



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VLIV DVOJITÉHO ZEMNÍHO SPOJENÍ NA NAPĚŤOVÉ POMĚRY V SOUSTAVĚ NN

IMPACT OF CROSS-COUNTRY DOUBLE EARTH FAULTS ON VOLTAGE CONDITION IN LV NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Fojtášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Topolánek, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Jan Fojtášek

ID: 203220

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Vliv dvojitého zemního spojení na napětové poměry v soustavě NN

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis nesouměrného dvojitého zemního spojení – definice možných typů a variací
2. Náhrada nesouměrného ZS symetrickými složkami
3. Vytvoření testovacího numerického modelu pro simulaci dvojitých zemních spojení
4. Analýza napětových poměrů při různých typech dvojitého ZS a zhodnocení výsledků simulace se zjednodušeným modelem symetrických složek
5. Možnosti rozlišení dvojitého nesouměrného ZS a dvoufázového zemního zkratu na základě měření napětí na NN straně distribučního transformátoru

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. David Topolánek, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem dvojitého zemního spojení na napěťové poměry v kompenzované síti. Tato práce se zaměřuje zejména na analýzu napěťových poměrů na sekundárních stranách distribučních transformátorů při vzniku této nesoumísné poruchy. Je provedena náhrada nesoumísného dvojitého zemního spojení pomocí metody symetrických složek a ověřena funkčnost této metody. Analýza vlivu dvojitého zemního spojení na navržené elektrizační soustavě je provedena v programu PSCAD, která je dále vyhodnocována. Tento typ nesoumísné poruchy je zkoumán při modifikaci jednotlivých parametrů navržené soustavy. Pro rozlišení dvojitého zemní spojení od dvoufázového zemního zkratu je zkoumána nesymetrie na NN stranách distribučních transformátorů. Pro lokalizaci místa vzniku dvojitého zemního spojení a dvoufázového zemního zkratu je poskytnut lokátor, který v kombinaci s hodnotami nesymetrie je schopen určit jak místo vzniku poruchy, tak rozlišení soumísné od nesoumísné poruchy.

Klíčová slova

Činitel nesymetrie, dvojitě zemní spojení, dvoufázový zemní zkrat, lokátor, metoda souměrných složek, PSCAD, zemní spojení.

Abstract

This master's thesis is focused on the influence of double earth fault on voltage ratios in the compensated network. This thesis is focuses on, in particular on the analysis of voltage ratios on the secondary sides of distribution transformers when this non-local fault occurs. The compensation of the non-local double earth fault using the symmetrical components method is performed and the performance of this method is verified. The analysis of the effect of double earth fault on the proposed power system is carried out in PSCAD software and further evaluated. This type of non-local fault is investigated while modifying the various parameters of the designed system. To differentiate the double earth fault from the two phase ground fault, the asymmetry on the LV sides of the distribution transformers is investigated. A locator is provided to locate the location of the double earth fault and the two-phase ground fault, which, combined with the asymmetry values, is able to determine both the location of the fault and the differentiation of the co-located fault from the non-co-located fault.

Keywords

Asymmetry factor, double earth fault, two-phase ground fault, locator, method of symmetrical components, PSCAD, earth fault.

Bibliografická citace

FOJTÁŠEK, Jan. *Vliv dvojitého zemního spojení na napěťové poměry v soustavě NN* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151310>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce David Topolánek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Jan Fojtášek</i>
VUT ID studenta:	<i>203220</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2022/23</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Vliv dvojitého zemního spojení na napěťové poměry v soustavě NN</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Davidu Topolánkovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 22. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. ZEMNÍ SPOJENÍ	11
1.1 DVOJITÉ ZEMNÍ SPOJENÍ	12
1.2 TYPY A VARIACE NESOUMÍSTNÉHO DVOJITÉHO ZS	13
2. METODA SOUMĚRNÝCH SLOŽEK	16
2.1 SOUMĚRNÉ SLOŽKY PRO DVOJITÉ ZEMNÍ SPOJENÍ.....	16
3. TESTOVACÍ MODEL VN SOUSTAVY	23
4. ANALÝZA VLIVU PORUCHY NA SEKUNDÁRNÍ NAPĚTÍ DT	25
4.1 ZEMNÍ SPOJENÍ VE VÝCHOZÍM STAVU SOUSTAVY	26
4.2 ZMĚNA MÍSTA PORUCHY	26
4.3 ZMĚNA ODPORU PORUCHY	27
4.4 ZMĚNA DÉLKY VENKOVNÍHO VEDENÍ.....	28
4.5 ZMĚNA ZATÍŽENÍ DT.....	29
4.6 LOKÁTOR MÍSTA VZNIKU PORUCHY.....	30
4.7 DVOUFÁZOVÝ ZEMNÍ ZKRAT	31
4.8 POROVNÁNÍ DVOJITÉHO ZS A DVOUFÁZOVÉHO ZEMNÍHO ZKRATU.....	34
4.9 MOŽNOST VYUŽITÍ NESYMETRIE NAPĚTÍ PRO INDIKACI NESOUMÍSTNÉ PORUCHY	35
4.9.1 <i>Metoda lokalizace s využitím nesymetrie napětí</i>	<i>36</i>
5. ZÁVĚR.....	38
LITERATURA.....	40
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	41
SEZNAM PŘÍLOH.....	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Distribuční soustava 110/22 kV	12
1.2	Dvojité zemní spojení v kompenzované síti	13
1.3	Jednostranně napájené radiální vedení [9].....	14
1.4	Dvě jednostranně napájená radiální vedení [9]	15
1.5	Dvoustranně napájené jednoduché vedení [9].....	15
2.1	Metoda souměrných složek	16
2.2	Impedance distribuční soustavy 110/22 kV	17
2.3	Náhradní schéma dvojitého zemního spojení.....	19
3.1	Testovací model DS pro simulaci vzniku poruch na vedení VN.....	24
4.1	Dvojité zemní spojení – změna poruchy ve fázi.....	26
4.2	Dvojité zemní spojení – změna místa poruchy.....	27
4.3	Dvojité zemní spojení – změna odporu poruchy	28
4.4	Dvojité zemní spojení – změna délky vedení.....	29
4.5	Dvojité zemní spojení – změna zatížení DT.....	29
4.6	Lokátor místa vzniku poruchy.....	31
4.7	Dvoufázový zkrat – změna místa poruchy	32
4.8	Dvoufázový zkrat v místě P2	33
4.9	Dvoufázový zkrat v místě P3	33
4.10	Porovnání dvojitého ZS a dvoufázového zkratu – výchozí stav.....	34
4.11	Schéma pro ověření nesymetrie	35
4.12	Porovnání nesymetrie distribučních transformátorů.....	36
4.13	Reaktance vedení a nesymetrie při dvojitém zemním spojení.....	37
B.1	Porovnání zemního spojení P1 a P2 s dvoufázovým zkratem P2 při změně odporu poruchy.....	47
B.2	Porovnání zemního spojení P1 a P2 s dvoufázovým zkratem P2 při změně délky vedení.....	47
B.3	Porovnání zemního spojení P1 a P2 s dvoufázovým zkratem P2 při změně velikosti zatížení DT ...	48
B.4	Porovnání zemního spojení P1-P2 a P2-P3 s dvoufázovým zkratem P2 pro výchozí stav.....	48
B.5	Porovnání zemního spojení P1-P2 a P2-P3 s dvoufázovým zkratem P2 při změně odporu poruchy	49
B.6	Porovnání zemního spojení P1-P2 a P2-P3 s dvoufázovým zkratem P2 při změně odporu poruchy	49
B.7	Porovnání zemního spojení P1-P2 a P2-P3 s dvoufázovým zkratem P2 při změně odporu poruchy	50

SEZNAM TABULEK

2.1	Porovnání souměrných složek napětí	22
4.1	Vypočtené reaktance vedení pomocí lokátoru.....	30
4.2	Vypočtené reaktance vedení pro navrženou soustavu	31
4.3	Hodnoty reaktance vedení pomocí lokátoru	37

ÚVOD

V současné době je stále více kladen důraz na veškeré prvky a zdroje elektrizační soustavy, ve které mohou nastat nebezpečné poruchové stavy. Mezi poruchové stavy se řadí zkrat, přepětí, průraz izolace kabelů, zemní spojení a jiné poruchy. Poruchy vznikají nahodile a ohrožují tak správnou funkci daných prvků a následně i provoz celé ES. Zemní spojení může nastat v soustavě izolované nebo kompenzované a svým charakterem se podobá dvoufázovému zemnímu zkratu. Kompenzované soustavy jsou vybaveny zhašecí tlumivkou umístěnou mezi nulový uzel napájecího transformátoru a zemnicí soustavu rozvodny. Při vzniku zemního spojení dokáže tlumivka kompenzovat poruchový proud, aby místem vzniku poruchy procházel pouze zbytkový proud činného charakteru.

Účelem této diplomové práce je popis dvojitého zemní spojení a uvedení jeho možných typů. Práce se především zaměřuje na vliv dvojitého zemního spojení na napěťové poměry v soustavě NN. Dvojité zemní spojení, které je typem nesoumísné poruchy, je vnímáno jako spojení dvou různých fází se zemí na různém místě vedení. Dvoufázový zemní zkrat je naopak soumísným typem poruchy a vzniká při současném spojení dvou různých fází v totožném místě vedení. Za tímto účelem bude vytvořena elektrizační soustava VN v prostředí PSCAD, na které bude zkoumán tento poruchový stav a jeho vliv na napětí sekundární strany distribučních transformátorů. Zároveň bude provedena náhrada dvojitého zemního spojení za pomocí metody symetrických složek a bude ověřena funkčnost této metody.

Protože se dvojité zemní spojení svým charakterem podobá dvoufázovému zemnímu zkratu, bude rovněž navržena soustava využita pro možné rozlišení těchto poruchových stavů při změnách parametrů dané soustavy. Současně bude analyzováno, na kterém parametru soustavy jsou nejvíce závislá sekundární napětí distribučních transformátorů při vzniku dané poruchy. Závěrem bude zkoumána možnost lokalizace těchto poruchových stavů s využitím lokátoru.

1. ZEMNÍ SPOJENÍ

Zemní spojení v ES je definováno dle PNE 33 3070 [11] jako porucha způsobená spojením vodiče jedné fáze se zemí nebo jeho izolačního odporu vůči zemi pod stanovenou hodnotu. Je to nejčastější porucha, která se vyskytuje u venkovních vedení VN. Tato porucha vniká v sítích, kde nulový uzel na sekundární straně transformátoru není přímo spojen se zemí. Jedná se o síť s izolovaným uzlem nebo síť neúčinně uzemněné přes zhášecí tlumivku, tzv. kompenzované síť. Zhášecí tlumivka pak slouží pro kompenzaci poruchového proudu tak, aby místem poruchy procházel pouze malý zbytkový proud. V distribučních sítích ČR se převážně využívá centralizovaná kompenzace, kdy je zhášecí tlumivka zapojená mezi nulový uzel transformátoru a zemnicí soustavu rozvodny. Zhášecí tlumivka je pak laděna automatickou do paralelní rezonance s celkovou kapacitou sítě, čímž se docílí požadovaného průchodu malého zbytkového proudu místem vzniku poruchy [1][3].

V sítích účinně uzemněných a neúčinně uzemněných přes nízkoohmový uzlový odporník nastává zemní zkrat. Pokud vznikne porucha v síti izolované nebo kompenzované, mluvíme o zemním spojení, kdy poruchový proud dosahuje nižší úrovně než při jednofázovém zkratu. Toto je obrovská výhoda provozu neúčinně uzemněných DS a sítí s uzemněným uzlem. Jestliže dojde k poruše a nastane zemní spojení, je možné stále síť provozovat, až do nalezení a odstranění příčiny zemního spojení. Tím se také minimalizují škody vzniklé přerušením výroby a nemožností distribuce elektrické energie. Obvykle provoz se zemní poruchou trvá v řádech desítek minut až několik hodin. Pokud jsou síť dobře kompenzované, dojde ke samozhášení zemních spojení a minimalizuje se tak počet trvalých, případně vznik jiných závažných poruch [1][3].

Pokud poruchový proud přesáhne hodnotu obvykle 5 A, vznikne zpravidla při zemním spojení oblouk, který dosahuje značných rozměrů. Zemní spojení se může rozšířit na vážnější typ poruchy, jako je dvojitě zemní spojení nebo mezifázový zkrat. V tomto případě je nutné provozovanou síť ihned odpojit, jinak dojde k přepálení vodičů, stožárů a ke zničení izolátorů vlivem hořícího oblouku [1][3].

Druhy zemních spojení lze rozdělit podle:

- Velikosti přechodového odporu v místě zemního spojení
- Doby trvání zemního spojení

Dle velikosti přechodového odporu v místě poruchy dělíme zemní spojení do třech kategorií, a to na [1]:

Kovová ZS – Přechodový odpor v místě ZS je téměř nulový, maximálně v řádech jednotek ohmů. Kovové zemní spojení může vzniknout v distribuční trafostanici vlivem přeskoku oblouku na neživou část trafostanice, která je velmi dobře uzemněná. Nicméně se tyto poruchy vyskytují s velmi malou pravděpodobností.

Oblouková ZS – Přechodový odpor v místě ZS je tvořen z většiny odporem oblouku, který dosahuje hodnoty desítek až stovek ohmů. Obloukové zemní spojení je typické svým krátkodobým přerušovaným hořením oblouku, který způsobuje krátkodobá přepětí.

Odporová ZS – Jsou nejčastějším typem zemních spojení na venkovních DS. Přechodový odpor v místě ZS dosahuje v řádech několika set až tisíc ohmů.

V současné době se dále při vzniku zemního spojení v DS projevují vyšší harmonické poruchového proudu. Zhášecí tlumivka, která je naladěna do rezonance se základní harmonickou, není schopna vykompenzovat vyšší harmonické. Proto poruchové proudy dosahují vyšší úrovně, než je zbytkový proud základní harmonické [1].

Dle doby trvání poruchy lze rozdělit zemní spojení na [1]:

Mžiková ZS – doba trvání do 5 s

Krátkodobá ZS – doba trvání mezi 5 s až do 10 min

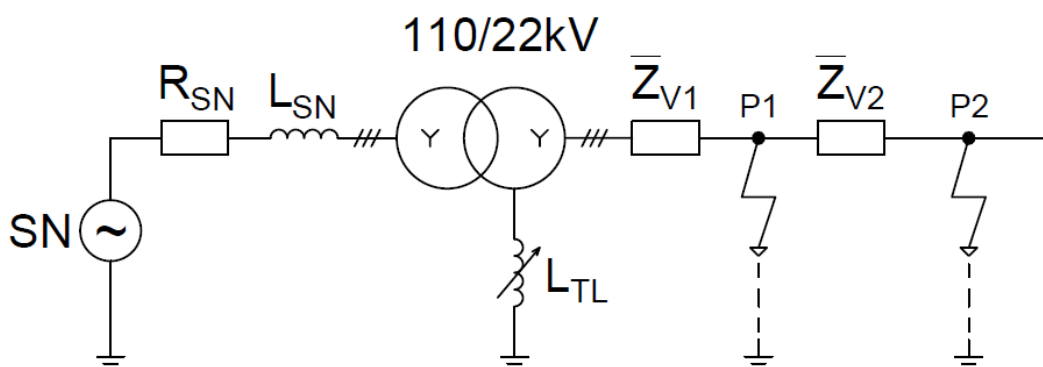
Přerušovaná ZS – mžikové či krátkodobé ZS po sobě rychle se opakující

Trvalá ZS – doba trvání nad 10 min

Nejčastěji vzniká obloukové zemní spojení, kdy oblouk zhasíná a znovu se zapaluje vlivem napětí na postižené fázi vedení. Důsledkem opakování zemních spojení, se izolace vedení unavuje a dochází tak k průrazu na slabších místech vedení [6].

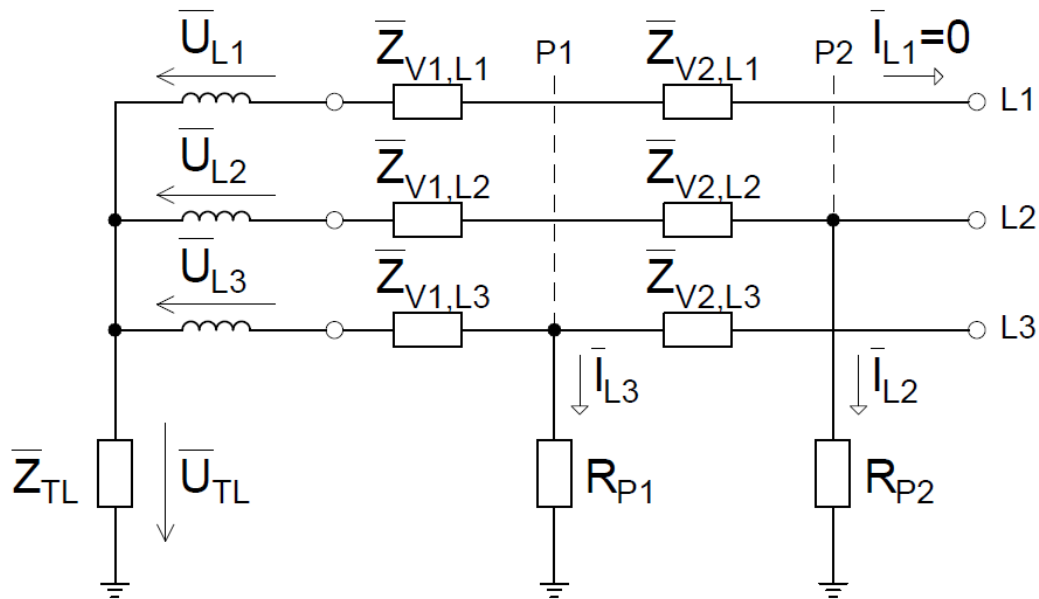
1.1 Dvojité zemní spojení

Definice zemního spojení dle PNE 33 3070 byla již popsána v kapitole 1. Dle normy ČSN EN 60909-3 ed. 2 [9] je však dvojité zemní spojení definováno jako „dva nesoumísné současné jednofázové zkraty“, tedy současné jednofázové zkraty v různých místech na různých vodičích trojfázové soustavy střídavé sítě s uzemněným či izolovaným nulovým uzlem transformátoru. V anglické literatuře se nesoumísné dvojité zemní spojení nazývá jako „Double Earth Fault“ nebo „Cross-Country Fault“. Dvojité zemní spojení se svým charakterem podobá dvoufázovému zkratu. Dvoufázový zkrat nastane, jestliže dojde ke spojení dvou různých fází ve stejném místě.



Obrázek 1.1 Distribuční soustava 110/22 kV

Obrázek 1.1 demonstruje jednoduchou distribuční soustavu 110/22 kV, která je tvořena síťovým napaječem 110 kV, distribučním transformátorem a třífázovým vedením 22 kV. Distribuční soustava 22 kV představuje kompenzovanou síť, ve které je nulový uzel distribučního transformátoru uzemněn přes laditelnou tlumivku. Jestliže vznikne na třífázovém vedení 22 kV dvojitě zemní spojení, pak lze sestavit schéma, které je zobrazeno na obrázku 1.2. Pro ilustraci této poruchy vzniklo v místě P1 spojení fáze L3 se zemí a v místě P2 spojení fáze L2 se zemí.



Obrázek 1.2 Dvojitě zemní spojení v kompenzované síti

1.2 Typy a variace nesoumírného dvojitého ZS

Norma ČSN EN 60909-3 ed. 2 [9] udává jednoduché variace dvou nesoumírných současných jednofázových zkratů. Tyto případy poruch se mohou vyskytnout ve třech typech třífázových vedení:

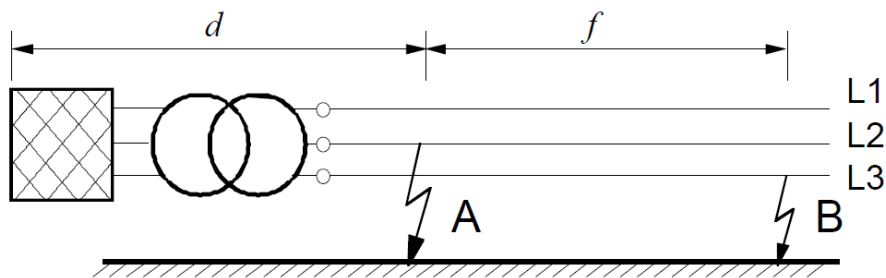
- Jednostranně napájená radiální vedení
- Dvě jednostranně napájená radiální vedení
- Dvoustranně napájené jednoduché vedení

Při vzniku zemního spojení existuje několik ochran pro odpojení postiženého vedení. Tyto ochrany se připojují na začátek distribučních vedení. Typicky se pro radiální distribuční sítě využívají nadproudové ochrany a již několik let jsou hojně využívány tzv. automatické reclosery (ACR). Nadproudová ochrana měří velikost proudu procházejícím vedením. Pokud nastane poruchový stav, typicky zkrat nebo zemní spojení, nadproudová ochrana zareaguje na zvýšený proud a odpojí vedení, na kterém porucha vznikla.

Recloser je ve své podstatě automatický výkonový vypínač schopný vypínat a opět zapínat vedení pod zkratem. Lze jej využít pro ochranu distribučních sítí na všech

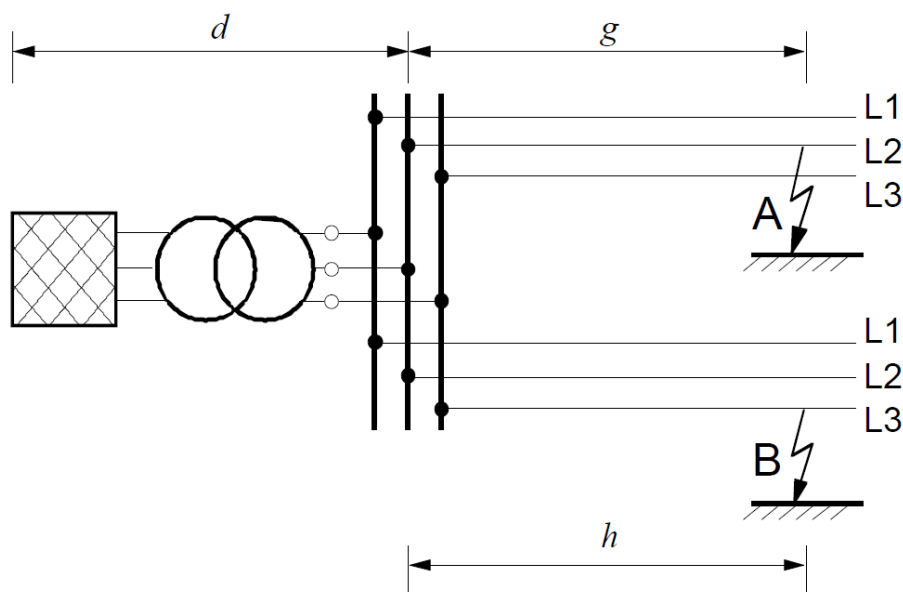
napětíových hladinách. Jestliže je recloser instalován na začátku distribučního vedení a detekuje poruchu na vedení, okamžitě vedení odpojí a po stanovené době opět vedení připojí. Pokud i nadále porucha na vedení přetrvává, opět recloser odpojí vedení. Pokud však bude instalován na vedení mezi místem A a místem B, ve kterých vzniklo zemní spojení, dojde k odstranění pouze zemního spojení v místě B a v místě A nadále zemní spojení přetrvává.

Na následujících obrázcích 1.3, 1.4 a 1.5 jsou uvedeny již zmíněná dvojitá zemní spojení pro tři variace třífázových vedení. Při jednostranně napájeném radiálním vedení, uvedeným na obrázku 1.3, může nastat dvojité zemní spojení na dvou libovolných fázích v libovolném místě vedení. V tomto případě se uvažuje, že první zemní spojení vzniklo v místě A na fázi L2 a druhé zemní spojení v místě B na fázi L3. Přičemž se zkoumá vzdálenost d , která udává, v jaké vzdálenosti od síťového napáječe vzniklo první zemní spojení fáze L2. Dále se zkoumá vzdálenost f , která udává vznik druhého zemního spojení fáze L3 ve vzdálenosti od prvního zemního spojení fáze L2 v místě A.



Obrázek 1.3 Jednostranně napájené radiální vedení [9]

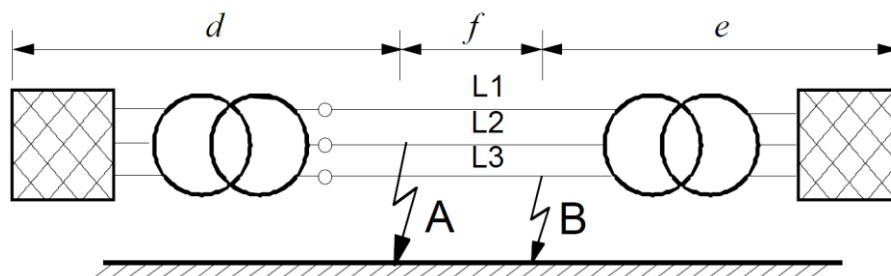
Obrázek 1.4 zobrazuje dvě radiální vedení, která jsou současně jednostranně napájena. Opět se předpokládá, že dvojité zemní spojení může nastat na libovolné fázi v libovolném místě vedení, a to jak na prvním vedení, tak i na druhém vedení. Pro názornost se uvažuje vznik prvního zemního spojení v místě A na fázi L2 prvního vedení a druhé zemní spojení v místě B na fázi L3 druhého vedení. V tomto případě se zkoumají celkem 3 vzdálenosti, a to vzdálenost d mezi síťovým napaječem a přípojnými rozvodny. Zbylé dvě zkoumané vzdálenosti g a h udávají vzdálenost mezi přípojnými rozvodny a místem zemního spojení vzniklé na prvním vedení v místě A na fázi L2 nebo na druhém vedení v místě B na fázi L3. Jestliže bude připojena nadproudová ochrana na začátku každého vedení, spolehlivě dojde k detekci dvojitého zemního spojení. Dojde-li ke spojení jedné fáze vedení A se zemí, nadproudová ochrana detekuje zemní poruchu a okamžitě odpojí postižený vývod. Totéž platí i pro vznik zemní poruchy na vedení B. Obě nadproudové ochrany však nemusí vybavit současně. Jestliže vybaví vývodová ochrana a odpojí pouze první vedení, na kterém vzniklo zemní spojení v místě A, pak stále může trvat druhé zemní spojení v místě B. V tomto případě lze říci, že se jedná o vznik dvojitého zemního spojení a druhá porucha musí být co nejdříve odstraněna.



Obrázek 1.4 Dvě jednostranně napájená radiální vedení [9]

Poslední obrázek 1.5 znázorňuje radiální vedení, které je napájeno ze dvou stran. Dvojitě zemní spojení i v tomto případě může nastat na libovolné fázi v libovolném místě vedení. Předpoklad je, že první zemní spojení vznikne v místě A na fázi L2 a druhé zemní spojení v místě B na fázi L3, přičemž se zkoumají opět tři vzdálenosti. Vzdálenost d udává místo vzniku zemního spojení na fázi L2 ve vzdálenosti od síťového napáječe z levé strany. Totéž platí pro vzdálenost e , ovšem pro vznik zemního spojení v místě B na fázi L3 ve vzdálenosti od síťového napáječe z pravé strany. Poslední vzdálenost f udává vzdálenost mezi oběma místy vzniku zemního spojení, a to v místě A na fázi L2 a na fázi L3 v místě B.

Je nutné poznamenat, že dvoustranně napájené jednoduché vedení se nevyskytuje v elektrizačních soustavách VN s neúčinně uzemněným uzlem na území ČR. Tento koncept vedení se využívá ve většině případů pro tzv. kmenové linky, aby byla zajištěna distribuce elektrické energie při výpadku z jedné ze dvou transformačních stanic, nicméně linka je vždy z jedné strany odpojována od zdroje.

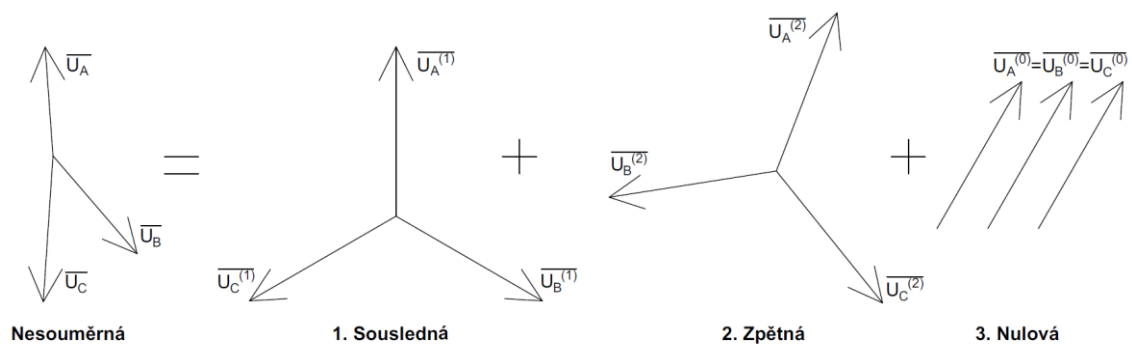


Obrázek 1.5 Dvoustranně napájené jednoduché vedení [9]

2. METODA SOUMĚRNÝCH SLOŽEK

Při zkratové poruše nebo vzniku zemního spojení v ES existují případy, kdy je postižena pouze jedna fáze nebo dvě fáze zároveň a jedná se tedy o nesouměrný zkrat. V případě vzniku souměrného zkratu jsou postiženy všechny tři fáze vedení a zemí neteče žádný proud. Takové případy poruch lze jednoduše matematicky vypočítat pomocí rozkladu proudu a napětí na souměrné složky. Metoda souměrných složek, někdy též označována jako metoda Fortescue, je lineární transformace, jejíž účelem je rozložení nesouměrné soustavy na tři samostatné souměrné soustavy, a to na soustavu [4]:

- Sousednou $X^{(1)}$
- Zpětnou $X^{(2)}$
- Netočivou (nulovou) $X^{(0)}$



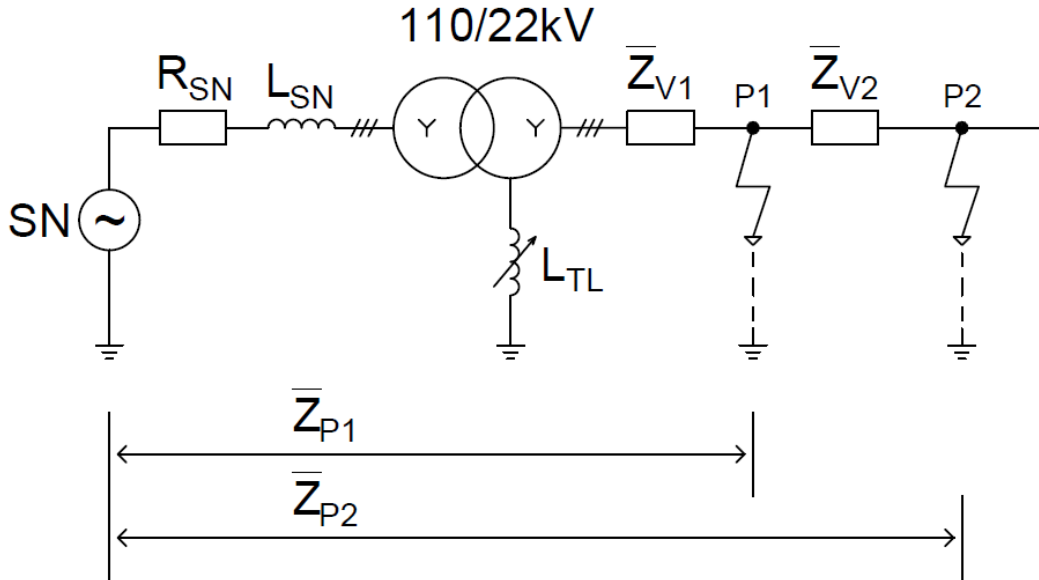
Obrázek 2.1 Metoda souměrných složek

Jak lze vidět na obrázku 2.1, souslednou soustavu tvoří tři fázory, které mají stejnou amplitudu, ale jsou navzájem posunuty o 120° v kladném směru. Zpětná soustava je totožná jako soustava sousledná s tím rozdílem, že má opačný sled fází, tedy fázový posun o 120° v záporném směru. Naopak netočivá soustava je tvořena třemi fázory se stejnými mody a s nulovým fázovým posuvem.

2.1 Souměrné složky pro dvojitě zemní spojení

Již bylo definováno, že dvojitě zemní spojení je typ poruchy, při které dochází k vodivému spojení jedné fáze se zemí na dvou různých místech vedení. Při takové poruše nastává určitá nesymetrie v soustavě, kterou lze řešit metodou souměrných složek v kombinaci s teorií dvojbranů. Dvojbran je v podstatě libovolný obvod, který lze spojit s ostatními částmi obvodu pomocí páru vstupních a výstupních svorek. Propojení jednotlivých svorek složkových dvojbranů pak může být do série nebo paralelně, a to podle typu poruchy. Při vzniku dvojitěho zemního spojení se uplatní sériové spojení [11].

Pro ověření funkčnosti metody souměrných složek byla za tímto účelem vytvořena v simulačním SW PSCAD jednoduchá distribuční soustava 110/22 kV, která již byla zmíněna v kapitole 1.1. a je zobrazena na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2 Impedance distribuční soustavy 110/22 kV

Na této soustavě byla provedena simulace, kdy v místě P1 došlo k zemnímu spojení fáze L1 a v místě P2 nastalo zemní spojení fáze L2. Následně v těchto dvou místech vzniku poruchy byla zaznamenána sousledná a zpětná složka napětí. Tato testovací soustava má následující výchozí parametry:

- Síťový napáječ ($I''_{k3} = 10 \text{ kA}$): $\overline{Z}_{SN} = (0,635 + j6,35) \Omega$
- Transformátor 110/22 kV: $\overline{Z}_T = j1,2676 \Omega$
- Laditelná tlumivka: $L_{TL} = 1,698 \text{ H}$
- Venkovní vedení: $\overline{Z}_{V1} = \overline{Z}_{V2} = (21,6 + j21,55) \Omega$
- Délka venkovního vedení: $l_{V1} = l_{V2} = 50 \text{ km}$
- Celková kapacita soustavy: $C_{\text{celk}} = 1,989 \mu\text{F}$
- Odpor poruchy: $R_{P1} = R_{P2} = 20 \Omega$

Aby bylo možné porovnat souměrné složky napětí získané simulací dvojitého zemního spojení v SW PSCAD, byly pro tento účel vypočteny souměrné složky napětí v programovém prostředí MATLAB dle postupu uvedeným v [7], [8] a [11]. Při výpočtech nesymetrie je nejdříve nutné vypočítat hodnoty prvků pro souslednou, zpětnou i netočivou složkovou soustavu.

Sousledná složková soustava obsahuje navíc síťový napáječ, který je považován za zcela symetrický, proto bude obsahovat ekvivalentní zdroje reprezentující fáze napětí

před poruchou a v místech vzniku poruchy. Bude-li se vycházet z navržené sítě uvedené na obrázku 2.2, lze určit ekvivalentní impedance od síťového napáječe do jednotlivých míst vzniku poruchy \bar{Z}_{P1} a \bar{Z}_{P2} .

Pro jednotlivé složky impedance \bar{Z}_{P1} platí následující:

$$\bar{Z}_{P1}^{(1)} = \bar{Z}_T^{(1)} + \bar{Z}_{SN}^{(1)} + \bar{Z}_{V1}^{(1)} \cdot l_{V1} \quad (2.1)$$

$$\bar{Z}_{P1}^{(2)} = \bar{Z}_T^{(2)} + \bar{Z}_{SN}^{(2)} + \bar{Z}_{V1}^{(2)} \cdot l_{V1} \quad (2.2)$$

$$\bar{Z}_{P1}^{(0)} = 3 \cdot \bar{Z}_{TL} + 3 \cdot R_{P1} + \bar{Z}_{V1}^{(0)} \cdot l_{V1} \quad (2.3)$$

Obdobně pak pro jednotlivé složky impedance \bar{Z}_{P2} platí:

$$\bar{Z}_{P2}^{(1)} = \bar{Z}_T^{(1)} + \bar{Z}_{SN}^{(1)} + \bar{Z}_{V1}^{(1)} \cdot l_{V1} + \bar{Z}_{V2}^{(1)} \cdot l_{V2} \quad (2.4)$$

$$\bar{Z}_{P2}^{(2)} = \bar{Z}_T^{(2)} + \bar{Z}_{SN}^{(2)} + \bar{Z}_{V1}^{(2)} \cdot l_{V1} + \bar{Z}_{V2}^{(2)} \cdot l_{V2} \quad (2.5)$$

$$\bar{Z}_{P2}^{(0)} = 3 \cdot \bar{Z}_{TL} + 3 \cdot R_{P2} + \bar{Z}_{V1}^{(0)} \cdot l_{V1} + \bar{Z}_{V2}^{(0)} \cdot l_{V2} \quad (2.6)$$

, kde \bar{Z}_{TL} je impedance tlumivky naladěná do paralelní rezonance s celkovou kapacitou soustavy.

Důležité je také určit ekvivalentní impedanci, přes kterou procházejí oba poruchové proudy a impedanci, kterou prochází pouze jeden poruchový proud. Pro impedanci, kterou protékají oba poruchové proudy, platí:

$$\bar{Z}_{P1P2}^{(1)} = \bar{Z}_{P2P1}^{(1)} = \bar{Z}_{P1}^{(1)} = \bar{Z}_T^{(1)} + \bar{Z}_{SN}^{(1)} + \bar{Z}_{V1}^{(1)} \cdot l_{V1} \quad (2.7)$$

$$\bar{Z}_{P1P2}^{(2)} = \bar{Z}_{P2P1}^{(2)} = \bar{Z}_{P1}^{(2)} = \bar{Z}_T^{(2)} + \bar{Z}_{SN}^{(2)} + \bar{Z}_{V1}^{(2)} \cdot l_{V1} \quad (2.8)$$

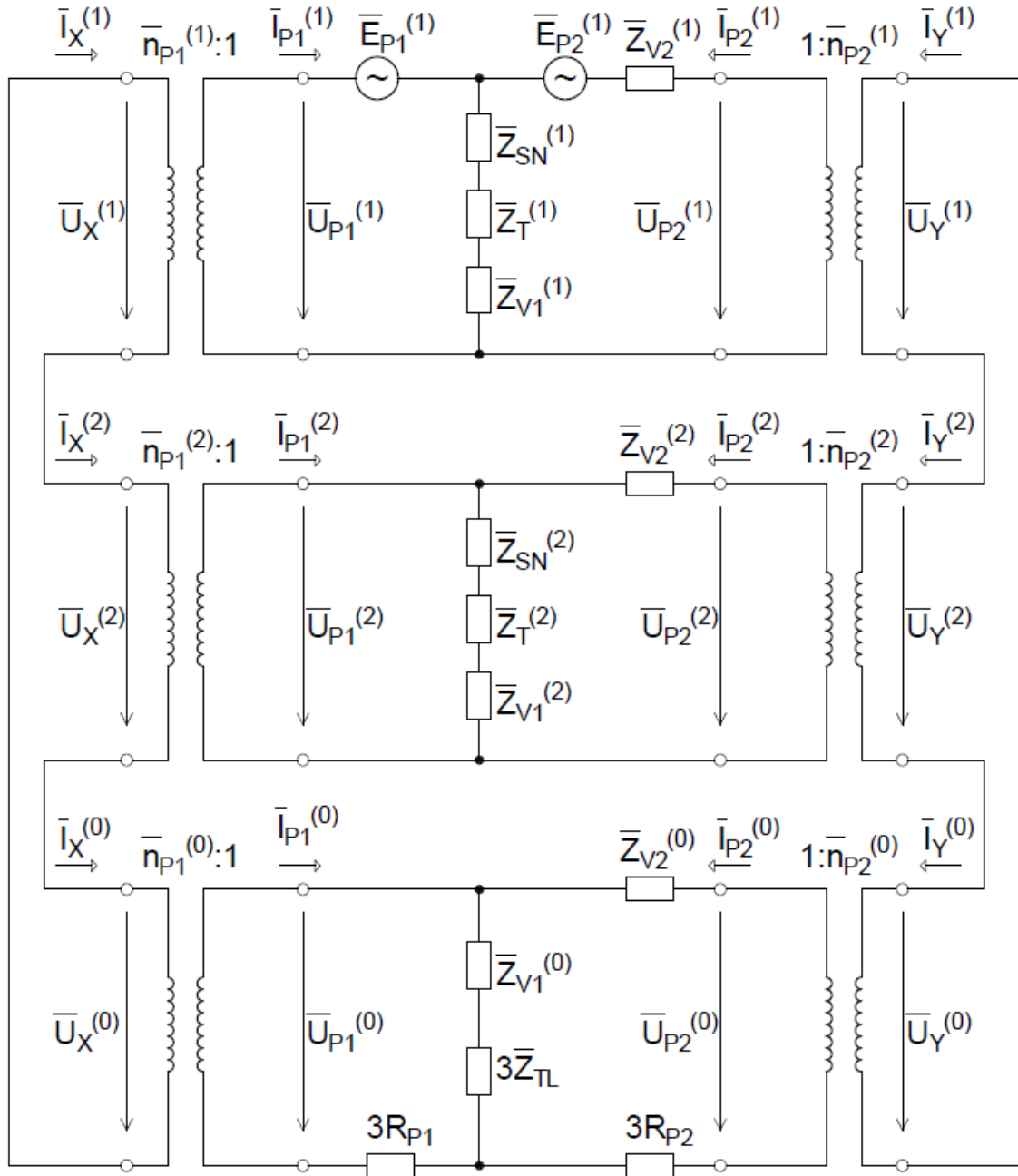
$$\bar{Z}_{P1P2}^{(0)} = \bar{Z}_{P2P1}^{(0)} = 3 \cdot \bar{Z}_{TL} + \bar{Z}_{V1}^{(0)} \cdot l_{V1} \quad (2.9)$$

Při návrhu náhradního schématu složkových soustav se musí navíc oddělit vstupní a výstupní terminály dvojbranu. Oddělení se provádí přes oddělovací transformátory. Jestliže se zvolí jako referenční fáze L1, pak převod oddělovacího transformátoru je 1:1. V případě vzniku poruchy v jiné fázi, než je referenční fáze L1, se fázory proudů a napětí musí pootočit tak, aby fázory proudů a napětí odpovídali referenci fáze L1. Toho se docílí využitím operátorů natočení:

$$\bar{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.10)$$

$$\bar{a}^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.11)$$

Výsledné náhradní schéma při vzniku dvojitého zemního spojení je uvedeno na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 Náhradní schéma dvojitého zemního spojení

Převody oddělovacích transformátorů složkových soustav jsou tedy:

$$\bar{n}_{P1}^{(1)} = \frac{\bar{u}_X^{(1)}}{\bar{u}_{P1}^{(1)}}, \bar{n}_{P1}^{(2)} = \frac{\bar{u}_X^{(2)}}{\bar{u}_{P1}^{(2)}}, \bar{n}_{P1}^{(0)} = \frac{\bar{u}_X^{(0)}}{\bar{u}_{P1}^{(0)}} \quad (2.12)$$

$$\overline{n_{P2}^{(1)}} = \frac{\overline{U_Y^{(1)}}}{\overline{U_{P2}^{(1)}}}, \overline{n_{P2}^{(2)}} = \frac{\overline{U_Y^{(2)}}}{\overline{U_{P2}^{(2)}}}, \overline{n_{P2}^{(0)}} = \frac{\overline{U_Y^{(0)}}}{\overline{U_{P2}^{(0)}}} \quad (2.13)$$

Složková schémata jsou navzájem propojena do série, jak bylo zmíněno na začátku této kapitoly, čímž se získá jeden výsledný dvojbran s impedanční charakteristickou maticí. Protože v místě P1 vnikla porucha na fázi L1, pak oddělovací transformátory budou mít ideální převod 1:1. Naopak, v místě P2 došlo ke vzniku poruchy fáze L2 a oddělovací transformátory budou mít tedy převod s odpovídajícím operátorem natočení. Převod pro nulovou složku soustavy bude vždy 1:1. V tomto případě budou převody oddělovacích transformátorů následující:

$$\overline{n_{P1}^{(1)}} = \overline{n_{P1}^{(2)}} = \overline{n_{P1}^{(0)}} = 1 \quad (2.14)$$

$$\overline{n_{P2}^{(1)}} = \overline{a}^2, \overline{n_{P2}^{(2)}} = \overline{a}, \overline{n_{P2}^{(0)}} = 1 \quad (2.15)$$

S využitím II. Kirchhoffova zákona lze zapsat vstupní a výstupní napětí sousledné složkové soustavy v maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} \overline{U_{P1}^{(1)}} \\ \overline{U_{P2}^{(1)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{E_{P1}^{(1)}} \\ \overline{E_{P2}^{(1)}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overline{Z_{P1}^{(1)}} & \overline{Z_{P1P2}^{(1)}} \\ \overline{Z_{P2P1}^{(1)}} & \overline{Z_{P2}^{(1)}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{I_{P1}^{(1)}} \\ \overline{I_{P2}^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Protože se jedná o sériově spojené dvojbrany, pak z obrázku 2.3 platí následující rovnice fázorů proudů a napětí:

$$\overline{I_X^{(1)}} = \overline{I_X^{(2)}} = \overline{I_X^{(0)}} = \overline{I_X}, \overline{I_Y^{(1)}} = \overline{I_Y^{(2)}} = \overline{I_Y^{(0)}} = \overline{I_Y} \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} \overline{U_X} \\ \overline{U_Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{U_X^{(1)}} \\ \overline{U_Y^{(1)}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{U_X^{(2)}} \\ \overline{U_Y^{(2)}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{U_X^{(0)}} \\ \overline{U_Y^{(0)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

S využitím rovnic (2.12) a (2.13) a po substituci se obdrží:

$$\begin{bmatrix} \overline{U_X^{(1)}} \\ \overline{U_Y^{(1)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{n_{P1}^{(1)}} \cdot \overline{E_{P1}^{(1)}} \\ \overline{n_{P2}^{(1)}} \cdot \overline{E_{P2}^{(1)}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overline{Z_{P1}^{(1)}} & \frac{\overline{n_{P1}^{(1)}}}{\overline{n_{P2}^{(1)}}} \cdot \overline{Z_{P1P2}^{(1)}} \\ \overline{n_{P2}^{(1)}} \cdot \overline{Z_{P2P1}^{(1)}} & \overline{Z_{P2}^{(1)}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{I_X} \\ \overline{I_Y} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Obdobně lze uvést rovnice pro zpětnou a netočivou složku. Pro netočivou složku platí, že převody oddělovacích transformátorů jsou 1:1, poté lze uvést rovnice v maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} \overline{U_X^{(2)}} \\ \overline{U_Y^{(2)}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \overline{Z_{P1}^{(2)}} & \frac{\overline{n_{P1}^{(2)}}}{\overline{n_{P2}^{(2)}}} \cdot \overline{Z_{P1P2}^{(2)}} \\ \frac{\overline{n_{P2}^{(2)}}}{\overline{n_{P1}^{(2)}}} \cdot \overline{Z_{P2P1}^{(2)}} & \overline{Z_{P2}^{(2)}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{I_X} \\ \overline{I_Y} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} \overline{U_X^{(0)}} \\ \overline{U_Y^{(0)}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \overline{Z_{P1}^{(0)}} & \overline{Z_{P1P2}^{(0)}} \\ \overline{Z_{P2P1}^{(0)}} & \overline{Z_{P2}^{(0)}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{I_X} \\ \overline{I_Y} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Po dosazení za vstupní a výstupní složková napětí do rovnice (2.18) se získá soustava rovnic výsledného dvojbranu:

$$\begin{bmatrix} \overline{U_X} \\ \overline{U_Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{n_{P1}^{(1)}} \cdot \overline{E_{P1}^{(1)}} \\ \overline{n_{P2}^{(1)}} \cdot \overline{E_{P2}^{(1)}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overline{Z_{P1}} & \overline{Z_{P1P2}} \\ \overline{Z_{P2P1}} & \overline{Z_{P2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{I_X} \\ \overline{I_Y} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Z této rovnice se získá výsledná charakteristická impedanční matice, která je dána součty prvků složkových charakteristických matic:

$$\overline{Z_{P1}} = \overline{Z_{P1}^{(1)}} + \overline{Z_{P1}^{(2)}} + \overline{Z_{P1}^{(0)}} \quad (2.23)$$

$$\overline{Z_{P1P2}} = \frac{\overline{n_{P1}^{(1)}}}{\overline{n_{P2}^{(1)}}} \cdot \overline{Z_{P1P2}^{(1)}} + \frac{\overline{n_{P1}^{(2)}}}{\overline{n_{P2}^{(2)}}} \cdot \overline{Z_{P1P2}^{(2)}} + \overline{Z_{P1P2}^{(0)}} \quad (2.24)$$

$$\overline{Z_{P2P1}} = \frac{\overline{n_{P2}^{(1)}}}{\overline{n_{P1}^{(1)}}} \cdot \overline{Z_{P2P1}^{(1)}} + \frac{\overline{n_{P2}^{(2)}}}{\overline{n_{P1}^{(2)}}} \cdot \overline{Z_{P2P1}^{(2)}} + \overline{Z_{P2P1}^{(0)}} \quad (2.25)$$

$$\overline{Z_{P2}} = \overline{Z_{P2}^{(1)}} + \overline{Z_{P2}^{(2)}} + \overline{Z_{P2}^{(0)}} \quad (2.26)$$

Z rovnice (2.22) lze určit vstupní a výstupní proudy při nulových vstupních a výstupních napětích:

$$\begin{bmatrix} \overline{I_X} \\ \overline{I_Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Z_{P1}} & \overline{Z_{P1P2}} \\ \overline{Z_{P2P1}} & \overline{Z_{P2}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \overline{n_{P1}^{(1)}} \cdot \overline{E_{P1}^{(1)}} \\ \overline{n_{P2}^{(1)}} \cdot \overline{E_{P2}^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Pomocí těchto proudů lze určit vstupní a výstupní složková napětí dosazením do rovnic (2.19), (2.20) a (2.21). Následně se přepočtem přes ideální transformátory získají jednotlivá složková napětí v místech poruchy:

$$\begin{bmatrix} \overline{U_{P1}^{(1)}} \\ \overline{U_{P1}^{(2)}} \\ \overline{U_{P1}^{(0)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/n_{P1}^{(1)} \\ 1/n_{P1}^{(2)} \\ 1/n_{P1}^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{U_X^{(1)}} \\ \overline{U_X^{(2)}} \\ \overline{U_X^{(0)}} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} \overline{U_{P2}^{(1)}} \\ \overline{U_{P2}^{(2)}} \\ \overline{U_{P2}^{(0)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/n_{P2}^{(1)} \\ 1/n_{P2}^{(2)} \\ 1/n_{P2}^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{U_Y^{(1)}} \\ \overline{U_Y^{(2)}} \\ \overline{U_Y^{(0)}} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Postup řešení z programu MATLAB je uveden v Příloha A -. Porovnání vypočtených hodnot s hodnotami získané simulací lze vidět v tabulce 2.1, která dále udává činitele nesymetrie napětí v jednotlivých místech poruchy, spočtený dle rovnice (2.30).

$$\rho_U = \frac{U^{(2)}}{U^{(1)}} \cdot 100 \quad (2.30)$$

Činitel nesymetrie napětí udává procentuální podíl absolutní hodnoty zpětné složky napětí $U^{(2)}$ a absolutní hodnoty sousledné složky napětí $U^{(1)}$ základního kmitočtu v místech poruchy. V místě P1 je vypočtená velikost činitele nesymetrie téměř totožná s hodnotou získané pomocí simulace, v místě P2 se vypočtená hodnota činitele nesymetrie liší o 4 % oproti hodnotě získané simulací. Lze tedy konstatovat, že substituce dvojitého zemního spojení s využitím souměrných složek byla ověřena s poměrně velkou přesností na navržené DS.

Tabulka 2.1 Porovnání souměrných složek napětí

Program	Složková napětí [V]				ρ_U [%]	
	$U_{P1}^{(1)}$	$U_{P1}^{(2)}$	$U_{P2}^{(1)}$	$U_{P2}^{(2)}$	$U_{P1}^{(2)}/U_{P1}^{(1)}$	$U_{P2}^{(2)}/U_{P2}^{(1)}$
PSCAD	9754,30	3016,27	8154,73	4576,68	30,92	56,12
Matlab	9750,69	3009,07	8358,38	4406,48	30,86	52,72

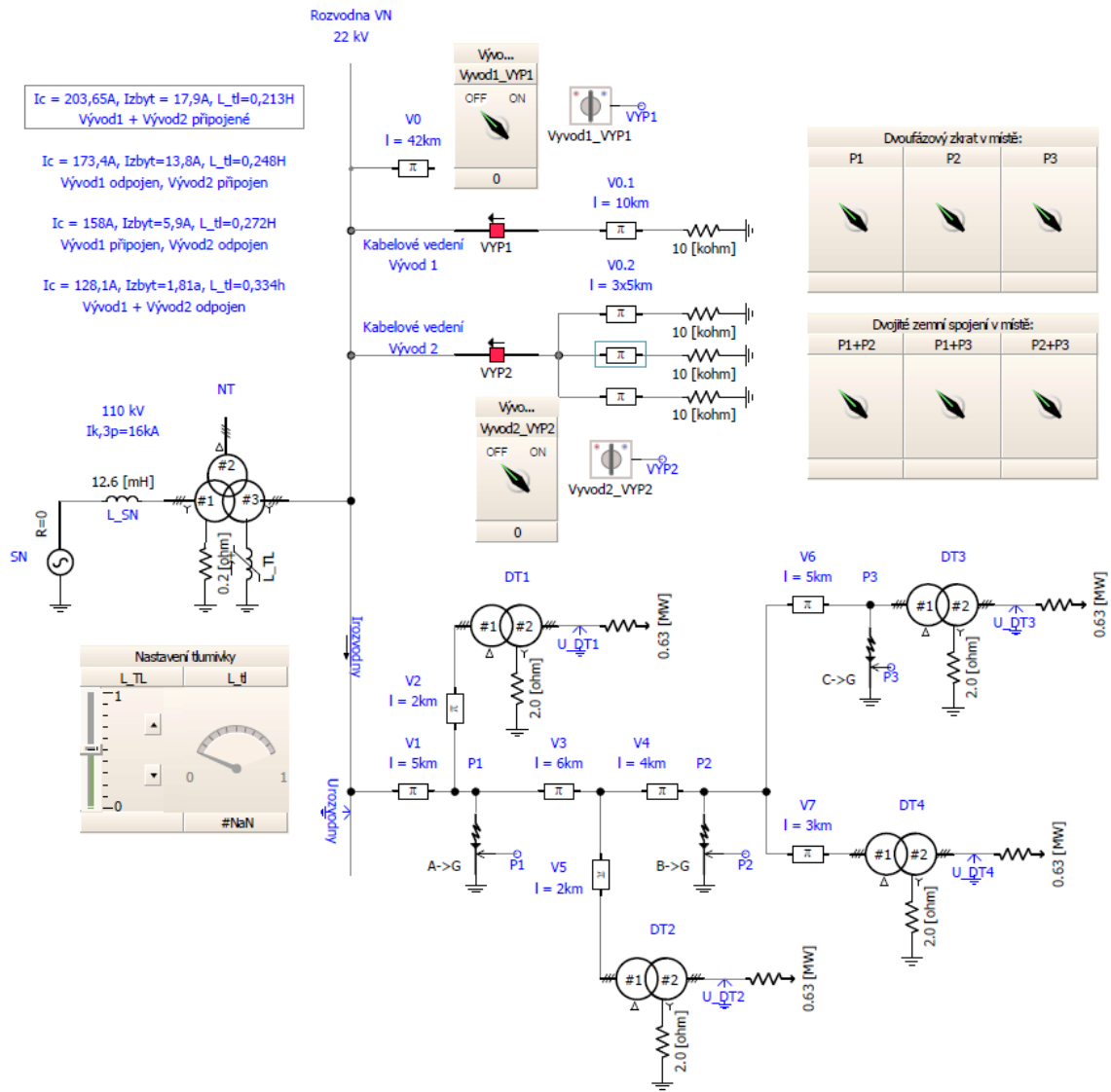
3. TESTOVACÍ MODEL VN SOUSTAVY

Za účelem, v jaké míře budou ovlivněny hodnoty napětí na sekundárních stranách DT při vzniku dvojitého zemního spojení, byl vytvořen testovací model pro simulaci dvojitých zemních spojení v distribuční soustavě VN. Model testovací soustavy byl vytvořen v simulačním SW PSCAD. Grafické rozhraní PSCAD umožňuje uživateli sestavit obvod ve schématickém rozvržení, spustit jeho simulaci, analyzovat výsledky a spravovat data v rámci jednoho uživatelského rozhraní. Zároveň obsahuje online kreslení průběhů veličin, ovládací prvky a měřicí systémy, kterými lze měnit systémové parametry i v průběhu simulace. Jádro tohoto programu tvoří EMTDC (Electromagnetic Transient including DC), které umožňuje výpočet elektromagnetických přechodových jevů [10].

V rozhraní PSCAD byla vytvořena část distribuční soustavy 110/22 kV, která představuje kompenzovanou síť. Síť se skládá ze síťového napáječe na napěťové hladině 110 kV, který přestavuje přenosovou soustavu. Dále soustava obsahuje třífázový trojvinuťový transformátor, na jehož sekundární straně je zapojená do nulového uzlu transformátoru zhášecí laditelná tlumivka. Ta slouží ke kompenzaci kapacitního poruchového proudu. Z rozvodných přípojníc 22 kV jsou poté napájeny jednotlivé vývody. Tato navržená soustava společně s délkami kabelových i venkovních vedení je zobrazena na obrázku 3.1.

Navržená soustava má následující výchozí parametry:

- Zkratový příspěvek síťového napáječe 110 kV: $I''_{k3} = 16 \text{ kA}$ ($L_{SN} = 12,6 \text{ mH}$)
- Transformátor 110/23 kV: $S_{nT} = 63 \text{ MVA}$, $r = 0,1648 \text{ pu}$
- Kabelové vedení 22AXEKVCEY 120:
 - $R_K = 0,253 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $X_L = 0,201 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $X_C = 13,8 \frac{\text{k}\Omega}{\text{km}}$
- Délky jednotlivých kabelových vedení 22AXEKVCEY 120:
 - $l_{V0} = 42 \text{ km}$, $l_{V0.1} = 10 \text{ km}$, $l_{V0.2} = 5 \text{ km}$
- Venkovní vedení 70AlFe6:
 - $R_K = 0,432 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $X_L = 0,431 \frac{\Omega}{\text{km}}$, $X_C = 320 \frac{\text{k}\Omega}{\text{km}}$
- Délky jednotlivých venkovních vedení 70AlFe6:
 - $l_{V1} = 5 \text{ km}$, $l_{V2} = 2 \text{ km}$, $l_{V3} = 6 \text{ km}$, $l_{V4} = 4 \text{ km}$, $l_{V5} = 2 \text{ km}$
 $l_{V6} = 5 \text{ km}$, $l_{V7} = 3 \text{ km}$
- Distribuční transformátory 23/0,408 kV (DT1-DT4):
 - $S_{nT} = 0,63 \text{ MVA}$, $r = 0,0562 \text{ pu}$



Obrázek 3.1 Testovací model DS pro simulaci vzniku poruch na vedení VN

4. ANALÝZA VLIVU PORUCHY NA SEKUNDÁRNÍ NAPĚTÍ DT

Na navržené DS byla provedena řada simulací, včetně analýzy při různých typech dvojitého zemního spojení. Hlavním kritériem bylo zjistit, na jakém parametru jsou nejvíce závislá právě sekundární napětí DT, která jsou umístěna v jednotlivých odbočkách venkovního vedení typu 70AlFe6, jestliže nastane dvojité zemní spojení. Pro tento účel byla v navržené DS vtipována tři místa, ve kterých byly simulovány jednopólové poruchy. Dále bylo třeba ověřit, zda na sekundárních stranách DT, které se nachází za místem vzniku poruchy, je stejná hodnota činitele nesymetrie.

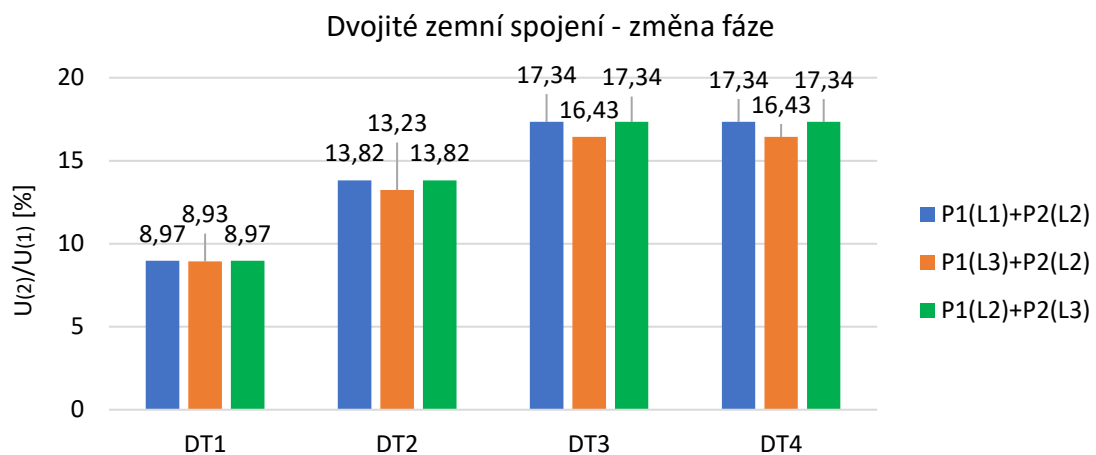
Výchozí stav soustavy pro simulaci poruchy je následující. Veškerá kabelová a venkovní vedení jsou připojena. Při vzniku poruchy v napájecí rozvodně 22 kV protéká kapacitní proud o velikosti 203,65 A. Laditelná tlumivka, zapojená do nulového uzlu napájecího transformátoru, je naladěna do paralelní rezonance s celkovou kapacitou soustavy na hodnotu 0,213 H. Uvažují se délky jednotlivých venkovních vedení typu 70AlFe6 v jednotkách km. Konkrétní délky těchto vedení jsou uvedeny jak kapitole 3, tak na obrázku 3.1. Neuvažuje se žádná zátěž na sekundární straně všech DT. Simulován je vznik obloukového zemního spojení s odporem poruchy 20Ω v místě P1 (spojení fáze L1 se zemí) a v místě P2 (spojení fáze L2 se zemí).

Po analýze výchozího stavu soustavy se následně měnily parametry navržené DS. Kromě změny místa vzniku dvojitého zemního spojení na venkovním vedení se dále měnila velikost odporu zemní poruchy, délka venkovního vedení a změna zatížení na sekundárních stranách DT. Protože se analýza zaměřuje zejména na napěťové poměry, byla zaznamenávána sousledná a zpětná složka napětí na NN stranách DT 22/0,4 kV pro již zmíněné variace za pomoci bloku Fourierovy transformace. Ze zaznamenaných hodnot byl poté pro každou variaci vypočten činitel nesymetrie na sekundární straně DT. Pomocí činitele nesymetrie byly následně provedeny grafické průběhy jeho velikosti pro jednotlivé DT.

Dalším kritériem bylo zjistit, jak lze rozlišit dvojité zemní spojení a dvoufázový zemní zkrat, jestliže se budou opět analyzovat napěťové poměry na NN stranách DT. Za tímto účelem byla rovněž provedena řada simulací dvoufázového zemního zkratu pro stejné variace, jako pro dvojité zemní spojení. Jako výchozí stav se uvažuje totožný, jako při analýze dvojitého zemního spojení s tím rozdílem, že vznikne dvoufázový zemní zkrat v místě P2 (spojení fáze L1 a L2 se zemí). Výsledky těchto simulací a jejich porovnání jsou uvedeny v následujících kapitolách.

4.1 Zemní spojení ve výchozím stavu soustavy

Pro výchozí stav soustavy, který byl popsán v kapitole 4, byla provedena simulace dvojitého zemního spojení v místě P1 a v místě P2. Protože zemní porucha může nastat spojením kterékoliv fáze vedení se zemí v daných místech symetrické soustavy, byly provedeny celkem 3 simulace pro různé fáze vedení. Na obrázku 4.1 lze vidět, že při spojení kterékoli fáze vedení se zemí má činitel nesymetrie na sekundárních stranách DT téměř totožnou hodnotu. Změna fáze tedy nemá na hodnotu činitele nesymetrie zásadní vliv.



Obrázek 4.1 Dvojité zemní spojení – změna poruchy ve fázi

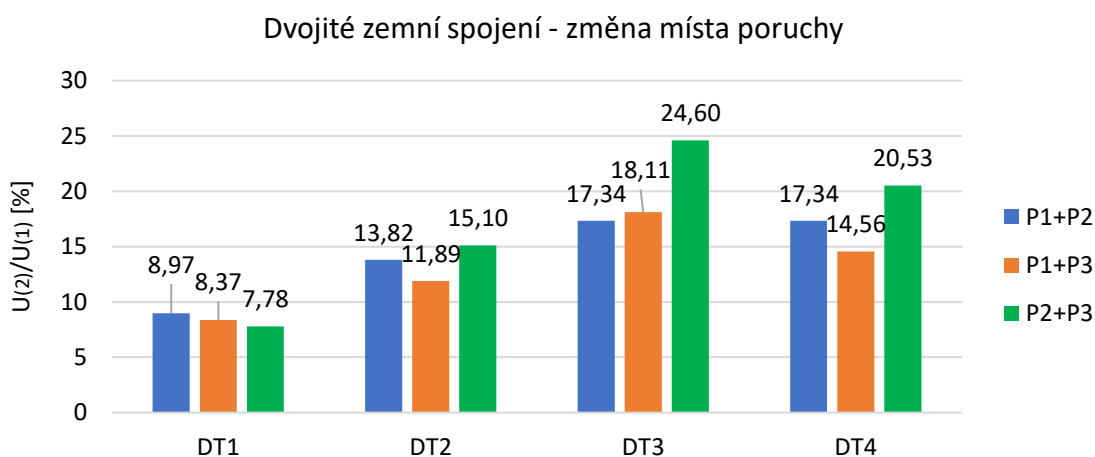
4.2 Změna místa poruchy

Protože byla vytipována celkem tři místa vzniku jednopólové poruchy na venkovním vedení navržené DS, byly proto provedeny tři simulace kombinací míst vzniku zemního spojení pro výchozí stav soustavy uvedeným v kapitole 4. Tato místa jsou uvedena na obrázku 3.1. Protože zemní spojení kterékoliv fáze vedení nemá vliv na velikost hodnoty činitele nesymetrie, byl zvolen následující záměr: zemní spojení fáze L1 v místě P1, zemní spojení fáze L2 v místě P2 a zemní spojení fáze L3 v místě P3. Simulace tedy byly provedeny v následující kombinaci míst:

- P1 (L1-G) + P2 (L2-G)
- P1 (L1-G) + P3 (L3-G)
- P2 (L2-G) + P3 (L3-G)

Z obrázku 4.2 lze vidět nárůst činitele nesymetrie na sekundární straně DT se vzdáleností vzniku poruchy od napájecí rozvodny. To znamená, že čím více jsou vzdálená obě místa poruchy od napájecí rozvodny, tím je vyšší činitel nesymetrie jednotlivých DT. Jako příklad lze uvést činitel nesymetrie na DT3, který je umístěn v odbočce vedení ve

vzdálenosti 20 km od napájecí rozvodny. Velikost činitele nesymetrie na sekundární straně toho DT je oproti ostatním DT nejvyšší a odpovídá hodnotě 24,6 %. Při vzniku dvojitého ZS v místě P1 a P2 má činitel nesymetrie rostoucí charakter těch DT, které se nachází před nebo mezi místy poruchy. Na daných DT, nacházející se za místem nejvzdálenější poruchy od napájecí rozvodny, jsou hodnoty činitele nesymetrie na konstantní hodnotě.

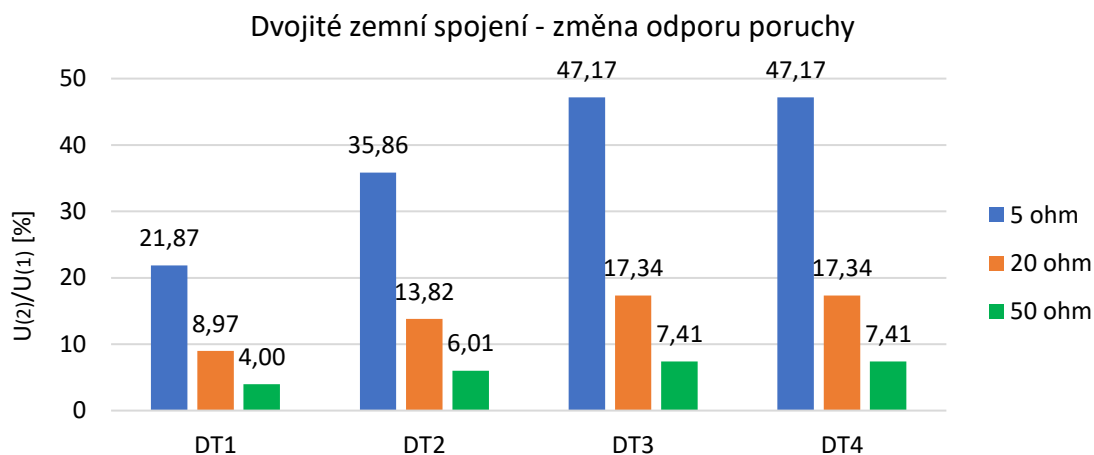


Obrázek 4.2 Dvojitě zemní spojení – změna místa poruchy

4.3 Změna odporu poruchy

Další analýza spočívala v simulaci dvojitého zemního spojení při různé velikosti odporu této poruchy. Protože byla provedena simulace vzniku obloukového zemního spojení, byly za tímto účelem provedeny rovněž tři simulace, při kterých se simulovalo zemní spojení s velikostí odporu 5 Ω , 20 Ω a 50 Ω . Tato simulace byla provedena pro dvojitě zemní spojení v místě P1 a v místě P2 a s výchozím nastavením soustavy uvedeným v kapitole 4.

Výsledky simulace jsou uvedeny na obrázku 4.3. S rostoucím odporem poruchy podstatně klesá činitel nesymetrie DT. Odpor poruchy omezuje velikost poruchového proudu vlivem zvýšení hodnoty impedance poruchové smyčky. Dochází tak k poklesu napětí na NN straně DT a tím klesá i činitel nesymetrie.

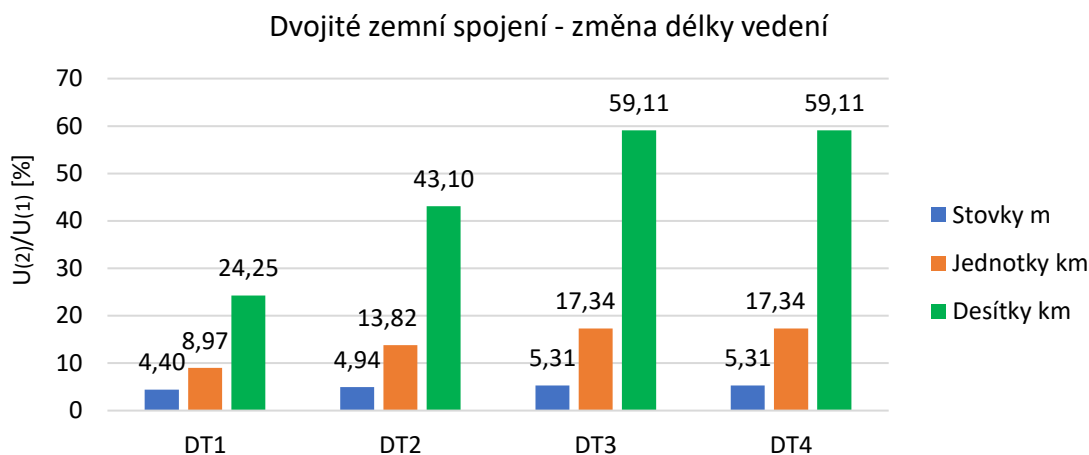


Obrázek 4.3 Dvojité zemní spojení – změna odporu poruchy

4.4 Změna délky venkovního vedení

Při následující simulaci byla modifikována délka venkovního vedení. Výchozí stav soustavy zahrnuje délky vedení v jednotkách km, jak je uvedeno v kapitole 4. Pro tento účel byly dále provedeny simulace dvojitého zemního spojení v nastavení délek vedení na stovky metrů a desítky km. Tato simulace byla rovněž provedena pro dvojité zemní spojení v místě P1 a v místě P2 s hodnotou odporu poruchy 20 Ω . Obrázek 4.4 dokazuje, že délka vedení má velmi zásadní dopad na hodnotu činitele nesymetrie jednotlivých DT.

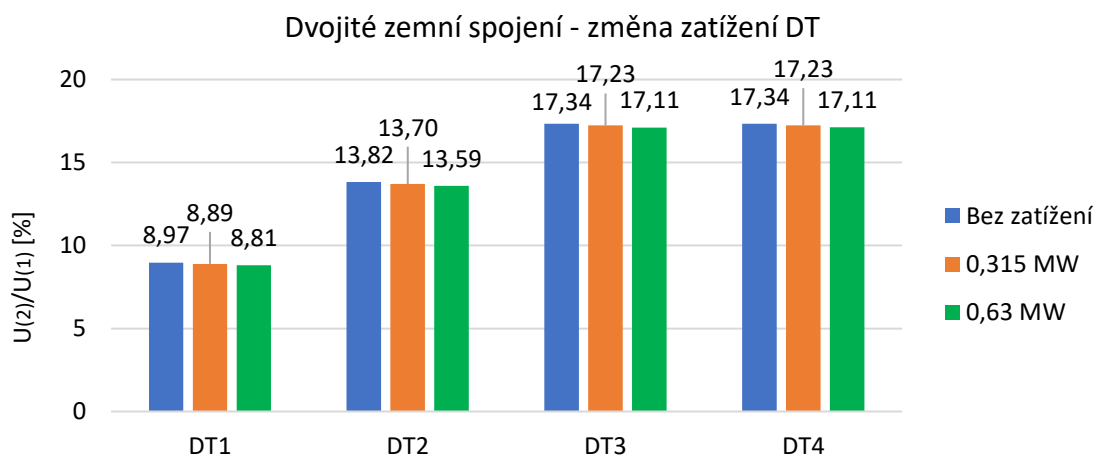
Činitel nesymetrie má tím vyšší hodnotu, čím delší je venkovní vedení. Při délkách vedení, která se pohybují v řádech několika desítek kilometrů, má činitel nesymetrie na sekundárních stranách DT o více než 10 % vyšší hodnotu než při délce venkovního vedení v řádech jednotek kilometrů. Na velmi krátkých vedení, tj. v řádech stovek metrů, je činitel nesymetrie téměř konstantní na všech DT. Stejně jako velikost odporu poruchy má zásadní dopad na citlivost. S vyšší délkou venkovního vedení klesá velikost poruchového proudu vlivem zvýšené impedance poruchové smyčky. Nastává pokles napětí na NN straně DT a dochází k poklesu činitele nesymetrie. Dvojité zemní spojení lze tedy jen těžko lokalizovat na krátkých délkách venkovního vedení.



Obrázek 4.4 Dvojité zemní spojení – změna délky vedení

4.5 Změna zatížení DT

Poslední analýza byla zaměřena na změnu zatížení DT. Při výchozím stavu soustavy se uvažují DT bez zátěže. Protože jmenovitý výkon DT odpovídá hodnotě 0,63 MVA, byla provedena simulace pro DT při výchozím stavu soustavy, kdy DT jsou ve stavu bez zatížení. Pro srovnání byly dále vykonány simulace s maximálním zatížením činného charakteru (0,63 MW) a polovičním zatížením DT (0,315 MW). Tato simulace byla provedena při vzniku zemního spojení v místě P1 a P2 s velikostí odporu 20 Ω a délkami vedení dle výchozího stavu uvedeným na obrázku 3.1. Z analýzy vyplývá, že s rostoucí zátěží roste i činitel nesymetrie jednotlivých DT. Nicméně všechny DT mají při všech simulovaných hodnotách zátěže konstantní hodnotu činitele nesymetrie, a proto velikost zatížení nemá zásadní vliv na velikost činitele nesymetrie jednotlivých DT.



Obrázek 4.5 Dvojité zemní spojení – změna zatížení DT

4.6 Lokátor místa vzniku poruchy

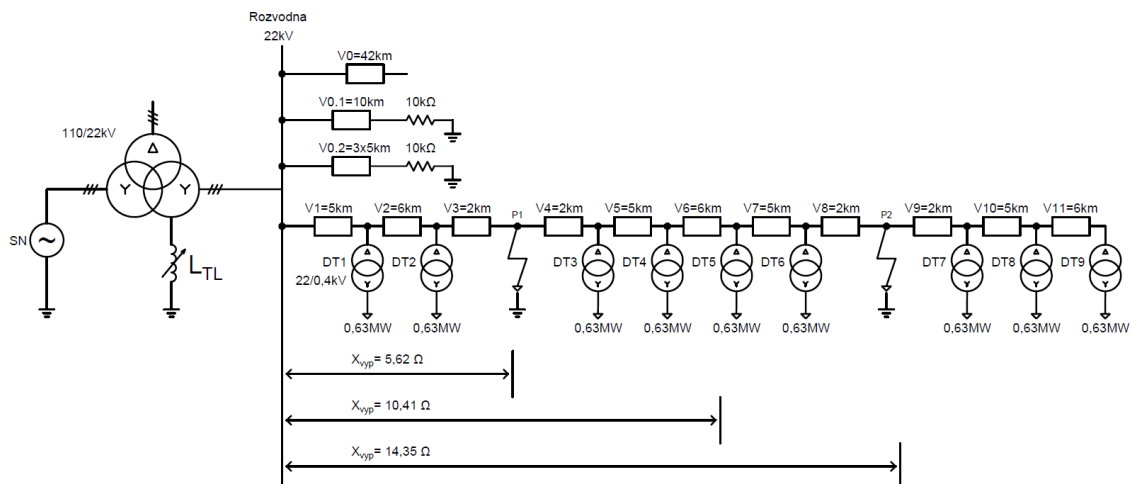
Pro lokalizaci místa vzniku dvoufázového zemního zkratu je možné využití lokátoru umístěného v napájecí rozvodně. Lokátor byl vytvořen v programovém prostředí MATLAB a byl poskytnut pro potřeby této DP. Pro tuto analýzu bylo rovněž využito rozhraní PSCAD, ve kterém bylo vytvořeno schéma DS s devíti distribučními transformátory, jak lze vidět na obrázku 4.6. Na této soustavě byla provedena simulace dvojitého zemního spojení v místě P1 a P2 s odporem poruchy 20Ω . Následně byly zaznamenány velikosti fázorů napětí a proudů jednotlivých fází v místě napájecí rozvodny.

Lokátor spočívá ve výpočtu reaktance vedení s využitím naměřených hodnot fázorů proudů a napětí v napájecí rozvodně. Následně z vypočtené hodnoty reaktance vedení lze určit vzdálenost místa poruchy od napájecí rozvodny. V případě dvojitého zemního spojení však lokátor není schopen lokalizovat přímo obě místa vzniku zemního spojení. Při vzniku nesoumísné poruchy lokátor vždy vypočítá takovou hodnotu reaktance vedení, která odpovídá vzdálenosti mezi danými místy poruchy. Při vzniku dvojitého zemního spojení v místě P1 ve vzdálenosti 13 km od napájecí rozvodny a v místě P2 ve vzdálenosti 33 km od napájecí rozvodny lokátor vypočítal reaktanci vedení na hodnotu $10,41 \Omega$. Tato hodnota reaktance vedení odpovídá vzdálenosti 24,16 km od napájecí rozvodny, tedy téměř do poloviny vzdálenosti mezi oběma místy poruchy. V následující tabulce 4.1 jsou uvedeny hodnoty vypočtených reaktancí vedení pomocí lokátoru při jednotlivých typech poruchy a zároveň skutečné hodnoty reaktancí vedení.

Tabulka 4.1 Vypočtené reaktance vedení pomocí lokátoru

Typ poruchy	Místo poruchy	$X_{vyp} [\Omega]$	$X_{skut} [\Omega]$
Dvojitě ZS	P1 (L1-G) + P2 (L2-G)	10,41	5,603; 14,22
Dvoufázový zkrat	P1 (L1-L2-G)	5,62	5,603
	P2 (L1-L2-G)	14,35	14,22

Správná funkce lokátoru byla doložena při lokalizaci simulovaného dvoufázového zemního zkratu fáze L1 a L2 se zemí jak v místě P1, tak v místě P2. Z tabulky 4.1 a obrázku 4.6 lze vidět, že lokátor vypočítal pro oba dvoufázové zemní zkraty takovou hodnotu reaktance vedení, která s velkou přesností odpovídá skutečné reaktanci vedení. V případě dvoufázového zemního zkratu v místě P1 lokátor vypočítal hodnotu reaktance $5,62 \Omega$. Ta odpovídá vzdálenosti 13,03 km, ve skutečnosti porucha vznikla ve vzdálenosti 13 km od napájecí rozvodny. Při dvoufázovém zemním zkratu v místě P2 byla vypočtena reaktance $14,35 \Omega$, ta odpovídá vzdálenosti 33,3 km. Skutečná vzdálenost od místa poruchy P2 odpovídá vzdálenosti 33 km. Lze konstatovat, že s velmi vysokou přesností lze pomocí lokátoru lokalizovat místo vzniku dvoufázového zemního zkratu, tedy soumísné poruchy. Nelze však určit konkrétní místo vzniku nesoumísné poruchy.



Obrázek 4.6 Lokátor místa vzniku poruchy

Pro názornost byl dále lokátor použit pro výpočet reaktance venkovního vedení v případě navržené DS uvedené na obrázku 3.1. V tabulce 4.2 jsou uvedeny vypočtené hodnoty reaktance vedení pomocí lokátoru a skutečné reaktance od napájecí rozvodny do místa vzniku poruchy. V případě vzniku dvoufázového zemního zkratu lokátor poměrně s velkou přesností vypočítal reaktanci vedení místa vzniku poruchy od napájení rozvodny.

Tabulka 4.2 Vypočtené reaktance vedení pro navrženou soustavu

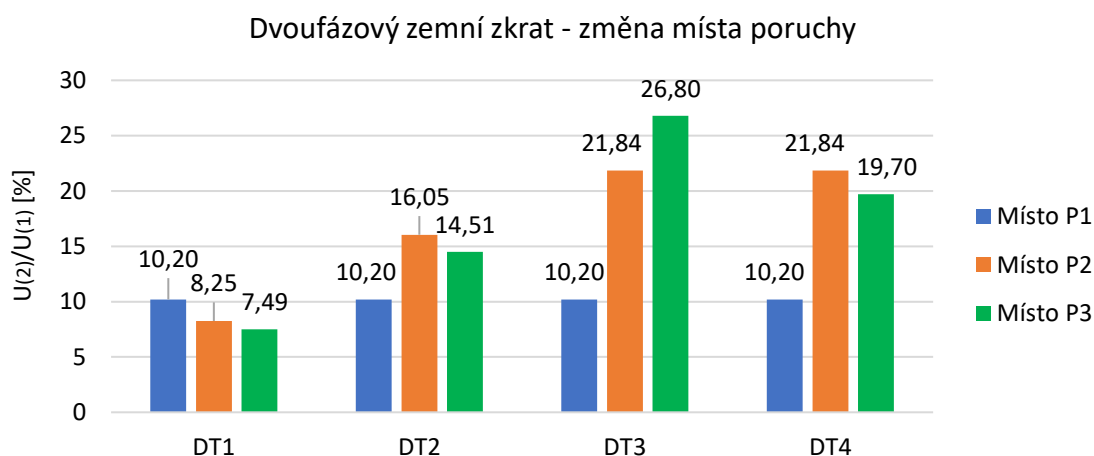
Typ poruchy	Místo poruchy	X_{vyp} [Ω]	X_{skut} [Ω]
Dvojitě ZS	P1 (L1-G) + P2 (L2-G)	5,0509	2,16; 6,48
	P1 (L1-G) + P3 (L3-G)	6,1445	2,16; 8,64
	P2 (L1-G) + P3 (L3-G)	7,492	6,48; 8,64
Dvoufázový zkrat	P1-P1 (L1-L2-G)	2,2311	2,16
	P2-P2 (L1-L2-G)	6,2359	6,48
	P3-P3 (L1-L3-G)	8,3524	8,64

4.7 Dvoufázový zemní zkrat

Součástí této DP je simulace dvoufázového zemního zkratu na modelu DS uvedené na obrázku 3.1. Stejně jako pro analýzu dvojitěho zemního spojení byly vykonány simulace dvoufázového zemního zkratu pro totožný výchozí stav uvedeným v kapitole 4, při kterém jsou délky vedení v jednotkách km a DT jsou v nezátíženém stavu. Pro vznik dvoufázového zemního zkratu bylo zvoleno místo P2, ve kterém bylo simulováno spojení fáze L1 a L2 se zemí s velikostí odporu poruchy 20 Ω .

Následovala analýza, při které byly modifikovány parametry této soustavy. Měnilo se místo vzniku dvoufázového zemního zkratu, velikost odporu poruchy, délka venkovního vedení a velikost zatížení na NN stranách DT.

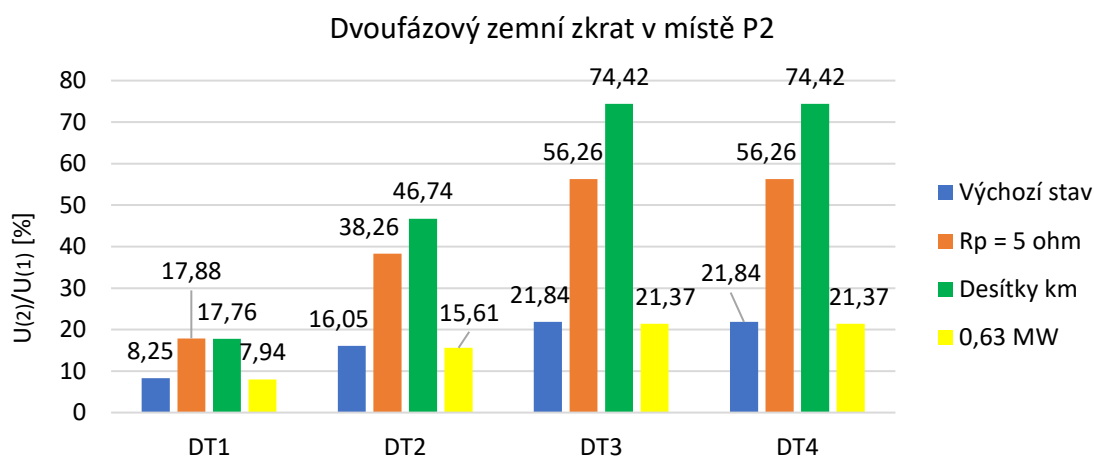
Z obrázku 4.7 lze vidět, že při vzniku dvoufázového zemního zkratu činitel nesymetrie má větší strmost nárůstu své hodnoty pro jednotlivé DT s rostoucí vzdáleností místa vzniku dvoufázového zemního zkratu od napájecí rozvodny. Protože porucha vznikla v místě P1, tedy v první odbočce venkovního vedení, mají všechny DT totožnou hodnotu činitele nesymetrie. V případě vzniku místa poruchy v místě P2 se za tímto místem nachází pouze transformátory DT3 a DT4. Na těchto DT je činitel nesymetrie konstantní, totožně jako v případě vzniku dvojitého ZS v místě P1 a P2.



Obrázek 4.7 Dvoufázový zkrat – změna místa poruchy

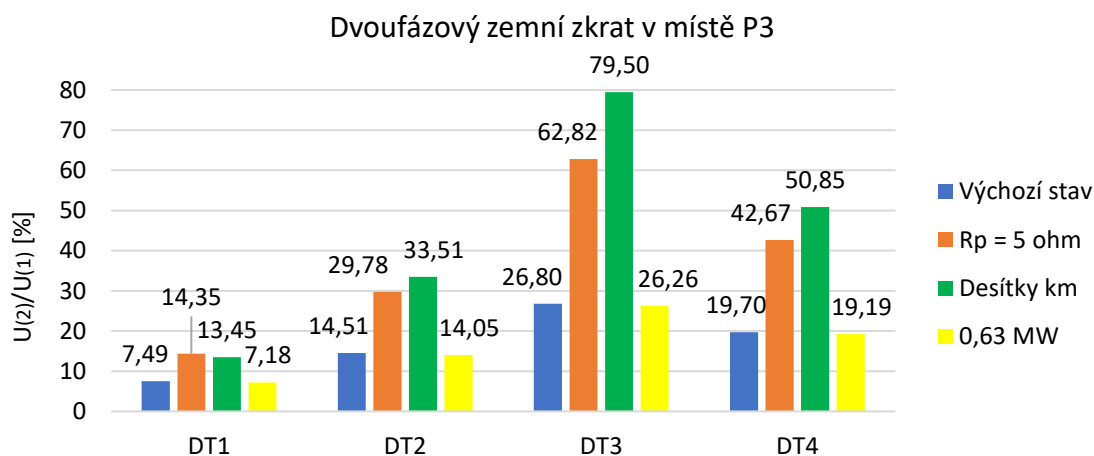
Následující obrázek 4.8 porovnává velikost činitele nesymetrie při změně velikosti odporu poruchy, délce vedení a velikosti zatížení DT, jestliže vznikne dvoufázový zemní zkrat v místě poruchy P2. Nutné je podotknout, že před místem vzniku poruchy se nachází distribuční transformátory DT1 a DT2. Jak lze očekávat, tak činitel nesymetrie těchto DT bude nižší hodnoty než pro ostatní DT. Transformátory za místem vzniku poruchy by naopak měly vykazovat konstantní hodnotu činitele nesymetrie.

Simulace pro výchozí stav byla provedena při odporu poruchy 20Ω , bez zatížení DT a délkách venkovního vedení v jednotkách km. Stejně jako u simulace dvojitého zemního spojení, tak i při vzniku dvoufázového zemního zkratu nemá velikost zatížení DT podstatný vliv (činitel nesymetrie má téměř stejnou velikost při maximálním zatížení všech DT i pro stav DT bez zatížení). Při snížení velikosti odporu poruchy na 5Ω dochází ke zvýšení činitele nesymetrie, stejně jako u dvojitého zemního spojení. Nejvyšší vliv má změna délky venkovního vedení. V tomto případě, pokud jsou dány délky vedení v desítkách km, vzroste několikanásobně hodnota činitele nesymetrie jednotlivých DT.



Obrázek 4.8 Dvoufázový zkrat v místě P2

V místě vzniku dvoufázového zemního zkratu P3, je situace odlišná. Za tímto místem poruchy se nachází pouze distribuční transformátor DT3, který je nejvíce ovlivněn, jak ukazuje obrázek 4.9. Činitel nesymetrie při maximálním zatížení DT je opět na téměř totožné hodnotě, jako ve stavu DT bez zatížení. Stejně jako v případě vzniku poruchy v místě P2, tak i v tomto případě snížení odporu poruchy způsobí zvýšení činitele nesymetrie DT. S rostoucí délkou vedení taktéž roste několikanásobně činitel nesymetrie.



Obrázek 4.9 Dvoufázový zkrat v místě P3

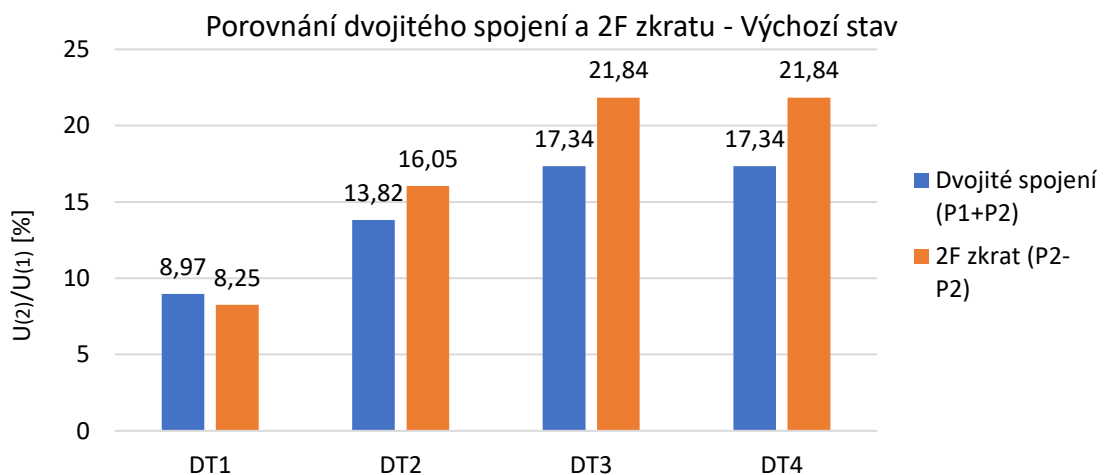
4.8 Porovnání dvojitého ZS a dvoufázového zemního zkratu

Dalším úkolem bylo zjistit, jak lze rozlišit dvojitě zemní spojení od dvoufázového zemního zkratu. Za tímto účelem byly porovnány naměřené hodnoty činitele nesymetrie při těchto kombinací poruch:

- Dvojitě zemní spojení v místě P1 a P2 a dvoufázový zemní zkrat v místě P2
- Dvojitě zemní spojení v místě P1 a P3 a dvoufázový zemní zkrat v místě P3
- Dvojitě zemní spojení v místě P2 a P3 a dvoufázový zemní zkrat v místě P3

Zároveň pro porovnání slouží simulace vzniku uvedených poruch při změně velikosti odporu poruchy, délky venkovního vedení a zatížení DT. Pro názornost bude v této kapitole uvedeno pouze porovnání dvojitě zemního spojení v místě P1 a P2 a dvojitě zemního zkratu v místě P2, kdy byla provedena simulace pro soustavu ve výchozím stavu dle obrázku 3.1. Tento výchozí stav je zároveň popsán v kapitole 4, kdy soustava disponuje délkami vedení v řádech jednotek km, DT jsou ve stavu bez zatížení a velikost odporu jednotlivých poruch odpovídá hodnotě 20Ω . Grafické průběhy zbylých dvou kombinací poruch jsou uvedeny v Příloha B -. Vývojová tendence činitele nesymetrie je pro všechny variace a pro všechny DT téměř totožná, liší se pouze ve velikosti hodnoty.

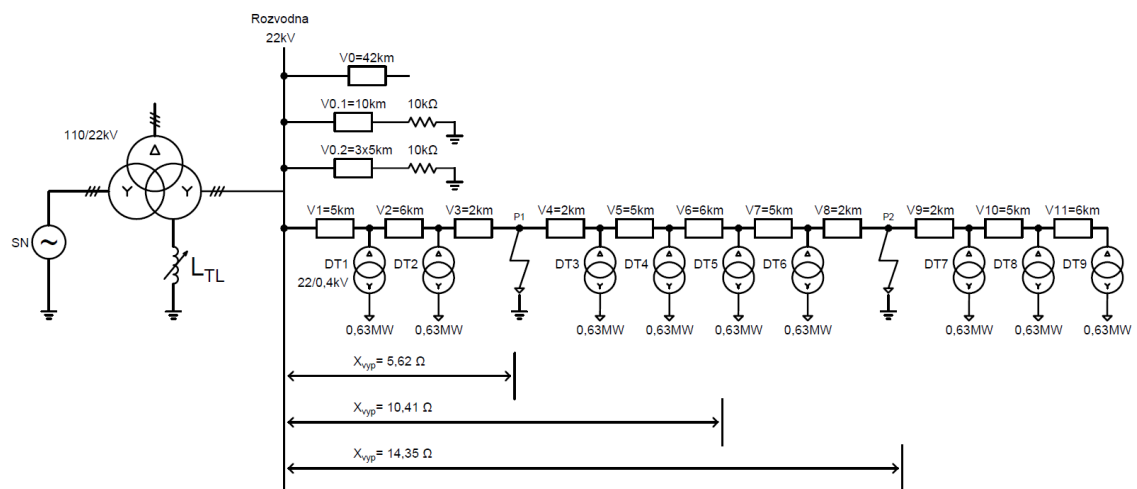
Na obrázku 4.10 si lze všimnout, že při vzniku dvoufázového zemního zkratu má činitel nesymetrie rychlejší strmost nárůstu své velikosti než při vzniku dvojitě zemního spojení. Toto je však způsobeno odlišnou hodnotou impedance poruchové smyčky. Ta je při vzniku dvojitě zemního spojení větší než při vzniku dvoufázového zemního zkratu. S vyšší impedancí smyčky klesá napětí na NN straně DT a tím i činitel nesymetrie.



Obrázek 4.10 Porovnání dvojitého ZS a dvoufázového zkratu – výchozí stav

4.9 Možnost využití nesymetrie napětí pro indikaci nesouměrné poruchy

Účelem této kapitoly bylo ověřit myšlenku z kapitoly 4, zda na sekundárních stranách DT, které se nachází za místem vzniku poruchy, je stejná hodnota činitele nesymetrie. Za tímto účelem bude využito schéma, které již bylo uvedeno v kapitole 4.6. Pro přehlednost je toto schéma znovu uvedeno na obrázku 4.11. Pomocí simulace v prostředí PSCAD byly zaznamenány hodnoty činitele nesymetrie na sekundární stranách všech DT. Byly provedeny tři simulace, a to při vzniku dvojitého zemního spojení v místě poruchy P1 a P2, dvojfázový zkrat v místě poruchy P1 a dvojfázový zkrat v místě poruchy P2.



Obrázek 4.11 Schéma pro ověření nesymetrie

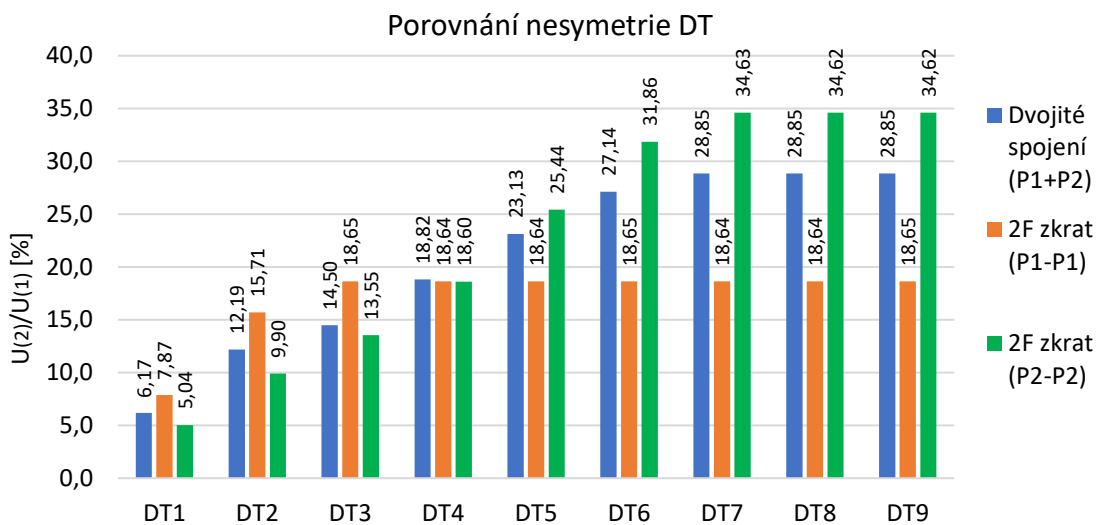
Jestliže vznikne dvojfázový zemní zkrat v místě P1, pak činitel nesymetrie všech DT nacházející se před místem této poruchy (DT1 a DT2) je rostoucí. Za místem této poruchy mají ostatní distribuční transformátory (DT3-DT9) konstantní hodnotu činitele nesymetrie. Totéž platí pro místo poruchy P3, kde činitel nesymetrie roste na distribučních transformátorech DT1-DT6, které se nachází před místem poruchy a zbylé distribuční transformátory DT7-DT9, nacházející se za místem poruchy, mají konstantní hodnotu činitele nesymetrie.

Při vzniku dvojitého zemního spojení v místě P1 a P2 je situace téměř totožná, jako při vzniku dvojitého zemního zkratu v místě poruchy P2. Jestliže vznikne první zemní spojení v místě P1 a druhé zemní spojení v místě P2, pak distribuční transformátory (DT7-DT9), nacházející se za místem druhé poruchy P2, mají konstantní hodnotu činitele nesymetrie. Hodnota činitele nesymetrie je naopak rostoucí pro distribuční transformátory DT1-DT6, které se nachází jak před, tak i za místem poruchy P1.

Rozdíl je pouze ve velikosti činitele nesymetrie všech DT. Při vzniku dvojitého zemního spojení mají činitelé nesymetrie (DT1-DT2) před místem poruchy P1 vyšší hodnotu než činitelé nesymetrie při dvoufázovém zkratu v místě poruchy P2.

Mezi místem poruchy P1 a P2 mají hodnoty činitelů nesymetrie (DT3-DT6) nižší strmost nárůstu a činitelé nesymetrie při dvojitém zemním zkratu mají vyšší strmost nárůstu své hodnoty. Za místem poruchy P2 pak činitelé nesymetrie (DT7-DT9) mají nižší a konstantní hodnoty.

Lze tedy konstatovat, že při vzniku souměrné i nesouměrné poruchy mají veškeré DT za místem dané poruchy konstantní hodnotu činitele nesymetrie. S využitím sledování nesymetrie na sekundárních stranách jednotlivých DT nelze jednoznačně rozeznat a určit typ poruchy. Touto metodou lze pouze určit nejbližší poruchu.



Obrázek 4.12 Porovnání nesymetrie distribučních transformátorů

4.9.1 Metoda lokalizace s využitím nesymetrie napětí

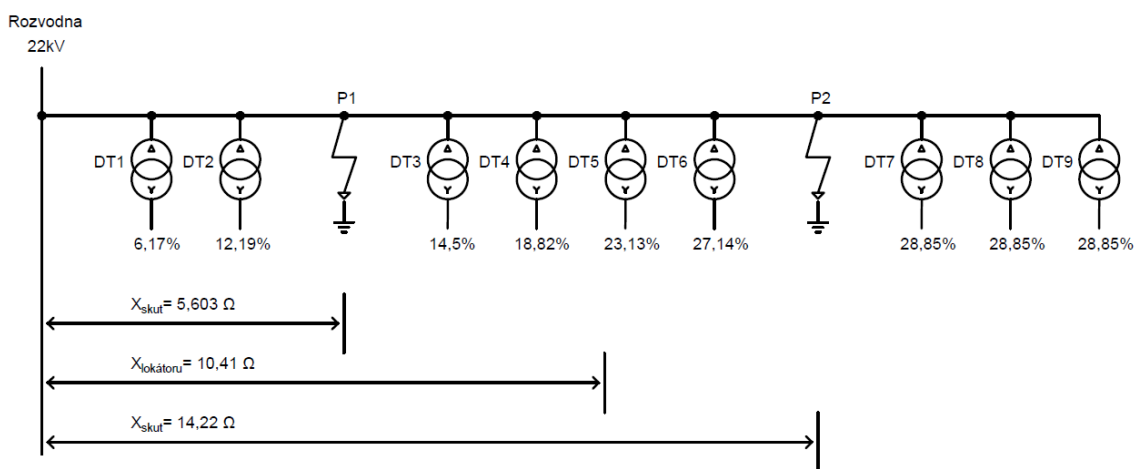
Poslední možností pro rozeznání typu vzniklé poruchy na venkovním vedení DS, je kombinace poskytnutého lokátoru a sledování nesymetrie na sekundárních stranách DT. Již bylo ověřeno v předchozí kapitole, kdy se sledovala nesymetrie jednotlivých DT, že při vzniku poruchy jsou konstantní hodnoty nesymetrie na všech DT nacházející se za místem vzniku nejbližší poruchy. Tento závěr však platí zejména při vzniku dvoufázového zemního zkratu. Při vzniku dvojitého zemního spojení se docílí pouze toho, že se určí místo vzniku nejbližší poruchy a místo poruchy blíže k napájecí rozvodně nelze jednoznačně určit. V této kapitole bude ověřeno, zda sledováním nesymetrie DT a využitím lokátoru lze jednoznačně určit typ vzniklé poruchy. V kapitole 4.6 byly pomocí lokátoru vypočteny hodnoty reaktance vedení od napájecí rozvodny do místa poruchy. Pro přehlednost těchto hodnot je zde znovu uvedena tabulka 4.3 s vypočtenými a skutečnými hodnotami reaktancí vedení.

Tabulka 4.3 Hodnoty reaktance vedení pomocí lokátoru

Typ poruchy	Místo poruchy	$X_{vyp} [\Omega]$	$X_{skut} [\Omega]$
Dvojitě ZS	P1 (L1-G) + P2 (L2-G)	10,41	5,603; 14,22
Dvoufázový zkrat	P1 (L1-L2-G)	5,62	5,603
	P2 (L1-L2-G)	14,35	14,22

Na obrázku 4.11 jsou uvedeny jednotlivé vypočtené hodnoty reaktancí vedení, které udávají místo vzniku poruchy. Jestliže se tyto reaktance porovnají s grafickým průběhem nesymetrie na obrázku 4.12, lze díky tomu do jisté míry rozeznat vznik souměrné a nesouměrné poruchy. S velkou přesností nám lokátor určil místo vzniku dvoufázového zemního zkratu jak v místě P1, tak i v místě P2. Za místem poruchy P1 se nachází DT3-DT9. Hodnoty nesymetrie těchto DT jsou od místa P1 konstantní a lze tedy říci, že se jedná o souměrnou poruchu. Totéž platí pro DT7-DT9, nacházející se za místem poruchy P2. Tyto DT mají taktéž konstantní hodnotu nesymetrie za daným místem poruchy a jedná se tedy rovněž o souměrnou poruchu.

Při vzniku dvojitěho zemního spojení je situace odlišná. Na základě vypočtené reaktance vedení lokátorem, jejíž hodnota je 10,41 Ω , lokátor určil místo poruchy mezi DT4 a DT5. Hodnota nesymetrie DT1-DT4 by měla tedy na těchto DT narůstat a na DT5-DT9 by se měla hodnota nesymetrie ustálit na konstantní hodnotě. Hodnota nesymetrie je však konstantní až na DT7-DT9. Tato informace udává, že se jedná o nesouměrnou poruchu. Tuto situaci lze vidět na obrázku 4.13, kde jsou uvedeny skutečné reaktance vedení od napájecí rozvodny do míst vzniku poruchy P1 a P2, vypočtená hodnota reaktance vedení pomocí lokátoru umístěným v napájecí rozvodně a hodnoty činitelů nesymetrie na sekundárních stranách jednotlivých DT. Lze tedy konstatovat, že sledováním hodnoty nesymetrie v kombinaci s lokátorem lze rozlišit, zda se jedná o souměrnou nebo nesouměrnou poruchu.



Obrázek 4.13 Reaktance vedení a nesymetrie při dvojitěm zemním spojení

5. ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce je řešena problematika vlivu dvojitého zemního spojení na napěťové poměry v kompenzované síti. V úvodu práce bylo popsáno nesoumírné dvojitě zemní spojení a jeho možné typy, které se mohou vyskytovat právě v kompenzovaných distribučních soustavách. Za účelem analýzy napěťových poměrů v jednoduché distribuční soustavě, je na navržené jednoduché DS uskutečněna simulace dvojitého zemního spojení, při které se zaznamenaly napětí sousledné a zpětné složkové soustavy. Aby bylo možné porovnat získané hodnoty pomocí simulace, byla provedena náhrada nesouměrného dvojitého zemního spojení souměrnými složkami dle [7], [8] a [11]. Náhrada dvojitého zemního spojení symetrickými složkami zahrnuje návrh náhradního schématu složkových soustav, který je uveden na obrázku 2.3.2.1 S využitím programu MATLAB byly vypočteny hodnoty sousledné a zpětné složky napětí v místech vzniku poruchy dané soustavy, ze kterých byl určen činitel nesymetrie a následně byl porovnán s činitelem nesymetrie získaným pomocí simulace. V porovnání jsou vypočtené hodnoty s hodnotami simulace téměř totožné a jsou uvedeny v tabulce 2.1. Metoda souměrných složek byla tedy ověřena.

Dále se práce zabývá vlivem dvojitého zemního spojení na napěťové poměry na NN stranách distribučních transformátorů a na kterém parametru soustavy jsou tato napětí nejvíce závislá. Za tímto účelem byl proveden značný počet simulací na navržené DS, uvedené na obrázku 3.1, při kterých byly zkoumány činitelé nesymetrie jednotlivých DT. Analyzován byl zejména vliv změny velikosti odporu zemní poruchy, změny délky venkovního vedení a změny zatížení na sekundární straně DT. Z analýzy vyplývá, že podstatný vliv na velikost činitele nesymetrie má délka venkovního vedení a velikost vzniklé poruchy. Čím delší je venkovní vedení, tím roste velikost činitele nesymetrie. Naopak čím větší je odpor poruchy, tím má činitel nesymetrie nižší hodnotu na jednotlivých DT.

Vzhledem k podobnému charakteru dvojitého zemního spojení a dvoufázového zemního zkratu, byly rovněž uskutečněny totožné simulace i pro vznik dvoufázového zemního zkratu. Na základě získaných hodnot činitelů nesymetrie jednotlivých DT vyplývá stejný závěr, jako v případě vzniku dvojitého zemního spojení. Nelze tedy prokazatelně určit, jestliže vznikne porucha na vedení DS, o jaký typ poruchy se jedná. Porovnání těchto výsledků je uvedeno v kapitole 4.8 a Příloha B -.

V rámci této práce byla dále ověřena teorie, zda na sekundárních stranách DT, které se nachází za místem vzniku poruchy, je konstantní hodnota činitele nesymetrie. Byla navržena DS, která disponuje devíti distribučními transformátory zapojenými v jednotlivých odbočkách venkovního vedení. Bylo ověřeno, že za místem vzniku dvoufázového zemního zkratu jsou činitelé nesymetrie jednotlivých DT konstantní. Činitelé nesymetrie DT nacházející se před místem této poruchy mají rostoucí hodnotu

až do daného místa poruchy. Při vzniku dvojitého zemního spojení mají činitele nesymetrie konstantní hodnotu na DT nacházející se za místem vzdálenější poruchy. Na daných DT, nacházející se mezi oběma místy poruchy, je však činitel nesymetrie rostoucí. Při analýze velikosti činitele nesymetrie na NN straně DT připojených na venkovní vedení DS plyne závěr, že lze určit vždy místo nejbližší poruchy od napájecí rozvodny. Nelze však s jistotou určit, zda se jedná o dvojitě zemní spojení nebo o dvoufázový zemní zkrat.

Závěrem této práce byla možnost rozeznání typu poruchy s využitím poskytnutého lokátoru a naměřených hodnot činitelů nesymetrie jednotlivých DT. Na základě této kombinace, kdy lokátor vypočítá hodnotu reaktance vedení do místa poruchy a s naměřenými hodnotami činitele nesymetrie jednotlivých DT, lze určit, zda se jedná o nesoumísnou či soumísnou poruchu.

LITERATURA

- [1] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, et al. Provoz distribučních soustav [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2022-10-17]. ISBN 978-80-01-04935-8. Dostupné z: <https://docplayer.cz/5613732-Provoz-distribu-nich-soustav-petr-toman-ji-i-drapela-stanislav-misak-jaroslava-orsagova-mar-n-paar-david-topolanek-a-kol.html>
- [2] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. Rozvodná zařízení [online]. VUT, 2015 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16989703-Rozvodna-zarizeni-autor-textu-ing-jaroslava-orsagova.html>
- [3] Zemní spojení v trojfázových soustavách [online]. [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [4] HODINKA, Miloslav. Přechodné jevy v elektrizačních soustavách. 2 nezměněné. VUT Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1985.
- [5] MARX, Stephen a Dean BENDER. An Introduction to Symmetrical Components, System Modeling and Fault Calculation [online]. Washington: Bonneville Power Administration, 2013 [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: https://na.eventscloud.com/file_uploads/a4f0ea9ba5ebe8baf31cba17ff378633_SymmetricalComponents_2013.pdf
- [6] PAUZA, Josef. Zkratky v elektrických rozvodech. Praha: SNTL, 1970, 248 s. DT 621.3.014.3.
- [7] ORSÁGOVÁ, Jaroslava, David TOPOLÁNEK, Petr TOMAN a Vojtěch WASSERBAUER. Localization Method for the Resistive Earth Faults in Compensated Network Based on Simultaneous Earth Faults Evaluation [online]. 2014 [cit. 2022-11-13]. ISBN 978-1-84919-834-9. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6822898>
- [8] CLARKE, Edith. ET AL. Circuit Analysis Of A-C Power Systems [online]. 1. 1943, 543 s. [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.1252/page/n3/mode/2up>
- [9] ČSN EN 60909-3: Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách - Část 3: Proudění během dvou nesouměrných současných jednofázových zkratů a příspěvky zkratových proudů tekoucích zemí. Ed. 2. Praha: ÚJV Řež, 2010.
- [10] Power Systems Computer Aided Design: USER'S GUIDE [online]. Winnipeg, Manitoba, Canada R3P 1A3, 2018, 529 s. [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: https://www.pscad.com/knowledge-base/download/pscad_manual_v4_6.pdf
- [11] PNE 33 3070. KOMPENZACE KAPACITNÍCH ZEMNÍCH PROUDŮ V SÍTÍCH VYSOKÉHO NAPĚTÍ. VUT Brno, 2021.
- [12] KOUBA, Daniel. Analýza bezpečného provozu kompenzované sítě VN velkého rozsahu [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/w6sr53/>. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

ACR	Automatic circuit reclosers
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
DS	Distribuční síť
DT	Distribuční transformátor
EMTDC	Electromagnetic Transient including DC
ES	Elektrizační soustava
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
LV	Low voltage
MATLAB	Matrix Laboratory
NN	Nízké napětí
PNE	Podniková norma pro energetiku
PSCAD	Power System Computer Aided Design
SN	Síťový napáječ
SW	Software
VN	Vysoké napětí
VUT	Vysoké učení technické v Brně
ZS	Zemní spojení

Symboly:

\bar{a}	fázor natočení	(-)
C_{celk}	celková kapacita soustavy	(F)
d, e, f, g, h	zkoumané vzdálenosti do místa vzniku poruchy	(m)
$\overline{E_{P1}^{(1)}}$	fázor předporuchového napětí souměrné soustavy v místě P1	(V)
$\overline{E_{P2}^{(1)}}$	fázor předporuchového napětí souměrné soustavy v místě P2	(V)
I''_{k3}	počáteční souměrný rázový zkratový proud	(A)
$\overline{I_{L1}}, \overline{I_{L2}}, \overline{I_{L3}}$	fázory fázových proudů	(A)
$\overline{I_{P1}^{(1)}}$	proud sousledné složkové soustavy v místě P1	(A)
$\overline{I_{P1}^{(2)}}$	proud zpětné složkové soustavy v místě P1	(A)
$\overline{I_{P1}^{(0)}}$	proud netočivé složkové soustavy v místě P1	(A)
$\overline{I_{P2}^{(1)}}$	proud sousledné složkové soustavy v místě P2	(A)

$\overline{I_{P2}^{(2)}}$	proud zpětné složkové soustavy v místě P2	(A)
$\overline{I_{P2}^{(0)}}$	proud netočivé složkové soustavy v místě P2	(A)
$\overline{I_X^{(1)}}$	vstupní proud sousledného složkového dvojbranu	(A)
$\overline{I_X^{(2)}}$	vstupní proud zpětného složkového dvojbranu	(A)
$\overline{I_X^{(0)}}$	vstupní proud netočivého složkového dvojbranu	(A)
$\overline{I_Y^{(1)}}$	výstupní proud sousledného složkového dvojbranu	(A)
$\overline{I_Y^{(2)}}$	výstupní proud zpětného složkového dvojbranu	(A)
$\overline{I_Y^{(0)}}$	výstupní proud netočivého složkového dvojbranu	(A)
L_{SN}	indukčnost síťového napáječe	(H)
L_{TL}	indukčnost zhášecí tlumivky	(H)
l_{V1}	délka venkovního vedení V1	(km)
l_{V2}	délka venkovního vedení V2	(km)
$\overline{n_{P1}^{(1)}}$	převod oddělovacích transformátorů sousledné složkové soustavy v místě P1	(-)
$\overline{n_{P1}^{(2)}}$	převod oddělovacích transformátorů sousledné složkové soustavy v místě P1	(-)
$\overline{n_{P1}^{(0)}}$	převod oddělovacích transformátorů sousledné složkové soustavy v místě P1	(-)
$\overline{n_{P2}^{(1)}}$	převod oddělovacích transformátorů sousledné složkové soustavy v místě P2	(-)
$\overline{n_{P2}^{(2)}}$	převod oddělovacích transformátorů sousledné složkové soustavy v místě P2	(-)
$\overline{n_{P2}^{(0)}}$	převod oddělovacích transformátorů sousledné složkové soustavy v místě P2	(-)
r	svodová reaktance transformátoru	(-)
R_k	rezistance vedení na kilometr délky	($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
R_{P1}	činný odpor poruchy v místě P1	(Ω)
R_{P2}	činný odpor poruchy v místě P2	(Ω)
R_{SN}	činný odpor síťového napáječe	(Ω)
S_{nT}	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	(VA)
$U^{(1)}$	sousledná složka napětí	(V)
$U^{(2)}$	zpětná složka napětí	(V)
$\overline{U_{L1}}, \overline{U_{L2}}, \overline{U_{L3}}$	fázory fázových napětí	(V)
$\overline{U_{P1}^{(1)}}$	sousledná složka napětí v místě P1	(V)

$\overline{U_{P1}^{(2)}}$	netočivá složka napětí v místě P1	(V)
$\overline{U_{P1}^{(1)}}$	napětí sousledné složkové soustavy v místě P1	(V)
$\overline{U_{P1}^{(2)}}$	napětí zpětné složkové soustavy v místě P1	(V)
$\overline{U_{P1}^{(0)}}$	napětí netočivé složkové soustavy v místě P1	(V)
$\overline{U_{P2}^{(1)}}$	sousledná složka napětí v místě P2	(V)
$\overline{U_{P2}^{(2)}}$	netočivá složka napětí v místě P2	(V)
$\overline{U_{P2}^{(1)}}$	napětí sousledné složkové soustavy v místě P2	(V)
$\overline{U_{P2}^{(2)}}$	napětí zpětné složkové soustavy v místě P2	(V)
$\overline{U_{P2}^{(0)}}$	napětí netočivé složkové soustavy v místě P2	(V)
$\overline{U_{TL}}$	fázor napětí na tlumivce	(V)
$\overline{U_X^{(1)}}$	vstupní napětí sousledného složkového dvojbranu	(V)
$\overline{U_X^{(2)}}$	vstupní napětí zpětného složkového dvojbranu	(V)
$\overline{U_X^{(0)}}$	vstupní napětí netočivého složkového dvojbranu	(V)
$\overline{U_Y^{(1)}}$	výstupní napětí sousledného složkového dvojbranu	(V)
$\overline{U_Y^{(2)}}$	výstupní napětí zpětného složkového dvojbranu	(V)
$\overline{U_Y^{(0)}}$	výstupní napětí netočivého složkového dvojbranu	(V)
X_C	kapacitní reaktance vedení	(kΩ.km)
X_L	reaktance vedení na kilometr délky	(Ω.km ⁻¹)
X_{skut}	skutečná reaktance vedení	(Ω)
X_{vyp}	vypočtená reaktance vedení	(Ω)
$\overline{Z_{P1}}$	ekvivalentní impedance od SN do místa P1	(Ω)
$\overline{Z_{P1}^{(1)}}$	impedance sousledné složkové soustavy v místě P1	(Ω)
$\overline{Z_{P1}^{(2)}}$	impedance zpětné složkové soustavy v místě P1	(Ω)
$\overline{Z_{P1}^{(0)}}$	impedance netočivé složkové soustavy v místě P1	(Ω)
$\overline{Z_{P1P2}}, \overline{Z_{P2P1}}$	prvky impedanční matice	(Ω)
$\overline{Z_{P1P2}^{(1)}}, \overline{Z_{P2P1}^{(1)}}$	prvek sousledné složkové impedanční matice	(Ω)
$\overline{Z_{P1P2}^{(2)}}, \overline{Z_{P2P1}^{(2)}}$	prvek netočivé složkové impedanční matice	(Ω)
$\overline{Z_{P1P2}^{(0)}}, \overline{Z_{P2P1}^{(0)}}$	prvek zpětné složkové impedanční matice	(Ω)
$\overline{Z_{P2}}$	ekvivalentní impedance od SN do místa P2	(Ω)
$\overline{Z_{P2}^{(1)}}$	impedance sousledné složkové soustavy v místě P2	(Ω)
$\overline{Z_{P2}^{(2)}}$	impedance zpětné složkové soustavy v místě P2	(Ω)

$\overline{Z_{P2}^{(0)}}$	impedance netočivé složkové soustavy v místě P2	(Ω)
$\overline{Z_{SN}}$	fázor impedance síťového napáječe	(Ω)
$\overline{Z_{SN}^{(1)}}$	impedance sousledné složkové soustavy síťového napáječe	(Ω)
$\overline{Z_{SN}^{(2)}}$	impedance zpětné složkové soustavy síťového napáječe	(Ω)
$\overline{Z_T^{(1)}}$	impedance sousledné složkové soustavy transformátoru	(Ω)
$\overline{Z_T^{(2)}}$	impedance zpětné složkové soustavy transformátoru	(Ω)
$\overline{Z_{TL}}$	fázor impedance tlumivky	(Ω)
$\overline{Z_V}$	fázor impedance vedení	(Ω)
$\overline{Z_V}$	fázor impedance transformátoru	(Ω)
$\overline{Z_{V1}^{(1)}}$	impedance sousledné složkové soustavy vedení V1	(Ω)
$\overline{Z_{V1}^{(2)}}$	impedance zpětné složkové soustavy vedení V1	(Ω)
$\overline{Z_{V1}^{(0)}}$	impedance netočivé složkové soustavy vedení V1	(Ω)
$\overline{Z_{V2}^{(1)}}$	impedance sousledné složkové soustavy vedení V2	(Ω)
$\overline{Z_{V2}^{(2)}}$	impedance zpětné složkové soustavy vedení V2	(Ω)
$\overline{Z_{V2}^{(0)}}$	impedance netočivé složkové soustavy vedení V2	(Ω)
ρ_U	činitel nesymetrie napětí	(%)

SEZNAM PŘÍLOH

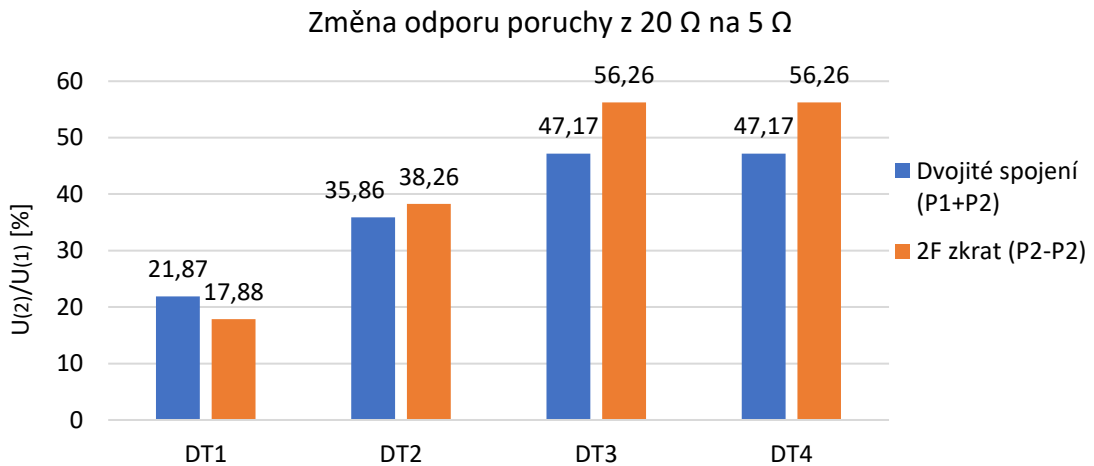
PŘÍLOHA A - VÝPOČET POMOCÍ SOUMĚRNÝCH SLOŽEK	46
PŘÍLOHA B - POROVNÁNÍ DVOJITÉHO ZEMNÍHO SPOJENÍ A DVOUFÁZOVÉHO ZEMNÍHO ZKRATU.....	47

Příloha A - Výpočet pomocí souměrných složek

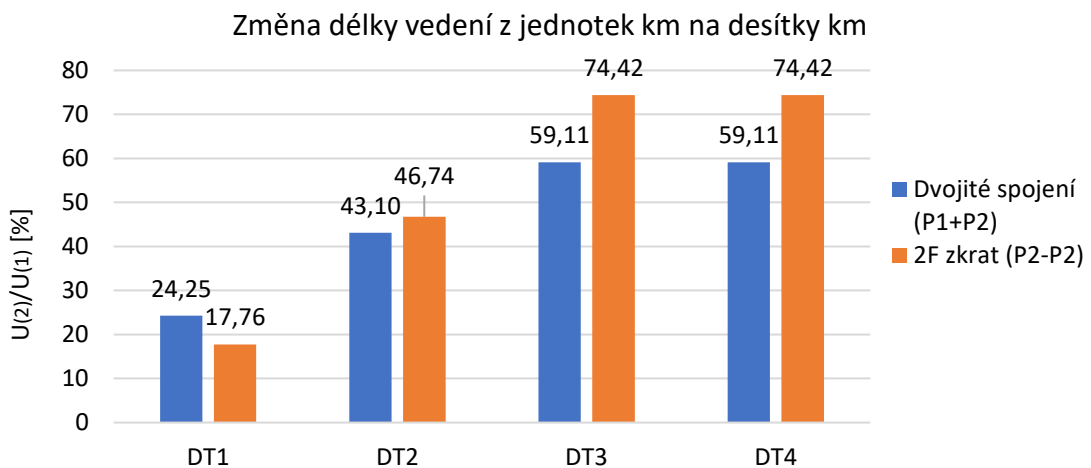
```
% dvojitě zemní spojení
j = sqrt(-1);
a = -0.5 + ((sqrt(3))/2)*j;
%odpor poruchy
Rp1 = 20;
Rp2 = Rp1;
% parametry vedení
lv1 = 50;
lv2 = 50;
%celková kapacita soustavy
Ccelk=((lv1+lv2)/(2*pi*50*320000));
% porucha ve fázi a, b
np1_1 = 1; % porucha ve fázi a
np2_1 = a*a; % porucha ve fázi b
np1_2 = 1; % porucha ve fázi a
np2_2 = a; % porucha ve fázi b
% impedance (sousedná složka = zpětná složka)
Zt = 1.2676*1j;
Zv1 = 0.432+0.431*1j;
Zv2 = Zv1;
Zsn = 0.635+6.35*1j; % pro Ik3=10kA
Zt1 = (1/(3*2*pi*50*Ccelk))*1j;
% nulová složka
Zv0 = 3*Zt1+Zv1*lv1;
% výpočet prvků složkových impedančních matic
Zp1p2_1 = Zt+Zsn+Zv1*lv1;
Zp2p1_1 = Zp1p2_1;
Zp1_1 = Zp1p2_1;
Zp2_1 = Zp2p1_1+Zv1*lv2;
Zp1p2_0 = Zv0;
Zp2p1_0 = Zp1p2_0;
Zp1_0 = 3*Rp1+Zv0;
Zp2_0 = 3*Rp2+Zv0+Zv1*lv2;
% definice složkových matic
Z1 = [Zp1_1 ((np1_1/np2_1)*Zp1p2_1);
((np2_1/np1_1)*Zp2p1_1) Zp2_1];
Z2 = [Zp1_1 ((np1_2/np2_2)*Zp1p2_1);
((np2_2/np1_2)*Zp2p1_1) Zp2_1];
Z0 = [Zp1_0 Zp1p2_0;
Zp2p1_0 Zp2_0];
% výpočet dvojitěho zemního spojení
E = [(np1_1*((22000/sqrt(3))+0j)); (np2_1*((22000/sqrt(3)) + 0j))];
Z = Z1+Z2+Z0;
IxIy = Z\E;
Uxy1 = E-Z1*IxIy;
Uxy2 = -Z2*IxIy;
Uxy0 = -Z0*IxIy;
Up1_1 = [Uxy1(1)*(1/np1_1); Uxy2(1)*(1/np1_2); Uxy0(1)];
[fi_Up1, rho_Up1] = cart2pol(real(Up1_1), imag(Up1_1))
Up2_1 = [Uxy1(2)*(1/np2_1); Uxy2(2)*(1/np2_2); Uxy0(2)];
[fi_Up2, rho_Up2] = cart2pol(real(Up2_1), imag(Up2_1))
```

Příloha B - Porovnání dvojitého zemního spojení a dvoufázového zemního zkratu

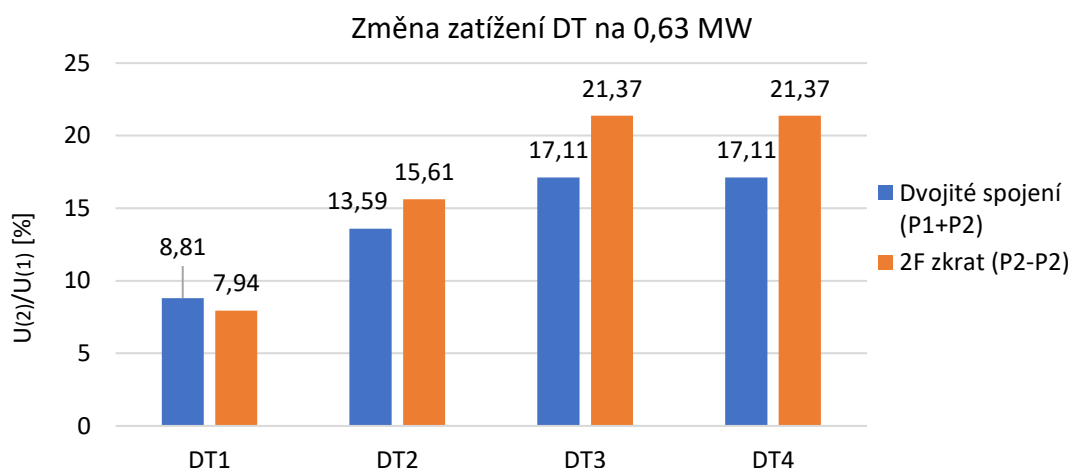
B.1 Zemní spojení P1 a P2 vs. zemní zkrat P2



Obrázek B.1 Porovnání zemního spojení P1 a P2 s dvoufázovým zkratem P2 při změně odporu poruchy

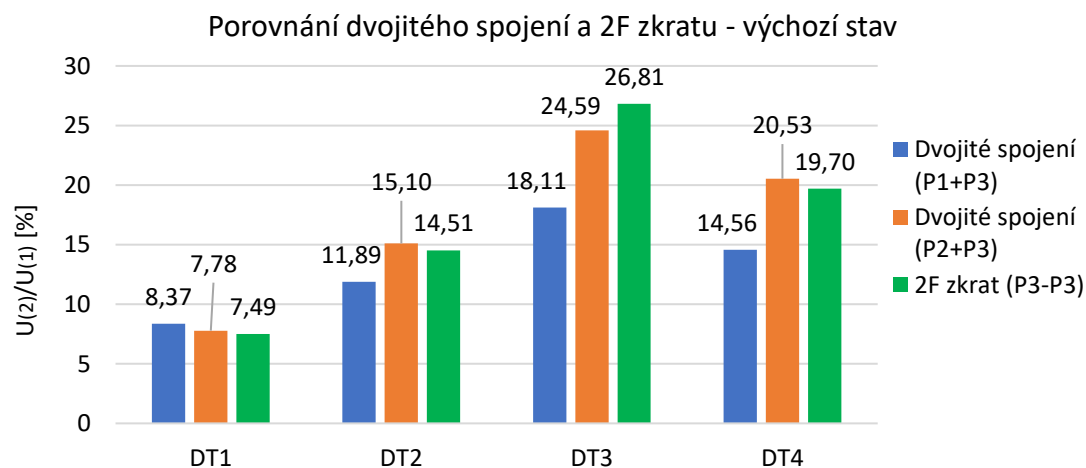


Obrázek B.2 Porovnání zemního spojení P1 a P2 s dvoufázovým zkratem P2 při změně délky vedení

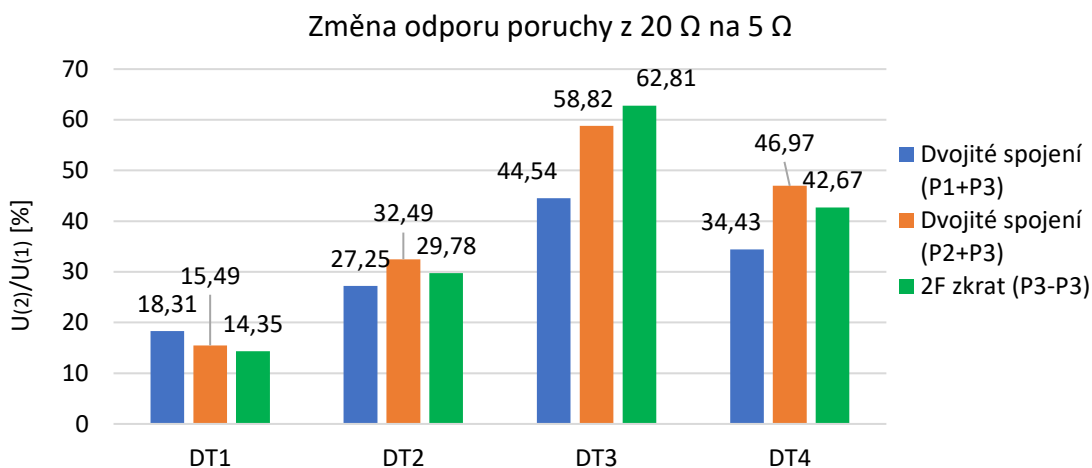


Obrázek B.3 Porovnání zemního spojení P1 a P2 s dvoufázovým zkratem P2 při změně velikosti zatížení DT

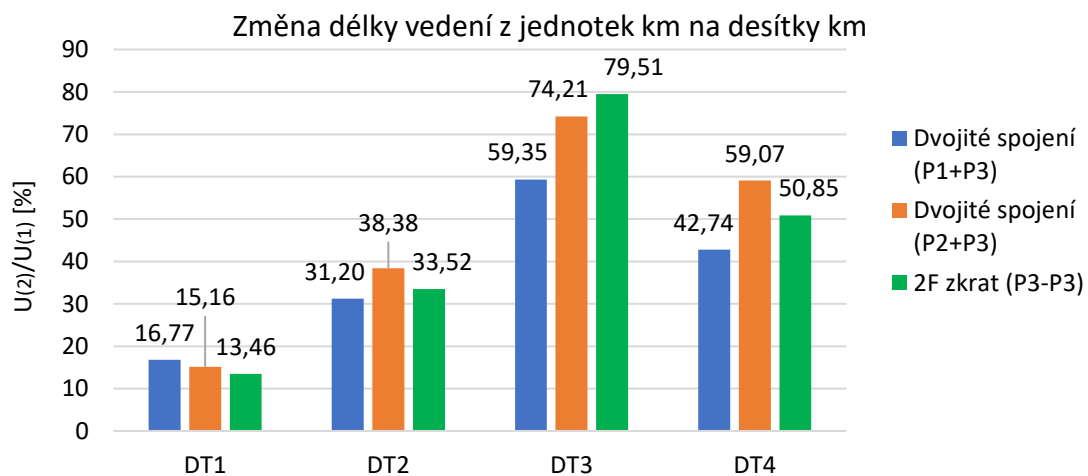
B.2 Zemní spojení P1 a P3, zemní spojení P2 a P3, zemní zkrat P3



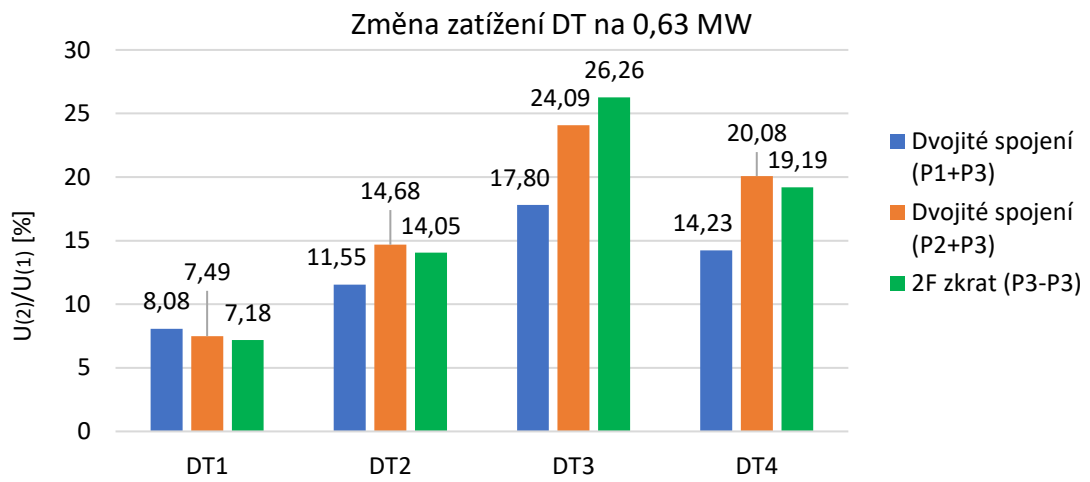
Obrázek B.4 Porovnání zemního spojení P1-P2 a P2-P3 s dvoufázovým zkratem P2 pro výchozí stav



Obrázek B.5 Porovnání zemního spojení P1-P2 a P2-P3 s dvoufázovým zkratem P2 při změně odporu poruchy



Obrázek B.6 Porovnání zemního spojení P1-P2 a P2-P3 s dvoufázovým zkratem P2 při změně odporu poruchy



Obrázek B.7 Porovnání zemního spojení P1-P2 a P2-P3 s dvoufázovým zkratem P2 při změně odporu poruchy