 15 |
| 2.7  | Zhášecí komora vakuového vypínače . . . . .   | 16 |
| 2.8  | Zařízení s alternativními plyny k $SF_6$ . . . . .  | 21 |
| 2.9  | Závislost přeskokového napětí na tlaku plynu – srovnání plynů 3M Novac 4710 . . . . .                                       | 22 |
| 2.12 | Disociační teploty plynů a jejich vliv na rozložení zón oblouku . . . . .   | 26 |
| 2.13 | Větev vyvedení výkonu z elektrárny a zapojení generátorového vypínače . . . . .   | 29 |
| 2.14 | Generátorové vypínače významných výrobců . . . . .  | 30 |
| 3.1  | Ilustrační porovnání symetrického a asymetrického průběhu zkratového proudu . . . . .                                       | 32 |
| 3.2  | Průběh asymetrického zkratového proudu s průběhem jednotlivých parametrů – %-ní ss. složkou a S-faktorem . . . . .          | 33 |
| 3.3  | Intervaly vypínacího procesu s detailem okolí proudové nuly . . . . .   | 35 |
| 3.4  | Časová posloupnost vypínacího procesu vypínače $SF_6$ . . . . .   | 38 |
| 3.5  | Náhradní obvody pro stanovení přechodné složky zotaveného napětí . . . . .  | 39 |
| 3.6  | Idealizovaný obvod vypínání kapacitních proudů . . . . .  | 41 |
| 3.7  | Průběhy proudu a napětí při idealizovaném vypínání kapacitních proudů . . . . .   | 41 |
| 3.8  | Reálný obvod vypínání kapacitních proudů . . . . .  | 42 |
| 3.9  | Průběhy proudu a napětí při reálném vypínání kapacitních proudů . . . . .   | 42 |
| 3.10 | Průraz v první amplitudě zotaveného napětí při vypínání kapacitních proudů . . . . .  | 43 |
| 3.11 | Obvod pro reprezentaci vypínání malých induktivních proudů . . . . .  | 44 |
| 3.12 | Průběhy proudu a napětí při vypínání malých induktivních proudů v přirozené proudové nule . . . . .                         | 44 |
| 3.13 | Průběhy proudu a napětí při vypínání malých induktivních proudů před přirozenou proudovou nulou . . . . .                   | 45 |
| 3.14 | Napětí a proud oblouku při vypínání malého indukčního proudu s opakovanými průrazy kontaktní dráhy . . . . .                | 46 |
| 3.15 | Průběh vypínání transformátoru naprázdno s opakovanými průrazy kontaktní dráhy . . . . .                                    | 46 |
| 3.16 | Průběh vypínání malých induktivních proudů s opakovanými průrazy kontaktní dráhy . . . . .                                  | 47 |
| 3.17 | Průběh napětí a proudu při vypínání induktivních proudů při uhasnutí oblouku v nule proudu a před proudovou nulou . . . . . | 48 |
| 4.1  | Stupeň disociace a ionizace a rozklad molekuly v závislosti na teplotě pro dusík $N_2$ . . . . .                            | 51 |
| 4.2  | Ilustrační znázornění obloukového sloupce s klíčovými parametry . . . . .   | 53 |
| 4.3  | Dynamický oblouk – ilustrace odezvy na skokovou změnu proudu . . . . .  | 54 |
| 4.4  | Schématiký postup při řešení modelu elektrického oblouku [45] . . . . .   | 60 |
| 4.5  | Závislost hustoty dusíku $N_2$ dle stavové rovnice ideálního plynu a reálného plynu [45] . . . . .                          | 61 |
| 4.6  | Schéma modelovaného obvodu . . . . .  | 62 |



|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.7  | Vnitřní schéma black-box modelu dle Cassieho . . . . .   | 63  |
| 4.8  | Vnitřní schéma black-box modelu dle Mayra . . . . .  | 63  |
| 4.9  | Vnitřní schéma black-box modelu dle Schavemakera . . . . .   | 64  |
| 4.10 | Vnitřní schéma black-box modelu dle Schwarze . . . . .   | 64  |
| 4.11 | Průběhy napětí a proudu Cassieho modelu pro různé hodnoty $U_{as}$ . . . . .   | 65  |
| 4.12 | Průběhy napětí a proudu Mayrova modelu pro různé hodnoty $P_d$ . . . . .   | 65  |
| 4.13 | Průběhy napětí a proudu Schavemakerova modelu pro různé hodnoty $\tau$ . . . . .   | 66  |
| 4.14 | Průběhy napětí a proudu Schwarzova modifikovaného modelu pro různé hodnoty $Const2$ . . . . .  | 66  |
| 4.15 | Schéma ukázkového modelu <i>power_arcmodels</i> v Simulink . . . . .   | 67  |
| 4.16 | Průběhy napětí a proudu Cassieho a Mayrova modelu – porovnání vlastních modelů s modelem <i>power_arcmodels</i> . . . . .                                | 68  |
| 5.1  | Náhradní schéma vinutí synchronních strojů v osách a, b, c, d, q . . . . .   | 70  |
| 5.2  | Přechodné složky způsobené stejnosměrnou složkou ve statoru . . . . .  | 73  |
| 5.3  | Přechodné složky způsobené stejnosměrnou složkou v rotoru . . . . .  | 74  |
| 5.4  | Průběh zkratového proudu v jedné fázi statorového vinutí . . . . .   | 75  |
| 5.5  | Jednotlivé složky generátorového zkratu . . . . .  | 76  |
| 5.6  | Průběhy zotavených napětí generátorového vypínače pro jednotlivé druhy zkratu . . . . .  | 80  |
| 5.7  | Odvozené závislosti mezi počáteční strmostí zotaveného napětí na velikosti vypínacího proudu, resp. na velikosti asymetrie dle úhlu $\alpha_0$ . . . . . | 80  |
| 5.8  | Vybraný průběh zkratového proudu s úhlem $\alpha_0 = 0^\circ$ – plně asymetrický zkrat . . . . .   | 81  |
| 5.9  | Vybraný průběh zkratového proudu s úhlem $\alpha_0 = 15^\circ$ . . . . .   | 81  |
| 5.10 | Namáhání vypínače v první proudové nule jako funkce úhlu $\alpha_0$ . . . . .  | 84  |
| 5.11 | Namáhání vypínače v první proudové nule jako funkce velikosti asymetrie . . . . .  | 84  |
| 5.12 | Výsledné porovnání namáhání vypínače jako funkce velikosti asymetrie zkratového proudu vzhledem k symetrickému zkratovému proudu . . . . .               | 85  |
| 5.13 | Spektrum zkratových proudů turboalternátoru s různou asymetrií . . . . .   | 86  |
| 5.14 | Spektrum zkratových proudů hydroalternátoru s různou asymetrií . . . . .   | 87  |
| 5.15 | Výsledky rozšířeného modelu – namáhání generátorového vypínače při vypínání v závislosti na okamžiku proudové nuly a velikosti asymetrie . . . . .       | 88  |
| 5.16 | Výsledky rozšířeného analytického modelu s provedením plošné 3D interpolace kubickým polynomem . . . . .   | 89  |
| 5.17 | Výsledky rozšířeného modelu ve 2D závislostech pro analýzu turboalternátoru . . . . .  | 90  |
| 5.18 | Výsledky rozšířeného modelu ve 2D závislostech pro analýzu hydroalternátoru . . . . .  | 91  |
| 6.1  | Přehled využitých bloků v jednotlivých modelech . . . . .  | 94  |
| 6.2  | Jednopolové schéma modelu č. 1 . . . . .   | 96  |
| 6.3  | Realizace modelu č. 1 v Simulinku . . . . .  | 96  |
| 6.4  | Průběh proudu ve vinutí modelovaných alternátorů při 3f zkratu na svorkách – symetrický průběh ve fázi A, vznik v čase 0,04515[s] . . . . .              | 98  |
| 6.5  | Průběh proudu ve vinutí modelovaných alternátorů při 3f zkratu na svorkách – asymetrický průběh ve fázi A, vznik v čase 0,04015 [s] . . . . .            | 98  |
| 6.6  | Jednopolové schéma modelu č. 2 . . . . .   | 99  |
| 6.7  | Realizace modelu č. 2 v Simulinku . . . . .  | 99  |
| 6.8  | Průběhy proudů při 3f zkratu na konci vedení V1 v čase 0,02 [s] . . . . .  | 101 |
| 6.9  | Průběhy proudů při 3f zkratu na konci zapouzdrěného vedení v čase 0,02167 [s] . . . . .  | 102 |
| 6.10 | Průběhy proudů při zkratu fáze A na konci vedení V1 v čase 0,02 [s] . . . . .  | 104 |
| 6.11 | Průběhy proudů při zkratu fáze A na konci vedení V1 v čase 0,02167 [s] . . . . .   | 104 |
| 6.12 | Průběhy proudů při zkratu fáze A na sekundární straně transformátoru T1 v čase 0,02 [s] . . . . .  | 105 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.13 Průběhy proudů při zkratu fáze A na sekundární straně transformátoru T1 v čase 0,02167 [s]             | 105 |
| 6.14 Průběhy proudů při zkratu fáze B na konci vedení V1 v čase 0,02 [s]                                    | 106 |
| 6.15 Průběhy proudů při zkratu fáze B na konci vedení V1 v čase 0,02167 [s]                                 | 106 |
| 6.16 Průběhy proudů při zkratu fáze B na sekundární straně transformátoru T1 v čase 0,02 [s]                | 107 |
| 6.17 Průběhy proudů při zkratu fáze B na sekundární straně transformátoru T1 v čase 0,02167 [s]             | 107 |
| 6.18 Jednopolové schéma modelu č. 3   | 108 |
| 6.19 Realizace modelu č. 3 v Simulinku  | 109 |
| 6.20 Průběhy měřených proudů při 3f zkratu v místě <i>a</i> – asymetrický průběh                            | 113 |
| 6.21 Průběhy proudů z generátorů při 3f zkratu v místě <i>a</i> – asymetrický průběh                        | 113 |
| 6.22 Průběhy měřených proudů při 3f zkratu v místě <i>a</i> – symetrický průběh                             | 114 |
| 6.23 Průběhy proudů z generátorů při 3f zkratu v místě <i>a</i> – symetrický průběh                         | 114 |
| 6.24 Průběhy měřených proudů při 3f zkratu v místě <i>b</i> – asymetrický průběh                            | 115 |
| 6.25 Průběhy proudů z generátorů při 3f zkratu v místě <i>b</i> – asymetrický průběh                        | 115 |
| 6.26 Průběhy měřených proudů při 3f zkratu v místě <i>b</i> – symetrický průběh                             | 116 |
| 6.27 Průběhy proudů z generátorů při 3f zkratu v místě <i>b</i> – symetrický průběh                         | 116 |
| 6.28 Průběhy měřených proudů při 3f zkratu v místě <i>c</i> – asymetrický průběh                            | 117 |
| 6.29 Průběhy proudů z generátorů při 3f zkratu v místě <i>c</i> – asymetrický průběh                        | 117 |
| 6.30 Průběhy měřených proudů při 3f zkratu v místě <i>c</i> – symetrický průběh                             | 118 |
| 6.31 Průběhy proudů z generátorů při 3f zkratu v místě <i>c</i> – symetrický průběh                         | 118 |
| 6.32 Průběhy měřených proudů při 1f zkratu v místě <i>b</i> – symetrický průběh                             | 119 |
| 6.33 Průběhy proudů z generátorů při 1f zkratu v místě <i>b</i> – symetrický průběh                         | 119 |
| 6.34 Průběhy měřených proudů při 1f zkratu v místě <i>b</i> – asymetrický průběh                            | 120 |
| 6.35 Průběhy proudů z generátorů při 1f zkratu v místě <i>b</i> – asymetrický průběh                        | 120 |
| 7.1 Ilustrační příklad obecné rozsáhlé sítě a znázornění náhradním Théveninovým obvodem s poruchou v uzlu 3 | 123 |
| 7.2 IEEE 14-Bus Case Network Diagram  | 126 |
| 7.3 Výsledky pro 14ti uzlovou síť   | 127 |
| 7.4 Průběhy zkratových proudů v jednotlivých uzlech 14ti uzlové sítě a jejich DC složky                     | 127 |
| 7.5 IEEE 30-Bus Case Network Diagram  | 128 |
| 7.6 Výsledky pro 30ti uzlovou síť   | 129 |
| 7.7 Průběhy zkratových proudů v jednotlivých uzlech 30ti uzlové sítě a jejich DC složky                     | 129 |
| 7.8 Výsledky pro síť RTE 2848-Bus   | 130 |
| 7.9 Průběhy zkratových proudů v jednotlivých uzlech 2848ti uzlové sítě a jejich DC složky                   | 132 |

# Seznam tabulek

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Struktura částí normy IEC 62271 dle zaměření . . . . .   | 9   |
| 2.2 | Rozdělení normy IEC 62271 na jednotlivé části . . . . .  | 10  |
| 2.3 | Přehled norem z řady C37 relevantních pro téma práce . . . . .   | 11  |
| 2.4 | Porovnání normativních ukazatelů pro vypínače nad 72,5 kV . . . . .                                      | 11  |
| 2.5 | Štítkové parametry vypínače LTB 72.5 AirPlus . . . . .   | 25  |
| 2.6 | Porovnání parametrů a požadavků na generátorové (GCB) a běžné distribuční vypínače (HVCB) [39] . . . . . | 30  |
| 3.1 | Přibližné počty poruch dle příčiny [42] . . . . .  | 31  |
| 3.2 | Časová posloupnost vypínacího procesu vypínače $SF_6$ . . . . .  | 38  |
| 3.3 | Hodnoty počáteční strmosti $u_{zn}$ pro různé hodnoty proudu $I_V = 40$ [kA] vypínače $SF_6$ . . . . .   | 39  |
| 5.1 | Přehled vlastností složek generátorového zkratu . . . . .  | 77  |
| 5.2 | Parametry zkoumaných alternátorů . . . . .   | 78  |
| 5.3 | Výsledné hodnoty analýzy turboalternátoru . . . . .  | 82  |
| 5.4 | Výsledné hodnoty analýzy hydroalternátoru . . . . .  | 83  |
| 6.1 | Intervaly mezi průchody proudu nulou . . . . .   | 97  |
| 6.2 | Parametry prvků pro model č. 2 . . . . .   | 100 |
| 6.3 | Srovnání dosažených výsledků pro model č. 2 . . . . .  | 101 |
| 6.4 | Parametry prvků modelované soustavy . . . . .  | 110 |
| 6.5 | Srovnání relevantních výsledků pro 1f zkrat na začátku vedení V4 . . . . .                               | 112 |

# Seznam symbolů a zkratk

|                  |  |
|------------------|--|
| 1f .....         | Jednofázový.   |
| 3f .....         | Třífázový.   |
| CFD .....        | Computational Fluid Dynamics. Výpočet proudění kontinua.   |
| CIGRE .....      | Conseil International des Grands Reseaux Électriques. Světová profesní asociace elektroinženýrů v přenosových sítích.            |
| CIREN .....      | Congres International des Réseaux Électriques de Distribution. Světová profesní asociace elektroinženýrů v distribučních sítích. |
| ČAS .....        | Česká agentura pro standardizaci.  |
| ČSN .....        | České státní normy.  |
| FEA .....        | Finite Element Analysis. Analýza metodou konečných prvků.  |
| GCB .....        | Generator circuit breaker. Generátorový vypínač.   |
| GIS .....        | Gas-insulated switchgears. Plynem izolované rozvaděče.   |
| GIL .....        | Gas-insulated line. Zapouzdřené vedení.  |
| GWP .....        | Global Warming Potential. Potenciál globálního oteplování, [-].  |
| HVCB .....       | High voltage circuit breaker. Vysokonapěťový vypínač.  |
| HVDC .....       | High voltage direct current. Vysokonapěťový rozvod stejnosměrného proudu.  |
| IEC .....        | International Electrotechnical Commission. Mezinárodní elektrotechnická komise.  |
| IEEE .....       | Institute of Electrical and Electronics Engineers. Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství.                     |
| IEV .....        | International Electrotechnical Vocabulary. Mezinárodní elektrotechnický slovník.   |
| IPCC .....       | Intergovernmental Panel On Climate Change. Mezivládní panel pro změny klimatu.   |
| ITI .....        | Interrupting time interval. Vypínací interval.   |
| mn .....         | Malé napětí.   |
| NCIT .....       | Non-conventional instrument transformer. Nekonenvenční řešení přístrojového transformátoru.                                      |
| nn .....         | Nízké napětí.  |
| ODP .....        | Ozone Depletion Potential. Potenciál tvorby ozonové díry, [-].   |
| RRRV .....       | Rate of rise of recovery voltage. Počáteční strmost zotaveného napětí, $[kV/s]$ .  |
| RTE .....        | Réseau de Transport d'électricité. Francouzský provozovatel přenosové soustavy.  |
| SGCC .....       | State Grid Corporation of China. Provozovatel čínské elektrizační soustavy.  |
| TRV .....        | Transient recovery voltage. Zotavené napětí, $[kV]$ .  |
| UNFCCC .....     | United Nations Framework Convention on Climate Change. Rámcová úmluva OSN o změně klimatu.                                       |
| ÚNMZ .....       | Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.   |
| vn .....         | Vysoké napětí.   |
| vvn .....        | Velmi vysoké napětí.   |
| zvn .....        | Zvláště vysoké napětí.   |
| $CO_2$ .....     | Oxid uhličitý.   |
| $N_2$ .....      | Dusík.   |
| $O_2$ .....      | Kyslík.  |
| $SF_6$ .....     | Fluorid sírový.  |
| $\vec{A}$ .....  | Vektorový magnetický potenciál, $[V \cdot s \cdot m^{-1}]$ .   |
| $E_i$ .....      | Vnitřní napětí stroje, $[V]$ .   |
| $\vec{J}$ .....  | Vektor proudové hustoty, $[A/m^2]$ .   |
| $h$ .....        | Entalpie média, $[J]$ .  |
| $i_a, i_A$ ..... | Proud tekoucí obloukem, případně proud ve fázi A, $[A]$ .  |

|                            |  |
|----------------------------|--|
| $i_{fault}$ .....          | Časový průběh poruchového proudu, [A].   |
| $i_p$ .....                | Nárazový zkratový proud, [A].  |
| $I_N$ .....                | Jmenovitý proud, [A].  |
| $I_V$ .....                | Vypínací zkratový proud, [A].  |
| $p \cdot d$ .....          | Součin tlaku a vzdálenosti kontaktů, argument v rámci Paschenova zákona, [Pa · m].                                     |
| $Q_i$ .....                | Namáhání vypínače při vypnutí v proudové nule, [MVA/μs <sup>2</sup> ].   |
| $Q_{TLV}$ .....            | Vypínací schopnost tlakovzdušných vypínačů, [MVA/μs <sup>2</sup> ].  |
| $S_V$ .....                | Vztažný výkon, [MVA].  |
| $t_0$ .....                | Čas průchodu proudu nulovou hodnotou, [s].   |
| $t_{inception}$ .....      | Čas simulace při vzniku zkratu, [s].   |
| $T_a$ .....                | Časová konstanta statorového vinutí, [s].  |
| $T_d, T'_d, T''_d$ .....   | Časová konstanta synchronní, přechodné a rázové složky v podélné ose stroje, [s].                                      |
| $T_q, T'_q, T''_q$ .....   | Časová konstanta synchronní, přechodné a rázové složky v příčné ose stroje, [s].                                       |
| $U_r, U_N$ .....           | Jmenovité napětí, [V].   |
| $U_v$ .....                | Vztažné napětí, [V].   |
| $u_{zn}$ .....             | Zotavené napětí, [V].  |
| $v$ .....                  | Rychlost proudícího média, [m · s <sup>-1</sup> ].   |
| $X/R$ .....                | Poměr mezi induktivní reaktancí a činným odporem v obvodu, [-].  |
| $x_d, x'_d, x''_d$ .....   | Ustálená, přechodná a rázová reaktance v podélné ose stroje, [p.u.].   |
| $x_q, x'_q, x''_q$ .....   | Ustálená, přechodná a rázová reaktance v příčné ose stroje, [p.u.].  |
| $Y_{bus}$ .....            | Admitanční matice soustavy.  |
| $Z_{bus}$ .....            | Impedanční matice soustavy.  |
| $Z_{i,i}$ .....            | Diagonální prvky impedanční matice.  |
| $\alpha_0$ .....           | Úhel natočení mezi osou rotoru a osou statorového vinutí, respektive velikost elektrického úhlu od proudové nuly, [°]. |
| $\gamma$ .....             | Elektrická vodivost, [S].  |
| $\Theta_d, \Theta_z$ ..... | Disociační teplota, zápalná teplota, [K].  |
| $\omega$ .....             | Úhlová frekvence, [rad · s <sup>-1</sup> ].  |
| $\Psi$ .....               | Sprážený magnetický tok, [Wb].   |
| $\rho$ .....               | Hustota proudícího média, [kg · m <sup>-3</sup> ].   |
| $\varphi$ .....            | Elektrický potenciál, [V].   |
| $\tau$ .....               | Časová konstanta, [s].   |

# 1 Úvodní část

## 1.1 Motivace k řešení tématu

Vývoj spínací techniky probíhal již od počátku elektrifikace souběžně s vývojem požadavků na vypínací parametry a s postupným zdokonalováním zhášecích technologií. Od zhášení natlakovaným vzduchem, přes využití oleje až po několik generací vypínačů využívajících plynu  $SF_6$  či vakuové techniky. Všechny tyto typy vypínačů byly navrhovány tak, aby reflektovaly aktuální požadavky pro úspěšné vypnutí za současné minimalizace investičních a provozních nákladů a zohlednění dalších kritérií. Zásadním kritériem vždy byla dostatečná vypínací schopnost na dané napěťové hladině. Současné moderní vypínače vyhovují požadavkům již po zhruba tři desetiletí.

Nicméně neustálý vývoj v oblasti provozu distribučních a přenosových soustav, změna charakteru a rozložení zdrojů centrální i distribuované výroby vede i ke změně a rozšíření spektra vypínacích parametrů a většího množství specifických aplikací. Zmíněné okolnosti mohou vést k selhání vypínače. Tuto skutečnost potvrzuje množství publikovaných prací na mezinárodních a národních konferencích i mnohé informace od odborníků z distribučních, přenosových a výrobních společností. Na mnoha konferencích i v kuloárních diskusích zaznívá skutečnost, že jsou vypínače v posledních letech zatěžovány více než dříve a množství operací dnes patří mezi obtížné vypínací disciplíny.

Do popředí zájmu se tak dostává časová závislost vypínací schopnosti, konkrétně udržení dostatečné vypínací schopnosti v delších časových intervalech tak, aby byl dostatek zhášecí energie po maximální možné dobu, během níž může dojít k uhasnutí oblouku. Téma práce tak může být vedeno dvěma hlavními směry – jednak je to identifikace spektra vypínacích parametrů v jednotlivých místech soustavy v závislosti na aktivních i pasivních parametrech, ve druhém směru je to pak bližší analýza vypínacího procesu vypínače, principu zhášení a aplikace případných modifikací, jak zajistit dostatečnou vypínací schopnost v daném čase. K tématu jsou dále vázány další dílčí oblasti jako např. modifikace v systému chránění, asset management, matematické pravděpodobnostní modelování možných stavů, ekonomické posouzení, údržba apod.

Selhání vypínače, tedy prvku s nejvyšší vypínací schopností v soustavě, je zcela ojedinělý stav. Soubor jednotlivých událostí tak obsahuje velmi malý počet případů, u nichž je velmi složité dostat se ke konkrétním informacím, co vedlo k daným událostem. Zároveň je však platný ten fakt, že nedostatečná vypínací schopnost končí kompletní destrukcí vypínače, což ohrožuje nejen přilehlá zařízení a vede k finančním ztrátám, ale i zdraví a bezpečnost pracovníků. Z toho důvodu je vhodné vynaložit veškeré úsilí k tomu, aby byla pravděpodobnost těchto stavů zcela minimalizována. Řešení tématu je tak z tohoto pohledu žádoucí a aktuální.

K motivaci k řešení tohoto tématu ještě nutno dodat, že se problematice mimořádných spínacích dějů věnují soustavně již od bakalářského stupně studia. Navzdory tomu, že se jedná o poměrně dlouhé časové období, jde o téma, které se po celou dobu organicky vyvíjelo a rozšiřovalo o další souvislosti a odlišné přístupy přesahující oblast konvenční elektroenergetiky, což téma vhodně doplňovalo a tvořilo tak zajímavý a poutavý celek.

## 1.2 Současný stav problematiky

Téma vypínací schopnosti bylo vždy poměrně aktuální v souvislosti s objevováním nových a lepších způsobů vypínání. Vždy se ale jednalo o velikost vypínací schopnosti, tedy o nárůst vypínacích zkratových proudů na vyšších napěťových hladinách. Nicméně téma vypínací schopnosti v souvislosti s její časovou závislostí a případy narušeného vypínání se objevuje teprve v nedávných letech až desetiletích.

První zmínka o neúspěšném vypnutí asymetrického zkratu se objevuje v článku [1], který popisuje namáhání a následné selhání vypínače pracujícího v blokové rozvodně brazilsko-paraguayské vodní elektrárny Itaipú včetně provedených testů na vypínači s plynem  $SF_6$  společnosti Siemens v laboratořích holandského KEMA institutu. Závěr diskutuje kritická uspořádání sítě se závislostí na pasivních parametrech alternátorů ovlivňujících zejména poměr  $X/R$  v jednotlivých místech sítě. O poznání novější je zdroj [2], který diskutuje právě vliv poměru  $X/R$  na namáhání vypínače, zároveň hodnotí namáhání generátorového vypínače v závislosti na požadavcích kladených normami [8, 9] a zda těmto normám zmíněné generátorové vypínače vyhovují.

Prvotní problém z elektrárny Itaipú byl impulzem i pro kanadskou společnost Hydro-Québec, která se v publikaci [3] věnuje problematice oddálené proudové nuly na příkladu vypínání dlouhých, sériově kompenzovaných vedení. Publikace uvádí množství měřených a zkoušených případů, kdy vypínací proud byl zcela nad vodorovnou osou po dobu několika period.

Výše zmíněné články publikované na světových konferencích IEEE se opírají o současný stav problematiky na poli standardizace. Významnou normu tvoří standard IEC 62271-100 (zdroj [6]), který definuje požadavky na vysokonapěťové vypínače střídavého proudu. Zásadní normou je též balík IEEE C37 (zejména zdroje [7] až [9]), tvořící rozsáhlý popis požadavků na návrh, provoz a údržbu vysokonapěťových vypínačů v souvislosti s vypínáním symetrických a nesymetrických zkratů. Blíže bude problematika standardizace popsána v Kapitole 2.2.

O aktuálnosti tématu u předních světových výrobců vypínací techniky svědčí i dostupné materiály [4, 5], které ve formě aplikačních příruček v dostatečně srozumitelné míře představují zásadní problémy spojené s vypínáním asymetrických zkratů či požadavky na generátorové vypínače. Tématu je věnována pozornost i u asijských výrobců, jak ukazuje zdroj [10], který zmiňuje provedené numerické výpočty proudění plynu  $SF_6$  při vypínání asymetrických zkratů.

V oblasti světových profesních asociací má problematika časové závislosti vypínací schopnosti pozornost zejména v CIGRE, kde se studijní komise A3 (Zařízení vvn a zvn) kontinuálně věnuje problematice vypínací schopnosti v závislosti na charakteru sítě, což dokazují zdroje [11] až [13]. Historicky pak při CIGRE byla založena i pracovní skupina *Current Zero Club*, volně přeloženo tedy jako "*klub proudové nuly*". Obecně jde o skupinu odborníků řešící problematiku úspěšného vypnutí vypínače nejen v okamžiku proudové nuly, ale i v rámci sítí HVDC. Tato skupina měla historicky poměrně velký význam, nicméně v současné době jsou její aktivity opět spíše integrovány do aktivit samotné skupiny CIGRE A3. V rámci profesní asociace CIPRED nejsou zaznamenány žádné zřejmé aktivity v problematice oddálených proudových nul, což ale může být odůvodněno zaměřením této asociace spíše do distribučních soustav nízkého a vysokého napětí, které se vyznačují jinými specifiky, kdy důraz je kladen na provozní vlastnosti sítí a kvalitu dodávaných elektroenergetických služeb.

Je tedy zřejmé, že uvedená problematika je globálně aktuálním tématem jak na poli provozovatelů sítí, tak i výrobců produktů pro elektroenergetiku, akademickou sféru i relevantní standardizační a vědecko-výzkumné subjekty.

### 1.3 Cíle disertační práce

Název disertační práce *Nestandardní případy vypínání zkratů – interakce elektrických a mechanických dějů* je tématicky poměrně široký a abstraktní a může obsahem znatelně převyšovat požadavky na disertační práci. Je tedy žádoucí adekvátně definovat rozsah a cíle této práce.

Cílem disertační práce je představit odborné veřejnosti problematiku časové závislosti vypínací schopnosti, na analýze výskytu zkratových proudů s oddálenou proudovou nulou ilustrovat problematiku narušeného vypínání, lokalizovat a typově definovat nejohroženější místa v elektrizační soustavě a navrhnout dílčí protipatření týkající se principu zhášení oblouku, jak zamezit selháním vypínačů. Téma práce oslovuje jak výrobce spínacích přístrojů, jimž může přispět v oblasti spolehlivosti a kvality vlastních produktů, tak i provozovatele přenosových a distribučních soustav, pro něž je kritická bezporuchovost jednotlivých přístrojů ke spolehlivému a bezpečnému přenosu či distribuci. Téma rovněž oslovuje i širší akademickou obec, jež může přispět teoretickým či aplikovaným výzkumem k dalšímu řešení tématu.

Protože se způsob zhášení spínacího oblouku v distribuci, kde jsou téměř výhradně nasazeny vakuové vypínače, a v přenosu, kde mají zřejmou dominanci vypínače s plynem  $SF_6$ , liší, je disertační práce zaměřena zejména na druhou kategorii – tedy na tlakoplynové vypínače s  $SF_6$ , jejichž aplikace je nejčastější na napěťových úrovních 110 kV a výše. Tyto vypínače jsou též nasazovány jako generátorové vypínače ve větvích vyvedení výkonu z elektráren.

Je však vhodné zmínit, že nestandardním případům vypínání a problematice vypínací schopnosti je možné se věnovat i v dalších směrech, jako je např. vývoj nových zhášecích technologií, problematika vypínání malých kapacitních či induktivních proudů, či celosvětově velmi perspektivní oblast vypínání v HVDC soustavách s využitím hybridních vypínačů. Všechny tyto směry byly částečně analyzovány v průběhu doktorského studia, což je doloženo seznamem publikací v závěrečné části této práce. Pro udržení konzistence této práce a jejího rozsahu však byl kladen důraz zejména na analýzu výskytu oddálených proudových nul a problematiku s tím spojenou.

### 1.4 Členění práce

První kapitola práce obsahuje ucelený pohled na funkci vypínače v elektrizační soustavě. Důraz je kladen na historický vývoj jednotlivých způsobů zhášení oblouku a jejich vliv na vypínací schopnost, dále na standardizaci a míru zohlednění nestandardních provozních stavů v celosvětových normách. Kapitola vyúsťuje v popisu a specifikách generátorových vypínačů.

Další kapitola pak podrobně popisuje celý proces vypínání v obvodu a to jak z pohledu vypínače, tak z pohledu sítě. Na to navazuje Kapitola 4 popisem oblouku jakožto zásadním průvodním jevu ovlivňující spínací proces. Kapitola obsahuje i vlastní vyhotovené modely oblouku.

Kapitola 5 pak obsahuje vlastní analýzu namáhání vypínače při generátorových zkratech ve dvou úrovních komplexnosti modelu a diskutuje zásadní problémy spojené s vypínáním generátorových zkratů a aplikací generátorových vypínačů. Na to navazuje podrobná analýza několika typů sítí založená na vlastních vyhotovených modelech v Kapitole 6. Vlastní provedené studie pak završuje Kapitola 7, která představuje nástroj pro hodnocení nebezpečí oddálených proudových nul na základě vyhodnocení impedanční matice soustavy.



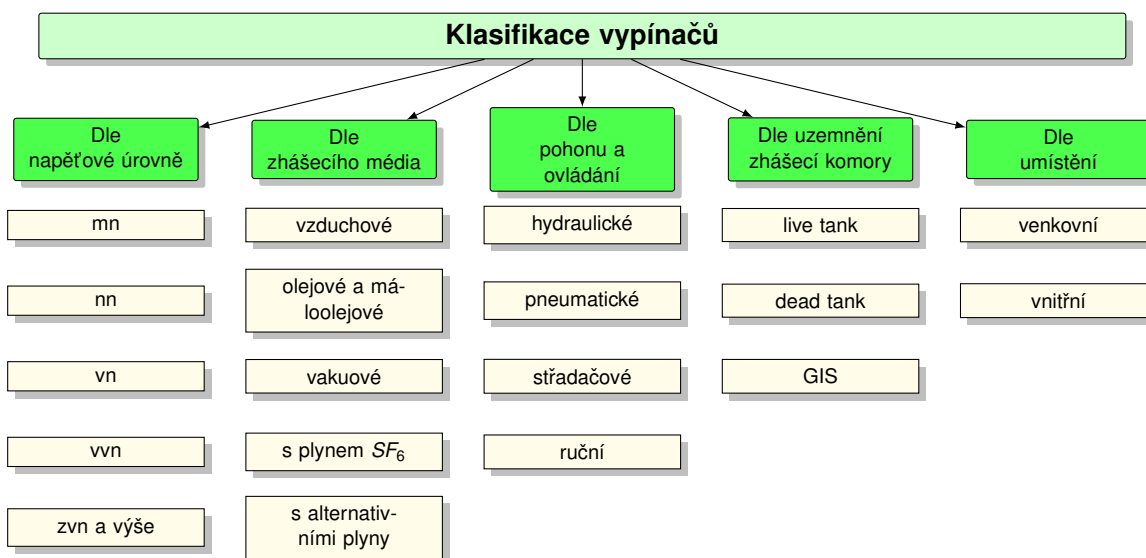
## 2 Vypínače na úrovních vn až zvn

### 2.1 Definice vypínače a jeho úloha v síti

Vypínačem v kontextu elektroenergetických systémů vysokého napětí rozumíme spínací elektrický přístroj, jehož primární funkcí je zapínat a vypínat elektrický obvod při běžných provozních stavech i za mimořádných podmínek. Tím tvoří nepostradatelnou součást k zajištění bezpečnosti a říditelnosti elektroenergetických soustav a ochrany dalších částí soustavy a rozvodných zařízení. Při vzniku poruchy (např. zkratu) musí vypínače rychle odpojit postiženou část soustavy a ochránit tak stabilitu energetického systému a minimalizovat negativní působení vzniklého zkratu na okolí (např. vliv na bezpečnost osob a majetku). Vypínač se zároveň používá ke změně konfigurace soustavy za běžných provozních podmínek, např. provozní propojování vývodů, připojování kompenzačních zařízení, rekonfigurace sítě atp.

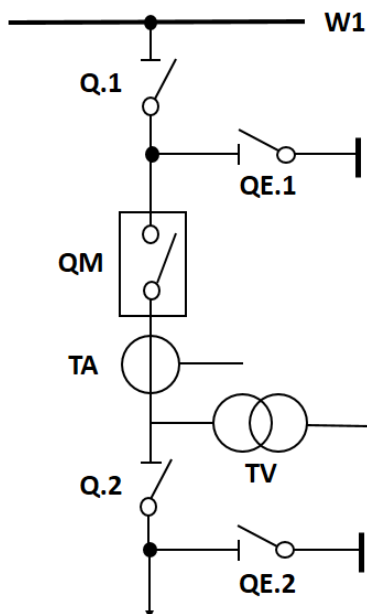
Vypínače jsou tedy prvky s nejvyšší vypínací schopností a jsou schopné spínat běžné provozní, jmenovité i zkratové proudy. Tím se vypínače zásadně liší od dalších spínacích či jističích přístrojů v elektroenergetických soustavách, které mají zásadně nižší vypínací schopnost, obvykle související s funkcí konkrétního přístroje (jako jsou např. odpojovače, odpínače či reclosery). Tímto způsobem, tedy jako zařízení v elektroenergetické soustavě s maximální vypínací schopností, buď vypínač chápán v celém následujícím textu.

Je však možné a vhodné upozornit na možnou záměnu, kdy pojmem *vypínač* je označen jakýkoliv prvek určený pro spínání obvodů napříč napěťovými hladinami. Totéž platí i v anglickém jazyce, kdy výraz *circuit breaker* je obvykle v překladu zaměňován místy za jistič a místy za jakékoliv obecné spínací zařízení. Pro vypínače, tak jak jsou popsány v tomto odstavci, existuje množství kritérií, dle kterých je možné je klasifikovat. To je uvedeno na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Klasifikace vypínačů

Příklad zapojení vypínače v přenosové či distribuční síti je uveden na Obr. 2.2, který znázorňuje typickou odbočku z rozvodny.



**Obr. 2.2:** Příklad umístění vypínače v rozvodně (QM - vypínač, Q - odpojovače, QE - uzemňovače, W1 - přípojnice, TA - přístrojový transformátor proudu, TV - přístrojový transformátor napětí)

Z obrázku je patrný význam vypínače jakožto jediného prvku s plnou vypínací schopností a chránící množství dalších zařízení.

Mezinárodní elektrotechnická komise (IEC) definuje vypínač jako *mechanické spínací zařízení schopné zapínat, přenášet a vypínat elektrický proud za normálních podmínek a též zapínat, přenášet po určený čas a vypínat elektrický proud při určených abnormálních stavech, jako jsou např. zkratky.*

Mezi základní požadavky kladené na vypínače patří:

1. V sepnutém stavu musí být dobrým vodičem schopným přenášet provozní i zkratové proudy, a to jak termicky, tak i mechanicky.
2. V rozepnutém stavu musí být vynikajícím izolátorem schopným vydržet namáhání napětím proti zemi, napětími mezi póly i napětím mezi kontakty.
3. Při sepnutém stavu mohou rychle a bez abnormálních přepětí vypnout zkratový či nižší proud.
4. Při rozepnutém stavu dokáží spínat rychle a bezpečně zkratové či nižší proudy bez nadměrné eroze kontaktů.

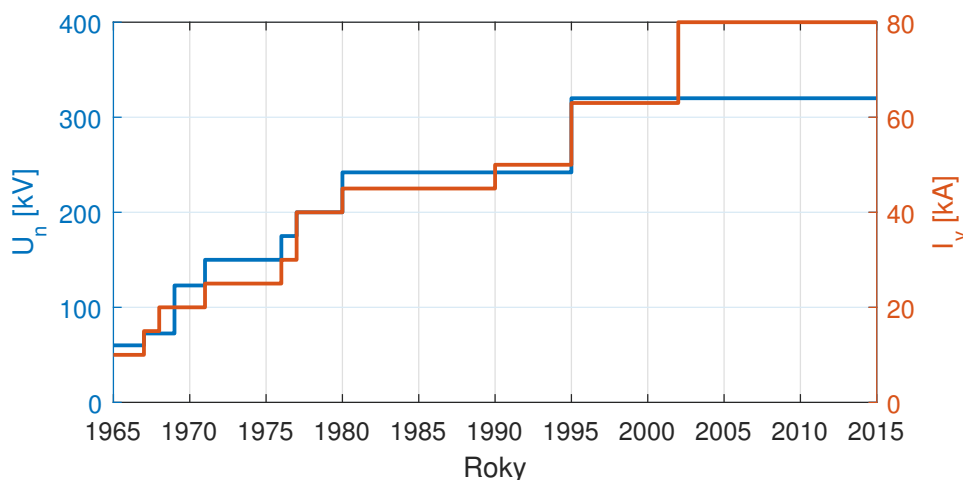
Některé z těchto požadavků mohou vést k vzájemně protichůdným konstrukčním uspořádáním či opatřením a tudíž vývoj vypínačů zahrnuje překonání množství obtíží a výzev, ale v souvislosti s neustálým vývojem v oblasti provozu nových zdrojů energie a provozu rozvodných sítí pak tvoří zajímavou a vyzývající činnost jak z teoretického, tak i praktického hlediska.

Volba konkrétního vypínače pak závisí na mnoha specifikách jak z hlediska vlastností sítě a soustavy, kam je vypínač umístěn, tak i z hlediska nabízeného portfolia a celého spektra kritérií

posuzovaného vypínače. Volba pak probíhá plně v korelaci se specifiky provozu soustav a zvyklostmi v jejich operabilitě. Vzhledem k tomu, že vypínače jsou prvky s nejvyšší vypínací schopností v soustavě a plní tak jistící a ochrannou funkci, je nutné zvolit adekvátní přístroj pro danou aplikaci, tedy vzít v úvahu např. způsob uzemnění uzlu sítě, očekávanou četnost spínání, očekávané vypínané jmenovité i zkratové proudy, charakter zátěže a spínaného zařízení, přepětové děje, klimatické podmínky, způsob údržby atp.

Principiálním a funkčním jádrem všech vypínačů napříč napěťovými hladinami je zhášecí komora, která definuje celkovou technicko-ekonomickou úroveň vypínače. Právě ve zhášecí komoře dochází k uhašení oblouku a přerušení proudu. Během vypínacího procesu probíhají v komoře složité multifyzikální a chemické procesy, které jsou analyticky mnohdy za hranicí řešitelnosti a díky své komplexnosti (velké gradienty teplot a tlaků, kombinovaný přenos energie, rozklad složitých molekul, ablace atp.) jsou velmi obtížně počitatelné a díky technologickým nárokům na konstrukci zhášecí komory jsou tyto děje i velmi obtížně měřitelné. Uplatňuje se zde tedy současná aplikace poznatků z mnoha oborů jako je fyzika plazmatu, termodynamika a termomechanika, elektromagnetické pole, kinematika atd. Korektní analýza vypínacího pochodu je tak nezbytnou podmínkou pro další vývoj a optimalizaci vypínačů. [16]

Že se jedná o velmi aktuální problematiku s kontinuálním vývojem dokazuje Obr. 2.3, který ukazuje nárůst vypínací schopnosti v rámci jmenovitého napětí a vypínaného proudu pro jednu zhášecí komoru vypínače s plynem  $SF_6$ , což jsou aktuálně nejrozšířenější zhášecí komory vypínačů v přenosových a distribučních sítích.



**Obr. 2.3:** Historický nárůst vypínací schopnosti jedné zhášecí komory vypínače s plynem  $SF_6$

Komplexnost návrhu vypínače jakožto celkového zařízení pak ještě prohlubují související části jako jsou pouzdro zhášecí komory a její uzemnění, pohon, paralelní kondenzátory, paralelní rezistory či měřicí a řídicí jednotka. Společnost Siemens ve zdroji [17] udává, že díky konzistentním požadavkům ze strany zákazníků, garantují modulární řešení vypínačů na úrovních 72,5 až 800 kV složené z těchto základních částí, a to pro provedení jak vzduchem, tak plynem izolovaných vypínačů:

- zhášecí komora,
- pohonná jednotka,
- pouzdro komory a uzemnění,

- ovládací tyč (táhlo),
- měřící a řídicí prvky.

Z Obr. 2.2 je patrný význam vypínače a dalších přístrojů. Tento význam koreluje s konzistentním vývojem v uplynulých desetiletích, nicméně v souvislosti s kontinuálním vývojem a inovativními přístupy jednotlivých výrobců lze zaznamenat mírnou distorzi významu jednotlivých přístrojů, kdy např. společnost ABB realizuje tzv. *disconnecting circuit breakers*, tedy vypínače s integrovaným odpojovačem, některá provedení odpojovačů obsahují i uzemňovač, některá provedení vypínačů integrují přístrojové transformátory přímo na přívodní svorky atp. Těmito přístupy se tak přístroje rozšiřují o další funkcionality, což může zneprůhledňovat problematiku návrhu a provozu, nicméně základním požadavkem na vypínače za všech okolností zůstává maximální vypínací schopnost pro všechny navrhované případy. Na druhou stranu však portfolio významných výrobců a dodavatelů pro energetiku bývá harmonizované, což umožňuje provozovatelům pořídit komplexní řešení celého systému od jednotlivých komponent jednotlivých přístrojů až po celé objekty rozveden.

V oboru spínací techniky na vyšších napěťových úrovních se v dnešní době soustřeďuje globální výzkum na řešení problematiky ve třech oblastech:

- teoretický a experimentální výzkum spínacího procesu,
- výzkum závislostí vypínací schopnosti na konstrukčních vlastnostech zhášecích komor,
- definice vypínací schopnosti vypínače ve vztahu k parametrům sítě.

V první oblasti jsou činnosti zaměřeny na získání nových poznatků a popis jevů ve stacionárním a dynamickém režimu hoření oblouku. Experimentální výzkum je soustřeďován na měření fyzikálních vlastností oblouku, složení a teploty plazma oblouku, gradientů napětí a rozložení elektrostatického a proudového pole a vlastností rychlostního pole proudícího média. Okrajové podmínky těchto výzkumů jsou neustále ovlivňovány vývojem a aplikací nových zhášecích médií.

Ve druhé oblasti byly práce soustřeďovány především na experimentální výzkum a vyhodnocování velkého množství laboratorních testů a zkoušek. Vývoj výpočetní techniky a výpočetních metod v uplynulých dekádách ale přinesl nové možnosti ve výpočtu a v modelování fyzikálních polí. Lze tak vytvářet složité propojené modely založené na reálném systému a tím výrazně omezit časově i finančně nákladnou fázi experimentů.

Třetí oblast, souvislosti vypínací schopnosti vypínače a parametrů sítě, je založena na správném zpracování poznatků z obou předchozích oblastí a v současné době adekvátně osvojena díky množství vývojových i uživatelských zkušeností s provozem a aplikací vypínačů. Obecně jsou tyto souvislosti zhodnoceny jen v limitních charakteristikách vypínačů, kdy se základním parametrům jmenovitého napětí a jmenovitého vypínaného proudu přiřadí sada vybraných parametrů tak, aby byla statisticky respektována zotavená napětí, vypínané proudy a spínací disciplíny, k nimž může dojít. Jedná se však o historický způsob, který je nyní eliminován díky množstvím uživatelských a provozních zkušeností, které byly mezinárodními komisemi (např. CIGRE a IEEE) implementovány do mezinárodních standardů a vypínací schopnost tak zaznamenala podstatný vývoj, na jejímž konci splňuje podmínky většiny typických aplikací. [15, 16, 22]

I tato oblast ale vykazuje kontinuální vývoj spolu s plynulým vývojem v provozu elektroenergetických sítí.



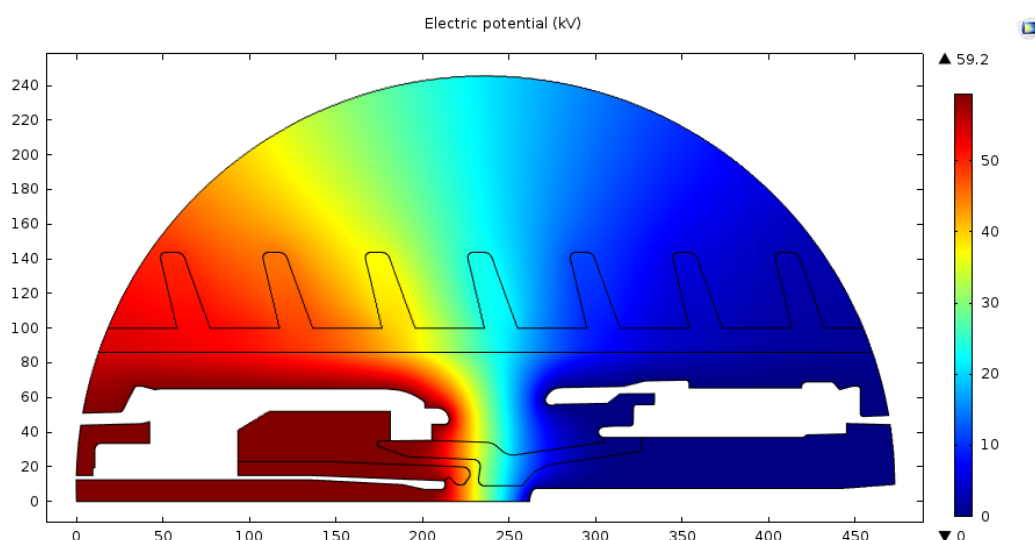
(a) Typ live tank, Siemens 3AP2 FI 420 kV [23]



(b) Typ dead tank, Siemens 3AP2 DT 550 kV [23]



(c) Zhášecí komora v řezu



(d) Výpočet rozložení elektrického potenciálu ve zhášecí komoře v programu COMSOL Multiphysics

Obr. 2.4: Vypínače zvn s plynem  $SF_6$

## 2.2 Standardizace ve vysokonapěťové spínací technice

Stejně tak jako v nepřeberném množství různých odvětví plní standardizace a normalizace svůj úkol, nejinak je tomu i v případě návrhu a provozu vysokonapěťové spínací techniky, kde jsou zcela zásadní dva soubory norem, které budou popsány v této kapitole. Jejich primárním úkolem je, aby přístroje spolehlivě a bezpečně plnily svoji funkci. Sekundárním cílem pak je zajistit unifikaci jednotlivých druhů přístrojů tak, aby byly vzájemně harmonizované a do určité míry zaměnitelné.

V oblasti celosvětové normalizace vysokonapěťové spínací techniky je nejpodstatnější balík norem s označením IEC 62271. Ta spadá do kompetence Mezinárodní elektrotechnické komise (The International Electrotechnical Commission – IEC). Jedná se o komisi sdružující přes 170 zemí s globálním dosahem pokrývajícím přes 99 % světové populace. Členy IEC jsou národní výbory jmenující odborníky a delegáty z oblasti průmyslu, vládních orgánů a akademických obcí, aby se podíleli na technických a dozorčích pracích. Jednou ze stěžejních prací IEC je příprava a vydávání platných norem pro elektrotechnický průmysl, do nichž spadá i norma IEC 62271.

Zmíněný balík norem má název *High-voltage switchgear and controlgear*, tedy *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení* a obsahuje množství částí pro adekvátní podchycení celého segmentu. Za přípravu a vydávání této normy zodpovídají subkomise SC 17A a SC 17C. Rozdělení normy na jednotlivé části a rozdělení odpovědnosti subkomisí reprezentuje Tab. 2.1.

**Tab. 2.1:** Struktura částí normy IEC 62271 dle zaměření

|                  | Část    | Obsah                | Zodpovědné subkomise |
|------------------|---------|----------------------|----------------------|
| <b>IEC 62271</b> | 1-99    | Obecná ustanovení    | 17A + 17C            |
|                  | 100-199 | Spínací zařízení     | 17A                  |
|                  | 200-299 | Instalace rozvaděčů  | 17C                  |
|                  | 300-399 | Pokyny, reporty atd. | 17A + 17C            |

Jedná se o číselné rozdělení mezi jednotlivé stovky z důvodu přehlednosti a možnosti rozšiřování o další součásti. Kompletní seznam jednotlivých součástí a jejich číselného označení je uveden jako Tab. 2.2.

V kontextu této práce je nejpodstatnější část normy s číselným označením -100, tedy *Vypínače střídavého proudu na napětí nad 1000 V*.

České normy již po celosvětové harmonizaci nesou stejné číselné označení, tedy konkrétně norma IEC 62271-100 existuje též v české mutaci celého balíku s označením ČSN EN 62271. Ta částečně zastupovala dřívější platnou normu ČSN 35 4220, která však byla v září roku 2004 zrušena a v současné době platí jen norma ČSN EN 62271-100. V České republice spadá standardizace a normalizace do kompetence ÚNMZ a ČAS.

Norma IEC 62271-100 se v mnoha kapitolách odkazuje na ustanovení společná pro veškeré spínací a řídicí zařízení v elektroenergetice, tedy na IEC 62271-1. Shodné číselné označení platí i pro části normy ČSN EN 62271 s tím, že norma pro společné ustanovení ČSN EN 62271-1 nahradila v roce 2011 normu ČSN 35 4205. Část se společným ustanovením definuje veškeré základní popisné parametry zařízení a názvosloví v souvislosti s mezinárodním elektrotechnickým slovníkem (IEV – International Electrotechnical Vocabulary), definuje prostředí pro umístění vypínačů a přehled základních prováděných zkoušek. Naproti tomu část -100 se již specializuje přímo na vypínače, a to na celý cyklus od výroby, testování, skladování, transport, uvádění do provozu, období provozu a pravidelné údržby, až po jejich demontáž a likvidaci.

**Tab. 2.2:** Rozdělení normy IEC 62271 na jednotlivé části

| Část | Název části   |
|------|---|
| -1   | Společná ustanovení   |
| -100 | Vypínače střídavého proudu na napětí nad 1000 V   |
| -101 | Syntetické zkoušky  |
| -102 | Vysokonapěťové odpojovače a uzemňovače pro střídavé sítě  |
| -103 | Spínače pro jmenovitá napětí od 1 kV do 52 kV   |
| -104 | Vysokonapěťové spínače pro jmenovitá napětí nad 52 kV   |
| -105 | Vysokonapěťové kombinace spínačů s pojistkami   |
| -106 | Vysokonapěťové stykače a stykačové spouštěče motoru   |
| -200 | Kovově kryté rozvaděče na střídavý proud pro jmenovitá napětí od 1 kV do 52 kV  |
| -201 | Izolačně kryté rozvaděče na střídavý proud pro jmenovitá napětí do 52 kV  |
| -202 | Blokové transformovny vn a nn   |
| -203 | Plynem izolované kovově kryté rozvaděče pro jmenovitá napětí 72,5 kV a vyšší  |
| -204 | Pevná vysokonapěťová přenosová vedení pro jmenovitá napětí 72,5 kV a vyšší  |
| -300 | Návod na hodnocení seismické odolnosti  |
| -301 | Pokyny pro spínání indukivní zátěže   |
| -302 | Návod na provádění zkratových a spínacích zkoušek kovově krytých vypínačů a vypínačů s uzemněnou nádobou                  |
| -303 | Manipulace s fluoridem sírovým (SF <sub>6</sub> ) a jeho použití ve vysokonapěťových spínacích a řídicích zařízeních      |
| -304 | Doplňující požadavky pro rozvaděče pro jmenovitá napětí od 1 kV do 72,5 kV pro použití do ztížených klimatických podmínek |
| -305 | Kabelové koncovky pro plynem izolované kovově kryté rozvaděče pro jmenovitá napětí nad 52 kV                              |
| -306 | Přímé spojení mezi výkonovými transformátory a plynem izolovanými kovově krytými rozvaděči pro jmenovitá napětí nad 52 kV |
| -307 | Použití elektronických a souvisejících technologií v pomocných zařízeních spínacích a řídicích zařízeních                 |
| -308 | Pokyny pro zkušební sled T100a vypínání nesouměrného zkratového proudu  |

Dalším důležitým subjektem na poli standardizace je i IEEE, neboli Mezinárodní institut elektrotechnických a elektronických inženýrů (The Institute of Electrical and Electronics Engineers). Jedná se o neziskovou profesní organizaci zabývající se publikováním vědeckých článků, pořádáním odborných setkání a konferencí, spolupracemi na vzdělávacích programech a vydáváním norem. To má na starosti IEEE SA (IEEE Standards Association), která stojí i za normami řady C37. Řada C37 má několik desítek součástí v poměrně širokém spektru od relé pro nízké napětí až po elektrické stanice velmi vysokého napětí. V Tab. 2.3 je uveden seznam těch nejpodstatnějších norem, týkajících se problematiky této práce.

Vzájemným porovnáním obou standardů lze dojít k diskusi podobností a rozdílností. Na první pohled patrným a nikoliv ryze technickým rozdílem je složení a struktura obou balíků – zatímco celý balík IEC 62271 působí rozsáhle a uceleně a je složený jen z několika málo částí, přičemž každá z nich má poměrně velký rozsah, balík C37 je o poznání rozmanitější a ne zcela přehledný. To je způsobeno velkým množstvím částí (každá spíše menšího rozsahu) zahrnujících široké spektrum aplikací. Další, tentokrát technické rozdíly v technologickém návrhu vypínačů, lze vysledovat v návrhových hodnotách jmenovitých proudů a napětí a zkušebních napětí. Též v oblasti jmenovité frekvence – C37 řeší jen vypínače v sítích s běžnou frekvencí 50 Hz či 60 Hz, IEC 62271 však za-

**Tab. 2.3:** Přehled norem z řady C37 relevantních pro téma práce

| Část    | Název části   |
|---------|---|
| C37.06  | Výkonové vypínače hodnocené na základě symetrického proudu – doporučené hodnoty a požadované vlastnosti |
| C37.09  | Testovací postupy pro výkonové vypínače hodnocené na základě symetrického proudu                        |
| C37.10  | Návod na použití výkonových vypínačů hodnocených na základě symetrického proudu                         |
| C37.012 | Návod pro aplikaci při spínání kapacitních proudů pro AC vysokonapěťové vypínače                        |
| C37.013 | Norma pro generátorové vypínače na základě symetrického proudu  |
| C37.100 | Obecné požadavky pro spínací zařízení nad 1 kV  |

hrnuje i vypínače pro soustavy o frekvencích 16,66 Hz a 25 Hz. To je primárně cíleno na vypínače používané v trakčních sítích a speciálních průmyslových či důlních soustavách. Dalšími ze zajímavých rozdílů mohou být rozdílná předepsaná doba trvání zkratu, rozdílné jmenovité sledy spínání (či jejich variace), v návaznosti na jmenovitý proud pak např. dovolené oteplení jednotlivých částí vypínače. Zde se jeví C37 jako konzervativnější. Zajímavě též vychází porovnání obou norem pro posouzení přístupu k jednotlivým mimořádným případům vypínání, jako je např. hodnocení vypínání kapacitních proudů, vypínání zkratů s vysokou strmostí zotaveného napětí či předpokládané časové konstanty stejnosměrné složky při testování vypínání asymetrických proudů. To je pro tuto práci pochopitelně velice důležitý aspekt, který ale problematiku narušeného vypínání reprezentuje v normách jako jediný. Přehled klíčových parametrů a dalších zajímavých rozdílů mezi jednotlivými normami je uveden v Tab. 2.4. Detailnější pohled na porovnání obou norem mohou poskytnout zdroje [24, 25].

**Tab. 2.4:** Porovnání normativních ukazatelů pro vypínače nad 72,5 kV

| Parametr                                     | IEC 62271   | IEEE C37   |
|--|---|--|
| Napětí $U_r$ (kV)                            | 72,5; 100; 123; 145; 170; 245; 300; 362; 420; 550; 800                                    |  |
| Frekvence $f$ (Hz)                           | 16,66; 25; 50; 60   | 50; 60   |
| Jmenovitý proud $I_r$ (kA)                   | Renardova řada R10 <sup>1</sup>   | Renardova řada R10;<br>volitelně i 600; 1200; 2000; 3000 A |
| Jmenovitý zkratový proud $I_k$ (A)           | Renardova řada R10  |  |
| Jmenovitý dynamický výdržný proud $I_p$ (kA) | 2,5 · $I_k$ pro soustavy s $f=50$ Hz<br>2,6 · $I_k$ pro soustavy s $f=60$ Hz <sup>2</sup> |  |
| Doba trvání zkratu $t_k$ (s)                 | 1 (volitelně 0,5 a 2)   | 2 (volitelně 0,5; 1 a 3)                                   |
| Jmenovitý sled spínání                       | O–0,3s–CO–3min–CO<br>povolené další variace režimů O–t–CO–t–CO či CO–t–CO                 | O–15s–CO–3min–CO   |
| Min. počet operací                           | Třída M1: 2 000 cyklů<br>Třída M2: 10 000 cyklů   | 1 500 až 10 000 cyklů                                      |
| Časová konstanta DC složky                   | 45ms<br>60ms (pro 72,5-420 kV)<br>75ms (pro 550 kV a výše)                                | 45ms <sup>3</sup>  |

<sup>1</sup>Řada R10 obsahuje čísla 1-1,25-1,6-2-2,5-3,15-4-5-6,3-8 a jejich násobky 10<sup>n</sup>

<sup>2</sup>V závislosti na charakteristických hodnotách soustavy mohou být požadovány hodnoty vyšší než 2,5 či 2,6 násobek jmenovitého zkratového proudu

<sup>3</sup>Standardizováno na 45ms, obsahuje další specifikace pro generátorové vypínače



Je možné zmínit, že požadavky kladené na vypínače v rámci IEEE jsou většinou shodné s požadavky IEC, případně je drobně rozšiřují tak, že dávají výrobcům více možností pro design vypínačů a provozovatelům více možností pro provoz a údržbu. To může být způsobeno podstatně větším zapojením výrobců a uživatelů v komisích a na jednáních IEEE, oproti jejich o poznání slabšímu zapojení v IEC.

I na poli standardizace dochází k plynulému vývoji. V současné době je tak aktuální v budoucích dodatcích plánované zahrnutí a respektování specifik na hladině ultra vysokého napětí, změna v požadavcích na elektromagnetickou kompatibilitu v závislosti na požadavcích CENELEC, harmonizace obou zmíněných norem (tedy IEC 62271 a IEEE C37), či další změny v oblasti typových testů. [26]

## 2.3 Technologie zhášení oblouku

Základní funkcí vypínače je provádět spínací operace v elektroenergetických systémech za jakýchkoliv možných podmínek. V tomto směru se nijak neliší od jiných elektrických přístrojů, se kterými se lze setkat na každodenní úrovni a které nesou stejné názvosloví. Nicméně zásadní rozdíly při použití výkonových vysokonapěťových vypínačů, o nichž pojednává tato práce, jsou ve velikosti proudu a napětí, jež jsou významně vyšší, a v co nejkratších časech jednotlivých operací.

Termínem *spínací operace* je obecně míněn obousměrný přechod mezi vodivým a izolačním stavem mezi dvěma body v daném obvodu. Kromě účasti elektrického oblouku, jakožto prostředku při vypínání, lze uvažovat některé další fyzikální principy jako vhodné obvodové prvky k přerušení proudu, např. využití polovodičů (změna vodivosti řízením elektronů v pevné látce). Polovodiče jakožto součást spínacích elektrických přístrojů nyní nacházejí široké uplatnění v tzv. hybridních vypínačích pro sítě HVDC.

Zásadním faktorem ovlivňujícím spínání ve střídavých obvodech je účast elektrického oblouku. Ten vzniká jako důsledek zákona zachování energie, který v podobě pro střídavé obvody říká, že proud tekoucí prvkem induktivního charakteru nemůže změnit svoji hodnotu okamžitě a v případě vynucené vnější změny je nutná jeho spojitost. Nutná spojitost procházejícího proudu pak vede k vytvoření elektrického spínacího oblouku, který tak tvoří kritickou součást ovlivňující návrh vypínače. Bližší popis elektrického oblouku je uveden v Kapitole 4.

Současné vypínače uplatňují jako princip funkčnosti řízené snížení teploty a vodivosti plasma oblouku, dokud nedojde k jeho rozrušení a zániku. Oblouk zde figuruje jako obvodový prvek při změně mezi vodivým a izolačním stavem. Historicky první nasazované vypínače však nepřistupovaly primárně k nakládání s plasmatem oblouku. Při rozpojení dvou částí vodiče za účelem přerušení proudu vznikne elektrický oblouk; vypínání proudu znamenalo co nejrychlejší uhašení tohoto oblouku. Tyto dvě činnosti byly považovány za synonyma. Nicméně v rámci spojitého a co nejrychlejšího přechodu mezi vodivým a izolačním stavem, obloukový výboj má mnohé žádané vlastnosti a spínání velkých proudů na vysokých napětích je tedy vhodné pouze za účasti obloukového výboje. Tyto vlastnosti plasmatu obloukového výboje a tedy i průběh vypínání je spojen s izolačním materiálem a způsobem, jakým je ve zhášecí komoře vypínače zajištěno řízené snižování teploty obloukového sloupce. Proto je zhášecí komora nejdůležitějším prvkem v celém návrhu vypínače. V následující části je tedy stručné představení technologií využívaných ke zhášení oblouku a přerušení proudu s uvážením historického vývoje v oblasti vývoje problematiky spínání a izolačních materiálů. [19, 20]

### 2.3.1 Vzduchové a tlakovzdušné vypínače

Principiálně a konstrukčně nejjednodušším způsobem spínání a zhášení oblouku je volně ve vzduchu, což je pro reálné aplikace limitováno na úzký rozsah elektrických parametrů, a proto ke spínání volně ve vzduchu dochází jen ve kontaktních přístrojích na úrovních nízkého napětí. Z toho důvodu se pro použití na vyšších napěťových hladinách přešlo k využití natlakovaného proudu vzduchu a vývoji tlakovzdušných vypínačů.

Tlakovzdušné vypínače jsou se svým principem zhášení spínacího oblouku jedny z nejstarších. Prouděním natlakovaného vzduchu s tlakem v kompresní komoře 2 až 6 [MPa] dochází k intenzivnímu chlazení oblouku a tedy narušení obloukového sloupce a následné zhasnutí.

Mezi největší výhody tlakovzdušných vypínačů patří:

- rychlé reakční časy díky rychlosti proudícího plynu,
- dostupnost zhášecího média (vzduchu),
- možnost sériového řazení komor,
- vysoká vypínací schopnost v interakčním intervalu.

Naopak zásadní nevýhody pak tvoří:

- omezené trvání vypínací schopnosti,
- přidružené technologie tlakového vzduchu (kompresory, těsnost, prostorové požadavky),
- vysoké strmosti zotaveného napětí,
- akustické jevy při vypínání.

Hodnoty a průběhy elektrických a mechanických veličin při spínání jsou závislé na provedení zhášecích komor. Ty se vyvíjely ve třech směrech. Prvním byl vypínač *s otevřenými zhášedly*, kde k hašení docházelo tlakovým vzduchem, ale ve volném otevřeném prostoru. Oblouk tak musel být uhašen již během proudění vzduchu. Některé vypínače s otevřenými zhášedly byly vybaveny zařízením pro otáčivý pohyb izolátoru nesoucího roubík a izolátoru nesoucího zhášecí trysku; tím bylo docíleno vyšší rychlosti při vypínání. Zhášení zde probíhalo ve dvou fázích. Nejprve byl od sebe oddalován pevný a pohyblivý kontakt, jehož dutinou začal proudit tlakový vzduch díky zmenšování prostoru pod pracovním pístem tohoto kontaktu. V této fázi je tlak proudícího vzduchu ovlivněn zahlcením trysky elektrickým obloukem. Tím je regulována vypínací schopnost v první fázi vypínání. Po ukončení pohybu kontaktů je zcela otevřena cesta natlakovanému vzduchu, jehož muselo být dostatek pro úspěšné vypnutí.

Dalším typem byly vypínače *s uzavřenou zhášecí komorou s porcelánovým pláštěm*. Jejich zhášecí komorám se říkalo *impulsové*, protože po úspěšném vypnutí se kontakty vracely zpět do zapnutého stavu. Z toho důvodu musely být vybaveny rozpojovačem, což byla část vypínače, která zajišťovala trvale rozepnutý stav. Tlakovým vzduchem se nejprve naplnil prostor zhášedla, který potom zapůsobil na pohyblivý kontakt a tím došlo k pohybu kontaktů. Po rozpojení kontaktů začal vzduch proudit mezi tryskami a přírubami zhášedla, odkud vzduch proudil do volného ovzduší. Po ukončení proudění došlo k odvzdušnění prostoru a pružiny vracely kontakty zpět do výchozí zapnuté polohy. Třetím typem byly vypínače *se zhášecí komorou s kovovým pláštěm*, které byly nazývány *průchodkové*. Ty byly velice podobné předchozímu typu, ale zhášecí komory byly pod trvalým přetlakem, díky čemuž byla zajištěna vyšší vypínací schopnost už od začátku vypínání.

Vypínací schopnost tlakovzdušných vypínačů je sice rozdílná u jednotlivých provedení, ale je silně vázána na proudící vzduch. Obecně je jejich vypínací schopnost popsitelná vztahem 2.1, kde  $v$  udává rychlost proudění vzduchu,  $\rho$  udává hustotu a  $h$  značí entalpii proudícího média.

$$Q_{TLV} \approx v \cdot \rho \cdot h \quad (2.1)$$

Po ukončení proudění tedy vypínací schopnost okamžitě klesá k nulové hodnotě. Pro úspěšné vypnutí musí být při vypínání zajištěna podmínka dostatečné vypínací schopnosti. Tlakovzdušné vypínače byly první, u kterých se objevil problém s vypínáním asymetrických zkratových proudů. Vychýlením průběhu nad časovou osu dojde k prodloužení intervalů mezi průchody proudu nulou. Tlakovzdušné vypínače však historicky měly konstrukčně daný vypínací interval na zhruba 10 [ms], během nichž bylo zaručeno proudění vzduchu a vypínač obvykle vypnul. Díky větším asymetriím pak bylo kritické vypínání v mezních oblastech vypínacího intervalu, kdy byl zásobník tlakového vzduchu vyčerpán a vypínač nevypnul (oblouk zhasl až po selektivním zapůsobení nadřazeného spínacího prvku). Zajištění déletrvající vypínací schopnosti vedlo k udržení proudění vzduchu po delší dobu. S tím je však spojena i velikost tlakové nádoby, nároky na kompresory a údržbu, což podstatně zvýšilo cenu a rozměry vypínače. Rovněž akustické projevy natlakovaného vzduchu při vypínání byly patrnou nevýhodou v nasazení tlakovzdušných vypínačů poblíž hustších aglomerací. Tlakovzdušný vypínač je uveden na Obr. 2.5, na němž je v dolní části patrný zásobník tlakového vzduchu a jeho prostorové nároky.



**Obr. 2.5:** Tlakovzdušný vypínač Škoda VVR 400

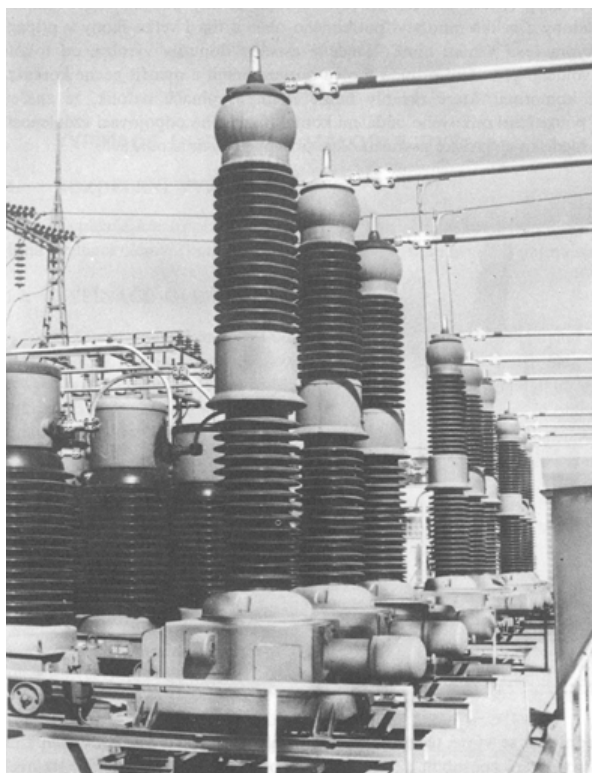
V současné době již vývoj tlakovzdušných vypínačů neprobíhá a jejich nasazení v elektrizační soustavě je téměř nulové. Pro aplikace v přenosových a distribučních sítích byla technologie tlakového vzduchu postupně vytlačena technologií plynu  $SF_6$ , který našel plošné uplatnění v celém segmentu elektroenergetiky. Technologie natlakovaného vzduchu pro vypínání se však stále místy používá v trakčních aplikacích, např. na starších lokomotivách.

### 2.3.2 Olejové a máloolejové vypínače

Vypínače využívající oleje lze charakterizovat jako vypínače s vlastní zhašecí energií, protože jejich činnost je založena na tepelném rozkladu oleje způsobeným hořícím obloukem. Nejčastěji

používaným médiem je minerální olej, který figuruje jak ke zhášení oblouku, tak i k izolaci proudové dráhy proti zemi.

Prvním typem olejových vypínačů byly tzv. *kotlové vypínače*, které se skládaly z nádoby v podobě kotlového tvaru s víkem, skrz něž byly v průchodkách izolačně uloženy přívody pevných a pohyblivých kontaktů. Oblouk zde hořel volně v oleji a konstrukčně kotlové vypínače vedly k velkým zdvihům pohyblivého kontaktu. To vedlo k velkým rozměrům nádoby, velkému množství oleje a tedy i vysoké škody s následky pro okolí při případném selhání a explozi vypínače. Tyto aspekty přiměly výrobce opatřit kontaktní ústrojí zhášecími komorami a tím zmenšit zdvih kontaktů a množství oleje. To vedlo k vývoji *máloolejových vypínačů*, které našly široké uplatnění již v počátcích elektrifikace. Oproti kotlovým vypínačům je u nich podstatně menší nebezpečí pro okolí v případě selhání a destruktivní havárie vypínače, rovněž mají výhodu ve snazší dopravě a manipulaci s olejem při revizích či opravách. Další předností budiž malá závislost vypínací schopnosti na strmosti zotaveného napětí a z toho vyplývající schopnosti vypínání blízkých zkratů bez nutnosti použití tlumících paralelních rezistorů. Výhodná je rovněž spolehlivost při vypínání malých induktivních proudů, kdy díky stabilnímu hoření oblouku v oleji dochází k uhasnutí přesně v okamžiku proudové nuly.



**Obr. 2.6:** Máloolejový vypínač Škoda VVM 110

Máloolejový vypínač 110 [kV] se jmenovitým vypínacím proudem 18,4 [kA] je uveden na Obr. 2.6. Konstrukčně je patrná horní část, která obsahuje výfukový prostor pro expanzi plynů a olejových par po vypnutí (kulovitý tvar na vrchu vypínače), pevný kontakt, pevnou zhášecí komoru a v sepnutém stavu i pohyblivý kontakt. Při spínací operaci vlivem tlaku obloukových plynů dochází k vtlačování oleje do zhášecí komory a ochlazování oblouku. Spodní polovina plní funkci podpěrné části tvořící izolaci vůči zemi. Vespod vypínače je podvozkový rám s obvykle pneumatickým pohonem a pohonným pákovým mechanismem. Konkrétní způsob a architektura zhášecích komor

se u jednotlivých výrobců mírně odlišovala, např. francouzský Alstom vybavil zhášedla pomocným vstříkem čerstvého oleje do mezikontaktního prostoru pro omezení průrazů při vypínání malých kapacitních proudů.

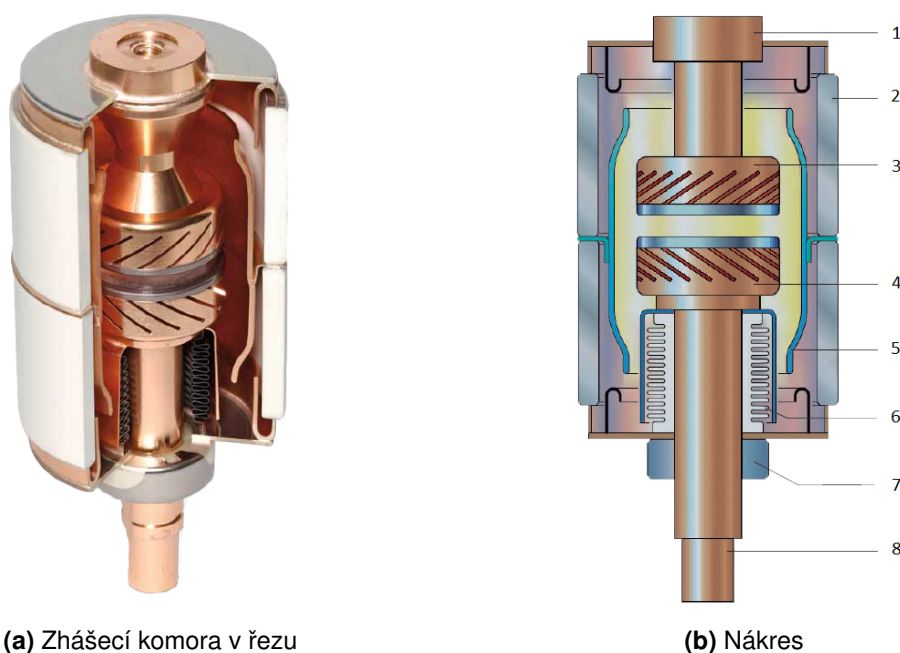
Vývoj máloolejových vypínačů je dnes již zastaven. Máloolejové vypínače jsou dnes v provozu v zemích se starší energetickou infrastrukturou. Ve vysokonapěťové spínací technice je oleje též případně využíváno v dalších vybraných aplikacích, např. u úsečnickových odpojovačů či jako výsuvné vypínače v kobkách či rozvaděčových skříních rozveden vn. Nasazení máloolejových vypínačů v distribučních soustavách, dříve celoplošné, je dnes již rovněž minimalizováno díky masivnímu rozvoji vakuových vypínačů.

### 2.3.3 Vakuové vypínače

Vakuové vypínače jsou v současné době nepoužívanějším a nejmasivněji nasazovaným typem vypínačů instalovaných v distribučních sítích vysokého napětí, též patří mezi nejmodernější. Princip vypínání a vypínací schopnost je úzce spjata se specifiky a vlastnostmi oblouku hořícího ve vakuu, který se zřetelně liší od oblouku hořícího ve zhášecím médiu, jímž je ochlazován.

Funkčnost a princip vakuových vypínačů jsou založeny na absenci vodivých částic v mezikontaktním prostoru a rozptýlení oblouku působením vlastních elektrodynamických sil a konstrukčními prvky v oblasti kontaktů. Z hlediska dielektrických a izolačních vlastností principiálně spadá v rámci Paschenovy křivky do oblasti nízkých hodnot součinu  $p \cdot d$ , na rozdíl od tlakovzdušných či tlakoplynových vypínačů pracujících v oblasti vysokých hodnot součinu  $p \cdot d$ .

Zhášecí komora vakuového vypínače je zobrazena na Obr. 2.7.



**Obr. 2.7:** Zhášecí komora vakuového vypínače (1 - svorka pevného kontaktu, 2 - izolátorové pouzdro, 3 - pevný kontakt, 4 - pohyblivý kontakt, 5 - UV stínění, 6 - vlnovec, 7 - vodící ložisko, 8 - připojení pohyblivého kontaktu) [28, 29]

Vakuum s tlakem  $10^{-4}$  až  $10^{-6}$  [Pa] obsahuje jen velmi málo vodivých částí a chová se tak jako izolant a prostředí se téměř neionizuje. Oddálením kontaktů při vypínání vznikne mrak kovových par odpařených ze stykové plochy kontaktů, tento mrak se následně ionizuje a zapálí se tak

elektrický oblouk. Při proudech menších, než je jmenovitý vypínací proud (obvykle do velikost cca 10 [kA]) hoří oblouk v tzv. *difúzním módu*, což je oblouk, který hoří s probíhajícími elementárními procesy, oblouk na anodě zabírá téměř celou plochu kontaktů. Při proudech nad 10 [kA] dojde ke zúžení anodové skvrny na poměrně malou plochu. Při dalším zvyšování proudu až k hodnotám jmenovitého vypínacího zkratového proudu přechází oblouk z difúzního módu do vysokotlaké podoby, kdy dojde i ke zúžení katodové skvrny a oblouk hoří v podobném režimu jako v případě tlakovzdušných či tlakoplynových vypínačů. Díky konstrukčním úpravám a díky vlastním elektrodynamickým silám pak dochází k rotaci oblouku a jeho ochlazování a zároveň rovnoměrnějšímu tepelnému zatěžování elektrod.

Velkou výhodou vakuových vypínačů je vysoká elektrická pevnost vakua, což zdatelně minimalizuje přeskokovou vzdálenost (zdvih kontaktů vakuových vypínačů se pohybuje v řádech desítek milimetrů), díky malému úbytku napětí na oblouku ve vakuu též není třeba velká zhášecí energie. Na rozdíl od jiných vypínačů zde rovněž nedochází k vyfukování izolačního média či ionizovaných plynů či k jeho degradaci. Na druhou stranu však vakuové vypínače mají i funkcionální nevýhody – vysoká vypínací schopnost s okamžitým nárůstem obvykle vede k "utrnutí" proudu mimo proudovou nulu. Předčasné vypnutí tak vede k nebezpečným přepětím. Tento fakt tvoří zásadní problém při nasazování vakuových vypínačů do dnešních distribučních soustav, vypínač je pak nutné vybavovat doplňkovými prvky pro omezení spínacích přepětíových vln. Další nevýhodou je nemožnost zapojování zhášecích komor do série, čehož je obvykle využíváno u tlakoplynových vypínačů. Vakuové vypínače jsou technologicky velice náročné na výrobu z důvodu vysokých nároků na čistotu kontaktních materiálů a prvků zhášecí komory, složitá je též technologie udržení dostatečně kvalitního vakua. Nároky na výrobu jsou však vyváženy jednoduchou a minimální potřebnou údržbou a vysokou životností.

Díky nemožnosti spojování vakuových zhášedel do série a díky tendencím pro hledání vhodné alternativy k plynu  $SF_6$ , o nichž bude řeč dále v práci, probíhal velice rychlý vývoj a vakuových zhášedel začalo být využíváno i na úrovních nad 72,5 [kV], což byla donedávna horní hranice pro aplikaci vakuových vypínačů. V průběhu roku 2017 však byly realizovány první pilotní projekty s nasazením nových vakuových vypínačů společnosti Siemens pro sítě 123 kV a 145 kV v Německu, Švýcarsku a v Polsku. Tyto vypínače nesoucí označení 3AV1-145kV navazují na úspěšnou řadu konvenčních tlakoplynových vypínačů 3AP1. Nejen podobnost v označení, ale i konstrukční vlastnosti napovídají, že technické parametry obou řad budou podobné, tedy i nové vypínače 3AV1 budou dostupným pro jmenovitý proud až 3150 [A] a jmenovitý vypínací proud až 40 [kA]. Pozitivní vlastností zhášecích komor je i skutečnost, že není třeba řešit zkapalňování zhášecího média při teplotách pod  $-30 [^{\circ}C]$ , vypínače tedy garantují širší rozsah provozních teplot od  $-60 [^{\circ}C]$  do  $+55 [^{\circ}C]$  bez omezení provozních parametrů či nutnosti vyhřívání či míchání médií. Je zde tedy patrná snaha výrobce o vývoj dvou ekvivalentních vypínačů (z pohledu vnějších technických parametrů).

### 2.3.4 Tlakoplynové vypínače s plynem $SF_6$

Vzhledem k tomu, že těžiště této disertační práce je zejména problematika vypínacího procesu a vypínací schopnosti v distribučních a přenosových soustavách, kde jsou v současné době primárně a téměř výhradně nasazovány vypínače s plynem  $SF_6$ , je tak vhodné vysvětlit vypínací proces a způsob hašení oblouku s adekvátní důsledností právě pro tento typ. To bude provedeno v samostatné Kapitole 2.4.

### 2.3.5 Tlakoplynové vypínače využívající alternativní směsi

#### Legislativní rámec pro omezení vlivu plynu $SF_6$ v energetice

Z předchozích kapitol, historického vývoje ve spínací technice na úrovních od vn výše a z přehledu osvojených praktik provozovatelů přenosových a distribučních soustav je možné usoudit, že plyn  $SF_6$  zaujímá neotřesitelný monopol jakožto zhašecí a izolační médium ve vypínačích a zařízeních pro energetiku. Největší nevýhodou plynu  $SF_6$  je však jeho vliv na životní prostředí. Fluorid sírový byl totiž Kjótskými protokoly identifikován jako silný skleníkový plyn s potenciálem globálního oteplování (GWP) zhruba 23.000 a byly přijaty kroky pro omezení jeho vypouštění volně do atmosféry a jeho použití bylo zakázáno v téměř všech oblastech, kde byla nalezena adekvátní alternativa. A protože neustále vzrůstající nároky na parametry, efektivitu, spolehlivost a hospodárnost zařízení v současné době zahrnují i požadavky na ochranu životního prostředí, segment elektroenergetiky nezůstává stranou a v uplynulé dekádě mnoho předních světových výrobců věnovalo zásadní pozornost vývoji nových směsí s technickými vlastnostmi podobnými plynu  $SF_6$  s minimalizovaným dopadem na životní prostředí.

Původní motivace vychází již z Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu (UNFCCC), respektive ze 4. hodnotící zprávy Mezinárodního panelu pro změnu klimatu (IPCC), kde bylo stanoveno, že členské země by měly pro zpomalení globálního nárůstu teploty na 2 [K] snížit emise skleníkových plynů o 80-95 % oproti úrovním z roku 1990. Ke splnění těchto cílů pak byl v roce 2012 schválen Evropskou unií *Plán přechodu na konkurenceschopné nízkouhlíkové hospodářství do r. 2050*, který stanovil cíle pro jednotlivé odvětví. Nejzásadnější dopady na výrobu a provoz vypínačů vvn pak má *Nařízení evropského parlamentu a rady (EU) č. 517/2014*, které se věnuje použití fluorovaných skleníkových plynů a kterému se v souvislosti s hledáním alternativních izolačních a zhašecích médií v rámci evropských zvyklostí a s potřebou účinnějších a ekologičtějších zařízení pro dekarbonizaci energetických odvětví vžil termín *ecodesign*. [30]

Nařízení č. 517/2014 stanovuje pokračující směr pro odpovědné používání plynu  $SF_6$  k dosažení evropských cílů týkajících se ochrany klimatu a energetické účinnosti. Původní nařízení č. 842/2006, které nahradilo, byť obsahově v mnohých aspektech spíše doplnilo a rozšířilo nařízení č. 517/2014, obsahovalo návrh úplného zákazu používání  $SF_6$  v některých rozvaděčích vysokého napětí. Tento návrh s úplným zákazem nakonec do nového nařízení zahrnut nebyl. Bezpečnosti a stabilitě dodávek elektrické energie tak byl prozatím ponechán ze strany orgánů Evropské unie větší význam, než drastickému omezování či kompletnímu zákazu používání fluorovaných skleníkových plynů v elektroenergetice. Jednoznačně tím však byl vydán signál k intenzivnímu úsilí v oblasti výzkumu a vývoje alternativ k plynu  $SF_6$ . Již pro rok 2020 je stanoveno opětovné přezkoumání alternativ k plynu  $SF_6$  pro použití v rozvaděčích vvn sekundární distribuce. Nařízení samotné se týká všech energetických zařízení s plynem  $SF_6$  všech napětí.

Na rozdíl od jiných aplikací fluorovaných skleníkových plynů (jako např. tlaková úprava hořčíku, chladírenské a klimatizační zařízení) prozatím v elektroenergetice nedošlo k omezení jejich používání, v souvislosti s používáním  $SF_6$  však byla přijata či rozšířena technická, provozní, monitorovací a evidenční opatření pro úspěšnou měřitelnost a ověřitelnost dosažení stanovených cílů. Některá zpřísněná opatření v rámci nařízení č. 517/2014 jsou následující:

- Článek 3 předepisuje provozovatelům zařízení, které obsahují fluorované skleníkové plyny, přijmout jakákoliv technicky dostupná preventivní opatření, aby zabránili jejich neúmyslnému vypouštění a přijmout všechna technicky i ekonomicky proveditelná opatření za účelem minimalizace úniků. Článek 3 dále provozovatele zavazuje k okamžité nápravě jakýchkoliv úniků.

- Článek 4 je zaměřen na náležitosti kontroly těsnosti, přičemž rozvaděče elektrické energie jsou vyjmuty z povinnosti sledování přístroji pro kontrolu těsnosti, pokud splňují alespoň jednu z podmínek:

- prověřené úniky plynu menší než 0,1% ročně, nebo
- jsou již vybaveny přístroji pro kontrolu tlaku nebo hustoty, nebo
- obsahují méně než 6 [kg] plynu  $SF_6$ .

V praxi toto splňuje většina rozvaděčů vysokého i velmi vysokého napětí.

- Článek 5 však nezávisle na článku 4 stanovuje, že všechny rozvaděče s obsahem  $SF_6$  přes 22 [kg] instalované po 1.1.2017 je nutno vybavit systémem pro sledování úniku plynu v každém případě. K tomu už ale dochází v rámci běžné praxe.
- Článek 6 předepisuje povinnost vést a uchovávat záznamy o kontrolách pro zařízení, pro něž jsou předepisovány kontroly dle Článku 3.
- Článek 10 diskutuje způsobilost a certifikaci osob manipulujících s  $SF_6$ .
- Článek 12 definuje povinnost výrobců rozvaděčů uvádět na štítku hodnoty obsaženého plynu  $SF_6$  i jeho ekvivalentu  $CO_2$ .
- Článek 19 pak stanovuje povinnost výrobců, dovozců a vývozců plynu  $SF_6$  při zpracování více než 100 tun ekvivalentu  $CO_2$  (cca 4,4 [kg]  $SF_6$ ) podávat každoročně zprávy Evropské komisi o množství a využívání  $SF_6$ . Tato povinnost odpadá, pokud byl plyn zakoupen či prodán subjektu spadajícímu do členského státu unie, také provozovatelé rozvaděčů musí hlásit pouze množství plynu dovážejícího na území EU.
- Článek 25 předepisuje členským státům stanovit pravidla pro ukládání sankcí za porušení tohoto nařízení a přijmout opatření nezbytná k uplatnění těchto sankcí. V rámci České republiky jsou tyto sankce specifikovány v Zákoně č. 89/2017 Sb. (jde o novelu Zákona č. 72/2012 Sb.). V rámci tohoto zákona se sankce pohybují v řádu jednotek milionů korun za přestupky a správní delikty ohledně necertifikovanosti, chybné instalace, nezajištění kontroly atp. Obvyklou hranicí těchto sankcí je úroveň 500 tun ekvivalentu  $CO_2$  (cca 22 [kg] plynu  $SF_6$ ). Tato hranice je vztažena na jednotlivý oddíl naplněný plynem, nikoliv na celý rozvaděč, i přes to, že různé výklady nařízení přijímají obě varianty. Rozdílné chápání této hranice *samostatný oddíl vs celý rozvaděč* může mít praktický dopad především na rozvaděče vysokého napětí; u rozvaděčů vvn je tato hranice překročena už na úrovni samostatných oddílů.

Výše zmíněné rozdílné chápání lze registrovat u většího množství pojmů v rámci celého nařízení č. 517/2014, díky tomu, že některé formulace mnohdy nepřipouštějí zcela jednoznačný věcný výklad, tím spíše při co nejpřesnější snaze o překlad do češtiny.

Pro oblast použití, kontroly, manipulace i likvidace  $SF_6$  je nutné zohlednit některé další související předpisy, které by ideálně měly mít implementovány zmíněná nařízení. Mezi tyto normativní předpisy lze zařadit:

- ČSN EN 60480: Metodický pokyn pro kontrolu a úpravu fluoridu sírového ( $SF_6$ ) získaného z elektrických zařízení a specifikace pro jeho opětovné použití.
- ČSN EN 60376: Specifikace fluoridu sírového ( $SF_6$ ) technického stupně čistoty pro použití v elektrických zařízeních.



- ČSN EN 62271-4: Vysokonapěťové spínací a řídicí zařízení – Část 4: Manipulace s fluoridem sírovým ( $SF_6$ ) a jeho použití ve vysokonapěťových spínacích a řídicích zařízeních.

Množství významných distribučních i přenosových společností již zareagovalo na nařízení č. 517/2014 s předstihem či s jeho vydáním zapracováním předepsaných cílů do svých střednědobých i dlouhodobých rozvojových plánů. Je tak zřejmé, že tento trend je globální a vzhledem k množství aktivizovaných společností je možné usoudit, že to bude jeden z nejvýznamnějších trendů na poli rozvodu elektrické energie v následující dekádě. Například německý TenneT rozvinul politiku  $SF_6$  snažící se minimalizovat použití a emise  $SF_6$ , kdy cílem je redukovat relativní emise  $SF_6$  do roku 2020 o 20 % ve srovnání s rokem 2015. Britská National Grid říká, že jejich cílem je redukovat emise skleníkových plynů o 45 % v roce 2020 a o 80 % v roce 2050 oproti úrovním z roku 1990. Francouzský RTE se zavázal k přijetí iniciativy k redukcí plynu  $SF_6$  s výrazným skleníkovým efektem. Čínská SGCC přijala zodpovědnost za opatření proti nízkokarbonovým emisím. Též v České republice již nyní společnost ČEZ Distribuce, a. s. uvádí na svých internetových stránkách riziko znečištění ovzduší plynem  $SF_6$  mezi 4 nejvýznamnější environmentální aspekty, byť bez konkrétních cílů či závazků.

Tendence pro hledání vhodných alternativních plynů pro energetiku tak jsou zcela aktuální, zřejmá a jednoznačná, protože lze očekávat postupnou minimalizaci používání fluorovaných skleníkových plynů i v elektroenergetice, která doposud měla určitou výjimku a vyšší toleranci ohledně plynu  $SF_6$ . V budoucnosti tedy lze očekávat přísnější a právně závazné předpisy a nařízení v této oblasti. Je tedy v zájmu technickém i komerčním a v důsledku i vědecko-výzkumném, aby byly jednotlivé subjekty s těmito limity seznámeny a prakticky připraveny. Uvedenou problematikou se tak zabývají důležité odborné subjekty i standardizační orgány. Kupříkladu CIGRE založilo v roce 2016 pracovní skupinu WG B3.45 *Application of non- $SF_6$  gases or gas mixtures in medium voltage and high voltage gas insulated switchgears* (Aplikace plynů nebo směsí bez  $SF_6$  v plynem izolovaných rozvaděčích vysokého a velmi vysokého napětí), jejímž cílem je primárně zmapovat aktuální stav a následně doporučit oblasti vědecko-výzkumných činností a navrhnout změny ve standardizaci. Též IEC založila pracovní skupinu s názvem *New alternative gases and their impact on switchgear standards* (Nové alternativní plyny a jejich dopad na normy rozvaděčů). Příslušnou pracovní skupinu plánuje založit též IEEE.

### **Přístup největších výrobců produktů pro energetiku**

Výše zmíněné tendence na poli ústředních a zákonodárných orgánů byly registrovány již relevantním množstvím výrobců produktů pro přenos a distribuci v elektroenergetice. Jejich rozdílné přístupy a nástin portfolia jsou uvedeny v následující části.

#### **Siemens, série Blue Line**

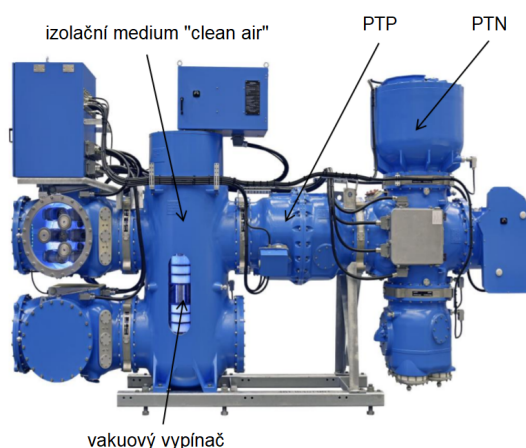
Do určité míry průkopníkem ve vývoji zařízení vn a vvn bez použití plynu  $SF_6$  je společnost Siemens. Ten uvedl do provozu svoji první zapouzdřenou rozvodnu s  $SF_6$  v Berlíně v roce 1968, šlo o rozvodnu 123 [kV] se zhašecím i izolačním médiem fluoridem sírovým. Tohoto typu je celosvětově instalováno přes 34 500 polí a společnost Siemens nejvíce deklamuje spolehlivost jejich řešení, která je údajně 3x až 4x vyšší, než jsou průměrné hodnoty výzkumů spolehlivosti CIGRE [56]. V eliminaci plynu  $SF_6$  z elektroenergetických zařízení tak společnost Siemens označuje jako největší výzvu udržení vysoké spolehlivosti. V rámci zapouzdřených rozvodů tak přistoupili k využití vakuových zhašedel pro zhašení a plynu s označením *clean air* pro izolaci. Fúze těchto dvou řešení



(a) Vypínač ABB LTA 145 kV



(b) Zapouzdřená rozvodna v technologii g3



(c) Pole zapouzdřené rozvodny Siemens 8VN1-145kV série Blue Line s plynem Clean air

### Obr. 2.8: Zařízení s alternativními plyny k $SF_6$

byla podmíněna úspěšným vývojem vakuových zhášedel pro napětí do 145 [kV] (zmiňovaných výše v kapitole 2.3.3). Izolačním médiem v těchto zapouzdřených rozvodnách je plyn reklamě označovaný jako *clean air*. Jedná se o syntetickou směs skládající se z 80 % dusíku a 20 % kyslíku, která je filtrovaná a zcela vysušená. Díky tomu, že se v podstatě jedná o běžný vzduch, je možné diskutovat očividné výhody, např. žádný příspěvek ke globálnímu oteplování či k efektu ozonové díry (GWP = 0, ODP = 0), netoxičita, nehořlavost, stabilita, nízký bod varu a žádné zkapalnění při nízkých teplotách, bezfluorová a bezuhlíková izolace, bez nutnosti evidence a dokumentace, bez nutnosti recyklace plynu na konci životnosti atp.

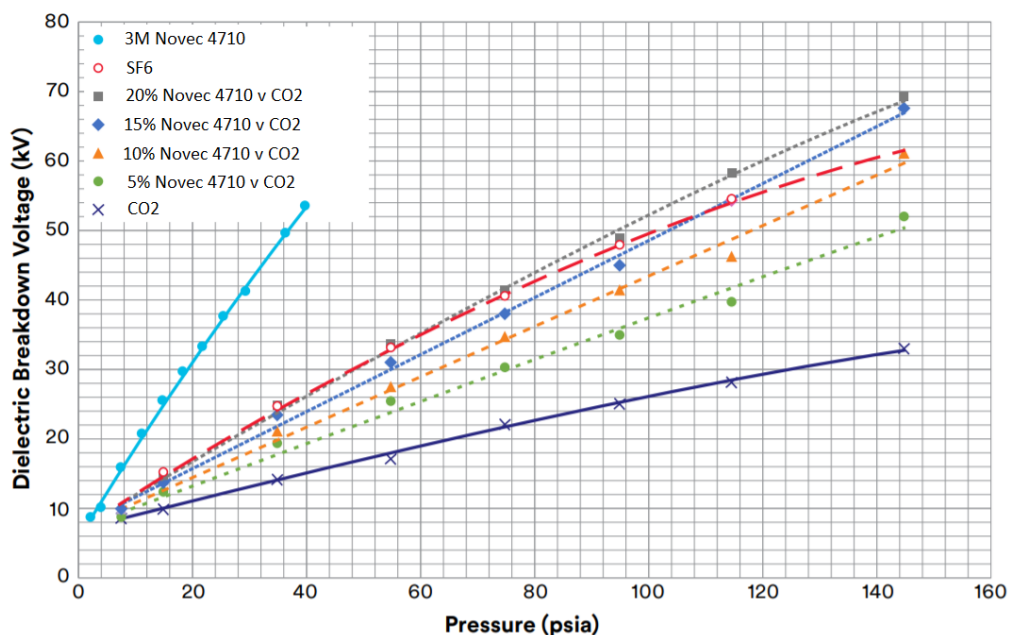
Prvními produkty v sérii Blue Line byly zapouzdřené rozvodny 72,5 [kV], určené pro provozní proudy 1250 [A] a vypínací proudy 25 [kA]. Jednalo se o 4 jednotlivá pole pro vyvedení výkonu větrných elektráren na volném moři u pobřeží Dánska. Jednotlivá pole byla umístěna v přechodových komorách pod tubusy věží elektráren. Vzhledem k omezeným prostorovým nárokům tohoto uspořádání je možné považovat tuto aplikaci za typickou. Následně byla v roce 2017 na veletrhu v Hannoveru představena zapouzdřená rozvodna série Blue Line pro napětí 145 [kV] s označením 8VN1-145kV. Společnost Siemens pak proklamuje funkční ekvivalenci s konvenčními GIS s  $SF_6$ , dále pak nabízí nekonvenční řešení přístrojových transformátorů proudu a napětí (NCIT – *non-conventional instrument transformer*). Klasický přístrojový transformátor proudu je tak nahrazen

proudovým senzorem v podobě Rogowskiho cívky, přístrojový transformátor napětí je nahrazen napěťovým senzorem pracujícím na kapacitním principu. Jedná se tak o implementaci další perspektivní oblasti v rozvodné technologii do reálného funkčního zařízení. GIS v sérii Blue Line tak eliminuje využití plynu  $SF_6$  a za udržení srovnatelných technických parametrů snižuje prostorové nároky vzhledem k ekvivalentní sérii 8DN8-145kV (GIS s plynem  $SF_6$ ).

### General Electric, série g3

Též americký výrobce General Electric věnuje v oblasti vývoje zařízení s alternativními izolačními plyny náležitou pozornost, kterou primárně promítá ve svém portfoliu též do oblasti zapouzdřených rozvodů. Výzkumy společnosti GE hledaly náhradu ve třech hlavních oblastech a to mezi konvenčními plyny ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ , vysoušený vzduch) a jejich vzájemnými směsmi s různou velikostí jednotlivých složek. Americký výrobce však následně vyhodnotil tento přístup jako kontraproduktivní návrat k dřívějším technologiím. Dále vyhodnocoval použitelnost plynu  $CF_3I$ , vlastnostmi velmi podobný plyn fluoridu sírovému s hodnotou GWP zhruba 10. Tento byl ale díky podezření na mutagenní účinky na lidský organismus vyhodnocen jako velice nevhodný pro masivní nasazení v průmyslových a rozvodných aplikacích. Třetí ze zkoumaných oblastí bylo využití vakua, které GE vyhodnotilo díky neosvojeným praktikám a chybějícím referencím na vyšší napěťové hladiny též jako nevhodné medium. [31]

V roce 2010 však GE zahájilo spolupráci se společností 3M a pro svoji pilotní sérii bez  $SF_6$  zvolili směs založenou na plynu s označením 3M Novec 4710. Jedná se o plyn s chemickým složením  $(CF_3)_2CFCN$ . Ten však nemůže být použit samostatně díky poměrně vysoké teplotě kapalnění, která je zhruba  $-5 [^{\circ}C]$ . Proto je plyn 3M Novec 4710 doplněn o oxid uhličitý  $CO_2$ , který byl upřednostněn před dusíkem  $N_2$  díky svým výhodnějším izolačním vlastnostem a schopnostem hašení oblouku. Vznikl tak základ pro nový směr produktů General Electric. Tato série pak dostala označení g3 (z anglického *green gas for grid*, tedy "zelený" plyn pro soustavu).



**Obr. 2.9:** Závislost přeskovového napětí na tlaku plynu – srovnání plynu 3M Novec 4710 (psia = libra na čtvereční palec, cca  $6,89 [kPa]$ ), měřeno homogenní pole diskových elektrod se vzdáleností 2,54mm [32]

Samotná směs v produktech GE g3 je složena s podílem 4 až 10 % plynu 3M Novec 4710 a 90 až 96 % oxidu uhličitého. Celkový potenciál globálního oteplování výsledné směsi se pak pohybuje v rozmezí od 360 do 500 podle obsahu jednotlivých složek. Tím tedy dochází k redukci GWP až o 98 % vzhledem k  $SF_6$ . Potenciál GWP pro samotný plyn Novec 4710 je uváděn jako 2100. [31, 32]

Série g3 byla zprvu vyvíjena opět pro pilotní použití zapouzdřených rozveden 145 kV, což je momentálně aplikace, pro níž je již typově otestovaná a komerčně dostupná. V portfoliu technologie g3 se dále vyskytuje zapouzdřené vedení pro napěťové úrovně do 420 kV. Zmíněné aplikace jsou již v provozu v sítích provozovatele britské přenosové soustavy National Grid (v rozvodně Selindge konstruované pro zvýšení přenosové kapacity britských ostrovů a propojení s pevninskou soustavou). [33]

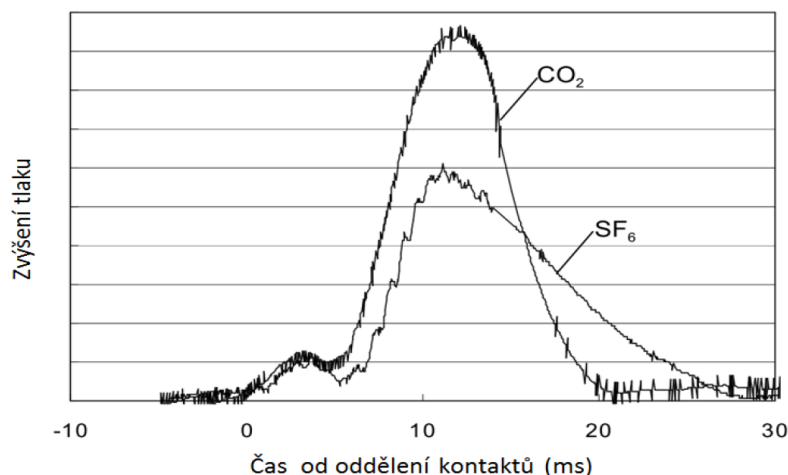
Jak bylo publikováno v [34], již dochází i k možnému použití směsi g3 ve vypínačích 145 kV. Prototypy těchto vypínačů byly úspěšně testovány dle IEC 62271-100 sérií pěti po sobě jdoucích vypnutí plného zkratového proudu 40 [kA]. Po úspěšném vypnutí byly zkoumány technické parametry zhašecího a izolačního plynu s ohledem na použitelnost a ekologii. Závěr zmíněného článku uvádí, že technologie g3 je vhodnou technickou i ekonomicky dostupnou alternativou ke konvenčním technologiím rozveden zapouzdřených plynem  $SF_6$  a tato vhodnost byla měřením ověřena i pro aplikaci technologie g3 na live tank vypínače. Vzhledem k tomu, že oficiální webové stránky výrobce aktuálně neobsahují žádnou informaci o vypínačích s technologií g3, je možné usoudit, že testování stále probíhá a k uvedení na trh a komerčnímu využití dojde v blízké budoucnosti.

### ABB, vypínače LTA

Další ze zde uváděných předních výrobců produktů pro elektroenergetiku je ABB, spolu se společností Siemens jeden z nejdůležitějších subjektů v oblasti. ABB je tradičním výrobcem vypínačů se zkušenostmi přesahující 100 let. Portfolio jejich vypínačů se vyvíjelo ruku v ruce s historickým vývojem vypínací techniky, od vypínačů vzduchem izolovaných, přes vypínače kotlové, až k tlakovzdušným, máloolejovým a tlakoplynovým s  $SF_6$ . Globální snahy o eliminaci vlivu plynu  $SF_6$  zaregistrovala i společnost ABB a jako náhradu ve svých výrobcích, primárně tedy ve vypínačích, zvolila samotný oxid uhličitý  $CO_2$ . To vedlo k vývoji vypínačů s označením LTA (z anglického *live tank alternative*) jako alternativní volby ke konvenčním tlakoplynovým vypínačům s  $SF_6$  s označením LTB (z anglického *live tank breaker*). Vývoj vypínačů LTA probíhal od roku 2013.

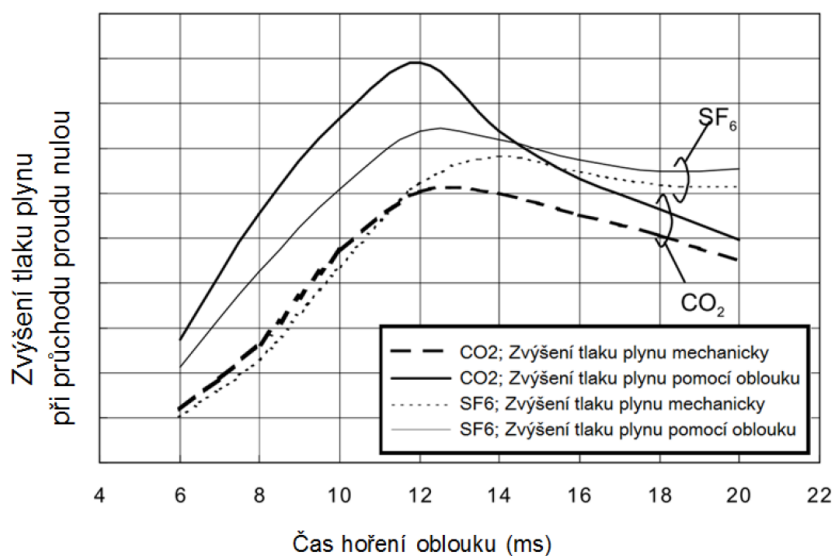
K využití  $CO_2$  ke zhašení přistoupila společnost ABB po provedení množství testů jeho zhašecí schopnosti. V rámci vzájemného porovnání, oxid uhličitý má menší molekulovou hmotnost, menší hustotu, též elektrická pevnost je nižší. Pro udržení srovnatelných zhašecích schopností je tak nutné navýšit tlak a zajistit intenzivnější odvod tepla z oblouku. Protože je ale měrná tepelná kapacita  $CO_2$  menší a zároveň hořící oblouk má vyšší úbytek napětí, než je tomu v případě oblouku hořícího v  $SF_6$ , bude natlakování zhašecí komory větší. To je uvedeno na Obr. 2.10. [35, 36]

Obr. 2.10 ukazuje průběh nárůstu tlaku plynu v komoře vypínače s hořícím obloukem při zvýšení tlaku pouze mechanicky pístem (tzv. druhá generace vypínačů nazývané jako *puffer type*). Je zřejmý rychlý vzrůst tlaku v komoře s  $CO_2$ . Toto natlakování poté ale velmi rychle klesá. Tento pokles je dán rychlejším šířením zvuku v  $CO_2$ , díky čemuž se zhašecí plyn uvolňuje rychleji z oblasti kolem oblouku. To má za následek nižší schopnost zhašení oblouku v případě delší doby trvání oblouku. Aby byla schopnost zhašení oblouku zachována i pro dlouhé doby hoření oblouku, musí být použit větší objem válcového výfuku. Tím se prodlouží doba působení intenzivního chlazení obloukového sloupce. Větší objem výfuku a tedy plynu ale vyžaduje použití pohonu vypínače s velmi vysokou energií, aby byl zároveň zachován strmý nárůst tlaku zhašecího média.



**Obr. 2.10:** Průběh nárůstu tlaku ve zhašecí komoře vypínače s plynem  $CO_2$  a s  $SF_6$

Možnost využití pohonu s nižší energií umožňují zhašecí komory, ve kterých je vytvoření tlaku zhašecího média částečně vyvoláno tepelnou energií samotného oblouku, tedy konstrukce využívající tepelného působení oblouku na natlakování media (tzv. třetí generace vypínačů známé jako *self-blast* či *auto puffer*). Principiálně je tento způsob běžně využíván v konvenčních moderních vypínačích s plynem  $SF_6$ . Obr. 2.11 ale ukazuje, že tento efekt je ještě účinnější při použití plynu  $CO_2$ .



**Obr. 2.11:** Průběh nárůstu tlaku ve zhašecí komoře vypínače při zvýšení tlaku mechanicky (pouze písmem) a s využitím působení oblouku

Z předchozích obrázků je tak patrné, že využití oxidu uhličitého je tak vhodné nejen k izolování, ale i ke zhašení oblouku. ABB následně samotný oxid uhličitý začala promíchávat s kyslíkem  $O_2$  pro zlepšení dalších vlastností. Původní vypínače LTA tak v portfoliu vystřídaly vypínače s označením LTB AirPlus. Nyní jsou tak dostupné vypínače pro sítě o napěťové hladině do 72,5 kV s dalšími parametry uvedenými v Tab. 2.5. [37]

Společnost ABB uvádí plnou kompatibilitu s doplňkovými prvky vypínače s prvky z konvenčních vypínačů (např. pohon, konstrukční rám atp.). Vypínače pro napěťovou úroveň 72,5 kV jsou

**Tab. 2.5:** Štítkové parametry vypínače LTB 72.5 AirPlus

|                          |    |            |
|--------------------------|----|------------|
| Napěťová úroveň          | kV | 72,5 až 84 |
| Jmenovitý proud          | A  | 2750       |
| Jmenovitý vypínací proud | kA | 31,5       |
| Teplotní rozsah          | °C | −50 až +50 |
| Vypínací čas             | ms | 50         |
| Ovládání                 |    | 3-pólové   |
| Provedení izolátoru      |    | polymer    |

tak již v několika instalacích běžnou součástí sítí. V provozu je rovněž i prototyp vypínače této série pro napěťovou úroveň 145 kV. Ten je uveden na Obr. 2.8a. Výrobce uvádí, že v průběhu dvou let pilotního provozu tohoto typu vypínač vykazuje spolehlivý a bezporuchový provoz. Je tak možné očekávat další aktivity v tomto směru s ohledem na použití na vyšších napěťových hladinách a zvýšení vypínací schopnosti. [37]

## 2.4 Princip tlakoplynových vypínačů s plynem $SF_6$

Tlakoplynové vypínače s fluoridem sírovým jsou svým principem velmi podobné tlakovzdušným vypínačům, ale využívají výhodných fyzikálních vlastností tohoto plynu. Fluorid sírový:

- má vyšší elektrickou pevnost než vzduch (při tlaku 2,5 [MPa] cca 125 [kV/cm]),
- je přibližně 5x těžší než vzduch,
- má větší tepelnou vodivost, čili lepší odvod tepla,
- je chemicky stálý,
- je bezbarvý, bez zápachu, nejedovatý, nedýchátný.

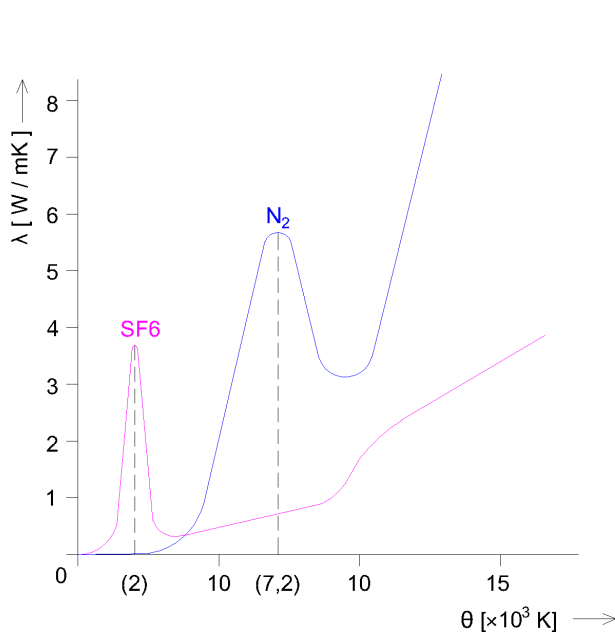
V průmyslu se začal  $SF_6$  využívat v hornictví, ve 30. letech se začal hojně využívat pro elektrotechnické aplikace a jako zhášecí medium při spínacích procesech byl poprvé použit v roce 1953.

Pro uhasnutí spínacího oblouku je nutné, aby proudící plyn plazma oblouku dostatečně ochladil. Po uhasnutí oblouku je však zhášecí komora namáhána zotaveným napětím s obecně vysokou strmostí. V tomto krizovém okamžiku po uhasnutí oblouku je mezi kontakty zbytkové plazma s určitým počtem volných elektronů. Ty mohou začít tvořit laviny nebo striméry a jiskrový výboj pak může způsobit zpětný zápal oblouku. Důležitou vlastností plynného zhášecího média je tedy chladicí schopnost, o níž vypovídá jeho měrná tepelná kapacita a hustota. Ač má  $SF_6$  měrnou tepelnou kapacitu malou, tak díky své hustotě a tepelné vodivosti má vynikající chladicí vlastnosti. Tepelná vodivost je způsobena těmito dvěma jevy [15]:

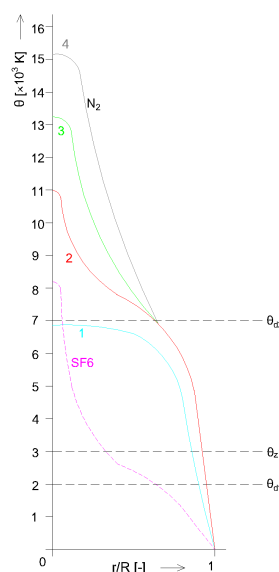
- odvod kinetické energie plynu při vzájemných srážkách molekul rozkmitaných tepelnou energií plynu,
- disociací molekul, kdy při jejich rozkladech na základní atomy se při nepružných srážkách pohlcuje disociační energie a tím se kinetická energie molekul přeměňuje na potenciální energii atomů. Ta se pak odvádí difúzí do oblasti s nízkou teplotou. Disociace molekul je jev, který podstatně zvyšuje tepelnou vodivost plynů.

Disociace molekul ale nastává jen v úzkém teplotním intervalu charakterizovaném *disociační teplotou*  $\Theta_d$ . Proto je v závislosti tepelné vodivosti na teplotě znatelné maximum právě v oblasti disociační teploty. Fluorid sírový má disociační teplotu okolo 2500 [K] a dusík (resp. vzduch) okolo 7500 [K]. Závislost tepelné vodivosti na teplotě tak dává představu o prostorovém rozložení teplot v hořícím oblouku. V okolí disociační teploty, kde je tepelná vodivost maximální je minimální teplotní spád. Disociační teplota tak rozděluje hořící oblouk do dvou rozdílných oblastí:

- vnitřní oblast, velmi jasně zářící s vysokými teplotami ležícími nad  $\Theta_d$ , tzv. *trup oblouku*,
- vnější oblast, difúzně svítivá část s teplotami pod  $\Theta_d$ , tzv. *plášť oblouku*.



(a) Tepelná vodivost  $SF_6$  a  $N_2$  v závislosti na teplotě



(b) Průběh teplot oblouku v závislosti na poloměru oblouku (křivky 1 až 4 jsou pro různé hodnoty proudu oblouku v plynu  $N_2$ )

**Obr. 2.12:** Disociační teploty plynů a jejich vliv na rozložení zón oblouku

Další důležitou vlastností disociační teploty je její vliv na rychlost úbytku hustoty elektronů ve zbytkovém plazmatu. Ve žhavém trupu oblouku je úbytek hustoty elektronů až stokrát rychlejší než v plášti. Při vypínání tak v nule proudu zanikne trup oblouku téměř okamžitě a zotavené napětí působí jen na plášť oblouku. Na obr. 2.12b je  $\Theta_z$  *zápalná teplota* zhruba 3000 [K]. To odpovídá kritické hustotě elektronů  $10^{14} [1/m^3]$ , která je rozhodující pro vznik elektrického výboje v plynném prostředí. Porovnáním velikostí  $\Theta_z$  a  $\Theta_d$  pro oba plyny lze odvodit, že v plynu  $SF_6$  bude oblouk tvořen převážně pláštěm, protože trup oblouku bude malý ( $\Theta_{zSF_6} > \Theta_d$ ), naopak v  $N_2$  bude poloměr trupu oblouku znatelně vyšší. Zároveň srovnáním disociačních teplot obou plynů a jejich vlivu na teplotní profil oblouku lze vysvětlit, proč jsou chladicí vlastnosti fluoridu sírového výhodné. [15]

Fluorid sírový tak vykazuje z hlediska zhasení oblouku výjimečnou kombinaci příznivých termodynamických a elektrických vlastností [19, 27]:

- nízké obloukové napětí a relativně nízká energie v silnoproudém intervalu,
- nízká disociační teplota a s ní spojený vhodný teplotní profil oblouku s úzkým trupem,

- relativně krátká časová konstanta,
- velká statická i dynamická elektrická pevnost,
- relativně stabilní hoření oblouku a jeho uhasnutí ochlazením přirozeně v proudové nule.

Vývoj tlakoplynových vypínačů probíhal v jednotlivých generacích. Vypínače první generace byly analogické k tlakovzdušným vypínačům a pracovaly s tzv. dvoutlakým principem – kompresor zajišťoval potřebný tlak plynu ve vysokotlaké nádobě 1,5 – 2 [MPa], za zhášedly tlak 0,3–0,4 [MPa]. Jejich nevýhodou byla složitost celého zařízení a s ní související nároky na údržbu a spolehlivost, zkapalňování plynu  $SF_6$  při nízkých teplotách a vysoká cena. Vývoj tak následně směřoval ke konstrukčně jednodušším typům. Tak vznikla druhá generace vypínačů nazývaná *puffer type*, která potřebný tlakový spád vytvářela stlačením plynu pístem přímo během vypínacího procesu. Tím bylo zajištěno zjednodušení konstrukce vypínače, ale zásadně tak vzrostly požadavky na pohon, který tak kromě ovládací funkce a pohybu kontaktů zajišťoval i natlakování plynu v kompresní komoře. Převratnou změnu pak přinesla třetí generace, která k natlakování plynu ve zhášedle využívá přímo energii hořícího oblouku. Vypínače třetí generace jsou po uplynulá desetiletí nejmodernější a nejprogresivnější technologií, v současnosti jeho napěťová a proudová vypínací schopnost dosahuje úrovní 245 [kV] a až 63 [kA] na jednu zhášecí komoru.

Vypínače třetí generace se označují jako *self-blast* či *auto puffer*. K natlakování plynu totiž využívají vlastní energie oblouku (tepelná energie oblouku → zahřívání a rozpínání plynu → růst tlaku ve zhášecí komoře). Touto zápornou zpětnou vazbou je vypínací schopnost zajištěna jednak výhodami fluoridu sírového, ale i vytvořením potřebného tlaku v závislosti na procházejícím proudu a hořícím oblouku. Toto však neplatí v případě vypínání malých proudů, kdy oblouk nedokáže natlakovat plyn dostatečně tak, aby uhasil hořící oblouk. Tento nedostatek byl odstraněn pomocí přídatné komory s pomocným pístem, který zajišťuje pomocnou kompresi. Tyto vypínače bývají označovány jako "tří a pultá" generace či jako generace čtvrtá.

Jádrum těchto vypínačů je jedna či více zhášecích komor zapojených do série a to buď v provedení *live tank* (umístěné v izolační nádobě s živým potenciálem na podpěrných izolátorech) či *dead tank* (umístěné v kovové nádobě na zemním potenciálu). Zhášecí komora je hermeticky oddělena od okolního prostředí a pod trvalým přetlakem. Po zapůsobení ochrany a vyslání pokynu na vypínač dojde k vybavení pohonu, který pomocí táhel začne rozpojovat kontakty. Nejprve se rozepnou vnější kontakty s hlavní proudovou dráhou a proud komutuje na vnitřní opalovací kontakty, které jsou přizpůsobeny vlastnímu vypínání a zhášení oblouku (zvýšená odolnost proti opalování, zvýšený přechodový odpor). Po rozpojení vnitřních opalovacích kontaktů začne hořet elektrický oblouk, který zahřívá okolní plyn a ten díky tlakovým změnám začne proudit do výfuků a kompresní komory. K plnému proudění a intenzivnímu chlazení však dojde až v momentě, kdy roubík uvolní hrdlo izolační zhášecí trysky. Tato tryska, zhotovená obvykle z teflonu, je konstruována jako Lavalova dýza – za hrdlem trysky je vlivem rozšiřujícího průřezu a poklesu tlaku dosahováno nadzvukové rychlosti proudění. Po uhasnutí oblouku v proudové nule plyn nadále proudí a pomáhá tak ochlazovat zbytkové plazma s volnými elektrony a napomáhá k rychlé obnově průrazné pevnosti ve vypínací dráze namáhané zotaveným napětím. Pokud je v každém okamžiku elektrická pevnost mezi kontakty vyšší než kritická elektrická pevnost daná zotaveným napětím, při kterém by došlo k průrazu, vypínací proces je u konce. Kontakty mají maximální zdvih a dojde k vyrovnání tlaku a teploty ve zhášecí komoře. [16, 27, 60]



## 2.5 Generátorové vypínače

Generátorové vypínače tvoří díky své specifické aplikaci jedinečnou skupinu přístrojů ve spínací technice. Jedná se o prvky s nejvyšší vypínací schopností umístěné ve větvi vyvedení výkonu z elektráren v blízkosti generátorů, obvykle zapojené mezi generátor a zvyšovací transformátor. Generátorové vypínače zažívají mnohem obtížnější vypínací disciplíny než běžné distribuční vypínače, což vyžaduje specifický design zhášecích komor a náročnější testovací postupy. Generátorové vypínače musí v jakémkoliv okamžiku zajistit:

- synchronizaci generátoru se soustavou,
- vypnutí nezátíženého generátoru a jeho oddělení od soustavy,
- spolehlivě přerušit jmenovité i zkratové proudy,
- vypínat za nesymetrických fázových podmínek.

Tyto požadavky spolu s vysokými vypínacími parametry (výkon, proud) a požadované všestrannosti a spolehlivosti komplikují návrh a provoz generátorových vypínačů.

Poprvé se potřeba specializovaných generátorových vypínačů naplno projevila s cílem chránit velké energetické celky v 70. letech. V současné době s rozvojem malých průmyslových a komerčních zdrojů rozptýlené výroby přibývá možností jejich aplikací, což rozšiřuje spektrum vypínaných výkonů na všech napěťových hladinách. Typickými aplikacemi generátorových vypínačů mohou být například instalace pro:

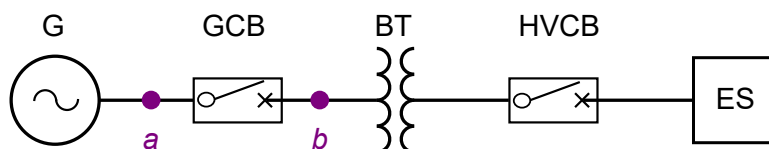
- generátory tepelných elektrárnách (uhelné, jaderné) – obvykle nejvyšší výkony a zatížení,
- generátory přečerpávacích vodních elektráren – velká četnost spínání, obvykle i několikrát za den, velké výkony,
- generátory velkých průtočných a akumulacních vodních elektráren – charakteristické hodnoty reaktancí hydroalternátorů,
- bloky pro start ze tmy,
- bloky obnovitelných zdrojů energie.

Bez ohledu na velikost a typ zdroje musí generátorové vypínače zohledňovat následující faktory:

- konfigurace, umístění a zapojení generátorového vypínače,
- vysoké hodnoty proudového zatížení,
- náročné vypínací disciplíny z hlediska zkratových proudů:
  - System-source (Transformet-fed) faults – porucha na straně generátoru,
  - Generator-source (Generator-fed) fault – porucha na straně transformátoru,
- náročné vypínací podmínky z hlediska přepětí:
  - vysoká počáteční strmost zotaveného napětí,
  - přepětové děje při mimofázovém spínání.

Na Obr. 2.13 je uvedeno typické zapojení generátorového vypínače ve větvi vyvedení výkonu z elektrárny. Na první pohled jednoduché schéma však obsahuje řadu faktorů, jež je nutné respektovat už v návrhové fázi generátorových vypínačů či v projektové fázi vyvedení výkonu. Toto schéma

je navrhováno s ohledem na minimální Jouleovy ztráty tak, aby veškerý vyráběný výkon byl s minimálními ztrátami vyveden do soustavy. Veškeré vedení by tak mělo být co možná nejkratší s maximálním průřezem vodičů, což s sebou přináší komplikace z hlediska prostorového uspořádání a samotného propojování jednotlivých prvků schématu. Protože vyvedení výkonu pak bývá často realizováno pomocí zapouzdřených vodičů, návrh generátorových vypínačů musí specificky respektovat i způsob nasvorkování (oproti poměrně jednoduchému napojení běžných distribučních vypínačů).



**Obr. 2.13:** Větev vyvedení výkonu z elektrárny a zapojení generátorového vypínače (G – generátor, GCB – generátorový vypínač, BT – blokový transformátor, HVCB – běžný distribuční vypínač, ES – elektrizační soustava, *a* – System-source fault, *b* – Generator-source fault)

Obr. 2.13 ukazuje dvě lokace v blízkosti generátorového vypínače, které definují náročné vypínací disciplíny. Jedná se o tzv. poruchu na straně generátoru (System-source fault) a poruchu na straně transformátoru (Generator-source fault). První z nich, porucha na straně generátoru, se vyznačuje velkými poruchovými proudy, kdy zdrojem zkratového proudu je celá soustava a relativně malá impedance zapouzdřených vodičů, generátorového vypínače i transformátoru jen velmi málo omezí velikost těchto poruchových proudů. Naproti tomu poruchy na straně transformátoru bývají obvykle nižší co do amplitudy zkratového proudu, ale s podstatně vyšší mírou asymetrie, což obvykle ústí v problematiku tzv. oddálené proudové nuly. Tento unikátní stav je způsoben vysokým poměrem reaktance vůči rezistenci obvodu  $X/R$  a náhodným okamžikem vybavení generátorového vypínače a tyto okolnosti mohou způsobit stejnosměrnou složku přesahující 100 %. Vrcholová hodnota zkratového proudu tak může být velmi vysoká (v řádu až stovek [kA]) a tlumení stejnosměrné složky tak pomalé, že průchod proudu nulovou hodnotou může být zpožděn o několik period. Generátorové vypínače tak při delším působení zkratových proudů musí vydržet vyšší elektrické, tepelné a mechanické namáhání, než je tomu v případě běžných distribučních vypínačů. To je zohledněno i v normě IEEE C37.013. Kulicke a Schramm [1, 40] se v návaznosti na analýzy poruch generátorových vypínačů zabývali právě problematikou oddálených proudových nul a jako první zdůraznili vyšší požadavky na dostatečnou dobu trvání vypínací schopnosti. V souvislosti s těmito požadavky pak diskutují benefity vakuových zhášedel, jejichž vypínací schopnost není omezena prouděním zhášecího média, ale je zachována i poté, co pohyb kontaktů ustane, což bylo prezentováno v rámci podkapitoly 2.3.3. Z hlediska dostatečné vypínací schopnosti je též zajímavá dekompozice dvou zmíněných poruchových proudů (dle *a* i dle *b*) na složku tekoucí z generátoru a složku tekoucí ze soustavy a zda při dané selektivě dokáže příslušný vypínač (GCB či HVCB) vypnout příslušnou složku.

Při vypínání se rovněž negativně projevují i napěťové vlivy. Jak již bylo zmíněno, propojení generátorového vypínače s dalšími prvky je provedeno z co nejkratších vodičů s co největším průřezem. Při provozu typicky vysokonapěťových kabelů či zapouzdřených vodičů je nutné brát ohled i na jejich indukční a kapacitní charakter. Přechodný děj charakterizovaný těmito induktivními a kapacitními parazitami se pak projeví přechodným zotaveným napětím s velmi vysokou počáteční strmostí. To znamená, že se dielektrická pevnost v dráze mezi kontakty musí obnovit během několika mikrosekund po úspěšném uhašení horkého oblouku. Právě díky parazitním kapacitám a

indukčností obvodu v blízkosti generátorového vypínače je počáteční strmost zotaveného napětí několikrát větší než v případě míst v přenosové či distribuční síti. Long a kolektiv uvádějí [39], že počáteční strmost zotaveného napětí se v případě distribučních vypínačů 15 kV pohybuje v rozmezí 0,4 až 1 [kV/μs], zatímco v případě generátorových vypínačů 15 kV je to až 3,5 [kV/μs]. Smith uvedl [41], že vakuové vypínače vydrží takto velké strmosti zotavených napětí i po přerušení velkých zkratových proudů bez přidání dalších omezovacích prvků. Takto těžké napěťové podmínky jsou dokonce tak závažné, že jen velmi malé množství vysokonapěťových laboratoří pro testování vypínačů dokáže generovat takové průběhy napětí pro zkoušky a experimenty. To vedlo k vývoji tzv. *syntetických metod* zkoušení.

Z kapitoly je patrný význam generátorových vypínačů a zpřísněných požadavků na ně kladených. Tab. 2.6 ukazuje klíčové parametry a požadavky v porovnání generátorových (GCB) a běžných distribučních vypínačů (HVCB).

**Tab. 2.6:** Porovnání parametrů a požadavků na generátorové (GCB) a běžné distribuční vypínače (HVCB) [39]

| Parametr                   | Jednotky | GCB                                 | HVCB                |
|----------------------------|----------|-------------------------------------|---------------------|
| Základní návrh             |          | specifický                          | standardní          |
| Jmen. napětí $U_r$         | kV       | $1,05 \times U_{\text{generatoru}}$ | viz Tab. 2.4        |
| Jmen. frekvence            | Hz       | 50, 60                              | 50, 60              |
| Jmen. proud $I_r$          | kA       | dle $I_{\text{generatoru}}$         | Řada R10            |
| Jmen. zkr. proud $I_k$     | kA       | 20-200                              | 16-100              |
| Jmen. sled spínání         |          | CO-30 mins-CO                       | O-0.3s-CO-3 mins-CO |
| Požadavek na dobu spínání  |          | vyžadováno                          | nevyžadováno        |
| Poměr X/R                  | -        | 50                                  | 17                  |
| Časová konstanta $\tau$    | ms       | 133                                 | 45                  |
| Vypínací čas               | ms       | 60-90                               | 50-83               |
|                            | period   | 3-6                                 | 2-5                 |
| Proud při mimofáz. spínání | kA       | $50\% \times I_k$                   | $25\% \times I_k$   |
| Počet operací – bez zátěže |          | 1 000                               | 5 000-10 000        |
| Počet operací – se zátěží  |          | 50                                  | 500                 |



(a) Výrobce ABB, typ HEC 9, jeden pól



(b) Výrobce General Electric, typ FKG1XW

**Obr. 2.14:** Generátorové vypínače významných výrobců

# 3 Vypínání zkratů a průběh vypínacího procesu

## 3.1 Vypínání symetrických a asymetrických zkratů

Vodivým spojením dvou (či více) částí elektrického obvodu s odlišným elektrickým potenciálem, které za běžných provozních okolností nemají být spojené, dochází k tzv. *zkratu*. Zkrat je mimořádný a poruchový stav, při kterém se díky nízkaimpedančnímu spojení znatelně zvýší proud ve zkratovém obvodu, poklesne napětí v místě zkratu a zkratový proud neprochází přes spotřebič, nýbrž zkratovou smyčkou. Nejvíce je ohroženo místo zkratu, kterým protéká od vytvoření zkratu až do jeho vypnutí vypínačem či pojistkami, zkratový proud (mnohonásobek provozního proudu). V elektrizační soustavě díky mnoha používaným napěťovým hladinám, různým provedením, uspořádáním a provozním podmínkám mají i zkratové proudy různé velikosti, vlastnosti i účinky. V elektrizační soustavě je základním kategorizačním hlediskem počet postižených/zkratovaných fází/pólů. V tomto ohledu se dělí zkrat na:

- trojpólový izolovaný/zemní zkrat,
- dvojpólový izolovaný/zemní zkrat,
- jednopólový zemní zkrat (jen v sítích s účinně uzemněným uzlem).

Z hlediska tohoto dělení je v četnosti jednotlivých zkratů naprosto převládající jednofázový zkrat, naopak poměrně ojedinělý je zkrat všech tří fází. Tento fakt však není platný pro kabelové sítě, kde převládající poruchou je třífázový zkrat – vzniklým elektrickým obloukem při poruše se zpravidla poškodí izolace kabelu a porucha tak díky tepelným účinkům vyústí ve zkrat všech tří fází. Analytické řešení těchto poruch obvykle využívá metody souměrných složek.

Poruchy však vznikají nejen na venkovním či kabelovém vedení, ale i v rámci elektrických stanic. Blíže je tento poměr uveden včetně jednotlivých příčin v následující Tabulce 3.1.

| Příčiny poruch       | Přibližné počty poruch v [%] |              |             |             |        |
|----------------------|------------------------------|--------------|-------------|-------------|--------|
|                      | Objekt poruchy               | Venk. vedení | Kab. vedení | El. stanice | Celkem |
| Atmosférické přepětí |                              | 38           | 1           | 7           | 46     |
| Vnější zásahy        |                              | 16           | 11          | 1           | 28     |
| Závady materiálu     |                              | 5            | 5           | 1           | 11     |
| Chyby obsluhy        |                              | 4            | 0,5         | 2,5         | 7      |
| Ostatní              |                              | 3            | 4           | 1           | 8      |
| Celkem               |                              | 66           | 21,5        | 12,5        | 100    |

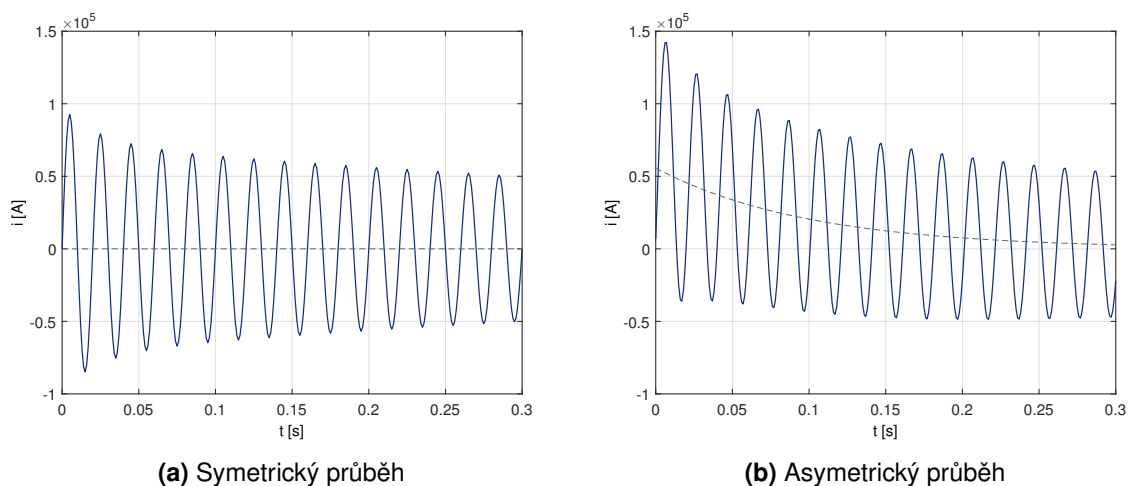
Tab. 3.1: Přibližné počty poruch dle příčiny [42]

Mezi vnější zásahy je možné zařadit zásahy nepověřených osob, zvěře, vegetace apod. Mezi ostatní příčiny např. vadnou montáž, provozní přepětí či jiné nahodilé jevy.

Dále lze zkrat kategorizovat na *galvanický* a *obloukový*. Při galvanickém zkratu je impedance spojení téměř nulová (např. kovový styk dvou fázových vodičů) a zkratový proud tak není příliš omezený a dosahuje vysokých hodnot. Galvanických zkratů se využívá např. při zkoušení zkratové

odolnosti rozvaděčů, často k nim též dochází zapomenutou zkratovací soustavou na přípojnicích či vedení po prováděné údržbě. K obloukovému zkratu dochází tehdy, pokud mezi jednotlivými částmi vznikne elektrický oblouk. Ten svým odporem brání průchodu proudu, takže jeho velikost bude nižší než při galvanickém zkratu, ale svými vlastnostmi jako je velká proudová hustota a vysoká teplota vodivého kanálu způsobuje odpovídající tepelné ztráty a tím i velké nebezpečí na okolní zařízení z hlediska tepelných účinků. Oba dva z uvedených typů jsou velmi nebezpečné svými mechanickými i tepelnými účinky a je proto nezbytně nutné jejich včasné a spolehlivé vypnutí.

Nejzásadnější kategorizací zkratových proudů pro tuto práci ale tvoří hodnocení na základě časového průběhu zkratového proudu v jednotlivých fázích a velikosti stejnosměrné složky. Tím se rozeznává *symetrický zkrat*, který má průběh symetrický podle horizontální časové osy a má nulovou stejnosměrnou složku, a *asymetrický zkrat*, jehož průběh je vlivem nenulové stejnosměrné složky posunut nad horizontální časovou osu.



**Obr. 3.1:** Ilustrační porovnání symetrického a asymetrického průběhu zkratového proudu

### Symetrický zkratový proud

Pokud zkrat vznikne v momentě, kdy je okamžitá hodnota protékajícího proudu nulová, nevynese žádná stejnosměrná složka a obálka průběhu zkratového proudu pak zůstane symetrická podle horizontální časové osy (osy  $x$ ). Tento fakt vychází ze zákona zachování energie – síť jakožto pasivní prvek induktivního charakteru má schopnost akumulovat v sobě energii magnetického pole, kterou nelze měnit skokově. V okamžiku vzniku zkratu dojde ke změně konfigurace obvodu a začne protékat zkratový proud. Obvykle je několik prvních amplitud vyšších než jsou amplitudy ustáleného zkratového proudu. To je způsobeno rázovou a přechodnou složkou, která vzniká v synchronních strojích (v alternátorech pracujících do sítě či synchronních kompenzáto-rech). Tyto složky mají exponenciální charakter a po několika periodách odezní a zkratový proud se ustálí. Jednotlivé složky a jejich vliv na průběh proudu a jeho vypínání budou detailněji popsány v Kapitole 5.

Pro symetrické průběhy platí, že proud prochází nulou vždy po  $10$  [ms] (v sítích s frekvencí  $50$  Hz). To je pro vypínání velice přínosný fakt, protože jde o nejkratší možnou dobu mezi dvěma průchody nulou. Tím je zajištěno, že v průběhu plné vypínací schopnosti vypínače máme garantované minimálně 2 průchody proudu nulou, během nichž vypínač obvykle vypíná.

### Asymetrický zkratový proud

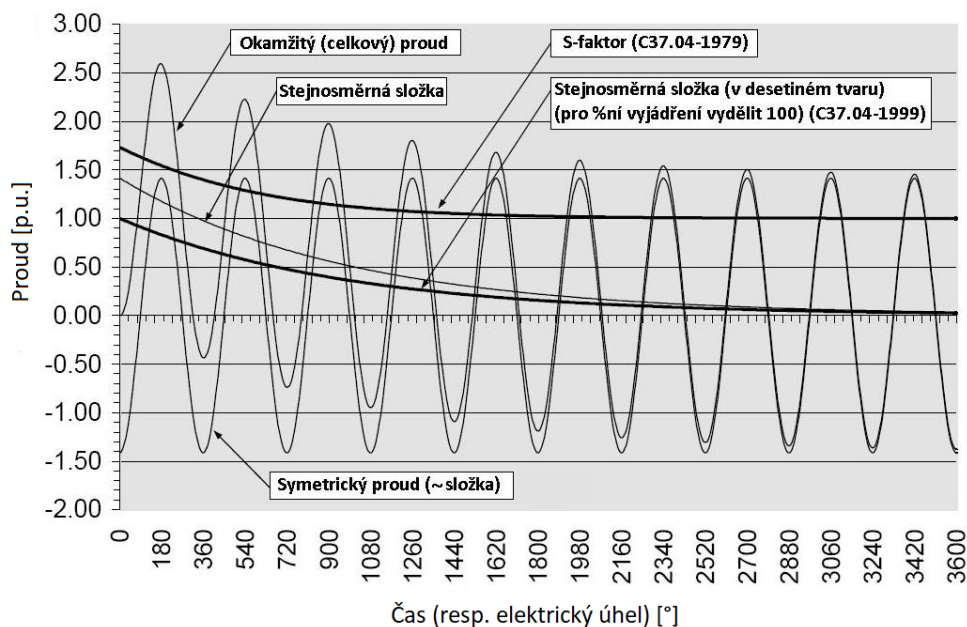
Protože pravděpodobnost výskytu symetrického zkratového proudu je nízká, naprostá většina vzniklých zkratů jsou asymetrické zkraty, jejichž časový průběh je posunut nad (či pod) vodorovnou osu. Vznikem zkratu v okamžiku s nenulovou hodnotou proudu se vyvine stejnosměrná složka a dojde k vychýlení průběhu proudu mimo symetrii časové osy. Toto vychýlení je tím větší, čím větší je vzdálenost proudu v okamžiku vzniku zkratu od proudové nuly, respektive čím vyšší je okamžitá absolutní hodnota proudu. Teoreticky tedy k největší asymetrii dochází při vzniku zkratu v amplitudě proudu<sup>1</sup>. Výsledný průběh zkratového proudu je pak superpozicí symetrického zkratu a stejnosměrné složky. Stejnosměrná složka pak exponenciálně klesá ze své počáteční hodnoty s časovou konstantou  $\tau$ , která je dána induktivní reaktancí  $X_L$  a činného odporu  $R$  zkratového obvodu. Velikost stejnosměrné složky je vyjádřena procentně dle následujícího vztahu:

$$p_{dc} = 100 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [\%] \quad (3.1)$$

$$\tau = \frac{X_L}{2\pi f \cdot R} \quad [s] \quad (3.2)$$

Ve starších emisích norem byla stejnosměrná složka počítána pomocí tzv. S-faktoru, což je poměr celkového asymetrického proudu a odpovídajícího proudu se symetrickým průběhem. Koncepty S-faktoru a procentní stejnosměrné složky jsou matematicky ekvivalentní, přestože vyjadřují představu o stejnosměrné složce jiným způsobem. S-faktor a procentní stejnosměrnou složku lze navzájem vztáhnout podle následujícího vztahu:

$$s = \frac{I_{celk}}{I_{sym}} = \sqrt{1 + 2 \cdot \frac{p_{dc}}{100}} \quad [-] \quad (3.3)$$



**Obr. 3.2:** Průběh asymetrického zkratového proudu s průběhem jednotlivých parametrů – %-ní ss. složkou a S-faktorem

<sup>1</sup>Některá literatura mylně uvádí jako nejnepříznivější okamžik vzniku asymetrického zkratu okamžik napětíové nuly. To je způsobeno zanedbáním činného odporu sítě s uvažováním jen indukčnosti.

Křivka S-faktoru nám umožňuje pozorovat a jiným způsobem hodnotit celkový proud a jeho asymetrii. Povšimněme si, že S-faktor klesá z maximální hodnoty 1,707 a jen asi po 5 periodách dosahuje hodnoty 1. Protože jednotková hodnota S-faktoru je ekvivalentní symetrickému proudu, S-faktor indikuje změnu asymetrického proudu na symetrický během několika málo period.

Na porovnání obrázků 3.1 je patrné, že proud asymetrického zkratu dosahuje zřetelně vyšších hodnot. Asymetrický zkrat tedy bude mít i vyšší tepelné a mechanické účinky (kvadratická závislost působící síly mezi dvěma proudovodiči, resp. tepelných ztrát na procházejícím proudu). Asymetrický proud je tedy nebezpečnější pro přípojnicové systémy a vinutí transformátorů či elektrických strojů.

Dalším sledovaným kritériem, v němž asymetrický zkrat způsobuje obtíže, je veličina  $I^2t$ . To je veličina, která se sleduje v řídicích a ochranných systémech provozovatelů distribučních a přenosových soustav při vzniklých zkratech, či jiných poruchách. V zásadě jde o integrál z protékajícího proudu a značí množství energie, která při zkratu projde obvodem při daném trvání zkratu. Lze usoudit, že vychýlením průběhu nad osu dojde i ke značnému nárůstu veličiny  $I^2t$ .

## 3.2 Základní časové intervaly vypínacího procesu

Pro studium vypínací schopnosti vypínačů je potřebné znát důkladně průběh spínacího procesu – stavy hořícího oblouku, provozní vlastnosti zhašecího média a vliv obvodu na spínací oblouk. Hořící elektrický oblouk ve střídavém obvodu (a v určité míře tedy i vypínací proces) lze rozčlenit do tří základních intervalů, ze kterých plynou inherentní podmínky pro navrhování a zkoušení vypínačů:

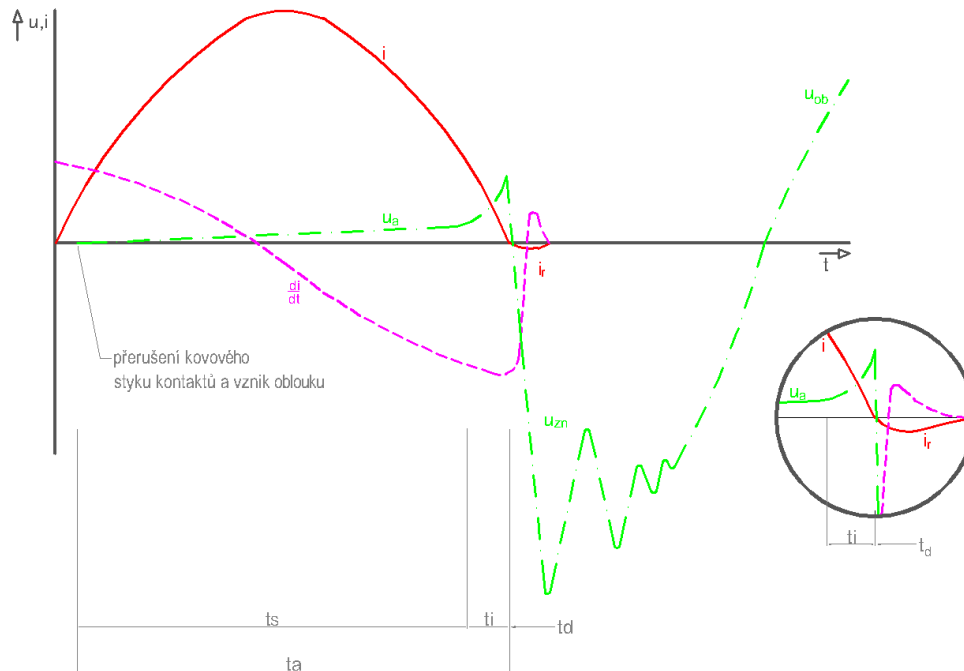
- silnoproudý interval,
- interakční interval,
- dielektrický interval.

Vypínací proces je děj, který je zahájen oddálením kontaktů vypínače a je ukončen v okamžiku, kdy kontakty mají maximální zdvih, spínací oblouk byl uhašen a je zajištěna dostatečná elektrická pevnost ve vypínací dráze tak, aby nedocházelo k průrazům vlivem spínacích přepětí. Během tohoto pochodu nastane každý interval minimálně jednou. [27]

Na Obr. 3.3 je uveden ilustrační průběh proudu a napětí s detailem okolí proudové nuly při vypínání s vyznačenými intervaly:  $t_s$  - silnoproudý,  $t_i$  - interakční,  $t_d$  - dielektrický,  $t_a$  - celková doba hoření oblouku. Jde o ilustrační příklad úspěšného vypnutí, kdy došlo k uhašení oblouku a v dielektrickém intervalu můžeme pozorovat zotavené napětí  $u_{zn}$

### 3.2.1 Silnoproudý interval

Silnoproudý interval je časový úsek v harmonickém průběhu, kdy obloukem protékají velké proudy, které jsou dané pouze vlastními inherentními parametry obvodu. V silnoproudém intervalu se neuvazuje žádná interakce mezi obloukem a vypínaným obvodem. To je způsobeno tím, že v oblasti velkých proudů má oblouk malé napětí, které je zanedbatelné vůči napětí zdroje, tedy i odpor oblouku je malý a zanedbatelný vůči impedanci obvodu (takové předpoklady však neplatí při vypínání malých induktivních a kapacitních proudů). V oblasti menších proudů je pak vyšší napětí na oblouku a to deformuje proud v obvodu, nicméně během silnoproudého intervalu je změna ještě dostatečně pomalá a oblouk má vlastnosti převážně určené velikostí proudu a intenzitou chlazení oblouku.



**Obr. 3.3:** Intervaly vypínacího procesu s detailem okolí proudové nuly ( $t_s$  - silnoproudý interval,  $t_i$  - interakční interval,  $t_d$  - dielektrický interval,  $t_a$  - doba hoření oblouku)

V okolí maxima proudu se proud mění jen velmi málo, protože  $\left(\frac{di}{dt}\right)_{I_{max}} = 0$ . Budeme-li uvažovat, že změna od maximální hodnoty proudu je do 10%, čili  $I/I_{max} \leq 0,9$ , pak této změně odpovídá časový interval:

$$\Delta t = 2 \cdot \frac{1}{\omega} \arcsin(0,9) = 2 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 50} \arcsin(0,9) = 2,78 \cdot 10^{-3} \text{ [s]} \quad (3.4)$$

Výsledek  $\Delta t = 2,78 \text{ [ms]}$  odpovídá 27,8 % doby půlperrody proudu. Vzhledem k tomu, že časová konstanta oblouku je řádově stokrát menší než uvažovaná oblast  $\Delta t$ , lze oblouk hořící v silnoproudém intervalu považovat za stacionární. Stacionární oblouk tak lze uvažovat v průběhu celé půlperrody proudu kromě oblasti zhruba 1 [ms] v okolí proudové nuly, kde je již časová konstanta oblouku srovnatelná s rychlostí změny proudu.

V silnoproudém intervalu má hořící oblouk velký průměr a rozhodující je zde maximální hodnota proudu  $I_{max}$ . Pro tuto hodnotu je nutné stanovit kritéria, aby se vlivem nadměrného zahlcení trysky nenarušil vypínací proces. Při nadměrném zahlcení trysky je omezeno proudění plynu i v okolí nuly proudu. Tomuto případu se říká *termické selhání vypínače*. Dalším kritériem nutným pro návrh zhášecí komory je termické působení oblouku. To nesmí způsobit tepelné poškození, jako například tavení konstrukčních částí zhášedla. [15]

### 3.2.2 Interakční interval

Interakční interval je charakterizován interakcí mezi proudem a obloukovým napětím, tj. mezi spínacím obloukem a obvodem, a je klíčovým pro úspěšné či neúspěšné vypnutí. Interakční interval je těžištěm problematiky teoretických i experimentálních výzkumů vypínací schopnosti a zkušebních metod a provedené výzkumy spínacího oblouku se zaměřují právě na interakční interval. Sledu-



jeme jej v oblasti proudové nuly, kdy probíhá výrazná změna proudu i napětí. Projeví se tím tedy časová konstanta oblouku a je tedy nutné na hořící oblouk nahlížet jako na dynamický. Interakční interval lze při zkoumání rozdělit na dva dílčí časové úseky:

- a) interval výrazné změny obloukového napětí před průchodem proudu nulou,
- b) interval zbytkového proudu po průchodu proudu nulou.

Interval výrazné změny obloukového napětí před průchodem proudu nulou je důsledek rychle klesajícího proudu k nulové hodnotě a nestabilně hořícímu oblouku, kdy se objeví zhášecí napěťová špička. Interval zbytkového proudu je důsledkem zbytkové vodivosti horkého prostředí mezi kontakty, pro úspěšné vypnutí by měla být co nejmenší. Interval zbytkového proudu se objevuje po proudové nule v řádu mikrosekund.

Počáteční podmínky oblouku hořícího v interakčním intervalu jsou dány vlastnostmi hoření v silnoproudém intervalu. Z toho důvodu není možné striktně oddělit tyto dva intervaly a jejich změna probíhá plynule. V interakčním intervalu je oblouk intenzivně chlazen, jeho průměr je vzhledem k průměru zhášecí trysky malý a napětí na oblouku obsahuje zhášecí či zapalovací špičky. Činný odpor oblouku se uplatní, protože je závislý nejen na proudu, ale i na intenzitě chlazení; dochází k interakci energetických poměrů ve zhášené a ve vypínaném obvodu a energetická bilance těchto interakcí je rozhodující pro výsledek vypínání. Vzhledem k rychlým změnám proudu v okolí průchodu nulou je nutné respektovat tepelnou setrvačnost oblouku a řešit diferenciální rovnice dynamického oblouku, kde charakterizující veličinou tepelné setrvačnosti oblouku je jeho časová konstanta. Naproti tomu základními inherentními veličinami obvodu pro interakční interval jsou strmost proudu v okamžiku proudové nuly  $(\frac{di}{dt})_{i=0}$  a počáteční strmost zotaveného napětí  $(\frac{du_{zn}}{dt})$ .

### 3.2.3 Dielektrický interval

Počátek dielektrického intervalu lze přesně určit jako okamžik, kdy došlo k přerušení proudu v obvodu. Během něj dochází k rozpadu zbytkového obloukového sloupce (rekombinace nosičů náboje, ochlazování proudícím plynem). Při selhání v dielektrickém intervalu, kdy vlivem přeskočků nastane opět zapálení oblouku, lze sledovat skok v průběhu  $\frac{di}{dt}$  z nulové na maximální hodnotu.

V dielektrickém intervalu je vypínací dráha mezi kontakty namáhána časově proměnným zotaveným napětím, jehož průběh je dán vypínaným elektrickým obvodem. Za úspěšné vypnutí považujeme stav, kdy průrazné napětí ve vypínací dráze je v každém okamžiku vyšší než zotavené napětí. V opačném případě dojde k opětovnému přeskočků, tento stav se nazývá *dielektrickým selháním* vypínače. Rozlišení termického a dielektrického selhání je nutné posuzovat bezprostředně po vypnutí proudu. Dielektrický průraz může nastat ve velmi krátké době ( $\leq 10 [\mu s]$ ), což není čitelné na oscilografickém záznamu proudu, při zkoušení a při experimentech je tak nutné mít záznamy o průbězích proudů, napětí i jejich derivací v dostatečně malém časovém měřítku.

Dielektrický interval lze rozdělit na 2 dílčí intervaly: první dynamický interval a druhý kvazistacionární interval. První dynamický interval je posuzován v oblasti nárůstu zotaveného napětí na vrcholovou hodnotu. Bezprostředně po přerušení proudu se vyskytují mezi kontakty ještě ionizované částice, které mohou zpočátku zvyšovat dielektrickou pevnost, protože se rovnoměrněji rozloží gradient elektrického pole. Později se však vlivem deionizačních procesů a pohyblivosti ionizovaných částic v elektrickém i rychlostním poli proudícího média dielektrická pevnost snižuje vzhledem k pevnosti studeného, neionizovaného plynu. Rozložení elektrické pevnosti ve vypínací

dráze je ovlivňováno termodynamickými poměry z předchozího hoření oblouku. Proto k nejčastějším případům dielektrického selhání dochází v počáteční fázi nárůstu zotaveného napětí, ještě před maximální hodnotou v dynamickém intervalu. V druhém dílčím intervalu obvykle k selháním nedochází. Příčinou případných selhání může být např. malá vzdálenost kontaktů, nízký tlak plynu či nehomogenity elektrického pole. Po úspěšném vypnutí je vypínač ve stabilizované klidové poloze a vypínač musí vyhovět izolačním podmínkám dané napěťové hladiny, což se ověřuje dle normativních požadavků (výdržné střídavé napětí 50 Hz a rázové vlny), které jsou stanoveny tak, aby byly vyšší než zotavená napětí. Dimenzování zhašecí komory a kontaktního ústrojí je pak určeno z řešení stacionárního nehomogenního elektrického pole.

### 3.2.4 Požadovaná vypínací schopnost v interakčním intervalu

Jak již bylo zmíněno, interakční interval je rozhodující pro úspěšné vypnutí vypínače. Ve střídavých obvodech dochází k vypnutí v nulové hodnotě proudu. V tomto okamžiku je vypínač namáhán časově proměnným proudem a napětím a toto namáhání je tím větší, čím rychlejší jsou změny daných veličin. Požadovaná vypínací schopnost je tedy dána vztahem:

$$Q_i = \frac{di}{dt} \cdot \frac{du}{dt} \quad (3.5)$$

Analýza tohoto vztahu bude základním kamenem následujících analýz namáhání vypínače při generátorových zkratech v Kapitole 5. Uvedený vztah do určité míry spojuje interakční a dielektrický interval. Zatímco nulovou hodnotu proudu sledujeme v interakčním intervalu, zotavené napětí je již otázkou dielektrického intervalu a jeho průběh je závislý na vypínaném obvodu a vypínací disciplíně.

Nejprve je nutné, aby bylo v okolí proudové nuly zajištěno dostatečné chlazení, čímž se zvýší odpor oblouku a objeví se napěťová zhašecí špička. Chlazením je zajištěno snižování vodivosti hořícího oblouku, který je v okolí proudové nuly nestabilní. V dalším kroku prochází obloukem ještě v řádech desítek [ $\mu$ s] zbytkový proud. To je způsobeno zbytkovou vodivostí a tepelnou setrvačností oblouku. Z energetické bilance (chladič výkon musí být vyšší než elektrický příkon do oblouku) vyplývá, že snahou vývojářů zhašecích komor je omezit tento proud jak velikostně, tak časově.

V interakčním intervalu je průměr oblouku o poznání menší než je průměr zhašecí trysky a dochází tak k intenzivnímu chlazení zhašecím médiem, které proudí v axiálním směru. Charakter proudění není obloukem nijak ovlivněn. [22]

### 3.2.5 Porovnání intervalů z hlediska spolehlivosti a vypínací schopnosti

Vypínací schopnost je u vypínačů hodnocena z hlediska interakčního a dielektrického intervalu. Pro vypínaný proud 40 kA je interakční interval rozhodující až do napětí 145 kV. V tomto rozsahu se nevyskytují u vypínačů SF<sub>6</sub> elektrické průrazy. Při zvýšení napětí vypínačů s plynem SF<sub>6</sub> na 200 [kV] (420 [kV] dvě komory) nebo dokonce 245 [kV] je však dielektrický interval často klíčový. Maximální hodnota zotaveného napětí dosahuje téměř 400 [kV], zkušební napětí je přibližně 500 [kV] a rázové zkušební napětí 1100 [kV]. Dielektrický interval může být rozhodujícím intervalem pro návrh vypínače, a proto je nutné věnovat značnou pozornost poznání i výzkumu jeho problematiky pro dynamickou fázi i pro stacionární stav vypínače. [14, 22, 27]

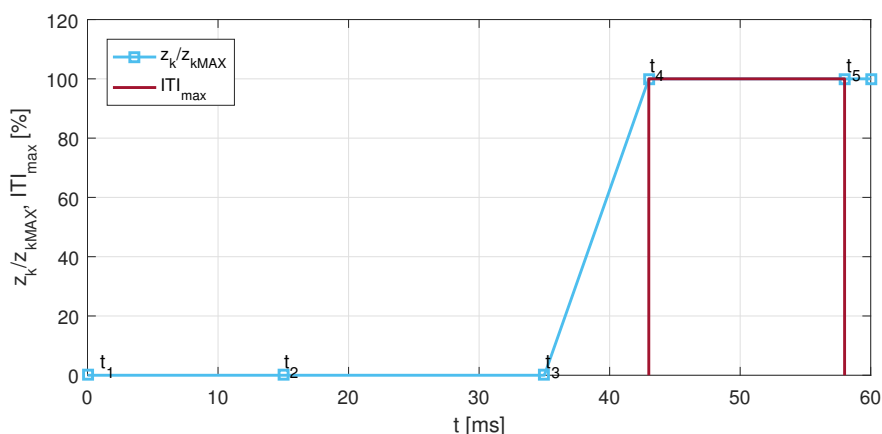
### 3.3 Vypínací interval

Vypínací schopnost vypínačů a její časová závislost je vymezena v rámci tzv. vypínacího intervalu ITI. Vypínací interval ITI (z anglického *interrupting time interval*) určuje časový úsek trvání plné vypínací schopnosti. V průběhu ITI vypínače musí přerušit vypínaný proud v normativně daných disciplínách za daných okolností. Co možná nejrychlejší růst vypínací schopnosti a její dlouhá doba trvání jsou klíčové pro návrh zhášecí komory a pohonu vypínače, čímž definuje šířku ITI. Na dobu vypínacího okna má dále vliv mechanická funkce vypínače a to rozdílně v závislosti na typu zkratu z hlediska vypínací disciplíny. Vypínací interval je omezen dobou pohybu kontaktů a prouděním plynu ve zhášecí komoře, přičemž zásadní vliv na úspěšné zhodnocení vypínacího intervalu bude mít i časová nesynchronicita a náhodnost mechanického vybavení kontaktů. [27]

|  |   |
|--|---|
| Okamžik vybavení ochrany (impuls na elektromagnet) | $t_1 = 0 \text{ ms}$                        |
| Uvolnění pohonu (doba vybavení elektromagnetu)     | $t_2 = t_1 + 15 \text{ ms} = 15 \text{ ms}$ |
| Začátek pohybu kontaktů                            | $t_3 = t_2 + 20 \text{ ms} = 35 \text{ ms}$ |
| Rozpojení kontaktů a hoření oblouku                | $t_4 = t_3 + 8 \text{ ms} = 43 \text{ ms}$  |
| Ukončení proudění plynu                            | $t_5 = t_4 + 15 \text{ ms} = 58 \text{ ms}$ |

**Tab. 3.2:** Časová posloupnost vypínacího procesu vypínače  $SF_6$

V tabulce 3.2 je uvedena experimentálně zjištěná časová posloupnost vypínacího pochodu vypínače  $SF_6$  s hydraulickým pohonem. Na obrázku 3.4 je pak táž posloupnost graficky znázorněná spolu s vyznačeným vypínacím oknem ITI.



**Obr. 3.4:** Časová posloupnost vypínacího procesu vypínače  $SF_6$

Jak bylo zmíněno výše, časová závislost vypínací schopnosti je svázána s rychlostí množství proudícího plynu a v rámci návrhu zhášecí komory a podmínek hoření oblouku, kdy vypínací interval je vymezen následovně dle rovnice 3.6.

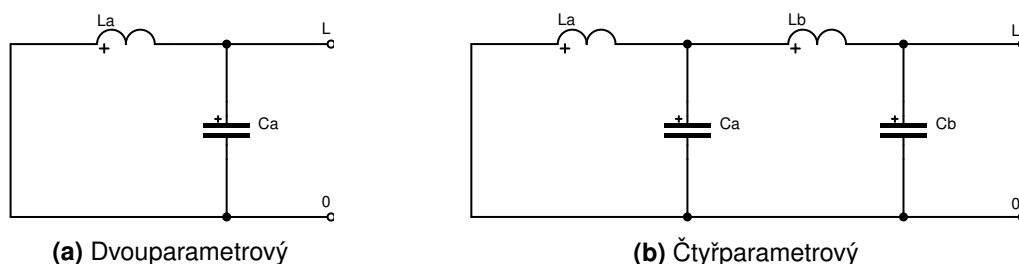
$$ITI = t_w = t_{a,max} - t_{a,min} \quad (3.6)$$

Minimální doba hoření oblouku je definována vypínanými parametry (napětí, proud, zotavené napětí). Doba  $t_w$  musí být dostatečně dlouhá, aby došlo k úspěšnému vypnutí, na druhou stranu zásadní prodloužení vypínacího okna vede k "nadhodnocenému" návrhu, který podstatně zvyšuje cenu vypínače.

### 3.4 Zotavené napětí

Zotavené napětí je napětí, které je na svorkách vypínače po uhasnutí oblouku ve vypínači a přerušení proudu obvodu. Uhasnutí oblouku iniciuje přechodný děj, během něhož se úbytek napětí na hořícím oblouku vyrovnává na napětí zdroje. Průběh zotaveného napětí je zpravidla součtem obnoveného napětí, které je dáno zdrojem, a přechodné složky, o níž rozhoduje charakter sítě a konkrétní poruchy.

#### Zotavené napětí při svorkovém zkratu



**Obr. 3.5:** Náhradní obvody pro stanovení přechodné složky zotaveného napětí

Při svorkovém zkratu (tj. v blízkosti svorek vypínače v rámci rozvodny) je impedance zkratového obvodu minimální a zkratové proudy tak nabývají nejvyšších hodnot. Pro stanovení přechodné složky zotaveného napětí se prvky soustavy nahrazují indukčnostmi a kapacitami, ze kterých se sestavuje náhradní obvod. Pro náhradní jednodukmitočtový obvod definovaný indukčností  $L_A$  a kapacitou  $C_A$  platí:

$$u_{zn} = u_{ob} \cdot (1 - e^{\alpha t} \omega_0 t) \quad (3.7)$$

V rovnici 3.7 je člen  $\alpha$  součinitel tlumení přechodné složky a  $\omega_0$  je vlastní úhlová frekvence, pro kterou platí:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_A C_A}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.8)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad [\text{Hz}] \quad (3.9)$$

Pro vypínání je obvykle důležitá zejména počáteční strmost zotaveného napětí. Její hodnotu přibližně udává přímka spojující počátek souřadných os a první amplitudu zotaveného napětí, která bývá díky velkému překmitu i maximální hodnotou průběhu. V reálných situacích je obtížné stanovit strmost  $u_{zn}$  předem, proto bylo provedeno množství experimentů pro získání závislosti mezi vypínaným proudem  $I_V$  a počáteční strmostí. Experimenty ukázaly, že tyto dvě veličiny jsou nepřímo úměrné, což ilustruje Tab. 3.3.

| Vypínaný proud | $30\% \cdot I_V$         | $60\% \cdot I_V$         | $100\% \cdot I_V$        |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Strmost        | $5\text{kV}/\mu\text{s}$ | $3\text{kV}/\mu\text{s}$ | $2\text{kV}/\mu\text{s}$ |

**Tab. 3.3:** Hodnoty počáteční strmosti  $u_{zn}$  pro různé hodnoty proudu  $I_V = 40$  [kA] vypínače  $SF_6$

### Zotavené napětí při blízkém zkratu

Při blízkém zkratu, který vzniká ve vzdálenosti od několika set metrů do cca 3 km od svorek vypínače, se na připojeném vedení objeví vlnové pochody. To se projeví tím, že na svorce připojené k vedení vznikne pilový průběh s frekvencí v řádech stovek kHz. Tyto pilové kmity se utlumí ještě před první amplitudou, ale prvotní strmý nárůst zotaveného napětí bývá často příčinou nevypnutí blízkých zkratů. Závislost mezi strmostí zotaveného napětí a vypínaným proudem je pro blízké zkraty uvedena v rovnici 3.10. Dle této rovnice je zřejmé, že sledování zotaveného napětí při blízkém zkratu má smysl od jmenovitého vypínaného proudu 10 [kA].

$$\frac{du_{zn}}{dt} = -2\pi f Z_0 \cdot I_v \cdot \sqrt{2} \approx 0,2 \cdot I_v \quad [kV/\mu s; kA] \quad (3.10)$$

Přesné stanovení zotaveného napětí je obtížné. Většina v současné době známých závislostí mezi vypínaným proudem a zotaveným napětím pro různé disciplíny byla získána z mnoha provedených zkoušek a experimentů.

Obecně platí fakt, že blízké zkraty jsou pro vypínače nebezpečnější kvůli dielektrickému sehlání, které hrozí zvýšenou strmostí napěťových kmitů na kontaktu vypínače připojeného k vedení. Uplatňují se zde vlnové pochody na vedení a zřejmý vliv pak tedy hrají konstrukční parametry vedení, zejména jeho vlastní a vzájemná indukčnost fází, mezifázová kapacita a kapacita fází vůči zemi.

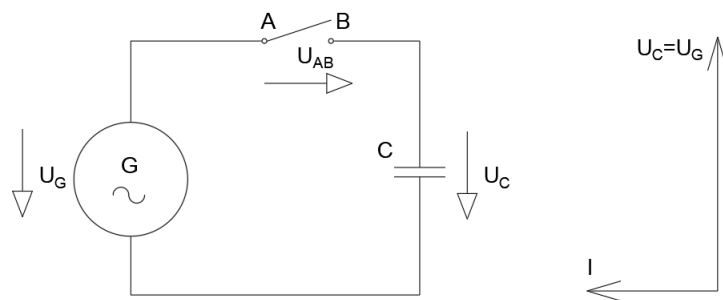
### Zotavené napětí při vypínání malých kapacitních proudů

S vypínáním kapacitních proudů je možné se běžně setkat při operacích jako je např. spínání kondenzátorových baterií, kompenzačních zařízení, spínání kabelových sítí a spínání dlouhých nezatížených vedení. K vypínání kapacitních proudů může docházet na všech napěťových hladinách, přičemž spínání kondenzátorových baterií a rozsáhlých kabelových sítí je běžnější na hladině vn, spínání dlouhých nezatížených vedení je častější na úrovních vvn a zvn. Pravděpodobnost výskytu vypínání malých kapacitních proudů není závislá na napěťové hladině, vedou ale na přepěťové jevy, které už ale na napěťové hladině závislé jsou.

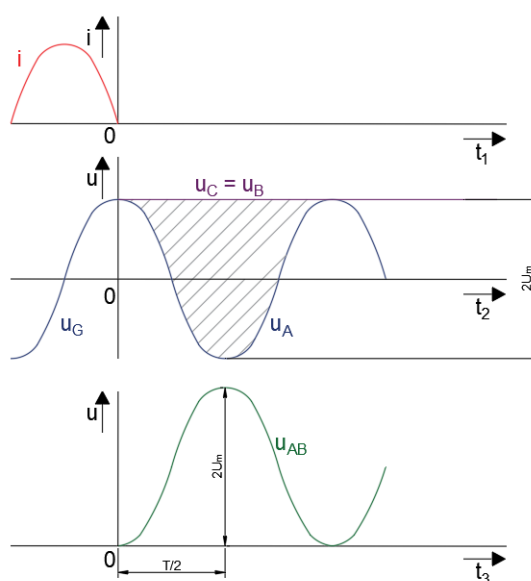
Zásadní problémy spojené s vypínáním malých kapacitních proudů jsou dobře reprezentovatelné na idealizovaném průběhu, který odpovídá čistě kapacitnímu obvodu se zanedbanými složkami odporu a indukčnosti. Kapacitní proud  $I_c$  předbíhá o 90° napětí na kapacitě, které je ve fázi s napětím generátoru. Při vypínání a uhasnutí oblouku v proudové nule je kondenzátor plně nabit na maximální hodnotu napětí. Po rozpojení obvodu pak je na kontaktu B vypínače plné napětí nabitého kondenzátoru, napětí na kontaktu A se však dále mění dle napětí zdroje se síťovou frekvencí. Mezi kontakty A a B tak bude harmonicky se měnící napětí dané rozdílem potenciálů mezi kontakty.

Tento děj je popsán na Obr. 3.7, kde na horní ose je proud přerušovaný v proudové nule. Na prostřední ose je vyznačeno harmonické napětí a od okamžiku proudové nuly se napětí na kontaktu B drží na konstantní hodnotě vlivem nabití kondenzátoru. Zotavené napětí pak je vyšrafováno jako rozdíl napětí mezi kontakty A a B a vyneseno do průběhu na třetí ose zmíněného obrázku. Napětí se tak periodicky mění z nuly na hodnotu dvojnásobné amplitudy.

K vypnutí zde bez velkých problémů dochází velmi brzy, zpravidla v první proudové nule. To ale nemusí být ve všech případech žádoucí, neboť při rychlém uhasnutí oblouku a malé vzdálenosti kontaktů, respektive při malé elektrické pevnosti mezi kontakty může dojít k průrazu – kontakty



**Obr. 3.6:** Idealizovaný obvod vypínání kapacitních proudů



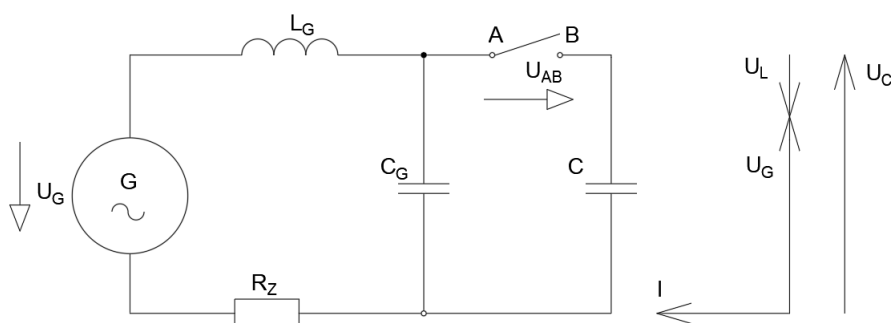
**Obr. 3.7:** Průběhy proudu a napětí při idealizovaném vypínání kapacitních proudů

mají ještě malou vzdálenost a již po polovině periody je mezikontaktní prostor namáhán napětím  $2 \cdot U_m$ . V realitě jsou napěťové špičky dále tím menší, čím kapacita ztrácí náboj a dochází vybíjení přes výše zanedbaný činný odpor obvodu.

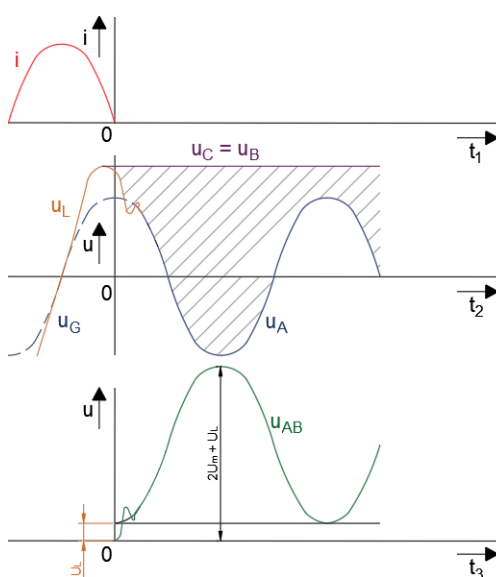
Zatímco odpor počáteční průběh zotaveného napětí příliš neovlivní, indukčnost už ano. Fázo-rový diagram s obvodem s uvážením indukčnosti je uveden na Obr. 3.8. Je vidět, že napětí na kapacitě a indukčnosti jsou v protifázi, což způsobí zvýšení napětí na kapacitě vzhledem k napětí generátoru.

Je zde ten rozdíl, že napětí na kontaktu A bylo v předchozím případě vyšší. Průběh zotaveného napětí mezi kontakty je opět dán rozdílem napětí mezi kontakty, což je opět patrné na Obr. 3.9. Samotný průběh zotaveného napětí je ve spodní části obrázku a jeho maximální amplituda dosahuje hodnoty  $2 \cdot U_m + U_L$ .

Pro zajištění bezpečného a spolehlivého vypnutí je nutné, aby napěťová pevnost prostoru mezi kontakty byla vždy vyšší než zotavené napětí. Dojde-li k porušení této podmínky, dochází k průrazu a následujícím nežádoucím jevům. To je uvedeno na Obr. 3.10, kde v čase  $t_P$  dojde k průrazu a vodivému spojení kontaktů. Ihned dochází k vyrovnání napětí kapacity  $U_C$  na napětí generátoru  $U_G$ . Vzhledem k velkým rozdílům napětí se začne napětí vyrovnávat přechodovým dějem a způsobuje to, že přes napětí generátoru se přeloží kmity přechodového kmitavého děje



**Obr. 3.8:** Reálný obvod vypínání kapacitních proudů

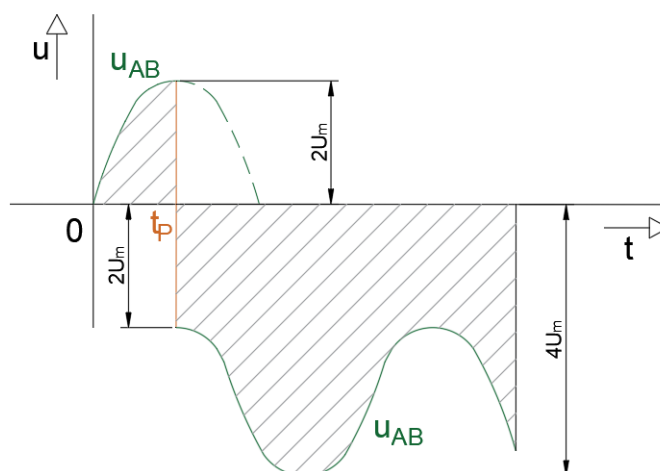


**Obr. 3.9:** Průběhy proudu a napětí při reálném vypínání kapacitních proudů

a začne obvodem procházet kapacitní proud  $I_C$ , který se vybíjí a je fázově posunut. Pokud se nepřeruší kapacitní proud  $I_C$  v nule přechodových kmitů, tak se opět ustálí na původním sinusovém průběhu proudu a napětí na průběhu  $u_G$ . Při průchodu proudu další nulou se tento jev celý opakuje.

Takto popsaný průraz je jen jeden z několika možných průrazů, který může nastat. Nyní je uvažováno, že k průrazu došlo v maximu zotaveného napětí. Zde v čase první nuly kapacity dosahuje přechodový děj maximální velikosti a to je hodnota  $3 \cdot U_m$  vzhledem k zemi. Uhasnutím oblouku a přerušení kontaktů A a B se odpojí nabitá kapacita s velikostí  $3 \cdot U_m$  od obvodu. Napětí na kontaktu A opět sleduje napětí generátoru  $u_G$ . Zotavené napětí je opět dáno rozdílem potenciálů napětí na kontaktech i přes krátkodobé přerušení vlivem průrazu, což vyobrazuje Obr. 3.10. V čase  $t = 0$  zotavené napětí stoupá z nulové hodnoty na velikost dvojnásobného napětí maxima amplitudy, přičemž v čase  $t_P$  dochází k průrazu a přechodový děj vlivem vlastního kmitočtu obvodu otočí polaritu napětí. Toto napětí teď již  $2 \cdot U_m$  narůstá podle kosinusového průběhu až do čtyřnásobné maximální velikosti amplitudy  $4 \cdot U_m$  a následně klesá na původní hodnotu  $2 \cdot U_m$ . Tato situace by trvala do té doby, než by došlo k úplnému vybití náboje kondenzátoru vlivem svodového proudu.

V praxi dále může dojít k vícenásobným průrazům kontaktní dráhy. Mechanismus vzniku těchto průrazů je obdobný jako zde bylo popsáno. Takové průrazy se nazývají *harmonické průrazy*. Tyto průrazy nejsou časté, ale pokud nastanou, dochází v nich k velmi vysokému přepětí, které ohro-



**Obr. 3.10:** Průraz v první amplitudě zotaveného napětí při vypínání kapacitních proudů

žuje izolaci celé sítě. Při vícenásobných průrazech dochází ke stejným dějům jako u jednoho průrazu s tím rozdílem, že vícenásobný průraz ovlivní maximální velikost amplitudy, a to tím, že s násobky průrazů se zvyšuje i velikost amplitudy. Dochází tak ke kumulaci napětí a související přepětí negativně ovlivňuje připojená zařízení působením rychlých rázových jevů. Vše pak probíhá do okamžiku zapůsobení selektivně nadřazeného vypínacího prvku.

Uvedené způsoby vypínání kapacitní zátěže byly všechny směřovány do jednoho místa, jak tomu bývá např. u kondenzátorových baterií. U vypínání dlouhého nezátíženého vedení či rozsáhlých kabelových sítí není kapacita soustředěna v jednom místě, ale je rozprostřena po celém vedení.

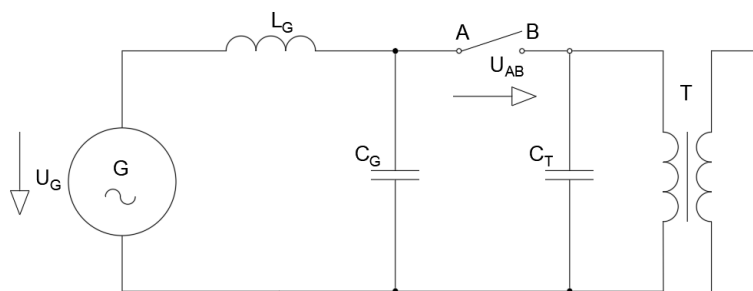
K přepětí při vypínání kapacitních obvodů může dojít jen tehdy, dojde-li k průrazu kontaktní dráhy. Nenastanou-li v průběhu vypínání kapacitních proudů průrazy, nedojde k souvisejícímu přepětí. Vhodným typem zhašecího média jsou zde vypínače tlakovzdušné, s fluoridem sírovým a nejpříznivější vliv zde má vypínač vakuový. Je důležité, aby vypínače měly studenou charakteristiku tak strmou, že průrazné napětí kontaktní dráhy vždy převyší velikost zotaveného napětí. Jedná se o tzv. *bezprůrazové kritérium* vypínačů.

### Zotavené napětí při vypínání malých induktivních proudů

K řešení problémů, které vznikají jako důsledek vypínání malých induktivních proudů, se přešlo poměrně nedávno, v souvislosti s masivním rozvojem vakuových vypínačů. U vypínačů s velkou vypínací schopností, což vakuové vypínače jsou, dochází vlivem nestability hořené oblouku k utržívání proudu před přirozenou proudovou nulou. Ve vypínaném obvodu obsahující parazitní kapacity a indukčnosti pak dochází k vysokofrekvenčním proudovým kmitům, které se sčítají s proudem jmenovitého kmitočtu. Díky různě velkým amplitudám a frekvencím těchto sčítaných složek tak může dojít k vynucené proudové nule před přirozenou nulou první harmonické a dojde k výše zmíněnému utržení proudu. V tu chvíli je v indukčnosti akumulovaná energie. Tato energie způsobí přepětí rázy, které namáhají izolační pevnost ve vypínací dráze, a dochází k opakovaným průrazům vypínače, tzv. *chopping*.

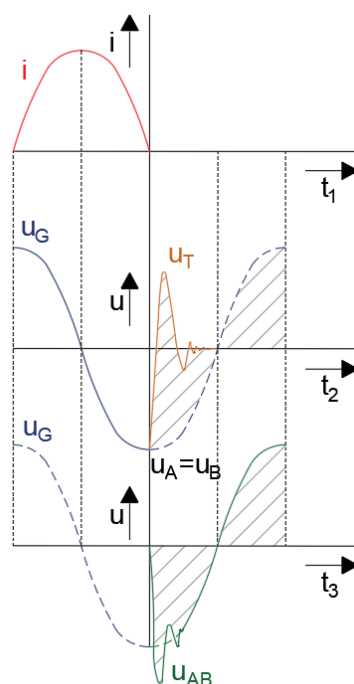
Tyto netradiční jevy jsou rozebrány na příkladu vypnutí vysokonapěťového nezátíženého transformátoru, jehož schématický obvod je uveden na Obr. 3.11.





**Obr. 3.11:** Obvod pro reprezentaci vypínání malých induktivních proudů

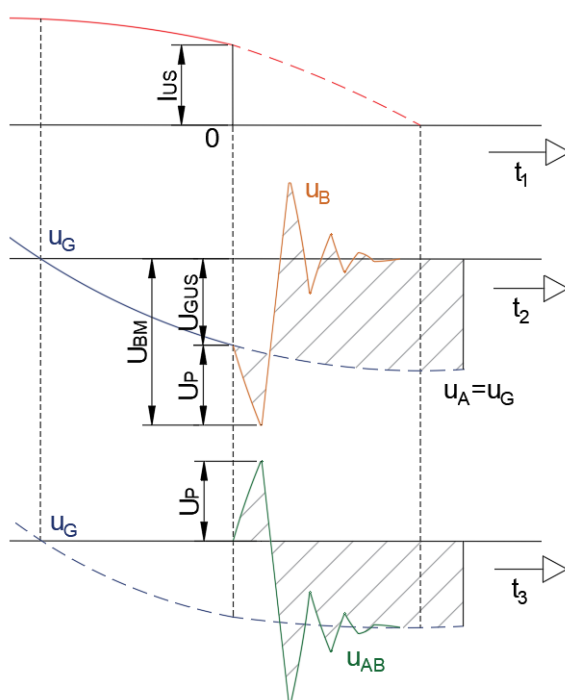
Indukčnost  $L_G$  a kapacita  $C_G$  generátoru jsou poměrně malé v porovnání s kapacitou  $C_T$  a indukčností transformátoru. Jelikož parametry  $L$  a  $C$  mají vliv na vlastní kmitočet, tak obvod generátoru do kontaktu A má mnohem větší kmitočet než obvod od kontaktu B k transformátoru. Nejprve budeme uvažovat, že oblouk, který je mezi kontakty A a B zanikne v proudové nule, jako je zobrazeno na prvním průběhu v Obr. 3.12. Než oblouk zanikl, úbytek napětí na indukčnosti generátoru  $L_G$  byl skoro zanedbatelný, a proto se napětí na transformátoru  $u_T$  a napětí na generátoru  $u_G$  rovnalo. Po rozpojení kontaktů a uhasnutí oblouku se tyto napětí již nerovnají. Napětí na kontaktu A sleduje napětí generátoru  $u_G$ , které přebíhá proud (induktivní charakter). Vlivem úbytku napětí na indukčnosti generátoru  $L_G$  je napětí generátoru trochu vyšší, než bylo napětí na vypínači před uhasnutím oblouku. Vlivem rozdílných velikostí napětí dojde ke kmitavému přechodovému ději, ovšem amplituda kmitů je tak malá, že se může zanedbat, a tudíž můžeme říct, že napětí na kontaktu A se rovná napětí na generátoru  $u_G$ , které je znázorněno na druhém průběhu na Obr. 3.12.



**Obr. 3.12:** Průběhy proudu a napětí při vypínání malých induktivních proudů v přirozené proudové nule

Po uhasnutí oblouku je proud nulový, a proto je i energie na indukčnosti transformátoru  $L_T$  nulová. Kapacita  $C_T$  je ovšem plně nabitá na maximální napětí generátoru  $U_G$  a vzhledem k rozpojení obvodu se začne vybíjet přes indukčnost  $L_T$ . To způsobí rozkmitání odpojeného obvodu. Tento kmitavý přechodný děj tak určuje napětí na svorce B. Jak již bylo několikrát řečeno, zotavené napětí je dáno rozdílem napětí na kontaktech A a B a je tedy zobrazeno v třetí části Obr. 3.12.

Na Obr. 3.13 je rozebrán fiktivní případ, při kterém dojde k přerušení proudu mimo jeho nulovou hodnotu. Velikost proudu v čase  $t = 0$ , kdy došlo k přerušení, je označena jako  $I_{US}$ . Vzhledem k tomu, že proud nebyl přerušeno spojitě v nulové hodnotě, je v obvodu uložena elektromagnetická energie o velikosti  $W = \frac{1}{2} L I_{US}^2$ . Nejhorším případem průběhu vypínání by bylo vlivem maximální akumulované energie useknutí v proudové amplitudě. Vzhledem k tomu, že kapacita  $C_T$  byla při useknutí nabitá na napětí zdroje  $U_{GUS}$ , naroste napětí na kontaktu B až na hodnotu  $U_{BM}$ , kdy  $U_{BM} = U_{GUS} + U_P$ . Zotavené napětí je znázorněno ve třetím průběhu na Obr. 3.13.

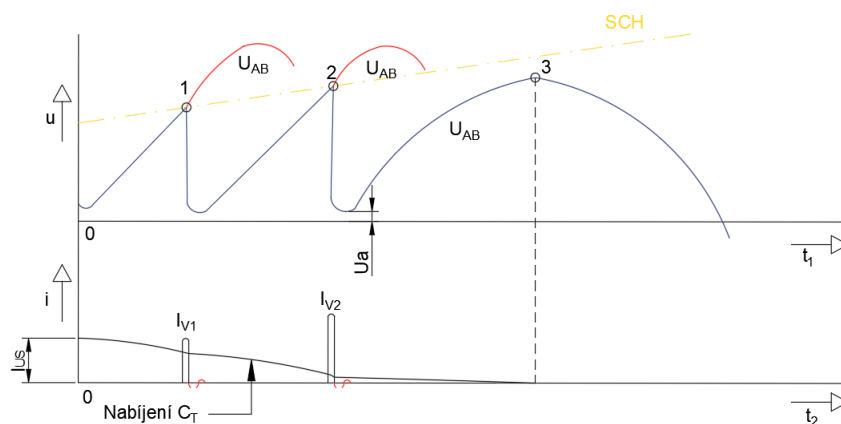


**Obr. 3.13:** Průběhy proudu a napětí při vypínání malých induktivních proudů před přirozenou proudovou nulou

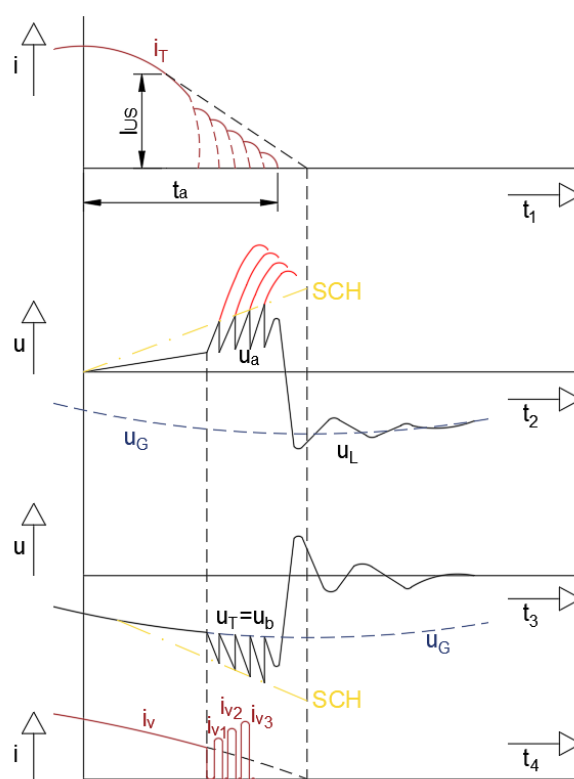
V obvodu dle Obr. 3.11 dochází při vypínání vypínače s velkou vypínací schopností k intenzivnímu chlazení oblouku a jeho odpor narůstá velmi rychle a strmě. Děj probíhá tak rychle, že změna proudu o síťovém kmitočtu je proti tomu zanedbatelná a fyzikálně se tak utržení proudu jeví jako by šlo o přerušení stejnosměrného proudu. Tím dochází v charakteristice oblouku k přibližování stabilního a labilního bodu hoření, dokud snižováním proudu nedojde k jejich úplnému splynutí. Splynutí těchto dvou bodů znamená, že se do oblouku nedostává dostatečné množství energie a nedosahuje se stupně ionizace potřebného k existenci oblouku, což vede k zániku proudu a zániku oblouku. Po zániku oblouku se tak přeruší vodivá cesta mezi generátorem a transformátorem a probíhá děj, který je znázorněn na Obr. 3.13.

Napětí mezi kontakty však nemusí dosáhnout hodnoty  $U_P$ , protože průrazné napětí mezi oddalujícími se kontakty není tak velké, ani nenarůstá tak rychle, aby byl větší, než čelo zotaveného napětí. Mezi kontakty je totiž malé množství nabitých částic a elektrická pevnost je téměř shodná

s elektrickou pevností přeskovové dráhy. Protože je vzhledem k rychlosti elektrických dějů rychlost pohybu kontaktů malá, narůstá toto průrazné napětí poměrně pomalu. Časový průběh průrazného napětí mezi kontakty se za těchto okolností (při velmi malých proudech) nazývá *studená charakteristika přeskovové dráhy*. Ta je zobrazena žlutou barvou na Obr. 3.14 a 3.15.



**Obr. 3.14:** Napětí a proud oblouku při vypínání malého indukčního proudu s opakovanými průrazy kontaktní dráhy



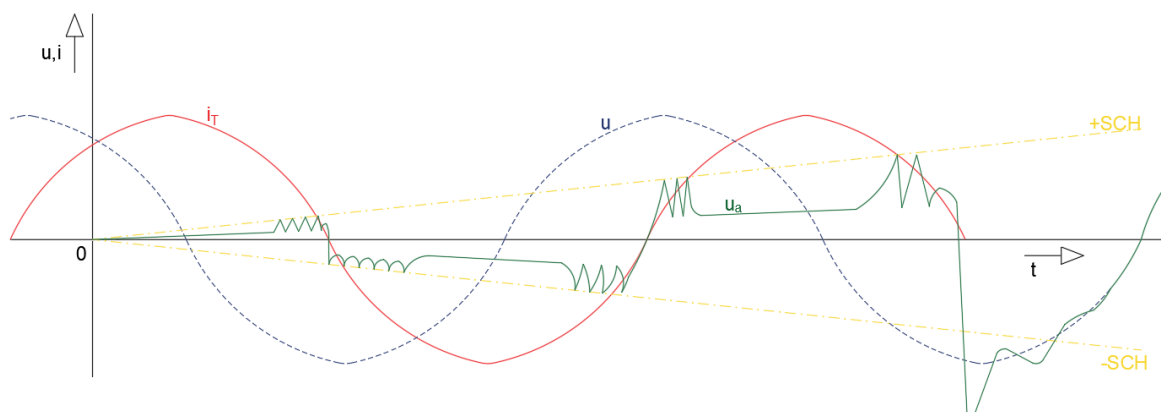
**Obr. 3.15:** Průběh vypínání transformátoru naprázdno s opakovanými průrazy kontaktní dráhy

Velká intenzita elektrického pole se stane příčinou průrazu prostředí, jakmile zotavené napětí převyší průrazné napětí mezi kontakty. Na Obr. 3.14 je tento okamžik dán bodem 1. Průrazem dochází k opětovnému propojení kontaktů A a B a napětí mezi nimi klesne na napětí oblouku. Dochází k vybíjení kapacity  $C_T$  přes obvod generátoru (její napětí je vyšší než napětí zdroje) a vypínačem prochází proud  $i_{v1}$ . Než proud může narůst na plnou velikost, intenzivní vliv zhášedla způsobí

znovu jeho zánik a celý jev se opakuje. Mezitím ovšem část energie z indukčnosti přešla do obvodu generátoru a v jeho činných odporech se proměnila v teplo. Proto po druhém zániku oblouku je energie v indukčnosti  $L_T$  menší, vrchol napětí  $u_{AB2} = U_P$  by byl nižší, a proto i strmost nárůstu čela tohoto napětí je mírnější. Po druhém průrazu byla energie v indukčnosti transformátoru tak malá, že vrchol napětí  $u_{AB3}$  nedosáhl velikosti studené charakteristiky, a proto bodem 3 je určen okamžik konečného přerušení obvodu.

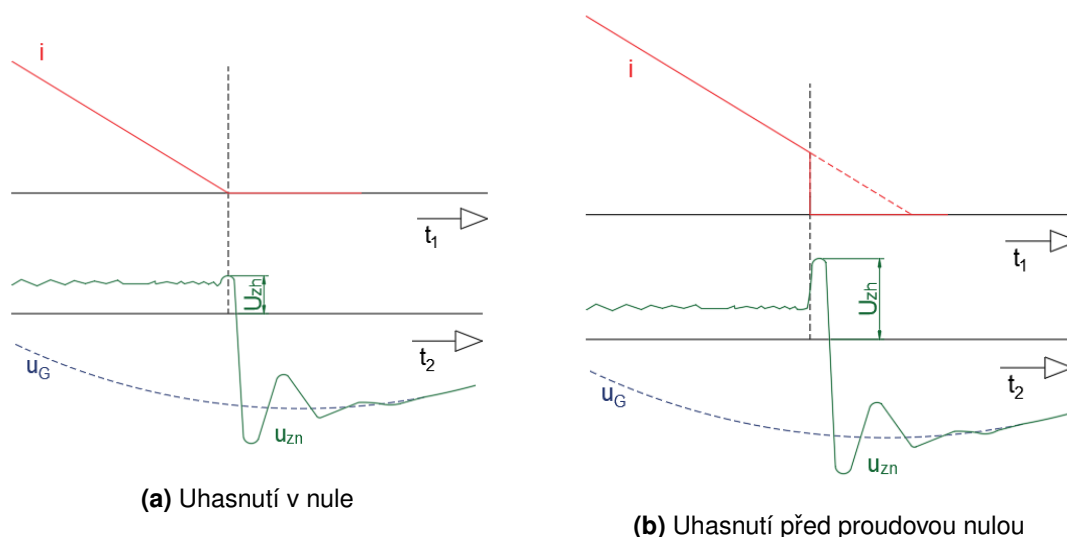
Na Obr. 3.15 je průběh proudu transformátoru (časová osa  $t_1$ ), napětí mezi kontakty (časová osa  $t_2$ ), napětí na transformátoru (tj. na kontaktu B, osa  $t_3$ ) a proud vypínačem (osa  $t_4$ ) v širším časovém úseku. Oddálení kontaktů nastalo v čase  $t = 0$ , useknutí proudu teprve později, při menším proudu. Počet průrazů, a tedy i napěťových špiček pilového charakteru bývá zpravidla větší, než je uvedeno, bývají též mnohem rychlejší, než je uvedeno v tomto reprezentativním výkladu. Vypínačem prochází spojitý harmonický proud jen do prvního useknutí. Následující průběh proudu je jen v podobě krátkodobých proudových rázů (často kmitavého, značně tlumeného charakteru) výbojového proudu  $i_v$  z kapacity  $C_T$ . Naproti tomu proud  $i_T$  v kapacitě  $C_T$  postupně s jednotlivými výboji klesá. Tento proud je však neměřitelný, neboť kapacita  $C_T$  není fyzikálně soustředěna do jednoho místa, ale je parazitně rozložena podél vinutí.

Vypínání s useknutím proudu před jeho přirozenou nulou lze souhrnně klasifikovat jako stejnosměrný princip zhášení oblouku, aplikovaný ve střídavém obvodu. Popsaný jev však nastává jen při malých proudech. Jde-li o vypínání proudu v řádu jednotek ampérů, bývá oblouk nestabilní v celém průběhu půlvlny. Po oddálení kontaktů dochází ihned k useknutí proudu. Jde-li o proud řádu několika desítek ampérů, nemusí být chladicí účinek soustavy dostatečný k narušení stability oblouku v široké oblasti kolem amplitudy, ale jen v krátkém úseku v okolí jeho průchodu nulou. Je-li indukčnost  $L_T$  vysoká, může se stát, že useknutí a pilové kmity nastanou krátce před průchodem nulou. Průrazy se však její energie odčerpává při malé hodnotě studené charakteristiky jen pomalu, takže v přirozené proudové nule není ještě zcela vyčerpána. Pak nedochází v nule k definitivnímu přerušení obvodu, protože napětí na transformátorové straně vyvolá další průrazy a pilové kmity pak pokračují se změněnou polaritou. Dosáhne-li pak proud velikosti, kterou již zhášení neovlivní, oblouk dosáhne stabilního hoření a proud probíhá podle sinusovky. V časovém horizontu do dalšího průchodu proudu nulou elektrická pevnost vypínací dráhy vzroste, dochází k rychlejšímu vyčerpávání energie v indukčnosti, až dojde ke konečnému zániku výboje. Tento případ vypínání je znázorněn křivkami na Obr. 3.16, kde žlutě je uvedena *studená charakteristika*, červeně průběh proudu a zeleně je obloukové napětí.



**Obr. 3.16:** Průběh vypínání malých induktivních proudů s opakovanými průrazy kontaktní dráhy

Jde-li o vypínání indukčních proudů velikosti několika set ampérů, je oblouk stabilní v celém průběhu půlčiny. Pouze v těsném okolí proudové nuly může docházet k jeho useknutí. Zda nastává tento stav, poznáme jedinečně podle vysoké zhášecí špičky přechodu obloukového napětí do napětí zotaveného. Průběh napětí a proudu při vypnutí bez useknutí ukazuje Obr. 3.17a. Vypnutí s useknutím pak Obr. 3.17b. V prvním případě přechází obloukové napětí téměř plynulou křivkou do čela zotaveného napětí. Ve druhém případě probíhá tento přechod špičkou, která dosahuje i několikanásobku předchozí velikosti obloukového napětí. V tomto případě bývá i překmit zotaveného napětí větší.



**Obr. 3.17:** Průběh napětí a proudu při vypínání induktivních proudů při uhasnutí oblouku v nule proudu a před proudovou nulou

Při vypínání ještě větších proudů (řádově stovky a tisíce ampér) nedochází k usekávání ani v oblasti nuly proudu proto, že se podstatně mění průběh elektrické pevnosti, stupeň ionizace dráhy je větší. Následkem tepelné setrvačnosti výbojového sloupce a okolnosti, že dochází v místě paty oblouku k tavení a vypařování kontaktů a k tepelné emisi elektronů, je elektrická pevnost mezi kontakty až do přirozené nuly proudu malá. Její prudký nárůst začíná teprve po uhasnutí oblouku. V takových případech je pak nutné hovořit o *horké charakteristice přeskokové dráhy*. Proud zhášecího média nemůže již za těchto okolností odnášením částic z výbojového sloupce zvětšit odpor krátkého oblouku až k mezi nestability tak, jak je toho schopen při malých proudech, kdy jsou teplota a ionizace prostoru mezi kontakty na nízkém stupni.

Průběh studené charakteristiky se blíží průběhu nárůstu elektrické pevnosti dráhy mezi kontakty vypínanými naprázdno (bez proudu). Závisí tedy na rychlosti oddalování kontaktů a elektrických vlastnostech prostředí. Průběh horké charakteristiky je zásadně odlišný. Průrazné napětí během hoření oblouku je dáno obloukovým napětím, tedy je obecně nižší než napětí zdroje. Nárůst na hodnotu odpovídající pevnosti přeskokové dráhy oddálených kontaktů, tedy na hodnotu studené charakteristiky, probíhá až po nule proudu během krátké doby – několika set mikrosekund.

Usekávání proudu s následnými pilovými kmity se projevuje u vypínačů s cizí i s vlastní zhášecí energií. Mezi průběhem a zejména pak mezi velikostmi napěťových špiček je však rozdíl. Obecně musí dosáhnout tyto špičky vyšších hodnot u vypínače, pokud průrazné napětí přeskokové dráhy nezávisí na proudu a nabývá po oddálení kontaktů velkých hodnot. Napěťové špičky dosahují velikosti i několikanásobku jmenovitého napětí sítě. Následné průrazy jsou pro samotný vypínač

neškodné. Jde o malé proudové nárazy, které na kontaktech dimenzovaných pro podstatně větší proudy nemohou zanechat znatelné opotřebení. Přepětí se však přenáší do sítě a ohrožuje její izolaci. Kdyby však nedošlo k průrazu v kontaktní dráze, přepětí ová špička by byla ještě mnohem vyšší. Průraz ve vypínací dráze vede tedy ke snížení spínacího přepětí v síti. Vakuové vypínače a vypínače s cizí zhášecí energií omezují tato přepětí nejméně.

Pro tuto spínací disciplínu jsou vhodnější soustavy s vlastní zhášecí energií, např. vypínače kapalinové. U těchto vypínačů nelze však jednoznačně definovat studenou charakteristiku. Protože jde o malé proudy, množství plynů vytvořené obloukem je nepatrné a v praxi vždy jde o pochod volného zhášení oblouku v kapalině. Kapalina stačí odnímat tenkému obloukovému sloupci sice tolik energie, že dochází k nestabilitě výboje a useknutí proudu, ale na jeho místě setrvává řetězec bublinek plynů a par kapaliny rozložené teplem. Kmit napětí vyvolává vzápětí průraz podél tohoto řetězce. Velikost průrazného napětí závisí nejen na množství a velikosti těchto bublinek (resp. tedy na velikosti proudu), ale i na jejich náhodné konfiguraci. Výsledkem je nepravidelné kolísání průrazného napětí. Průběh pilových kmitů oproti vypínači s cizí zhášecí energií se pak liší tak, že jejich vrcholy nesledují plynule vzrůstající čáru. Pásmo, které vymezují, nelze již klasifikovat jako studenou charakteristiku, protože se od průrazného napětí vypínací dráhy v kapalině nedotčené proudem značně liší. Průrazné napětí vypínací dráhy je nižší a celkově jsou špičky přepětí nižší. Tyto soustavy neohrožují tolik izolaci vedení, a proto lépe vyhovují v obvodech, kde přichází v úvahu častější vypínání malých induktivních proudů. Z tohoto důvodu též byly máloolejové vypínače nejběžnější v distribučních soustavách, kde ale ustupují vakuovým vypínačům, které, jak již bylo zmíněno, jsou pro tuto spínací disciplínu nejnevhodnější.

## 4 Elektrický spínací oblouk

Předchozí kapitoly popisovaly celý proces vypínání zkratu a to jak z pohledu vypínače, tak z pohledu sítě, kdy jsou elektrické parametry vypínaného obvodu definovány inherentně právě obvodem. Při reálném vypínání však dochází ke vzájemné interakci mezi obvodem a vypínačem prostřednictvím elektrického oblouku. V této části je tedy stručně popsán spínací oblouk a to, jakým způsobem ovlivňuje vypínání.

### 4.1 Teoretický popis elektrického spínacího oblouku

#### 4.1.1 Ionizační procesy v plynech

Elektrický oblouk je multifyzikální jev, se kterým se každý z nás občas setkává. Z hlediska teoretického zařazení je oblouk kategorizován jako elektrický výboj. V rámci kategorizace elektrických výbojů lze říci, že elektrický oblouk zaujímá výsadní pozici a na rozdíl od dalších typů elektrických výbojů (např. koróna či doutnavý výboj), s elektrickým obloukem se setkáváme jen díky přičinění člověka, rozvoji poznání a masivní utilizace výroby, přenosu, rozvodu a využití elektrické energie. Elektrický oblouk se tak vyskytuje jako fenomén žádaný a užitečný, i jako nežádoucí a problematický. V obou případech je pak nutné znát jeho chování a vlastnosti tak, aby mohl být využit co nejefektivněji či omezen tak, aby nezpůsobil žádné škody.

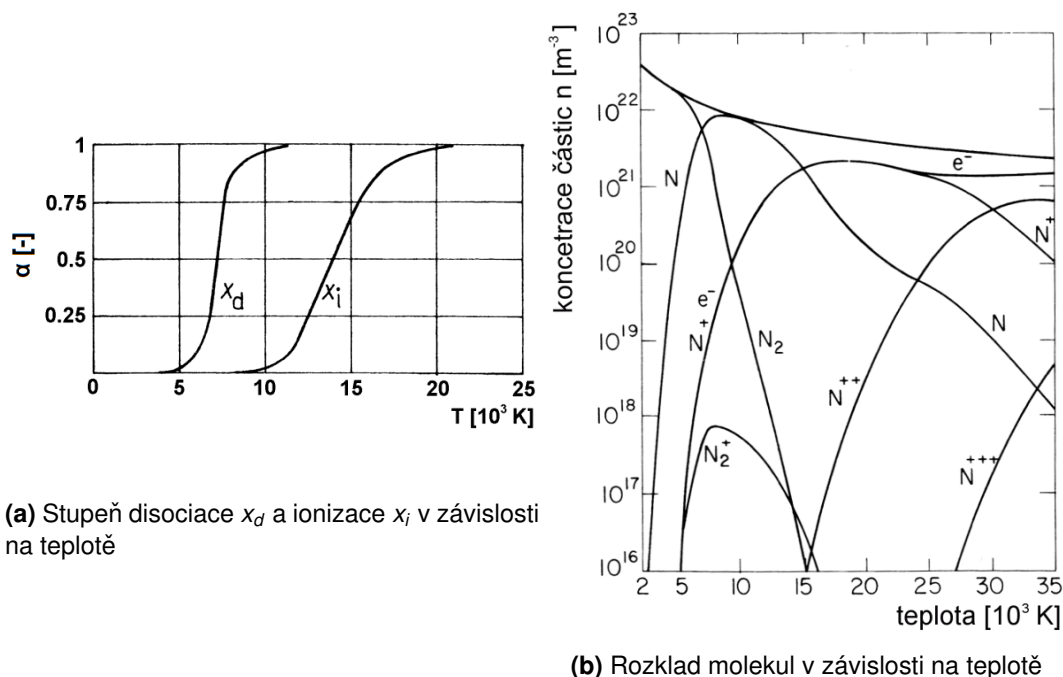
Kategorizace mezi elektrické výboje značí, že se jedná o pohyb elektrického náboje, tedy průchod proudu, plynným prostředím. Elektrický oblouk je výboj úplný (překleneje celou vzdálenost mezi elektrodami) a samostatný (existuje i bez vnějšího ionizačního činidla). Plyny jsou za běžných podmínek vynikající izolanty, které neobsahují prakticky žádné částice schopné přenosu elektrického náboje. Při dodání dostatečného množství energie však začne docházet k disociaci, tedy rozpadu molekul plynu na nižší molekuly a atomy, následně pak může docházet k ionizaci, tedy vytrhávání elektronů z atomů plynu, čímž dochází ke vzniku volných elektronů a kladných iontů. Při dosažení určité koncentrace volných částic a za přítomnosti elektrického pole pak lze očekávat vznik elektrického výboje. Kromě procesů v plynu se pak při vzniku spínacího oblouku uplatňují i další procesy v blízkosti a na povrchu elektrod (zejména autoemise, termoemise a sekundární nárazová emise). Při hlubším popisu procesů nezbytných pro vznik a existenci oblouku se lze dostat až k řešení elementárních reakcí molekul, atomů, iontů a elektronů příslušného plynu a materiálu kontaktů, což je při udržení dostatečné korektnosti problematika spadající do kompetencí fyzikálně-chemických inženýrů. V prostředí mezi kontakty tak bude docházet k pružným a nepružným srážkám, nabuzení neutrálních i excitovaných atomů, ionizaci a zároveň i rekombinaci. [45]

Zásadní pro existenci obloukového výboje je pak stupeň ionizace plynu, kterou lze popsat Sahovou rovnicí dle rovnice 4.1.

$$\frac{n_e \cdot n_i}{n} = \frac{2 \cdot Q_i}{Q_o} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{3/2} \cdot e^{\left( -\frac{E_i}{kT} \right)} \quad (4.1)$$

V rovnici 4.1 je  $n_e$ ,  $n_i$  a  $n$  jsou koncentrace elektronů, iontů a neutrálních částic,  $Q_i$  a  $Q_o$  jsou rozdělovací funkce pro ionizované a neutrální částice,  $m_e$  je klidová hmotnost elektronu,  $k$  je Boltzmannova konstanta,  $h$  je Planckova konstanta,  $E_i$  je ionizační energie a  $T$  je teplota.

Uvedenou rovnici lze chápat jako popis přechodu mezi izolačním a vodivým stavem plynu, což lze graficky znázornit tak, jak je na Obr. 4.1a znázorněno pro dusík  $N_2$ . Efekt takového přechodu při zvyšování teploty (tedy při dodávání energie) je patrný i na rozkladu molekuly dusíku  $N_2$  na molekuly nižší a na atomy, což je uvedeno na Obr. 4.1b. Tento obrázek též ilustruje koncentrace částic jednotlivých komponent při daných teplotách. Situace obdobná bude v případě molekuly  $SF_6$ , která je díky velkému množství nižších molekul o podstatnou míru složitější. [16, 19]



**Obr. 4.1:** Stupeň disociace a ionizace a rozklad molekuly v závislosti na teplotě pro dusík  $N_2$

Jedním z důvodů uvedení Obr. 4.1 je reprezentace vlivu ionizačních procesů na makroskopické definice fyzikálních a transportních vlastností daného plynu a výsledku. Reprezentuje tedy vliv na hoření spínacího oblouku a jeho spolehlivé uhašení, poněvadž množství energie spojené s elementárními reakcemi disociace a ionizace zásadně ovlivňuje termodynamické vlastnosti plynu, např. tepelnou vodivost, měrnou tepelnou kapacitu či tepelný obsah obloukového sloupce.

#### 4.1.2 Popis a kategorizace plazmatu obloukového sloupce

Z hlediska stavu materiálu se hmotě rozložené působením vysokých teplot na jednotlivé elektrony, kladně nabitě ionty a neutrální částice říká *plazma*. Plazma bývá obvykle označováno jako čtvrté skupenství hmoty. Takové označení nese díky tomu, že zhruba 99 % známého vesmíru se vyskytuje právě v tomto skupenství. Plazma je kvazineutrální soubor částic – celkový náboj kladných částic je vyrovnán s celkovým nábojem záporných částic. Plazma se tedy z celkového pohledu chová jako elektricky neutrální a vykazuje kolektivní chování – stav a pohyb částic není závislý jen na lokálních podmínkách, ale na celkovém stavu plazmatu. Základní skupiny plazmatu jsou dle složení částic následující:



- běžné plazma, kdy elektronové obaly jsou částečně poškozeny teplotou či tlakem a plazmatické chování je zajištěno díky volným elektronům;
- termonukleární plazma, v němž elektronové obaly jsou již plně rozrušeny a látka je směsí jader a elektronů. Toto plazma je charakteristické pro jádra hvězd, v nichž probíhá termonukleární syntéza;
- nukleonové plazma – dalším působením tlaku a teploty dojde k narušení jader atomů a plazma je směsí elektronů, protonů a neutronů;
- kvark-gluonové plazma, v němž jsou nukleony dalším působením vysokých energií rozloženy na kvarky a gluony. Přirozeně toto plazma existovalo jen asi deset mikrosekund po vzniku vesmíru, uměle bylo vytvořeno v CERNu roku 2000.

Zásadní význam pro klasifikaci má tlak a teplota, respektive hustota částic, což určuje kinetickou rovnováhu souborů částic. V následujícím textu dojde k omezení jen na termické a vysokotlaké plazma, což je případ právě elektrického oblouku. Modelování plazmatu spínacího oblouku je tak o poznání jednodušší, než např. modelování plazmatu v nízkotlakých reaktorech či plazmatronech. To je však opět kompetencí spíše teoretických fyziků.

Vznik spínacího oblouku je obecně složitý proces podmíněný dostatečným množstvím disociační a ionizační energie (dle Sahovy rovnice 4.1) a elektrickým polem. V elektrických přístrojích při vypínání lze vznik spínacího oblouku popsat následovně: rozpojením kontaktů přístroje prudce vzroste stykový odpor, vlivem Jouleových ztrát dojde k adekvátnímu ohřevu a odparu materiálu z kontaktů. To vytvoří kovové páry mezi kontakty, zároveň dochází k autoemisi vlivem silného elektrického pole, vzniká tedy vodivé prostředí mezi kontakty. Tak dojde k zapálení elektrického oblouku. Jouleovými ztrátami je prostředí dále ohříváno a ionizováno, což způsobuje stabilní hoření oblouku. Zároveň lze popsat zapálení oblouku vzniklého v důsledku přepěťové vlny jako: vysokou intenzitou elektrického pole na kontaktech dojde k autoemisi a vlivem silného elektrického pole dojde k vytvoření elektronových lavin a strimérů. Tím dojde k jiskrovému výboji mezi kontakty, čímž vznikne vodivý kanál. Při dostatečné energii na zdrojové straně dojde k zapálení oblouku. [45]

### 4.1.3 Stacionární a dynamický oblouk

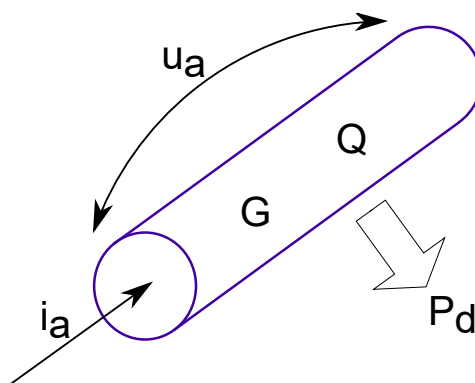
Pro elektrický spínací oblouk hořící ve vypínačích během vypínacího procesu platí následující vlastnosti:

- velká proudová hustota ( $1 - 10^5 [A/cm^2]$ ),
- nízká hodnota katodového úbytku (jednotky až desítky [V]),
- vysoká teplota elektrod podporující elektronovou emisi,
- vysoká teplota plazmatu mezi elektrodami ( $50.000 [K]$ ).

Z hlediska popisných makroskopických vlastností obloukového sloupce lze uvést veličiny dle Obr. 4.2, kde  $u_a$  a  $i_a$  představuje obloukové napětí a proud,  $G$  vodivost,  $Q$  tepelný obsah a  $P_z$  představuje ztráty odváděné z oblouku do okolí.

Stacionární oblouk se vyznačuje tím, že klíčové parametry oblouku uvedené na obr. 4.2 se v závislosti na čase téměř nemění a ztráty odváděné do okolí jsou rovné příkonu oblouku. Elektrický stav je obecně popsán voltamperovou charakteristikou, jež pro stacionární oblouk definuje rovnice Ayrtonové (rovnice 4.2).

$$U_a = \alpha + \beta I + \frac{\gamma + \delta I}{I_a} \quad (4.2)$$



**Obr. 4.2:** Ilustrační znázornění obloukového sloupce s klíčovými parametry

V rovnici Ayrtonové jsou  $U_a$  a  $I_a$  obloukové napětí a proud, konstanty  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  a  $\delta$  jsou konstanty závislé na uspořádání oblouku, jeho geometrii a materiálovém prostředí. Uvedená rovnice lze úpravami a sloučením konstant vyjádřit v následujícím tvaru:

$$U_a \cdot I_a^\sigma = konst. \quad (4.3)$$

Rovnice 4.3 je matematickým vyjádřením hyperboly a stacionární elektrický oblouk je tak popsán voltampérovou charakteristikou ve tvaru hyperboly, tedy obloukové napětí je nepřímo úměrné protékajícímu proudu. Stacionární oblouk byl historicky využíván v 19. století v obloukových lampách, dnes je jeho aplikace soustředována na využití v obloukových pecích či plazmatronech.

Vlivem vysokých teplot obloukového sloupce je však hořící oblouk charakterizován vlastním tepelným obsahem, který díky tepelné setrvačnosti nelze měnit skokově. Mírou této tepelné setrvačnosti je časová konstanta oblouku  $\tau$ , která charakterizuje rychlost odezvy sledované veličiny (obloukového napětí) na skokovou změnu vstupní veličiny (proudu). Klíčovým vztahem pro popis oblouku je energetická bilance dle rovnice 4.4. Ta říká, že příkon dodávaný do oblouku se rozděluje na hrazení ztrát oblouku  $P_d$  a změnu tepelného obsahu  $\frac{dQ}{dt}$ .

$$u_a \cdot i_a = \frac{dQ}{dt} + P_d \quad (4.4)$$

Z této rovnice lze určit časovou konstantu jako:

$$\tau = \frac{Q}{P_d} \quad (4.5)$$

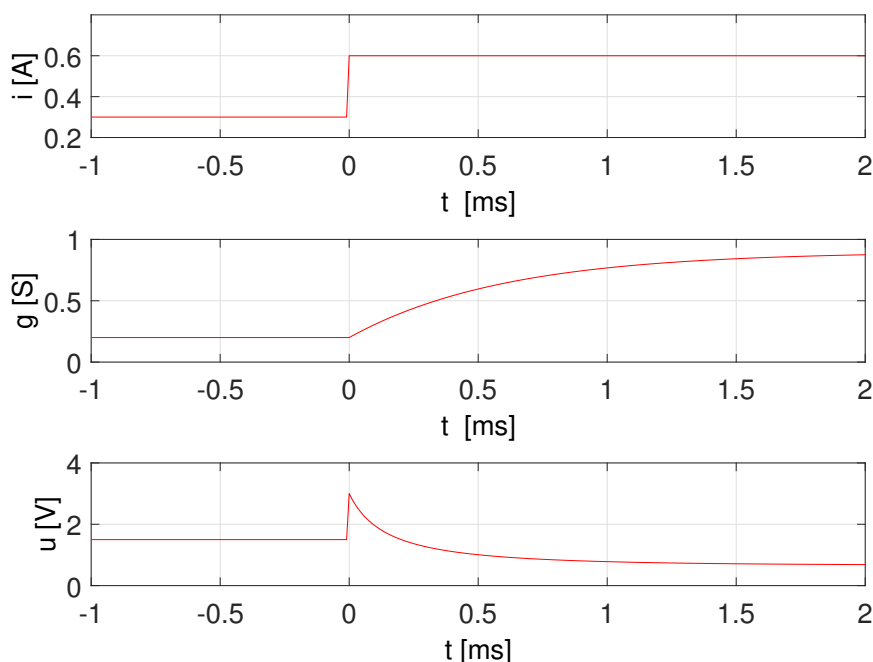
Velichiny  $Q$  i  $P_d$  jsou však nelineárně závislé na teplotě obloukového sloupce, proto časová konstanta  $\tau$  závisí na počátečních a okrajových podmínkách hoření oblouku a takto definovanou ji lze uvažovat jen v určitém rozmezí proudů a za určitých zjednodušujících předpokladů. Nicméně definici časové konstanty dle rovnice 4.5 lze pro modelování oblouku ve spínacích přístrojích uvažovat jako obecně platnou. Širšímu rozsahu případů je pak nutné uvažovat celé spektrum časových konstant.

Význam časové konstanty roste při určování průběhu vodivosti oblouku. Pro časovou změnu vodivosti oblouku platí:

$$\frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot [G_s - g(t)] \quad (4.6)$$

$$\frac{dg(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot g(t) = \frac{1}{\tau} \cdot G_s \quad (4.7)$$

Rovnice 4.7 je výchozí diferenciální rovnicí pro popis skokových změn elektrických obvodových veličin oblouku, kdy  $G_s$  udává konstantní vodivost, která odpovídá stacionárnímu napětí a procházejícímu proudu.



**Obr. 4.3:** Dynamický oblouk – ilustrace odezvy na skokovou změnu proudu

Chování dynamického oblouku je tedy závislé na mnoha faktorech. Pro návrh zhášecí komory je nutné prozkoumat možné stavy oblouku během spínacích operací, z čehož vzešel požadavek na podrobnější matematický popis oblouku. Tak vznikaly jednotlivé modely, které se lišily rozdílným náhledem na obloukový sloupec a předpokládaly rozdílná zjednodušení matematicko-fyzikálního popisu oblouku

## 4.2 Metodika modelování spínacího oblouku

Dle výše uvedených vlastností lze z elektrotechnického hlediska k oblouku, jakožto k objektu modelování, přistupovat buď jako k nelineárnímu prvku s proměnnými elektrickými parametry ( $u_a$ ,  $i_a$ ,  $R$ ,  $G$ ,  $P_d$ ,  $Q$ ) nebo jako ke sdružené úloze multifyzikálního pole, což vyžaduje znalost pokročilých matematických a fyzikálních postupů či využití softwareových výpočetních nástrojů.

Snahy o matematický popis elektrického oblouku probíhaly již od 19. století, na čemž v současné době staví zavedené black-box modely, které jsou již běžnou součástí knihoven modelovacích nástrojů pro snadnou reprezentaci chování oblouku. V polovině 20. století se však s masivním rozvojem výpočetní techniky a diferenciálního počtu dostávají do popředí i složité matematicko-fyzikální modely využívající metod FEA a CFD, které umožňují získat přesnější představy o oblouku a jeho parametrech napříč spektrem fyzikálních polí. [47]

### 4.2.1 Obvodové black-box modely oblouku

Historicky první snahy o podchycení chování oblouku byly odvozeny z experimentálních měření a byly použitelné pouze pro stacionární elektrický oblouk, byly založeny na rovnici Ayrtónové (dle rov. 4.2). Z tohoto vycházely původní jednoduché modely – první, **model definovaný obloukovým napětím**, byl jen v podobě napěťového zdroje s opačnou polaritou než je polarita vnějšího zdroje a tento napěťový zdroj byl vsazen do obvodu. Využíván byl pouze v energetice při obloukovém zkratu v rozvodech či při přepětových jevech. Posléze byla modelu přidána obecná váhová funkce  $e(t)$ , časově závislá, čímž byl model zdokonalen o zahrnutí dynamičnosti. [15, 18, 19]

V realitě však podmínky stacionárnosti oblouku nejsou příliš často splněny. Z toho důvodu a i v souvislosti s rozšířením soustav střídavého napětí a proudu byl zájem orientován více na dynamický oblouk a zároveň fyzikální procesy probíhající v oblouku. A tak se spolu s rozšířením střídavých rozvodů přešlo ke zkoumání dynamického chování oblouku definovaným jeho energetickou bilancí (dle rovnice 4.4). Z té byly následně odvozeny nejznámější black-box modely, na nichž byly založeny kybernetické modely (hojně využívané v druhé polovině 20. století) a které v modifikované podobě nacházejí uplatnění dodnes v řadě aplikací. Pro zpřesnění byly uvedené modely dále rozvíjeny a doplňovány o funkce a parametry pro přiblížení se realitě fyzikálních dějů. Původní kybernetické modely využívaly pro řešení odvozených rovnic analogové počítače, dnes jsou tyto modely řešeny numerickými iteračními metodami. Přes značné zdokonalení nedosáhly modely typu black-box nikdy obecné uplatnitelnosti díky omezené vypovídací schopnosti modelů silně závislé na vstupních parametrech a okrajových podmínkách. Například současné varianty kybernetických modelů jsou po sladění s experimentálními daty pro konkrétní typ vypínače výborně použitelné jen pro daný typ a velmi podobné typy vypínače, u konstrukčně odlišného vypínače s jinými podmínkami hoření oblouku však již dávají chybné výsledky.

Základními pilíři pro black-box modelování oblouku představují dvě nejznámější teorie – **Cassieho** a **Mayrova** teorie oblouku, obě zpracované ve 30. letech 20. století. Oba dva modely vycházejí z energetické bilance, ale liší se v předpokladech pro dynamické chování oblouku.

#### Cassieho model

Výchozí rovnicí pro modelování spínacího oblouku dle Cassieho je energetická bilance oblouku dle rovnice 4.4. Zjednodušujícími předpoklady Cassieho teorie jsou:

1. teplota oblouku  $T$ , obloukové napětí  $U_a$ , měrná vodivost  $\gamma$  a tepelná energie v jednotce objemu  $q$  jsou konstantní,
2. měrná vodivost plazmatu je úměrná teplu v něm akumulovaném,
3. průměr oblouku  $2r$  se mění v závislosti na procházejícím proudu.

Cassieho teorie je platná pro oblouk hořící v rychle proudícím prostředí, kdy médium proudí souhlasně s osou oblouku. Uplatňuje se zejména odvod ztrát prouděním z celého povrchu, čili veškerý příkon do oblouku se mění na tepelné ztráty odvedené proudícím médiem. To je v přímé ekvivalenci s tím, že předpokládáme konstantní teplotu oblouku  $T$ . Tím, že  $T$ ,  $U_a$ ,  $\gamma$  a  $q$  jsou konstantní, získáme pro válec oblouku jednotkové délky následující vztahy:

$$G = \pi \cdot r^2 \cdot \gamma \quad (4.8)$$

$$Q = \pi \cdot r^2 \cdot q \quad (4.9)$$

Pak tedy:

$$\frac{Q}{q} = \frac{G}{\gamma} = \pi r^2 = konst. \Rightarrow Q = \frac{q}{\gamma} \cdot G \quad (4.10)$$

Zderivováním rovnice 4.10 získáme vztah pro derivaci tepelného obsahu:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{q}{\gamma} \cdot \frac{dG}{dt} \quad (4.11)$$

Dosazením této rovnice do energetické bilance a postupnými úpravami získáme výslednou rovnici Cassieho teorie (4.12).

$$\frac{1}{g(t)} \frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left[ \left( \frac{u_a(t)}{U_{as}} \right)^2 - 1 \right] \quad (4.12)$$

Ve výsledné rovnici je obloukové napětí  $U_{as}$  v ustáleném stavu, které ve spínacích přístrojích běžně nabývá hodnot z intervalu 0,3kV až 5kV (v závislosti na napěťové hladině). Mění-li se stacionární stav oblouku, pak se průběh  $G$  a  $u_a$  mění podle výše uvedené diferenciální rovnice. Nový ustálený stav je charakterizován stejným úbytkem napětí na oblouku  $U_{as}$ , změní se poloměr oblouku  $r$  a s ním i nově ustálené hodnoty  $G$ ,  $Q$  a  $P_d$ . Cassieho model je nejlépe využitelný pro oblast velkých proudů, kdy je obloukové napětí téměř konstantní.

### Mayrův model

Obdobně jako Cassieho teorie, i Mayrova teorie vychází z energetické bilance oblouku, rozdíl je však ve zjednodušujících předpokladech. V souladu se skutečností je předpokládán exponenciální růst vodivosti v závislosti na akumulovaném teple. Dále se předpokládá, že průměr oblouku  $2r$  a ztráty konvekcí  $P_d$  jsou konstantní. Vycházíme z uvažované exponenciální závislosti vodivosti na akumulovaném teple, kterou logaritmujeme a poté zderivujeme tak, že získáme následující vztah pro derivaci tepelného obsahu:

$$\frac{dQ}{dt} = Q_0 \frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} \quad (4.13)$$

Dosazením výsledné rovnice do energetické bilance oblouku za  $dQ/dt$  získáme a následně upravíme do následující podoby, která tvoří popis dynamického chování oblouku dle Mayra:

$$\frac{1}{g(t)} \frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u_a(t) \cdot i(t)}{P_d} - 1 \right) \quad (4.14)$$

V rovnicích 4.12 a 4.14 je možné najít analogii v podobě zápisu i ve fyzikální interpretaci. Obě rovnice popisují dynamickou změnu vodivosti, zatímco však u Cassieho modelu je vstupní časově proměnnou veličinou jen obloukové napětí, u Mayrova modelu je to obloukové napětí i proud, které jsou spolu vázány právě změnou konduktivity. Zřejmý rozdíl je v předpokládaných konstantách. Tou je u Cassieho modelu konstanta  $U_{as}$ , která reprezentuje konstantní úbytek napětí na oblouku v průběhu hoření. Provedenými zkouškami a experimenty bylo zjištěno, že takový předpoklad platí jen ve stacionárních obvodech a střídavých obvodech kolem proudových maxim. Cassieho model je tedy aplikovatelný na silnoproudý interval, kdy dochází k plnému hoření oblouku a je jen nepatrná změna proudu. V Mayrově modelu se vyskytuje konstanta  $P_d$ , jež uvažuje konstantní odvod ztrát a je vhodný pro oblast malých proudů, což je rozhodující v okolí proudové nuly. To je rozhodující pro vypnutí vypínače, proto je vhodné při odvozování vypínací schopnosti klást větší

důraz právě na Mayrův model. [14, 16, 19, 44]

Další konstantou vyskytující se v obou rovnicích je časová konstanta oblouku  $\tau$ . Jak již bylo zmíněno, i ta je závislá na podmínkách hoření, proto se její hodnota v jednotlivých rovnicích bude lišit. V současné době pokročilé výpočetní techniky je možné modelovat oblouk kombinací Cassieho a Mayrova modelu. Dále lze různě navolit vstupní parametry (vodivost, průběh napětí, průběh proudění chladícího média) a tím získat přesnější výsledky o chování spínacího oblouku. Na tomto následně stavěly další modifikace těchto teorií.

### Schwarzův model

Schwarzův model oblouku je modifikací modelu Mayrova. V tomto případě jsou časová konstanta a chladící výkon závislé na vodivosti oblouku. Schwarzova rovnice má tedy tvar dle Rov. 4.15

$$\frac{1}{g(t)} \frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\tau \cdot g^\alpha} \left( \frac{u_a(t) \cdot i(t)}{P_z \cdot g^\beta} - 1 \right) \quad (4.15)$$

kde  $\alpha$  je parametr určující vliv vodivosti na závislost časové konstanty a  $\beta$  je parametr určující vliv vodivosti na závislost chladícího výkonu. Obě jsou empiricky volené konstanty. [46]

### Habedankův model

Habedankův model je sériové spojení dříve zmíněných modelů, tedy Cassieho a Mayrova, které jsou mírně modifikovány. Je použitelný tedy pro vysoké hodnoty proudu a pro hodnoty blízké nule. Sestává ze soustavy dvou diferenciálních rovnic, tedy modifikovaných rovnic Cassieho a Mayrovy a jedné rovnice algebraické.

$$\frac{1}{g_c(t)} \frac{dg_c(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \cdot \left[ \left( \frac{u_a(t) \cdot g(t)}{U_{as} \cdot g_c} \right)^2 - 1 \right] \quad (4.16)$$

$$\frac{1}{g_m(t)} \frac{dg_m(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left( \frac{u_a^2(t) \cdot g^2(t)}{P_d \cdot g_m} - 1 \right) \quad (4.17)$$

$$\frac{1}{g(t)} = \frac{1}{g_c(t)} + \frac{1}{g_m(t)} \quad (4.18)$$

V těchto rovnicích jsou  $g_c$  a  $\tau_c$  vodivost, resp. časová konstanta oblouku zvolená pro Cassieho model a  $g_m$  a  $\tau_m$  jsou vodivost, resp. časová konstanta oblouku zvolená pro Mayrův model. Habedankův model bývá obvykle v pokročilých výpočetních modelovacích nástrojích rozšířen o váhovou funkci, která v závislosti na průběhu periody mění váhu Cassieho či Mayrova modelu v sériovém zapojení. [44, 46]

### Schavemakerův model

Schavemaker zakládá svou teorii na Mayrově modelu a na závislosti chladícího výkonu na proudu vstupujícím do oblouku a řeší následující rovnici:

$$\frac{1}{g(t)} \frac{dg(t)}{dt} = \frac{d \ln g(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u_a(t) \cdot i(t)}{P_d + P_1 \cdot u_a(t) \cdot i(t)} - 1 \right) \quad (4.19)$$

kde  $P_d$  a  $P_1$  jsou konstanty závislé na odvodu ztrát z oblouku.  $P_d$  představuje chladicí výkon daný konstrukcí, tlakem a dalšími parametry pro prostředí, kde oblouk zkoumáme (zřejmě zhašecí komora výkonového vypínače). Konstanta  $P_1$  reguluje vliv elektrického proudu oblouku na chladicí výkon, proto představuje nárůst tlaku v komoře zapříčiněný činným oteplením hasícího média obloukem.

Po měření a porovnávání napětí v oblasti vysokých proudů došel Schavemaker [48] ještě k úpravě vztahu na následující podobu:

$$\frac{1}{g(t)} \frac{dg(t)}{dt} = \frac{d \ln g(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{u_a(t) \cdot i(t)}{\max(U_{as} \cdot |i|, P_d + P_1 \cdot u_a(t) \cdot i(t))} - 1 \right) \quad (4.20)$$

kde  $U_{as}$  je konstanta napětí oblouku v oblasti vysokých proudů. Je vidět, že jmenovatel členu v závorce obsahuje rozhodovací funkci, dle velikosti jednotlivých členů. Pokud je hodnota nastavena na nulu, je rovnice ve stejném tvaru jako v případě před touto úpravou. V oblasti vysokého proudu rovnice přejde do tvaru, kdy první člen ve jmenovateli je větší a rovnice je poté analogická s Cassieho rovnicí dle 4.12. Při průběhu v okolí proudové nuly lze opět ve jmenovateli díky rozhodovacímu členu a úpravami dojít k analogii s Mayrovou rovnicí dle 4.14. Schavemakerův model tak tvoří zajímavou a plynulou kombinaci obou modelů. [48]

### KEMA model

Tento model vytvořený nizozemskou elektroenergetickou laboratoří využívá tři korigovaných submodelů a jejich kombinací založených opět na rovnicích Cassieho a Mayra. Základem je diferenciální rovnice ve tvaru:

$$\frac{dg_i}{dt} = \frac{1}{\Pi_i \cdot \tau_i} \cdot g^{\alpha_i} \cdot i \cdot U_i - \frac{1}{\tau_i} \cdot G_i \quad (4.21)$$

kde  $g$  je elektrická vodivost oblouku,  $u_a$  jeho napětí,  $\alpha$  bezrozměrný parametr pro parametrizaci jednotlivých submodelů,  $\tau$  je časová konstanta jednotlivých submodelů,  $\Pi$  jsou tepelné ztráty odváděné z oblouku a  $i$  značí indexaci daného submodelu.

Následně je elektrická vodivost oblouku a obloukové napětí dáno vztahy:

$$\frac{1}{g} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{g_i} \quad (4.22)$$

$$u_a = \sum_{i=1}^3 u_i \quad (4.23)$$

KEMA model oblouku obsahuje pro každý submodel další množství nastavujících parametrů pro přiblížení se reálným měřeným průběhům. Tím je KEMA model unikátní. Díky jedinečné pozici této instituce tak může založit modelování oblouku a jeho chování na měřených datech z reálných vypínačů. Problém pak logicky nastává při externím přístupu k tomuto modelu, když dosažené výsledky jsou velmi úzce spjaté s volbou vstupních parametrů. To je však fakt, který je platný pro všechny zde uvedené modely a při jakémkoliv modelování oblouku je nutné mít jej na paměti. [49]

## 4.2.2 Fyzikální modely oblouku

Fyzikální modely jsou tou nejsložitější a zároveň nejpřesnější interpretací reálného oblouku. Zaměřují se na fyzikální popis elementárních reakcí v plazmatu na úrovni jednotlivých souborů částic. S rozsahem modelovaného celku roste i složitost a náročnost samotného řešení, proto se fyzikální modely zaměřují jen na vybrané části obloukového sloupce.

Jedná se o teoreticky velmi náročné modely, u nichž je velkým problémem vedle obrovské výpočetní náročnosti i schopnost definovat jednotlivé fyzikální či chemické reakce a procesy a jejich parametry.

Fyzikální modely jsou řešeny obvykle na makroskopické úrovni a vycházejí ze zákonů zachování hmoty, hybnosti a energie a z Maxwellových rovnic, přičemž i míra složitosti popisu oblouku jednotlivými rovnicemi se mění s ohledem na konkrétní aplikace. Při snaze zjednodušit matematickou náročnost modelů při současném zachování jeho vypovídací schopnosti byly v případě spínací techniky uplatňovány např. zónové modely, kde je oblouk rozdělen do jedné či více koncentrických zón s odlišným charakterem a probíhajícími procesy. Toto bylo použitelné zejména u vypínačů vn a vvn, kde je oblouk stabilizován ve zhášecí trysce a lze při běžném vypínání zkratových proudů uvažovat oblouk jako válcový objem se zřetelně oddělenými soubory jádra a obalu oblouku v teplotním profilu v závislosti na poloměru oblouku. [45, 50]

Pro detailnější simulace oblouku ve vypínačích při nestandardních stavech, kdy nelze uvažovat oblouk jako stabilizovaný válcový objem, je nutné vycházet z výše zmíněných rovnic. Základní matematický model je pak tvořen soustavou parciálních diferenciálních rovnic (význam jednotlivých symbolů uveden v [45]):

Zákon zachování hmotnosti:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{v}) = s_m \quad (4.24)$$

Zákon zachování hybnosti v inerciální soustavě:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.25)$$

Zákon zachování energie:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla [\vec{v} (\rho E + p)] = \nabla \left( k_{ef} \nabla T - \sum_j h_j \Phi_j + (\vec{\tau}_{ef} \vec{v}) \right) + s_h \quad (4.26)$$

Uvedené rovnice 4.24 až 4.26 doplňují rovnice pro řešení elektromagnetického pole, Jouleových ztrát a Lorentzovy síly, jež do vlastního matematického modelu proudění přidávají samotné elektromagnetické chování oblouku. S ohledem na elektrický oblouk jako vodič protékáný elektrickým proudem jde o elektrické pole proudové, magnetické pole je řešeno pro magnetický vektorový potenciál z důvodu silových účinků. Skalární potenciál elektrického proudového pole je řešen na základě kontinuity elektrického proudu dle rovnice 4.27, respektive 4.28:

$$\operatorname{div} \vec{J} = 0 \quad (4.27)$$

$$\operatorname{div} (\gamma (-\operatorname{grad} \varphi)) = 0 \quad (4.28)$$

Z hlediska magnetického pole je princip vyšetřování jeho účinků shodný jako pro běžný vo-



dič. Díky povaze elektrického oblouku je však docíleno specifického chování oblouku pod vlivem magnetického pole. Je možné dokázat, že silové účinky magnetického pole mezi dvěma paralelně umístěnými vodiči protékajícími proudem ve stejném směru budou působit tak, že vodiče k sobě budou přitahovány. Oblouk je možné si tak představit jako velké množství jednotlivých proudových vláken protékajících proudem ve stejném směru. Tyto síly tak budou vodiče koncentrovat a zejména pro elektrický oblouk tvořený plazmatem bude mít vliv těchto sil významný podíl na tvar oblouku. Zároveň dle uspořádání kontaktního ústrojí může mít oblouk charakter polouzavřené smyčky. V tomto případě se síly snaží tuto smyčku rozevřít a délka obloukového sloupce se tím zvětšuje. Toho je využito např. u spínacích přístrojů na úrovních nízkého napětí. Výpočet magnetického pole vychází z rovnice pro magnetický vektorový potenciál:

$$\Delta \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (4.29)$$

Vypočítaný magnetický potenciál je pak využit k výpočtu sil figurujících v rovnici 4.25.

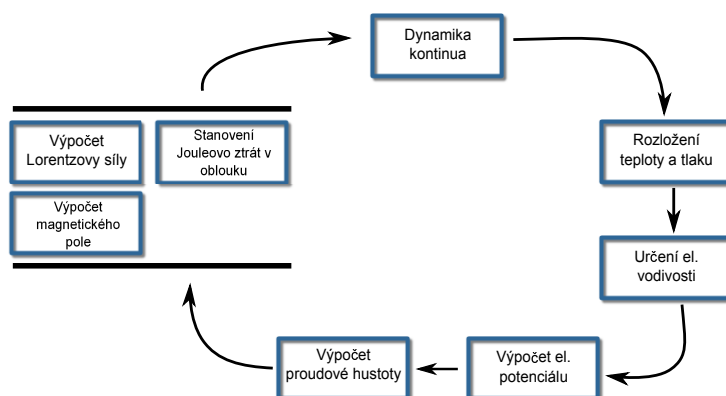
Dle požadované složitosti či dimenze matematického popisu oblouku lze pro jednoduché modely využít běžné iterační metody (např. Runge-Kutta), obvykle se však při řešení výše uvedených rovnic ve 2D či 3D využívá metod konečných prvků (MKP, či FEM – *finite element method*) či konečných objemů (MKO, či FVM – *finite volume method*). S ohledem na soustavu rovnic použitého fyzikálního modelu lze využít některý z dostupných simulačních CFD nástrojů, jako např. ANSYS – Fluent, CFX, COMSOL Multiphysics či další. Fluent, v současné době součást nástroje ANSYS, řeší pro libovolnou skalární veličinu  $\Theta_i$  následující rovnici:

$$\frac{\partial \rho \Theta_i}{\partial t} - \nabla \cdot (\Gamma_i \nabla \Theta_i) = S_i \quad (4.30)$$

Pro výpočet elektrického pole je pak vhodný následující tvar v rovnici 4.31, který koresponduje s rovnicí kontinuity elektrického proudu dle rov. 4.28.

$$-\nabla \cdot (\Gamma_i \nabla \Theta_i) = S_i \quad (4.31)$$

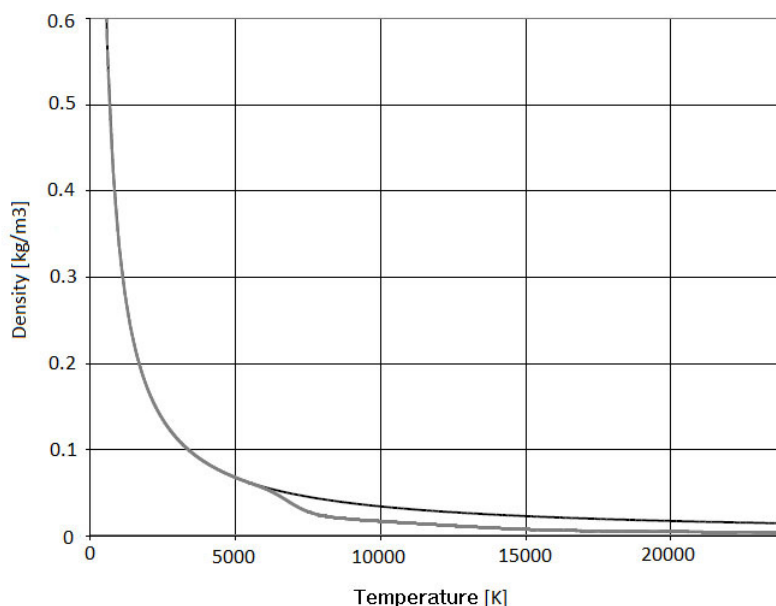
Výsledkem řešení rovnic 4.31, respektive 4.28 je rozložení elektrického potenciálu v dané oblasti a rozložení vodivosti, která je též funkcí teploty. Získané veličiny se pak využijí pro výpočet jednotlivých složek vektoru intenzity elektrického pole  $\vec{E}$  a následně výpočet proudové hustoty  $\vec{J}$  a rozložení Jouleových ztrát. Ty se pak v rovnicích mechaniky kontinua využijí jako zdrojový člen v zákonu zachování energie (rovnice 4.26). Postup řešení je zřejmý z Obr. 4.4.



**Obr. 4.4:** Schématický postup při řešení modelu elektrického oblouku [45]

Numerická simulace chování oblouku nemusí být na dané úrovni popisu fyzikálních dějů složitým problémem a s možnostmi dnešních výpočetních nástrojů je bez zásadních problémů zvládnutelná. Zřejmé problémy se však pro korektnější model objevují v popisu fyzikálních parametrů a transportních vlastností materiálů ve výjimečných stavech. Tím je míněno zejména termodynamické chování materiálů při velmi vysokých teplotách, složité geometrické uspořádání a vlastní nároky numerického řešení, které se vlivem vysokých gradientů teploty a tlaku stávají velmi citlivé.

Obvyklou možností, jak se vypořádat s výše zmíněnými požadavky, je modelování stlačitelného plynu s uvažováním hustoty dle stavové rovnice ideálního plynu, tedy při konstantní molekulové hmotnosti se hustota mění v závislosti na teplotě a tlaku. Tento postup je použitelný pro jednoduché (např. monoatomické) plyny v omezeném rozsahu teplot a tlaků. Například na obr. 4.5 je vidět odklon křivky hustoty reálného plynu  $N_2$  v závislosti na teplotě (při konstantním tlaku) od křivky spočítané dle stavové rovnice ideálního plynu. V reálné situaci při teplotě zhruba kolem 6500 [K] začíná docházet k disociaci molekuly. Je zřejmé, že tedy i v případě jednoduchého plynu  $N_2$  dochází k velkému odchýlení ideálního plynu od reálného, což se ještě více projeví u tak složitého plynu, jakým je  $SF_6$ .



**Obr. 4.5:** Závislost hustoty dusíku  $N_2$  dle stavové rovnice ideálního plynu a reálného plynu [45]

Z předchozích odstavců vyplývá, že pro plně vypovídající model je nutné uvažovat reálný plyn. Pro tuto možnost se v nástroji Fluent objevil specializovaný modul pro definici vlastních materiálových závislostí, jež se do vlastního modelu importují v podobě funkce psané v syntaxi jazyka C. Mezi takto definované závislosti patří hustota  $\rho$ , entalpie  $h$ , entropie  $s$ , specifické teplo či molekulová hmotnost, rychlost šíření zvuku, viskozita, teplotní vodivost, změna hustoty při změně teploty za konstantního tlaku  $\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_{p=\text{konst.}}$  a obdobně pak  $\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_{T=\text{konst.}}$ ,  $\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_{p=\text{konst.}}$  a  $\left(\frac{\partial e}{\partial p}\right)_{T=\text{konst.}}$ .

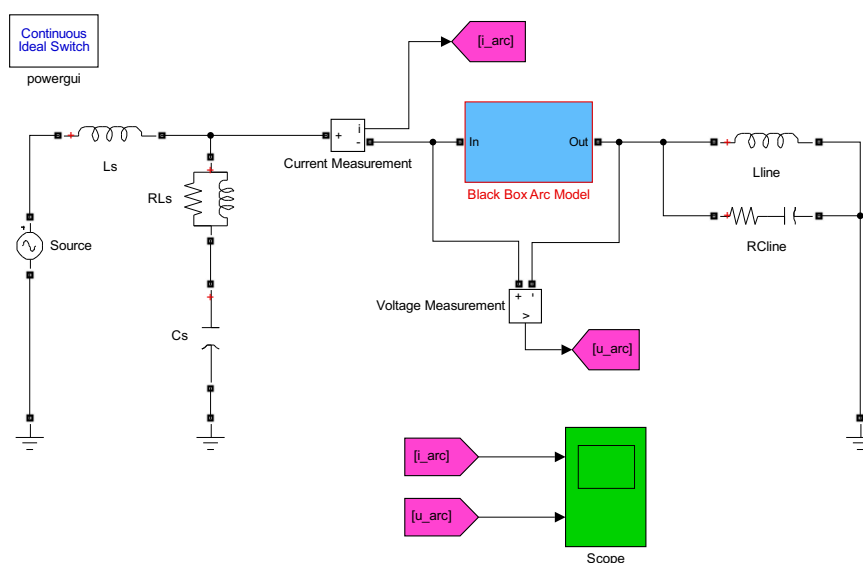
Definice uvedených vlastností závisí jen na uživateli, avšak pro realizovatelný výpočet a smysluplný výsledek musí být v souladu s termodynamickými principy. Samotná specifikace těchto parametrů pro složitější plyny je rovněž obtížným úkolem, který však již spadá zcela mimo problematiku jejich modelování, obvykle se však vychází z interpolace tabulkových či experimentálně zjištěných hodnot. [45]

## 4.3 Realizované modely elektrického oblouku

### 4.3.1 Obvodové black-box modely v prostředí Simulink

Některé z modelů uvedených v kapitole 4.2.1 byly realizovány v prostředí Simulink. Účelem modelování byla původně snaha o osvojení si technik a postupů při modelování s takto nelineárním prvkem, dále též potřeba získat pro oblast návrhu vypínačů a rozvodných systémů proudové a napěťové poměry oblouku hořícího ve vypínači. Účelem vyhotovených modelů se následně stala i možnost poměrně rychle a univerzálně porovnávat jednotlivé modely a vliv dílčích parametrů na výsledné průběhy. Zhotovení modelu jako black-box tak umožní v jediném obvodu měnit jednotlivé modely jako samotné bloky s implementovanými rovnicemi a popisem chování.

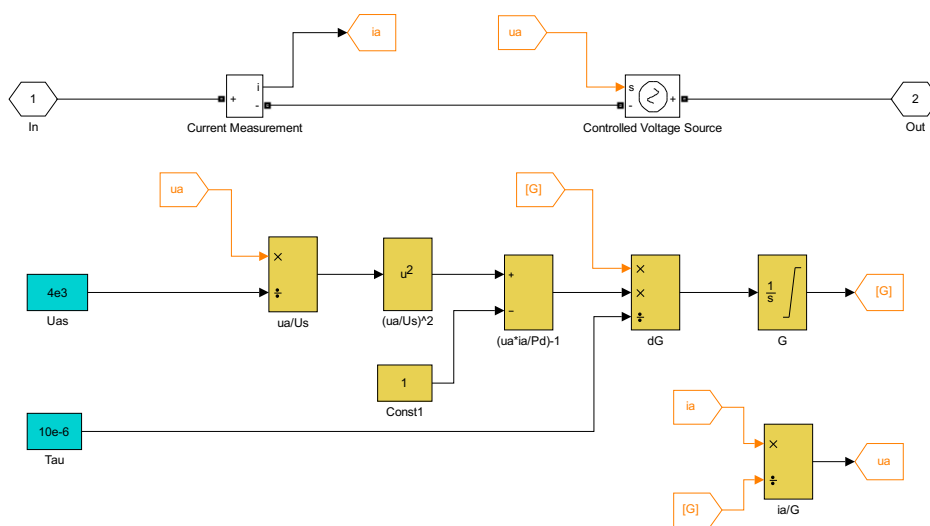
Modelovaný obvod je na Obr. 4.6, v němž je umístěný modrý blok s konkrétním modelem oblouku, zelený blok představuje osciloskop pro zaznamenání průběhů proudu a napětí, fialové bloky jsou pomocné prvky pro trasování signálu pro větší přehlednost modelu. Část obvodu na zdrojové straně je modelována jako syntetický zkušební obvod pro dvouparametrové zotavené napětí dle IEC, část na straně vedení (napravo od black-box modelu) představuje zkratované vedení s parametry představující 100 % svorkového zkratu (pro vypínaný proud  $I_v = 40 \text{ kA}$ )



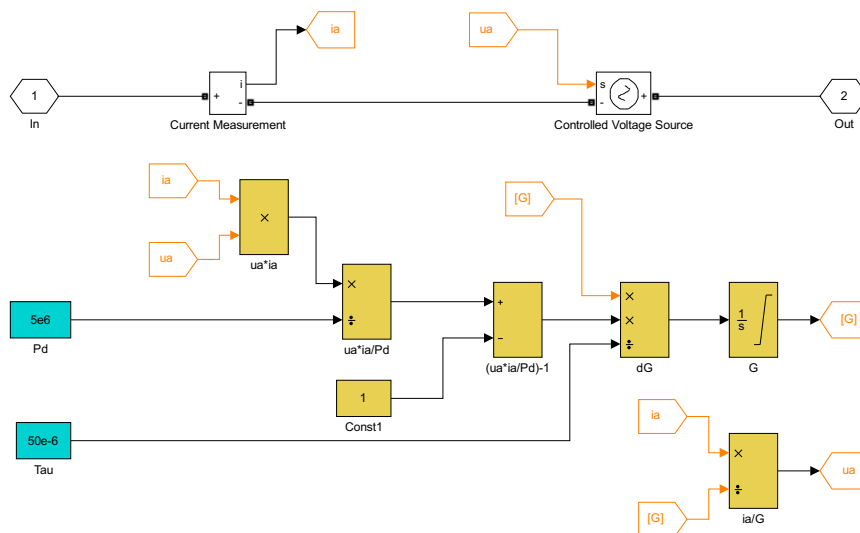
**Obr. 4.6:** Schéma modelovaného obvodu

Následující obrázky 4.7 až 4.10 ukazují obsah samotných modelovaných black-boxů. V horní části modelu se vždy nachází hlavní proudová větev, do níž je umístěno měření procházejícího proudu (následně využité ve výpočtu diferenciální rovnice). Samotný oblouk a jeho chování je pak koncipován napěťovými projevy bloku *Controlled Voltage Source*, který je zapojen v hlavní proudové větvi tak, aby působil proti napětí obvodu a fungoval jako pasivní odporový prvek. Do tohoto bloku je zaveden výstup z řešené diferenciální rovnice. Ta je realizována bloky podbarve-

nými žlutou barvou. Jako vstupní parametry do výpočtu (konstanty a vstupy jednotlivých modelů) jsou bloky podbarvené světle modrou barvou. Oranžově zakreslené pak jsou bloky pro trasování jednotlivých signálů a proměnných opět pro lepší orientaci v modelu.

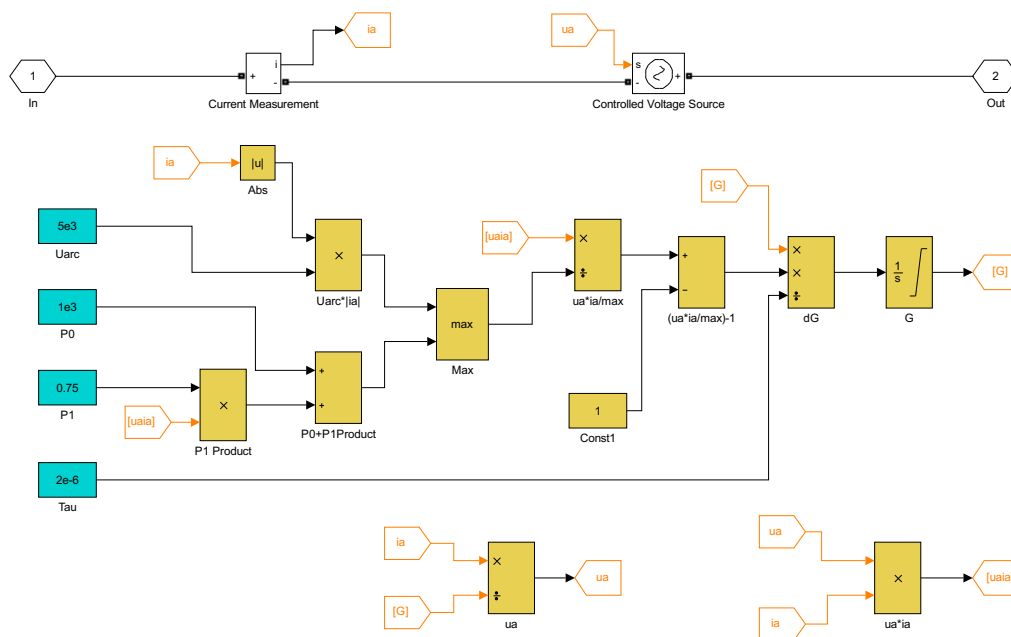


**Obr. 4.7:** Vnitřní schéma black-box modelu dle Cassieho

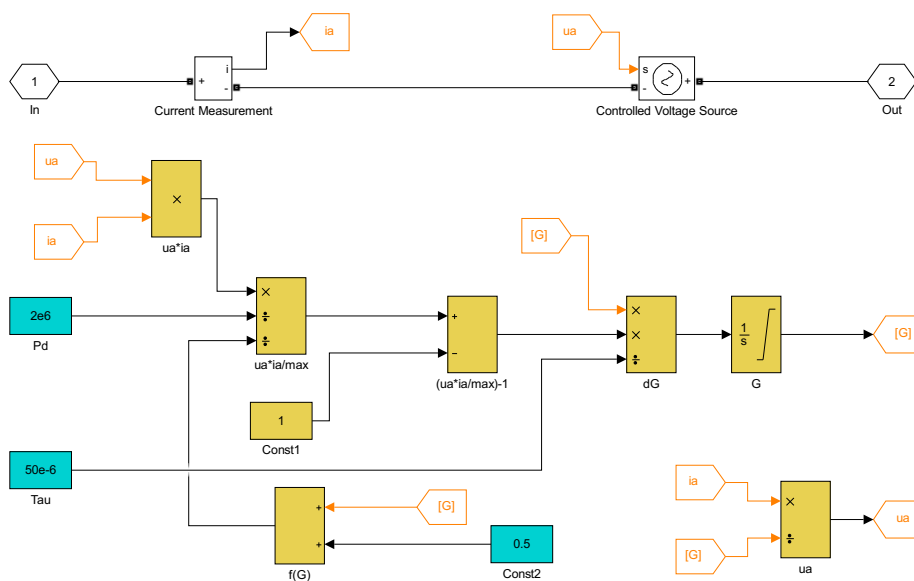


**Obr. 4.8:** Vnitřní schéma black-box modelu dle Mayra

Vzhledem k velké nelinearitě oblouku jako takového a vzhledem k množství vstupních parametrů je možné dopředu odhadovat, že úloha modelování oblouku bude složitá, nicméně využití

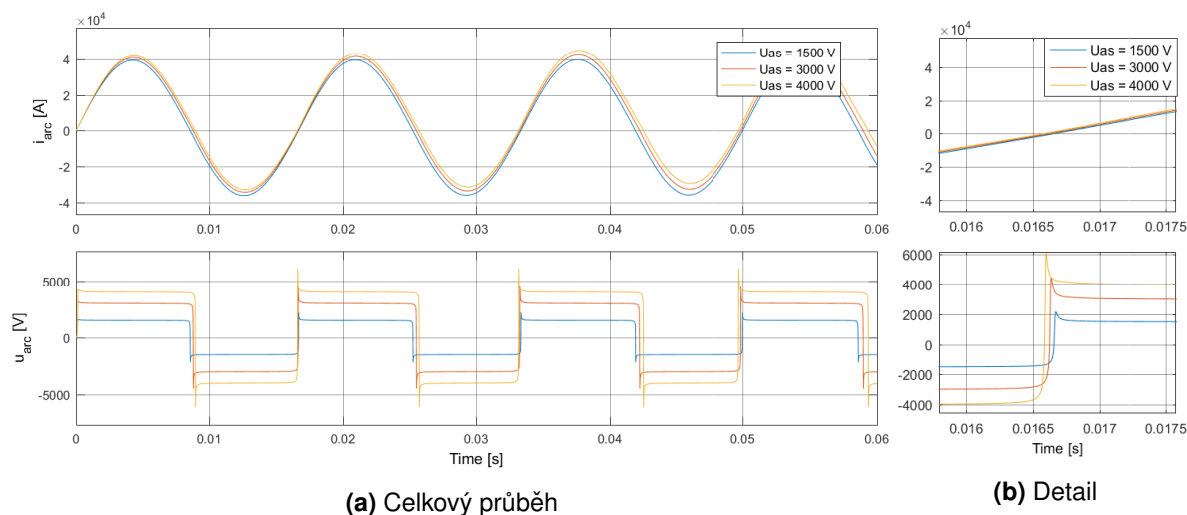


Obr. 4.9: Vnitřní schéma black-box modelu dle Schavemakera

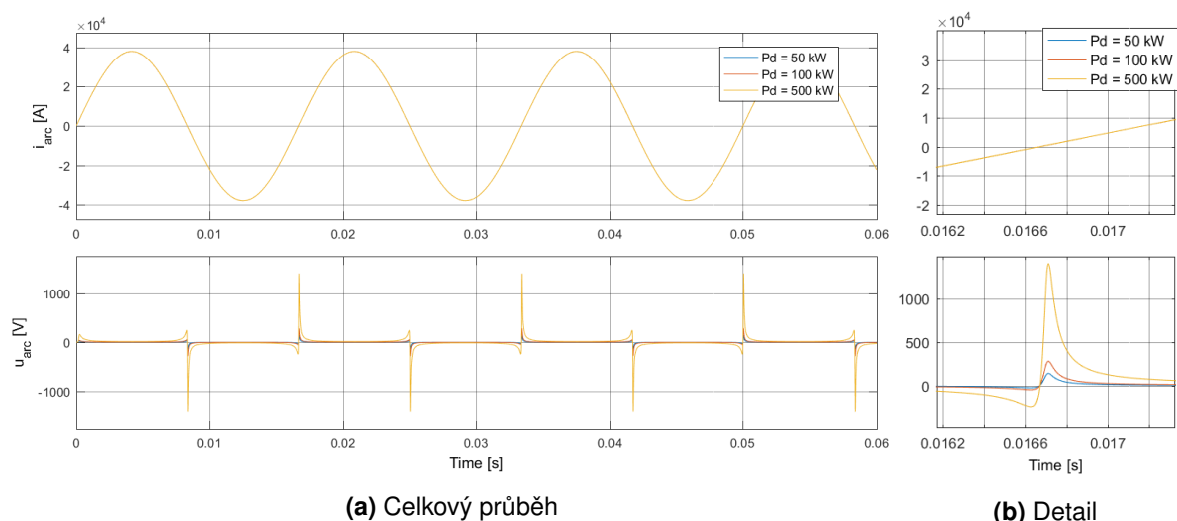


Obr. 4.10: Vnitřní schéma black-box modelu dle Schwarze

modelovacího prostředí Simulink tvoří usnadnění celého přístupu a snazší pochopení vlivu jednotlivých parametrů u dílčích teorií. Ze všech možných variant uvádím vždy jen variaci jednoho parametru pro jednu dílčí teorii.



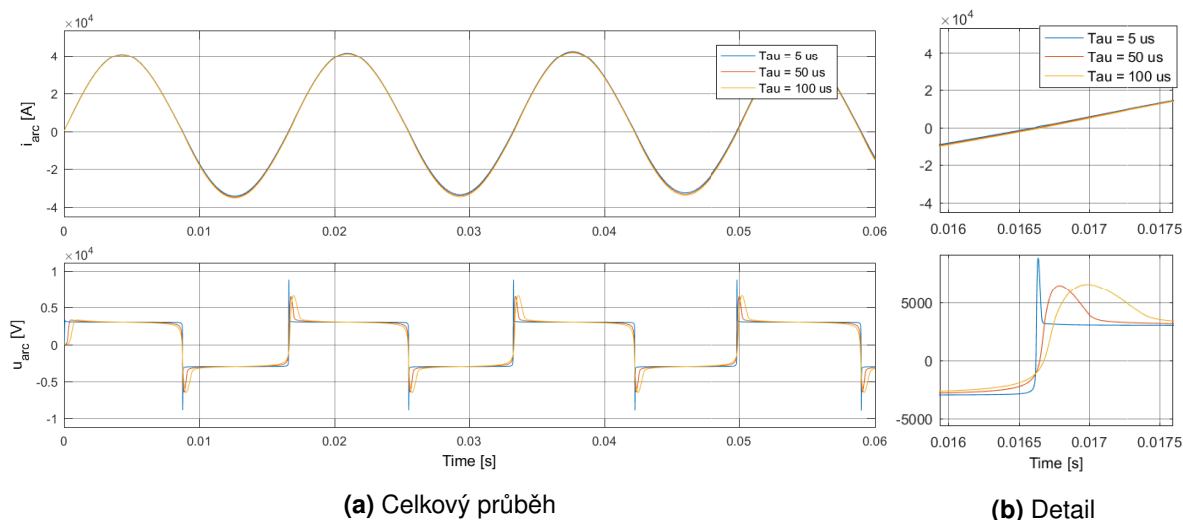
**Obr. 4.11:** Průběhy napětí a proudu Cassieho modelu pro různé hodnoty  $U_{as}$



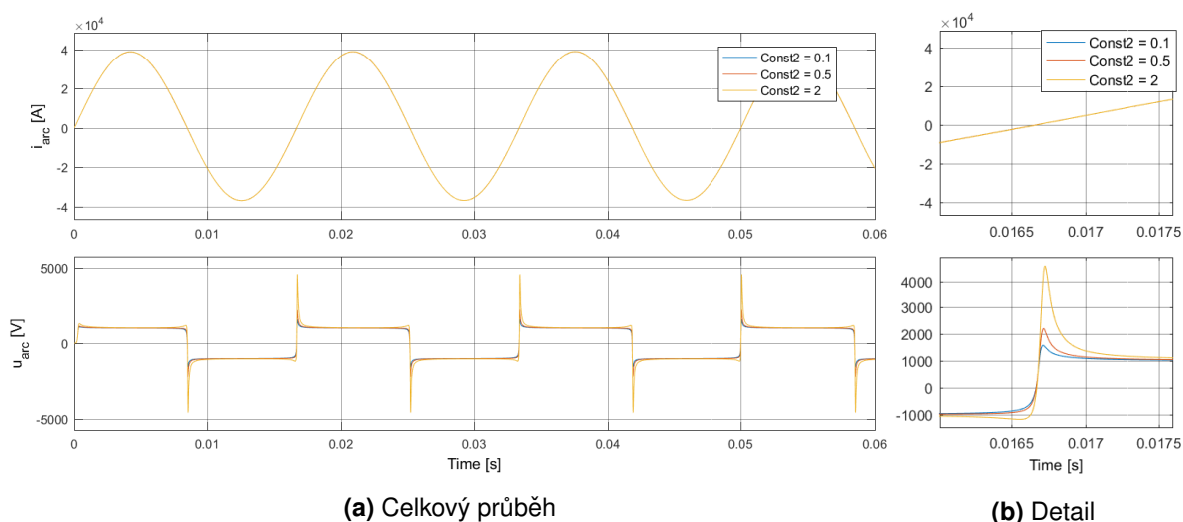
**Obr. 4.12:** Průběhy napětí a proudu Mayrova modelu pro různé hodnoty  $P_d$

V případě Cassieho modelu byla zvolena variace vstupního parametru  $U_{as}$ , který dle teoretického popisu stanovuje úbytek napětí na stacionárním oblouku, respektive úbytek napětí na oblouku v oblasti velkých proudů kolem amplitudy proudu. Tomu odpovídají výsledné průběhy uvedené na Obr. 4.11. Změny hodnoty  $U_{as}$  se projeví jinou hodnotou konstantního úbytku napětí v silnoproudém intervalu. Úměrně s tím se však změní i napěťové chování v okolí proudové nuly; je patrné, že vyšší hodnota  $U_{as}$  znamená i vyšší zapalovací špičku a též dřívější pokles napětí před proudovou nulou. Dále je nutné zmínit absenci zhášecí špičky těsně před proudovou nulou.

Zhášecí špička je mnohem patrnější na výsledných průbězích Mayrova modelu, které jsou uvedené na Obr. 4.12, přičemž model variuje hodnoty  $P_d$ . V porovnání s Cassieho modelem je možné si všimnout, že úbytek napětí v oblasti velkých proudů je malý, téměř nulový a mnohem větší rozmanitost lze zaznamenat v okolí proudové nuly. Celkový průběh ukazuje poměrně velké a ostré vrcholy – lze si všimnout, že zapalovací špičky jsou tím vyšší, čím je vyšší hodnota  $P_d$ . To je způsobeno tím, že příkon dodaný do oblouku musí být vyšší než odváděné ztráty (tedy  $P_d$ ). Dále je možné si všimnout zhášecích špiček, pro něž platí obdobná analogie a jejich patrnost tak potvrzuje



**Obr. 4.13:** Průběhy napětí a proudu Schavemakerova modelu pro různé hodnoty  $\tau$



**Obr. 4.14:** Průběhy napětí a proudu Schwarzova modifikovaného modelu pro různé hodnoty  $Const2$

použitelnost Mayrova modelu v okolí proudové nuly. Velikost a ostrost zapalovacích a zhašecích špiček je však též velmi silně závislá na velikosti časové konstanty  $\tau$ . Její vliv je diskutován na Schavemakerově modelu.

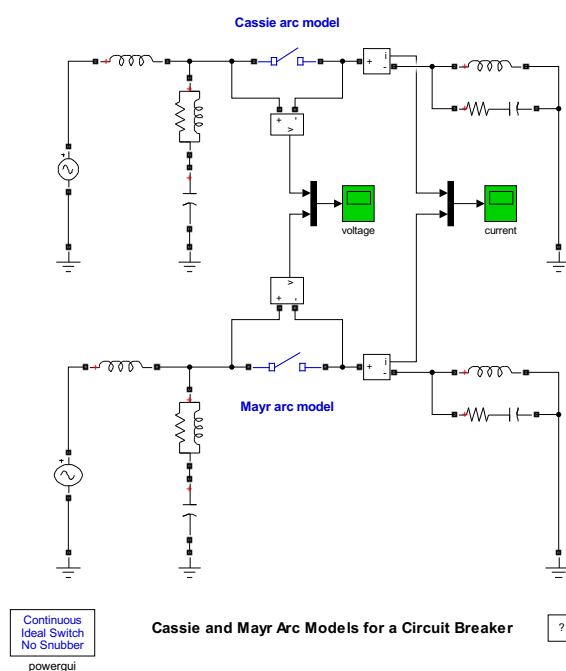
Výsledné průběhy pro Schavemakerův model jsou uvedeny na Obr. 4.13, kde je parametrem průběhů právě časová konstanta  $\tau$ . Je zřejmé, že zde platí opačná úměrnost než v předchozím případě – čím vyšší je hodnota časové konstanty, tím "měkčí" a "hladší" je průběh zapalovacích špiček, přičemž zhašecí špičky nejsou patrné. Čím vyšší je hodnota  $\tau$ , tím dřívější je pokles napětí k opačné polaritě, naopak čím nižší je hodnota  $\tau$ , tím je oblast před proudovou nulou pravoúhlejší.

Schwarzův model byl pro realizaci nejobtížnější – úvodní diskuse a variace vstupních parametrů a závislostí časové konstanty a ztrát z oblouku na výsledné vodivosti nepřinesly reálné a reálně odůvodnitelné průběhy a to ani při změnách nastavení numerického výpočtu. Z toho důvodu byl Schwarzův model modifikován a závislost vodivosti byla zohledněna pouze pro ztráty  $P_d$ . To je ve schématu Schwarzova black-box modelu dle Obr. 4.10 zohledněno parametrem  $Const2$ . Výsledné

průběhy jsou uvedeny na Obr. 4.14. Je zřejmé, že konstanta  $Const2$  se nejvíce projeví opět ve velikosti a ostrosti průběhu v okolí proudové nuly. Což je logické, protože změnou hodnoty  $Const2$  dojde ke změně ztrát  $P_d$ . Je zde tedy zřejmá korelace s chováním oblouku s Mayrovým modelem a vlivu velikosti ztrát  $P_d$ . Zásadním problémem však zůstává dosažitelnost a vypovídající hodnota vstupních parametrů a modelu samotného. Na tomto místě je tedy opět vhodné zmínit nutnost rozlišit situace, kdy ještě dochází k modelování chování oblouku a kdy už dochází k variaci hodnot a parametrů tak, aby byl výsledný průběh co nejpříznivější.

Úloha modelování oblouku je vysoce nelineární a řešené diferenciální rovnice tak vyžadují adekvátní nastavení numerického výpočtu. Pro takto nelineární systém a pro obecnou povahu problémů při využití systému Simscape Power Systems je zvolen řešič *ode23tb*, tedy numerické řešení tuhých problémů lichoběžníkovou metodou se zpětnou diferenciací s maximální velikostí kroku  $10^{-7}$  [s]. Tím je zajištěno dostatečně přesný průběh výpočtu v okolí proudové nuly vzhledem k nejmenší časové konstantě v modelovaném obvodu, kterou je časová konstanta oblouku v řádech  $10^{-6}$  [s].

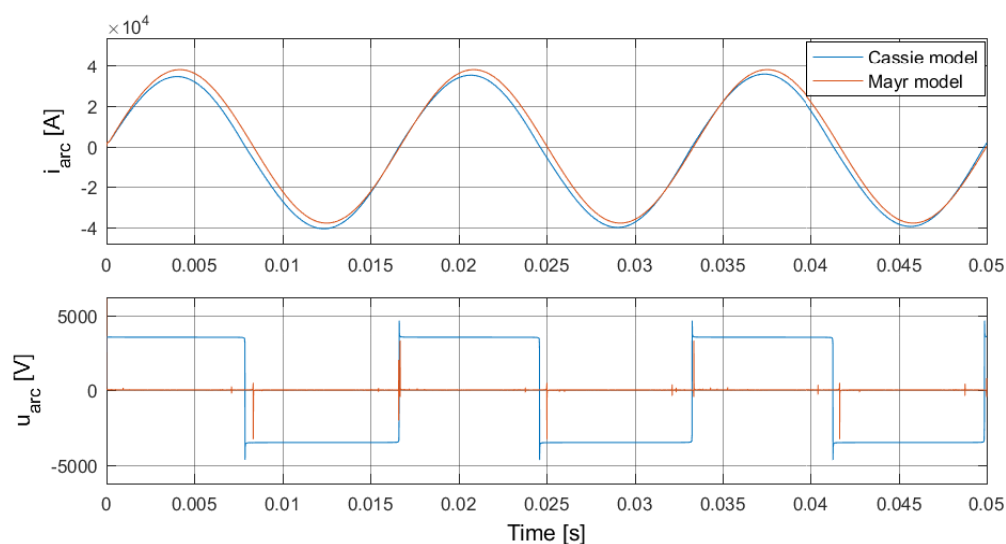
Vyhotovený model lze porovnat s obdobně konstruovanými modely. Nejjintuitivnější a nejsnadněji získatelné je porovnání s modelem, který je součástí ukázkových a výukových modelů balíku Simscape Power Systems, který je jedním z toolboxů Simulinku. Tento model, který je možné najít v knihovně nápovědy MATLABu jako *Cassie and Mayr Arc Models for Circuit Breaker* či zadáním výrazu *power\_arcmodels*, což je též jméno souboru, do příkazového řádku MATLABu. Model též využívá black-box přístupu, ale samotné řešení diferenciální rovnice provádí v rámci bloku *Differential Equation Editor*, který dovoluje přímo napsat řešenou diferenciální rovnici, což je přístup snadnější a elegantnější, ale pro uživatele neznalého problematiky může být neprůhledný a nepřehledný. Další rozdíl je např. v tom, že ukázkový model zavádí odezvu oblouku do sériově zapojeného řízeného zdroje proudu, na rozdíl od řízeného zdroje napětí použitého ve vlastních black-boxech dle obrázků výše. Veškeré další doplňující informace k ukázkovému modelu lze nalézt ve zdroji [52]. Schéma modelu *power\_arcmodel* je uvedeno na Obr. 4.15.



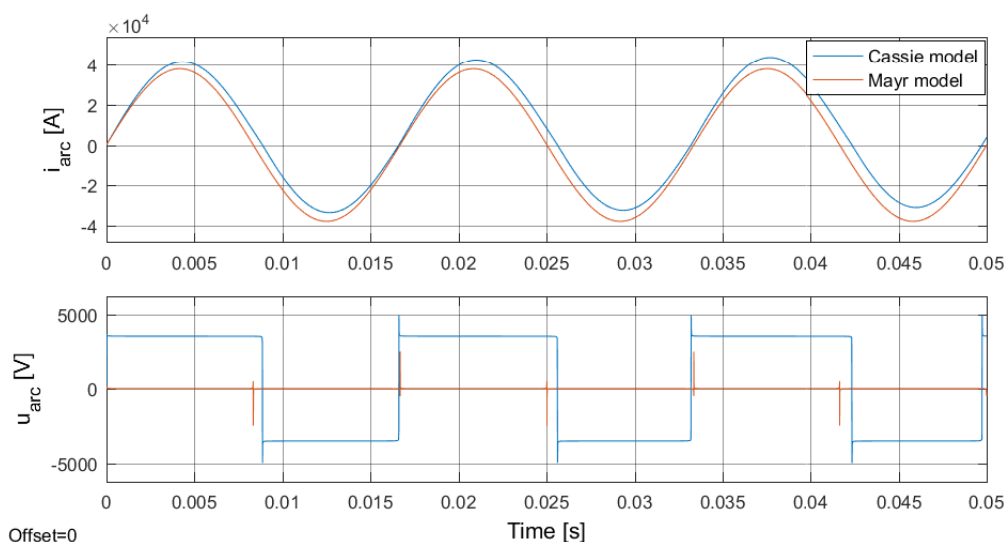
**Obr. 4.15:** Schéma ukázkového modelu *power\_arcmodels* v Simulink



Ukázkový model *power\_arcmodels* byl porovnán s vlastními vyhotovenými modely oblouku dle Cassieho a dle Mayra. Samotný *power\_arcmodels* však evidentně klade důraz pouze na principiální odzkoušení diferenciálních rovnic v modelovacím prostředí než na získání co nejpřesnějších průběhů proudu a napětí, o čemž svědčí např. již zmíněná netransparentnost samotného black-boxu, nenastavený řešič (který v případě *power\_arcmodels* pracuje s automaticky volenou délkou kroku, což vede na nepřesný výpočet v klíčových oblastech periody) a obtížnější úpravy samotného black-boxu. Na vyhotoveném ukázkovém modelu dále staví balíky modelů oblouku od stejného autorského týmu, které lze najít v [53, 54].



(a) Vzorový příklad *power\_arcmodels*



(b) Vlastní modely

**Obr. 4.16:** Průběhy napětí a proudu Cassieho a Mayrova modelu – porovnání vlastních modelů s modelem *power\_arcmodels*

Všechny black-boxy byly vloženy do totožného obvodu a byly nastaveny shodné vstupní parametry:  $U_{as} = 3500$  [V] a  $\tau = 1,5$  [ $\mu$ s] pro Cassieho model a  $P_d = 20$  [kW] a  $\tau = 0,6$  [ $\mu$ s] pro Mayrův model. Výsledné průběhy jsou na Obr. 4.16. Již na první pohled je možné si všimnout rozdílů mezi jednotlivými teoriemi, kdy průběh napětí Cassieho teorie má v silnoproudém inter-

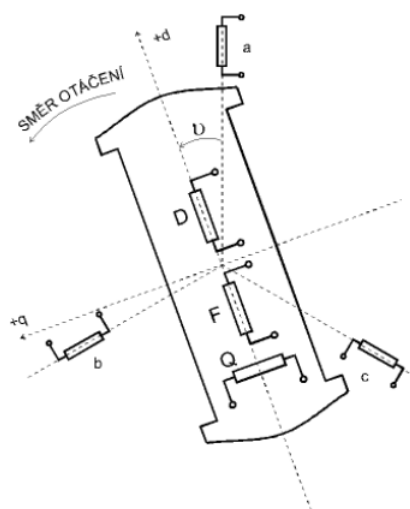
valu konstantní hodnotu přibližně rovnou  $U_{as}$ . Dále je možné si všimnout menších napěťových vrcholů u modelu *power\_arcmodels* mimo proudové nuly, ty jsou nejspíše způsobeny již zmíněným hrubým výpočtem diferenciálních rovnic (bylo ověřeno, že po nastavení stejných parametrů numerického výpočtu byly napěťové průběhy téměř totožné). Další rozdíl je patrný na průbězích proudu – červený průběh, proud obloukem dle Mayrovy teorie je shodný pro oba porovnávané modely (s amplitudou proudu kolem hodnoty 38 [kA]), rozdíl je však v průběhu proudu dle Casieho teorie. V případě modelu *power\_arcmodels* je proud menší (mírně posunutý o zápornou stejnosměrnou složku), přičemž u vlastního vyhotoveného modelu je tomu naopak. Veškerou variací vstupních parametrů a nastavení výpočtu se však příčinu a podstatu tohoto rozdílu nepodařilo odhalit či objasnit.

## 5 Generátorový zkrat

Generátor i celá větev vyvedení výkonu tvoří pojící část mezi elektrárnou a elektrickou sítí, do níž je dodáván elektrický výkon. Protože namáhání vinutí i magnetických obvodů synchronních alternátorů při poruchách je jedním ze zásadních a omezujících faktorů v návrhu a provozu těchto strojů a protože vypínání zkratů v těsné blízkosti točivých strojů je velice náročnou vypínací disciplínou, detailní analýza a odvození průběhu přechodných dějů je esenciální částí v rámci studie provozu synchronních alternátorů a bezpečného a spolehlivého návrhu systému elektrických ochran a přístrojového vybavení. Generátorovým zkratem v následujícím textu rozumíme zkrat na svorkách generátorů či v jejich těsné blízkosti, nikoliv vnitřní zkrat budícího či statorového vinutí.

### 5.1 Dohertyho zákon a zavedení Parkovy transformace

Odvození přesného a analytického řešení přechodných dějů na generátoru a generátorových zkratů je obecně velmi složité a již na počátku je nutné se uchýlit k několika zjednodušujícím předpokladům. Generátorový zkrat je složitý elektro-magneticko-mechanický přechodný děj. Zatímco elektromagnetické děje jsou velice rychlé a v podstatě nezávislé na vnějších podmínkách, mechanické děje jsou pak díky časovým konstantám významně delší. Pro řešení dostatečně krátkého přechodného děje, jako je např. zkrat, lze uvažovat konstantní rychlost stroje; v dostatečně krátkém časovém intervalu se tak mechanické poměry změní jen zanedbatelně málo. Pro řešení delších přechodných dějů by však bylo nutné zahrnout i mechanické parametry, jejich změnu a vliv na stabilitu a bezpečnost provozu.



**Obr. 5.1:** Náhradní schéma vinutí synchronních strojů v osách a, b, c, d, q

Při odvozování přechodného děje a aplikaci Dohertyho zákona popisujeme systém znázorněný náhradním schématem dle Obr. 5.1 napětíovými rovnicemi ve tvaru dle rovnice 5.1.

$$U_k = R_k I_k + \frac{d\Psi_k}{dt} \quad (5.1)$$

kde za index  $k$  lze dosadit a, b, c, D, Q, F, přičemž a, b, c označují tři fáze statorového vinutí, D a Q rotorové vinutí tlumiče v osách d a q, a F označuje rotorové budící vinutí. Systém lze rovněž popsat maticovou soustavou pro spřažené magnetické toky jednotlivých vinutí dle soustavy 5.2, kde prvky matice  $L_{ij}$  představují vzájemné indukčnosti mezi vinutími.

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \\ \Psi_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aD} & L_{aQ} & L_{aF} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bD} & L_{bQ} & L_{bF} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cD} & L_{cQ} & L_{cF} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DD} & 0 & L_{DF} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & 0 & L_{QQ} & 0 \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FD} & 0 & L_{FF} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_D \\ I_Q \\ I_F \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Vlastní a vzájemné indukčnosti rotorových vinutí jsou nezávislé na poloze rotoru, což je pro další výpočty výhodný stav. Nicméně vlastní indukčnosti statorových vinutí a vzájemné indukčnosti mezi státorem a rotorem již na poloze rotoru závislé jsou a tak se v rovnicích začne vyskytovat úhel natočení rotoru  $\vartheta$ , což situaci značně komplikuje. Proto při dalším řešení napěťových a tokových rovnic a odvozování průběhů proudů, momentů a napětí alternátorů využíváme tzv. *Parkovy transformace*. Ta spočívá v tom, že veličiny spojené se státorem převádíme do jedné vztažné rotující soustavy spojené s rotorem v osách **d** (podélná), **q** (příčná) a **0** (nulová). Zpětnou transformací pak lze získat požadované průběhy ve statorových fázích A, B, C. Předpoklady použití Parkovy transformace jsou:

- sinusové rozložení magnetického pole ve vzduchové mezeře,
- plná symetrie statoru,
- symetrie rotoru podle os *d* a *q*.

Výhoda Parkovy transformace spočívá v tom, že po její aplikaci bude mít rotor vůči statoru konstantní polohu definovanou zátěžným úhlem  $\theta$ . Harmonicky proměnné veličiny (vzájemné indukčnosti, reaktance, magnetické toky) tak přejdou do konstantní podoby. Zároveň tím dojde k eliminaci nelinearity diferenciálních vztahů mezi magnetickými toky, proudy a indukovanými napětími.

## 5.2 Třífázový zkrat na svorkách generátoru

### 5.2.1 Projevy statoru a rotoru a odvození analytického řešení

Protože předpokládáme lineární prostředí, lze při řešení zkratu postupovat metodou superpozice předporuchového stavu a přímých injektovaných změn daných poruchou. Řeší se tak dva navzájem nezávislé obvody – lineární aktivní bezporuchový obvod protékáný proudem  $i_{[u]}$  a lineární pasivní obvod s poruchovým proudem  $i_h$ . Vlastní poruchový proud má část ustálenou  $i_{hu}$  a volnou (přechodnou)  $i_v$ . Matematicky vyjádřeno dle rovnice 5.3.

$$i(t) = i_{[u]}(t) + i_{hu}(t) + i_v(t) \quad (5.3)$$

V rotoru bude situace obdobná, ale při zanedbání regulace buzení z rovnice vypadává ustálená hodnota poruchového proudu. Rotorový proud tak bude mít jen ustálenou složku  $i_{f[u]}$  a volnou poruchovou složku  $i_{fv}$ .

$$i_f(t) = i_{f[u]}(t) + i_{fV}(t) \quad (5.4)$$

Volné proudy statoru mají střídavou a stejnosměrnou složku. Stejnosemřná složka  $i_a$  odeznívá s časovou konstantou statoru  $T_a$  a vyvolá pulsující pole v rotoru (vlivem synchronních otáček). Toto pole je možné rozložit dle Leblancova teorému na dvě protisměrná točivá pole s poloviční amplitudou. Tím pádem v rotoru přibude volná střídavá složka  $i_{f\omega}$ , ve statoru pak přibude volná složka proudu s dvojnásobnou frekvencí  $i_{2\omega}$ .

Obdobně v budícím vinutí stejnosměrná složka  $i_{fa}$  odeznívá s časovou konstantou rotoru. Magnetické pole vytvořené tímto proudem je unášeno rotorem synchronními otáčkami a tím indukuje ve statoru napětí, které způsobí vznik volné střídavé složky ve statoru  $i_{\omega}$ . Magnetické pole vytvořené touto střídavou složkou je točivé a vzhledem k rotoru je v klidu. Tato volná střídavá složka odeznívá s časovou konstantou rotoru.

Ve výsledku tak v přechodném ději budou vystupovat tyto složky:

#### Statorové:

- $i_{[u]}$  – proud předcházejícího ustáleného stavu s frekvencí  $f$ ,
- $i_{hu}$  – ustálený proud vlastního poruchového stavu s frekvencí  $f$ ,
- $i_a$  – volná stejnosměrná složka zkr. proudu s časovou konstantou statoru,
- $i_{2\omega}$  – volná střídavá složka zkr. proudu s dvojnásobnou frekvencí, s časovou konstantou statoru,
- $i_{\omega}$  – volná střídavá složka zkr. proudu s frekvencí  $f$  a časovou konstantou rotoru.

#### Rotorové:

- $i_{f[u]}$  – stejnosměrný budící proud ustáleného provozního stavu,
- $i_{fa}$  – volná stejnosměrná složka budícího proudu s časovou konstantou rotoru,
- $i_{f\omega}$  – volná střídavá složka budícího proudu s frekvencí  $f$  a časovou konstantou statoru,
- $i_{D\omega}$  – volná střídavá složka proudu v tlumiči s frekvencí  $f$  a časovou konstantou statoru,
- $i_{Da}$  – volná stejnosměrná složka s proudu tlumiče s časovou konstantou rotoru.

Posloupnost příčiny a důsledku stejnosměrné složky statorového proudu je znázorněna následující relací:

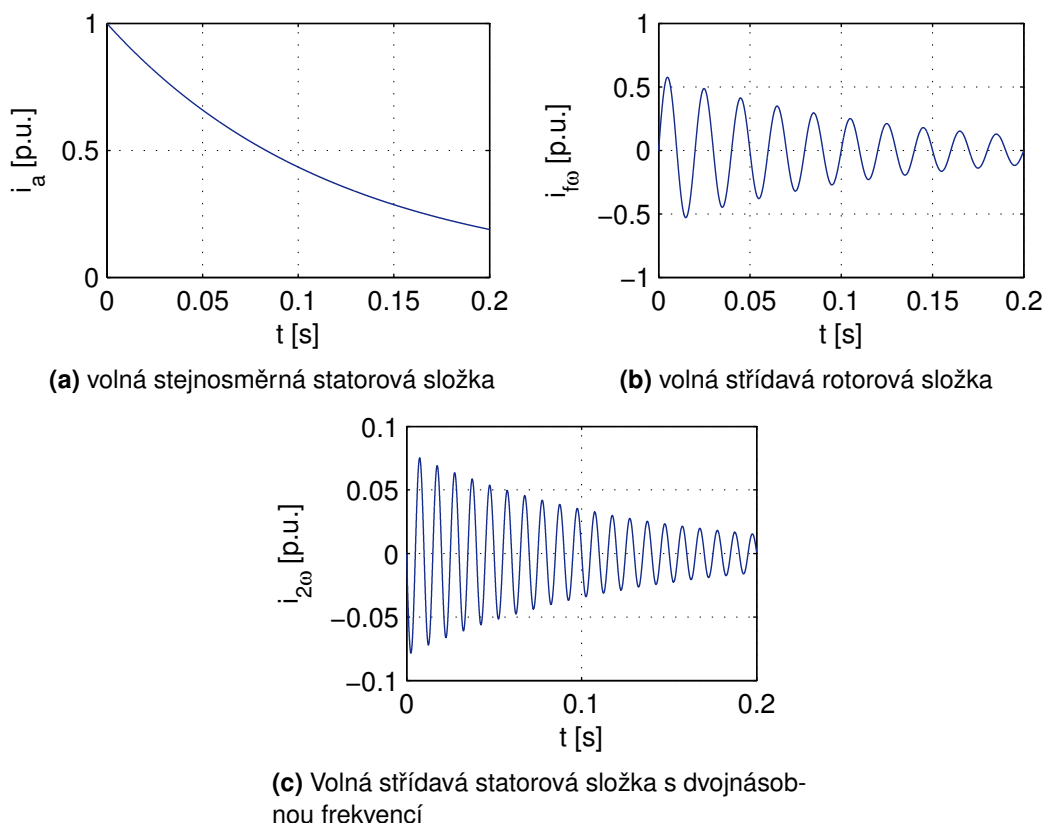
$$i_a \longrightarrow i_{f\omega} \longrightarrow i_{2\omega}$$

V případě stejnosměrné složky rotorového proudu bude tato relace jednodušší, přičemž celý řetězec se ale u stroje s tlumičem objeví dvakrát – jednou díky stejnosměrné složce v budícím vinutí a podruhé díky stejnosměrné složce v tlumiči:

$$i_{fa} \longrightarrow i_{\omega(1)}$$

$$i_{Da} \longrightarrow i_{\omega(2)}$$

Protože volná střídavá složka s dvojnásobnou frekvencí  $i_{2\omega}$  bývá obvykle velice malá, bude v následujícím textu zanedbávána. Zkratový proud pak lze členit pouze na dvě složky – střídavou složku o základní frekvenci a stejnosměrnou složku  $i_a$ . Další dekompozici jednotlivých složek do



**Obr. 5.2:** Přechodné složky způsobené stejnosměrnou složkou ve statoru

os  $d$  a  $q$  pak lze postupovat v odvození průběhu zkratového proudu. Při zanedbání činného odporu statorového vinutí lze určit ustálený proud předchozího stavu, který je rozhodující pro první okamžik přechodného děje. Rozepsáno do jednotlivých os bude mít tento stav následující podobu:

$$u_q = e + x_d i_d \quad (5.5)$$

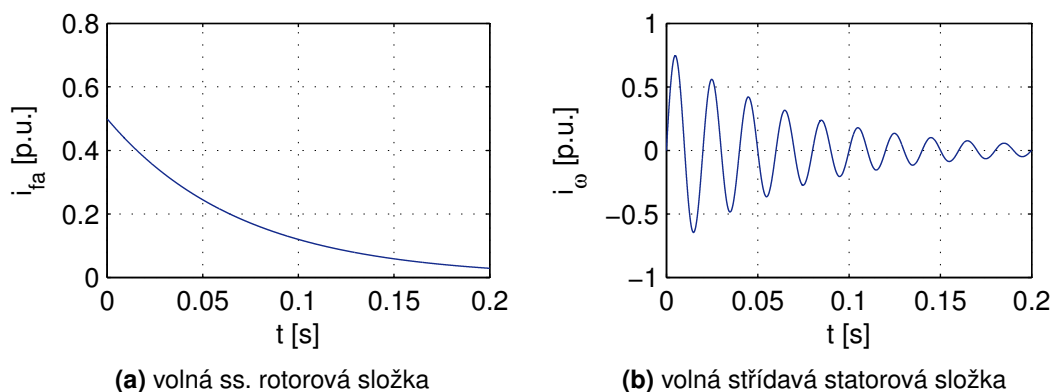
$$u_d = -x_q i_q \quad (5.6)$$

Touto metodikou lze odvodit vztahy pro všechny proudy, které se podílejí na výsledném zkratovém proudu, rozdílly budou ve velikostech indukovaných či elektromotorických napětí a zúčastněných reaktancích. V jednotlivých osách pak bude mít zkratový proud následující podobu (princip indexace je shodný s předchozím značením):

$$i_d(t) = i_{d[u]} + i_{dhu} + i_{da}(t) + i_{d\omega}(t) = i_{du} + i_{da} e^{-\frac{t}{T_d}} + i_{d\omega m} e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (5.7)$$

$$i_q(t) = i_{q[u]} + i_{qhu} + i_{q\omega}(t) = -\frac{u_{d[0]}}{x_q} + \frac{u_{d[0]}}{x_q} + i_{q\omega m} e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (5.8)$$

Výsledný průběh zkratového proudu ve statorovém vinutí získáme provedením zpětné Parkovy transformace pro proudy  $i_d$  a  $i_q$  a následnými úpravami. Výsledným vztahem popisujícím průběh zkratového proudu ve statorovém vinutí pak je následující rovnice 5.9.



**Obr. 5.3:** Přechodné složky způsobené stejnosměrnou složkou v rotoru

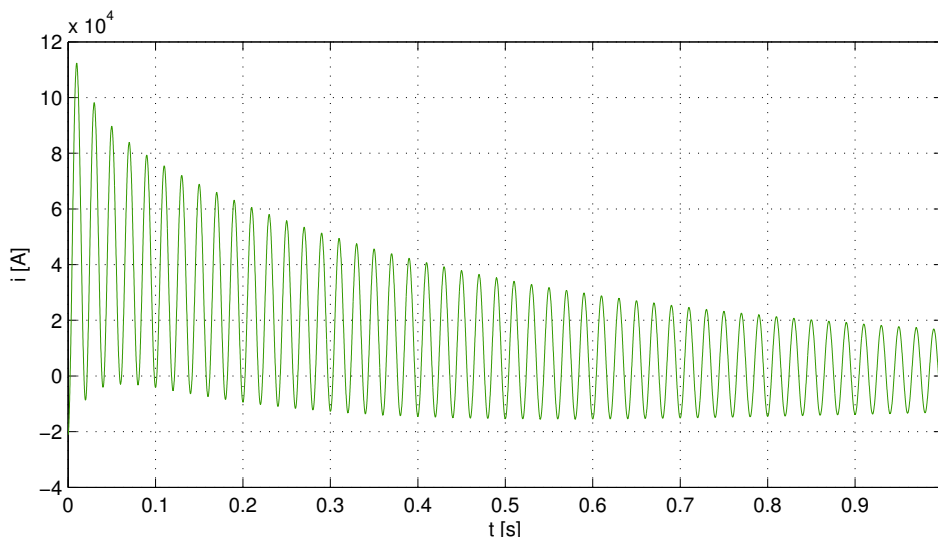
$$\begin{aligned}
 i_A = & -E_i \cdot \left[ \frac{1}{x_d} + \left( \frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \cos(\omega \cdot t + \alpha_0) + \\
 & + \frac{E_i}{2} \left( \frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(\alpha_0) + \\
 & + \frac{E_i}{2} \left( \frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x''_q} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(2\omega t + \alpha_0)
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Uvedený vztah platí pro proud ve fázi *a* stroje s tlumícím vinutím. Jedná se o poměrně složitý výraz, který však zcela respektuje veškeré elektrické přechodné děje uvnitř alternátoru během zkratu. První řádek představuje součet ustálené, přechodné a rázové složky. Jedná se o střídavé složky s periodickým průběhem o jmenovité frekvenci. Přechodná a rázová složka jsou exponenciálně tlumeny dle svých časových konstant. Druhý řádek vztahu 5.9 představuje stejnosměrnou složku. Jedná se o exponenciální průběh klesající ze své počáteční hodnoty, která je dána rázovou reaktancí v podélné i příčné ose a úhlem  $\alpha_0$ . Třetí řádek vztahu představuje střídavou složku proudu s dvojnásobnou frekvencí, která je tlumena exponenciálně s časovou konstantou statoru.

Podrobnější popis jednotlivých složek je uveden v následující podkapitole, nicméně je nutné zdůraznit vliv úhlu  $\alpha_0$ . Jedná se o úhel mezi podélnou osou stroje a osou jednotlivé fáze statorového vinutí v okamžiku vzniku zkratu. Jak je vidět, ovlivňuje průběh všech složek, nicméně největší vliv však má na velikost stejnosměrné složky. Úhel  $\alpha_0$  tak reprezentuje okamžik vzniku zkratu a definuje odezvu proudu na kontinuitu elektromagnetických veličin. Uvedený vztah 5.9 tedy platí i pro fáze *b* a *c*, kde se však změni právě úhel  $\alpha_0$  o hodnoty  $+120^\circ$  či  $-120^\circ$ .

## 5.2.2 Popis jednotlivých složek zkratového proudu

Pro zhodnocení průběhu zkratového proudu ve statorovém vinutí generátoru je vhodné diskutovat zúčastněné složky, jejichž výskyt je závislý na parametrech respektujících vzájemné elektromagnetické vazby mezi částmi stroje a parametrech respektujících aktuální provozní stav stroje a přidruženého obvodu. Je též vhodné poznamenat, že výsledné řešení v rovnici 5.9 není exaktně přesné, neboť k odvození došlo Parkovou transformací za určitých předpokladů. Též přesnost



**Obr. 5.4:** Průběh zkratového proudu v jedné fázi statorového vinutí

určení jednotlivých pasivních parametrů je v případě synchronních alternátorů velmi citlivá na přijatých předpokladech, postupu řešení při odvozování i měřících metodách. To může významně ovlivnit hodnoty jednotlivých složek a průběh výsledného proudu. Ilustrační obrázek jednotlivých složek je uvedený na Obr. 5.5, který zřetelně ukazuje velikost i tlumení každé složky.

### Ustálená složka

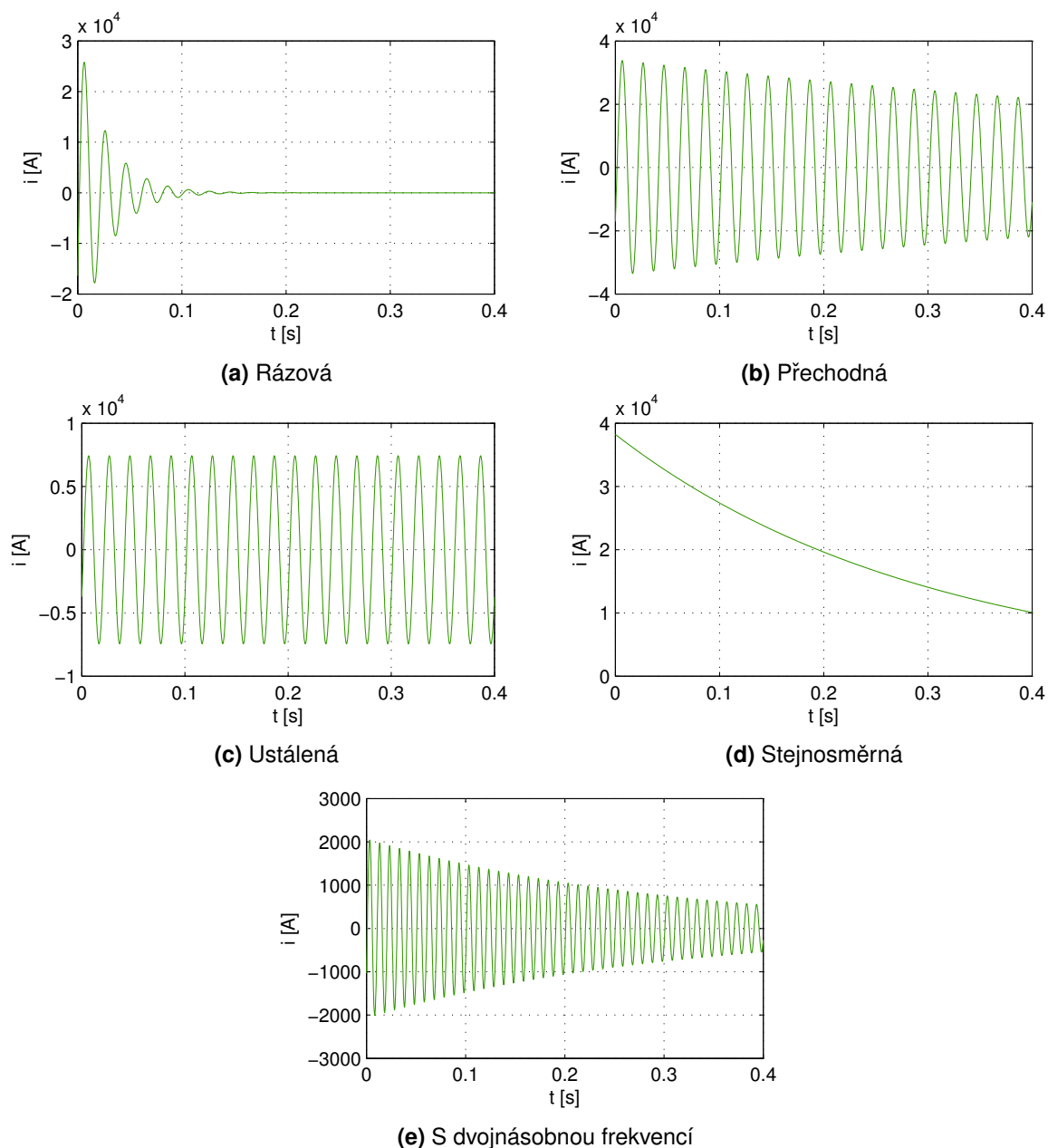
Ustálená složka je harmonicky proměnný průběh zkratového proudu poté, co odezní přechodný děj a nastane nový ustálený stav. Velikost průběhu je charakterizována synchronní reaktancí v podélné ose  $x_d$ , jejíž velikost bývá v případě turboalternátorů typově v rozmezí 1, 2 až 2, 4 [p.u.] a v případě hydroalternátorů 0, 8 až 1, 4 [p.u.]. Toto porovnání poměrně zajímavě říká, že ustálený zkratový proud turboalternátorů bude typově nižší než u hydroalternátorů. Ustálený zkratový proud lze určit na základě výsledků zkoušek nakrátko. V ustáleném stavu je impedance stroje dána činným odporem, rozptylovou reaktancí statorového vinutí a hlavní reaktancí reakce kotvy ( $x_d = x_{d\sigma} + x_{ad}$ ). Velikost synchronní reaktance lze určit např. skluzovou metodou a je jednou ze štítkových hodnot stroje.

### Přechodná složka

Přechodná složka vzniká jako důsledek volné stejnosměrné složky proudu v budícím vinutí (proud  $i_{fa}$ ). Je charakterizována přechodnou (tranzistní) reaktancí v podélné ose  $x'_d$ , jejíž velikost se typicky pohybuje v rozmezí 0, 15 až 0, 3 [p.u.] (turboalternátory) a 0, 2 až 0, 4 [p.u.] (hydroalternátory). Přechodná složka je harmonicky proměnná o jmenovité frekvenci a její průběh je exponenciálně tlumen dle přechodné časové konstanty  $T'_d$  vztahující se k budícímu vinutí. Vzhledem k tomu, že budící vinutí má obrovský poměr  $L/R$ , časová konstanta tudíž bude z pohledu dynamicky elektromagnetického přechodného děje velmi dlouhá; velikost časové konstanty  $T'_d$  se pohybuje v řádu několika setin sekundy až jednotky sekund.

$$T'_d \sim x_f / \omega r_f \quad (5.10)$$





Obr. 5.5: Jednotlivé složky generátorového zkratu

### Rázová složka

Rázová složka vzniká jako důsledek stejnosměrné složky proudu v tlumícím vinutí (proud  $i_{Da}$ ). Je charakterizována rázovou (subtranzitní) reaktancí v podélné ose  $x_d''$  a její velikost se pohybuje v rozmezí  $0,1 - 0,3 [p.u.]$ , přičemž u hydrolaternátorů bývá typově vyšší než u turboalternátorů. Porovnáním s velikostmi  $x_d$  a  $x_d'$  lze usoudit, že rázová složka proudu bude nabývat nejvyšších hodnot. Rázová složka je též harmonicky proměnná o jmenovité frekvenci a je exponenciálně tlumena dle rázové časové konstanty  $T_d''$ , která se pohybuje v řádu setin sekundy. Rázová složka je tedy svými hodnotami největší, ale po několika periodách je zcela utlumena. To je zásadní fakt pro hodnocení zkratového proudu v okamžiku těsně po vzniku zkratu, kdy na průběh má největší vliv právě rázová složka s ní spojený tlumič stroje.

### Stejnoseměrná složka

Stejnoseměrná složka, někdy též nazývaná jako *asymetrická složka* či *DC-komponenta* zajišťuje spojitost proudu v obvodu v okamžiku vzniku zkratu. Během působení stejnoseměrné složky dochází k vyrovnávání elektromagnetické energie v akumulovaných indukčnostech mezi stavem předchozím a stavem nově ustáleným. Stejnoseměrná složka vzniká ve statorovém vinutí a exponenciálně klesá ze své počáteční hodnoty s časovou konstantou statoru  $T_a$ . Při odvozování  $T_a$  se vychází z náhradních schémat stroje v jednotlivých osách.

$$T_a = \frac{2x_d''x_q''}{\omega r (x_d'' + x_q'')} \quad (5.11)$$

Průběh stejnoseměrné složky nejvíce ovlivňuje zejména tlumič a jeho reprezentace v podélné i příčné ose. Časová konstanta  $T_a$  je též nepřímo úměrná odporu statorového vinutí. Vyšší činný odpor statoru povede k rychlejšímu útlumu stejnoseměrné složky. Velikost stejnoseměrné složky je však nejvíce závislá zejména na okamžiku vzniku zkratu a míře energie uložené v magnetickém obvodu. Tento okamžik je pro alternátory v rámci vztahu 5.9 reprezentován členem  $\cos(\alpha_0)$ . Pokud je v okamžiku vzniku zkratu podélná osa stroje souhlasně s osou vinutí statorové fáze, pak sprážený magnetický tok je maximální, průběh indukovaného napětí má nulovou hodnotu a proud nabývá svého maxima a vyvine se tudíž maximální stejnoseměrná složka, protože platí:

$$\cos(\alpha_0) = \cos(0) = 1 \quad (5.12)$$

Díky tomu, že člen  $\cos(\alpha_0)$  vystupuje ve vztahu pro všechny tři fáze a díky tomu, že platí vzájemné natočení fází o  $\pm 120^\circ$  bude součet stejnoseměrných složek ve všech fázích roven nule.

### Složka s dvojnásobnou frekvencí

V průběhu zkratového proudu se projeví též složka proudu o dvojnásobné frekvenci. Ta vzniká jako důsledek volné střídavé složky proudu rotoru a její velikost je dána rázovou reaktancí v podélné i příčné ose. Díky tomu, že hodnoty  $x_d''$  a  $x_q''$  jsou si velice blízké, tak složka proudu s dvojnásobnou frekvencí bude velice malá. Její velikost obvykle bývá nulová a složku proudu s dvojnásobnou frekvencí lze ve vybraných případech zcela zanedbat.

| Složka        | Počáteční hodnota   | Frekvence     | Časová konstanta |
|---------------|---|---------------|------------------|
| ustálená      | $\frac{E_i}{x_d}$   | fundamentální | $\infty$         |
| přechodná     | $E_i \left( \frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right)$                         | fundamentální | $T_d'$           |
| rázová        | $E_i \left( \frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right)$                       | fundamentální | $T_d''$          |
| stejnoseměrná | $\frac{-E_i}{2} \left( \frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q'} \right) \sin(\alpha)$ | x             | $T_a$            |
| dvojnásobná   | $\frac{-E_i}{2} \left( \frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q'} \right)$            | dvojnásobná   | $T_a$            |

Tab. 5.1: Přehled vlastností složek generátorového zkratu

## 5.3 Namáhání generátorového vypínače při vypínání 3f zkratu na svorkách alternátoru

### 5.3.1 Definice úlohy, postup a parametrické zadání

Pro zhodnocení nebezpečí narušeného vypínání a analýzu oddálených proudových nul při asymetrických zkratech se v této části práce věnují porovnání namáhání vypínače při zkratech na svorkách stroje s hladkým rotorem a stroje s vyniklými póly s cílem posouzení specifík namáhání vypínačů pracujících u těchto strojů. Toto porovnání budiž zaměřeno na analýzu vztahu pro namáhání vypínače, který dává do součinu derivaci proudu a strmost zotaveného napětí v okamžiku průchodu proudu nulou, dle následujícího vztahu:

$$Q_i = \frac{di}{dt} \cdot \frac{du_{zn}}{dt} \quad (5.13)$$

Zdroj [60] obsahuje totéž vyhodnocení pro dva reálné stroje o srovnatelných výkonech, turboalternátor z klasické tepelné elektrárny Pruněrov a hydroalternátor z vodní elektrárny Dalešice. Pro analýzu v této práci jsou voleny jiné, srovnatelné stroje s typizovanými, reálnými hodnotami. Parametry strojů, pro něž byla provedena analýza, jsou uvedeny v Tab. 5.2. Hodnoty analyzovaných strojů jsou získány ze zdroje [61] a spadají do typového rozsahu.

|         |        | Turboalternátor | Hydroalternátor |
|---------|--------|-----------------|-----------------|
| $x_d$   | [p.u.] | 2.00            | 1.15            |
| $x'_d$  | [p.u.] | 0.29            | 0.37            |
| $x''_d$ | [p.u.] | 0.17            | 0.24            |
| $x_q$   | [p.u.] | 2.00            | 0.75            |
| $x''_q$ | [p.u.] | 0.18            | 0.23            |
| $T_a$   | [s]    | 0.278           | 0.16            |
| $T'_d$  | [s]    | 0.86            | 1.80            |
| $T''_d$ | [s]    | 0.114           | 0.262           |
| $P_n$   | [MW]   | 110             |                 |
| $U_n$   | [kV]   | 15              |                 |
| $f_n$   | [Hz]   | 50              |                 |

Tab. 5.2: Parametry zkoumaných alternátorů

Cílem analýzy je vyhodnocení namáhání vypínače v okamžiku průchodu proudu nulovou hodnotou v závislosti na různě velké asymetrii zkratového proudu, včetně vzájemného porovnání mezi stroji s hladkým rotorem a s vyniklými póly. Výchozím bodem je rovnice pro generátorový zkrat 5.9, kde parametrem udávajícím asymetrii proudu je člen  $\alpha_0$ . Ten svojí velikostí definuje velikost vyvinuté stejnosměrné složky. Dále byl zvolen postup dle následujících odstavců.

#### 1. Dosazení parametrů a vykreslení zkratového proudu:

Parametry z Tab. 5.2 byly dosazeny do rovnice 5.9 a byl vykreslen zkratový proud pro různě velkou asymetrii, tedy pro úhel  $\alpha_0$  od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  s krokem  $5^\circ$ .

#### 2. Odečtení času $t_0$ :

Z průběhů byl odečten čas prvního průchodu proudu nulovou hodnotou, tedy okamžik, v němž

vyhodnocujeme namáhání vypínače.

### 3. Stanovení strmosti proudu v čase $t_0$ :

Zderivování vztahu 5.9 získáme následující vztah (5.14) popisující průběh derivace zkratového proudu<sup>1</sup>. Pro získání strmosti proudu v okamžiku  $t_0$  byl do vztahu za čas  $t$  dosazený právě tento čas  $t_0$  odpovídající průběhu při konkrétní hodnotě úhlu  $\alpha_0$ .

$$\begin{aligned} \frac{di_a(t)}{dt} = & -\sqrt{2}E_i \cos(\omega t + \alpha_0) \cdot \left[ \left( \frac{1}{x_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \cdot \frac{1}{T'_d} \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x''_d} \right) \cdot \frac{1}{T''_d} \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] - \\ & -\sqrt{2}E_i \omega \sin(\omega t + \alpha_0) \cdot \left[ \left( \frac{1}{x_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x''_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} - \frac{1}{x_d} \right] - \\ & -\frac{\sqrt{2}E_i}{2} \cos(\alpha_0) \cdot \left( \frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) \cdot \frac{1}{T_a} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \end{aligned} \quad (5.14)$$

### 4. Stanovení strmosti zotaveného napětí v čase $t_0$ :

Při určení druhého členu v součinu 5.13 je nutné diskutovat komplikaci, kterou přináší absence přímé vazby mezi strmostí zotaveného napětí po přerušení proudu a velikostí asymetrie zkratového proudu, což s sebou přináší nemožnost exaktně přesně určit hodnotu  $(du_{zn}/dt)_{t_0}$ . Je tedy nutné provést odvození strmosti zotaveného napětí v závislosti na efektivní hodnotě vypínaného proudu. Pro tento účel je nutné zjistit efektivní hodnotu vypínaného proudu  $I_v$  v okamžiku  $t_0$ .

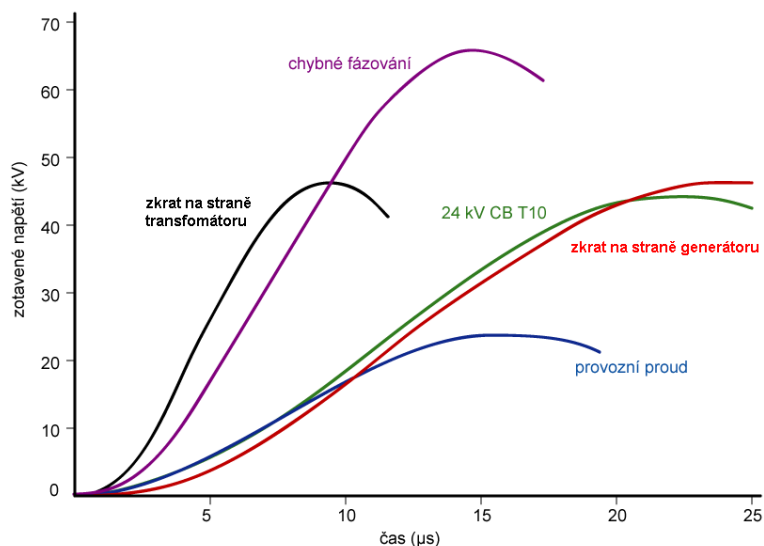
Souvislost s vypínaným proudem je možné získat z podrobného studia příčin některých nevytřípnutí, protože jak již bylo zmíněno, průběh zotaveného napětí po přerušení proudu je závislý na zkratovém obvodu, vypínací disciplíně a velikosti vypínaného proudu.

Při zkratu mezi generátorovým vypínačem a generátorem (tzv. system-source fault) dodává zkratový výkon zejména soustava. Proudové takových zkratů jsou obecně nejvyšší, narozdíl od aplikací běžných vypínačů je v tomto případě i nejprudší nárůst zotaveného napětí dle Obr. 5.6 až  $5,25 [kV/\mu s]$ . Při zkratu na straně transformátoru (generator-fed fault) je částečně redukována počáteční strmost zotaveného napětí. Vypínané zkratové proudy jsou při zkratech na straně transformátoru obecně nižší, což je dáno celkovou impedancí a odporem zkratového obvodu. Dle Obr. 5.6 je měřená počáteční strmost zotaveného napětí zhruba  $2 [kV/\mu s]$ .

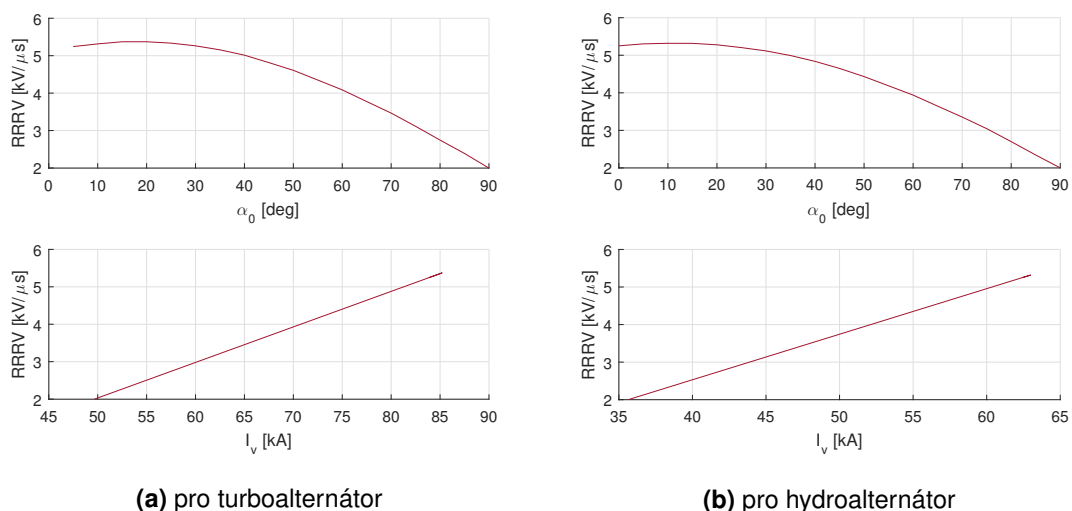
Porovnání průběhů zotavených napětí je na Obr. 5.6.

Obr. 5.6 zobrazuje popsané situace, které musí generátorový vypínač zvládat. Zvýšené požadavky na generátorový vypínač oproti běžnému distribučnímu vypínači reprezentuje i zelená křivka znázorňující průběh zotaveného napětí pro svorkový zkrat s 10% jmenovitého vypínacího proudu (disciplína TF10 udává dle normy IEC 62270-100 nejstrmější průběh zotaveného napětí pro standardní distribuční vypínač). Protože proudy při zkratech na straně generátoru dosahují vyšších hodnot, což platí i pro asymetrické zkraty, tak pro případ plné asymetrie budeme uvažovat  $5,25 [kV/\mu s]$ , naopak při zkratech na straně transformátoru dosahují proudy nižších hodnot s RRRV okolo  $2 [kV/\mu s]$ . Závislost RRRV na velikosti asymetrie je na Obr. 5.7, který vychází z experimentů provedených na základě mezinárodních standardů IEEE a je v korelaci s Obr. 5.6.

<sup>1</sup>Vztah 5.14 je platný při zanedbání složky zkratového proudu s dvojnásobnou frekvencí, což lze s dostatečnou mírou přesnosti díky velikostem  $x'_d$  a  $x''_q$  provést pro oba stroje.



**Obr. 5.6:** Průběhy zotavených napětí generátorového vypínače pro jednotlivé druhy zkratu



**Obr. 5.7:** Odvozené závislosti mezi počáteční strmostí zotaveného napětí na velikosti vypínaného proudu, resp. na velikosti asymetrie dle úhlu  $\alpha_0$

### 5. Výpočet namáhání vypínače v okamžiku $t_0$ :

Ze získaných hodnot  $(di/dt)_{t_0}$  a  $(du_{zn}/dt)_{t_0}$  je vztahem 5.13 dopočítáno namáhání vypínače v okamžiku proudové nuly.

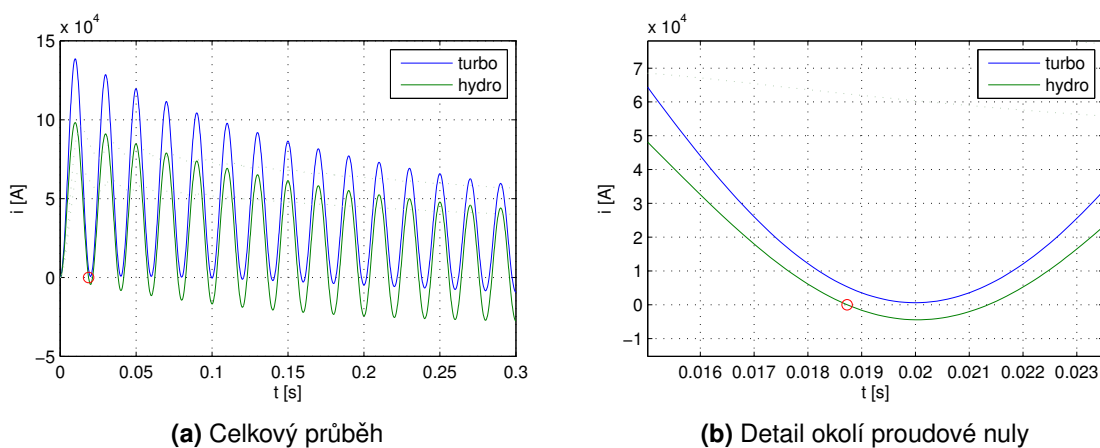
### 6. Vyhodnocení v pojmenovaných a poměrných jednotkách, diskuse výsledků a porovnání strojů:

Výstupem z výpočtu je sada hodnot. Pro každou hodnotu úhlu  $\alpha_0$  je tak získán soubor dat obsahující čas do prvního průchodu proudu nulovou hodnotou, strmost proudu a strmost zotaveného napětí v tomto čase, efektivní hodnota vypínaného proudu a namáhání vypínače  $Q_i$ . Tento soubor dat je získaný pro oba stroje a cílem je vyhodnotit jednak průběh těchto veličin v závislosti na velikosti úhlu  $\alpha_0$  či (což dá lepší informaci o tvaru průběhu) na velikosti asymetrie, ale i rozdíly mezi jednotlivými stroji a následně tak definovat rozdílné požadavky na generátorové vypínače pracující v blocích s turbo- či hydroalternátory. Výsledky jsou shrnuty v následující podkapitole.

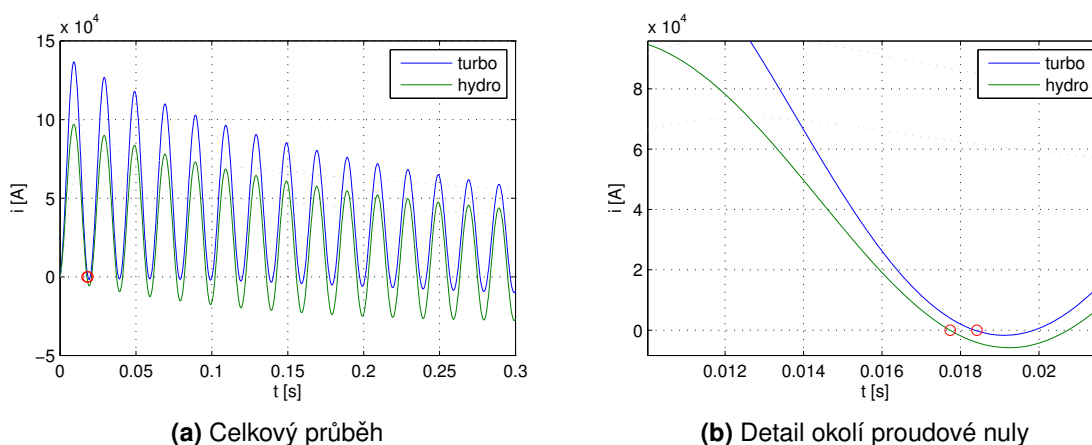
### 5.3.2 Vyhodnocení dílčích výsledků

Uvedený postup a výpočet byl naprogramován s pomocí výpočetního jádra programu MATLAB a vypracován jako plně zautomatizovaný skript. Ten je uveden jako Příloha A na konci této práce. V první části se nachází deklarace vstupních parametrů, tedy hodnoty reaktancí, časových konstant apod. pro jednotlivé stroje. Druhá část výpočtu obsahuje cyklus pro jednotlivé hodnoty úhlu  $\alpha_0$ , v němž dochází k výpočtu a vykreslení průběhů zkratových proudů a efektivní hodnoty proudu, dále pak výpočet strmostí proudů v proudových nulách. Ve třetí části kódu se vyskytuje výpočet strmosti zotaveného napětí, namáhání vypínače a konstrukce matice výsledků. Čtvrtá část kódu pak obsahuje vizualizaci výsledků a výstupních hodnot.

Na Obr. 5.8 a 5.9 jsou pro ilustraci průběhy zkratového proudu obou strojů při úhlech  $\alpha_0 = 0^\circ$  a  $\alpha_0 = 15^\circ$  s vyznačeným průchodem proudu nulou. Je možné si všimnout, že v případě turboalternátoru při plně asymetrickém zkratu nedojde během první periody k průchodu proudu nulou, lokální minimum je zhruba 627 [A].



**Obr. 5.8:** Vybraný průběh zkratového proudu s úhlem  $\alpha_0 = 0^\circ$  – plně asymetrický zkrat



**Obr. 5.9:** Vybraný průběh zkratového proudu s úhlem  $\alpha_0 = 15^\circ$

Výsledky analýzy pro celé spektrum úhlů  $\alpha_0$  jsou uvedeny v Tab. 5.3 a 5.4. Je vhodné upozornit na několik zásadních faktů. V Tab. 5.3 je první řádek volný právě z důvodu neuskutečněního průchodu proudu nulovou hodnotou. K prvnímu průchodu dojde až v průběhu druhé periody a získané hodnoty namáhání vypínače by tak zkreslily výslednou sadu hodnot. Proto byl případ plně

asymetrie vyloučen z tabulky a v porovnání se zaměřujeme jen na průchod nulou během první periody<sup>2</sup>.

Je možné si všimnout, že s narůstající asymetrií (tedy se vzrůstající procentní stejnosměrnou složkou) klesá hodnota  $(di/dt)_{t_0}$ , což je způsobeno tím, že k průchodu proudu nulou dochází blíže k lokálnímu extrému goniometrické funkce. Záporné znaménko je způsobeno tím, že směrnice k průběhu v bodě  $t_0$  je klesající. Dále je možné si všimnout, že se vzrůstající asymetrií roste i strmost zotaveného napětí, což je způsobeno tím, že je vypínán proud s větší efektivní hodnotou. Tyto rozdílné závislosti povedou k tomu, že k nejvyššímu namáhání vypínače nebude docházet v krajních bodech při  $\alpha_0 = 0^\circ$  či  $\alpha_0 = 90^\circ$ , jak by se dalo očekávat, ale "někde mezi", v závislosti na velikosti součinu  $Q_i$ .

| $\alpha_0$<br>[°] | % DC<br>[%] | $t_0$<br>[ms] | di/dt<br>[A/ $\mu$ s] | $I_V$<br>[kA] | RRRV<br>[kV/ $\mu$ s] | $Q_i$<br>[MVA/ $\mu$ s <sup>2</sup> ] |
|-------------------|-------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 0                 | 100         | x             | x                     | x             | x                     | x                                     |
| 5                 | 94,44       | 19,74         | -0,191                | 83,86         | 5,24                  | 1,002                                 |
| 10                | 88,89       | 19,11         | -2,321                | 84,61         | 5,32                  | 12,337                                |
| 15                | 83,33       | 18,42         | -5,237                | 85,21         | 5,37                  | 28,135                                |
| 20                | 77,78       | 17,77         | -7,810                | 85,21         | 5,37                  | 41,954                                |
| 25                | 72,22       | 17,17         | -9,963                | 84,82         | 5,34                  | 53,159                                |
| 30                | 66,67       | 16,57         | -12,024               | 84,06         | 5,26                  | 63,285                                |
| 35                | 61,11       | 16,00         | -13,796               | 82,93         | 5,16                  | 71,132                                |
| 40                | 55,56       | 15,43         | -15,459               | 81,44         | 5,01                  | 77,519                                |
| 45                | 50,00       | 14,87         | -16,949               | 79,34         | 4,82                  | 81,611                                |
| 50                | 44,44       | 14,31         | -18,312               | 77,17         | 4,61                  | 84,408                                |
| 55                | 38,89       | 13,76         | -19,497               | 74,43         | 4,35                  | 84,792                                |
| 60                | 33,33       | 13,21         | -20,543               | 71,67         | 4,09                  | 83,962                                |
| 65                | 27,78       | 12,67         | -21,414               | 68,38         | 3,78                  | 80,839                                |
| 70                | 22,22       | 12,13         | -22,143               | 65,13         | 3,47                  | 76,757                                |
| 75                | 16,67       | 11,61         | -22,687               | 61,41         | 3,11                  | 70,637                                |
| 80                | 11,11       | 11,06         | -23,141               | 57,52         | 2,75                  | 63,521                                |
| 85                | 5,56        | 10,53         | -23,414               | 53,76         | 2,39                  | 55,911                                |
| 90                | 0           | 10,00         | -23,541               | 49,64         | 2,00                  | 47,018                                |

**Tab. 5.3:** Výsledné hodnoty analýzy turboalternátoru

Z výsledných hodnot uvedených v tabulkách 5.3 a 5.4 je patrné, že k největšímu namáhání vypínače vypínáním zkratovým proudem dochází v případě, kdy byl úhel  $\alpha_0$  v okamžiku vzniku zkratu  $60^\circ$  a to v případě obou strojů. Dále je možné si všimnout, že namáhání generátorovými zkraty hydroalternátoru je zřetelně menší než u turboalternátoru, zhruba třetinové až poloviční. Jedinou výjimkou jsou případy s velmi malým úhlem  $\alpha_0$  (cca do  $15^\circ$ ). V těchto případech došlo k průchodu proudu nulou u turboalternátoru velmi blízko lokálního extrému, díky čemuž je strmost proudu velice nízká, spínací oblouk uhasíná přirozeně a vypínací schopnost je využita pouze k rozrušení oblasti se zbytkovou vodivostí mezi kontakty vypínače.

<sup>2</sup>Celková analýza namáhání vypínače při všech průchodech proudu nulou pro všechny velikosti asymetrie bude uvedena v následující podkapitole.

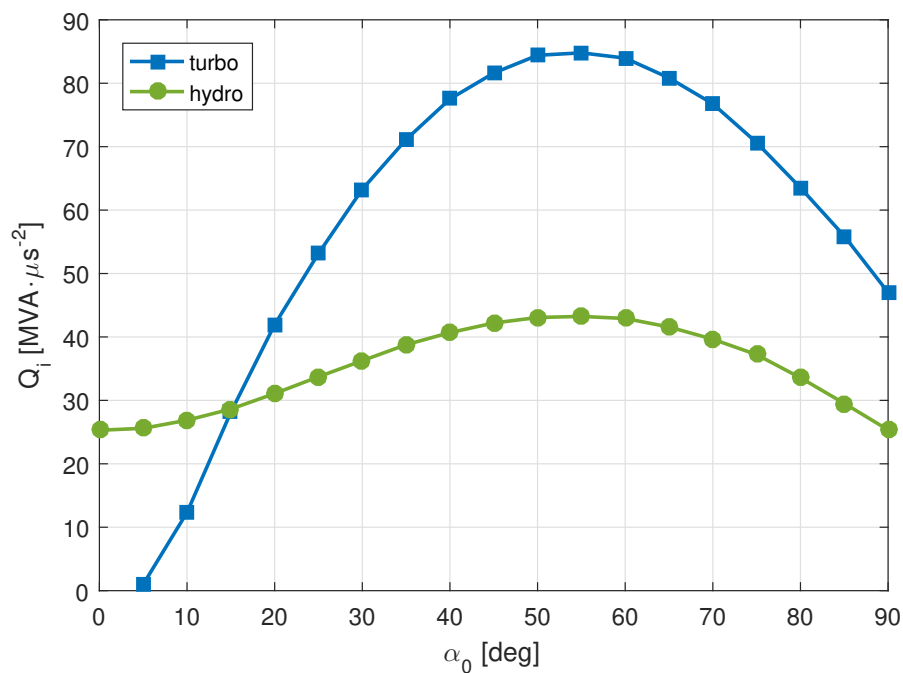
| $\alpha_0$<br>[°] | % DC<br>[%] | $t_0$<br>[ms] | $di/dt$<br>[A/ $\mu$ S] | $I_V$<br>[kA] | RRRV<br>[kV/ $\mu$ S] | $Q_i$<br>[MVA/ $\mu$ S <sup>2</sup> ] |
|-------------------|-------------|---------------|-------------------------|---------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 0                 | 100         | 18,73         | -4,816                  | 62,44         | 5,25                  | 25,290                                |
| 5                 | 94,44       | 18,45         | -4,826                  | 62,86         | 5,30                  | 25,595                                |
| 10                | 88,89       | 18,11         | -5,053                  | 62,98         | 5,32                  | 26,873                                |
| 15                | 83,33       | 17,74         | -5,385                  | 62,98         | 5,32                  | 28,631                                |
| 20                | 77,78       | 17,32         | -5,888                  | 62,66         | 5,28                  | 31,077                                |
| 25                | 72,22       | 16,87         | -6,480                  | 62,04         | 5,20                  | 33,722                                |
| 30                | 66,67       | 16,41         | -7,088                  | 61,31         | 5,12                  | 36,257                                |
| 35                | 61,11       | 15,92         | -7,766                  | 60,30         | 4,99                  | 38,776                                |
| 40                | 55,56       | 15,43         | -8,412                  | 59,02         | 4,84                  | 40,687                                |
| 45                | 50,00       | 14,92         | -9,076                  | 57,47         | 4,65                  | 42,196                                |
| 50                | 44,44       | 14,40         | -9,718                  | 55,68         | 4,43                  | 43,068                                |
| 55                | 38,89       | 13,87         | -10,328                 | 53,66         | 4,19                  | 43,237                                |
| 60                | 33,33       | 13,33         | -10,894                 | 51,62         | 3,94                  | 42,911                                |
| 65                | 27,78       | 12,78         | -11,404                 | 49,20         | 3,65                  | 41,572                                |
| 70                | 22,22       | 12,24         | -11,818                 | 46,80         | 3,35                  | 39,643                                |
| 75                | 16,67       | 11,64         | -12,216                 | 44,25         | 3,05                  | 37,211                                |
| 80                | 11,11       | 11,13         | -12,428                 | 41,40         | 2,71                  | 33,559                                |
| 85                | 5,56        | 10,57         | -12,595                 | 38,47         | 2,34                  | 29,523                                |
| 90                | 0           | 10,00         | -12,664                 | 35,64         | 2,00                  | 25,347                                |

**Tab. 5.4:** Výsledné hodnoty analýzy hydroalternátoru

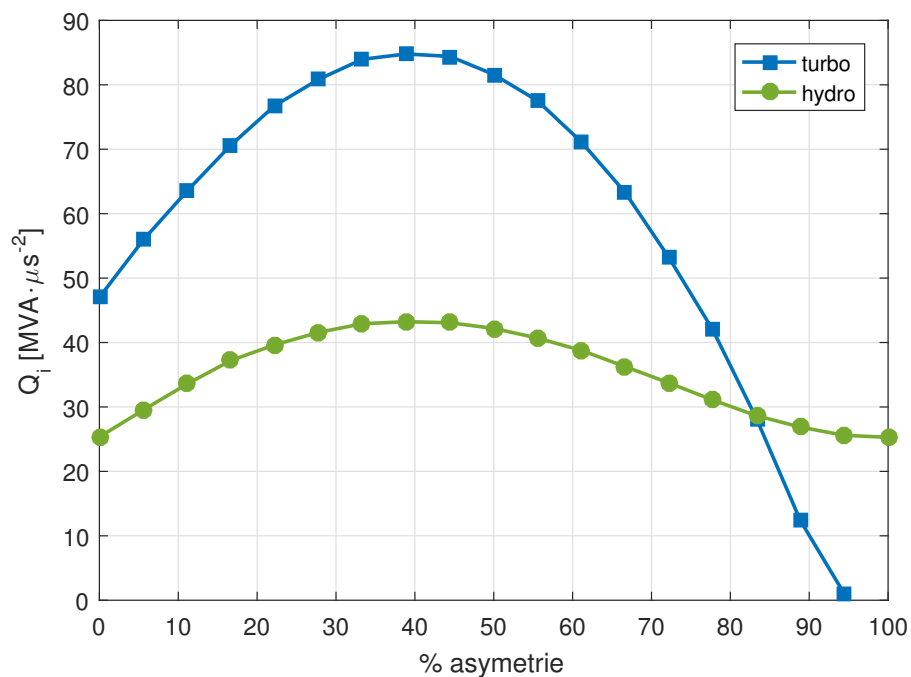
Zajímavé porovnání a závislosti rovněž poskytují Obr. 5.10 a 5.11, které uvádějí průběh namáhání vypínače jakožto funkci úhlu  $\alpha_0$ , potažmo procentní velikosti asymetrie. Je patrné, že se jedná o zrcadlově převrácené závislosti, na nichž je patrné maximální namáhání vypínače při  $\alpha_0 = 60^\circ$ , což odpovídá jedné třetině či 33,33 % plně vyvinuté stejnosměrné složky.

Nejzajímavější porovnání však poskytují Obr. 5.12a a 5.12b. Jak je vidět, znázorňují průběh namáhání vypínače v první proudové nule v závislosti na velikosti asymetrie, ale v poměru k namáhání, ke kterému dochází při symetrickém zkratu. Zároveň ukazují nárůst času  $t_0$  s narůstající asymetrií, opět vzhledem k symetrickému zkratu, kdy  $t_0 = 10$  [ms]. V přímé korelaci s předchozími obrázky ukazují, jak s narůstající asymetrií zkratového proudu nejprve roste namáhání vypínače až do 33,33 % a poté začne klesat. V případě turboalternátoru je tento pokles strmější, což je způsobeno jednak širším spektrem hodnot  $(di/dt)_{t_0}$ , ale i proudy  $I_V$  a s tím související strmostí zotaveného napětí. Na obrázcích je rovněž patrný nárůst času do první proudové nuly až na téměř dvojnásobek, tedy k hodnotě  $t_0$  kolem 20 [ms]. Mezi nejzajímavější závěry lze zařadit poslední body v Obr. 5.12a a 5.12b, které ukazují, že z hlediska úrovně vypínací schopnosti při vypínání asymetrických zkratů se nejedná o kritické vypínání a postačuje nižší vypínací schopnost. Pro turboalternátor řádově jednotky procent, pro hydroalternátor řádově 60 až 80 %, vzhledem k namáhání při symetrickém zkratu. Zároveň je ale nutné respektovat fakt, že k tomuto namáhání dojde v delším čase, s nárůstem až o 80 %. Zároveň je vidět, že v případě plně asymetrického zkratu turboalternátoru k průchodu proudu nulou vůbec nedochází a bod pro plnou asymetrii tak, stejně jako první řádek v Tab. 5.3, chybí.

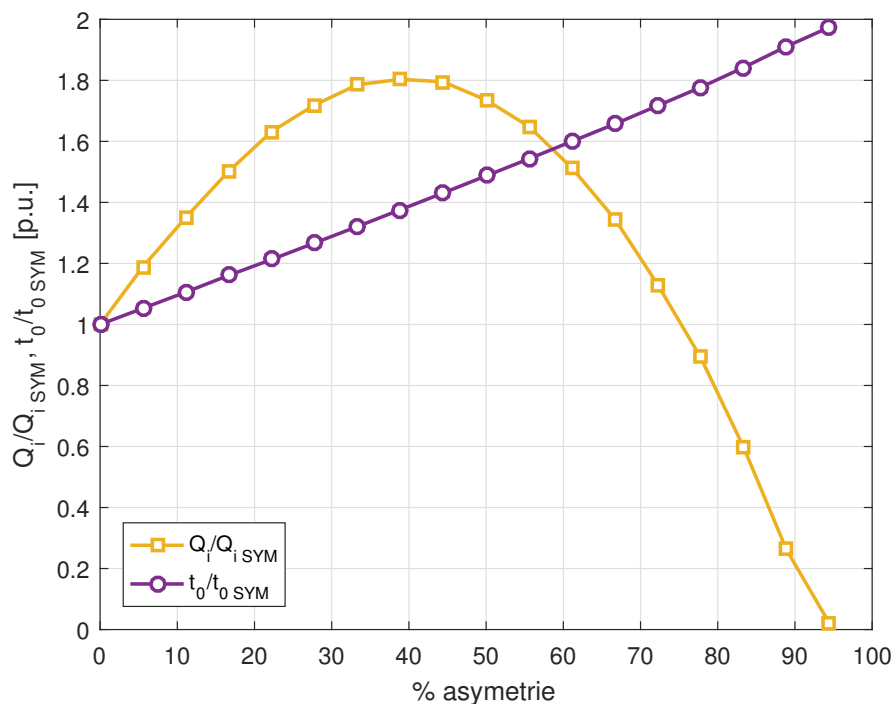




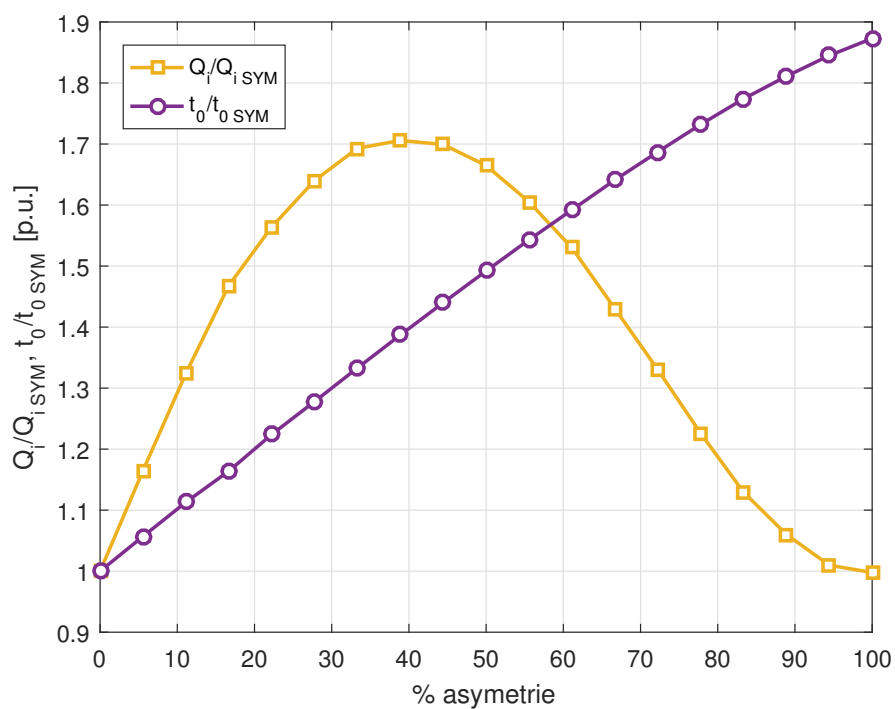
**Obr. 5.10:** Namáhání vypínače v první proudové nule jako funkce úhlu  $\alpha_0$



**Obr. 5.11:** Namáhání vypínače v první proudové nule jako funkce velikosti asymetrie



(a) Turboalternátor



(b) Hydroalternátor

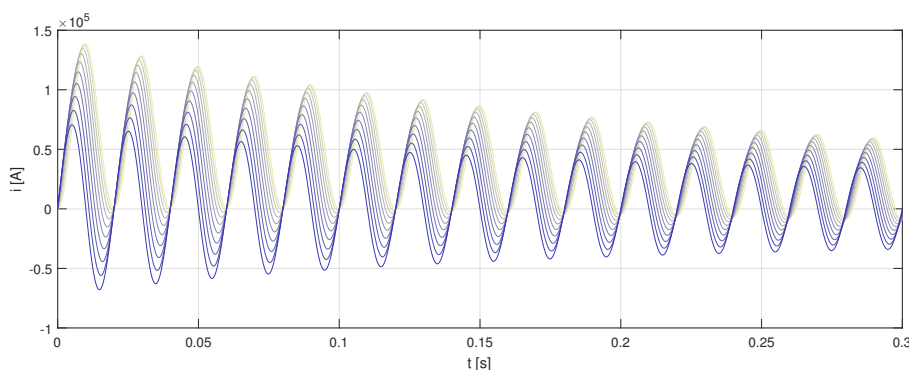
**Obr. 5.12:** Výsledné porovnání namáhání vypínače jako funkce velikosti asymetrie zkratového proudu vzhledem k symetrickému zkratovému proudu

### 5.3.3 Rozšířený analytický model

Předchozí studie poskytla důležité poznatky o porovnání jednotlivých alternátorů při zkratech na statorovém vinutí včetně metodiky výpočtu namáhání vypínače v první proudové nule. Ač je to přístup správný, který vede k důležitým závěrům ohledně namáhání generátorových vypínačů pracujících u jednotlivých typů alternátorů, nejedná se o exaktně přesný přístup z pohledu provádění s reálnými aplikacemi vypínačů a jednotlivých vypnutí. K těm nedochází direktivně v první proudové nule, ale záleží na náhodné souhře mechanických a elektrických dějů, které ve výsledku určí, ve které proudové nule bude vypínač vypínat.

Z toho důvodu byl předchozí analytický model opíraný o první proudovou nulu rozšířen o analýzu všech průchodů proudu nulovou hodnotou (v daném časovém intervalu, ten byl zvolený na 300 [ms]) a to pro celé spektrum asymetrie zkratového proudu (definováno opět úhlem  $\alpha_0$ ). Tímto krokem vzrostla míra komplikovanosti výpočetního kódu o značné množství, což se promítlo zejména do množství zpracovávaných výsledků a obtížnější orientaci v dílčích výpočtech a dílčích výsledcích. Z hlediska závislosti namáhání vypínače na velikosti asymetrie zkratového proudu výsledky narůstají o další rozměr, který parametrizuje dobu od počátku vzniku zkratu, ve které k průchodu proudu nulou došlo a ve které vypínač vypnul. Rozšířený analytický model tak dává ucelenější informaci díky zahrnuté časovosti průchodu proudu nulovou hodnotou.

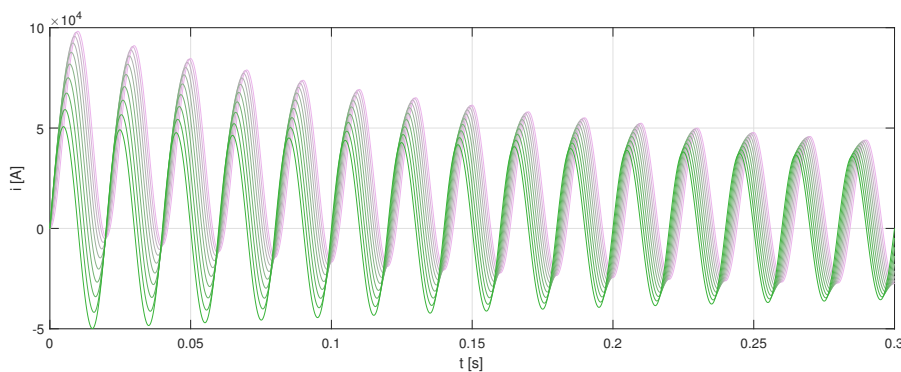
Obrázky 5.13 a 5.14 ukazují celé spektrum zkratových proudů s různou asymetrií. Na obrázcích je díky vhodně nastavené grafické interpretaci patrné, jak se se zvyšujícím se úhlem  $\alpha_0$  průběh vychyluje nad osu.



**Obr. 5.13:** Spektrum zkratových proudů turboalternátoru s různou asymetrií (nejsvětlejší průběh odpovídá úhlu  $\alpha_0 = 0^\circ$ , další pak s krokem  $10^\circ$  až do symetrického sytě modrého průběhu)

Výpočetní skript opět obsahuje části, ve kterých dochází k ukládání okamžitých hodnot zkratového proudu s danou asymetrií, oproti předchozí studii se však nejedná o vektor, ale o matici, která v jednotlivých řádcích obsahuje právě okamžité hodnoty zkratového proudu s danou asymetrií. Totéž pak platí o stanovení efektivní hodnoty vypínaného zkratového proudu, časy průchodu proudu nulovou hodnotou, stanovené strmosti proudu a zotaveného napětí v proudových nulách a výsledné namáhání vypínače – ve všech těchto případech se nejedná o jeden vektor výsledných hodnot, ale o celou matici hodnot, kde řádky kategorizují velikost asymetrie zkratového proudu a sloupce kategorizují pořadí proudové nuly od počátku vzniku zkratu.

Metodika určení namáhání vypínače je pak již shodná s předchozím modelem, přičemž tento rozšířený model vyhodnocuje toto namáhání v každé proudové nule v daném časovém intervalu. Tím jsou získány mnohem komplexnější informace o tom, jak se mění požadovaná vypínací schopnost v závislosti na okamžiku vypnutí od vzniku zkratu a na velikost asymetrie.



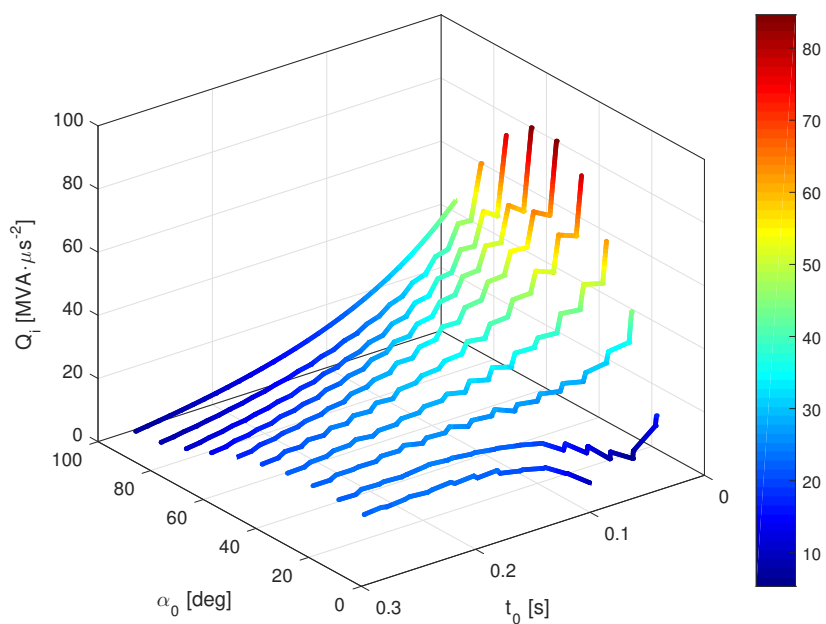
**Obr. 5.14:** Spektrum zkratových proudů hydroalternátoru s různou asymetrií (nejsvětlejší průběh odpovídá úhlu  $\alpha_0 = 0^\circ$ , další pak s krokem  $10^\circ$  až do symetrického, sytě zeleného průběhu)

Získané výsledky tohoto rozšířeného modelu jsou zobrazeny na obrázcích 5.15a a 5.15b.

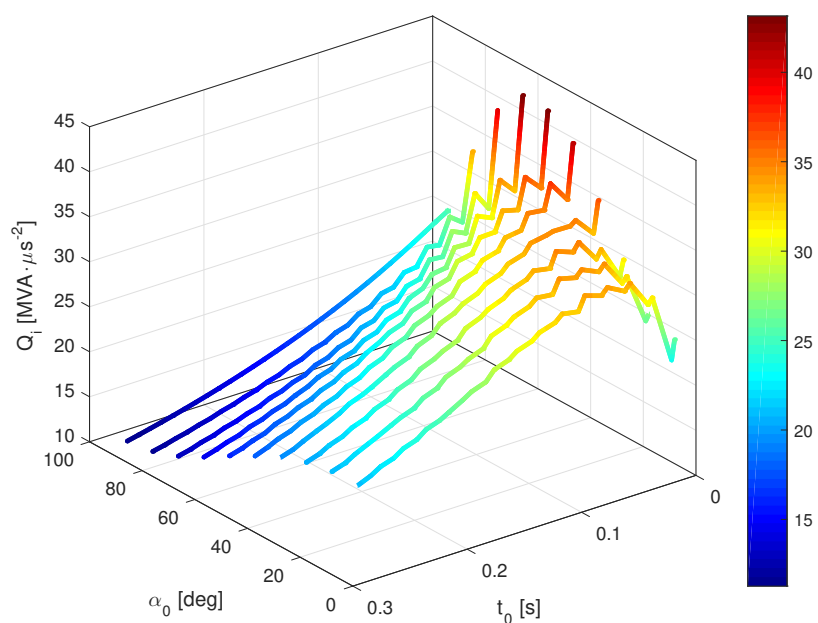
Obrázky poměrně dobře reprezentují některá fakta. Na prvním místě je vhodné zmínit konzistenci s předchozím "2D" modelem, jehož výsledky v podstatě odpovídají jedné sadě hodnot z těchto trojrozměrných výsledků, konkrétně tedy první průchod proudu nulovou hodnotou, čemuž na Obr. 5.15a a 5.15b odpovídají body poblíž roviny, kde  $t_0 = 0$  [s]. Z obrázků je dále patrné, že s přibývajícimi hodnotami  $t_0$  a  $\alpha$  se namáhání vypínače v proudové nule snižuje. To je logický a očekávatelný fakt, protože s narůstajícím časem stejnosměrná složka odeznívá a průběh proudu se pak blíží k symetrickému. Dalším okomentováníhodným faktorem může být i mírná zubatost křivek pro jednotlivé hodnoty úhlu  $\alpha$ . Ta je způsobena mírnou nekonzistencí způsobenou numerickým určením efektivní hodnoty vypínaného proudu – efektivní hodnota totiž díky své integrální definici při okamžitém výpočtu v kladné půlvlně roste, v záporné půlvlně klesá.

Pro získání spojitého průběhu této závislosti namáhání vypínače na velikosti úhlu  $\alpha$  a času  $t_0$  byl využit nástroj pro interpolizační a aproximační úlohy v MATLABu, konkrétně systém *Curve Fitting Toolbox*. Výsledky takto aproximovaných závislostí jsou uvedeny na Obr. 5.16. Obrázek ukazuje získanou sadu hodnot jako body v třídímním prostoru. Body jsou proloženy grafem, který tvoří jejich po částech spojitou kubickou interpolaci. Tyto grafy poměrně vhodně ukazují hodnoty namáhání vypínače i v místech mimo získané hodnoty. Je však nutné zmínit omezenou výpovědní hodnotu v závislosti na ose  $t_0$ , která značí diskrétní časy konkrétních proudových nul. Uvažovali bychom vypnutí vypínače v obecně daném čase  $t_0$ , bylo by nutné upravit výpočet hodnot derivace proudu v daném okamžiku, což by znatelně ovlivnilo hodnotu namáhání vypínače. S přihlédnutím k fyzikální realitě vypínání zkratových proudů je však nutné diskutovat pravděpodobnost vypínání vypínače daleko od proudové nuly (např. v amplitudě). To je však v praxi téměř nereálné, protože vypínače vypínají v proudové nule, či v její těsné blízkosti.

Dílčí závislosti pro všechny asymetrie zkratového proudu jsou uvedeny na obrázcích 5.17 a 5.18. Konkrétně obrázky ukazují závislosti strmosti zkratového proudu, strmosti zotaveného napětí a namáhání vypínače v závislosti na době průniku proudu nulovou hodnotou. V případě Obr. 5.17 se jedná o výsledky zkratových proudů turboalternátoru, v případě Obr. 5.18 se jedná o výsledky zkratových proudů hydroalternátoru. Výsledky poměrně pěkně ukazují vývoj jednotlivých ukazatelů i výsledné namáhání vypínače jak v závislosti na velikosti asymetrie, tak i na hodnotě  $t_0$ . V případě třetí části těchto obrázků lze říci, že se jedná o 2D pohled na Obr. 5.15a, resp. 5.15b v osách  $Q_j = f(t_0)$  s kolorifikací dle velikosti úhlu  $\alpha_0$ .

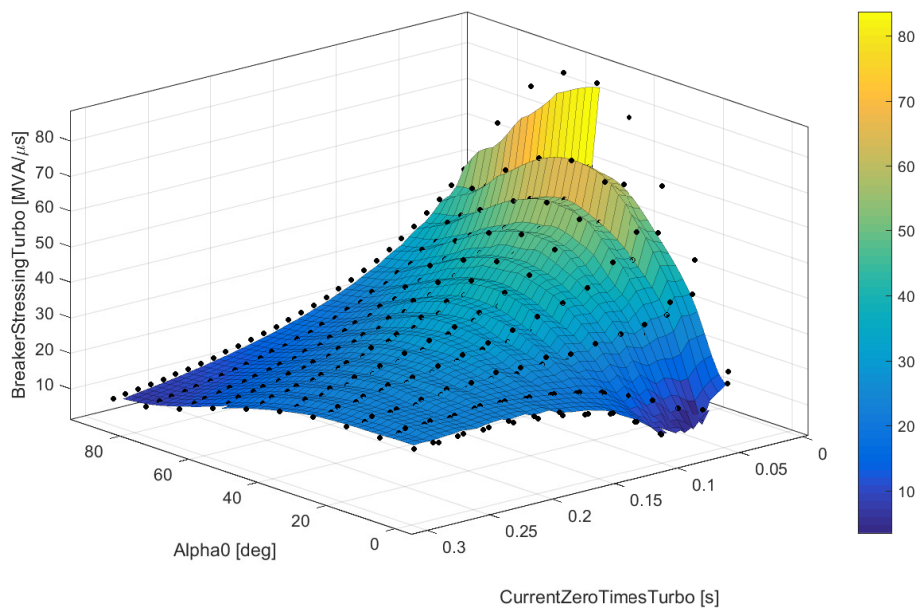


(a) Analýza turboalternátoru

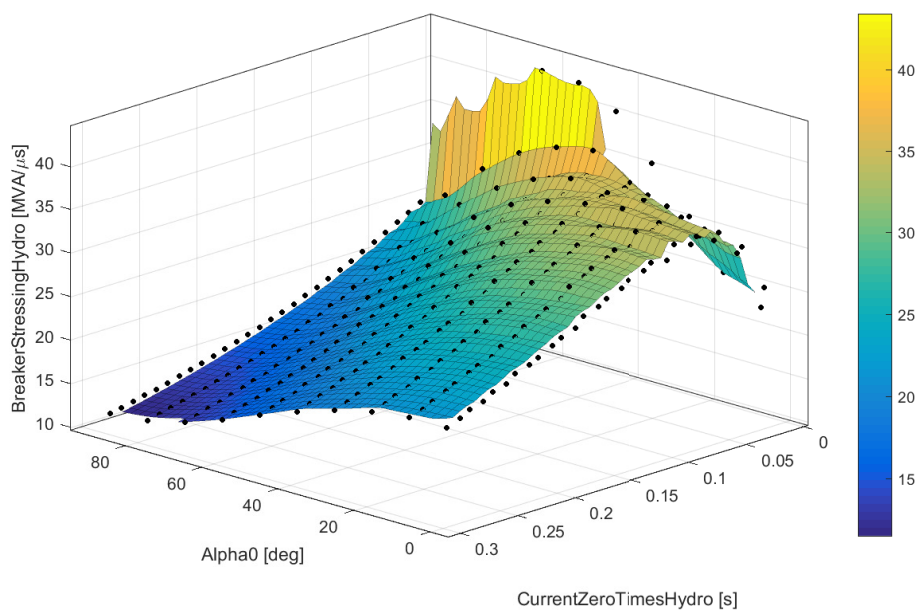


(b) Analýza hydroalternátoru

**Obr. 5.15:** Výsledky rozšířeného modelu – namáhání generátorového vypínače při vypínání v závislosti na okamžiku proudové nuly a velikosti asymetrie

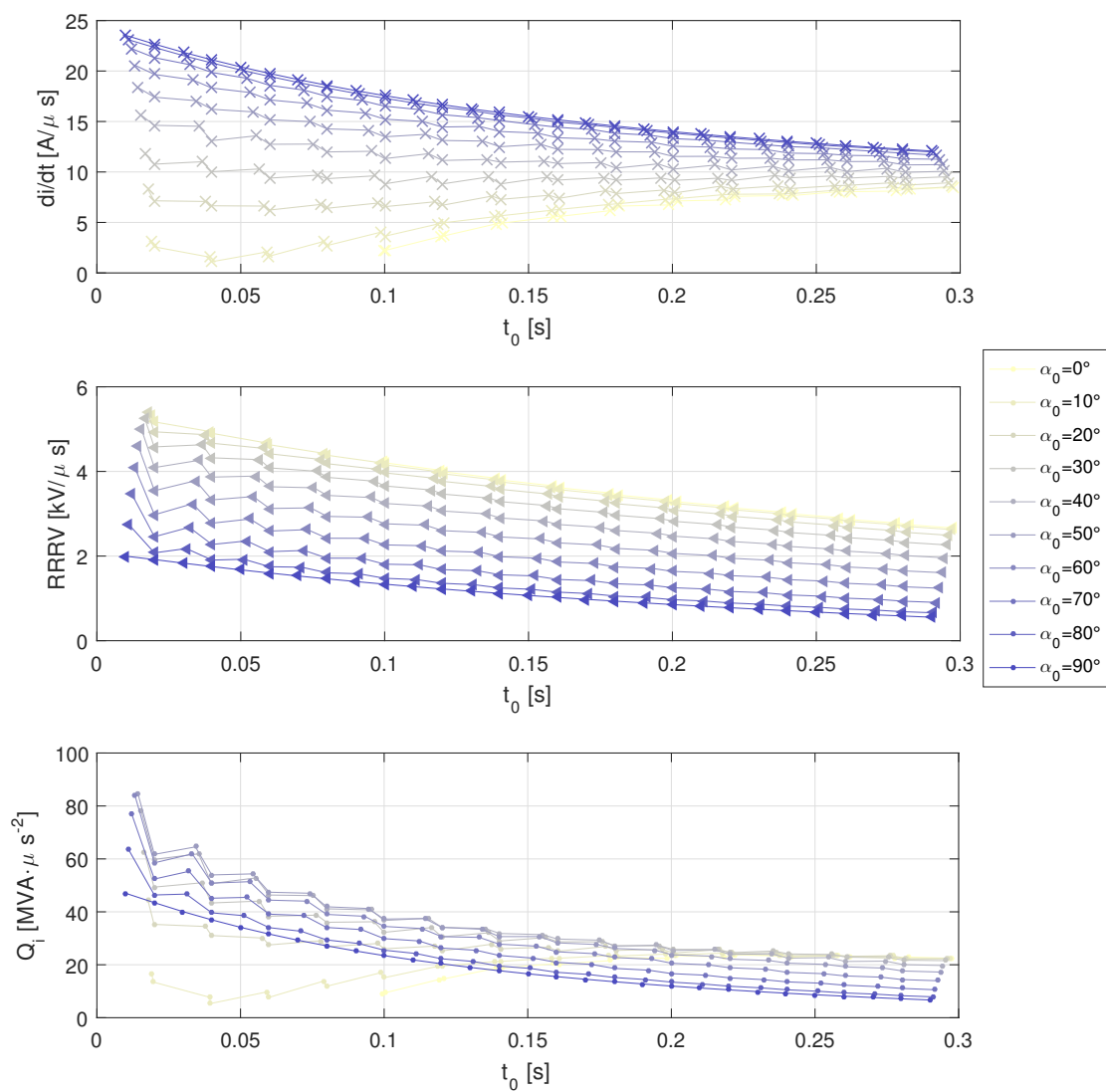


(a) Analýza turboalternátoru

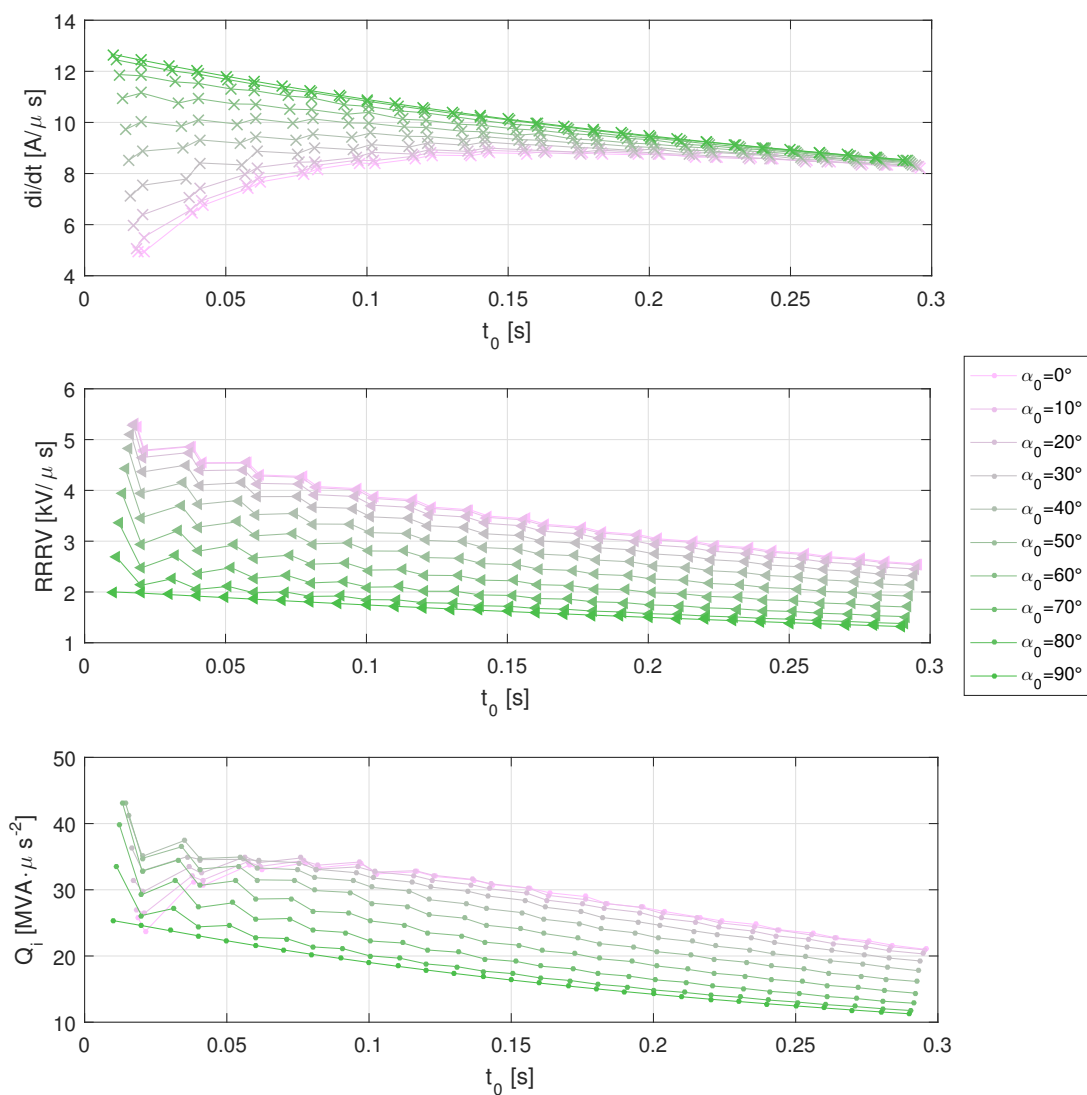


(b) Analýza hydroalternátoru

**Obr. 5.16:** Výsledky rozšířeného analytického modelu s provedením plošné 3D interpolace kubickým polynomem



**Obr. 5.17:** Výsledky rozšířeného modelu ve 2D závislostech pro analýzu turboalternátoru



Obr. 5.18: Výsledky rozšířeného modelu ve 2D závislostech pro analýzu hydroalternátoru



### 5.3.4 Shrnutí dílčích výsledků analytického modelu

Analytický model přináší několik vysoce zajímavých výsledků a porovnání, k nimž náleží adekvátní diskuse. Celkový model je založený na vyhodnocení namáhání vypínače dle rovnice 5.13. První činitel staví na analytickém vyjádření proudu při zkratu na svorkách alternátoru a jeho derivaci, druhý činitel je postaven na odvození počáteční strmosti zotaveného napětí vzhledem k velikosti vypínaného proudu. Jedná se o velice specifickou úlohu, protože ke zkratům na svorkách alternátorů dochází jen poměrně zřídka. Analýza ale přináší velmi zajímavé porovnání vypínání bloků s turbo- či s hydroalternátory. Je zřejmé, že díky velikostem přechodných a rázových reaktancí v podélné či příčné ose budou zkratové proudy strojů s hladkým rotorem včetně jejich stejnosměrných složek zřetelně vyšší, než je tomu v případě strojů s vyniklými póly. Na druhou stranu ale hydroalternátory pracují ve větším paralelním počtu. To může zásadně ovlivnit výsledný zkratový proud skupiny generátorů. Generátorové vypínače pracující s hydro- stroji pak též ohrožuje zřetelně větší počet operací (zejména např. u přečerpávacích vodních elektráren). Generátorové vypínače tak musejí být řádně zhodnoceny pro konkrétní provoz. V provedených modelech bylo ukázáno, že velmi riziková je oblast úhlu  $\alpha_0$  od 0 do zhruba  $35^\circ$ , tedy průběhy zkratových proudů s asymetrií od 60 % výše.

Jak bylo zmíněno, analytický model staví na exaktním vyjádření zkratového proudu, který se vztahuje ke zkratovanému soustrojí. V reálném případě se však na výsledný průběh proudu projeví i další faktory, jako např. odpor samotné poruchy, či proudová a napěťová odezva dynamicky se měnícího oblouku v průběhu vypínacího procesu. Analytický model též předpokládá zkratový obvod pouze v podobě samostatně pracujícího a následně zkratovaného alternátoru. Tyto externality jsou však velmi obtížně implementovatelné do analytického modelu (v rámci reprezentace předpisu pro zkratový proud dle rovnice 5.9), jehož hlavními výhodami je zhodnocení asymetrie a namáhání vypínače vzhledem k jednotlivým reaktancím či složkám výsledného proudu.

Analytický model přináší důležité porovnání namáhání vypínače při prvním průchodu proudu nulovou hodnotou, jako i celkovou analýzu namáhání vypínače při všech průchodech. Vypovídající schopnost má samozřejmě druhý rozšířený model vyšší, nicméně pozornost je nutné věnovat též prvnímu výpočtu – ten totiž představuje celou metodiku úlohy a postup výpočtu, ale může mít velký vliv na problematiku narušeného vypínání. Tedy na případy, kdy v průběhu běžného provozního spínání dojde ke vzniku zkratu. Probíhající vypínací proces pak musí přerušit proud co nejdříve, veškerá pozornost je tedy směřována k prvnímu průchodu proudu nulou. V něm se totiž rozhodne, zda případ narušeného vypínání vypínač překoná bez poruchy či nikoliv.

## 6 Modelování zkratů v sítích s alternátorem

Předchozí kapitola poskytla ucelený analytický pohled na nároky na vypínací schopnost při vypínání zkratu na svorkách alternátorů napříč spektrem velikostí asymetrie zkratového proudu a s důležitým porovnáním strojů s vyniklými póly a s hladkým rotorem. Jedná se však o velice exaktní přístup s diskutovanými limitacemi. Na této analýze však následně staví tato kapitola zaměřující se na modelování zkratů v sítích s alternátory.

Mezi hlavní cíle provedených modelů patří verifikace předchozí kapitoly ohledně vlivu alternátorů na průběhy zkratového proudu a to jak v případech samotného generátorového zkratu, tak i v případech zkratu na větví vyvedení výkonu z elektrárny či v náhodném místě běžné modelové soustavy. Byly tak zhotoveny celkem 3 modely dle těchto scénářů. Všechny tři případy se zaměřují na poměrně zásadní místa v rámci elektrizační soustavy a výsledné průběhy zkratových proudů tak mají svá specifika. Dalšími cíli tak bylo identifikovat tato specifika a jak jsou ovlivněny faktory jako např. okamžik vzniku zkratu, počet zkratovaných fází či konkrétní místo poruchy a související omezení proudu impedancemi jednotlivých prvků schématu.

Následující kapitoly tedy popisují metodiku modelování tří zmíněných scénářů, jejich vlastnosti a dílčí výsledky. Závěr kapitoly je věnován shrnutí provedených modelů a získaných závěrů.

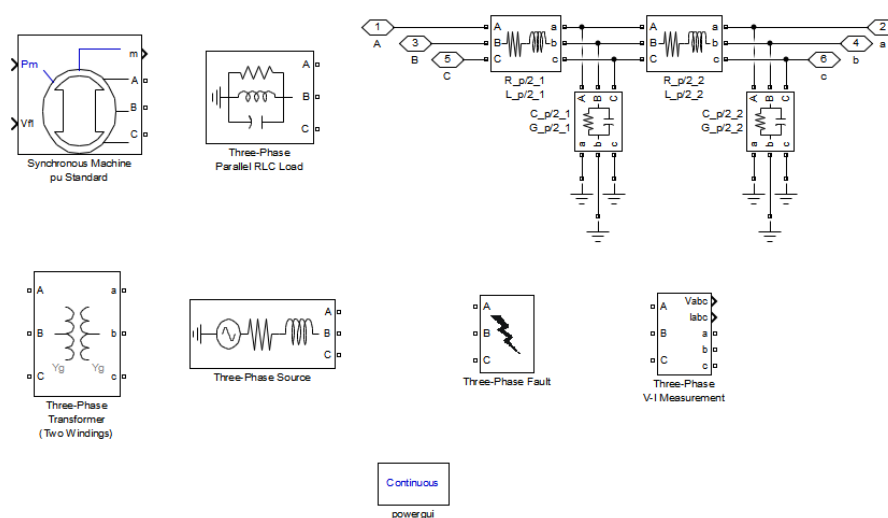
### 6.1 Metodika modelování částí a prvků elektrizační soustavy

Veškeré modelování v této kapitole bylo provedeno v programovém nástroji Simulink, z podstatné míry bylo využito programové nadstavby Simscape Power Systems (dnes již nazvané Simscape Electrical), která je zaměřena na modelování energetických sestav a systémů v kombinaci s mechanickými, mechatronickými či termickými procesy. Využití Simscape Power Systems umožňuje propojovat obvodové struktury s nativními bloky nástroje Simulink (jako např. koncentrace výsledných průběhů v bloku *Scope*) či parametrizaci proměnných a výpočtu využitím kódu v MATLABovské syntaxi. Uvedeného nástroje bylo rovněž využito díky velké uživatelské přívětivosti, přehledně zpracovanému systému nápovědy, možnostem nastavení výpočtu a dlouhotrvajícím zkušenostem s prostředím MATLABu a Simulinku.

Na Obr. 6.1 je uveden přehled použitých bloků v jednotlivých studiích. Následující odstavce popisují vlastnosti a význam těchto bloků a způsob jejich parametrizace v jednotlivých studiích.

#### Model synchronního stroje

Nadstavba Simulinku pro modelování elektroenergetických soustav obsahuje poměrně velké množství bloků pro reprezentaci rotačních strojů, každý s odlišným přístupem ke zjednodušení elektrických, magnetických a mechanických diferenciálních rovnic a jejich číselné parametrizace. Jen pro reprezentaci synchronního stroje obsahuje celkem čtyři základní modely (zjednodušený, fundamentální, oba s popisem možným v poměrných či v pojmenovaných SI jednotkách, dále pak standardní model a model s permanentními magnety). Pro modelování alternátorů pro potřeby zkratu na svorkách generátorů, ať již s hladkým rotorem či s vyniklými póly, byl zvolen blok



Obr. 6.1: Přehled využitých bloků v jednotlivých modelech

*Synchronous Machine – pu Standard.* Parametrizace bloku je poměrně složitá, ale při dostatku vstupních hodnot je zcela intuitivní. Lze zvolit, zda se jedná o reprezentaci stroje s hladkým rotorem či s vyniklými póly, dále pak druh vstupní mechanické veličiny (mechanický výkon na hřídeli  $P_m$ , či rychlost otáčení  $w$ ). Dále pak model vyžaduje vstupní hodnoty jmenovitého výkonu, napětí a frekvence, sady reaktancí v podélné a příčné ose, příslušné časové konstanty, rozptylovou reaktanci a činný odpor statorového vinutí, moment setrvačnosti, koeficient tření v ložiskách, počet pólových dvojic a sadu počátečních podmínek. Model též umožňuje simulovat saturaci magnetického obvodu.

### Model zátěže

Pro reprezentaci zátěže byl zvolen blok *Parallel RLC Load*. Ten umožňuje zvolit velikost odebíraného odebíraného činného i jalového výkonu, jak induktivního, tak i kapacitního charakteru. Toto dále doplňují informace o jmenovitém napětí, frekvenci a zapojení zátěže do hvězdy či do trojúhelníka. V případě první studie, modelování generátorového zkratu byly nastaveny odpovídající hodnoty  $P$  a  $Q_L$  reprezentující jmenovitý odběr z alternátorů.

### Model nadzemního a zapouzdřeného vedení

Pro reprezentaci vedení má knihovna Simscape Power Systems připraveny celkem dva bloky: *Distributed Parameters Line* a *Pi Section Line*. Jedná se o velice příhodné bloky. Oba však mají poměrně složitou parametrizaci z pohledu pasivních parametrů, vyžadující informaci o velikosti mezifázových hodnot či rozkladu do sousledné, zpětné a netočivé soustavy. Také bylo ověřeno, že použití těchto bloků zásadně prodlužuje výpočetní čas. Reprezentace vedení proto byla provedena v podobě vlastní konstrukce náhradních článků ( $T$ ,  $\pi$ ,  $\Gamma$ ). Tento přístup mírně komplikuje přehlednost zadání vstupních hodnot, ale s dostatečnou mírou přesnosti a respektu k realitě se projeví na výsledku aniž by zásadně prodlužoval výpočetní čas. Ve všech následujících studiích se objevují všechny tři náhradní články, vždy s ohledem na konzistenci modelu a vlastní výpočetní jádro (zamezující například sériové spojení indukčnosti a proudového zdroje bez existence paralelního prvku). Tento přístup je aplikovatelný na nadzemní i zapouzdřené vedení, kde jediný rozdíl bude ve velikosti provozních hodnot pasivních parametrů.

### Model transformátoru

I pro transformátor lze využít několik modelů ze zmíněné knihovny a to od lineárního, dvou- či třívinutového, symetrického či nesymetrického atp. V následujících studiích byl využit blok *Three-Phase Transformer (Two Windings)*. Jeho parametrizace umožňuje zvolit způsob zapojení primárního a sekundárního vinutí, tvar magnetického jádra, jmenovitý výkon, frekvenci, jmenovitá napětí vinutí a jejich činný odpor, rozptylovou indukčnost a magnetizační odpor a indukčnost. Odporů a indukčností je možno definovat v poměrných či pojmenovaných SI jednotkách.

### Model elektrizační soustavy

Elektrizační soustava je reprezentována blokem *Three-Phase Source*. Navzdory svému názvu se nemusí jednat jen o zdroj, ale díky jmenovitému napětí a fázovému posuvu napěťové růžice tak lze vhodně reprezentovat i nadřazenou elektrizační soustavu. Přejídný děj pak lze charakterizovat vnitřním odporem a indukčností, případně lze toto specifikovat na základě zkratových parametrů soustav (zkratový výkon soustavy a poměr X/R).

### Blok zkratu

Byl použit blok *Three-Phase Fault*, který umožňuje zvolit zkratované fáze a přítomnost země (zda se jedná o zkrat se zemí či nikoliv). Též umožňuje zvolit okamžik vzniku a zániku poruchy (explicitně či implicitně) a její ohmickou velikost. To představuje spoustu možností použití tohoto bloku a reprezentaci zkratových poruch. Díky možnosti externě definovaných časů vzniku a zániku zkratu tak lze vytvářet sofistikované analýzy chování reálné soustavy s poruchou.

### Měření a vyhodnocení výsledků

Každý ze zmíněných bloků umožňuje ukládání průchozích signálů či dalších klíčových veličin. Toho bylo využito jen v případě modelu alternátoru, kdy blok *Synchronous Machine – pu Standard* obsahuje pod portem *m* množství elektrických, magnetických a mechanických veličin. Pro další měření napětí a proudů byl využíván blok *Three-Phase V-I Measurement*. Požadované signály byly posléze extrahovány a graficky znázorněny v tradičním bloku pro záznam časově proměnných hodnot, bloku *Scope*. Blok *Three-Phase V-I Measurement* je velice výhodný pro měření signálů v 3f systémech, protože umožňuje měření jak fázových a sdružených napětí, tak i hodnoty fázových proudů. Obě dvě veličiny vyhodnocuje v pojmenovaných jednotkách SI či po zadání vztažných hodnot napětí a výkonu  $U_v$ , resp.  $S_v$  i v jednotkách poměrných.

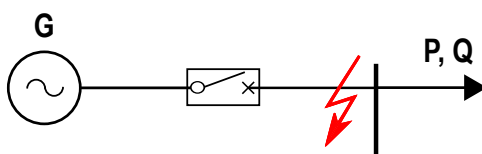
### Blok powergui

Všechny uvedené modely obsahují kromě reprezentace jednotlivých fyzikálních objektů a procesování výstupních průběhů i jeden specifický blok, kterým je *powergui*. Jedná se o fundamentální blok v knihovně SimPowerSystems a jde o speciální blok definující realizované prostředí a umožňující pokročilé nastavení výpočtu. Jde tedy o specifičtější nastavení výpočtu oproti standardnímu ovládacímu panelu jádra Simulink. Blok *powergui* umožňuje zvolení typu úlohy (spojitá, diskrétní), nastavení spínacích prvků a jejich fundamentální i parazitní chování, nastavení řešení symbolicko-komplexní metody nebo nastavení řešiče. Dále však poskytuje nástroje pro řešení chodu elektrizační soustavy jako je load-flow analýza, výpočet počátečních podmínek a hodnot stavových proměnných, inicializace rotačních soustrojí, výpočet parametrů vedení atp. V rámci

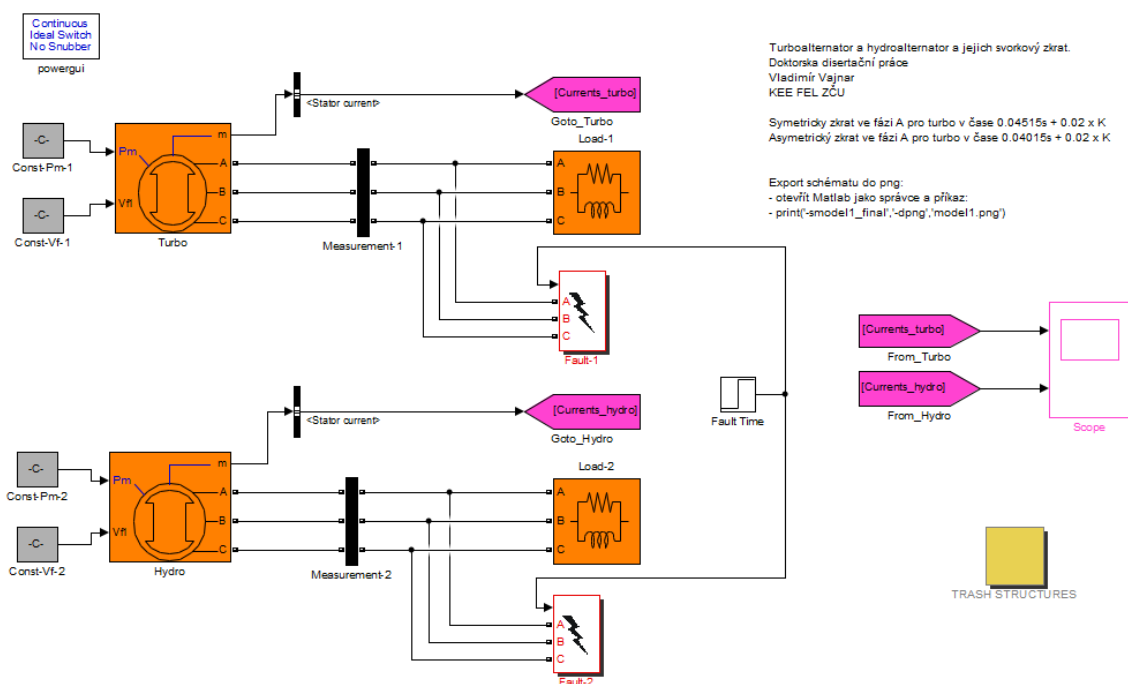
inicializace modelu se tak jedná o klíčový blok definující roli jednotlivých uzlů schématu a výpočtu počátečních podmínek (ustáleného stavu).

## 6.2 Zkrat na svorkách alternátoru

První z modelovaných studií představuje zkrat na svorkách alternátorů z předchozí kapitoly pracujících do zátěže s konstantním odebíraným činným a jalovým výkonem. Cílem této studie je verifikovat průběhy a závěry stanovené v předchozí kapitole a na základě případných rozdílů ve výsledcích diskutovat pozitivní a negativní vlastnosti jednotlivých přístupů. Dalšími cíli pak je porovnat jednotlivé průběhy zkratového proudu, stanovit vliv dalších externalit na výsledný průběh a definovat zásadní přínosy zhotoveného modelu.



Obr. 6.2: Jednopolové schéma modelu č. 1



Obr. 6.3: Realizace modelu č. 1 v Simulinku

Jednopolové schéma obvodu je znázorněno na Obr. 6.2, realizace obvodu v Simulinku na Obr. 6.3. Jednotlivé prvky byly modelovány dle dříve zmíněné metodiky. Z obrázku je patrné, že se jedná jen o sériové spojení alternátoru a zátěže. Parametry alternátorů byly voleny shodně s parametry z předchozí kapitoly – pro větší koherenci modelu se parametricky jedná o tytéž analyzované stroje jako v Kapitole 5, jejichž klíčové hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5.2. Zátěž byla parametrizována odběrem  $P = 100 [MW]$  a  $Q_L = 45 [MVar]$ . Uvedené hodnoty odpovídají tomu, že je alternátor zatížen jmenovitým výkonem.

Byly modelovány případy pro plně symetrický zkratový proud (sledováno ve fázi A), plně asymetrický a poté pro úhly  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $60^\circ$ , což při frekvenci  $50 [Hz]$  odpovídá časovému posuvu v okamžiku vzniku zkratu o  $1,67 [ms]$ , respektive  $2,5 [ms]$  a  $3,33 [ms]$ <sup>1</sup> od symetrického zkratu.

Zmíněné varianty okamžiku vzniku zkratu byly modelovány a úspěšně nasimulovány. Je možné zmínit velké množství poznatků ze získaných průběhů a jejich široké spektrum. Pro každou variantu velikosti asymetrie byly přezkoumány průchody proudu nulovou hodnotou a sledovány intervaly mezi jednotlivými průchody. Prvních 8 intervalů, tedy průchody během prvních čtyř period, pro všechny varianty a modelované stroje jsou v Tab. 6.1.

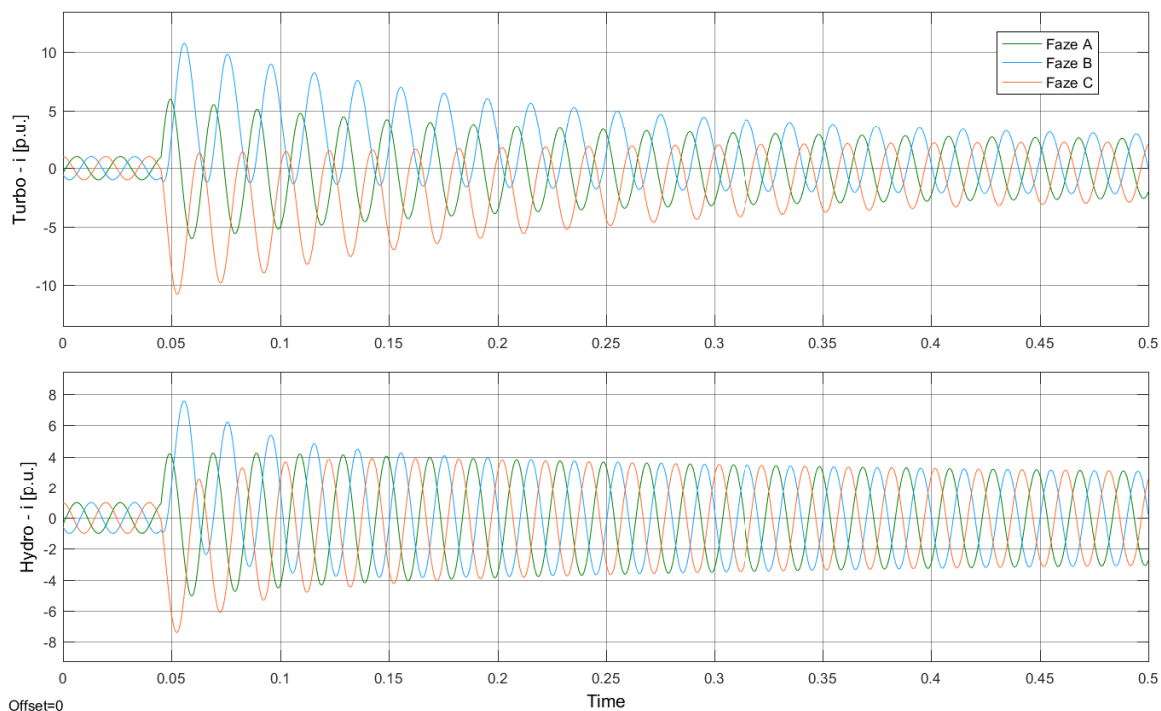
| Intervaly mezi průchody proudu nulou v [ms] |            |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | $\alpha$   | 1.    | 2.    | 3.    | 4.    | 5.    | 6.    | 7.    | 8.    |
| <b>Turbo</b>                                | $0^\circ$  | 17,03 | 2,88  | 16,68 | 3,45  | 16,28 | 3,90  | 15,72 | 4,41  |
|   | $30^\circ$ | 15,31 | 4,62  | 15,09 | 4,91  | 14,90 | 5,13  | 14,56 | 5,38  |
|   | $45^\circ$ | 14,04 | 5,94  | 13,86 | 6,30  | 13,50 | 6,48  | 13,33 | 6,67  |
|   | $60^\circ$ | 12,37 | 7,21  | 12,48 | 7,57  | 12,37 | 7,79  | 12,26 | 7,85  |
|   | $90^\circ$ | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |
| <b>Hydro</b>                                | $0^\circ$  | 15,88 | 6,21  | 13,01 | 7,71  | 11,62 | 8,74  | 11,03 | 9,38  |
|   | $30^\circ$ | 13,85 | 6,91  | 12,25 | 8,17  | 11,36 | 8,81  | 10,89 | 9,31  |
|   | $45^\circ$ | 13,14 | 7,56  | 11,71 | 8,64  | 11,16 | 9,18  | 10,71 | 9,52  |
|   | $60^\circ$ | 11,82 | 8,31  | 11,26 | 9,05  | 10,86 | 9,23  | 10,41 | 9,66  |
|   | $90^\circ$ | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |

**Tab. 6.1:** Intervaly mezi průchody proudu nulou

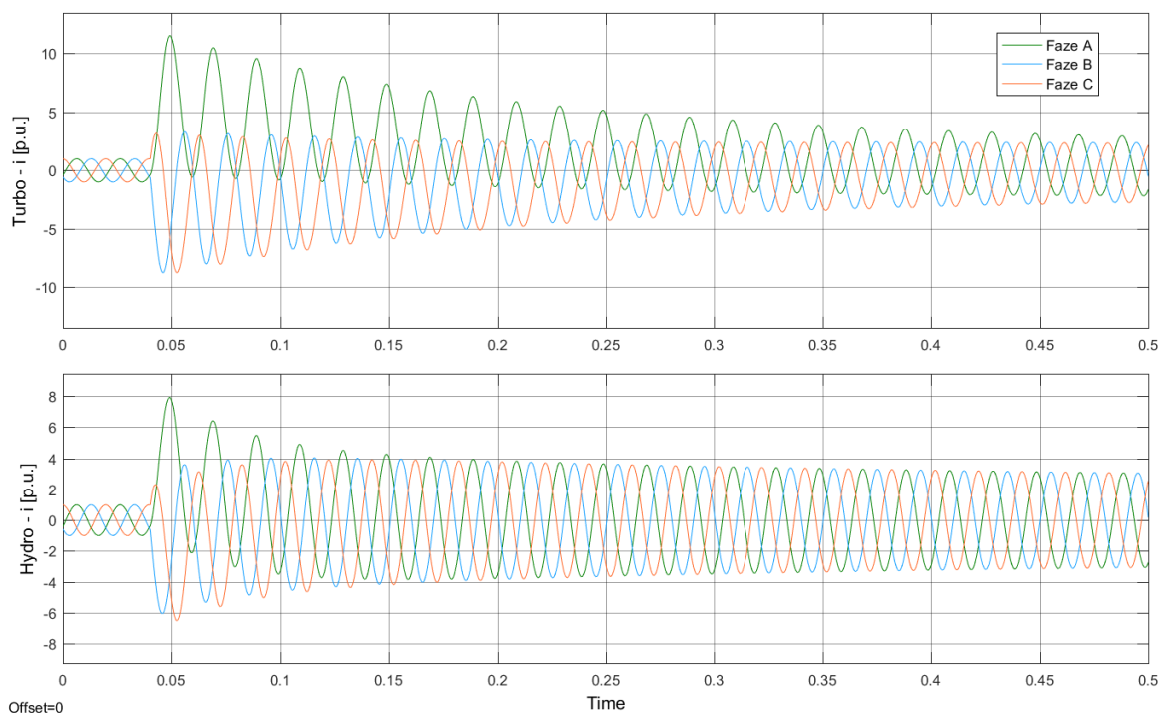
Tabulka 6.1 obsahuje zajímavé porovnání. Z hodnot je na první pohled patrné, že problematika oddálené proudové nuly a prodloužených intervalů mezi jednotlivými průchody proudu nulou je mnohem závažnější pro provoz turboalternátorů. Je možné si všimnout, že se v případě turboalternátorů hodnoty v mnoha případech pohybují nad hodnotou  $15 [ms]$  a může tedy jít o kritický případ vypínání. Dále je možné si všimnout, že s narůstajícím úhlem  $\alpha$  (a tedy s klesající asymetrií) a s narůstajícím časem od vzniku zkratu se jednotlivé intervaly vyrovnávají na standardní hodnotu  $10 [ms]$ . Je vidět, že rychlost změny u lichých a u sudých intervalů je zpočátku velká a poté klesá, jak se exponenciálně tlumí stejnosměrná složka a odeznívá přechodný děj. Na následujících obrázcích (Obr. 6.4 a Obr. 6.5) jsou uvedeny dva krajní případy, symetrický a asymetrický průběh.

Obr. 6.4 a 6.5 ukazují průběh vypínaného zkratového proudu, který vznikl z ustáleného stavu v čase  $0,04515 [s]$ , resp.  $0,04015 [s]$  v poměrných jednotkách. Obrázky potvrzují dříve diskutovaná fakta ohledně velikosti zkratových proudů jednotlivých strojů. Dále je možné si všimnout průběhů v dalších fázích – vzhledem k tomu, že se jedná o souměrnou poruchu, tak při symetrickém průběhu ve fázi A jsou stejnosměrné složky fází B a C stejně velké, ale opačně orientované. Logicky pak při maximální asymetrii proudu ve fázi A, budou stejnosměrné složky fází B a C mít stejnou polaritu (opačnou vůči fázi A) a menší velikost (než by měly při symetrickém průběhu ve fázi A). Obrázky dále vizuálně potvrzují velikost a rychlost tlumení přechodné, rázové a stejnosměrné složky. Je vidět jejich silnější tlumení v případě hydroalternátoru.

<sup>1</sup> Při frekvenci  $50 [Hz]$  je délka periody  $20 [ms]$  a to odpovídá elektrickému úhlu  $360^\circ$ .



**Obr. 6.4:** Průběh proudu ve vinutí modelovaných alternátorů při 3f zkratu na svorkách – symetrický průběh ve fázi A, vznik v čase 0,04515[s]



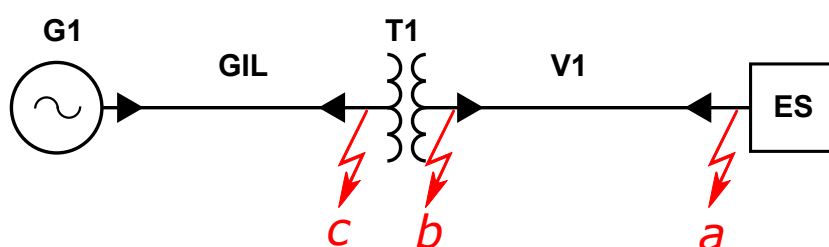
**Obr. 6.5:** Průběh proudu ve vinutí modelovaných alternátorů při 3f zkratu na svorkách – asymetrický průběh ve fázi A, vznik v čase 0,04015 [s]

Zhotovený model potvrzuje závěry z předchozí kapitoly. Totiž že problematika oddálených proudových nul a výskytu narušeného vypínání je aktuálnější pro turboalternátory a při nevhodné souhře parametrů (zejména reaktancí v podélné a příčné ose a činného odporu statorového vinutí)

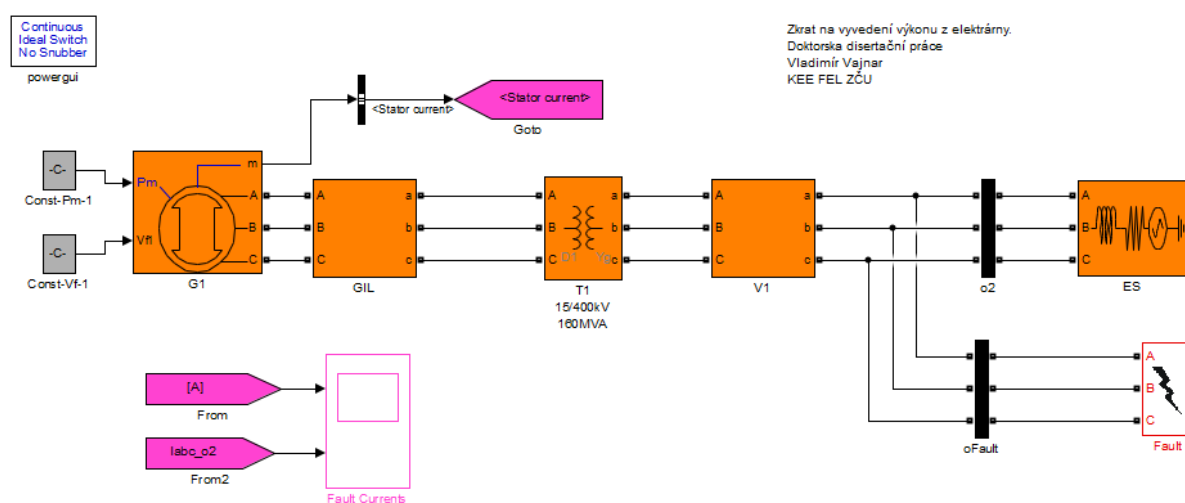
je možné, že průběh zkratového proudu bude zcela posunut nad vodorovnou osu a k průchodu proudu nulou dojde až po několika periodách, což bylo dokázáno v [60]. Je však důležité zmínit neurčitost výsledků a jejich hodnověrnost způsobenou neprůhledností ve způsobu modelování synchronního stroje v prostředí Simulinku. Jen popis a návod na používání bloku *Synchronous Machine – pu Standard* je poměrně náročný a rozsáhlý text. Ač jsou závěry z tohoto modelu poměrně podobné, průběhy se mohou zřetelně lišit, protože navzdory od předchozího analytického modelu v Kapitole 5, model alternátoru vyžaduje informace o hodnotách momentu setrvačnosti či koeficientu tření. To může mít podstatný vliv na výsledek studie, kdy jsou sledované rozdíly v řádech jednotek milisekund. Vypovídající schopnost tohoto modelu je tak podmíněna znalostí veškerých parametrů vyžadovaných výpočetním nástrojem.

### 6.3 Zkrat na vyvedení výkonu z elektrárny

Další z modelovaných studií byla typická úloha vyvedení výkonu z elektrárny v podobě sériového zapojení alternátoru, zapouzdřeného vedení, blokového transformátoru, nadzemního vedení a přílehlé uzlové rozvodny. V daném modelu byly zkoumány případy vzniklého zkratu na třech různých místech – na konci vedení V1, na jeho začátku (tzn. na sekundární straně transformátoru) a na primární straně transformátoru (tzn. na konci zapouzdřeného vedení). Schéma řešeného modelu je na Obr. 6.6, červeně jsou označena místa vzniku zkratu. Jde o běžný typ provedení vyvedení výkonu z velkých elektráren; dané schéma lze ještě variovat o větší počet paralelně pracujících alternátorů, jak tomu bývá např. v případě vodních elektráren.



Obr. 6.6: Jednopolové schéma modelu č. 2 s vyznačenými místy zkratu a, b, c



Obr. 6.7: Realizace modelu č. 2 v Simulinku



Model vyhotovený v prostředí Simulink je na Obr. 6.7. Oranžově jsou zvýrazněny bloky hlavní proudové větve vyvedení výkonu, fialově podbarvené jsou pak bloky využitě pro trasování signálu a jeho vizualizaci. Pro všechny případy vzniku zkratu tak byly sledovány průběhy proudu ve statorovém vinutí stroje a průběhy proudu tekoucí z bloku reprezentujícího ES, tedy zprava, měřené blokem označeným o2. Všechny výsledné průběhy a proudy ve výsledkových tabulkách nesoucí označení či index o2 tak odkazují k tomuto bloku a vyjadřují proudy tekoucí z této pravé strany schématu. Parametry jednotlivých prvků jsou uvedeny v Tab. 6.2 a odpovídají typovým velikostem reálných prvků.

| <b>G1: Alternátor</b>                        |                                    |                                   |                                     |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Parametry dle Tab. 5.2 pro Turboalternátor   |                                    |                                   |                                     |
| <b>GIL: IPB (GIS) vodiče</b>                 |                                    |                                   |                                     |
| $R_k = 6,29 \text{ m}\Omega/\text{km}$       | $L_k = 0,204 \text{ mH}/\text{km}$ | $C_p = 54,5 \text{ nF}/\text{km}$ | $G_p = 0,2 \mu\text{S}/\text{km}$   |
| $l = 100 \text{ m}$                          |                                    |                                   |                                     |
| <b>T1: Ynd1 15/400 kV 160 MVA</b>            |                                    |                                   |                                     |
| $u_k = 8\%$                                  | $\Delta P_k = 0,4\%$               | $i_0 = 0,1\%$                     | $\Delta P_0 = 0,15\%$               |
| $r_k = 0,004 \text{ p.u.}$                   | $x_\sigma = 0,079 \text{ p.u.}$    | $g_{Fe} = 0,0015 \text{ p.u.}$    | $b_\mu = 0,0098 \text{ p.u.}$       |
|  | $r_{Fe} = 666,6 \text{ p.u.}$      | $x_\mu = 108 \text{ p.u.}$        |                                     |
| <b>V1: Vedení 400 kV, Donau AIFe 3x350/6</b> |                                    |                                   |                                     |
| $R_k = 0,0283 \Omega/\text{km}$              | $L_k = 1,15 \text{ mH}/\text{km}$  | $C_p = 7,57 \text{ nF}/\text{km}$ | $G_p = 0,019 \mu\text{S}/\text{km}$ |
| $l = 40 \text{ km}$                          |                                    |                                   |                                     |
| <b>ES: Soustava 400 kV</b>                   |                                    |                                   |                                     |
| $U_n = 400 \text{ kV}$                       | $S_{ks} = 4 \text{ GVA}$           | $X/R = 8,3$                       |                                     |

**Tab. 6.2:** Parametry prvků pro model č. 2

Z předchozího modelu je patrné riziko průběhů poruchových proudů s asymetrií od 66,7% do 100%, což odpovídá elektrickému úhlu  $30^\circ$ , tato studie se tedy zaměřuje na tuto kritickou oblast.

Studie se zaměřila na porovnání velikostí amplitud poruchových proudů v jednotlivých fázích a na porovnání doby do první proudové nuly ve fázi A, případně ve fázi B, při 3f zkratech ve výše uvedených místech. Klíčové je, že v obou případech je alespoň v jedné fázi nebezpečná velikost asymetrie poruchového proudu, i přes to, že v jiné fázi je zcela symetrický průběh. První ze série výsledků je pro zkrat vzniklý v čase  $t_{inception} = 0,02 \text{ [s]}$ , druhá série je pro zkrat vzniklý v čase  $t_{inception} = 0,02167 \text{ [s]}$ . Časový rozdíl  $1,67 \text{ [ms]}$  odpovídá úhlu  $30^\circ$ .

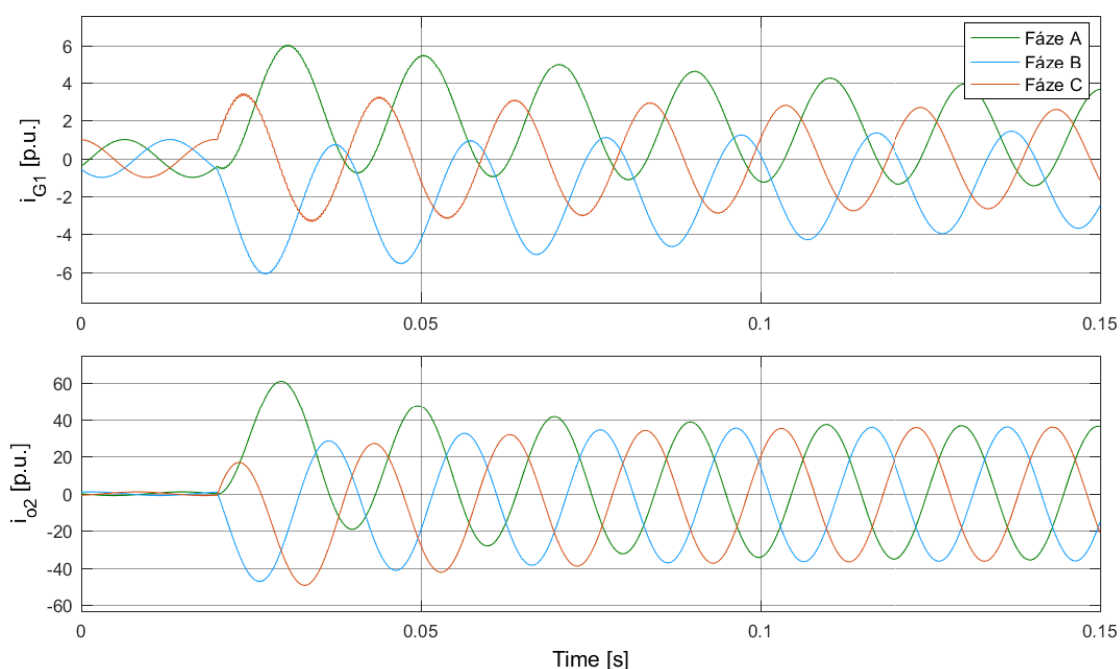
Získané výsledky jsou uvedeny v Tab. 6.3, v níž  $i_p$  představuje nejvyšší hodnotu průběhu a to pro sledované průběhy proudů z generátoru G1, tak i pro proudy tekoucí z ES blokem o2. Hodnoty  $t_0$  pak ukazují dobu do první proudové nuly v průběhu fáze A, respektive B. V druhé části studie nebyla doba průchodu proudu nulou ve fázi B analyzována. Bylo sledováno, že její hodnoty se pohybují v intervalu od  $10 \text{ [ms]}$  do  $14 \text{ [ms]}$  a to pro proudy tekoucí z generátoru i ze soustavy. Výsledné průběhy proudů dvou vybraných případů (pro zkrat na konci vedení V1 v čase  $0,02 \text{ [s]}$  a zkrat na konci zapouzdřeného vedení GIL v čase  $= 0,02167 \text{ [s]}$ ) jsou uvedeny na Obr. 6.8 a 6.9.

V uvedené Tab. 6.3 lze vysledovat některé zajímavé poznatky. Je zřejmé, že s místem zkratu blížícím se svorkám alternátoru roste velikost jeho proudu a jeho celkového příspěvku do výsledného zkratu. Je zřejmé, že vedení V1 příspěvek příliš neomezí, ale je vidět, že k velkému nárůstu dojde, pokud zkrat vznikne na primární straně transformátoru – je možné pozorovat nárůst ve

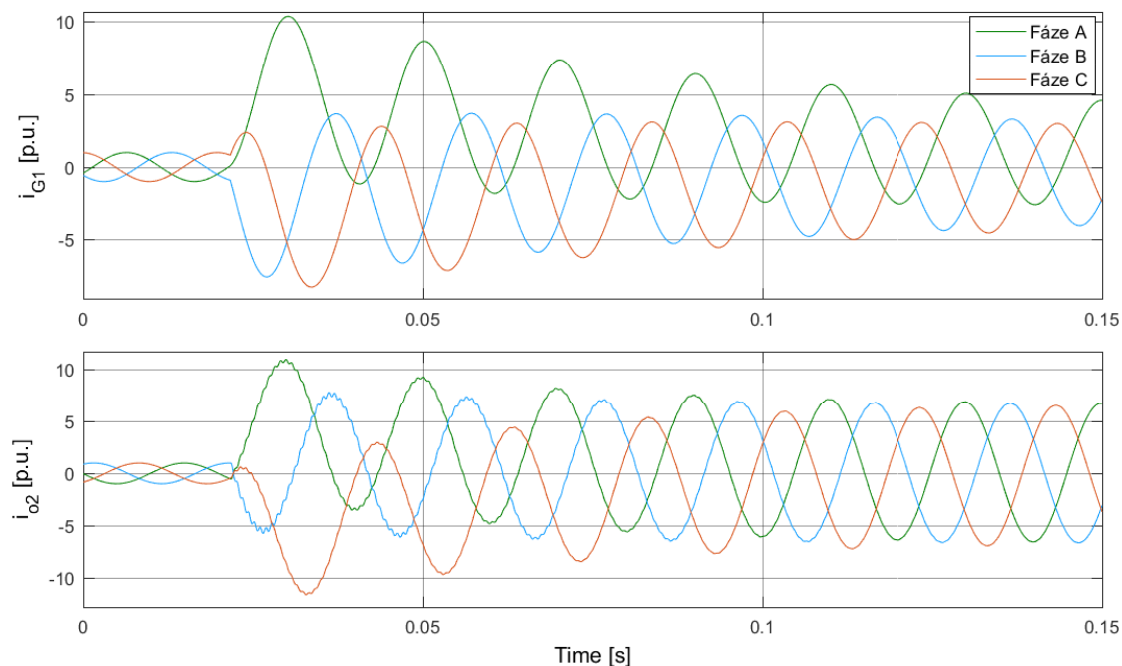
|                            |                           |        |        |                              |        |        |        |
|----------------------------|---------------------------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|
| Okamžik vzniku zkratu:     | $t_{inception} = 0.02[s]$ |        |        | $t_{inception} = 0.02167[s]$ |        |        |        |
| Klíčový průběh ve fázi:    | C – symetrický            |        |        | A – asymetrický              |        |        |        |
| Průběh v ostatních fázích: | A, B – 67% asymetrie      |        |        | B, C – 50% asymetrie         |        |        |        |
| Místo zkratu na konci:     | V1                        | T1     | GIL    | V1                           | T1     | GIL    |        |
| $i_{pG1} [p.u.]$           | A                         | 6,02   | 6,22   | 9,88                         | 6,46   | 6,71   | 10,39  |
|                            | B                         | -6,10  | -6,29  | -9,54                        | -4,97  | -5,11  | -7,56  |
|                            | C                         | 3,43   | 3,46   | -5,98                        | -4,86  | -5,02  | -8,26  |
| $i_{po2} [p.u.]$           | A                         | 60,97  | 45,44  | 11,93                        | 57,41  | 42,73  | 10,99  |
|                            | B                         | -47,18 | -35,22 | -8,55                        | 38,53  | 28,64  | 7,57   |
|                            | C                         | -49,28 | -36,95 | -10,07                       | -57,71 | -43,22 | -11,61 |
| $t_{0(A)} [ms]$            | G1                        | 16,03  | 16,11  | 16,17                        | 17,34  | 17,62  | 16,9   |
|                            | o2                        | 16,48  | 16,65  | 17,11                        | 14,43  | 14,55  | 15,11  |
| $t_{0(B)} [ms]$            | G1                        | 15,23  | 15,21  | 14,49                        | X      |        |        |
|                            | o2                        | 12,21  | 12,28  | 12,35                        |        |        |        |

**Tab. 6.3:** Srovnání dosažených výsledků pro model č. 2

vrcholové hodnotě proudu ve fázi A o zhruba 3,65 [p.u.]. Recipročně pak je možné si všimnout poklesu příspěvku ze soustavy. Je ale nutné zmínit, že takto zřejmý pokles v příspěvku ke zkratovému proudu co do hodnoty uvedené v [p.u.] je nutné též přisuzovat tomu, že zkrat na konci GIL je na jiné napěťové hladině, než zkraty na konci V1 či sekundární straně transformátoru T1. Poměrné hodnoty proudů ze soustavy (o2) jsou totiž vztaženy na hodnoty  $U_v = 400 [kV]$  a  $S_v = 110 [MVA]$ , zatímco poměrné hodnoty proudů alternátoru jsou vztaženy k jeho jmenovitým parametrům. Např. hodnota  $i_{po2}$  ve fázi A je při zkratu na sekundární straně T1 45,44 [p.u.], což odpovídá hodnotě 10,2 [kA]. Při zkratu na primární straně transformátoru je hodnota příspěvku 11,92 [p.u.], což odpovídá hodnotě zhruba 2676 [A].



**Obr. 6.8:** Průběhy proudů při 3f zkratu na konci vedení V1 v čase 0,02 [s]



**Obr. 6.9:** Průběhy proudů při 3f zkratu na konci zapouzdřeného vedení v čase 0,02167 [s]

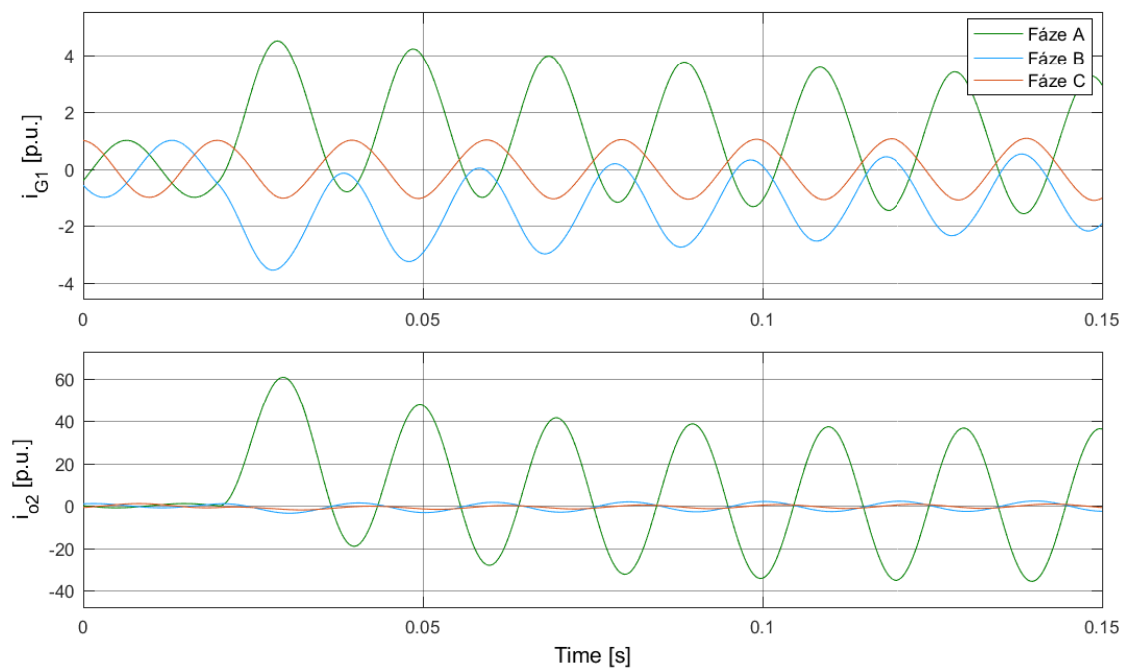
V Tab. 6.3 je rovněž zajímavé porovnání časů  $t_0$  pro proudy ve fázích A a B, opět je potvrzený předpoklad, že větší asymetrie proudu vede k vyšším intervalům mezi průchody proudu nulou a v tomto případě při maximální asymetrii proudu ve fázi A jsou hodnoty času  $t_0$  opět okolo 17 [ms]. Též lze vidět, že při asymetrii 67% (úhlu  $30^\circ$ ) doba  $t_0$  opět překračuje hodnotu 15 [ms]. I tento model tedy potvrzuje závěry z předchozí studie, že vzhledem k asymetrii proudu je nebezpečné pásmo vzniku zkratu při velikosti úhlu  $\alpha$  od 0 do  $30^\circ$ .

Další zajímavé výsledky jsou však zřejmé i v rámci modelování více častých zkratových poruch a to sice jednofázových zkratů. V tomto modelu byly provedeny další studie vyhodnocující asymetrie fázových proudů pro jednofázové zkraty. Jednofázový zkrat je svojí podstatou nesy-metrická porucha, při níž je přesnost získaných výsledků přímo úměrná míře složitosti a komplexnosti vstupních parametrů, protože se ve velké míře uplatňují rozdílné mezifázové kapacity a indukčnosti; dále může zřejmou míru nepřesnosti přinášet nekompletní popis řešení nesy-metrických stavů jednotlivých bloků použitých v modelu, konkrétně tedy zejména bloku transformátoru *Three-Phase Transformer (Two Windings)* či modelu alternátoru *Synchronous Machine – pu Standard*. Zřejmou nepřesností v modelu pak je náhradní model vedení provedený formou náhradního článku s provozními parametry R, L, C, G. Alternativně by bylo možné použít jiné bloky z knihovny Simscape jako např. model vedení s rovnoměrně rozloženými parametry *Distributed Parameters Line* či model několika sériově zapojených  $\pi$ -článků *PI Section Line*, kde pro oba bloky lze definovat velikosti mezifázových parametrů. Bylo ověřeno, že použitím těchto bloků byl zásadním způsobem prodloužen výpočet a zároveň při neznalosti potřebných vstupních parametrů není možné udržet konzistenci s doposud vypracovanými modely. Analytické řešení vede na využití metody souměrných složek.

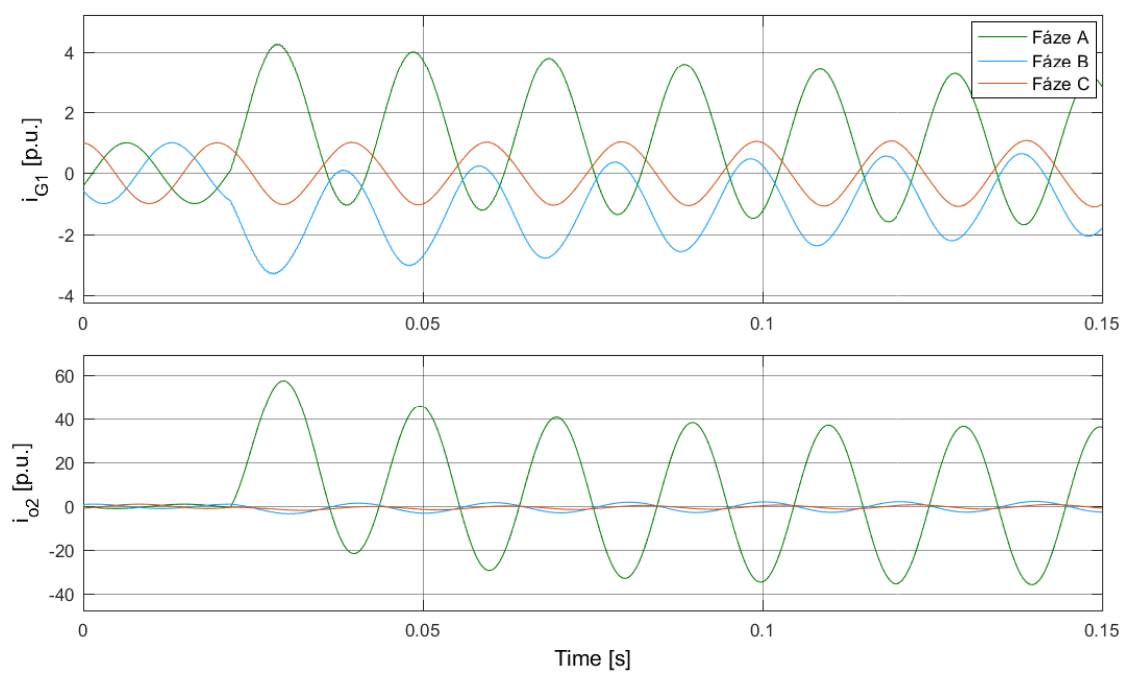
Jedná se o velmi důležitou skutečnost, protože vznikem jednofázového zkratu dojde k narušení symetrie vzhledem k vyvážené různici proudů a napětí a nárůst proudu porouchané fáze bude reflektován ve zdravých fázích. To je patrné na Obr. 6.10 až 6.13, kde je vidět značná asymetrie zkratového proudu ve fázi A. Zkratový proud fáze A procházel nulovou hodnotou v kritických ča-

sech okolo 15 [ms] od vzniku zkratu, ve vybraných případech i více. Zásadní je však průběh ve fázi B, která byla vysunuta zcela pod osu a k průchodu proudu nulovou hodnotou dochází až v průběhu druhé či třetí periody. Je zřejmé, že při zkratu na konci vedení V1 je příspěvek alternátoru o něco menší, než při zkratu na začátku vedení V1. Mnohem zřejmější pokles je ale v případě příspěvku proudu tekoucího ze soustavy – je vidět, že impedanci vedení V1 omezí proud ve zkratované fázi A o zhruba 15 [p.u.], přičemž průchody proudu nulovou hodnotou jsou v intervalech až 16,7 [ms]. Tyto výsledky tak ukazují případ zkratu nebezpečného jak pro generátorový tak pro běžný distribuční vypínač.

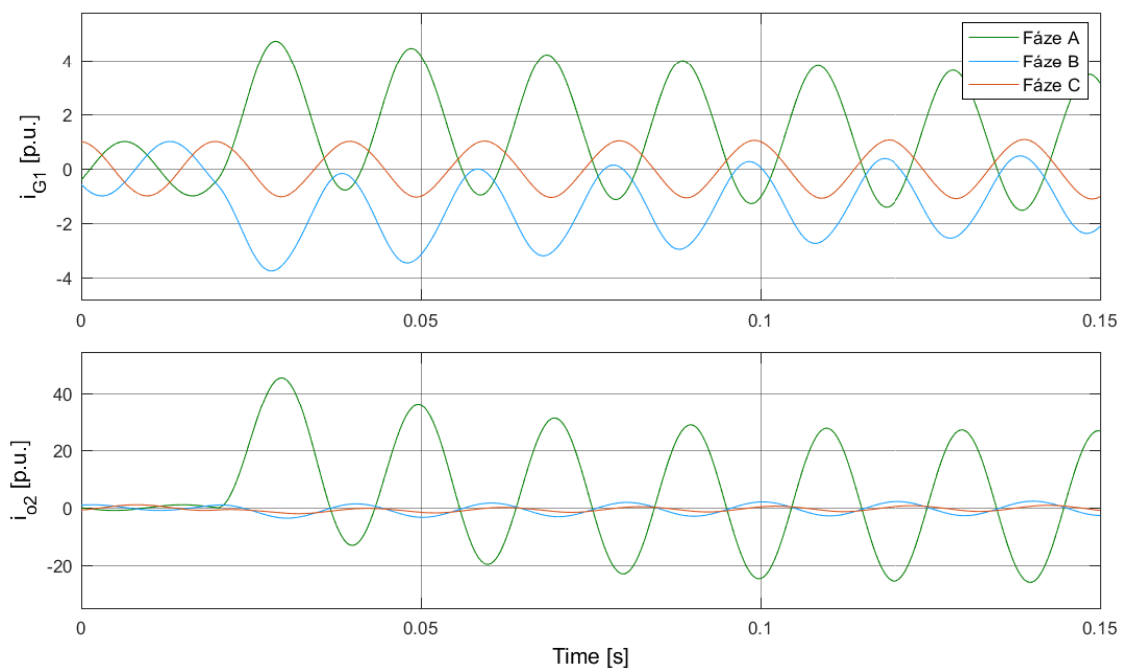
Obrázky 6.14 až 6.17 pak ukazují průběhy při zkratované fázi B ve stejných časech a stejných místech jako při zkratované fázi A. Díky vzájemnému fázovému posuvu se tak průběhy poruchového proudu blíží symetrickému průběhu. Díky tomu ani ostatní fáze nevykazují zásadní vysunutí mimo osu a průchody proudu nulou jsou tak do 12 [ms]. V rámci 1f zkratů je tak nejnebezpečnějším aspektem okamžik vzniku zkratu, který ohrožuje všechny fáze, nejen zkratovanou. Obdobné průběhy a výsledky byly zjištěny též pro případ zkratované fáze C, tyto ale nejsou z důvodů rozsahu a přehlednosti prezentovány.



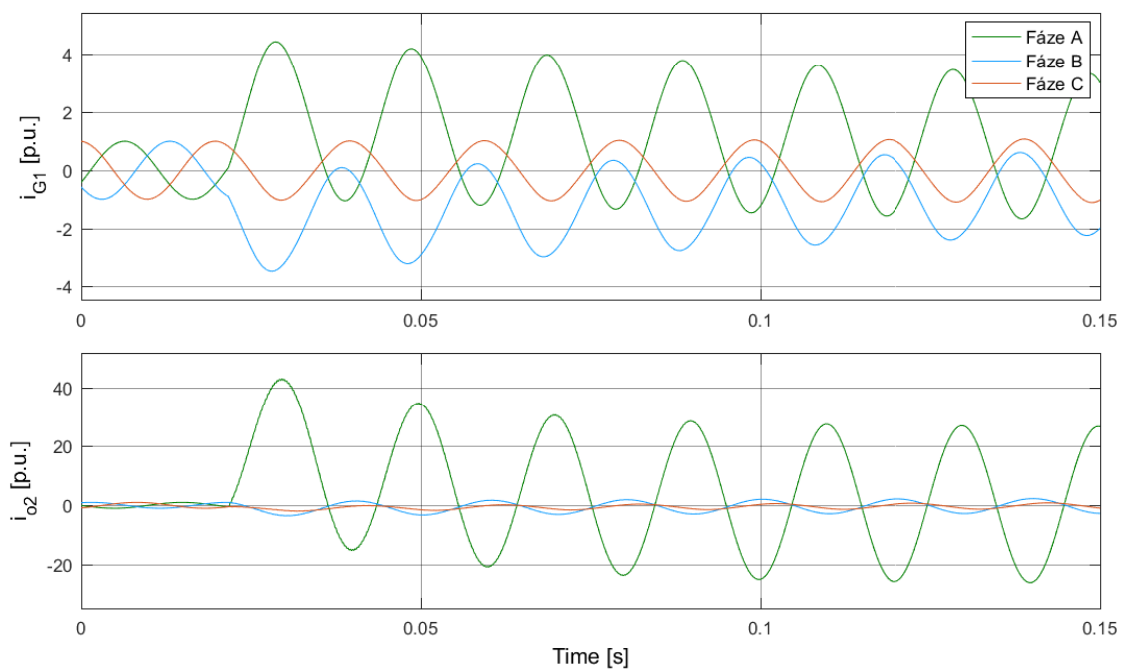
**Obr. 6.10:** Průběhy proudů při zkratu fáze A na konci vedení V1 v čase 0,02 [s]



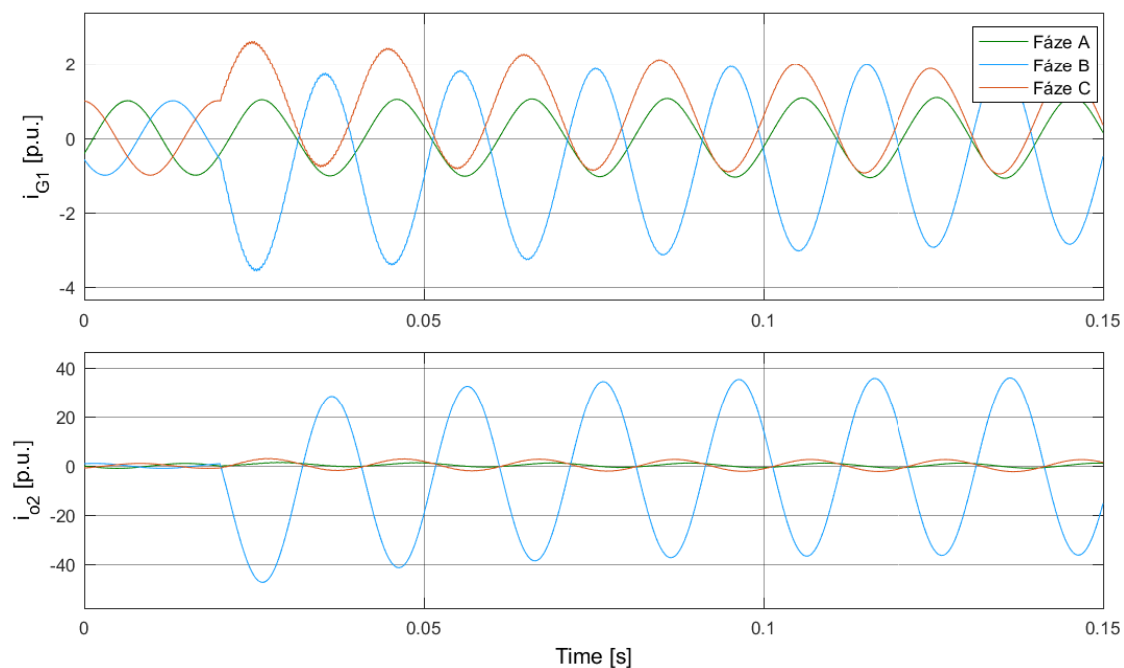
**Obr. 6.11:** Průběhy proudů při zkratu fáze A na konci vedení V1 v čase 0,02167 [s]



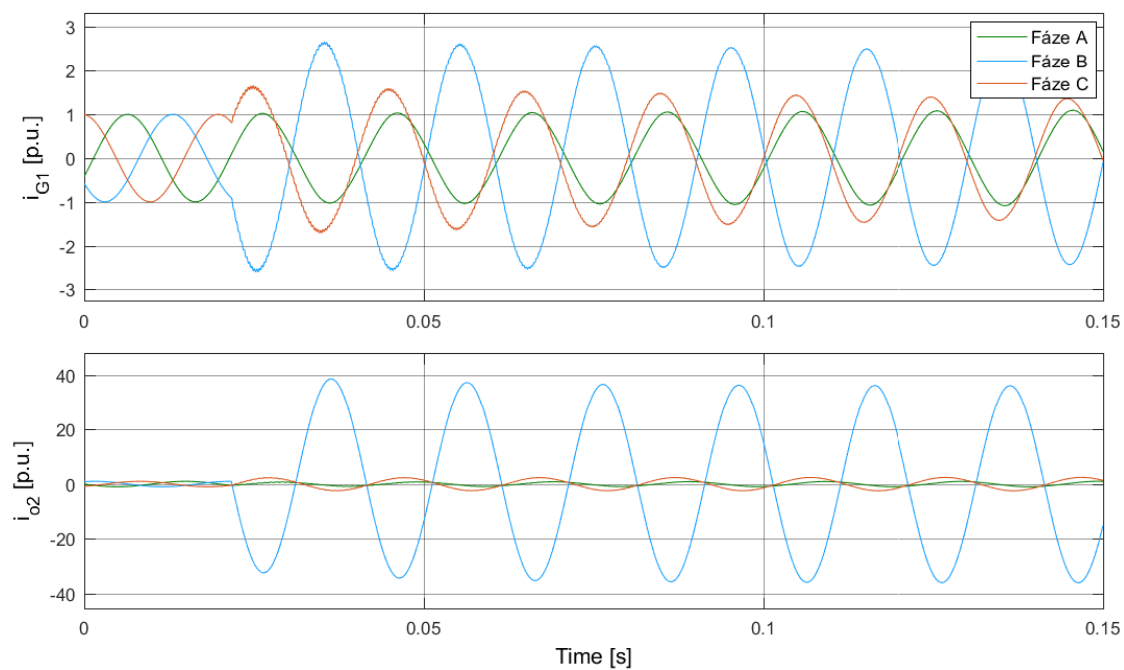
**Obr. 6.12:** Průběhy proudů při zkratu fáze A na sekundární straně transformátoru T1 v čase 0,02 [s]



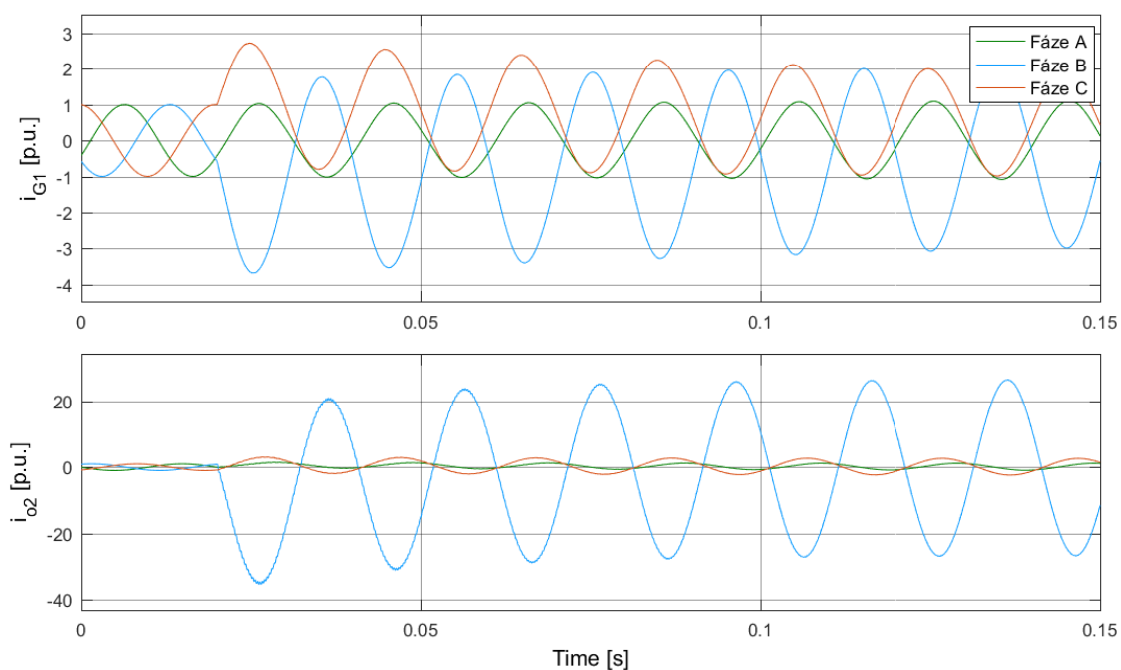
**Obr. 6.13:** Průběhy proudů při zkratu fáze A na sekundární straně transformátoru T1 v čase 0,02167 [s]



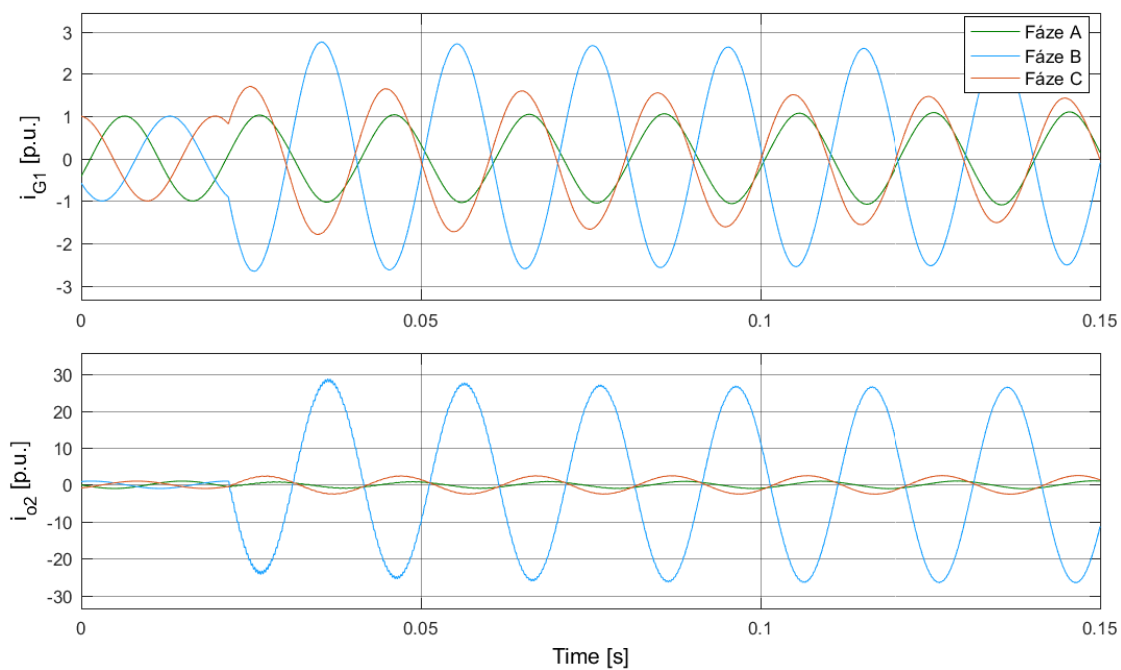
**Obr. 6.14:** Průběhy proudů při zkratu fáze B na konci vedení V1 v čase 0,02 [s]



**Obr. 6.15:** Průběhy proudů při zkratu fáze B na konci vedení V1 v čase 0,02167 [s]



**Obr. 6.16:** Průběhy proudů při zkratu fáze B na sekundární straně transformátoru T1 v čase 0,02 [s]



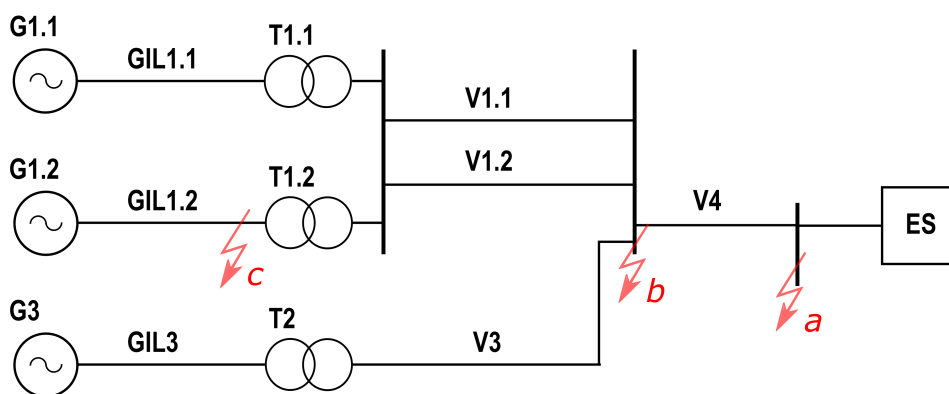
**Obr. 6.17:** Průběhy proudů při zkratu fáze B na sekundární straně transformátoru T1 v čase 0,02167 [s]



## 6.4 Zkrat v náhodném místě soustavy

Třetí modelovaná studie představuje část soustavy, kterou tvoří dva turboalternátory, které jsou vyvedeny zapouzdřenými vodiči přes blokové transformátory do blokové rozvodny, odkud vede dvojité vedení do přenosové rozvodny, do níž je vyveden i jeden blok vodní elektrárny s hydroalternátorem. Odtud pak vede vedení V4 do rozvodny, do níž je připojen blok reprezentující vnější elektrizační soustavu. Jednopolové schéma modelu je uvedeno na Obr. 6.18. V daném schématu byly modelovány celkem 3 místa vzniku zkratu (v Obr. 6.18 označené jako místa *a*, *b*, *c*) – na konci a na začátku vedení V4 a na primární straně transformátoru T1.2. Realizace této třetí studie v Simulinku je pak uvedena na Obr. 6.19, který odpovídá místu zkratu *a* (blok *Fault* je umístěn na konec vedení V4). Ve schématu 6.19 a na níže uvedených průbězích figurují průběhy označené *o1*, *o2* a *oFault* – jedná se o průběhy proudů tekoucích z levé části do zkratu, tekoucích z pravé části do zkratu a výsledný průběh zkratového proudu. Toto rozdělení bylo zvoleno pro následnou dekompozici jednotlivých příspěvků do zkratu a vyhodnocení modelu.

Velikosti jednotlivých parametrů prvků schématu jsou uvedeny v Tab. 6.4. Uvedené parametry vystačí k parametrizaci modelu v Simulinku. Všechny parametry zapadají do typového rozsahu velikosti odpovídajícího parametru a byly voleny s ohledem na nejlepší reprezentaci reálných prvků, zpravidla založené na reálném měření (stroje) či výpočtu provozních parametrů (vedení). Parametry zapouzdřených vodičů byly (stejně tak jako v předchozím modelu) přejaty z [62]. Při znalosti velkého množství potřebných dat v dialogových oknech jednotlivých prvků je důležité zmínit, že množství dalších parametrů není zadáváno explicitně, ale zadání probíhá pomocí load-flow analýzy a inicializace modelu pomocí bloku *powergui* (viz. Kapitola 6.1).

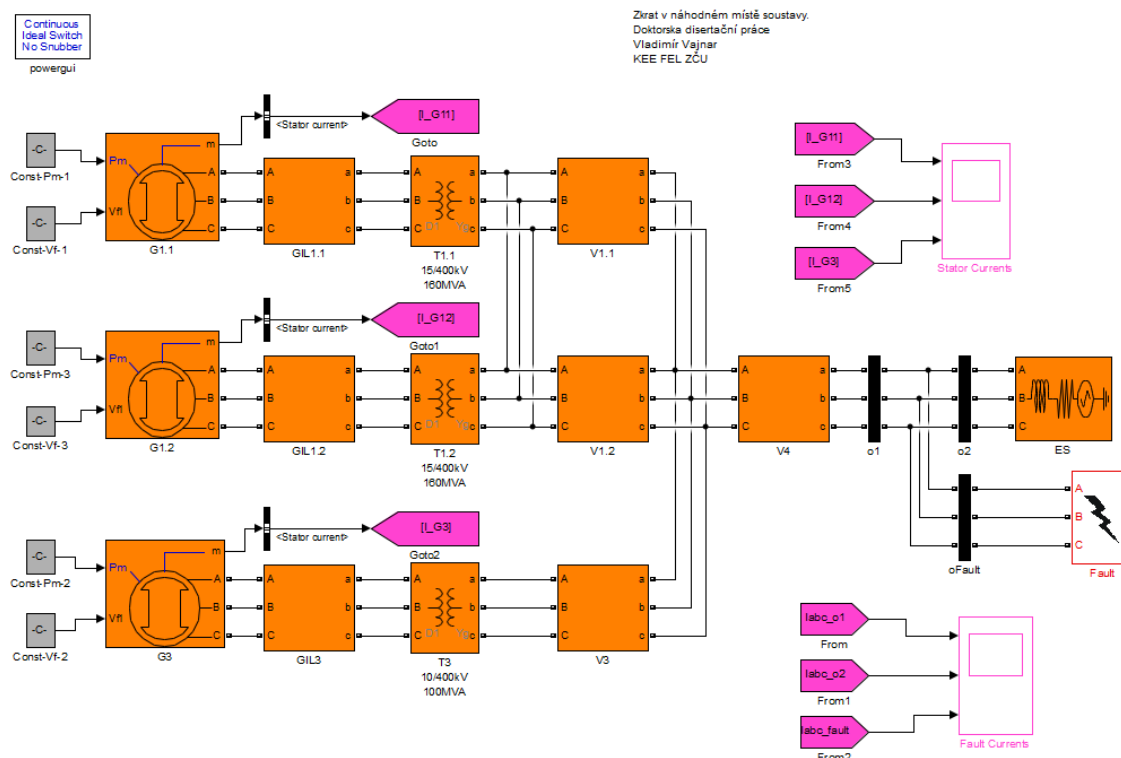


Obr. 6.18: Jednopolové schéma modelu č. 3 s vyznačenými místy zkratu *a*, *b*, *c*

### 6.4.1 Zkrat na konci vedení V4

První z modelovaných případů, zkrat na konci vedení V4 (dle Obr. 6.18 v místě *a*) přináší výsledky uvedené na Obrázcích 6.20 až 6.23. Každá dvojice obrázků vždy ukazuje průběhy proudů při 3f zkratu v místech měření *o1*, *o2* a *oFault* a proudy, které tečou statorovým vinutím alternátorů při daném zkratu. Průběhy jsou pro lepší srovnání vizualizovány v poměrných jednotkách, při vztázných parametrech  $U_v = 400 [kV]$  a  $S_v = 110 [MVA]$ .

Jsou prezentovány 2 případy okamžiku vzniku zkratu, nejprve zkrat vzniknuvší v čase  $t = 0,05 [s]$ , což vede na asymetrický průběh ve fázi A (zelená křivka), dále pak zkrat vzniknuvší v čase  $t = 0,045 [s]$ , který naopak generuje téměř symetrický průběh.



**Obr. 6.19:** Realizace modelu č. 3 v Simulinku se zkratem na konci vedení V4

Na první pohled je možné si všimnout oscilací a nehladkosti průběhů. To je způsobeno přechodnými ději na kapacitách a indukčnostech vedení. Je vidět, že amplituda těchto oscilací je závislá na absolutní hodnotě proudu v okamžiku vzniku zkratu a poměrně rychle (v řádu jednotek period) se utlumí. Oscilace jsou patrné zejména na průběhu  $o1$ , protože nejbližším prvkem je právě vedení V4. Naproti tomu průběhy v místě  $o2$  neobsahují žádné oscilace, protože jde o proudy generované jednoduchým blokem zjednodušeně reprezentujícím ES.

Dalším důležitým ukazatelem je velikost jednotlivých složek – je zřejmé, že hlavním zdrojem zkratového proudu bude právě blok reprezentující ES, protože proud tekoucí z levé strany schématu bude omezován impedancí vedení.

Porovnáním poruchových proudů a proudů tekoucích ze satorů jednotlivých alternátorů lze diskutovat vliv jednotlivých prvků na rychlost tlumení přechodné, rázové a stejnosměrné složky – vidíme, že tyto složky se mnohem více projevují na průbězích proudů ve satorových vinutích a jsou mnohem méně tlumeny. Je tedy zjevná elektrická blízkost synchronního stroje.

V případě asymetrického průběhu (ve fázi A) je možné si všimnout, že proudy tekoucí z levé i z pravé strany protínají časovou osu s prodlouženými intervaly, během prvních třech period s časy až nad 16 [ms], na proudech v sadě  $o1$  je dokonce patrně větší asymetrie, na druhou stranu ale s menší velikostí efektivní hodnoty proudu (viz větší příspěvek bloku ES do zkratu o dva odstavce výše). Naproti tomu symetrický průběh (ve fázi A) potvrzuje dříve diskutovaná fakta – proud prochází nulou v přesných intervalech 10 [ms] a průběhy ve fázích B a C mají stejně velkou, ale opačně orientovanou stejnosměrnou složku.

|   |                                    |                                   |                                      |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <b>G1.1 + G1.2 + G3: Alternátory</b>            |                                    |                                   |                                      |
| Parametry dle Tab. 5.2                          |                                    |                                   |                                      |
| <b>GIL1.1 + GIL1.2 + GIL3: IPB (GIS) vodiče</b> |                                    |                                   |                                      |
| $R_k = 6,29 \text{ m}\Omega/\text{km}$          | $L_k = 0,204 \text{ mH}/\text{km}$ | $C_p = 54,5 \text{ nF}/\text{km}$ | $G_p = 0,49 \mu\text{S}/\text{km}$   |
| $I_{GIL1.1} = I_{GIL1.2} = 200 \text{ m}$       |                                    | $I_{GIL3} = 500 \text{ m}$        |                                      |
| <b>V1.1 + V1.2: Donau AIFe 3x350/6</b>          |                                    |                                   |                                      |
| $R_k = 0,0283 \Omega/\text{km}$                 | $L_k = 1,1 \text{ mH}/\text{km}$   | $C_p = 8,12 \text{ nF}/\text{km}$ | $G_p = 0,0187 \mu\text{S}/\text{km}$ |
| $l = 80 \text{ km}$                             |                                    |                                   |                                      |
| <b>V3: Portál AIFe 3x350/6</b>                  |                                    |                                   |                                      |
| $R_k = 0,0291 \Omega/\text{km}$                 | $L_k = 0,95 \text{ mH}/\text{km}$  | $C_p = 4,12 \text{ nF}/\text{km}$ | $G_p = 0,02 \mu\text{S}/\text{km}$   |
| $l = 40 \text{ km}$                             |                                    |                                   |                                      |
| <b>V4: Portál AIFe 3x450/6</b>                  |                                    |                                   |                                      |
| $R_k = 0,029 \Omega/\text{km}$                  | $L_k = 0,95 \text{ mH}/\text{km}$  | $C_p = 6,12 \text{ nF}/\text{km}$ | $G_p = 0,02 \mu\text{S}/\text{km}$   |
| $l = 60 \text{ km}$                             |                                    |                                   |                                      |
| <b>T1.1 + T1.2: Ynd1 15/400 kV 160 MVA</b>      |                                    |                                   |                                      |
| $u_k = 8 \%$                                    | $\Delta P_k = 0,4 \%$              | $i_0 = 0,1 \%$                    | $\Delta P_0 = 0,15 \%$               |
| $r_k = 0,004 \text{ p.u.}$                      | $x_\sigma = 0,079 \text{ p.u.}$    | $g_{Fe} = 0,0015 \text{ p.u.}$    | $b_\mu = 0,0098 \text{ p.u.}$        |
|   | $r_{Fe} = 666,6 \text{ p.u.}$      | $x_\mu = 108 \text{ p.u.}$        |                                      |
| <b>T3: Ynd1 10/400 kV 100 MVA</b>               |                                    |                                   |                                      |
| $u_k = 8 \%$                                    | $\Delta P_k = 0,42 \%$             | $i_0 = 0,1 \%$                    | $\Delta P_0 = 0,15 \%$               |
| $r_k = 0,00389 \text{ p.u.}$                    | $x_\sigma = 0,08 \text{ p.u.}$     | $g_{Fe} = 0,0015 \text{ p.u.}$    | $b_\mu = 0,0098 \text{ p.u.}$        |
|   | $r_{Fe} = 666,6 \text{ p.u.}$      | $x_\mu = 120 \text{ p.u.}$        |                                      |
| <b>ES: Soustava 400 kV</b>                      |                                    |                                   |                                      |
| $U_n = 400 \text{ kV}$                          | $S_{ks} = 4 \text{ GVA}$           | $X/R = 8,3$                       |                                      |

Tab. 6.4: Parametry prvků modelované soustavy

#### 6.4.2 Zkrat na začátku vedení V4

Výsledné průběhy při zkratu na začátku vedení V4 a stejné typové situace (symetrický a asymetrický průběh) jsou uvedeny na Obr. 6.24 až 6.27. Výsledky potvrzují předpokládané skutečnosti – došlo k omezení velikosti proudu tekoucího z pravé strany schématu, protože proud je nyní omezen nejen velikostí pouze bloku ES, ale i impedancí vedení V4. Dále jsou patrné větší oscilace poruchového proudu, protože místo zkratu je nyní ovlivněno z obou stran kapacitami vedení V1.1, V1.2, V3 i V4. Co se týče porovnání velikosti proudů tekoucích z jednotlivých alternátorů, je patrný jen mírný nárůst, porovnáním hodnoty nárazového zkratového proudu ve fázi A na Obr. 6.23 a 6.27 došlo k nárůstu jen o cca 0,2 [p.u.]. Projevy alternátorů jsou tak ještě dostatečně elektricky vzdálené.

Obr. 6.26 ukazuje případ 3f zkratu s téměř dokonale symetrickým průběhem ve fázi A, jež amplituda je cca 32 [p.u.], což při vztažných parametrech  $U_V = 400 \text{ [kV]}$  a  $S_V = 110 \text{ [MVA]}$  odpovídá:

$$i_{\text{fault(MAX)}} = \sqrt{2} \cdot \frac{S_V}{\sqrt{3} \cdot U_V} \cdot i_{\text{fault[p.u.]}} = \sqrt{2} \cdot \frac{110 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3} \cdot 32 = 7,19 \text{ [kA]} \quad (6.1)$$

### 6.4.3 Zkrat na primární straně transformátoru T1.2

Výsledné průběhy při zkratu v místě *c*, tedy na primární straně transformátoru T1.2 jsou uvedeny na Obr. 6.28 až 6.31. V tomto případě byly poměrné jednotky počítány na napěťovou úroveň primární strany transformátoru, tedy  $U_V = 15 [kV]$ . Průběhy zcela jasně potvrzují elektrickou blízkost alternátoru G1.2 i G1.1, protože na výsledných průbězích proudů v místech *o1* i *o2* je vidět patrná asymetrie a pomalý útlum (mnohem patrnější v porovnání s předchozími případy).

Je možné si všimnout, že příspěvky z levé i z pravé strany schématu jsou téměř stejné (proudy dosahující hodnoty nárazového zkratového proudu cca 10 [p.u.] s výslednou velikostí zkratového proudu cca 20 [p.u.]), protože obě paralelní větve mají srovnatelnou hodnotu impedance. Přepočtením hodnot nárazových zkratových proudů fází A a B z grafu  $i_{o1}$  v Obr. 6.28 z poměrných na pojmenované SI je možné zjistit, že hodnota 10 [p.u.] odpovídá zhruba:

$$I_{V(RMS)} = \frac{S_V}{\sqrt{3} \cdot U_V} \Rightarrow i_p = \sqrt{2} \cdot \frac{S_V}{\sqrt{3} \cdot U_V} \cdot i_{p[p.u.]} = \sqrt{2} \cdot \frac{110 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3} \cdot 10 = 59,8 [kA] \quad (6.2)$$

Výslednou hodnotu nárazového zkratového proudu lze opět dokázat výstupem ze simulace odškrtnutím volby měření v poměrných jednotkách v bloku měření, což bylo také provedeno a zpětná početní verifikace tak byla úspěšná. Za povšimnutí dále stojí fakt, že pro alternátor G1.2 se jedná o téměř svorkový zkrat a v Obr. 6.29 a 6.31 má průběh vždy alespoň v jedné fázi průchod proudu nulovou hodnotou až po cca 18 [ms].

### 6.4.4 Jednofázový zkrat na začátku vedení V4

Pro doplnění spektra poruchových proudů a pro širší pohled na souvislosti v rámci oddálených proudových nul při zkratech v soustavě byl modelován i případ jednofázového zkratu, který je v soustavách běžnější a častější, než zkrat třífázový. Z hlediska závislosti okamžiku vzniku zkratu a související velikosti asymetrie jsou očekávány obdobné závěry jako v případě zkratů třífázových, nicméně vliv na výsledné průběhy a tedy i podmínky vypínání bude mít to, že se nejedná o symetrickou (z hlediska vyvážené růžice 3f proudů a napětí) poruchu a na výsledcích se též projeví mezifázové vzájemné indukčnosti a kapacity, které tak tvoří zásadní komplikaci v této úloze.

Bylo prozkoumáno celé spektrum proudů pro různě velkou asymetrii, tedy pro různý okamžik vzniku zkratu přepočítaný na úhel  $\alpha$ . Relevantní a veskrze podobná studie byla provedena i v rámci [60], která však v podobném modelu iniciuje zkraty s krokem 2 [ms] v průběhu jedné půlperrody. Výsledky ze zmíněného zdroje dávají dobrou představu o chování a spektrech proudů, nicméně tato studie iniciuje vznik 1f zkratu v daných hodnotách úhlu  $\alpha$ , konkrétně pro úhly 0, 30, 45, 60 a 90°, protože velikost vyvinuté asymetrie je závislá na kosinové funkci tohoto úhlu. Postupně byly zkratovány jednotlivě všechny fáze a sledovány hodnoty nárazového zkratového proudu, čas prvního průchodu proudu nulovou hodnotou a nárazové zkratové proudy tekoucí z generátorů G1.1, G1.2 a G3. Tab. 6.5 obsahuje porovnání nejdůležitějších parametrů pro různé momenty vzniku zkratu.

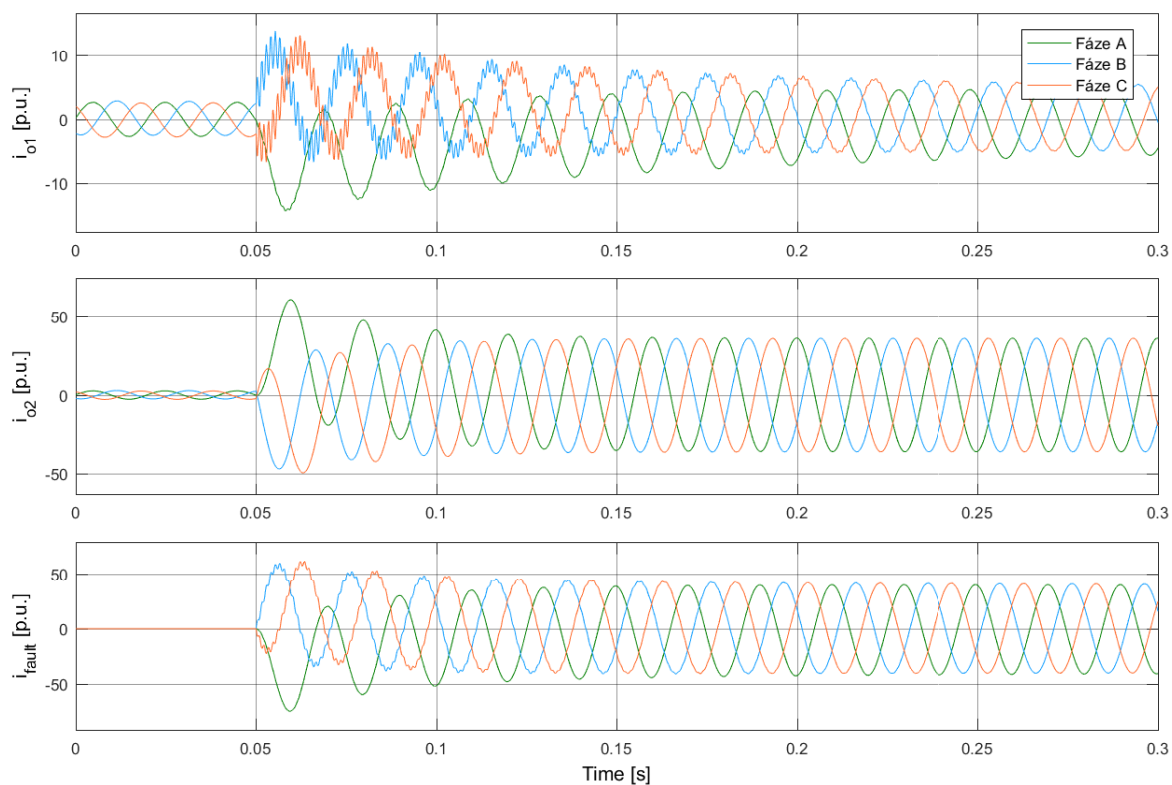
Získané průběhy jsou vidět na Obr. 6.32 až 6.35, které opět zobrazují průběhy proudů v bodech *o1*, *o2*, *oFault* a proudy ve statorových vinutích alternátorů právě při 1f zkratu na začátku vedení V4. Obrázky znázorňují průběhy při zcela symetrickém a asymetrickém průběhu ve fázi A, tedy případy zkratu, který vznikl v čase  $t = 0,055 [s]$  a v čase  $t = 0,05 [s]$  (v Tab. 6.5 se jedná se o hodnoty v prvním a posledním sloupci v horní třetině).

Z obrázků i z tabulky je patrné celé spektrum vypínaných parametrů při jednofázovém zkratu. Je vidět, že asymetrie zkratových proudů v odpovídajících fázích byla tím vyšší, čím menší je úhel  $\alpha$ . Asymetrie výsledných zkratových proudů se relevantně projevuje i na průbězích proudů tekoucích z generátorů i přes to, že zkrat na začátku vedení V4 je generátorům elektricky poměrně vzdálený. Též lze zhodnotit, že prodloužené průchody proudu nulovou hodnotou nad 15 [ms] lze pozorovat pro všechny fáze v intervalech úhlu  $\alpha$  od 0 až do cca 30°. Tím pádem dochází k eliminaci náhodnosti příčinné souvislosti mezi okamžikem vzniku zkratu a asymetrií zkratového proudu, protože v blízkosti tohoto intervalu se vždy bude nacházet průběh v alespoň jedné fázi. Míra náhodnosti tak bude mnohem zásadnější pro konkrétní zkratovanou fázi. Další velmi důležitou skutečností povšimnutíhodnou na Obr. 6.34 a 6.35 je průběh v nepostižených fázích. Stejně tak jako v předchozím modelu zkratů na větví vyvedení výkonu z elektrárny, i zde je patrné zjevné vysunutí průběhů nad či pod osu. V souvislosti s předchozím výrokem tak 1f zkraty tvoří velice nebezpečnou vypínací disciplínu, která v kontextu asymetrie zkratových proudů je nebezpečná pro všechny fáze a to jak pro složky zkratového proudu tekoucí z generátoru, tak i pro složky tekoucí z ES.

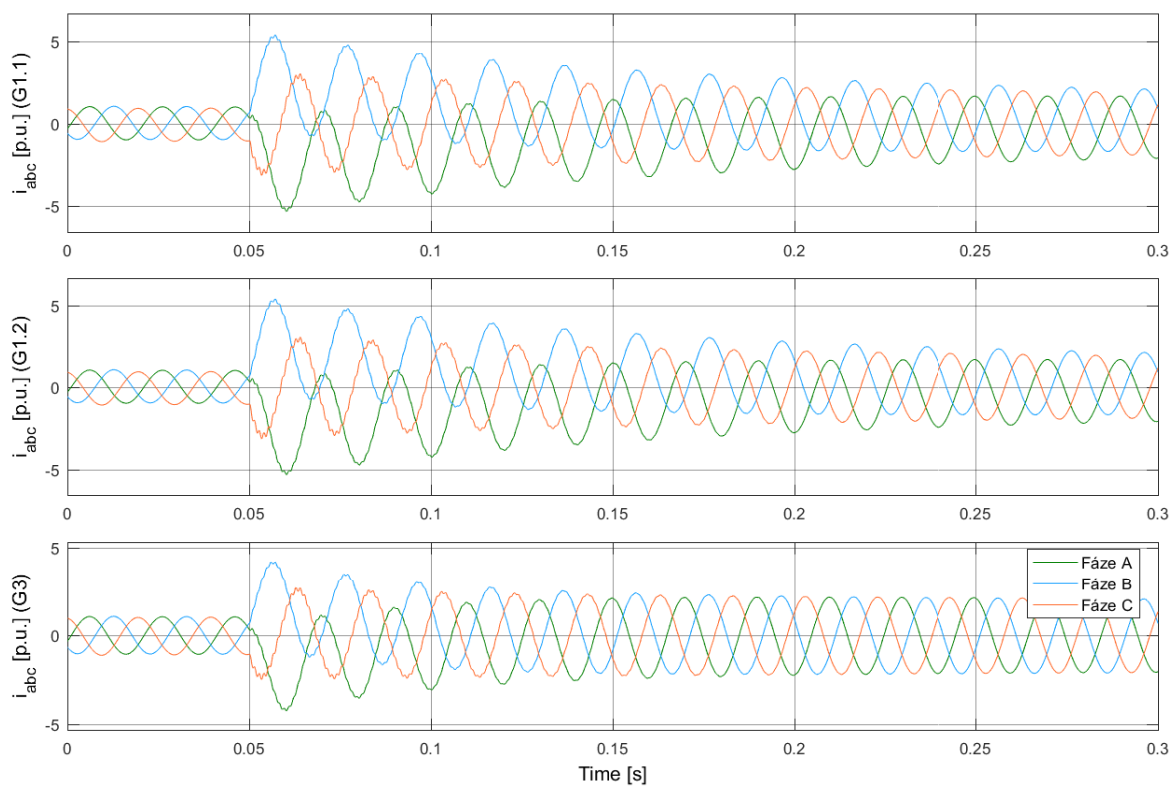
| Zkratovaná fáze | $\alpha$                      | 0°      | 30°     | 45°     | 60°     | 90°     |
|-----------------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>A</b>        | $t_{inception}$ [s]           | 0,05    | 0,05167 | 0,0525  | 0,05333 | 0,055   |
|                 | $i_p$ [p.u.]                  | -64,31  | -59,65  | -56,11  | -51,41  | -34,28  |
|                 | $i_p$ [kA]                    | -14,44  | -13,39  | -12,60  | -11,54  | -7,71   |
|                 | $t_0$ [ms]                    | 16,74   | 14,71   | 13,28   | 12,06   | 10,00   |
|                 | $i_{pG1.1}, i_{pG1.2}$ [p.u.] | -4,57   | -4,28   | -3,97   | -3,45   | -2,51   |
|                 | $i_{pG1.1}, i_{pG1.2}$ [kA]   | -27,36  | -25,63  | -23,77  | -20,66  | -15,03  |
| <b>B</b>        | $i_{pG3}$ [p.u.]              | -3,67   | -3,47   | -3,19   | -2,91   | -2,12   |
|                 | $i_{pG3}$ [kA]                | -21,97  | -20,78  | -19,10  | -17,42  | -12,69  |
|                 | $t_{inception}$ [s]           | 0,05667 | 0,05833 | 0,05915 | 0,06    | 0,06167 |
|                 | $i_p$ [p.u.]                  | -64,29  | -60,81  | -56,80  | -52,17  | -37,91  |
|                 | $i_p$ [kA]                    | -14,43  | -13,65  | -12,75  | -11,71  | -8,50   |
|                 | $t_0$ [ms]                    | 16,81   | 14,67   | 13,39   | 11,95   | 10,81   |
| <b>C</b>        | $i_{pG1.1}, i_{pG1.2}$ [p.u.] | -4,55   | -4,25   | -3,87   | -3,47   | -2,44   |
|                 | $i_{pG1.1}, i_{pG1.2}$ [kA]   | -27,24  | -25,44  | -23,17  | -20,78  | -14,61  |
|                 | $i_{pG3}$ [p.u.]              | -3,68   | -3,48   | -3,22   | -2,92   | -2,18   |
|                 | $i_{pG3}$ [kA]                | -22,04  | -20,84  | -19,28  | -17,48  | -13,05  |
|                 | $t_{inception}$ [s]           | 0,04333 | 0,045   | 0,04583 | 0,04667 | 0,04833 |
|                 | $i_p$ [p.u.]                  | -64,38  | -61,37  | -57,41  | -52,42  | -38,05  |
| <b>C</b>        | $i_p$ [kA]                    | -14,46  | -13,78  | -12,89  | -11,77  | -8,54   |
|                 | $t_0$ [ms]                    | 16,82   | 14,71   | 13,36   | 12,01   | 10,17   |
|                 | $i_{pG1.1}, i_{pG1.2}$ [p.u.] | -4,62   | -4,34   | -4,02   | -3,60   | -2,56   |
|                 | $i_{pG1.1}, i_{pG1.2}$ [kA]   | -27,66  | -25,99  | -24,07  | -21,56  | -15,33  |
|                 | $i_{pG3}$ [p.u.]              | -3,71   | -3,48   | -3,24   | -2,95   | -2,14   |
|                 | $i_{pG3}$ [kA]                | -22,21  | -20,84  | -19,40  | -17,66  | -12,81  |

**Tab. 6.5:** Srovnání relevantních výsledků pro 1f zkrat na začátku vedení V4 ( $\alpha$  je velikost elektrického úhlu od proudové nuly,  $t_{inception}$  je čas simulace při vzniku zkratu,  $i_p$  je maximální okamžitá hodnota zkratového proudu,  $i_{pG1.1}$ ,  $i_{pG1.2}$  a  $i_{pG3}$  jsou maximální okamžité hodnoty proudů z odpovídajících alternátorů)

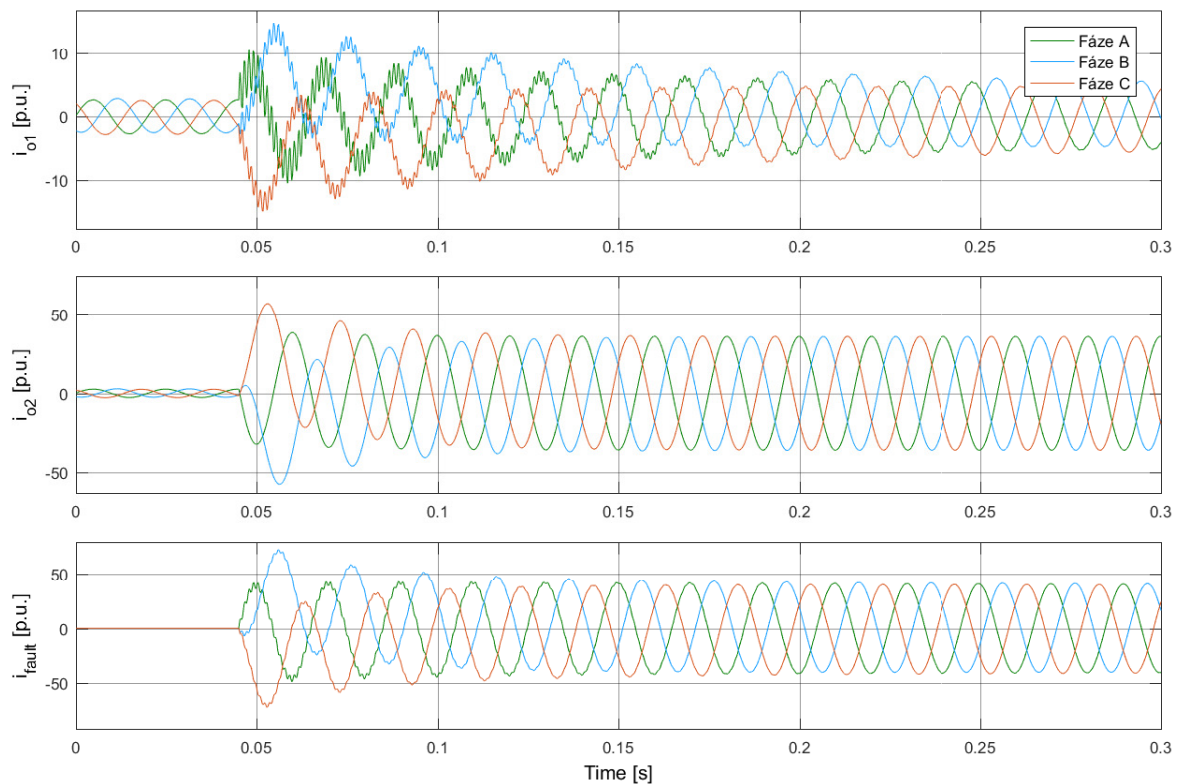
<sup>2</sup>Poměrné jednotky proudů alternátoru jsou vztaženy vůči jmenovitým proudům alternátorů, na rozdíl od poměrných jednotek poruchového proudu a jeho příspěvků, které jsou vztaženy na  $U_v = 400$  [kV] a  $S_v = 110$  [MVA].



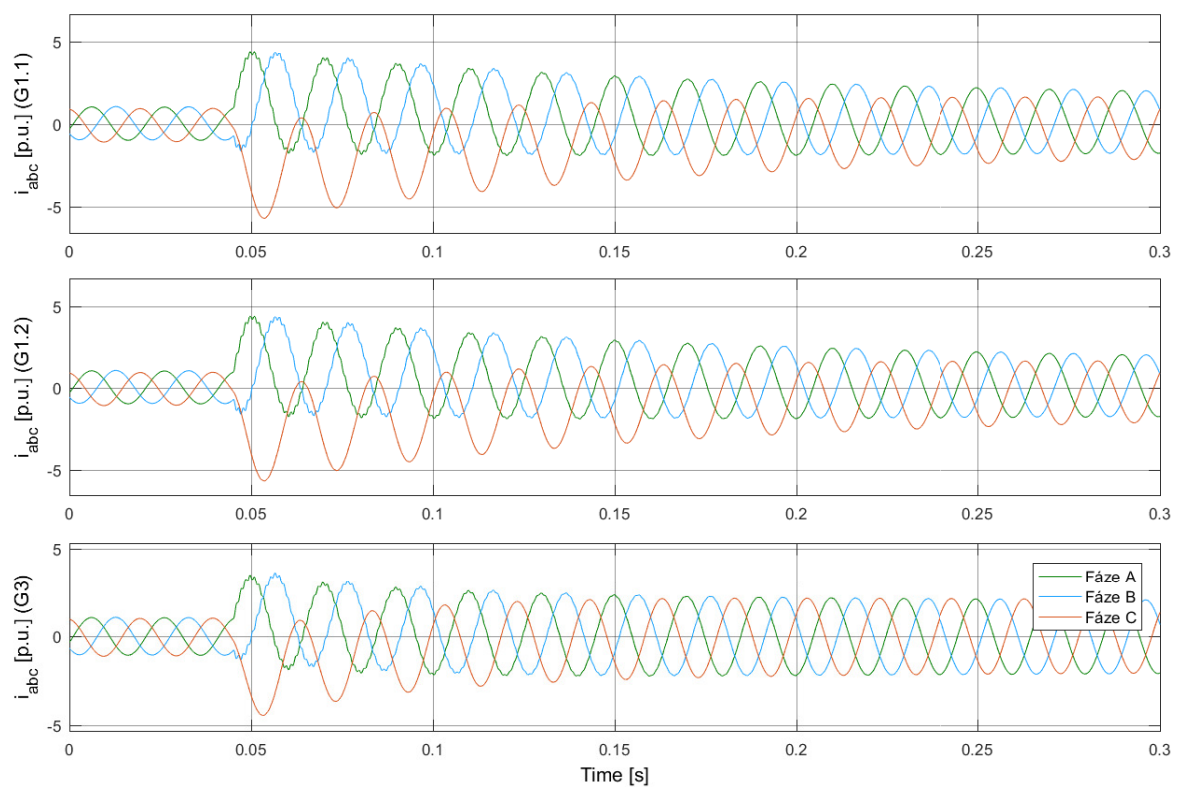
**Obr. 6.20:** Průběhy měřených proudů při 3f zkratu v místě *a* – asymetrický průběh



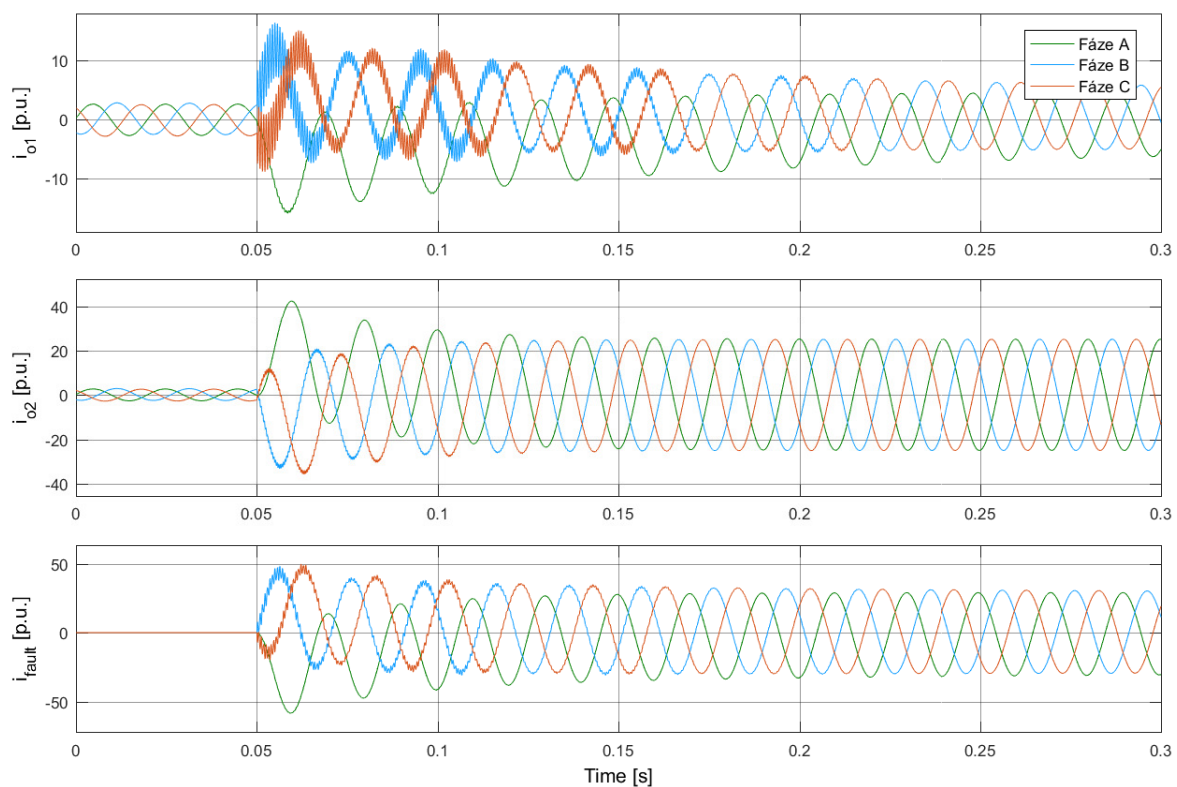
**Obr. 6.21:** Průběhy proudů z generátorů při 3f zkratu v místě *a* – asymetrický průběh



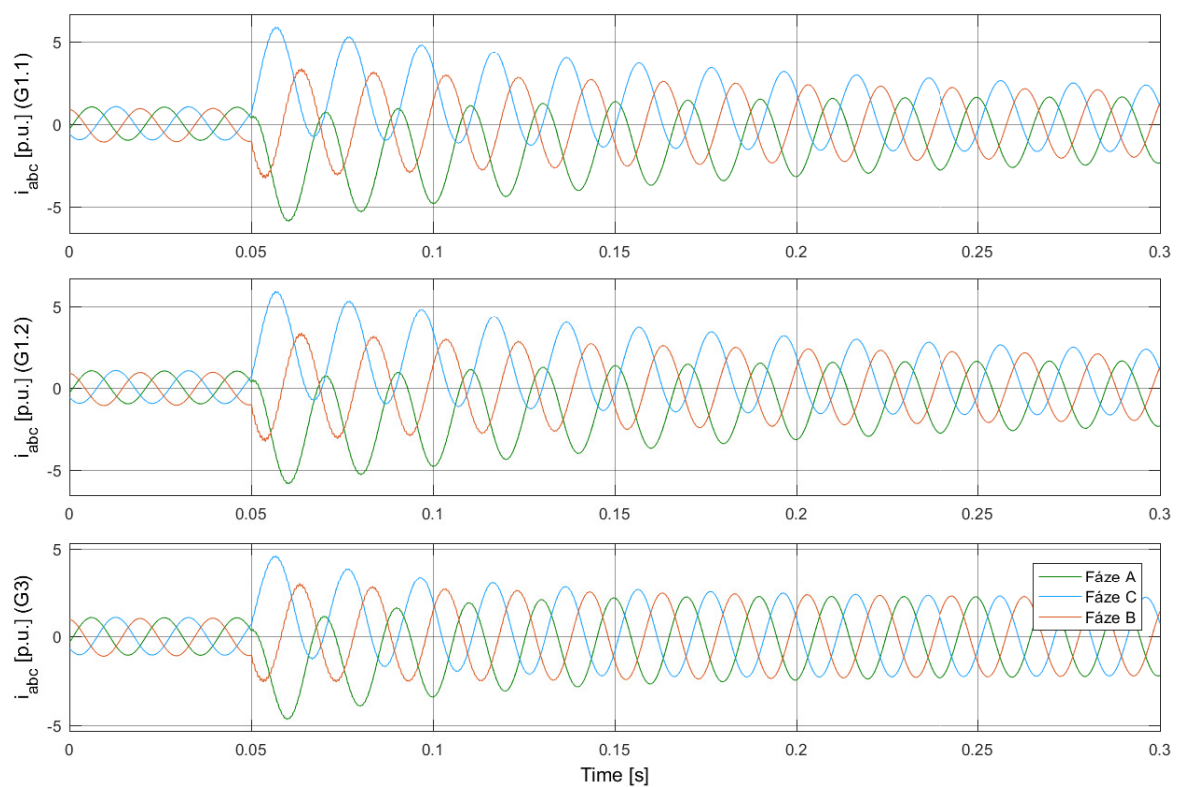
**Obr. 6.22:** Průběhy měřených proudů při 3 $\phi$  zkratu v místě  $a$  – symetrický průběh



**Obr. 6.23:** Průběhy proudů z generátorů při 3 $\phi$  zkratu v místě  $a$  – symetrický průběh

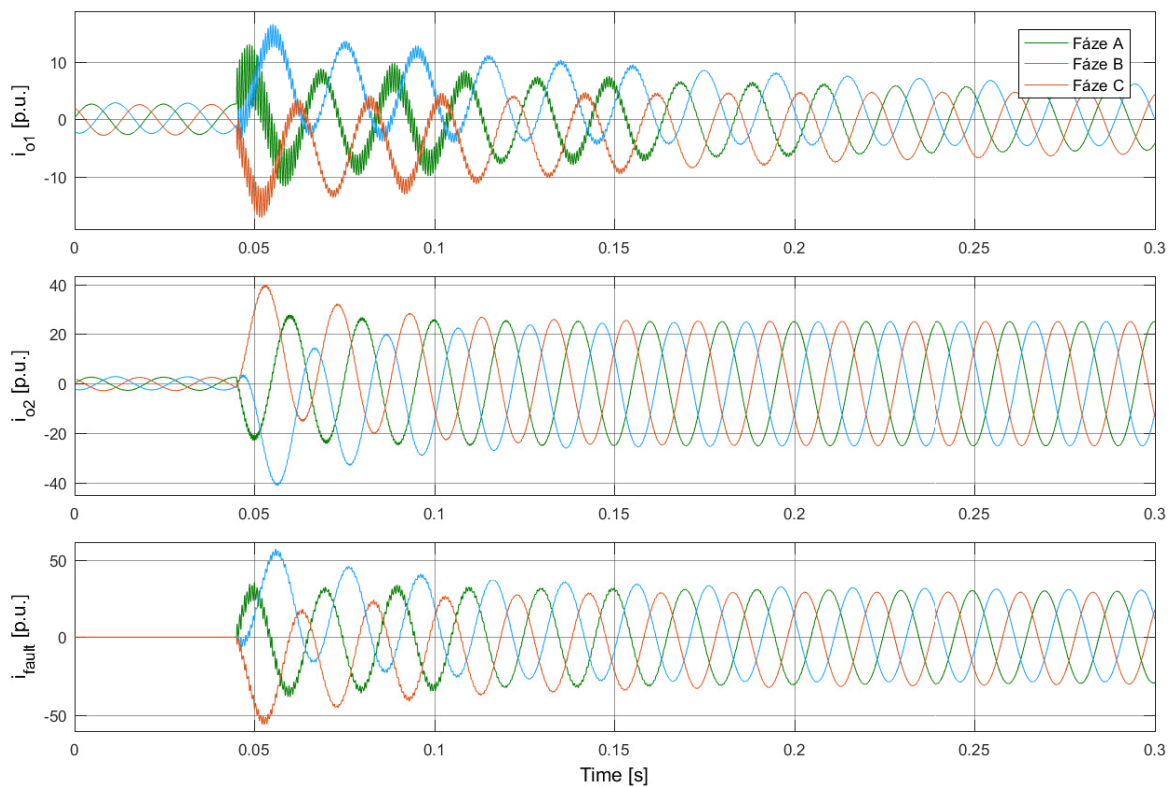


**Obr. 6.24:** Průběhy měřených proudů při 3f zkratu v místě  $b$  – asymetrický průběh

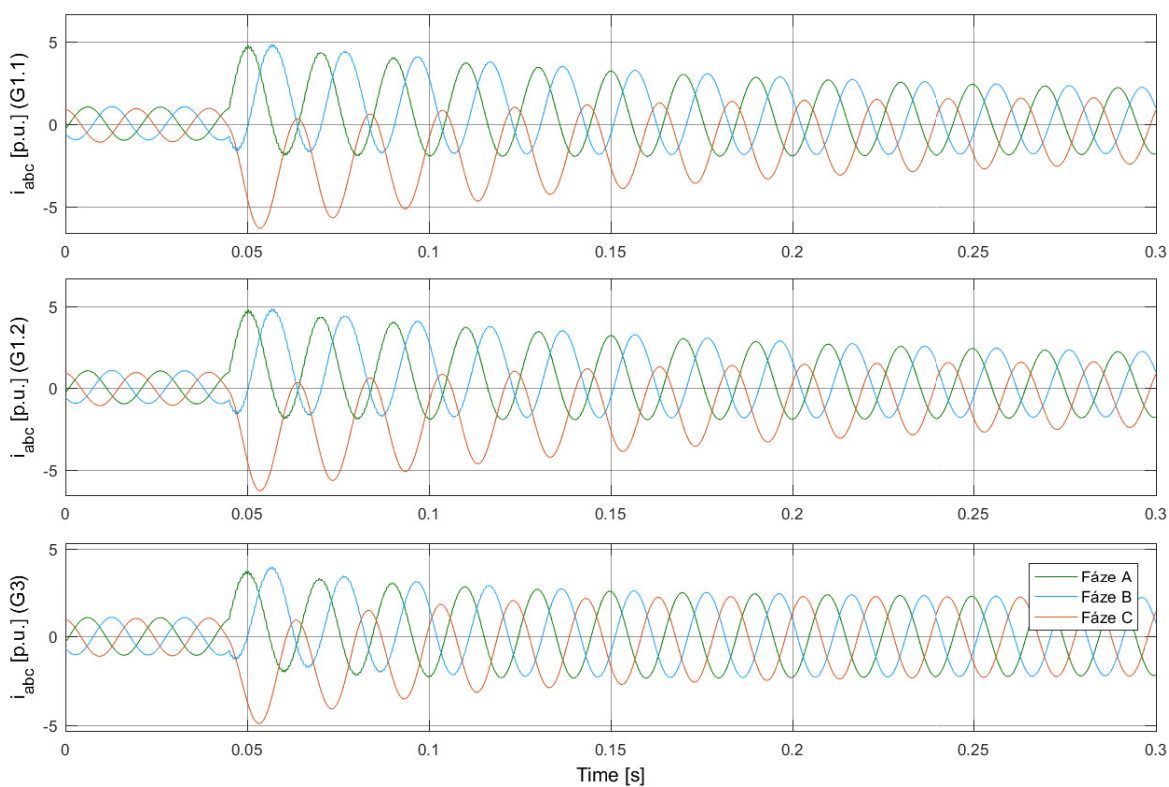


**Obr. 6.25:** Průběhy proudů z generátorů při 3f zkratu v místě  $b$  – asymetrický průběh

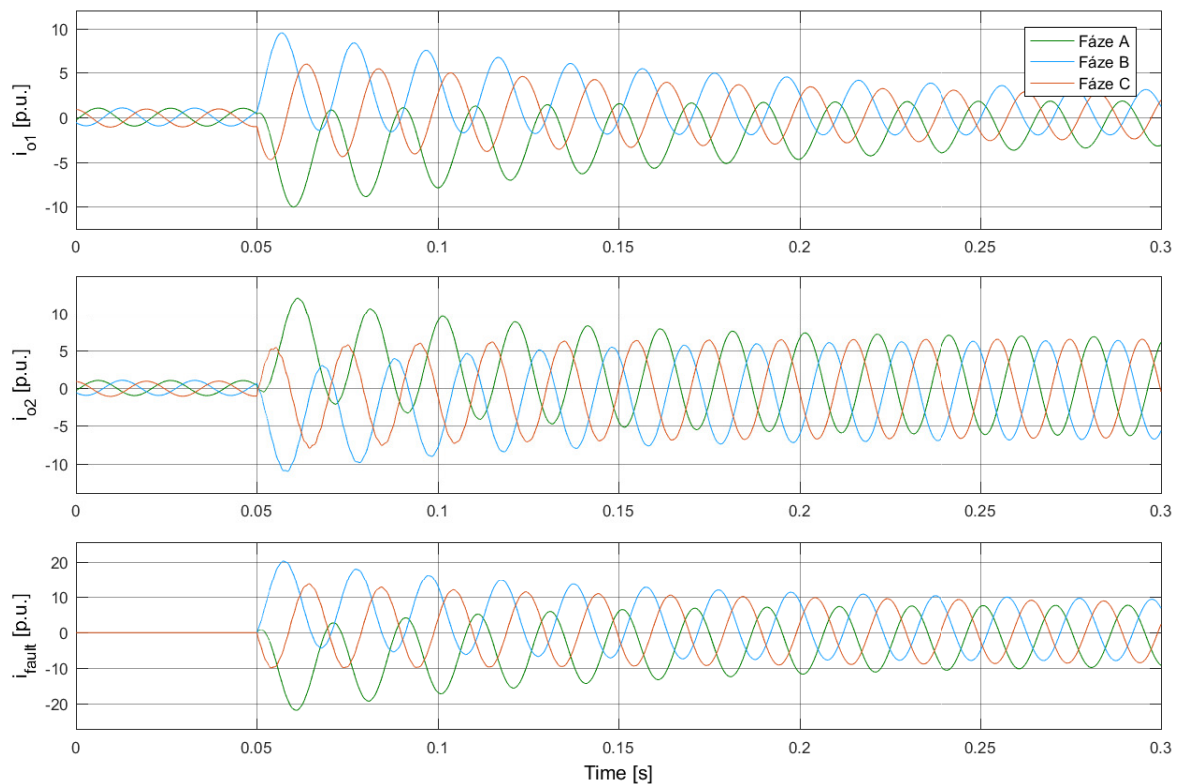




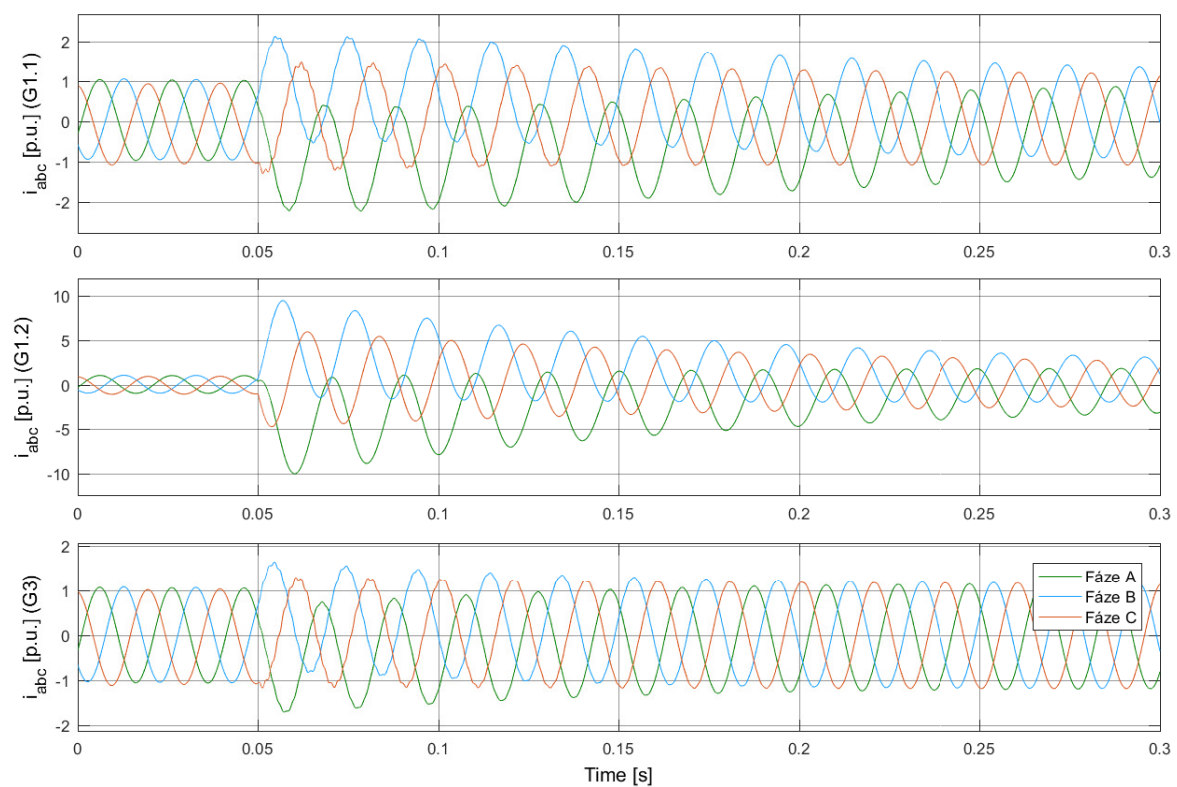
**Obr. 6.26:** Průběhy měřených proudů při 3f zkratu v místě  $b$  – symetrický průběh



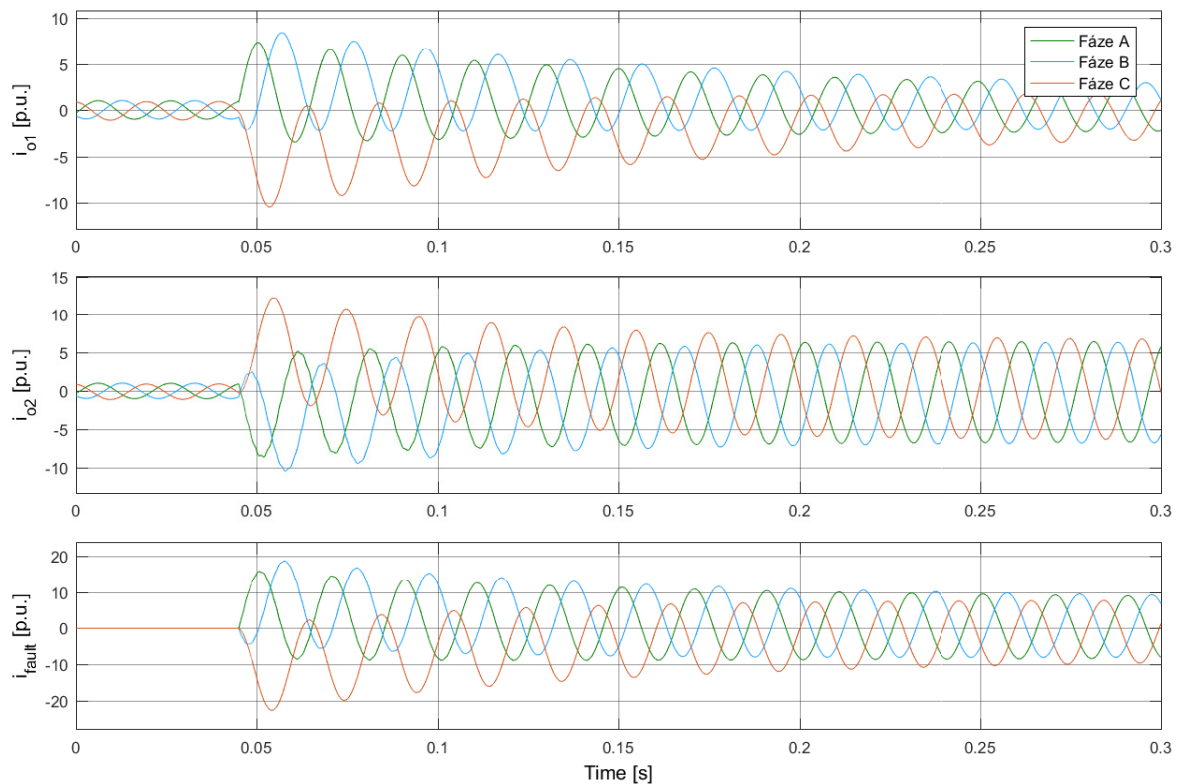
**Obr. 6.27:** Průběhy proudů z generátorů při 3f zkratu v místě  $b$  – symetrický průběh



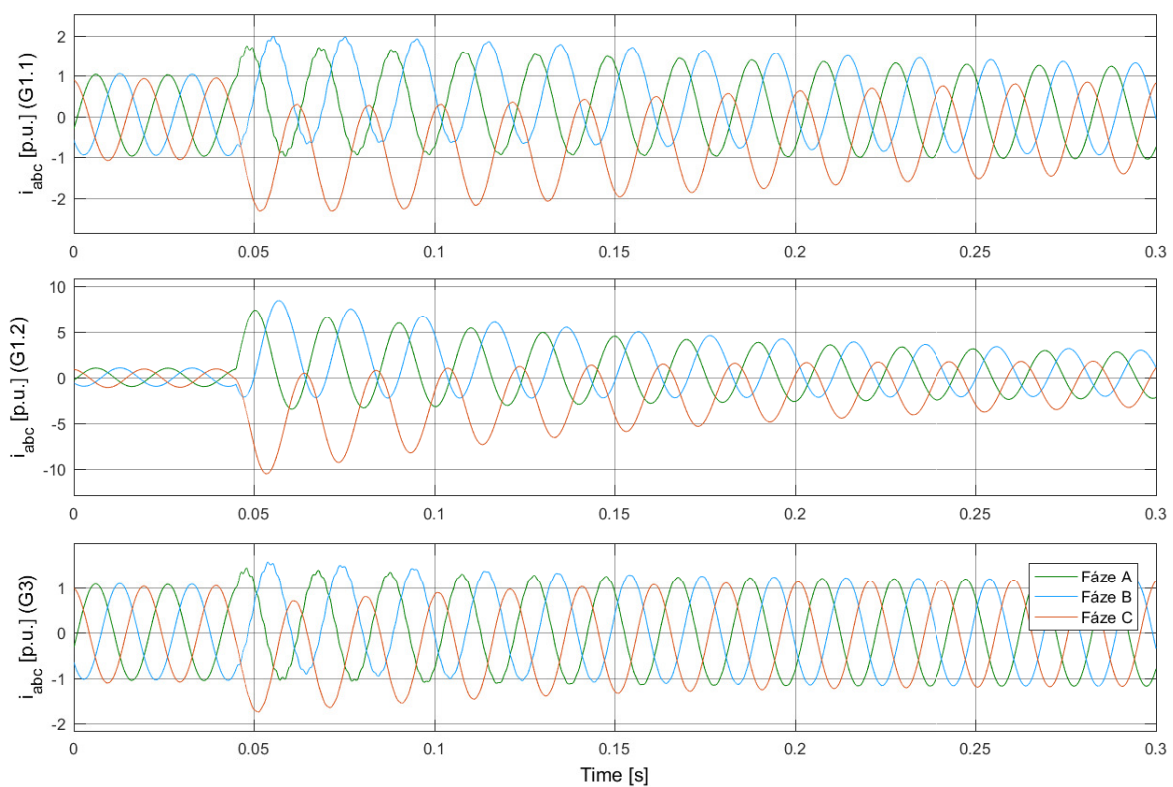
**Obr. 6.28:** Průběhy měřených proudů při 3f zkratu v místě  $c$  – asymetrický průběh



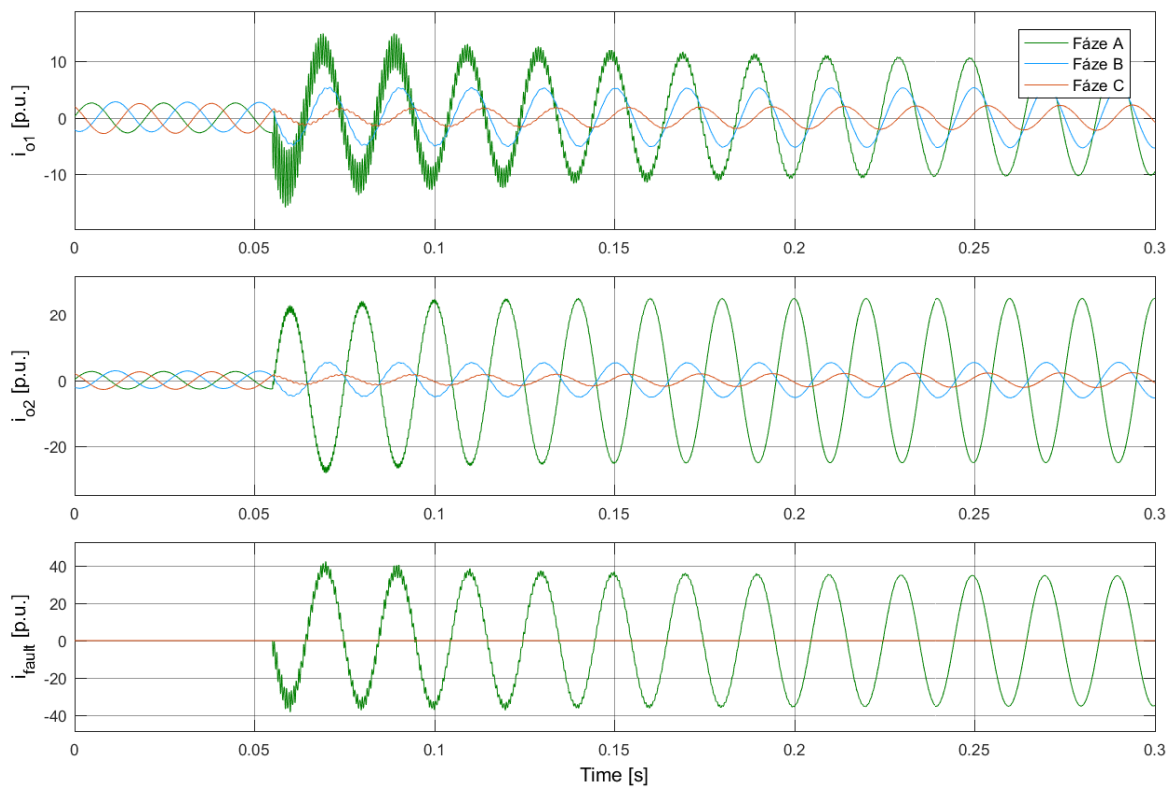
**Obr. 6.29:** Průběhy proudů z generátorů při 3f zkratu v místě  $c$  – asymetrický průběh



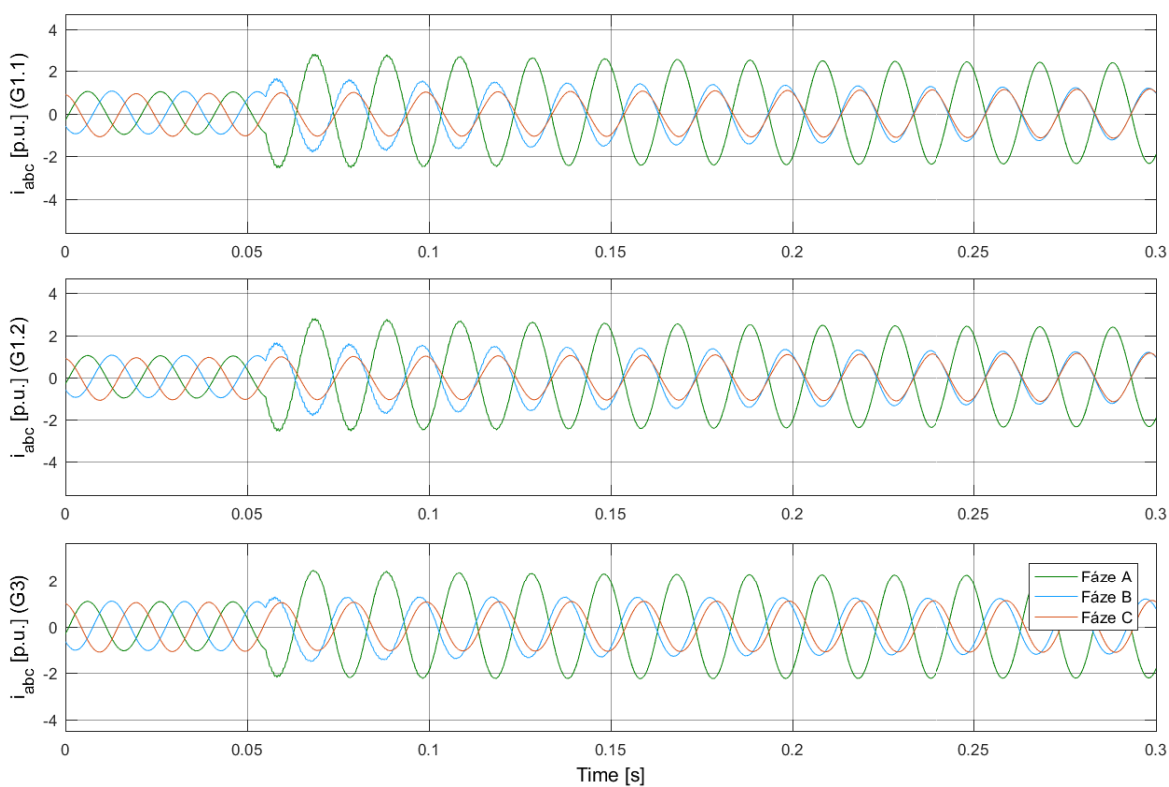
**Obr. 6.30:** Průběhy měřených proudů při 3f zkratu v místě c – symetrický průběh



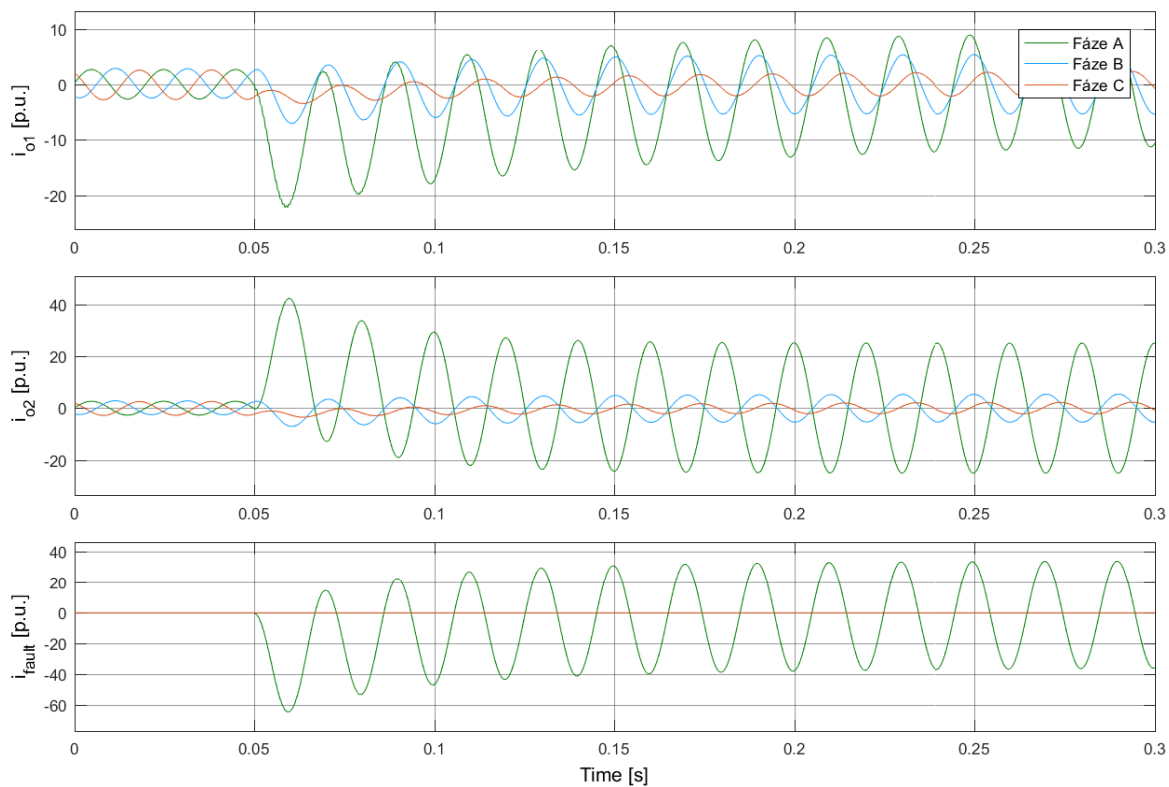
**Obr. 6.31:** Průběhy proudů z generátorů při 3f zkratu v místě c – symetrický průběh



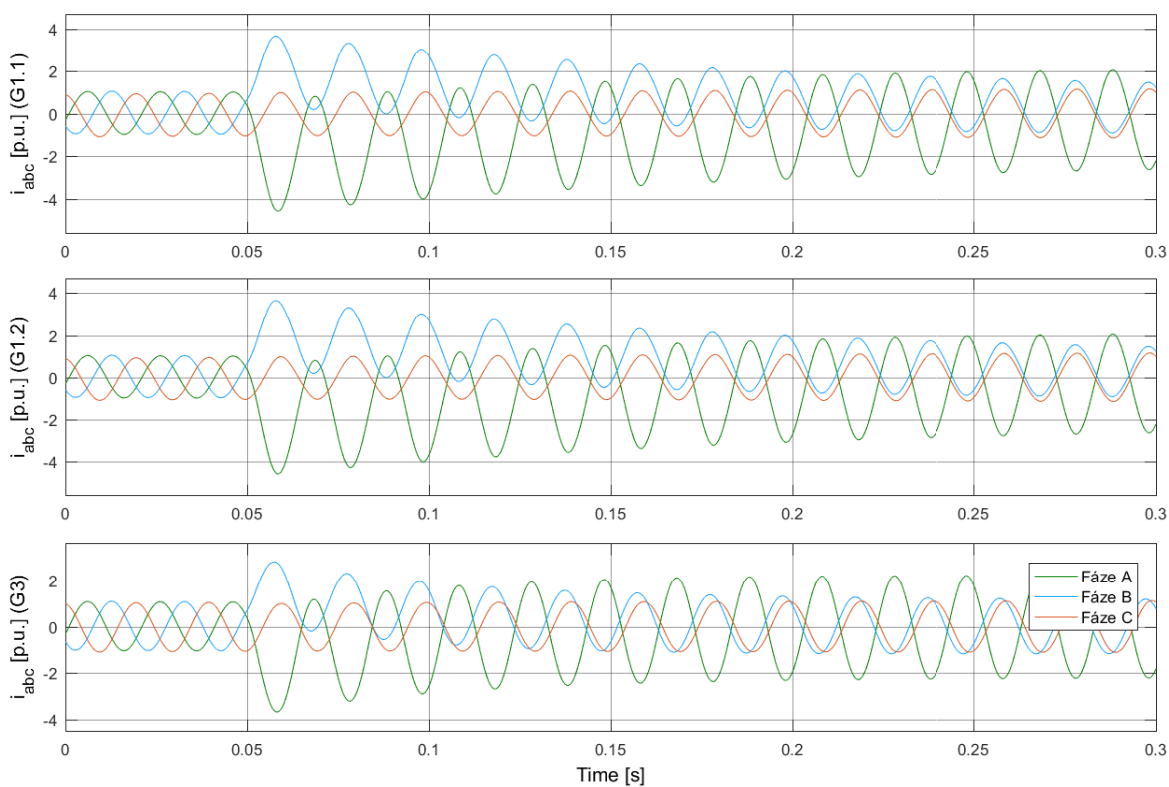
**Obr. 6.32:** Průběhy měřených proudů při 1f zkratu v místě  $b$  – symetrický průběh



**Obr. 6.33:** Průběhy proudů z generátorů při 1f zkratu v místě  $b$  – symetrický průběh



**Obr. 6.34:** Průběhy měřených proudů při 1f zkratu v místě *b* – asymetrický průběh



**Obr. 6.35:** Průběhy proudů z generátorů při 1f zkratu v místě *b* – asymetrický průběh

## 6.5 Vyhodnocení provedených modelů

### Vliv blízkosti alternátoru

Provedené modely jasně potvrzují teoretický předpoklad nebezpečí blízkosti alternátorů. Bylo ukázáno, že při zafixování ostatních vstupních parametrů při přibližování místa zkratu k alternátoru roste jak výsledná hodnota zkratového proudu, tak i projevy jednotlivých složek. Asymetrie poruchových proudů a jejich velikost však není podmíněna pouze místem vzniku zkratu – na obrázcích s průběhy z provedených modelů je patrné, že i při elektricky vzdáleném zkratu se v proudech tekoucích z generátorů projevují jednotlivé složky a relevantní asymetrie proudů tekoucích z generátoru je patrná na každém z výše zmíněných modelů.

### Vliv okamžiku vzniku zkratu

Přesný okamžik vzniku zkratu či jiné poruchy je jedinou neovlivnitelnou externalitou celé problematiky. Ze zásady se jedná o událost nepředvídatelnou a zcela náhodnou. Nicméně bylo ukázáno, že nejnebezpečnější průběhy poruchových proudů z hlediska jejich asymetrie je pásmo úhlu  $\alpha$  od 0 až do cca 30°, respektive oboustranné pásmo 30°, tedy interval od  $-30^\circ$  do  $+30^\circ$ . V souvislosti s fázovým posuvem jednotlivých fází je možné říci, že vždy existuje relevantní riziko pro alespoň jednu fázi. Okamžik vzniku zkratu je zcela náhodný a systémem neovlivnitelný parametr. Provedené modely ale do určité míry svázaly tuto náhodnost s průběhem proudu v aktuální fázi a vyhodnotily míru nebezpečí prodloužených průchodů proudu nulovou hodnotou právě v závislosti na dílčím průběhu proudu. S těmito informacemi lze následně pracovat s využitím pokročilých a rychlých elektronických systémů, které již pozvolna penetrují oblast spínání, např. tzv. *synchro switch* či *switch sync*. Tyto principy našly uplatnění zejména v přenosových soustavách pro řízené spínání tlumivek a kompenzačních zařízení, kde jejich instalace snižuje zapínací proudy a omezuje doprovodné spínací přepětí. Primárně byl tento princip vyvíjen pouze pro operaci *spínání*, ale vývoj těchto produktů již zahrnuje větší množství typů operací a možných aplikací. Obdobný princip by tedy bylo možné využít i pro problematiku vypínání s oddálenou proudovou nulou. [63, 64, 65]

### Dekompozice výsledného proudu na jednotlivé příspěvky

V druhém a zejména ve třetím modelu byl kladen důraz i na vizualizaci jednotlivých příspěvků do výsledného zkratu z jednotlivých zdrojů zkratového proudu, tedy buď z generátoru nebo z elektrizační soustavy. Toto posouzení je důležité pro zhodnocení a navržení systémů ochrany a zajištění selektivity. V rámci tématu narušeného vypínání je ale tato dekompozice důležitá pro určení rámce vypínaných proudů a intervalů mezi průchody proudu nulovou hodnotou. Při náhodně nepříznivém případě se tak může stát, že i přes zásadně relevantní a nepříznivé asymetrie proudů z blízkých alternátorů, které generátorové vypínače bez problémů přeruší, bude asymetrií poruchového proudu ohrožen právě běžný distribuční vypínač umístěný v elektrické stanici distribuční či přenosové soustavy v poli, do něž je přiveden výkon z blízké elektrárny. Ze všech provedených modelů ale dále jasně vyplývá potvrzení, že aplikace generátorových vypínačů, respektive vypínačů instalovaných v blízkosti velkých generátorů, tvoří nejnáročnější aplikace s nejkritičtějšími požadavky. Zkratové a poruchové proudy tekoucí z alternátorů vykazují nejen zřejmou asymetrii při náhodně nepříznivém momentu vzniku zkratu, ale i zřejmý projev přechodné a rázové složky, které nejsou na průbězích proudů tekoucích ze soustavy v reálném případě patrné, v těchto modelech respektovány.

## 7 Hodnocení asymetrie zkratových proudů na základě posouzení matice soustavy

Předchozí kapitoly byly zaměřeny na analýzu konkrétních sítí s explicitně zadanými hodnotami a poměrně přímočaře byla provedena dekompozice jednotlivých typů zkratů a jejich složek. V rámci tématu disertační práce byla motivace nalézt a vyvinout nástroj pro apriorní identifikaci kritických míst soustavy založený na vyhodnocení parametrů  $X$  a  $R$  v jednotlivých místech sítě a tím prozkoumat možné nebezpečí výskytu zkratových proudů s velkou asymetrií a oddálenými proudovými nulami. Teoretický úvod, postup, metodika, aplikace a shrnutí výsledků je náplní této kapitoly. Podstatná část úlohy byla vypracována v rámci zahraniční stáže na Brunel University London a úspěšně prezentována před odborným plénem v rámci publikace [66].

### 7.1 Metodika úlohy

Úvahy nad touto úlohou jsou založeny na operacích s admitanční a impedanční maticí soustavy, která je součástí výpočtu řešení chodu soustavy pomocí *metody uzlových napětí*. Jejím předpokladem je znalost impedancí/admitancí jednotlivých větví a úkolem je určit napětí v uzlech sítě.

Lze uvažovat  $i$ -uzlovou síť, pro kterou se řeší soustava rovnic dle následujícího tvaru:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_i \end{bmatrix}$$

V uvedené soustavě značí levá strana rovnice vektor komplexních proudů injektovaných do uzlu či z něj, pravá strana rovnice je uzlová admitanční matice násobená vektorem uzlových napětí, které tvoří neznámou. V maticovém tvaru pak tedy platí:

$$[I_{bus}] = [Y_{bus}] \cdot [U_{bus}] \quad (7.1)$$

$$[U_{bus}] = [Z_{bus}] \cdot [I_{bus}] \quad (7.2)$$

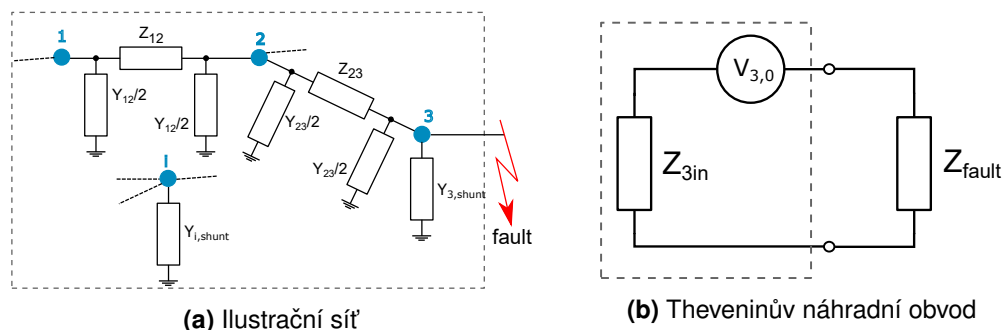
$$[Z_{bus}] = [Y_{bus}]^{-1} \quad (7.3)$$

V rovnicích 7.1 až 7.3  $U_{bus}$  představuje vektor uzlových napětí,  $I_{bus}$  značí vektor proudů injektovaných do každého uzlu (kladné znamínkování znamená proud přitékající do uzlu, záporné znamínkování znamená proud z uzlu vytékající). Matice  $Y_{bus}$  a  $Z_{bus}$  pak představuje právě admitanční, resp. impedanční matice. Je vhodné zmínit, že prvky uvedených matic jsou komplexní čísla. Samotná power flow analýza pak za využití existence vnějších parametrů soustavy řeší uzlová napětí, tedy vektor neznámých  $U_{bus}$ . Definice komplexního výkonu jako  $\overline{S}_i = \sqrt{3} \cdot \overline{U}_i \cdot \overline{I}_i^*$  z toho pak díky komplexnímu sdružení vytváří nelineární problém, který je nutné řešit numericky.

Numerický výpočet metody uzlových napětí však není cílem této kapitoly, kde důležitou roli hrají spíše admitanční a impedanční matice.

Admitanční matice soustavy  $[Y_{bus}]$  obsahuje na jednotlivých prvcích velikost admitance mezi jednotlivými uzly (souřadnice prvku značí o které uzly se jedná), na diagonále matice jsou pak zohledněny i příčné admitance uzlu vůči zemi. Admitanční matice  $[Y_{bus}]$  je výhodná oproti matici impedanční v tom, že má velké množství nulových prvků (díky menšímu množství propojení dvou náhodných uzlů), je řídká a diagonálně dominantní; díky tomu je poměrně snadné najít numerické řešení soustavy rovnic 7.1. Zároveň je využití admitanční matice při výpočtech chodu sítě výhodné, protože snadno umožňuje připravit vstupní data, přepočítat při změnách konfigurace sítě (např. změna převodu regulačních transformátorů, vypnutí či zapnutí vedení mezi dvěma uzly atp.), matice je též symetrická pro sítě, které obsahují pouze prvky vedení (bez příčných prvků, např. kompenzátory účinníku či tlumivky). Naproti tomu absence těchto výhod u impedanční matice představují právě její nevýhody – impedanční matice neobsahuje nenulové prvky, impedance jedné větve má vliv na ostatní prvky matice, nelze ji sestavit přímo ze znalosti topologie a velikostí prvků sítě, změna konfigurace sítě se pak projeví ve všech prvcích matice. [67]

Impedanční matice je však výhodná pro výpočet mimo rámec ustáleného chodu soustavy, protože obsahuje komplexní informace o parametrech soustavy, hodí se tak např. k výpočtu zkratových proudů v jednotlivých uzlech. Pro takové aplikace je možné využít Théveninova teorému. Ten říká, že libovolně složitý lineární obvod lze nahradit obvodem skutečného zdroje napětí, připojeným k libovolným dvěma svorkám. Tento postup se dá aplikovat v obvodech, kde je třeba spočítat pouze proud v jedné větvi obvodu, jako např. zkratový proud mezi uzlem soustavy a zemí. Jeho obdobou je Nortonův teorém. Princip roku 1883 znovuobjevil a pojmenoval francouzský inženýr Léon Charles Thévenin. [68]



**Obr. 7.1:** Ilustrační příklad obecné rozsáhlé sítě a znázornění náhradním Théveninovým obvodem s poruchou v uzlu 3

Obecně lze náhodnou  $i$ -uzlovou síť znázornit např. dle Obr. 7.1 a, který obsahuje jednotlivá vedení mezi uzly 1-2 a 2-3 a též příčné prvky mezi uzly 3 a  $i$  a zemí. Je uvažováno, že v uzlu 3 vznikl zkrat. Celá síť (ohraničena šedou čárkovanou čarou) pak může být reprezentována náhradním Théveninovým obvodem dle Obr. 7.1b. V tomto obrázku pak  $V_{3,0}$  značí zdroj napětí skutečného Théveninova zdroje a  $Z_{3in}$  jeho vnitřní impedanci, která je shodná s celkovou impedancí mezi daným uzlem a zemí.

Pro výpočet poruchového proudu pak platí:

$$I_{3ph,fault} \approx I_i = \frac{U_{i,pf}}{Z_{i,i}} \quad (7.4)$$

V rov. 7.4 značí  $U_{i,pf}$  předporuchové napětí v uzlu  $i$  a  $Z_{i,i}$  znamená diagonální prvek impe-



danční matice odpovídající uzlu  $i$ . V souvislosti s tím pak pro udržení konzistence s případem dle Obr. 7.1 platí:

$$Z_{3,3} = Z_{3in} \implies Z_{i,i} = Z_{i,in} \quad (7.5)$$

Platí tedy, že diagonální prvky impedanční matice lze za určitých předpokladů uvažovat jako hodnoty vnitřní impedance Théveninova náhradního zdroje.

Celý systém je tak nahrazen jedním jednoduchým obvodem dle Obr. 7.1b s definovaným zdrojem napětí, vnitřní impedancí a připojenou impedancí reprezentující poruchu. Třífázový poruchový proud uzlu  $i$  pak lze vypočítat vztahem:

$$I_{fault} = \frac{U_i}{Z_{fault} + Z_{i,in}} \quad (7.6)$$

Při ideálním kovovém zkratu a při jmenovitém napětí v daném uzlu  $i$ , které odpovídá hodnotě 1 [p.u.] lze uvažovat v poměrných jednotkách následující vztah:

$$I_{fault} \approx \frac{1}{Z_{i,in}} \approx Y_{i,i} \quad (7.7)$$

Z uvedeného zřejmě vyplývá souvislost mezi asymetrií zkratových proudů v daných uzlech sítě s odpovídajícími prvky impedanční matice  $Z_{bus}$ . Je-li však nutná aplikovatelnost metody pro všechny uzly sítě, je složité správně vyhodnotit vliv točivých strojů k poruchovému proudu a určení přechodných a rázových složek. Pro obecné stanovení zkratového proudu v jakémkoliv místě soustavy je tak nutné vycházet z obecného vztahu pro zkratový proud, tedy analytického řešení přechodného děje ve 3f obvodech s harmonicky proměnným zdrojem. Vztah pro průběh zkratového proudu je následující, dle rovnice 7.8:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{bus}}{Z_{in}} \cdot \left[ \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \right] \quad (7.8)$$

V rovnici 7.8 značí první člen (před závorkou) amplitudu ustáleného zkratového proudu, první součtový člen v závorce představuje stejnosměrnou složku a druhý součtový člen pak harmonicky proměnnou ustálenou složku. Je zřejmé, že velikost zkratového proudu závisí na napětí v daném uzlu a impedanci uzlu, tedy diagonálnímu prvku impedanční matice odpovídající danému uzlu. V rámci impedance však též záleží na poměru jednotlivých složek, tedy činného odporu a induktivní reaktance. Tento poměr se projeví právě u velikosti stejnosměrné složky, kde je poměr zahrnut v časové konstantě  $\tau$ . Poměr induktivní reaktance a činného odporu obecně udává rychlost tlumení stejnosměrné složky.

Nicméně při nepříznivé velikosti poměru  $X/R$  a současně velké impedanci může dojít k tomu, že i při poměrně malé stejnosměrné složce je díky velké impedanci výsledný zkratový proud tak malý, že je celý posunut nad horizontální osu. Poměrně malá obálka amplitud zkratového proudu je totiž celá posunuta nad osu a dojde k neprůchodu proudu nulovou hodnotou. Z toho důvodu byl do posouzení zahrnut parametr označený jako  $\sigma$ , ten dává do souvislosti vzájemný poměr  $X/R$  a celkovou velikost impedance, konkrétně formou jejich součinu. Vyšší hodnoty parametru  $\sigma$  značí vysoký poměr  $X/R$ , případně vysokou hodnotu celkové impedance. Posouzení velikosti součinu  $X/R$  a velikosti celkové impedance může dát dobrou informaci o velikosti asymetrie zkratových proudů a být tak prvotním indikátorem nebezpečí neprůchodu proudu nulovou hodnotou při vyšších asymetriích.

Veškeré zmíněné skutečnosti a vztahy byly analyzovány s využitím základních a pokročilých nástrojů MATLABu a mnoha ukázkových testovacích příkladů různých sítí. Následující podkapitoly popisují využití nástroje a výsledky analyzovaných sítí.

## 7.2 Popis použitého software a výpočetního skriptu

K posouzení matice soustavy vzhledem k nebezpečí výskytu asymetrických zkratových proudů byl využit výpočetní nástroj MATPOWER. Jedná se o open-source balík příkazů, funkcí a skriptů implementovatelných do výpočetního jádra MATLABu. MATPOWER řeší úlohy ustáleného provozního stavu a optimalizace chodu systému, jako je např. power flow (PF), continuation power flow (CPF), optimal power flow (OPF), zatížení jednotek (UC) atp. MATPOWER je považován díky své otevřenosti za jednoduchý a uživatelsky přívětivý díky přehledně řešenému systému zdrojových dat a výpočetních skriptů. Původně byl tento nástroj vyvíjen jako součást projektu PowerWeb. Za celým systémem stojí tým Raye D. Zimmermana z Cornellovy univerzity v USA. [71]

Díky široké uživatelské základně v oblasti R&D a provozu elektroenergetických soustav bylo zpracováno velké množství případových studií a modelů, které jsou založeny na skutečných soustavách a sítích po celém světě či představují testovací soubory pro reprezentaci výpočetních metod. Celý balík MATPOWER se sestává z velkého množství funkcí a skriptů pro řešení chodu soustavy a obsahuje též množství ukázkových či testovacích souborů reprezentujících různé přenosové a distribuční sítě. Reálný systém je v rámci těchto souborů popsán a reprezentován kódem obsahujícím v několika částech informace o prvcích soustavy např. pro uzly typy uzlů a označení, pro větve velikosti pasivních parametrů, limity průchozích proudů či výkonů, informace o velikosti výroby a odběrů atp. Nativně je v balíku MATPOWER zahrnuto zhruba 40 ukázkových sítí, tzv. caseů, což jsou právě kódy ve formátu skriptu pro MATLAB (*m-file*) s danou strukturou.

Ač je MATPOWER nástrojem primárně určeným pro analýzy chodu soustavy, bylo jej využito díky velkému množství zdrojových souborů a možnostem operací s admitanční maticí soustavy a jejímu dalšímu zpracování pro účely této úlohy.

Postup této úlohy pak lze definovat jako následující:

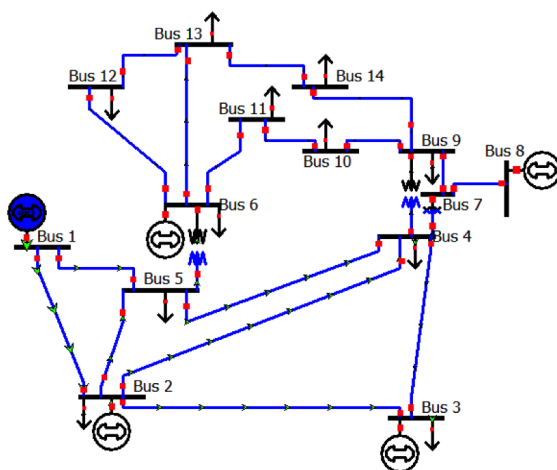
1. Výběr a definice řešené sítě a nahrání zdrojových dat do pracovního prostředí.
2. Spočítat chod sítě a předporuchových napětí.
3. Výpočet admitanční matice a její inverze na impedanční matici.
4. Znázornění prvků matice  $Z_{bus}$  v rovině X/R.
5. Vyhodnocení poměrů mezi velikostmi prvků  $Z_{i,i}$  a jejich poměru X/R.
6. Identifikace kritických prvků matice  $Z_{bus}$  a s tím souvisejících kritických uzlů sítě.
7. Vykreslení spektra poruchových proudů v síti či v daném uzlu za využití parametrů Théveninova náhradního zdroje.

Tento postup byl vypracován a naprogramován v podobě automatického skriptu v pracovním prostředí programovatelných textů (skriptů, funkcí atp.), kde jediným uživatelským vstupem do výpočtu byla volba řešené sítě. Vlastní vyhodnocení úlohy a identifikace kritických uzlů je však uživatelská záležitost, ukázkové případy a jejich vyhodnocení je tak obsaženo v následující podkapitole. Celý výpočetní skript je uveden jako Příloha C této práce. Výpočetní kód v příloze přehledně ukazuje jednotlivé části výpočtu od volby řešené sítě, analýzu admitanční a impedanční matice, vykreslení jednotlivých prvků a identifikace kritických míst s vykreslením spektra zkratových proudů v těchto uzlech.

## 7.3 Případové studie dílčích schémat

### 7.3.1 IEEE 14-Bus Case – síť se 14ti uzly

První implementovaný a analyzovaný soubor byl IEEE testovací soubor case14.m. Jedná se o případ sítě se čtrnácti uzly, pěti generátory a jedenácti odběry. Jedná se o reprezentaci části přenosové sítě na americkém středozápadě, v jaké se nacházela v roce 1962. Jedná se o poměrně historický případ, který byl převeden do podoby testovacího souboru díky své jednoduchosti a optimálnímu počtu uzlů, generátorů a odběrů. Informace o této úloze lze najít v [74]. Schéma sítě dle case14.m je na Obr. 7.2.

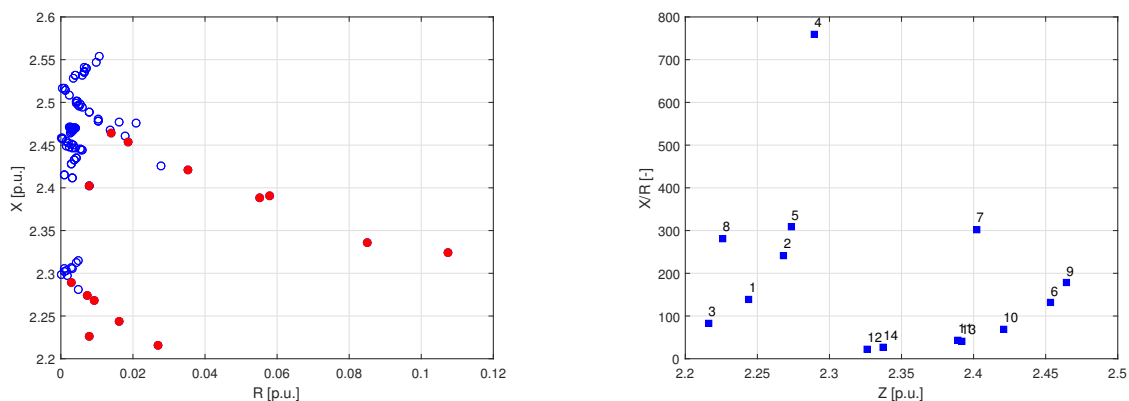


Obr. 7.2: IEEE 14-Bus Case Network Diagram

Po aplikaci zmíněného kódu na soubor case14.m byl kromě grafického výstupu uvedených na následujících obrázcích získán i formátovaný textový výstup obsahující klíčové hodnoty pro jednotlivé uzly  $i$  odpovídající diagonálním prvkům  $Z_{i,i}$  matice  $Z_{bus}$ .

| i  | Z(i,i) | R(i,i) | X(i,i)  | Tau    | X/R_rat. | Sigma   |
|----|--------|--------|---------|--------|----------|---------|
| 1  | 2.2442 | 0.0162 | -2.2442 | 0.4406 | 138.34   | 310.46  |
| 2  | 2.2684 | 0.0094 | -2.2684 | 0.7700 | 241.78   | 548.45  |
| 3  | 2.2160 | 0.0270 | -2.2158 | 0.2616 | 82.13    | 182.00  |
| 4  | 2.2896 | 0.0030 | -2.2896 | 2.4190 | 759.55   | 1739.04 |
| 5  | 2.2738 | 0.0074 | -2.2738 | 0.9808 | 307.97   | 700.24  |
| 6  | 2.4536 | 0.0188 | -2.4535 | 0.4160 | 130.63   | 320.50  |
| 7  | 2.4021 | 0.0079 | -2.4021 | 0.9651 | 303.05   | 727.97  |
| 8  | 2.2260 | 0.0079 | -2.2259 | 0.8944 | 280.83   | 625.12  |
| 9  | 2.4644 | 0.0139 | -2.4643 | 0.5652 | 177.49   | 437.40  |
| 10 | 2.4208 | 0.0351 | -2.4205 | 0.2193 | 68.87    | 166.71  |
| 11 | 2.3893 | 0.0550 | -2.3887 | 0.1382 | 43.40    | 103.70  |
| 12 | 2.3264 | 0.1073 | -2.3239 | 0.0690 | 21.66    | 50.39   |
| 13 | 2.3915 | 0.0580 | -2.3908 | 0.1314 | 41.25    | 98.65   |
| 14 | 2.3374 | 0.0850 | -2.3359 | 0.0875 | 27.48    | 64.23   |
| -  | [p.u.] | [p.u.] | [p.u.]  | [s]    | [-]      | [-]     |

Uvedený výpis přehledně shrnuje podstatné hodnoty pro diagonální prvky matice  $Z_{bus}$ , tedy velikost impedance, její složky  $R$  a  $X$ , časovou konstantu, poměr  $X/R$  a parametr  $\sigma$  udávající poměr mezi poměrem  $X/R$  a velikostí impedance. Vizualizace těchto hodnot je na Obr. 7.3.

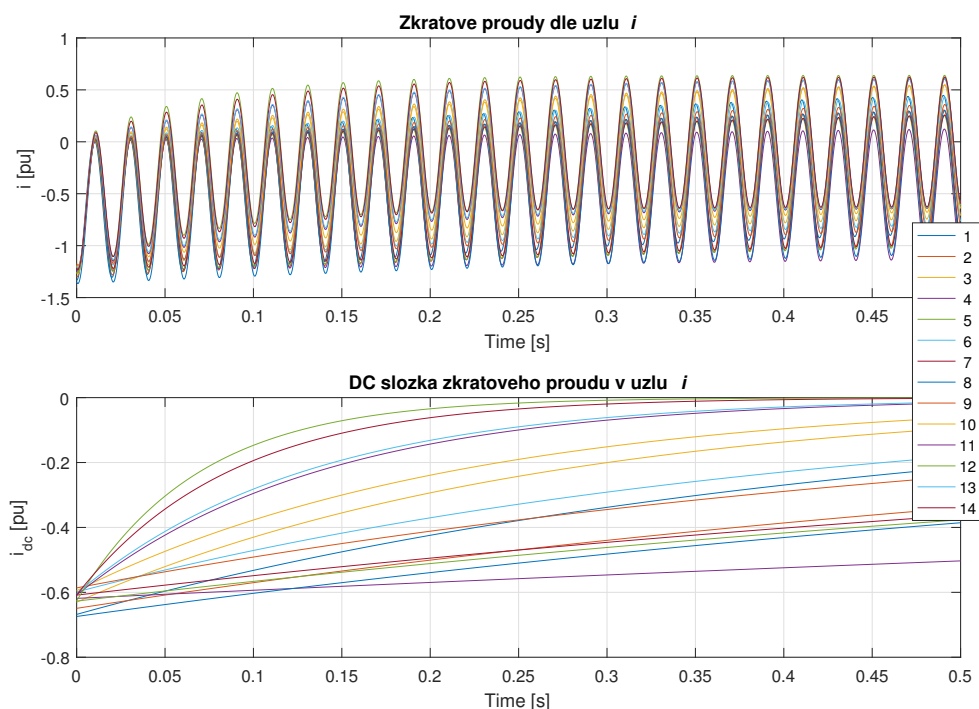


(a) Vizualizace prvků matice  $Z_{bus}$  v rovině  $X/R$  – červeně jsou zvýrazněny diagonální prvky

(b) Vizualizace diagonálních prvků  $z_{i,i}$  v rovině  $X/R=f(Z)$

**Obr. 7.3:** Výsledky pro 14ti uzlovou síť

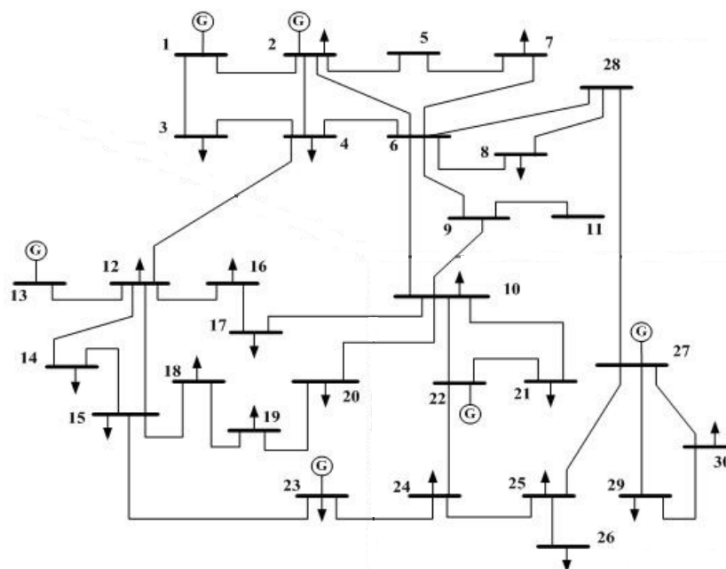
Z předchozích odstavců je patrné, že největší pozornost by měla být upřena k uzlům s nejvyšší hodnotou poměru  $X/R$  a zároveň s nejvyšší hodnotou parametru  $\sigma$ . V rámci vizualizace diagonálních prvků v rovině  $X/R = f(Z)$  se tak jedná o oblast co nejvíce vpravo a nahoře. Obr. 7.3b tak potvrzuje v korelaci s uvedeným textovým výpisem, že mezi kritické uzly této sítě budou patřit uzly č. 4, 5 a 7. Je vidět, že uzel č. 4 je jedinečný svým velkým poměrem  $X/R$ , zatímco uzel č. 7 je charakterizován spíše větší velikostí celkové impedance. Toto mohou potvrdit též průběhy výsledných zkratových proudů v jednotlivých uzlech. Je vidět, že zkratový proud v uzlu č. 4 má největší stejnosměrnou složku s nejpomalejším útlumem. Na opačné straně spektra je možné si všimnout stejnosměrné složky zkratového proudu v uzlu č. 12, který má velmi rychlý útlum.



**Obr. 7.4:** Průběhy zkratových proudů v jednotlivých uzlech 14ti uzlové sítě a jejich DC složky

### 7.3.2 IEEE 30-Bus Case – síť se 30ti uzly

Druhý příklad testovacího souboru zhotovenému IEEE představuje 30ti uzlovou část soustavy opět z amerického středozápadu, tentokrát však o napěťových hladinách 33 až 132 [kV], lze tedy očekávat mírně vyšší hodnoty výsledných impedancí. Více informací lze nalézt v [73]. Schéma sítě dle souboru case30.m je na Obr. 7.5.



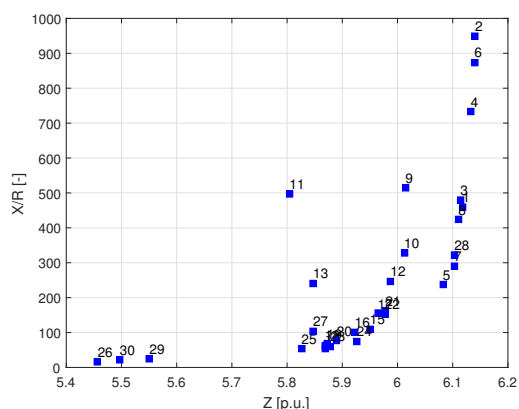
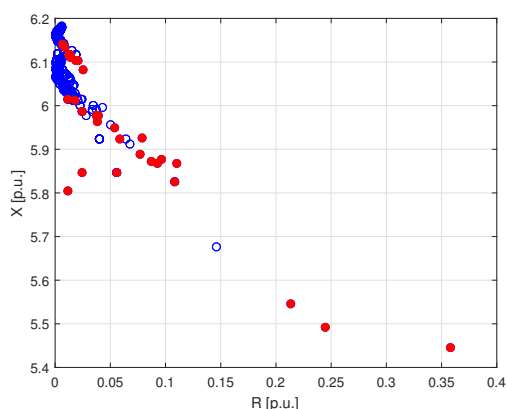
Obr. 7.5: IEEE 30-Bus Case Network Diagram

Jedním z výstupů je opět formátovaný textový výstup z výpočetního kódu udávající velikosti jednotlivých parametrů v jednotlivých uzlech. To je uvedeno v následující sekci a graficky znázorněné na Obr. 7.6.

| i  | Z(i,i) | R(i,i) | X(i,i)  | Tau    | X/R_rat. | Sigma   |
|----|--------|--------|---------|--------|----------|---------|
| 1  | 6.1179 | 0.0133 | -6.1179 | 1.4635 | 459.53   | 2811.39 |
| 2  | 6.1409 | 0.0065 | -6.1409 | 3.0257 | 950.05   | 5834.20 |
| 3  | 6.1142 | 0.0128 | -6.1142 | 1.5246 | 478.72   | 2926.95 |
| 4  | 6.1331 | 0.0084 | -6.1331 | 2.3309 | 731.90   | 4488.83 |
| 5  | 6.0823 | 0.0256 | -6.0822 | 0.7570 | 237.70   | 1445.76 |
| 6  | 6.1394 | 0.0070 | -6.1394 | 2.7839 | 874.16   | 5366.81 |
| 7  | 6.1027 | 0.0210 | -6.1026 | 0.9274 | 291.21   | 1777.18 |
| 8  | 6.1105 | 0.0144 | -6.1105 | 1.3476 | 423.13   | 2585.58 |
| 9  | 6.0143 | 0.0117 | -6.0143 | 1.6408 | 515.20   | 3098.61 |
| 10 | 6.0122 | 0.0183 | -6.0122 | 1.0456 | 328.31   | 1973.85 |
| 11 | 5.8043 | 0.0117 | -5.8043 | 1.5835 | 497.21   | 2886.00 |
| 12 | 5.9873 | 0.0242 | -5.9872 | 0.7883 | 247.52   | 1481.99 |
| 13 | 5.8473 | 0.0242 | -5.8472 | 0.7699 | 241.74   | 1413.50 |
| 14 | 5.8691 | 0.1105 | -5.8681 | 0.1691 | 53.08    | 311.56  |
| 15 | 5.9501 | 0.0538 | -5.9498 | 0.3520 | 110.52   | 657.59  |
| 16 | 5.9228 | 0.0586 | -5.9225 | 0.3219 | 101.08   | 598.68  |
| 17 | 5.9645 | 0.0385 | -5.9643 | 0.4933 | 154.90   | 923.89  |
| 18 | 5.8683 | 0.0926 | -5.8676 | 0.2018 | 63.36    | 371.79  |
| 19 | 5.8720 | 0.0870 | -5.8714 | 0.2150 | 67.52    | 396.50  |
| 20 | 5.8902 | 0.0769 | -5.8897 | 0.2439 | 76.59    | 451.15  |
| 21 | 5.9783 | 0.0369 | -5.9782 | 0.5155 | 161.87   | 967.71  |
| 22 | 5.9772 | 0.0388 | -5.9770 | 0.4903 | 153.94   | 920.15  |
| 23 | 5.8784 | 0.0964 | -5.8776 | 0.1942 | 60.99    | 358.50  |
| 24 | 5.9265 | 0.0790 | -5.9260 | 0.2390 | 75.06    | 444.84  |
| 25 | 5.8263 | 0.1083 | -5.8253 | 0.1713 | 53.79    | 313.42  |

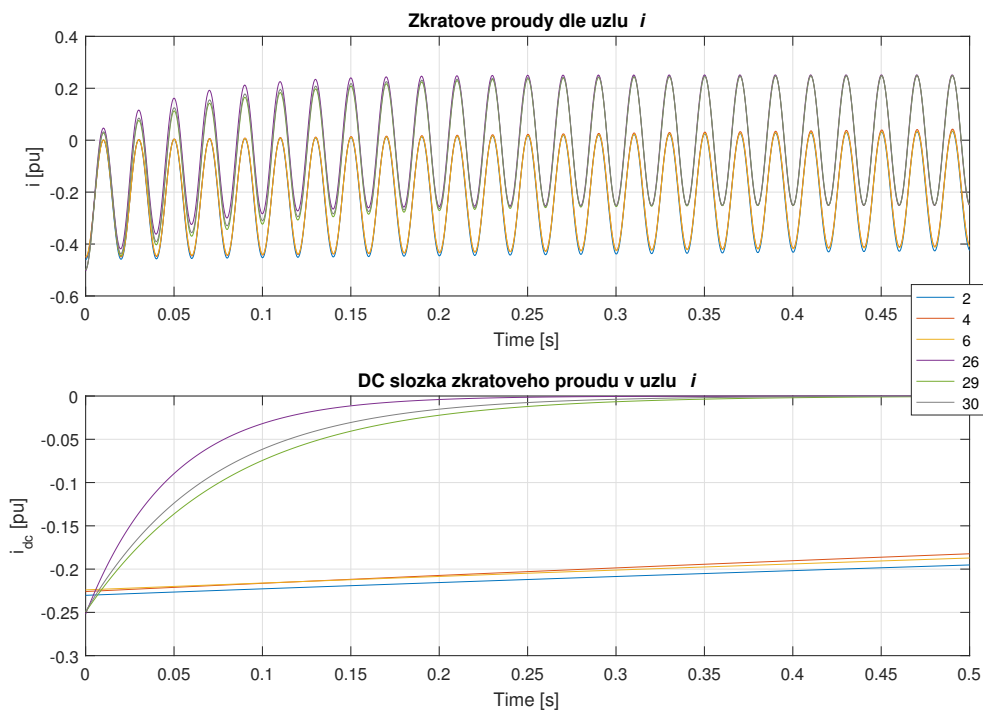
|    |        |        |         |        |        |         |
|----|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
| 26 | 5.4570 | 0.3583 | -5.4453 | 0.0484 | 15.20  | 82.94   |
| 27 | 5.8471 | 0.0558 | -5.8469 | 0.3338 | 104.83 | 612.93  |
| 28 | 6.1031 | 0.0189 | -6.1031 | 1.0273 | 322.56 | 1968.62 |
| 29 | 5.5510 | 0.2137 | -5.5469 | 0.0827 | 25.95  | 144.06  |
| 30 | 5.4972 | 0.2445 | -5.4918 | 0.0715 | 22.46  | 123.47  |

-----  
 -| [p.u.] [p.u.] [p.u.] [s] [-] [-]  
 =====



(a) Vizualizace prvků matice  $Z_{bus}$  v rovině  $X/R$  – červeně jsou zvýrazněny diagonální prvky (b) Vizualizace diagonálních prvků  $z_{i,i}$  v rovině  $X/R=f(Z)$

**Obr. 7.6:** Výsledky pro 30ti uzlovou síť



**Obr. 7.7:** Průběhy zkratových proudů v jednotlivých uzlech 30ti uzlové sítě a jejich DC složky

Uvedené výstupy korelují s výsledky zjištěnými v předchozí podkapitole. Na Obr. 7.6b zcela zřetelně vystupují uzly č. 2, 4 a 6, naopak velmi malý poměr  $X/R$  se současně relativně malou

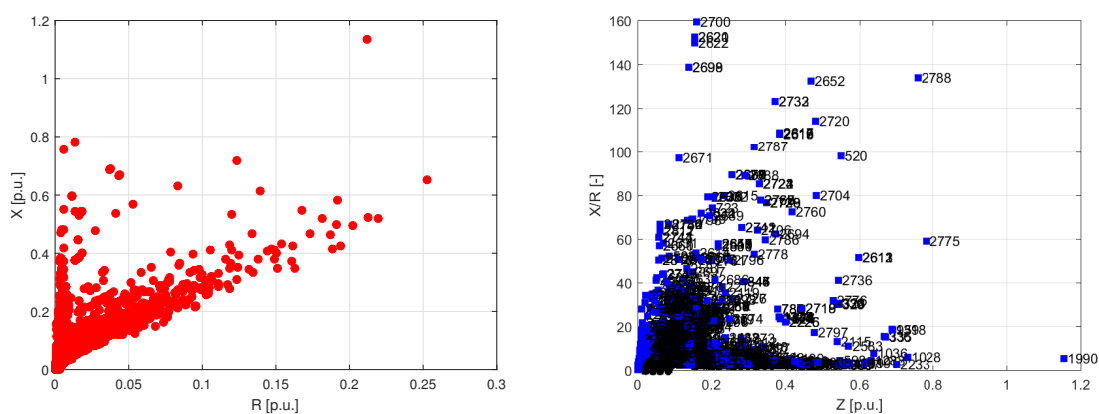
impedancí mají uzly 26, 29 a 30. Pro všechny uzly pak byly vykresleny zkratové proudy, ale z důvodu přehlednosti byly vybrány jen průběhy odpovídající zmíněným uzlům. Průběhy jsou uvedeny na Obr. 7.7.

### 7.3.3 RTE 2848-Bus – Francouzská vn a vvn soustava s 2848 uzly

Poslední z analyzovaných souborů je `case2848rte.m`. Ten obsahuje celkem 2848 uzlů, 547 generátorů, 3776 větví, v nichž je celkem 558 transformátorů. Soubor je v podstatě zkonstruován jako reprezentace komplexní francouzské soustavy vn a vvn s napěťovými hladinami od 45 kV do 380 kV. Soubor vznikl jako součást rozsáhlých studií francouzského RTE (Réseau de Transport d'Electricité – provozovatel francouzské přenosové soustavy) na zhodnocení výpočetních metod chodu soustavy v rámci projektů iTesla a PEGASE. Více informací o vlastnostech reprezentované sítě je možné nalézt v [75].

Už v průběhu výpočtu je patrné, že se jedná o mnohonásobně rozsáhlejší síť než v předchozích případech. Zatímco u předchozích studií trval výpočet chodu soustavy zpravidla do dvou sekund a grafické znázornění mělo okamžitou odezvu, pro tuto síť již výpočet chodu sítě trval v řádu minut a grafické znázornění tvořilo náročnou úlohu s obrovskými požadavky zejména na paměť RAM počítače. Při analýzách rozsáhlých sítí s počtem uzlů v řádech tisíců je tak nutné aplikovat zpracovaný výpočetní kód s maximální obezřetností vzhledem k přístroji, na němž je výpočet prováděn. Též reprezentace výsledků je vzhledem k velkému počtu uzlů náročnou úlohou.

Následující Obr. 7.8 opět reprezentuje prvky matice  $Z_{bus}$  (tentokrát však pouze diagonální) v rovinách X-R a Z-X/R. Z prvního obrázku je patrné, že největší množství prvků leží podél přímky s lineárním růstem. Druhý obrázek (7.8b) pak ukazuje, že naprostá většina diagonálních prvků leží v levé spodní oblasti grafu, nicméně patrně vystupují body mimo tuto oblast – rozdělením grafu do čtyřech kvartálů tak můžeme analyzovat jednotlivé oblasti odděleně – body vlevo nahoře, vpravo nahoře a vpravo dole. Ze všech těchto oblastí byly pro ukázkou zvoleny jednotlivé uzly.



(a) Vizualizace diagonálních prvků matice  $Z_{bus}$  v rovině X/R

(b) Vizualizace diagonálních prvků  $Z_{i,i}$  v rovině  $X/R=f(Z)$

**Obr. 7.8:** Výsledky pro síť RTE 2848-Bus

V první oblasti (vlevo nahoře) byly zvoleny uzly s čísly 2700 a 2622, v oblasti vpravo nahoře uzly 2788 a 2652, v pravé spodní oblasti uzly 2775 a 1990 a v majoritní oblasti vlevo dole byly náhodně vybrány prvky 440 a 791.

Pro uzly 2700 a 2622 platí, že mají velký poměr  $X/R$  a současně malou impedanci. Tedy že

prvky  $Z_{2700,2700}$  a  $Z_{2622,2622}$  budou mít téměř stejně velkou hodnotu celkové impedance a induktivní reaktance, zatímco činný odpor bude téměř zanedbatelný. Výsledný zkratový proud v těchto uzlech tedy bude nabývat poměrně velkých hodnot (v porovnání s ostatními uzly) a díky vysokému poměru  $X/R$  bude velmi pomalý útlum stejnosměrné složky. Jde tedy o zkratové proudy, které budou mít poměrně velké termické namáhání rozvodného zařízení. Díky velikosti střídavé složky zkratového proudu však dojde k průchodu proudu nulovou hodnotou velmi brzy i vzhledem k pomalému tlumení stejnosměrné složky. Pro uzly 2788 a 2652 pak platí rovněž vysoká hodnota poměru  $X/R$  za současně velké hodnoty impedance. To znamená, že výsledný zkratový proud bude poměrně malý a asymetrický po poměrně dlouhou dobu. Pro všechny čtyři dosud zmíněné uzly platí, že mají poměrně dlouhou časovou konstantu, nicméně liší se v parametru  $\sigma$ , který má pro oblast vlevo nahoře hodnotu 25,29, resp. 23,10 a pro oblast vpravo nahoře 62–101,6. Dále je vidět, že uzly 2775 a 1990 mají poměrně velkou hodnotu impedance a malý poměr  $X/R$ . Zkratový proud tedy bude mít podobnou velikost jako pro předchozí dva uzly, nicméně bude díky malému poměru  $X/R$  rychle utlumený. Podobný závěr vyplývá i pro uzly v levé spodní oblasti, např. náhodně vybrané uzly 440 a 791. Je patrné, že efektivní hodnota střídavé složky zkratového proudu v těchto uzlech bude poměrně velká a stejnosměrná složka bude poměrně rychle utlumena. Zmíněné parametry pro všechny zmíněné uzly je možné ověřit v rámci formátovaného textového výstupu z výpočtu, který však uvedme vzhledem k velkému množství uzlů a souvisejícím prostorovým požadavkům v redukované formě pouze pro zmíněné uzly.

| i    | Z(i,i) | R(i,i) | X(i,i) | Tau    | X/R_rat. | Sigma  |
|------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|
| ...  |        |        |        |        |          |        |
| 440  | 0.1174 | 0.0079 | 0.1171 | 0.0471 | 14.79    | 1.74   |
| ...  |        |        |        |        |          |        |
| 791  | 0.1278 | 0.0075 | 0.1276 | 0.0543 | 17.05    | 2.18   |
| ...  |        |        |        |        |          |        |
| 1990 | 1.1554 | 0.2118 | 1.1358 | 0.0171 | 5.36     | 6.20   |
| ...  |        |        |        |        |          |        |
| 2622 | 0.1543 | 0.0010 | 0.1543 | 0.4768 | 149.73   | 23.10  |
| ...  |        |        |        |        |          |        |
| 2652 | 0.4695 | 0.0035 | 0.4695 | 0.4220 | 132.49   | 62.20  |
| ...  |        |        |        |        |          |        |
| 2700 | 0.1588 | 0.0010 | 0.1588 | 0.5072 | 159.27   | 25.29  |
| ...  |        |        |        |        |          |        |
| 2775 | 0.7812 | 0.0132 | 0.7811 | 0.1880 | 59.02    | 46.11  |
| ...  |        |        |        |        |          |        |
| 2788 | 0.7584 | 0.0057 | 0.7584 | 0.4266 | 133.97   | 101.60 |
| ...  |        |        |        |        |          |        |
| -    | [p.u.] | [p.u.] | [p.u.] | [s]    | [-]      | [-]    |

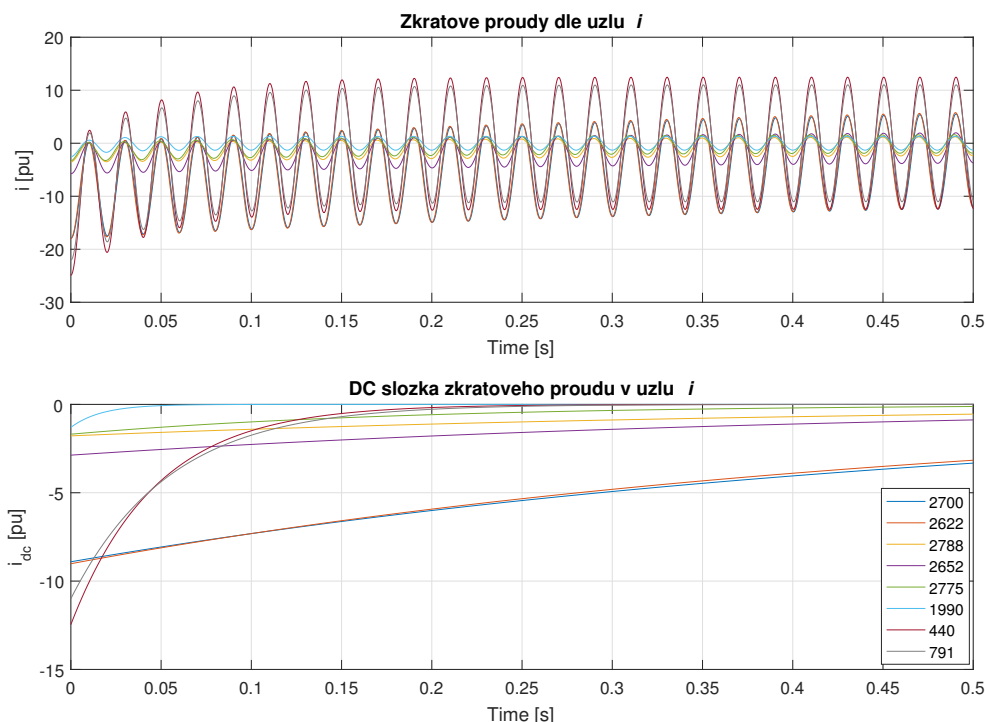
Následující Obr. 7.9 ukazuje výsledné průběhy zkratových proudů ve zmíněných uzlech, opět průběh s největší asymetrií (na základě vztahu 7.8). Uvedené průběhy korelují s vypočtenými parametry a s diskuzemi provedenými v předchozích odstavcích.

## 7.4 Vyhodnocení dílčích výsledků

### Použitelnost

Navržený postup a vyvinutý výpočetní kód vyniká svojí univerzální použitelností při využití programové nadstavby MATPOWER, která byla představena v úvodu této kapitoly. Celá úloha je vyvi-





**Obr. 7.9:** Průběhy zkratových proudů v jednotlivých uzlech 2848ti uzlové sítě a jejich DC složky

nuta tak, aby za využití pokročilých výpočetních metod vhodným způsobem identifikovala kritické uzly soustav v celé škále napěťových a typových rozsahů a v celém spektru složitosti – od sítí zcela jednoduchých až k sítím s velkým počtem uzlů a topologické složitosti. Ohledně použitelnosti nutno přiznat vynikající výsledky pro prvotní identifikaci kritických a nejvíce ohrožených uzlů. Vyvinutý nástroj slouží jako vhodný způsob prvotní analýzy, který však nezabývá nebezpečí ostatní uzly. Unikátnost tohoto nástroje spočívá v kombinaci dvou zdánlivě nesouvisejících problematik a jejich společné vyústění pro problematiku výskytu oddálených proudových nul.

### Výpočetní výkon a náročnost vstupních dat, struktura databáze výsledků Results

Jedním z omezujících faktorů využití zpracovaného výpočetního kódu může být pro uživatele obtížnější instalace systému MATPOWER, který nutně staví na základu systému MATLAB a který je nutné svépomocí stáhnout, zkopírovat relevantní soubory a propojit s jádrem MATLABu, což může působit pracně<sup>1</sup>. Dalším zásadním omezením se může zdát náročný matematický aparát numerického výpočtu chodu sítě, který využívá iteračních metod, což se projevilo v případě poslední analyzované sítě RTE 2848-Bus; samotný výpočet napětí v jednotlivých uzlech soustavy trval v řádech několika minut. Zásadními výhodami však je dostupnost a faktická průhlednost celého systému, který je otevřený všem uživatelům. Vývojáři systému MATPOWER staví na velmi průhledném přístupu umožňující připravit soubory vstupující do výpočtu velmi snadno a plně v konzistenci s řešením chodu soustavy metodou uzlových napětí; příprava vstupních souborů je tak velmi jednoduchá. Vyvinutý výpočetní kód též provádí sám většinu důležitých operací umožňujících identifikovat kritické a ohrožené uzly soustavy. Veškeré výsledky pro detailnější analýzu jsou v rámci výpočetního kódu ukládány do paměti MATLABu do proměnné s názvem *Results*.

<sup>1</sup>Od verze 7.0 však již MATPOWER obsahuje instalační soubor, který většinu úvodních operací provádí sám.

Jedná se o proměnnou, která obsahuje hodnoty z provedené load flow analýzy potřebné pro vykreslení průběhů a vizualizaci dílčích parametrů jednotlivých uzlů. Proměnná *Results* má formu matice, která má tolik řádků, kolik uzlů má řešená síť. V jednotlivých řádcích jsou parametry vztahující se k danému řádku (s odpovídajícím číselným označením). Jednotlivé sloupce  $i$ -tého řádku potom obsahují:

1. sloupec: Celkovou velikost impedance  $Z_{i,i}$ ,
2. sloupec: Činný odpor  $R_{i,i}$ ,
3. sloupec: Induktivní reaktanci  $X_{i,i}$ ,
4. sloupec: Časovou konstantu  $\tau$ ,
5. sloupec: Poměr  $X/R$ ,
6. sloupec: Amplitudu předporuchového napětí v uzlu  $i$ ,
7. sloupec: Úhel předporuchového napětí v uzlu  $i$ ,
8. sloupec: Funkci  $\arccos(R_{i,i}/|Z_{i,i}|)$ , tedy velikost úhlu.

Z výsledné matice *Results* jsou následně konstruovány průběhy a grafické závislosti uvedené v této kapitole. Využití nástroje MATPOWER ale v rámci výpočtu load flow analýzy dává k dispozici velké množství dalších využitelných dat. Tyto výsledky jsou výsledkem příkazu *runpf*.

### Limitace přístupu a možnosti navazujících analýz

Jak již bylo zmíněno v odstavci **Použitelnost**, přístup je vhodný k prvotní identifikaci kritických a nejvíce ohrožených uzlů. Je tak nutné zmínit, že celý přístup je svázaný axiomy přijatými v úvodu kapitoly, tedy kombinace použitelnosti metody Théveninova náhradního zdroje a uzlové admitanční matice a její inverze na matici impedanční. Tyto dva fakty a s tím související omezení je tak nutné mít na paměti po celou dobu operování s vyvinutým výpočetním kódem. Získanou impedanční matici však lze dále upravovat a využívat.

Jedním ze zásadních nedostatků je absence vlivu jednotlivých reaktancí alternátorů v soustavě. Jednou z možností, jak v úloze pokračovat, je tak navržení způsobu implementace přechodných a rázových reaktancí do výpočtu impedanční matice. Protože jsou však tyto složky závislé na čase, získají tím i prvky impedanční matice časovou závislost. Lze však předestřít, že se pak nebude jednat o matici dle korektní definice dle rovnice 7.2, ale o jakýsi soubor síťových dat. Je zřejmé, že analytické vyjádření možností implementace reaktancí alternátorů bude dosahováno s nadpřirozenou mírou složitosti a bude třeba přijmout zcela zásadní zjednodušení.

Další studie však mohou být směřované i na důkladnou analýzu mimodiagonálních prvků a jejich významu. Jejich velikost pak může poskytnout informaci o impedančních poměrech mezi dvěma uzly a v případě navzájem propojených uzlů tak může indikovat průběhy zkratových proudů po dekompozici výsledného zkratu na jeho jednotlivé příspěvky přitékající z různých uzlů soustavy. Jedná se tedy o úvahu logicky stavějící na této úloze, která se tak může stát při adekvátním rozpracování vhodným nástrojem identifikujícím v online režimu za využití znalosti topologie soustavy a jejích pasivních parametrů nejvíce ohrožená místa a určující spektrum vypínaných poruchových proudů.

## 8 Závěrečná část

### 8.1 Zhodnocení provedené práce a vlastní přínos

Spolehlivost vypínačů je obecně rozsáhlé téma, jak z hlediska teoretického, tak i praktického. I přes to, že je tato spolehlivost v současné době na vysoké úrovni, je nutné neustále přezkoumávat celé spektrum vypínaných parametrů, zkratových obvodů a jednotlivých operací. A právě to je možné shrnout v rámci této práce, která prozkoumala jednu z těchto oblastí.

Za zcela ojedinělou lze považovat skutečnost, že s předkládanou problematikou se v rámci České republiky nikdo nezabývá. Částečně je možné registrovat průniky s dílčími oblastmi u jednotlivých subjektů (např. provozovatelé distribučních soustav či výrobci vypínačů), zpravidla se ale jedná o okrajové části z předkládaného tématu (např. tedy rozbor jednotlivých selhání, vypínací schopnost vypínačů s alternativními izolačními plyny atp.). Přístup k problematice časové závislosti vypínací schopnosti a analýzy asymetrie zkratových proudů tak, jak je k ní přistupováno na mezinárodních fórech, je v rámci České republiky ojedinělá a jedinečná.

Z těchto důvodů lze mezi přínosy práce počítat i první kapitoly uceleně a přehledně shrnující problematiku vypínačů v přenosových a distribučních sítích. Unikátní je též přehledně shrnutá kapitola o standardizaci provozu vysokonapěťových vypínačů. První část práce tedy může být využita jako pedagogické curriculum pro výuku studentů v kurzech elektrických přístrojů či pracovníky dotčených subjektů setkávající se s provozem vypínačů na profesní bázi. V rámci České republiky je též nové představení a shrnutí alternativních izolačních plynů v souvislosti s problematikou vypínací schopnosti.

Přínosné nejen pro pedagogiku je též zpracování a simulace black-box modelů oblouku včetně diskuse vlivu jednotlivých parametrů, jež koreluje s fyzikální podstatou oblouku. Vypracované modely jsou kompaktně zpracované a snadno přenositelné mezi dalšími modely sítí v prostředí Simulink, v nichž je třeba znát odezvu oblouku na napětí či proud v obvodu.

Za jednu z nejzajímavějších součástí této práce považuji Kapitulu 5. V ní bylo ukázáno, že generátorové zkraty jsou složitou vypínací disciplínou, která namáhá vypínač nejvyššími zkratovými proudy, jejichž asymetrie může být pro běžné vypínače fatální. Nicméně generátorové vypínače jsou dimenzovány i pro tyto náročné aplikace. Přínosem je zhodnocení a porovnání požadované vypínací schopnosti v okamžiku proudové nuly pro vypínače pracující s turbo- či hydro-alternátory v závislosti na velikosti asymetrie. Porovnání v poměrných jednotkách dává dobrou představu o tom, jak asymetrie zkratového proudu upravují okolnosti, při kterých dochází k vypnutí. Rozšířený analytický model pak tomuto porovnání přidává vývoj v závislosti na čase od vzniku zkratu. Model byl opět vypracovaný s maximální transparentností a s minimálními úpravami zdrojového kódu pak lze získat analýzu pro jakýkoliv alternátor, pro nějž jsou dostupná vstupní data.

Získané výsledky byly následně ověřeny a rozšířeny o další poznatky založené na vyhotovených modelech v prostředí Simulink. Na třech typových modelech bylo dokázáno, že selhání vypínače při vypínání asymetrických zkratů je nebezpečné zejména pro běžné distribuční vypínače pracující v polích přenosových rozveden do nichž jsou vyvedeny velké elektrárenské bloky.

V rámci vyhotovených modelů bylo stanoveno kritické časové pásmo v periodě průběhu proudu, při němž je riziko plné asymetrie proudu nejvyšší.

Souvislost mezi poměrem  $X/R$ , asymetrií zkratového proudu a nebezpečí oddálené proudové nuly je pak shrnuta v Kapitole 7. Ta představila výpočetní skript, který na základě impedanční matice soustavy analyzuje danou síť a identifikuje kritická místa. Výpočetní skript byl opět zpracován transparentně a za využití moderních výpočetních nástrojů lze snadno získat představu o tom, která místa v síti budou nejvíce ohrožena průběhy proudů s největší asymetrií. Na třech vybraných sítích byla otestována funkcionalita a ověřeny výsledky. Metodika výpočtu i samotný kód by bylo možné využít i jako doplňkový nástroj pro přenosové a distribuční dispečinky, který by v on-line režimu vyhodnocoval klíčové parametry a fungoval by tak jako výstražný nástroj pro provozovatele sítě v kontextu nebezpečí narušeného vypínání.

Vlastní přínos této práce tak vidím ve zhotovení všech výpočetních skriptů, provedení modelů a dosažení zajímavých výsledků, které mezi sebou porovnávají různé stroje a různá místa v síti. Vypracované skripty a provedené modely se zároveň doplňují a navzájem rozšiřují, což spolu s důsledným popisem vypínačů a vypínacího procesu tvoří provázaný celek a ucelený pohled na danou problematiku.

## 8.2 Směr dalšího zkoumání tématu

Na téma předkládané disertační práce může být navazováno dalšími aktivitami, které téma práce dále rozvinou a pomůžou k postupu řešení tématu dále. Principiálně lze hovořit o zaměření na síť či zaměření na vypínač.

V oblasti síťové analýzy tak může být žádoucí zobecněný pohled na tvar poruchových proudů a sledování dalších případů mimořádných spínacích dějů. Jak samotný, poměrně obecný název tématu disertační práce napovídá, je vhodné věnovat se i dalším případům, kdy je interakcí mezi mechanickými a elektrickými ději dosaženo vypínání v oblasti limitní charakteristiky a tím ohrožen úspěšný vypínací proces a tedy i vypínač a blízká zařízení. K obdobným případům, tedy kdy požadovaná vypínací schopnost je menší než vypínací schopnost vypínače v daný moment, můžeme zařadit i vypínání malých kapacitních či induktivních proudů. Vedle oddálené proudové nuly tak jde o další obtížnou vypínací disciplínu, v níž jde o časovou souhru elektrických a mechanických procesů a je zde velký potenciál pro další zkoumání.

V oblasti samotných vypínačů je vhodné se dále věnovat průběhu vypínacího procesu a jeho modelování FEM a CFD nástroji. Namáhání vypínače a průběh vypínací schopnosti byly doposud diskutovány jen na základě v minulosti provedených zkoušek a experimentů. Současný stav na poli výpočetního a modelovacího software však umožňuje ověřit fyzikální poměry ve zhášecí komoře a provést vhodnou fúzi s obvody modelováním, z níž by bylo možné stanovit obecné závěry pro možnou modifikaci zhášecích komor. Vzhledem k možnostem, které nám současné FEM a CFD nástroje umožňují, a vzhledem k šíři tématu lze tento směr uchopit i jako výhradní směr pro samostatné téma navazující disertační práce. Z tohoto důvodu je nutné najít vhodné optimum výsledného modelu, který bude vhodně doplňovat téma práce, ale nezpůsobí jeho odklonění na problematiku numerického řešení silně sdružených úloh elektrického proudového pole a mechaniky kontinua.

## 8.3 Seznam publikovaných prací

### Příspěvky na konferencích a články ve sbornících

- [I] VAJNAR, V., JIŘIČKOVÁ, J., SEDLÁČEK, J., *Možnosti využití výpočetních modelovacích nástrojů pro analýzu mimořádných spínacích jevů*. Referáty 20. konference ČK CIRED. Praha: Český komitét CIRED, 2016. ISBN: 978-80-905014-5-4
- [II] VAJNAR, V., *Posouzení využitelnosti alternativních izolačních plynů pro rozvodná zařízení v energetice za účelem snižování dopadů na životní prostředí*. Elektrotechnika a informatika 2017. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. ISBN: 978-80-261-0712-5
- [III] VAJNAR, V., VOSTRACKÝ, Z., SEDLÁČEK, J., *Analysis of breaking capability within asymmetrical short circuits*. Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, 2015. ISBN: 978-1-4673-6788-2, ISSN: 2376-5623
- [IV] VOSTRACKÝ, Z., VAJNAR, V., SEDLÁČEK, J., *Částečné výboje a jejich vliv na životnost energetických zařízení vysokého napětí*. Sborník z 10. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. ISBN: 978-80-261-0522-0
- [V] VAJNAR, V., *Metody modelování elektrického spínacího oblouku a jejich užití v praxi*. Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. ISBN: 978-80-261-0514-5
- [VI] VAJNAR, V., VOSTRACKÝ, Z., *Analysis of dielectric stress of SF6 high voltage circuit breaker*. Proceedings of the 13th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2016. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2016. ISBN: 978-80-89402-85-4
- [VII] VAJNAR, V., JIŘIČKOVÁ, J., SEDLÁČEK, J., *Možnosti využití výpočetních modelovacích nástrojů pro analýzu mimořádných spínacích jevů*. Elektro a trh: odborný česko-slovenský elektrotechnický časopis, 2016, roč. 7, č. 6, ISSN: 2464-5753
- [VIII] MUŽÍK, V., VAJNAR, V., *Frequency and voltage stability assessment of a power system during emergency service states*. Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Piscataway: IEEE, 2018. ISBN: 978-1-5386-4340-2
- [IX] VAJNAR, V., SEDLÁČEK, J., VOSTRACKÝ, Z., *Approach analysis of modeling of electric arc for use in circuit breakers' special conditions*. Proceedings of the 14th International Scientific Conference EEE 2018: Energy - Ecology - Economy 2018. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2018. ISBN: 978-80-89402-99-1, ISSN: 2585-9684
- [X] VAJNAR, V., VOSTRACKÝ, Z., *Assessment of the breaking characteristics of high voltage circuit breakers with respect to the fault circuit interactions*. Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2017). Košice: Technical University of Košice, 2017. ISBN: 978-80-553-3195-9
- [XI] VAJNAR, V., *Posouzení spolehlivosti návrhu a provozu vypínačů vvn/zvn na základě výsledků mezinárodních průzkumů spolehlivosti*. Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. ISBN: 978-80-261-0785-9
- [XII] VAJNAR, V., *Rozbor vypínací schopnosti generátorových vypínačů při generátorových zkratech*. Elektrotechnika a informatika 2014. Část 3., Elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. ISBN: 978-80-261-0368-4
- [XIII] VAJNAR, V., VOSTRACKÝ, Z., *Problematika narušeného vypínání v distribučních soustavách*. Referáty 19. konference ČK CIRED. Praha: Český komitét CIRED, 2015. ISBN: 978-80-905014-4-7

- [XIV] VAJNAR, V., VOSTRACKÝ, Z., *Reduced breaking capability of circuit breakers within operations with delayed current zeros*. Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Prague: Czech Technical University in Prague, 2016. ISBN: 978-1-5090-0907-7
- [XV] VAJNAR, V., VOSTRACKÝ, Z., RAWN, B., *Assessment of the delayed current zeros occurrence using the evaluation of the Z-bus matrix in matpower toolkit*. Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Piscataway: IEEE, 2017. ISBN: 978-1-5090-6405-2
- [XVI] VAJNAR, V., VOSTRACKÝ, Z., *Analysis of delayed current zero occurrence within generator fed faults*. Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2015). Košice: Technical University of Košice, 2015. ISBN: 978-80-553-2187-5
- [XVII] NOHÁČ, K., JIŘIČKOVÁ, J., RAKOVÁ, L., VAJNAR, V., *Dynamic mutual influence of electricity network, nuclear stations, renewable and other energy sources at events associated with the occurrence of faults and subsequent scenarios*. Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2015). Košice: Technical University of Košice, 2015. ISBN: 978-80-553-2187-5
- [XVIII] VAJNAR, V., NAZARČÍK, T., *Service operation of UHVDC systems with emphasis on switching phenomena*. Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Piscataway: IEEE, 2018. ISBN: 978-1-5386-4340-2

### Výzkumné zprávy

- [XIX] VOSTRACKÝ, Z., VAJNAR, V., MUŽÍK, V., ŠLECHTA, P., *Studie automatizace spínacích prvků na úrovni 22kV*. Výzkumná zpráva, 2015.
- [XX] NOHÁČ, K., VAJNAR, V., MUŽÍK, V., VOSTRACKÝ, Z., JIŘIČKOVÁ, J., RAKOVÁ, L., *Studie dynamického vzájemného ovlivnění přepravní soustavy, velkých jaderně-energetických zdrojů, nových obnovitelných zdrojů a dalších energetických zdrojů při událostech spojených s výskytem poruchových stavů*. Výzkumná zpráva, Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., 2014.

### Odborné přednášky

- [XXI] VAJNAR, V., *Modelling of the Electric Arc for the Use in Circuit Breaker's Design*. The Welding Institute, Granta Park, Cambridge, Velká Británie, 2017.
- [XXII] VAJNAR, V., *Circuit Breakers: Modeling of the Electric Arc*. Deggendorf Institute of Technology, Deggendorf, Německo, 2014.

### Ostatní výsledky bez vztahu k tématu disertační práce

- [XXIII] KRUTINA, A., VAJNAR, V., MUŽÍK, V., *Neintruzivní měření elektrických veličin*. Funkční vzorek, ZČU v Plzni, 2018.
- [XXIV] JIŘIČKOVÁ, J., VAJNAR, V., MUŽÍK, V., HEJTMÁNKOVÁ, P., KACÍŘ, J., *Robotika pro účely diagnostiky a monitoringu při práci na potenciálu distribuční sítě*. In: Referáty 22. konference ČK CIREC 2018. Praha: Český komitét CIREC, 2018. ISBN: 978-80-905014-7-8.
- [XXV] MUŽÍK, V., VAJNAR, V., *Software pro možnost on-line hodnocení přechodu do ostrovního provozu (Island Operator)*. 2017.

- [XXVI] MUŽÍK, V., VAJNAR, V., VOSTRACKÝ, Z., *The e-mobility analysis with respect to the transmission and distribution grid and its effects on stability of power delivery*. In: Smart City Symposium Prague (SCSP 2018): IEEE proceedings. Piscataway: IEEE, 2018. ISBN: 978-1-5386-5017-2
- [XXVII] MUŽÍK, V., VAJNAR, V., VOSTRACKÝ, Z., ŠLECHTA, P., *Application of a smart load-control concept in a municipality building in city of Pilsen*. In: Smart City Symposium Prague (SCSP 2017): IEEE proceedings. Piscataway: IEEE, 2017. ISBN: 978-1-5386-3825-5.
- [XXVIII] NOHÁČ, K., RAKOVÁ, L., VAJNAR, V., MUŽÍK, V., *Autorský software „Stabilita JE“ alias „Stabilita vyvedení elektrického výkonu JE“*, Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [XXIX] NOHÁČ, K., VOSTRACKÝ, Z., MUŽÍK, V., VAJNAR, V., RAKOVÁ, L., JIŘIČKOVÁ, J., *Vývoj softwarového modulu simulačního modelovacího nástroje pro podporu zajištění stability přenosové soustavy*. Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [XXX] VOSTRACKÝ, Z., MUŽÍK, V., VAJNAR, V., ADÁMEK, M., KRUTINA, A., JANEČEK, P., STŘELEČEK, M., ŠLECHTA, P., *Zabezpečení krizových stavů v energetice města Plzně*. Výzkumná zpráva, 2015.
- [XXXI] PITERKA, L., VAJNAR, V., MUŽÍK, V., *Soubor metodických postupů pro hodnocení provozní spolehlivosti jaderně-energetických zdrojů a jejich vlivu na stabilitu provozu přenosové soustavy*. Výzkumná zpráva, Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., 2014.

# Literatura

- [1] KULICKE, B., SCHRAMM, H. H., *Clearance of short-circuits with delayed current zeros in the Itaipu 500kV-substation*. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-99, No. 4, Vancouver, Kanada, 1980.
- [2] DARAWAN, K., PIERRE, C. S., *Evaluating Generator Circuit Breakers Short-Circuit Duty Using IEEE C37.010 and C37.013*. IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 50, No. 6., Louisville, USA, 2014.
- [3] BUI-VAN, Q., KHODABAKHCHIAN, B., LANDRY, M., MAHSEREDJIAN, J., MAINVILLE, J., *Performance of series-compensated line circuit breakers under delayed current-zero conditions*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, Issue 1, 1997.
- [4] Siemens TechTopics No. 67, *%dc component*. Application note, Siemens AG, Erlangen, Německo, 2012.
- [5] Siemens TechTopics No. 72, *Generator circuit breaker applications – delayed current zeros*. Application note. Siemens AG, Erlangen, Německo, 2009.
- [6] Norma IEC *International standard IEC 62271-100: High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers*. Ženeva, Švýcarsko, 2008.
- [7] Norma IEEE Power & Energy Society *C37.06-2009: IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis – Preferred Ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V*. New York, USA, 2009.
- [8] Norma IEEE Power & Energy Society *C37.010-1999: IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis*. New York, USA, 1999.
- [9] Norma IEEE Power & Energy Society *IEEE Standard for AC High Voltage Generator Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis – Amendment 1: Supplement for Use with Generators Rated 10-100 MVA*. New York, USA, 2007.
- [10] ISHIKAWA, M., IKEDA, H., YANABU, S., YAMAMOTO, M., *Numerical Study of Delayed-Zero-Current Interruption Phenomena Using Transient Analysis Model for an ARC in SF6 Flow*. IEEE Power Engineering Review, Vol. PER-4, Issue 12, 1984.
- [11] CIGRE Technical Brochure, *Switching Phenomena for EHV and UHV Equipment*. Technická brožura, TB-570, WG A3.28. Paříž, Francie, 2014.
- [12] CIGRE Technical Brochure, *Influence of Shunt Capacitor Banks on Circuit Breaker Fault Interruption Duties*. Technická brožura TB-624, WG A3-26. Paříž, Francie, 2015.
- [13] CIGRE Technical Brochure, *System conditions for and probability of out-of-phase*. Technická brožura TB-716, JWG A3/B5/C4.37. Paříž, Francie, 2018.
- [14] NAKANISHI, K. a kol. *Switching phenomena in high-voltage circuit breakers*. 2. vydání, Marcel Dekker Inc., New York, USA, 1991. ISBN: 0-8247-8543-6
- [15] BÁRTA, K., VOSTRACKÝ, Z. a kol. *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*. Praha: SNTL/ALFA, 1983.



- [16] SEDLÁČEK, J. *Stacionární a dynamické napěťové namáhání vypínčů vn a vvn*. Doktorská disertační práce, ZČU v Plzni, 1999.
- [17] Siemens AG, *Power Engineering Guide*. Edition 8.0, Energy Management Division, Siemens AG, Erlangen, Německo, 2017.
- [18] RUSŇÁK, Š., ŘEZÁČEK, P. *Elektrické přístroje 1*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2001. ISBN 80-7082-825-0.
- [19] HAVELKA, O., a kol. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL/ALFA, 1985.
- [20] Bharat Heavy Electricals Limited, kolektiv autorů, *Handbook of Switchgears*. New York: McGraw-Hill Handbooks, USA, 2007. ISBN: 0-07-147696-2.
- [21] GRIGSBY, L. L., *The Electric Power Engineering Handbook – Power Systems*. Third edition, Boca Raton: CRC Press 2012. ISBN: 978-1-4398-5633-8.
- [22] VOSTRACKÝ, Z. *Charakteristiky vypínací schopnosti vypínačů a jejich užití v praxi*. Doktorská disertační práce, ČVUT Praha, FEL - Škoda, Plzeň, 1986.
- [23] Siemens, AG, *High-voltage Circuit Breakers*. Product guide, Erlangen, Německo, 2012.
- [24] CARY, S. M., *High voltage circuit breaker standards – comparative guide*. White paper WP012001EN, Eaton, USA, 2013.
- [25] KRATOCHVÍL, V. *Porovnání normativních požadavků na vypínače velmi vysokého napětí*. Bakalářská práce, vedoucí práce: Vladimír Vajnar. Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2018.
- [26] BISCHUR, Olaf, *IEC 62271 - Series standards for MV-Switchgear*. Online, dostupné z: [http://highvoltage.org.tw/news\\_file/08.pdf](http://highvoltage.org.tw/news_file/08.pdf). [cit: 28-06-2018]
- [27] JEŽEK, V. *Analýza vypínacího procesu generátorového vypínače*. Doktorská disertační práce, ZČU v Plzni, 2011.
- [28] Catalog HG 11.03 *3AH3 Vacuum Circuit-Breakers*. Edice 2010, Siemens AG, Berlín, Německo.
- [29] Catalog HG 11.01 *Vacuum Switching Technology and Components for Medium Voltage*. Edice 2016, Siemens AG, Berlín, Německo.
- [30] PISARČÍK, T. *Vypínače a GIS VVN "SF6 Free"*. Referáty 21. konference ČK CIREC. Praha: Český komitét CIREC, 2017.
- [31] KIEFFEL, Y., BIQUEZ, F., PONCHON, P., *Alternative Gas To SF6 For Use In High Voltage Switchgears: g3*. 23rd International Conference on Electricity Distribution CIREC 2015, Lyon, Francie, 2015.
- [32] Propagační materiál *3M Novec 4710 Insulating Gas*. Online, dostupné z: <http://multimedia.3m.com/mws/media/11321240/3m-novec-4710-insulating-gas.pdf>. [cit: 20-8-2018]
- [33] GE Grid Solutions, *National Grid Begins Journey to SF6-free HV Substations*. Případová studie. Online, dostupné z: [https://www.gegridsolutions.com/press/gepress/Grid-GS-L5-Sellindge\\_GIL\\_g3-1597-2017\\_08-EN.pdf](https://www.gegridsolutions.com/press/gepress/Grid-GS-L5-Sellindge_GIL_g3-1597-2017_08-EN.pdf). [cit: 22-8-2018]
- [34] KIEFFEL, Y., BIQUEZ, F., VIGOROUX, D., PONCHON, P., SCHLERNITZAUER, A., MAGOUS, R., CROS, G., OWENS, J. G., *Characteristics of g3 — an alternative to SF6*. 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIREC), Glasgow, 2017.
- [35] PRCHLÍK, M. *Vypínače se zhasécím plynem CO2*. Referáty 18. konference ČK CIREC. Praha: Český komitét CIREC, 2014.
- [36] STOLLER, P. C., SEEGER, M., IORDANIDIS, A. A., NAIDIS, G. V., *CO2 as an Arc Interruption Medium in Gas Circuit Breakers*. IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 41, No. 8, 2013.

- [37] ABB High Voltage Products, *High voltage CO2 circuit breaker type LTA – Enhancing eco-efficiency*. Produkční list. ABB High Voltage Products, Ludvika, Švédsko, 2018.
- [38] LONG, R. W., SMITH, R. K., *Are All Circuit Breakers Created Equal? Certainly NOT When it Comes to Generator Circuits!*. Eaton, USA, 2003.
- [39] LONG, R. W., SMITH, R. K., CARY, S. M., *Generator circuit breakers have special requirements for generator protection*. White paper, WP131001, Eaton, USA, 2003.
- [40] KULICKE, B., SCHRAMM, H.-H., *Application of Vacuum Circuit-Breaker to Clear Faults with Delayed Current Zeroes*. IEEE/PES 1987 Summer Meeting, San Francisco, USA, 1987.
- [41] SMITH, R.K., *Tests show ability of vacuum circuit breaker to interrupt fast transient recovery voltage rates of rise of transformer secondary faults*. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 10, Issue: 1, 1995.
- [42] TESAŘOVÁ, M., ŠTROBLOVÁ, M. *Průmyslová elektroenergetika*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-703-3.
- [43] ČÍŽEK, V. *Rozbor vypínacího procesu vypínačů VVN/ZVN se zaměřením na dielektrický interval*. Bakalářská práce, vedoucí práce: Vladimír Vajnar. Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2018.
- [44] BIZJAK, G., ZUNKO, P., POVH, D. *Combined model of SF6 circuit breaker for use in digital simulation programs*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19., No. 1. 2004.
- [45] SEDLÁČEK, J. *Matematický model elektrického oblouku jako interakce proudícího média a teplotního a elektromagnetického pole*. Vědeckotechnická společnost ŠKODA. Plzeň, 2008.
- [46] PEDRO, K., *Electric Arc Modeling in Circuit Breakers for Electromagnetic Transients Analysis*. Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, 2017.
- [47] YUAN, L., WU, H., *Simulation of Fault Arc Using Conventional Arc Models*. Energy and Power Engineering, p. 833-837, Čína, 2013.
- [48] SCHAVEMAKER, P. H., SLUIS, L. V. D., *An improved Mayr-type arc model based on current-zero measurements*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, no. 2, p. 580-584, 2000.
- [49] RASHTCHI, V., LOTFI, A., MOUSAVI, A., *Identification of KEMA arc model parameters in high voltage circuit breaker by using generic algorithm*. IEEE 2nd International Power and Energy Conference, p. 1515-1517, Johor Bahru, 2000.
- [50] SLUIS, L. van der, RUTGERS, W. R., KOREMAN, C. G. A., *A physical arc model for the simulation of current zero behavior of high-voltage circuit breakers*. In: Proceedings of the Transmission and Distribution Conference, Dallas, USA, 1991.
- [51] SEDLACEK, J., VOSTRACKY, Z., SCHRAMM, H., KNOBLOCH, H., WIESINGER, C., *Optimization of h.v. self-blast interrupter by gas flow and electric field computations*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, No.4, p.1228-1235, ISSN 0885-8977, 2013.
- [52] MATLAB Help, *Cassie and Mayr Arc Models for a Circuit Breaker*. Online, dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/cassie-and-mayr-arc-models-for-a-circuit-breaker.html>. [cit: 3-01-2019]
- [53] SCHAVEMAKER, P. H., *Arc Model Blockset for use with MATLAB Simulink and Power System Blockset*. User's Guide, Version 2, Delft University of Technology, Nizozemsko, 2001.
- [54] SCHAVEMAKER, P. H., SLUIS, L. V. D., *The Arc Model Blockset*. Proceedings of the 2nd IASTED International Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS (EuroPES), str. 644-648, Řecko, 2002.
- [55] CIGRÉ WG 13.06, *Final report of the 2nd international enquiry on HV circuit-breaker failures and defects in service*. CIGRÉ Technical Brochure no. 83, 1994.

- [56] CIGRÉ WG A3.06, *Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment, Part 1 - Summary and General Matters*. CIGRÉ Technical Brochure no. 509, 2012.
- [57] CIGRÉ WG A3.06: *Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment, Part 2 - SF6 Circuit Breakers*. CIGRÉ Technical Brochure no. 510, 2012.
- [58] TROJÁNEK, Z., HÁJEK, J., KVASNICA, P. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: SNTL/ALFA, 1987.
- [59] HÁJEK, J. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Plzeň: Ediční středisko VŠSE, 1983.
- [60] VAJNAR, V., *Spolehlivost vypínačů vvn včetně mimořádných stavů*. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, 2008.
- [61] LIPO, T. A., *Analysis of synchronous machines*. Druhé vydání, CRC Press, Florida, USA, 2017. ISBN 978-1-4398-8067-8.
- [62] LAURIA, D., QUAIA, S., *Technical comparison between a gas-insulated line and a traditional three-bundled OHL for a 400 kV, 200 km connection*, IEEE International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Taormina, Itálie, 2015.
- [63] ULLMAN, I., *Nové výzvy pro spolehlivý provoz přenosové soustavy*. Online, dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2017/Energie\\_pro\\_budoucnost\\_XX\\_Amper2017/\\_02-PS\\_spolehlyvy\\_provoz\\_Ullman.pdf](http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2017/Energie_pro_budoucnost_XX_Amper2017/_02-PS_spolehlyvy_provoz_Ullman.pdf). [cit: 16-01-2019]
- [64] *Controlled Switching*. Produkční brožura. ABB High Voltage Products, Ludvika, Švédsko, 2018.
- [65] GRANADA, G., *Controlled Switching with Switchsync – PWC600 Point-on-Wave Controller*. Lima, Peru, 2017.
- [66] VAJNAR, V., VOSTRACKÝ, Z., *Assessment of the delayed current zeros occurrence using the evaluation of the Z-bus matrix in Matpower toolkit*. Sborník konference 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2017.
- [67] HREINSSON, E. B., *Calculating the short circuit current and input impedance of each node in the power system (by matrix methods)*. Lecture 23, University of Iceland, Reykjavik, 2012. Online, dostupné z: [https://notendur.hi.is/egill/raforkuk1/SLIDESetc/RK23\\_short\\_circuit2\\_and\\_SCADA.pdf](https://notendur.hi.is/egill/raforkuk1/SLIDESetc/RK23_short_circuit2_and_SCADA.pdf). [cit: 08-11-2018]
- [68] Wikipedie, otevřená encyklopedie, *Théveninova věta*. Online, dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9veninova\\_v%C4%9Bta](https://cs.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9veninova_v%C4%9Bta). [cit: 08-11-2018]
- [69] KUNDUR, P., *Power System Stability and Control*. Electric Power Research Institute, McGraw-Hill, New Delhi, 2012. ISBN: 978-0-07-063515-9
- [70] CHAKRABARTI, A., HALDER, S., *Power System Analysis Operation and Control*. PHI Learning Private Ltd., New Delhi, 2012. ISBN: 978-81-203-4015-2
- [71] MATPOWER: *Free, open-source Electric Power System Simulation and Optimization Tools for MATLAB and Octave*. Online, dostupné z: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>. [cit: 11-11-2018]
- [72] ZIMMERMAN, R. D., MURILLO-SÁNCHEZ, C. E., THOMAS, R. J., *MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education*. Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011.
- [73] LI, F., BO, R., *Small Test Systems for Power System Economic Studies*. Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2010.
- [74] Power System Test Case Archive, Case 14, online: <http://labs.ece.uw.edu/pstca/>. [cit:18-11-2018].

- [75] JOSZ, C., FLISCOUNAKIS, S., MAEGHT, J., PANCIATICI, P., *AC Power Flow Data in MATPOWER and QCQP Format: iTesla, RTE Snapshots, and PEGASE*. Online, dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1603.01533.pdf>. [cit: 20-11-2018]

# Přílohy

## A Skript pro výpočet namáhání vypínače při generátorových zkratech

```
1 % Analysis of breaker stressing at synchronous machine terminals
2 % Vladimír Vajnar / University of West Bohemia
3 % -----
4 clc; clear all;
5 % PART I =====
6 % Zadání parametru stroju
7 f = 50; % [Hz]
8 w = 2*pi*f; % [rad/s]
9 % TURBO
10 % Reaktance
11 xd2t = 0.17; % [pu]
12 xdt = 0.29; % [pu]
13 xd0t = 2.0; % [pu]
14 xq2t = 0.18; % [pu]
15 xq0t = 2.0; % [pu]
16 % Casove konstanty:
17 Td2t = 0.114; % [s]
18 Tdt = 0.86; % [s]
19 Tat = 0.278; % [s]
20 % Ostatni:
21 Unt = 15; % [kV]
22 Eit = Unt*1e3*sqrt(2)/sqrt(3);
23
24 % HYDRO
25 % Reaktance
26 xd2h = 0.24; % [pu]
27 xd1h = 0.37; % [pu]
28 xd0h = 1.15; % [pu]
29 xq2h = 0.23; % [pu]
30 xq0h = 0.75; % [pu]
31 % Casove konstanty:
32 Td2h = 0.262; % [s]
33 Td1h = 1.8; % [s]
34 Tah = 0.16; % [s]
35 % Ostatni:
36 Unh = 15; % [kV]
37 Eih = Unh*1e3*sqrt(2)/sqrt(3);
38
39 % PART II =====
40 % Analýza pro vsechny asymetrie s Alpha0 od 0 do 90 stupnu
41 alpha0 = 0;
42 i = 1;
43 for alpha0 = 0:pi/36:pi/2
44     t = 0:.0001:0.4; % Vektor casu
45
46     SteadyTurbo = 1./xd0t;
47     TransTurbo = (1./xdt - 1./xd0t).*exp(-t./Tdt);
48     SubTranTurbo = (1./xd2t - 1./xdt).*exp(-t./Td2t);
49     DCTurbo = (1./xd2t + 1./xq2t).*exp(-t./Tat);
50     DoubleTurbo = (1./xd2t - 1./xq2t).*exp(-t./Tat);
51
52     FaultCurrentTurbo = -Eit.*(SteadyTurbo + TransTurbo + SubTranTurbo).*cos(w.*t+alpha0)+...
53         Eit/2.*DCTurbo.*cos(alpha0)+...
54         Eit/2.*DoubleTurbo.*cos(2*w.*t+alpha0); % Poruchovy proud Turba
55
56     for j = 1:length(FaultCurrentTurbo) % Prubeh RMS hodnoty Turba
57         RMSCurrentTurbo(j) = rms(FaultCurrentTurbo(1:j));
58     end
```

```

59
60 SteadyHydro = 1./xd0h;
61 TransHydro = (1./xd1h - 1./xd0h).*exp(-t./Td1h);
62 SubTranHydro = (1./xd2h - 1./xd1h).*exp(-t./Td2h);
63 DCHydro = (1./xd2h + 1./xq2h).*exp(-t./Tah);
64 DoubleHydro = (1./xd2h - 1./xq2h).*exp(-t./Tah);
65
66 FaultCurrentHydro = -Eih.*(SteadyHydro + TransHydro + SubTranHydro).*cos(w.*t+alpha0)+...
67   Eih/2.*DCHydro.*cos(alpha0)+...
68   Eih/2.*DoubleHydro.*cos(2*w.*t+alpha0); % Poruchovy proud Hydra
69
70 for j = 1:length(FaultCurrentHydro) % Prubeh RMS hodnoty Hydra
71   RMSCurrentHydro(j) = rms(FaultCurrentHydro(1:j));
72 end
73
74 %Vykreslovani prubehu
75 figure('Color', 'w');
76 plot(t, [FaultCurrentTurbo; FaultCurrentHydro]);
77 hold on; grid on; xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
78 legend(['turbo'; 'hydro']);
79 gray = [.7 .8 .7];
80 plot(t, [RMSCurrentTurbo; RMSCurrentHydro], ':', 'Color', gray);
81 title(['Asymetrie s uhlem \alpha_{0} = ', num2str(rad2deg(alpha0)), ' stupnu']);
82
83 if alpha0 == 0;
84   figure('Color', 'w');
85   plot(t, [FaultCurrentTurbo; FaultCurrentHydro]);
86   hold on; grid on; xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]'); xlim([0 0.3]);
87   legend(['turbo'; 'hydro']);
88   gray = [.7 .8 .7];
89   plot(t, [RMSCurrentTurbo; RMSCurrentHydro], ':', 'Color', gray);
90   %title(['Asymetrie s uhlem \alpha_{0} = ', num2str(rad2deg(alpha0)), ' stupnu']);
91   plot([0.01873], [0], 'ro');
92 end;
93
94 AsymmetryAngle = 0:5:90; % [deg]
95 % Doba do prvnioho pruchodu nulou u Turba - nutno odecist z grafu a zadat:
96 CurrentZeroTimeTurbo = 1e-3*[NaN 19.74 19.11 18.42 17.77 17.17 16.57 16 15.43...
97   14.87 14.31 13.76 13.21 12.67 12.13 11.61 11.06 10.53 10];
98 % Hodnoty di/dt v okamziku t0 - vypocet z CurrentZeroTimeTurbo
99 CurrentDerivativesTurbo = -Eit.*cos(w.*CurrentZeroTimeTurbo+deg2rad(AsymmetryAngle)).*...
100   ((1/xd0t-1/xd1t).*exp(-CurrentZeroTimeTurbo./Td1t)/Td1t + (1/xd1t-1/xd2t).*exp(-CurrentZeroTimeTurbo./Td2t))
101   ....
102   Eit.*w.*sin(w.*CurrentZeroTimeTurbo+deg2rad(AsymmetryAngle)).*((1/xd0t-1/xd1t).*exp(-CurrentZeroTimeTurbo./
103   Td1t)/Td1t + (1/xd1t-1/xd2t).*exp(-CurrentZeroTimeTurbo./Td2t)-1/xd0t)-...
104   Eit/2.*cos(deg2rad(AsymmetryAngle)).*(1/xd2t-1/xq2t).*exp(-CurrentZeroTimeTurbo./Tat);
105 % Doba do prvnioho pruchodu nulou u Hydra - nutno odecist z grafu a zadat:
106 CurrentZeroTimeHydro = 1e-3*[18.73 18.45 18.11 17.74 17.32 16.87 16.41...
107   15.92 15.43 14.92 14.4 13.87 13.33 12.78 12.24 11.64 11.13 10.57 10];
108 % Hodnoty di/dt v okamziku t0 - vypocet z CurrentZeroTimeHydro
109 CurrentDerivativesHydro = -Eih.*cos(w.*CurrentZeroTimeHydro+deg2rad(AsymmetryAngle)).*...
110   ((1/xd0h-1/xd1h).*exp(-CurrentZeroTimeHydro./Td1h)/Td1h + (1/xd1h-1/xd2h).*exp(-CurrentZeroTimeHydro./Td2h))
111   ....
112   Eih.*w.*sin(w.*CurrentZeroTimeHydro+deg2rad(AsymmetryAngle)).*((1/xd0h-1/xd1h).*exp(-CurrentZeroTimeHydro./
113   Td1h)/Td1h + (1/xd1h-1/xd2h).*exp(-CurrentZeroTimeHydro./Td2h)-1/xd0h)-...
114   Eih/2.*cos(deg2rad(AsymmetryAngle)).*(1/xd2h-1/xq2h).*exp(-CurrentZeroTimeHydro./Tah);
115
116 [CZT, Index] = min(abs(CurrentZeroTimeTurbo(i)-t)); clear CZT;
117 RMSClearedCurrentTurbo(i) = RMSCurrentTurbo(Index);
118 [CZH, Index] = min(abs(CurrentZeroTimeHydro(i)-t)); clear CZH;
119 RMSClearedCurrentHydro(i) = RMSCurrentHydro(Index);
120
121 i = i + 1;
122 end;
123
124 % PART III =====
125 % Vypocet du/dt
126 RRRVTurbo03 = 0.0949.*(RMSClearedCurrentTurbo/1e3)-2.714;
127 RRRVHydro03 = 0.1213.*(RMSClearedCurrentHydro/1e3)-2.322;
128
129 % Vypocet namahani vypinace
130 BreakerStressingTurbo = abs(CurrentDerivativesTurbo.*RRRVTurbo03);
131 BreakerStressingHydro = abs(CurrentDerivativesHydro.*RRRVHydro03);
132
133 % Konstrukce matice vysledku
134 ResultsTurbo = [AsymmetryAngle; [0:100/18:100]; CurrentZeroTimeTurbo; ...
135   CurrentDerivativesTurbo/1e6; RMSClearedCurrentTurbo/1e3; RRRVTurbo03;...
136   BreakerStressingTurbo/1e6];
137 ResultsHydro = [AsymmetryAngle; [0:100/18:100]; CurrentZeroTimeHydro; ...
138   CurrentDerivativesHydro/1e6; RMSClearedCurrentHydro/1e3; RRRVHydro03;...
139   BreakerStressingHydro/1e6];
140
141 % PART IV =====
142 % Konstrukce vyslednych grafu
143 figure('Color', 'w');
144 plot(AsymmetryAngle,BreakerStressingTurbo/1e6, '-s', 'LineWidth', 1.5), 'MarkerFaceColor', 'b');

```

```

141 hold on; ax = gca; ax.ColorOrderIndex = 5;
142 plot(AsymmetryAngle,BreakerStressingHydro/1e6, '-o', 'LineWidth', 1.5), 'MarkerFaceColor', [0 .5 0]);
143 grid on; xlabel('\alpha_{0} [deg]'); ylabel('Q_{i} [MVA\cdot\mus^{-2}]');
144 legend(['turbo'; 'hydro'], 'Location', 'NW');
145 title('Namahani vypinace v prvni proudove nule jako fce uhlu \alpha_{0}');
146
147 figure('Color', 'w');
148 plot(0:100/18:100,fliplr(BreakerStressingTurbo/1e6), '-s', 'LineWidth', 1.5), 'MarkerFaceColor', 'b');
149 hold on; ax = gca; ax.ColorOrderIndex = 5;
150 plot(0:100/18:100,fliplr(BreakerStressingHydro/1e6), '-o', 'LineWidth', 1.5), 'MarkerFaceColor', [0 .5 0]);
151 grid on; xlabel('% asymetrie'); ylabel('Q_{i} [MVA\cdot\mus^{-2}]');
152 legend(['turbo'; 'hydro']);
153 title('Namahani vypinace v prvni proudove nule jako fce asymetrie');
154
155 figure('Color', 'w'); ax = gca; ax.ColorOrderIndex = 3; hold on;
156 plot(0:100/18:100, fliplr(BreakerStressingTurbo/BreakerStressingTurbo(19)), '-s', 'LineWidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'w');
157 plot(0:100/18:100, fliplr(CurrentZeroTimeTurbo/CurrentZeroTimeTurbo(19)), '-o', 'LineWidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'w');
158 grid on; title('Porovnani Q_{i} a t_{0} v pomernych jednotkach pro turbo');
159 xlabel('% asymetrie'); ylabel('Q_{i}/Q_{i SYM}, t_{0}/t_{0 SYM} [p.u.]');
160 legend(['Q_{i}/Q_{i SYM}'; 't_{0}/t_{0 SYM}'], 'Location', 'SW'); box on;
161
162 figure('Color', 'w'); ax = gca; ax.ColorOrderIndex = 3; hold on;
163 plot(0:100/18:100, fliplr(BreakerStressingHydro/BreakerStressingHydro(19)), '-s', 'LineWidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'w');
164 plot(0:100/18:100, fliplr(CurrentZeroTimeHydro/CurrentZeroTimeHydro(19)), '-o', 'LineWidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'w');
165 grid on; title('Porovnani Q_{i} a t_{0} v pomernych jednotkach pro hydro');
166 xlabel('% asymetrie'); ylabel('Q_{i}/Q_{i SYM}, t_{0}/t_{0 SYM} [p.u.]');
167 legend(['Q_{i}/Q_{i SYM}'; 't_{0}/t_{0 SYM}'], 'Location', 'NW'); box on;
168 % =====

```

## B Rozšířený model namáhání vypínače při generátorových zkratech

```
1 % Analysis of breaker stressing at synchronous machine terminals - advanced
2 % Vladimír Vajnar / University of West Bohemia
3 % -----
4 clc; clear all;
5 % PART I =====
6 % Zadání parametru stroju
7 f = 50; % [Hz]
8 w = 2*pi*f; % [rad/s]
9 % TURBO
10 % Reaktance
11 xd2t = 0.17; % [pu]
12 xdit = 0.29; % [pu]
13 xd0t = 2.0; % [pu]
14 xq2t = 0.18; % [pu]
15 xq0t = 2.0; % [pu]
16 % Casove konstanty:
17 Td2t = 0.114; % [s]
18 Tdit = 0.86; % [s]
19 Tat = 0.278; % [s]
20 % Ostatni:
21 Unt = 15; % [kV]
22 Eit = Unt*1e3*sqrt(2)/sqrt(3);
23
24 % HYDRO
25 % Reaktance
26 xd2h = 0.24; % [pu]
27 xdh1 = 0.37; % [pu]
28 xd0h = 1.15; % [pu]
29 xq2h = 0.23; % [pu]
30 xq0h = 0.75; % [pu]
31 % Casove konstanty:
32 Td2h = 0.262; % [s]
33 Tdh1 = 1.8; % [s]
34 Tah = 0.16; % [s]
35 % Ostatni:
36 Unh = 15; % [kV]
37 Eih = Unh*1e3*sqrt(2)/sqrt(3);
38
39 % PART II =====
40 % Cyklus Ziskani FaultCurrentsTurbo (prubehy), RMSCurrentsTurbo (prubehy
41 % RMS) a CurrentZeroTimesTurbo (casy pruchodu proudu nulou)
42 alpha0 = 0;
43 i = 1;
44 while alpha0 <= pi/2 % Analýza pro jednotlivé úhly Alpha_0
45     t = 0:.0001:0.3; % Vektor casu
46
47     SteadyTurbo = 1./xd0t;
48     TransTurbo = (1./xdit - 1./xd0t).*exp(-t./Tdit);
49     SubTranTurbo = (1./xd2t - 1./xdit).*exp(-t./Td2t);
50     DCTurbo = (1./xd2t + 1./xq2t).*exp(-t./Tat);
51     DoubleTurbo = (1./xd2t - 1./xq2t).*exp(-t./Tat);
52
53     FaultCurrentsTurbo(i,:) = -Eit.*(SteadyTurbo + TransTurbo + SubTranTurbo).*cos(w.*t+alpha0)+...
54         Eit/2.*DCTurbo.*cos(alpha0)+...
55         Eit/2.*DoubleTurbo.*cos(2*w.*t+alpha0); % Poruchovy proud Turba
56
57     for j = 1:length(FaultCurrentsTurbo) % Prubehy RMS hodnoty Turba
58         RMSCurrentsTurbo(i,j) = rms(FaultCurrentsTurbo(i,1:j));
59     end
60
61     j = 1;
62     for p = 1:length(t)-1 % Hledani Current Zero Crossings
63         if sign(FaultCurrentsTurbo(i,p)) ~= sign(FaultCurrentsTurbo(i,p+1)) % Podminka zmeny polarity
64             if abs(FaultCurrentsTurbo(i,p)) < abs(FaultCurrentsTurbo(i,p+1))
65                 CurrentZeroTimesTurbo(i,j) = t(p);
66             else CurrentZeroTimesTurbo(i,j) = t(p+1);
67             end;
68             j = j + 1;
69         else continue;
```



```

70     end;
71 end;
72
73 SteadyHydro = 1./xd0h;
74 TransHydro = (1./xd1h - 1./xd0h).*exp(-t./Td1h);
75 SubTranHydro = (1./xd2h - 1./xd1h).*exp(-t./Td2h);
76 DCHydro = (1./xd2h + 1./xq2h).*exp(-t./Tah);
77 DoubleHydro = (1./xd2h - 1./xq2h).*exp(-t./Tah);
78
79 FaultCurrentsHydro(i,:) = -Eih.*(SteadyHydro + TransHydro + SubTranHydro).*cos(w.*t+alpha0)+...
80     Eih/2.*DCHydro.*cos(alpha0)+...
81     Eih/2.*DoubleHydro.*cos(2*w.*t+alpha0); % Poruchovy proud Hydra
82
83 for j = 1:length(FaultCurrentsHydro) % Prubeh RMS hodnoty Hydra
84     RMSCurrentsHydro(i,j) = rms(FaultCurrentsHydro(i,1:j));
85 end
86
87 j = 1;
88 for p = 1:length(t)-1 % Hledani Current Zero Crossings
89     if sign(FaultCurrentsHydro(i,p)) ~= sign(FaultCurrentsHydro(i,p+1)) % Podminka zmeny polarity
90         if abs(FaultCurrentsHydro(i,p)) < abs(FaultCurrentsHydro(i,p+1))
91             CurrentZeroTimesHydro(i,j) = t(p);
92         else CurrentZeroTimesHydro(i,j) = t(p+1);
93         end;
94         j = j + 1;
95     else continue;
96     end;
97 end;
98
99 figure(1); set(1, 'Color', 'w');
100 plot(t, FaultCurrentsTurbo(i,:), 'Color', [(255-20*i)/255, (255-20*i)/255, .7]);
101 grid on; xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]'); xlim([0 0.3]);
102 hold on;
103 plot(CurrentZeroTimesTurbo(i,:), zeros(length(CurrentZeroTimesTurbo)), 'rx');
104 plot(t, RMSCurrentsTurbo, 'Color', [20*i/255, 20*i/255, 20*i/255]);
105
106 figure(2); set(2, 'Color', 'w');
107 plot(t, FaultCurrentsHydro(i,:), 'Color', [(255-20*i)/255, .7, (255-20*i)/255]);
108 grid on; xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]'); xlim([0 0.3]);
109 hold on;
110 plot(CurrentZeroTimesHydro(i,:), zeros(length(CurrentZeroTimesHydro)), 'rx');
111 plot(t, RMSCurrentsHydro, 'Color', [20*i/255, 20*i/255, 20*i/255]);
112
113
114 % fprintf('Zero times for alpha = %4.2d:\n', rad2deg(alpha0));
115 % disp(CurrentZeroTimes);
116
117 AsymmetryAngle(i,1) = rad2deg(alpha0);
118 alpha0 = alpha0 + pi/18;
119 i = i + 1;
120 end;
121
122 % Cyklus pro získání CurrentDerivatives (di/dt v průchodech nulou), tomu
123 % odpovídající hodnota RMS (při průchodech nulou), zjištění RRRV při
124 % průchodech nulou a namáhání vypínací Qi v těchto průchodech nulou
125 alpha0 = 0;
126 i = 1;
127 while alpha0 <= pi/2 % Analýza pro jednotlivé úhly Alpha_0
128     t = 0:.0001:0.3; % Vektor času
129
130     CurrentDerivativesTurbo(i,:) = -Eit.*cos(w.*CurrentZeroTimesTurbo(i,:)+alpha0).*...
131         ((1./xd0t-1./xd1t).*exp(-CurrentZeroTimesTurbo(i,:)/Td1t)/Td1t + (1./xd1t-1./xd2t).*exp(-CurrentZeroTimesTurbo(
132             i,:)/Td2t))-...
133         Eit.*w.*sin(w.*CurrentZeroTimesTurbo(i,:)+alpha0).*((1./xd0t-1./xd1t).*exp(-CurrentZeroTimesTurbo(i,:)/Td1t)/
134             Td1t + (1./xd1t-1./xd2t).*exp(-CurrentZeroTimesTurbo(i,:)/Td2t)-1./xd0t)-...
135         Eit/2.*cos(alpha0).*(1./xd2t-1./xq2t).*exp(-CurrentZeroTimesTurbo(i,:)/Tat);
136
137     for j = 1:length(t)
138         for p = 1:length(CurrentZeroTimesTurbo(i,:))
139             if t(j) == CurrentZeroTimesTurbo(i,p)
140                 RMSClearedTurbo(i,p) = RMSCurrentsTurbo(i,j);
141             end;
142         end;
143     end;
144
145     RRRVTurbo = 0.0949.*(RMSClearedTurbo/1e3)-2.714;
146     BreakerStressingTurbo = abs(CurrentDerivativesTurbo.*RRRVTurbo);
147
148     for j = 1:length(CurrentZeroTimesTurbo)
149         if CurrentZeroTimesTurbo(i,j) == 0
150             CurrentZeroTimesTurbo(i,j) = NaN;
151             CurrentDerivativesTurbo(i,j) = NaN;
152             RMSClearedTurbo(i,j) = NaN;
153             RRRVTurbo(i,j) = NaN;
154             BreakerStressingTurbo(i,j) = NaN;
155         end;
156     end;

```

```

154     end;
155
156     CurrentDerivativesHydro(i,:) = -Eih.*cos(w.*CurrentZeroTimesHydro(i,:)+alpha0).*...
157     ((1/xd0h-1/xd1h).*exp(-CurrentZeroTimesHydro(i,:)/Td1h)/Td1h + (1/xd1h-1/xd2h).*exp(-CurrentZeroTimesHydro(
158     i,:)/Td2h))-...
159     Eih.*w.*sin(w.*CurrentZeroTimesHydro(i,:)+alpha0).*((1/xd0h-1/xd1h).*exp(-CurrentZeroTimesHydro(i,:)/Td1h)/
160     Td1h + (1/xd1h-1/xd2h).*exp(-CurrentZeroTimesHydro(i,:)/Td2h)-1/xd0h)-...
161     Eih/2.*cos(alpha0).*(1/xd2h-1/xq2h).*exp(-CurrentZeroTimesHydro(i,:)/Tah);
162
163     for j = 1:length(t)
164         for p = 1:length(CurrentZeroTimesHydro(i,:))
165             if t(j) == CurrentZeroTimesHydro(i,p)
166                 RMSClearedHydro(i,p) = RMSCurrentsHydro(i,j);
167             end;
168         end;
169     end;
170
171     RRRVHydro = 0.1213.*(RMSClearedHydro/1e3)-2.322;
172     BreakerStressingHydro = abs(CurrentDerivativesHydro.*RRRVHydro);
173
174     for j = 1:length(CurrentZeroTimesHydro)
175         if CurrentZeroTimesHydro(i,j) == 0
176             CurrentZeroTimesHydro(i,j) = NaN;
177             CurrentDerivativesHydro(i,j) = NaN;
178             RMSClearedHydro(i,j) = NaN;
179             RRRVHydro(i,j) = NaN;
180             BreakerStressingHydro(i,j) = NaN;
181         end;
182     end;
183
184     figure(1)
185     plot(t, FaultCurrentsTurbo(i,:), 'Color', [(255-20*i)/255, (255-20*i)/255, .7]);
186     grid on; xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
187     hold on;
188     plot(CurrentZeroTimesTurbo(i,:), zeros(length(CurrentZeroTimesTurbo)), 'ro');
189     plot(t, RMSCurrentsTurbo, 'Color', [20*i/255, 20*i/255, 20*i/255]);
190
191     alpha0 = alpha0 + pi/18;
192     i = i + 1;
193 end;
194 clear xd0t xd0h xd1t xd1h xd2t xd2h xq0t xq0h xq2t xq2h Tat Tah Tdit Td1h Td2t Td2h...
195 SteadyTurbo SteadyHydro TransTurbo TransHydro SubTranTurbo SubTranHydro Eit Eih Unt Unh...
196 DoubleTurbo DoubleHydro DCTurbo DCHydro f q alpha0;
197
198 % PART =====
199 figure('Color', 'w');
200 for i = 0:1:9
201     x = CurrentZeroTimesTurbo(i+1,:);
202     y = BreakerStressingTurbo(i+1,)/1e6;
203
204     xx = [x; x];
205     yy = [y; y];
206     zz = 10*i*ones(size(xx));
207     hs = surf(xx, zz, yy, yy, 'EdgeColor', 'interp', 'LineWidth', 2.5);
208     colormap('jet'); % assign the colormap
209     colorbar;
210     hold on; box on;
211 end; xlabel('t_{0} [s]'); ylabel('\alpha_{0} [deg]'); zlabel('Q_{i} [MVA\cdot\mu s^{-2}]'); %grid on;
212 xlim([0 0.3]);
213 set(gca, 'XDir', 'reverse');
214
215 figure('Color', 'w');
216 for i = 0:1:9
217     x = CurrentZeroTimesHydro(i+1,:);
218     y = BreakerStressingHydro(i+1,)/1e6;
219
220     xx = [x; x];
221     yy = [y; y];
222     zz = 10*i*ones(size(xx));
223     ht = surf(xx, zz, yy, yy, 'EdgeColor', 'interp', 'LineWidth', 2.5);
224     colormap('jet'); % assign the colormap
225     colorbar;
226     hold on; box on;
227 end; xlabel('t_{0} [s]'); ylabel('\alpha_{0} [deg]'); zlabel('Q_{i} [MVA\cdot\mu s^{-2}]'); %grid on;
228 xlim([0 0.3]);
229 set(gca, 'XDir', 'reverse');
230
231 clear x y xx yy zz hs ht;
232
233 % ===== CURVE FITTING DATA PREPARATION =====
234 Alpha0 = zeros(10,30); for i=1:1:30; Alpha0(:,i)=AsymmetryAngle; end;
235 BreakerStressingTurbo = BreakerStressingTurbo/1e6;
236 BreakerStressingHydro = BreakerStressingHydro/1e6;
237 % =====
238
239 for i = 0:1:9

```

```

238 figure('Color','w');
239 subplot(4,1,1);
240 plot(t,FaultCurrentsTurbo(i+1,:), 'r');
241 grid on; xlabel('t [s]'); ylabel('i [A]');
242 title(['Vysledky pro \alpha_{0}=', num2str(AsymmetryAngle(i+1)), ' stupnu']);
243 subplot(4,1,2);
244 plot(CurrentZeroTimesTurbo(i+1,:), abs(CurrentDerivativesTurbo(i+1,:)), 'gv'); xlabel('t_{0} [s]'); ylabel('di/dt'); grid on;
245 subplot(4,1,3);
246 plot(CurrentZeroTimesTurbo(i+1,:), abs(RRRVTurbo(i+1,:)), 'bo'); xlabel('t_{0} [s]'); ylabel('RRRV [kV/\mu s]'); grid on;
247 subplot(4,1,4);
248 plot(CurrentZeroTimesTurbo(i+1,:), abs(BreakerStressingTurbo(i+1,:)), 'bs-'); xlabel('t_{0} [s]'); ylabel('Q_{i}');
249 end;
250
251 figure('Color','w');
252 for i = 0:1:9
253     ColorBlue = [(255-20*i)/255, (255-20*i)/255, .75];
254     subplot(3,1,1);
255     h2 = plot(CurrentZeroTimesTurbo(i+1,:), abs(CurrentDerivativesTurbo(i+1,:))/1e6);
256     set(h2, 'Color', ColorBlue, 'Marker', 'x');
257     grid on; hold on; xlabel('t_{0} [s]'); ylabel('di/dt [A/\mu s]'); xlim([0 0.3]);
258
259     subplot(3,1,2);
260     h3 = plot(CurrentZeroTimesTurbo(i+1,:), abs(RRRVTurbo(i+1,:)));
261     set(h3, 'Color', ColorBlue, 'Marker', '<', 'MarkerSize', 4, 'MarkerFaceColor', ColorBlue);
262     xlabel('t_{0} [s]'); ylabel('RRRV [kV/\mu s]'); grid on; hold on; xlim([0 0.3]);
263
264     subplot(3,1,3);
265     h4 = plot(CurrentZeroTimesTurbo(i+1,:), abs(BreakerStressingTurbo(i+1,:))/1e6);
266     set(h4, 'Color', ColorBlue, 'Marker', 'o', 'MarkerSize', 2, 'MarkerFaceColor', ColorBlue);
267     xlabel('t_{0} [s]'); ylabel('Q_{i} [MVA\cdot\mu s^{-2}]'); grid on; xlim([0 0.3]); hold on;
268 end; legend('\alpha_{0}=0', '\alpha_{0}=10', '\alpha_{0}=20', '\alpha_{0}=30', ...
269 '\alpha_{0}=40', '\alpha_{0}=50', '\alpha_{0}=60', '\alpha_{0}=70', ...
270 '\alpha_{0}=80', '\alpha_{0}=90');
271
272 figure('Color','w');
273 for i = 0:1:9
274     ColorGreen = [(255-20*i)/255, .75, (255-20*i)/255];
275     subplot(3,1,1);
276     h2 = plot(CurrentZeroTimesHydro(i+1,:), abs(CurrentDerivativesHydro(i+1,:))/1e6);
277     set(h2, 'Color', ColorGreen, 'Marker', 'x');
278     grid on; hold on; xlabel('t_{0} [s]'); ylabel('di/dt [A/\mu s]'); xlim([0 0.3]);
279
280     subplot(3,1,2);
281     h3 = plot(CurrentZeroTimesHydro(i+1,:), abs(RRRVHydro(i+1,:)));
282     set(h3, 'Color', ColorGreen, 'Marker', '<', 'MarkerSize', 4, 'MarkerFaceColor', ColorGreen);
283     xlabel('t_{0} [s]'); ylabel('RRRV [kV/\mu s]'); grid on; hold on; xlim([0 0.3]);
284
285     subplot(3,1,3);
286     h4 = plot(CurrentZeroTimesHydro(i+1,:), abs(BreakerStressingHydro(i+1,:))/1e6);
287     set(h4, 'Color', ColorGreen, 'Marker', 'o', 'MarkerSize', 2, 'MarkerFaceColor', ColorGreen);
288     xlabel('t_{0} [s]'); ylabel('Q_{i} [MVA\cdot\mu s^{-2}]'); grid on; hold on; xlim([0 0.3]);
289     legend('\alpha_{0}=0', '\alpha_{0}=10', '\alpha_{0}=20', '\alpha_{0}=30', ...
290 '\alpha_{0}=40', '\alpha_{0}=50', '\alpha_{0}=60', '\alpha_{0}=70', ...
291 '\alpha_{0}=80', '\alpha_{0}=90');
292 end;
293 % =====

```

# C Skript pro analýzu impedanční matice soustavy

```
1 % Delayed Current Zero Assessment Based on X/R Ratios Using MATPOWER
2 % Vladimír Vajnar / University of West Bohemia
3 % -----
4 clc; clear all; tic;
5 % Loading the case dataset:
6 file = 'case14.m'; % ----- <<<----- <<<----- <<<----- Choose the file
7 DataSet = loadcase(file);
8 BranchData = DataSet.branch;
9 BusData = DataSet.bus;
10 GenData = DataSet.gen;
11 BasePow = DataSet.baseMVA * 1e6;
12 % Constructing the Y_BUS matrix:
13 Y_bus = makeYbus(ext2int(DataSet));
14 %Y_bus = ext2int(DataSet);
15 Z_bus = inv(Y_bus);
16
17 figure('Color', 'w');
18 subplot(1,2,1); spy(Y_bus); title('\bfSpy Y_{bus}');
19 subplot(1,2,2); spy(Z_bus); title('\bfSpy Z_{bus}');
20 % Transform sparse matrices to full -----
21 Y_full = full(Y_bus);
22 Z_full = full(inv(Y_bus));
23 Y_diag = diag(Y_full);
24 Z_diag = diag(Z_full);
25 % Draw the matrix complex elements in polar -----
26 figure('Color', 'w');
27 h = subplot(1,2,1); k = compass(Y_full); title('\bfCompass Y_{full}');
28 hold on; compass(Y_diag, 'r');
29 l = subplot(1,2,2); m = compass(Z_full); title('\bfCompass Z_{full}');
30 hold on; compass(Z_diag, 'r');
31 % Draw the X/R plane for diagonal elements -----
32 R_diag = real(Z_diag);
33 X_diag = imag(Z_diag);
34 XR_ratio = abs(X_diag./R_diag);
35 Tau = abs(X_diag./(314*R_diag));
36 Z_abs = abs(Z_diag);
37 Sigma = XR_ratio.*Z_abs;
38
39 figure('Color', 'w');
40 n = plot(abs(real(Z_full)), abs(imag(Z_full)), 'bo'); grid on;
41 hold on; plot(abs(R_diag), abs(X_diag), 'ro', 'MarkerFaceColor','r');
42 xlabel('R [p.u.]'); ylabel('X [p.u.]');
43
44 figure('Color', 'w');
45 for iter = 1:length(Z_abs);
46     plot(Z_abs(iter), XR_ratio(iter), 'bs', 'MarkerFaceColor','b');
47     hold on;
48     text(Z_abs(iter)+0.01, XR_ratio(iter)+0.4, num2str(iter));
49 end;
50 grid on;
51 xlabel('Z [p.u.]'); ylabel('X/R [-]');
52 % Format print of values on screen -----
53 fprintf('\n| |Z(i,i)|\tR(i,i)\tX(i,i)\tTau\t\tX/R rat.\tSigma\n');
54 fprintf('-----\n');
55 for i=1:length(diag(Z_full))
56     fprintf('%1d|\t5.4f\t5.4f\t5.4f\t5.4f\t4.2f\t4.2f\n', ...
57         i, Z_abs(i), R_diag(i), X_diag(i), Tau(i), XR_ratio(i), Sigma(i));
58 end;
59 fprintf('-----\n');
60 fprintf('-|\t[p.u.]\t[p.u.]\t[p.u.]\t[s]\t[-]\t[-]\n');
61 fprintf('-----\n');
62
63 % Power flow solution for the voltage levels in buses
64 ResultsPF = runpf(file);
65 BusVoltageMag = ResultsPF.bus(:,8);
66 BusVoltageAng = deg2rad(ResultsPF.bus(:,9));
67 Results = [Z_abs, R_diag, X_diag, Tau, XR_ratio, ...
68     BusVoltageMag, BusVoltageAng, acos(R_diag./Z_abs)];
69
70 % Drawing the waveforms
71 Time = 0:.0005:.5;
72 figure('Color', 'w', 'Position', [20 20 900 600]);
73
```

```
74 DCComps = zeros(length(diag(Z_full)), length(Time));
75 ACComps = zeros(length(diag(Z_full)), length(Time));
76 for iter=1:1:length(diag(Z_full))
77     DCComps(iter,:) = sqrt(2).*Results(iter,6)./Results(iter,1)*...
78         (sin(Results(iter,7)-Results(iter,8)).*exp(-Time./Results(iter,4)));
79     ACComps(iter,:) = sqrt(2).*Results(iter,6)./Results(iter,1)*...
80         (sin(314.*Time+Results(iter,7)-Results(iter,8)));
81 end;
82 Currents = DCComps + ACComps;
83 subplot(2,1,1);
84 plot(Time, Currents); grid on; title('Zkratove proudy dle uzlu \iti');
85 xlabel('Time [s]'); ylabel('i [pu]');
86 subplot(2,1,2);
87 plot(Time,DCComps); grid on; title('DC slozka zkratoveho proudu v uzlu \iti');
88 xlabel('Time [s]'); ylabel('i_{dc} [pu]');
89 legend(num2str([1:1:length(diag(Z_full))]''));
90 toc;
91 % the end-----
```