



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zemní ochrany v distribuční síti

Autor práce: Bc. Aleš Vozka

Vedoucí práce: Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

Plzeň 2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Aleš VOZKA**
Osobní číslo: **E12N0128P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Zemní ochrany v distribuční síti**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Uveďte způsoby, jakými se provádí uzemnění uzlu sítě.
2. Zpracujte analýzu jednofázových poruch v distribuční síti vn.
3. Porovnejte jednotlivé možné způsoby identifikace vývodu se zemní poruchou.
4. Vyhodnoťte a na vybraných případech porovnejte vhodnost použitých způsobů chránění.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Skripta k předmětu Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie
2. Přednášky a podklady k předmětu "Elektrické ochrany"
3. Internetové podklady
4. Dle uvážení a pokynů udá konzultant

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce:

14. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou zemních ochran v distribuční síti.

V první části práce je uveden popis elektrizační soustavy České republiky, požadavky na síť distribuční soustavy a na kvalitu elektrické energie. V této části práce jsou také zmíněny nejčastěji používané způsoby provozu nulového bodu transformátoru.

Druhá část práce je zaměřena na analýzu jednofázových poruch v sítích VN. Analýza je provedena pro jeden model sítě s rozdílným uzemněním nulového bodu. Teoretické předpoklady byly ověřeny výpočtem metodou souměrných složek a v programu DYNAST.

V poslední části předkládané práce jsou uvedeny možné způsoby identifikace vývodu se zemní poruchou a provedeno vyhodnocení vhodnosti způsobu chránění.

Klíčová slova

zemní ochrany, distribuční síť, síť vn, uzemnění uzlu sítě, kompenzační tlumivka, jednofázová porucha, zemní spojení, metoda souměrných složek, metoda Fortescue, DYNAST

Abstract

Vozka, Aleš. *Earth protections in distribution network [Zemní ochrany v distribuční síti]*. Pilsen, 2014. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electric power engineering and Ecology. Supervisor: Lucie Noháčová

This thesis deals with the issues of the earth protections in the distribution system.

In the first part of this thesis, there are described the power system of the Czech Republic, requirements for the networks of the distribution system and power quality. In this part the frequently used neutral earthing arrangement are mentioned.

The second part is focused on analysis of the single line to ground faults. The analysis was performed for the model system with a different neutral earthing. The theoretical assumptions were verified using the Fortescue method and with the results of simulation in the DYNAST software.

In the last part of this thesis the possible methods of the identification of the feeder with a earth fault are described and suitability of the used methods of the protection is evaluated.

Keywords

earth protections, distribution system, neutral earthing, compensating suppressor, single line to ground, Fortescue method, DYNAST

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 12. května 2014

Bc. Aleš Vozka

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratek	ix
1 Úvod	1
2 Elektrizací soustava	2
2.1 Přenosová soustava	2
2.2 Distribuční soustava	3
2.2.1 Požadavky na sítě distribuční soustavy	4
2.2.2 Rozdělení sítí distribuční soustavy	10
3 Způsoby provozu uzlu sítě	13
3.1 Sítě s účinně uzemněným uzlem	14
3.2 Sítě s izolovaným uzlem	14
3.3 Sítě s neúčinně uzemněným uzlem	15
3.3.1 Síť neúčinně uzemněná přes zhášecí tlumivku	15
3.3.1.1 Kompenzační tlumivka	16
3.3.2 Síť neúčinně uzemněná přes uzlový odporník	20
4 Analýza jednofázových poruch v distribučních sítích VN	21
4.1 Metoda souměrných složek	21
4.2 Definice analyzovaného modelu sítě	25
4.2.1 Model sítě se dvěma vývody v nástroji DYNAST	27
4.3 Účinně uzemněná síť VVN 110 kV	28
4.3.1 Charakteristika jednofázové zemní poruchy	28
4.4 Izolovaná síť VN	29
4.4.1 Charakteristika jednofázové zemní poruchy	29
4.4.2 Napěťové a proudové poměry během zemní poruchy	30
4.4.3 Simulace zemní poruchy v programu DYNAST	31
4.5 Neúčinně uzemněná síť VN přes zhášecí tlumivku	33

4.5.1	Charakteristika jednofázové zemní poruchy	33
4.5.2	Napěťové a proudové poměry během zemní poruchy	35
4.5.3	Simulace zemní poruchy v programu DYNAST	36
4.6	Neúčinně uzemněná síť VN přes uzlový odporník	38
4.6.1	Charakteristika jednofázové zemní poruchy	38
4.6.2	Napěťové a proudové poměry během zemní poruchy	38
4.6.3	Simulace zemní poruchy v programu DYNAST	39
5	Metody identifikace vývodu se zemní poruchou v sítích VN	41
5.1	Statické metody vhodné pro izolované sítě	43
5.2	Statické metody vhodné pro kompenzované sítě	44
5.3	Dynamické metody	47
5.4	Metody vhodné pro odporově uzemněné sítě	49
5.5	Způsoby lokalizace místa zemní poruchy	50
5.6	Systém RCC (Swedish Neutral)	52
5.7	Přizemnění postižené fáze v napájecí rozvodně	53
6	Vyhodnocení vhodnosti způsobu chránění pro vybrané případy	54
6.1	Charakteristika ochrany REJ 527	55
6.1.1	Směrová nebo nesměrová jednotka zemního proudu	55
6.2	Charakteristika IED REF615	63
6.2.1	Ochranné funkce	63
6.2.2	Aplikace	63
7	Závěr	64
	Reference, použitá literatura	66
	Přílohy	68
A	Vypočtené hodnoty	68
A.1	Izolovaná síť	68
A.2	Kompenzovaná síť	69
A.3	Odporově uzemněná síť	70
B	Model sítě v DYNAST	71
B.1	Výpis skriptu	71
B.2	Diagram modelu sítě	72
C		73
D		76

Seznam obrázků

2.1	Jednoduché schématické znázornění základních způsobů provozu sítě.	11
2.2	Schématické znázornění dvou základních typů otevřených sítí.	12
3.1	Příklady možných způsobů uzemnění nulového bodu soustavy.	13
3.2	Obecné schéma sítě s přímo uzemněným uzlem.	14
3.3	Obecné schéma sítě s izolovaným uzlem.	14
3.4	Obecné schéma sítě s neúčinně uzemněným uzlem přes kompenzační tlumivku.	15
3.5	Zjednodušené vnitřní schéma běžné kompenzační tlumivky.	16
3.6	Příklad rezonanční křivky soustavy. (a) venkovní vedení (b) kabelové vedení.	17
3.7	Schéma sítě uzemněné přes zhašecí tlumivku.	18
3.8	Znázornění poměrného napětí u_0 v komplexní rovině.	19
3.9	Obecné schéma sítě s neúčinně uzemněným uzlem přes uzlový odporník.	20
4.1	Rozložení nesymetrické soustavy na tři symetrické.	21
4.2	Schéma sítě s jedním vývodem uzemněné přes obecnou impedanci \bar{Z}_N	23
4.3	Schéma sítě uzemněné přes obecnou impedanci.	24
4.4	Zapojení souměrných složkových schémat pro síť se dvěma vývody.	26
4.5	Napěťové a proudové poměry při zemním spojení v izolované síti.	30
4.6	Schéma nulové složky v izolované síti.	30
4.7	Průběhy napětí během odporového jednofázového zemního spojení.	32
4.8	Průběhy proudů během odporového jednofázového zemního spojení.	32
4.9	Napěťové a proudové poměry při zemním spojení v izolované síti.	34
4.10	Schéma nulové složky v kompenzované síti.	35
4.11	Průběhy napětí během odporového jednofázového zemního spojení.	37
4.12	Průběh proudů během odporového jednofázového zemního spojení.	37
4.13	Schéma nulové složky v síti uzemněné přes uzlový odporník.	38
4.14	Průběhy napětí během odporového jednofázového zemního spojení.	40
4.15	Průběh poruchového proudu během odporového jednofázového zemního spojení.	40
5.1	Měření netočivých složek napětí U_0 a proudu I_0	41
5.2	Příklad pracovní charakteristiky Wattmetrické metody.	44

5.3	47
5.4	Schéma zapojení systému RRC (Swedish Neutral).....	52
5.5	Schéma systému přizemnění postižené fáze.....	53
6.1	Charakteristika se základním úhlem $\varphi_b = -90^\circ$ vhodná pro izolované síť. .	56
6.2	Závislost nulového napětí U_0 na odporu poruchy R_P	57
6.3	Závislost proudů I_P a součtových proudů I_{0V1} a I_{0V2} odporu poruchy R_P . .	57
6.4	Charakteristika se základním úhlem $\varphi_b = 0^\circ$ vhodná pro kompenzované síť. .	58
6.5	Závislost velikosti úhlu α na procentuálním rozložení celkové kapacity. . . .	58
6.6	Závislost úhlu mezi proudy I_{0V1} a I_{0V2} na procentuálním rozložení C_{0C} a R_{0C}	59
6.7	Závislost úhlu mezi součtovými proudy I_{0V1} a I_{0V2} na svodovém proudu I_W . .	59
6.8	Závislost velikostí proudů I_P , I_{0V1} a I_{0V2} na svodovém proudu I_W	60
6.9	Velikosti úhlu α v závislosti na připnutí pomocného odporníku R_{POM}	60
6.10	Závislost úhlu mezi proudy I_{0V1} a I_{0V2} na vyladění tlumivky.	61
6.11	Závislost součtových proudů I_P , I_{0V1} a I_{0V2} na vyladění tlumivky.	61
6.12	Závislost napětí U_0 na odporu poruchy R_P	62
6.13	Závislost sledovaných proudů I_P , I_{0V1} a I_{0V2} na odporu poruchy R_P	62
B.1	Diagram modelu sítě v DYNAST.	72
C.1	Průběhy proudů I_P , I_{0V1} a I_{0V2} v závislosti na způsobu uzemnění uzlu. . .	73
C.2	Průběhy napětí U_0 , U_A , U_B a U_C v závislosti na způsobu uzemnění uzlu. .	73
C.3	Průběhy napětí U_0 , U_A , U_B a U_C v závislosti na způsobu uzemnění uzlu. .	74
C.4	Průběhy proudů v síti se systémem přizemnění postižené fáze.	75
D.1	Ukázka výpočtového programu: Zadání parametrů modelu sítě.	76
D.2	Ukázka výpočtového programu: Výpočet poměrů v kompenzované síti.	76

Seznam tabulek

2.1	Charakteristika napěťových úrovní používaných v elektrizační soustavě České republiky (normalizovaná stupnice sdružených napětí).	2
4.1	Parametry řešené sítě.	25
4.2	Pasivní parametry jednotlivých vývodů.	26
4.3	Parametry transformátoru $110\text{ kV} \pm 8 \times 2\% / 23\text{ kV}$ od firmy ETD.	26
4.4	Rozložení celkové kapacity sítě proti zemi C_{0C}	31
4.5	Srovnání vypočtených a odečtených hodnot na postiženém vývodu.	31
4.6	Srovnání vypočtených a odečtených hodnot na postiženém vývodu.	36
4.7	Srovnání vypočtených a odečtených hodnot na postiženém vývodu.	39
A.1	Vypočtené hodnoty napětí pro izolovanou síť.	68
A.2	Vypočtené hodnoty proudů pro izolovanou síť.	68
A.3	Vypočtené hodnoty napětí pro kompenzovanou síť.	69
A.4	Vypočtené hodnoty proudů pro kompenzovanou síť.	69
A.5	Vypočtené hodnoty napětí pro odporově uzemněnou síť.	70
A.6	Vypočtené hodnoty proudů pro odporově uzemněnou síť.	70

Seznam symbolů a zkratek

C_{0C}	celková kapacita sítě proti zemi (F).
G_{0C}	celkový činný svod sítě (S).
\bar{I}_{0V1}	nulový proud vývodu se zemní poruchou (A).
\bar{I}_{0V2}	nulový proud zdravého vývodu (A).
I_C	celkový kapacitní proud sítě (A).
I_L	induktivní proud tlumivky (A).
\bar{I}_P	poruchový proud (A).
I_{RL}	proud tekoucí uzlovým odporníkem (A).
I_W	celkový svodový proud sítě (A).
L_T	indukčnost kompenzační tlumivky (H).
R_{0C}	celkový svodový odpor sítě (Ω).
R_N	odpor uzlového odporníku (Ω).
\bar{U}_0	nulové napětí (V).
\bar{U}_N	napětí uzlu proti zemi (V).
U_n	jmenovité napětí sítě (V).
\bar{Z}_L	impedance kompenzační tlumivky (Ω).
\bar{Z}_N	obecná impedance uzlu proti zemi (Ω).
ACCR	Aluminium Conductor Composite Reinforced. Kompozitně vyztužený hliníkový vodič.
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity. Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny.
ES	Elektrizační soustava.
NN	nízké napětí.
VN	vysoké napětí.
VVN	velmi vysoké napětí.
ZVN	zvlášť vysoké napětí.
VR	vstupní napájecí rozvodny.
VT	vstupní napájecí transformovna.

1

Úvod

Distribuční soustava je tvořena složitou a rozlehlou sítí převážně venkovních vedení, na které během provozu působí velké množství vnějších vlivů. Vzhledem k těmto vnějším vlivům, mezi něž patří například špatné povětrnostní podmínky nebo dokonce chyby obsluhy či ostatních lidí pohybujících se v blízkosti těchto vedení, jsou poruchy v sítích distribuční soustavy poměrně časté. Ze statistik plyne, že nejčastější poruchou, jež se v těchto sítích vyskytuje, je právě jednofázová zemní porucha.

V sítích distribuční soustavy, jež jsou nejčastěji provozovány s neúčinně uzemněným uzlem přes kompenzační tlumivku, vzniká při vodivém spojení jedné fáze se zemí jednofázové zemní spojení, které je charakteristické relativně nízkým poruchovým proudem, který je závislý hlavně na celkové rozloze sítě, přechodovém odporu poruchy a vyladění tlumivky. I přes svou relativně malou velikost může reziduální proud tekoucí místem poruchy ohrozit bezpečnost osob v blízkosti místa poruchy a i izolaci zařízení, jimiž proud protéká. U ostatních způsobů provozu uzlu je situace ještě horší. Pro bezpečný provoz distribučních sítí je proto nutné zajistit dostatečně spolehlivou detekci zemního spojení v sítí, identifikaci vývodu se zemní poruchou a také lokalizaci konkrétního místa zemního spojení, díky čemuž se zkrátí doba výpadku dodávky elektrické energie na minimum.

V této práci proto provedu analýzu zemních spojení v sítích s různým uzemněním nulového bodu transformátoru, dále uvedu přehled možných způsobů identifikace vývodu se zemní poruchou a způsobů lokalizace místa zemní poruchy a v závěru provedu vyhodnocení vhodnosti konkrétního způsobu chránění pro vybrané konfigurace sítě.

K vyhodnocení napěťových a proudových poměrů během zemního spojení využiji metodu souměrných složek, jež se používá k analytickému řešení kvůli své jednoduchosti a zároveň dostatečně dobré interpretaci fyzikální reality, a simulační software DYNAST, díky kterému získám i časové průběhy analyzovaných veličin.

2

Elektrizační soustava

Elektrizační soustavu České republiky tvoří tři hlavní celky: výrobní, přenosové a rozvodné sítě a spotřebiče elektrické energie. Spojovací prvky mezi těmito celky jsou elektrické stanice, které umožňují transformaci napětí mezi napěťovými hladinami, změnu střídavého napětí na stejnosměrné a naopak. Umožňují také měření primárních parametrů elektrické energie a tím poskytují celkový přehled o dané části soustavy nebo sítě.

Napěťová úroveň		Jmenovitá napětí		Použití
Nízké napětí	NN	400	V	Distribuční soustava
Vysoké napětí	VN	3, 6, 10, 22, 35	kV	Distribuční soustava
Velmi vysoké napětí	VVN	110, 220	kV	Distribuční, přenosová soustava
Zvláště vysoké napětí	ZVN	400	kV	Přenosová soustava

Tab. 2.1: Charakteristika napěťových úrovní používaných v elektrizační soustavě České republiky (normalizovaná stupnice sdružených napětí).

2.1 Přenosová soustava

Smyslem přenosové (nadřazené) soustavy je přenos elektrické energie od výroby k distributorům. Zajišťuje tedy propojení uzlů, do kterých je přiváděna energie z výrobních jednotek, a uzlů, ze kterých je následně odebírána za účelem napájení distribučních sítí. Důležitým úkolem přenosové soustavy je rovnoměrné rozložení výkonu s ohledem na náklady na výrobu a ekonomii přenosu.

Soustava je řešena a provozována okružně a je propojena s Evropskou sítí provozovatelů přenosových soustav elektřiny (ENTSO-E), což má pozitivní vliv na stabilitu soustavy a spolehlivost dodávky elektrické energie do uzlů distribuční soustavy. Paralelně k nadřazené soustavě jsou přes elektrické stanice připojeny lokální výrobní větších a velkých výkonů: jaderné, klasické tepelné, plynové i velké vodní elektrárny. Pro přenos energie se používají výhradně venkovní vedení o napěťových hladinách 400 kV a 220 kV. Síť 400 kV tvoří podstatnou část ES. Prochází podélně celou Českou republikou a v současné době

je celková délka vedení této napěťové hladiny 3508 kilometrů (k 20. 10. 2013). Síť 220 kV je méně rozlehlá – celková délka vedení je 1910 kilometrů. Z ekonomického a hlavně pak z provozního hlediska je síť 220 kV méně výhodná a proto od roku 1970 nedochází k jejímu rozvoji, ale pouze k nutné údržbě. Dnes plní převážně úlohu záložních a doplňkových vedení. K přenosové soustavě patří 41 rozvoden a celkem 71 transformátorů. Celkový instalovaný transformační výkon je 19 980 MVA. Celkový kompenzační výkon tlumivek na hladinách 400 kV, 35 kV a 10 kV je 1346,2 MVAR. [3]

O provoz, rozvoj a údržbu nadřazené soustavy se stará společnost ČEPS, a.s., jejímž jediným akcionářem je stát Česká republika. Výkon akcionářských práv provádí z pověření státu Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. ČEPS, a.s. také spolupracuje s provozovateli přenosových soustav v Evropě a stará se o přidělování přeshraniční přenosové kapacity formou aukcí. [7] [10]

2.2 Distribuční soustava

Distribuční (rozvodná) soustava slouží k distribuci elektrické energie spotřebitelům, tj. k napájení průmyslových závodů, elektrické trakce, zemědělství, nevýrobní sféry a domácností v požadovaném čase, množství a místě při požadované kvalitě a spolehlivosti dodávky. Rozvodná soustava tvoří podstatnou část elektrizační soustavy. Je napájena z uzlů přenosové soustavy a také z distribuovaných zdrojů. Distribuované zdroje jsou výrobní menších výkonů převážně místního charakteru: podnikové elektrárny, malé vodní a větrné elektrárny, kogenerační jednotky, elektrárny využívající geotermální energii nebo biomasu a také fotovoltaické zdroje, které společně s malými větrnými elektrárnami v poslední době svými výkonovými výkyvy způsobují v sítích distribuční soustavy značné potíže a mají vliv na její celkovou stabilitu. Páteří soustavy je síť s napěťovou úrovní VVN 110 kV, která se větví na síť VN 35 kV, používanou převážně ve východních Čechách, a síť 22 kV zastoupenou ve významné části České republiky. V distribučních stanicích dochází k transformaci napětí 22/6 kV (35/10 kV) pro napájení menších obcí nebo větších odběratelů, např. průmyslových závodů. Do distribuční soustavy patří také sítě s napěťovou úrovní NN 0,4 kV. Na hladinu NN jsou napojeny převážně domácnosti a další menší odběry zejména nevýrobní sféry.

Síť 110 kV a sítě VN jsou z důvodu větší přehlednosti provozovány paprskovým nebo průběžným rozvodem, jejich technické řešení a uspořádání ale umožňuje provoz okružně, čímž se výrazně zvyšuje spolehlivost dodávky. Venkovské sítě NN jsou provozovány paprskovým (průběžným) rozvodem, husté městské sítě jsou, opět s ohledem na spolehlivost dodávky, provozovány jako mřížové. [7] [10]

Na provozu distribuční soustavy České republiky se podílejí společnosti ČEZ Distribuce, a.s. (převážná část ČR), E.ON Distribuce, a.s. (jižní Čechy a Morava) a PREdistribuce, a.s. (Praha).

2.2.1 Požadavky na síť distribuční soustavy

Požadavky na síť distribuční soustavy vycházejí z definice její funkce. V dnešní době je kladen velký důraz nejen na spolehlivost dodávky a kvalitu elektrické energie, jež mají zásadní vliv na správnou funkci všech elektrických spotřebičů připojených k distribuční soustavě, ale také na ekonomii rozvodu elektrické energie a to jak z pohledu prvotních investic do výstavby, tak i z pohledu samotného provozu a údržby energetických zařízení.

Kvalita elektrické energie

Kvalita elektrické energie je dána provozními hodnotami systémových veličin U_n a f .

Frekvence sítě by měla být pokud možno stálá a měla by odpovídat hodnotě $f = 50 \text{ Hz}$. Za normálních provozních podmínek musí být odchylka od jmenovitého kmitočtu maximálně do $\pm 1\%$ po 99,5% roku. O udržení frekvence v těchto stanovených mezích se stará primární a sekundární regulace. Velikost a stálost síťové frekvence není možné v distribuční soustavě ovlivnit, protože je dána zdroji pracujícími do nadřazené soustavy – jedná se o tzv. globální parametr elektrizační soustavy. Každá změna frekvence má za následek změnu velikostí činných i jalových výkonů v soustavě, popř. od určité velikosti odchylky ovlivnění funkce některých zařízení.

Z pohledu distribuční soustavy je důležitým parametrem kvality elektrické energie napájecí napětí. Na rozdíl od frekvence je napětí lokální parametr a lze ho tedy ovlivnit na úrovni distribuční soustavy vhodným způsobem regulace. Cílem je udržet jmenovité napájecí napětí U_n pokud možno stálé, bez kolísání a poklesů, v normou daných mezích, protože provoz elektrických zařízení na výrazně jiném než jmenovitém napětí, které může mít dokonce vlivem vyšších harmonických deformovanou napěťovou křivku, může mít nepříznivý dopad na jejich správnou funkčnost a také životnost.

Faktory, které mají vliv na výsledný tvar a velikost napěťové křivky napájecího napětí:

Odchytky napětí Odchytky v síti vznikají v důsledku úbytků napětí na energetických zařízeních určených k rozvodu elektrické energie, především pak na dlouhých venkovních vedeních, transformátorech a reaktorech, a jsou proto závislé na rozložení sítě, její topologii a také na charakteru spotřebičů. Normou dovolená odchylka v distribučních sítích VN a NN je až $\pm 10\% U_n$.

Napětí lze v dovolených mezích udržet hned několika prostředky: vhodně nastavenými regulátory napětí na regulačních transformátorech 110 kV $\pm 8 \times 2\% / VN$, jejichž nastavení se mění automaticky i pod zatížením, a odbočkami na distribučních transformátorech VN/NN, které lze měnit pouze v několika stupních a bez zatížení; kompenzací jalového výkonu na straně provozovatele distribuční soustavy, ale i větších odběratelů; případnými dílčími úpravami částí soustavy, u kterých jsou odchylky napětí výrazné nebo se jejich velikost často mění.

Kolísání napětí Pojmem kolísání napětí se rozumí sled rychlých většinou periodických změn napájecího napětí, přičemž tyto změny nepřekračují dovolenou odchylku $\pm 10\% U_n$. Vzniká hlavně v průmyslovém sektoru na strojích a zařízeních s proměnným odběrem s frekvencí změn nižší, než je frekvence sítě, a odtud se pak šíří směrem od proměnlivého odběru k napájecí síti.

Relativní změna napětí d :

$$d = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \quad (2.1)$$

kde ΔS_A – změna výkonu zátěže, ΔS_{kV} – zkratový výkon v místě připojení.

Přesněji:

$$d = \frac{1}{U_n^2} \cdot (R_{kV} \cdot \Delta P_A + X_{kV} \cdot \Delta Q_A) \quad (2.2)$$

Kolísání napájecího napětí se nejvíce projevuje na světelných spotřebičích, kde způsobuje jev zvaný flickr (blikání). Flickr je definovaný jako *změna zrakového vnímání vyvolaná časovou změnou světelného toku svítidel* [10, str. 132] a je závislý na velikosti d a četnosti r změn napájecího napětí a také na délce trvání jevu. K vyhodnocení účinků blikání (kolísání napětí) na lidský organismus a citlivé elektronické přístroje se využívají veličiny: *míra vjemu flickru* P a *činitel flickru* A , pro něž platí: $A = P^3$. Oba činitele se vyhodnocují pro různé časové intervaly:

$$P_{st} = \sqrt[3]{\frac{\sum t_f}{10min}} \quad (2.3)$$

Pro nepravidelné a nepravoúhlé změny napětí je P_{st} :

$$P_{st} = \sqrt[3]{\frac{\sum 2,3 \cdot (100 \cdot d \cdot F)^3}{10min}} \quad (2.4)$$

kde P_{st} – krátkodobá míra vjemu flickru vtažená na časový interval 10 minut, d – relativní změna napětí [p.j.], F – činitel tvaru podle PNE 33 3430.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum 2,3 \cdot (100 \cdot d \cdot F)^3}{120min}} \quad (2.5)$$

kde P_{lt} – dlouhodobá míra vjemu flickru vztažená na časový interval 120 minut.

Kolísání napětí se dá omezit připojením problematického odběru do vyšší napěťové hladiny, zvýšením zkratového výkonu sítě v místě připojení S_{kV} (2.1), nebo použitím zařízení pro rychlou dynamickou kompenzaci jalového výkonu. [10]

Vyšší harmonické Vyšší harmonické generují nelineární spotřebiče, které i při klasickém sinusovém napájecím napětí odebírají ze sítě proud s nesinusovým průběhem. Patří mezi ně zejména obloukové pece, zařízení využívající výkonovou elektroniku (usměrňovače, výkonové měniče, atd.) a další elektronická zařízení. Odebíraný proud lze rozložit na jednotlivé složky se sinusovým průběhem, rozdílnou amplitudou a frekvencí, jež nejčastěji odpovídá celistvému násobku frekvence základní harmonické s $f = 50 \text{ Hz}$. Složky s celistvými násobky frekvence základní harmonické se nazývají vyšší harmonické nebo harmonické řádu h . Ve spektru odebíraného proudu se mohou vlivem proměnného zatížení nelineárních spotřebičů objevit i mezilehlé harmonické (interharmonické), jejichž frekvence není celistvým násobkem základní frekvence sítě. Klasickým příkladem interharmonické je ovládací frekvence systému HD0 s $f = 216\frac{2}{3} \text{ Hz}$, která je ale do sítě dodávaná záměrně za účelem regulace a řízení soustavy.

Celkový odebíraný proud vyjádřený Fourierovou řadou:

$$i(t) = \sum_{h=0}^{\infty} i_h(t) \quad (2.6)$$

Pro $h > 0$ platí:

$$i(t) = \sum_{h=0}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_h \cdot \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (2.7)$$

Nelineární spotřebiče lze tedy pokládat za zdroje proudů vyšších harmonických. Jednotlivé složky celkového proudu dodávaného do sítě následně způsobují na impedanci sítě Z_h úbytky napětí s odpovídajícím řádem harmonické h :

$$U_h = Z_h \cdot I_h \quad (2.8)$$

Vzniklé harmonické úbytky napětí U_h následně podle principu superpozice deformují původní křivku napájecího napětí ve společném napájecím bodě (PPC) a tím negativně působí na provoz ostatních spotřebičů připojených k síti.

Úroveň vyšších harmonických v konkrétní oblasti není konstantní, protože se mění v závislosti na počtu nelineárních zařízení připojených do společného bodu, amplitudě a fázi harmonických proudů dodávaných do sítě a samozřejmě na velikosti impedance sítě Z_h pro konkrétní harmonickou řádu h . Výsledná úroveň se hodnotí buď individuálně, podle efektivních hodnot jednotlivých harmonických napětí vztažených ke jmenovitému (dohodnutému) napětí podle normy ČSN EN 50160, nebo souhrnně s využitím *celkového činitele zkreslení* THD_u :

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (2.9)$$

Impedance sítě Z_h je závislá na řádu harmonické h , protože obsahuje indukčnosti a kondenzátory, které jsou silně frekvenčně závislé. Pro základní harmonickou má síť převážně induktivní charakter, ale pro některé další harmonické může mít i charakter kapacitní. Při určitých řádech harmonických mohou mezi induktivními a kapacitními prvky v síti vznikat rezonanční jevy:

- Sériová rezonance, která pro konkrétní řád harmonické představuje v podstatě zkrat. Harmonickým sériovým obvodem prochází velká hodnota proudu příslušné harmonické I_h , čímž dochází k proudovému a následně tepelnému přetěžování prvků, a je tedy nutné využít vhodného způsobu blokace, tj. úmyslného rozladění rezonančního obvodu s využitím ochranné tlumivky nebo hradícího členu. Zároveň je nutné zajistit, aby se rezonanční frekvence obvodu nepřiblížila frekvenci ovládacího signálu HDO, neboť by mohlo dojít k jeho *odsávání*.
- Paralelní rezonance, která pro konkrétní řád harmonické představuje v rozpojený obvod. Při paralelní rezonanci může napětí U_h nabývat velmi vysokých hodnot v případě, že se rezonanční frekvence obvodu shoduje s frekvencí některého harmonického proudu, a tím může výrazně deformovat křivku napětí a ovlivňovat tak činnost zařízení citlivých na tvar napájecí křivky .

Z výše uvedeného vyplývá, že vyšší a mezilehlé harmonické mají na elektrická zařízení negativní účinky související se zvýšenou efektivní hodnotou procházejícího proudu a přítomností harmonických napětí superponovaných na křivku napájecího napětí. Zvýšená hodnota průchozího proudu způsobuje přídavné ztráty při přenosu elektrické energie a snižuje životnost a využitelnost energetických zařízení. Životnost zařízení ovlivňují také harmonická napětí, která dielektricky namáhají izolace. V neošetřených sítích mohou harmonické ovlivňovat činnost systému HDO, kdy může docházet k odsávání signálu, tj. ke snižování jeho úrovně. S ohledem na zaměření této práce je potřeba také zmínit špatné účinky vyšších harmonických na správnou funkci elektrických ochrany, u nichž mohou způsobit vybavení ochrany i ve stavech, kdy by reagovat neměla, a na zhasnutí zemních spojení.

Celková efektivní hodnota procházejícího proudu:

$$I = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (2.10)$$

Omezení negativních účinků harmonických lze dosáhnout například zvýšením zkratového výkonu S_k v místě připojení problematického odběru k síti. Další možností je volba zapojení vinutí napájecího transformátoru jako D/yn, jež umožňuje přirozenou filtraci harmonické třetího řádu. V případě již existujících odběrů, u kterých není možné využít předchozích možností, se dají použít aktivní či pasivní filtry naladěné na konkrétní řád harmonické h .

Kromě velikosti a tvaru křivky napájecího napětí je pro kvalitu elektrické energie důležitá také jeho případná nesymetrie, která vzniká jako důsledek poruchových stavů nebo nesouměrného zatížení. *Nesymetrie napětí je stav třífázové sítě, při němž velikosti fázových napětí a/nebo úhly mezi po sobě jdoucími fázory napětí nejsou stejné.* [10, str.130] a je dána tzv. stupněm nesymetrie, tedy poměrem zpětné a sousledné složky napětí:

$$u_2 = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \quad (2.11)$$

Při dlouhodobém působení smí být stupeň nesymetrie maximálně $u_2 = 2\%$, protože větší nesymetrie znemožňují plné zatížení transformátorů a vedení, svými účinky způsobují přidavné ztráty na točivých strojích a zároveň mohou ovlivňovat i funkci řídicích a regulačních zařízení a ochran.

Spolehlivost dodávky elektrické energie

Spolehlivost dodávky je po kvalitě napětí dalším důležitým požadavkem na distribuční síť s to především z pohledu spotřebitelů elektrické energie. Dosáhnout nepřetržitého provozu u všech sítí distribuční soustavy je s ohledem na investiční náklady v podstatě nemožné, protože na takto rozlehlou soustavu působí příliš mnoho vnějších vlivů. Cílem je proto pokud možno minimalizovat počet poruch a jejich důsledky na minimum s tím, že u některých velmi důležitých provozů nesmí dojít k výpadku dodávky vůbec. Spolehlivost dodávky elektrické energie je vyjádřena třemi stupni zajištění dodávky:

První stupeň Platí pro spotřebiče, u kterých nesmí za žádných okolností dojít k přerušení dodávky elektrické energie, neboť zde může přerušení dodávky znamenat ohrožení lidských životů nebo značné hospodářské ztráty.

Druhý stupeň Platí pro spotřebiče, u kterých může přerušení dodávky elektrické energie způsobit podstatné snížení či dokonce úplné zastavení výroby a tedy velké hospodářské ztráty, jež ale nejsou tak vysoké jako ztráty vzniklé v sítích prvního stupně.

Třetí stupeň Platí pro spotřebiče, na které nejsou kladeny žádné speciální nároky.

Obecně lze zvýšit spolehlivost části soustavy vhodnou volbou kvalitních zařízení s nízkou poruchovostí, zálohováním vedení a transformátorů, volbou rozveden s více systémy přípojníc, volbou vhodného typu sítě či vybavením důležitých částí sítě automatikami mžikového obnovení napětí.

Automatiky opětovného zapnutí se používají v distribuční soustavě v sítích VVN a VN venkovního vedení, kde slouží pro opětovné zapnutí části sítě a obnovení provozu po odeznění přechodné nebo semipernamentní poruchy na vedení, které v případě venkovního vedení tvoří i více než 80 % všech poruch. Přechodné poruchy vznikají náhodným přiblížením fázových vodičů například vlivem nepříznivých povětrnostních podmínek nebo po úderu blesku. Po vzniku poruchy se zapálí oblouk, který se ale po vypnutí postižené

části vedení sám uhasí a porucha odezní. Po dostatečně dlouhém časovém intervalu, během kterého se stačí okolní prostředí deionizovat a obnovit tak svou izolační pevnost, se porucha již neobjeví. Semipernamentní jsou poruchy, jež nezaniknou okamžitě po prvním vypnutí a zapnutí vedení automatikou opětovného zapnutí, ale k jejich odstranění je většinou nutné provést několik cyklů OZ.

U kabelových vedení je vznik poruchy přechodného charakteru nepravděpodobný, proto se zde tyto automatiky nevyužívají.

V účinně uzemněné síti VVN (i 110 kV) se používají jednopólové automatiky OZ, protože zde většinou není nutné vypínat více než jednofázový zemní zkrat. I v případě poruchy tak zůstávají v provozu dvě nepostižené fáze, které jsou dočasně schopny udržet stabilitu a synchronismus soustavy. V případě neúspěšného jednopólového OZ se vedení vypne úplně. U sítích izolovaných nebo kompenzovaných se pak běžně používá trojpólová automatika OZ, neboť zde nemůže vzniknout jednofázový zemní zkrat.

Použití automatik OZ má tedy pozitivní vliv nejen na spolehlivost dodávky elektrické energie koncovým uživatelům, jelikož zkracuje dobu trvání poruchy na minimum, ale také na stabilitu elektrizační soustavy jako celku. [10]

Přehlednost a jednoduchost sítě

Společným rysem sítí distribuční soustavy je snaha o jejich maximální jednoduchost a přehlednost. Jednoduchá a přehledná síť se dobře udržuje, chrání, její uspořádání zamezuje zbytečným chybám při obsluze, řízení a rekonfiguraci, a tím zvyšuje bezpečnost obsluhy a dalších osob. V jednoduché a přehledné síti se navíc dobře vyhledávají a odstraňují trvalé poruchy na vedeních. Nevýhodou sítí s minimálním počtem energetických zařízení je nízký stupeň zabezpečení dodávky a tedy nízká spolehlivost přenosu elektrické energie. Výsledné řešení by mělo být kompromisem mezi jednoduchostí sítě a její spolehlivostí, s ohledem na požadovaný stupeň zajištění dodávky.

Ekonomický návrh a provoz sítě

Při provozu sítí distribuční soustavy je velmi důležitá hospodárnost přenosu elektrické energie při standardních i nestandardních stavech, které vznikají nejčastěji při neplánovaných změnách zatížení. Obecně lze hospodárnost přenosu zvýšit zmenšením činných a jalových ztrát na vedeních, čehož se dá dosáhnout ideální konfigurací sítě: využitím optimálního dělení, volbou vhodné napěťové hladiny, volbou ideálního počtu distribučních transformátorů a samozřejmě správně navrženou kompenzací účinníku.

Návrh sítě by měl tedy zohledňovat všechny požadavky na elektrické síť distribuční soustavy s ohledem na finanční náročnost investic na vybudování a provoz. Při návrhu sítě je třeba správně zvolit nejen vhodnou topologii sítě a elektrickou stanici s příslušným počtem systémů přípojníc, ale také vhodné průřezy vodičů, počet transformátorů a dalších energetických zařízení a je také nutné počítat s možným rozšířením sítě o nové odběry. [10]

2.2.2 Rozdělení sítí distribuční soustavy

Sítě distribuční soustavy se dělí podle: napěťové úrovně, funkce, spolehlivosti dodávky, typu elektrického vedení, topologie sítě a způsobu provozu uzlu transformátoru. [10]

Podle napěťové úrovně

Jak už jsem zmínil v předcházející kapitole, pro přenos elektrické energie se v distribuční soustavě používají napěťové úrovně VVN (110 kV), VN (22 kV resp. 35 kV, 6 kV resp. 10 kV, 3 kV) a NN (0,4 kV). Síť VVN 110 kV slouží jako nadřazená soustava pro napájení měst a velkých průmyslových sítí. Po vedeních s úrovní VN se energie přenáší do distribučních transformačních stanic VN/NN odkud je pak přiváděna koncovým spotřebitelům.

Podle funkce

Rozdělení podle funkce má význam pouze pro sítě VVN a VN. Vedení se dělí na hlavní, která vycházejí ze vstupní napájecí elektrické stanice a ústí do podružných spínacích stanic, a podružná, která z podružných stanic vycházejí. Z podružných vedení jsou pak vyvedeny odbočky k distribučním transformovně VN/NN. Vstupní napájecí elektrické stanice jsou buď napájecí transformovny (VT) nebo vstupní (hlavní) rozvodny (VR). Rozdělení stanic na hlavní a podružné má vliv na vybavení stanic spínacími prvky, ochranami a měřicími přístroji. Stejně rozdělení u elektrických vedení pak určuje typ sítě a průřezy vodičů. [10]

Podle spolehlivosti dodávky

Obecně se sítě podle spolehlivosti dodávky dělí, v souladu se stupni zajištění dodávky, které jsem podrobněji rozepsal v předcházející kapitole, na sítě s rezervou (více transformátorů, výkonová rezerva, záložní napájení, dvojité vedení, atd.) a bez rezervy. Rozdíl mezi sítěmi vyplývá také ze způsobu připojení rezervy, které může být ruční (dojde k přerušení dodávky) nebo automatické, při kterém k výpadku nedojde a síť tak pracuje bez přerušení dodávky elektrické energie. [10]

Podle typu elektrického vedení

Pro přenos elektrické energie se v distribuční soustavě používají venkovní i kabelová vedení. Venkovní vedení s holými (AlFe, ACCR) nebo izolovanými vodiči (PAS) se používají pro napěťové hladiny 100 kV, 22 kV (35 kV), 6 kV (10 kV), ale i pro 0,4 kV. Pro sítě městských a venkovských rozvodů (6 kV, 10 kV, 0,4 kV) se používají i vedení kabelová a venkovní kabelová (AES). Kabelová vedení pro vyšší napěťové úrovně se používají jen výjimečně, především ve velkých městech a průmyslových závodech.

Venkovní vedení se skládají z fázových vodičů, stožárů, konzol a izolátorů. Mezi další části patří ochrany proti přepětí (svodiče přepětí, ochranná jiskřiště, zemnicí lana), pří-

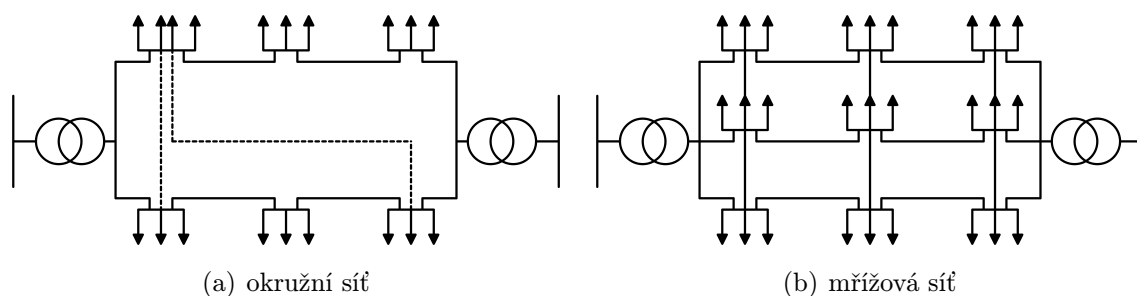
pravky a zařízení sloužící pro údržbu a revize vedení, různé plastové přepážky nebo kryty, které mají zamezit úhynu ptactva po úrazu elektrickým proudem a tím i předejít případné poruše, a také výstražné koule, které slouží k vizuálnímu zvýraznění vedení v blízkosti letišť, komunikací a vodních toků. Venkovní vedení se vyznačují především menšími investičními náklady na vybudování a údržbu vedení o vyšších napěťových hladinách, přehledností a jednoduchostí a s tím související snadnou lokalizací a eliminování většinou přechodných poruch. Nevýhodou řešení rozvodu formou venkovního vedení je především velká náročnost na prostor, větší poruchovost a také horší hospodárnost přenosu. V porovnání se stejně dlouhým kabelovým vedením zde dochází k větším úbytkům napětí a také k větším jalovým ztrátám.

Kabelová vedení se používají pro napěťové úrovně VN a především pak NN ve městech a v sítích průmyslových závodů. Kabelové sítě vynikají svou vysokou spolehlivostí, která je ale podmíněna vysokými investičními náklady. Vysoké procento poruch (uvádí se až 90 %) na kabelových vedeních je trvalých, kdy dochází k porušení izolace fázových vodičů a následnému vícefázovému zkratu. [10]

Podle topologie sítě

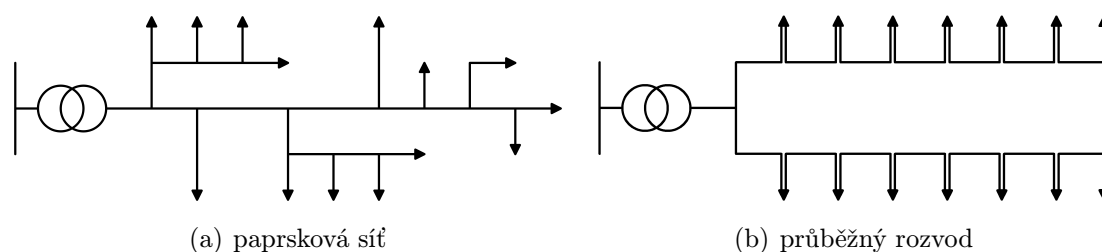
V distribuční soustavě se sítě provozují jako uzavřené nebo otevřené. Výběr konkrétní topologie sítě závisí na způsobu provozu z hlediska rozdělování výkonu, hospodárnosti přenosu, bezpečnosti a spolehlivosti dodávky.

Uzavřené sítě se používají tam, kde je požadována vysoká spolehlivost dodávky. Jsou napájeny z více míst na sobě nezávislými napáječi a jednotlivé vývody mohou být vzájemně propojeny. Uzavřené sítě jsou konstrukčně složité – náklady na výstavbu a údržbu jsou proto vysoké. Kromě vysoké spolehlivosti vynikají tyto sítě také malými ztrátami a úbytky napětí, jsou to tedy tzv. tvrdé sítě. Mezi jasné nevýhody patří zejména vysoké hodnoty zkratových proudů a složité nastavení selektivity chránění. Klasické uzavřené sítě jsou sítě: mřížové, okružní, hřebenové a jejich další modifikace. Používají se v přenosové soustavě, průmyslových závodech a také v husté městské zástavbě, kde se očekává nerovnoměrné zatížení vývodů a kolísání napětí, které jsem popsal v kapitole 2.2.1.



Obr. 2.1: Jednoduché schématické znázornění základních způsobů provozu sítě.

Otevřené sítě jsou napájeny pouze z jednoho místa. Jednotlivé vývody nejsou nijak propojeny, elektrická energie je spotřebiči dodávána jen jednou cestou. Tyto sítě splňují požadavek na jednoduchost a přehlednost, ale mají nízkou spolehlivost dodávky, na vývodech vznikají velké úbytky napětí a ztráty. Výhodou jejich konstrukčního uspořádání jsou nízké investice do výstavby a údržby vedení, nízké hodnoty zkratových proudů a snadné nastavení selektivity jištění. Mezi sítě průběžné patří sítě: paprskové, průběžné a stromkové. Používají se v distribuční soustavě na napěťových úrovních NN, VN i VVN a to v průmyslových rozvodech a u rozvodů venkovského vedení. Sítě průběžné se používají speciálně u kabelových rozvodů, rozvodů veřejného osvětlení atp. [10]



Obr. 2.2: Schématické znázornění dvou základních typů otevřených sítí.

Podle způsobu provozu uzlu sítě

Způsob provozu uzlu sekundárního vinutí napájecího transformátoru je jedním z důležitých technicko-ekonomických parametrů každé sítě, který v podstatě definuje její chování během nesymetrických poruchových stavů. Během normálního provozu v bezporuchovém stavu se ale rozdíl mezi jednotlivými způsoby provozu téměř neprojeví.

Obecně může být uzel sítě uzemněný nebo izolovaný od země, přičemž uzemněný může být přímo (účinně) nebo nepřímo (neúčinně) přes kompenzační tlumivku nebo uzlový odporník. Páteřní síť naší distribuční soustavy (síť 110 kV) a sítě NN jsou provozovány s přímo uzemněným uzlem. Sítě VN, které tvoří převážnou část distribuční soustavy, jsou provozovány jako kompenzované. Tyto sítě jsou nejčastěji uzemněné přes zhášecí tlumivku s přípínatelným odporníkem na její sekundární stranu. Některé lokální distribuční soustavy, např. blokové vlastní spotřeby elektráren, důlní sítě a další sítě malého rozsahu, jsou provozovány s uzlem izolovaným od zemnicí soustavy. V současné době se ale zejména u důlních sítí přechází na sítě kompenzované. [11]

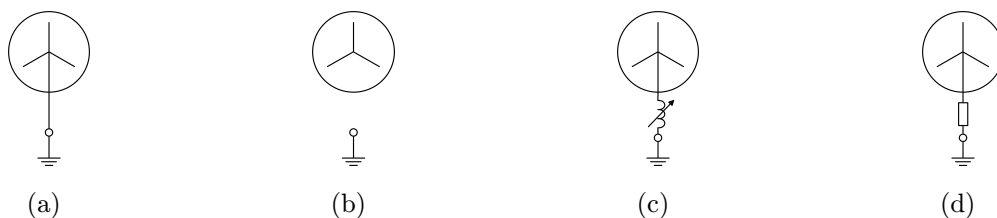
Jednotlivé možné způsoby provozu podrobněji rozeberu v následující kapitole.

3

Způsoby provozu uzlu sítě

Způsob provozu uzlu definuje nejen chování sítě při nesymetrických stavech, ale také možnosti jejího provozu z hlediska bezpečnosti, chránění, dimenzování či nepřetržitosti dodávky, protože právě způsob uzemnění má zásadní vliv na velikost poruchového proudu a napěťové poměry, jež jsou určující pro posouzení zmíněných hledisek.

V sítích propojených se zemnicí soustavou přímo či přes uzlový odporník vzniká při vodivém spojení se zemí jednofázový zkrat, který je charakteristický vysokou hodnotou poruchového proudu, jež může ohrozit bezpečnost osob nebo vést k destrukci energetických zařízení. V sítích izolovaných nebo neúčinně uzemněných přes kompenzační tlumivku vzniká při stejné jednofázové poruše jednofázové zemní spojení, při němž je hodnota poruchového proudu mnohem menší než při jednofázovém zkratu, ale současně zde dochází ke zvýšení napětí nepostižených fází, které poté více namáhají izolace vodičů.

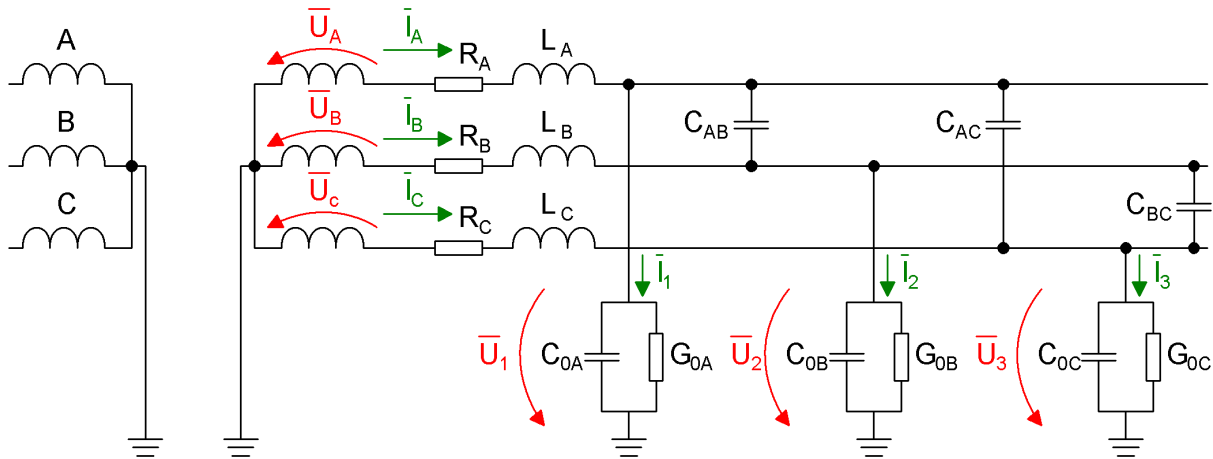


Obr. 3.1: Příklady možných způsobů uzemnění nulového bodu soustavy.

Způsob uzemnění nulového bodu transformátoru má tedy největší vliv na možnost provozu sítě po vzniku a během jednofázové zemní poruchy. Zatímco sítě uzemněné přímo nebo přes uzlový odporník je nutné kvůli vysoké hodnotě poruchového proudu vypnout okamžitě po vzniku poruchy, sítě izolované od země či neúčinně uzemněné přes kompenzační tlumivku je teoreticky možné provozovat po dobu potřebnou k samovolnému odeznění nebo vyhledání a odstranění poruchy. U sítí uzemněných přes tlumivku je ale tento čas omezen jejím dovoleným oteplením, ke kterému dochází vlivem průchodu proudu induktivního charakteru. Neúčinné uzemnění uzlu sítí distribuční soustavy je tedy velmi výhodné z hlediska nepřetržitosti dodávky elektrické energie, neboť většina poruch v těchto sítích je přechodného charakteru a proto je většinou není třeba odpojovat.

3.1 Síť s účinně uzemněným uzlem

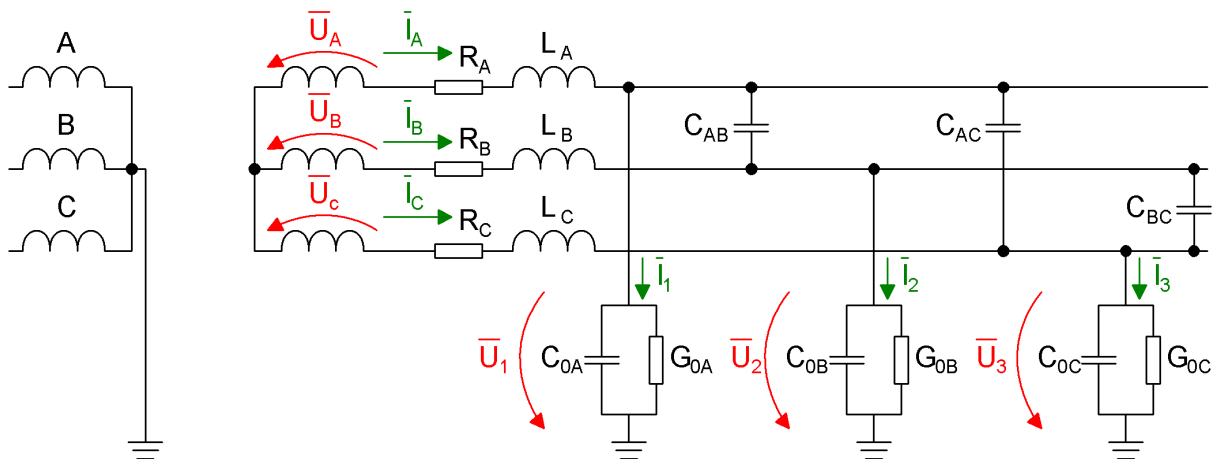
Uzel sekundární strany transformátoru je u této sítě spojen se zemnicí soustavou téměř bezimpedanční spojkou ($\bar{Z}_N \rightarrow 0$). U nás se tento druh provozu uzlu používá na napěťové hladině ZVN, VVN (110 kV) a téměř výhradně na hladině NN (0,4 kV). [10]



Obr. 3.2: Obecné schéma sítě s přímo uzemněným uzlem.

3.2 Síť s izolovaným uzlem

Mezi uzlem sítě s izolovaným uzlem a zemnicí soustavou je v ideálním případě nekonečná impedance ($\bar{Z}_N \rightarrow \infty$). Tento způsob provozu je vhodný pouze pro malé sítě VN a NN (0,5 kV popř. 0,69 kV) převážně průmyslových provozů se zemním kapacitním proudem $I_C = I_P > 20$ A, přičemž od $I_C > 10$ A se doporučuje jeho kompenzace. [10]



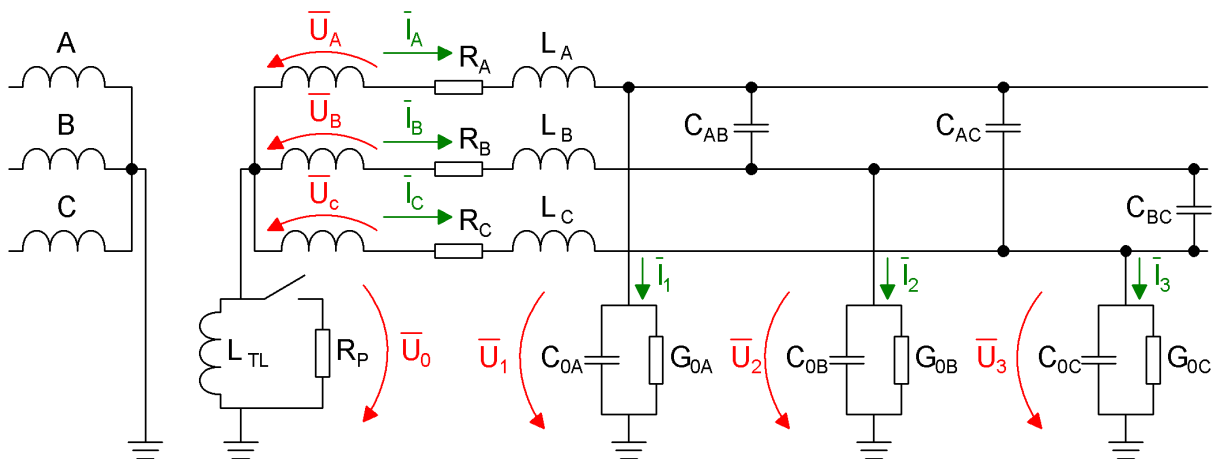
Obr. 3.3: Obecné schéma sítě s izolovaným uzlem.

3.3 Síť s neúčinně uzemněným uzlem

Sítě s neúčinně uzemněným uzlem mají mezi nulovým bodem transformátoru a zemnicí soustavou zapojenu nenulovou impedanci ($\bar{Z}_N \neq 0$). Obecně mohou být tyto sítě uzemněny přes zhášecí tlumivku s automatickým přeladováním indukčnosti nebo přes pevně nastavený uzlový odporník. Uzemnění uzlu přes zhášecí tlumivku se používá u sítí s kapacitním proudem převyšujícím hodnotu $I_C > 10 A$ a to až do jeho mezní hodnoty, která se liší pro každý druh elektrického vedení: pro venkovní vedení je horní mez kapacitního proudu stanovena na $100 A$, pro smíšená vedení na $300 A$ a pro čistě kabelová vedení je tato mez stanovena na $300 A$. Síť, u kterých je překročena tato mezní hodnota kapacitního proudu se používá uzemnění uzlu přes uzlový odporník. [10] [11]

3.3.1 Síť neúčinně uzemněná přes zhášecí tlumivku

Zhášecí (kompenzační) tlumivka se připojuje mezi uzel napájecího transformátoru a zemnicí soustavu rozvodny. V případě, že uzel transformátoru není vyveden, lze zhášecí tlumivku připojit k uměle vytvořenému uzlu třífázové nulové tlumivky nebo k uzlu nezátíženého pomocného transformátoru v zapojení YNd1, které jsou připojeny k přípojnicím hlavní napájecí rozvodny se samostatnou výstrojí jako odběrová odbočka. [11, str. 77] Slouží ke kompenzaci kapacitního poruchového proudu I_P tak, aby místem poruchy procházel pouze reziduální poruchový proud převážně činného charakteru. Výsledný reziduální proud je obvykle tvořen pouze 3 % až 10 % původního poruchového proudu. [11]



Obr. 3.4: Obecné schéma sítě s neúčinně uzemněným uzlem přes kompenzační tlumivku.

V naší distribuční soustavě se používá většinou centrální kompenzace, kdy je mezi uzel transformátoru a zemnicí soustavu připojena jediná kompenzační tlumivka. Velmi výjimečně se lze setkat s vícero paralelními tlumivkami připojenými do jednoho uzlu. Kromě klasických kompenzačních tlumivek se u nás používají následující modifikace [11]:

- Klasická kompenzační tlumivka s připínáním pomocného odporníku na sekundární straně. Odporník je určený k navýšení činné složky poruchového proudu. Občas se

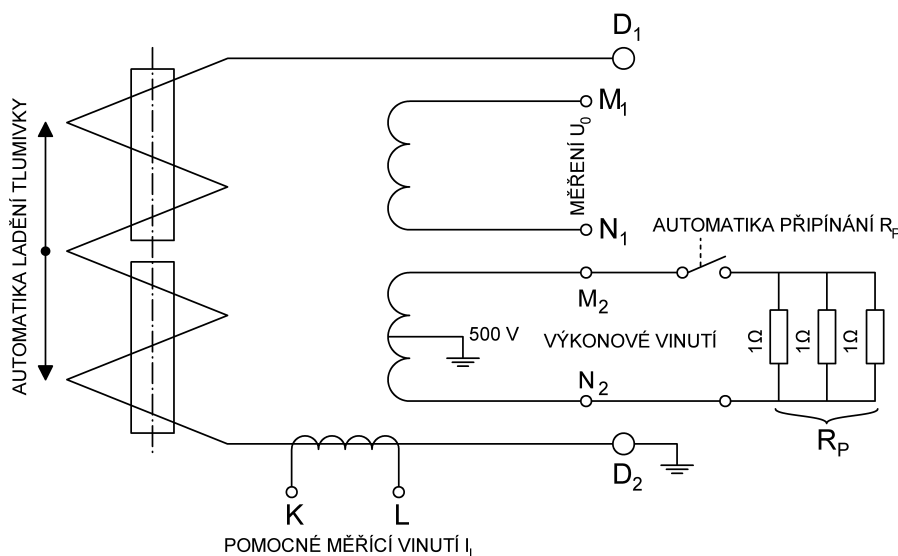
odporník připíná i na primární stranu tzv. „maďarský“ odporník.

- Tlumivka vybavená automatikou pro přizemnění postižené fáze v napájecí rozvodně.
- Systém Švédské neutrály (Swedish Neutral).

3.3.1.1 Kompenzační tlumivka

Běžná kompenzační tlumivka obsahuje:

- Primární vinutí, které je automatickou změnou vzduchové mezery nastavováno na požadovanou hodnotu indukčnosti tlumivky L_T .
- Pomocné vinutí KL , ke kterému se připojuje měřící transformátor určený k měření kompenzovaného proudu.
- Pomocné vinutí M_1N_1 , které slouží k měření netočivé složky napětí U_0 .
- Výkonové vinutí M_2N_2 , k němuž se obvykle buď ručně nebo automaticky připojuje většinou soustava paralelně spojených rezistorů. Sestava odporníků odpovídá zadání provozovatele sítě, ale většinou se volí o ohledem na časté využívání digitálních ochran tak, aby byla celková hodnota rezistance odporové dekády rovna právě 1Ω .



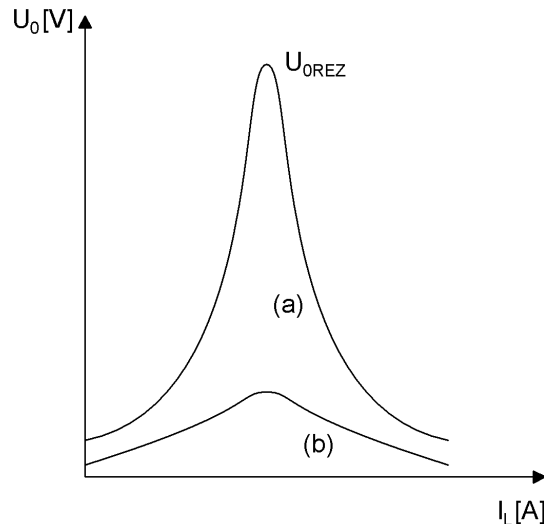
Obr. 3.5: Zjednodušené vnitřní schéma běžné kompenzační tlumivky.

Kompenzační tlumivka určená ke kompenzaci zemních poruchových proudů ve venkovních nebo smíšených sítích s kapacitním proudem $I_C > 50 A$ by tedy měla obsahovat *samočinnou regulaci vyladění tlumivky s možností manuální regulace proudu tlumivkou, zobrazení ukazatele proudového nastavení tlumivky i napětí na tlumivce pro sledování vyladěného stavu a automatiku připínání odporu pro navýšení činné složky poruchového proudu.* [11, str. 77] [11]

K nastavení kompenzační tlumivky je třeba znát rezonanční křivku sítě.

Rezonanční křivka soustavy

Rezonanční křivka soustavy je závislost uzlového napětí U_0 na kompenzačním proudu tlumivky I_L . Průběh rezonanční křivky se nejčastěji zjišťuje plynulým přeladováním kompenzační tlumivky v bezporuchovém stavu, během kterého se na ukazatelích odečítají hodnoty U_0 a I_L . Nezbytným předpokladem úspěšného vynesení rezonanční křivky je dostatečně nesymetrická síť. Pokud je třeba odvodit rezonanční křivku u velmi symetrické sítě, například u kabelových vedení, je potřeba zavést umělou nesymetrii.



Obr. 3.6: Příklad rezonanční křivky soustavy. (a) venkovní vedení (b) kabelové vedení.

Z rezonanční křivky lze pak snadno získat důležité hodnoty: celkový kapacitní proud sítě I_C , celkový svodový proud I_W , činitel útlumu α a činitel nesymetrie ε . [11]

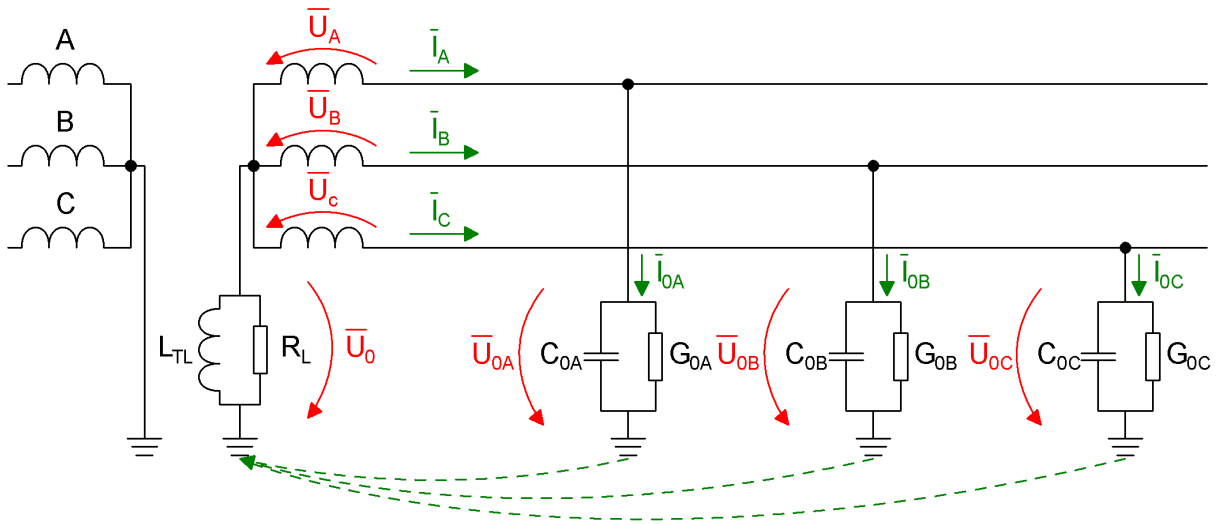
Ladění kompenzační tlumivky

V ČR se ve většině sítí VN distribuční soustavy používají kompenzační tlumivky s automatickým laděním indukčnosti L_T . Cílem ladících automatik je dosažení vyladěného stavu sítě, jenž nastává při dosažení rezonančního bodu sítě U_{0REZ} , při kterém je hodnota poruchového proudu minimální a současně hodnota napětí uzlu proti zemi U_0 maximální. Ladění tlumivek probíhá za provozu a to při každé změně sítě. Aby nedocházelo k automatickému přeladování tlumivky během změn napětí U_0 , které přímo nesouvisí s rozladěním sítě, jsou ladící automatiky vybaveny zpožďujícím členem, díky kterému reagují pouze na změny trvající déle než je předem zvolené časové zpoždění. [11]

Hodnotu napětí U_0 lze odvodit z modelu skutečné neidealizované sítě. Podrobné odvození je uvedeno v literatuře [11], v následujícím se proto omezím jen na uvedení nejdůležitějších vztahů.

Pro napětí na tlumivce, jež fakticky odpovídá napětí U_0 , platí:

$$\bar{U}_0 = -\bar{Z}_L \cdot I_L \quad (3.1)$$



Obr. 3.7: Schéma sítě uzemněné přes zhašecí tlumivku.

S využitím prvního a druhého Kirchhoffova zákona lze dle schématu psát:

$$\begin{aligned}\bar{U}_0 &= -\bar{Z}_L \cdot (\bar{I}_{0A} + \bar{I}_{0B} + \bar{I}_{0C}) \\ &= -\bar{Z}_L \cdot [\bar{Y}_A(\bar{U}_A + \bar{U}_0) + \bar{Y}_B(\bar{U}_B + \bar{U}_0) + \bar{Y}_C(\bar{U}_C + \bar{U}_0)]\end{aligned}\quad (3.2)$$

Po vyjádření fázových napětí s využitím operátoru natočení $\bar{U}_A = \bar{U}$, $\bar{U}_B = a^2\bar{U}$, $\bar{U}_C = a\bar{U}$ a dosazení do vztahu 3.2 pro napětí U_0 :

$$\bar{U}_0 = -\frac{\bar{U}(\bar{Y}_A + a^2\bar{Y}_B + a\bar{Y}_C)}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \frac{1}{\bar{Z}_L}}\quad (3.3)$$

Poměrná hodnota napětí u_0 :

$$\bar{u}_0 = \frac{\bar{U}_0}{\bar{U}} = -\frac{\bar{Y}_A + a^2\bar{Y}_B + a\bar{Y}_C}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \frac{1}{\bar{Z}_L}}\quad (3.4)$$

Po rozkladu příčných admitancí jednotlivých fází a dalších úpravách uvedených v [11] lze z předpisu pro \bar{u}_0 získat poměrné parametry sítě:

Rozkladění v :

$$v = \frac{1}{\omega^2 L(C_A + C_B + C_C)} - 1\quad (3.5)$$

Tlumení d :

$$d = \frac{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}}{\omega(C_A + C_B + C_C)}\quad (3.6)$$

Vektor nesymetrie \bar{k}_0 :

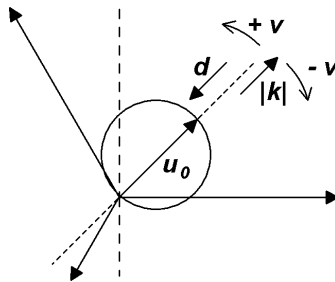
$$\bar{k}_0 = \frac{\bar{Y}_A + a^2\bar{Y}_B + a\bar{Y}_C}{j\omega(C_A + C_B + C_C)}\quad (3.7)$$

Amplituda \bar{u}_0 vyjádřená pomocí poměrných parametrů:

$$|\bar{u}_0| = \frac{\bar{k}_0}{\sqrt{v^2 + d^2}} \quad (3.8)$$

Polohovou křivkou poměrného napětí \bar{u}_0 v komplexní rovině je tedy kružnice se středem v počátku souřadnic, jejíž průměr je dán poměrem celkové kapacitní nesymetrie \bar{k}_0 a parametru tlumení d . V ideálním vyladěném stavu je činitel rozladění rovný nule $v = 0$, proto pro \bar{u}_{0max} platí:

$$|\bar{u}_{0max}| = \frac{\bar{k}_0}{d} \quad (3.9)$$



Obr. 3.8: Znáornění poměrného napětí u_0 v komplexní rovině..

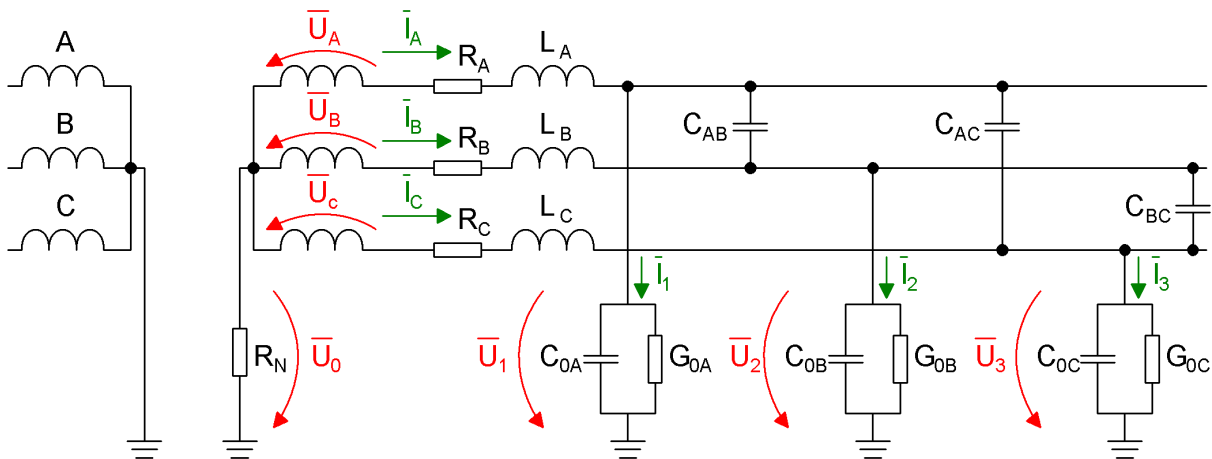
Většina ladících automatik používaných v našich sítích vyhledává rezonanční bod sítě, tedy hodnotu $|\bar{u}_{0max}|$. Problém s touto metodou nastává v sítích s malými přirozenými nesymetriemi, protože u nich nelze získat měřitelné hodnoty napětí $|\bar{u}_{0max}|$. Z tohoto důvodu se u novějších systémů používá sledování a měření polohové křivky pomocí parametru rozladění v , kdy i při malých nesymetriích a tedy i při nízkých hodnotách napětí $|\bar{u}_{0max}|$ je relativně dobře měřitelná úhlová změna napětí \bar{u}_0 v blízkosti rezonančního bodu. K určení rezonančního bodu poté stačí už pouze tři body na polohové křivce. Tato metoda je ale náročná na vybavení kompenzační tlumivky, která musí disponovat relativně přesným a citlivým laděním indukčnosti L_T . U méně citlivých tlumivek je možné s výhodou využít metodu injecktáže proudu do nulového bodu, kdy se před a během injecktáže měří hodnoty základních poměrných parametrů rozladění v , nesymetrie \bar{k}_0 a útlumu d . [11]

Kompenzační tlumivka s automatikou připínání odporníku

V ideálně vykompenzovaném stavu teče místem poruchy jen velmi malý reziduální proud činného charakteru, který je vzhledem ke své velikosti zemními ochranami obtížně měřitelný, protože je dán pouze součtem svodových proudů a činného proudu vzniklým na parazitním odporu tlumivky. V některých případech tak může dojít k nesprávné detekci vývodu s poruchou, proto se obvykle používá automatika připínání pomocného odporníku, jehož účelem je navýšení činné složky poruchového proudu. Pomocný odporník se k sekundární straně tlumivky připíná pouze na dobu potřebnou k detekci poruchy. [11]

3.3.2 Síť neúčinně uzemněná přes uzlový odporník

Uzemnění uzlu přes uzlový odporník se používá převážně u kabelových a velmi rozsáhlých sítí venkovního vedení, u kterých je z důvodu velmi vysoké hodnoty kapacitního (poruchového) proudu ekonomicky nevýhodné provozovat kompenzační tlumivky, jež by museli mít velký výkon v řádu MVA r. Zvláště nevýhodné je použití kompenzační tlumivky v čistě kabelové síti, kde je z důvodu velmi malých mezifázových kapacitních nesymetrií velmi obtížné tlumivku správně vyladit a navíc se zde ani neuplatní schopnost tlumivky zhaset oblouková zemní spojení, protože v těchto sítích velmi často přecházejí jednofázové zemní poruchy na poruchy vícefázové a navíc trvalé. [10]



Obr. 3.9: Obecné schéma sítě s neúčinně uzemněným uzlem přes uzlový odporník.

Jako výhodnější je proto v těchto sítích jeví využití rezistoru s odporem řádově desítky Ω , které slouží jednak k omezení velikosti poruchového proudu a jednak k útlumu vzniklého přepětí. Právě kvůli spolehlivému tlumení přepětí se odporník obvykle volí tak, aby jeho jmenovitý proud byl vyšší než celkový kapacitní proud sítě. [10] [11]

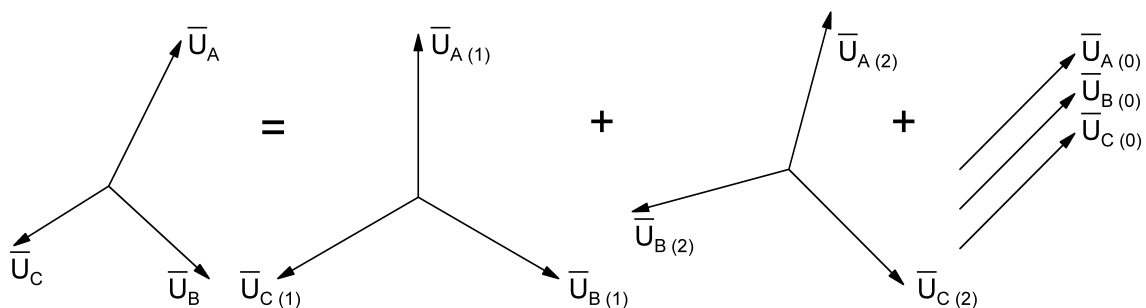
$$I_{RN} = \frac{U_f}{R_N} \geq I_C \quad (3.10)$$

4

Analýza jednofázových poruch v distribučních sítích VN

4.1 Metoda souměrných složek

K analýze napěťových a proudových poměrů při jednofázových poruchových stavech sítí distribuční soustavy lze velmi dobře využít metodu souměrných složek. Metoda souměrných složek¹ se používá pro vyhodnocení poruch v ustáleném stavu a je založena na faktu, že každou obecnou nesymetrickou trojfázovou soustavu fázorů je možné rozložit na tři souměrné soustavy: **souslednou** (1), **zpětnou** (2) a **netočivou** (0).



Obr. 4.1: Rozložení nesymetrické soustavy na tři symetrické.

Výhodou této metody oproti ostatním obecnějším metodám je její relativně snadné řešení a zároveň dostatečně přesná interpretace fyzikální reality.

Součet jednotlivých složek je tedy roven původnímu fázoru:

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_A &= \bar{U}_{A(1)} + \bar{U}_{A(2)} + \bar{U}_{A(0)} \\
 \bar{U}_B &= \bar{U}_{B(1)} + \bar{U}_{B(2)} + \bar{U}_{B(0)} \\
 \bar{U}_C &= \bar{U}_{C(1)} + \bar{U}_{C(2)} + \bar{U}_{C(0)}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

¹Metodu souměrných složek přestavil v roce 1918 Ch. L. Fortescue (1876-1936)

Pokud zvolím napětí U_A jako referenční, dostanu rovnice ve tvaru:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_C &= \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)}\end{aligned}\quad (4.2)$$

kde \bar{a} a \bar{a}^2 jsou fázory natočení, pro které platí:

$$\begin{aligned}\bar{a} &= e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \bar{a}^2 &= e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\end{aligned}\quad (4.3)$$

Obecně tedy mohu předchozí rovnice vyjádřit v maticovém tvaru $\bar{U}_f = \bar{F} \cdot \bar{U}_S$:

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{pmatrix}\quad (4.4)$$

Matice \bar{F} je tzv. **Fortescue matice**. Jelikož je determinant matice \bar{F} nenulový, mohu provést její inverzi a díky tomu získat maticový předpis pro jednotlivá složková napětí. Očekávám tedy zápis ve tvaru $\bar{U}_S = \bar{F}^{-1} \cdot \bar{U}_f$:

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}\quad (4.5)$$

Musí tedy platit:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{a} \bar{U}_B + \bar{a}^2 \bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{a}^2 \bar{U}_B + \bar{a} \bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C)\end{aligned}\quad (4.6)$$

Sečtením symetrických napětí a symetrických úbytků lze získat vnitřní napětí zdroje:

$$\begin{aligned}\bar{E}_{(1)} &= \bar{U}_{(1)} + \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} \\ \bar{E}_{(2)} &= \bar{U}_{(2)} + \bar{I}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(2)} \\ \bar{E}_{(0)} &= \bar{U}_{(0)} + \bar{I}_{(0)} \cdot \bar{Z}_{(0)}\end{aligned}\quad (4.7)$$

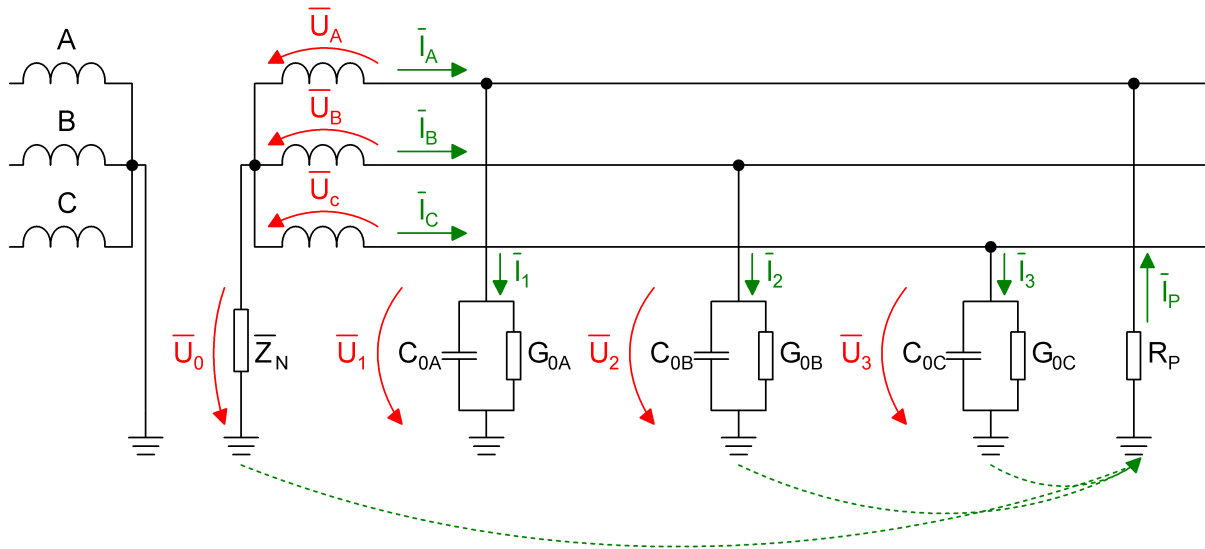
Obvykle se uvažuje napětí zdroje jako souměrné, kdy $\bar{E}_{(2)} = \bar{E}_{(0)} = 0$:

$$\begin{aligned}\bar{E} &= \bar{U}_{(1)} + \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} \rightarrow \bar{U}_{(1)} = \bar{E} - \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} \\ 0 &= \bar{U}_{(2)} + \bar{I}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(2)} \rightarrow \bar{U}_{(2)} = -\bar{I}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(2)} \\ 0 &= \bar{U}_{(0)} + \bar{I}_{(0)} \cdot \bar{Z}_{(0)} \rightarrow \bar{U}_{(0)} = -\bar{I}_{(0)} \cdot \bar{Z}_{(0)}\end{aligned}\quad (4.8)$$

Stejný postup platí i pro proudy.

Síť uzemněná přes obecnou impedanci

Postup výpočtu metodou souměrných složek lze nejlépe demonstrovat na příkladu sítě s jedním vývodem, která je uzemněná přes obecnou impedanci \bar{Z}_N . I s ohledem na přesnost výpočtu je možné při využití této metody přijmout několik zjednodušení, mezi které patří zanedbání mezifázových kapacit a úvaha symetrického zdroje napětí i sítě, ve které jsou si jednotlivé fázové kapacity proti zemi rovny tj. $C_0 = C_{01} = C_{02} = C_{03}$. Obecné schéma sítě z něhož mohou při následujících výpočtech vycházet je uvedeno na Obr. 4.2. [11]



Obr. 4.2: Schéma sítě s jedním vývodem uzemněné přes obecnou impedanci \bar{Z}_N .

Dojde-li k jednofázové zemní poruše, začne místem poruchy přes odpor poruchy R_P procházet poruchový proud \bar{I}_P a na impedanci \bar{Z}_N se objeví uzlové napětí $\bar{U}_N = \bar{U}_0$.

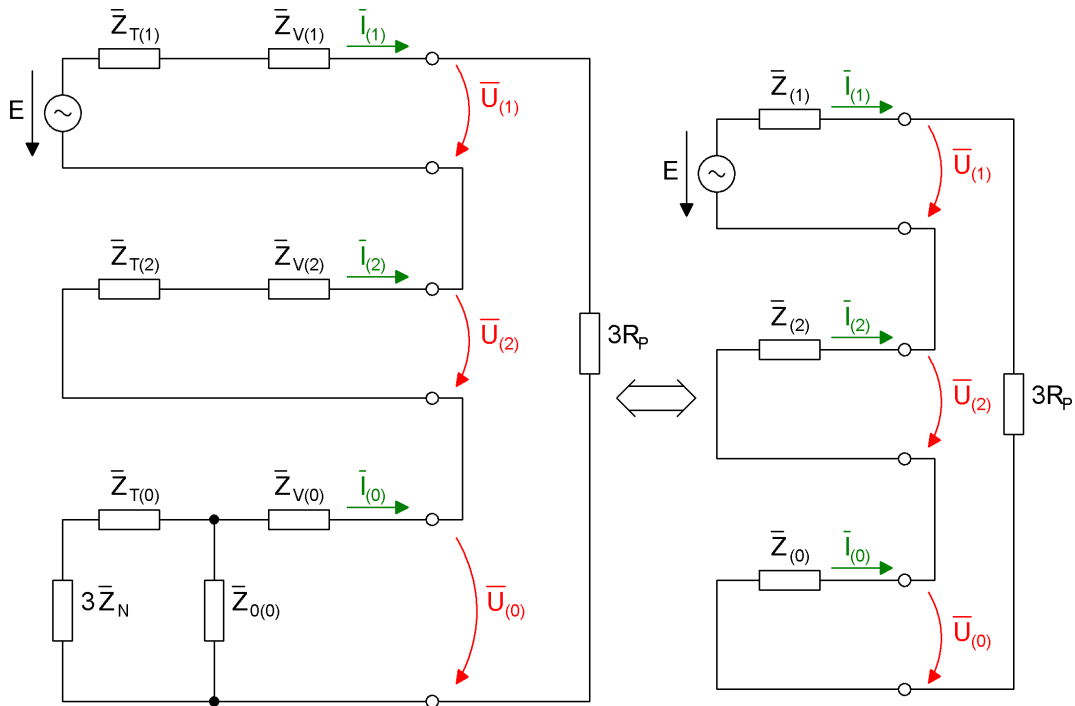
Podle Obr. 4.2 platí smyčky:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 - \bar{U}_A - \bar{U}_0 &= 0, \\ \bar{U}_2 - \bar{U}_B - \bar{U}_0 &= 0, \\ \bar{U}_3 - \bar{U}_C - \bar{U}_0 &= 0\end{aligned}\tag{4.9}$$

Po vzniku zemní poruchy ve fázi A se napěťové poměry změní následovně:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= 0, \\ \bar{U}_0 &= -\bar{U}_A, \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_B + \bar{U}_0 = (-1 + \bar{a}^2)\bar{U}_A = -\sqrt{3}e^{j\frac{\pi}{6}}\bar{U}_A, \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_C + \bar{U}_0 = (-1 + \bar{a})\bar{U}_A = -\sqrt{3}e^{-j\frac{\pi}{6}}\bar{U}_A\end{aligned}\tag{4.10}$$

K výpočtu celkového poruchového proudu \bar{I}_P v místě zemního spojení i jednotlivých složkových napětí lze využít náhradní složkové schéma uvedené na Obr. 4.3.



Obr. 4.3: Schéma sítě uzemněné přes obecnou impedanci.

Impedance $\bar{Z}_{(1)}$ zahrnuje sousledné složky impedance napájecího transformátoru $\bar{Z}_{T(1)}$ a vedení $\bar{Z}_{V(1)}$ a $\bar{Z}_{(2)}$ jejich zpětné složky $\bar{Z}_{T(2)}$ a $\bar{Z}_{V(2)}$. Impedance netočivé složky $\bar{Z}_{(0)}$ obsahuje opět příslušné složky pro transformátor $\bar{Z}_{T(0)}$ a vedení $\bar{Z}_{V(0)}$, celkovou příčnou impedanci všech vedení proti zemi \bar{Z}_C a také trojnásobek obecné impedance \bar{Z}_N zapojené mezi nulový bod transformátoru a zemnicí soustavu. Ve složkovém schématu jsou zanedbány impedance nadřazené napájecí síti a generátoru, které je opět možné s ohledem na požadovanou přesnost výpočtu zanedbat. [11]

Ze schématu na Obr. 4.3 vyplývá velikost složkových proudů:

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)} = \frac{1}{3}\bar{I}_A = \frac{\bar{U}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \quad (4.11)$$

Podle Obr. 4.2 se poruchový proud \bar{I}_P rovná proudu \bar{I}_A , ale je opačně orientovaný:

$$\bar{I}_P = -\bar{I}_A = -3\bar{I}_{(1)} = \frac{-3\bar{U}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \quad (4.12)$$

Složková napětí podle rovnice 4.8:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{(1)} &= U_f - \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} = \frac{\bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \bar{U}_f \\ \bar{U}_{(2)} &= -\bar{Z}_{(2)}\bar{I}_{(1)} = -\bar{Z}_{(1)}\bar{I}_{(1)} = \frac{-\bar{Z}_{(1)}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \bar{U}_f \\ \bar{U}_{(0)} &= -\bar{Z}_{(0)}\bar{I}_{(0)} = \frac{-\bar{Z}_{(0)}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \bar{U}_f \end{aligned} \quad (4.13)$$

Podle vztahu 4.4 mohu následně převést složková napětí na skutečné fázové hodnoty:

$$\bar{U}'_1 = \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \left(\frac{3R_P}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \right) \bar{U}_f \quad (4.14)$$

$$\bar{U}'_2 = \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \left(\bar{a}^2 - \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \right) \bar{U}_f \quad (4.15)$$

$$\bar{U}'_3 = \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \left(\bar{a} - \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \right) \bar{U}_f \quad (4.16)$$

Napětí uzlu sítě proti zemi při $R_P = 0$, $\bar{Z}_{(1)} = 0$ a $\bar{Z}_{(2)} = 0$:

$$\bar{U}_0 = -\frac{\bar{Z}_{(0)}}{\bar{Z}_{(0)}} \bar{U}_f = -\bar{U}_f \quad (4.17)$$

Odvozené vztahy jsou platné obecně pro všechny možné způsoby uzemnění uzlu. Konkrétní způsob uzemnění má vliv pouze na hodnotu netočivé impedance $\bar{Z}_{(0)}$, jejíž velikost a charakter následně ovlivňují napěťové a proudové poměry v síti během zemní poruchy.

4.2 Definice analyzovaného modelu sítě

Pro přesnější popsání proudových a napěťových poměrů během jednofázové zemní poruchy je vhodné použít model sítě s minimálně dvěma vývody. Pro své výpočty a simulaci zemní poruchy jsem zvolil síť se dvěma plnohodnotnými vývody, jež jsou určeny všemi pasivními parametry a jedním vývodem reprezentovaným pouze příčnou impedancí proti zemi, který v modelu sítě představuje všechny ostatní neřešené vývody. Parametry řešené sítě jsou uvedeny v Tab. 4.1.

U_n (V)	I_C (A)	I_W (%)	I_W (A)	C_{0C} (F)	G_{0C} (S)	R_{0C} (Ω)
22 000	75	2	1,5	$6,265 \cdot 10^{-6}$	$3,936 \cdot 10^{-6}$	25 403,41

Tab. 4.1: Parametry řešené sítě.

U sítí s malým poruchovým proudem lze při orientačních výpočtech zanedbat podélnou impedanci $\bar{Z}_{(1)}$ a $\bar{Z}_{(2)}$ tvořenou impedancí transformátoru \bar{Z}_T a impedancí postiženého vývodu \bar{Z}_V . Při přesnějším výpočtech nebo u rozlehlejších sítí už ale počítá i s touto impedancí, neboť při jejich zanedbání už hrozí zkreslení výsledků. Z tohoto důvodu budu při následujících výpočtech s uvažovat pasivní parametry vodičů vedení všech vývodů podle Tab. 4.2 a parametry transformátoru podle Tab. 4.3.

	$l (km)$	$R (\Omega \cdot km^{-1})$	$L (mH \cdot km^{-1})$	$C (F \cdot km^{-1})$	$G (S \cdot km^{-1})$
VÝVOD 1	50	0,28	1,21	5–50 % C_{0C}	5–50 % G_{0C}
VÝVOD 2	35	0,37	1,27	5–50 % C_{0C}	5–50 % G_{0C}
VÝVOD 3	1	–	–	$C_{0V1} - C_{0V2}$	$G_{0V1} - G_{0V2}$

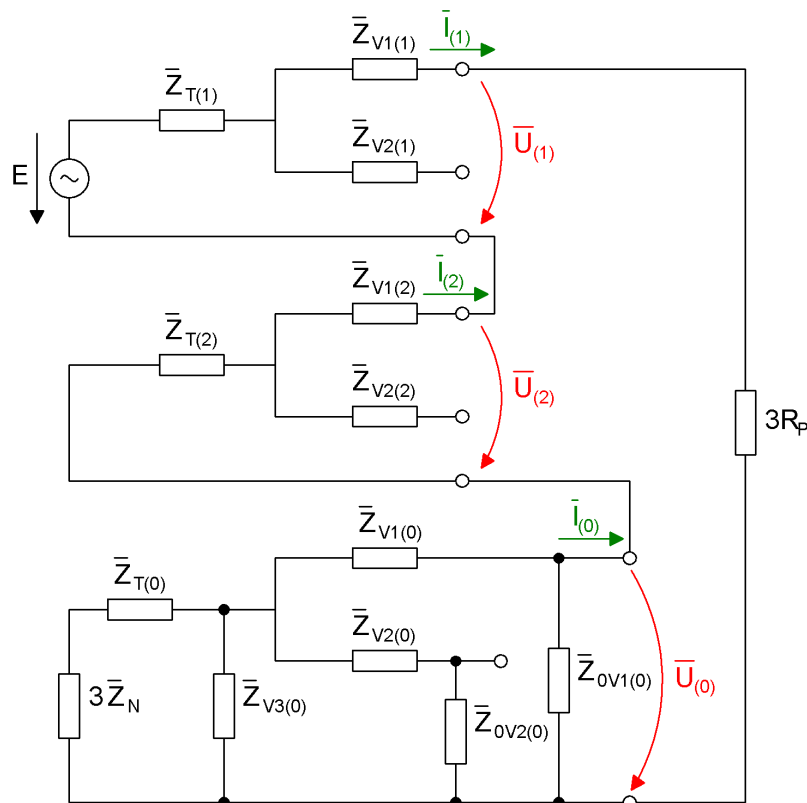
Tab. 4.2: Pasivní parametry jednotlivých vývodů.

Všechny tři vývody jsou napájeny ze stejné přípojnice, do které je připojen transformátor $110 kV \pm 8 \times 2 \% / 23 kV$ s jmenovitým výkonem $S_n = 40 MVA$ od firmy ETD:

$S_n (MVA)$	$\Delta P_0 (kW)$	$\Delta P_k (kW)$	$u_k (\%)$	$i_k (\%)$	$U_n (V)$
40	19,5	110	11,5	0,15	22 000

Tab. 4.3: Parametry transformátoru $110 kV \pm 8 \times 2 \% / 23 kV$ od firmy ETD.

Podobně jako v předcházející kapitole i zde mohou převést obecné schéma řešené části sítě na náhradní složkové schéma uvedené na Obr. 4.4.



Obr. 4.4: Zapojení souměrných složkových schémat pro síť se dvěma vývody.

Složkové schéma na Obr. 4.4 vypadá sice složitěji než obecné složkové schéma pro síť s jedním vývodem na Obr. 4.3, ale po bližším prozkoumání je patrné, že se výrazněji změnilo pouze zapojení a tedy i velikost impedance \bar{Z}_0 . Jak už jsem nastínil v na konci předcházející kapitoly, velikost a charakter netočivé impedance \bar{Z}_0 a tedy i výsledné

napěťové a proudové poměry (poruchový proud) závisí na způsobu provozu uzlu transformátoru. V následujících kapitolách proto určím netočivou impedanci \bar{Z}_0 i poměry pro každý způsob uzemnění nulového bodu zvlášť. V této části pouze uvedu předpisy pro výpočet impedancí, které jsou společné pro všechny řešené sítě.

Impedance transformátoru:

$$Z_T = \frac{u_k(\%)^2}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nT}} \quad R_T = \frac{\Delta P_k}{S_{nT}} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nT}} \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (4.18)$$

$$\bar{Z}_T = R_T + iX_T \quad (4.19)$$

Impedance vedení \bar{Z}_{V1} :

$$R_{V1} = R_{kV1} \cdot l \quad X_{V1} = L_{kV1} \cdot l \quad (4.20)$$

$$\bar{Z}_{V1} = R_{V1} + iX_{V1} \quad (4.21)$$

$$\bar{Z}_{V1(1)} = \bar{Z}_{V1(2)} = \frac{\bar{Z}_{V1(0)}}{3} \quad (4.22)$$

Stejně předpisy platí i pro impedanci vedení \bar{Z}_{V2} .

Příčná impedance \bar{Z}_{0V1} :

$$X_{0CV1} = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot \frac{I_C}{3 \cdot \omega \cdot U_f}} \quad (4.23)$$

$$R_{0V1} = \frac{I_C}{0.02 \cdot I_C} \cdot X_{0CV1} \quad (4.24)$$

$$\bar{Z}_{0V1} = \frac{X_{0CV1} \cdot R_{0V1}}{X_{0CV1} + R_{0V1}} \quad (4.25)$$

Vztahy jsou opět platné i pro impedanci vývodu č.2 \bar{Z}_{0V2} a vývodu č.3 \bar{Z}_{0V3} .

4.2.1 Model sítě se dvěma vývody v nástroji DYNAST

Pro ověření výsledků získaných výpočtem metodou souměrných složek a vizuální zobrazení výsledných průběhů proudových a napěťových poměrů během jednofázové zemní poruchy jsem sestavil model systému v simulačním programu DYNAST. Sestavený model sítě svými parametry přesně odpovídá modelu definovanému v předchozí kapitole.

Simulační nástroj DYNAST je určený modelování různých fyzikálních soustav. Mimo jiného tedy obsahuje i prvky a knihovny vhodné pro simulaci chování elektrických a energetických systémů. Při vytváření mého modelu jsem kromě základních prvků dostupných ve výchozí knihovně využil také prvky, které vytvořil Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D., a které nám poskytl v rámci předmětu Modelování elektrických sítí.

Výpis skriptu a diagram modelu jsou uvedeny v příloze B.

4.3 Účinně uzemněná síť VVN 110 kV

V přímo uzemněné síti 110 kV vzniká při vodivém spojení jedné fáze se zemí zkrat. „Zkrat je elektromagnetický přechodový děj, který je definován jako náhodné nebo úmyslné spojení dvou nebo více bodů obvodu (vodivé spojení fází, nebo jedné fáze se zemí), které mají při normálním provozu různá napětí, přes poměrně malý odpor nebo impedanci.“ [11, str. 35] Při tomto druhu poruchy protéká místem poruchy značný poruchový (zkratový) proud, který je několika násobně větší než proudy provozní a postižený obvod proto musí být co nejrychleji odpojen od zdroje. Velikost zkratového proudu je obecně ovlivněna použitými prvky v síti, dodávaným výkonem a také celkovou rozlohou dané sítě. Velikost a časový průběh zkratového proudu je směrodatná při dimenzování elektroenergetických zařízení, protože je svým působením tepelně a silově namáhá. Kvůli neustálému zvyšování spotřeby (výroby) je nutné, s ohledem na dlouho dobu životnosti elektroenergetických zařízení, při projektování a provozování uvažovat rezervu k dané zkratové odolnosti prvku. [11]

Mezi hlavní příčiny zkratů patří: výrobní vady (nevhodné materiály nebo konstrukce zařízení), nevhodná montáž a přetěžování kabelů, při kterém dochází k rychlejšímu stárnutí a následné destrukci izolace, atmosférické a provozní přepětí, které způsobuje průrazy izolace, nedostatečná zkratová odolnost starších zařízení atp. Ke zkratům také často dochází vinou lidského činitele při chybných manipulacích na například přípojnicových odpojovačích pod zatížením. Porušení izolační vrstvy může nastat vinou cizích zásahů a to přírodních i lidských. Mezi takové zásahy může patřit překopnutí kabelu při zemních pracích, ale i pád stromu na venkovní vedení. [11]

4.3.1 Charakteristika jednofázové zemní poruchy

Při jednofázovém zemním zkratu se napěťové poměry změní následovně: při ideálním zkratu s $R_p = 0$ klesne napětí postižené fáze a nulu. Napětí v ostatních dvou fázích zůstanou nezměněna co do velikosti i úhlu, ale pouze za předpokladu, že se sobě rovnají hodnoty sousledné a netočivé impedance. V běžném provozu se tyto hodnoty liší, proto i napětí v nepostižených fázích mírně vzrostou a také dojde k nepatrné změně úhlů.

Následkem spojení fáze se zemí začne místem poruchy procházet značný poruchový proud \bar{I}_P , který se může při tomto typu uzemnění uzlu uzavírat přes relativně malou impedanci uzlu proti zemi \bar{Z}_N a není proto tolik omezený netočivou impedancí sítě \bar{Z}_0 . Zkratový proud má převážně induktivní charakter a jeho velikost je ovlivněna vzdáleností místa poruchy od napájecí rozvodny. [10]

$$\bar{I}_P = \frac{3 \cdot \bar{U}_f}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3R_p} \quad (4.26)$$

Tato práce je ale zaměřena na síť VN, proto se již nebudu sítí 100 kV více zabývat.

4.4 Izolovaná síť VN

V sítích s izolovaným nulovým bodem vzniká při vodivém spojení jedné fáze se zemí jednofázové zemní spojení, jež se od zkratu popsaného v kapitole 4.3 liší především mnohonásobně nižší hodnotou poruchového proudu, který se v tomto případě může uzavřít pouze přes příčné impedance vedení dané paralelní kombinací jednotlivých kapacit proti zemi C_{0i} a jim příslušných svodových odporů $R_{0i} = \frac{1}{G_{0i}}$. Výsledný poruchový proud má proto převážně kapacitní charakter, jeho velikost odpovídá celkové příčné admitanci všech vedení proti zemi a v podstatě tedy není závislá na místě zemního spojení. Záleží proto pouze na aktuální konfiguraci sítě. [10]

$$I_C = j3\omega C_{0C} U_f \quad (4.27)$$

I_C je celkový kapacitní proud, který patří mezi charakteristické hodnoty sítě. Při kovovém zemním spojení s $R_P = 0$ se kapacitní proud I_C izolované sítě rovná proudu poruchovému I_P .

Málo rozlehlé sítě s izolovaným uzlem lze díky relativně nízké hodnotě poruchového proudu teoreticky provozovat až do doby vyhledání poruchy nebo případného vzniku druhé poruchy. U větších sítí už je nutné postižený vývod vypnout, protože hrozí vznik nebezpečných hodnot dotykových a krokových napětí.

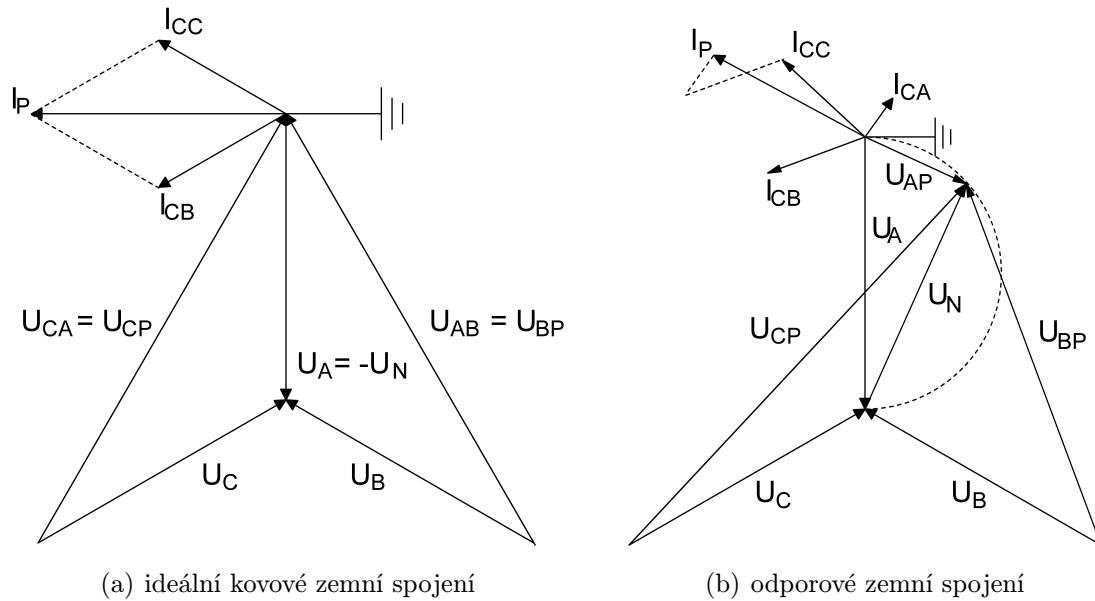
Zmíněný kapacitní charakter poruchového proudu způsobuje v síti problémy se zhášením obloukových zemních spojení, kdy se jeho vlivem může krátce po uhašení oblouku na postižené fázi opět obnovit napětí, které opět zapálí oblouk. Takto vzniká přerušované zemní spojení, které generuje značná přepětí, jež následně namáhají izolace vodičů a energetických zařízení a v krajním případě mohou způsobit jejich průraz. Po průrazu izolací přejde jednofázové zemní spojení na dvojitě a vznikne mezifázový zkrat. Mezifázový zkrat je podobně jako jednofázový popsaný v kapitole 4.3 nebezpečný z důvodu vysoké hodnoty poruchového proudu a postižený vývod je proto nutné okamžitě vypnout. [10]

Jednofázová zemní spojení vznikají nejčastěji na venkovních vedeních distribuční soustavy hlavně jako důsledek pádu stromu či větve do vedení nebo po přetržení jednoho z vodičů vlivem špatných povětrnostních podmínek.

4.4.1 Charakteristika jednofázové zemní poruchy

Při zemním spojení nastane také zde změna napěťových poměrů a porušení symetrie: dojde-li k ideálnímu kovovému zemnímu spojení, napětí uzlu proti zemi U_N vzroste z prakticky nulového hodnoty na hodnotu fázového napětí sítě U_f , napětí postižené fáze klesne na nulu a napětí na ostatních dvou zdravých fázích vzrostou na hodnotu sdruženého napětí U_s . Při odporovém zemním spojení nebude uzlové napětí rovné fázovému napětí sítě, bude ale nepřímo úměrné odporu poruchy. Čím větší bude odpor poruchy, tím nižší bude uzlové napětí. V případě vysokého odporu poruchy tak nemusí uzlové napětí překročit podmínku přítomnosti zemního spojení nastavenou na ochranách a proto

nemusí dojít k indikaci poruchy v síti. Vlivem odporu poruchy zároveň vzroste napětí jedné z nepostižených fází nad hodnotu sdruženého napětí. Popsanou situaci znázorňuje fázorový diagram na Obr. 4.9. [10]



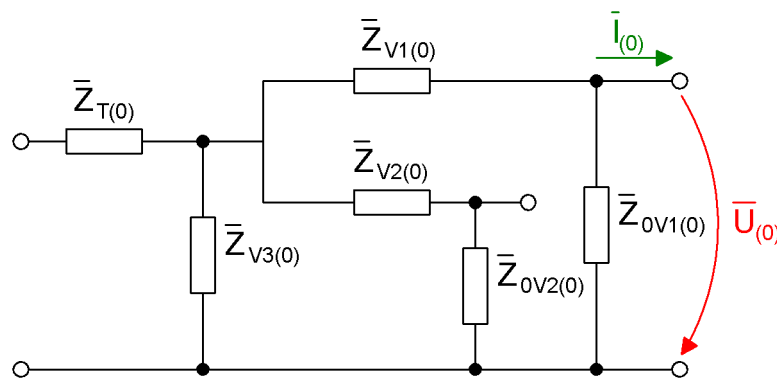
Obr. 4.5: Napěťové a proudové poměry při zemním spojení v izolované síti.

Poruchový proud při odporovém zemním spojení:

$$\bar{I}_P = \bar{U}_f \cdot \frac{R_P^{-1}}{R_P^{-1} + j3\omega C} \cdot j3\omega C \tag{4.28}$$

4.4.2 Napěťové a proudové poměry během zemní poruchy

Schéma nulové složky, která odpovídá síti s izolovaným nulovým bodem je na Obr. 4.10.



Obr. 4.6: Schéma nulové složky v izolované síti.

Dílčí impedance:

$$\bar{Z}_1 = \frac{\bar{Z}_{V2(0)} + \bar{Z}_{OV2(0)} \cdot \bar{Z}_{OV3(0)}}{\bar{Z}_{V2(0)} + \bar{Z}_{OV2(0)} + \bar{Z}_{OV3(0)}} + \bar{Z}_{V1(0)} \tag{4.29}$$

Celková impedance netočivé složky v síti s izolovaným nulovým bodem:

$$\bar{Z}_0 = \frac{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_{0V1(0)}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_{0V1(0)}} \quad (4.30)$$

Protože platí: $\bar{Z}_{T(1)} = \bar{Z}_{V(1)}$ a $\bar{Z}_{T(2)} = \bar{Z}_{V(2)}$, lze psát:

$$\bar{Z}_C = \bar{Z}_0 + 2 \cdot (\bar{Z}_T + \bar{Z}_{V1}) + 3R_P \quad (4.31)$$

S využitím vztahů uvedených v kapitole 4.1 mohu z celkové impedance Z_C vypočítat složkové proudy a napětí a ty poté převést na skutečné hodnoty. Vypočtené skutečné hodnoty napětí a proudů pro dvě různé procentuální rozložení celkové kapacity mezi vývody jsou uvedeny v příloze A v Tab. A.2

4.4.3 Simulace zemní poruchy v programu DYNAST

Pro simulaci zemní poruchy v síti s izolovaným uzlem jsem použil model definovaný v kapitole 4.2 s procentuálním rozdělením celkové kapacity proti zemi C_{OC} a svodu G_{OC} podle Tab. 4.4. Odpor poruchy je $R_P = 100 \Omega$.

	% z C_{0C}	$C_V (F \cdot km^{-1})$	$G_V (S \cdot km^{-1})$
VÝVOD 1	35	$43,86 \cdot 10^{-9}$	$2,25 \cdot 10^{-6}$
VÝVOD 2	40	$71,60 \cdot 10^{-9}$	$2,81 \cdot 10^{-6}$
VÝVOD 3	25	$1,57 \cdot 10^{-6}$	$157,45 \cdot 10^{-6}$

Tab. 4.4: Rozložení celkové kapacity sítě proti zemi C_{0C} .

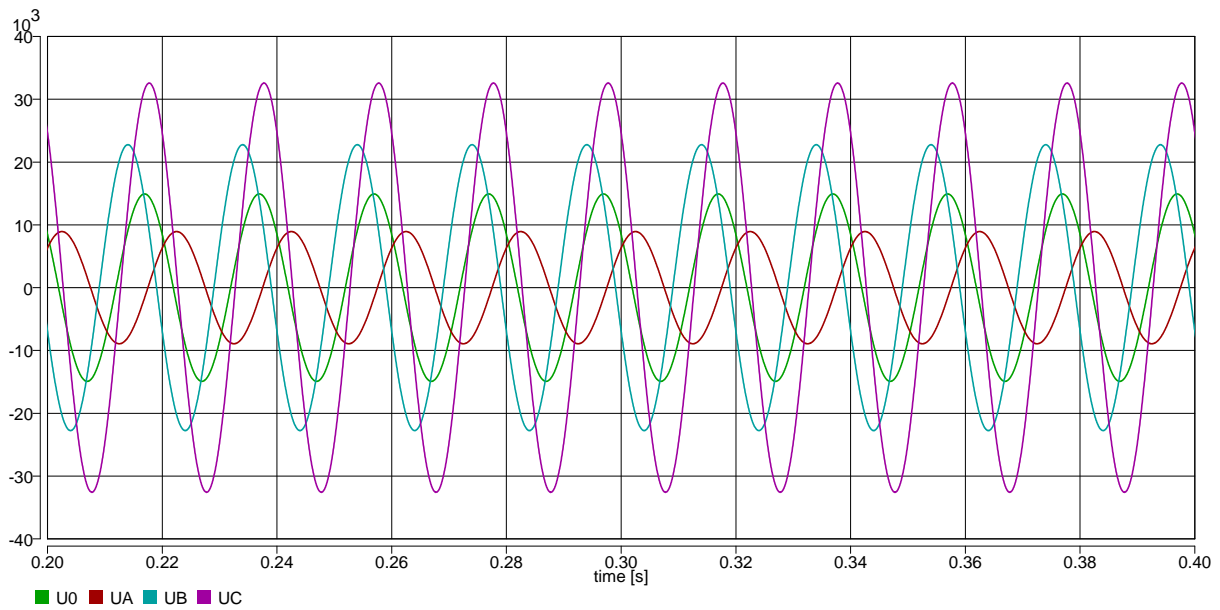
Porovnání získaných hodnot s využitím programu DYNAST a hodnot vypočtených metodou souměrných složek pro toto konkrétní zadání je uvedeno v Tab. 4.5.

Metoda	$ I_P (A)$	$ U_0 (V)$	$ U_A (V)$	$ U_B (V)$	$ U_C (V)$
DYNAST	63,14	10550,03	6316,23	16093,75	23034,00
Souměrné složky	62,22	10024,17	6222,36	15748,89	22520,37
Chyba (%)	1,45	4,98	2,14	2,22	1,45

Tab. 4.5: Srovnání vypočtených a odečtených hodnot na postiženém vývodu.

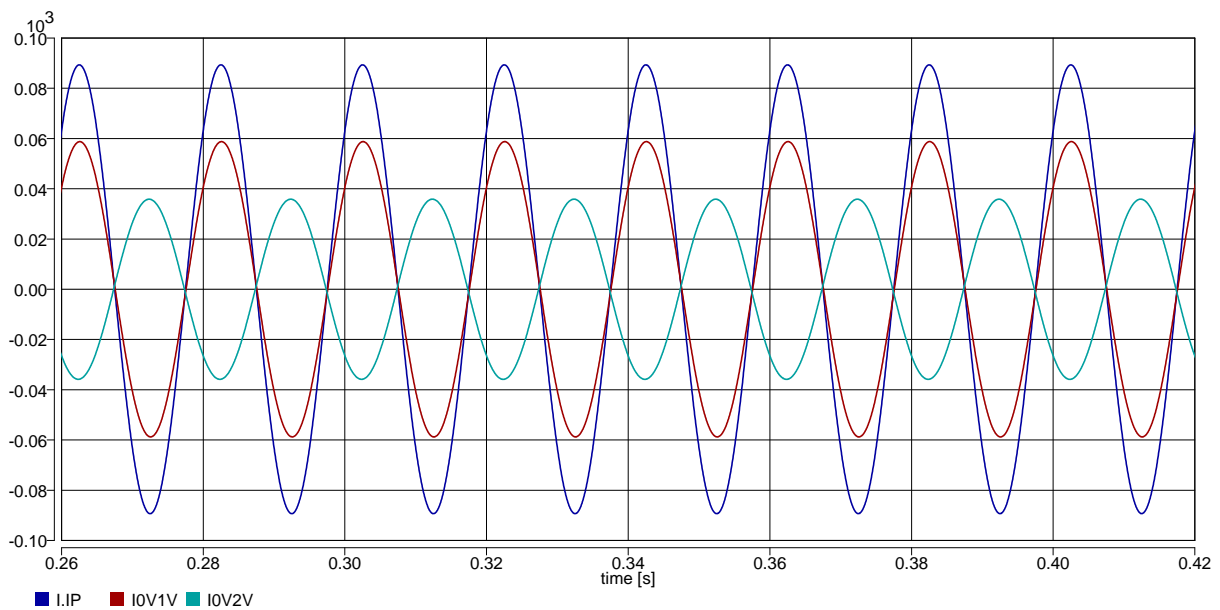
Na Obr. 4.7 jsou zobrazeny průběhy napětí U_A , U_B , U_C a U_0 v místě zemního spojení, ze kterých je patrné, že odpovídají teoretickým předpokladům popsaným v kapitole 4.4.

Z průběhů je zřejmý i vliv odporu poruchy na velikost amplitud všech napětí, především pak na velikost fázového napětí U_A , které z prakticky nulové hodnoty při kovovém zemním spojení popsaném v kapitole 4.4.1 vzroste na hodnotu odpovídající právě odporu poruchy R_P a celkovému poruchovému proudu I_P .



Obr. 4.7: Průběhy napětí během odporového jednofázového zemního spojení.

Na Obr. 4.8 jsou zobrazeny průběhy sledovaných proudů během zemní poruchy.



Obr. 4.8: Průběhy proudů během odporového jednofázového zemního spojení.

Na Obr. 4.8 je dobře vidět fázový posun mezi proudem postiženého vývodu I_{0V1} a nepostiženého vývodu I_{0V2} , který se běžně pohybuje okolo π . Těto vlastnosti izolovaných sítí se využívá při identifikaci vývodu postiženého zemní poruchou viz další kapitoly.

4.5 Neúčinně uzemněná síť VN přes zhášecí tlumivku

V kompenzované síti také vzniká zemní spojení. Na rozdíl od předchozí sítě izolované zde ale dochází ke kompenzaci poruchového proudu kapacitního charakteru ideálně stejně velkým induktivním proudem dodávaným do sítě kompenzační tlumivkou. V ideálním plně vykompenzovaném stavu je poruchový proud v místě poruchy nulový. Tohoto stavu se dá ale dosáhnout pouze teoreticky při zanedbání činného odporu kompenzační tlumivky R_L a svodových odporů vedení. V praxi proto teče místem poruchy reziduální proud, který má ale už převážně činný charakter a je mnohonásobně menší než původní poruchový proud. Díky převážně činnému charakteru poruchového proudu jsou u tohoto druhu uzemnění uzlu podmínky pro zhášení obloukových zemních spojení výrazně lepší než u sítě izolovaných. [10]

$$\bar{I}_P = I_W + j(I_C - I_L) \quad (4.32)$$

kde I_W – nevykompenzovaná činná složka poruchového proudu, I_C – kapacitní složka poruchového proudu, I_L – induktivní proud dodaný kompenzační tlumivkou.

Problém se zhášením obloukových zemních spojení ale nastává v případě, kdy poruchový proud obsahuje navíc další složky harmonických proudů vyšších řádů, které nelze vykompenzovat, neboť je kompenzační tlumivka naladěna pouze na základní harmonickou. U takto silně znečištěných sítí s vysokým obsahem nelineárních spotřebičů, typicky v sítích průmyslových závodů nebo větších měst, mohou tyto harmonické složky v některých případech dokonce převyšovat reziduální proud základní harmonické a výsledný poruchový proud tekoucí místem poruchy již nemusí mít popisovaný činný charakter. V tomto případě se zde opět může mnohem více projevit kapacitní složka poruchového proudu, která má nepříznivý dopad na zhášení oblouku. [11] [10]

4.5.1 Charakteristika jednofázové zemní poruchy

Napěťové poměry při zemním spojení v kompenzované síti jsou podobné jako v předchozím případě sítě izolované. Vlivem kompenzace se mění hlavně proudové poměry.

Pro poruchový proud v místě poruchy platí:

$$\bar{I}_P = \bar{U}_N \cdot \left[\frac{1}{R_L} + j(3\omega C - \frac{1}{\omega L}) \right] \quad (4.33)$$

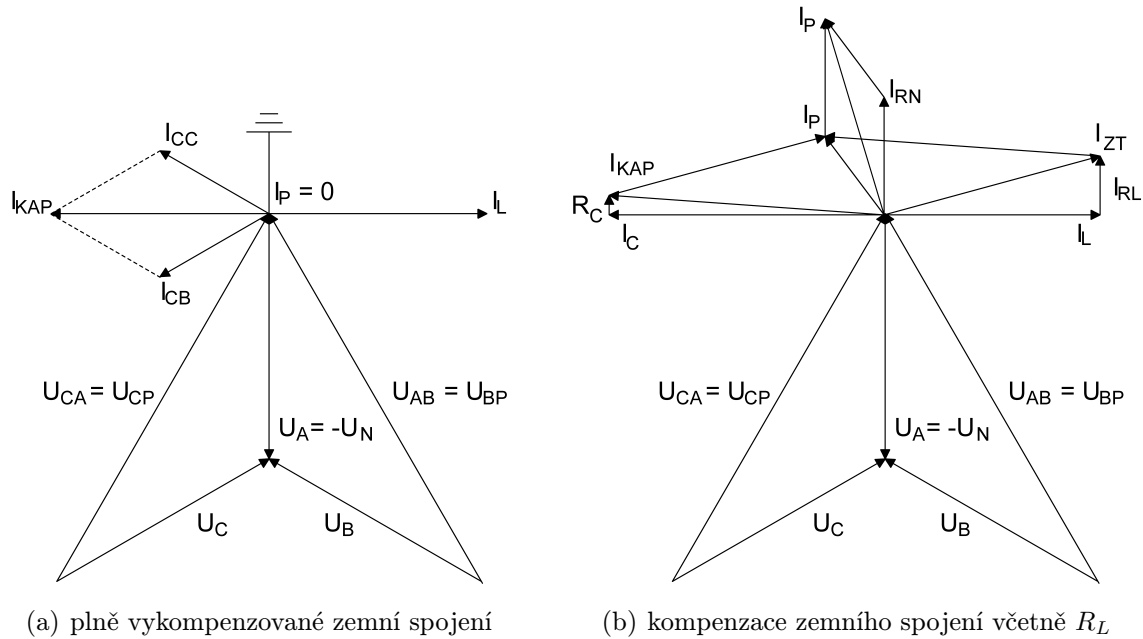
kde R_L – odpor tlumivky (Ω), L – indukčnost tlumivky: $L = \frac{1}{3\omega^2 C}$ (H).

Napětí uzlu proti zemi U_N :

$$\bar{U}_N = \bar{U}_f \cdot \frac{R_P^{-1}}{R_P^{-1} + j(3\omega C - \frac{1}{\omega L})} \quad (4.34)$$

Při kovovém zemním spojení $R_P = 0$ je opět $U_N = U_{faz}$ a proto platí:

$$\bar{I}_P = \bar{U}_f \cdot \left[\frac{1}{R_L} + j(3\omega C - \frac{1}{\omega L}) \right] \quad (4.35)$$



Obr. 4.9: Napěťové a proudové poměry při zemním spojení v izolované síti.

Z uvedených vztahů vyplývá, že výsledné napěťové a proudové poměry v síti postižené jednofázovým zemním spojením, jsou velmi závislé na charakteru poruchy, zvláště pak na přechodovém odporu R_P a době trvání poruchy. [11]

Podle velikosti odporu R_P lze zemní spojení rozdělit na:

Kovové zemní spojení Při ideálním kovovém zemním spojení je přechodový odpor poruchy $R_P = 0$. V praxi jsou ale za kovová zemní spojení považovány i poruchy s přechodovým odporem v řádech jednotek Ω . Téměř bezodporové zemní spojení ale může vzniknout jen v místech s velmi dobrým uzemněním, kde může dojít k přímému přeskoku oblouku na blízkou, uzemněnou neživou část. Takové podmínky splňují reálně jen spínací stanice VN nebo distribuční trafostanice VN/NN. Velkou výhodou kovových zemních spojení jsou poměrně velké hodnoty poruchového proudu, protože nedochází k tlumení transientních jevů, což umožňuje bezproblémovou detekci poruchy. [11]

Odporové zemní spojení Tento druh zemního spojení je zdaleka nejrozšířenější poruchou v sítích VN distribuční soustavy. Přechodový odpor R_P u tohoto typu poruch se pohybuje v řádu stovek až tisíců Ω , přičemž poruchy s $R_P > 1 \text{ k}\Omega$ se už považují za vysokoodporové. Vlivem vysokého odporu zde dochází k tlumení transientních jevů, omezení velikosti poruchového proudu a tím i netočivé složky napětí, což značně komplikuje indikaci a následnou lokalizaci poruchy v síti. *Obecně lze konstatovat, že poruchy s odporem nad 1000 Ω jsou jen obtížně lokalizovatelné. Poruchy s odporem v řádech až několika tisíc ohmů jsou pak jen obtížně zaznamatelné, jelikož velmi nízká úroveň netočivé složky napětí při této poruše je velmi obtížně odlišitelná od úrovně netočivé složky napětí v bezporuchovém stavu vyvolané nesymetrií soustavy.*

Při vysokoodporové poruše nemusí dosáhnout netočivá složka napětí prahové úrovně, díky čemuž nedojde k aktivaci automatik umožňující detekci této poruchy. [11, str. 87]

Prahová úroveň odpovídala dříve 33 % U_f , ale právě kvůli vysokoodporovým zemním spojení byla upravena na současnou hodnotu 15 až 25 % U_f .

Obloukové zemní spojení Přechodový odpor obloukové poruchy tvoří především odpor samotného oblouku. Při obloukovém zemním spojení často vzniká přerušované zemní spojení, které jsem blíže popsal v kapitole 4.4. [11]

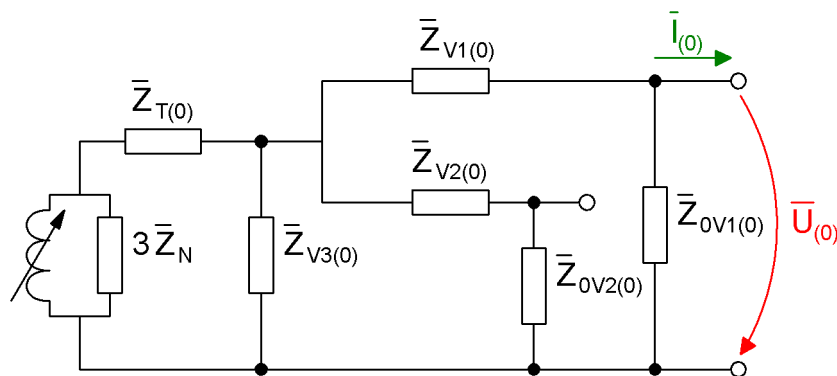
Podle doby trvání pak na:

- Mžiková zemní spojení: $t < 5 s$
- Krátkodobá zemní spojení: $5 s < t < 10 minut$
- Trvalá zemní spojení: $t > 10 minut$
- Přerušovaná zemní spojení: mžiková zemní spojení v rychlém sledu za sebou

Dalším faktorem, jež ovlivňuje velikost vybíjecího proudu, je okamžik vzniku poruchy vzhledem k fázovému posunu postiženého napětí. Ze statistik vyplývá, že více než 70 % všech zemních spojení bylo zapáleno v okamžiku napěťového maxima. [11]

4.5.2 Napěťové a proudové poměry během zemní poruchy

Schéma nulové složky pro kompenzovanou síť je uvedeno na Obr. 4.10.



Obr. 4.10: Schéma nulové složky v kompenzované síti.

U tohoto způsobu uzemnění je nejprve nutné určit impedanci \bar{Z}_N , která odpovídá paralelní kombinaci indukčnosti tlumivky L_{TL} a jejímu parazitnímu odporu R_{TL} , jímž protéká 1 % celkového proudu tlumivky.

$$L_{TL} = \frac{1}{3\omega C_{0C}} \quad \rightarrow \quad X_{TL} = \omega L_{TL} \quad \rightarrow \quad R_{TL} = \frac{X_{TL}}{0.01} \quad (4.36)$$

$$\bar{Z}_N = \frac{R_{TL} \cdot iX_{TL}}{R_{TL} + iX_{TL}} \quad (4.37)$$

V případě, že je třeba určit hodnotu celkového poruchového proudu \bar{I}_P během chvíle, kdy je připnutý pomocný odporník R_P , je nutné uvažovat impedanci \bar{Z}'_N podle vztahu:

$$\frac{1}{\bar{Z}'_N} = \frac{1}{X_{TL}} + \frac{1}{R_{TL}} + \frac{1}{R_P} \quad (4.38)$$

Dílčí impedance:

$$\bar{Z}_1 = \frac{(\bar{Z}_{V2(0)} + \bar{Z}_{0V2(0)}) \cdot (3\bar{Z}_N + \bar{Z}_{T(0)})}{\bar{Z}_{V2(0)} + \bar{Z}_{0V2(0)} + 3\bar{Z}_N + \bar{Z}_{T(0)}} \quad (4.39)$$

$$\bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_{0V3(0)}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_{0V3(0)}} + \bar{Z}_{V1(0)} \quad (4.40)$$

Celková impedance netočivé složky v síti s izolovaným nulovým bodem:

$$\bar{Z}_0 = \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_{0V1(0)}}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_{0V1(0)}} \quad (4.41)$$

Protože platí: $\bar{Z}_{T(1)} = \bar{Z}_{V(1)}$ a $\bar{Z}_{T(2)} = \bar{Z}_{V(2)}$, lze psát:

$$\bar{Z}_C = \bar{Z}_0 + 2 \cdot (\bar{Z}_T + \bar{Z}_{V1}) + 3R_P \quad (4.42)$$

Vypočtené skutečné hodnoty napětí a proudů jsou opět uvedeny v příloze A v Tab. A.4.

4.5.3 Simulace zemní poruchy v programu DYNAST

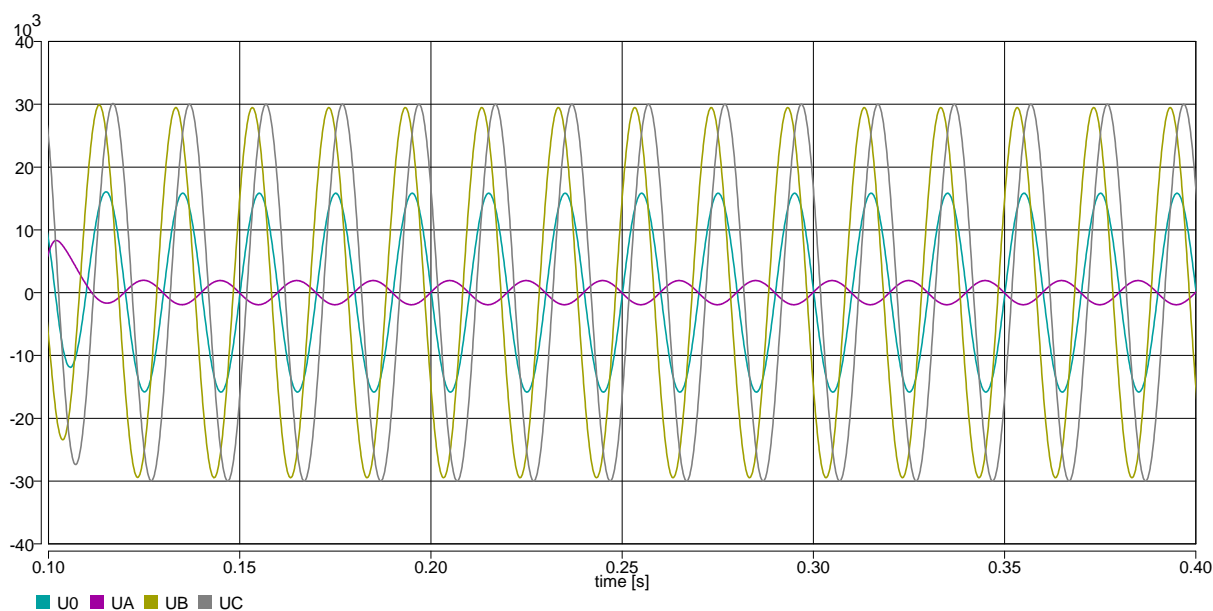
Pro simulaci zemní poruchy v síti s uzlem uzemněným přes kompenzační tlumivku jsem použil stejný model i vstupní parametry jako v síti s izolovaným uzlem podle Tab. 4.4. Odpor poruchy je opět $R_P = 100 \Omega$.

Stejně jako v předchozím případě, i zde je v Tab. 4.6 uvedeno srovnání vypočtených a odečtených hodnot.

Metoda	$ I_P (A)$	$ U_0 (V)$	$ U_A (V)$	$ U_B (V)$	$ U_C (V)$
DYNAST	13,59	11192,08	1359,06	20834,90	21208,96
Souměrné složky	13,65	11230,55	1365,05	20481,62	20898,79
Chyba (%)	0,44	0,34	0,44	1,69	1,46

Tab. 4.6: Srovnání vypočtených a odečtených hodnot na postiženém vývodu.

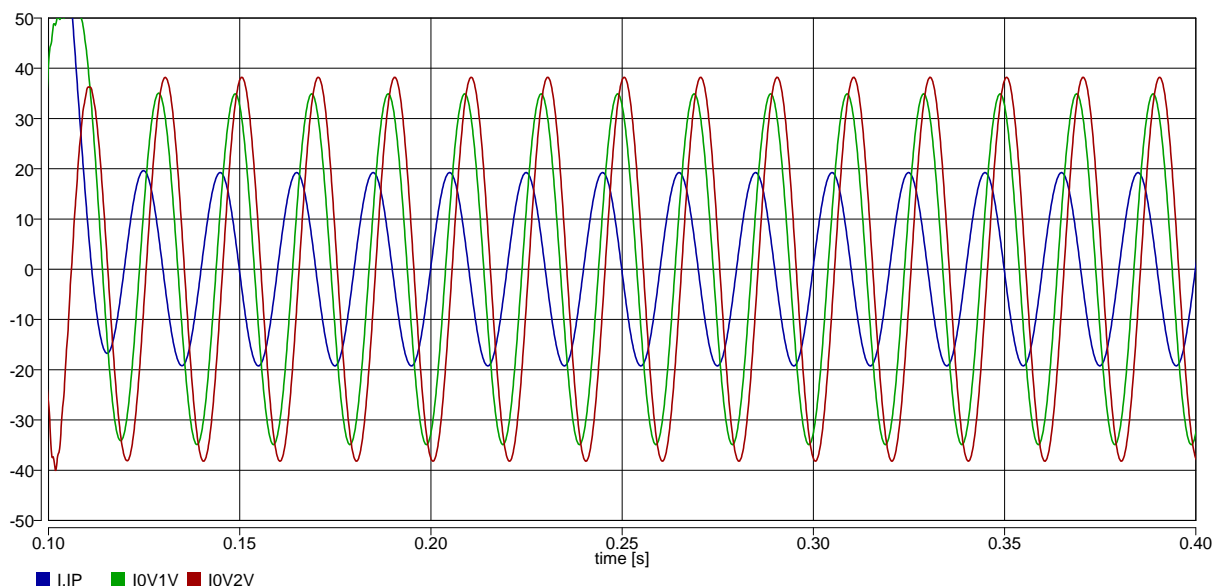
Na Obr. 4.11 jsou zobrazeny průběhy napětí U_A , U_B , U_C a U_0 v místě zemního spojení. I v tomto případě se průběhy shodují s uvedenými předpoklady.



Obr. 4.11: Průběhy napětí během odporového jednofázového zemního spojení.

Z Obr. 4.11 je také vidět, že velikosti jednotlivých napětí jsou zde mnohem méně závislé na velikosti odporu poruchy R_P .

Na Obr. 4.12 je zobrazen průběh sledovaných proudů. Z průběhů je dobře vidět, že hlavní nevýhodou kompenzovaných sítí z pohledu identifikace postiženého vývodu je malý fázový posun mezi nulovými proudy postiženého a nepostiženého vývodu.



Obr. 4.12: Průběh proudů během odporového jednofázového zemního spojení.

4.6 Neúčinně uzemněná síť VN přes uzlový odporník

Při poruše v síti nepřímo uzemněné přes uzlový odporník nevzniká při jednofázové zemní poruše klasické zemní spojení, jako v síti izolované či nepřímo uzemněné přes kompenzační tlumivku, ale vzniká jednofázový zkrat, který je svým charakterem podobný zkratu v síti s přímo uzemněným uzlem. Na rozdíl od přímo uzemněné sítě je poruchový proud v této síti omezen právě uzlovým odporníkem, který zároveň tlumí i vzniklé přepětí. [11] [10]

Vliv uzemnění uzlu přes činný odpor se nejvíce projeví při jednopólových poruchách. U ostatních druhů poruch jsou poměry v podstatě shodné se soustavami nepřímo uzemněnými přes indukčnost, či soustavami s izolovaným uzlem. [11, str. 114]

S ohledem na velikost poruchového proudu je tedy nutné v takto uzemněné síti, opět podobně jako v přímo uzemněné síti, okamžitě odpojit postiženou část vedení.

4.6.1 Charakteristika jednofázové zemní poruchy

Při jednofázovém zkratu začne místem poruchy procházet zkratový proud, který je dán součtem celkového kapacitního proudu sítě a jmenovitého proudu uzlového odporníku. Velikost tohoto proudu je tedy závislá na aktuální konfiguraci a celkové rozloze sítě. Platí, že poruchový proud v odporově uzemněné síti je maximální v blízkosti napájecí rozvodny a se vzrůstající vzdáleností od ní klesá. [10]

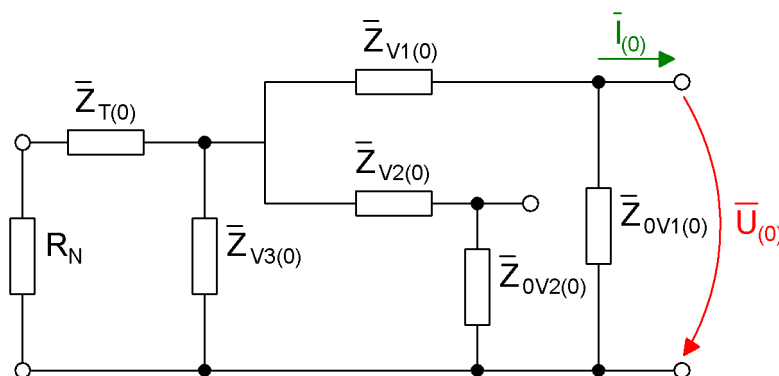
$$\bar{I}_P = \bar{U}_N \cdot (R_N^{-1} + j3\omega C) = I_{RN} + I_C \quad (4.43)$$

Napěťové poměry jsou velmi podobné ostatním neúčinně uzemněným sítím: při kovovém zemním spojení klesne napětí postižené fáze na nulu, napětí ostatních dvou fází vzrostou na hodnoty sdružených napětí U_s a na uzlovém odporníku se objeví napětí U_N :

$$\bar{U}_N = \bar{U}_f \cdot \frac{R_N}{R_N + R_P - jR_N R_P 3\omega C} \quad (4.44)$$

4.6.2 Napěťové a proudové poměry během zemní poruchy

Schéma nulové složky pro síť uzemněnou přes uzlový odporník je uvedeno na Obr. 4.13.



Obr. 4.13: Schéma nulové složky v síti uzemněné přes uzlový odporník.

Podobně jako v předcházejícím případě, i zde je nejprve nutné určit velikost potřebného uzlového odporníku. Činná rezistance odporníku by měla být tak velká, aby byla splněna podmínka daná vztahem 3.10:

$$I_{RN} = \frac{U_f}{R_N} > I_C \quad \rightarrow \quad R_N = \frac{U_f}{I_C} \quad (4.45)$$

Vztahem 4.45 je dána minimální hodnota velikosti rezistance uzlového odporníku.

Dílčí impedance:

$$\bar{Z}_1 = \frac{(\bar{Z}_{V2(0)} + \bar{Z}_{0V2(0)}) \cdot (3\bar{R}_N + \bar{Z}_{T(0)})}{\bar{Z}_{V2(0)} + \bar{Z}_{0V2(0)} + 3\bar{R}_N + \bar{Z}_{T(0)}} \quad (4.46)$$

$$\bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_{0V3(0)}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_{0V3(0)}} + \bar{Z}_{V1(0)} \quad (4.47)$$

Celková impedance netočivé složky v síti s izolovaným nulovým bodem:

$$\bar{Z}_0 = \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_{0V1(0)}}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_{0V1(0)}} \quad (4.48)$$

Protože platí: $\bar{Z}_{T(1)} = \bar{Z}_{V(1)}$ a $\bar{Z}_{T(2)} = \bar{Z}_{V(2)}$, lze psát:

$$\bar{Z}_C = \bar{Z}_0 + 2 \cdot (\bar{Z}_T + \bar{Z}_{V1}) + 3R_P \quad (4.49)$$

Vypočtené hodnoty jsou v příloze A v Tab. A.6.

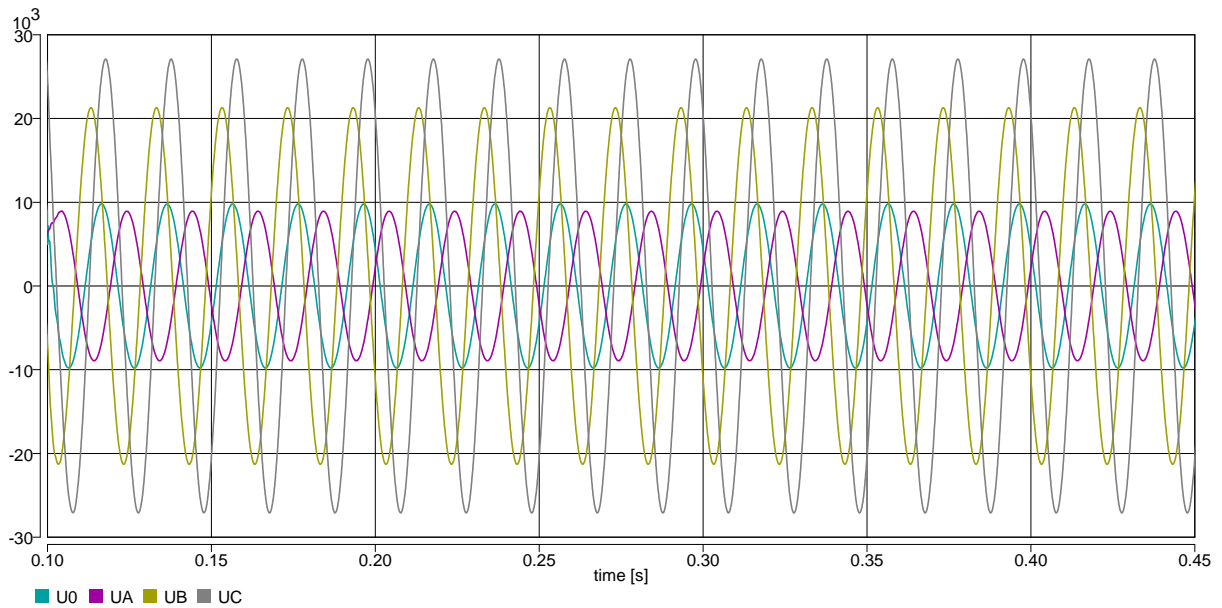
4.6.3 Simulace zemní poruchy v programu DYNAST

Vstupní parametry pro simulaci jsou opět stejné jako v předchozích případech. Srovnání získaných hodnot nejdůležitějších hodnot je uvedeno v Tab. 4.7.

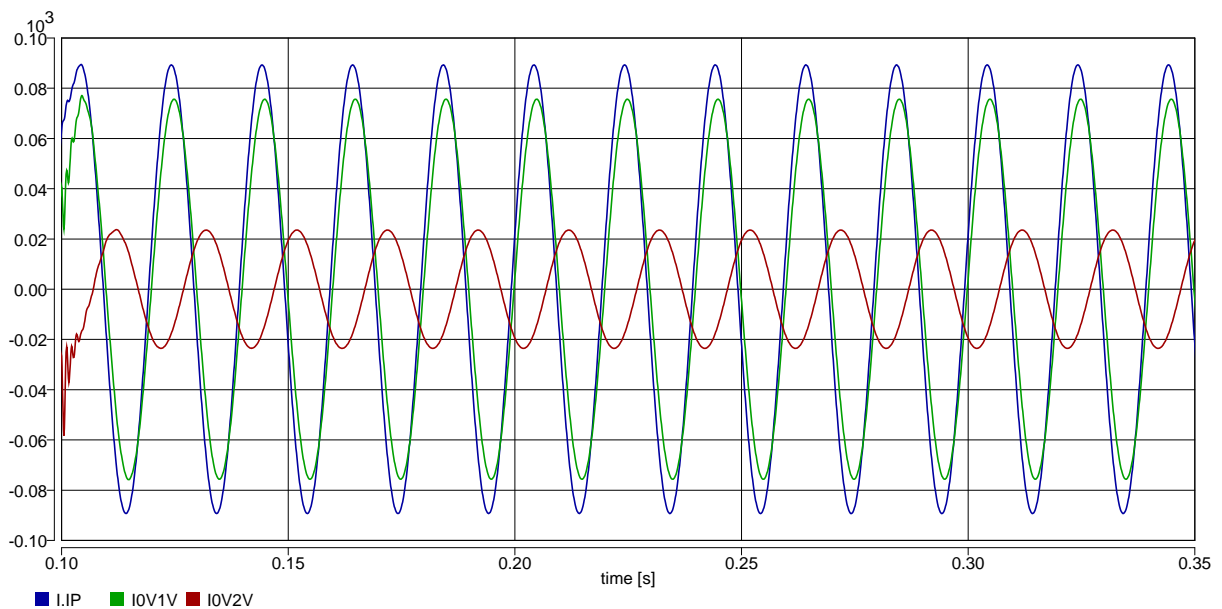
Metoda	$ I_P (A)$	$ U_0 (V)$	$ U_A (V)$	$ U_B (V)$	$ U_C (V)$
DYNAST	63,12	6923,99	6312,34	15055,50	19158,07
Souměrné složky	61,68	6920,24	6187,95	14778,83	18909,31
Chyba (%)	2,28	0,05	1,97	1,84	1,30

Tab. 4.7: Srovnání vypočtených a odečtených hodnot na postiženém vývodu.

Na Obr. 4.14 jsou zobrazeny průběhy napětí U_A , U_B , U_C a U_0 v místě zemního spojení.



Obr. 4.14: Průběhy napětí během odporového jednofázového zemního spojení.



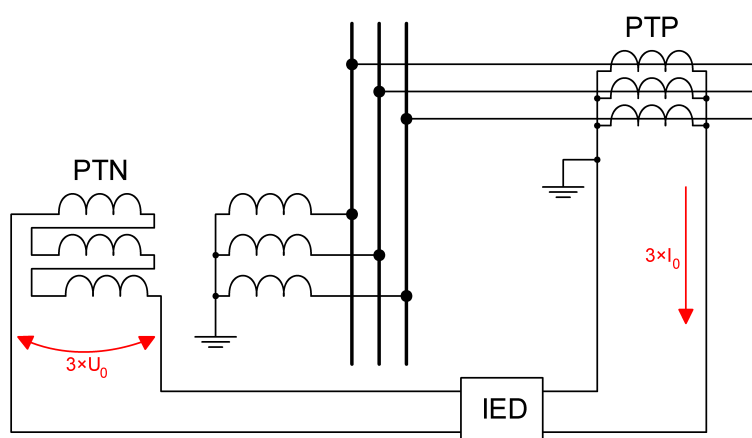
Obr. 4.15: Průběh poruchového proudu během odporového jednofázového zemního spojení.

5

Metody identifikace vývodu se zemní poruchou v sítích VN

Metody identifikace vývodu se zemní poruchou se odvíjí od proudových a napěťových poměrů v síti během poruchy, které jsou závislé na způsobu provozu uzlu viz kapitola 4. V následující kapitole proto uvedu jednotlivé možné způsoby identifikace postiženého vývodu pro všechny používané způsoby uzemnění nulového bodu v sítích VN.

V sítích VN je v první řadě nutné detekovat samotný vznik zemního spojení. Indikace zemního spojení je založena na měření měření netočivé složky napětí U_0 . Napětí U_0 lze měřit skupinou přístrojových transformátorů PTN zapojených do otevřeného trojúhelníka, jež fakticky měří trojnásobek netočivého napětí $3 \times U_0$. V sítích neúčinně uzemněných přes kompenzační tlumivku je možné k měření uzlového napětí využít přímo její automaticku. V napájecích rozvodnách se společně s napětím U_0 měří také netočivá složka proudu $3 \times I_0$, která slouží především k pozdějšímu vyhodnocení vývodu se zemní poruchou. Složka $3 \times I_0$ se obvykle měří součtovým zapojením proudových transformátorů (Holmgreenova skupina), nebo součtovým zapojením proudových transformátorů, jež obepínají všechny tři fáze. Měření nulové složky proudu tímto způsobem je vhodné pro kabelová vedení. [11]



Obr. 5.1: Měření netočivých složek napětí U_0 a proudu I_0 .

Ochrany v rozvodně indikují zemní spojení spojení v případě, překročí-li nulová složka napětí U_0 stanovenou mez asi 15 až 25 % U_f . Nulová složka napětí je závislá na přechodovém odporu R_P a na celkové rozloze sítě. V praxi to znamená, že čím je síť rozlehlejší, při tím menší hodnotě odporu R_P ochrany indikují poruchu v síti. V sítích kompenzovaných navíc stačí k indikaci zemního spojení i malý pokles přechodového odporu R_P . [10]

Popsaná metoda je neselektivní, protože hodnota netočivé složky napětí je téměř stejná v celé síti, a proto ji lze využít pouze k indikaci poruchy, ale už ne k určení konkrétního postiženého vývodu ani k lokalizaci místa poruchy. Pouhá indikace zemní poruchy je dostatečná pouze u sítí, které mají malý rozsah a tedy i velmi malý poruchový proud, který nezpůsobuje nebezpečné hodnoty krokových napětí, a mohou tak být provozovány i se zemní poruchou. U rozlehlejších sítí s větším poruchovým proudem je nutné spolehlivě určit minimálně postižený vývod. Pro identifikaci postiženého vývodu je možné využít metody popsané v následujících kapitolách. Všechny metody lze rozdělit do dvou skupin:

Aktivní metody Aktivní metody využívají k identifikaci postiženého vývodu speciálně generovaného signálu se specifickou stálou nebo proměnnou frekvencí, který je dodán do sítě a který se uzavírá přes místo poruchy do smyčky. Následným sledováním a vyhodnocením tohoto signálu lze relativně přesně určit vývod s zemní poruchou, přestože je přesnost a pravděpodobnost správného určení postiženého vývodu závislá na velikosti odporu zemní poruchy a také na celkové kapacitě vedení proti zemi, kdy u obou těchto parametrů platí, že čím jsou větší, tím je přesnost metody menší.

U kompenzovaných sítí, u kterých je velká pravděpodobnost výskytu vysokoodporových zemních poruch, se proto používá proudového signálu s rezonanční frekvencí. Dojde-li k nízkoodporovému zemnímu spojení, je do soustavy injektován signál s konstantní frekvencí $f = 70 \text{ Hz}$. Tyto signály jsou poté porovnávány a je vyhodnoceno poměrné tlumení na jednotlivých vývodech, přičemž za vývod postižený zemní poruchou je považovaný vývod s útlumem signálu větším než 17 %. [8] [11]

Pasivní metody Pasivní metody využívají k identifikaci postiženého vývodu pouze napěťové a proudové signály generované samotnou zemní poruchou a nepotřebují tedy ke své funkci žádný speciálně generovaný signál. Pasivní metody se dělí na:

- Statické metody, které k vyhodnocení postiženého vývodu využívají proudové a napěťové signály po odeznění přechodného děje.
- Dynamické metody, které k vyhodnocení postiženého vývodu využívají proudové a napěťové signály v průběhu přechodného děje.

Kvůli své technické náročnosti, především kvůli nutnosti využití generátoru pomocného signálu s omezenou kapacitou, nejsou aktivní metody v praxi příliš používané. V této práci se proto zaměřím více používané pasivní metody. [8] [11]

5.1 Statické metody vhodné pro izolované sítě

Porovnání amplitudy netočivé složky proudu

Metoda je založena na porovnávání amplitud netočivých složek proudů v jednotlivých vývodech. Dojde-li vlivem poruchy k překročení přednastavené hodnoty, začne ochrana porovnávat amplitudy netočivých složek proudů ve vývodech s tím, že jako postižený vývod je označen vývod s maximální amplitudou tohoto proudu. Nevýhodou této základní metody je nízká citlivost a značná závislost na přesném změření netočivé složky proudu a to zejména v případech, kdy se celková kapacita sítě blíží kapacitě postiženého vývodu, nebo při vysokoodporových zemních poruchách. [11]

Lepších výsledků je možné dosáhnout aplikací výpočetní metody EdF s názvem DESIR, která vytváří vektorový součet všech netočivých reziduálních proudů a porovnává hodnoty jejich vertikálních projekcí na osu kolmou k tomuto součtovému proudu. Tím se rozpozná vedení s největší činnou složkou netočivého proudu, což je vedení s poruchou. Tato metoda zaručuje rozpoznání zemních spojení s odporem do cca 20 k Ω . [8, str. 23]

Porovnání fáze netočivé složky proudu

U této metody se porovnávají fáze netočivých složek proudů jednotlivých vývodů, přičemž platí, že vývod postižený zemním spojením je charakteristický opačnou fází netočivé složky proudu. Správné vyhodnocení postiženého vývodu je závislé na délce jednotlivých vývodů, velikosti proudové nesymetrie sítě a opět na velikosti přechodového odporu poruchy.

Zvýšení pravděpodobnosti správné identifikace vývodu se zemní poruchou lze podstatně zvýšit kombinací metod. Nejprve se porovnáním amplitud netočivé složky proudu vyberou vývody s možným výskytem zemního spojení a následně se u takto vybraných vývodů porovnají jejich fáze. Opět platí, že postižený vývod bude mít opačnou fázi netočivé složky proudu oproti vývodům bez poruchy. Bohužel ani tato kombinace nezajistí zcela bezchybnou identifikaci postiženého vývodu a to zejména u krátkých sítí s malými hodnotami netočivých složek proudu při vysokoodporových zemních spojeních. [11]

Určení toku netočivé složky jalového výkonu

Tato metoda porovnává netočivé složky proudu a napětí vývodu před a během zemního spojení. U vývodu před poruchou se netočivá složka napětí opožďuje za netočivou složkou proudu o 90°, zatímco u postiženého vývodu předbíhá o 90° netočivá složka napětí netočivou složkou proudu. Metoda tedy vyhodnocuje tok jalového výkonu. O přítomnosti zemního spojení rozhoduje znaménko jalového výkonu tak, že u nepostiženého vývodu je znaménko výkonu kladné a u postiženého naopak záporné. K vyhodnocení zemní poruchy tedy není u této poruchy třeba porovnávat jalový výkon s ostatními vývody. Podobně jako u předchozích metod i zde nastává problém s citlivostí metody u krátkých vývodů s malou hodnotou netočivé složky proudu. [11]

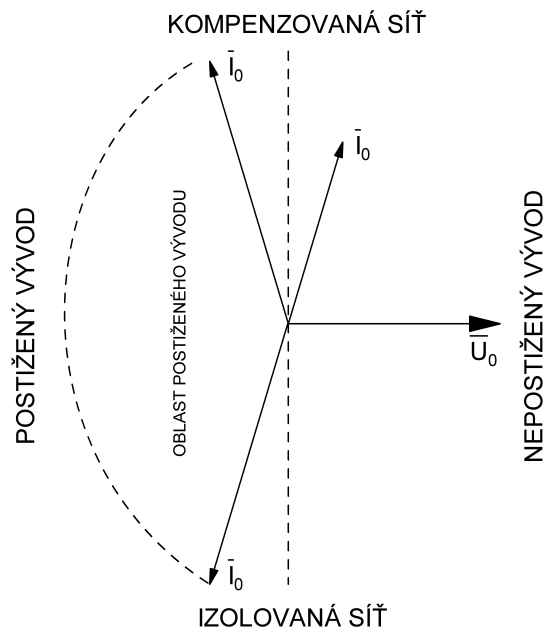
Maximální změna jalové složky netočivého proudu

Podstata této metody spočívá v určení referenčního signálu netočivé složky proudu a odpovídajícího fázového posunu netočivé složky napětí pro každý vývod v bezporuchovém stavu a následnému vyhodnocení jejich změny během zemního spojení. Jako postižený je označený vývod s maximální změnou jalové složky. Využitím této metody se omezuje vliv nesymetrie na selektivitu metody. [11]

5.2 Statické metody vhodné pro kompenzované sítě

Metoda detekce činné složky netočivého proudu

Metoda detekce činné složky netočivého proudu, často označovaná také jako **Wattmetrická metoda**, je jednou ze základních metod pro identifikaci zemního spojení v sítích s uzlem uzemněným neúčinně přes kompenzační tlumivku. Metoda je založena na skutečnosti, že nikdy nelze zcela vykompenzovat celý poruchový proud. Tento reziduální poruchový proud činného charakteru lze poté využít k identifikaci postiženého vývodu, protože u postiženého vývodu je činná složka netočivého proudu resp. výkonu vyšší než u ostatních nepostižených vývodů a navíc má opačný směr.



Obr. 5.2: Příklad pracovní charakteristiky Wattmetrické metody.

Citlivost a přesnost metody stojí na správně navržených měřících proudových transformátorech a opět na velikosti tentokrát činné netočivé složky proudu. Chyby fáze a úhlu použitých měřících transformátorů mohou způsobit neselektivní působení ochrany. Pro zvýšení citlivosti této metody se u nás i ve světě používá krátkodobé navýšení velikosti netočivé složky proudu připojením pomocného odporu ke kompenzační tlumivce. [11] [8]

Admitanční metoda netočivé složky

Admitanční metoda je založena na neustálém měření netočivé složky napětí a proudu. Při překročení nastavené hodnoty netočivé složky napětí \bar{U}_0 ochrana provede výpočet admitance podle vztahu:

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{-\bar{U}_0} \quad (5.1)$$

Přesnost metody lze zvýšit vyhodnocením admitance přírůstkovou metodou, kdy je výsledná admitance vypočtena z poměru přírůstků netočivých složek proudu a napětí mezi stavy před (prefault) a po poruše (fault):

$$\bar{Y}_0 = \frac{(\bar{I}_{0fault} - \bar{I}_{0prefault})}{-(\bar{U}_{0fault} - \bar{U}_{0prefault})} = \frac{\Delta \bar{I}_0}{-\Delta \bar{U}_0} \quad (5.2)$$

U nepostiženého vývodu je výsledná vypočtená admitance rovna celkové admitanci chráněného vývodu \bar{Y}_{vyv} se záporným znaménkem:

$$\bar{Y}_0 = -\bar{Y}_{vyv} = -(G_{vyv} + jB_{vyv}) \quad (5.3)$$

I tato metoda je silně závislá na úrovni netočivých složek proudu a napětí. U malých úrovní těchto složek může mít vypočtená konduktance G_{vyv} a susceptance B_{vyv} i kladné znaménko. Pro správné vyhodnocení je tedy nutná vhodná volba provozní charakteristiky.

Admitance u postiženého vývodu je pak rovna součtu celkové admitance nepostižených vývodů \bar{Y}_{cN} a admitance kompenzační tlumivky \bar{Y}_{TL} :

$$\bar{Y}_0 = -(\bar{Y}_{cN} + \bar{Y}_{TL}) \quad (5.4)$$

Výsledná netočivá konduktance má většinou kladné znaménko, ale znaménko susceptance je v tomto případě závislé na kompenzaci soustavy.

Ochrany využívající admitanční metodu pro indikaci postiženého vývodu pracují s podobnými charakteristikami jako distanční ochrany. Admitanční ochrany využívají pracovní charakteristiky tak, že pokud je nově vypočtená admitance uvnitř charakteristiky, je popud blokován a vývod je označený jako nepostižený. Pokud ale vypočtená admitance překročí stanovenou hranici, dojde k vybavení ochrany a vývod je označen jako postižený.

Na základě experimentálních měření byla prokázána korektní funkce admitanční metody v kombinaci s automatikou připínání pomocného odporníku během ZS s odporem poruchy až do 7,5 kΩ. [11, str. 102]

Přesnost admitanční metody lze pozitivně ovlivnit použitím metody, která k výpočtu výsledné admitance využívá pouze násobky základní harmonické, které jsou obsaženy v poruchovém proudu a nejsou kompenzovány kompenzační tlumivkou – systém se pro tyto frekvenční složky chová jako nevykompenzovaný. Pro výpočet admitance se většinou využívá 5. harmonické, tedy nejvýraznější složky poruchového proudu. V některých případech lze využít také součtu admitancí jednotlivých výrazných harmonických složek. [11] [8]

Konduktanční metoda

Tato metoda je svým principem podobná admitanční metodě s tím rozdílem, že zde dochází pouze k vyhodnocení konduktance vypočtené z netočivé složky proudu \bar{I}_0 a napětí \bar{U}_0 . Pro nepostižený vývod platí:

$$G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = G_{vyv} \quad (5.5)$$

kde G_{vyv} – netočivá konduktance chráněného vývodu.

Konduktance postiženého vývodu je rovna:

$$G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \quad (5.6)$$

kde G_{cN} – netočivá konduktance respektující svod zbývajících nepostižených linek, G_{TL} – netočivá konduktance odpovídající ekvivalentu kompenzační tlumivky.

Přesnost metody je možné opět zvýšit tím, že se k výpočtu konduktance využije přírůstků netočivých složek napětí $\Delta\bar{U}_0$ a proudu $\Delta\bar{I}_0$ mezi stavy před a po poruše. [11]

Konduktanční metoda s měřením přírůstku

U této metody je výpočet konduktancí obdobný jako v předchozím případě, jen s tím rozdílem, že se k výpočtu použijí, podobně jako u admitanční metody, přírůstky netočivé složky proudu a napětí. Využitím této metody lze minimalizovat chyby předchozí metody, vzniklé chybou měření přístrojových transformátorů a nesymetrií soustavy.

Pro nepostižený vývod platí:

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta\bar{I}_0}{\Delta\bar{U}_0} \right] = G_{vyv} \quad (5.7)$$

Pro postižený vývod:

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta\bar{I}_0}{\Delta\bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \quad (5.8)$$

Směr poruchy určuje ochrana z porovnání přírůstků konduktance G_0 s kladnou a zápornou prahovou hodnotou podle stanovené pracovní charakteristiky. Zvlášť výhodné je použití této metody v kombinaci s automatikou připínání pomocného odporu, kdy je na pracovní charakteristice ochrany nastavena jedna popudová hodnota konduktance a to právě podle konduktance zvoleného pomocného odporu G_{Rp} . Při zemní poruše vzroste netočivá hodnota konduktance postiženého vývodu nad hodnotu, která je rovna minimálně konduktanci pomocného odporu G_{Rp} , což má pozitivní vliv na selektivitu těchto typů ochrany a tedy na jejich spolehlivost a citlivost. [11]

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta\bar{I}_0}{\Delta\bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL} + G_{Rp}) = -G_{Rp} \quad (5.9)$$

Platí: $|G_{Rp}| \gg |G_{vyv}|$.

Metoda vyšších harmonických

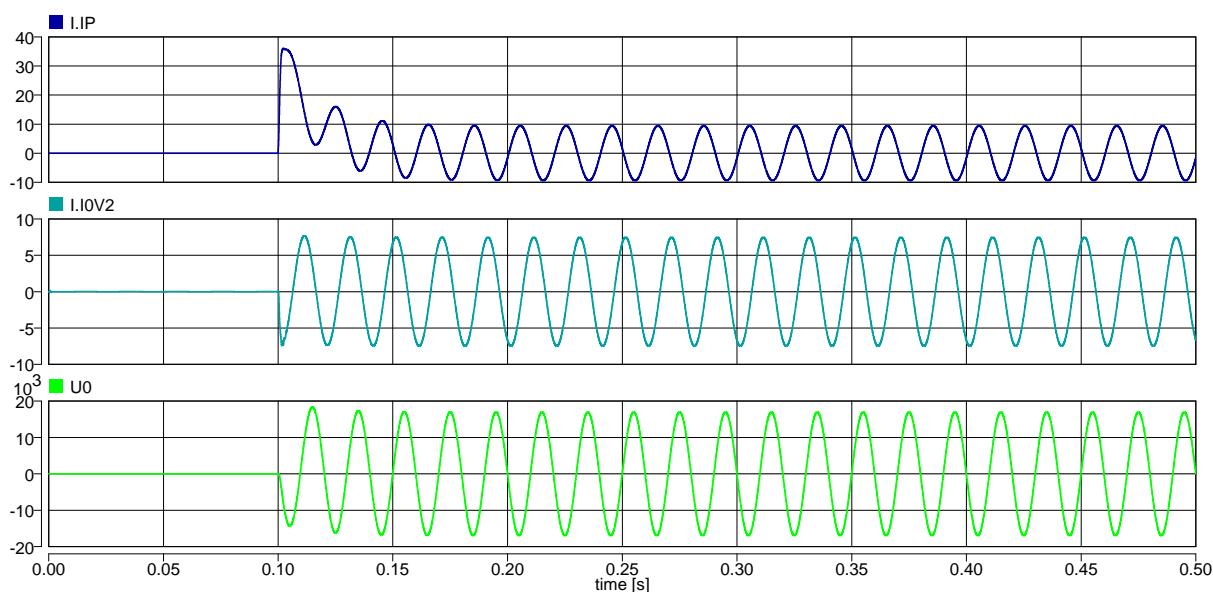
Metoda vyšších harmonických využívá k identifikaci postiženého vývodu úroveň signálu, daného sumací vyšších harmonických (3., 5., 7. harmonické), které se v poruchovém proudu vyskytují vlivem nedokonalé kompenzace poruchy kompenzační tlumivkou. Jako postižený je poté označený vývod s maximální úrovní tohoto signálu.

V praxi se ještě používá metoda 5. harmonické, kdy se po vzniku poruchy měří nejen úroveň signálu, ale i jeho fáze. Postižený vývod má pak maximální úroveň této složky a navíc opačnou fázi. Metoda 5. harmonické je velmi závislá na přesnosti měření, frekvenční analýze a samozřejmě na úrovni této harmonické složky v chráněné síti, která běžně není větší než 10 % základní harmonické. [11]

5.3 Dynamické metody

Metoda první půl-periody

Metoda první půl-periody vyhodnocuje oscilografické průběhy netočivé složky proudu a napětí právě během první půl-periody (desítky milisekund) přechodného děje, který vzniká při zemním spojení v důsledku vybití kapacity postižené fáze a nabití kapacit zbývajících dvou fází, než dojde k jeho utlumení. Jako postižený je označen vývod, u kterého jsou naměřené složky netočivého proudu a napětí v tomto krátkém časovém intervalu v protifázi. U zdravého vývodu jsou tyto netočivé složky ve fázi. Metoda první půl-periody je vhodná pro kompenzované sítě, kde spolehlivě funguje i pro oblouková zemní spojení. Problémy s touto metodou ale nastávají u vysokoodporových zemních poruch, jejichž odpor výrazně tlumí přechodný děj a tím znesnadňuje spolehlivé označení vývodu. [11]



Obr. 5.3

Metoda qu-diagramu

Metoda vyhodnocuje grafickou závislost netočivé složky proudu (představující náboj q_0) na netočivé složce napětí. [11, str. 107] Vybíjecí proces nepostíženého vývodu lze popsat rovnicemi:

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eq}} \int_{t_0}^t i_0(\tau) d\tau = u_0(t_0) + \frac{q_0(t)}{C_{eq}} \quad (5.10)$$

kde t_0 – čas vzniku zemního spojení, C_{eq} – ekvivalentní kapacita mezi vodičem a zemí všech nepostížených vedení v celé síti, i_0 – okamžitá hodnota netočivé složky proudu procházející sledovaným nepostíženým vedením.

Obecně se předpokládá, že v okamžiku vzniku zemního spojení je okamžitá hodnota netočivé složky napětí $u_0(t)$ rovna nule. S ohledem na tento předpoklad z rovnice 5.10 vyplývá, že závislost netočivé složky proudu na netočivé složce napětí je ovlivněna jen konstantní kapacitou C_{eq} . Výsledné grafické znázornění tzv. qu-diagram u nepostíženého vývodu je tedy přímka s gradientem C_{eq} . V případě postiženého vývodu nebude závislost 5.10 platná z důvodu opačného směru vybíjecího proudu (qu-diagram začíná s opačným gradientem) a vlivu kompenzační tlumivky na její linearitu. [11]

Metoda qu2-diagramu

Metoda qu2-diagramu je dokonalejší verzí předchozí metody, u které se využívá filtru pro odstranění frekvenčního spektra netočivé složky proudu a napětí, způsobeného nesymetrií a nelineárním zatížením systému ve stavu před poruchou tak, aby bylo možné vyhodnotit pouze průběhy netočivých složek proudu a napětí vzniklých při zemní poruše. Díky tomu nedochází ke zkreslování výsledného qu2-diagramu a lze snadněji určit gradient. [11]

Metoda vyhodnocení částečných výbojů

Metoda vyhodnocení částečných výbojů je určena zejména pro izolované vysokonapěťové vodiče venkovních vedení, u kterých je složité detekovat zemní spojení obvyklými metodami vzhledem k velmi dobrým izolačním vlastnostem těchto vodičů. Pro detekci poruchy se proto využívá metoda sledování impulzních složek signálů částečných výbojů, které vznikají ať už na povrchu vodičů (korónové výboje) nebo uvnitř izolace. Vhodným vyhodnocením naměřených signálů lze úspěšně rozeznat poruchy, jež jsou zapříčiněny pádem vodiče na zem nebo také pádem stromu či větve do izolovaného vedení. Velkou nevýhodou této nové metody je ale požadavek na velmi přesnou měřicí techniku. [11]

Pulzní metoda

Při indikaci postiženého vývodu pulzní metodou postačuje sledovat velikost netočivé složky proudu. V průběhu zemního spojení se ke kompenzační tlumivce paralelně připojuje kapacitní baterie, která na postiženém vývodu mění proud tekoucí místem poruchy. Skupinu impulzů generovanou s periodou připínání kapacitní baterie 0,5 až 1Hz lze pak

naměřit od místa připojení baterie až do místa zemního spojení. *Pro zvýšení citlivosti této metody se používá asymetrická skupina pulzů, která také zlepšuje rozlišení postiženého a nepostiženého vývodu při vysokoodporovém zemním spojení.* [8, str. 30] [8]

Porovnání amplitudy netočivé složky proudu

U této metody se porovnávají amplitudy netočivé složky proudu u jednotlivých vývodů během přechodného děje. Jako postižený je indikován vývod s maximální velikostí této složky. Metoda není vhodná pro v síti se dvěma vývody, kde dochází k chybné indikaci. [8]

Porovnání polaritý netočivé složky proudu

Metoda indikuje vývod jako postižený, má-li během přechodného děje opačnou polaritu netočivé složky proudu na rozdíl od ostatních vývodů. [8]

Porovnání polaritý jalového výkonu netočivých složek napětí a proudu

Metoda indikuje vývod jako postižený, má-li jalový výkon netočivých složek proudu a napětí během přechodného děje opačnou polaritu než ostatní vývody. [8]

Metoda energií

Procesy po vzniku zemního spojení jsou interpretovány zobrazením energií, které jsou produkovány netočivými složkami napětí a proudu. Po zemním spojení je energie postiženého vývodu záporná a nepostižených kladná. [8, str. 30]

5.4 Metody vhodné pro odporově uzemněné sítě

V sítích uzemněných přes uzlový odporník se k vyhodnocení postiženého vývodu využívá relativně jednoduchého nadproudého kritéria. Vzhledem k velikosti rezistance odporníku, jež ovlivňuje výslednou velikost poruchového proudu, je i zde nutné, aby ochrany vyhodnocovaly součtový proud, který lze měřit buď v uzlu fázových transformátorů proudu nebo přídavným součtovým transformátorem.

Aby byla zemní ochranou detekována zemní porucha, musí být splněna podmínka daná vztahem 5.11, která jasně určuje, že poruchový proud musí být větší než proud nastavený:

$$I_{nast} < \frac{I_{min}}{k_c \cdot p_i} \quad (5.11)$$

kde I_{nast} – rozběhový proud ochrany, I_{min} – minimální proud při poruše, k_c – koeficient citlivosti ochrany, p_i – převod proudového transformátoru.

Zároveň musí platit, že nastavený proud v ochraně musí být dostatečně větší než vlastní kapacitní proud vývodu:

$$I_{nast} > I_C \cdot k_b \quad (5.12)$$

kde k_b – koeficient bezpečnosti, jež by měl být $c_b = 1, 3$.

Mez minimálního poruchového proudu v sítích uzemněných přes uzlový odporník pro oblouková zemní spojení byla stanovena na:

- Pro kabelová vedení:

$$I_{pmin} = \frac{0,7 \cdot U_f}{R_N \cdot R_v} \quad (5.13)$$

kde R_N – odpor uzlového odporníku, R_v – odpor vlastního vedení.

- Pro venkovní vedení:

$$I_{pmin} = \frac{0,1 \cdot U_f}{R_N} \quad (5.14)$$

Podmínky dané vztahy 5.11 a 5.12 nelze splnit zejména u velkých kabelových nebo smíšených sítí a to hlavně kvůli velkým vlastním kapacitním proudům, které nedovolují správné seřízení ochran. V těchto sítích se již proto nemohou využít jednoduché ochrany využívající pouze nadproudé kritérium, ale musí se použít směrové nadproudé ochrany či zemní Wattové, které využívají principu popsaného v kapitole 5.2. [9]

5.5 Způsoby lokalizace místa zemní poruchy

Odpínání úseků postiženého vývodu

Odpínání úseků postiženého vývodu je jedním z nejdéle používaným a především neefektivnějším způsobem vyhledávání místa zemní poruchy. Metoda spočívá v postupném odpojování části vývodu a to až do doby, kdy ochrany přestanou zemní poruchu indikovat. Po zjištění konkrétní části postiženého vedení je na místo vyslána technická obsluha, která zajistí přesné dohledání a odstranění poruchy. Nevýhoda této metody spočívá ve velmi náročných dispečerských manipulacích a také v nutnosti častého přerušování dodávky elektrické energie. I přesto je ale tato metoda velmi používaná a rozšířená, protože dosud neexistuje adekvátní náhrada. Obecně je ale snaha tuto nedokonalou metodu nahradit novými schopnějšími metodami, které se v současné době vyvíjejí. [11]

Spojování postiženého vývodu do kruhu

Metodu spojování postiženého vývodu do kruhu s nepostiženým vývodem využívá pro určení místa poruchy například již zmíněný systém RCC od firmy Swedish Neutral. Z dispečerského hlediska se jedná o jednodušší metodu než je odpínání úseků postiženého vývodu, ale u vedení, která vycházejí ze stejné přípojnice napájecí rozvodny, není spojení do kruhu vždy možné. Pro určení místa zemní poruchy využívá metoda přerozdělení netočivé složky proudu a z toho poté dopočte vzdálenost poruchy. Kromě často nemožného propojení vývodů do kruhu brání plošnému nasazování této metody také velké difference provedení venkovních vedení jednotlivých vývodů, ať už se jedná o délky jednotlivých

vedení nebo parametry použitých vodičů. Na přesnost výpočtu místa poruchy má vliv také nestálost parametrů vedení s ohledem na povětrnostní podmínky. [11]

Indikátory poruch pro venkovní vedení

Indikátory poruch slouží k indikaci směru zemního spojení tak, že sledují napěťové a proudové poměry jednotlivých fázových vodičů nebo netočivých složek napětí a proudu a vyhodnocují je na základě výše zmíněných metod či jejich kombinací. Provedení různých indikátorů se liší, protože odpovídá požadavkům provozovatelů distribučních sítí, ale zřejmě nejrozšířenější jsou indikátory, které sledují elektrické a magnetické pole chráněné části vedení. Podle provedení (podle počtu senzorů) lze tyto přístroje rozdělit na:

- Indikátory snímající celkové elektrické a magnetické pole všech fází, jež jsou vybaveny pouze jedním senzorem a měří sumaci elektrických a magnetických polí.
- Indikátory snímající elektrické a magnetické pole jednotlivých fází.

Indikátory snímající sumaci polí jsou konstrukčně jednoduché a mají malé rozměry, díky čemuž se velmi snadno instalují na poruchové části vedení a to i bez přerušení dodávky elektrické energie. Nevýhodou těchto indikátorů je ale relativně nízká citlivost.

Velmi výhodná je instalace indikátorů poruch v blízkosti dálkově ovládaných úsečníků, které jsou vybaveny dálkovou komunikací s dispečinkem napájecí rozvodny, kterou lze poté využít i pro dálkovou signalizaci místa poruchy. Pokud není dálková komunikace možná, mohou přístroje indikovat zemní spojení pomocí rozpínacích kontaktů relé, optickou signalizací nebo indikačními terčíky s magnetickou pamětí. Prostředky dálkově ovládaných úsečníků lze využít i pro napájení těchto přístrojů, popřípadě je možné napájet indikátory z akumulátorů, fotovoltaickým panelem nebo přímo z chráněného vedení. [11]

Indikátory poruch pro kabelová vedení

Indikátory pro kabelová vedení jsou konstrukčně jednodušší a i přesnější než indikátory poruch pro venkovní vedení. K vyhodnocení zemního spojení je do jednotky přiveden signál z průvlekového transformátoru proudu, který měří nulovou složku proudu I_0 . Metodou vyšších harmonických je vyhodnocena úroveň tohoto proudu, jež následně rozhodne o přítomnosti zemní spojení. Dohledání konkrétního místa zemní poruchy se poté provádí, podobně jako u venkovního vedení, sledováním stavu jednotlivých indikátorů. [11]

Indikátory zkratového proudu

Indikátory zkratového proudu (IZP) se používají v rozlehlých a konstrukčně složitých kabelových sítích s nulovým bodem neúčinně uzemněným přes uzlový odporník.

Každý indikátor obsahuje vlastní řídicí jednotku a tři měřící proudové transformátory, které jsou instalovány na jednotlivé fáze a ty pak sledují průchod proudu jednotlivými

vodiči. Překročí-li sledovaný průchozí proud popudovou hodnotu a čas zpoždění, dojde k indikaci poruchy. Řídící jednotky IZP jsou napájeny buď ze sítě NN, nebo přímo z proudových transformátorů, jež odebírají elektrickou energii přímo z kontrolovaného vedení. Princip vyhledání místa poruchy je pak obdobný jako v předchozích případech. [11]

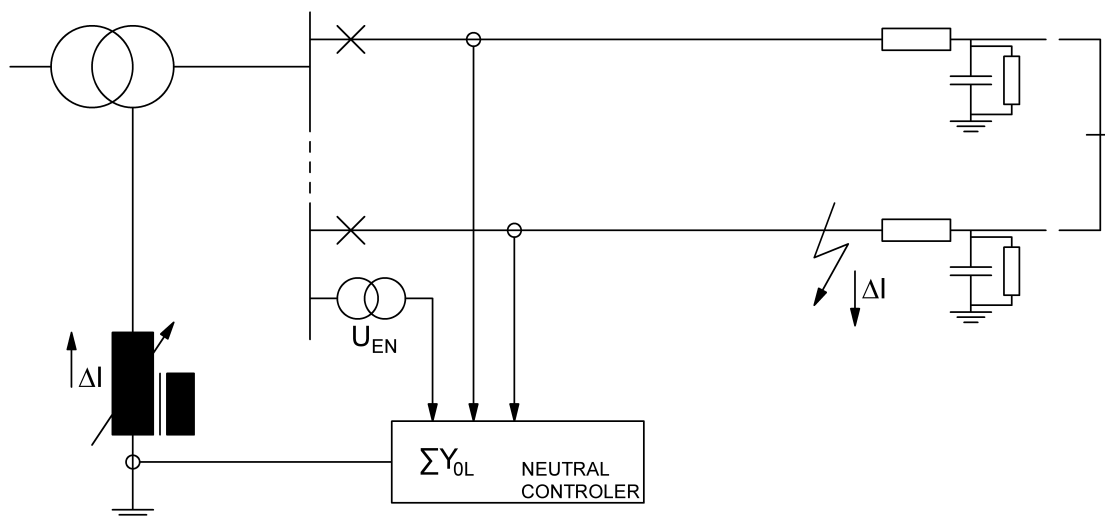
5.6 Systém RCC (Swedish Neutral)

Systém RCC (Residual Current Compensation) vyvinutý firmou Swedish Neutral v sobě kombinuje zařízení pro indikaci postiženého vývodu, kompenzaci poruchového proudu i systému pro lokalizaci místa zemní poruchy.

Systém RCC pracuje na základě admitanční metody, kdy v souladu s touto dříve popsanou metodou sleduje a vypočítává hodnoty admitance jednotlivých vývodů a na základě zjištěné změny admitance označí vývod postižený zemní poruchou. Prakticky ihned po označení postiženého vývodu systém začíná s kompenzací poruchového proudu automatickým laděním kompenzačních tlumivek, které ladí až do chvíle, kdy se průběžně vypočítávaná admitance rovná admitanci vývodu před vznikem poruchy.

K určení místa poruchy je systémem RCC je nutné spojit postižený vývod do kruhu s vývodem nepostiženým, neboť je se zde využívá principu přerozdělení netočivé složky proudu a místo poruchy je vypočteno z poměru admitancí obou vývodů. Ve většině oblastí ale není možné tuto metodu využít, protože zde není možné provést potřebné zakruhování.

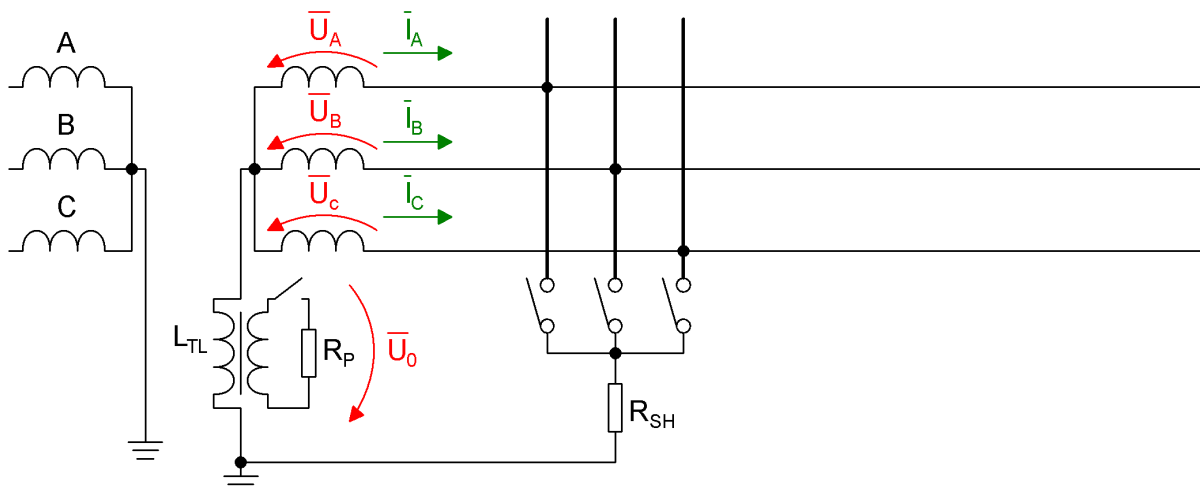
Výhodou tohoto systému je kromě kombinovaného řešení také rychlost přizpůsobení na změny kapacity proti zemi při změnách konfigurace sítě. V ČR je systém *Swedish Neutral* provozován společností ČEZ.a.s. v rozvodně Hodolany, Olomouc. [8, str. 30] [11]



Obr. 5.4: Schéma zapojení systému RCC (Swedish Neutral).

5.7 Přizemnění postižené fáze v napájecí rozvodně

Přizemnění postižené fáze tzv. shuntig (česky též šentování) je určeno především ke zvýšení bezpečnosti provozu během jednofázové zemní poruchy, kde slouží jako ochrana před nebezpečným dotykovým a krokovým napětím v místě zemního spojení, a také ke snížení tepelného namáhání energetických zařízení, které vzniká jako důsledek průchodu proudu.



Obr. 5.5: Schéma systému přizemnění postižené fáze.

Princip a účel přizemnění vyplývá již z názvu: po vzniku a úspěšné identifikaci postiženého vývodu a ideálně také po lokalizaci místa zemního spojení je spínačem připojena postižená fáze k zemní soustavě napájecí rozvodny. Tímto přepojením vznikne poruchovému proudu paralelní cesta s obvykle mnohem menší impedancí. Protože platí, že se poruchový proud přerozdělí v poměru impedancí jednotlivých vodivých cest, velmi často se téměř celý uzavírá v rozvodně, kde je přes kvalitní zemní soustavu sveden do země, a v místě poruchy tak zůstává už jen velmi malý zbytkový proud, který není nebezpečný.

Posiženou fází systém vyhodnotí na základě napěťových a proudových poměrů, jež jsou v souladu s dříve uvedeným teoretickým rozbohem zemních spojení v sítích s neúčinně uzemněným uzlem. Při zemním spojení v neúčinně uzemněné síti klesne napětí na poškozené fázi na hodnotu, která je závislá na odporu poruchy. Současné systémy šentování vyhodnocují jako postiženou fází tu, jejíž napětí klesne na hodnotu $0,8 \cdot U_f$ [5, str. 62]. Při této mezní hodnotě dojde k sepnutí spínače a přizemnění poškozené fáze.[5]

Na Obr. C.4 je zobrazen průběh poruchového proudu v kompenzované síti s automatikou připínání pomocného odporníku a systémem přizemnění postižené fáze. Z průběhu je patrné, že v časech $t = 0,3$ až $t = 0,35$ s došlo k připnutí pomocného odporníku R_{POM} , protože se poruchový proud náhle zvýšil. V čase $t = 0,4$ s došlo k přizemnění fáze A přes odpor shuntu $R_{SH} = 1 \Omega$ a poruchový proud v místě poruchy klesl téměř na nulu.

6

Vyhodnocení vhodnosti způsobu chránění pro vybrané případy

V předchozí kapitole jsem popsal několik způsobů identifikace vývodu postiženého zemní poruchou pro sítě izolované a kompenzované a také metodu vhodnou pro sítě uzemněné přes uzlový odpor. I když je u sítí izolovaných a neúčinně uzemněných přes tlumivku obecně snaha přecházet na novější metody identifikace postiženého vývodu, které jsou často součástí multifunkčních zemních ochran, zřejmě nejrozšířenější jsou stále metody založené na sledování směru nulové složky proudu I_0 .

Po domluvě se svým konzultantem Ing. Františkem Žákem jsem se rozhodl, že se v následujícím rozboru zaměřím právě na spolehlivost této metody v závislosti na různých modelových případech, které jsou typické pro provoz distribučních sítí. K simulaci těchto provozních stavů využiji model sítě, jež jsem si sestavil pro potřeby předcházejících kapitol, a vlastní výpočtový program sestavený v programu OpenOffice Calc.

Jako referenční mi byla doporučena jednoduchá číslicová kombinovaná nadproudá a zemní ochrana **REJ 527** od ABB, která je určena především pro chránění distribučních sítí vysokého napětí a jejíž vypínací charakteristiky využiji k ověření spolehlivosti metody. Ochraňovací REJ 527 se v praxi stále využívá, ale oficiálně již byla v roce 2009 nahrazena IED REF610 pro chránění a řízení vývodu, o kterém se zmíním v závěru této kapitoly.

Zemní směrová nebo nesměrová ochrana REJ 527 je sekundární ochrana, která je připojena k napěťovým a proudovým transformátorům chráněného objektu. [2, str. 8] Pracuje na principu nepřetržitého monitorování nulové složky napětí, zemního proudu a fázového úhlu chráněného objektu. Podle konfigurace ochrany může při zjištění poruchy v síti dojít k popudu ochrany, vypnutí vypínače, vyslání alarmů či k zaznamenání poruchových dat.

Ochranné funkce ochrany jsou na sobě nezávislé. Proudové i napěťové stupně k využívají běžné napěťové a proudové měřicí transformátory. V běžném provozu a při splnění předepsaných podmínek je ochrana REJ 527 prakticky bezúdržbová. [2]

6.1 Charakteristika ochrany REJ 527

Podle Technické referenční příručky [2] obsahuje ochrana REJ 527 především:

- Směrový nebo nesměrový proudový stupeň s nízkým nastavením s časově závislou (s definovaným minimálním časem) či nezávislou charakteristikou.
- Směrový nebo nesměrový proudový stupeň s vysokým nastavením s časově nezávislou charakteristikou.
- Uvolňovací stupeň nulové složky napětí s časově nezávislou charakteristikou.
- Ochranu při přerušovaném zemním spojení.
- Ochranu při selhání vypínače (CBFP).

Další charakteristické vlastnosti ochrany jsou vypsány v [2, str. 5].

6.1.1 Směrová nebo nesměrová jednotka zemního proudu

Stupně s vysokým i nízkým nastavením směrové jednotky zemního proudu je možné nastavit jako směrové nebo nesměrové. Směrovým stupňům mohou mít charakteristiku s se základním úhlem, nebo se $\sin(\varphi)$ či $\cos(\varphi)$.

Při využití charakteristiky se základním úhlem je měřeno napětí U_0 , zemní proud I_0 a jejich vzájemný fázový posuv φ . K popudu ochrany dojde ve chvíli, kdy jsou splněna tři kritéria, která odpovídají postiženému vývodu:

- proud I_0 překročí popudovou hodnotu daného stupně nastavení,
- hodnota nulové složky napětí U_0 překročí nastavenou popudovou hodnotu $U_{0b} >$,
- fázový úhel φ mezi napětím a proudem klesne do vypínací oblasti $\varphi_b \pm \Delta\varphi$.

Základní úhel φ_b je rozdílný v závislosti na uzemnění uzlu sítě: v sítích s izolovaným uzlem je $\varphi_b = -90^\circ$, zatímco v sítích s uzlem uzemněným přes tlumivku je $\varphi_b = 0^\circ$. *Oblast vypnutí lze zvolit v rozsahu $\Delta\varphi = \pm 80^\circ$ nebo $\Delta\varphi = \pm 88^\circ$.* [2, str. 14]

Při popudu zemního stupně je generován popudový signál a popud je indikován na HMI¹. Jestliže jsou výše uvedená kritéria splněna po dostatečně dlouhou dobu, kdy je překročen nastavený vypínací čas, stupeň vyšle vypínací signál a na HMI je indikováno vypnutí. Indikátor zůstane aktivní i přesto, že ochranný stupeň je resetován. Směr k místu poruchy je určený úhlem mezi napětím a proudem. [2, str. 14]

¹HMI (Human-Machine Interface) obsahuje alfanumerické LCD a ovládací tlačítka a slouží, jež slouží k místnímu ovládání a konfiguraci funkcí ochrany.

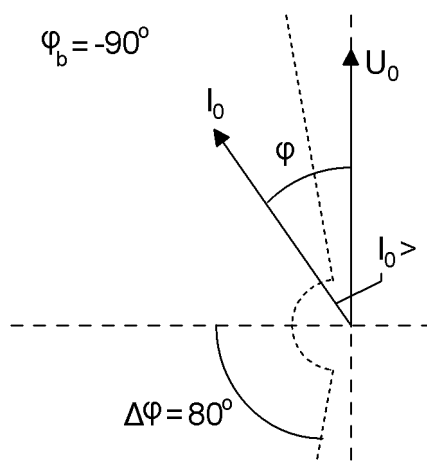
Aby ochrana vybavila je nutné splnit podmínky uvedené v 6.1.1. Úhel ve vypínací oblasti tedy není jedinou podmínkou správného určení vývodu se zemní poruchou. Nejprve je nutné, aby ochrana vůbec zaregistrovala vznik zemního spojení v chráněné části sítě. O přítomnosti zemní poruchy rozhoduje právě úroveň nulového napětí U_0 a proud I_0 . Aby tedy bylo zemní spojení spolehlivě detekováno, musí napětí a proud překročit určitou úroveň danou nastavením příslušného stupně. Na úroveň sledovaných složek má největší vliv velikost přechodového odporu poruchy R_P . Při vysokých hodnotách přechodového odporu se může stát, že sledované složky napětí a proudu nepřekročí nastavenou hodnotu a zemní spojení nebude vůbec detekováno.

S nízkou úrovní zemního proudu souvisí také problém s přesností měřících transformátorů. Na začátku kapitoly 5 jsem zmínil, že se nulové proudy jednotlivých vývodů nadzemních vedení měří v napájecí rozvodně součtovým zapojením proudových transformátorů, jejichž převod se volí podle nejvyššího očekávaného proudu v síti při poruše. Popudový proud na ochranách se poté nastavuje jako procento z proudu jmenovitého. Pro nízký stupeň $I_0 >$ se obecně používá rozsah $1,0$ až $100\% \times I_n$. V základu jsou ochrany nastaveny na popudový proud odpovídající $1,0\% \times I_n$, ale s ohledem na omezenou přesnost měřících transformátorů se spíše volí nastavení například $2,0\% \times I_n$, aby se předešlo případnému falešnému vybavení ochrany.

V následujícím rozboru budu tedy měnit jednotlivé parametry modelu sítě a sledovat, jestli měřené a vyhodnocované veličiny $\Delta\varphi$, U_0 , I_0 splní uvedené podmínky a dojde tak ke spolehlivé detekci zemního spojení v síti a následné identifikaci vývodu se zemní poruchou.

Sít s izolovaným uzlem

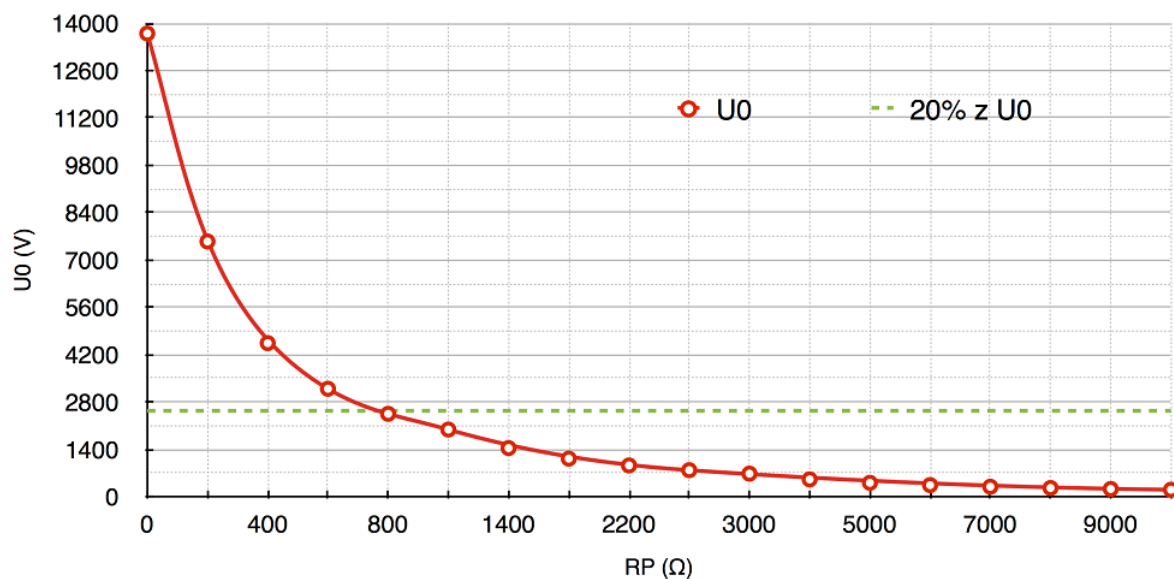
V síti s izolovaným uzlem je využití směru nulového proudu I_0 k identifikaci postiženého vývodu výhodné, protože zde platí, že proud I_0 postiženého vývodu má opačný směr oproti proudu I_0 vývodu bez poruchy. Vypínací charakteristika se základním úhlem $\varphi_b = -90^\circ$, která se uplatňuje v sítích s izolovaným uzlem je na Obr. 6.4. [2]



Obr. 6.1: Charakteristika se základním úhlem $\varphi_b = -90^\circ$ vhodná pro izolované sítě.

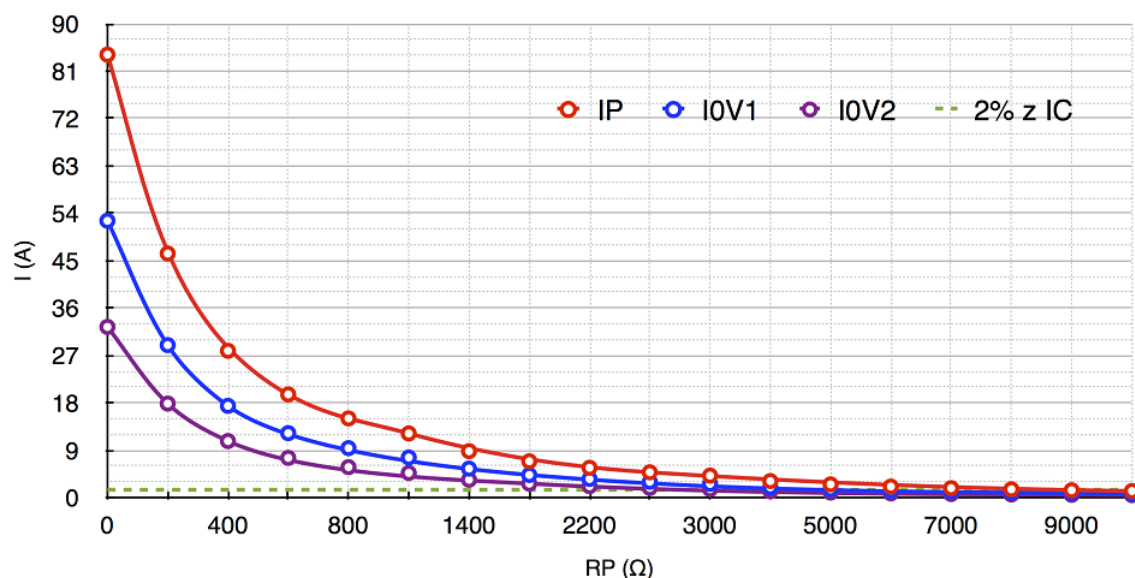
U sítí s izolovaným uzlem tedy není problém s identifikací postiženého vývodu podle směru fázoru proudu I_0 , ale spíše se samotnou detekcí zemní poruchy s velkým přechodovým odporem. Průběhy měřených veličin jsou na Obr. 6.2 a Obr. 6.3.

Ze závislosti nulového napětí U_0 na odporu poruchy R_P je patrné, že v síti izolované od země přestávají při nastavení $U_0 = 0,2 \cdot U_f$ přestává ochrana detekovat zemní poruchu již při odporu poruchy asi 800Ω . Řešením této situace je nastavení popudové hodnoty U_0 například na 10% z U_f , ale při takovém nastavení už reálně hrozí možnost falešné detekce zemní poruchy kvůli nesymetriím sítě, jež nejsou způsobeny přímo poruchou v síti.



Obr. 6.2: Závislost nulového napětí U_0 na odporu poruchy R_P .

U proudů není vliv odporu poruchy tak markantní. Měřený součtový proud I_{0V1} nepřesáhne nastavenou hodnotu až při odporu poruchy odpovídající zhruba $R_P = 5000 \Omega$.



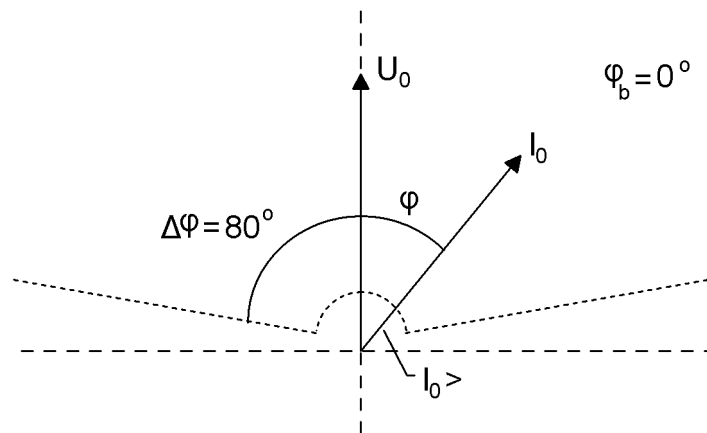
Obr. 6.3: Závislost proudů I_P a součtových proudů I_{0V1} a I_{0V2} odporu poruchy R_P .

Síť uzemněná přes kompenzační tlumivku

Identifikace postiženého vývodu podle směru I_0 v sítích s tímto způsobem uzemnění uzlu je složitější než v předchozím případě, protože u těchto sítí již neplatí, že jsou fázory nulových proudů postiženého a nepostiženého vývodu ve vzájemné protifázi, nebo že se jejich směr alespoň významněji liší. Výsledný úhel mezi nulovými proudy sledovaných vývodů α závisí na mnoha parametrech sítě, proto se může stát, že pro některé konfigurace nebude úhel mezi nulovými proudy postiženého a nepostiženého vývodu dostatečný ke spolehlivé identifikaci vývodu se zemní poruchou. Popsanou situaci znázorňuje Obr. 6.5.

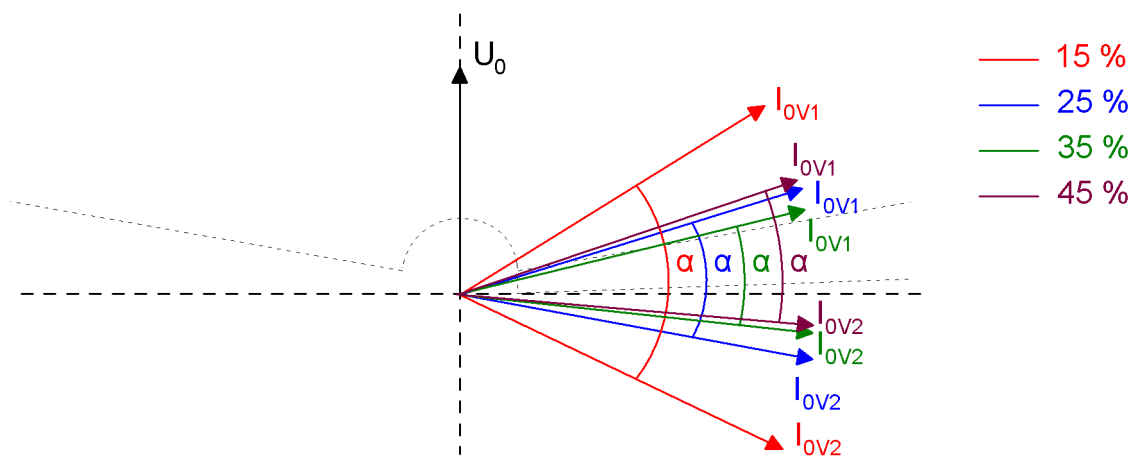
Obecně se dá říct, že ochrany správně identifikují postižený vývod je-li $\alpha > 10^\circ$. [4]

Vypínací charakteristika ochrany REJ 527 se základním úhlem $\varphi_b = -90^\circ$, která se uplatňuje v sítích s uzlem uzemněným přes kompenzační tlumivku je na Obr. 6.4. [2]



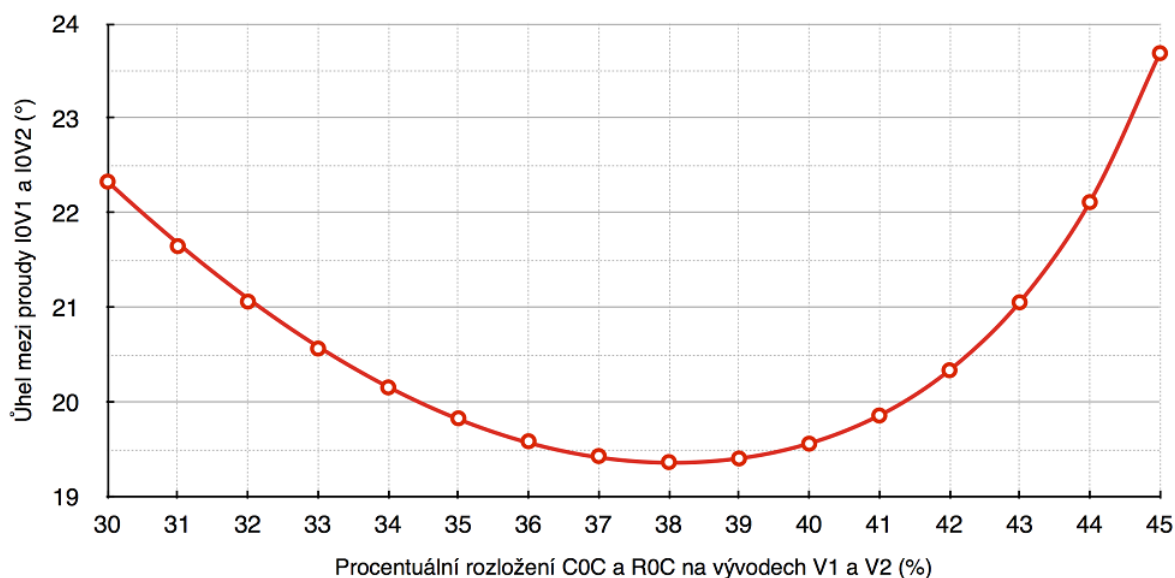
Obr. 6.4: Charakteristika se základním úhlem $\varphi_b = 0^\circ$ vhodná pro kompenzované síť.

Jedním z hlavních parametrů, který má podstatný vliv na velikost úhlu mezi proudy sledovaných vývodů, je procentuální rozložení celkové kapacity proti síti zemi C_{0C} mezi zkoumané vývody a neřešený zbytek sítě. Tato závislost je zobrazena na Obr. 6.5.



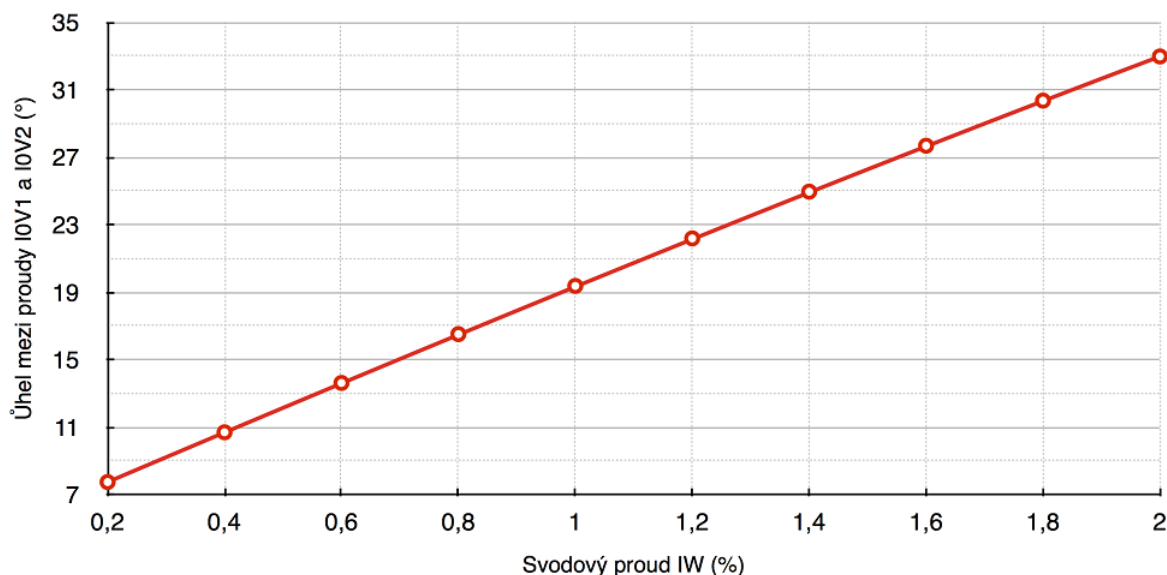
Obr. 6.5: Závislost velikosti úhlu α na procentuálním rozložení celkové kapacity.

Z Obr. 6.5 je zřejmé, že nejmenší úhel mezi fázory sledovaných proudů je přibližně při rovnoměrném rozložení celkové kapacity mezi dva sledované vývody a zbytek sítě. Tento potenciálně nebezpečný interval jsem podrobněji vynesl do grafu na Obr. 6.6.



Obr. 6.6: Závislost úhlu mezi proudy I_{0V1} a I_{0V2} na procentuálním rozložení C_{0C} a R_{0C} .

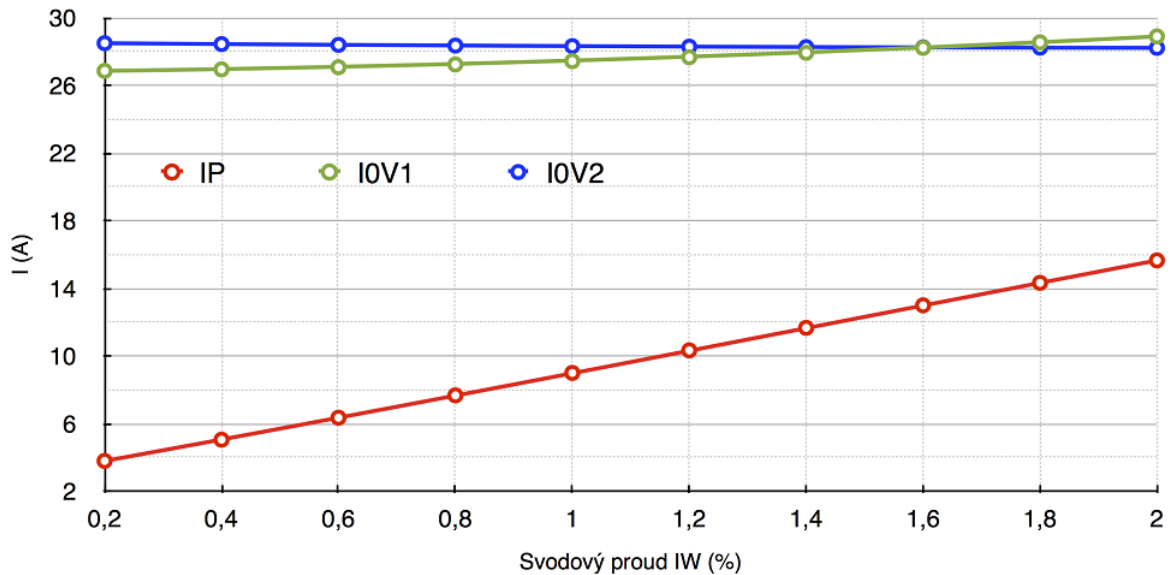
Z grafické závislosti na Obr. 6.6 je vidět, že díky relativně velkému svodovému proudu $I_W = 1\%$ z I_C neklesl úhel α pod nebezpečnou úroveň asi $\alpha < 10^\circ$, protože právě činný svodový proud I_W je další důležitý parametr, na kterém je úhel α závislý viz Obr. 6.7.



Obr. 6.7: Závislost úhlu mezi součtovými proudy I_{0V1} a I_{0V2} na svodovém proudu I_W .

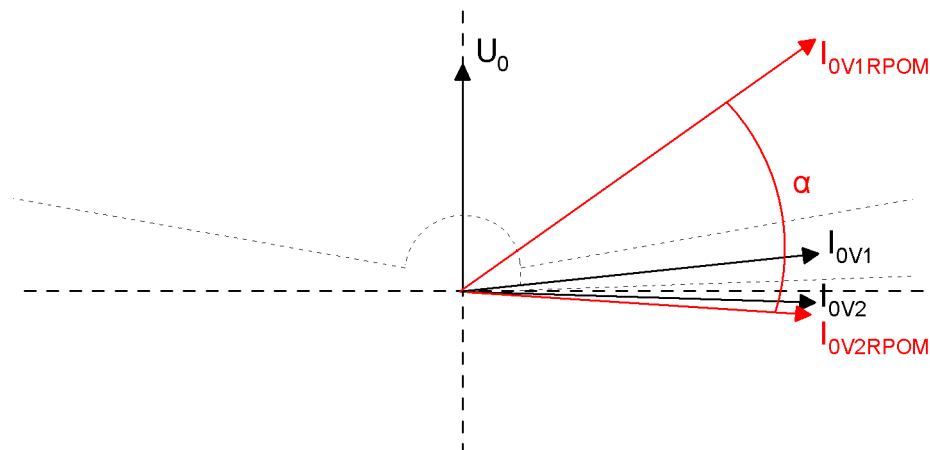
Fázorový diagram na Obr. 6.5 a graf na Obr. 6.6 odpovídají parametrům sítě: $I_C = 75\text{ A}$, $C_{0C} = 6,27 \cdot 10^{-6}$, $I_W = 1\%$ z I_C a $R_P = 0$.

Činný svodový proud I_W má vliv také na velikost sledovaných proudů. Největší vliv má na velikost poruchového proudu I_P v místě poruchy, kde v případě správně navržené kompenzace tvoří většinu tohoto proudu, což je dobře vidět z grafu na Obr. 6.8.



Obr. 6.8: Závislost velikostí proudů I_P , I_{0V1} a I_{0V2} na svodovém proudu I_W .

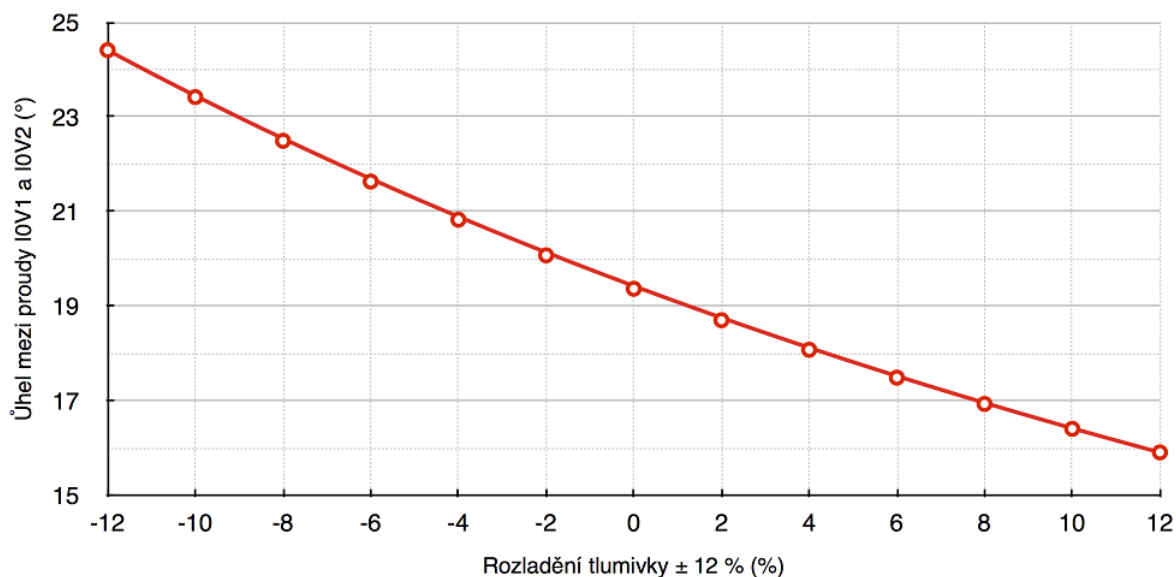
Jak jsem už zmínil, pro některé konfigurace sítě může být úhel mezi součtovým proudem postiženého a nepostiženého vývodu velmi malý. V takovém případě reálně hrozí chybná identifikace postiženého vývodu. Nejen pro zvětšení úhlu mezi součtovými proudy I_{0V1} a I_{0V2} se proto používá připojení pomocného odporu k sekundární straně kompenzační tlumivky. Vliv připojení pomocného odporu 1Ω je uveden na Obr. 6.9.



Obr. 6.9: Velikosti úhlu α v závislosti na připojení pomocného odporu R_{POM} .

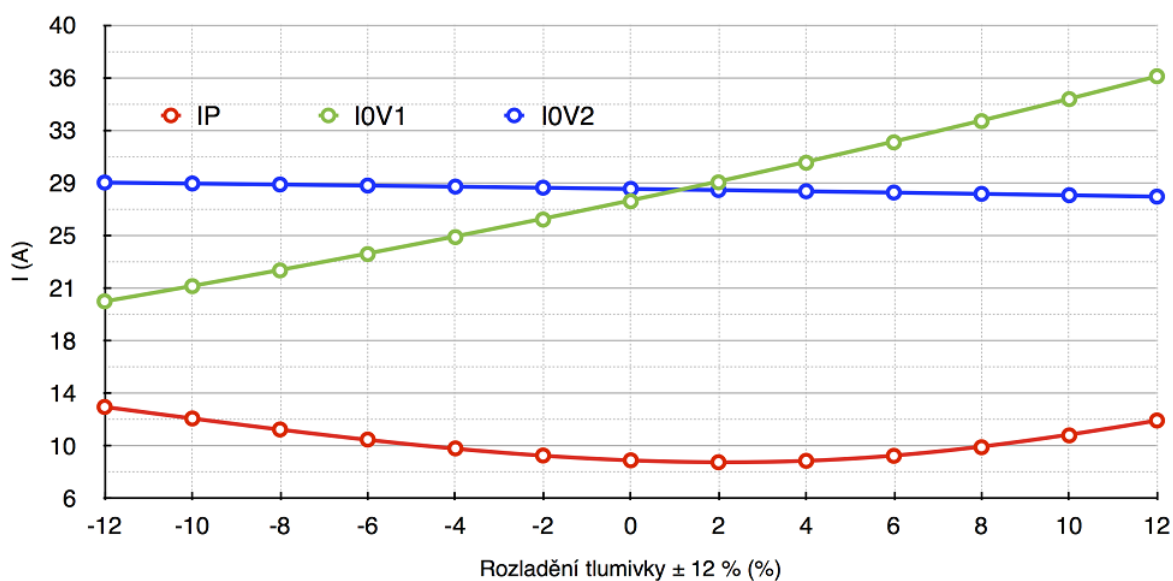
Obr. 6.9 odpovídá stejnému modelu sítě jako Obr. 6.5 a Obr. 6.6 jen s tím rozdílem, že svodový proud je v tomto případě pouze $0,4\%$ z I_C . Před připojením odporu byl úhel mezi proudy $\alpha = 7,74^\circ$ a po připojení se zvětšil na $\alpha_{R_{POM}} = 39,97^\circ$.

Předchozí závislosti platily pro model s ideálně vyladěnou kompenzační tlumivkou. V praxi se ale z různých důvodů úplná kompenzace nepoužívá. Jedním z důvodů umělého rozladění může být právě snaha o zlepšení podmínek pro identifikaci postiženého vývodu podle směru fázoru, neboť, jak vyplývá i z Obr. 6.10, přesnost vyladění tlumivky má přímý vliv na úhel α mezi součtovými proudy I_{0V1} a I_{0V2} sledovaných vývodů.



Obr. 6.10: Závislost úhlu mezi proudy I_{0V1} a I_{0V2} na vyladění tlumivky.

Z Obr. 6.10 vyplývá, že lepší podmínky jsou v překompenzované síti ($I_L < I_C$), jež odpovídá levé části grafu. Z grafu na Obr. 6.11 je ale vidět zřejmá nevýhoda tohoto nastavení tlumivky, neboť zde dochází ke snížení úrovně součtového proudu postiženého vývodu I_{0V1} , což může opět zhoršit podmínky pro spolehlivou detekci zemní poruchy.

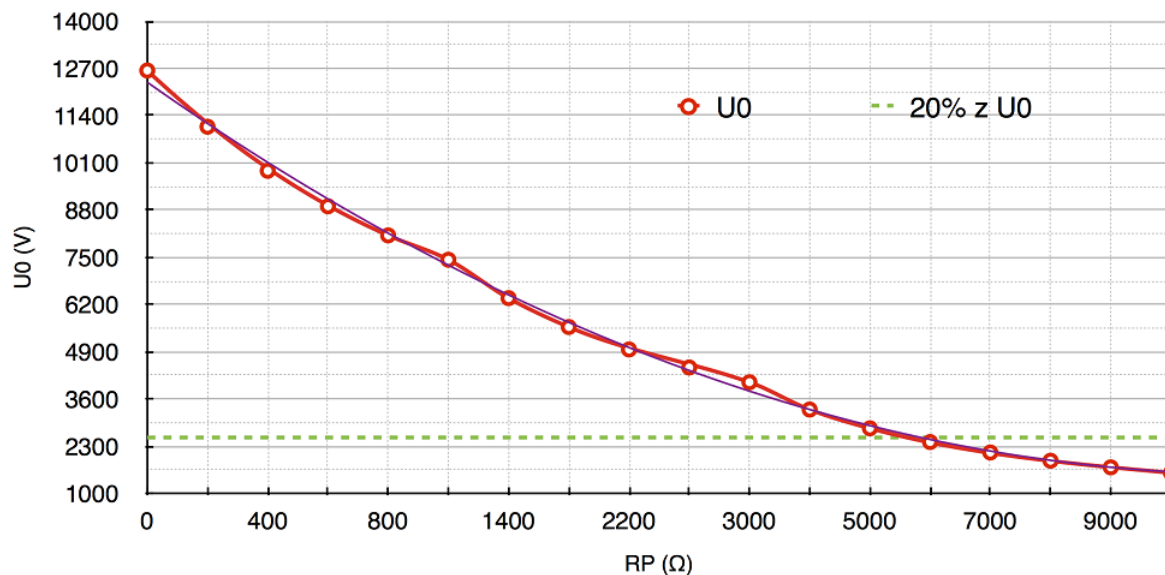


Obr. 6.11: Závislost součtových proudů I_P , I_{0V1} a I_{0V2} na vyladění tlumivky.

V praxi je tedy nutné zvolit vhodný kompromis podle aktuální konfigurace sítě.

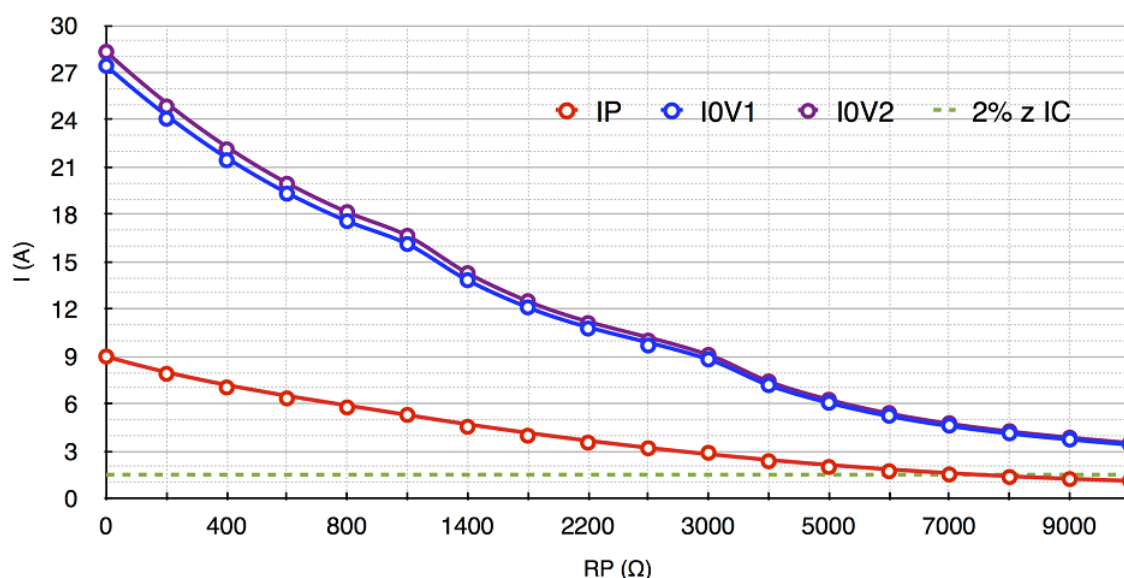
Podobně jako v síti izolované, i zde ovlivňuje přechodový odpor poruchy velikost měřených veličin U_0 a I_0 . Z grafů na Obr. 6.12 a Obr. 6.13 je dobře vidět, že kompenzovaná síť je z pohledu vlivu odporu poruchy na velikost sledovaných veličin mnohem odolnější.

V síti se stejnými parametry jako v předchozím případě izolované sítě tentokrát klesne nulové napětí U_0 pod popudovou úroveň při odporu poruchy asi $R_P = 6000 \Omega$.



Obr. 6.12: Závislost napětí U_0 na odporu poruchy R_P .

Ještě příznivěji se situace jeví při pohledu na součtové proudy I_{0V1} a I_{0V2} , které pod popudovou úroveň $I_0 >$ neklesnou ve sledovaném intervalu, ale až při $R_P = 25000 \Omega$.



Obr. 6.13: Závislost sledovaných proudů I_P , I_{0V1} a I_{0V2} na odporu poruchy R_P .

6.2 Charakteristika IED REF615

IED² REF615 je od roku 2009 oficiální náhrada popisované ochrany REJ 527.

IED REF615 je zařízení určené k *chránění, ovládání, měření a monitorování vývodů v rozvodnách energetických společností i v energetických systémech průmyslových podniků, včetně radiálních, okružních a zauzlených distribučních sítí s distribuovanou výrobou i bez výroby*. [1, str.3] Podle zvolené konfigurace je zařízení schopné chránit venkovní i kabelová vedení sítí distribuční soustavy s přímo uzemněným, izolovaným i neúčinně uzemněným uzlem přes kompenzační tlumivku či uzlový odporník.

IED REF615 je dostupné v devíti standardních konfiguracích, které je ale možné dále upravit prostřednictvím grafické signálové matice nebo grafickou aplikační funkcí nástroje PCM600. Ochrana je navržena tak, aby ji bylo možné využít s v automatizované rozvodně, neboť plně podporuje komunikační protokol IEC 61850. [1]

6.2.1 Ochranné funkce

IED REF615 obsahuje směrovou i nesměrovou nadproudovou ochranu, ochranu proti přetížení i směrovou a nesměrovou zemní ochranu. Některé standardní konfigurace nabízejí vedle směrové ochrany také alternativní zemní admitanční ochranu, zemní wattovou ochranu či zemní ochranu, jež vyhodnocuje harmonické složky.

Kromě těchto základních funkcí je ochrana vybavena ještě citlivou zemní ochranou, ochranou při fázové nevyváženosti, ochranou pro přerušované či přechodné zemní poruchy, přepětovou a podpětovou ochranou, přepětovou ochranou vyhodnocující nulovou složku napětí, podpětovou ochranu vyhodnocující souslednou a zpětnou složku napětí. V konfiguracích H a J je dostupné i frekvenční chránění.

Kromě ochranných funkcí nabízí tato ochrana také trojpólovou automatiku OZ, která je určena zvláště pro vývody venkovních vedení. [1]

6.2.2 Aplikace

IED REF615 lze dodat buď se směrovou, nebo s nesměrovou zemní ochranou. Volba typu ochrany záleží na způsobu provozu uzlu. Zemní směrová ochrana se obvykle používá v sítích s izolovaným uzlem či s uzlem uzemněným přes kompenzační tlumivku, zatímco zemní nesměrová ochrana je určena k chránění sítí s přímo uzemněným uzlem či uzlem uzemněným přes uzlový odporník. Pro sítě, které jsem popisoval v této kapitole jsou nejvhodnější standardní konfigurace A a B. [1]

²Intelligent Electronic Device. Inteligentní elektronické zařízení. Touto zkratkou se v energetice obecně označují zařízení na bázi mikroprocesorů.

7

Závěr

Zadání práce jsem zpracoval do celkem pěti kapitol.

V první kapitole jsem popsal strukturu elektrizační soustavy České republiky, její přenosovou a distribuční část. V této kapitole jsem také uvedl obecné požadavky na síť distribuční soustavy, zvláště podrobně jsem rozepsal požadavky na kvalitu elektrické energie, a také jsem uvedl obecné rozdělení sítí distribuční soustavy podle několika hledisek.

Ve druhé kapitole jsem provedl rozdělení sítí podle způsobu provozu uzlu. V této části jsem největší pozornost věnoval popisu sítě uzemněné přes kompenzační tlumivku, kde jsem uvedl různé používané modifikace tlumivky a stručný postup jejího ladění s využitím parametrů získaných z rezonanční křivky sítě. Z této kapitoly vyplynulo, že pro běžné síť distribuční soustavy je s ohledem na často přechodný charakter poruch nejvýhodnější využít právě toto uzemnění uzlu, neboť při tomto způsobu provozu nemusí nutně dojít k okamžitému odpojení vývodu s poruchou, ale lze jej provozovat po dobu nutnou k samovolnému odeznění nebo cílenému odstranění poruchy.

Třetí kapitolu jsem věnoval analýze jednofázových zemních poruch v sítích VN. Pro každý způsob uzemnění uzlu jsem popsal teoretické předpoklady napěťových a proudových poměrů během jednofázové zemní poruchy a následně jsem tyto předpoklady ověřil výpočtem metodou souměrných složek a simulací v software DYNAST. Výsledky získané výpočtem metodou souměrných složek, které jsou uvedené v příloze A, popsané teoretické předpoklady potvrdily. Pro ověření správnosti výsledků i pro vzájemné porovnání dvou rozdílných přístupů k analýze sítí jsem následně porovnal výsledky získané v podstatě analytickým výpočtem s hodnotami, které jsem odečetl z výsledků simulace v software DYNAST. Z tohoto porovnání mi vyšlo, že pro zvolený model definovaný v Tab. 4.5 se téměř všechny výsledky neliší o více než 2 % pro všechny způsoby uzemnění uzlu. Porovnávané hodnoty se nejvíce liší u sítě izolované, kde je průměrná chyba 2,45 %, a u sítě odporově uzemněné s průměrnou chybou 1,49 %. Naopak nejmenší průměrná chyba mezi vypočtenými a odečtenými hodnotami je u sítě kompenzované, kde činí jen 0,87 %.

Obecně se tedy dá říct, že jsou obě metody srovnatelné.

Ve čtvrté kapitole jsem uvedl postup detekce zemního spojení v sítích distribuční soustavy, vytvořil přehled různých tradičních i nových způsobů identifikace vývodu se zemní poruchou a popsal i používané metody lokalizace místa zemní poruchy v síti. U každé z metod jsem uvedl i faktory, které mají vliv na selektivitu a citlivost dané metody. Po srovnání jednotlivých metod jsem zjistil, že u většiny používaných metod je hlavní příčinou nespolehlivé funkce nízká přesnost proudových transformátorů, protože zejména u malých sítí jsou netočivé složky tak malé, že jsou jen těžko měřitelné. Většina používaných metod má také problém s identifikací vývodu s poruchou s velkým přechodovým odporem. Problém s nízkou hodnotou netočivého proudu řeší nové metody, které jsou založeny na měření přírůstků $\Delta\bar{U}_0$ a $\Delta\bar{I}_0$, nebo využívají přídavného pomocného odporníku R_{POM} . Obecně přesnější jsou metody dynamické, které k určení postiženého vývodu využívají vzniklý přechodný děj. Jejich hlavní nevýhoda tkví ale v tom, že na identifikaci postiženého vývodu mají jen jeden pokus a nedají se tedy použít opakovaně. Samostatnou kategorií jsou aktivní metody, které k identifikaci vývodu využívají speciálně generovaný signál. Podle [11] se ale kvůli své technické náročnosti nepoužívají.

V této části práce jsem také popsal dva systémy, které se uplatňují při jednofázových zemních poruchách, a to sice Systém RCC od firmy Swedish Neutral, který se ale pro svou technickou náročnost v praxi moc neujal, a systém přizemnění postižené fáze (Shunting).

V poslední páté kapitole jsem využil sestavený model sítě a výpočtový program k vyhodnocení spolehlivosti metody identifikace vývodu se zemní poruchou podle směru součtového zemního proudu I_0 v závislosti na vybraných provozních stavech distribuční sítě. Při ověřování jsem postupoval tak, že jsem v výpočtovém programu postupně měnil parametry sítě a sledoval jejich vliv na nejdůležitější veličiny. Z výsledků je patrné, že největší vliv na spolehlivost této metody má právě přechodový odpor poruchy. Tato závislost je nejvíce patrná u sítí s izolovaným uzlem, kde ochrany přestávají detekovat zemní spojení již při odporu poruchy asi $800\ \Omega$. Výhodou těchto sítí je ale jednoznačně odlišný směr zemního proudu postiženého a nepostiženého vývodu viz Obr. 4.8 nebo Obr. C.1. Jako méně výhodné se ale jeví použití této metody v sítích kompenzovaných. Z přiložených závislostí je patrné, že je výsledný úhel mezi zemním proudy jednotlivých vývodů závislý na mnoha parametrech, nejvíce pak na rozložení celkové kapacity proti zemi C_{0C} mezi vývody (Obr. 6.5), celkovém svodovém proudu I_W (Obr. 6.7) a na rozladění tlumivky (Obr. 6.10). Budu-li vycházet z uvedených průběhů, mohu říct, že v kompenzovaných sítích bude tato metoda spolehlivě fungovat pouze v sítích s relativně velkým činným svodovým proudem I_W či v sítích překompenzovaných. V ostatních případech je nutné využít pomocný odporník, jehož pozitivní vliv na spolehlivost metody jsem dokázal, když se v daném modelovém případě ($I_W = 0,4\%$) po jeho připnutí zvětšil úhel α o $32,23^\circ$.

Literatura

- [1] ABB, s.r.o. *IED pro chránění a řízení vývodu. Popis a technická data výroby.* [online] Trutnov: ABB, s.r.o., 2012. [cit. 14. 4. 2014]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/27e17662c1db7136c1257b5000365436/\\$file/REF615_pg.756625_CZc.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/27e17662c1db7136c1257b5000365436/$file/REF615_pg.756625_CZc.pdf)
- [2] ABB, s.r.o. *REJ 527 Kombinovaná nadproudová a zemní ochrana. Technická referenční příručka.* [online] Trutnov: ABB, s.r.o., 2002. [cit. 7. 4. 2014]. Dostupné z: http://www.vfservis.cz/?pg=produkty/ridici_systemy_pro_energetiku_a_ochrany/ochrany_vn.
- [3] ČEPS, a.s.: *Technická infrastruktura.* [online] Praha: 2013 [cit. 20. 10. 2013]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura>
- [4] Konzultace s Františkem ŽÁKEM. Vedoucí analytik, Sekce Elektrotechnika, Provoz distribučních sítí, EGE, spol. s. r.o. České Budějovice 28. 4. 2014.
- [5] KOUBA, Daniel. *Analýza bezpečného provozu kompenzované sítě VN velkého rozsahu.* Plzeň, 2013. 143 str. Disertační práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie. Školitel Lucie Noháčová.
- [6] MERTLOVÁ, Jiřina, HEJTMÁNKOVÁ, Pavla, TAJTL, Tomáš. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7043-307-8
- [7] MERTLOVÁ, Jiřina, NOHÁČOVÁ, Lucie. *Elektrické stanice a vedení.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7
- [8] PERCINA, Drahomír. *Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení.* Brno, 2011. 97 str. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Petr TOMAN.
- [9] PNE 38 4065. Provoz, navrhování a zkoušení ochrany a automatik. České Budějovice: EGC-EnerGOConsult ČB, s.r.o., 2008.
- [10] TESAŘOVÁ, Miloslava, ŠTROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová energetika.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-703-3

- [11] TOMAN, Petr, DRÁPELA, Jiří, MIŠÁK, Stanislav, ORSÁGOVÁ, Jaroslava, PAAR, Martin, TOPOLÁNEK, David, a kol. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8

Příloha A

Vypočtené hodnoty

A.1 Izolovaná síť

(a) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 20\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

U_0 (kV)	U_A (kV)	U_B (kV)	U_C (kV)
$-8324,5 + 5291,6i$	$4534,4 + 4275,0i$	$-14753,9 - 5200,2i$	$-14753,9 + 16799,8i$
$ U_0 $ (kV)	$ U_A $ (kV)	$ U_B $ (kV)	$ U_C $ (kV)
9 863,95	6 231,86	15 643,50	22 358,71

(b) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 40\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

U_0 (kV)	U_A (kV)	U_B (kV)	U_C (kV)
$-8532,9 + 5418,6i$	$4368,9 + 4411,7i$	$-14970,4 - 5077,9i$	$-14970,4 + 16922,0i$
$ U_0 $ (kV)	$ U_A $ (kV)	$ U_B $ (kV)	$ U_C $ (kV)
10 100,45	6 208,95	15 808,20	22 593,53

Tab. A.1: Vypočtené hodnoty napětí pro izolovanou síť.

(a) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 20\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

$I_1 = I_2 = I_0$ (A)	I_P (A)	I_{0V1} (A)	I_{0V2} (A)
$15,11 + 14,25i$	$-45,34 - 42,75i$	$33,42 + 36,21i$	$-14,12 - 12,60i$
$ I_1 = I_2 = I_0 $ (A)	$ I_P $ (A)	$ I_{0V1} $ (A)	$ I_{0V2} $ (A)
20,77	63,32	49,28	18,92

(b) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 40\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

$I_1 = I_2 = I_0$ (A)	I_P (A)	I_{0V1} (A)	I_{0V2} (A)
$14,56 + 14,70i$	$-43,69 - 44,12i$	$27,55 + 25,64i$	$-13,97 - 12,77i$
$ I_1 = I_2 = I_0 $ (A)	$ I_P $ (A)	$ I_{0V1} $ (A)	$ I_{0V2} $ (A)
20,69	62,09	37,64	18,94

Tab. A.2: Vypočtené hodnoty proudů pro izolovanou síť.

A.2 Kompenzovaná síť

(a) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 20\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

$U_0 (kV)$	$U_A (kV)$	$U_B (kV)$	$U_C (kV)$
$-11118,8 + 230,7i$	$1451,3 + 30,5i$	$-17403,9 - 10669,2i$	$-17403,9 + 11330,8i$
$ U_0 (kV)$	$ U_A (kV)$	$ U_B (kV)$	$ U_C (kV)$
11 121,20	1 451,57	20 413,87	20 767,30

(b) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 40\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

$U_0 (kV)$	$U_A (kV)$	$U_B (kV)$	$U_C (kV)$
$-11269,5 + 290,4i$	$1322,3 + 101,1i$	$-17565,3 - 10615,0i$	$-17565,3 + 11385,0i$
$ U_0 (kV)$	$ U_A (kV)$	$ U_B (kV)$	$ U_C (kV)$
11 273,20	1 326,14	20 523,64	20 932,24

Tab. A.3: Vypočtené hodnoty napětí pro kompenzovanou síť.

(a) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 20\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

$I_1 = I_2 = I_0 (A)$	$I_P (A)$	$I_{0V1} (A)$	$I_{0V2} (A)$
$4,84 + 0,10i$	$-14,51 - 0,3i$	$7,67 - 12,69i$	$-5,07 - 19,37i$
$ I_1 = I_2 = I_0 (A)$	$ I_P (A)$	$ I_{0V1} (A)$	$ I_{0V2} (A)$
4,84	14,52	14,83	20,03

(b) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 40\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

$I_1 = I_2 = I_0 (A)$	$I_P (A)$	$I_{0V1} (A)$	$I_{0V2} (A)$
$4,40 + 0,34i$	$-13,22 - 1,01i$	$9,21 - 25,52i$	$-5,00 - 19,36i$
$ I_1 = I_2 = I_0 (A)$	$ I_P (A)$	$ I_{0V1} (A)$	$ I_{0V2} (A)$
4,42	13,26	27,13	19,99

Tab. A.4: Vypočtené hodnoty proudů pro kompenzovanou síť.

A.3 Odporově uzemněná síť

(a) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 20\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

U_0 (kV)	U_A (kV)	U_B (kV)	U_C (kV)
-6281,2 + 2612,5i	6009,7 + 1672,0i	-12426,8 - 7917,2i	-12426,8 + 14082,8i
$ U_0 $ (kV)	$ U_A $ (kV)	$ U_B $ (kV)	$ U_C $ (kV)
6 802,95	6 237,92	14 734,58	18 781,65

(b) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 20\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

U_0 (kV)	U_A (kV)	U_B (kV)	U_C (kV)
-6413,8 + 2719,3i	5902,2 + 1781,2i	-12571,9 - 7811,6i	-12571,9 + 14188,4i
$ U_0 $ (kV)	$ U_A $ (kV)	$ U_B $ (kV)	$ U_C $ (kV)
6 966,48i	6 165,13	14 801,12i	18 956,84

Tab. A.5: Vypočtené hodnoty napětí pro odporově uzemněnou síť.

(a) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 15\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

$I_1 = I_2 = I_0$ (A)	I_P (A)	I_{0V1} (A)	I_{0V2} (A)
20,35 + 3,93i	-61,05 - 11,80i	54,25 + 5,92i	-6,33 - 14,27i
$ I_1 = I_2 = I_0 $ (A)	$ I_P $ (A)	$ I_{0V1} $ (A)	$ I_{0V2} $ (A)
20,73	62,18	54,58	15,61

(b) Procentuální rozložení vývodů: $C_{01} = 15\% C_{0C}$ a $C_{02} = 30\% C_{0C}$

$I_1 = I_2 = I_0$ (A)	I_P (A)	I_{0V1} (A)	I_{0V2} (A)
20,02 + 4,32	-60,72 - 12,97i	51,75 - 1,38i	-7,77 - 12,60i
$ I_1 = I_2 = I_0 $ (A)	$ I_P $ (A)	$ I_{0V1} $ (A)	$ I_{0V2} $ (A)
20,48	61,45	51,77	14,81

Tab. A.6: Vypočtené hodnoty proudů pro odporově uzemněnou síť.

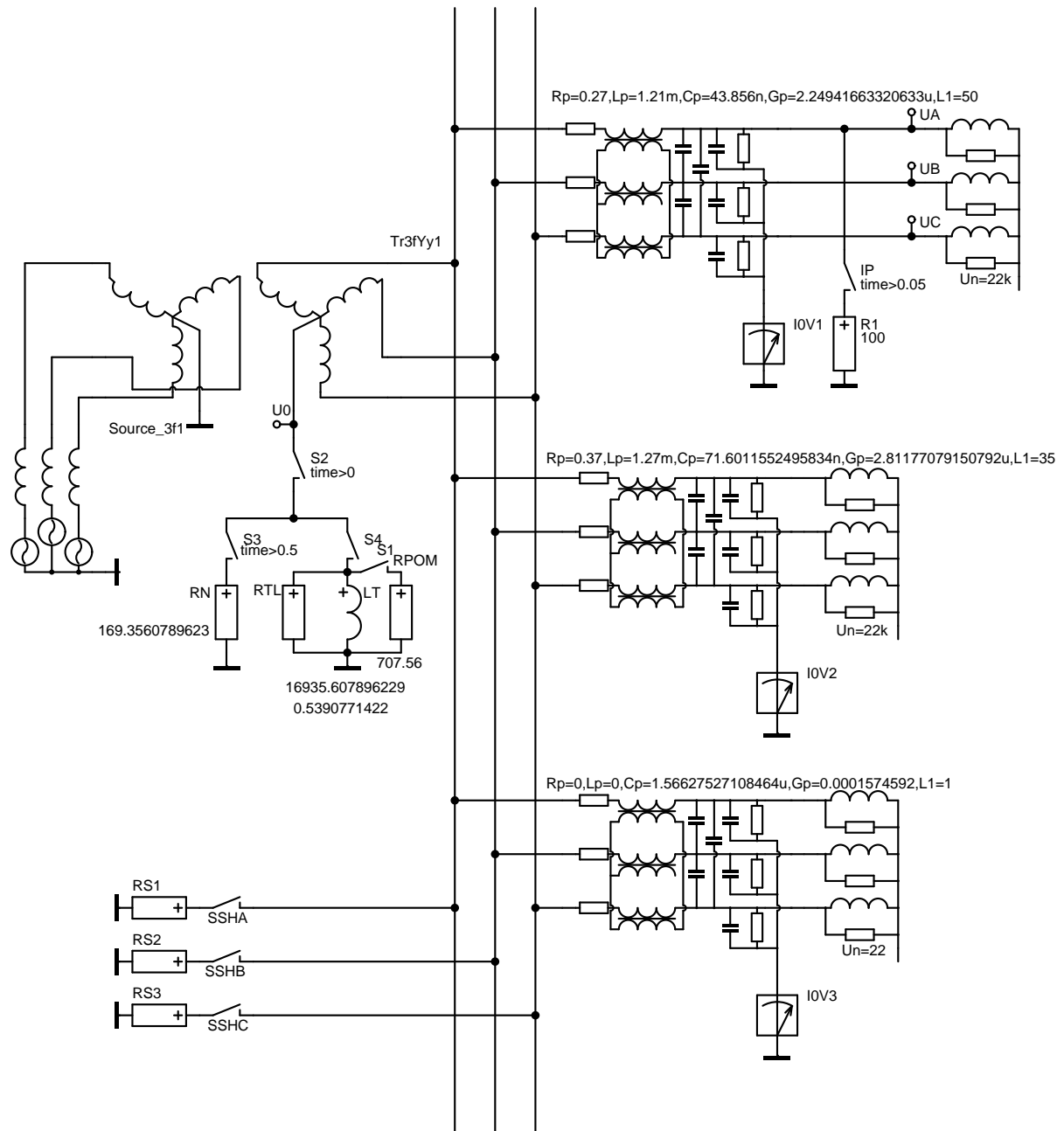
Příloha B

Model sítě v DYNAST

B.1 Výpis skriptu

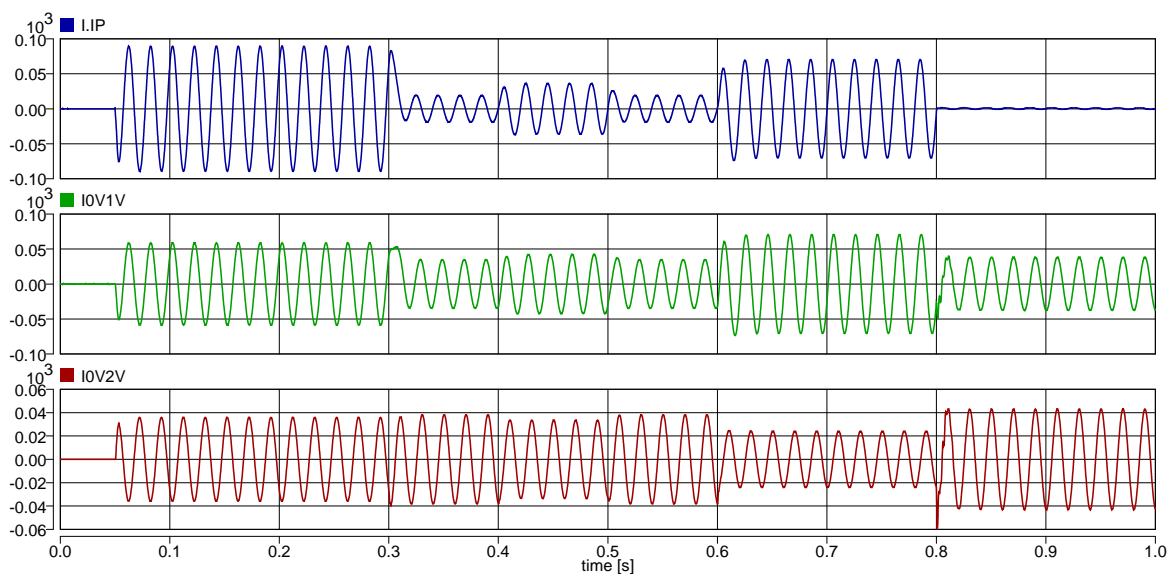
```
1
2 *:
3 *SYSTEM;
4 Tr3fYy1 > @Tr3fYy 1,3,5,2,4,6,0,U0 / N1=110000,N2=22000,
5   Sn=40ME,Un2=22k,I0=0.115,Uk=11.5,dPk=0.275;
6 Tran_Line_3f21 > @TrLine3f2 2,4,6,UA,UB,UC,7 / Rp=0.27,
7   Lp=1.21m,Cp=43.856n,Gp=2.24941663320633u,L1=50;
8 Tran_Line_3f22 > @TrLine3f2 2,4,6,8,9,10,11 / Rp=0.37,
9   Lp=1.27m,Cp=71.6011552495834n,Gp=2.81177079150792u,L1=35;
10 Load_3f1 > @Load3f1 UA,UB,UC,12 / Un=22k;
11 Load_3f2 > @Load3f1 8,9,10,13 / Un=22k;
12 Source_3f1 > @PowerSource3f 1,3,5,0;
13 R1 14 = 100;
14
15 Tran_Line_3f23 > @TrLine3f2 2,4,6,15,16,17,18 / Rp=0,Lp=0,
16   Cp=1.56627527108464u,Gp=0.0001574592,L1=1;
17 Load_3f3 > @Load3f1 15,16,17,19 / Un=22;
18 IP > S UA-14 = time>0.05;
19 IOV1 > E 7 = 0;
20 IOV2 > E 11 = 0;
21 IOV1V = I.IP + I.IOV1;
22 IOV2V = I.IOV2;
23 IOV3 > E 18 = 0;
24 S1 22-21 = time>0.5&time<0.5;
25 RTL 22 = 16935.607896229;
26 RPOM 21 = 707.56;
27 SSHA 23-2 = time>0.5;
28 META > J 2 = 0;
29 METB > J 4 = 0;
30 METC > J 6 = 0;
31
32 S2 U0-20 = time>0;
33 RS1 23 = 1;
34 RN 24 = 169.3560789623;
35 S3 20-24 = time>0.5;
36 S4 20-22 = time>0;
37 RS2 25 = 1;
38 SSHAB 25-4 = time>0.5;
39 RS3 26 = 1;
40 SHC 26-6 = time>0.5;
41 LT 22 = 0.5390771422;
42 *TR;
43 TR 0 0.5;
44 PRINT(10000) I.IP, IOV1V, IOV2V;
45 RUN;
46 *END;
47
```

B.2 Diagram modelu sítě

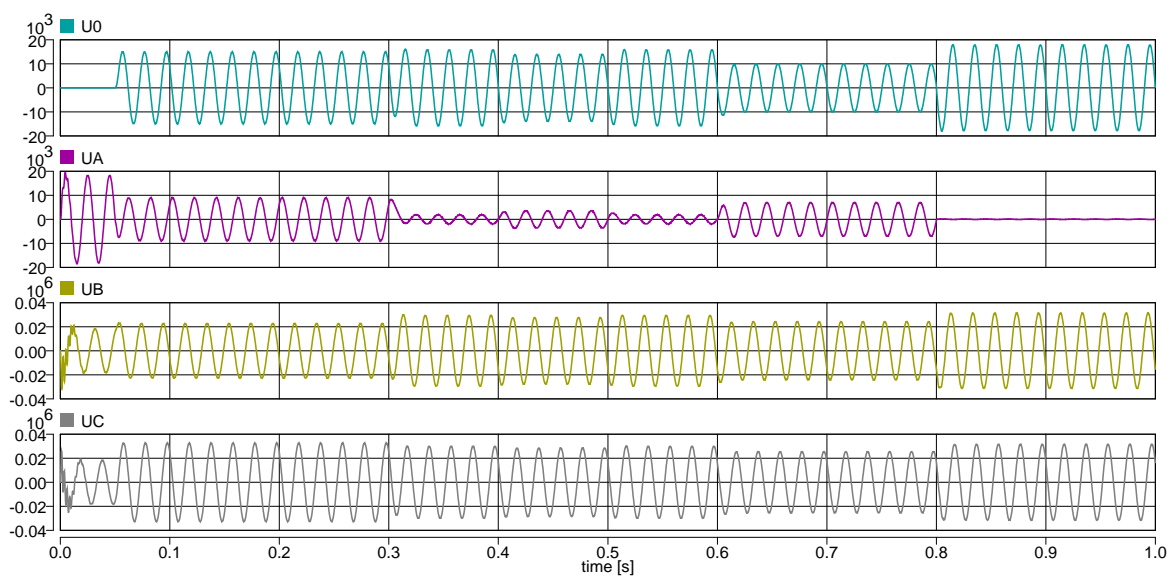


Obr. B.1: Diagram modelu sítě v DYNAST.

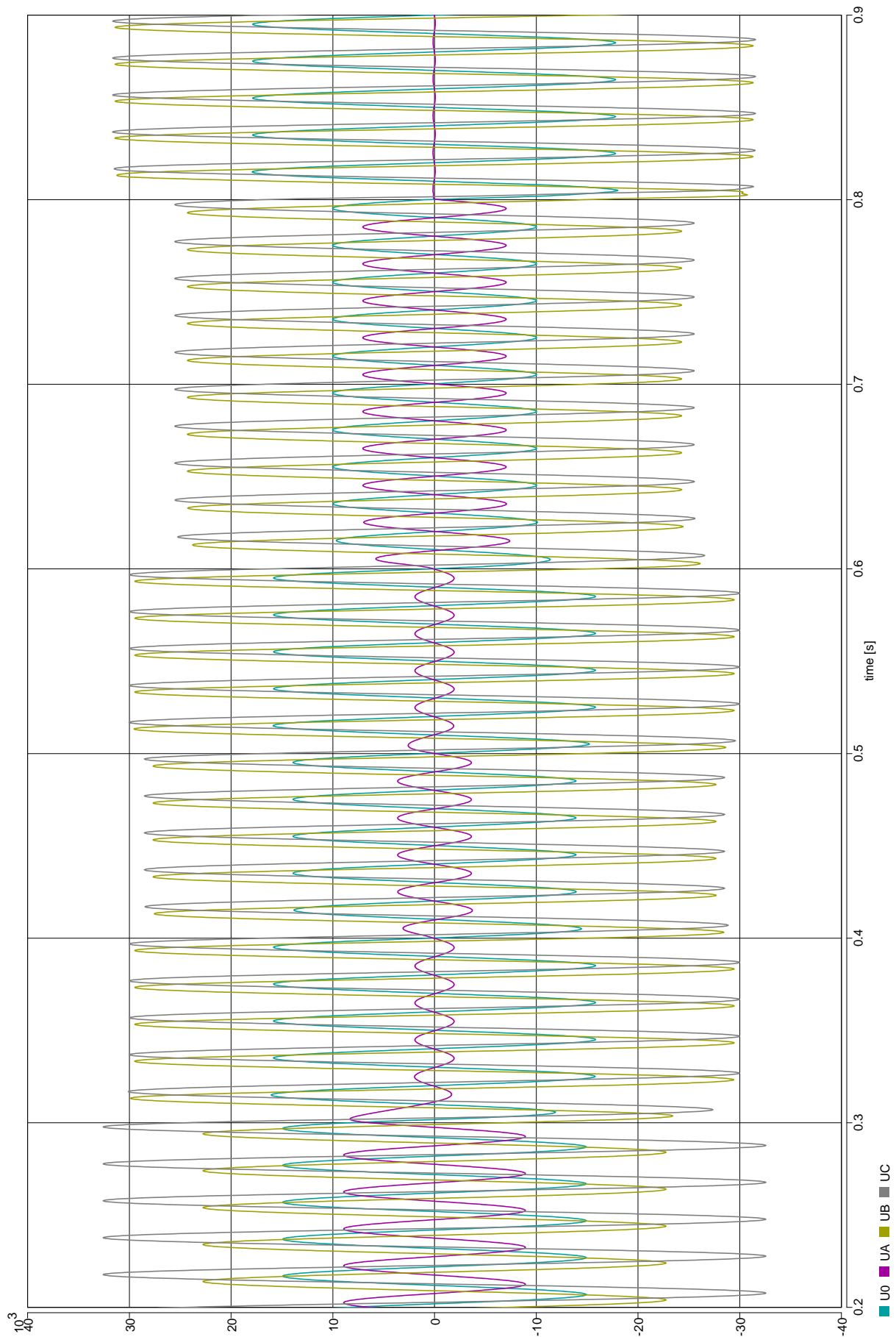
Příloha C



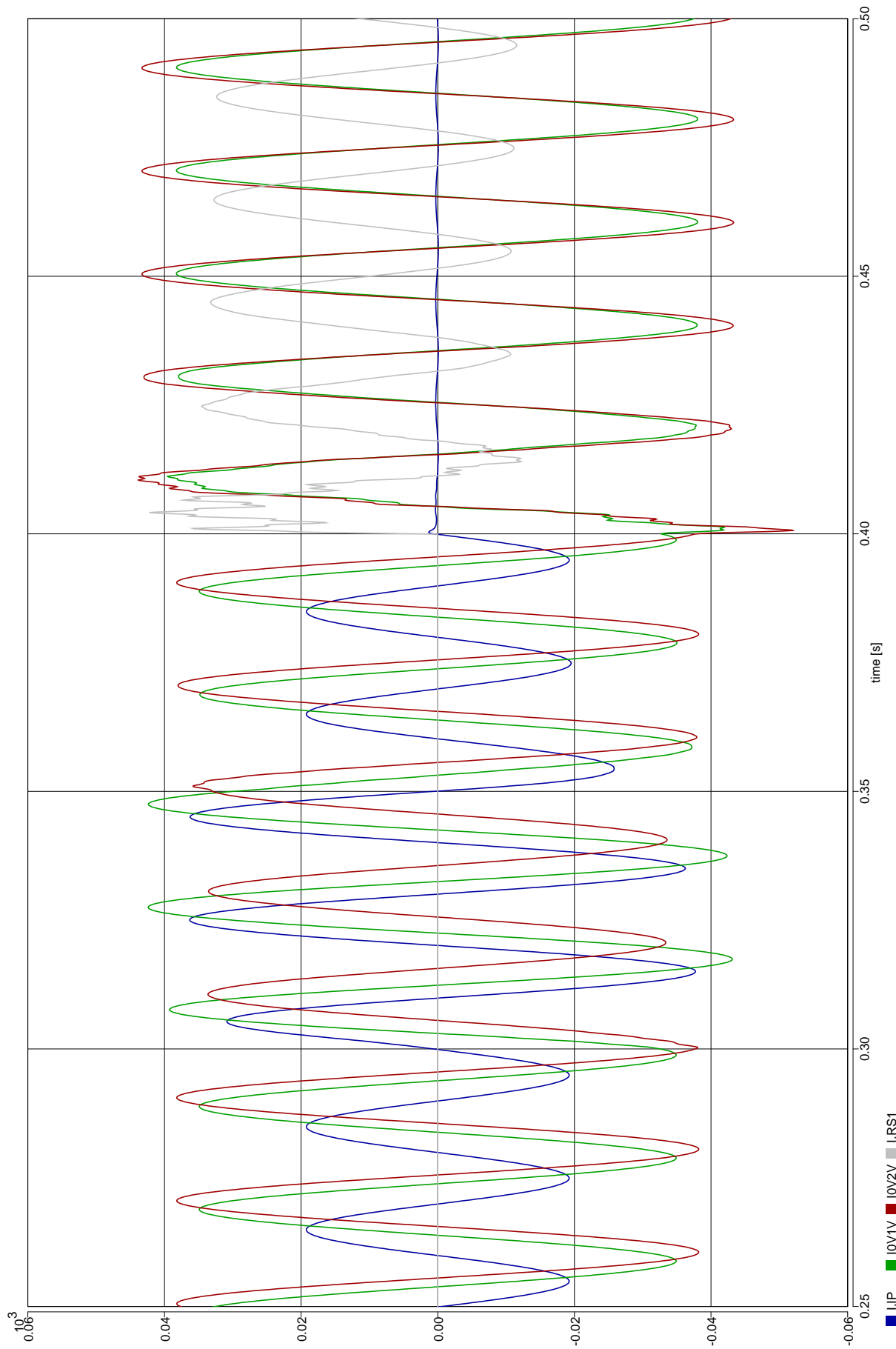
Obr. C.1: Průběhy proudů I_P , I_{0V1} a I_{0V2} v závislosti na způsobu uzemnění uzlu.



Obr. C.2: Průběhy napětí U_0 , U_A , U_B a U_C v závislosti na způsobu uzemnění uzlu.



Obr. C.3: Průběhy napětí U_0 , U_A , U_B a U_C v závislosti na způsobu uzemnění uzlu.



Obr. C.4: Průběhy proudů v síti se systémem přizemnění postižené fáze.

Příloha D

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Transformátor			Sít'			Odpor poruchy			Tlumivka				
2	S _N (MVA)	40		S _{sc} (MVA)	1000		R _p (Ω)	100		L _h (H)	0.5390771422			
3	ΔP ₀ (kW)	19.5		U _N (V)	110000					X _h (Ω)	169.3500789623			
4	ΔE ₀ (kW)	110												
5	k ₀ (%)	11.5		U _N (V)	22000					Rozladění (%)				
6	f ₀ (%)	0.115		U _N (V)	12701.7099221718	2540.341184				L _h (H)	0.5390771422			
7	U _N (V)	22000								X _h (Ω)	169.3500789623			
8				I ₀ (A)	75			1.5		R _p	169.3507896229			
9				C _{sc} (F)	6.26510108433859E-006					Z ₀	1.69339145047785+169.339145047785i			
10				X _{sc} (Ω/km)	508.0862368889					Z _{0,por}	1.69339145047785+169.339145047785i			
11														
12				I _{0c} (%)	2									
13				I _{0c} (A)	1.5					Odporník				
14				R _{0c} (Ω)	25403.4118443435					R	169.3500789623			
15														
16				G _{0c} (S)	3.93647910811108E-005									
17														
18														
19	Vývod 1 (AlFe 120 mm ²)			Vývod 2 (AlFe 95 mm ²)			Vývod 3							
20														
21	z (km)		50	z (km)		35	C ₀₃ (%)		25					
22							C ₀₃ (F)	1.58627527108494E-006						
23	R ₀₃ (Ω/km)		0.28	R ₀₃ (Ω/km)		0.37	X ₀₃ (Ω)	2032.2729479476						
24	R ₀₃ (Ω)		14	R ₀₃ (Ω)		12.95								
25	L ₀₃ (H/km)		0.00121	L ₀₃ (H/km)		0.00127	R ₀₃ (Ω)	6350.8529610859						
26	L ₀₃ (H)		0.0605	L ₀₃ (H)		0.04445	G ₀₃ (S)	0.0001574592						
27	X ₀₃ (Ω/km)		0.3801327111	X ₀₃ (Ω/km)		0.398982267								
28	X ₀₃ (Ω)		19.008355542	X ₀₃ (Ω)		13.9643793452								
29														
30	C ₀₃ (%)		35	C ₀₃ (%)		40								
31	C ₀₃ (F)		2.18278537951849E-006	C ₀₃ (F)		0.000025096								
32	C ₀₃ (F/km)		4.3859E-008	C ₀₃ (F/km)		7.18011552495834E-008								
33	X ₀₃ (Ω)		1451.6239339625	X ₀₃ (Ω)		1270.1705922172								
34														
35	R ₀₃ (Ω)		8891.1941456202	R ₀₃ (Ω)		10161.3947377374								
36	R ₀₃ (Ω/km)		444559.707276012	R ₀₃ (Ω/km)		355647.76582081								
37														
38	G ₀₃ (S/km)		2.2494195320633E-006	G ₀₃ (S/km)		2.61177079150793E-006								
39														

Obr. D.1: Ukázka výpočtového programu: Zadání parametrů modelu sítě.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2	Z1	9.11344935143355+509.408537233201i	Z1-Z2	100.452174978744+847.644514598939i			a'	-0.5+0.8900254033784439i						
3	Z2	180.933968272884-1224.09718542716i	Z1-Z0V3	80.7247210484193+670.17706340771i			a	-0.5+0.8900254033784439i						
4	Z3	549.024509699229+1246.03337403797i	Z2-Z0V3	158.043597337227+740.551743899901i										
5														
6	Z4	575.624509699229+1284.14588159098i												
7														
8	Z0	2455.83439403496-246.40203341857i												
9														
10	ZC	2783.90094403496-205.606558053528i												
11														
12														
13	I ₀ = I _{0c}	4.53780460017595+0.33514209151758i	4.550	4.2239428807										
14	I _{0OR}	-13.6134138005279-1.00542627455274i	13.650	-175.7760571										
15														
16														
17	U ₀	-11226.6763033305+295.070805152794i	11230.553	178.49444127				2540.4						
18														
19	U ₁ (1)	12944.8618027775-97.2940888487803i	12845.236											
20	U ₁ (2)	-50.8441193942754-97.2940888487803i	112.657											
21														
22														
23	U _A	1361.34138005272+100.542627455273i	1365.049			I _A	13.6134138005279+1.00542627455273i	13.65049						
24	U _B	-17520.6851450221-10607.6651059984i	20481.625			I _B	8.88178419700125e-016+5.55*8.9E-016i							
25	U _C	-17520.6851450221+11392.3348940016i	20898.797			I _C	8.88178419700125e-016+5.55*8.9E-016i							
26														
27	U _{OR}	-10678.9756808989+210.080183284098i	10881.004											
28														
29														
30	U ₁ (1)R	12702.0211435876-6.32370131571457i	12702.023											
31	U ₁ (2)R	0.315221415834741-6.32370131571457i	6.332											
32														
33	U _{AR}	1823.36068410453+197.432780652629i	1834.019											
34	U _{BR}	-17230.1438634006-10783.5961154003i	20326.431											
35	U _{CR}	-17230.1438634006+11216.4038845998i	20559.318											
36														
37														
38														
39	I _{Z3}	3.07186149907711-7.38554897590578i	7.9804520638											
40	I _{Z0V1} (0)	1.40594513109884+7.7005699742329i	7.838978613223	5.169388397118										

Obr. D.2: Ukázka výpočtového programu: Výpočet poměrů v kompenzované síti.