



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

LOKALIZACE JEDNOSTRANNĚ NAPÁJENÝCH ZKRATŮ NA VEDENÍ VVN

LOCALIZATION OF SHORT-CIRCUITS ON SINGLE SIDE SUPPLIED HV LINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Zíka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. David Topolánek, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Jakub Zíka

ID: 230451

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Lokalizace jednostranně napájených zkratů na vedení VVN

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis problematiky lokalizace jednostranně napájených 1f, 2f a 3f zkratů na vedení VVN
2. Rešerše a výběr vhodného postupu výpočtu vzdálenosti poruchy, definování vzorců pro jednotlivé impedanční smyčky
3. Implementace vybraného postupu pro doměření vzdálenosti 1f, 2f a 3f zkratu
4. Možnosti zpřesnění vyměřené vzdálenosti v případě 2f a 3f zkratu, omezení negativního vlivu nesymetrického odporu poruchy
5. Ověření funkce výpočtu vzdálenosti u navrženého řešení s využitím simulovaných a/nebo reálných poruchových záznamů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 29.5.2023

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

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Tato bakalářská práce se zabývá lokalizací jednostranně napájených zkratů na vedení VVN. První část bakalářské práce se zabývá rešerší problematiky lokalizace jednostranně napájených 1f, 2f a 3f zkratů na vedení VVN. Dále jsou zde popsány jednotlivé druhy zkratů s vhodnými postupy výpočtu vzdálenosti poruchy a definicí vzorců pro jednotlivé impedanční smyčky. Druhá část bakalářské práce se zaměřila na implementaci těchto vzorců pro dopočítání vzdálenosti místa poruchy. Vstupní hodnoty napětí a proudů byly nasimulovány jednoduchým modelem soustavy v programu PSCAD. Následně byla provedena podrobnější citlivostní analýza jednotlivých druhů zkratů a případné zjištění, kdy jednotlivé metody výpočtu selhávají.

Klíčová slova

zkrat; lokalizace poruchy; stanovení poruchových smyček; výpočet reaktance poruchové smyčky; vliv nesymetrie odporů poruch

Abstract

This bachelor's thesis deals with the localization of unilaterally fed short circuits on high voltage lines. The first part of the bachelor's thesis deals with the research of the localization of unilaterally fed 1-Phase, 2-Phase and 3-Phase short circuits on the HV lines. Furthermore, individual types of short circuits are described here with suitable procedures for calculating the fault distance and definition of formulas for individual impedance loops. The second part of the bachelor's thesis focuses on the implementation of these formulas for calculating the distance to the fault location. The input values of voltages and currents were simulated by a simple system model in the PSCAD program. Subsequently, a more detailed sensitivity analysis of individual types of short-circuits was carried out and possible detection of when individual calculation methods fail.

Keywords

short-circuit; fault location; determination of fault loops; calculation of fault loop reactance; the effect of asymmetry of fault resistances

Bibliografická citace

ZÍKA, Jakub. *Lokalizace jednostranně napájených zkratů na vedení VVN* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151366>. Bakalářská 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: *Jakub Zíka*

VUT ID studenta: *230451*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2022/2023*

Téma závěrečné práce: *Lokalizace jednostranně napájených zkratů na vedení VVN*

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: 27. května 2023

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Davidu Topolánkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval své rodině za mentální podporu při studiu.

V Brně dne: 27. květen 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM TABULEK.....	12
ÚVOD	13
1. ÚVOD DO ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY.....	14
1.1 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA	14
1.2 TRANSFORMÁTOROVÁ KONCEPCE SÍTĚ VVN/VN	14
2. PORUCHOVÉ STAVY	17
2.1 ZKRATY	17
2.1.1 Příčiny vzniku zkratu.....	17
2.1.2 Časové průběhy zkratových proudů	18
2.1.3 Řešení nesouměrných zkratů.....	19
2.1.4 Poruchové smyčky jednotlivých druhů zkratů	19
2.1.5 Lokalizace zkratů na venkovním vedení 22 kV – mezifázový zkrat.....	20
2.1.6 Princip lokátoru poruchy v digitálních distančních ochranách.....	20
2.1.7 Lokalizace zemního spojení na venkovním vedení 22 kV	21
3. VYMĚŘENÍ VZDÁLENOSTI ZKRATU.....	22
3.1 JEDNOFÁZOVÝ ZEMNÍ ZKRAT	23
3.2 DVOUFÁZOVÝ ZKRAT	26
3.3 TROJFÁZOVÝ ZKRAT.....	28
4. NÁVRH VEDENÍ A VÝPOČET VZDÁLENOSTI ZKRATU.....	32
4.1 MODEL TESTOVACÍ SOUSTAVY.....	32
4.2 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – VŠECHNY DRUHY ZKRATŮ PŘI NULOVÝCH ODPORECH PORUCH	34
4.3 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – VŠECHNY DRUHY ZKRATŮ PŘI STEJNÝCH HODNOTÁCH ODPORŮ PORUCH A PŘI ZATÍŽENÍ 18,9 MW	36
4.4 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – PODROBNĚJŠÍ ANALÝZA JEDNOFÁZOVÉHO ZEMNÍHO ZKRATU – ROZDÍLNÁ ZATÍŽENÍ.....	37
4.5 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – NESYMETRIE ODPORŮ PORUCHY – 2F A 3F ZKRATY	41
5. SHRNTÍ POZNATKŮ ZE SIMULACE	44
5.1 VÝBĚR VHODNÝCH VZORCŮ PRO VÝPOČET REAKTANCE PORUCHOVÉ SMYČKY.....	44
5.2 NEJVĚTŠÍ ZPŮSOBENÉ CHYBY PŘI MODELACI VEDENÍ A JEJICH VÝPOČTU	44
6. ZÁVĚR.....	46
LITERATURA.....	47
SEZNAM PŘÍLOH.....	49

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
ES	Elektrizační soustava
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
DS	Distribuční soustava
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvlášť vysoké napětí
HV	High Voltage
1f	Jednofázový
2f	Dvoufázový
3f	Trojfázový

Symbols:

x	Číslo fáze	(-)
U_{Lx-Lx}	Sdružené napětí fáze $Lx-Lx$, kde $x \{1,2,3\}$	(V)
U_{Lx}	Fázové napětí fáze x , kde $x \{1,2,3\}$	(V)
U_{L1R}	Reálná složka napětí fáze L1	(V)
U_{L1X}	Imaginární složka napětí fáze L1	(V)
U_{EH}	Fiktivní napětí mezi zemnicí soustavou napájecí rozvodny a místem poruchy	(V)
U_{EHR}	Reálná složka fiktivního napětí mezi zemnicí soustavou napájecí rozvodny a místem poruchy	(V)
U_{EHX}	Imaginární složka fiktivního napětí mezi zemnicí soustavou napájecí rozvodny a místem poruchy	(V)
U_N	Napětí síťového napaječe	(V)
P_{Lx}	Činný výkon ve fázi Lx , kde $x \{1,2,3\}$	(W)
E_{Lx}	Elektromotorické napětí fáze, kde $x \{1,2,3\}$	(V)
I_{Lx}	Proud fázového vodiče, kde $x \{1,2,3\}$	(A)
I_{L1R}	Reálná složka proudu protékajícího fází L1	(A)
I_{L1X}	Imaginární složka proudu protékajícího fází L1	(A)
I_E	Zemní proud	(A)
Z_{Lx}	Impedance fázového vodiče Lx , kde $x \{1,2,3\}$	(Ω)
X_{Lx}	Reaktance fázového vodiče Lx , kde $x \{1,2,3\}$	(Ω)
X_{ksn}	Reaktance síťového napaječe	(Ω)
X_{nast}	Nastavená hodnota reaktance v simulaci	(Ω)

X_{vyp}	Vypočtená hodnota reaktance ze simulovaných poruchových záznamů	(Ω)
ΔX	Absolutní chyba vypočtené reaktance	(Ω)
X_E	Zemní reaktance	(Ω)
R_{ksn}	Odpor síťového napaječe	(Ω)
$R_{\text{fl}x}$	Odpor fázového vodiče Lx , kde $x \in \{1,2,3\}$	(Ω)
R_f	Odpor poruchy – zkratu	(Ω)
R_E	Zemní odpor	(Ω)
$R_{\text{fl}x}$	Odpor poruchy fázového vodiče Lx , kde $x \in \{1,2,3\}$	(Ω)
Z_{0L}	Netočivá složka impedance zkratového obvodu	(Ω)
Z_{1L}	Sousledná složka impedance zkratového obvodu	(Ω)
Δl_{zk}	Rozdíl mezi vzdáleností nastavenou v simulaci a vzdáleností vypočtenou	(km)
S_{nt}	Zdánlivý výkon napájecí transformátoru	(VA)
S_T	Jmenovitý činný výkon zatížení – čistě odporová zátěž	(W)
φ	Fázový úhel	($^\circ$)
S	Smyčka pro výpočet reaktance	(-)
k	Zemní poměr	(-)

Definice

Zemní spojení (earth fault, ground fault) – je porucha způsobená spojením vodiče jedné fáze se zemí nebo snížením jeho izolačního odporu vůči zemi pod stanovenou hodnotu v soustavách nepřímo uzemněných přes vysokou hodnotu impedance nebo izolovaných. Vlivem této poruchy vzniká zpravidla napětí mezi uzlem sítě a zemí vyšší než 33 % fázového provozního napětí [1].

Dvojitě zemní spojení (double earth fault) – dvě zemní spojení vzniklá na dvou různých místech jedné uzlové oblasti v rozdílných fázích. Dle terminologie ČSN EN 60909-3 „dva nesoumírné současné jednofázové zkraty“ [1].

Zkrat (short circuit) – 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 [2].

Izolovaná soustava (isolated network) – soustava vysokého napětí, ve které uzly transformátorů a generátorů nejsou úmyslně spojeny se zemí, s výjimkou vysokoimpedančních spojení pro účely signalizace, měření nebo ochrany [1].

Kompenzovaná soustava (resonant earthed network) – soustava vysokého napětí, u níž je zajištěna kompenzace zemního kapacitního proudu, přičemž je nulový bod sítě uzemněn přes vysokou impedanci, nejčastěji zhášecí tlumivku [1].

Odporově uzemněná soustava (resistor earthed network) – soustava s nulovým bodem sítě uzemněným přes uzlový odporník; zpravidla se jedná o nízkoodporově uzemněnou soustavu (proudové poměry při jednopólové poruše se blíží jednofázovému zkratu), avšak se lze setkat i s vysokoodporově uzemněnou soustavou (jednopólová porucha má charakter zemního spojení) [1].

Uzlový odporník (Neutral Earthing Resistor – NER) – výkonový odpor umístěný mezi nulový bod sítě a zem za účelem omezení zkratového proudu; je definován jmenovitým proudem (nejčastěji 600 A nebo 1000 A) [1].

Zemní kapacitní proud (capacitive earth fault current) – je kapacitní složka poruchového proudu uzavírající se zemí přes vlastní kapacity vedení při uvažování nesymetrie napětí odpovídající kovovému zemnímu spojení [1].

Zhášecí tlumivka (arc-suppression coil) – je nejrozšířenější zhášecí zařízení stávající se z laditelné tlumivky a automatiky ladění [1].

Zhášecí zařízení (arc-suppression apparatus) – je zařízení určené pro redukci (kompenzaci) proudu zemního spojení v kompenzovaných soustavách a přispívající tak k jeho samozhášení [1].

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Transformátorová koncepce	14
1.2	Možnosti spojení sekundární strany transformátoru, a) soustava izolovaná, b) soustava nepřímo uzemněná přes zhášecí tlumivku, c) soustava nepřímo uzemněná přes uzlový odporník	16
2.1	Časový průběh zkratového proudu	18
2.2	Princip vyhledání poruchy na venkovním vedení 22 kV	20
3.1	Přesné určení místa zkratu	22
3.2	Jednofázový zemní zkrat – stanovení poruchových smyček	23
3.3	Příklad fázorového diagramu jednofázového zemního zkratu	24
3.4	Dvoufázový zkrat – stanovení poruchových smyček pro metodu výpočtu č. 1	26
3.5	Příklad fázorového diagramu dvoufázového zkratu [14]	27
3.6	Trojfázový zkrat – stanovení poruchových smyček	28
3.7	Příklad fázorového diagramu trojfázového zkratu	29
4.1	Náhradní schéma modelu vedení použité při měření v programu PSCAD	32

SEZNAM TABULEK

2.1	Procentuální pravděpodobnost výskytu zkratů na vedení	17
2.2	Stanovení poruchových smyček pro jednotlivé druhy zkratů	19
4.1	Sousledné a netočivé složky impedancí nastavené na PI člankách	33
4.2	Výsledky lokalizace pro dvoufázový a trojfázový zkrat – nulové zatížení a odpory poruch	34
4.3	Výsledky lokalizace pro jednofázový, dvoufázový a trojfázový zemní zkrat – nulové zatížení a odpor zkratu, změna zemního poměru k	35
4.4	Výsledky lokalizace pro dvoufázový a trojfázový zkrat - stejné hodnoty odporů poruch	36
4.5	Výsledky lokalizace pro jednofázový, dvoufázový a trojfázový zemní zkrat - stejné hodnoty odporů poruch, změna zemního poměru k	37
4.6	Výsledky lokalizace pro jednofázový zemní zkrat - podrobnější analýza při rozdílné hodnotě odporu fázového vodiče při nulovém zatížení, rozdílného odporu poruchy – zkratu, stejných vzdálenostech a rozdílného zemního poměru k	38
4.7	Výsledky lokalizace pro jednofázový zemní zkrat - podrobnější analýza při rozdílné hodnotě odporu fázového vodiče při zatížení 18,9 MW, rozdílného odporu poruchy – zkratu, stejných vzdálenostech a rozdílného zemního poměru k	39
4.8	Výsledky lokalizace pro jednofázový zemní zkrat - podrobnější analýza při rozdílné hodnotě odporu fázového vodiče při zatížení 18,9 MW, rozdílného odporu poruchy – zkratu, $l=30$ km a rozdílného zemního poměru k	40
4.9	Výsledky lokalizace pro dvoufázový a trojfázový zkrat - podrobnější analýza vlivu nesymetrických odporů fázových vodičů na přesnost výpočtu při stejném zemním poměru a zatížení 18,9 MW	41
4.10	Výsledky lokalizace pro dvoufázový zemní zkrat - podrobnější analýza vlivu nesymetrických odporů fázových vodičů na přesnost výpočtu při zemním poměru $k = 0,5$ a zatížení 18,9 MW	42
4.11	Výsledky lokalizace pro trojfázový zemní zkrat - podrobnější analýza vlivu nesymetrických odporů poruch – zkratu na přesnost výpočtu při zemním poměru $k = 0,5$ a zatížení 18,9 MW	43
6.1	Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů při nulových hodnotách odporů poruch a nulovém zatížení	50
6.2	Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů při stejných hodnotách odporů poruch	51
6.3	Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů – podrobnější analýza jednofázového zemního zkratu ve vzdálenosti $l = 10$ km a nulovém zatížení	52
6.4	Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů – podrobnější analýza jednofázového zemního zkratu ve vzdálenosti $l = 10$ km a zatížení 18,9 MW	53
6.5	Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů – podrobnější analýza jednofázového zemního zkratu ve vzdálenosti $l = 30$ km a zatížení 18,9 MW	54
6.6	Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů – nesymetrie odporů poruchy – 2f zkrat	55
6.7	Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů – nesymetrie odporů poruchy – 3f zkrat	56
6.8	Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů – nesymetrie odporů poruchy – 2f zemní zkrat.....	56
6.9	Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů – nesymetrie odporů fázových vodičů a rozdílného odporu poruchy – zkratu – 3f zemní zkrat	57

ÚVOD

Vznik zkratů je nedílnou součástí běžného provozu elektrického vedení bez ohledu na to, o jakou napěťovou hladinu vedení se jedná. Následkem působení tohoto přechodného jevu může dojít k vážnému ohrožení lidského zdraví, případně k narušení provozu a destrukci jednotlivých komponentů elektrického vedení. Proto pokud nastane tento poruchový stav, snažíme se danou poruchu co nejrychleji odstavit a bezpečně opravit.

Cílem této bakalářské práce je ověření různých metod výpočtu pro doměření vzdálenosti zkratu na jednostranně napájeném vedení VVN a případné doporučení užití vhodné metody výpočtu. Je zde pracováno se simulovanými poruchovými záznamy, ze kterých je následně vypočítána reaktance poruchové smyčky.

V této bakalářské práci lze nalézt 4 základní kapitoly, přičemž v první kapitole je popsána elektrizační soustava a transformátorová koncepce sítě VVN/VN, kde jsou blíže popsány způsoby uzemnění uzlu transformátoru jednotlivých soustav. Druhá kapitola se zabývá rešerší poruchových stavů, tedy zkratů, jejich vliv a případný moderní trend lokalizace, který se zde v České republice zatím nevyužívá. Třetí kapitola popisuje vyměření vzdálenosti zkratu a stanovení jednotlivých vzorců pro výpočet reaktance poruchové smyčky. Jsou zde popsány všechny možné typy zkratů, které zde mohou nastat v případě jednostranně napájeného vedení. Čtvrtá kapitola se zabývá citlivostní analýzou a modelací vedení v programu PSCAD. Jedná se o citlivostní analýzu s využitím simulovaných poruchových záznamů a ověření vzorců pro výpočet reaktance poruchové smyčky z předchozí kapitoly.

1. ÚVOD DO ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY

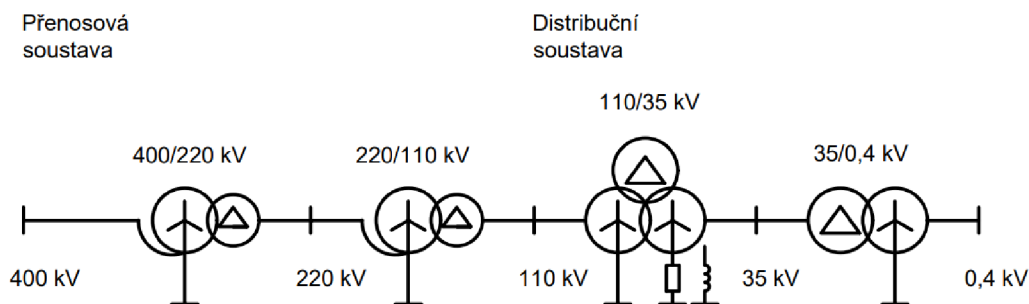
1.1 Distribuční soustava

Hlavním úkolem distribuční soustavy je propojit přenosovou soustavu s koncovými místy odběry elektrické energie. V případě distribuce elektřiny jsou postupně upravovány její parametry, hlavně napěťová úroveň, s cílem minimalizace ztrát a dodávky elektřiny v požadovaném množství a kvalitě. DS je tvořena jak venkovním, tak kabelovým vedením, kde záleží na napětí dané linky, podle kterého je zvoleno provedení [2] [4].

1.2 Transformátorová koncepce sítě VVN/VN

Tato práce se zabývá napěťovou hladinou VVN a VN. Napěťová hladina VN se provozuje jako neúčinně uzemněná soustava, zatímco VVN je provozováno jako účinně uzemněná soustava.

V této práci budou řešeny zkraty, které vznikly v účinně uzemněné soustavě, kde budou řešeny 1f, 2f a 3f zkraty. Případně zde budou řešeny zkraty, které vznikly v neúčinně uzemněné soustavě jako jsou 2f a 3f zkraty. Jednofázová porucha v neúčinně uzemněné soustavě zde řešena nebude, jelikož se jedná o zemní spojení. Na terciárním vinutí transformátoru VVN/VN je možné řešit 2f a 3f zkraty.



Obrázek 1.1 Transformátorová koncepce

Primární vinutí transformátorů VVN/VN je provozováno jako síť TT, která má jeden střed uzlu vinutí přímo uzemněný. Zatímco sekundární vinutí transformátoru je provozováno jako kompenzovaná síť IT nebo síť odporníková ITr [5]. Vinutí na sekundární straně transformátoru bývá zapojeno do hvězdy, případně jako neúčinně uzemněné přes zhašecí tlumivku nebo uzlový odporník v případě kabelového provedení sítě [6].

Výhodou transformátorů VVN/VN je regulace napětí pod zatížením. Na straně VVN je obsaženo 17 regulačních odboček po kroku 2 %, kdy je regulace provedena především na straně vyššího napětí transformátoru. Přepínač odboček nesmí přesáhnout více než 25 přepnutí za den, přičemž za přepínání odboček zodpovídá automatický hladinový regulátor napětí [6].

Nejčastěji používané zdánlivé výkony transformátorů ve vedení VVN/VN jsou: 16, 25, 40 a 63 MVA [7].

Způsoby uzemnění

Způsob uzemnění dané soustavy souvisí s bezpečností, dimenzováním, chráněním a nepřetržitostí dodávky elektrické energie. Ve stavu, kdy symetrická síť nevykazuje poruchový stav, nezáleží na způsobu uzemnění a neprojeví se na jejím provozu. Rozdíl nastane při poruše, kdy dojde ke spojení jedné fáze se zemí. Proto soustavu dělíme na účinně uzemněnou a neúčinně uzemněnou, případně izolovanou soustavu [8].

Pokud nastane spojení jedné fáze se zemí v účinně uzemněné síti, tak dojde k jednofázovému zkratu, a to vede k okamžitému odpojení tohoto vedení [8].

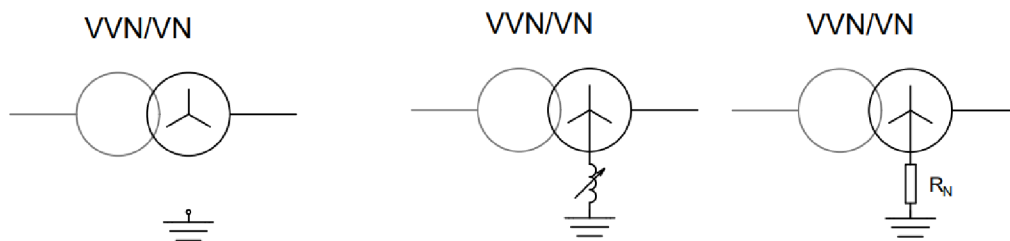
Pokud dojde ke spojení jedné fáze se zemí v síti neúčinně uzemněné, eventuálně izolované, tak mluvíme o zemním spojení. Poruchový proud procházející skrze tento typ poruchy nedosahuje tak vysoké hodnoty, a proto tuto síť lze provozovat určitou dobu bez okamžitého odpojení [8].

Účinně uzemněnou síť provozujeme u ZVN a VVN, tedy jedná se napětíovou hladinu 400 kV, 220 kV a 110 kV, případně u NN sítě 400 V [9].

Neúčinně uzemněnou síť provozujeme u VN – 10 kV, 22 kV a 35 kV [9]. Je zde potřeba rozlišovat, zdali je soustava uzemněna přes uzlový odporník nebo zhášecí tlumivku (Petersenova cívka).

Uzlový odporník – je použit u kabelového provedení sítě, a slouží k potlačení přepětí při zemních poruchách a k zaručení dostatečného proudu pro činnost ochran k rychlému vypnutí postiženého úseku sítě [10].

Zhášecí tlumivka – je použita u venkovního vedení a slouží ke kompenzaci kapacitních proudů při zemním spojení [10].



Obrázek 1.2 Možnosti spojení sekundární strany transformátoru, a) soustava izolovaná, b) soustava nepřímě uzemněná přes zhášecí tlumivku, c) soustava nepřímě uzemněná přes uzlový odporník

2. PORUCHOVÉ STAVY

2.1 Zkraty

Zkrat je poměrně častý jev, při kterém dojde k vzájemnému spojení dvou nebo více fází, případně spojení jedné fáze se zemí, které mají při normálním provozu různá napětí přes poměrně malý odpor nebo impedanci [2]. Zkrat je definován jako elektromagnetický přechodový děj, kdy dochází k poškození, eventuálně destrukci izolátorů a dielektrik, tepelnému poškození vodičů apod. Nedílnou součástí zkratů jsou dynamické síly, které způsobí mechanické poškození daného zařízení. Při zkratu dochází k průchodu zkratového proudu obvodem, kdy tento zkratový proud dosahuje několikanásobně vyšší hodnoty běžného nominálního provozního proudu. Díky průchodu zkratového proudu dojde k následnému odpojení zkratované části od zdroje. Zkraty mohou nastat díky mechanickému poškození izolace, špatnou manipulací na vedení, případně vlivem počasí – například: pád stromu na vedení VVN a následnému vzájemnému propojení dvou nebo více fází [2] [11].

Přirozeným vývojem a zvyšující se spotřebou elektrické energie dochází ke stálému zvětšování zkratových proudů ve všech člancích elektrického rozvodu. Tento problém způsobují stále se navyšující elektrické výkony v nových elektrárnách a stále se zvětšující rozsahy elektrických sítí všech napětí [2] [11].

Tabulka 2.1 Procentuální pravděpodobnost výskytu zkratů na vedení

Druh zkratu	Relativní pravděpodobnost výskytu zkratu [%]		
	vn	110 kV	220 kV
Jednofázový/zemní spojení	65	91	93,1
Dvoufázový zemní	20	3,8	5,4
Dvoufázový	10	4,8	0,6
Trojfázový	5	0,4	0,9

Tabulka je převzata z literatury dle [2].

V případě jednofázového zkratu na vedení VN v neúčinně uzemněné soustavě se jedná o zemní spojení.

2.1.1 Příčiny vzniku zkratu

Informace uvedené v následující kapitole byly převzaty z literatury [2].

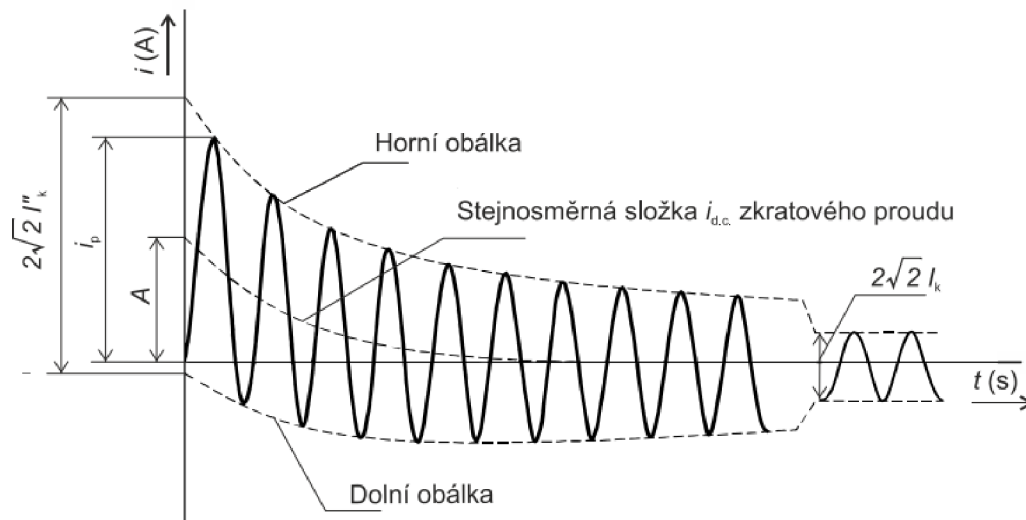
Zkrat vzniká mnoha způsoby, ale především vzniká díky nedokonalé izolaci, a to buď z výrobních důvodů nebo vlivem nedostatečné dimenzace při návrhu vedení nebo z dlouhodobého přetěžování izolace vlivem průchodu nadproudů vedením.

Nejčastějšími příčinami vzniku zkratů jsou:

- Přepětí – díky přepětí na vedení dojde k porušení izolace, to následně vede ke zkratu
- Cizí zásah – cizí zásah do vedení je způsoben člověkem – výkopové práce, kde dojde k poškození izolace, nebo přírodními vlivy – poškození izolace hlodavci
- Nedostatečná zkratová odolnost zařízení – především u zastaralých zařízení v soustavách s prudkým nárůstem zkratového proudu, kde díky částečnému poškození dochází k poruše
- Vlivem selhání lidského činitele – nesprávné manipulace pracovníku na elektrickém zařízení

2.1.2 Časové průběhy zkratových proudů

V elektrizační soustavě dochází při zkratu ke vzniku přechodného děje, a to v následku rychlé změny impedance, tudíž energie magnetického pole se nemění skokově, a proto vzniká neharmonický průběh. Největší zkratový proud se objeví v prvních okamžicích zkratu. Tento neharmonický průběh se skládá ze 4 složek a to: rázová složka, přechodná složka, ustálená složka a stejnosměrná složka [2].



Obrázek 2.1 Časový průběh zkratového proudu

Rázová (subtranzitní) složka $i_k''(t)$ – sinusový průběh, má frekvenci soustavy a amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T_k'' . Objevuje se na začátku zkratu a trvá řádově desítky sekund [2].

Přechodná (tranzitní) složka $i'_k(t)$ – sinusový průběh, má frekvenci soustavy a amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T'_k . Do řádově několika sekund tato složka vymizí [2].

Ustálená složka $i_k(t)$ – sinusový průběh, má frekvenci soustavy a stálou amplitudu [2].

Stejnoseměrná (aperiodická) složka $i_{d.c.}(t)$ – reprezentuje exponenciálně klesající stejnosměrný proud s časovou konstantou $T_{d.c.}$ [2].

2.1.3 Řešení nesouměrných zkratů

Nesouměrný zkrat je stav, kdy dojde k poruše jedné fáze nebo dvou fází, takže se neúčastní všechny fáze stejným podílem na konečné hodnotě zkratového proudu. Abychom vyřešili nesouměrné zkraty, tak lze využít rozklad proudů a napětí na souměrné složky. Hlavním cílem této metody je rozložit nesouměrný děj na několik souměrných dějů, které jsou následně podle zákona superpozice složeny do celkového děje [2].

2.1.4 Poruchové smyčky jednotlivých druhů zkratů

Tabulka je převzata z literatury viz [12].

Tabulka 2.2 Stanovení poruchových smyček pro jednotlivé druhy zkratů

Druh zkratu	Postižené fáze	Poruchové smyčky pro doměření vzdálenosti
Jednofázový zemní zkrat	L1-E L2-E L3-E	L1-E L2-E L3-E
Dvoufázový zkrat	L1-L2 L2-L3 L3-L1	L1-L2 L2-L3 L3-L1
Dvoufázový zemní zkrat	L1-L2-E L2-L3-E L3-L1-E	L1-E nebo L2-E nebo L1-L2 L2-E nebo L3-E nebo L2-L3 L3-E nebo L1-E nebo L3-L1
Trojfázový zkrat	L1-L2-L3	L1-L2 nebo L2-L3 nebo L3-L1
Trojfázový zemní zkrat	L1-L2-L3-E	L1-L2 nebo L2-L3 nebo L3-L1 L1-E nebo L2-E nebo L3-E

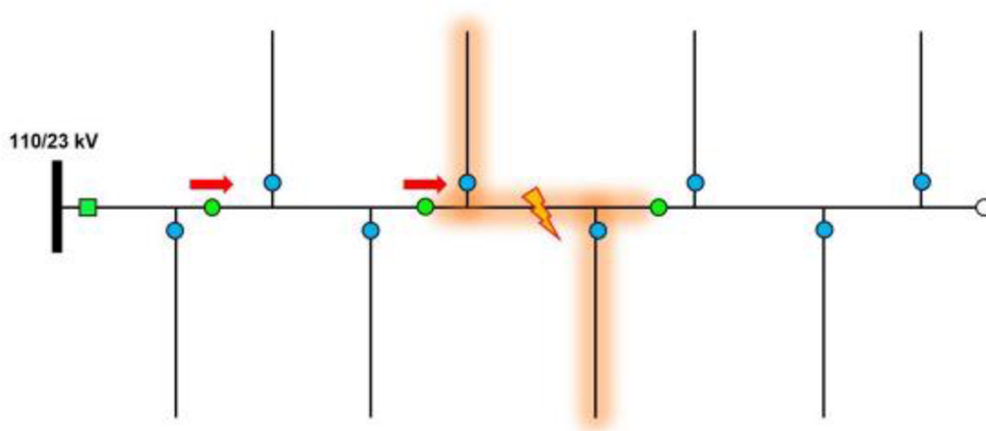
Primární snahou je vyhnout se při výpočtu reaktance poruchové smyčky využitím zemní smyčky, jelikož je zde při výpočtu zaveden zemní odpor a odpor fázové poruchy, který je neznámý.

2.1.5 Lokalizace zkratů na venkovním vedení 22 kV – mezifázový zkrat

Způsob vyhledání poruchy:

Tato problematika byla popsána v článku [13] a jedná se o **moderní trend** dohledávání poruchy na vedení. Problematika je vysvětlena v následujícím odstavci za použití obrázku 2.2. V České republice se tato metoda zatím nevyužívá.

Princip vyhledání poruchy je zobrazen na obrázku 2.2. V soustavě 22 kV se nachází tzv. „smart“ úsekové odpínače, které jsou ovládány pomocí dálkového ovládání a ochrany, které jsou na obrázku vyznačeny zelenými kroužky. Pokud dojde k poruše na tomto vedení, tak dojde k odpojení vedení výkonovým vypínačem pomocí nadproudové ochrany umístěné v rozvodně. Zároveň je tato porucha zaznamenána „smart“ úsekovými odpínači mezi napájecí rozvodnou a místem poruchy. Tato porucha je následně dálkově vypnuta dispečerem pomocí „smart“ úsekových odpínačů postiženého úseku sítě, a nakonec tak dojde k obnově dodávky elektrické energie zdravé části sítě. Poté využijeme funkci lokátoru poruch obsažených ve vývodových elektrických ochranách a dojde k doměření vzdálenosti poruchy.



Obrázek 2.2 Princip vyhledání poruchy na venkovním vedení 22 kV

Obrázek je převzat z literatury viz [13].

2.1.6 Princip lokátoru poruchy v digitálních distančních ochranách

Distanční ochrana funguje na principu výpočtu reaktance poruchové smyčky na vedení, tzn. vypočítá elektrickou vzdálenost místa poruchy od příslušné rozvodny. Tato vypočtená hodnota je následně zobrazena pomocí určitého systému dispečerovi [13]. Pro stanovení přesné vzdálenosti poruchy je potřeba zahrnout aktuální parametry vedení. Proto je důležité do výpočtu zařadit vliv paralelních vedení, vliv počasí a vliv prostředí

fází paralelního vedení apod. [2].

2.1.7 Lokalizace zemního spojení na venkovním vedení 22 kV

Způsob vyhledání poruchy

Dojde-li k zemnímu spojení na vedení 22 kV, tak je tato porucha signalizována zemní směrovou ochranou, která pracuje na wattmetrickém principu. Při zemním spojení lze provozovat vedení pod napětím, proto nedojde k zapůsobení výkonového vypínače [13].

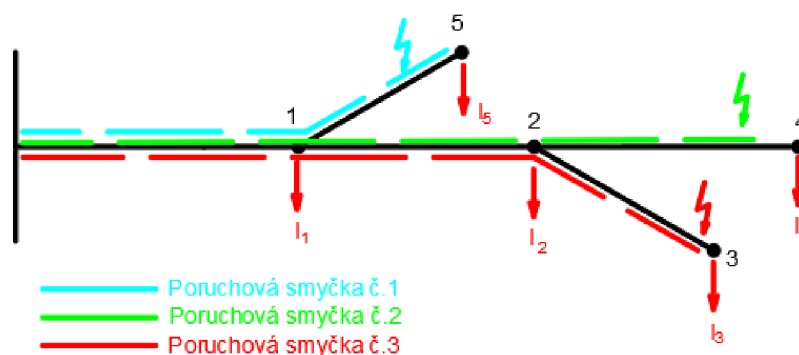
Informace o zemním spojení je také signalizována „smart“ úsekovými odpínači mezi místem poruchy a příslušnou napájecí rozvodnou. Následně dojde k dálkovému odpojení postiženého úseku sítě „smart“ úsekovým odpínačem a dispečer informuje pracovníky o zemním spojení, které je poté dohledáno ručním přístrojem, např. Elvac ELF7 [13].

3. VYMĚŘENÍ VZDÁLENOSTI ZKRATU

Hlavním cílem pro vyměření vzdálenosti zkratu je správné stanovení poruchových smyček, díky kterým lze následně stanovit vzorce pro výpočet reaktance linky X_L do poruchy. Tyto vzorce jsou dále popsány a odvozeny v následujících kapitolách. Díky této vypočtené hodnotě si při znalosti reaktance na kilometr vedení lze výpočtem určit vzdálenost poruchy l , avšak pouhým zjištěním délky l neznáme přesnou lokalizaci zkratu v případě rozvětveného vedení. U jednoduchého vedení tento problém neřešíme. V případě použití lokátoru známe vzdálenost zkratu, ale jelikož vedení je provozováno jako rozvětvené, tak může dojít k problému geografické lokalizace zkratu, tzn. že vzdálenost od napájecí rozvodny může vést do více míst. Tudíž je tedy potřeba zjistit v jaké části rozvětveného vedení se zkrat vyskytuje v případech, kdy jedna vzdálenost odpovídá několika bodům na postiženém vývodu, jak popisuje Obrázek 3.1. Vzdálenost zkratu je nám známa, ale zkrat se může vyskytovat v lince č.1, 2 nebo 3. Proto přesné vymezení místa zkratu lze zjistit pouhým odepínáním jednotlivých linek. Pokud se zkrat nachází v lince č.3, tak určení, zdali se v této poruchové smyčce zkrat nachází provedeme tím způsobem, že zkusíme odepnout linku č.1 a pokud porucha dále trvá, můžeme usoudit, že v lince č.1 se zkrat nevyskytuje. Z tohoto důvodu odepneme linku č.2, kde porucha opět přetrvává, tudíž z této zkoušky lze usoudit, že porucha se vyskytuje na lince č.3.

Dalším problémem vyměření přesné vzdálenosti zkratu způsobuje nehomogenita vedení, reaktance jednotlivých fází si nejsou nikdy rovny, a proto výpočet vzdálenosti nebude nikdy zcela přesný a bude zde zavedena chyba výpočtu vzdálenosti Δl .

V následujícím obrázku 3.1 jsou zakresleny tři poruchové smyčky, které odpovídají stejné impedanční vzdálenosti, ale nikoliv grafické, tedy porucha ve smyčce 1, 2 a 3 se nachází ve stejné vzdálenosti impedanční vzdálenosti a je nutné provést selekci skutečného místa poruchy např. postupným odpínáním části úseků vedení.

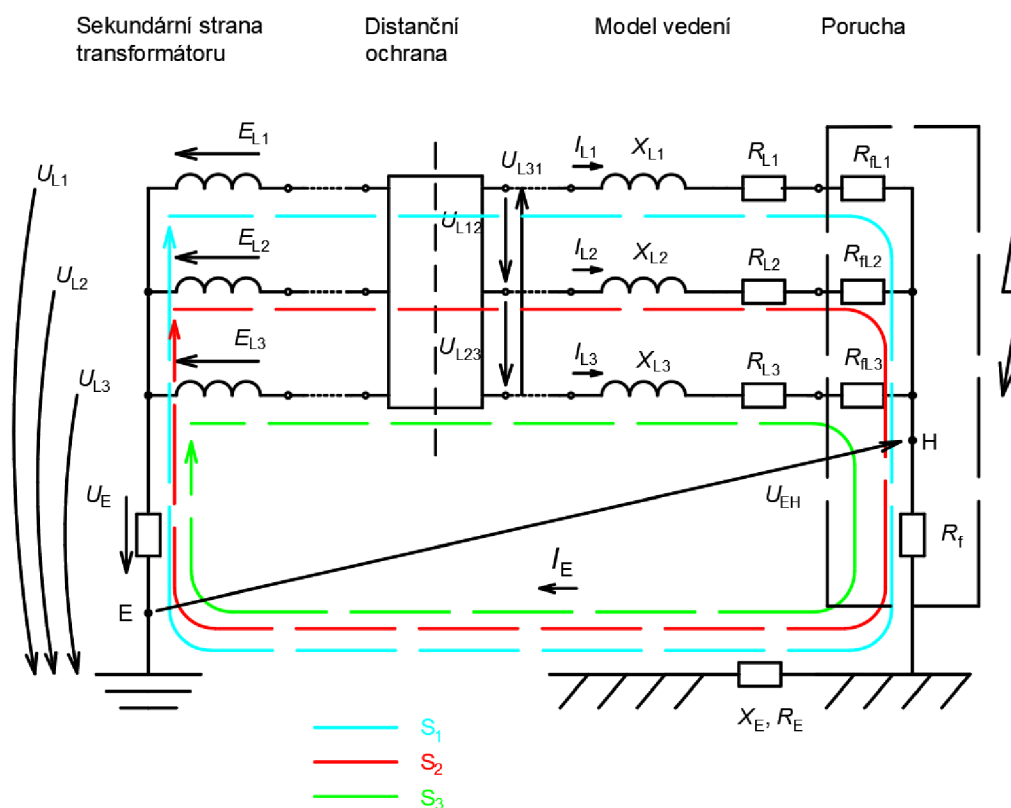


Obrázek 3.1 Přesné určení místa zkratu

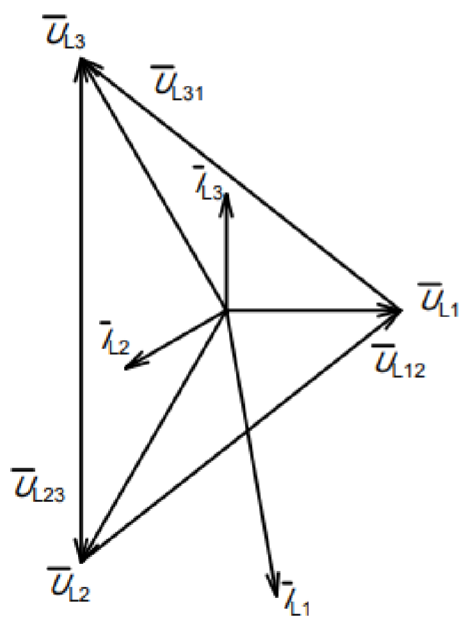
Dále jsou popsány u jednotlivých typů zkratů zjednodušující předpoklady, které byly použity pro stanovení vzorců pro výpočet reaktance poruchové smyčky. Tyto předpoklady jsou blíže rozepsány v následujících odstavcích u jednotlivých metod výpočtu. **Obecně lze říct, že hlavním předpokladem u všech níže rozepsaných metod výpočtu bylo uvažování nulového odporu poruchy fázového vodiče.**

3.1 Jednofázový zemní zkrat

Jednofázový zemní zkrat nastane při spojení jedné fáze se zemí v síti s účinně uzemněným uzlem. V tomto případě jsou na obrázku 3.2 vyobrazeny odpory poruch pro všechny tři fáze. Pokud porucha nastane mezi fází L1-E, tak odpory poruch $R_{fl,2}$ a $R_{fl,3}$ nabývají nekonečné hodnoty.



Obrázek 3.2 Jednofázový zemní zkrat – stanovení poruchových smyček



Obrázek 3.3 Příklad fázorového diagramu jednofázového zemního zkratu

Obrázek je převzat z literatury viz [14].

a) **Metoda č.1** – vychází z literatury dle [12], výpočet lze provést následovně:

U této metody výpočtu je problém v užití zemních poměrů v daném vzorci, tedy X_E a R_E . Tyto hodnoty bohužel často nebývají známy, jelikož jejich přesné zjištění se provádí měřením. Dále je důležité zmínit, že tato metoda výpočtu nezanedbává vliv fázového posunu zemního proudu ve vzorci výpočtu oproti metodě č.2, proto tato metoda bude přesnější v estimaci výsledků.

Výpočet reaktance poruchové smyčky S_1 :

$$X_{L1-E} = \frac{U_{L1}}{I_{L1}} \cdot \frac{\sin(\varphi_{U_{L1}} - \varphi_{I_{L1}}) - \frac{I_E \cdot R_E}{I_{L1} \cdot R_{L1}} \cdot \sin(\varphi_{U_{L1}} - \varphi_{I_E})}{1 - \left(\frac{X_E + R_E}{X_{L1} + R_{L1}}\right) \cdot \frac{I_E}{I_{L1}} \cdot \cos(\varphi_{I_E} - \varphi_{I_{L1}}) + \frac{R_E \cdot X_E}{R_{L1} \cdot X_{L1}} \cdot \left(\frac{I_E}{I_{L1}}\right)^2}, \quad (3.1)$$

kde:

U_{L1} je fázové napětí fáze L1, I_{L1} je proud fázového vodiče L1, φ je fázový posun (příslušného proudu nebo napětí), I_E je zemní proud, R_E je zemní odpor, R_{L1} je odpor fázového vodiče L1, X_E je zemní reaktance, X_{L1} je reaktance fázového vodiče L1.

Výpočet reaktance poruchové smyčky S_2 :

$$X_{L2-E} = \frac{U_{L2}}{I_{L2}} \cdot \frac{\sin(\varphi_{U_{L2}} - \varphi_{I_{L2}}) - \frac{I_E \cdot R_E}{I_{L2} \cdot R_{L2}} \cdot \sin(\varphi_{U_{L2}} - \varphi_{I_E})}{1 - \left(\frac{X_E + R_E}{X_{L2} + R_{L2}}\right) \cdot \frac{I_E}{I_{L2}} \cdot \cos(\varphi_{I_E} - \varphi_{I_{L2}}) + \frac{R_E \cdot X_E}{R_{L2} \cdot X_{L2}} \cdot \left(\frac{I_E}{I_{L2}}\right)^2}, \quad (3.2)$$

kde:

U_{L2} je fázové napětí fáze L2, I_{L2} je proud fázového vodiče L2, R_{L2} je odpor fázového vodiče L2, X_{L2} je reaktance fázového vodiče L2.

Výpočet reaktance poruchové smyčky S₃:

$$X_{L3-E} = \frac{U_{L3}}{I_{L3}} \cdot \frac{\sin(\varphi_{U_{L3}} - \varphi_{I_{L3}}) - \frac{I_E \cdot R_E}{I_{L3} \cdot R_{L3}} \cdot \sin(\varphi_{U_{L3}} - \varphi_{I_E})}{1 - \left(\frac{X_E}{X_{L3}} + \frac{R_E}{R_{L3}}\right) \frac{I_E}{I_{L3}} \cdot \cos(\varphi_{I_E} - \varphi_{I_{L3}}) + \frac{R_E \cdot X_E}{R_{L3} \cdot X_{L3}} \left(\frac{I_E}{I_{L3}}\right)^2}, \quad (3.3)$$

kde:

U_{L3} je fázové napětí fáze L3, I_{L3} je proud fázového vodiče L3, R_{L3} je odpor fázového vodiče L3, X_{L3} je reaktance fázového vodiče L3.

b) Metoda č.2 – vychází z literatury dle [15], výpočet lze provést následovně:

V této metodě výpočtu je zanedbán vliv fázového posunu zemního proudu, tudíž zde estimace výsledků bude méně přesná.

Výpočet zemního poměru k , který vstupuje do vzorce 3.11 se provede dle následujícího vzorce:

$$k = \frac{(\overline{Z_{0L}} - \overline{Z_{1L}})}{3 \cdot \overline{Z_{1L}}}, \quad (3.4)$$

kde:

$\overline{Z_{0L}}$ je netočivá složka impedance zkratového obvodu, $\overline{Z_{1L}}$ je sousledná složka impedance zkratového obvodu, $\overline{Z_E}$ je celková zemní impedance.

Pro netočivou složku impedance můžeme dále psát

$$\overline{Z_{0L}} = \overline{Z_{1L}} + 3 \cdot \overline{Z_E}, \quad (3.5)$$

kde pak zemní poměr můžeme psát jako:

$$k = \frac{\overline{Z_E}}{\overline{Z_{1L}}}, \quad (3.6)$$

Výpočet celkové impedance smyčky S₁:

$$\overline{Z_{L1-E}} = \text{Imag} \left| \frac{\overline{U_{L1}}}{(\overline{I_{L1}} + k \cdot \overline{I_E})} \right|, \quad (3.7)$$

kde:

$\overline{I_E}$ je zemní proud

Výpočet celkové impedance smyčky S₂:

$$\overline{Z_{L2-E}} = \text{Imag} \left| \frac{\overline{U_{L2}}}{(\overline{I_{L2}} + k \cdot \overline{I_E})} \right|, \quad (3.8)$$

Výpočet celkové impedance smyčky S₃:

$$\overline{Z_{L3-E}} = \text{Imag} \left[\frac{\overline{U_{L3}}}{(\overline{I_{L3}} + k \cdot \overline{I_E})} \right], \quad (3.9)$$

Dále je zde uveden modifikovaný vzorec vyjadřující přímo reaktanci vedení do poruchy, který je později při citlivostní analýze použit při výpočtech reaktance poruchové smyčky. Zde je opět zanedbán vliv fázového posunu zemního proudu, tudíž metoda bude méně přesná oproti metodě výpočtu č.1.

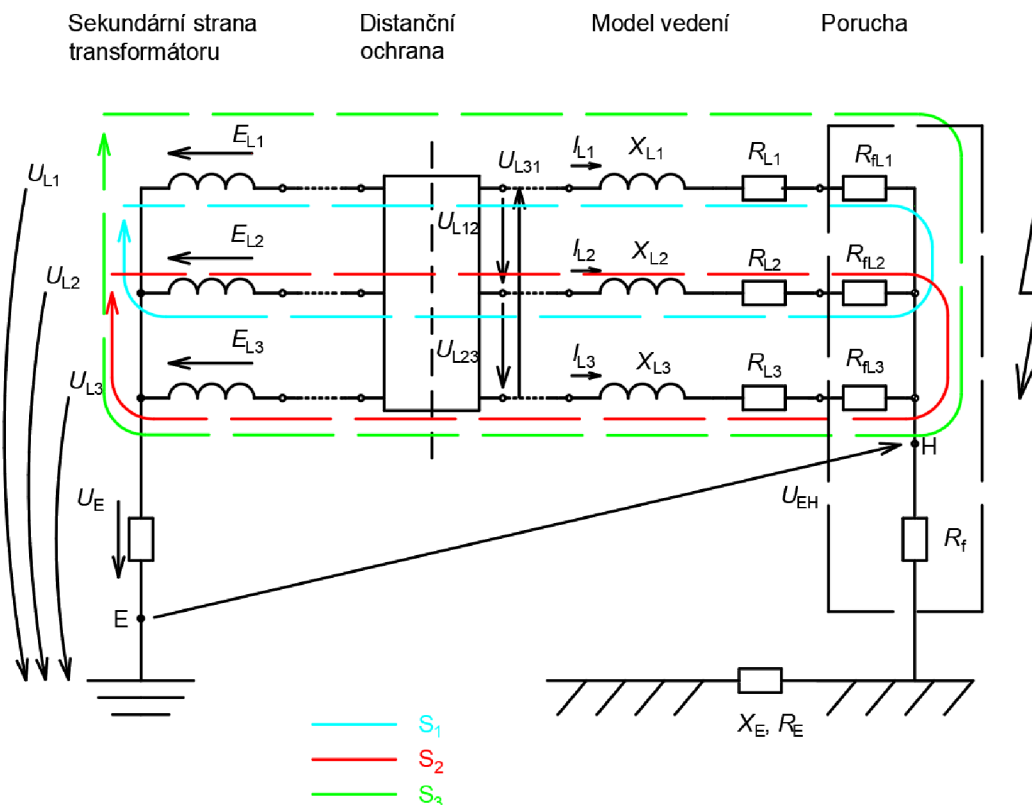
$$X_{LX-E} = \frac{U_{LX} \cdot \sin(\varphi_{U_{LX}} - \varphi_{I_{LX}})}{I_{LX} + k \cdot I_E}, \quad (3.10)$$

kde:

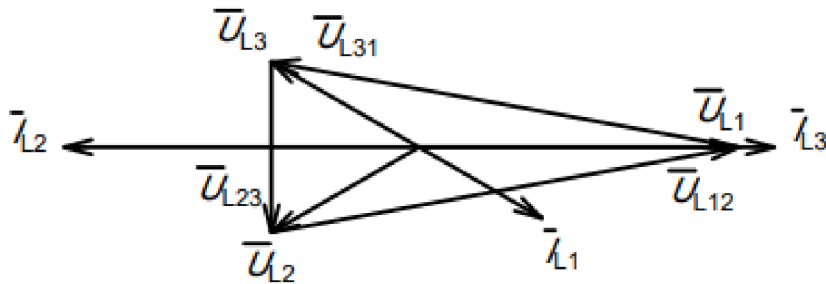
x {1,2,3} určuje danou fází

3.2 Dvoufázový zkrat

Dvoufázový zkrat nastane při spojení jakýchkoliv dvou fází v jednom místě. V tomto případě jsou na obrázku 3.4 vyobrazeny odpory poruch pro všechny tři fáze. Pokud porucha nastane mezi fází L1-L2, tak odpor poruchy R_{fL3} nabývá nekonečné hodnoty, zároveň odpor poruchy R_f také nabývá nekonečné hodnoty, jelikož se nejedná o dvoufázový zemní zkrat.



Obrázek 3.4 Dvoufázový zkrat – stanovení poruchových smyček pro metodu výpočtu č.1



Obrázek 3.5 Příklad fázorového diagramu dvoufázového zkratu [14]

a) **Metoda č.1** – vychází z literatury [12], výpočet lze provést následovně: Zde mezi jednotlivými metodami výpočtu není rozdíl ve stanovených vzorcích, jedná se pouze o modifikaci a zjednodušení daného vzorce.

Výpočet reaktance poruchové smyčky S_1 :

$$X_{L1-L2} = \frac{U_{L12} [I_{L1} \cdot \sin(\varphi_{U_{L12}} - \varphi_{I_{L1}}) - I_{L2} \cdot \sin(\varphi_{U_{L12}} - \varphi_{I_{L2}})]}{I_{L1}^2 - 2 \cdot I_{L1} \cdot I_{L2} \cdot \cos(\varphi_{I_{L1}} - \varphi_{I_{L2}}) + I_{L2}^2}, \quad (3.11)$$

kde:

U_{L12} je sdružené napětí mezi fází L1-L2

Výpočet reaktance poruchové smyčky S_2 :

$$X_{L2-L3} = \frac{U_{L23} [I_{L2} \cdot \sin(\varphi_{U_{L23}} - \varphi_{I_{L2}}) - I_{L3} \cdot \sin(\varphi_{U_{L23}} - \varphi_{I_{L3}})]}{I_{L2}^2 - 2 \cdot I_{L2} \cdot I_{L3} \cdot \cos(\varphi_{I_{L2}} - \varphi_{I_{L3}}) + I_{L3}^2}, \quad (3.12)$$

kde:

U_{L23} je sdružené napětí mezi fází L2-L3

Výpočet reaktance poruchové smyčky S_3 :

$$X_{L3-L1} = \frac{U_{L31} [I_{L3} \cdot \sin(\varphi_{U_{L31}} - \varphi_{I_{L3}}) - I_{L1} \cdot \sin(\varphi_{U_{L31}} - \varphi_{I_{L1}})]}{I_{L3}^2 - 2 \cdot I_{L3} \cdot I_{L1} \cdot \cos(\varphi_{I_{L3}} - \varphi_{I_{L1}}) + I_{L1}^2}, \quad (3.13)$$

kde:

U_{L31} je sdružené napětí mezi fází L3-L1

b) **Metoda č.2** – vychází z literatury dle [15], výpočet lze provést následovně: Výpočet reaktance poruchové smyčky mezi fází L1-L2:

$$X_{L1-L2} = \text{Imag} \left[\frac{\overline{U_{L1}} - \overline{U_{L2}}}{\overline{I_{L1}} - \overline{I_{L2}}} \right], \quad (3.14)$$

Výpočet reaktance poruchové smyčky mezi fází L2-L3:

$$X_{L2-L3} = \text{Imag} \left| \frac{\overline{U_{L2}} - \overline{U_{L3}}}{\overline{I_{L2}} - \overline{I_{L3}}} \right|, \quad (3.15)$$

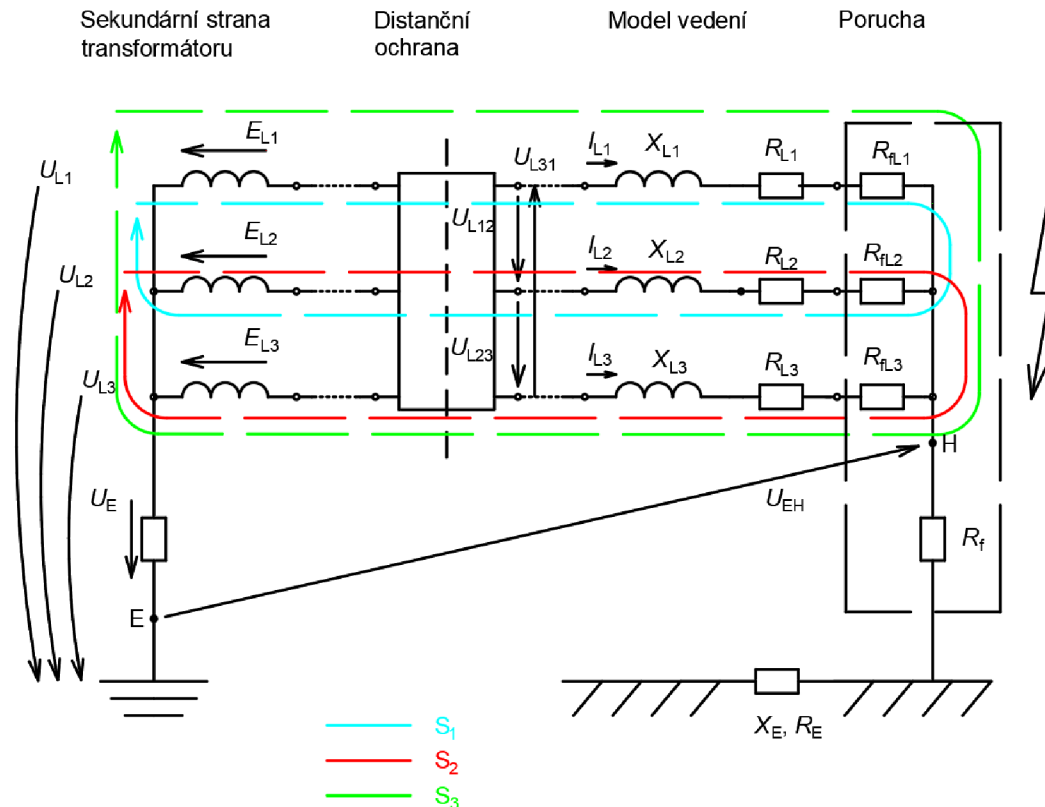
Výpočet reaktance poruchové smyčky mezi fází L3-L1:

$$X_{L3-L1} = \text{Imag} \left| \frac{\overline{U_{L3}} - \overline{U_{L1}}}{\overline{I_{L3}} - \overline{I_{L1}}} \right|, \quad (3.16)$$

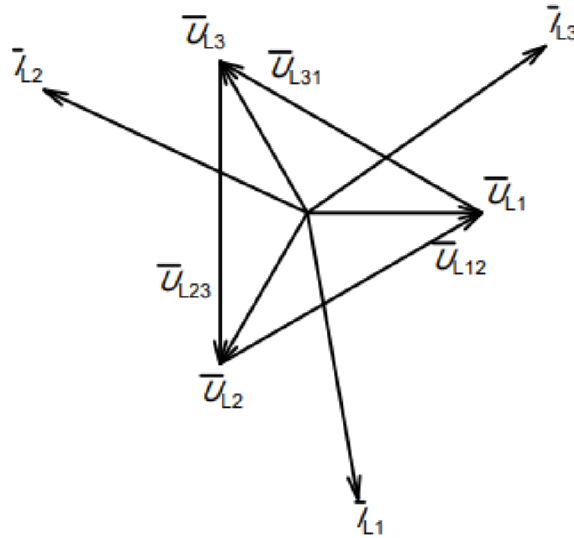
Stejným způsobem lze přistupovat i k dvojfázovému zemnímu zkratu, výše uvedené postupy a rovnice lze tedy aplikovat jak na 2f zkrat, tak i 2f zemní. Z důvodu duplicity stejných vzorců zde nejsou tyto rovnice uvedeny.

3.3 Trojfázový zkrat

Trojfázový zkrat nastane při spojení všech tří fází současně. V tomto případě jsou na obrázku 3.9 vyobrazeny odpory poruch pro všechny tři fáze. Pokud porucha nastane mezi fází L1-L2-L3, tak odpor poruchy R_f nabývá nekonečné hodnoty, jelikož se nejedná o trojfázový zemní zkrat.



Obrázek 3.6 Trojfázový zkrat – stanovení poruchových smyček



Obrázek 3.7 Příklad fázorového diagramu trojfázového zkratu

Obrázek je převzat z literatury viz [14].

a) Metoda č.1 - vychází z literatury dle [15]:

Tato metoda vychází ze stejných vzorců, které byly odvozeny pro dvoufázový zkrat – metoda č.2 (viz. kapitola 3.2). Jednotlivé vzorce pro výpočet reaktance do poruchy lze však odvodit pro tři smyčky, kde výsledná reaktance je dána jejich průměrem, jak je uvedeno níže.

Výpočet reaktance poruchové smyčky mezi fází L1-L2:

$$X_{L1-L2} = \text{Imag} \left| \frac{\overline{U_{L1}} - \overline{U_{L2}}}{\overline{I_{L1}} - \overline{I_{L2}}} \right|, \quad (3.17)$$

Výpočet reaktance poruchové smyčky mezi fází L2-L3:

$$X_{L2-L3} = \text{Imag} \left| \frac{\overline{U_{L2}} - \overline{U_{L3}}}{\overline{I_{L2}} - \overline{I_{L3}}} \right|, \quad (3.18)$$

Výpočet reaktance poruchové smyčky mezi fází L3-L1:

$$X_{L3-L1} = \text{Imag} \left| \frac{\overline{U_{L3}} - \overline{U_{L1}}}{\overline{I_{L3}} - \overline{I_{L1}}} \right|, \quad (3.19)$$

Dále je potřeba tyto tři vypočtené hodnoty zprůměrovat.

$$X_L = \frac{X_{L1-L2} + X_{L2-L3} + X_{L3-L1}}{3}, \quad (3.20)$$

Stejným způsobem lze přistupovat i k třífázovému zemnímu zkratu, výše uvedené postupy a rovnice lze tedy aplikovat jak na 3f, tak i 3f zemní.

a) **Metoda č.2** – vychází z literatury dle [15], výpočet lze provést následovně:

Příklad odvození reaktance pro fáze L1-L2:

Zde je zaveden předpoklad rovnosti reaktancí vedení do místa poruchy a rovnosti fiktivního napětí $\overline{U_{EH}}$, viz. Obrázek 3.9.

Předpoklad:

$$X_{L1-E} = X_{L2-E} = X_{L3-E} , \quad (3.21)$$

$$\overline{U_{EH}} = \overline{U_{EH}} , \quad (3.22)$$

Výpočet reaktance zemní smyčky S1 s uvažováním $\overline{U_{EH}}$:

$$X_{L1-E} = \text{Imag} \left| \frac{\overline{U_{L1}} + \overline{U_{EH}}}{\overline{I_{L1}}} \right| , \quad (3.23)$$

Výpočet reaktance zemní smyčky S2:

$$X_{L2-E} = \text{Imag} \left| \frac{\overline{U_{L2}} + \overline{U_{EH}}}{\overline{I_{L2}}} \right| , \quad (3.24)$$

Výpočet reaktance zemní smyčky S3:

$$X_{L3-E} = \text{Imag} \left| \frac{\overline{U_{L3}} + \overline{U_{EH}}}{\overline{I_{L3}}} \right| , \quad (3.25)$$

Následně jsou tyto rovnice rozloženy do složkového tvaru, pro ukázkou je zde uvedena pouze smyčka X_{L1-E} :

$$\overline{Z_{L1-E}} = \frac{U_{L1R} + j \cdot U_{L1X} + U_{EHR} + j \cdot U_{EHX}}{I_{L1R} + j \cdot I_{L1X}} , \quad (3.26)$$

Dále se vzorec upraví, aby ve jmenovateli nefigurovalo komplexní číslo – rozdělíme vzorec na reálnou a imaginární část:

$$\overline{Z_{L1-E}} = \frac{U_{L1R} + j \cdot U_{L1X} + U_{EHR} + j \cdot U_{EHX}}{I_{L1R} + j \cdot I_{L1X}} \cdot \frac{I_{L1R} - j \cdot I_{L1X}}{I_{L1R} - j \cdot I_{L1X}} , \quad (3.27)$$

Po upravení vznikne vzorec:

$$\overline{Z_{L1-E}} = \frac{I_{L1R} \cdot U_{L1R} + I_{L1R} \cdot U_{EHR} + U_{L1X} \cdot I_{L1X} + U_{EHX} \cdot I_{L1X}}{I_{L1R}^2 + I_{L1X}^2} + j \cdot \frac{I_{L1R} \cdot U_{L1X} + I_{L1R} \cdot U_{EHX} - U_{L1X} \cdot I_{L1R} - U_{EHR} \cdot I_{L1X}}{I_{L1R}^2 + I_{L1X}^2} , \quad (3.28)$$

Vzorec upravíme a respektujeme pouze imaginární část, jelikož se jedná o reaktanci:

Pro výpočet reaktance zemní smyčky S1 s uvažováním $\overline{U_{EH}}$ platí:

$$X_{L1-E} = \frac{-I_{L1X} \cdot (U_{L1R} + U_{EHR}) + (U_{L1X} + U_{EHX}) \cdot I_{L1R}}{I_{L1R}^2 + I_{L1X}^2} , \quad (3.29)$$

Zbýlé smyčky se analyticky upraví totožně:

Výpočet reaktance zemní smyčky S2:

$$X_{L2-E} = \frac{-I_{L2X} \cdot (U_{L2R} + U_{EHR}) + (U_{L2X} + U_{EHX}) \cdot I_{L2R}}{I_{L2R}^2 + I_{L2X}^2}, \quad (3.30)$$

Výpočet reaktance zemní smyčky S3:

$$X_{L3-E} = \frac{-I_{L3X} \cdot (U_{L3R} + U_{EHR}) + (U_{L3X} + U_{EHX}) \cdot I_{L3R}}{I_{L3R}^2 + I_{L3X}^2}, \quad (3.31)$$

Dále je vytvořena první rovnice respektující rovnost reaktancí $X_{L1-E} = X_{L2-E}$, z této rovnice se vyjádří napětí U_{EHR} . Pro lepší přehlednost bakalářské práce zde uvádím pouze výsledek:

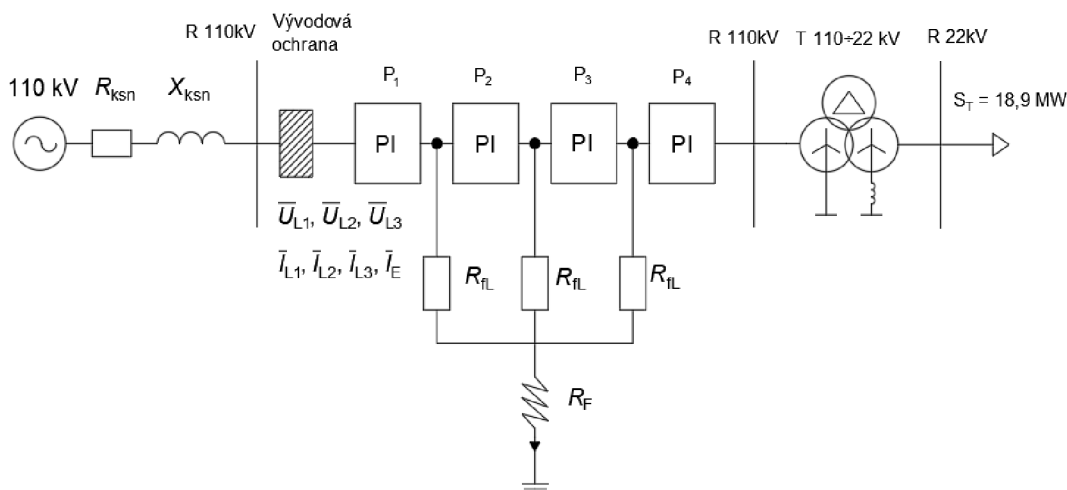
$$U_{EHR} = \frac{-I_{L2X} \cdot U_{L2R} \cdot (I_{L1R}^2 + I_{L1X}^2) + U_{L2X} \cdot I_{L2R} \cdot (I_{L1R}^2 + I_{L1X}^2) + U_{EHX} \cdot I_{L2R} \cdot (I_{L1R}^2 + I_{L1X}^2)}{I_{L1X} \cdot (-I_{L2R}^2 - I_{L2X}^2) + I_{L2X} \cdot (I_{L1R}^2 + I_{L1X}^2)} + \frac{I_{L1X} \cdot U_{L1R} \cdot (I_{L2R}^2 + I_{L2X}^2) + U_{EHX} \cdot I_{L1R} \cdot (-I_{L2R}^2 - I_{L2X}^2) + U_{L1X} \cdot I_{L1R} \cdot (-I_{L2R}^2 - I_{L2X}^2)}{I_{L1X} \cdot (-I_{L2R}^2 - I_{L2X}^2) + I_{L2X} \cdot (I_{L1R}^2 + I_{L1X}^2)}, \quad (3.32)$$

Dalším krokem je odvození druhé rovnice z podmínky rovnosti reaktancí $X_{L2-E} = X_{L3-E}$, v tomto vzorci by se dosadilo za neznámou U_{EHR} (3.32) a vyčíslilo napětí U_{EHX} . Z důvodu lepší přehlednosti bakalářské práce zde tento výsledek již nezobrazuji. Následně se složky spočteného fiktivního napětí $\overline{U}_{EH} = (U_{EHR} + j \cdot U_{EHX})$ dosadí do původního vzorce 3.23 – 3.25.

4. NÁVRH VEDENÍ A VÝPOČET VZDÁLENOSTI ZKRATU

Jedním z dalších cílů této bakalářské práce je návrh náhradního modelu vedení v programu PSCAD a odečtení hodnot napětí a proudů při vzniklé poruše. Z těchto testovacích hodnot je následně spočítána reaktance poruchové smyčky, která bude porovnána s reaktancí do poruchy (nastavenou na PI článkách) v daném modelu soustavy v PSCADu. Výpočet bude proveden pomocí již vypsanych vzorců z předchozí kapitoly a bude zde provedeno porovnání mezi jednotlivými metodami výpočtu a zjištění, která z těchto metod dosahuje nejpřesnější estimace reaktance do místa poruchy.

4.1 Model testovací soustavy



Obrázek 4.1 Náhradní schéma modelu vedení použité při měření v programu PSCAD

Parametry modelu:

$$S_{nt} = 100 \text{ MVA}, S_T = 18,9 \text{ MW}, S_{T\text{rafo}} = 63 \text{ MVA}, R_{ksn} = 0,1 \Omega, X_{ksn} = 0,126 \text{ H}, \\ X_{1C} = 320 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}, \text{AlFe } 185/6 \text{ mm}^2$$

Model sestává z napájecí soustavy na napěťové hladině 110 kV, dále je zde uvažován odpor a reaktance nadřazené soustavy R_{ksn} resp. X_{ksn} . Následuje blok vývodové ochrany, kde jsou měřeny hodnoty napětí a proudů, které protékají nasimulovanou poruchou. Model vedení je zkonstruován ze čtyř symetrických PI článků o délkách 10 km. Tyto PI články jsou nastaveny pomocí hodnot sousledné složky impedance a netočivé složky impedance. Sousledná složka impedance byla použita z reálných parametrů venkovního vedení 110 kV, kde byla hodnota zvolena pro jednoduché provedení o vodičích z AlFe

lana o průřezu 185/6 mm². Sousedná složka kapacitní reaktance byla zvolena viz parametry modelu a netočivá složka byla uvažována jako 2116,95 MΩ·km (viz výpočet níže). Dále při znalosti zemních poměrů byly dopočítány netočivé složky odporů a indukční reaktance. Tyto hodnoty jsou zobrazeny níže v tabulce 4.1. Zároveň je zde potřeba zahrnout zemní poměry, které jsou nastaveny na $k = 0,5; 1,5$ a 3 . Hodnoty proudů a napětí budou měřeny v různých vzdálenostech a to v 10 km, 20 km a 30 km. Mezi jednotlivými PÍ články jsou zakresleny odpory poruch fázových vodičů a dále odpor poruchy daného zkratu. Konec vedení je zatížen třívínutovým transformátorem s terciárním vinutím, kde je napětí transformováno z hodnoty 110 kV na 22 kV. Tento transformátor má výkon 63 MVA a za transformátorem je zakreslena čistě odporová zátěž o odebráním výkonu 18,9 MW (30 % S_T).

Tabulka 4.1 Sousedné a netočivé složky impedancí nastavené na PÍ článcích

$k = 0,5$		$l = 10$ km	$l = 10$ km	$l = 10$ km
		PI článek - 1	PI článek - 2	PI článek - 3
		[Ω/km]	[Ω/km]	[Ω/km]
Sousedná složka	R_{1L}	0,156	0,156	0,156
	X_{1L}	0,4091	0,4091	0,4091
Netočivá složka	R_{0L}	0,39	0,39	0,39
	X_{0L}	1,02275	1,02275	1,02275
$k = 1,5$		$l = 10$ km	$l = 10$ km	$l = 10$ km
		PI článek - 1	PI článek - 2	PI článek - 3
		[Ω/km]	[Ω/km]	[Ω/km]
Sousedná složka	R_{1L}	0,156	0,156	0,156
	X_{1L}	0,4091	0,4091	0,4091
Netočivá složka	R_{0L}	0,858	0,858	0,858
	X_{0L}	2,25005	2,25005	2,25005
$k = 3$		$l = 10$ km	$l = 10$ km	$l = 10$ km
		PI článek - 1	PI článek - 2	PI článek - 3
		[Ω/km]	[Ω/km]	[Ω/km]
Sousedná složka	R_{1L}	0,156	0,156	0,156
	X_{1L}	0,4091	0,4091	0,4091
Netočivá složka	R_{0L}	1,56	1,56	1,56
	X_{0L}	4,091	4,091	4,091

Příklad výpočtu netočivé kapacitní reaktance:

Předpoklad: $I_{\max} = 30$ mA

$$X_{0C} = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_{\max}}, \quad (4.1)$$

kde:

U_N je napětí napájecího transformátoru

$$X_{0C} = \frac{110000}{\frac{\sqrt{3}}{0,03}}, \quad (4.2)$$

$$X_{0C} = 2116,95 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}, \quad (4.3)$$

Příklad výpočtu netočivé impedance při zvoleném zemním poměru $k = 0,5$:

Předpoklad: $\overline{Z}_{1L} = (0,156 + j \cdot 0,4091)\Omega/\text{km}$ – tato hodnota byla zvolena dle reálných parametrů vedení 110 kV

Použijeme vzorec, který byl zmíněn v předchozí kapitole:

$$k = \frac{(\overline{Z}_{0L} - \overline{Z}_{1L})}{3 \cdot \overline{Z}_{1L}}, \quad (4.4)$$

Vzorec je následně upraven tak, že je vyjádřena Z_{0L} :

$$\overline{Z}_{0L} = k \cdot 3 \cdot \overline{Z}_{1L} + \overline{Z}_{1L}, \quad (4.5)$$

Dále jsou dosazeny hodnoty:

$$\overline{Z}_{0L} = 0,5 \cdot 3 \cdot (0,156 + j \cdot 0,4091) + (0,156 + j \cdot 0,4091), \quad (4.6)$$

Výsledek:

$$\overline{Z}_{0L} = (0,39 + j \cdot 1,02275) \Omega/\text{km}, \quad (4.7)$$

Stejným analytickým postupem lze spočítat netočivou složku pro zemní poměru $k = 1,5$ a $k = 3$.

4.2 Citlivostní analýza – všechny druhy zkratů při nulových odporech poruch

Pro prvotní ověření byla zvolena při nulových odporech poruch a nulovém zatížení modelu vedení. Zde se jedná o nejpřesnější estimaci výsledků, jelikož výpočet reaktance poruchové smyčky není ovlivněn např. nesymetrií odporů poruch nebo zatížením. V následujících tabulkách jsou zobrazeny všechny možné druhy zkratu.

Tabulka 4.2 Výsledky lokalizace pro dvoufázový a trojfázový zkrat – nulové zatížení a odpory poruch

Zemní poměr	Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu $R_f [\Omega]$	Parametry vedení		L1-L2						L1-L2-L3								
			l [km]	$X_{nast} [\Omega]$	Vypočtená reaktance			Vypočtená reaktance			Vypočtená reaktance			Vypočtená reaktance					
					Metoda č.1	Metoda č.2		Metoda č.1	Metoda č.2		Metoda č.1	Metoda č.2		Metoda č.1	Metoda č.2				
$X_{vyp.} [\Omega]$	$\Delta X [\Omega]$	$\Delta l_{zk} [\text{km}]$	$X_{vyp.} [\Omega]$	$\Delta X [\Omega]$	$\Delta l_{zk} [\text{km}]$	$X_{vyp.} [\Omega]$	$\Delta X [\Omega]$	$\Delta l_{zk} [\text{km}]$	$X_{vyp.} [\Omega]$	$\Delta X [\Omega]$	$\Delta l_{zk} [\text{km}]$	$X_{vyp.} [\Omega]$	$\Delta X [\Omega]$	$\Delta l_{zk} [\text{km}]$	$X_{vyp.} [\Omega]$	$\Delta X [\Omega]$	$\Delta l_{zk} [\text{km}]$		
$k = 0,5$	$R_{fL1}=0 [\Omega]$	0	10	4,091	4,091	0,000	0,0	4,091	0,000	0,0	4,091	0,000	0,0	4,091	0,000	0,0	4,091	0,000	0,0
	$R_{fL2}=0 [\Omega]$		20	8,182	8,184	0,002	0,0	8,184	0,002	0,0	8,184	0,002	0,0	8,184	0,002	0,0	8,184	0,002	0,0
	$R_{fL3}=0 [\Omega]$		30	12,273	12,279	0,006	0,0	12,279	0,006	0,0	12,279	0,006	0,0	12,279	0,006	0,0	12,279	0,006	0,0

Naměřené hodnoty napětí a proudů jsou vloženy v příloze A.1 – Tabulka 6.1. V této tabulce jsou zobrazeny výsledky vypočtené reaktance společně s absolutní chybou a chybou výpočtu vzdálenosti. Zde jsou uvedeny výsledky dvoufázového zkratu L1-L2 a

trojfázového zkratu L1-L2-L3 při zemním poměru $k = 0,5$. Ze zobrazených výsledků v tabulce vyplývá, že vypočítaná reaktance odpovídá reaktanci nastavené, což odpovídá teoretickým předpokladům. Do této tabulky byly zapsány výsledky pouze pro nastavený zemní poměr $k = 0,5$, jelikož se jedná o zkrat dvoufázový a trojfázový. Vlivem dvoufázového a trojfázového zkratu se poruchová smyčka neuzavírá zemí, a proto zemní poměr k nemá vliv na přesnost tohoto výpočtu. Vypočtené hodnoty pro ostatní zemní poměry by byly totožné, a proto z přehlednosti bakalářské práce a duplicitě stejných hodnot zde tyto výsledky nejsou zobrazeny. Z výsledků absolutních chyb a absolutních chyb výpočtu vzdálenosti je patrna vysoká přesnost metody výpočtu, pokud se jedná o čistě kovový/tvrký zkrat. Avšak s narůstající vzdáleností místa vzniku zkratu dochází k mírnému nárůstu absolutní chyby ΔX .

Tabulka 4.3 Výsledky lokalizace pro jednofázový, dvoufázový a trojfázový zemní zkrat – nulové zatížení a odpor zkratu, změna zemního poměru k

Zemní poměr	Odpor fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu R_f [Ω]	Parametry vedení		L1-E				L1-L2-E				L1-L2-L3-E			
			l [km]	$X_{nast.}$ [Ω]	Vypočtená reaktance		Vypočtená reaktance		Vypočtená reaktance		Vypočtená reaktance		Vypočtená reaktance			
					Metoda č.1	Metoda č.2	Metoda č.1	Metoda č.2	Metoda č.1	Metoda č.2	Metoda č.1	Metoda č.2				
				ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	
$k = 0,5$	$R_{f11}=0$ [Ω]	0	10	4,091	0,020	0,0	0,023	0,1	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	
	$R_{f12}=0$ [Ω]		20	8,182	0,078	0,2	0,097	0,2	0,002	0,0	0,002	0,0	0,002	0,0	0,002	
	$R_{f13}=0$ [Ω]		30	12,273	0,176	0,4	0,245	0,6	0,006	0,0	0,006	0,0	0,006	0,0	0,006	
$k = 1,5$	$R_{f11}=0$ [Ω]	0	10	4,091	0,026	0,1	0,038	0,1	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	
	$R_{f12}=0$ [Ω]		20	8,182	0,103	0,3	0,185	0,5	0,002	0,0	0,002	0,0	0,002	0,0	0,002	
	$R_{f13}=0$ [Ω]		30	12,273	0,233	0,6	0,541	1,3	0,006	0,0	0,006	0,0	0,006	0,0	0,006	
$k = 3$	$R_{f11}=0$ [Ω]	0	10	4,091	0,030	0,1	0,064	0,2	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	
	$R_{f12}=0$ [Ω]		20	8,182	0,117	0,3	0,343	0,8	0,002	0,0	0,002	0,0	0,002	0,0	0,002	
	$R_{f13}=0$ [Ω]		30	12,273	0,265	0,6	1,158	2,8	0,006	0,0	0,006	0,0	0,006	0,0	0,006	

Z důvodu velikosti a větší přehlednosti tabulky zde nejsou uvedeny reaktance poruchové smyčky $X_{vyp.}$. Naměřené hodnoty napětí a proudů jsou vloženy v příloze A.1 – Tabulka 6.1. V této tabulce jsou uvedeny výsledky pro jednofázový, dvoufázový a trojfázový zemní zkrat. U dvoufázového zemního a trojfázového zemního zkratu je patrné, že se zvětšujícím se zemním poměrem nedošlo k větší nepřesnosti výpočtu. Také obě metody výpočtu vycházejí totožně. Toto je způsobeno tím, že vzorce pro výpočet tohoto typu zkratu neuvádějí vliv zemního poměru k ve vzorcích výpočtu.

U jednofázového zemního zkratu – metoda č.2 je viditelná zvětšující se nepřesnost výpočtu při narůstajícím zemním poměru k , kde chyba výpočtu je nejmenší při $k = 0,5$ a vzdálenosti $l = 10$ km (minimální impedance poruchové smyčky). Naproti tomu největší chyba vznikla při zemním poměru $k = 3$ a $l = 30$ km (maximální impedance poruchové smyčky), kde absolutní chyba reaktance dosáhla hodnoty 1,158 Ω. Tato absolutní chyba vypočtené reaktance způsobila rozdíl $\Delta l = 2,8$ km na nastavené vzdálenosti zkratu $l = 30$ km. Nepřesnost výpočtu zde vznikla díky uvedení vlivu zemního poměru ve vzorcích výpočtu a z těchto výsledků je patrné, že zemní poměr má značný vliv na výpočet jednofázového zemního zkratu a je zde snaha o to, aby zemní poměr byl co nejmenší při užití metody výpočtu č.2. S narůstajícím zemním poměrem bude chyba exponenciálně narůstat v případě užití nulových odporů poruch.

Naopak pokud je použita metoda výpočtu č.1 u jednofázového zemního zkratu, tak je patrné, že metoda výpočtu je zdaleka přesnější oproti druhé metodě výpočtu. Problémem v metodě výpočtu č.2 může být například neuvedení fázového posunu zemního proudu při výpočtu. Toto zanedbání má výrazný vliv na výpočet, a **proto se doporučuje při výpočtu reaktance L-N zkratu využít výhradně metodu výpočtu č.1.**

4.3 Citlivostní analýza – všechny druhy zkratů při stejných hodnotách odporů poruch a při zatížení 18,9 MW

Další důležitou citlivostní analýzou je vliv odporů fázových vodičů a vliv zemního odporu poruchy na výpočet reaktance poruchové smyčky. Do následujících tabulek byly zpracovány všechny možné druhy zkratu.

Tabulka 4.4 Výsledky lokalizace pro dvoufázový a trojfázový zkrat - stejné hodnoty odporů poruch

Zemní poměr	Odpor fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu R_f [Ω]	Parametry vedení		L1-L2				L1-L2-L3					
			l [km]	$X_{nast.}$ [Ω]	Vypočtená reaktance									
					Metoda č.1		Metoda č.2		Metoda č.1		Metoda č.2			
					ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	$X_{vyp.}$ [Ω]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	$X_{vyp.}$ [Ω]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]
$k = 0,5$	$R_{f1}=4$ [Ω]	4	10	4,091	0,118	0,3	0,118	0,3	4,209	0,118	0,3	4,209	0,118	0,3
	$R_{f2}=4$ [Ω]		20	8,182	0,118	0,3	0,118	0,3	8,300	0,118	0,3	8,300	0,118	0,3
	$R_{f3}=4$ [Ω]		30	12,273	0,121	0,3	0,121	0,3	12,394	0,121	0,3	12,394	0,121	0,3

Naměřené hodnoty napětí a proudů jsou vloženy v příloze A.1 – Tabulka 6.2. V této tabulce je uveden dvoufázový a trojfázový zkrat při zemním poměru $k = 0,5$. Pro ostatní zemní poměry při těchto dvou typech zkratu tabulku výsledků neuvádím, jelikož se jedná o totožné hodnoty viz předchozí kapitola. Z výsledků výpočtu vyplývá, že v případě uvedení vlivů odporů poruch dochází při výpočtu k větší nepřesnosti a je patrné, že hodnoty odporů mají vliv na vypočítanou hodnotu reaktance. Ze zpracovaných výsledků vyplývá, že u dvoufázového zkratu při užití obou metod výpočtu dochází k totožným výsledkům, a to z důvodu, že metoda č.2 je pouhá modifikace a zjednodušení vzorce metody č.1, shoda výsledků tedy dokládá správnou implementaci vzorců. U trojfázového zkratu je možné vidět opět totožné výsledky, zde tedy je možné použít jakoukoliv metodu výpočtu, v případě, že vedení bude zatíženo symetrickými odpory, jak je možné vidět v tabulce. V porovnání s vypočítanými a nastavenými hodnotami reaktancí v tabulce 4.2 (kdy se jednalo o nulové odpory poruch) s výsledky ze zatíženého vedení vlivem odporů poruch, je viditelná značná nepřesnost. Absolutní chyba ΔX narůstá se zvětšující se vzdáleností poruchy. Dále z vypočítaných hodnot Δl_{zk} vyplývá menší nepřesnost a způsobení chyby při výpočtu vzdálenosti, kde rozdíl vzdálenosti Δl_{zk} dosáhne 0,3 km.

Tabulka 4.5 Výsledky lokalizace pro jednofázový, dvoufázový a trojfázový zemní zkrat - stejné hodnoty odporů poruch, změna zemního poměru k

Zemní poměr	Odporů fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu R_f [Ω]	Parametry vedení l [km] $X_{nast.}$ [Ω]		L1-E				L1-L2-E				L1-L2-L3-E			
					Vypočtená reaktance											
					Metoda č.1		Metoda č.2		Metoda č.1		Metoda č.2		Metoda č.1		Metoda č.2	
					ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]
$k = 0,5$	$R_{f1}=4$ [Ω]	4	10	4,091	0,134	0,3	0,230	0,6	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3
	$R_{f2}=4$ [Ω]		20	8,182	0,080	0,2	0,152	0,4	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3
	$R_{f3}=4$ [Ω]		30	12,273	0,040	0,1	0,034	0,1	0,121	0,3	0,121	0,3	0,121	0,3	0,121	0,3
$k = 1,5$	$R_{f1}=4$ [Ω]	4	10	4,091	0,028	0,1	0,123	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3
	$R_{f2}=4$ [Ω]		20	8,182	0,012	0,0	0,001	0,0	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3
	$R_{f3}=4$ [Ω]		30	12,273	0,048	0,1	0,273	0,7	0,121	0,3	0,121	0,3	0,121	0,3	0,121	0,3
$k = 3$	$R_{f1}=4$ [Ω]	4	10	4,091	0,011	0,0	0,051	0,1	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3
	$R_{f2}=4$ [Ω]		20	8,182	0,046	0,1	0,174	0,4	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3	0,118	0,3
	$R_{f3}=4$ [Ω]		30	12,273	0,173	0,4	0,831	2,0	0,121	0,3	0,121	0,3	0,121	0,3	0,121	0,3

Z důvodu velikosti a větší přehlednosti tabulky zde není uvedena vypočtená reaktance poruchové smyčky X_{vyp} . Naměřené hodnoty napětí a proudů jsou vloženy v příloze A.1 – Tabulka 6.2. V této tabulce je zpracován jednofázový, dvoufázový a trojfázový zemní zkrat při různých hodnotách zemního poměru. Z výsledku zobrazených v tabulce vyplývá, že zemní poměr opět neměl vliv na přesnost výpočtu dvoufázového a trojfázového zemního zkratu (neuplatňuje se vliv zemního poměru). Naopak při jednofázovém zemním zkratu se zemní poměr uplatňuje, a proto jsou zde odlišné výsledky při různých zemních poměrech. V případě jednofázového zemního zkratu – metoda č. 2 při zemním poměru $k = 0,5$ je patrné, že s rostoucí vzdáleností je absolutní chyba ΔX menší. Při zemním poměru $k = 1,5$ a $k = 3$ absolutní chyba ΔX se zvětšující vzdáleností narůstá, avšak největší přesnost výpočtu byla při zemním poměru $k = 1,5$. U metody výpočtu č.1 v případě jednofázového zemního zkratu je zde opět viditelná větší přesnost výsledku oproti druhé metodě výpočtu, proto je opět doporučeno užití této metody pro doměření vzdálenosti zkratu. Dále je ze zpracovaných výsledků patrné, že největší přesnost výpočtu jednofázového zemního zkratu je v případě užití zemního poměru $k = 1,5$. Z tohoto lze usoudit, že největší přesnost by byla v užití zemního poměru $k = 1$. V případě použití odlišného zemního poměru zde nadále vzniká chyba viz uvedené výsledky v tabulce 4.5.

V porovnání s tabulkou 5.3, kde se jednalo o čistě kovový zkrat, je patrné, že při zemním poměru $k = 0,5$ byl výpočet přesnější u čistě kovového zkratu. Naopak při zemním poměru $k = 1,5$ a 3 je výpočet přesnější u zkratu, kde odpory poruch nabývají hodnoty 4Ω .

4.4 Citlivostní analýza – podrobnější analýza jednofázového zemního zkratu – rozdílná zatížení

Tato kapitola je zaměřena na bližší zkoumání jednofázového zemního zkratu, kde je uvažován vliv zemních poměrů, vliv rozdílného zatížení modelu soustavy a vliv nesymetrie odporů fázových vodičů a odporů poruch – zkratu.

Tabulka 4.6 Výsledky lokalizace pro jednofázový zemní zkrat - podrobnější analýza při rozdílné hodnotě odporu fázového vodiče při nulovém zatížení, rozdílného odporu poruchy – zkratu, stejných vzdálenostech a rozdílného zemního poměru k

Zemní poměr	Odpor fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	Parametry vedení		L1-E					
					Vypočtená reaktance					
					Metoda č.1			Metoda č.2		
					$X_{vyp.} [\Omega]$	$\Delta X [\Omega]$	$\Delta l_{zk} [km]$	$X_{vyp.} [\Omega]$	$\Delta X [\Omega]$	$\Delta l_{zk} [km]$
$k = 0,5$	$R_{fl1}=2 [\Omega]$	0	10	4,091	4,069	0,022	0,1	4,076	0,015	0,0
		4	10	4,091	4,138	0,047	0,1	4,196	0,105	0,3
		8	10	4,091	4,297	0,206	0,5	4,444	0,353	0,9
	$R_{fl1}=4 [\Omega]$	0	10	4,091	4,092	0,001	0,0	4,119	0,028	0,1
		4	10	4,091	4,206	0,115	0,3	4,305	0,214	0,5
		8	10	4,091	4,408	0,317	0,8	4,613	0,522	1,3
	$R_{fl1}=6 [\Omega]$	0	10	4,091	4,137	0,046	0,1	4,196	0,105	0,3
		4	10	4,091	4,297	0,206	0,5	4,444	0,353	0,9
		8	10	4,091	4,541	0,450	1,1	4,810	0,719	1,8
$k = 1,5$	$R_{fl1}=2 [\Omega]$	0	10	4,091	4,060	0,031	0,1	4,061	0,030	0,1
		4	10	4,091	4,079	0,012	0,0	4,139	0,048	0,1
		8	10	4,091	4,133	0,042	0,1	4,293	0,202	0,5
	$R_{fl1}=4 [\Omega]$	0	10	4,091	4,065	0,026	0,1	4,090	0,001	0,0
		4	10	4,091	4,102	0,011	0,0	4,207	0,116	0,3
		8	10	4,091	4,173	0,082	0,2	4,397	0,306	0,7
	$R_{fl1}=6 [\Omega]$	0	10	4,091	4,079	0,012	0,0	4,139	0,048	0,1
		4	10	4,091	4,142	0,051	0,1	4,293	0,202	0,5
		8	10	4,091	4,220	0,129	0,3	4,518	0,427	1,0
$k = 3$	$R_{fl1}=2 [\Omega]$	0	10	4,091	4,062	0,029	0,1	4,038	0,053	0,1
		4	10	4,091	4,076	0,016	0,0	4,096	0,005	0,0
		8	10	4,091	4,103	0,012	0,0	4,200	0,109	0,3
	$R_{fl1}=4 [\Omega]$	0	10	4,091	4,067	0,024	0,1	4,061	0,030	0,1
		4	10	4,091	4,088	0,003	0,0	4,142	0,051	0,1
		8	10	4,091	4,122	0,031	0,1	4,268	0,177	0,4
	$R_{fl1}=6 [\Omega]$	0	10	4,091	4,076	0,015	0,0	4,096	0,005	0,0
		4	10	4,091	4,103	0,012	0,0	4,200	0,109	0,3
		8	10	4,091	4,144	0,053	0,1	4,346	0,255	0,6

Naměřené hodnoty napětí a proudů jsou vloženy v příloze A.1 – Tabulka 6.3. Při podrobnější analýze tohoto typu zkratu bylo namodelováno vedení tak, že odpor poruchy fázového vodiče byl proměnný pouze ve fázi L1. Odpor poruchy zkratu byl také proměnný a vzdálenost byla konstantní - 10 km při nulovém zatížení vedení. Ze zobrazených hodnot v této tabulce je patrné, že při zemním poměru $k = 0,5$ dochází k největší nepřesnosti v případě $R_{fl1} = 6 \Omega$ a $R_f = 8 \Omega$, kde chyba výpočtu vzdálenosti je rozdílná o 1,1 km, dále také dochází k větší absolutní chybě ΔX při zvětšující se hodnotě

odporu poruchy – zkratu R_f . V případě porovnání výpočtu jednofázového zemního zkratu je opět značně větší přesnost při užití 1. metody výpočtu. Z naměřených a vypočítaných výsledků zobrazených v tabulce vyplývá, že při užití většího zemního poměru v případě jednofázového zemního zkratu dochází k větší přesnosti výpočtu při hodnotě odporu poruchy – zkratu $R_f = 8 \Omega$.

Tabulka 4.7 Výsledky lokalizace pro jednofázový zemní zkrat - podrobnější analýza při rozdílné hodnotě odporu fázového vodiče při zatížení 18,9 MW, rozdílného odporu poruchy – zkratu, stejných vzdálenostech a rozdílného zemního poměru k

Zemní poměr	Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	Parametry vedení		L1-E					
					Vypočtená reaktance					
					Metoda č.1			Metoda č.2		
					R_f [Ω]	l [km]	$X_{nast.}$ [Ω]	$X_{vyp.}$ [Ω]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]
$k = 0,5$	$R_{fL1}=2$ [Ω]	0	10	4,091	4,072	0,019	0,0	4,076	0,016	0,0
		4	10	4,091	4,150	0,059	0,1	4,205	0,114	0,3
		8	10	4,091	4,324	0,233	0,6	4,469	0,378	0,9
	$R_{fL1}=4$ [Ω]	0	10	4,091	4,099	0,007	0,0	4,123	0,032	0,1
		4	10	4,091	4,225	0,134	0,3	4,321	0,230	0,6
		8	10	4,091	4,444	0,353	0,9	4,648	0,557	1,4
	$R_{fL1}=6$ [Ω]	0	10	4,091	4,150	0,059	0,1	4,205	0,114	0,3
		4	10	4,091	4,324	0,233	0,6	4,469	0,378	0,9
		8	10	4,091	4,585	0,494	1,2	4,854	0,763	1,9
$k = 1,5$	$R_{fL1}=2$ [Ω]	0	10	4,091	4,064	0,027	0,1	4,057	0,034	0,1
		4	10	4,091	4,091	0,000	0,0	4,142	0,050	0,1
		8	10	4,091	4,155	0,064	0,2	4,306	0,215	0,5
	$R_{fL1}=4$ [Ω]	0	10	4,091	4,073	0,018	0,0	4,089	0,002	0,0
		4	10	4,091	4,119	0,028	0,1	4,214	0,123	0,3
		8	10	4,091	4,201	0,110	0,3	4,417	0,326	0,8
	$R_{fL1}=6$ [Ω]	0	10	4,091	4,091	0,000	0,0	4,142	0,050	0,1
		4	10	4,091	4,155	0,064	0,2	4,307	0,216	0,5
		8	10	4,091	4,255	0,164	0,4	4,545	0,454	1,1
$k = 3$	$R_{fL1}=2$ [Ω]	0	10	4,091	4,066	0,025	0,1	4,030	0,061	0,1
		4	10	4,091	4,087	0,005	0,0	4,093	0,002	0,0
		8	10	4,091	4,122	0,031	0,1	4,204	0,113	0,3
	$R_{fL1}=4$ [Ω]	0	10	4,091	4,074	0,017	0,0	4,055	0,036	0,1
		4	10	4,091	4,102	0,011	0,0	4,142	0,051	0,1
		8	10	4,091	4,145	0,054	0,1	4,276	0,185	0,5
	$R_{fL1}=6$ [Ω]	0	10	4,091	4,087	0,004	0,0	4,093	0,002	0,0
		4	10	4,091	4,122	0,031	0,1	4,204	0,113	0,3
		8	10	4,091	4,172	0,081	0,2	4,359	0,268	0,7

Naměřené hodnoty napětí a proudů jsou vloženy v příloze A.1 – Tabulka 6.4. Dále byla

zpracována tabulka při stejné vzdálenosti poruchy, kdy $l = 10$ km, avšak s rozdílným zatížením vedení. Vedení bylo zatíženo hodnotou 18,9 MW – tedy šlo o čistě odporovou zátěž. Z této sestavené tabulky vyplývá, že při větším zatížení vedení dochází k větší nepřesnosti výpočtu. Větší nepřesnost výpočtu je možno vidět u všech druhů zkratů, kde díky většímu zatížení vedení dochází ke zmenšení poruchového proudu, který následně vede k větší nepřesnosti výpočtu. V případě porovnání s předešlou tabulkou je možno vidět, že při největší chybě výpočtu, která byla způsobena při zemním poměru $k = 0,5$, $R_{fl1} = 6 \Omega$ a $R_f = 8 \Omega$, nepřesnost a absolutní chyba vzrostla o $0,04 \Omega$. Z tohoto lze usoudit, že velikost zatížení má opět vliv na přesnost výpočtu reaktance, jelikož vnáší další nejistotu do jejího výpočtu.

Tabulka 4.8 Výsledky lokalizace pro jednofázový zemní zkrat - podrobnější analýza při rozdílné hodnotě odporu fázového vodiče při zatížení 18,9 MW, rozdílného odporu poruchy – zkratu, $l=30$ km a rozdílného zemního poměru k

Zemní poměr	Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	Parametry vedení		L1-E					
					Vypočtená reaktance					
					Metoda č.1			Metoda č.2		
					$X_{vyp.} [\Omega]$	$\Delta X [\Omega]$	$\Delta l_{zk} [km]$	$X_{vyp.} [\Omega]$	$\Delta X [\Omega]$	$\Delta l_{zk} [km]$
$k = 0,5$	$R_{fl1}=2 [\Omega]$	0	30	12,273	12,123	0,150	0,4	12,046	0,227	0,6
		4	30	12,273	12,231	0,042	0,1	12,193	0,080	0,2
		8	30	12,273	12,413	0,140	0,3	12,446	0,173	0,4
	$R_{fl1}=4 [\Omega]$	0	30	12,273	12,167	0,106	0,3	12,106	0,167	0,4
		4	30	12,273	12,313	0,040	0,1	12,307	0,034	0,1
		8	30	12,273	12,530	0,257	0,6	12,609	0,336	0,8
	$R_{fl1}=6 [\Omega]$	0	30	12,273	12,231	0,042	0,1	12,194	0,079	0,2
		4	30	12,273	12,413	0,140	0,3	12,447	0,174	0,4
		8	30	12,273	12,664	0,391	1,0	12,795	0,522	1,3
$k = 1,5$	$R_{fl1}=2 [\Omega]$	0	30	12,273	12,105	0,168	0,4	11,746	0,527	1,3
		4	30	12,273	12,244	0,029	0,1	11,904	0,369	0,9
		8	30	12,273	12,402	0,129	0,3	12,107	0,166	0,4
	$R_{fl1}=4 [\Omega]$	0	30	12,273	12,172	0,101	0,2	11,820	0,453	1,1
		4	30	12,273	12,320	0,047	0,1	12,000	0,273	0,7
		8	30	12,273	12,488	0,215	0,5	12,223	0,050	0,1
	$R_{fl1}=6 [\Omega]$	0	30	12,273	12,244	0,029	0,1	11,905	0,368	0,9
		4	30	12,273	12,402	0,129	0,3	12,107	0,166	0,4
		8	30	12,273	12,579	0,306	0,7	12,350	0,077	0,2
$k = 3$	$R_{fl1}=2 [\Omega]$	0	30	12,273	12,119	0,154	0,4	11,127	1,146	2,8
		4	30	12,273	12,337	0,064	0,2	11,334	0,939	2,3
		8	30	12,273	12,556	0,283	0,7	11,552	0,721	1,8
	$R_{fl1}=4 [\Omega]$	0	30	12,273	12,228	0,045	0,1	11,229	1,044	2,6
		4	30	12,273	12,446	0,173	0,4	11,442	0,831	2,0
		8	30	12,273	12,666	0,393	1,0	11,666	0,607	1,5
	$R_{fl1}=6 [\Omega]$	0	30	12,273	12,337	0,064	0,2	11,334	0,939	2,3
		4	30	12,273	12,556	0,283	0,7	11,553	0,720	1,8
		8	30	12,273	12,777	0,504	1,2	11,782	0,492	1,2

Naměřené hodnoty napětí a proudů jsou vloženy v příloze A.1 – Tabulka 6.5. Zde byla

sestavena tabulka, kde byla rozdílná vzdálenost poruchy a to $l = 30$ km. V porovnání s předchozí tabulkou je zřejmé, že zde byla obecně větší nepřesnost výpočtu v porovnání s jednofázovým zemním zkratem, který byl ve vzdálenosti $l = 10$ km. Dále je zřejmé, že **metoda výpočtu č.1 je mnohem přesnější při estimaci výsledků oproti metodě výpočtu č.2.** Pokud je užitá metoda výpočtu č.2, tak je viditelná zvětšující se absolutní chyba ΔX s navyšujícím se zemním poměrem. Další zajímavostí v případě užití druhé metody výpočtu je to, že s rostoucími odpory poruch je tato metoda přesnější, přičemž podle teoretických předpokladů by měl být výsledek více zkreslen nepřesností výpočtu. Naopak u metody výpočtu č.1 je zde tento rozdíl viditelný, s narůstajícími odpory poruch dochází k větší absolutní chybě a chybě výpočtu vzdálenosti.

4.5 Citlivostní analýza – nesymetrie odporů poruchy – 2f a 3f zkratů

V této kapitole je naopak zpracována citlivostní analýza 2f, 2f zemních, 3f a 3f zemních zkratů. Zde byl kladen důraz na zpracování výsledků vypočtené reaktance při užití nesymetrie odporů fázových vodičů a odporů fáze-zem.

Tabulka 4.9 Výsledky lokalizace pro dvoufázový a trojfázový zkrat - podrobnější analýza vlivu nesymetrických odporů fázových vodičů na přesnost výpočtu při stejném zemním poměru a zatížení 18,9 MW

k = 0,5															
Odpor fázových vodičů	Odpor poruchy R_f	Parametry vedení		L1-L2						L1-L2-L3					
				Vypočtená reaktance						Vypočtená reaktance					
				Metoda č.1			Metoda č.2			Metoda č.1			Metoda č.2		
				X_{vvp} [Ω]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	X_{vvp} [Ω]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	X_{vvp} [Ω]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	X_{vvp} [Ω]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]
$R_{n1}=2$ [Ω] $R_{n2}=4$ [Ω] $R_{n3}=6$ [Ω]	0	10	4,091	4,158	0,067	0,2	4,158	0,067	0,2	4,314	0,223	0,5	4,209	0,118	0,3
		20	8,182	8,250	0,068	0,2	8,250	0,068	0,2	8,381	0,199	0,5	8,303	0,121	0,3
		30	12,273	12,344	0,071	0,2	12,344	0,071	0,2	12,459	0,186	0,5	12,399	0,126	0,3
	4	10	4,091	4,158	0,067	0,2	4,158	0,067	0,2	4,314	0,223	0,5	4,209	0,118	0,3
		20	8,182	8,250	0,068	0,2	8,250	0,068	0,2	8,381	0,199	0,5	8,303	0,121	0,3
		30	12,273	12,344	0,071	0,2	12,344	0,071	0,2	12,459	0,186	0,5	12,399	0,126	0,3
	8	10	4,091	4,158	0,067	0,2	4,158	0,067	0,2	4,314	0,223	0,5	4,209	0,118	0,3
		20	8,182	8,250	0,068	0,2	8,250	0,068	0,2	8,381	0,199	0,5	8,303	0,121	0,3
		30	12,273	12,344	0,071	0,2	12,344	0,071	0,2	12,459	0,186	0,5	12,399	0,126	0,3
$R_{n1}=6$ [Ω] $R_{n2}=2$ [Ω] $R_{n3}=4$ [Ω]	0	10	4,091	4,209	0,118	0,3	4,209	0,118	0,3	4,314	0,223	0,5	4,209	0,118	0,3
		20	8,182	8,300	0,118	0,3	8,300	0,118	0,3	8,381	0,199	0,5	8,303	0,121	0,3
		30	12,273	12,394	0,121	0,3	12,394	0,121	0,3	12,459	0,186	0,5	12,399	0,126	0,3
	4	10	4,091	4,209	0,118	0,3	4,209	0,118	0,3	4,314	0,223	0,5	4,209	0,118	0,3
		20	8,182	8,300	0,118	0,3	8,300	0,118	0,3	8,381	0,199	0,5	8,303	0,121	0,3
		30	12,273	12,394	0,121	0,3	12,394	0,121	0,3	12,459	0,186	0,5	12,399	0,126	0,3
	8	10	4,091	4,209	0,118	0,3	4,209	0,118	0,3	4,314	0,223	0,5	4,209	0,118	0,3
		20	8,182	8,300	0,118	0,3	8,300	0,118	0,3	8,381	0,199	0,5	8,303	0,121	0,3
		30	12,273	12,394	0,121	0,3	12,394	0,121	0,3	12,459	0,186	0,5	12,399	0,126	0,3
$R_{n1}=4$ [Ω] $R_{n2}=6$ [Ω] $R_{n3}=2$ [Ω]	0	10	4,091	4,273	0,182	0,4	4,273	0,182	0,4	4,314	0,223	0,5	4,209	0,118	0,3
		20	8,182	8,364	0,182	0,4	8,364	0,182	0,4	8,381	0,199	0,5	8,303	0,121	0,3
		30	12,273	12,457	0,184	0,5	12,457	0,184	0,5	12,459	0,186	0,5	12,399	0,126	0,3
	4	10	4,091	4,273	0,182	0,4	4,273	0,182	0,4	4,314	0,223	0,5	4,209	0,118	0,3
		20	8,182	8,364	0,182	0,4	8,364	0,182	0,4	8,381	0,199	0,5	8,303	0,121	0,3
		30	12,273	12,457	0,184	0,5	12,457	0,184	0,5	12,459	0,186	0,5	12,399	0,126	0,3
	8	10	4,091	4,273	0,182	0,4	4,273	0,182	0,4	4,314	0,223	0,5	4,209	0,118	0,3
		20	8,182	8,364	0,182	0,4	8,364	0,182	0,4	8,381	0,199	0,5	8,303	0,121	0,3
		30	12,273	12,457	0,184	0,5	12,457	0,184	0,5	12,459	0,186	0,5	12,399	0,126	0,3

Naměřené hodnoty napětí a proudů jsou vloženy v příloze A.1 – Tabulka 6.6 a Tabulka 6.7. Z naměřených a vypočítaných výsledků je patrné, že nesymetrie odporů v případě

dvoufázového zkratu má vliv na výpočet reaktance poruchové smyčky. Pokud se jedná o dvoufázový zkrat L1-L2, tak je zřejmé, že při užití větších odporů fázových vodičů L1 a L2 dochází k větší nepřesnosti výpočtu. To je způsobeno vlivem většího omezení poruchového proudu, v případě nejvyšších nastavených hodnotách odporů fázových vodičů. Vlivem menších poruchových proudů dochází k větší nepřesnosti výpočtu a způsobení větší absolutní chyby a chyby výpočtu vzdálenosti. Naopak u trojfázového zkratu můžeme vidět, že nesymetrie odporů poruch nemá vliv na výpočet reaktance poruchové smyčky, to je dáno tím, že u trojfázového zkratu je potřeba vypočítat reaktanci poruchové smyčky ve všech kombinacích, tedy L1-L2, L1-L3, L2-L3 a tyto hodnoty se následně zprůměrují, proto nesymetrie nemá vliv na výpočet a vypočítaný výsledek bude vždy totožný. **Naopak zde je již viditelné, že metoda výpočtu č.2 u trojfázového zkratu je přesnější oproti metodě výpočtu č.1, proto je výhradně doporučeno užití metody č.2** při doměření vzdálenosti zkratu, pokud se bude jednat o nesymetrii odporů poruch v případě trojfázového zkratu. Zároveň zde nejsou zobrazeny výsledky při odlišných zemních poměrech, jelikož zemní poměr zde nemá vliv na výpočet, protože poruchová smyčka se neuzavírá zemí.

Tabulka 4.10 Výsledky lokalizace pro dvoufázový zemní zkrat - podrobnější analýza vlivu nesymetrických odporů fázových vodičů na přesnost výpočtu při zemním poměru $k = 0,5$ a zatížení 18,9 MW

$k = 0,5$									
Odpor fázových vodičů	Odpor poruchy R_f	Parametry vedení l [km] $X_{nast.}$ [Ω]		L1-L2-E					
				Vypočtená reaktance					
				Metoda č.1			Metoda č.1		
				$X_{vvp.}$ [Ω]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]	$X_{vvp.}$ [Ω]	ΔX [Ω]	Δl_{zk} [km]
$R_{fL1}=2$ [Ω]	4	10	4,091	3,939	0,152	0,4	3,939	0,152	0,4
$R_{fL2}=4$ [Ω]		20	8,182	8,020	0,162	0,4	8,020	0,162	0,4
$R_{fL3}=6$ [Ω]		30	12,273	12,126	0,147	0,4	12,126	0,147	0,4
$R_{fL1}=6$ [Ω]	4	10	4,091	4,848	0,757	1,9	4,848	0,757	1,9
$R_{fL2}=2$ [Ω]		20	8,182	8,933	0,751	1,8	8,933	0,751	1,8
$R_{fL3}=4$ [Ω]		30	12,273	12,967	0,694	1,7	12,967	0,694	1,7
$R_{fL1}=4$ [Ω]	4	10	4,091	4,034	0,057	0,1	4,034	0,057	0,1
$R_{fL2}=6$ [Ω]		20	8,182	8,124	0,058	0,1	8,124	0,058	0,1
$R_{fL3}=2$ [Ω]		30	12,273	12,233	0,040	0,1	12,233	0,040	0,1
$R_{fL1}=6$ [Ω]	4	10	4,091	5,215	1,124	2,7	5,215	1,124	2,7
$R_{fL2}=0$ [Ω]		20	8,182	9,293	1,111	2,7	9,293	1,111	2,7
$R_{fL3}=2$ [Ω]		30	12,273	13,276	1,003	2,5	13,276	1,003	2,5

Naměřené hodnoty napětí a proudů jsou vloženy v příloze A.1 – Tabulka 6.8. V této tabulce jsou zpracovány výsledky reaktancí při užití nesymetrie odporů fázových vodičů při zemním poměru $k = 0,5$. Zde je zpracován 2f zemní zkrat při náhodně zvolených hodnotách odporů fázových vodičů a při konstantním odporu poruchy zkratu, kde byla

hodnota zvolena $R_f = 4 \Omega$. Tento druh zkratu byl spočítán pomocí obou metod výpočtu, avšak jak již bylo uvedeno dříve, tak je možno vidět, že výsledky u obou metod jsou totožné, jelikož se jedná pouze o upravení a zjednodušení vzorce výpočtu. Ze zpracovaných výsledků je viditelný značný vliv nesymetrie odporů ve výpočtu reaktance. Největší nepřesnost výpočtu vzniká vždy při nejmenší zvolené vzdálenosti a největší nesymetrii odporů, tedy rozdíl hodnot odporů mezi fází L1 a L2 v uvedeném dvoufázovém zemním zkratu, kde mají na výpočet vliv fáze L1 a L2. Pro lepší představu zde byla uvedena i největší asymetrie odporů, kde asymetrie nabývala rozdílu 6Ω ve fázi L1 a L2. Ze zobrazených výsledků vyplývá značná nepřesnost a exponenciální nárůst absolutní chyby výpočtu při odporových poruchách.

Tabulka 4.11 Výsledky lokalizace pro trojfázový zemní zkrat - podrobnější analýza vlivu nesymetrických odporů poruch – zkratu na přesnost výpočtu při zemním poměru $k = 0,5$ a zatížení $18,9 MW$

$k = 0,5$									
Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy	Parametry vedení		L1-L2-L3-E					
		R_f	l [km]	$X_{nast.} [\Omega]$	Vypočtená reaktance				
	Metoda č.1				Metoda č.2				
	$X_{vyp.} [\Omega]$				$\Delta X [\Omega]$	Δl_{zk} [km]	$X_{vyp.} [\Omega]$	$\Delta X [\Omega]$	Δl_{zk} [km]
$R_{f1}=2 [\Omega]$	4	10	4,091	4,341	0,250	0,6	4,211	0,120	0,3
$R_{f2}=4 [\Omega]$		20	8,182	8,406	0,224	0,5	8,304	0,122	0,3
$R_{f3}=6 [\Omega]$		30	12,273	12,479	0,206	0,5	12,397	0,124	0,3
$R_{f1}=2 [\Omega]$	8	10	4,091	4,326	0,235	0,6	4,210	0,119	0,3
$R_{f2}=4 [\Omega]$		20	8,182	8,396	0,214	0,5	8,304	0,122	0,3
$R_{f3}=6 [\Omega]$		30	12,273	12,473	0,200	0,5	12,398	0,125	0,3
$R_{f1}=2 [\Omega]$	12	10	4,091	4,320	0,229	0,6	4,209	0,118	0,3
$R_{f2}=4 [\Omega]$		20	8,182	8,390	0,208	0,5	8,304	0,122	0,3
$R_{f3}=6 [\Omega]$		30	12,273	12,469	0,196	0,5	12,398	0,125	0,3

Naměřené hodnoty napětí a proudů jsou vloženy v příloze A.1 – Tabulka 6.9. Zde byl kladen důraz na citlivostní analýzu trojfázového zemního zkratu se zemním poměrem $k = 0,5$, nesymetrii odporů fázových vodičů a nesymetrii odporů poruchy – zkratu. Z vypočítaných hodnot zobrazených v tabulce vyplývá, že se zvětšující se hodnotou odporu poruchy – zkratu dochází k mírnému zlepšení přesnosti výpočtu při užití metody výpočtu č.1. Naopak v případě užití metody výpočtu č.2 vyplývá větší přesnost v případě doměření vzdálenosti poruchy. Proto je výhradně doporučeno použití této metody při estimaci vzdálenosti poruchy. **Obecně lze říct, že metoda výpočtu č.2 omezuje do určité míry vliv nesymetrie odporů poruch.**

5. SHRUTÍ POZNATKŮ ZE SIMULACE

V této kapitole jsou blíže popsány poznatky, které byly zjištěny v průběhu zpracování bakalářské práce.

5.1 Výběr vhodných vzorců pro výpočet reaktance poruchové smyčky

Z vypočítaných hodnot zobrazených v předchozí kapitole vyplývá pár poznatků, které je důležité zmínit. V případě vzniku jednofázového zemního zkratu je snaha použití vzorce metody výpočtu č.1 pro výpočet reaktance poruchové smyčky, jelikož metoda č.2 zanedbává pár faktorů, které nejsou uvedeny ve vzorci výpočtu jako je např. fázový posun zemního proudu. Díky tomuto zanedbání zde vzniká větší nepřesnost oproti metodě výpočtu č.1, a to především pokud se jedná o zkrat, který je ve vzdálenosti větší jak $l = 10$ km, kde s rostoucí vzdáleností chyba výpočtu exponenciálně narůstá.

U dvoufázového a dvoufázového zemního zkratu je možnost vypočítat reaktanci poruchové smyčky pomocí dvou metod výpočtu, avšak tyto metody se od sebe liší pouhým zjednodušením a modifikací vzorce. Proto je možné užít obě tyto metody, jelikož nezpůsobují rozdíl jednotlivých výsledků a jsou totožné.

Pokud se jedná o trojfázový a trojfázový zemní zkrat, tak jsou zde popsány dvě metody výpočtu. V případě, že se bude jednat o nesymetrii odporů poruch při 3f zkratu, tak je výhradně doporučeno použít metodu výpočtu č.2. Tato metoda do určité míry omezuje vliv těchto nesymetrických odporů. Naopak metoda výpočtu č.1 tento vliv nijak neomezuje, a proto dochází k horší estimaci výsledků vypočtené reaktance. Dále je důležité zmínit, že v případě 3f zkratu je potřeba vypočítat reaktanci mezi všemi fázemi, tedy L1-L2, L2-L3 a L3-L1. Tyto vypočtené hodnoty je potřeba následně zprůměrovat a poté je získána výsledná reaktance X_L .

5.2 Největší způsobené chyby při modelaci vedení a jejich výpočtu

Chyba výpočtu reaktance poruchové smyčky je ovlivněna protékajícím poruchovým proudem, proto dle teoretických předpokladů vyplývá, že čím menší bude poruchový proud, tím bude docházet k větší nepřesnosti a chybě výpočtu, proto při nulových hodnotách odporů poruch je výpočet nejpřesnější. Z tohoto lze také usoudit, že v případě vzniku zkratu na elektrickém vedení by bylo ideální, aby odpory poruch dosahovali nulových hodnot, což v případě reálného elektrického vedení je nemožné a je to pouze teoretické. Zde jsou zrekapitulovány největší chyby výpočtu, které byly zpozorovány při citlivostní analýze.

Při modelaci jednofázového zemního zkratu je patrné ze zobrazených hodnot, že zemní poměr k má vliv na výpočet reaktance, a zároveň lze pozorovat vliv zatížení vedení, který zde způsobuje nepřesnost výpočtu. Největší nepřesnost výpočtu jednofázového zemního zkratu vznikla v konfiguraci, kdy odpor fázového vodiče L1 nabýval hodnoty 6Ω a odpor poruchy – zkratu nabýval hodnoty 8Ω . Zde byla způsobena chyba výpočtu $\Delta X = 0,504 \Omega$, což odpovídalo rozdílu vypočtené vzdálenosti o hodnotě $\Delta l_{zk} = 1,2 \text{ km}$.

V případě dvoufázového zkratu došlo k největší nepřesnosti výpočtu při největší nesymetrii odporů fázových vodičů, tedy kde $R_{fL1} = 4 \Omega$ a $R_{fL2} = 6 \Omega$. Zde absolutní chyba vypočtené reaktance dosáhla hodnoty $\Delta X = 0,184 \Omega$, a to způsobilo rozdíl vypočtené vzdálenosti o $\Delta l_{zk} = 0,5 \text{ km}$.

Naproti tomu u dvoufázového zemního zkratu je opět viditelná největší nepřesnost v případě největší nesymetrie odporů fázových vodičů, kde ze zobrazené tabulky 4.10 vyplývá, že největší nepřesnost není způsobena součtem všech odporů v poruchové smyčce, ale jedná se zde o rozdíl mezi odpory jednotlivých fází. Tedy v případě, kdy se jedná o zkrat L1-L2-E, tak největší chyby výpočtu jsou v případě konfigurace, kdy rozdíl odporů mezi fázemi je největší, tedy kde $R_{fL1} = 6 \Omega$ a $R_{fL2} = 0 \Omega$. Absolutní chyba vypočtené reaktance odpovídá hodnotě $\Delta X = 1,124 \Omega$, což způsobilo rozdíl ve vypočtené vzdálenosti $\Delta l_{zk} = 2,7 \text{ km}$. Z těchto výsledků lze usoudit, že s narůstajícím rozdílem hodnot odporů fázových vodičů bude docházet ke stále větší chybě a nepřesnosti výpočtu.

U trojfázového zkratu si lze povšimnout, že v případě nesymetrie odporů fázových vodičů ve všech možných kombinacích nedochází k rozdílnému výsledku. To je způsobeno tím, že vypočtené reaktance jednotlivých poruchových smyček se vždy průměrují. To stejné platí pro trojfázový zemní zkrat.

6. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo ověření metody výpočtu pro doměření vzdálenosti zkratu na jednostranně napájeném vedení VVN. Úvodní část bakalářské práce se zabývala rešerší používaných metod a popisem vhodných rovnic pro jednotlivé poruchové smyčky a podrobnější informace ohledně zkratů na elektrickém vedení. Další částí práce bylo ověření jednotlivých rovnic za použití nasimulovaných poruchových záznamů, ze kterých se zpětně dopočítala pomocí rovnic reaktance poruchové smyčky a porovnala se s reaktancí nastavenou v programu PSCAD. Dále byla zpracována podrobnější citlivostní analýza pro jednotlivé druhy zkratů a bylo zde zkoumáno, při jakých konfiguracích modelu vedení dochází k selhání metody výpočtu, tedy kdy narůstá absolutní chyba ΔX a rozdíl vypočtené vzdálenosti Δl_{zk} .

Nasimulované poruchové záznamy byly počítány pomocí softwaru Matlab, kde zároveň došlo k ověření jednotlivých použitých vzorců a metod výpočtu pro všechny druhy zkratů. Také zde došlo k ověření kódu při různých postižených fázích např. při jednofázovém zemním zkratu. Z tohoto lze usoudit, že vzorce pro všechny možné poruchové smyčky v případě jednofázového zemního zkratu počítají a zobrazují totožné výsledky.

Z vypočtených hodnot a zobrazených tabulek v předchozích kapitolách je patrné, že v případě zkratů je největší problém při nesymetrii odporů poruch, a naopak největší přesnost se vyskytuje v případě nulových odporů poruch a nulového zatížení vedení, což však v případě reálných poruch téměř nikdy nenastává. Dále v předchozí kapitole 5.1 bylo uvedeno doporučení na užití diskutovaných metod výpočtu při různých typech zkratů, aby došlo k nejpřesnější estimaci výsledků.

LITERATURA

- [1] *PNE 33 3070 01.01.2021: Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí.*
- [2] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2022-11-19]. ISBN ISBN978-80-01-04935-8.
- [3] Elektrizační a přenosová soustava. In: Svět energie [online]. 2020 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektřiny/distribuce-elektrické-energie-podrobne/elektrizacni-a-prenosova-soustava/vyklad>
- [4] Distribuční soustava. In: *Svět energie* [online]. 2020. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elektřiny/distribuce-elektrické-energie-podrobne/distribucni-soustava/vyklad>
- [5] Rozvodné sítě TN, IT a TT - popis, výhody a nevýhody. In: O energetice [online]. 2015 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/rozvodne-site-tn-it-tt>
- [6] STRUSKA, Jan. *Hodnocení provozu transformátorů VN/NN s regulací napětí pod zatížením*. 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni - fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
- [7] Prvky distribučních sítí 03: Transformátory. In: Energetika info [online]. 2019 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.energetikainfo.cz/33/prvky-distribucnich-siti-03-transformatory-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EIDzoblDhBp5PauJSfzpaB-w9PBWuC7BmQ/?ns=1650548093>
- [8] Distribuční sítě vysokého napětí 01: Úvod. In: Energetika info [online]. 2019 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: https://www.energetikainfo.cz/33/distribucni-site-vysokeho-napeti-01-uvod-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EIDzoblDhBp5S55171qcyf_2ZspOsA8wwA/
- [9] Silnoproudá zařízení a elektroenergetika. In: Frengp [online]. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.frengp.cz/source/projekty/sablona-vystupy/siz-eeen/sada1/vy-inovace-siz-a-eeen-14.pdf>
- [10] Příručka nejen pro provozního pracovníka [online]. Brno, 2021 [cit. 2023-01-03].

- [11] DOHNÁLEK, Petr. *Ochrany pro průmysl a energetiku*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1991. ISBN 80-030-0630-9.
- [12] ZIEGLER, Gerhard. *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. Second Edition. Germany, 2006. ISBN 3-89578-266-1.
- [13] HORÁK, Martin. *Komplexný systém lokalizácie porúch v sieťach 22 kV*. In: Konferencia ČK CIRED [online]. 2021 [cit. 2022-11-27].
- [14] Relay training: Principles *and Practice* [online]. In: . s. 10 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: https://relaytraining.com/updatefiles/TRTH-A_38-46.pdf
- [15] IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines. 2014. ISBN 978-0-7381-9421-9.

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - NAMĚŘENÉ HODNOTY Z PROGRAMU PSCAD	50
---	----

Příloha A - Naměřené hodnoty z programu PSCAD

A.1 Tabulka naměřených hodnot

Tabulka 6.1 Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů při nulových hodnotách odporů poruch a nulovém zatížení

Zemní poměr	Druh zkratu	Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	l [km]	Změřené hodnoty napětí a proudů											
					U_{l1} [V]	$\varphi_{U_{l1}}$ [°]	U_{l2} [V]	$\varphi_{U_{l2}}$ [°]	U_{l3} [V]	$\varphi_{U_{l3}}$ [°]	I_{l1} [A]	$\varphi_{I_{l1}}$ [°]	I_{l2} [A]	$\varphi_{I_{l2}}$ [°]	I_{l3} [A]	$\varphi_{I_{l3}}$ [°]
k = 0,5	L1-E	$R_{\beta 1}=0$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	39810	22,6	61649	149,4	62113	-90,9	6208	-46,4	499	80,9	438	-142,6
		20		48983	25,4	61863	149,6	62246	-91,1	3842	-43,4	431	76,6	442	-135,3	
		30		53110	26,6	62086	149,8	62393	-91,3	2768	-41,8	363	69,8	456	-127,4	
	L1-L2	$R_{\beta 1}=0$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	39379	41,7	45549	128,6	61778	-90,9	6614	-76,3	6778	99,6	503	-149,3
		20		47046	34,9	51378	137,2	61837	-90,9	4319	-72,0	4449	101,9	485	-149,6	
		30		51121	32,7	54303	140,9	61892	-90,8	3201	-69,5	3313	102,5	468	-149,7	
	L1-L2-E	$R_{\beta 1}=0$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	35655	28,4	37387	135,1	61944	-90,7	7042	-56,6	7326	80,8	439	-153,0
		20		45422	28,5	46983	140,7	62170	-90,7	4581	-54,9	4732	85,3	390	-149,0	
		30		50133	28,7	51394	143,3	62400	-90,7	3393	-53,8	3499	87,3	341	-144,2	
	L1-L2-L3	$R_{\beta 1}=0$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	33834	20,8	33834	140,8	33834	-99,2	7727	-48,3	7727	71,7	7727	-168,3
		20		44281	24,0	44281	144,0	44281	-96,0	5055	-45,1	5055	74,9	5055	-165,1	
		30		49307	25,5	49307	145,5	49307	-94,5	3752	-43,6	3752	76,4	3752	-163,6	
	L1-L2-L3-E	$R_{\beta 1}=0$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	33835	20,8	33835	140,8	33835	-99,2	7727	-48,3	7727	71,7	7727	-168,3
		20		44281	24,0	44281	144,0	44281	-96,0	5055	-45,1	5055	74,9	5055	-165,1	
		30		49308	25,5	49308	145,5	49308	-94,5	3752	-43,6	3752	76,4	3752	-163,6	
k = 1,5	L1-E	$R_{\beta 1}=0$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	46353	24,5	61656	149,2	61944	-90,9	4528	-44,2	516	86,0	461	-148,0
		20		53572	26,6	61923	149,5	62094	-91,1	2655	-41,1	428	81,7	467	-138,9	
		30		56731	27,5	62202	149,7	62269	-91,4	1839	-38,3	338	73,9	488	-129,1	
	L1-L2-E	$R_{\beta 1}=0$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	37144	34,0	40549	131,9	61806	-90,8	6714	-64,2	7065	88,2	483	-151,9
		20		46180	31,4	48915	138,9	62057	-90,8	4390	-62,4	4578	92,7	428	-147,8	
		30		50650	30,7	52757	142,0	62308	-90,8	3251	-61,2	3395	94,5	375	-142,9	
	L1-L2-L3-E	$R_{\beta 1}=0$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	33835	20,8	33835	140,8	33835	-99,2	7727	-48,3	7727	71,7	7727	-168,3
		20		44281	24,0	44281	144,0	44281	-96,0	5055	-45,1	5055	74,9	5055	-165,1	
		30		49308	25,5	49308	145,5	49308	-94,5	3752	-43,6	3752	76,4	3752	-163,6	
k = 3	L1-E	$R_{\beta 1}=0$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	51124	25,8	61729	149,1	61839	-90,9	3297	-42,1	508	88,9	487	-149,0
		20		56647	27,4	62031	149,4	62019	-91,2	1866	-38,0	405	83,9	495	-138,6	
		30		59134	27,9	62354	149,7	62211	-91,5	1241	-32,5	300	74,7	525	-127,9	
	L1-L2-E	$R_{\beta 1}=0$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	37967	37,0	42378	130,5	61705	-90,8	6624	-68,7	6942	92,4	512	-151,9
		20		46543	32,8	49893	138,2	61977	-90,8	4338	-66,3	4520	96,3	451	-147,9	
		30		50886	31,5	53411	141,5	62242	-90,8	3211	-64,8	3361	98,0	394	-143,2	
	L1-L2-L3-E	$R_{\beta 1}=0$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	33835	20,8	33835	140,8	33835	-99,2	7727	-48,3	7727	71,7	7727	-168,3
		20		44281	24,0	44281	144,0	44281	-96,0	5055	-45,1	5055	74,9	5055	-165,1	
		30		49308	25,5	49308	145,5	49308	-94,5	3752	-43,6	3752	76,4	3752	-163,6	

Tabulka 6.2 Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů při stejných hodnotách odporů poruch

Zemní poměr	Druh zkratu	Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	l [km]	Změřené hodnoty napětí a proudů											
					U_{L1} [V]	$\varphi_{U_{L1}}$ [°]	U_{L2} [V]	$\varphi_{U_{L2}}$ [°]	U_{L3} [V]	$\varphi_{U_{L3}}$ [°]	I_{L1} [A]	$\varphi_{I_{L1}}$ [°]	I_{L2} [A]	$\varphi_{I_{L2}}$ [°]	I_{L3} [A]	$\varphi_{I_{L3}}$ [°]
k = 0,5	L1-E	$R_{\phi 1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	51696	16,6	61480	149,2	61892	-90,9	4497	-16,4	563	85,6	479	-147,5
		$R_{\phi 2}=4$ [Ω]		20	53541	22,3	61619	149,4	62120	-91,0	3204	-24,0	504	79,9	451	-140,1
		$R_{\phi 3}=4$ [Ω]		30	55318	24,9	61809	149,7	62321	-91,2	2460	-28,2	439	73,3	446	-131,4
	L1-L2	$R_{\phi 1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	41574	27,0	55907	130,1	61668	-91,0	5581	-52,9	5553	121,6	539	-148,7
		$R_{\phi 2}=4$ [Ω]		20	48161	29,2	56103	137,0	61733	-90,9	3881	-55,9	3889	116,4	518	-148,9
		$R_{\phi 3}=4$ [Ω]		30	51765	29,7	56952	140,6	61794	-90,9	2967	-57,1	2991	113,3	499	-149,2
	L1-L2-E	$R_{\phi 1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	44149	19,9	50087	129,0	61679	-90,8	5428	-37,4	6203	108,4	515	-152,8
		$R_{\phi 2}=4$ [Ω]		20	49017	24,5	52067	137,6	61923	-90,7	3905	-40,7	4256	102,8	449	-152,1
		$R_{\phi 3}=4$ [Ω]		30	51998	26,4	54089	141,6	62175	-90,7	3050	-42,7	3220	99,8	387	-149,4
	L1-L2-L3	$R_{\phi 1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	44365	11,9	44365	131,9	44365	-108,1	6421	-25,7	6421	94,3	6421	-145,7
		$R_{\phi 2}=4$ [Ω]		20	48727	19,9	48727	139,9	48727	-100,1	4476	-29,8	4476	90,2	4476	-149,8
		$R_{\phi 3}=4$ [Ω]		30	51729	23,3	51729	143,3	51729	-96,7	3428	-32,0	3428	88,0	3428	-152,0
	L1-L2-L3-E	$R_{\phi 1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	44367	11,9	44367	131,9	44367	-108,1	6420	-25,7	6420	94,3	6420	-145,7
		$R_{\phi 2}=4$ [Ω]		20	48728	19,9	48728	139,9	48728	-100,1	4476	-29,8	4476	90,2	4476	-149,8
		$R_{\phi 3}=4$ [Ω]		30	51730	23,3	51730	143,3	51730	-96,7	3428	-32,0	3428	88,0	3428	-152,0
k = 1,5	L1-E	$R_{\phi 1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	52615	20,5	61559	149,1	61772	-90,9	3660	-21,8	556	88,6	508	-148,8
		$R_{\phi 2}=4$ [Ω]		20	55481	25,1	61751	149,3	61995	-91,1	2401	-28,5	479	83,2	488	-140,6
		$R_{\phi 3}=4$ [Ω]		30	57489	26,8	62010	149,6	62193	-91,3	1740	-31,0	392	76,1	497	-131,1
	L1-L2-E	$R_{\phi 1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	42720	21,5	51683	130,1	61662	-90,9	5603	-41,9	5830	111,2	530	-150,7
		$R_{\phi 2}=4$ [Ω]		20	48282	26,2	53699	137,8	61913	-90,9	3957	-46,7	4000	107,3	467	-148,6
		$R_{\phi 3}=4$ [Ω]		30	51673	27,8	55423	141,3	62168	-90,8	3040	-49,1	3049	105,2	410	-144,6
	L1-L2-L3-E	$R_{\phi 1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	44367	11,9	44367	131,9	44367	-108,1	6420	-25,7	6420	94,3	6420	-145,7
		$R_{\phi 2}=4$ [Ω]		20	48728	19,9	48728	139,9	48728	-100,1	4476	-29,8	4476	90,2	4476	-149,8
		$R_{\phi 3}=4$ [Ω]		30	51730	23,3	51730	143,3	51730	-96,7	3428	-32,0	3428	88,0	3428	-152,0
k = 3	L1-E	$R_{\phi 1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	54194	23,5	61638	149,0	61707	-91,0	2888	-26,2	542	90,3	529	-148,4
		$R_{\phi 2}=4$ [Ω]		20	57400	26,7	61884	149,3	61930	-91,2	1774	-30,6	448	84,8	520	-139,2
		$R_{\phi 3}=4$ [Ω]		30	59338	27,7	62207	149,6	62110	-91,5	1221	-29,3	343	77,7	546	-129,7
	L1-L2-E	$R_{\phi 1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	41979	23,0	53018	130,4	61674	-91,0	5663	-45,4	5637	114,1	534	-149,2
		$R_{\phi 2}=4$ [Ω]		20	48096	27,3	54657	137,6	61936	-90,9	3947	-50,3	3915	110,7	473	-146,2
		$R_{\phi 3}=4$ [Ω]		30	51675	28,6	56096	141,0	62194	-90,9	3009	-52,5	3009	108,6	418	-141,5
	L1-L2-L3-E	$R_{\phi 1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	44367	11,9	44367	131,9	44367	-108,1	6420	-25,7	6420	94,3	6420	-145,7
		$R_{\phi 2}=4$ [Ω]		20	48728	19,9	48728	139,9	48728	-100,1	4476	-29,8	4476	90,2	4476	-149,8
		$R_{\phi 3}=4$ [Ω]		30	51730	23,3	51730	143,3	51730	-96,7	3428	-32,0	3428	88,0	3428	-152,0

Tabulka 6.3 Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů –
podrobnější analýza jednofázového zemního zkratu ve vzdálenosti $l = 10$ km a nulovém zatížení

Zemní poměr	Druh zkratu	Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	l [km]	Změřené hodnoty napětí a proudů											
					U_{l1} [V]	$\varphi_{U_{l1}}$ [°]	U_{l2} [V]	$\varphi_{U_{l2}}$ [°]	U_{l3} [V]	$\varphi_{U_{l3}}$ [°]	I_{l1} [A]	$\varphi_{I_{l1}}$ [°]	I_{l2} [A]	$\varphi_{I_{l2}}$ [°]	I_{l3} [A]	$\varphi_{I_{l3}}$ [°]
$k = 0,5$	L1-E	$R_{\text{fáz}}=2$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	42848	18,3	61605	149,3	62094	-90,9	5865	-36,6	513	81,7	433	-144,6
			$R_f=4$ [Ω]	10	49298	16,2	61578	149,3	62024	-90,8	4938	-21,6	529	83,9	438	-147,8
			$R_f=8$ [Ω]	10	53664	17,4	61592	149,2	61961	-90,8	4087	-12,1	532	85,7	449	-149,4
		$R_{\text{fáz}}=4$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	46258	16,5	61584	149,3	62061	-90,8	5413	-28,4	523	82,8	434	-146,4
			$R_f=4$ [Ω]	10	51756	16,6	61583	149,2	61990	-90,8	4489	-16,3	532	84,9	443	-148,8
			$R_f=8$ [Ω]	10	55131	18,2	61604	149,2	61936	-90,8	3737	-8,7	532	86,3	454	-149,9
		$R_{\text{fáz}}=6$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	49298	16,2	61578	149,3	62024	-90,8	4938	-21,6	529	83,9	438	-147,8
			$R_f=4$ [Ω]	10	53665	17,4	61592	149,2	61961	-90,8	4087	-12,1	532	85,7	449	-149,4
			$R_f=8$ [Ω]	10	56261	19,0	61615	149,2	61916	-90,8	3434	-6,1	531	86,9	459	-150,1
$k = 1,5$	L1-E	$R_{\text{fáz}}=2$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	47839	22,5	61648	149,2	61929	-90,8	4353	-37,4	520	86,4	462	-148,7
			$R_f=4$ [Ω]	10	51170	20,7	61647	149,2	61895	-90,8	3890	-26,2	525	87,4	467	-149,8
			$R_f=8$ [Ω]	10	53958	20,6	61658	149,1	61866	-90,8	3414	-18,0	525	88,2	473	-150,3
		$R_{\text{fáz}}=4$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	49521	21,3	61645	149,2	61912	-90,8	4132	-31,4	523	86,9	464	-149,3
			$R_f=4$ [Ω]	10	52664	20,5	61652	149,1	61880	-90,8	3647	-21,7	525	87,9	470	-150,1
			$R_f=8$ [Ω]	10	55052	20,9	61665	149,1	61854	-90,8	3198	-14,9	525	88,6	475	-150,5
		$R_{\text{fáz}}=6$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	51170	20,7	61647	149,2	61895	-90,8	3890	-26,2	525	87,4	467	-149,8
			$R_f=4$ [Ω]	10	53958	20,6	61658	149,1	61866	-90,8	3414	-18,0	525	88,2	473	-150,3
			$R_f=8$ [Ω]	10	55967	21,2	61672	149,1	61844	-90,8	2999	-12,2	524	88,8	478	-150,6
$k = 3$	L1-E	$R_{\text{fáz}}=2$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	51844	25,0	61727	149,1	61835	-90,9	3209	-37,6	510	89,0	487	-149,2
			$R_f=4$ [Ω]	10	53454	23,9	61727	149,1	61826	-90,9	2990	-29,6	511	89,3	488	-149,5
			$R_f=8$ [Ω]	10	54983	23,4	61729	149,1	61817	-90,9	2749	-23,3	512	89,6	490	-149,7
		$R_{\text{fáz}}=4$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	52640	24,3	61726	149,1	61830	-90,9	3105	-33,4	510	89,2	488	-149,3
			$R_f=4$ [Ω]	10	54243	23,6	61728	149,1	61821	-90,9	2869	-26,3	511	89,4	489	-149,6
			$R_f=8$ [Ω]	10	55660	23,4	61731	149,1	61813	-90,9	2630	-20,6	512	89,7	491	-149,7
		$R_{\text{fáz}}=6$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	53454	23,9	61727	149,1	61826	-90,9	2990	-29,6	511	89,3	488	-149,5
			$R_f=4$ [Ω]	10	54983	23,4	61729	149,1	61817	-90,9	2749	-23,3	512	89,6	490	-149,7
			$R_f=8$ [Ω]	10	56270	23,4	61733	149,1	61809	-90,9	2517	-18,3	512	89,8	492	-149,8

Tabulka 6.4 Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů –
podrobnější analýza jednofázového zemního zkratu ve vzdálenosti $l = 10$ km a zatížení 18,9 MW

Zemní poměr	Druh zkratu	Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	l [km]	Změřené hodnoty napětí a proudů											
					U_{l1} [V]	$\varphi_{U_{l1}}$ [°]	U_{l2} [V]	$\varphi_{U_{l2}}$ [°]	U_{l3} [V]	$\varphi_{U_{l3}}$ [°]	I_{l1} [A]	$\varphi_{I_{l1}}$ [°]	I_{l2} [A]	$\varphi_{I_{l2}}$ [°]	I_{l3} [A]	$\varphi_{I_{l3}}$ [°]
$k = 0,5$	L1-E	$R_{\eta 1}=2$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	42833	18,3	61512	149,3	61991	-91,0	5870	-36,6	542	82,7	471	-143,4
			$R_f=4$ [Ω]	10	49255	16,2	61478	149,2	61925	-90,9	4944	-21,7	560	84,7	474	-146,5
			$R_f=8$ [Ω]	10	53591	17,4	61487	149,1	61862	-90,9	4097	-12,3	565	86,3	484	-148,2
		$R_{\eta 1}=4$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	46231	16,5	61486	149,2	61961	-90,9	5418	-28,4	553	83,7	471	-145,2
			$R_f=4$ [Ω]	10	51696	16,6	61480	149,2	61892	-90,9	4497	-16,4	563	85,6	479	-147,5
			$R_f=8$ [Ω]	10	55047	18,2	61497	149,1	61837	-90,9	3748	-9,0	565	87,0	489	-148,7
		$R_{\eta 1}=6$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	49255	16,2	61478	149,2	61925	-90,9	4944	-21,7	560	84,6	474	-146,5
			$R_f=4$ [Ω]	10	53592	17,4	61487	149,1	61862	-90,9	4097	-12,3	565	86,3	484	-148,2
			$R_f=8$ [Ω]	10	56168	18,9	61508	149,1	61817	-90,9	3447	-6,4	565	87,5	494	-149,0
$k = 1,5$	L1-E	$R_{\eta 1}=2$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	47810	22,5	61562	149,1	61814	-91,0	4365	-37,3	549	87,5	502	-147,5
			$R_f=4$ [Ω]	10	51131	20,7	61556	149,1	61786	-90,9	3903	-26,2	555	88,3	505	-148,5
			$R_f=8$ [Ω]	10	53900	20,6	61563	149,1	61759	-90,9	3428	-18,1	556	89,0	510	-149,0
		$R_{\eta 1}=4$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	49489	21,3	61557	149,1	61800	-90,9	4144	-31,3	553	87,9	503	-148,0
			$R_f=4$ [Ω]	10	52615	20,5	61559	149,1	61772	-90,9	3660	-21,8	556	88,6	508	-148,8
			$R_f=8$ [Ω]	10	54985	20,8	61568	149,0	61748	-90,9	3212	-15,0	556	89,2	512	-149,2
		$R_{\eta 1}=6$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	51131	20,7	61556	149,1	61786	-90,9	3903	-26,2	555	88,3	505	-148,5
			$R_f=4$ [Ω]	10	53900	20,6	61563	149,1	61759	-90,9	3428	-18,1	556	88,9	510	-149,0
			$R_f=8$ [Ω]	10	55891	21,2	61573	149,0	61739	-90,9	3015	-12,5	556	89,5	515	-149,3
$k = 3$	L1-E	$R_{\eta 1}=2$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	51797	24,9	61641	149,0	61715	-91,0	3229	-37,3	540	90,1	528	-148,1
			$R_f=4$ [Ω]	10	53408	23,8	61638	149,0	61710	-91,0	3008	-29,5	541	90,2	528	-148,3
			$R_f=8$ [Ω]	10	54930	23,4	61638	149,0	61704	-91,0	2767	-23,3	542	90,4	529	-148,5
		$R_{\eta 1}=4$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	52595	24,2	61639	149,0	61713	-91,0	3124	-33,2	541	90,1	528	-148,2
			$R_f=4$ [Ω]	10	54194	23,5	61638	149,0	61707	-91,0	2888	-26,2	542	90,3	529	-148,4
			$R_f=8$ [Ω]	10	55601	23,3	61638	149,0	61702	-91,0	2649	-20,7	543	90,4	529	-148,6
		$R_{\eta 1}=6$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	53408	23,8	61638	149,0	61710	-91,0	3008	-29,5	541	90,2	528	-148,3
			$R_f=4$ [Ω]	10	54930	23,4	61638	149,0	61704	-91,0	2767	-23,3	542	90,4	529	-148,5
			$R_f=8$ [Ω]	10	56205	23,4	61639	149,0	61699	-91,0	2536	-18,4	543	90,5	530	-148,6

Tabulka 6.5 Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů –
podrobnější analýza jednofázového zemního zkratu ve vzdálenosti $l = 30$ km a zatížení 18,9 MW

Zemní poměr	Druh zkratu	Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	l [km]	Změřené hodnoty napětí a proudů											
					U_{L1} [V]	$\varphi_{U_{L1}}$ [°]	U_{L2} [V]	$\varphi_{U_{L2}}$ [°]	U_{L3} [V]	$\varphi_{U_{L3}}$ [°]	I_{L1} [A]	$\varphi_{I_{L1}}$ [°]	I_{L2} [A]	$\varphi_{I_{L2}}$ [°]	I_{L3} [A]	$\varphi_{I_{L3}}$ [°]
$k = 0,5$	L1-E	$R_{\text{fáz}}=2$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	30	53611	25,9	61953	149,7	62305	-91,3	2709	-37,8	400	72,2	479	-128,6
			$R_f=4$ [Ω]	30	54753	25,1	61850	149,7	62323	-91,2	2548	-31,1	427	72,7	455	-130,3
			$R_f=8$ [Ω]	30	55857	24,8	61775	149,6	62314	-91,2	2372	-25,6	449	73,9	439	-132,5
		$R_{\text{fáz}}=4$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	30	54176	25,5	61898	149,7	62318	-91,3	2631	-34,3	414	72,4	466	-129,4
			$R_f=4$ [Ω]	30	55318	24,9	61809	149,7	62321	-91,2	2460	-28,2	439	73,3	446	-131,4
			$R_f=8$ [Ω]	30	56359	24,7	61746	149,6	62304	-91,1	2285	-23,3	457	74,6	434	-133,6
		$R_{\text{fáz}}=6$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	30	54753	25,1	61850	149,7	62323	-91,2	2547	-31,1	427	72,7	455	-130,3
			$R_f=4$ [Ω]	30	55857	24,8	61775	149,6	62314	-91,2	2372	-25,6	449	73,9	439	-132,5
			$R_f=8$ [Ω]	30	56822	24,7	61723	149,6	62291	-91,1	2201	-21,3	465	75,2	430	-134,8
$k = 1,5$	L1-E	$R_{\text{fáz}}=2$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	30	56877	27,2	62100	149,6	62160	-91,4	1832	-36,0	369	76,6	519	-130,3
			$R_f=4$ [Ω]	30	57286	26,9	62038	149,6	62185	-91,4	1772	-32,5	384	76,2	504	-130,8
			$R_f=8$ [Ω]	30	57690	26,7	61984	149,6	62199	-91,3	1708	-29,5	398	76,1	491	-131,5
		$R_{\text{fáz}}=4$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	30	57081	27,0	62068	149,6	62174	-91,4	1802	-34,2	377	76,3	511	-130,5
			$R_f=4$ [Ω]	30	57489	26,8	62010	149,6	62193	-91,3	1740	-31,0	392	76,1	497	-131,1
			$R_f=8$ [Ω]	30	57885	26,7	61959	149,6	62203	-91,3	1676	-28,1	405	76,2	486	-131,9
		$R_{\text{fáz}}=6$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	30	57286	26,9	62038	149,6	62185	-91,4	1772	-32,5	384	76,2	504	-130,8
			$R_f=4$ [Ω]	30	57690	26,7	61984	149,6	62199	-91,3	1708	-29,5	398	76,1	491	-131,5
			$R_f=8$ [Ω]	30	58074	26,6	61937	149,6	62205	-91,3	1644	-26,8	411	76,4	481	-132,4
$k = 3$	L1-E	$R_{\text{fáz}}=2$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	30	59130	27,8	62262	149,7	62089	-91,5	1258	-31,2	329	78,1	559	-129,2
			$R_f=4$ [Ω]	30	59270	27,7	62225	149,7	62104	-91,5	1233	-29,9	338	77,8	550	-129,5
			$R_f=8$ [Ω]	30	59404	27,7	62190	149,6	62115	-91,5	1208	-28,8	347	77,6	542	-129,8
		$R_{\text{fáz}}=4$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	30	59201	27,8	62243	149,7	62097	-91,5	1245	-30,5	334	77,9	554	-129,3
			$R_f=4$ [Ω]	30	59338	27,7	62207	149,6	62110	-91,5	1221	-29,3	343	77,7	546	-129,7
			$R_f=8$ [Ω]	30	59468	27,7	62174	149,6	62119	-91,5	1196	-28,2	351	77,6	538	-130,0
		$R_{\text{fáz}}=6$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	30	59270	27,7	62225	149,7	62104	-91,5	1233	-29,9	338	77,8	550	-129,5
			$R_f=4$ [Ω]	30	59404	27,7	62190	149,6	62115	-91,5	1208	-28,8	347	77,6	542	-129,8
			$R_f=8$ [Ω]	30	59531	27,7	62159	149,6	62123	-91,5	1184	-27,7	355	77,6	534	-130,2

Tabulka 6.6 Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů – nesymetrie odporů poruchy – 2f zkrat

Zemní poměr	Druh zkratu	Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	l [km]	Změřené hodnoty napětí a proudů											
					U_{L1} [V]	$\varphi_{U_{L1}}$ [°]	U_{L2} [V]	$\varphi_{U_{L2}}$ [°]	U_{L3} [V]	$\varphi_{U_{L3}}$ [°]	I_{L1} [A]	$\varphi_{I_{L1}}$ [°]	I_{L2} [A]	$\varphi_{I_{L2}}$ [°]	I_{L3} [A]	$\varphi_{I_{L3}}$ [°]
k = 0,5	L1-L2	$R_{fL1}=2$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	40195	29,5	53859	129,0	61668	-91,0	5889	-57,8	5905	117,0	539	-148,7
				20	47637	30,3	55042	136,8	61733	-90,9	4009	-59,5	4047	113,2	518	-148,9
				30	51499	30,3	56325	140,5	61794	-90,9	3034	-59,9	3081	110,8	499	-149,2
			$R_f=4$ [Ω]	10	40195	29,5	53859	129,0	61668	-91,0	5889	-57,8	5905	117,0	539	-148,7
				20	47637	30,3	55042	136,8	61733	-90,9	4009	-59,5	4047	113,2	518	-148,9
				30	51499	30,3	56325	140,5	61794	-90,9	3034	-59,9	3081	110,8	499	-149,2
			$R_f=8$ [Ω]	10	40195	29,5	53859	129,0	61668	-91,0	5889	-57,8	5905	117,0	539	-148,7
				20	47637	30,3	55042	136,8	61733	-90,9	4009	-59,5	4047	113,2	518	-148,9
				30	51499	30,3	56325	140,5	61794	-90,9	3034	-59,9	3081	110,8	499	-149,2
		$R_{fL1}=6$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	41575	27,0	55906	130,1	61668	-91,0	5581	-52,9	5553	121,6	539	-148,7
				20	48161	29,2	56103	137,0	61733	-90,9	3881	-55,9	3889	116,4	518	-148,9
				30	51765	29,7	56952	140,6	61794	-90,9	2967	-57,1	2991	113,3	499	-149,2
			$R_f=4$ [Ω]	10	41575	27,0	55906	130,1	61668	-91,0	5581	-52,9	5553	121,6	539	-148,7
				20	48161	29,2	56103	137,0	61733	-90,9	3881	-55,9	3889	116,4	518	-148,9
				30	51765	29,7	56952	140,6	61794	-90,9	2967	-57,1	2991	113,3	499	-149,2
			$R_f=8$ [Ω]	10	41575	27,0	55906	130,1	61668	-91,0	5581	-52,9	5553	121,6	539	-148,7
				20	48161	29,2	56103	137,0	61733	-90,9	3881	-55,9	3889	116,4	518	-148,9
				30	51765	29,7	56952	140,6	61794	-90,9	2967	-57,1	2991	113,3	499	-149,2
		$R_{fL1}=4$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	43088	25,2	57557	131,2	61668	-91,0	5273	-48,6	5207	125,5	539	-148,7
				20	48763	28,2	57046	137,3	61733	-90,9	3749	-52,7	3729	119,3	518	-148,9
				30	52073	29,1	57534	140,7	61794	-90,9	2896	-54,6	2899	115,6	499	-149,2
			$R_f=4$ [Ω]	10	43088	25,2	57557	131,2	61668	-91,0	5273	-48,6	5207	125,5	539	-148,7
				20	48763	28,2	57046	137,3	61733	-90,9	3749	-52,7	3729	119,3	518	-148,9
				30	52073	29,1	57534	140,7	61794	-90,9	2896	-54,6	2899	115,6	499	-149,2
			$R_f=8$ [Ω]	10	43088	25,2	57557	131,2	61668	-91,0	5273	-48,6	5207	125,5	539	-148,7
				20	48763	28,2	57046	137,3	61733	-90,9	3749	-52,7	3729	119,3	518	-148,9
				30	52073	29,1	57534	140,7	61794	-90,9	2896	-54,6	2899	115,6	499	-149,2

Tabulka 6.7 Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů – nesymetrie odporů poruchy – 3f zkrat

Zemní poměr	Druh zkratu	Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	l [km]	Změřené hodnoty napětí a proudů											
					U_{l1} [V]	$\varphi_{U_{l1}}$ [°]	U_{l2} [V]	$\varphi_{U_{l2}}$ [°]	U_{l3} [V]	$\varphi_{U_{l3}}$ [°]	I_{l1} [A]	$\varphi_{I_{l1}}$ [°]	I_{l2} [A]	$\varphi_{I_{l2}}$ [°]	I_{l3} [A]	$\varphi_{I_{l3}}$ [°]
k = 0,5	L1-L2-L3	$R_{fl1}=2$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	41793	14,3	44137	128,5	46701	-106,2	6533	-32,7	6979	97,2	5740	-143,7
				20	47780	21,3	48283	138,5	50047	-99,6	4500	-34,6	4759	92,2	4154	-148,0
				30	51268	24,1	51378	142,5	52533	-96,6	3432	-35,6	3598	89,5	3243	-150,4
			$R_f=4$ [Ω]	10	41793	14,3	44137	128,5	46701	-106,2	6533	-32,7	6979	97,2	5740	-143,7
				20	47780	21,3	48283	138,5	50047	-99,6	4500	-34,6	4759	92,2	4154	-148,0
				30	51268	24,1	51378	142,5	52533	-96,6	3432	-35,6	3598	89,5	3243	-150,4
			$R_f=8$ [Ω]	10	41793	14,3	44137	128,5	46701	-106,2	6533	-32,7	6979	97,2	5740	-143,7
				20	47780	21,3	48283	138,5	50047	-99,6	4500	-34,6	4759	92,2	4154	-148,0
				30	51268	24,1	51378	142,5	52533	-96,6	3432	-35,6	3598	89,5	3243	-150,4
		$R_{fl1}=6$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	46701	13,8	41793	134,3	44137	-111,5	5740	-23,7	6533	87,3	6979	-142,8
				20	50047	20,4	47780	141,3	48283	-101,5	4154	-28,0	4500	85,4	4759	-147,8
				30	52533	23,4	51268	144,1	51378	-97,5	3243	-30,4	3432	84,4	3598	-150,5
			$R_f=4$ [Ω]	10	46701	13,8	41793	134,3	44137	-111,5	5740	-23,7	6533	87,3	6979	-142,8
				20	50047	20,4	47780	141,3	48283	-101,5	4154	-28,0	4500	85,4	4759	-147,8
				30	52533	23,4	51268	144,1	51378	-97,5	3243	-30,4	3432	84,4	3598	-150,5
			$R_f=8$ [Ω]	10	46701	13,8	41793	134,3	44137	-111,5	5740	-23,7	6533	87,3	6979	-142,8
				20	50047	20,4	47780	141,3	48283	-101,5	4154	-28,0	4500	85,4	4759	-147,8
				30	52533	23,4	51268	144,1	51378	-97,5	3243	-30,4	3432	84,4	3598	-150,5
		$R_{fl1}=4$ [Ω]	$R_f=0$ [Ω]	10	44137	8,5	46701	133,8	41793	-105,7	6979	-22,8	5740	96,3	6533	-152,7
				20	48283	18,5	50047	140,4	47780	-98,7	4759	-27,8	4154	92,0	4500	-154,6
				30	51378	22,5	52533	143,4	51268	-95,9	3598	-30,5	3243	89,6	3432	-155,6
			$R_f=4$ [Ω]	10	44137	8,5	46701	133,8	41793	-105,7	6979	-22,8	5740	96,3	6533	-152,7
				20	48283	18,5	50047	140,4	47780	-98,7	4759	-27,8	4154	92,0	4500	-154,6
				30	51378	22,5	52533	143,4	51268	-95,9	3598	-30,5	3243	89,6	3432	-155,6
			$R_f=8$ [Ω]	10	44137	8,5	46701	133,8	41793	-105,7	6979	-22,8	5740	96,3	6533	-152,7
				20	48283	18,5	50047	140,4	47780	-98,7	4759	-27,8	4154	92,0	4500	-154,6
				30	51378	22,5	52533	143,4	51268	-95,9	3598	-30,5	3243	89,6	3432	-155,6

Tabulka 6.8 Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů – nesymetrie odporů poruchy – 2f zemní zkrat

Zemní poměr	Druh zkratu	Odpory fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	l [km]	Změřené hodnoty napětí a proudů											
					U_{l1} [V]	$\varphi_{U_{l1}}$ [°]	U_{l2} [V]	$\varphi_{U_{l2}}$ [°]	U_{l3} [V]	$\varphi_{U_{l3}}$ [°]	I_{l1} [A]	$\varphi_{I_{l1}}$ [°]	I_{l2} [A]	$\varphi_{I_{l2}}$ [°]	I_{l3} [A]	$\varphi_{I_{l3}}$ [°]
k = 0,5	L1-L2-E	$R_{fl1}=2$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	41059	21,9	48991	128,4	61703	-90,8	5957	-44,3	6433	106,6	512	-151,9
				20	47711	25,7	51537	137,5	61926	-90,8	4124	-45,9	4365	101,7	453	-150,9
				30	51323	27,1	53782	141,5	62160	-90,7	3161	-46,7	3284	99,0	396	-148,1
		$R_{fl1}=6$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	46443	20,6	47261	128,3	61647	-90,8	4860	-35,3	6622	103,1	516	-154,6
				20	50191	24,3	50739	137,9	61934	-90,7	3652	-38,3	4422	98,9	438	-154,1
				30	52636	26,1	53366	141,8	62219	-90,6	2921	-40,5	3308	96,8	368	-151,2
		$R_{fl1}=4$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	44676	18,6	52905	130,6	61693	-90,9	5457	-34,4	5604	113,7	515	-151,9
				20	49175	23,9	53641	137,9	61912	-90,8	3921	-38,8	3984	106,9	456	-151,2
				30	52076	26,0	55025	141,6	62146	-90,7	3057	-41,2	3068	103,1	398	-148,7
		$R_{fl1}=6$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	46360	22,4	42639	128,1	61652	-90,7	4694	-39,3	7259	95,0	510	-155,8
				20	50178	25,0	48786	138,4	61966	-90,6	3591	-40,6	4682	93,4	426	-154,8
				30	52617	26,4	52320	142,2	62265	-90,6	2896	-42,0	3451	92,8	354	-151,5

Tabulka 6.9 Změřené hodnoty napětí, proudů a jejich fázových posunů – nesymetrie odporů fázových vodičů a rozdílného odporu poruchy – zkratu – 3f zemní zkrat

Zemní poměr	Druh zkratu	Odpor fázových vodičů	Odpor poruchy - zkratu	l [km]	Změřené hodnoty napětí a proudů											
					U_{l1} [V]	$\varphi_{U_{l1}}$ [°]	U_{l2} [V]	$\varphi_{U_{l2}}$ [°]	U_{l3} [V]	$\varphi_{U_{l3}}$ [°]	I_{l1} [A]	$\varphi_{I_{l1}}$ [°]	I_{l2} [A]	$\varphi_{I_{l2}}$ [°]	I_{l3} [A]	$\varphi_{I_{l3}}$ [°]
k = 0,5	L1-L2-L3-E	$R_{n1}=2$ [Ω]	$R_f=4$ [Ω]	10	40782	13,5	43843	129,9	47621	-106,3	6825	-33,1	6809	95,5	5630	-141,6
		20		47207	21,1	48352	139,1	50478	-99,9	4640	-35,2	4655	91,1	4118	-146,3	
		30		50918	24,0	51491	142,9	52754	-96,9	3513	-36,2	3529	88,7	3231	-149,0	
		$R_{n1}=2$ [Ω]	$R_f=8$ [Ω]	10	41188	13,6	43793	129,4	47351	-106,1	6740	-32,6	6891	95,8	5635	-142,4
		$R_{n2}=4$ [Ω]		20	47360	21,1	48251	139,0	50421	-99,8	4615	-34,8	4693	91,1	4107	-146,8
		$R_{n3}=6$ [Ω]		30	50978	24,0	51428	142,8	52750	-96,8	3505	-35,9	3547	88,7	3221	-149,3
		$R_{n1}=2$ [Ω]	$R_f=12$ [Ω]	10	41383	13,7	43827	129,1	47188	-106,1	6688	-32,5	6926	96,1	5651	-142,8
		$R_{n2}=4$ [Ω]		20	47464	21,0	48214	138,9	50362	-99,7	4594	-34,6	4715	91,3	4107	-147,1
		$R_{n3}=6$ [Ω]		30	51030	24,0	51392	142,8	52733	-96,7	3496	-35,8	3560	88,8	3218	-149,5