

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rázový proud při kruhování distribučních sítí

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Alois ŠAŇOVEC**
Osobní číslo: **E16B0058P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Rázový proud při kruhování distribučních sítí**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište důvody pro změny topologie distribuční soustavy a posuďte výhody a nevýhody provozu zkrhovaných sítí.
2. Uveďte podmínky nutné pro bezpečné kruhování sítí a možnosti, jak je zajistit.
3. Proveďte teoretický rozbor spínacího děje při kruhování (propojování) sítí či vývodů.
4. Proveďte pro zvolenou síť namodelování spínacího děje a výsledky porovnejte s teoretickým rozbohem.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Benešová, Z., Ledvinová, M. - Základy elektrických obvodů v příkladech, 3. dopl. vyd., ZČU v Plzni, 2015.

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018
Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení vzniku rázových a vyrovnávacích proudů při kruhování distribučních sítí na hladině 35 kV v závislosti na rozdílovém úhlu fázorů spínaných napětí. Práce obsahuje podmínky bezpečného kruhování a teoretický rozbor elektrické sítě. Dále výpočet a simulaci, v programu plects, kruhování reálné sítě, na úseku Koštov-Bukov nacházející se v ústeckém kraji. Kruhováno na rozvodně Bukov i mimo pomocí odpínače.

Klíčová slova

Distribuční soustava, rekonfigurace, odpínač, kruhování, vyrovnávací proud, rázový proud.

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on solving surge loop current in the circular arrangement of 35 kV distribution networks with respect of voltage phasor angle difference between switched substations. The work contains conditions of rounding and theoretical analysis of electrical network. Calculation and simulation, in PLECS program, loop closing of real network located between Koštov and Bukov electrical substation in Ústí Region.

Loop is closing at Bukov and outside the substation with switch disconnector.

Key words

Distribution system, network reconfiguration, switch disconnector, circulating current, shock current.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

.....
podpis

V Plzni dne 12.6.2019

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
1 SEZNÁMENÍ S ELEKTRICKOU SÍTÍ	12
1.1 ELEKTRICKÁ SÍŤ V ČR.....	12
1.2 TOPOLOGIE VEDENÍ.....	12
1.2.1 Důvody pro změnu topologie distribuční soustavy.....	13
1.2.2 Vodiče pro silnoproud.....	15
2 SEZNÁMENÍ SE SPÍNACÍMI ZAŘÍZENÍMI VN	16
HLAVNÍ PRVKY PŮSOBÍCÍ VE VN SÍŤÍCH:.....	17
3 KRUHOVÁNÍ SÍŤÍ	20
Paralelní provoz transformátorů.....	21
4 MATEMATICKÝ MODEL PRO VÝPOČET PARAMETRŮ VEDENÍ	23
4.1 REZISTANCE.....	24
4.2 INDUKTIVNÍ REAKTANCE.....	27
4.2.1 Indukčnost dvojvodičového vedení.....	27
4.2.2 Indukčnost trojvodičového vedení.....	29
4.3 KONDUKTANCE.....	31
4.4 KAPACITA VEDENÍ.....	31
4.5 SVOD.....	31
4.5.1 Koróna.....	31
5 TEORETICKÝ ROZBOR SPÍNACÍHO DĚJE	32
5.1 VYROVNÁVACÍ PROUDY.....	32
5.2 ODVOZENÍ VELIKOSTI ROZDÍLU FÁZE NA OBECNÉM PRVKU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY.....	33
5.3 PŘECHODOVÝ DĚJ.....	35
5.3.1 Obvod RL, stejnosměrný zdroj.....	36
5.3.2 Obvod RL, harmonický zdroj.....	37
6 PRAKTICKÉ ŘEŠENÍ	41
6.1 VÝPOČET PARAMETRŮ VEDENÍ.....	42
6.2 RUČNÍ VÝPOČET RÁZOVÝCH PROUDŮ.....	45
6.3 SEZNÁMENÍ S PROGRAMEM PLECS.....	45
6.3.1 Simulace rázového proudu při rozdílovém napětí v rozsahu rozdílu úhlů 0-15° za předpokladu stejné velikosti napětí zdroje U_{e1} i U_{e2}	46
6.4 SIMULACE S ROZDÍLEM ÚHLŮ NAPĚTÍ 1°.....	47
7 PRAKTICKÉ ŘEŠENÍ PRO JINOU DÉLKU VEDENÍ	50
8 VYPÍNÁNÍ V PRAXI	52
8.1 ODPÍNAČ DRIBO FLB 6400.....	53
8.1.1 Pro impedanci smyčky 27,43 Ω	53
8.1.2 Pro impedanci smyčky 38,76 Ω	53
8.2 ODPÍNAČ DRIBO FLB.....	54
8.2.1 Pro impedanci smyčky 27,43 Ω	54
8.2.2 Pro impedanci smyčky 38,76 Ω	54
9 ZÁVĚR	55

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ..... 57

Úvod

V současné době je na dodavatele, zajišťující dodávku a přenos elektrické energie, vyvíjen stále větší tlak, ze strany státu, na zvýšení spolehlivosti a kvality dodávky elektrické energie. Kvalita elektrické energie je popsána vyhláškou č.540/2005 sb. a dále normou ČSN EN 50 160.

Nepřetržitost dodávky elektrické energie je hodnocena na základě ukazatelů nepřetržitosti dodávky SAIDI (System Average Interruption Duration Index) a SAIFI (System Average Interruption Frequency Index). Podle těchto ukazatelů Energetický regulační úřad (ERÚ) pokutuje, nebo případně odměňuje dodavatele.

V důsledku jsou dodavatelé nuceni neustále modernizovat a rekonstruovat zařízení v celé síti a co nejvíce omezovat krátkodobé i dlouhodobé výpadky. Zároveň je snaha v případě poruchy, nebo plánované údržby co nejvíce zmenšit výpadkem zasaženou oblast. Dodavatelé tedy musí hledat řešení jak nepřetržitost dodávky zlepšit. Jedním z těchto řešení je **tzv. kruhování**. Při kruhování distribučních sítí 35 kV, **změnách topologie**, tečou vedením **vyrovnávací proudy**. Velikosti a příčině vzniku těchto proudů se věnuje předložená bakalářská práce.

Cílem této práce je predikce a vyzobrazení rázového proudu vzniklého v místě kruhování dvou paralelně jdoucích vedení. Veškeré hodnoty použité k výpočtům v této práci jsou skutečné hodnoty distribuční soustavy získané od zástupce společnosti **ČEZ Distribuce, a.s.**

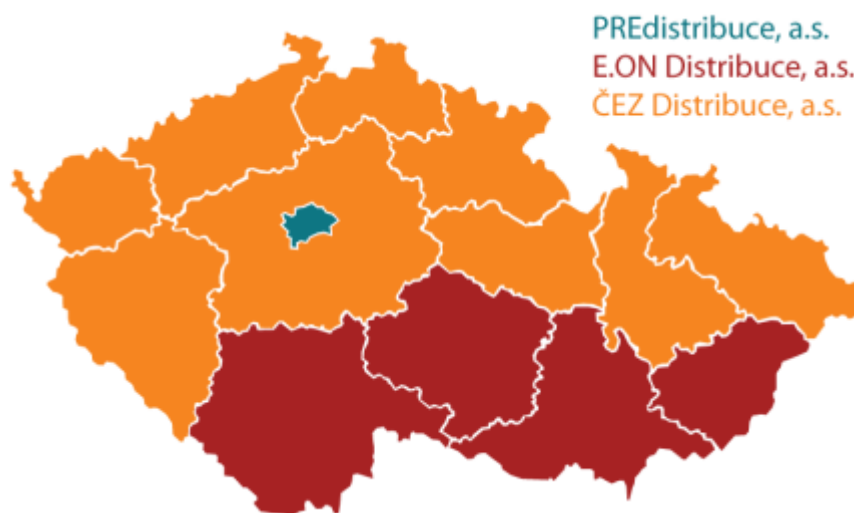
Seznam symbolů a zkratek

$L1, L2, L3$	Fázové vodiče napájecí soustavy
N	Střední pracovní vodič napájecí soustavy
$1f, 3f$	Počet fází
NN	Nízké napětí
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvláště vysoké napětí
I_{VYR}	Vyrovnávací proud
U	Elektrické napětí (V)
l	vzdálenost (m)
Z	Impedance (Ω)
AC	Střídavý proud
DC	Stejnoseměrný proud

1 Seznámení s elektrickou sítí

1.1 Elektrická síť v ČR

Elektrická síť v ČR se skládá ze dvou hlavních odvětví. Soustava přenosová a distribuční. Přenosovou soustavu tvoří linky napěťových hladin VVN 220 kV a ZVN 400 kV, kterou v současnosti provozuje společnost ČEPS a.s., tyto linky slouží jako “páteřní” rozvod elektrické energie po celé ČR. Soustava distribuční plní funkci rozvodu elektrické energie od přenosové soustavy až ke koncovému odběrateli, jde tedy o sítě převážně VVN (rozvodny 110 kV) a o několik VN i NN napěťových hladin (35, 22, 10, 6, 3, 0,4 kV). Lokálních distributorů je v současnosti v ČR hned několik desítek. Hlavní distributoři jsou tři velké společnosti.



Obr. 1.1 Rozdělení ČR z distribučního hlediska [1]

1.2 Topologie vedení

V případě poruchy je třeba zamezit jejímu dalšímu šíření, tedy poškozování vedení vlivem elektrodynamických a tepelných sil a zároveň zachovat dodávku elektrické energie do postižených oblastí. V praxi se distribuční síť provozuje ve třech různých zapojeních:

- Kruhová síť
- Paprsková síť
- Mřížková síť

Vedení VN je převážně napájeno pomocí transformace elektrické energie z nadřazené soustavy VVN 110kV, která je napájena z nadřazené přenosové soustavy 400kV.

VVN sítě 110kV jsou nejčastěji provozovány, jelikož je přímo na tuto síť napojeno

málo odběratelů, jako kruhové a přímo uzemněné. Rozpojovací místa jsou volena tak, aby se způsob provozu blížil paralelnímu chodu. V současnosti se řídí pravidlem N-1.

V poslední době se na napájení distribuční sítě podílí také malé domácí zdroje, jako třeba solární, nebo větrné elektrárny. Celkově je síť VN velice složitá a její zapojení (nikoliv provoz) je nejčastěji kruhové, nebo mřížkové, vždy nepřímo uzemněné.

1.2.1 Důvody pro změnu topologie distribuční soustavy

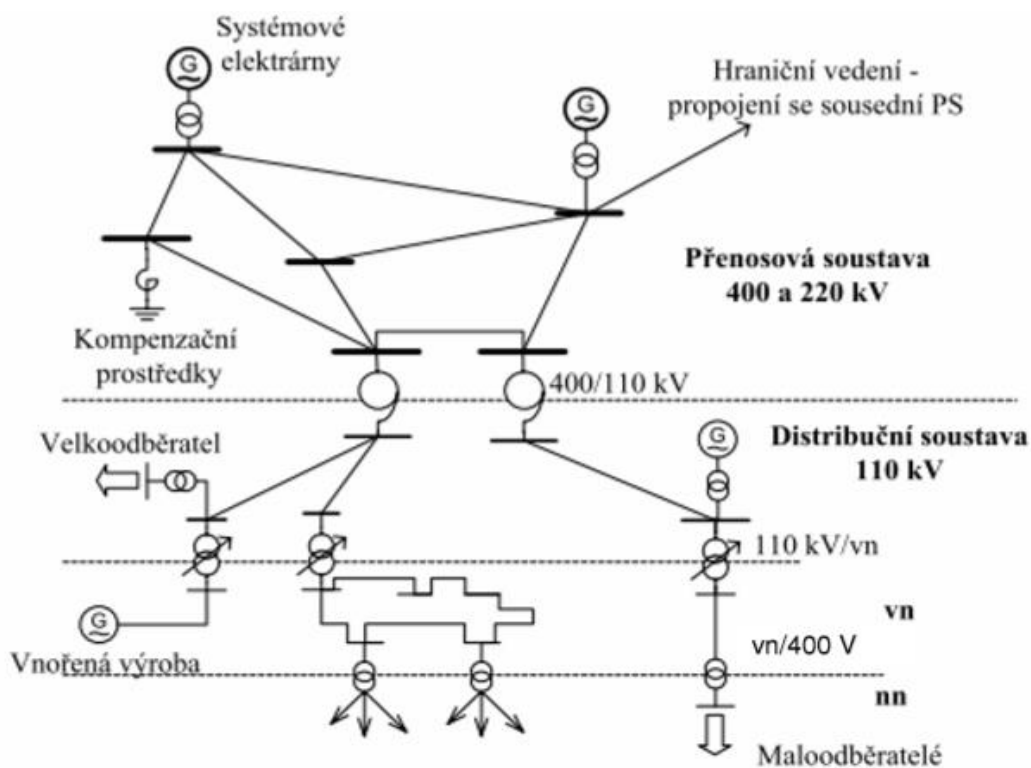
- Optimalizace sítě
- Rekonfigurace
- Ztráty

Kruhování je dnes nedílnou součástí provozu distribuční sítě.

V rámci zjednodušení, především chránění vedení, je provozování pomocí spínacích zařízení omezeno pouze na paprskové nebo stromečkové sítě.

V současné době je v regionu sever provoz VN distribuční sítě jako mřížkové ve fázi zvažování. Vzhledem k rozloze a složitosti i takto zjednodušené sítě může dojít k tzv. zemnímu spojení.

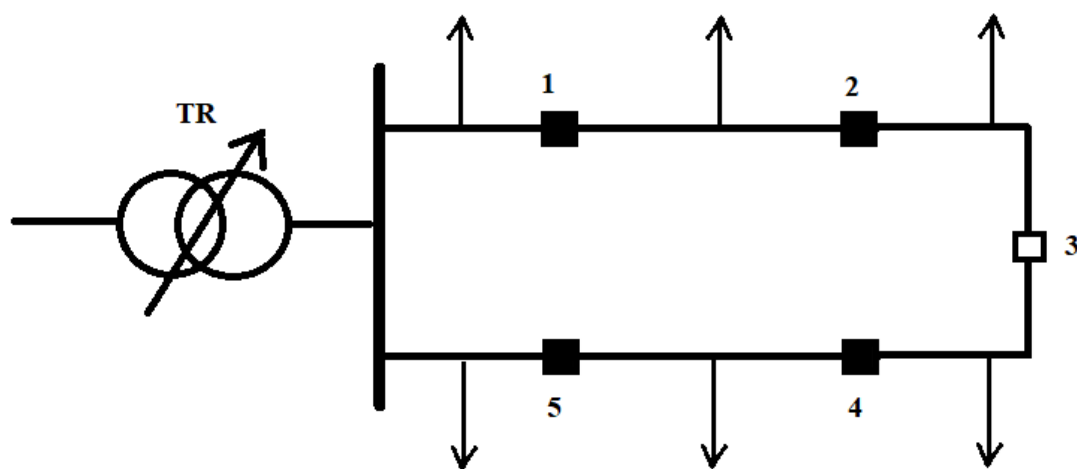
Distribuční soustava je postavena jako mřížová síť, ale provozována jako paprsková.



Obr. 1.2 Reálné rozvržení nadzemní sítě VN [EE2]

Kruhová síť: Je síť zapojená do kruhu. Používá se v místech s potřebou vyšší spolehlivosti dodávky, například ve větších městech. Její výhodou je, že se do každého napájeného místa dá přivést energie z více stran. Je možné i napájení z více stran. V případě zkruhované sítě je k místu odběru přivedeno vedení z více stran, což v podstatě znamená dvojnásobný průřez drátu, z toho vyplývá odlehčení sítě a snížení ztrát.

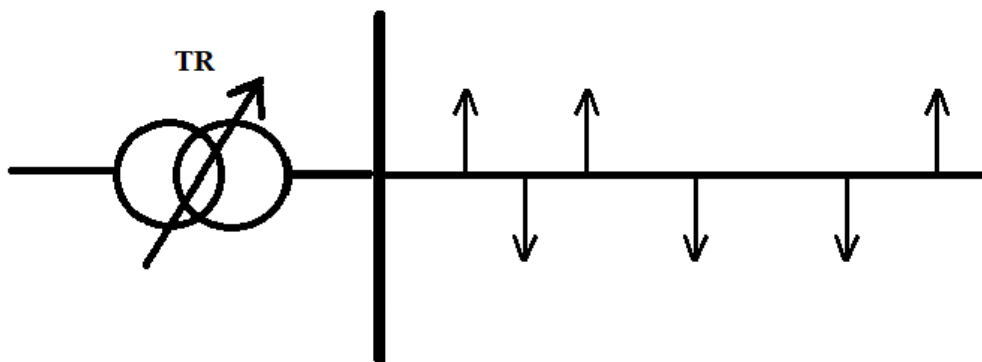
Pokud se bavíme o chránění kruhových sítí, je třeba uvažovat selektivitu chránění pomocí distančních a srovnávacích ochran. Potom je možné, bez problému určit místo poruchy a zajistit odpojení pouze postižené části vedení.



Obr. 1.3 Kruhová síť napájena z jedné strany

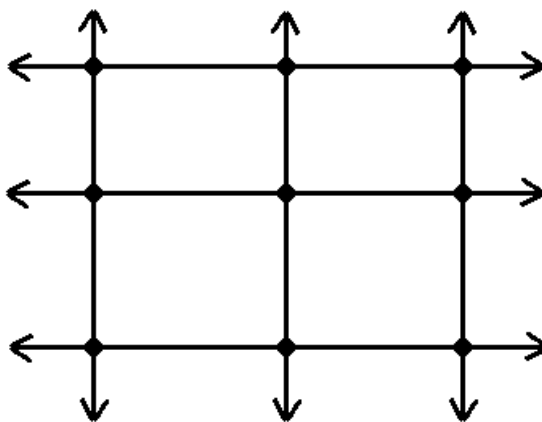
Na obrázku můžeme vidět 2 vývody VN napájené z jedné strany, z rozvodny VVN/VN. Jsou provozovány jako paprskové- spínací prvek č. 3 je rozpojený. Toto vedení je potom rozděleno do několika úseků pomocí spínacích prvků 1-5. Pokud by došlo k poruše, nebo byla potřeba oprava například mezi vývody 1 a 2, Jednoduše jsou potom tyto prvky rozepnuty a následným sepnutím prvku č. 3 je zajištěna dodávka elektrické energie do místa kam by se normálně nedostala. Tím se omezí počet míst zasažených plánovanou odstávkou, nebo poruchou na minimum, zvýší se tím tedy spolehlivost dodávky elektrické energie. Takovéto spínání v distribuční soustavě však způsobuje vznik vyrovnávacích proudů, které mohou ohrozit všechny prvky v této soustavě. Příčinám vzniku a chování vyrovnávacích proudů se věnuje kapitola 5.

Paprsková síť: Jedná se o nejjednodušší a nejméně spolehlivou síť protože každý odběr je napájen pouze z jedné příslušné větve, proto se zřizují tam, kde nejsou zvýšené nároky na spolehlivost dodávky elektrické energie. Pro chránění stačí pouze nesměrová nadproudová ochrana (směrová v případě oboustranného napájení).



Obr. 1.4 Paprsková síť napájena z jedné strany

Mřížková síť: Jedná se, z hlediska ochrany a provozu, o nejsložitější a nejdražší síť, kterou tvoří několik propojených uzlů často napájených z několika stran. Představuje maximální jistotu dodávky elektrické energie.



Obr. 1.5 Mřížková síť

1.2.2 Vodiče pro silnoproud

Vodič je materiál, který vede elektrický proud. Může být buď holý, nebo izolovaný, v tomto případě izolace společně s vodičem tvoří tzv. žílu. Jako materiál pro vodiče se nejčastěji používá měď (Cu), nebo hliník (Al).

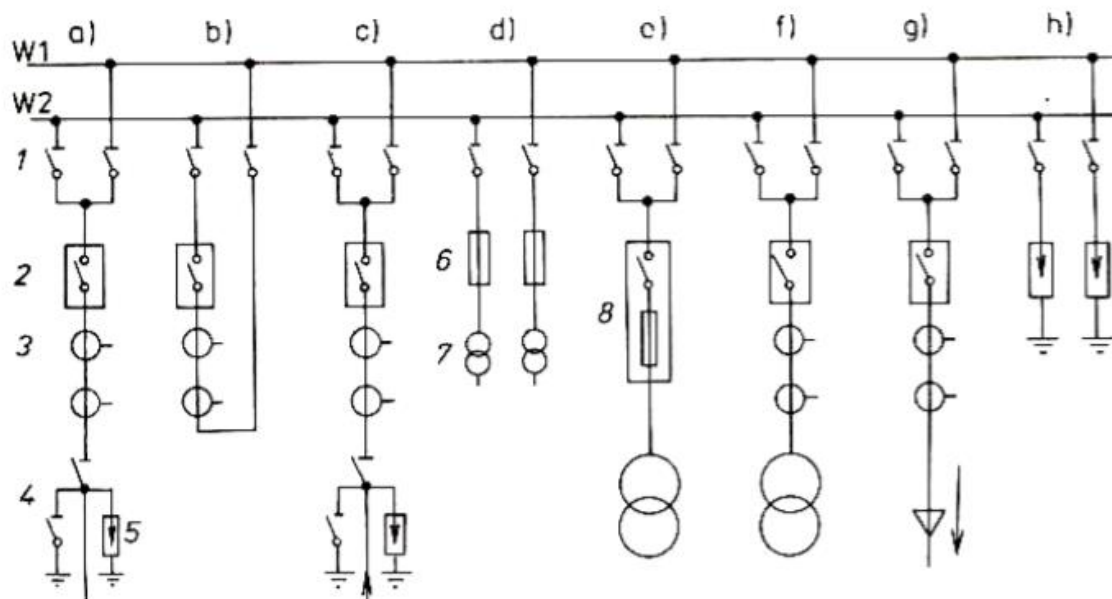
Několik vodičů spojených dohromady potom tvoří tzv. kabel. Ten může mít navíc ještě další přídavné vrstvy např. pancíř, PVC, nebo stínění.

2 Seznámení se spínacími zařízeními VN

Spínání v distribuční soustavě slouží, kromě změny topologie sítě, také k celkovému řízení a chránění této soustavy a její obsluhy. Pomocí spínacích prvků lze odpojit poškozenou oblast za účelem zamezení šíření poruchy, nebo případné opravy. Pro případ spínání celých vývodů přímo v rozvodně, slouží vývodové vypínače 110/35 kV.

Vedení v současnosti obsahuje spoustu mechanických, či elektronických spínacích zařízení nejen ke spínání a rozpínání určitých částí vedení, ale také k jejich ochraně a řízení.

Spínací a řídicí zařízení je obecný název zahrnující spínací přístroje a jejich kombinace s přidruženým ovládacím, měřícím, ochranným a regulačním zařízením. Také soubory těchto přístrojů a zařízení, s příslušným propojením, příslušenstvím, kryty a nosnými konstrukcemi. [4]



Obr. 2.1 Příklad odboček VN [11]

- | | | |
|------|--------------------------------------|----------------------------|
| Kde: | a) odbočka venkovního vývodu | 1) přípojnicové odpojovače |
| | b) odbočka přímého spínače přípojnic | 2) vypínače |
| | c) odbočka venkovního přívodu | 3) přístrojové TR proudu |
| | d) odbočka měření | 4) vývodové odpojovače |
| | e),f) odbočka transformátorů | 5) bleskojistky |
| | g) odbočka kabelového vývodu | 6) pojistky |
| | h) odbočka bleskojistek | 7) přístrojové TR napětí |
| | | 8) odpínače s pojistkami |

Druhy spínání:

- Vypínání
- Zapínání

Hlavní prvky působící ve VN sítích:

V následující kapitole bylo čerpáno z [2]. Obrázky a tabulky byly vytvořeny za spolupráce s ČEZ distribuce a.s.

- **Vypínač** – Mají schopnost spínat všechny druhy zátěže, naprázdno i při zatížení, a všechny typy poruch, včetně zkratů.

Rozdělení vypínačů

1. Podle velikosti napětí- (např. 25, 123, 420 kV)
2. Podle jmenovitého proudu- Velikost proudu který musí vypínač trvale vydržet. (od 200 do 800 A)
3. Podle jmenovitého vypínacího proudu- Největší zkratový proud, který vypínač vypne za předepsaných podmínek.

Zhášení oblouku

Od způsobu zhášení oblouku je odvozen název vypínače.

1. V magnetickém poli- Magnetické. (pouze pro stejnosměrné obvody)
2. Ve vakuu- Vakuové. (pouze VN)
3. Ve vzduchu- Tlakovzdušné.
4. V oleji- Máloolejové vypínače. (v současné době postupný útlum tohoto typu)
5. V plynu SF₆- Tlakoplynové. (fluorid sírový)

V současné době je snaha o unifikaci a sjednocení vypínačů, přičemž nejvyužívanější jsou právě tlakoplynové vypínače. Fluorid sírový SF₆ je bezbarvý, bez zápachu, nedýchatelný, nejedovatý a nehořlavý. Proti vzduchu má vyšší elektrickou pevnost, tj. při tlaku 0,25 Mpa 13 kV/mm. Za normálních podmínek je 5x těžší než vzduch a do 150 °C je chemicky stálý. Při hoření oblouku dochází k vyššímu odvodu tepla do okolí, oblouk tedy hoří při nízké teplotě, přibližně ¼ teploty oblouku ve vzduchu, s malým obloukovým napětím a úzkým obloukovým kanálem. Plyn se aktivně podílí na uhašení oblouku. Při průchodu nulou se rychle snižuje vodivost, elektrická pevnost mezi kontakty proto rychle narůstá. Po průchodu nulou je malá pravděpodobnost opětovného zapálení oblouku.

VD4		Vypínač 22kV		Vypínač 35kV	
UR	Napětí	24	kV	40,5	kV
UP	Výdržné napětí při atm. impulsu	125	kV	185	kV
UD	Jmenovité výdržné AC napětí	50	kV	85	kV
f	Kmitočet	50/60	Hz	50/60	Hz
Ir	Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	20	kA	630	kA
tk	Jmenovitá doba zkratu	3	s	3	s
Isc	Vypínací zkratový proud	20	kA	25	kA

Tab. 2.1 Vypínací schopnost vypínače VD4

- **Úsekový odpínač** – tzv. úsečník je jeden z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších prvků vedení VN. Je schopen spínat pouze provozní proudy a disponuje zhášecí komorou disponující opalovacími růžky, je zde také možnost osazení olejovou zhášecí komorou. Ve vypnuté poloze splňuje izolační požadavek na odpojovací vzdálenosti stanovené pro odpojovač.

Používají se pro venkovní vedení vysokého napětí k připojení nebo odpojení vedení, případně zapínání, nebo vypínání odboček, nebo přípojek k trafostanicím. Montují se na sloupy dřevěné, ocelové nebo betonové.[3]

Princip činnosti spočívá v oddalování pohyblivého kontaktu od nepohyblivého. Vzniklý oblouk se vlivem prodloužení vodivé cesty a vlastních elektrodynamických sil začne ohýbat směrem nahoru. To má za následek zvýšení obloukového napětí a zhoršení stability hoření a následné zhasnutí oblouku.

Jeho ovládání může být ruční, nebo dálkové.

Odpínače 25/38,5 kV

Význam značek: **DRIBO** výrobce
Flb typové označení řady odpínačů s růžky
6400 typové označení pro svislé provedení

DRIBO Flb 6400		
Název položky		Parametr
Jmenovité napětí	U_r	25/38,5
Jmenovitý zkratový zapínací proud	I_{ma} [kA]	3,15
Jm. vyp. proud ($\cos \varphi=0,7$ induktivní)	I_{vyp} [A]	17
Jm. vyp. proud obvodu uzavřené smyčky	I_{loop} [A]	17

Tab. 2.2 Vypínací schopnost odpínače DRIBO FLB 6400 [14]

DRIBO výrobce
Flb typové označení řady odpínačů s rúžky

DRIBO Flb		
Název položky		Parametr
Jmenovité napětí	U_r	25/38,5
Jmenovitý zkratový zapínací proud	I_{ma} [kA]	16
Jm. vyp. proud ($\cos \varphi=0,7$ induktivní)	I_{vyp} [A]	31,5
Jm. vyp. proud obvodu uzavřené smyčky	I_{loop} [A]	31,5

Tab. 2.3 Vypínací schopnost odpínače DRIBO FLB [14]

DRIBO výrobce
Fle typové označení řady odpínačů s rúžky
GB typové označení řady odpínačů pod vedení
R odbočení vedení z rámu odpínače

DRIBO Fle GB R		
Název položky		Parametr
Jmenovité napětí	U_r	25/38,5
Jmenovitý zkratový zapínací proud	I_{ma} [kA]	10
Jm. vyp. proud ($\cos \varphi=0,7$ induktivní)	I_{vyp} [A]	35
Jm. vyp. proud obvodu uzavřené smyčky	I_{loop} [A]	20

Tab. 2.4 Vypínací schopnost odpínače DRIBO Fle GB R [14]

IVEK výrobce
VLK typové označení řady odpínačů s rúžky

IVEP VLK		
Název položky		Parametr
Jmenovité napětí	U_r	25/38,5
Jmenovitý zkratový zapínací proud	I_{ma} [kA]	6,3
Jm. vyp. proud ($\cos \varphi=0,7$ induktivní)	I_{vyp} [A]	36
Jm. vyp. proud obvodu uzavřené smyčky	I_{loop} [A]	30

Tab. 2.5 Vypínací schopnost odpínače IVEP VLK [14]

- **Úsekový odpojovač** – na rozdíl od odpínače má odpojovač viditelné rozpojení vodivé cesty a je schopen spínat pouze vedení bez zatížení, jeho použití při spínání je tedy omezené. Jeho primární účel je ochrana osob pracujících na zařízeních za odpojovačem. Často je vybaven ocelovým uzemňovacím nožem, který bezpečně zabráňuje přenesení napětí z živé části na část, na které se pracuje. Může být doplněn pojistkami. Jeho ovládání může být ruční, nebo dálkové.
- **Úsekový vypínač** – tzv. recloser je v současnosti jeden z nejmodernějších spínacích prvků ve VN soustavě. Jedná se o vypínač vybavený funkcí OZ (opětovné zapnutí), který je zcela nezávisle na obsluze schopen vyhodnotit místo, povahu a závažnost poruchy a ve spolupráci s dalšími ochrannými prvky vedení je schopen poruchu odstranit, nebo odpojit. Následně předá informaci o poruše dispečerovi. To vše za velmi krátký časový úsek.

3 Kruhování sítí

V této kapitole se zabýváme spínáním různých částí distribuční soustavy na hladině VN. Jedná se o spínání sítí stejného kmitočtu. Při spínání musí být dodrženy stejné parametry:

- Sled fází
- Úhel a velikost napětí (fázory)
- Jmenovité napětí
- Frekvence

Pokud tyto parametry nebudou na obou stranách sítě, v ideálním stavu, stejné, vzniká tzv. vyrovnávací proud (popsaný v kapitole 5).

Zjištění parametrů

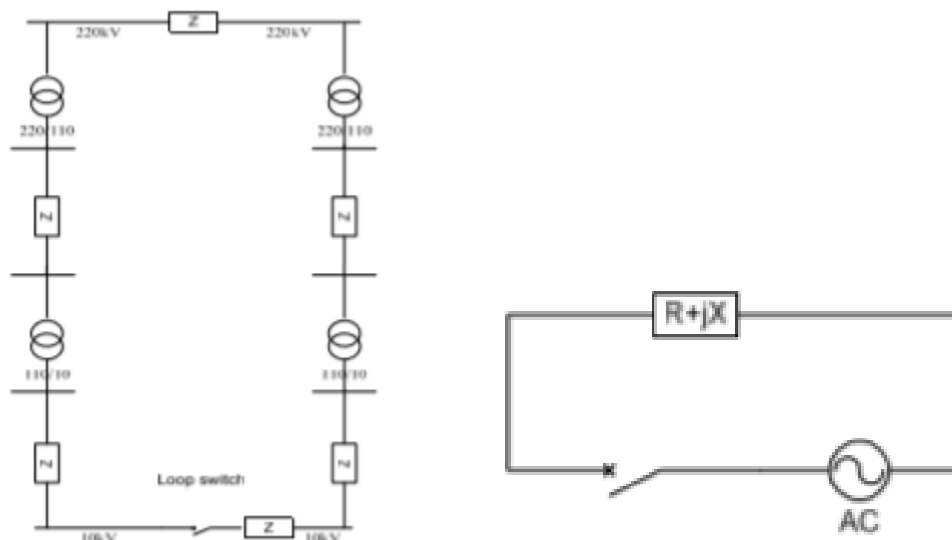
Zajištění shody parametrů jako je sled fází a frekvence, není v distribuční soustavě velký problém. Stálou frekvenci zajišťuje nadřazená přenosová sousta (ČEPS a.s.) a sled fází je v distribuční soustavě standartou.

Pouze dodržet velikost fázoru napětí v místě spínání je velice problematické. Zde nachází uplatnění systém synchronního měření fázorů zkráceně WAMS (Wide Area Monitoring System)

Existují 2 způsoby kruhování distribuční sítě, kruhování na stejné přípojnici a kruhování přes nadřazenou síť.

Kruhování na stejné přípojnici: Je jednodušší způsob, při kterém málokdy, při manipulaci, dochází k přerušení dodávky elektrické energie u odběratele.

Kruhování přes nadřazenou síť: Vzhledem k vysokému požadavku na bezvýpadkový chod u zákazníka, je v případě poruchy na samotném transformátoru, nebo nedostatečném dodávaném výkonu transformátorem, možnost zkrhovat síť přes nadřazenou linku 110 kV. V tomto případě dojde, na krátký okamžik, k paralelnímu chodu dvou transformátorů, navíc je nutné očekávat významné rozdíly úhlů mezi vývody VN. Vedením tedy potečou vyrovnávací proudy, které mohou způsobit výpadek linky VN, v důsledku zapůsobení nadproudové ochrany. Také se, vlivem vyrovnávacích proudů, zhorší možnost manipulace s rúžkovými odpínači, je nutno respektovat vypínací schopnost těchto odpínačů.



Obr. 3.1 Zjednodušený fyzikální model kruhované sítě [10]

Paralelní provoz transformátorů.

- Stejný sled fází
- Stejně hodinové číslo
- Stejná jmenovitá napětí
- Stejný převodový poměr
- Stejně napětí nakrátko
- Stejný sled fází

Stejně hodinové číslo: Za určitých podmínek lze dosáhnout spojení dvou transformátorů s rozdílným hodinovým číslem a to pokud jsou svorky sekundární, nebo primární strany prohozeny tak, že se dosáhne stejného natočení vektorů.

Stejná jmenovitá napětí: Jmenovité napětí se nesmí v každém bodě vedení lišit o více než 5%.

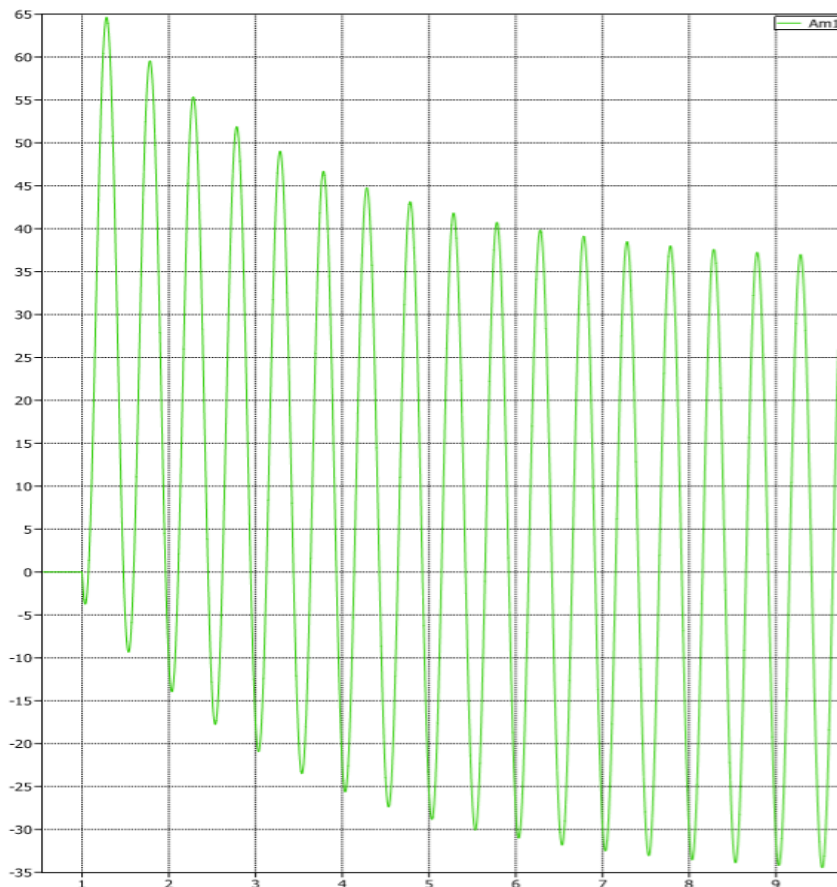
Stejný převodový poměr: Pokud by se převodový poměr lišil o více než pár desetin procenta, tekla by přes oba transformátory trvalý vyrovnávací proud omezený pouze impedancí transformátoru. Jeho velikost by byla přibližně: $I_v = 100 \cdot b (u_{k1} + u_{k2})$, kde I_v je procentní vyrovnávací proud oproti jmenovitému proudu, b je procentní rozdíl v převodových poměrech a u_k procentní napětí nakrátko.

Stejně napětí nakrátko: Napětí nakrátko se nesmí lišit o více než 10%, různé napětí nakrátko způsobuje nerovnoměrné zatížení transformátorů. Výkon se rozdělí nepřímo úměrně poměru napětí nakrátko.

$$S_1 : S_2 = \frac{S_{n1}}{u_{k1}} : \frac{S_{n2}}{u_{k2}},$$

kde S_1 znázorňuje skutečný výkon a S_{n1} je jmenovitý výkon, u_{k1} napětí nakrátko transformátoru č.1.

Poměr jmenovitých výkonů paralelně spolupracujících transformátorů menší než 3:2. Předpisy doporučují paralelně spojovat transformátory s poměrem výkonu do 1:2. To by mělo být zohledněno při volbě transformátoru. Při větším poměru už je přínos menšího stroje tak malý, že paralelní chod ztrácí smysl. Krátkodobě se využívá paralelní chod transformátorů s větším poměrem výkonů pouze při přepojování zátěže z většího stroje na menší a naopak bez přerušení dodávky. V tomto případě nemusí být ani splněná předepsaná tolerance pro napětí nakrátko. [5]



Obr. 3.2 Teoretický průběh rázového proudu s rozdílnými fázory napětí v místě kruhování

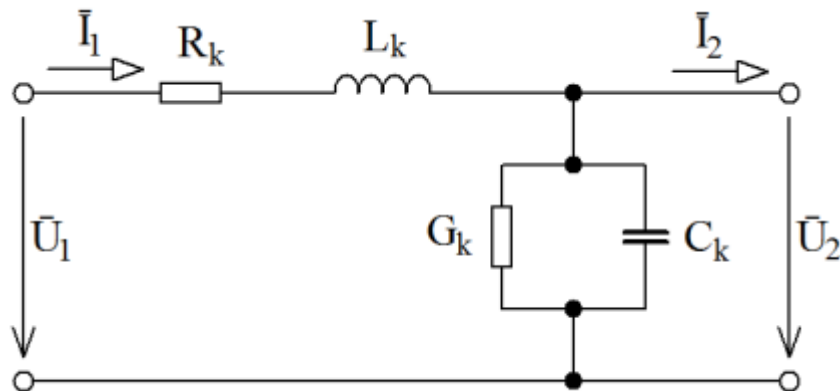
4 Matematický model pro výpočet parametrů vedení

Vzhledem k rozsahu bakalářské práce budou uvažovány pouze podélné složky impedance vedení, příčné složky tedy budou uvedeny pouze orientačně.

Vedení venkovní i vnitřní modelujeme pomocí dvojbranu tvaru π článku.

- **Podélná impedance** je tvořena **rezistancí** a **induktivní reaktancí**.
- **Příčná admittance** je tvořena **kapacitní susceptancí** a **svodem**, který je obvykle ve výpočtech zanedbán vzhledem ke své nevýznamné velikosti.

Jednotlivé pasivní parametry závisí na průřezu vodiče jedné fáze, na vzdálenosti mezi vodiči jednotlivých fází, vzdálenosti mezi zemí a vodiči, vodiči a zemními lany, na konstrukci kabelu a druhu izolace a u venkovních vedení na tvaru stožáru. [8]



Obr. 4.1 Náhradní schéma venkovního vedení [6]

Podélná impedance na jednotku délky:

$$Z_k = R_k + jX_k = R_k + j\omega L_k \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (4.1)$$

Příčná admittance na jednotku délky:

$$y_k = G_k + jB_k = G_k + j\omega C_k \left[\frac{S}{\text{km}} \right] \quad (4.2)$$

4.1 Rezistance

Jedná se o reálnou složku podélné impedance. Resistance způsobuje činné ztráty, následkem kterých dochází k úbytku napětí na vedení. Závisí na rezistivitě materiálu, průřezu a délce vodiče.

Vztah pro rezistanci v DC obvodech je:

$$R_{DC} = \frac{\rho \cdot l}{S} [\Omega] \quad (4.3)$$

Kde: ρ - udává se při 20 °C [$\mu\Omega\text{m}$]

Al: 0,02941 $\mu\Omega\text{m}$

Cu: 0,01786 $\mu\Omega\text{m}$

Fe: 0,130 $\mu\Omega\text{m}$

l- délka vodiče [m]

S- průřez vodiče [mm^2]

Uvedený vztah je při většině výpočtů dostatečně přesný i pro střídavé obvody.

V případě, že výsledky závisí na přesnosti rezistance, pak je nutné rozšířit vzorec o přídavné vlivy, které se vyjádří násobnými koeficienty.

$$R = R_{DC} \cdot k_g \cdot k_s \cdot k_e \cdot k_p \quad (4.4)$$

Kde: k_g - respektuje změnu rezistance vlivem teploty

k_s - respektuje skin efekt

k_e - respektuje kroucení vodičů v laně

k_p - respektuje průhyb zavěšeného vodiče

k_g - respektuje změnu rezistance vlivem teploty

$$k_g = 1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_{20}) + \beta(\vartheta - \vartheta_{20})^2 \quad (4.5)$$

Materiál	α	β
-	K^{-1}	K^{-1}
Cu	0,00393	$0,45 \cdot 10^{-6}$
Al	0,004	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Fe	0,0045	$9 \cdot 10^{-6}$

Tab. 4.1 Teplotní součinitele odporu [8]

Při uvažování teploty např. 40 °C je $k_g = 1,08$

k_s - respektuje skinefekt

Jedná se o nerovnoměrné rozložení střídavého proudu po průřezu vodiče. Při průchodu proudu vodičem se zvětšuje proudová hustota směrem k povrchu vodiče. Důsledkem tohoto jevu je zvětšení rezistence oproti stejnosměrnému proudu. Součinitel k_s je dán poměrem rezistance při průchodu AC proudu a rezistance při průchodu DC proudu. Vztah pro jeho výpočet vychází z rozvoje besselových funkcí do řad.

Zavedeme-li pomocný vztah m :

$$m = \sqrt{\frac{u \cdot f \cdot 10^{-3}}{2R_{DC}}} [-] \quad (4.6)$$

kde μ - je permeabilita,

f - je frekvence,

R_{DC} - je stejnosměrná rezistance na jednotku délky daná vztahem.

$$R_{DC} = \rho_0 / S [\Omega] \quad (4.7)$$

Pro nemagnetické materiály platí:

$$m \leq 1,2 : k_s = 1 + \frac{m^4}{12} - \frac{m^8}{180} + \frac{m^{12}}{2442} \quad (4.8)$$

$$m > 1,2 : k_s = 0,25 + 0,708m + \frac{0,06625}{m} \quad (4.9)$$

Pro magnetické materiály platí:

$$m \leq 1,2 : k_s = 1 + 0,85m^2 - 0,3m^3 + 0,05m^4 \quad (4.10)$$

$$m \leq 1,2 : m > 1,2 : k_s = 1,4m \quad (4.11)$$

Pro vodič o průřezu 240 mm^2 je $k_s = 1,005$.

k_e - respektuje kroucení vodičů v laně

$$k_e = \frac{\sqrt{a_n^2 + (D_n - d)^2 \cdot \pi^2}}{a_n} [-] \quad (4.12)$$

Kde a_n - je výška závitu šroubovice,
 D_n - je průměr lana,
 d - je průměr jednoho vodiče.

Pro přesné určení k_e je potřeba znát konkrétní lano. **Přibližná hodnota je $k_e=1,02$**

k_p - respektuje průhyb zavěšeného vodiče

$$k_p = \frac{l_p}{a} [-] \quad (4.13)$$

Kde l_p = délka prohnutého vodiče,

$$l_p = 2c \cdot \sinh \frac{a}{2c} \quad (4.14)$$

c = parametr řetězovky, který závisí na horizontálním tahu, měrné tíze vodiče a přetížení,
 a = rozpětí stožárů.

Při uvažování rozpětí stožárů **100m je $k_p= 1,0004$, při 200m $k_p= 1,0016$.**

Z uvedených koeficientů nejvíce ovlivňuje rezistenci teplota vodiče. [8]

4.2 Induktivní reaktance

Následující kapitola je vzata z [7].

Abychom porozuměli pojmu induktivní reaktance, musíme si napřed vysvětlit, co je to indukčnost. Indukčnost vyjadřuje schopnost elektricky vodivého tělesa protékaného proudem, vytvářet magnetické pole. U více vodičů umístěných blízko u sebe, dochází k vzájemnému ovlivňování. Časově proměnné magnetické pole způsobené proudem procházejícím vodičem ovlivňuje napětí nejen na tomto vodiči, ale i na vodičích od něj vzdálených. Vzniká na nich úbytek napětí. Pokud nejsou aktivní parametry nebo uložení vodičů souměrné, je třeba počítat pasivní parametry každé fáze zvlášť. Udává se v [H/km]. Od indukčnosti je odvozený parametr induktivní reaktance, která **je imaginární složkou podélné impedance vedení**.

Indukčnost dlouhého vedení se zmenšuje tzv. transponací vedení. Jedná se o postupné prostrídání fází vedení tak, aby se vzájemné působení polí vykompenzovalo.

4.2.1 Indukčnost dvojvodičového vedení

Indukčnost smyčky vychází ze statické definice indukčnosti.

Podle [7] platí:

$$L_p = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{a}{r} \left[H \cdot m^{-1}; Wb, A, H \cdot m^{-1}, m, m \right] \quad (4.15)$$

Kde Φ - je magnetický indukční tok,
 I - je proud,
 a - je osová vzdálenost mezi vodiči,
 r - je poloměr vodiče.

U elektrických vedení se uvažuje indukčnost na jeden vodič:

$$L_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{a}{r} \left[H/m \right] \quad (4.16)$$

Abychom dosáhli výrazu pro indukčnost vztaženou na jeden vodič, musíme dosadit hodnotu $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ a převést přirozený logaritmus na dekadický.

$$L_e = 0,46 \log \frac{a}{r} \left[mH \cdot km^{-1}; m, m \right] \quad (4.17)$$

Energetická definice indukčnosti říká, že indukčnost od magnetického toku uvnitř vodiče, která je nezávislá na poloměru i vzdálenosti vodičů, je dána vztahem:

$$L_i = \frac{\mu_0}{8\pi} \left[H \cdot m^{-1}; H \cdot m^{-1} \right] \quad (4.18)$$

Po dosazení za μ_0 a vyjádření indukčnosti v [mH/m], dostaneme hodnotu vnitřní indukčnosti na jeden vodič $L_i=0,05$ [mH/km].

Po spojení vnitřní a vnější indukčnosti dostaneme vztah pro celkovou indukčnost na jeden vodič. Je třeba respektovat, že jde o magnetický materiál, dosadíme tedy μ_r .

$$L = 0,46 \log \frac{a}{r} + 0,05 \mu_r \left[mH \cdot km^{-1}; m, m \right] \quad (4.19)$$

Jelikož se u vodičů projevuje také skin efekt, je třeba doplnit do vztahu korekční člen α .

$$L = 0,46 \log \frac{a}{r} + 0,05 \alpha \mu_r \left[mH \cdot km^{-1} \right] \quad (4.20)$$

Pokud zavedeme koeficient zvýšení provozní indukčnosti pro střídavý proud k a dosadíme za druhý člen v rovnici výraz $0,46 \log(1/k)$ můžeme potom psát:

$$L = 0,46 \log \frac{a}{r} + 0,46 \log \frac{1}{k} = 0,46 \log \frac{a}{kr} \left[mH \cdot km^{-1}; m, m, - \right] \quad (4.21)$$

Kde k je k dáno vztahem: [7]

$$k = 10^{\frac{0,05 \alpha \mu_r}{0,46}} \quad (4.22)$$

Koeficient k se běžně určuje měřením indukčnosti. Závisí na tvaru průřezu vodiče,

frekvenci a použitým materiálu.

vodič	počet drátů	k	Pouze pro 50Hz. Neplatí pro svazkové vodiče.
Al kruhový průřez	1	0,779	
Al lana	7	0,726	
	19	0,758	
	37	0,768	
	61	0,772	
	91	0,774	
	127	0,776	

Tab. 4.1 Koeficient zvýšení indukčnosti pro AC proud [6]

4.2.2 Indukčnost trojvodičového vedení

Při výpočtu indukčnosti u trojvodičového vedení se vychází z rovnice (4.19). Pokud uvažujeme nesouměrné trojfázové vedení, je nutné uvažovat nejen vliv působení magnetického pole způsobeného průchodem proudu ve vodiči, ale i v sousedních dvou vodičích.

Vztah tedy bude vypadat:

$$L_{p1} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{13}}}{r} + 0,05 \mu_r [mH \cdot km^{-1}; m, m] \quad (4.23)$$

kde L_{p1} - je provozní indukčnost vodiče 1,
 a_{12} - je vzdálenost mezi vodičem 1 a 2,
 a_{13} - je vzdálenost mezi vodičem 1 a 3.

Podobně pak u vodičů 2 a 3:

$$L_{p2} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \mu_r [mH \cdot km^{-1}; m, m] \quad (4.24)$$

$$L_{p3} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{13} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \mu_r [mH \cdot km^{-1}; m, m] \quad (4.25)$$

Pokud jsou vodiče uspořádány tak, aby tvořily rovnostranný trojúhelník, jsou mezi vodiči v hlavě stožáru stejné všechny vzdálenosti. Důsledkem toho jsou i provozní indukčnosti všech vodičů stejné a platí pro ně stejný vztah jako pro dvouvodičové provedení.

Tedy:

$$L_{p1} = L_{p2} = L_{p3} = L_p = 0,46 \log \frac{a}{r} + 0,05 \alpha \mu_r [mH \cdot km^{-1}; m, m] \quad (4.26)$$

Pokud je u jednoduchého trojfázového vedení provedena úplná transponace, jeho celková indukčnost bude rozdělena do tří sériově řazených indukčností rozdělených na třetiny podle vzdáleností $l/3$, kde l_t je délka transponovaného vedení. Výsledný vztah tedy bude:

$$\begin{aligned} L_{p1} = L_{p2} = L_{p3} = L_p = \\ = \frac{l_t}{3} \left(0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12} + a_{13}}}{r} + 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12} + a_{23}}}{r} + 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{13} + a_{23}}}{r} + 0,05 \alpha \mu_r \right) [mH] \end{aligned} \quad (4.27)$$

Po vztážením indukčnosti vodiče na délku vedení a po náležitě úpravě dostaneme vztah pro výpočet provozní indukčnosti jednoho vodiče třífázového transponovaného vedení na jednotku délky.

$$L_p = 0,46 \log \frac{a_s}{r} + 0,05 \mu_r [mH \cdot km^{-1}] \quad (4.28)$$

Kde $a_s = \sqrt{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}$.

Jde o střední vzdálenost mezi vodiči. Indukčnost trojfázového transponovaného vedení je potom trojnásobná.

Můžeme tvrdit, že provozní indukčnost plně transponovaného vedení je rovna střední hodnotě provozní indukčnosti vedení netransponovaného.

$$L_p = \frac{L_{p1} + L_{p2} + L_{p3}}{3} [mH \cdot km^{-1}] \quad [7] \quad (4.29)$$

4.3 Konduktance

Jedná se o reálnou složku příčné admitance. Její velikost závisí na napětí a povětrnostní podmínkách. U výpočtu se často zanedbává, jelikož se její velikost může pohybovat ve značně velkém rozmezí. Příčné ztráty jsou dány svodem přes izolátory a korunou.

4.4 Kapacita vedení

Jedná se o imaginární složku příčné admitance. Vedení vytváří kondenzátor s elektrodami vodič-zem, nebo vodič-vodič. Vlivem nedokonalého dielektrika prochází vedením kapacitní proud jalového charakteru. V dlouhých vedeních vvn je součástí procházejícího proudu nabíjecí proud daný kapacitou vedení. Celková kapacita jednoho vodiče je u vzdušných vedení asi $0,01\mu\text{F}/\text{km}$ a u kabelů $0,1\mu\text{F}/\text{km}$. [6]

4.5 Svod

Svod vzniká nedokonalou izolací a korunou. Při konstrukci vedení se dbá na co největší snížení svodu.

Hlavní vlivy, které ovlivňují velikost svodu jsou:

- Tvar, materiál a čistota izolátoru.
- Vlhkost vzduchu.
- Vzdálenost vodičů.
- Velikost provozovaného napětí.

4.5.1 Koróna

Jedná se o doutnavý výboj doprovázený sršením. Vzniká při intenzitě elektrického pole okolo 27 [kV/cm] .

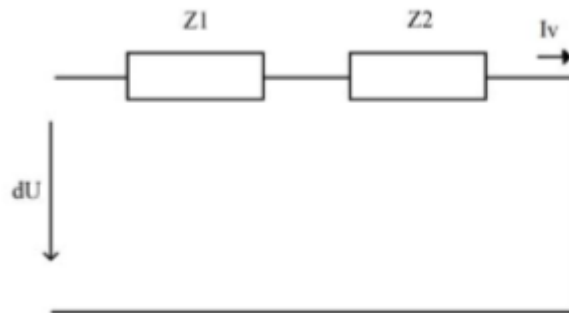
Škodlivé vlivy vznikající korunou:

- Činné ztráty.
- Vznik vyšších harmonických.
- Vznik rušení.

5 Teoretický rozbor spínacího děje

5.1 Vyrovnávací proudy

Vznik vyrovnávacího proudu při kruhování dvou linek závisí na dodržení podmínek fázování. V místě spojení dvou linek není možné udržet na obou stranách stejné napětí, ani úhel fázorů těchto napětí, ani stejnou frekvenci (dýchání sítě 0,04 Hz). Rozdílná velikost napětí je způsobena různými úbytky napětí spínaných úseků. Parametry různých úseků nejsou nikdy 100% stejné.



Obr. 5.1 Náhradní schéma pro výpočet vyrovnávacích proudů

Kde: dU - velikost rozdílu napětí

Impedance Z_1 a Z_2 představuje celkovou impedanci zkruhované smyčky. Pokud je kruhováno na jedné přípojnici Z_1 a Z_2 představuje impedanci jednoho transformátoru a vedení za ním. Pokud je kruhováno přes nadřazenou soustavu Z_1 a Z_2 představuje impedanci nadřazené soustavy a veškerých prvků ve smyčce.

Vztah pro výpočet vektoru vyrovnávacího proudu:

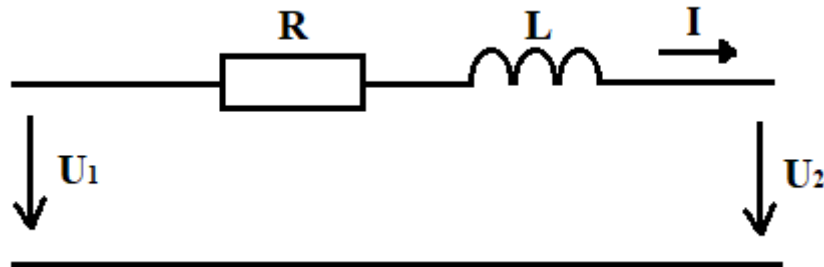
$$\overline{I}_v = \frac{\overline{dU}}{\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2} \quad (5.1)$$

Vztah pro výpočet velikosti vyrovnávacího proudu:

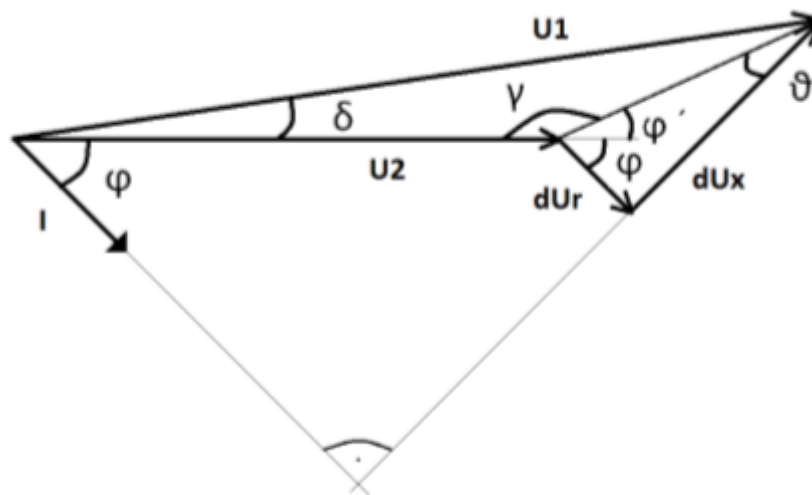
$$|\overline{I}_v| = \frac{|dU|}{|\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2|} [2] \quad (5.2)$$

5.2 Odvození velikosti rozdílu fáze na obecném prvku elektrizační soustavy.

V této kapitole bude uvedeno proč vzniká rozdíl fáze napětí v distribuční soustavě.



Obr. 5.2 Náhradní schéma obecného prvku distribuční soustavy



Obr. 5.3 Vektorový diagram úbytku napětí na obecném prvku distribuční soustavy [2]

Výpočet pomocí práce s vektory:

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + R \cdot \vec{I} + x \cdot \vec{I} \quad (5.3)$$

Výpočet pomocí geometrie:

$$\varphi = \arccos \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} ; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{Q}{P} \quad (5.4)$$

Úhel napětí mezi napětím U_2 a proudem I:

$$\vartheta = \operatorname{arctg} \frac{R}{X} \quad (5.5)$$

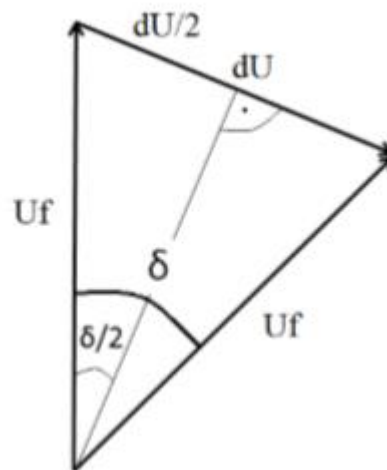
$$\varphi' = 180 - 90 - \vartheta \quad ; \quad \chi = 180 - \varphi' \quad (5.6)$$

Úhel natočení fáze napětí:

$$\delta = \arcsin \left(\frac{\sin \chi \cdot \sqrt{dU_r^2 + dU_x^2}}{U_1} \right) \quad (5.7)$$

Kde δ = úhel vektoru napětí \bar{U}_1 .

Rozdíl napětí v důsledku posunu fáze:



Obr. 5.4 Vznik rozdílu napětí v důsledku natočení fáze

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{dU}{2 \cdot U_f} \Rightarrow dU = 2 \cdot U_f \cdot \sin \frac{\delta}{2} \quad (5.8)$$

Kde: dU - velikost rozdílu napětí

U_f - velikost fázového napětí

δ - rozdílový úhel napětí

Ve výpočtu reálného rozdílu napětí je nutné uvažovat různá fázová napětí s chybou rovnou 1% U_n . Chyba 1% vyplývá z velikosti odbočky transformátoru 110/35kV, která je 2%. Z této skutečnosti a taktéž z přesnosti měničů napětí (1%) je zřejmé, že nejsme schopni dvě napětí srovnat s vyšší přesností než 1%. [2] Pro výpočet rozdílu napětí při různé velikosti fázových napětí je nutné použít práci s vektory:

$$\overline{dU} = \overline{U_{f1}} - \overline{U_{f2}} \quad (5.9)$$

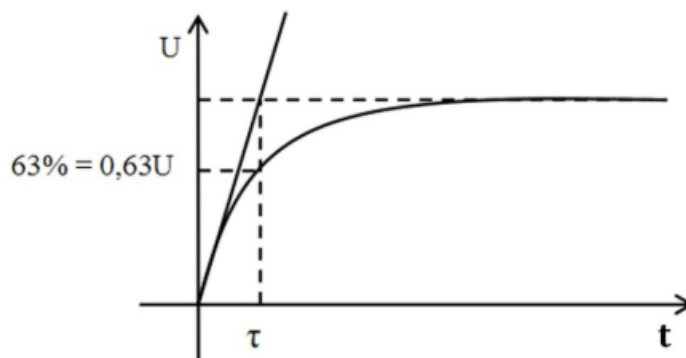
Kde: \overline{dU} – velikost rozdílu napětí je velikost vektoru dU

5.3 Přechodový děj

Probíhá v elektrickém obvodu mezi dvěma ustálenými stavy. Jeho vznik je podmíněn změnami energie v akumulacích prvcích obvodu (kondenzátory, cívky). Změny těchto tzv. stavových veličin nemohou proběhnout okamžitě, protože by vyžadovaly zdroj nekonečného výkonu. Charakter přechodového jevu závisí na druhu a počtu zapojených akumulacích součástí. Obsahuje-li obvod pouze jeden druh součástky (pouze kondenzátory, nebo cívky), nemůže dojít k vratné výměně dvou druhů energie a děj probíhá aperiodicky. Pokud obvod obsahuje oba druhy akumulacích součástí (tedy kondenzátory i cívky), může za určitých podmínek dojít k periodickým tlumeným kmitům. Konkrétní časové průběhy napětí a proudu v obvodu při přechodovém jevu závisí na výchozím ustáleném stavu. Proto je třeba znát počátečních podmínky, které určují stav obvodu před započítím přechodového jevu.

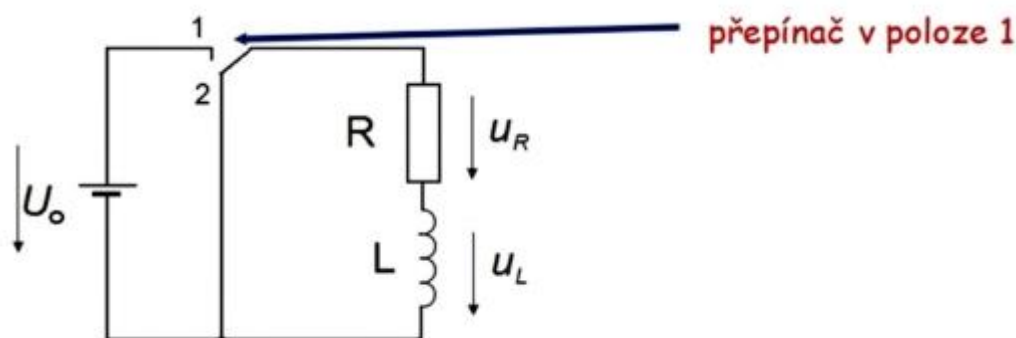
Z důvodů jmenovaných výše se velikosti napětí (kondenzátor) a proudů (cívka) nemohou měnit skokově, jejich hodnoty se pohybují v určitých mezích, ke kterým se přibližují exponenciálně.

Časová konstanta τ se pro jednoduchý obvod RL nebo RC určí pomocí tečny v počátku přechodové charakteristiky, nebo také jako doba, za kterou dosáhne napětí na výstupu 0,63 maximální hodnoty napětí U (U_0). [9]

Obr. 5.5 Určení časové konstanty τ [9]

5.3.1 Obvod RL, stejnosměrný zdroj

Indukčnost cívky se projeví při přechodovém ději zejména skokovou změnou napětí. Při spínání obvodu není indukčnost velký problém, ale v případě rozpojení obvodu se cívka chová jako zdroj proudu. Rozpojení se tváří jako nekonečně velký odpor a při aplikaci Ohmova zákona vychází napětí blížíící se nekonečnu. Dochází tedy k ionizaci okolního plynu a k následnému výboji.



Obr. 5.6 Obvod RL [9]

V obvodu RL jsou při přepínači v poloze 1 počáteční podmínky:

$$i_{(L)} = 0 \quad u_{(L)} = U_0 \quad (5.10)$$

Podle II. Kirchhoffova zákona musí platit:

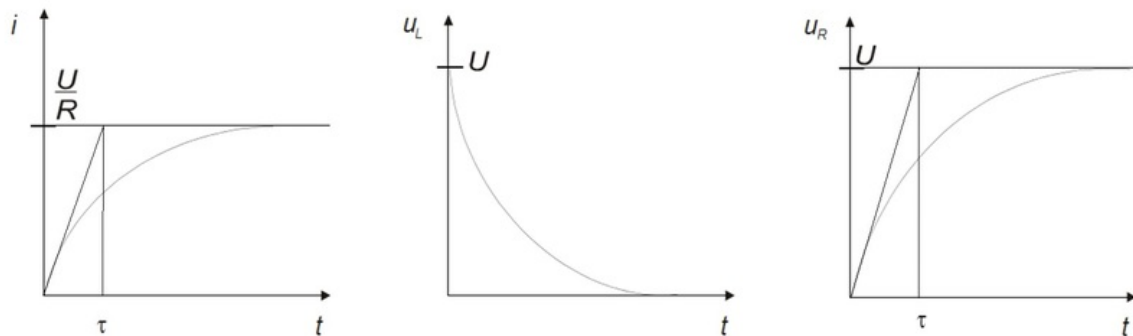
$$u_{(L)} + u_{(R)} = U_0 \quad \text{Pak platí:} \quad u_{L(t)} = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.11)$$

Velikost napětí na odporu bude:

$$u_{R(t)} = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (5.12)$$

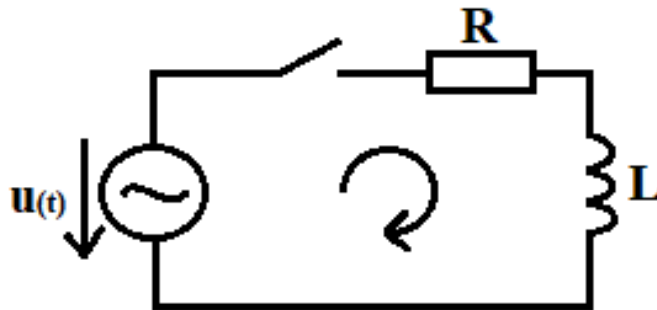
Proud obvodem:

$$i_{(t)} = \frac{u_{r(t)}}{R} = \frac{U_0}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = i_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (5.13)$$

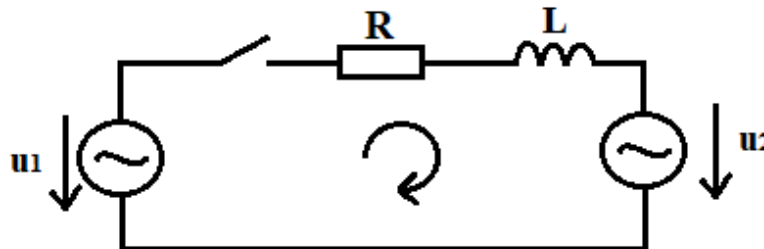


Obr. 5.7 Časové průběhy spínání obvodu RL [9]

5.3.2 Obvod RL, harmonický zdroj.



Obr. 5.8 Harmonický obvod RL



Obr. 5.8 Harmonický obvod RL se dvěma zdroji

$$u_{1(t)} = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (5.14)$$

$$u_{2(t)} = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2) \quad (5.15)$$

$$-\overline{U}_1 + \overline{I} \cdot R + \overline{I} \cdot j\omega L + \overline{U}_2 = 0 \quad (5.16)$$

$$\overline{I} \cdot (R + j\omega L) = \overline{U}_1 - \overline{U}_2 \quad (5.17)$$

$$\overline{I} = \frac{\overline{U}_1 - \overline{U}_2}{R + j\omega L} = \frac{U_{m1} \angle \varphi_1 - U_{m2} \angle \varphi_2}{Z \angle \psi} \quad (5.18)$$

Máme-li dva harmonické signály s neměnným fázovým posuvem v časové oblasti, pak je jejich rozdíl opět harmonický signál. Dál můžeme tedy počítat jako pro jeden harmonický zdroj.

V čase 0 se připojí zdroj harmonického napětí:

$$u_{(t)} = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.19)$$

$$\overline{U} = U_m \angle \varphi \quad (5.20)$$

Počáteční podmínky: $i_{(L)} = 0 \quad u_{(L)} = 0 \quad (5.21)$

Nový ustálený stav:

$$i_{(t)} = \frac{U_m}{Z} \cdot \sin(\omega t + \varphi - \psi) \quad (5.22)$$

$$u_{(t)} = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.23)$$

Přechodový děj nyní můžeme řešit metodou charakteristické rovnice:

$$u_{(t)} = R \cdot i_L + L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (5.24)$$

Přes homogenní řešení můžeme zjistit hodnotu λ , se kterým budeme pracovat v dalších výpočtech.

$$0 = R \cdot i_L + L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (5.25)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \lambda \quad i_L = 1 \quad (5.26)$$

$$R + \lambda L = 0 \quad (5.27)$$

$$\lambda = -\frac{R}{L} \quad (5.28)$$

Obecný tvar řešení rovnice:

$$i_{V(t)} = K \cdot e^{\lambda t} + \text{Partikulár ní řešení (nový ustálený stav)}. \quad (5.29)$$

$$i_{V(t)} = K \cdot e^{\lambda t} + \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \varphi - \psi) \quad (5.30)$$

$$\lambda = -\frac{1}{\tau} \quad (5.31)$$

$$i_{V(t)} = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \varphi - \psi) \quad (5.32)$$

-K určíme z počátečních podmínek

$$i_L = 0 \quad (5.33)$$

$$0 = K \cdot e^{-\frac{0}{\tau}} + \frac{U_m}{Z} \sin(\omega \cdot 0 + \varphi - \psi) \quad (5.34)$$

$$0 = K \cdot 1 + \frac{U_m}{Z} \sin(\varphi - \psi) \quad (5.35)$$

$$0 = K + \frac{U_m}{Z} \sin(\varphi - \psi) \quad (5.36)$$

$$K = -\frac{U_m}{Z} \sin(\varphi - \psi) \quad (5.37)$$

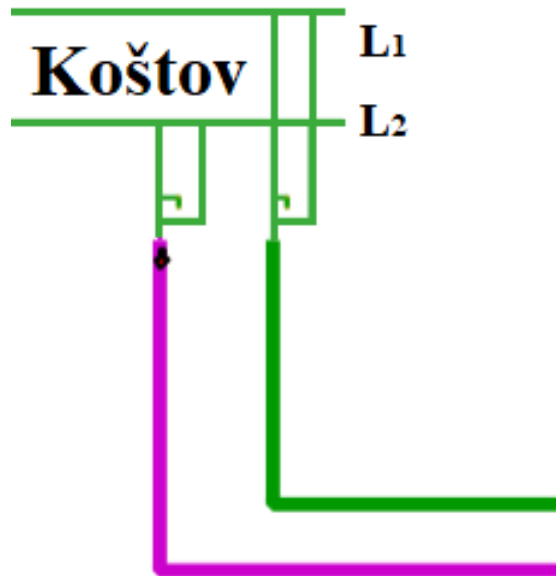
Pod dosazení do vzorce (5.31) dostaneme rovnici

$$i_{V(t)} = -\frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot Z} \sin(\varphi - \psi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot Z} \sin(\omega t + \varphi - \psi) \quad (5.38)$$

Dostáváme rovnici pro okamžité hodnoty proudu.

Detail rozvodny Kořtov

Napájení je realizováno přípojnícemi L₁ a L₂, které jsou napájené ze dvou stejných transformátorů.

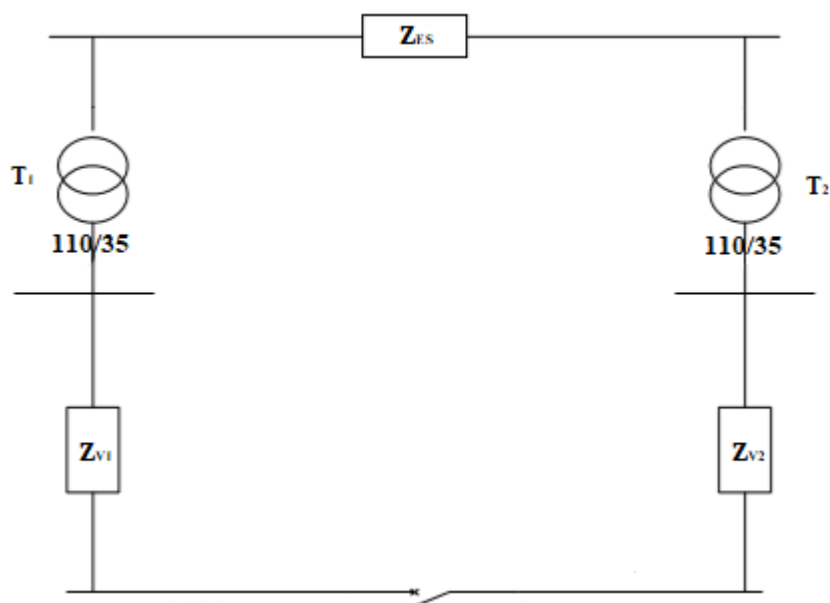


Obr. 6.3 Detail rozvodny Bukov

6.1 Výpočet parametrů vedení

Náhradní schéma

V následujícím schématu je vedení zastoupeno několika prvky. Z_{ES} představující celkovou impedanci nadřazené soustavy, $T_{1;2}$ jsou dva transformátory stejného typu a $Z_{V1;2}$ představují impedance vedení l₁ a l₂.



Obr. 6.4 Zjednodušené schéma vedení

Nadřazená soustava	Vedení	Transformátory
$S_k'' = 3957$ [MVA]	$X_{km} = 0,381$ [Ω /km]	$u_k\% = 11$ [%]
$c = 1,1$ [-]	$R_{km} = 0,667$ [Ω /km]	$S_n = 40$ [MVA]
$U_n = 110$ [kV]	$l_2 = 14$ [km]	$U_n = 35$ [kV]
	$l_1 = 16$ [km]	$\Delta P_k = 140$ [kW]
	$l_1 = 42/7$ ALFE	
	$l_2 = 42/7$ ALFE	

Tab. 6.1 Parametry obvodu

Použité vzorce:

$$Z_{ES} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k''} ; \quad Z_T = \frac{u_{k\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} ; \quad R_T = \Delta P_k \cdot \left(\frac{U_n}{S_n} \right)^2 ; \quad (6.1-3)$$

$$X_T = \sqrt{(Z_T^2 - R_T^2)} ; \quad X_V = l \cdot X_{km} ; \quad R_V = l \cdot R_{km} ; \quad (6.4-6)$$

$$L = \frac{X_L}{j\omega} \quad (6.7)$$

Výpočet parametrů nadřazené soustavy:

$$Z_{ES} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k''} = \frac{1,1 \cdot 110000^2}{3957 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{35}{110} \right)^2 = 0,341 \Omega \quad (6.8)$$

$$X_{LES} = 0,995 * Z_{ES} = 0,339 \Omega ; \quad (6.9-10)$$

$$R_{ES} = 0,1 * X_{LES} = 0,034 \Omega$$

Výpočet parametrů transformátoru:

$$Z_{T1} = Z_{T2} ; \quad X_{T1} = X_{T2} ; \quad R_{T1} = R_{T2} \quad (6.11-13)$$

$$Z_T = \frac{u_{k\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{11 \cdot 35000^2}{100 \cdot 40 \cdot 10^6} = 3,369 \Omega \quad (6.14)$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \left(\frac{U_n}{S_n} \right)^2 = 140 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{35000}{40 \cdot 10^6} \right)^2 = 0,107 \Omega \quad (6.15)$$

$$X_T = \sqrt{(Z_T^2 - R_T^2)} = \sqrt{(3,369^2 - 0,107^2)} = 3,367 \Omega \quad (6.16)$$

Výpočet parametrů vedení:

$$X_{V1} = l_1 \cdot X_{km} = 16 \cdot 0,381 = 6,096 \Omega \quad (6.17)$$

$$R_{V1} = l_1 \cdot R_{km} = 16 \cdot 0,667 = 10,672 \Omega \quad (6.18)$$

$$X_{V2} = l_2 \cdot X_{km} = 14 \cdot 0,381 = 5,334 \Omega \quad (6.19)$$

$$R_{V2} = l_2 \cdot R_{km} = 14 \cdot 0,667 = 9,338 \Omega \quad (6.20)$$

Celkový součet:

$$\begin{aligned} X_{Lcelk} &= X_{V1} + X_{V2} + 2 \cdot X_T + X_{LES} = \\ &5,334 + 6,096 + 2 \cdot 3,367 + 0,339 = \underline{\underline{18,503 \Omega}} \end{aligned} \quad (6.21)$$

$$\begin{aligned} R_{celk} &= R_{V1} + R_{V2} + 2 \cdot R_T + R_{LES} = \\ &9,338 + 10,672 + 2 \cdot 0,107 + 0,034 = \underline{\underline{20,258 \Omega}} \end{aligned} \quad (6.22)$$

$$L = \frac{18,503}{2 \cdot \pi \cdot 50} = \underline{\underline{0,059 H}} \quad (6.23)$$

6.2 Ruční výpočet rázových proudů.

Abychom mohli efektivní hodnotu rázového proudu vypočítat ručně, potřebujeme znát několik dalších hodnot. Impedanci Z a rozdílové napětí dU , které odpovídá zvolenému úhlu z Tab.[5.1].

Výpočet impedance:

$$Z = \sqrt{(R_{Celk}^2 + X_{Lcelk}^2)} = \sqrt{(20,258^2 + 18,503^2)} = 27,43\Omega \quad (6.24)$$

$$\Psi = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im } g}{\text{Re}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{18,503}{20,258}\right) = 42,43^\circ \quad (6.25)$$

Pro zvolený úhel například 1° odpovídá podle tabulky [5.1] velikost $dU=350 \text{ V}$.

Můžeme tedy dosadit do vzorce (5.2). Uvažujeme pouze část pro ustálený stav.

$$I_v = \frac{dU}{Z} = \frac{350}{27,43} = \underline{\underline{12,89A}} \quad (6.26)$$

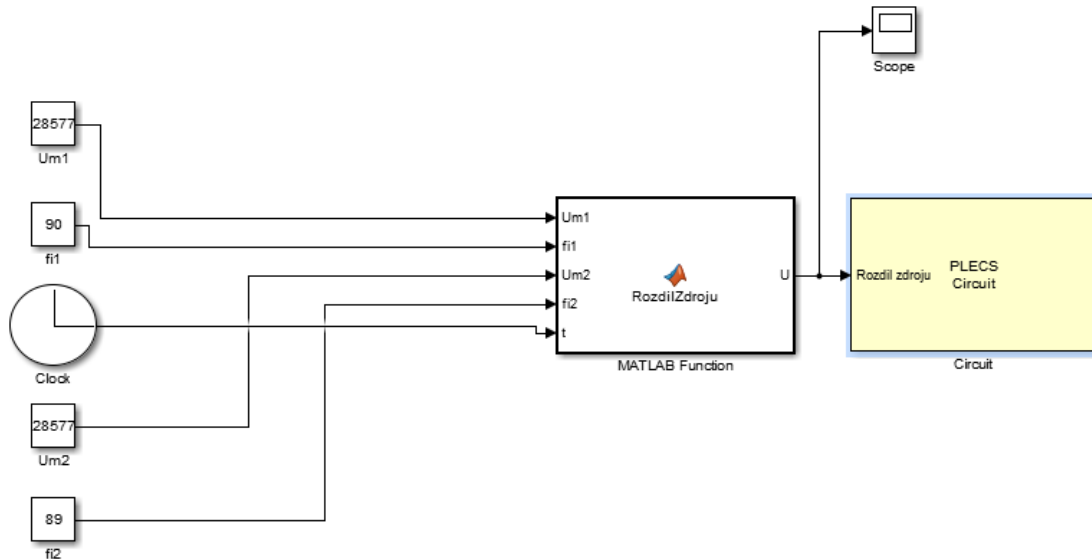
Kde amplituda bude:

$$I_{V(\max)} = \frac{dU \cdot \sqrt{2}}{Z} = \frac{495}{27,43} = \underline{\underline{18,23A}} \quad (6.27)$$

6.3 Seznámení s programem Plecs.

Prostředí Plecs je nástrojem pro vysokorychlostní simulace výkonových elektronických systémů. Je k dispozici ve dvou verzích: PLECS Blockset pro bezproblémovou integraci s MATLAB® / Simulink® a PLECS Standalone, který může fungovat zcela nezávisle. [13]

6.3.1 Simulace rázového proudu při rozdílovém napětí v rozsahu rozdílu úhlů 0-15° za předpokladu stejné velikosti napětí zdroje U_{ef1} i U_{ef2} .



Obr. 6.5 Náhrada dvou harmonických zdrojů jedním harmonickým zdrojem v prostředí plects.

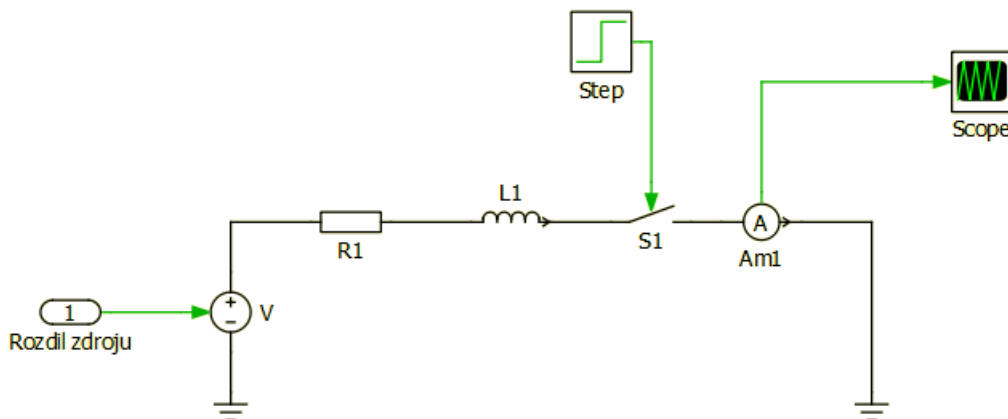
$U_{ef1;2}$ je velikost efektivní hodnoty 35 kV. Clock tvoří časovou základnu a $fi_{1;2}$ znázorňuje rozdíl úhlu efektivních napětí. Blok označený MATLAB funkcí (obrázek (6.6)) počítá velikost dU , popsáno v kapitole 5.2, v závislosti na vstupní hodnotě efektivního napětí U_{ef1} a U_{ef2} a rozdílu úhlu fi_1 a fi_2 . Scope potom znázorňuje již jen jeden harmonický průběh napětí. Funkce bloku Circuit tvoří zjednodušené schéma vedení, je znázorněno na obrázku (6.7).

```

Editor - Block: BP/MATLAB Function
MATLAB Function
1 function U = RozdilZdroju(Um1, fi1, Um2, fi2, t)
2     w=2*pi*50;
3     fi1_rad=fi1*pi/180;
4     fi2_rad=fi2*pi/180;
5     U=Um1*sin(w*t+fi1_rad)-Um2*sin(w*t+fi2_rad);
6     end

```

Obr. 6.6 MATLAB funkcion



Obr. 6.7 Simulace kruhování zjednodušeného vedení v prostředí plecs.

6.4 Simulace s rozdílem úhlů napětí 1°.

Nejprve viz. obrázek (6.5) doplníme příslušné veličiny U_{ef1} , U_{ef2} a φ_1 , φ_2 . MATLAB Function následně odečte tyto napětí podle **vzorce (6.28)** a vykreslí výsledný průběh napětí zobrazený na **obrázku (6.8)**.

$$dU = \overline{U_1} - \overline{U_2} = U_{m1} \angle \varphi_1 - U_{m2} \angle \varphi_2 \quad (6.28)$$

Pomocí metody popsané v **kapitole 5.2** vypočteme k rozdílu úhlu napětí od 0 do 15° příslušné dU.

$$dU = 2 \cdot U_f \cdot \sin \frac{\delta}{2} = 2 \cdot 20207 \cdot \sin \frac{1}{2} = 0,35 [kV] \quad (6.29)$$

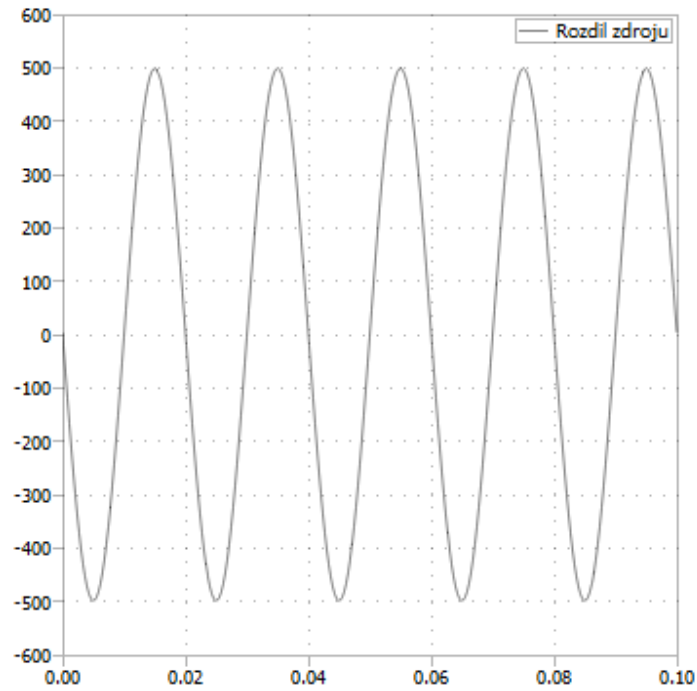
rozdílový úhel napětí [°]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Velikost dU [kV]	0	0,35	0,71	1,06	1,41	1,76	2,12	2,47	2,82	3,17	3,52	3,87	4,23	4,58	4,93	5,28

Tab. 6.2 Výpočet rozdílového napětí v rozsahu rozdílu úhlů 0-15° za předpokladu stejné velikosti napětí [2]

Kde: dU - velikost rozdílu napětí

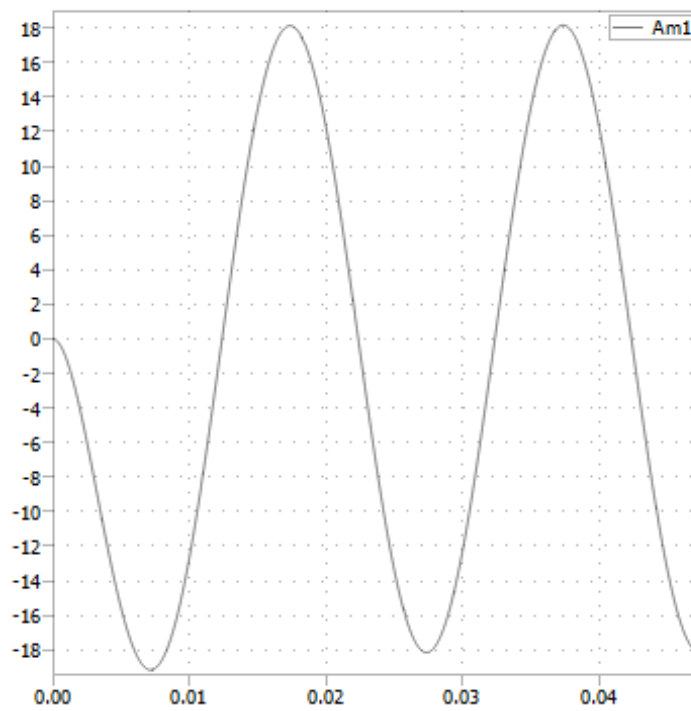
U_f - velikost fázového napětí

δ - rozdílový úhel napětí



Obr. 6.8 Znáznornění průběhu pro $\varphi_i=1^\circ$, $U_m=495$ V, $dU=350$ V.

Výsledná velikost efektivního napětí odpovídá **Tab. 6.2**. Toto napětí je napájecí napětí pro obvod na **obr. 6.7**, ve kterém po sepnutí spínače S_1 dojde k vytvoření rázového a následnému průtoku vyrovnávacího proudu, jehož velikost znázorňuje simulace na **obr. 6.9**.



Obr. 6.9 Průběh vyrovnávacího proudu pro úhel mezi napětím 1° .

Hodnoty I_m a $I_{\text{ráz}}$ se odečítají ze simulace na **obr. 6.9**, hodnota U_m se stanoví z průběhu na **obr. 6.8**, dU vyplývá z **Tab 6.2**.

Z průběhu na **obr 6.9** je patrná velikost ustáleného vyrovnávacího proudu I kolem 18,65 A. Průběh se ustálil v čase 0,047ms. Rázový proud dosáhl hodnoty přibližně 19,18 A.

φ [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
dU [kV]	0,35	0,71	1,06	1,41	1,76	2,12	2,47	2,82	3,17	3,52	3,87	4,23	4,58	4,93	5,28
dU _m [kV]	0,49	1,00	1,50	1,99	2,49	3,00	3,49	3,99	4,48	4,98	5,47	5,97	6,46	6,95	7,44
I [A]	13,19	25,69	38,53	51,36	64,21	77,03	89,87	102,67	115,48	128,28	141,07	153,85	166,62	179,37	192,12
I _m [A]	18,65	36,33	54,49	72,64	90,80	108,94	127,10	145,20	163,32	181,42	199,50	217,58	235,63	253,67	271,70
I _{ráz} [A]	19,18	38,34	57,52	76,69	95,85	115,00	134,14	153,20	172,37	191,46	210,51	229,58	248,61	267,61	286,58

Tab. 6.3 Simulace v rozmezí 1 až 15° pro impedanci $27,43\Omega$.

φ [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
dU [kV]	0,35	0,71	1,06	1,41	1,76	2,12	2,47	2,82	3,17	3,52	3,87	4,23	4,58	4,93	5,28
I [A]	12,76	25,88	38,64	51,40	64,16	77,29	90,05	102,81	115,57	128,33	141,09	153,85	166,61	179,37	192,13
I _m [A]	18,05	36,61	54,65	72,70	90,74	109,30	127,35	145,39	163,44	181,48	199,53	218,09	236,13	254,18	272,22

Tab. 6.4 Ruční výpočty v rozmezí 1 až 15° pro impedanci $27,43\Omega$.

Kde: φ - Je úhel mezi napětími.

dU- Je velikost rozdílu napětí.

dU_m- Je amplituda napětí.

I- Ef. Hodnota proudu.

I_{ráz}- Hodnota první půlvy proudu.

I_m- Max. hodnota ustáleného proudu.

Z **Tab 6.3 a 6.4** je patrná podobnost ručně vypočtených a nasimulovaných hodnot. Jejich rozdíl se pohybuje řádově v setinách až desetinách A, což se dá považovat za zanedbatelnou chybu způsobenou pravděpodobně zaokrouhlování při výpočtech a odečítáním z grafu při simulaci.

7 Praktické řešení pro jinou délku vedení

V případě uvažování Vedení $l_1 = 25$ km a $l_2 = 20$ km se změní celková impedance vedení a tím i vyrovnávací proudy. Z kapitoly 6.1 vezmeme hodnoty parametrů soustavy a změníme délku l_1 a l_2 . Postup v této kapitole bude identický s kapitolou 6.

Výpočet parametrů vedení potom bude

$$X_{V1} = l_1 \cdot X_{km} = 25 \cdot 0,381 = 9,525 \Omega \quad (7.1)$$

$$R_{V1} = l_1 \cdot R_{km} = 25 \cdot 0,667 = 16,675 \Omega \quad (7.2)$$

$$X_{V2} = l_2 \cdot X_{km} = 20 \cdot 0,381 = 7,62 \Omega \quad (7.3)$$

$$R_{V2} = l_2 \cdot R_{km} = 20 \cdot 0,667 = 13,34 \Omega \quad (7.4)$$

Celkový součet:

$$\begin{aligned} X_{Lcelk} &= X_{V1} + X_{V2} + 2 \cdot X_T + X_{LES} = \\ &7,62 + 9,525 + 2 \cdot 3,367 + 0,339 = \underline{\underline{24,218 \Omega}} \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$\begin{aligned} R_{celk} &= R_{V1} + R_{V2} + 2 \cdot R_T + R_{LES} = \\ &16,675 + 13,34 + 2 \cdot 0,107 + 0,034 = \underline{\underline{30,263 \Omega}} \end{aligned} \quad (7.6)$$

Výpočet impedance:

$$Z = \sqrt{(R_{celk}^2 + X_{Lcelk}^2)} = \sqrt{(30,263^2 + 24,218^2)} = 38,76 \Omega \quad (7.7)$$

$$\Psi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im } g}{\text{Re}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{24,218}{38,76} \right) = 34^\circ \quad (7.8)$$

$$L = \frac{X_{Lcelk}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{24,218}{2 \cdot \pi \cdot 50} = \underline{\underline{0,077H}} \quad (7.9)$$

Pro v minulém výpočtu zvolený úhel 1° odpovídá podle **Tab[5.1]** velikost $dU=350$ V.

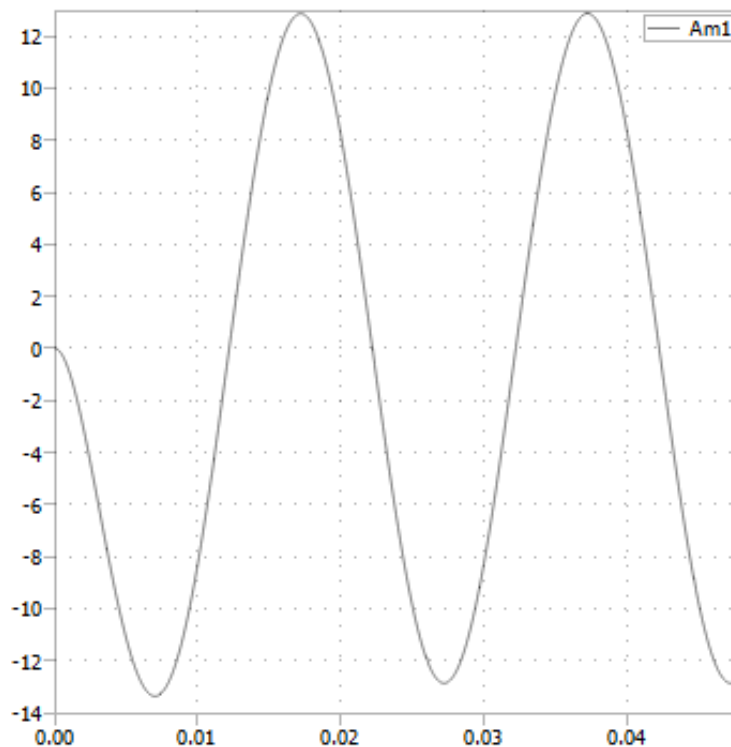
Můžeme tedy opět dosadit do vzorce (5.2) s novou hodnotou impedance. Uvažujeme pouze část pro ustálený stav.

$$I_V = \frac{dU}{Z} = \frac{350}{38,76} = \underline{\underline{9,03A}} \quad (7.10)$$

Kde amplituda bude:

$$I_{V(max)} = \frac{dU \cdot \sqrt{2}}{Z} = \frac{495}{38,76} = \underline{\underline{12,77A}} \quad (7.11)$$

Simulace pro novou hodnotu impedance:



Obr. 7.1 Průběh vyrovnávacího proudu pro úhel mezi napětím 1° s novou impedancí.

Hodnoty I_m a $I_{r\acute{a}z}$ se odečítají ze simulace na **obr. 7.1**, hodnota U_m se stanoví z průběhu na **obr. 6.8**, dU vyplývá z **Tab 6.2**. Z průběhu na **obr 7.1** je patrná velikost ustáleného vyrovnávacího proudu I kolem 12,87 A. Průběh se ustálil v čase 0,047ms. Rázový proud dosáhl hodnoty přibližně 13,37 A.

φ [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
dU [kV]	0,35	0,71	1,06	1,41	1,76	2,12	2,47	2,82	3,17	3,52	3,87	4,23	4,58	4,93	5,28
dU _m [kV]	0,49	1,00	1,50	1,99	2,49	3,00	3,49	3,99	4,48	4,98	5,47	5,98	6,48	6,97	7,47
I [A]	9,11	18,21	27,31	36,42	45,50	54,59	63,67	72,77	81,88	90,93	99,98	109,04	118,09	127,12	136,19
I _m [A]	12,88	25,75	38,62	51,50	64,35	77,20	90,05	102,91	115,80	128,60	141,40	154,20	167,00	179,78	192,60
I _{ráz} [A]	13,37	26,75	40,11	53,48	66,84	80,20	93,55	106,88	120,20	133,50	146,80	160,10	173,38	186,64	199,88

Tab. 7.1 Simulace v rozmezí 1 až 15° pro impedanci 38,76 Ω.

φ [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
dU [kV]	0,35	0,71	1,06	1,41	1,76	2,12	2,47	2,82	3,17	3,52	3,87	4,23	4,58	4,93	5,28
I [A]	9,03	18,32	27,35	36,38	45,41	54,70	63,73	72,76	81,79	90,82	99,85	109,13	118,16	127,19	136,22
I _m [A]	12,77	25,91	38,68	51,45	64,22	77,35	90,12	102,89	115,66	128,43	141,20	154,34	167,11	179,88	192,65

Tab. 7.2 Ruční výpočty v rozmezí 1 až 15° pro impedanci 38,76 Ω.

Kde: φ - Je úhel mezi napětími.

dU- Je velikost rozdílu napětí.

dU_m- Je amplituda napětí.

I- Ef. Hodnota proudu.

I_{ráz}- Hodnota první půlvlny proudu.

I_m- Max. hodnota ustáleného proudu

8 Vypínání v praxi

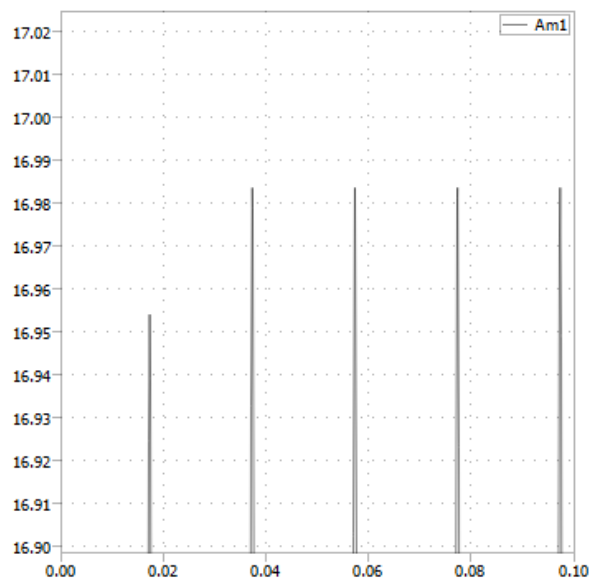
V následující kapitole bude zjištěna reálná schopnost vypínání rázových proudů odpínačem **DRIBO Flb 6400** a **DRIBO Fle GB R**.

V případě kruhování vedení mimo rozvodnu je nutné rozepnout a sepnout vedení odpínačem, který, pokud se nejedná o komorový odpínač (vypínací schopnost 400/630A), má menší spínací možnosti než vypínač. Vypínací schopnosti použitých odpínačů jsou zaznamenány v **tabulkách 2.2 a 2.4**. Zapínací schopnosti těchto odpínačů jsou řádově v kA, zvládnou tedy úhel mezi napětími i větší než 15°.

8.1 Odpínač DRIBO F1b 6400

8.1.1 Pro impedanci smyčky 27,43 Ω .

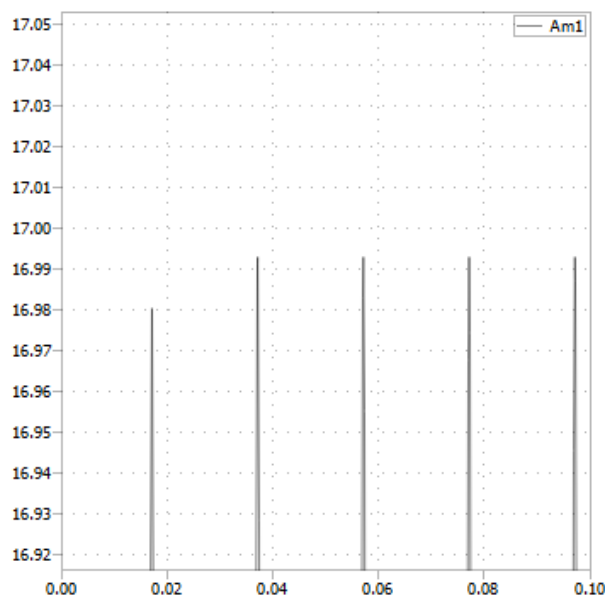
Odpínač **DRIBO F1b 6400** dokáže vypínat max. 17 A, což podle simulace odpovídá $\varphi = 0$ až 0,935 [°].



Obr. 8.1. Simulace spínání s úhlem $\varphi = 0,935^\circ$.

8.1.2 Pro impedanci smyčky 38,76 Ω .

Odpínač **DRIBO F1b 6400** dokáže vypínat max. 17 A, což podle simulace odpovídá $\varphi = 0$ až 1,32 [°].

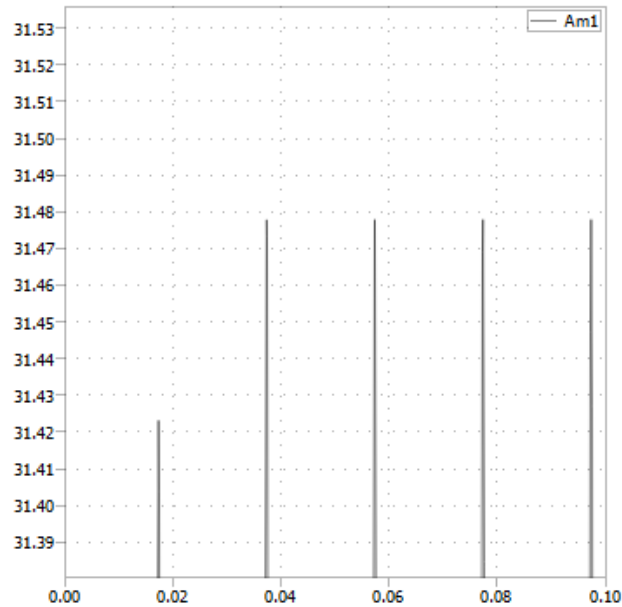


Obr. 8.2. Simulace spínání s úhlem $\varphi = 1,32^\circ$.

8.2 Odpínač DRIBO Flb

8.2.1 Pro impedanci smyčky 27,43 Ω .

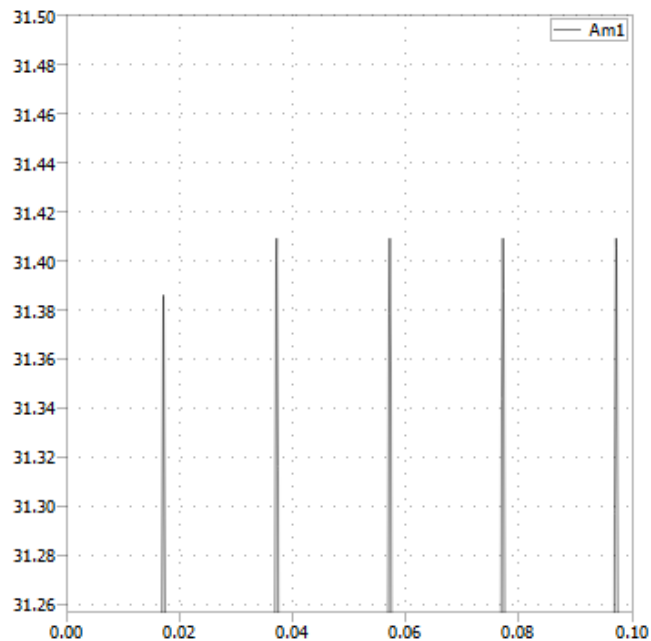
Odpínač DRIBO Fle GB R dokáže vypínat max 31,5 A, což podle simulace odpovídá $\varphi=0$ až 1,733 [°].



Obr. 8.3. Simulace spínání s úhlem $\varphi=1,733^\circ$.

8.2.2 Pro impedanci smyčky 38,76 Ω .

Odpínač DRIBO Fle GB R dokáže vypínat max 31,5 A, což podle simulace odpovídá $\varphi=0$ až 2,44 [°].



Obr. 8.4. Simulace spínání s úhlem $\varphi=2,44^\circ$.

9 Závěr

Tato bakalářská práce se věnuje rozboru vyrovnávacího a rázového proudu, který vzniká při kruhování distribučních sítí. Vyrovnávací proud je závislý na parametrech sítě a je třeba, počítat ho pro každou síť zvlášť.

V ČR jsou distributoři motivováni ke zlepšování nepřetržitosti dodávky elektrické energie. Je tedy snaha minimalizovat změny topologie vedení, které by měly za důsledek výpadek dodávky elektrické energie v místě, kde není odstávka nutná. Rekonfigurace vedení tedy probíhají pod zatížením, což má za následek provoz sítě s protékajícími vyrovnávacími proudy. Seznámení se samotnou sítí a zařízeními v ní obsaženými se zabývají **kapitoly 1 a 2**.

Kapitola 3 se zabývá kruhováním sítí, v této kapitole jsou popsány podmínky nutné pro bezpečné kruhování sítí spolu s možnostmi jak je zjistit. Také jsou zde popsány výhody a nevýhody provozu zkruhovaných sítí a způsoby kruhování distribučních sítí. Kruhování je dnes nedílnou součástí provozu kteréhokoliv distribučního vedení.

V **kapitole 4** je popsán matematický model pro výpočet parametrů vedení. Jednotlivé parametry vedení popsány v **podkapitolách 4.1 až 4.5** popisují charakter a chování vedení v praxi. V praxi jsou tyto parametry často vypočteny, nebo změřeny a uvedeny ve formě tabulek nebo norem. S každou novou technologií je však nutné provést výpočet, nebo měření znovu pro zvýšení přesnosti dalších výpočtů a spolehlivosti všech prvků, které jsou součástí vedení.

Popis spínacího děje je proveden v **kapitole 5**, v této kapitole je popsán vznik vyrovnávacího proudu. Ten je závislý na velikosti rozdílového úhlu fázorů spínaného napětí φ . Z teoretického rozboru vyplývá, že čím je úhel φ větší, tím je větší i vyrovnávací proud. Vyrovnávací proud zatěžuje dané vedení a může představovat problém pro spínací prvky, které nemusí mít dostatečné spínací schopnosti. Tím vzniká nebezpečí ohrožující nejen samotné vedení, ale i případnou obsluhu linky. V této kapitole je uveden také teoretický rozbor harmonického přechodového děje.

Kapitola 6 vychází ze skutečného modelu elektrické sítě v úseku Koštov-Bukov. Veškeré hodnoty jsou reálné, získané ve spolupráci s prostředníkem ČEZ distribuce a.s. Kruhování této sítě probíhalo v místě rozvodny Bukov pomocí vypínače VD4 **Tab 2.1**, který disponuje dostatečnou spínací schopností. Při výpočtu **Tab 6.4** a simulaci **Tab 6.3** rázového a vyrovnávacího proudu došlo k menším odchylkám v řádu setin až desetin A,

tato odchylka byla pravděpodobně způsobena nedostatečně přesným odečítáním z grafu a drobným zaokrouhlováním. Dá se tedy říct, že výsledky vyšly podle teoretický předpokladů.

V **kapitole 7** se zabýváme, obdobně jako v **kapitole 6**, výpočtem impedance smyčky kruhované sítě pouze s jinou délkou vedení.

Kapitola 8 řeší možnosti kruhování pomocí odpínačů s menší spínací schopností pro různé velikosti impedancí. Při sepnutí nevzniká nijak velký problém ani na odpínačích, ty jsou schopny zapínat řádově kA, pokud ale vycházíme z **Tab 2.2** a **Tab 2.4** uvidíme, že schopnost vypínání uzavřené smyčky je pouze v řádech desítek A. Z **Tab 6.3** a **7.1** potom vyplývá, že velikost rázového proudu závisí na velikosti impedance dané smyčky, tedy že z kruhovanou síť nebude možné těmito odpínači vrátit do původního stavu při větším úhlu φ než zhruba 3° . Ze simulace v **kapitole 8.1.1** je poznat, že odpínač DRIBO Flb 6400 je schopen vypínat vyrovnávací proud způsobený úhlem φ od 0 do $0,935^\circ$. Pokud se však zvedne impedance smyčky, jak je popsáno v **kapitole 7**, bude odpínač DRIBO Flb 6400, podle simulace v **kapitole 8.1.2**, schopen vypínat proud způsobený úhlem φ až do $1,32^\circ$. Ze simulace v **kapitole 8.2** vyplývá, že odpínač DRIBO Flb je schopen vypínat vyrovnávací proud způsobený úhlem φ od 0 do $1,733^\circ$. Po zvětšení impedance až úhel φ $2,44^\circ$.

Při vyšším úhlu φ je pravděpodobný vznik poruchy, která může ohrozit obsluhu, nebo samotné vedení.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] 301 Moved Permanently. 301 Moved Permanently [online]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/211-jak-zjistim-ke-ktere-distribucni-soustave-elektriny-patrim-a-mohu-si-zvolit-jinou>
- [2] HLAVIČKA, Jan. Analýza možností změny topologie distribuční soustavy s ohledem na velikost vyrovnávacího proudu. Plzeň, 2016. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE.
- [3] Úsekové odpínače VN - teorie. Sběratelství - světelné zdroje a svítidla veřejného osvětlení [online]. Dostupné z: http://www.vybojky-zarovky.cz/odpinace_theorie.html
- [4] PNE 35 4212 ÚSEKOVÉ SPÍNAČE PRO VENKOVNÍ VEDENÍ DO 45 KV, VČETNĚ
- [5] ELUC. ELUC [online]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/762%20>
- [6] DOHNAL, Martin. Parametry vedení vn. Brno, 2013. Bakalářská práce. Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [7] HORÁK, Karel. Výpočet elektrických sítí. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1980, 307 s.
- [8] MERTLOVÁ, Jiřina, Pavla HEJTMÁNKOVÁ a Tomáš TAJTL. Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-704-3307-8.
- [9] ELUC. ELUC [online]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/647>
- [10] FENG JING, ZHANG JIAN HUA a LIU RUO XI. Analysis of surge current due to closing loop in distribution network. In: 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009) [online]. IET, 2009, 2009, s. 160-160 [cit. 2019-06-10]. DOI: 10.1049/cp.2009.1807. ISBN 9781849192149. Dostupné z: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2009.1807>
- [11] AUTOR NEUVEDEN. Druhy rozvodných zařízení, schéma elektrických stanic [online]. [cit. 7.6.2019]. Dostupný na WWW: <http://files.milanovomisto.webnode.cz/200000445-c9118ca0ab/10%20Druhy%20rozvodn%C3%BDch%20za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD%20sch%C3%A9ma%20e%20stanc.pdf>
- [12] RAŠKA, Tomáš. Obrázkový katalog úsečníků používaných v Severomoravské energetice, a. s. [online]. [cit. 7.6.2019]. Dostupný na WWW: http://fei1.vsb.cz/kat410/fotogalerie/elektrina_v_CR/usecniky%20SME.pdf
- [13] Plexim: Electrical Engineering Software [online]. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://www.plexim.com/>

- [14] Venkovní odpínače Fla 15/60, DRIBO Flb a DRIBO Flc. jedno- a trojpólové provedení jmenovité napětí 25 a 38,5 kv jmenovitý proud 400 a 630 A [online]. [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/15624781-Venkovni-odpinace-fla-15-60-dribo-flb-a-dribo-flc-jedno-a-trojpolove-provedeni-jmenovite-napeti-25-a-38-5-kv-jmenovity-proud-400-a-630-a.html>
- [15] Tesařová, Miloslava. Elektrizační soustava ČR [přednáška]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni Katedra elektroenergetiky a ekologie