

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Zemní poruchy v distribučních sítích VN, jejich analýza
a simulace**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš VORÁČEK**
Osobní číslo: **E16N0116P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Zemní poruchy v distribučních sítích VN, jejich analýza a simulace**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

Diplomová práce "Zemní poruchy v distribučních sítích VN, jejich analýza a simulace" bude zaměřena na tyto body:

1. Zpracujte analýzu zemních poruch v sítích VN metodou Fortescue a metodou uzlových napětí.
2. Převedte tuto problematiku do simulačního prostředí MATLAB Simulink.
3. Porovnejte a ověřte analytické výpočty s naměřenou reálnou zemní poruchou.
4. Vyhodnoťte získané výsledky z analytických výpočtů a ze simulace.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Skripta k předmětu Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie.
2. Příručky k simulačnímu nástroji MATLAB simulink.
3. Internetové podklady.
4. Dle uvážení a pokynů udá konzultant.


Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**


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




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

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na problematiku zemních poruch v distribučních sítích VN, jejich analýzou a simulací. Teoretická část popisuje začlenění sítí VN do elektrizační soustavy České republiky, rozdělení zemních poruch a rozbor v sítích s různým uzemňovacím systémem nulového uzlu transformátoru. Pro každý způsob uzemnění nulového bodu transformátoru je na zjednodušených schématech proveden matematický popis metodou Fortescue a metodou uzlových napětí. V praktické části jsou výše uvedené výpočetní metody aplikovány na reálný příklad kompenzované distribuční sítě. Výpočty jsou doplněny o simulace zemního spojení v programech Matlab Simulink a Dynast. Závěrem jsou vypočtené hodnoty porovnány s výsledky simulací a simulované průběhy sledovaných veličin porovnány s naměřenou reálnou zemní poruchou.

Klíčová slova

Sítě vysokého napětí , zemní spojení, uzemnění uzlu sítě, simulace, kompenzovaná síť

Abstract

The thesis deals with earth faults in medium voltage distribution networks, their analysis, and simulation. The theoretical part of the thesis describes the MV networks in the Czech power system, types of the earth faults, fault conditions in networks with a different neutral earthing arrangement. For each neutral earthing arrangement, a mathematical description of fault conditions is performed by using simplified equivalent circuits, and the Fortescue and the node voltage method. In the practical part, the above-mentioned methods are applied for calculation of the earth-fault conditions in a real network grounded through arc suppression coil. The calculations are complemented by simulations of the earth fault in the Matlab Simulink and Dynast simulation tool. Finally, the calculated values are compared with the simulation results and the simulated waveforms are compared with the output of real earth fault measurement.

Key words

Medium voltage system, earth fault, neutral earthing arrangement, simulation, arc-suppression-coil earthing

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 3.5.2018

Tomáš Voráček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph. D a odbornému konzultantovi panu Ing. Františku Žákovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	12
ÚVOD	14
1 DISTRIBUČNÍ SÍŤ VN	15
1.1 DRUHY PORUCH.....	16
1.2 ZPŮSOB UZEMNĚNÍ UZLU.....	17
1.2.1 Síť s izolovaným uzlem.....	19
1.2.2 Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku.....	21
1.2.3 Síť s uzlem uzemněným přes rezistor.....	23
1.2.4 Síť s přechodným uzemněním.....	25
2 METODY VÝPOČTU ZEMNÍCH PORUCH	27
2.1 METODA FORTESCUE.....	27
2.1.1 Síť uzemněná přes obecnou impedanci.....	29
2.1.2 Izolovaný uzel.....	32
2.1.3 Uzel uzemněný přes zhášecí tlumivku.....	33
2.1.4 Uzel uzemněný přes rezistor.....	34
2.2 METODA UZLOVÝCH NAPĚTÍ.....	35
2.2.1 Síť uzemněná přes obecnou impedanci.....	36
2.2.2 Izolovaný uzel.....	36
2.2.3 Uzel uzemněný přes zhášecí tlumivku.....	38
2.2.4 Uzel uzemněný přes rezistor.....	39
3 ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ KONKRÉTNÍ SÍŤE	41
3.1 DEFINICE PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU SÍŤE VN.....	41
3.2 VÝPOČET PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU SÍŤE VN.....	42
3.2.1 Transformátor 110/23kV.....	42
3.2.2 Síť VN.....	43
3.2.3 Vývod s poruchou.....	43
3.2.4 Předběžný návrh zhášecí tlumivky.....	44
3.3 VÝPOČET METODOU FORTESCUE.....	44
3.4 VÝPOČET METODOU UZLOVÝCH NAPĚTÍ.....	51
4 SIMULACE	53
4.1 SIMULACE V PROGRAMU MATLAB SIMULINK.....	53

4.2	POROVNÁNÍ USTÁLENÉHO SIMULAČNÍHO ŘEŠENÍ S ANALYTICKÝMI VÝPOČTY	59
4.3	HODNOCENÍ PŘECHODOVÝCH DĚJŮ PŘI ZEMNÍM SPOJENÍ.....	61
5	REÁLNÁ ZEMNÍ PORUCHA A POROVNÁNÍ SE SIMULACEMI.....	66
6	ZÁVĚR.....	71
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	73
	PŘÍLOHY	74
	PŘÍLOHA A: DOPLŇUJÍCÍ ZÁVISLOSTI VELIČIN DANÉ ANALYTICKÝM VÝPOČTEM	74
	PŘÍLOHA B: ANALYTICKÝ VÝPOČET POMOCÍ SOFTWARE	75
	<i>B.1 Analytický výpočet v EXCELU metodou Fortescue</i>	<i>75</i>
	<i>B.2 Analytický výpočet v Matlabu metodou Fortescue a MUN.....</i>	<i>77</i>
	PŘÍLOHA C: SIMULACE.....	82
	<i>C.1 Simulační schéma v Simulinku.....</i>	<i>82</i>
	<i>C.2 Simulační schéma v Dynastu</i>	<i>84</i>
	<i>C.3 Doplnující nasimulované průběhy sledovaných veličin.....</i>	<i>85</i>
	<i>C.4 Doplnující tabulka porovnání analytického a simulačního řešení</i>	<i>88</i>
	<i>C.5 Doplnující nasimulované průběhy pro hodnocení přechodových dějů.....</i>	<i>88</i>

Seznam symbolů a zkratek

$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$	.....	fázory napětí vůči zemi (V)
\bar{U}	.....	fázor elektromotorického napětí (V)
U_n	.....	jmenovité sdružené napětí (V)
\bar{U}_f	.....	fázor fázového napětí (V)
$\bar{U}_{fA}, \bar{U}_{fB}, \bar{U}_{fC}$	.....	fázory fázových napětí zdroje (V)
$\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C$	.....	fázory fázových proudů (A)
\bar{I}_P	.....	fázor poruchového (kapacitního) proudu (A)
\bar{I}_L	.....	fázor proudu zhášecí tlumivky (A)
\bar{I}_{LL}	.....	fázor induktivního proudu zhášecí tlumivky (A)
\bar{I}_{LR}	.....	fázor činného proudu zhášecí tlumivky (A)
\bar{I}_R	.....	fázor proudu uzlového odporníku (A)
I_{RN}	.....	jmenovitý proud uzlového odporníku (A)
R	.....	odpor uzlového odporníku (Ω)
R_N	.....	jmenovitý odpor uzlového odporníku (Ω)
L	.....	indukčnost zhášecí tlumivky (H)
R_P	.....	přechodový odpor zemního spojení (Ω)
ω	.....	uhlová rychlost ($rad \cdot s^{-1}$)
t	.....	čas (s)
C	.....	celková kapacita sítě (F)
C_A, C_B, C_C	.....	kapacity fází vůči zemi (F)
$\bar{U}_{A(1)}, \bar{U}_{A(2)}, \bar{U}_{A(0)}$	.....	fázory složkových napětí fáze A (V)
$\bar{U}_{B(1)}, \bar{U}_{B(2)}, \bar{U}_{B(0)}$	.....	fázory složkových napětí fáze B (V)
$\bar{U}_{C(1)}, \bar{U}_{C(2)}, \bar{U}_{C(0)}$	.....	fázory složkových napětí fáze C (V)
$\bar{U}_{(1)}, \bar{U}_{(2)}, \bar{U}_{(0)}$	.....	fázory složkových napětí (V)
$\bar{I}_{(1)}, \bar{I}_{(2)}, \bar{I}_{(0)}$	.....	fázory složkových proudů (A)
X_C	.....	kapacitní reaktance (Ω)
X_L	.....	reaktance zhášecí tlumivky (Ω)
\bar{U}_N	.....	fázor napětí uzlu sítě (V)
\bar{a}, \bar{a}^2	.....	operátory natočení v Gaussově rovině (-)
$\bar{Z}_{(1)}, \bar{Z}_{(2)}, \bar{Z}_{(0)}$	.....	komplexní složkové impedance (Ω)
$\bar{Z}_{V(1)}, \bar{Z}_{V(2)}, \bar{Z}_{V(0)}$	.....	komplexní složkové impedance vedení (Ω)
$\bar{Z}_{T(1)}, \bar{Z}_{T(2)}, \bar{Z}_{T(0)}$	.....	komplexní složkové impedance transformátoru (Ω)
$X_{(0)}$	.....	netočivá reaktance (Ω)
S_{NT}	.....	jmenovitý výkon transformátoru (MVA)
ΔP_k	.....	ztráty nakrátko transformátoru (kW)
ΔP_0	.....	ztráty naprázdno transformátoru (kW)
u_k	.....	napětí nakrátko transformátoru (%)
i_0	.....	proud naprázdno transformátoru (%)
p	.....	převod transformátoru (-)
Z_T	.....	impedance transformátoru (Ω)
R_{T1}	.....	celkový činný odpor transformátoru (Ω)
X_{T1}	.....	celková reaktance transformátoru (Ω)
R_1	.....	činný odpor primárního vinutí transformátoru (Ω)
X_1	.....	reaktance primárního vinutí transformátoru (Ω)

R_2	činný odpor sekundárního vinutí transformátoru (Ω)
X_2	reaktance sekundárního vinutí transformátoru (Ω)
L_1	indukčnost primárního vinutí transformátoru (H)
L_2	indukčnost sekundárního vinutí transformátoru (H)
R_{FE}	činný odpor v železe transformátoru (Ω)
G_{FE}	vodivost železa transformátoru (S)
Y_G	příčná admitance transformátoru (S)
X_h	magnetizační reaktance transformátoru (Ω)
L_h	magnetizační indukčnost transformátoru (H)
I_{C0}	kapacitní proud sítě (A)
C_0	kapacita sítě vůči zemi (F)
X_{C0}	reaktance sítě vůči zemi (Ω)
R_0	svodový odpor sítě (Ω)
I_{C01}	kapacitní proud vývod (A)
I_W	činná složka svodového proudu (A)
C_{01}	kapacita vývodu vůči zemi (F)
C'_{01}	měrná kapacita vývodu vůči zemi (F/km)
X_{C01}	reaktance vývodu vůči zemi (Ω)
R_{01}	svodový odpor vývodu (Ω)
G_{01}	svod vývodu (S)
G'_{01}	měrný svod vývodu (S/km)
R_{V1}	odpor vývodu (Ω)
R'_V	měrný odpor kabelu (Ω /km)
X_{V1}	reaktance vývodu (Ω)
L_V	indukčnost vývodu (H)
L'_V	měrná indukčnost kabelu (H/km)
l	délka vývodu (km)
C_C	celková kapacita vůči zemi (F)
R_{TL}	odpor zhášecí tlumivky (Ω)
X_{TL}	reaktance zhášecí tlumivky (Ω)
L_{TL}	indukčnost zhášecí tlumivky (H)
\bar{Z}_{TL}	komplexní impedance zhášecí tlumivky (Ω)
\bar{Z}_{C0}	komplexní impedance sítě vůči zemi (Ω)
\bar{Z}_{C01}	komplexní impedance vývodu vůči zemi (Ω)
$\bar{Z}_{10}, \bar{Z}_{20}, \bar{Z}_{30}$	komplexní pomocné impedance nulové složky (Ω)
\bar{Z}_C	celková komplexní impedance složkové soustavy (Ω)
P_{ZS}, P_{ZV}	činný výkon zatížení sítě a vývodu (kW)
Q_{ZS}, Q_{ZV}	činný výkon zatížení sítě a vývodu (kVAr)
R_{ZS}, R_{ZV}	činný odpor zátěže sítě a vývodu (Ω)
X_{ZS}, X_{ZV}	reaktance zatížení sítě a vývodu (Ω)
$\bar{Z}_{ZS}, \bar{Z}_{ZV}$	komplexní impedance zátěže sítě a vývodu (Ω)
DS	distribuční soustava
LDS	lokální distribuční soustava
ČR	Česká republika
VN	vysoké napětí
ZS	zemní spojení
MUN	metoda uzlových napětí

Seznam obrázků

Obr. 1: Uspořádání elektrizační soustavy [1].....	15
Obr. 2: Používané způsoby uzemnění uzlu v sítích VN [1]	18
Obr. 3: Trojfázová soustava s izolovaným uzlem – bezporuchový stav	19
Obr. 4: Kovové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem.....	20
Obr. 5: Fázorový diagram při kovovém zemním spojení	20
Obr. 6: Odporové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem.....	21
Obr. 7: Fázorový diagram napětí a proudů při odporovém zemním spojení.....	21
Obr. 8: Zemní porucha v síti s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku	22
Obr. 9: Fázorový diagram ideální kompenzace poruchového proudu.....	22
Obr. 10: Fázorový diagram kompenzace poruchového proudu se zbytkovým proudem.....	23
Obr. 11: Zemní porucha v síti s uzlem uzemněným přes rezistor.....	24
Obr. 12: Fázorový diagram pro zemní poruchu v blízkosti transformátoru.....	24
Obr. 13: Síť s přechodným uzemněním uzlu	25
Obr. 14: Zhášecí tlumivka s odporníkem [8] a její schematické znázornění [1]	26
Obr. 15: Metoda přizemnění postižené fáze [15]	26
Obr. 16: Rozklad nesymetrické soustavy na tři symetrické soustavy	27
Obr. 17: Schéma sítě s obecnou impedancí v uzlu transformátoru.....	29
Obr. 18: Zjednodušené složkové schéma pro obecné zemní spojení.....	30
Obr. 19: Netočivá složka sítě s izolovaným uzlem	32
Obr. 20: Netočivá složka kompenzované sítě	33
Obr. 21: Schéma netočivé složky pro uzel uzemněným přes rezistor	35
Obr. 22: Blokové schéma příkladu VN sítě	41
Obr. 23: Náhradní složkové schéma jednofázové zemní poruchy	44
Obr. 24: Rezonanční křivka soustavy	47
Obr. 25: Závislost poruchového proudu na rozladění tlumivky při $R_P = 100 \Omega$	48
Obr. 26: Závislost fázových napětí na rozladění tlumivky při $R_P = 100 \Omega$	48
Obr. 27: Závislost fázových napětí na R_P ve vyladěném stavu.....	49
Obr. 28: Závislost fázových napětí na R_P při rozladění tlumivky +5%	49
Obr. 29: Závislost uzlového napětí na R_P při různém rozladění tlumivky.....	50
Obr. 30: Závislost poruchového proudu na R_P při různém rozladění tlumivky	50
Obr. 31: Náhradní schéma pro výpočet ZS metodou uzlových napětí	51
Obr. 32: Model zemního spojení v Simulinku.....	53
Obr. 33: Průběhy fázových napětí na vývodu v místě ZS o $R_P = 100 \Omega$	54
Obr. 34: Průběh poruchového proudu při ZS o $R_P = 100 \Omega$	55
Obr. 35: Průběh uzlového napětí při ZS o $R_P = 100 \Omega$	55
Obr. 36: Průběhy fázových napětí na vývodu v ZS o $R_P = 5 \Omega$	56
Obr. 37: Průběh poruchového proudu při ZS o $R_P = 5 \Omega$	56
Obr. 38: Průběhy fázových napětí na vývodu v místě ZS o $R_P = 1500 \Omega$	57
Obr. 39: Průběh poruchového proudu ZS o $R_P = 1500 \Omega$	57
Obr. 40: Průběh poruchového proudu ZS o $R_P = 5 \Omega$ a tlumivky +10%.....	58
Obr. 41: Průběhy napětí ve fázích při ZS o $R_P = 1500 \Omega$ a rozladění +10%.....	58
Obr. 42: Poruchový proud s připnutím odporníku a shuntováním při ZS o $R_P = 100 \Omega$	59
Obr. 43: Průběh proudu ve fázi na přípojnici po spuštění simulace.....	60
Obr. 44: Poruchový proud ZS o $R_P = 5 \Omega$ – vznik ZS v maximu U_A	61
Obr. 45: Proud odebíraný ze sítě při ZS o $R_P = 5 \Omega$ - vznik ZS v maximu U_A	62
Obr. 46: Napětí ve fázích v místě ZS o $R_P = 5 \Omega$ – vznik ZS v maximu U_A	62
Obr. 47: Poruchový proud ZS o $R_P = 100 \Omega$ – vznik ZS v maximu U_A	63

Obr. 48: Poruchový proud ZS o $R_P = 100 \Omega$ – vznik ZS v nule U_A	63
Obr. 49: Napětí ve fázích po ukončení kovového ZS.....	64
Obr. 50: Napětí ve fázích po ukončení odporového ZS o $R_P = 1500 \Omega$	64
Obr. 51: Napětí ve fázích po ukončení kovového ZS s rozladěním +2%.....	65
Obr. 52: Napětí ve fázích po ukončení kovového ZS s rozladěním +8%.....	65
Obr. 53: Vznik reálného kovového ZS – napětí ve fázích [7].....	66
Obr. 54: Simulovaný vznik kovového ZS – napětí ve fázích.....	66
Obr. 55: Vznik reálného odporového ZS – napětí ve fázích[7].....	67
Obr. 56: Simulovaný vznik odporového ZS s rozladěním +1% - napětí ve fázích.....	67
Obr. 57: Vypnutí reálného ZS - napětí ve fázích [7].....	68
Obr. 58: Simulované vypnutí odporového ZS s rozladěním +2% - napětí ve fázích.....	68
Obr. 59: Reálné přerušované zemní spojení.....	69
Obr. 60: Simulované přerušované ZS - napětí ve fázích.....	69
Obr. 61: Simulované přerušované ZS – poruchový proud.....	70
Obr. 62: Závislost fázových napětí na rozladění tlumivky při $R_P = 1500 \Omega$	74
Obr. 63: Závislost poruchového proudu na rozladění tlumivky při různém R_P	74
Obr. 64: Závislost uzlového napětí na rozladění tlumivky při různém R_P	75
Obr. 65: Ukázka zadání a výpočet parametrů ve výpočetním programu EXCEL.....	76
Obr. 66: Ukázka výpočtů metodou Fortescue ve výpočetním programu EXCEL.....	77
Obr. 67: Simulační schéma v Simulinku.....	82
Obr. 68: Model vedení sítě a vývodu.....	83
Obr. 69: Simulační schéma v Dynastu.....	84
Obr. 70: Průběhy fázových napětí na vývodu v místě ZS o $R_P = 10 \Omega$	85
Obr. 71: Průběhy napětí ve fázích na vývodu v místě ZS o $R_P = 500 \Omega$	85
Obr. 72: Průběh poruchového proudu při ZS o $R_P = 10 \Omega$	85
Obr. 73: Průběh poruchového proudu při ZS o $R_P = 500 \Omega$	86
Obr. 74: Průběh uzlového napětí při ZS o $R_P = 10 \Omega$	86
Obr. 75: Průběh uzlového napětí při ZS o $R_P = 500 \Omega$	86
Obr. 76: Průběhy napětí ve fázích při ZS o $R_P = 5 \Omega$ a rozladění +10%.....	87
Obr. 77: Průběh poruchového proudu při ZS o $R_P = 1500 \Omega$ a rozladění +10%.....	87
Obr. 78: Napětí ve fázích s připnutím odporník a shuntováním při ZS o $R_P = 100 \Omega$	87
Obr. 79: Proud odebíraný ze sítě při ZS o $R_P = 100 \Omega$ - vznik ZS v maximu U_A	88
Obr. 80: Napětí ve fázích v místě ZS o $R_P = 100 \Omega$ – vznik ZS v maximu U_A	88

Úvod

Hlavním cílem provozu elektrizační soustavy je zajištění dodávky elektrické energie určité kvality. S kvalitou elektrické energie úzce souvisí spolehlivost a bezpečnost provozu. K zajištění bezpečnosti a spolehlivosti provozu je důležité omezení nežádoucích stavů vznikající v elektrizační soustavě jako jsou především poruchy na elektrizačních zařízeních. Vše je zajištěno aplikací vhodného systému chránění, které je nutné nějakým způsobem navrhnout, dimenzovat a zajistit spolehlivou, rychlou detekci a lokalizaci poruch. Poruchy mohou být různé závažnosti, která závisí na druhu poruchy, oblasti vzniku poruchy a dalších podmínkách při jejich vzniku. K předběžnému zisku poznatků o závažnosti poruch v elektrizační soustavě a chování systému během poruchy je možné využívat právě analytických metod výpočtů či počítačových simulačních modelů, reprezentující dané místo a danou poruchu v soustavě. Modelování, simulace a analýzy nám dávají představy o chování systému při nežádoucích stavech soustavy a případném návrhu právě systému ochranného zařízení.

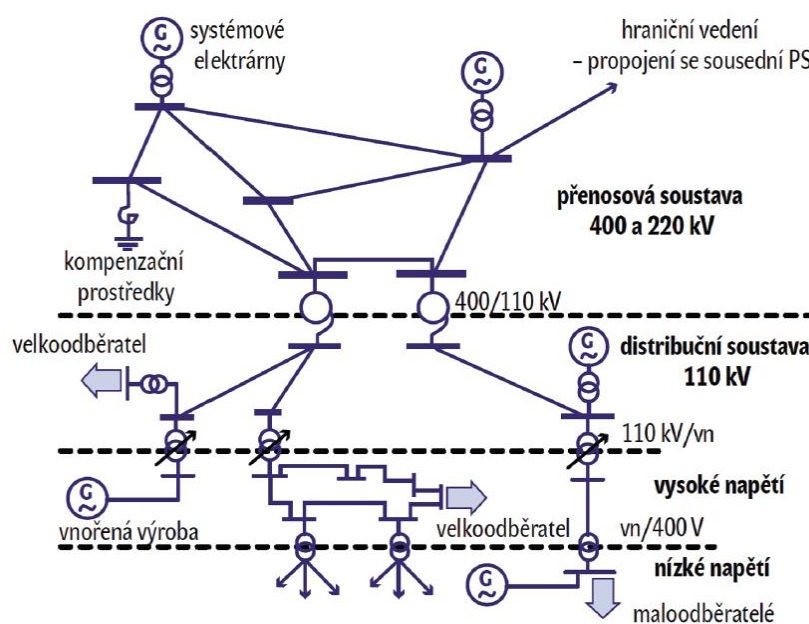
Předmětem mé diplomové práce je analýza a simulace nejčastější poruchy v nejrozsáhlejší části elektrizační soustavy, což je zemní spojení v distribučních sítích vysokého napětí. Smyslem mé diplomové práce je ukázat a dokázat správnost aplikací analytického a simulačního řešení poruchového stavu. Práce je rozdělena do několika velkých kapitol. Zpočátku je provedeno začlenění sítí vysokého napětí do elektrizační soustavy České republiky, objasnění pojmu zemního spojení a jeho rozdělení dle charakteru poruchy. Mluvím-li o zemním spojení, je důležité uvést způsob uzemnění nulového transformátoru, který má zásadní vliv na vlastnosti poruchy. Na tento bod navazuji v kapitole 2, kde provádím aplikací metody Fortescue a metody uzlových napětí, rozbor zemního spojení pro různý způsob uzemnění nulového uzlu transformátoru. Následuje kapitola analytického výpočtu konkrétního příkladu sítě s využitím softwarových prostředků Excel a Matlab. Po vytvoření vhodného náhradního modelu konkrétní sítě provádím simulace zemního spojení v programu Matlab Simulink a Dynast za různých podmínek, které mohou nastat v reálném provozu. Výsledky získané analytickým a simulačním řešením v závěru práce porovnávám s reálně naměřenou poruchou a provádím celkové vyhodnocení.

1 Distribuční síť VN

Na úvod bude dobré začlenit uvažované síť vysokého napětí do elektrizační soustavy České republiky, následně pak objasnit definici zemního spojení a provést jeho stručný rozbor v závislosti na způsobu uzemnění nulového uzlu transformátoru. Úvodní teorie v této kapitole je zpracována za pomoci literatury a informačních zdrojů [1], [2], [3] a [14].

Elektrizační soustava ČR je členěna na přenosovou a distribuční soustavu. Přenosová (nadřazená) soustava tvoří jakousi páteř elektrizační soustavy, do které jsou vyvedeny výkony tzv. systémových elektráren a zajišťuje propojení do elektrizačních soustav sousedních států. Mluvím zde o napětíových hladinách 400 a 220 kV (včetně vybraných vedení 110 kV). Na přenosovou soustavu navazuje distribuční soustava (dále jen DS) tvořená napětíovými hladinami od 110 kV až po síť nízkého napětí. Hlavním úkolem distribuční soustavy je přivedení elektrické energie z uzlových elektrických stanic nadřazené soustavy k velkoodběratelům (z vyšších napětíových hladin) či maloodběratelům (ze sítě nízkého napětí) a jsou do ní vyvedeny zdroje nižších výkonů tzv. distribuované (malé průmyslové elektrárny, kogenerační jednotky a obnovitelné zdroje).

Vzhledem k různým napětíovým hladinám je možné distribuční soustavu rozdělit na DS velmi vysokého napětí, DS vysokého napětí a DS nízkého napětí. Dělení distribuční soustavy včetně nadřazené soustavy je naznačeno na *Obr. 1*.



Obr. 1: Uspořádání elektrizační soustavy [1]

Distribuční síť vysokého napětí je dále možné rozdělit dle charakteru jejich provozu na soustavy distribuční s napětovými hladinami 10, 22 a 35 kV a dále pak na soustavy elektrárenských, průmyslových a důlních provozů s napětovou hladinou 6 a 10 kV. Síť VN bývají většinou provozovány paprskově případně formou průběžného rozvodu, přičemž toto řešení umožňuje řadu propojení do dvoupaprskového nebo okružního rozvodu a dovoluje tak zálohování pro případ poruchy.

Sítě VN jsou vzhledem k jejich velké rozloze, členitosti a místům jejich vedení ve značné míře vystaveny atmosférickým vlivům, cizím zásahům i četným přepětím. Vlivem těchto jevů je ovlivněn bezporuchový chod systému, kdy dochází především k izolačním vadám jednotlivých fází proti zemi. Nejčastějším poruchovým stavem v sítích VN na venkovním vedení je tedy jednofázová zemní porucha tzv. zemní spojení. V případě kabelových vedení většinou přechází jednofázové poruchy na vícefázové a pak už se jedná zkrat.

Zemní spojení lze jednoduše definovat jako spojení pouze jedné fáze se zemí v sítích s izolovaným uzlem či uzlem uzemněným přes zhašecí tlumivku. Ve všech ostatních případech (síť účinně uzemněné, neúčinně uzemněné přes odporník) se jedná o zemní zkrat. Na rozdíl od zkratu, nedosahují při zemním spojení poruchové proudy tak vysokých úrovní a není tak bezpodmínečně nutné postižený vývod okamžitě odpojit.

1.1 Druhy poruch

Vzhledem k závislosti proudových a napětových poměrů během zemního spojení na charakteru poruchy provedu v této kapitole rozdělení zemních poruch.

- ***Dle velikosti přechodového odporu v místě poruch:***
 - ***Kovové zemní spojení*** – hodnota přechodového odporu je při tomto typu poruchy v řádech jednotek ohmů. Vznik této poruchy je z hlediska četnosti ojedinělým případem. Jediná reálná místa vzniku jsou místa s velmi dobrým uzemněním např. spínací stanice VN či distribuční stanice, když dojde k přeskočení oblouku přímo na neživou část trafostanice vodivě spojenou s uzemněním. Výhodou kovových poruch je vysoká úroveň poruchových proudů a nízké tlumení přechodových jevů, vlivem čehož dosahují špičky kapacitního vybijecího proudu bezproblémově detekovatelné úrovně.

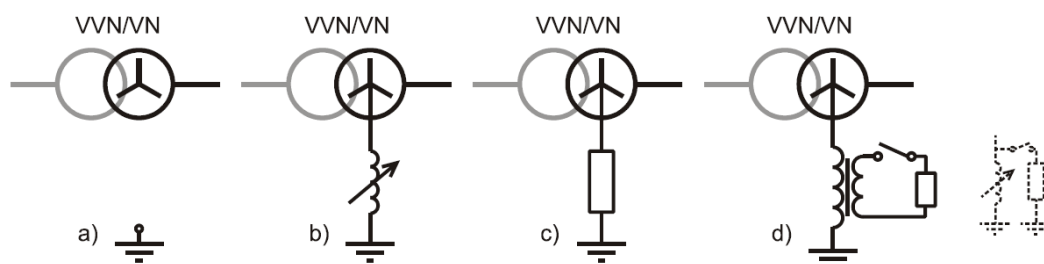
- **Oblouková zemní spojení** – přechodový odpor je tvořen odporem oblouku. Vznikají zpravidla v rozsáhlejších sítích, kde poruchový proud přesáhne hodnotu cca 5 A. Poruchy jsou charakteristické krátkodobým přerušovaným hořením oblouku, které způsobuje krátkodobá přepětí (na zdravých fázích až 4-5 násobek fázového napětí) a vysoké vybíjecí proudové špičky. Obloukové zemní spojení může přejít ve zkrat, když oblouk vzroste do značných délek a zasáhne sousední fáze. Obloukové zemní spojení přepaluje vodiče, dřevěné stožáry a poškozuje izolátory.
- **Odporová zemní spojení** – přechodový odpor poruchy dosahuje hodnot od několika stovek až po tisíce ohmů. Tento typ poruch je nejčastější poruchou na venkovním vedení DS. Nevýhodou je tlumení transientních jevů (vybíjecího proudu) a omezení úrovně poruchového proudu spolu s netočivou složkou napětí, což komplikuje identifikaci a následnou lokalizaci poruchy. Při vysokoodporové poruše (tj. nad 1 k Ω) nemusí dojít vlivem nízké úrovně netočivé složky napětí k aktivaci automatik pro detekci poruchy.
- **Dle doby trvání:**
 - **Mžiková zemní spojení** – doba trvání zemního spojení do 5 s.
 - **Krátkodobá zemní** – spojení doba trvání od 5 s do 10 minut.
 - **Přerušovaná zemní spojení** – jde o mžikové zemní spojení v krátkodobém sledu za sebou (přerušované hoření oblouku).
 - **Trvalá zemní spojení** – doba trvání nad 10 minut.

1.2 Způsob uzemnění uzlu

Základní parametry a možnosti provozu při zemním spojení jsou dány způsobem uzemnění nulového bodu VN vinutí transformátoru se zemnicí soustavou. Volba uzemňovacích systému definuje možnosti provozu z hlediska bezpečnosti, chránění, dimenzování a nepřetržitosti dodávky elektrické energie. Při bezporuchovém chodu symetrické sítě se způsob uzemnění na její provoz prakticky neprojeví. Zásadně se projeví až v případě poruchy, tedy při spojení jedné fáze se zemí. V sítích účinně uzemněných nebo neúčinně uzemněných přes odporník toto spojení vyvolá zkrat a vzhledem k úrovni zkratového proudu je potřeba postižené vedení v co nejkratším čase odpojit a tedy přerušit dodávku elektrické energie. V sítích VN v tomto ohledu není nutné vypnutí a přerušování

dodávky, neboť proudy nedosahují tak vysokých úrovní. Právě tato úroveň je značně ovlivněna systémem uzemnění. V sítích VN v ČR jsou používány čtyři způsoby provozu uzlu sítě:

- Uzel izolovaný (*Obr. 2a*)
- Uzel uzemněný přes zhašecí tlumivku (*Obr. 2b*)
- Uzel uzemněný přes rezistor (*Obr. 2c*)
- Uzel s přechodným uzemněním (*Obr. 2d*)



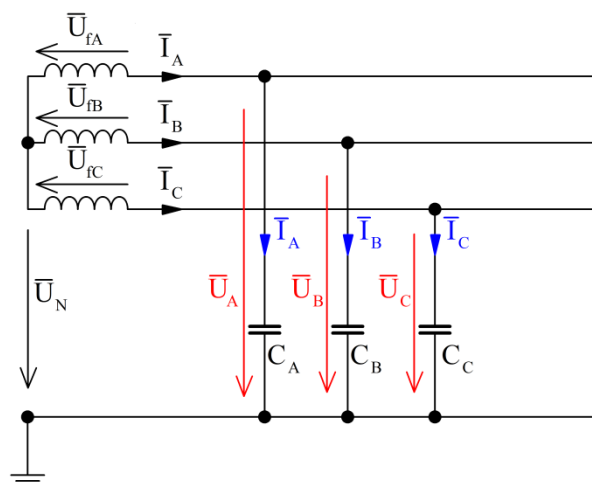
Obr. 2: Používané způsoby uzemnění uzlu v sítích VN [1]

Každý systém uzemnění má svá specifika a je vhodný pro určitý provoz DS či LDS (lokálních DS). Nejčastějším systémem používaným v rámci DS ČR je kompenzovaná síť s připínáním odporníku na sekundární straně zhašecí tlumivky (*Obr. 2d*). Vhodnost použití daného systému uzemnění je možno zohlednit dle důležitých kritérií:

- Celkový kapacitní proud soustavy.
- Úroveň poruchového proudu.
- Ustálená poruchová napětí.
- Přepětí při vzniku 1-pólové poruchy.
- Přepětí při přerušení 1-pólové poruchy.
- Ferorezonanční přepětí, přenesená napětí.
- Způsob likvidace poruchy.
- Možnost dosažení maximální citlivosti ochran.
- Ovlivnění pomocných obvodů.
- Porovnávací investiční náklady a provozní náklady.
- Bezpečnost s ohledem na hodnoty dotykového a krokového napětí apod.

1.2.1 Sít' s izolovaným uzlem

Provoz s izolovaným uzlem je zaveden především v malých sítích průmyslových závodů a vlastních spotřeb elektráren a tepláren. Nulový bod transformátoru není spojen se systémem uzemnění ($Z_N \rightarrow \infty$). Vzhledem k malé rozloze zemní proud obvykle nepřesahuje hodnotu 10 A. Zjednodušené schéma sítě s izolovaným uzlem v bezporuchovém stavu je naznačeno na *Obr. 3*. Pro zjednodušení byly uvažovány pouze kapacity vůči zemi, ostatní parametry jsou zanedbány. Zdroj je symetrický a síť kapacitně souměrná v chodu naprázdno. Napětí uzlu symetrické sítě je před vnikem poruchy nulové, ve skutečnosti v důsledku kapacitní nesymetrie bývá nižší než 0,5 % U_f , při vyladěné zhášecí tlumivce pro případ kompenzované sítě dosahuje hodnot asi 10 % U_f [14].

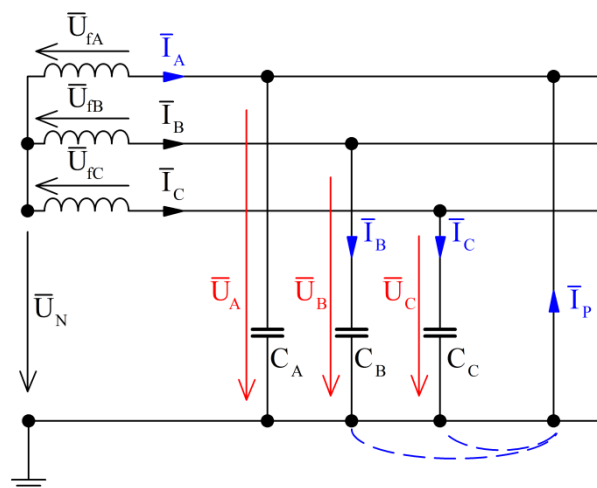


Obr. 3: Trojfázová soustava s izolovaným uzlem – bezporuchový stav

Na *Obr. 4* je naznačeno dokonalé kovové spojení jedné fáze se zemí. Napětí postižené fáze klesne na nulu, napětí uzlu vůči zemi vzroste na napětí fázové a napětí zdravých fází na napětí sdružené. Poruchový proud se zpětně uzavírá přes kapacity zdravých fází proti zemi a je vyjádřen vztahem:

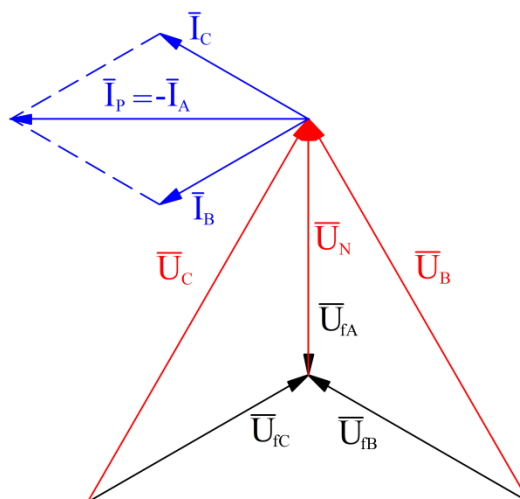
$$\bar{I}_p = j3\omega C \bar{U}_f, \quad (1.1)$$

Tato hodnota poruchového proudu je označovaná jako kapacitní proud sítě a patří mezi charakteristické parametry sítě. Velikost poruchového (kapacitního) proudu závisí na druhu použitých vodičů, tj. na velikosti měrné kapacity vodiče vůči zemi. Pro venkovní vedení je udávána hodnota měrného kapacitního proudu $I_p = 0,06 \text{ A/km}$, pro kabelová vedení řádově jednotky A/km [4].



Obr. 4: Kovové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem

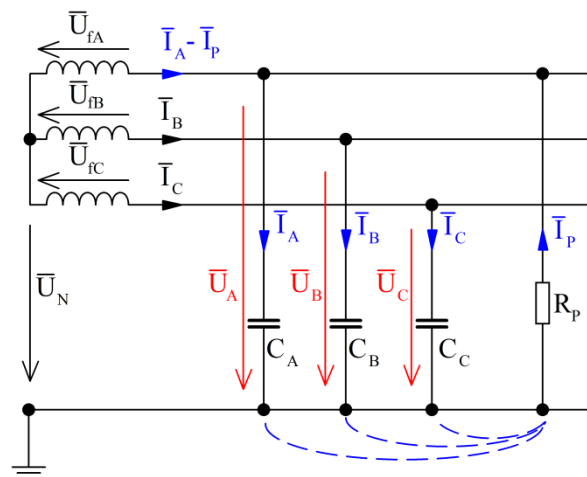
Fázory proudů a napětí při zemním spojení zobrazuje fázorový diagram na Obr. 5. Poruchový proud je fázorovým součtem kapacitních proudů ve zdravých fázích a předbíhá napětí nulového bodu soustavy o $\pi/2$.



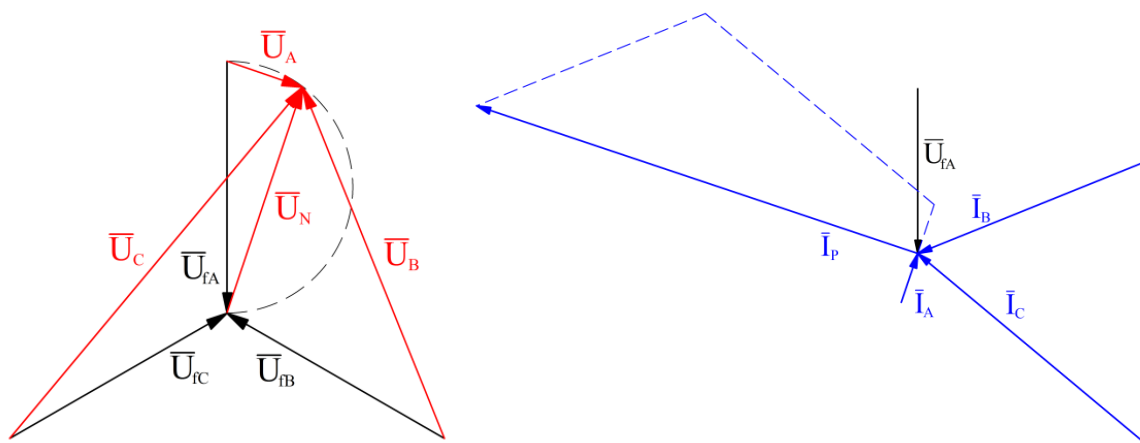
Obr. 5: Fázorový diagram při kovovém zemním spojení

Nelze-li zanedbat hodnotu přechodového odporu v místě zemního spojení, jedná se o odporové zemní spojení (Obr. 6). Odporů jednofázových poruch bývají proudově závislé [10]. Zemní spojení v kabelových sítích mají zpravidla hodnotu 20Ω až 40Ω , u venkovních vedení je třeba počítat i s několika kiloohmy [10].

Napětí na postižené fázi je vlivem odporu poruchy nenulové. Situaci odporového zemního spojení ilustruje fázorový diagram na Obr. 7. Kružnice opisující konec vektoru \bar{U}_0 symbolizuje rozsah hodnot přechodového odporu R_p . Napětí jedné zdravé fáze může dosáhnout i hodnot převyšující hodnotu sdruženou.



Obr. 6: Odporové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem



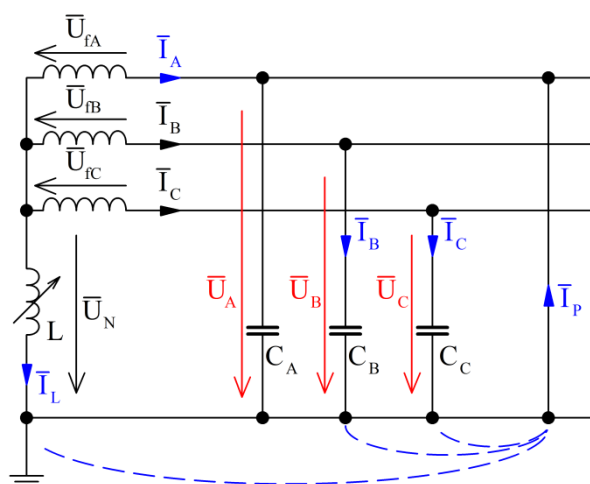
Obr. 7: Fázorový diagram napětí a proudů při odporovém zemním spojení

1.2.2 Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku

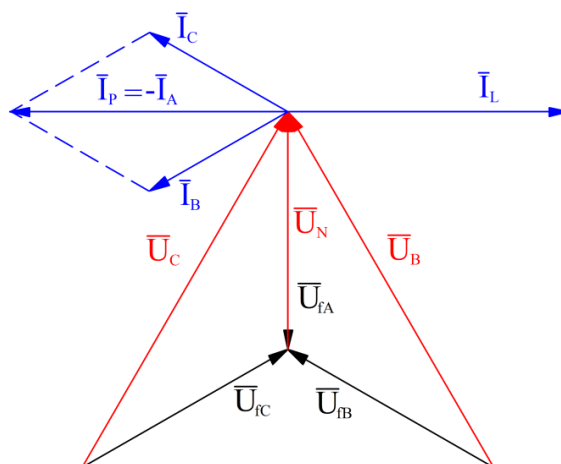
Často používaným systémem uzemnění v sítích VN je uzemnění uzlu přes zhášecí tlumivku (naznačeno na Obr. 8). Jedná se o kompenzovanou síť. Kompenzace je dle [14] doporučena při poruchových proudech $I_p > 10 \text{ A}$, při proudech nad 20 A je kompenzace nutná. Vlivem kompenzace kapacitních zemních proudů prochází místem poruchy pouze zbytkový (reziduální) proud převážně činného charakteru o velikosti 3 až 10 % z celkového kapacitního proudu, kde 10 % je horní hranice zbytkového proudu dle normy [14], která by měla být kompenzací dosažena. Norma [14] připouští provoz kompenzovaných sítí se zemním spojením při velikosti zbytkového proudu v místě zemního spojení maximálně 60 A , přičemž doporučuje, že se nemají tvořit velké síťové celky. Možnost použití zhášecí tlumivky je dána normou [14] pro venkovní síť s hodnotou celkového zemního kapacitního proudu do 100 A , pro smíšené síť s maximální

velikostí zemního kapacitního proudu 300 A a pro kabelové sítě, které je dovoleno provozovat do 450 A kapacitního proudu sítě.

Obecně je v DS využíváno centralizované kompenzace za pomoci jedné zhášecí tlumivky zapojené mezi uzel transformátoru a zemnicí soustavu rozvodny. V případě nevyvedeného uzlu vinutí se tlumivka připojí k uzlu uměle vytvořenému trojfázovou nulovou tlumivkou. Zhášecí tlumivka je laděná za provozu automatikou, která nastavuje tlumivku do paralelní rezonance s kapacitou sítě. Výhodou kompenzovaných sítí je možnost provozu sítě bez přerušení dodávky elektrické energie po dobu potřebnou k nalezení poruchy. V případě nutnosti provozu postiženého vedení je rozhodujícím faktorem pro vypnutí oteplení oleje zhášecí tlumivky nad dovolenou mez.



Obr. 8: Zemní porucha v síti s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku

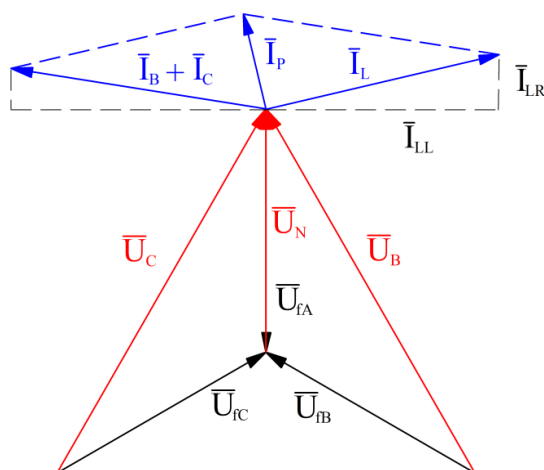


Obr. 9: Fázorový diagram ideální kompenzace poruchového proudu

Ideální kompenzace kapacitního proudu, tzn. vhodné nastavení indukčnosti tlumivky, zachycuje fázorový diagram na *Obr. 9*. Proud tlumivkou je v protifázi s kapacitním poruchovým proudem ($I_p = I_L$), tudíž dojde k úplné kompenzaci a místem poruchy neteče žádný proud. V tomto případě je indukčnost L zhášecí tlumivky s kapacitou sítě proti zemi C v paralelní rezonanci, tzn. že zhášecí tlumivka je naladěna na hodnotu indukčnosti:

$$L = 1/3\omega^2 C \quad (1.2)$$

Jak již bylo uvedeno, ve skutečnosti zůstává v místě poruch zbytkový proud, který obsahuje nevykompenzovaný proud způsobený nepřesným nastavením tlumivky, nevykompenzovanou činnou složku proudu způsobenou svody a činným odporem tlumivky a nakonec proudy vyšších harmonických (*Obr. 10*).



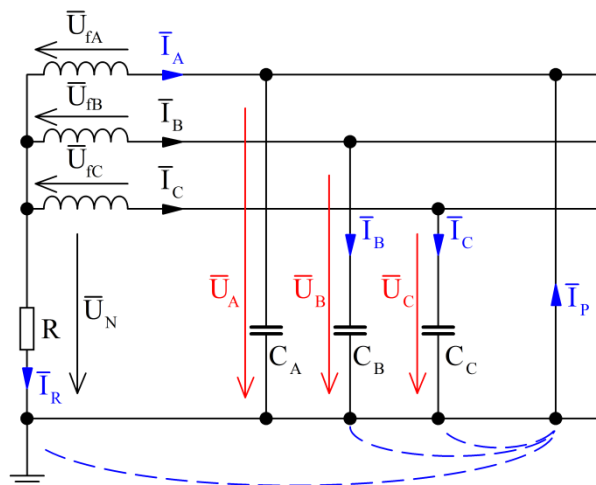
Obr. 10: Fázorový diagram kompenzace poruchového proudu se zbytkovým proudem

1.2.3 Síť s uzlem uzemněným přes rezistor

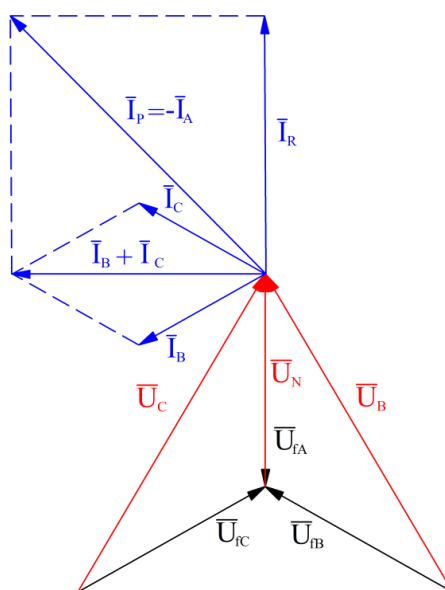
Vlivem rozšiřování kabelových sítí se snižuje počet přechodných poruch. Poruchy bývají trvalého charakteru, takže se zmenšení poruchového proudu nemůže projevit v samozhášení poruch jako při obloukových poruchách u venkovního vedení. Navíc velikost zemních kapacitních proudů na jednotku délky u kabelových vedení je 30 až 70 krát větší než u venkovních vedení, což by vyžadovalo zhášecí tlumivky značných výkonů (několik MVar). [4]

Většinou dochází k přechodu jednofázového zemního spojení ve zkrat a z hlediska velikosti poruchového proudu je nutné kabelový úsek s poruchou vypnout. S požadavkem

na rychlé vypínání zemních poruch se začal prosazovat systém uzemnění uzlu přes rezistor (uzlový odporník) na Obr. 11, kde rezistor nekompensuje kapacitní proudy, pouze omezuje celkovou velikost poruchových proudů na přijatelnou mez. Velikost poruchového proudu závisí na celkové rozloze sítě, ale se vzdáleností poruchy od transformátoru klesá.



Obr. 11: Zemní porucha v síti s uzlem uzemněným přes rezistor



Obr. 12: Fázorový diagram pro zemní poruchu v blízkosti transformátoru

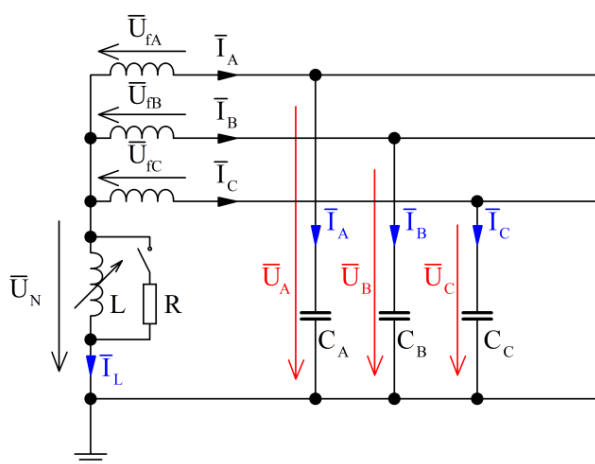
S ohledem na omezení přepětí při zemní poruše, musí být velikost odporníku taková, aby jmenovitý proud odporníku byl větší než kapacitní (poruchový) proud sítě:

$$I_{RN} = U_f / R_N \geq I_p. \quad (1.3)$$

1.2.4 Síť s přechodným uzemněním

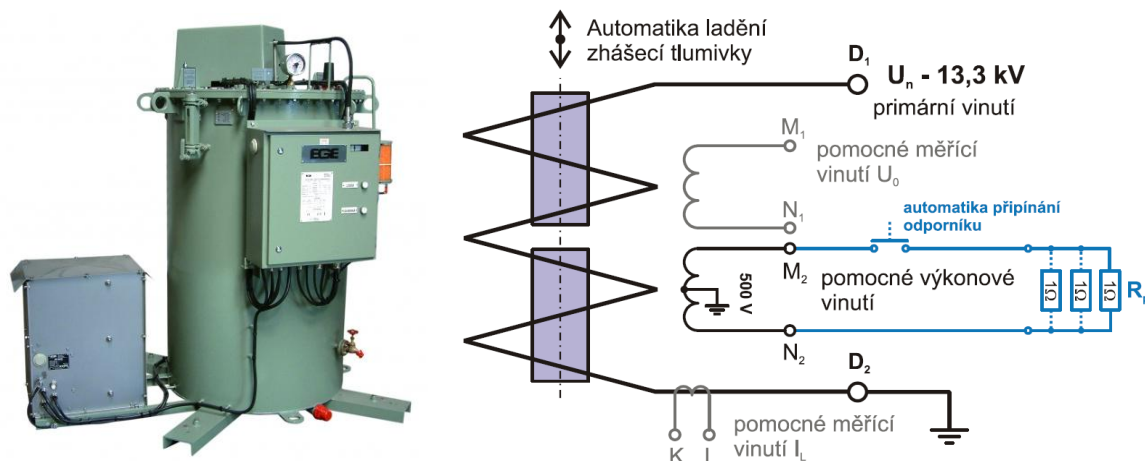
Kombinace výhod provozu zemních kapacitních proudů pomocí zhašecí tlumivky a provozu přes rezistor je provoz s krátkodobým přechodným uzemněním uzlu přes rezistor. Jedná se o provoz s kompenzací zemních kapacitních proudů, kde je při trvajícím poruše připojen paralelně k tlumivce rezistor, čímž dojde k zvětšení poruchového proudu a tím k vytvoření podmínky pro spolehlivý náběh ochran postiženého vývodu. Schematické znázornění sítě s přechodovým uzemněním je zobrazeno na *Obr. 13*. Pro velikost odporu platí:

$$R \leq \frac{1}{3\omega C} \quad (1.4)$$



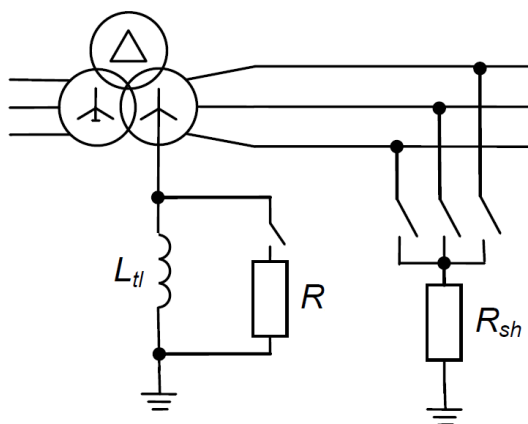
Obr. 13: Síť s přechodným uzemněním uzlu

K tomuto účelu se u některých kompenzovaných sítí používá zatěžování pomocného vinutí zhašecí tlumivky rezistorem. Schematické znázornění běžně používané zhašecí tlumivky je zobrazeno na *Obr. 14*. Sestava pomocných odporníků je připojována automatickou k výkonovému vinutí s nominálním napětím 500 V na základě kritéria U_0 s nastavením v oblasti přibližně 2 kV až 3 kV [1]. Hodnoty odporu sekundárního odporníku se pohybují v rozmezí několika desetín až po jednotky ohmů [10]. Volba hodnoty sekundárního odporníku je závislá na mnoha aspektech jako například: kvalita ochran, přesnost měření nulové složky napětí a proudu, velikost přirozené nesymetrie nebo hodnota odporu zemní poruchy [10]. Dnešní automatika umožňuje volbu hodnoty víceúrovňového sekundárního odporníku na základě výpočtu odporu zemní poruchy a umožňuje tak identifikaci zemního spojení na úrovni jednotek až desítek kiloohmů [10].



Obr. 14: Zhášecí tlumivka s odporníkem [8] a její schematické znázornění [1]

Společně s automatikou připínání odporníku se v některých rozvodnách využívá metody přizemnění postižené fáze (tzv. shunting) naznačen na Obr. 15. Tato metoda slouží k omezení zbytkového proudu, a tím k eliminaci rizika úrazu krokovým či dotykovým napětím během doby do odstranění příčiny poruchy. Po sepnutí spínače přizemnění se vytvoří paralelní cesta k poruchovému proudu a proud se přerozdělí v poměru impedancí mezi místo poruchy a místo přizemnění postižené fáze. Ve většině případů je odpor vytvořeného vodivého spojení mnohem menší než odpor v místě poruchy, dojde k přenesení poruchového proudu z místa poruchy do místa přizemnění v napájecí rozvodně.



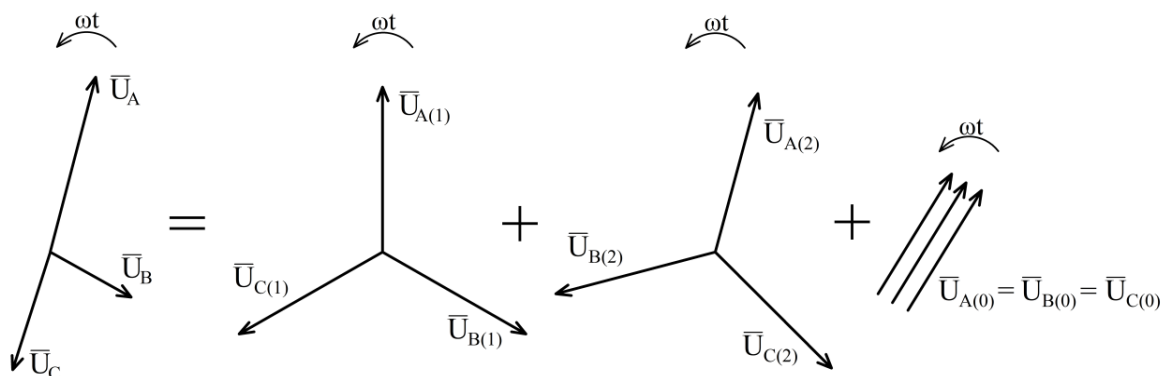
Obr. 15: Metoda přizemnění postižené fáze [15]

2 Metody výpočtu zemních poruch

Vzhledem k zadání mé diplomové práce jsem se zaměřil na výpočet zemních spojení metodou Fortescue a metodou uzlových napětí. Rozebral jsem případy zemního spojení v izolované síti, kompenzované síti a odporově uzemněné síti. Odvozování vztahů jsem provedl za pomoci literatury [1], [3], [4].

2.1 Metoda Fortescue

Před začátkem řešení zemních poruch pro jednotlivé typy soustav pomocí metody Fortescue nejdříve popíši základy této metody.



Obr. 16: Rozklad nesymetrické soustavy na tři symetrické soustavy

Metoda souměrných složek resp. metoda Fortescue spočívá v rozkladu nesymetrické třífázové soustavy napětí (proudů) na tři samostatné symetrické složkové systémy tzv. souměrné složky (viz Obr. 16), které se nazývají sousledná (1), zpětná (2) a netočivá (0). Nesymetrické fázory napětí (taktéž pro proud) lze pak vyjádřit pomocí souměrných složek následovně:

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_A &= \bar{U}_{A(1)} + \bar{U}_{A(2)} + \bar{U}_{A(0)} \\
 \bar{U}_B &= \bar{U}_{B(1)} + \bar{U}_{B(2)} + \bar{U}_{B(0)} \\
 \bar{U}_C &= \bar{U}_{C(1)} + \bar{U}_{C(2)} + \bar{U}_{C(0)}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Jako referenční fázi zvolím fázi A. Pak lze soustavu rovnic přepsat na:

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\
 \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\
 \bar{U}_C &= \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

kde \bar{a} a \bar{a}^2 jsou operátory natočení v Gaussově rovině, a lze je vyjádřit komplexním číslem:

$$\begin{aligned}
 \bar{a} &= e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\
 \bar{a}^2 &= e^{j-120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Pokud

$$\underline{\bar{U}} = \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix}; \quad \underline{\bar{U}}_S = \begin{bmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

lze přepsat soustavu do maticového tvaru

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{bmatrix} \rightarrow \underline{\bar{U}} = \underline{\bar{F}} \cdot \underline{\bar{U}}_S \tag{2.5}$$

Jelikož je determinant matice \bar{F} různý od nuly, lze získat inverzní matici \bar{F}^{-1} a přejít tak od fázových hodnot na hodnoty souměrných složek.

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} \rightarrow \underline{\bar{U}}_S = \underline{\bar{F}}^{-1} \cdot \underline{\bar{U}} \tag{2.6}$$

Maticovému zápisu odpovídá soustava rovnic:

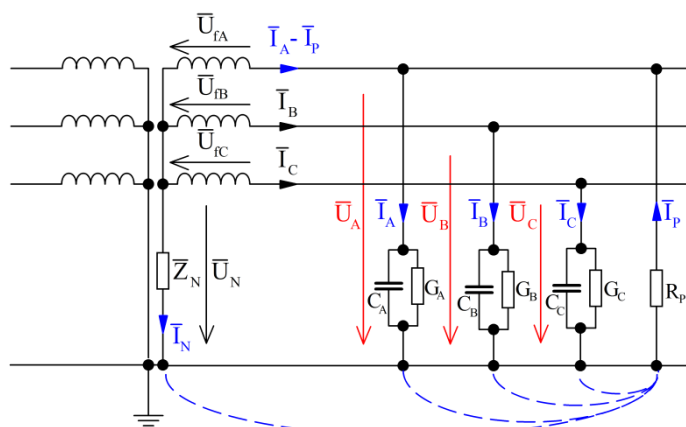
$$\begin{aligned}
 \bar{U}_{(1)} &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{a}\bar{U}_B + \bar{a}^2\bar{U}_C) \\
 \bar{U}_{(2)} &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{a}^2\bar{U}_B + \bar{a}\bar{U}_C) \\
 \bar{U}_{(0)} &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C)
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Jednotlivé složkové soustavy lze považovat za samostatné systémy. Sečtením symetrických napětí a symetrických úbytků na impedancích vyjádřím symetrická napětí zdroje. Napětí zdroje má pouze souslednou složku. Pro složkový systém pak platí soustava rovnic:

$$\begin{aligned}\bar{U} &= \bar{U}_{(1)} + \bar{Z}_{(1)}\bar{I}_{(1)} \rightarrow \bar{U}_{(1)} = \bar{U} - \bar{Z}_{(1)}\bar{I}_{(1)} \\ 0 &= \bar{U}_{(2)} + \bar{Z}_{(2)}\bar{I}_{(2)} \rightarrow \bar{U}_{(2)} = -\bar{Z}_{(2)}\bar{I}_{(2)} \\ 0 &= \bar{U}_{(0)} + \bar{Z}_{(0)}\bar{I}_{(0)} \rightarrow \bar{U}_{(0)} = -\bar{Z}_{(0)}\bar{I}_{(0)}\end{aligned}\quad (2.8)$$

2.1.1 Síť uzemněná přes obecnou impedanci

Protože provádím rozbor zemních poruch za různých provozních podmínek (systém uzemnění) a poruchových podmínek (typ zemního spojení v závislosti na přechodovém odporu v místě zemního spojení) provedu obecný výpočet zemní poruchy pro zjednodušené obecné schéma zemní poruchy zobrazující *Obr. 17*. Uzel transformátoru je uzemněn přes obecnou impedanci \bar{Z}_N a zemní poruchu reprezentuje přechodový odpor R_P .



Obr. 17: Schéma sítě s obecnou impedancí v uzlu transformátoru

Pro zemní spojení lze napsat charakteristické rovnice pro proudy:

$$\bar{I}_B = 0; \quad \bar{I}_C = 0 \quad (2.9)$$

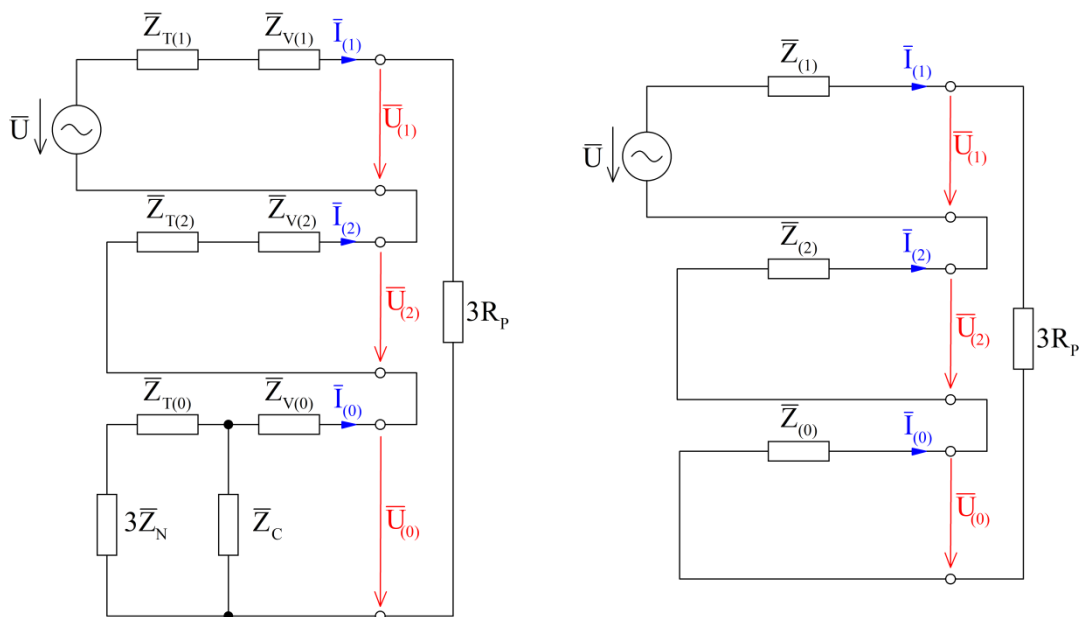
Pro složkové hodnoty proudů platí rovnice:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{(1)} \\ \bar{I}_{(2)} \\ \bar{I}_{(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_A \\ \bar{I}_A \end{bmatrix}, \quad (2.10)$$

ze kterých vyplývá:

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \bar{I}_A \quad (2.11)$$

Na základě rovnice (2.11) je možné propojit náhradní složková schémata do série (Obr. 18). Sousední složka impedance $\bar{Z}_{(1)}$ zahrnuje sousledné složky vedení $\bar{Z}_{V(1)}$ a transformátoru $\bar{Z}_{T(1)}$, stejně tak zpětná složka impedance $\bar{Z}_{(2)}$ zahrnuje zpětné složky vedení $\bar{Z}_{V(2)}$ a transformátoru $\bar{Z}_{T(2)}$. Netočivá složka $\bar{Z}_{(0)}$ je dána dle konfigurace zapojení netočivé složky netočivou složkou transformátoru $\bar{Z}_{T(0)}$ a vedení $\bar{Z}_{V(0)}$, celkovou příčnou impedancí všech vedení proti zemi \bar{Z}_C a trojnásobkem obecné impedance v uzlu transformátoru \bar{Z}_N . Pro podrobnější vyjádření by bylo třeba uvažovat impedance přispívající impedance nadřazené soustavy a impedance generátoru.



Obr. 18: Zjednodušené složkové schéma pro obecné zemní spojení

Ze schématu vyplývají vztahy pro hodnoty složkových proudů:

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)} = \frac{\bar{U}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \quad (2.12)$$

Pro napětí souměrných složek platí:

$$\begin{aligned}
\bar{U}_{(1)} &= (\bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P)\bar{I}_{(1)} = \frac{\bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \bar{U} \\
\bar{U}_{(2)} &= -\bar{Z}_{(2)}\bar{I}_{(2)} = -\bar{Z}_{(2)}\bar{I}_{(1)} = \frac{-\bar{Z}_{(2)}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \bar{U} \\
\bar{U}_{(0)} &= -\bar{Z}_{(0)}\bar{I}_{(0)} = -\bar{Z}_{(0)}\bar{I}_{(1)} = \frac{-\bar{Z}_{(0)}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \bar{U}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Fázová napětí se stanoví ze soustavy rovnic (2.2) dosazením jednotlivých složek napětí (2.13):

$$\begin{aligned}
\bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \frac{3R_P}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \bar{U} \\
\bar{U}_B &= \bar{a}^2\bar{U}_{(1)} + \bar{a}\bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \left(\bar{a}^2 - \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \right) \bar{U} \\
\bar{U}_C &= \bar{a}\bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2\bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \left(\bar{a} - \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \right) \bar{U}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Dle (2.9) a (2.11) jsou vtahy pro fázové proudy:

$$\bar{I}_A = 3\bar{I}_{(1)}; \quad \bar{I}_B = 0; \quad \bar{I}_C = 0 \tag{2.15}$$

Poruchový proud \bar{I}_P je záporně vzatý proud \bar{I}_A :

$$\bar{I}_P = -\bar{I}_A = -3\bar{I}_{(1)} = \frac{-3\bar{U}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \tag{2.16}$$

Fázor napětí uzlu:

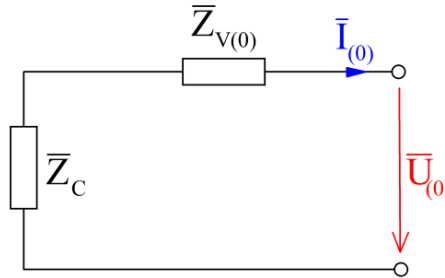
$$\bar{U}_N = \bar{U}_0 = -\bar{Z}_{(0)}\bar{I}_{(0)} = -\bar{Z}_{(0)}\bar{I}_{(1)} = \frac{-\bar{Z}_{(0)}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \bar{U} \tag{2.17}$$

Ze vztahů vyplývá, že proudové a napěťové poměry jsou ovlivňovány netočivou složkou impedance, tedy charakterem uzemnění uzlu sítě. Na základě odvození rovnic v této kapitole budu určovat zidealizované napěťové a proudové výpočty pro dané systémy provozu uzlu transformátoru.

2.1.2 Izolovaný uzel

V náhradním schématu (*Obr. 17*) pro provoz soustavy s izolovaným uzlem uvažují hodnotu obecné impedance $\bar{Z}_N \rightarrow \infty$. Pak platí pro netočivou složku impedance dle *Obr. 19* vztah:

$$\bar{Z}_{(0)} = \bar{Z}_C + \bar{Z}_{V(0)} \quad (2.18)$$



Obr. 19: Netočivá složka sítě s izolovaným uzlem

Provedu-li zanedbání všech podélných impedancí, tzn. že budu uvažovat pouze kapacitní reaktance vedení ($\bar{Z}_{(0)} = \bar{Z}_C$), a uvažuji-li kovové zemní spojení ($R_p = 0$), lze odvodit pomocí rovnic v kapitole 2.1.1 veškeré vztahy potřebné k analýze ideálního kovového zemního spojení.

Hodnoty složkových proudů:

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)} = \frac{\bar{U}}{\bar{Z}_{(0)}} = \frac{\bar{U}}{-jX_C} \quad (2.19)$$

Složková napětí:

$$\bar{U}_{(1)} = \bar{U}; \quad \bar{U}_{(2)} = 0; \quad \bar{U}_{(0)} = -\bar{U} \quad (2.20)$$

Fázová napětí:

$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = 0 \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = (\bar{a}^2 - 1) \bar{U} = -\sqrt{3} e^{j30^\circ} \bar{U} \\ \bar{U}_C &= \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = (\bar{a} - 1) \bar{U} = -\sqrt{3} e^{-j30^\circ} \bar{U} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Poruchový proud:

$$\bar{I}_p = \frac{-3\bar{U}}{\bar{Z}_{(0)}} = -j3\omega C\bar{U} \quad (2.22)$$

Napětí uzlu sítě:

$$\bar{U}_N = \bar{U}_{(0)} = -\bar{U} \quad (2.23)$$

Ze vztahů (2.21) jsou potvrzeny známé předpoklady pro vznik kovového zemního spojení za zjednodušujících podmínek a to, že napětí postižené fáze klesne k nule a napětí ostatních fází se zvýší na napětí sdružené.

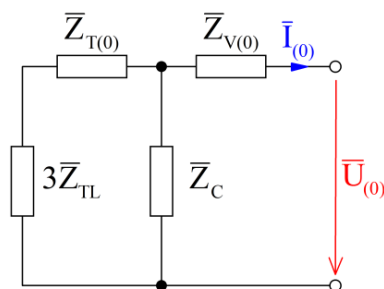
V případě nenulového odporu poruchy využijí k podrobnějšímu vyjádření napětí \bar{U}_N a poruchového proudu \bar{I}_p obecné vztahy (2.16) a (2.17). Po dosazení za $\bar{Z}_{(0)}$ platí pro napětí nulového bodu a poruchový proud vztahy:

$$\bar{U}_N = \frac{-\bar{Z}_{(0)}}{\bar{Z}_{(0)} + 3R_p} \bar{U} = -\frac{R_p^{-1}}{j3\omega C + R_p^{-1}} \bar{U} \quad (2.24)$$

$$\bar{I}_p = \frac{-3\bar{U}}{\bar{Z}_{(0)} + 3R_p} = -j3\omega C\bar{U} \frac{R_p^{-1}}{j3\omega C + R_p^{-1}} \quad (2.25)$$

2.1.3 Uzel uzemněný přes zhášecí tlumivku

Uzemnění nulového uzlu transformátoru přes zhášecí tlumivku se projeví v náhradním složkovém schématu oproti izolované síti pouze změnou obecné impedance na trojnásobek impedance tlumivky. Impedanci tlumivky představuje paralelní spojení indukčnosti L a vodivosti G , která představuje činné ztráty tlumivky. Náhradní schéma netočivé složky je zobrazeno na *Obr. 20*:



Obr. 20: Netočivá složka kompenzované sítě

Opět jako v případě izolovaného uzlu provedu zjednodušení a zanedbám podélné impedance, svody a činnou složku indukčnosti.

Velikosti netočivé impedance je vyjádřena paralelním spojením induktivní reaktance zhášecí tlumivky a kapacity vedení:

$$\bar{Z}_{(0)} = j \frac{3X_L X_C}{X_C - 3X_L} \quad (2.26)$$

Poruchový zemní proud:

$$\bar{I}_P = \frac{-3\bar{U}}{\bar{Z}_{(0)}} = -j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \bar{U} \quad (2.27)$$

Ze vztahu (2.27) vyplývá podmínka pro nulový poruchový zemní proud:

$$X_C - 3X_L = 0 \rightarrow X_L = \frac{1}{3} X_C \quad (2.28)$$

Proud jdoucí indukčností:

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{U}_N}{j3X_L} = j \frac{\bar{U}}{3\omega L} \quad (2.29)$$

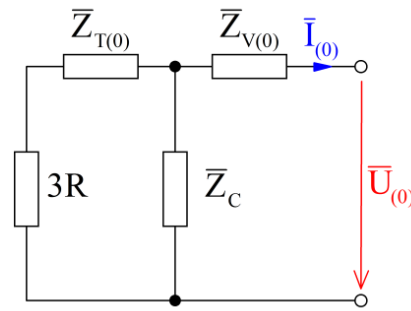
Pro odporové zemní spojení platí:

$$\bar{U}_N = \frac{-\bar{Z}_{(0)}}{\bar{Z}_{(0)} + 3R_P} \bar{U} = - \frac{R_P^{-1}}{j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) + R_P^{-1}} \bar{U} \quad (2.30)$$

$$\bar{I}_P = \frac{-3\bar{U}}{\bar{Z}_{(0)} + 3R_P} = -j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \bar{U} \frac{R_P^{-1}}{j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) + R_P^{-1}} \quad (2.31)$$

2.1.4 Uzel uzemněný přes rezistor

Analogicky dle kapitoly 2.1.3 jsem odvodil náhradní zjednodušené schéma a vztahy pro síť s uzlem uzemněným přes odporník. Netočivá složka se změní dle schématu uvedeného na *Obr. 21*.



Obr. 21: Schéma netočivé složky pro uzel uzemněným přes rezistor

Velikost netočivé složky impedance po zanedbání netočivé složky impedance transformátoru a vedení je určena vztahem:

$$Z_{(0)} = \frac{j3RX_C}{jX_C - 3R} \quad (2.32)$$

Poruchový proud je pak vyjádřen jako:

$$\bar{I}_P = \frac{-3\bar{U}}{\bar{Z}_{(0)}} = -\frac{jX_C - 3R}{jRX_C} \bar{U} = -\left(\frac{1}{R} + j3\omega C\right) \bar{U} \quad (2.33)$$

Vztahy pro poruchu s přechodovým odporem jsou:

$$\bar{U}_N = -\frac{R}{R + R_P + j(3\omega CR_P R)} \bar{U} \quad (2.34)$$

$$\bar{I}_P = \frac{-3\bar{U}}{\bar{Z}_{(0)} + 3R_P} = -\left(\frac{1}{R} + j3\omega C\right) \bar{U} \frac{R}{R + R_P + j(3\omega CR_P R)} \quad (2.35)$$

2.2 Metoda uzlových napětí

V této kapitole provedu analýzu pro síť s izolovaným uzlem, uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku a uzlem uzemněným přes uzlový odporník metodou uzlových napětí. Tato metoda využívá aplikaci Kirchhoffových zákonů a bude mi sloužit k ověření a kontrole vztahů odvozených pomocí metody Fortescue v předchozí kapitole. Nutno podotknout, že veškeré výpočty metodou uzlových napětí provádím pro zjednodušená schémata z kapitoly 1.2, kde zanedbávám podélné parametry sítě a příčné svody.

2.2.1 Síť uzemněná přes obecnou impedanci

Na úvod sestavím soustavu rovnic pro obecné schéma na *Obr. 17*.

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_N + \bar{U}_{fA} \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_N + \bar{U}_{fB} \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_N + \bar{U}_{fC}\end{aligned}\tag{2.36}$$

Jelikož mám v soustavě čtyři neznámé, potřebuji ještě čtvrtou rovnici.

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C + \bar{I}_N = \bar{I}_P\tag{2.37}$$

Jednotlivé proudy vyjádřím pomocí uzlových napětí. Uvažuji dokonale symetrickou síť, tzn. že impedance vedení vůči zemi bude ve všech fázích stejná.

$$\frac{\bar{U}_A}{\bar{Z}_C} + \frac{\bar{U}_B}{\bar{Z}_C} + \frac{\bar{U}_C}{\bar{Z}_C} + \frac{\bar{U}_N}{\bar{Z}_N} = -\frac{\bar{U}_A}{R_P}\tag{2.38}$$

Za napětí \bar{U}_A , \bar{U}_B , \bar{U}_C dosadím z (2.36) a po úpravách získám obecný vztah pro napětí uzlu transformátoru ve tvaru:

$$\bar{U}_N = -\frac{1}{R_P \cdot \left(\frac{1}{\bar{Z}_N} + \frac{3}{\bar{Z}_C} + \frac{1}{R_P}\right)} \bar{U}_{fA}\tag{2.39}$$

Z napětí vyjádřených v (2.42) a (2.45) lze pak určit proudy v obvodu.

$$\bar{I}_A = \frac{\bar{U}_A}{\bar{Z}_C}, \quad \bar{I}_B = \frac{\bar{U}_B}{\bar{Z}_C}, \quad \bar{I}_C = \frac{\bar{U}_C}{\bar{Z}_C}, \quad \bar{I}_N = \frac{\bar{U}_N}{\bar{Z}_N}\tag{2.40}$$

2.2.2 Izolovaný uzel

K vyjádření napěťových a proudových poměrů pro případ kovového zemního spojení v síti s izolovaným uzlem využiji schéma na *Obr. 4*. Ze schématu vyplývá, že napětí postižené fáze vlivem dokonalého kovového zemního spojení klesne na nulu a poruchový proud bude dán součtem proudů protékající kapacitami zdravých fází.

$$\bar{U}_A = 0\tag{2.41}$$

$$\bar{I}_P = \bar{I}_B + \bar{I}_C \quad (2.42)$$

Dosažením vztahu (2.41) do první rovnice soustavy (2.36) získám velikost uzlového napětí transformátoru (2.43). Následným dosažením do zbylých rovnic získám vztahy pro napětí zdravých fází (2.44).

$$\bar{U}_N = -\bar{U}_{fA} \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_B &= \bar{U}_N + \bar{U}_{fB} = (\bar{a}^2 - 1)\bar{U}_{fA} = -\sqrt{3}e^{j30^\circ}\bar{U}_{fA} \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_N + \bar{U}_{fC} = (\bar{a} - 1)\bar{U}_{fA} = -\sqrt{3}e^{-j30^\circ}\bar{U}_{fA} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Dosažením do vztahu (2.42) dostanu výsledný vztah pro poruchový proud:

$$\begin{aligned} \bar{I}_P &= \frac{1}{\bar{Z}_C}(\bar{U}_B + \bar{U}_C) = j\omega C[(\bar{a}^2 - 1) + (\bar{a} - 1)]\bar{U}_{fA} = \\ &= j\omega C(-2 + \bar{a}^2 + \bar{a} + 1 - 1)\bar{U}_{fA} = -j3\omega C\bar{U}_{fA} = j3\omega C\bar{U}_N \end{aligned} \quad (2.45)$$

Budu-li uvažovat odporové zemní spojení (*Obr. 6*), napětí postižené fáze je nenulové a pro poruchový proud platí:

$$\bar{I}_P = -\frac{\bar{U}_A}{R_P} = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C \quad (2.46)$$

Dosažení za proudy z (2.40) do (2.46) dostanu:

$$-\frac{\bar{U}_A}{R_P} = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = \frac{1}{\bar{Z}_C}(\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C) = j\omega C(\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C) \quad (2.47)$$

Vyjádřím-li napětí \bar{U}_A a \bar{U}_B a \bar{U}_C z (2.36) a dosadím do (2.47) dostanu:

$$-\frac{\bar{U}_{fA} + \bar{U}_N}{R_P} = j\omega C(\bar{U}_{fA} + \bar{U}_{fB} + \bar{U}_{fC}) + j3\omega C\bar{U}_N \quad (2.48)$$

Napětí lze vyjádřit jako:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{fB} &= \bar{a}^2\bar{U}_{fA} \\ \bar{U}_{fC} &= \bar{a}\bar{U}_{fA} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Po dosazení (2.49) do (2.48) a dalších úpravách dostanu vztah pro napětí uzlu transformátoru ve tvaru:

$$\bar{U}_N = -\frac{j\omega C(1 + \bar{a}^2 + \bar{a}) + R_P^{-1}}{j3\omega C + R_P} \bar{U}_{fA} = -\frac{R_P^{-1}}{j3\omega C + R_P^{-1}} \bar{U}_{fA} \quad (2.50)$$

Pro poruchový proud pak platí:

$$\begin{aligned} \bar{I}_P &= j\omega C(\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C) = j\omega C(\bar{U}_{fA} + \bar{U}_{fB} + \bar{U}_{fC} + 3\bar{U}_N) = \\ &= -3j\omega C \bar{U}_{fA} \frac{R_P^{-1}}{j3\omega C + R_P^{-1}} \end{aligned} \quad (2.51)$$

2.2.3 Uzel uzemněný přes zhášecí tlumivku

Pro odvozování vztahů pro kompenzovanou síť vycházím ze schématu na *Obr. 8*. Stejně jako pro případ kovového zemního spojení v síti s izolovaným uzlem, platí pro napětí uzlu transformátoru (2.43). Proud zhášecí tlumivky je pak vyjádřen vztahem:

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{U}_N}{jX_L} = -j \frac{\bar{U}_N}{\omega L} \quad (2.52)$$

Poruchový proud je dán součtem proudů tekoucích kapacitami zdravých fází a proudem zhášecí tlumivky.

$$\bar{I}_P = \bar{I}_B + \bar{I}_C + \bar{I}_L = j3\omega C \bar{U}_N + \frac{\bar{U}_N}{j\omega L} = -\bar{U}_{fA} \left(j3\omega C + \frac{1}{j\omega L} \right) \quad (2.53)$$

Pro plně vykompenzovaný poruchový proud ($\bar{I}_P = 0$) musí platit:

$$j3\omega C + \frac{1}{j\omega L} = 0 \quad (2.54)$$

Vyjádřím-li L ze vztahu (2.54) získám velikost zhášecí tlumivky:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C} \quad (2.55)$$

Ve skutečných poměrech však nelze dosáhnout úplné kompenzace poruchového

proudu. V místě poruchy teče zbytkový proud zapříčiněný činným odporem zhášecí tlumivky R_L a svody vedení G_0 . Pak lze poruchový proud vyjádřit vztahem:

$$\bar{I}_P = \left[\frac{1}{R_L} + 3G_0 + j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \bar{U}_N \quad (2.56)$$

Pro odvození vztahů v případě odporového zemního spojení využijí obecné vztahy (2.38) a (2.39).

$$\begin{aligned} \bar{U}_N &= -\frac{1}{R_P \cdot \left(\frac{1}{\bar{Z}_N} + \frac{3}{\bar{Z}_C} + \frac{1}{R_P} \right)} \bar{U}_{fA} = -\frac{1}{R_P \cdot \left(\frac{1}{j\omega L} + j3\omega C + \frac{1}{R_P} \right)} \bar{U}_{fA} = \\ &= -\frac{R_P^{-1}}{j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) + R_P^{-1}} \bar{U}_{fA} \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_P &= \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C + \bar{I}_L = j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \bar{U}_N = \\ &= -j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \bar{U}_{fA} \frac{R_P^{-1}}{j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) + R_P^{-1}} \end{aligned} \quad (2.58)$$

2.2.4 Uzel uzemněný přes rezistor

Pro případ kovového zemního spojení platí pro napětí uzlu (2.43). Proud uzlovým odporníkem je dán jako:

$$\bar{I}_R = \frac{\bar{U}_N}{R} \quad (2.59)$$

Poruchový proud je dán dle (2.60) vektorovým součtem proudů kapacitami zdravých fází a proudu tekoucí přes uzlový odporník.

$$\bar{I}_P = \bar{I}_B + \bar{I}_C + \bar{I}_R = \left(\frac{1}{R} + j3\omega C \right) \bar{U}_N = -\left(\frac{1}{R} + j3\omega C \right) \bar{U}_{fA} \quad (2.60)$$

Z podmínky tlumení (1.3) a rovnice (2.60) pro velikost uzlového odporníku musí platit:

$$R \leq \frac{1}{3\omega C} \quad (2.61)$$

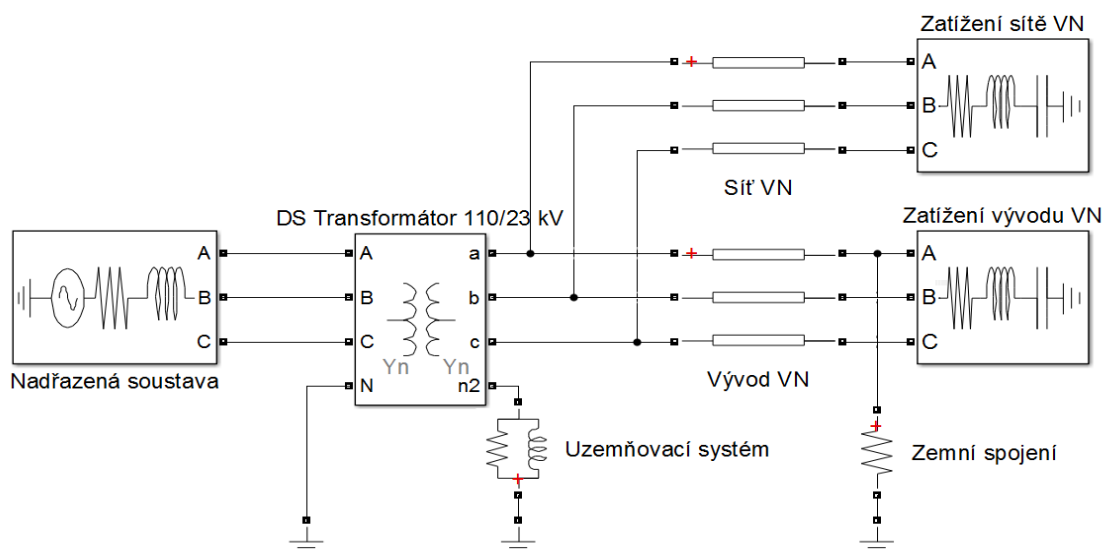
Jako u všech předcházejících případů odvodím i zde vztahy pro zemní spojení s nenulovým poruchovým odporem.

$$\begin{aligned}\bar{U}_N &= -\frac{1}{R_p \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{3}{\bar{Z}_C} + \frac{1}{R_p}\right)} \bar{U}_{fA} = -\frac{1}{R_p \cdot \left(\frac{1}{R} + j3\omega C + \frac{1}{R_p}\right)} \bar{U}_{fA} \\ &= -\frac{R}{R + R_p + j(3\omega C R_p R)} \bar{U}_{fA}\end{aligned}\quad (2.62)$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_p &= \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C + \bar{I}_R = \left(\frac{1}{R} + j3\omega C\right) \bar{U}_N = \\ &= -\left(\frac{1}{R} + j3\omega C\right) \bar{U}_{fA} \frac{R}{R + R_p + j(3\omega C R_p R)}\end{aligned}\quad (2.63)$$

3 Analytické řešení konkrétní sítě

V této kapitole provedu analytický výpočet modelu reálné kompenzované sítě naznačené na Obr. 22 metodou Fortescue a metodou uzlových napětí. Síť VN je reprezentována dvěma vývody, kde jeden z vývodů představuje konkrétní kabelový vývod postižený poruchou a druhý vývod nahrazuje celou síť VN připojenou na sekundární stranu distribučního transformátoru 110/23 kV. Nadřazená soustava je nahrazena ideálním tvrdým zdrojem napětí. Nutno říci, že model je zcela zidealizován. Parametry jednotlivých fází jsou stejné, mezifázové vazby jsou zanedbány a prvky jsou lineární. Znamená to tedy, že náhradní síť je zcela symetrická a nezohledňuje změnu parametrů soustavy během zemního spojení.



Obr. 22: Blokové schéma příkladu VN sítě

3.1 Definice parametrů náhradního schématu sítě VN

Prvním krokem byla definice potřebných hodnot pro výpočet prvků náhradního schématu VN sítě. Hodnoty byly nadefinovány na základě odborné zkušenosti z praxe mým konzultantem Františkem Žákem a jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 1: Parametry distribučního transformátoru TR_110/23kV [11]

Jmenovitý výkon	S_{NT} [VA]	40
Proud nakrátko	u_k [%]	11.5
Proud naprázdno	i_0 [%]	0.15
Ztráty naprázdno	dP_0 [kW]	19.5
Ztráty nakrátko	dP_k [kW]	110
Převod	p [-]	110/23

Tab. 2: Parametry distribuční sítě VN [7]

Kapacitní proud sítě	I_{C0} [A]	200
Svody	I_W [A]	2% I_{C0}
Zatížení	P_{ZS} [kW]	15
	Q_{ZS} [kVAr]	2

Tab. 3: Parametry vývodu 22AXEKVCEY 185 mm² poruchou [7][9]

Kapacitní proud vývodu	I_{C01} [A]	20
Svody	I_W [A]	2% I_{C01}
Odpor	R_V [Ω /km]	0.164
Indukčnost	L_V [Ω /km]	0.54
Délka vývodu	l [km]	5
Zatížení	P_{ZV} [kW]	3
	Q_{ZV} [kVAr]	1

3.2 Výpočet parametrů náhradního schématu sítě VN

Z nadefinovaných hodnot z kapitoly 3.1 výpočtu všechny požadované parametry prvků náhradních modelů prvků distribuční sítě VN nutné jak pro analytický výpočet, tak i pro následné simulace.

3.2.1 Transformátor 110/23kV

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT}} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{22^2}{40} = 1,3915 \Omega$$

$$R_{T1} = \frac{\Delta P_k}{S_{NT}} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT}} = \frac{110}{40000} \cdot \frac{22^2}{40} = 0,0333 \Omega \quad (3.1)$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = \sqrt{1,3915^2 - 0,0333^2} = 1,3911 \Omega$$

$$R_1 = \frac{R_{T1}}{2} \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = \frac{0,0333}{2} \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 0,4159 \Omega$$

$$R_2 = \frac{R_{T1}}{2} = \frac{0,0333}{2} = 0,0166 \Omega$$

$$X_1 = \frac{X_{T1}}{2} \cdot \left(\frac{110}{23}\right)^2 = \frac{1,3911}{2} \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 17,3888 \Omega \quad (3.2)$$

$$L_1 = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{17,3888}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0554 H$$

$$X_2 = \frac{X_{T1}}{2} = \frac{1,3911}{2} = 0,6956 \Omega$$

$$L_2 = \frac{X_2}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,6956}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0022 H$$

$$\begin{aligned}
G_{Fe} &= \frac{\Delta P_0}{U_n^2} = \frac{19000}{110000^2} = 1,6116 \mu S \\
R_{Fe} &= \frac{1}{G_{Fe}} = \frac{1}{1,6116 \cdot 10^{-6}} = 0,6205 M\Omega \\
Y_G &= \frac{i_0}{100} \cdot \frac{S_N}{U_n^2} = \frac{0,15}{100} \cdot \frac{40}{110^2} = 4,9587 \mu S \\
X_h &= 1/\sqrt{Y_G^2 - G_{Fe}^2} = 1/\sqrt{4,9587^2 - 1,6116^2} = 0,2132 M\Omega \\
L_h &= \frac{X_h}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,2132 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 678,7728 H
\end{aligned} \tag{3.3}$$

3.2.2 Síť VN

$$\begin{aligned}
U_f &= \frac{22}{\sqrt{3}} = 12,702 kV \\
C_0 &= \frac{I_{C0}}{3\omega U_f} = \frac{200}{3 \cdot 100 \cdot \pi \cdot 12702} = 16,71 \mu F \\
X_{C0} &= \frac{1}{\omega C_0} = \frac{1}{100 \cdot \pi \cdot 16,71 \cdot 10^{-6}} = 190,5256 k\Omega \\
R_0 &= X_{C0} \cdot \frac{100}{2} = 190,5256 \cdot \frac{100}{2} = 9,5263 k\Omega
\end{aligned} \tag{3.4}$$

3.2.3 Vývod s poruchou

$$\begin{aligned}
C_{01} &= \frac{I_{C01}}{3\omega U_f} = \frac{20}{3 \cdot 100 \cdot \pi \cdot 12702} = 1,6707 \mu F \\
X_{C01} &= \frac{1}{\omega C_{01}} = \frac{1}{100 \cdot \pi \cdot 1,6707 \cdot 10^{-6}} = 1905,2559 \Omega \\
R_{01} &= X_{C01} \cdot \frac{100}{2} = 1905,2559 \cdot \frac{100}{2} = 95,2628 k\Omega \\
G_{01} &= \frac{1}{R_{01}} = \frac{1}{95263,8} = 10,4973 \mu S \\
R_{V1} &= R'_V \cdot l = 0,164 \cdot 5 = 0,82 \Omega \\
L_V &= L'_V \cdot l = 0,54 \cdot 5 = 2,7 mH \\
X_{V1} &= \omega \cdot L_V = 100 \cdot \pi \cdot 2,7 = 0,8482 \Omega
\end{aligned} \tag{3.5}$$

$$C'_{01} = \frac{C_{01}}{l} = \frac{1,6707}{5} = 0,3341 \mu F/km$$

$$G'_{01} = \frac{G_{01}}{l} = \frac{10,4973}{5} = 2,0995 \mu S/km$$
(3.6)

3.2.4 Předběžný návrh zhašecí tlumivky

$$C_C = C_0 + C_{01} = 0,1671 + 1,6707 = 1,8378 \mu F$$

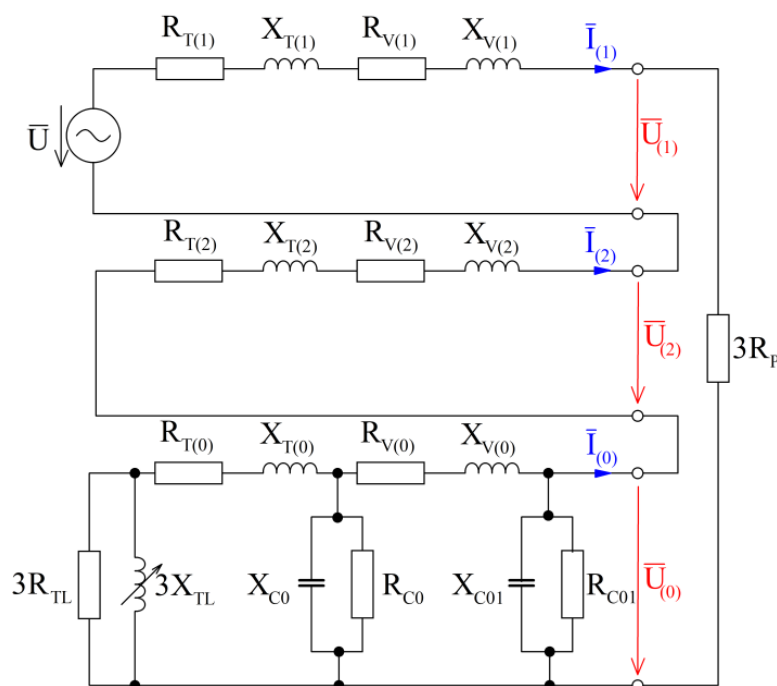
$$L_{TL} = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_C} = \frac{1}{3 \cdot (100 \cdot \pi)^2 \cdot 1,8378 \cdot 10^{-6}} = 0,1838 H$$

$$X_{TL} = \omega \cdot L_{TL} = 100 \cdot \pi \cdot 0,1838 = 57,7350 \Omega$$

$$R_{TL} = X_{TL} \cdot \frac{100}{0,8} = 57,7350 \cdot \frac{100}{0,8} = 7,2169 k\Omega \text{ (uvažují } I_{WTL} = 0,8\% I_{TL} \text{)}$$
(3.7)

3.3 Výpočet metodou Fortescue

Z teorie vyplývá, že jednofázovou poruchu lze nahradit sériovým spojením symetrických složek. Složkové schéma konkrétního příkladu soustavy je naznačeno na Obr. 23. Cílem výpočtu je určení sledovaných veličin, tzn. napětí v jednotlivých fázích v místě zemního spojení, napětí nulového bodu transformátoru vůči zemi a poruchový proud.



Obr. 23: Náhradní složkové schéma jednofázové zemní poruchy

Velikost fázového napětí a výpočet sousledné a zpětné impedance:

$$\begin{aligned}
 \bar{U} &= U_f = 12702 \text{ V} \\
 \bar{Z}_{T(1)} &= \bar{Z}_{T(2)} = \bar{Z}_{T(0)} = R_{T1} + jX_{T1} = 0,0333 + j1,3911 \Omega \\
 \bar{Z}_{V(1)} &= \bar{Z}_{V(2)} = \bar{Z}_{V(0)} = R_{V1} + jX_{V1} = 0,82 + j0,8482 \Omega \\
 \bar{Z}_{(1)} &= \bar{Z}_{(2)} = \bar{Z}_{T(1)} + \bar{Z}_{V(1)} = 0,8533 + j2,2393 \Omega
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Výpočet netočivé impedance:

$$\begin{aligned}
 \bar{Z}_{TL} &= \frac{R_{TL} \cdot jX_{TL}}{R_{TL} + jX_{TL}} = 0,4619 + j57,7313 \Omega \\
 \bar{Z}_{10} &= \bar{Z}_{T(0)} + \bar{Z}_{TL} = 1,4188 + j174,5851 \Omega \\
 \bar{Z}_{C0} &= \frac{R_0 \cdot (-jX_{C0})}{R_0 - jX_{C0}} = 3,8090 - j190,4494 \Omega \\
 \bar{Z}_{20} &= \frac{\bar{Z}_{C0} \cdot \bar{Z}_{10}}{\bar{Z}_{C0} + \bar{Z}_{10}} = 600,6611 + 1898,1273 \Omega \\
 \bar{Z}_{30} &= \bar{Z}_{20} + \bar{Z}_{V(0)} = 601,4811 + j1899,1273 \Omega \\
 \bar{Z}_{C01} &= \frac{R_{01} \cdot (-jX_{C01})}{R_{01} - jX_{C01}} = 38,0899 - j1904,4941 \Omega \\
 \bar{Z}_{(0)} &= \frac{\bar{Z}_{C01} \cdot \bar{Z}_{30}}{\bar{Z}_{C01} + \bar{Z}_{30}} = 5704,6609 - j1630,0984 \Omega
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Určení celkové impedance dané součtem složkových impedancí a trojnásobku přechodového odporu (přechodový odpor poruchy volím $R_p = 100 \Omega$) a následný výpočet složkových proudů a napětí:

$$\begin{aligned}
 \bar{Z}_C &= \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_p = 6006,3674 - j1625,6198 \Omega \\
 \bar{I}_{(1)} &= \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)} = \frac{\bar{U}}{\bar{Z}_C} = 1,9704 + j0,5333 \text{ A} \\
 \bar{U}_{(1)} &= \bar{U} - \bar{Z}_{(1)} \bar{I}_{(1)} = 12701,2188 - j4,8674 \text{ V} \\
 \bar{U}_{(2)} &= -\bar{Z}_{(2)} \bar{I}_{(2)} = -0,4871 - j4,8674 \text{ V} \\
 \bar{U}_{(0)} &= -\bar{Z}_{(0)} \bar{I}_{(0)} = -12109,6194 + j169,7189 \text{ V}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Výpočet napětí ve fázích v místě poruchy:

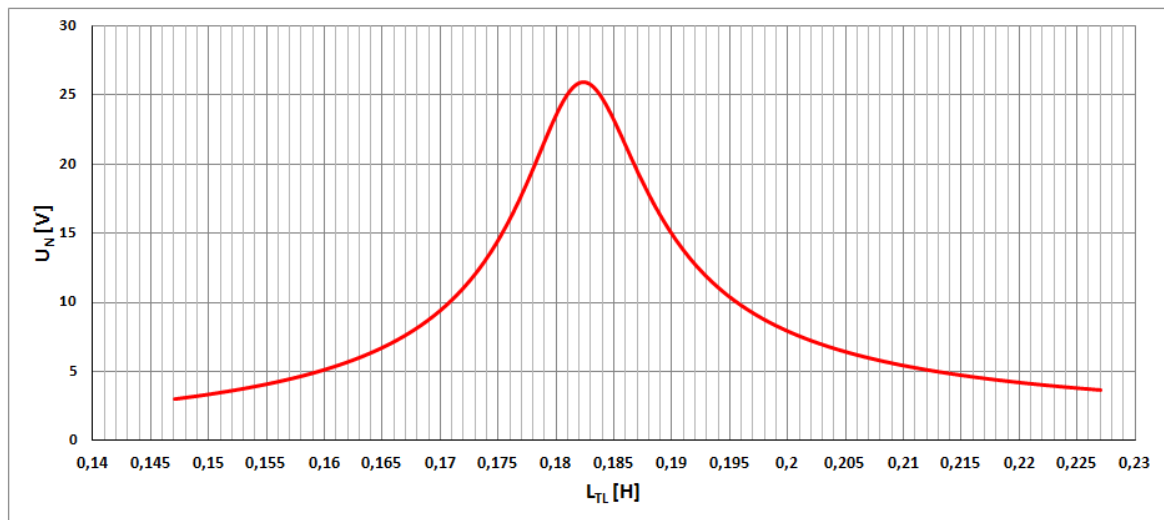
$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = 591,1124 + j159,9842 \text{ V} = 612,3796 \angle 15,1^\circ \text{ V} \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = -18459,9853 - j10825,4137 = \\ &= 21400,0149 \angle -149,6^\circ \text{ V} \\ \bar{U}_C &= \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = -18459,9853 + j11174,5863 = \\ &= 21578,7496 \angle 148,8^\circ \text{ V}\end{aligned}\tag{3.11}$$

Výpočet poruchového proudu a hodnoty uzlového napětí transformátoru získanou přepočtem netočivé složky napětí v místě poruchy na impedanci tlumivky přes napěťové děliče:

$$\begin{aligned}\bar{U}_N &= -12064,8432 + j220,9998 = 12066,8634 \angle 179,0^\circ \text{ V} \\ \bar{I}_P &= -3\bar{I}_{(1)} = -5,9111 - j1,5998 = 6,1238 \angle -164,9^\circ\end{aligned}\tag{3.12}$$

Z výsledků výpočtu je patrné neúplné vykompenzování kapacitního proudu sítě, neboť návrh velikosti zhášecí tlumivky dle 3.7 nezohledňuje podélnou indukčnost vývodu.

Ve skutečné síti se volí hodnota indukčnosti dle rezonanční křivky soustavy. Rezananční křivka soustavy se zjišťuje postupným laděním zhášecí tlumivky připojené k soustavě bez zemního spojení a následným odečítáním uzlového napětí U_N . V mém případě jsem reálné ladění tlumivky namodeloval pomocí předchozího výpočtu metodou Fortescue, kdy jsem využil přibližnou hodnotu indukčnosti danou výpočtem 3.7 a ladění jsem provedl v okolí této hodnoty indukčnosti tlumivky tak, aby výpočet představoval soustavu bez zemního spojení, zvolil jsem odpor poruchy R_P vysoké hodnoty, a zároveň jsem tím dokázal vytvořit nesymetrii soustavy, což je další nutná podmínka ke zjištění rezonanční křivky. Rezananční křivka mého modelu sítě je zobrazena na Obr. 24, ze kterého vyplývá stav rezonance (maximum U_N) při indukčnosti $L_{TL} = 0,1823 \text{ H}$.

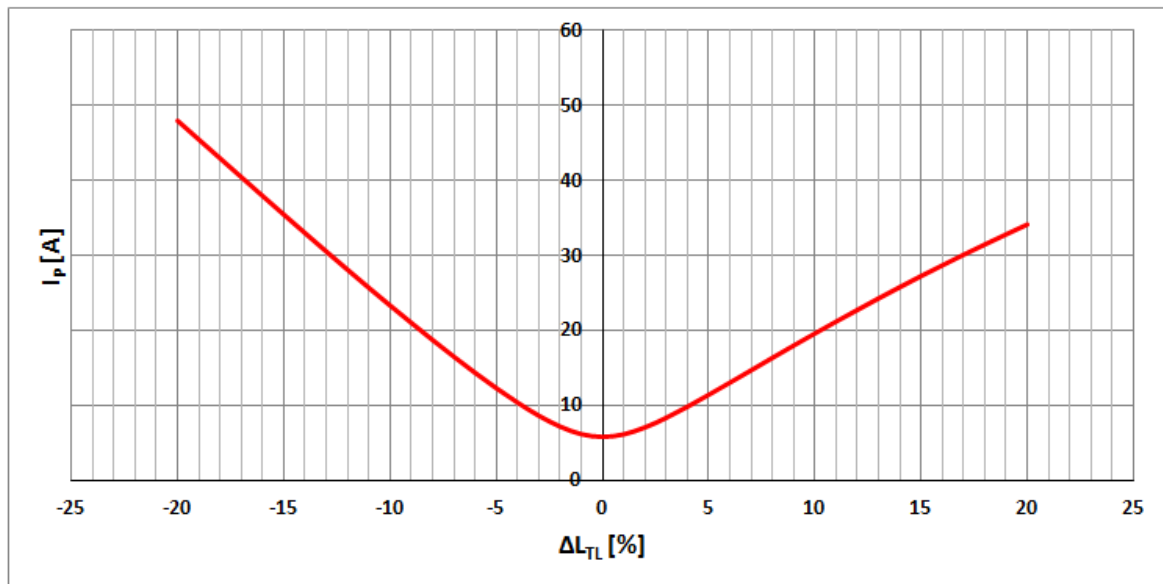


Obr. 24: Rezonanční křivka soustavy

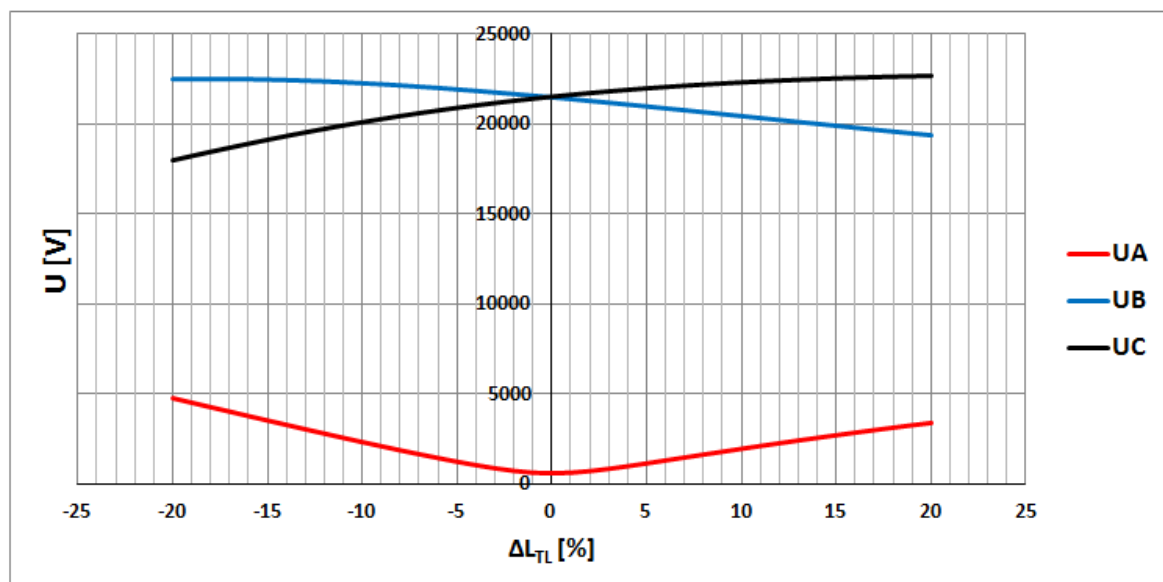
Po korekci hodnoty indukčnosti zhášecí tlumivky jsou vypočtené hodnoty následující:

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_A &= 590,1596 \pm 0,08^\circ V \\
 \bar{U}_B &= 21479,4454 \pm 149,2^\circ V \\
 \bar{U}_C &= 21493,8067 \pm 149,2^\circ V \\
 \bar{U}_N &= 12063,4914 \pm 179,7^\circ V \\
 \bar{I}_p &= 5,9016 \pm 179,9^\circ
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Poruchový proud je až na nepatrné odchylky činného charakteru. Kapacitní proud byl plně vykompenzován induktivním proudem zhášecí tlumivky. Důkaz kompenzace kapacitních proudů je patrný i na Obr. 25, kde ve vyladěném stavu je poruchový proud nejnižší a vlivem rozladění tlumivky poruchový proud roste. Na Obr. 26 jsou zobrazeny závislosti napětí v jednotlivých fázích na rozladění zhášecí tlumivky. Ve vyladěném stavu je napětí v postižené fázi nejnižší a je dáno velikostí přechodového odporu zemního spojení, což je také patrné z Obr. 27 zobrazující závislost napětí právě na odporu poruchy. Velikosti napětí ve zdravých fázích jsou ve vyladěném stavu stejné, zatímco vlivem rozladění se od sebe velikostně liší. Napětí postižené fáze vlivem rozladění roste. Pro zajímavost uvádím v příloze A Obr. 62 závislost napětí ve fázích na rozladění tlumivky pro vysokohmovou poruchu o $R_p = 1500 \Omega$.



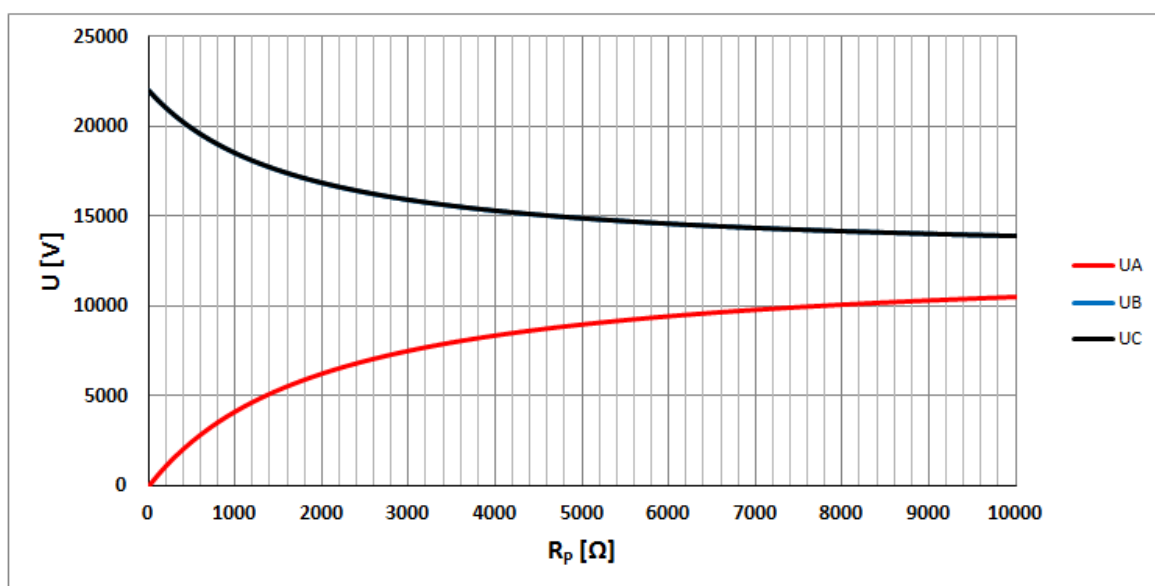
Obr. 25: Závislost poruchového proudu na rozladění tlumivky při $R_p = 100 \Omega$



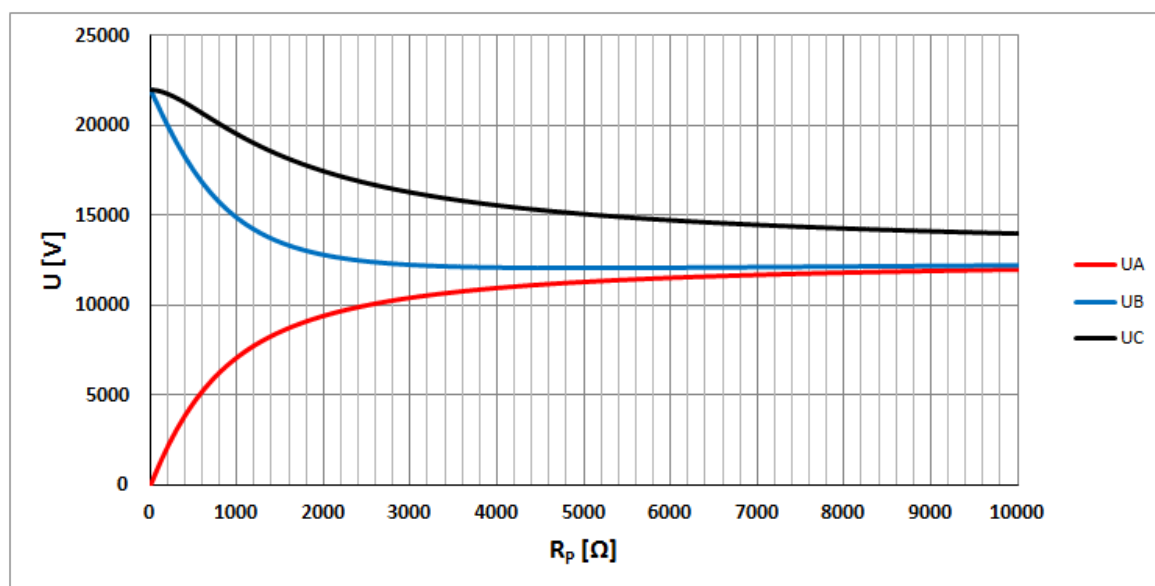
Obr. 26: Závislost fázových napětí na rozladění tlumivky při $R_p = 100 \Omega$

Dalšími zkoumanými závislostmi je závislost sledovaných veličin na velikosti přechodového odporu poruchy. Jak je známo z předchozí teorie, při kovovém zemním spojení ($R_p = 0$) klesne napětí postižené fáze na nulu a napětí zdravých fází vzroste na hodnotu sdruženého napětí. Z Obr. 27 či Obr. 28 lze predikovat, že vlivem rostoucího odporu poruchy se hodnoty napětí fází začnou opět přibližovat hodnotám fázovým, tudíž uzlové napětí transformátoru klesá a od určitých hodnot odporu poruchy není možné rozlišit poruchu od bezporuchového stavu. Vznik poruchy je totiž vyhodnocen měřením napětí uzlu transformátoru. Dle normy [14] je za zemní spojení považován stav, kdy napětí

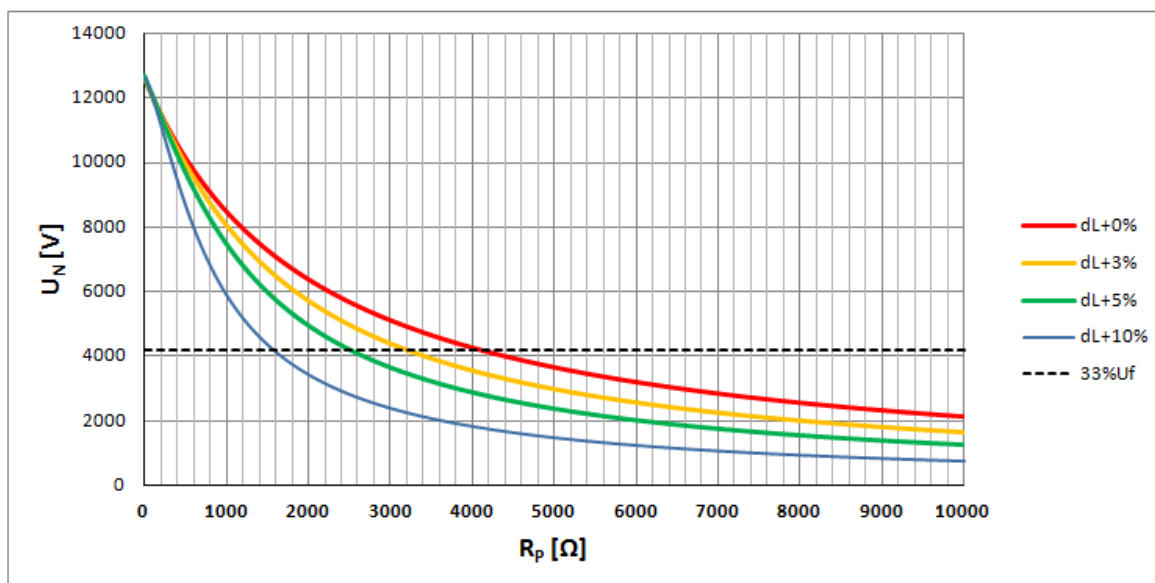
uzlu stoupne nad stanovenou mez 33% fázového napětí (cca 4200 V). V mém případě dle *Obr. 29* jsou za bezporuchový stav vyhodnocena odporová zemní spojení nad cca 4000 Ω při dokonale vyladěné tlumivce. Vlivem rozladění tlumivky se hranice rozlišení poruchy posouvá k nižším hodnotám odporu poruchy, což znamená, že rozladění tlumivky má negativní vliv na identifikaci vysokoohmové zemní poruchy. Toto tvrzení dokazuje *Obr. 64* v příloze A, kde je patrný, pro vysokoohmové poruchy rozladěním tlumivky, výraznější pokles uzlového napětí oproti vyladěnému stavu.



Obr. 27: Závislost fázových napětí na R_p ve vyladěném stavu

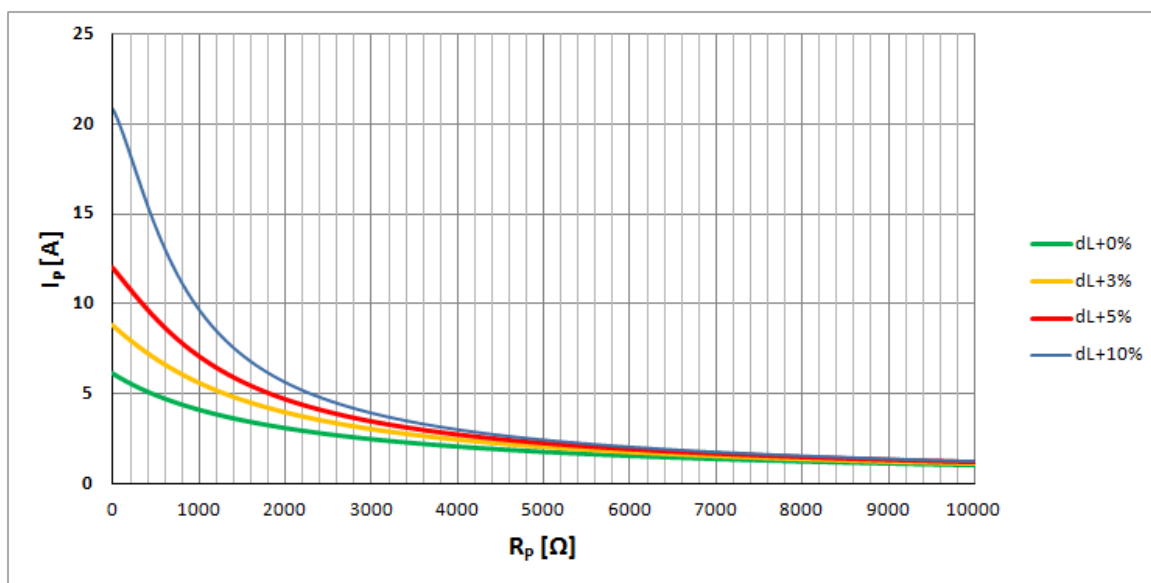


Obr. 28: Závislost fázových napětí na R_p při rozladění tlumivky +5%



Obr. 29: Závislost uzlového napětí na R_p při různém rozladění tlumivky

Velikost poruchového proudu se vlivem odporu poruchy snižuje (viz. Obr. 30). Změna velikosti poruchového proudu vlivem rozladění tlumivky, tzn. vlivem navýšení jalové složky poruchového proudu, způsobené nedokonalou kompenzací, se projevuje výrazněji především v oblastech zemního spojení s nižšími hodnotami odporu poruchy, což potvrzuje i obrácená závislost na Obr. 63 v příloze A.



Obr. 30: Závislost poruchového proudu na R_p při různém rozladění tlumivky

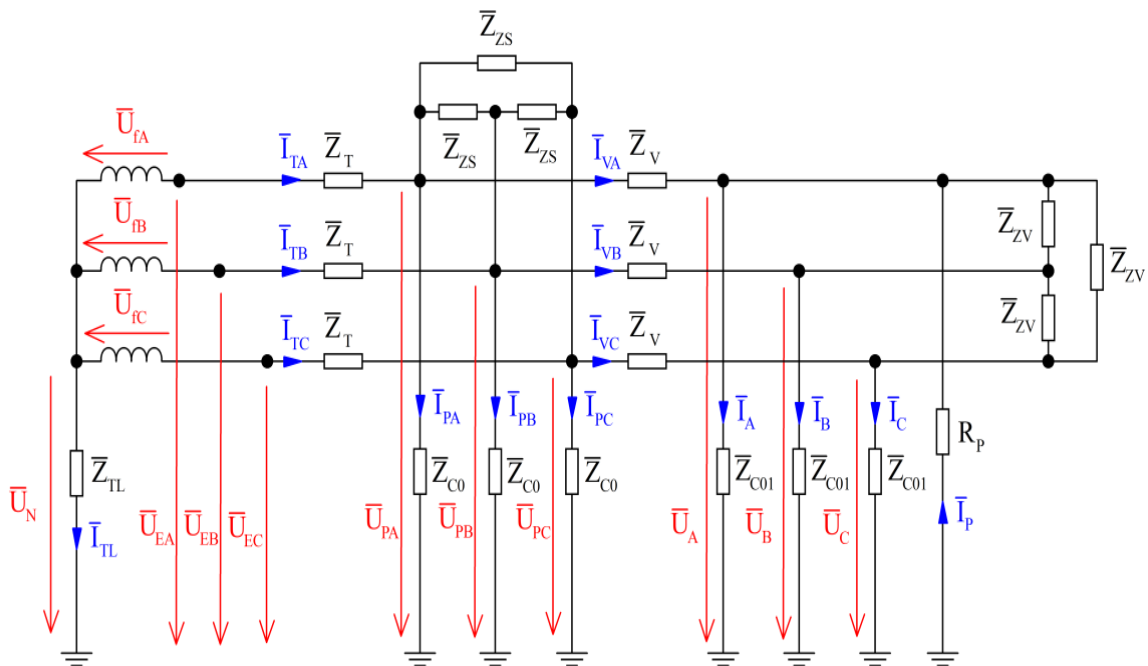
Veškeré analytické výpočty a grafy uvedené v této kapitole jsem zpracoval v Excelu a pro kontrolu jsem vytvořil skript v Matlabu. Ukázka prostředí a vysvětlení funkčnosti výpočtů v Excelu a skriptu v Matlabu je uvedena v příloze B. V elektronické podobě jsou

oba výpočtové programy umístěny na příloženém CD.

3.4 Výpočet metodou uzlových napětí

Aplikací metody uzlových napětí matematicky popíší daný případ soustavou rovnic (3.15). V mém případě se soustava rovnic bude skládat z deseti rovnic o deseti neznámých napětí vyznačených na *Obr. 31*. Pomocí těchto napětí je možné následně určit i proudové poměry v síti během zemního spojení. Výkonově zadanou zátěž sítě (*Tab. 2*) a zátěž vývodu (*Tab. 3*) bylo nutné přepočítat do hodnot impedančních v zapojení do trojúhelníka pro zjednodušení matematického vyjádření.

$$\begin{aligned}
 R_{ZV} &= 3 \cdot \frac{U_n^2}{P_{ZV}} = 3 \cdot \frac{22\,000^2}{3 \cdot 10^6} = 484 \, \Omega \\
 X_{ZV} &= 3 \cdot \frac{U_n^2}{Q_{ZV}} = 3 \cdot \frac{22\,000^2}{1 \cdot 10^6} = 1452 \, \Omega \\
 \bar{Z}_{ZV} &= R_{ZV} + jX_{ZV} = 484 + j1452 \, \Omega \\
 R_{ZS} &= 3 \cdot \frac{U_n^2}{P_{ZS}} = 3 \cdot \frac{22\,000^2}{15 \cdot 10^6} = 96,8 \, \Omega \\
 X_{ZS} &= 3 \cdot \frac{U_n^2}{Q_{ZS}} = 3 \cdot \frac{22\,000^2}{2 \cdot 10^6} = 726 \, \Omega \\
 \bar{Z}_{ZS} &= R_{ZS} + jX_{ZS} = 96,8 + j726 \, \Omega
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$



Obr. 31: Náhradní schéma pro výpočet ZS metodou uzlových napětí

$$\begin{aligned}
\bar{U}_{EA} &= \bar{U}_{fA} + \bar{U}_N \\
\bar{U}_{EB} &= \bar{U}_{fB} + \bar{U}_N \\
\bar{U}_{EC} &= \bar{U}_{fC} + \bar{U}_N \\
\frac{\bar{U}_{EA} - \bar{U}_{PA}}{\bar{Z}_T} - \frac{\bar{U}_{PA}}{\bar{Z}_{C0}} - \frac{\bar{U}_{PA} - \bar{U}_{PB}}{\bar{Z}_{ZS}} - \frac{\bar{U}_{PA} - \bar{U}_A}{\bar{Z}_V} &= 0 \\
\frac{\bar{U}_{EB} - \bar{U}_{PB}}{\bar{Z}_T} - \frac{\bar{U}_{PB}}{\bar{Z}_{C0}} - \frac{\bar{U}_{PB} - \bar{U}_{PC}}{\bar{Z}_{ZS}} - \frac{\bar{U}_{PB} - \bar{U}_B}{\bar{Z}_V} &= 0 \\
\frac{\bar{U}_{EC} - \bar{U}_{PC}}{\bar{Z}_T} - \frac{\bar{U}_{PC}}{\bar{Z}_{C0}} - \frac{\bar{U}_{PC} - \bar{U}_{PA}}{\bar{Z}_{ZS}} - \frac{\bar{U}_{PC} - \bar{U}_C}{\bar{Z}_V} &= 0 \\
\frac{\bar{U}_{PA} - \bar{U}_A}{\bar{Z}_V} - \frac{\bar{U}_A}{\bar{Z}_{C01}} - \frac{\bar{U}_A}{R_P} - \frac{\bar{U}_A - \bar{U}_B}{\bar{Z}_{ZV}} &= 0 \\
\frac{\bar{U}_{PB} - \bar{U}_B}{\bar{Z}_V} - \frac{\bar{U}_B}{\bar{Z}_{C01}} - \frac{\bar{U}_B - \bar{U}_C}{\bar{Z}_{ZV}} &= 0 \\
\frac{\bar{U}_{PC} - \bar{U}_C}{\bar{Z}_V} - \frac{\bar{U}_C}{\bar{Z}_{C01}} - \frac{\bar{U}_C - \bar{U}_A}{\bar{Z}_{ZV}} &= 0 \\
\frac{\bar{U}_N}{\bar{Z}_{TL}} + \frac{\bar{U}_{PA}}{\bar{Z}_{C0}} + \frac{\bar{U}_{PB}}{\bar{Z}_{C0}} + \frac{\bar{U}_{PC}}{\bar{Z}_{C0}} + \frac{\bar{U}_A}{\bar{Z}_{C01}} + \frac{\bar{U}_B}{\bar{Z}_{C01}} + \frac{\bar{U}_C}{\bar{Z}_{C01}} &= -\frac{\bar{U}_A}{R_P}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Rovnice (3.15) popisující náhradní schéma sítě na *Obr. 31* převedu do maticového tvaru (3.16), kde po řešení v Matlabu (skript uveden v příloze B) získám vektor neznámých napětí (3.17).

$$[Y] \cdot [X] = [b] \tag{3.16}$$

$$[X] = [\bar{U}_{EA} \ \bar{U}_{EB} \ \bar{U}_{EC} \ \bar{U}_{PA} \ \bar{U}_{PB} \ \bar{U}_{PC} \ \bar{U}_A \ \bar{U}_B \ \bar{U}_C \ \bar{U}_N]^T \tag{3.17}$$

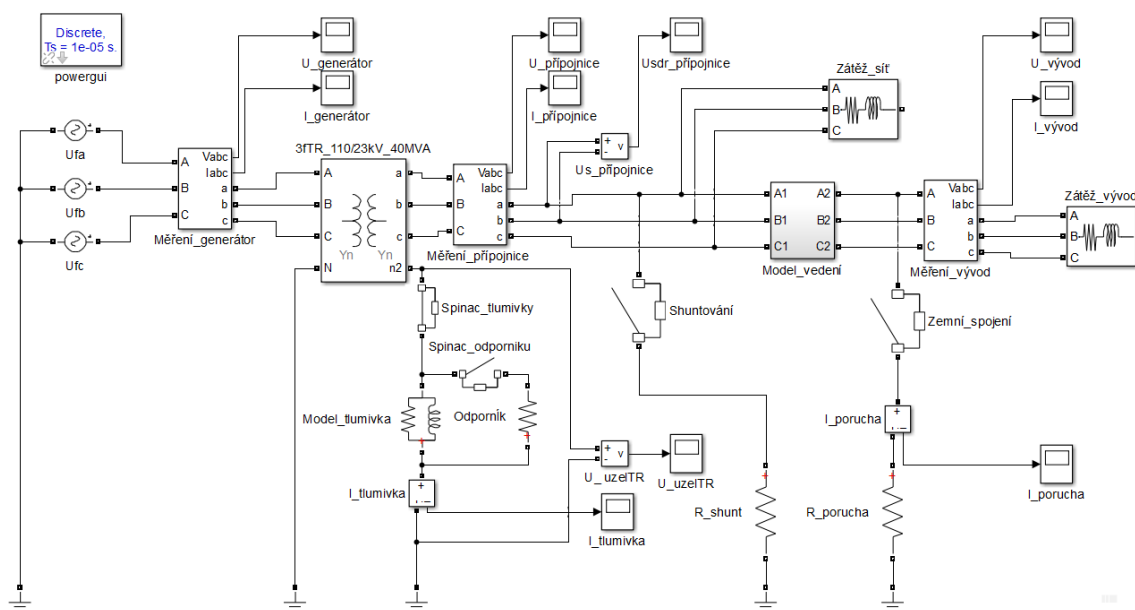
Sledované hodnoty napětí a poruchový proud dopočtený dle (2.46) v místě zemního spojení jsou:

$$\begin{aligned}
\bar{U}_A &= 584,2826 \angle 0,7^\circ \text{ V} \\
\bar{U}_B &= 21555,6183 \angle -149,5^\circ \text{ V} \\
\bar{U}_C &= 21596,7564 \angle 149,0^\circ \text{ V} \\
\bar{U}_N &= 12053,2579 \angle 179,7^\circ \text{ V} \\
\bar{I}_p &= 5,8428 \angle -179,3^\circ
\end{aligned} \tag{3.18}$$

4 Simulace

Simulaci zemního spojení jsem vytvořil v softwaru Matlab Simulink a následně jsem ověřil výsledky simulací pomocí softwaru Dynast. Simulační model jsem vytvořil dle blokového schématu na *Obr. 22*. Zpočátku jsem řešil výsledky simulací se zaměřením na ustálené stavy, které jsem porovnával s výsledky analytických výpočtů. Ke konci kapitoly jsem se rozhodl řešit přechodové děje při vzniku, či vypnutí zemního spojení a zkoumat vliv určitých podmínek na průběh přechodového děje sledovaných veličin.

4.1 Simulace v programu Matlab Simulink



Obr. 32: Model zemního spojení v Simulinku

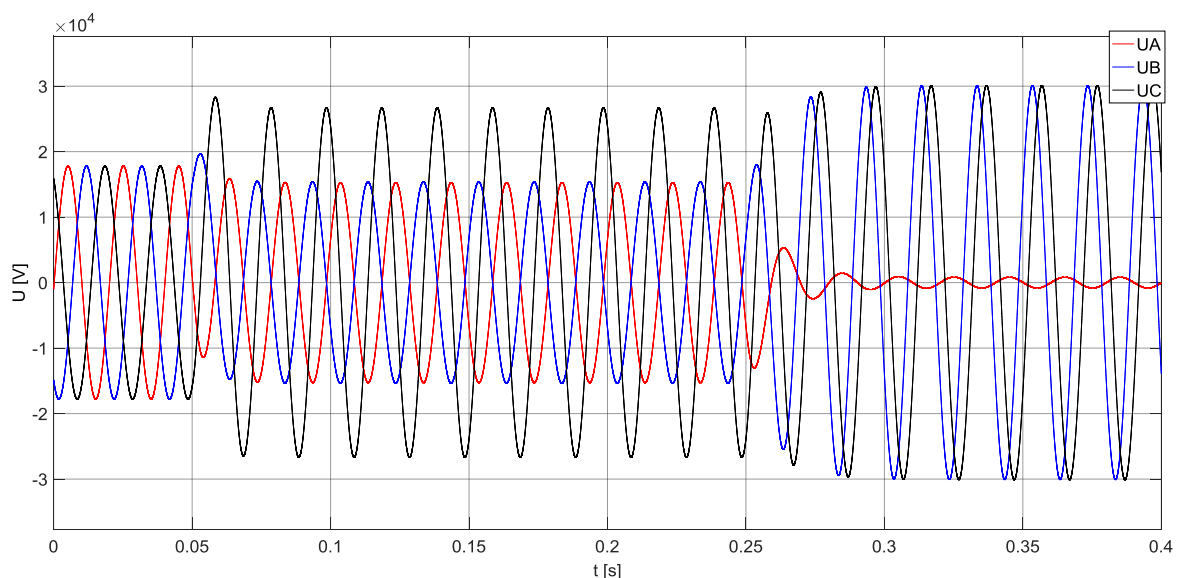
Simulační schéma v Simulinku je uvedeno na *Obr. 32* (ve větší velikosti společně s podrobným modelem vedení umístěno v příloze C). K sestavení schématu jsem využil knihovnu Simscape Power Systems, která obsahuje jak jednoduché elektrické součástky, tak i již vytvořené modely např. transformátorů, RLC větví, RLC zátěží a dalších. Výhodou je pohodlné zadávání parametrů a volba libovolné konfigurace modelů.

Zdroj (nadřazená soustava) je modelován pomocí tří ideálních zdrojů střídavého napětí s fázovým posunutím 120° . Distribuční transformátor reprezentuje model z knihovny Simulinku. Zapojení vinutí transformátoru vzhledem k požadavku připojení zhašecí tlumivky volím YNyn, kdy uzel primárního vinutí je přímo uzemněn a mezi zem a uzel sekundárního vinutí je zapojen paralelní RL článek s možností paralelního připojení

rezistoru, což reprezentuje zhášecí tlumivku s pomocným odporníkem. Kabelový vývod je nahrazen gama článkem a jako zátěž vývodu je brána trojfázová sériová RL kombinace v zapojení do hvězdy. Model zátěže umožňuje výkonové zadávání. Stejným způsobem jako kabelový vývod je nahrazena síť VN, pouze se zanedbáním podélné impedance. Zemní spojení na fázi A pak představuje spínač uzemněný přes volitelný odpor, reprezentující odpor poruchy. Schéma je obohaceno automatikou shuntování postižené fáze a nahrazenou spínačem a odporem přizemnění. Měření napěťových a proudových poměrů byla vyvedena dle potřeby. Veškeré požadované parametry jednotlivých prvků jsou vypočteny v kapitole 3.2.

Hlavním účelem provedení simulací v této kapitole je hodnocení průběhů sledovaných veličin po ustálení přechodových dějů, tedy ustálené stavy, se stejnými úvahami jako při analytickém řešení. Na hodnocení samotných přechodových dějů se zaměřím v jedné z dalších kapitol.

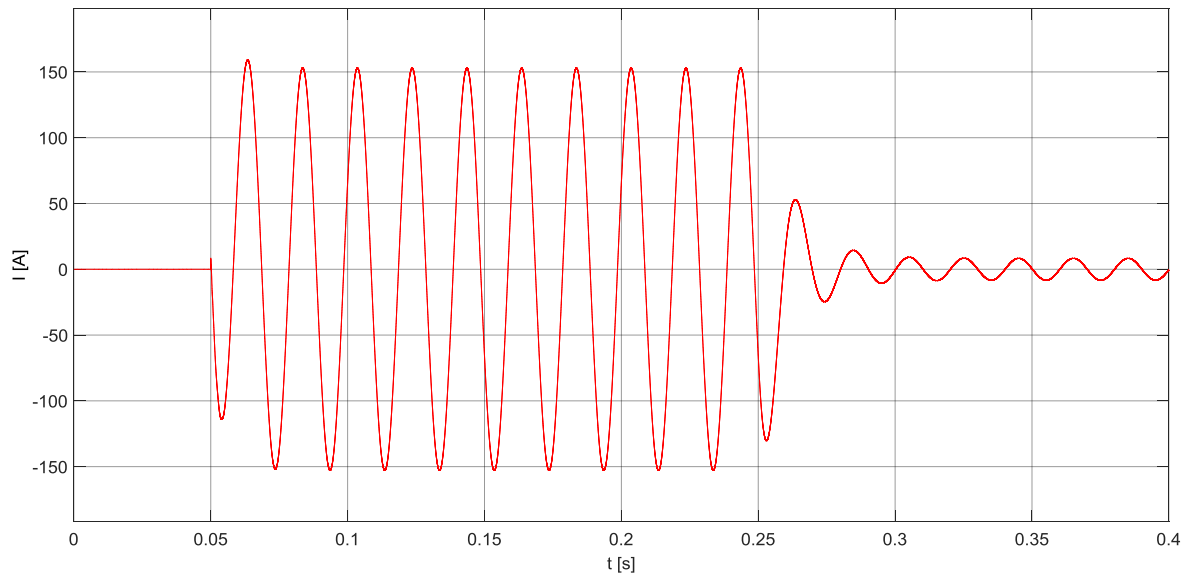
Zprvu bych chtěl simulací dokázat funkci zhášecí tlumivky. Vznik zemní poruchy nastal v čase 0,05 s. V době vzniku poruchy byl spínač tlumivky rozepnutý, jedná se tedy o síť provozovanou s izolovaným uzlem. V okamžiku 0,25 s byla sepnuta zhášecí tlumivka, jde tedy o kompenzovanou síť. Napěťové poměry pro odporové zemní spojení ukazuje *Obr. 33*.



Obr. 33: Průběhy fázových napětí na vývodu v místě ZS o $R_p = 100 \Omega$

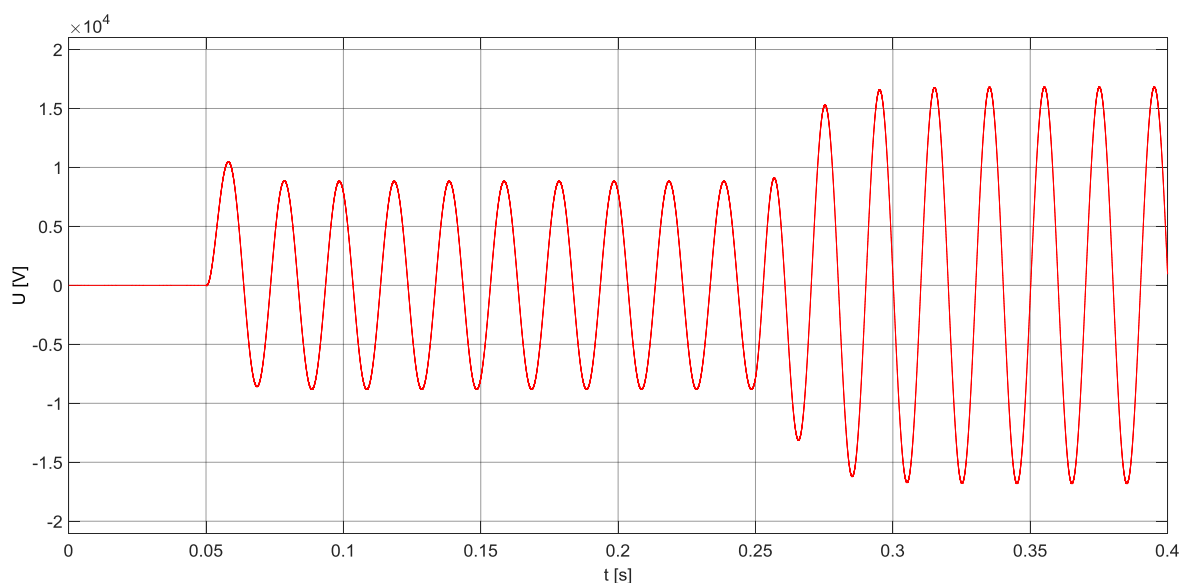
Z *Obr. 34* je patrné, vlivem připojení zhášecí tlumivky, výrazné snížení poruchového

proudu. Místem poruchy protéká pouze proud činného charakteru o efektivní hodnotě zhruba 6 A, což je necelé 3% kapacitního proudu simulované sítě, který je 220 A. Obr. 35 ukazuje změnu uzlového napětí, ze kterého vyplývá mnohem obtížnější aktivace automatik pro rozlišení vysokohmové zemní poruchy v síti s izolovaným uzlem.



Obr. 34: Průběh poruchového proudu při ZS o $R_P = 100 \Omega$

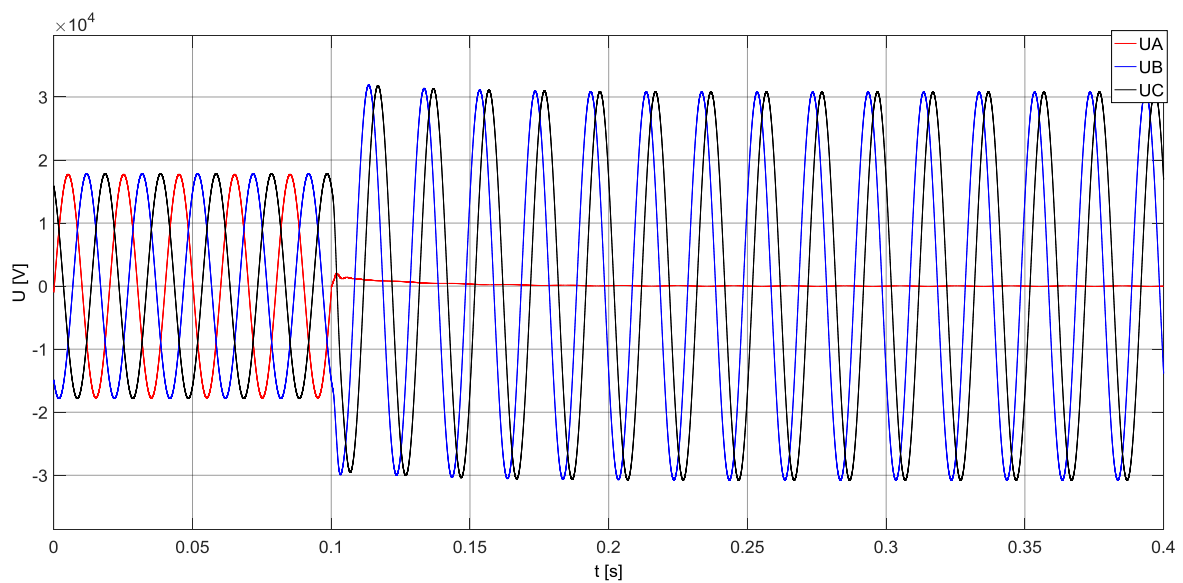
Významný vliv na napěťové a proudové poměry má hodnota odporu poruchy. V izolované síti je vliv odporu poruchy na napěťové a proudové poměry výraznější než v sítích kompenzovaných. Pro důkaz tohoto tvrzení jsem provedl simulace sledovaných veličin pro další hodnoty odporu poruchy umístěné v příloze C Obr. 70 až Obr. 75.



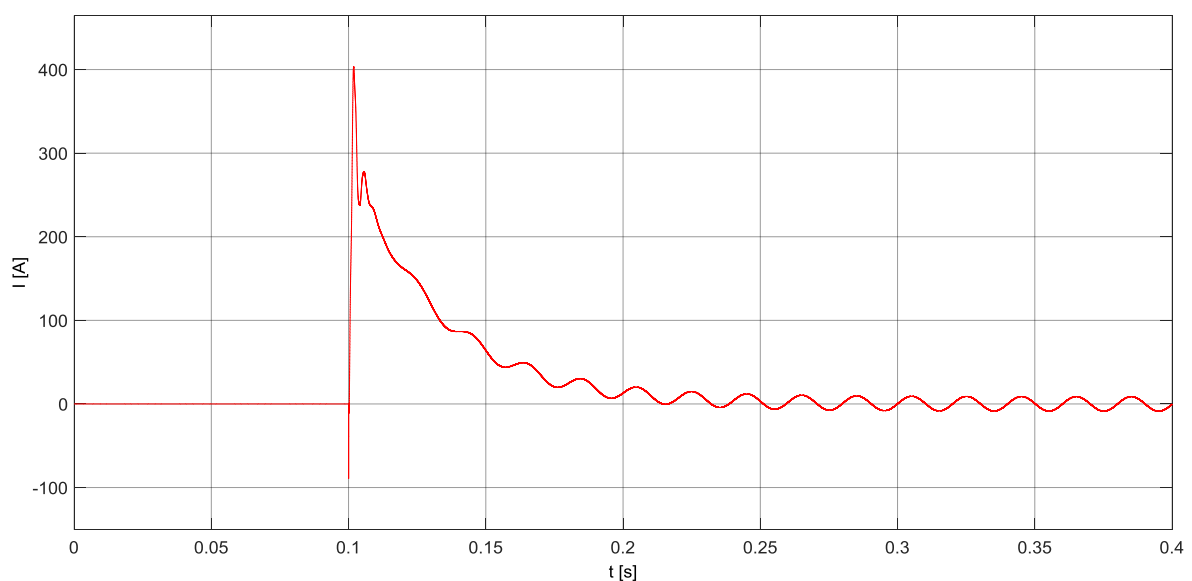
Obr. 35: Průběh uzlového napětí při ZS o $R_P = 100 \Omega$

Nyní se zaměřím podrobněji jen na napěťové a proudové průběhy v kompenzované síti. Cílem bude měnit parametry přechodového odporu poruchy nebo rozladění zhášecí tlumivky a hodnotit vliv těchto změn na napěťové a proudové poměry v soustavě tak, jako tomu bylo v kapitole 3.3.

Obr. 36 a Obr. 37 ukazují napětí ve fázích a poruchový proud v místě kovové zemní poruchy o $R_P = 5 \Omega$. Napětí v postižené fázi kleslo na 31,3 V a napětí ve zdravých fázích stoupl téměř na sdruženou hodnotu 21510 V a 22300 V. Ustálená efektivní hodnota poruchového proudu je asi 6,1 A.

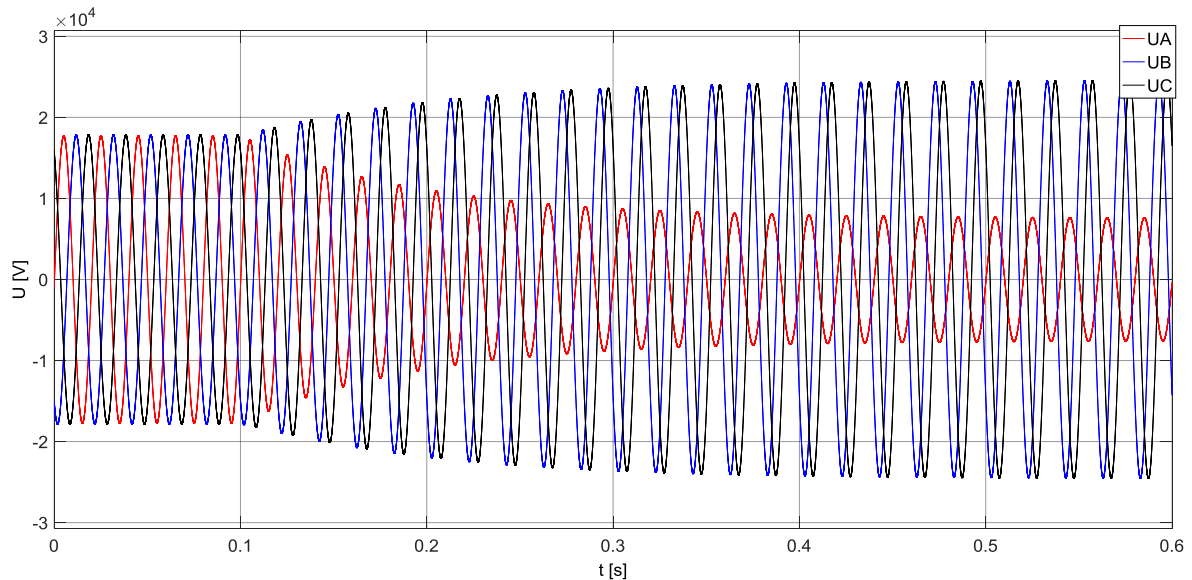


Obr. 36: Průběhy fázových napětí na vývodu v ZS o $R_P = 5 \Omega$

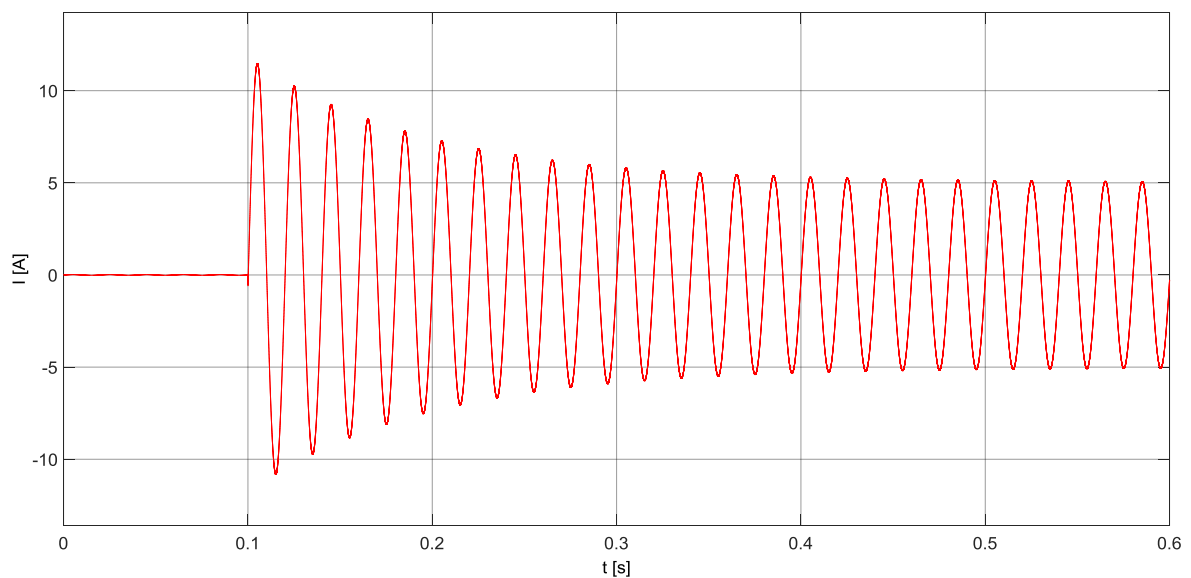


Obr. 37: Průběh poruchového proudu při ZS o $R_P = 5 \Omega$

Pro zhodnocení vlivu odporu poruchy jsem nasimuloval vysokoohmovou poruchu o $R_p = 1500 \Omega$. Na *Obr. 38* je možné pozorovat, že napětí postižené fáze kleslo na hodnotu kolem 5360 V a napětí zdravých fází vzrostlo na 16700 V a 17920 V. Poruchový proud (*Obr. 39*) se zvýšením odporu poruchy klesl na 3,6 A.



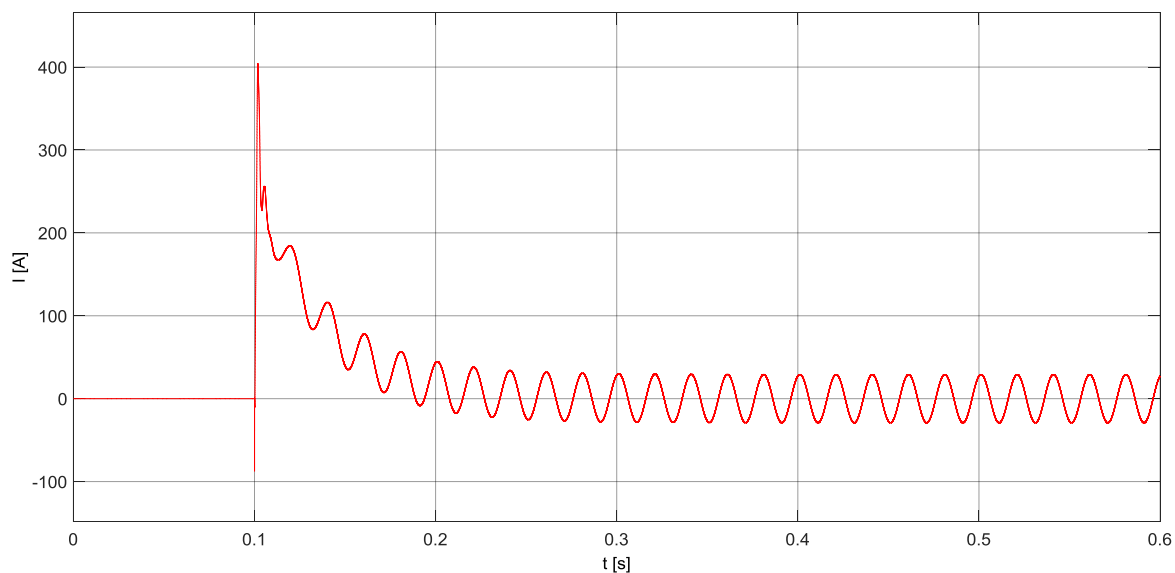
Obr. 38: Průběhy fázových napětí na vývodu v místě ZS o $R_p = 1500 \Omega$



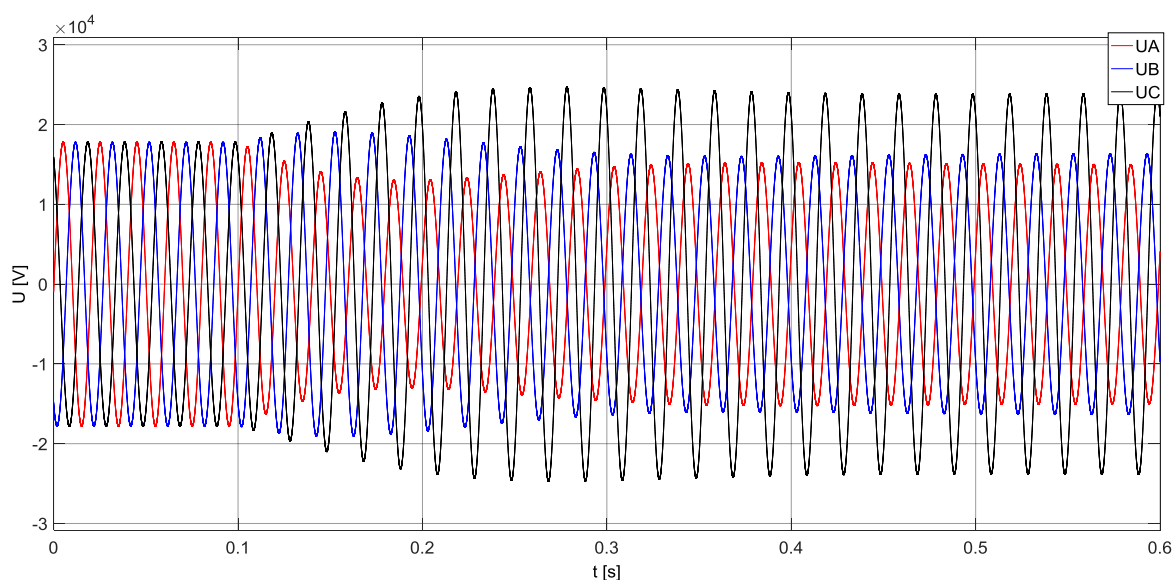
Obr. 39: Průběh poruchového proudu ZS o $R_p = 1500 \Omega$

Pro porovnání vlivu rozladění tlumivky jsem nasimuloval tytéž průběhy se stejnými hodnotami přechodového odporu poruchy ovšem při rozladění tlumivky o +10%. Pro kovové zemní spojení se výrazněji zvýší hodnota poruchového proudu, a to na 20,7 A (*Obr. 40*), což je podstatný rozdíl oproti vyladěnému stavu v porovnání s *Obr. 36*. Napětí

postižené fáze je 103 V a napětí zdravých fází 21210 V a 22 110 V (Obr. 76 v příloze C). Výraznější změna napěťových poměrů nastane při vysokoohmových poruchách, což dokumentuje Obr. 41. Napětí postižené fáze činí hodnotu 10460 V, zdravé fáze mají hodnoty napětí 11 430 V a 17 070 V. Poruchový proud o ustálené efektivní hodnotě 7 A je zobrazen na Obr. 77 v příloze C.



Obr. 40: Průběh poruchového proudu ZS o $R_P = 5 \Omega$ a tlumivky +10%



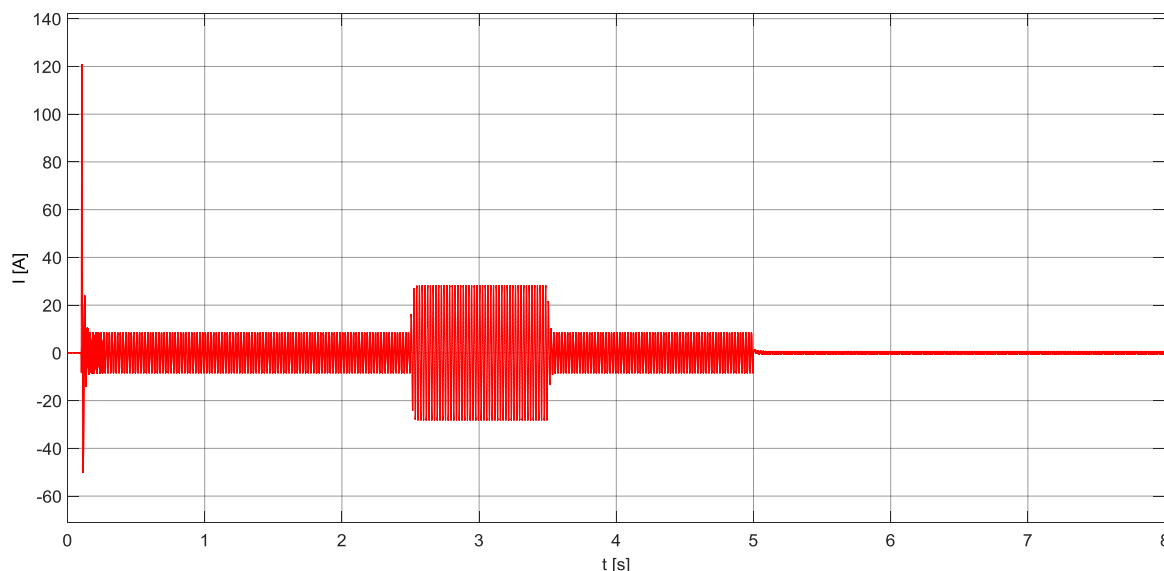
Obr. 41: Průběhy napětí ve fázích při ZS o $R_P = 1500 \Omega$ a rozladění +10%

V reálných kompenzovaných sítích se z důvodu obtížné detekce postiženého vývodu využívá automatika připnutí odporníku na sekundární vinutí zhášecí tlumivky. Odporník se připíná v přednastaveném čase po indikaci zemního spojení, nejčastěji po překročení

prahové hodnoty netočivé složky napětí na čas nezbytný pro vyhodnocení poruchy ochranami, obvykle kolem 1s [1]. Velikost odporníku jsem určil dle vztahu (1.4). Po přepočtení na sekundární vinutí zhášecí tlumivky odpovídá odporu 0,82 Ω .

$$R \leq \frac{1}{3\omega C} = \frac{1}{3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 1,8378 \cdot 10^{-6}} = 577,34 \Omega \quad (4.1)$$

Společně s automatikou připnutí odporníku jsem nasimuloval automatiku přizemnění postižené fáze (shuntování) zmíněnou v kapitole 1.2.4. Odpor přizemnění jsem zvolil dle [15]. Průběh poruchového proudu tohoto procesu je zobrazen na *Obr. 42*. Časové okamžiky spínání spínače odporníku a přizemnění byly voleny dle [1].



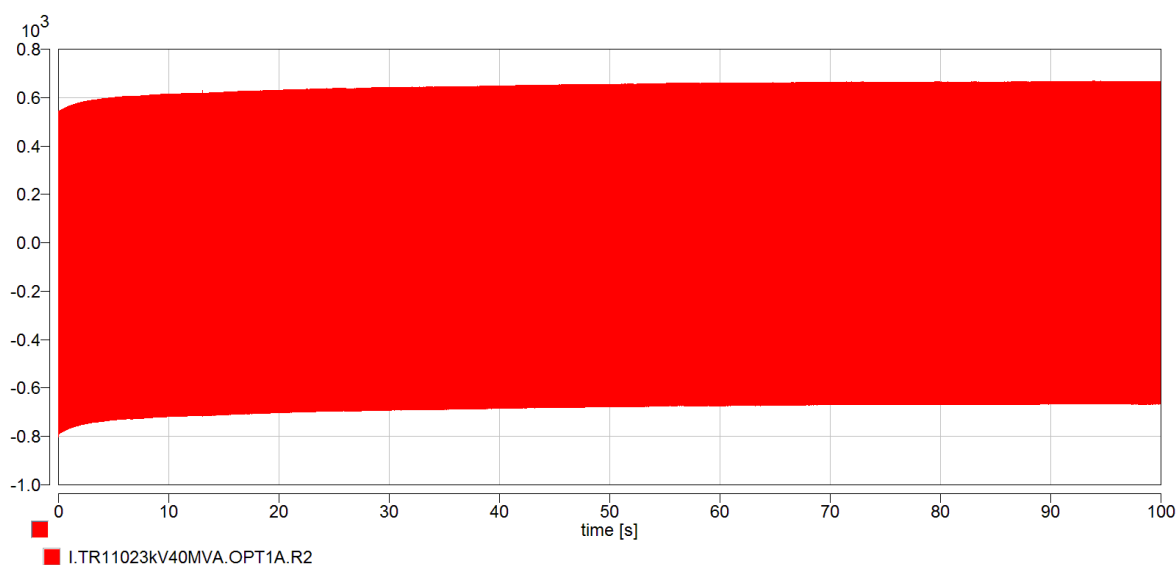
Obr. 42: Poruchový proud s připnutím odporníku a shuntováním při ZS o $R_P = 100 \Omega$

Připojením sekundárního odporníku v čase 2,5 s došlo na dobu 1 s k navýšení efektivní hodnoty poruchového proudu z hodnoty 5,89 A na hodnotu 22,59 A. Přizemněním postižené fáze v čase 5 s je docíleno snížení zbytkového poruchového proudu v místě poruchy na hodnotu kolem 0,4 A. Změny napětí ve fázích v místě poruchy jsou zachyceny na *Obr. 78* v příloze C. Simulací byly tak dokázány důvody využití těchto automatik v provozu kompenzovaných sítí.

4.2 Porovnání ustáleného simulačního řešení s analytickými výpočty

V této kapitole nabízím srovnání simulačních analýz zemního spojení s analytickými výpočty. Stejně jako při analytických výpočtech jsem se rozhodl zvolit druhý simulační

software pro kontrolu simulačního řešení v Simulinku. Vzhledem k získaným zkušenostem v průběhu studia jsem zvolil program Dynast. Schéma zkoumaného systému sestaveného v programu Dynast ukazuje *Obr. 69* v příloze C. Odečítání hodnot z průběhů sledovaných veličin komplikoval počáteční přechodový děj, vznikající spuštěním simulace, který jsem z důvodu poměrně složitého modelovaného systému nedokázal odstranit. Tento děj se projevoval především na proudových poměrech soustavy a zobrazuje jej průběh proudu ve fázi na přípojnici na *Obr. 43*. Pro odečítání hodnot, především poruchového proudu, bylo nutné vyhledat ustálený stav soustavy porovnáváním záporného a kladného maxima sinusovky proudu.



Obr. 43: Průběh proudu ve fázi na přípojnici po spuštění simulace

Hodnoty získané ze simulací, odečítány po ustálení veškerých přechodových dějů v porovnání s hodnotami vypočtenými pomocí analytických, metod shrnuje Tab. 4. Hodnoty odpovídají soustavě ve vyladěném stavu s přechodovým odporem poruchy 100Ω . V příloze C je provedeno porovnání pro vysokoohmovou poruchu o $R_P = 1500 \Omega$. Výsledky uvedených metod analýzy zemního spojení se na malé odchylky velmi blíže shodují. V případě analytických výpočtů mohou být nepatrné rozdíly způsobeny některými zjednodušeními a samotným systémem výpočtu. V případě simulačního řešení jsem získával hodnoty sledovaných veličin odečítáním amplitud z daného průběhu veličiny a následným přepočtem na efektivní hodnoty. Odchylky simulačních řešení se opět mohou lišit z důvodu odlišného výpočetního systému daného softwaru a samozřejmě je přesnost odečtení hodnot závislá na zvolené vzorkovací frekvenci.

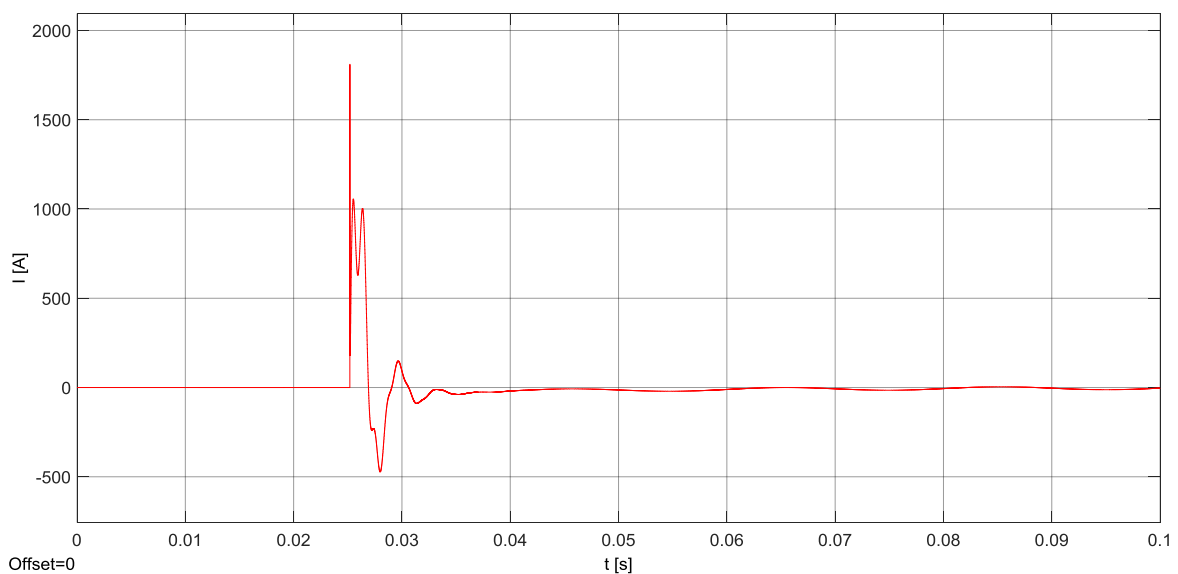
Tab. 4: Porovnání analytických výpočtů a simulačního řešení pro $R_P = 100 \Omega$

	U_A [V]	U_B [V]	U_C [V]	U_N [V]	I_P [A]
Fortescue	590,16	21479,45	21493,81	12063,49	5,90
MUM	584,28	21555,62	21596,76	12053,26	5,84
Dynast	565,69	21142,49	21177,85	11836,97	5,73
Simulink	589,09	21269,77	21283,91	11886,46	5,89

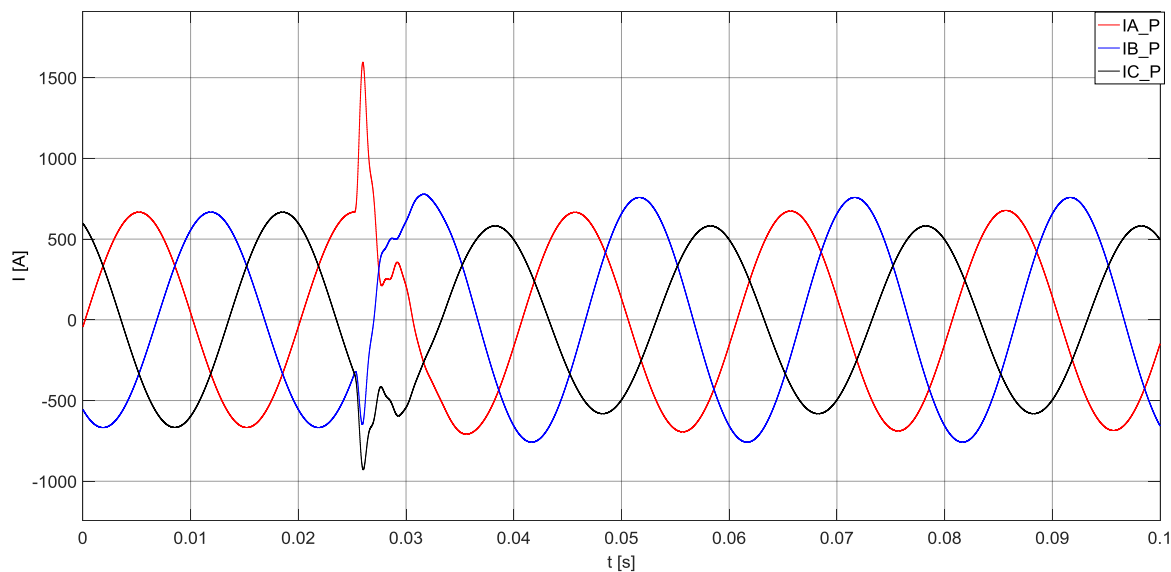
4.3 Hodnocení přechodových dějů při zemním spojení

V kapitole provedu analýzu přechodových dějů těsně po vzniku zemního spojení programu Matlab Simulink. Inspirací pro analýzu přechodových dějů mi jsou zkratové proudy, kde na okamžiku vzniku zkratu je závislý vývoj stejnosměrné složky, a tudíž velikost počátečního proudového rázu. Proto pro zajímavost budu zkoumat vliv okamžiku vzniku poruchy vzhledem k fázovému posunu postižené fáze na průběhy sledovaných veličin při různém druhu zemního spojení. Jak je uvedeno v literatuře [1] a [12], většina poruch nastává v okolí amplitudy napětí v postižené fázi. Samozřejmě existuje i oblast, kde je vysoká pravděpodobnost mechanického poškození kabelu, a tudíž možný okamžik vzniku poruchy i v okolí napěťové nuly [12]. Pro porovnání tedy zvolím dva extrémní stavy, mezi které řadím vznik zemního spojení v nule nebo v maximu napětí postižené fáze.

Na *Obr. 44* je nasimulován průběh poruchového proudu při kovovém zemním spojení ($R_P = 5 \Omega$) vznikající v maximu napětí v postižené fázi. Poruchový proud dosahuje výrazného proudového rázu daný vybíjecím proudem kapacity vůči zemi postižené fáze. Tento proudový ráz se projeví na proudu odebíraného ze sítě, což dokazuje *Obr. 45*.

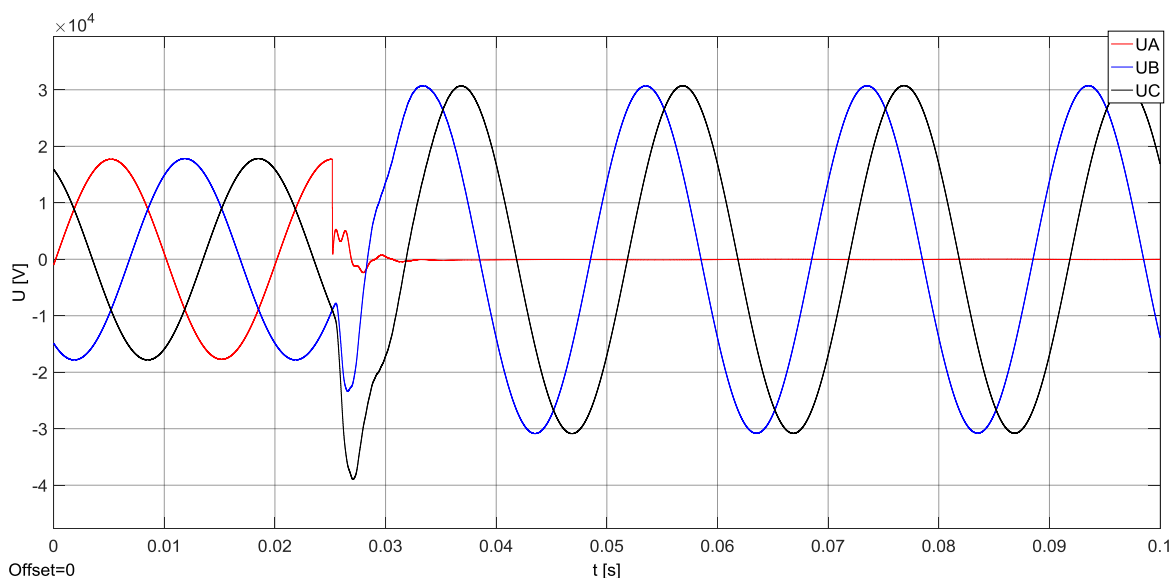


Obr. 44: Poruchový proud ZS o $R_P = 5 \Omega$ – vznik ZS v maximu U_A



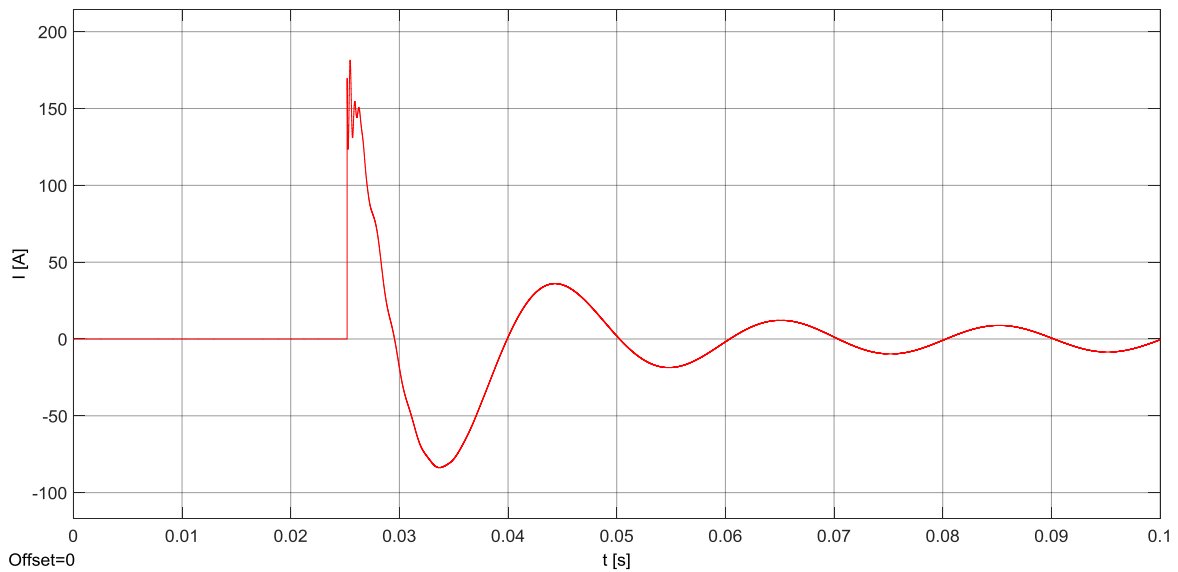
Obr. 45: Proud odebíraný ze sítě při ZS o $R_P = 5 \Omega$ - vznik ZS v maximu U_A

Přechodový děj se projeví i na napětí ve fázích, kdy v jedné z fází stoupne hodnota v prvním okamžiku nad hodnotu sdruženého napětí (Obr. 46).



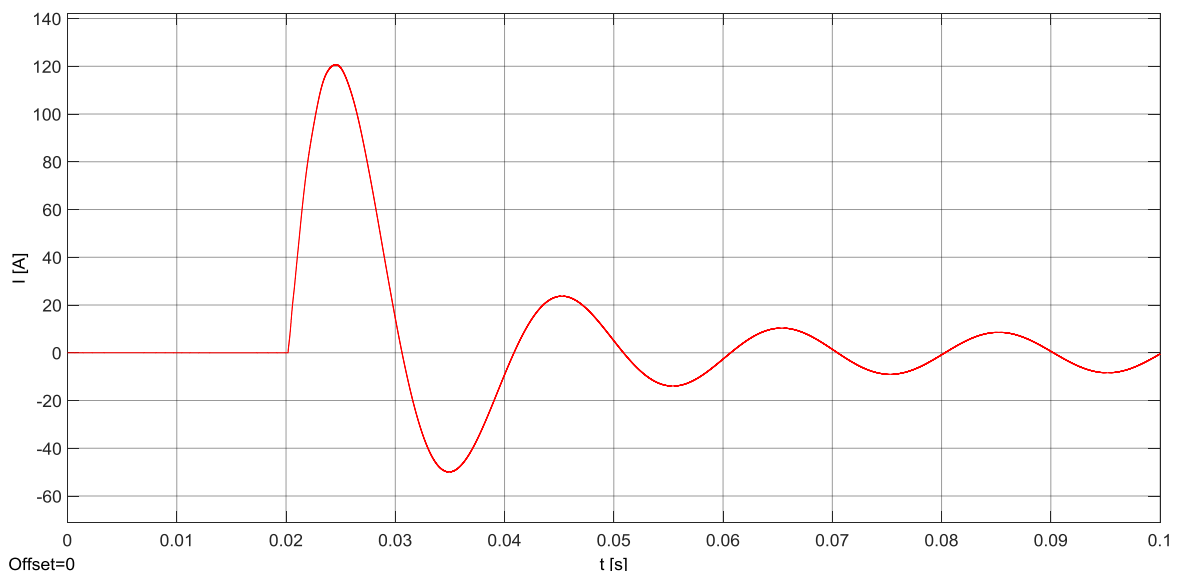
Obr. 46: Napětí ve fázích v místě ZS o $R_P = 5 \Omega$ - vznik ZS v maximu U_A

Na průběh přechodového děje má významný vliv odpor poruchy, což ukazuje Obr. 47. Zvýšením odporu poruchy dochází k útlumu přechodového děje. Dochází k výraznému omezení proudového rázu, který se téměř neprojeví na proudu odebíraném ze sítě a napětí ve fázích nestoupne nad sdruženou hodnotu (Obr. 79 a Obr. 80 v příloze C).



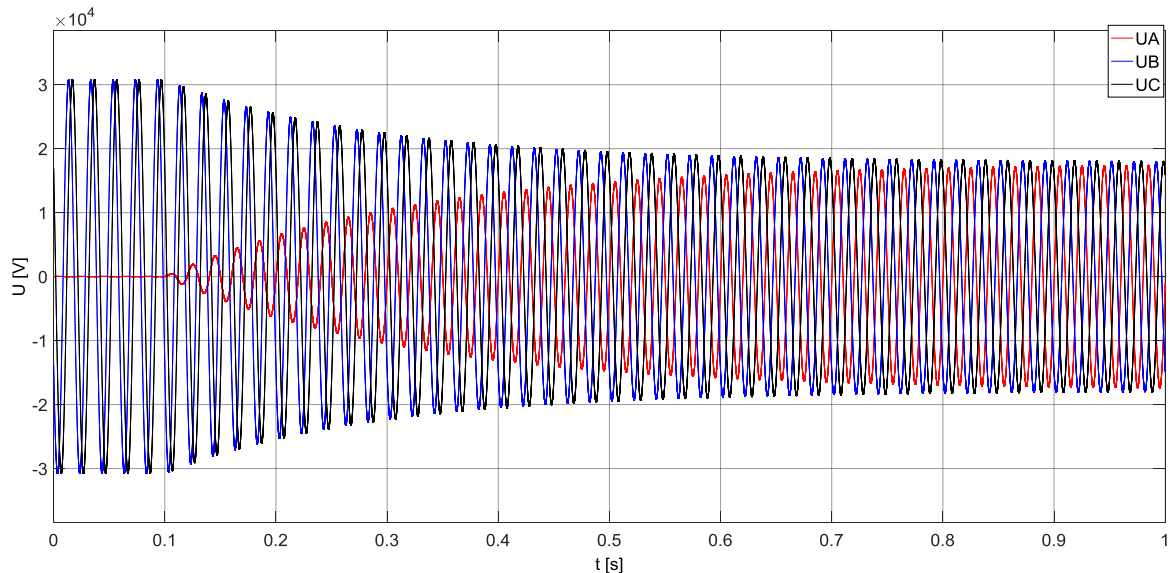
Obr. 47: Poruchový proud ZS o $R_P = 100 \Omega$ – vznik ZS v maximu U_A

K hodnocení přechodových dějů sledovaných veličin, po vzniku zemního spojení v okamžiku napěťové nuly postižené fáze, využiji nasimulované průběhy z kapitoly 4.1. Porovná-li poruchový proud na Obr. 44 s průběhem na Obr. 37, lze si všimnout aperiodické složky, která ustává po několika periodách. Vrcholová hodnota je o poznání nižší než v případě vzniku poruchy v napěťovém maximu, tudíž dopady na napětí a proudy ve fázích jsou menší. Při vyšší hodnotě odporu poruchy dochází jednak ke snížení proudové špičky, ale také k zániku aperiodické složky poruchového proudu a omezení vysokofrekvenčního zakmitání v počátku děje (Obr. 48).



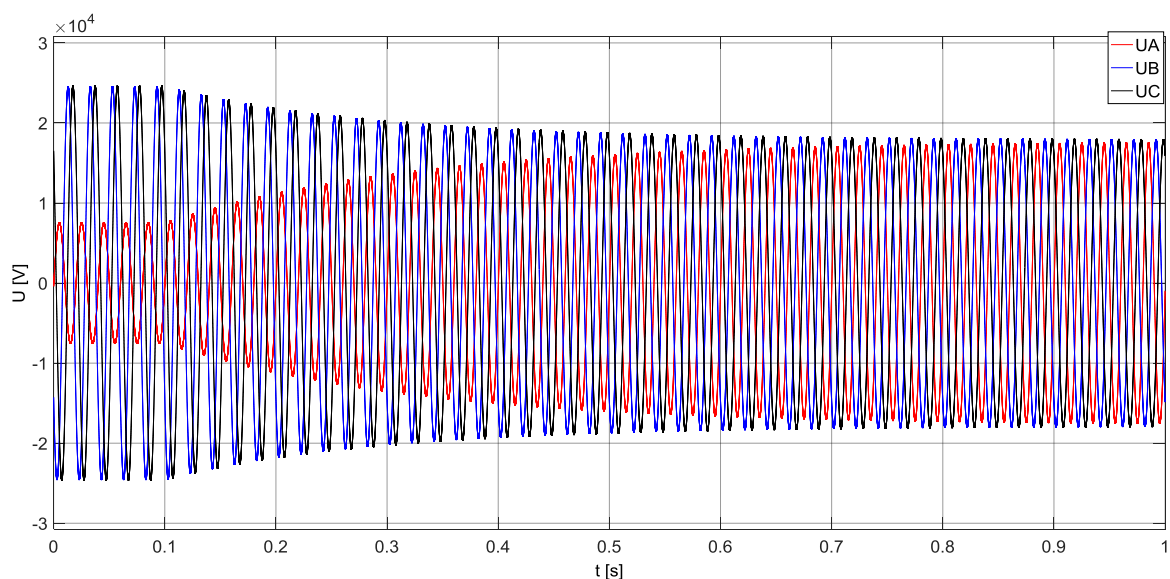
Obr. 48: Poruchový proud ZS o $R_P = 100 \Omega$ – vznik ZS v nule U_A

Dosud jsem se zaměřil na děje související s vznikem zemního spojení. Následující simulace znázorňují ukončení zemního spojení. Sledovaným parametrem bude především doba zotavení fázového napětí. V reálných systémech dochází k zotavení napětí v rozmezí 200 až 400 ms [7].



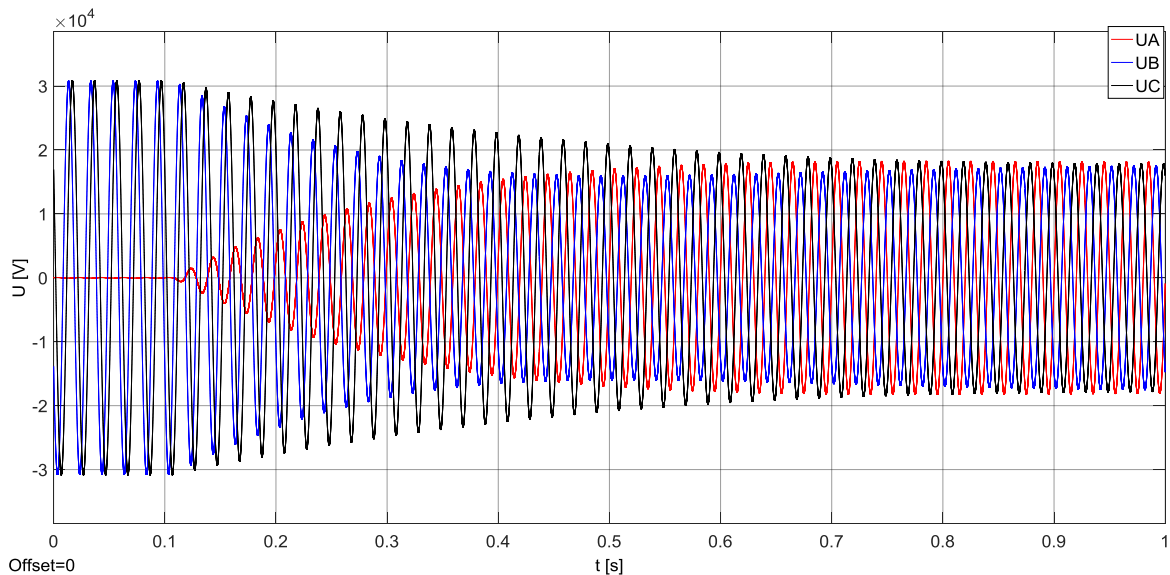
Obr. 49: Napětí ve fázích po ukončení kovového ZS

Na Obr. 49 je nasimulováno vypnutí kovového zemního spojení. Budu-li považovat zotavené napětí na spodní hranici dovolené odchylky napětí -10%, dojde k zotavení napětí po 520 ms. Na čas zotavení napětí má vliv odpor poruchy. Vypínání odporové poruchy je zobrazeno na Obr. 50. Doba zotavení napětí se zkrátila na 440 ms.

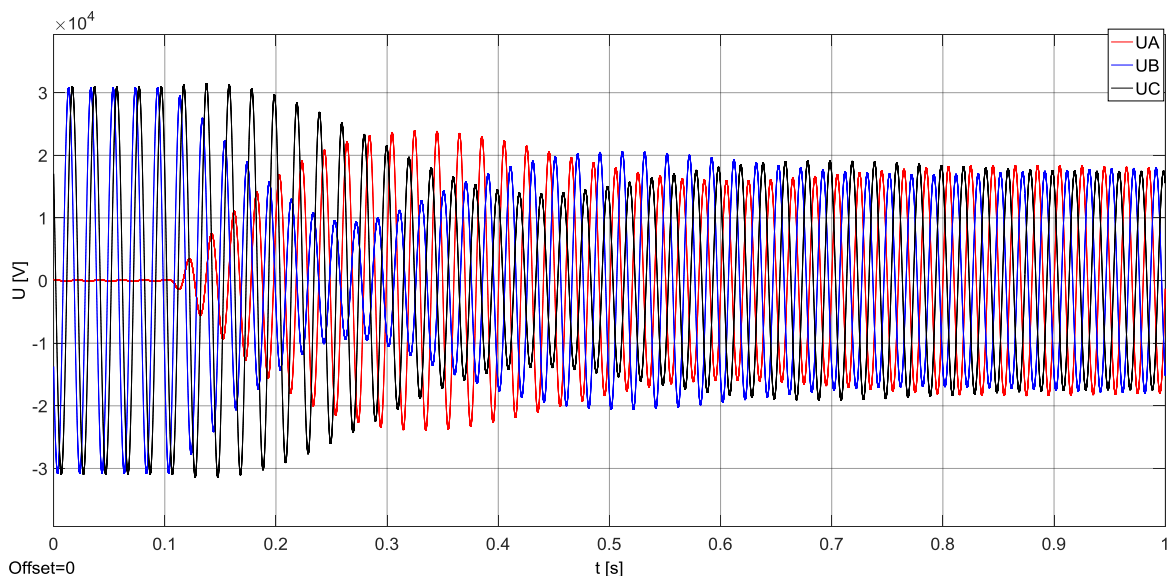


Obr. 50: Napětí ve fázích po ukončení odporového ZS o $R_P = 1500 \Omega$

Výraznější vliv na dobu zotavení a průběh napětí v jednotlivých fázích má rozladění tlumivky. Rozladění tlumivky o +2% sníží dobu zotavení na 340 ms při vypnutí kovového zemního spojení (*Obr. 51*). Na *Obr. 52* je zobrazen průběh zotavení při rozladění +8%. Při vyšším rozladění dojde sice k dalšímu urychlení zotavení, ovšem napětí přesáhne fázové napětí a k zakmitání napětí ve všech fázích.



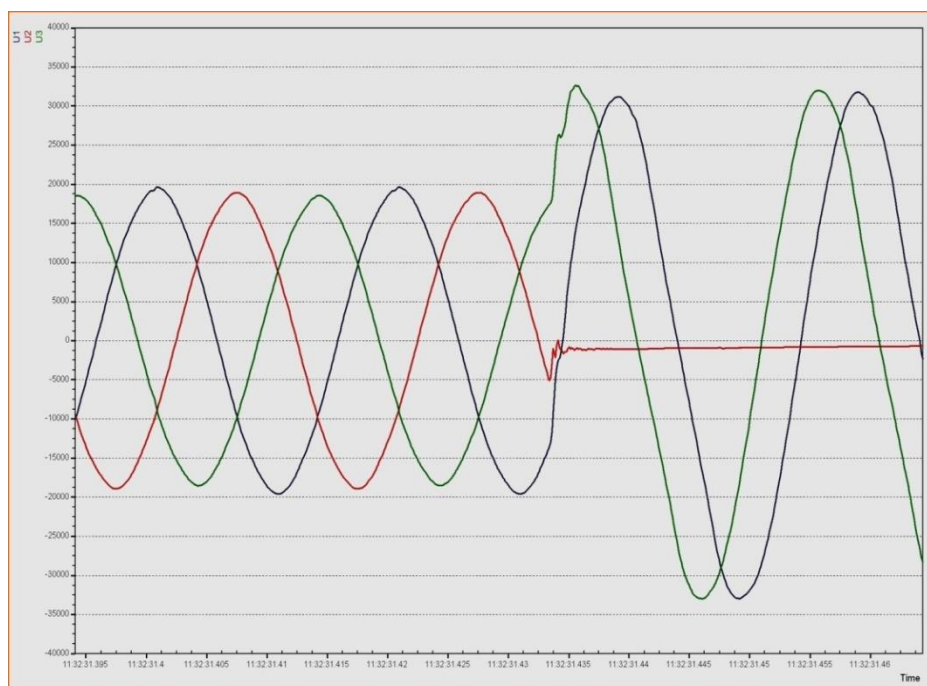
Obr. 51: Napětí ve fázích po ukončení kovového ZS s rozladěním +2%



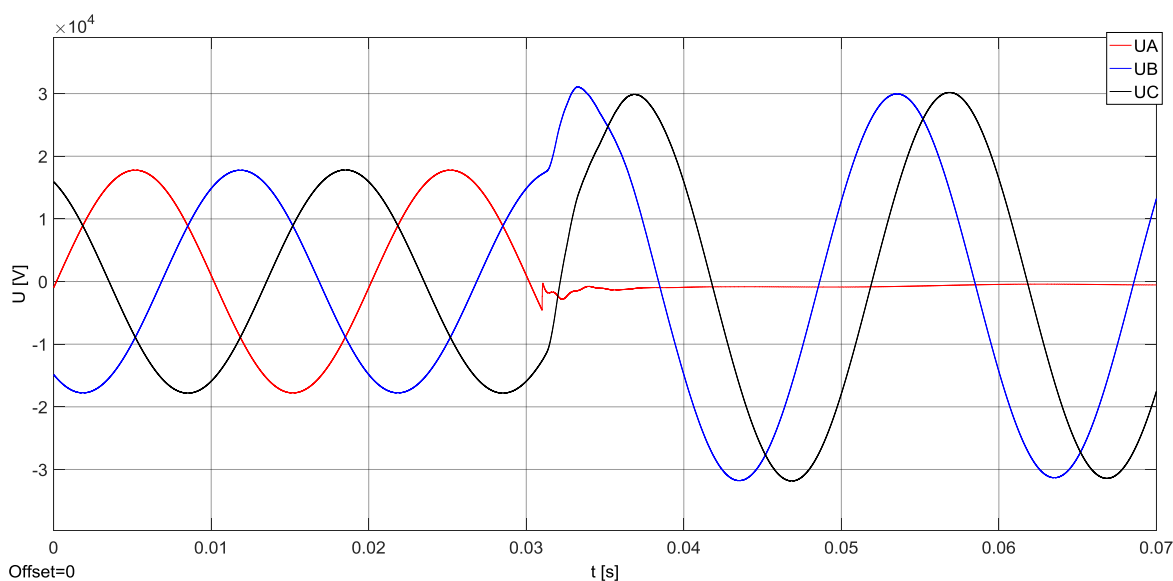
Obr. 52: Napětí ve fázích po ukončení kovového ZS s rozladěním +8%

5 Reálná zemní porucha a porovnání se simulacemi

V kapitole porovnávám reálnou naměřenou zemní poruchu a poruchu simulovanou na mém modelu uvedeného na *Obr. 32*. Snahou bylo získat průběhy co nejvíce se podobající reálnému průběhu. K volbě parametrů simulace a modelu soustavy jsem využil poznatky získané analýzou uvedenou v předchozí kapitole. Volil jsem tedy přibližně stejný okamžik vzniku zemního spojení na napěťové vlně, aby nastal podobný přechodový děj. Taktéž jsem volil i vhodný přechodový odpor zemní poruchy a rozladění zhašecí tlumivky.

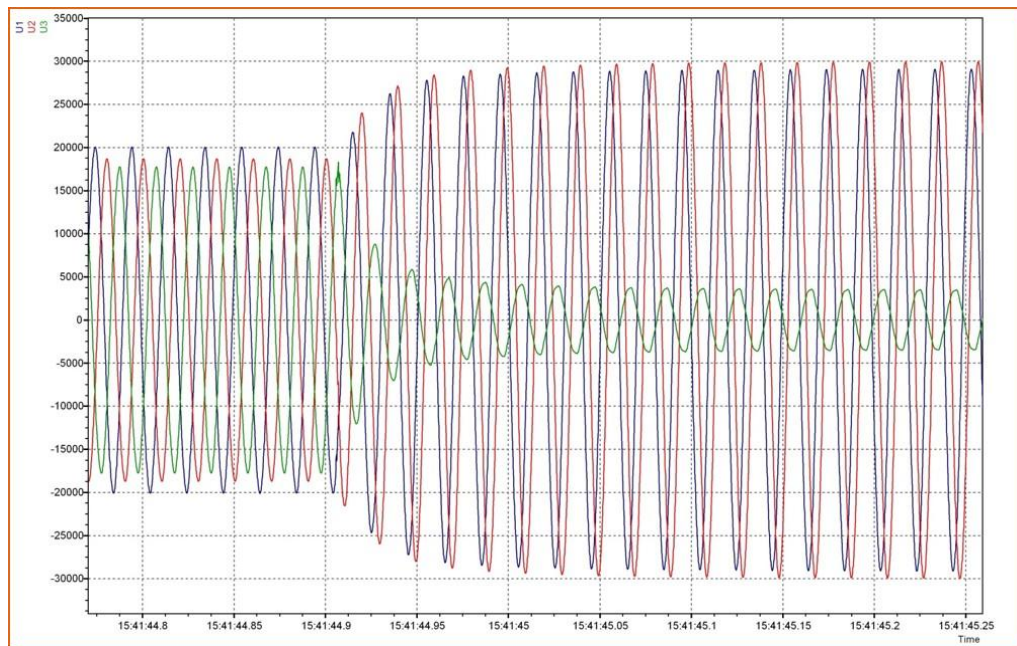


Obr. 53: Vznik reálného kovového ZS – napětí ve fázích [7]

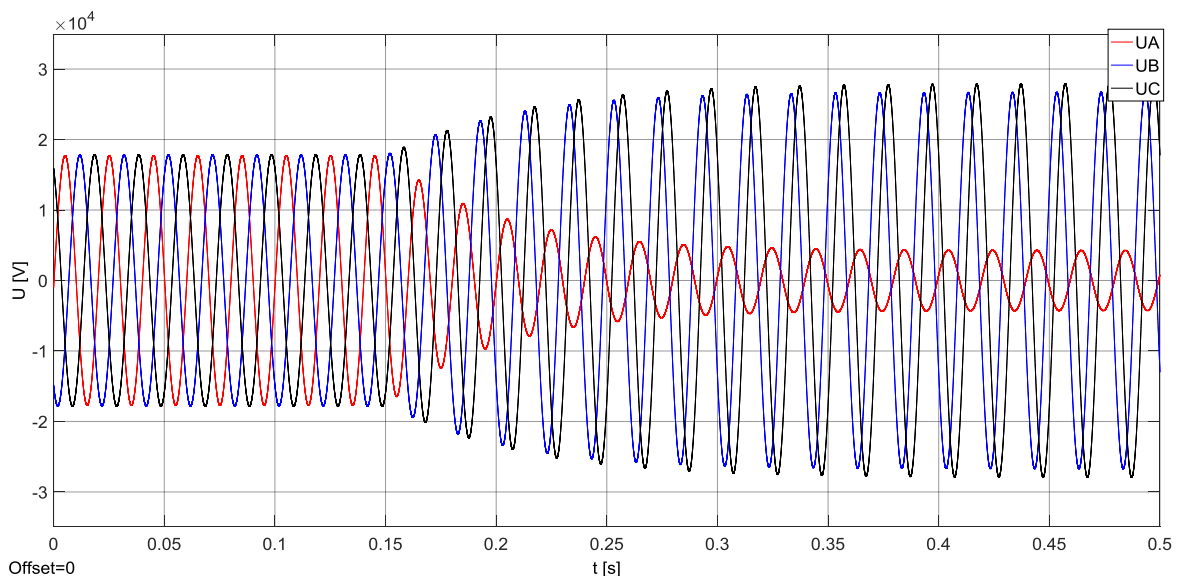


Obr. 54: Simulovaný vznik kovového ZS – napětí ve fázích

Na Obr. 53 a Obr. 54 je porovnána kovová zemní porucha. V modelu jsem zvolil odpor poruchy 5Ω . Oba průběhy se velmi podobají.



Obr. 55: Vznik reálného odporového ZS – napětí ve fázích [7]

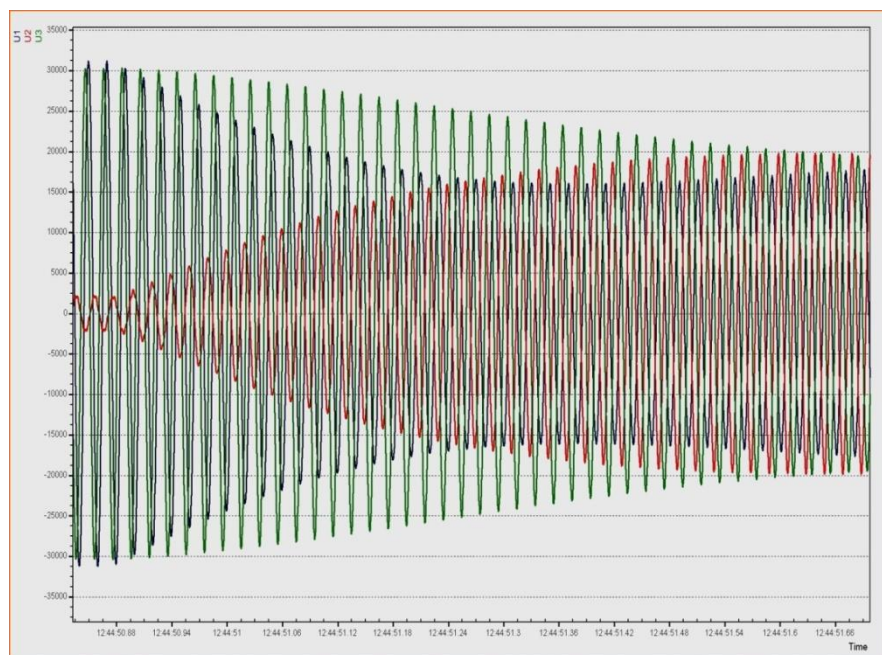


Obr. 56: Simulovaný vznik odporového ZS s rozladěním +1% - napětí ve fázích

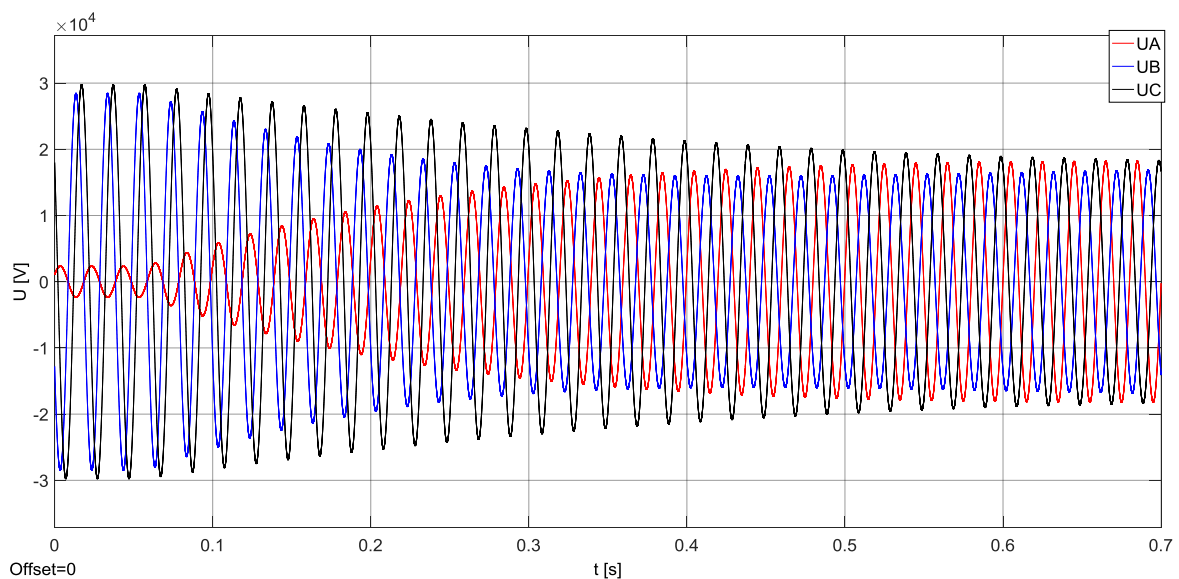
Na Obr. 55 a Obr. 56 je zobrazen vznik odporové zemní poruchy. Z reálného průběhu je patrná nesymetrie ve fázových napětích před poruchou. Tato nesymetrie má samozřejmě vliv na samotný přechodový děj i ustálený poruchový stav. Vzhledem k tomu, že doposud jsem v práci kapacitní nesymetrii zanedbal, uvažuji, že na průběhy sledovaných veličin má vliv pouze odpor poruchy a rozladění tlumivky. V modelu jsem zvolil přechodový odpor

600 Ω tak, aby přibližně odpovídala hodnota napětí postižené fáze. Rozladění tlumivky jsem zvolil +1%, neboť odlišné hodnoty napětí ve zdravých fázích mohou být způsobeny nedokonalou vyladěnou tlumivkou, jak vyplývá z *Obr. 28*.

Na dalším obrázku je naměřeno reálné ukončení zemního spojení. Dle nenulové hodnoty napětí v postižené fázi se jedná o vypnutí odporového zemního spojení. Průběh zotavování napětí ukazuje rozladění tlumivky, jak tomu bylo na *Obr. 51*. Z těchto poznatků odhaduji odpor poruchy 250 Ω a rozladění tlumivky +2%. Nasimulovaný průběh vypnutí zemního spojení ukazuje *Obr. 58*.

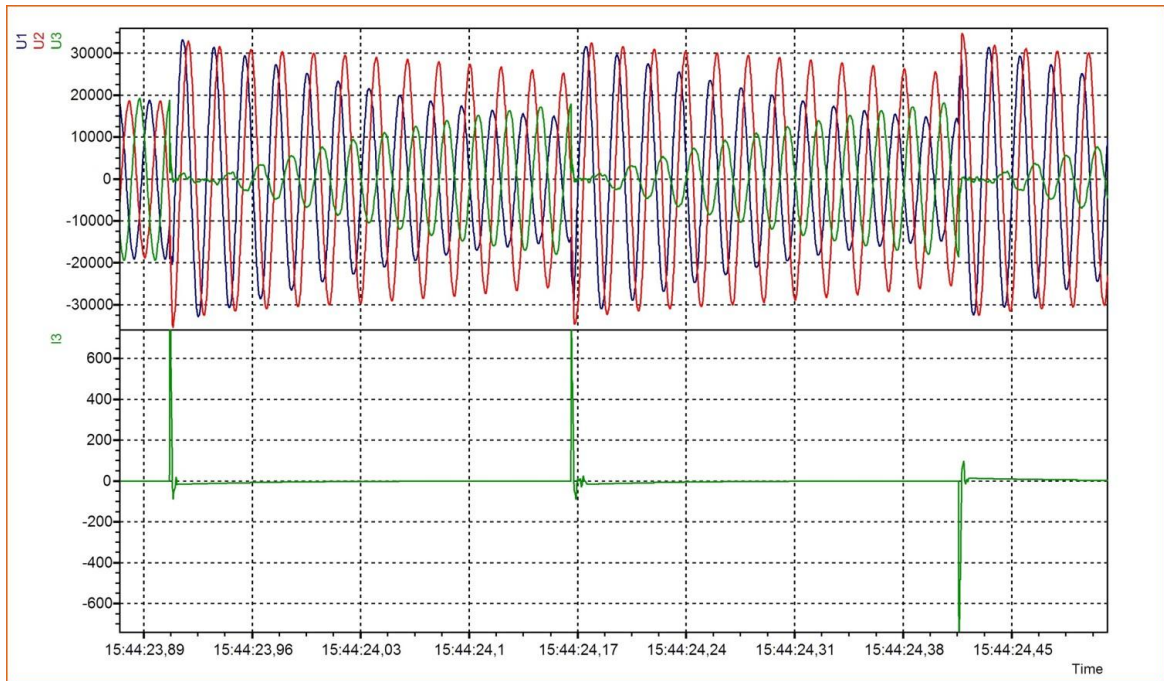


Obr. 57: Vypnutí reálného ZS - napětí ve fázích [7]

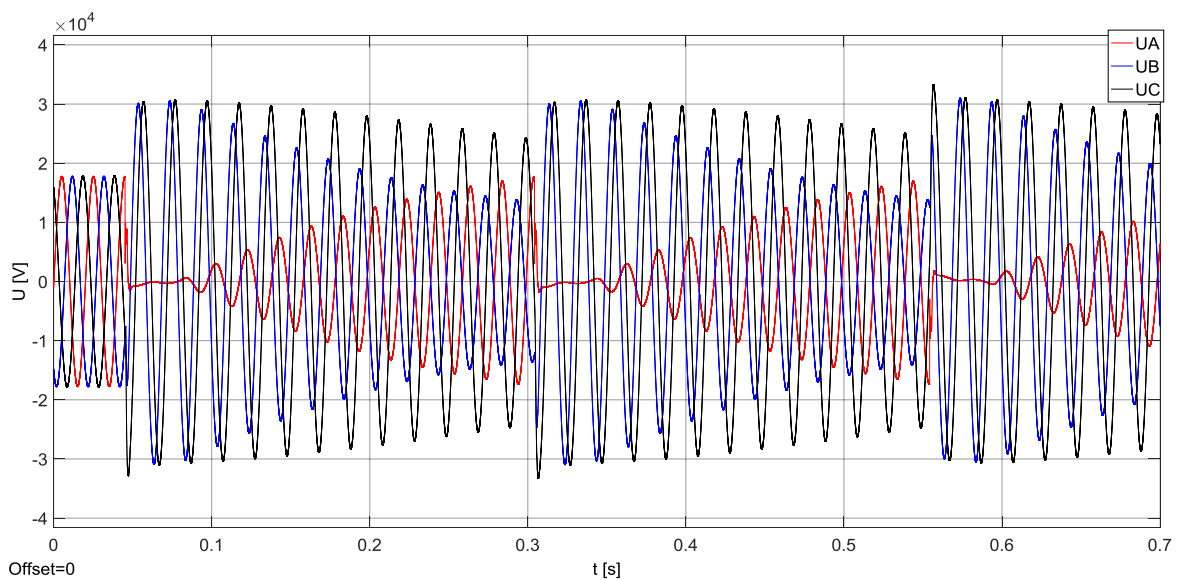


Obr. 58: Simulované vypnutí odporového ZS s rozladěním +2% - napětí ve fázích

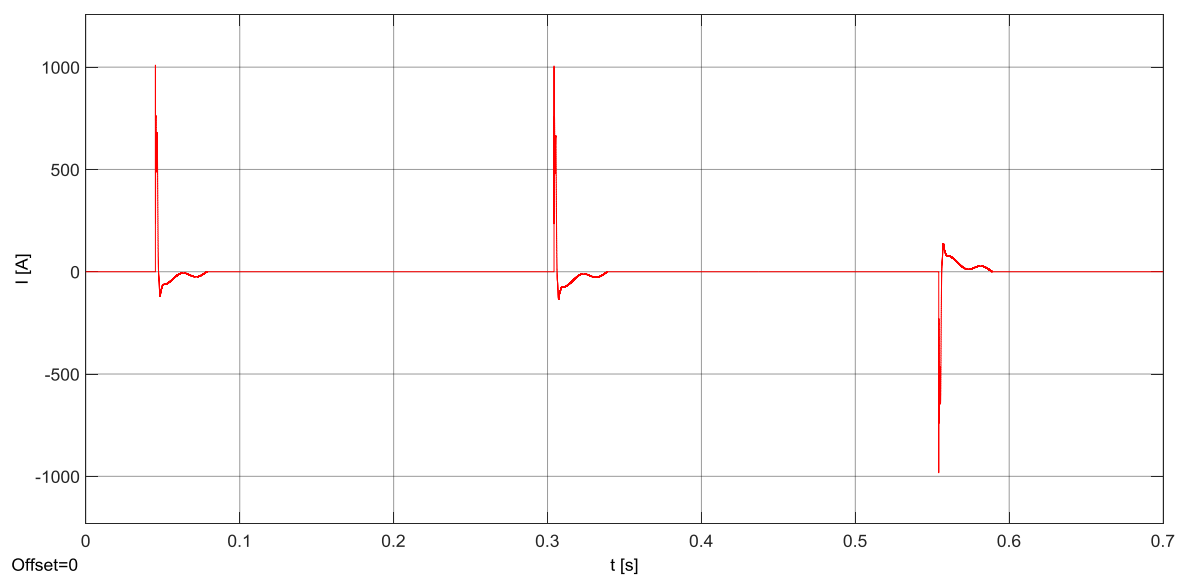
Na závěr této kapitoly se pokusím nasimulovat přerušované zemní spojení dle *Obr. 59*. Odpor poruchy jsem odhadl na 13Ω a rozladění tlumivky na +4%. Vznik a opětovné zapálení oblouku nastává v napěťovém maximu postižené fáze, jak ukazuje reálná porucha. Výsledek simulace přerušovaného zemního spojení je zobrazen na *Obr. 60* a *Obr. 61*.



Obr. 59: Reálné přerušované zemní spojení



Obr. 60: Simulované přerušované ZS - napětí ve fázích



Obr. 61: Simulované přerušované ZS – poruchový proud

6 Závěr

Cílem práce bylo provést analýzu zemního spojení analytickými metodami, následně převést danou problematiku do simulačního prostředí a vzájemným porovnáním analytických, simulačních a reálně naměřených hodnot provést celkové zhodnocení.

Analytická analýza byla provedena metodou Fortescue a metodou uzlových napětí. V kapitole 2 byly obě metody aplikovány na zjednodušená náhradní schémata reprezentující sítě s různým způsobem uzemnění uzlu transformátoru. Jelikož má každá metoda různý systém řešení, cílem této zjednodušené analýzy bylo poukázat na sobě rovnost obou metod. Pro každý druh sítě VN jsem postupným zjednodušováním a úpravami vyjádřil komplexní vztahy pro napětí uzlu transformátoru vůči zemi a pro poruchový proud protékající místem zemního spojení. Jak je patrné v kapitole 2, výsledné vztahy získané metodou Fortescue a metodou uzlových napětí se pro zjednodušené případy zcela shodují.

Aby bylo možné diskutovat využitelnost analytických metod na reálné systémy, provedl jsem v kapitole 3 analýzu konkrétního příkladu kompenzované sítě, z hlediska k tomu, že tento typ sítě VN je považován za nejrozšířenější. K výpočtu metodou Fortescue jsem využil výpočetní software Excel, do kterého jsem převedl postup výpočtu uvedený v kapitole 3.3. Na tentýž příklad sítě jsem aplikoval i metodu uzlových napětí, kterou jsem řešil pomocí softwaru Matlab. Výpočetní software mi umožnil zkoumat změnu jak parametrů sítě, tak parametrů zemní poruchy a vytvořit jejich závislosti. Konkrétně jsem zkoumal vliv velikosti odporu zemního spojení a vliv rozladění zhášecí tlumivky na napěťové a proudové poměry. S rostoucím odporem poruchy klesá jak poruchový proud místem zemního spojení, tak i napětí uzlu transformátoru vůči zemi. Provedenou analýzou je dokázána problematika vyhodnocování vysokoohmových zemních spojení. Pro příklad mé sítě nebudou dle normy [14] považovány za zemní spojení poruchy s hodnotami odporu zhruba vyšší než 4000Ω . Vlivem rozladění tlumivky se tato hranice posouvá ještě k nižším hodnotám odporu poruchy, jak dokazuje *Obr. 29*, a vyhodnocení poruchového stavu se ještě zhoršuje. Na poruchový proud a navýšení jeho velikosti rozladěním tlumivky dochází výrazněji především při nízkoohmových poruchách jak dokazuje *Obr. 30*.

Daný problém jsem následně v kapitole 4 převedl do simulačního prostředí Matlab Simulink a ke kontrole ustálených stavů jsem použil software Dynast. Porovnání simulačního a analytického řešení zemní poruchy ukazují tabulky *Tab. 4* a *Tab. 5*.

Z vypočtených a naměřených hodnot je patrná, až na malé odchylky, velmi blízká shoda a lze tedy považovat všechny použité metody za rovnocenné. Samozřejmě každá z metod má své výhody a nevýhody. Předností metody Fortescue je především jednoduchý postup výpočtu, který se provádí prakticky na jednofázovém modelu aplikací elementárních úprav. Metoda uzlových napětí je složitější v zisku řešení, neboť její aplikací získám rozsáhlou soustavu rovnic, kterou ukazuje kapitola 3.4. Soustava rovnic vede na maticový počet, a proto je nutné využít k řešení výpočetní software či aplikovat numerickou metodu. Nejdetailnější pohled na problém nám poskytují simulace. Simulace poskytují náhled na samotné průběhy sledovaných veličin a umožňují tak hodnotit nejen ustálené stavy, ale i přechodové děje vznikající v okamžiku zemního spojení.

Přechodové děje jsem zhodnotil v kapitole 4.3. Prvním zkoumaným problémem byl okamžik vzniku zemního spojení. Vznikne-li kovové zemní spojení v napěťovém maximu postižené fáze, poruchový proud dosahuje výrazného proudového rázu, v mém případě na *Obr. 44* o hodnotě více jak 1500 A, což je zhruba dvojnásobek odebíraného proudu z distribučního transformátoru (*Obr. 45*). Ovlivněny jsou i napěťové poměry zobrazeny na *Obr. 46*, kdy napětí ve zdravých fázích překročí sdruženou hodnotu. Podstatně nižší proudový ráz nastane při vzniku poruchy v napěťové nule, ovšem dojde k vývinu aperiodické složky, jak ukazuje *Obr. 37*. Proudový ráz i aperiodická složka je omezena odporem poruchy, tudíž vliv okamžiku vzniku poruchy je třeba brát v úvahu především u kovového zemního spojení. Společně se vznikem zemního spojení jsem zkoumal také ukončení zemního spojení a zaměřil jsem se na dobu zotavení napětí. Na dobu zotavení napětí má vliv odpor poruchy a rozladění tlumivky. Čím vyšší hodnota odporu poruchy a větší rozladění tlumivky je, proces zotavení se urychluje. Příliš velké rozladění způsobuje rozkmitání napětí jak ukazuje *Obr. 52*.

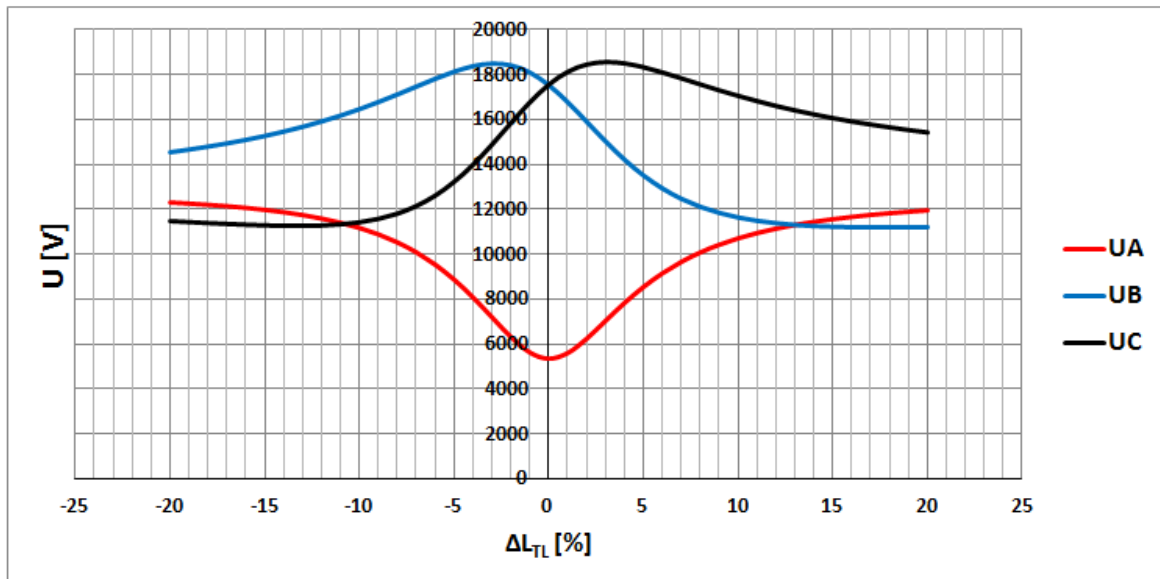
Z poznatků získaných analytickým a simulačním řešením jsem se na závěr práce v kapitole 5 pokusil nasimulovat zemní poruchy dle průběhů reálně změřené zemní poruchy. Jak je možno vidět na obrázcích v kapitole, i přes výrazná zjednodušení simulačního modelu soustavy, bylo docíleno výrazné shody průběhů sledovaných veličin. Lze konstatovat, že simulacemi je možné získat poměrně přesnou představu o chování soustavy během poruchových stavů a dává nám tak možnost předběžného návrhu ochranných systémů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

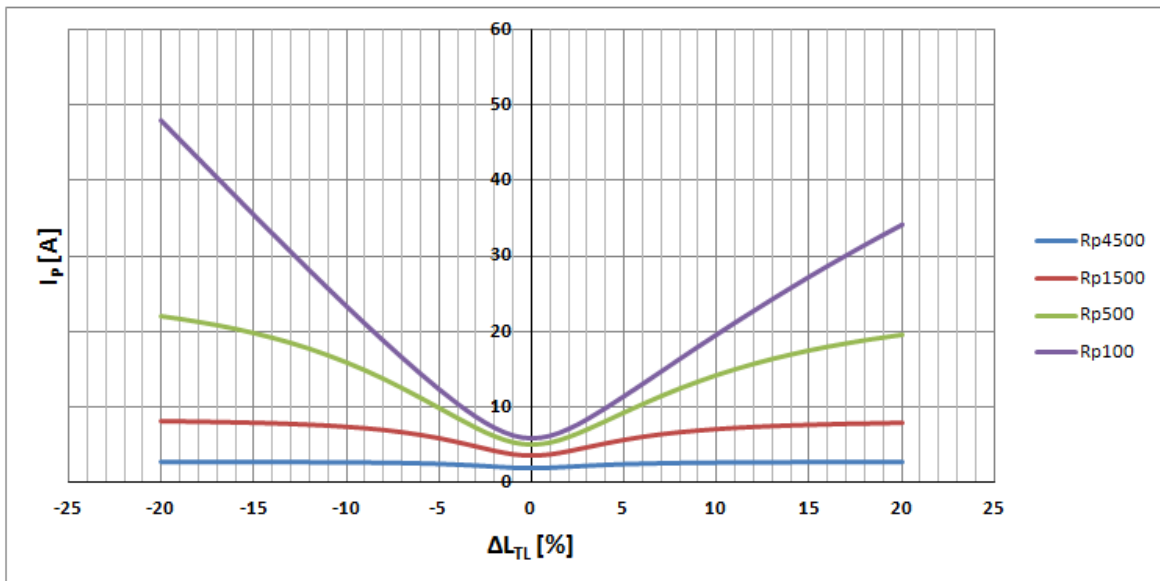
- [1] TOMAN, Petr, DRÁPELA, Jiří, MIŠÁK, Stanislav, ORSÁGOVÁ, Jaroslava, PAAR, Martin a TOPOLÁNEK, David. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] MERTLOVÁ, Jiřina a NOHÁČOVÁ, Lucie. *Elektrické stanice a vedení*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [3] POWERWIKI. *Zemní spojení v trojfázových soustavách*. [online]. [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [4] TESAŘOVÁ, Miloslava a ŠTROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-703-3.
- [5] TROJÁNEK, Zdeněk, HÁJEK, Josef a KVASNICA, Pavol. *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách*. 1. Vyd. Praha: STNL, 1987.
- [6] KARBAN, Pavel. *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 978-80-251-1448-3.
- [7] ŽÁK, František. *Konzultace*. České Budějovice, 2017-2018.
- [8] www.ege.cz [online]. [cit. 2018-2-3]. Dostupné z <http://www.ege.cz/>
- [9] NKT. *Silové kabely s izolací ze síťového polyetylenu 22-AXEKVCEY* [online]. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: http://www.nkt.cz/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/22-AXEKVCEY+DS+CZ+EN.pdf
- [10] ŽÁK, František. *Analýza způsobů uzemnění uzlu sítí VN a jejich vliv na provoz a chránění sítí VN*. Disertační práce. Plzeň: Západočeská univerzita, 2014.
- [11] ETD, *Parametry transformátorů* [online]. [cit. 2018-3-10]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/katalogy/parametry_transformatoru.pdf
- [12] V. Sivokobylenko a V. Lysenko, *Numerical Simulation of Transient Ground Faults in Medium Voltage Networks* [online]. [cit. 2018-3-12]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8248884/>
- [13] MANN, Heřman a ŠEVČENKO, Michal. *Příručka k internetovému kurzu a simulačnímu systému DYNAST*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008.
- [14] ČSN 33 3070. *Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí*. Praha: Český normalizační institut, 1979.
- [15] KOUBA, Daniel. *Analýza bezpečného provozu kompenzované sítě VN velkého rozsahu*. Disertační práce. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013.

Přílohy

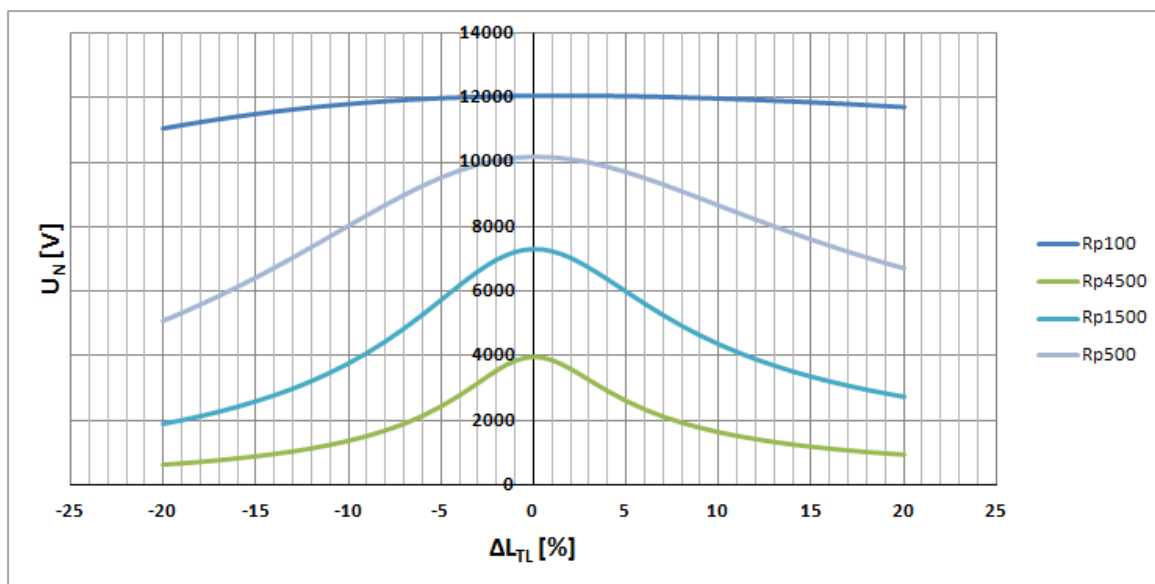
Příloha A: Doplnující závislosti veličin dané analytickým výpočtem



Obr. 62: Závislost fázových napětí na rozladění tlumivky při $R_p = 1500 \Omega$



Obr. 63: Závislost poruchového proudu na rozladění tlumivky při různém R_p



Obr. 64: Závislost uzlového napětí na rozladění tlumivky při různém R_p

Příloha B: Analytický výpočet pomocí softwaru

B.1 Analytický výpočet v EXCELU metodou Fortescue

Výpočetní program v EXCELU obsahuje několik samostatných listů. Základem je hlavní list. Hlavní list je složen z části zadání parametrů soustavy a samotného výpočtu metodou Fortescue dle kapitoly 3.3. Jsou zde umístěna tři tlačítka. Stiskem tlačítek se s využitím maker a postupného výpočtu vypočtou závislosti sledovaných parametrů na změnách některých parametrů ovlivňující charakter zemního spojení. Jedná se o závislosti veličin na změně přechodového odporu poruchy a změně rozladění zhášecí tlumivky. Jedno z tlačítek slouží k určení indukčnosti tlumivky, a je tak nasimulováno právě samotné ladění tlumivky. Jednotlivé hodnoty sledovaných veličin při změnách parametrů jsou zaznamenány do tabulek, umístěných do samostatných listů a následně převedeny do grafické podoby.

Parametry sítě									
Transformátor									
Sn	40 MVA								
dPk	110 kW	dPk						19500 W	
uk	11,5 %							0,15 %	
Zk22kV	1,3915 Ω	Zk110kV						1,61157E-06 S	
Rk22kV	0,033275 Ω	Rk110kV						620512,8205 Ω	R1k110kV 0,415938 Ω
Xk22kV	1,39110209 Ω	Xk110kV						4,95868E-06 S	R2k22kV 0,016638 Ω
Zk22complex	0,033275+1,39110208984639j Ω	Zk110complex						213242,7597 Ω	Lk110kV 0,05535 H
Lk22kV	0,004428015 H	Lk110kV						678,7727857 H	L2k110kV 0,002214 H
Vývod									
lv	5 km								
Rv	0,164 Ω/km	Rv						0,82 Ω	
Lv	0,54 mH/km	Lv						2,7 mH	
Xv	0,169646003 Ω/km								
lc01	20 A								
C01	1,67069E-06 F	C01						3,34139E-07 F/km	
Xc01	1905,255888 Ω	Xc01complex						-1905,25588832576i Ω	
R01	95262,79442 Ω	R01complex						95262,7944162882 Ω	
G01	1,04973E-05							S/km	
Síť									
lc0	200 A								
C01	1,67069E-05 F								
Xc0	190,5255888 F	Xc0complex						-190,525588832577i F	
R0	9526,279442 Ω	R0complex						9526,27944162883 Ω	
Xlsit	12701,70592 H	L0						4,043078566 H	
Tlumička									
Ccelk	1,83776E-05 F								
Lrez	0,1823 H	z rezonanční křivky							
XTL	57,27123407 Ω	3XTLcomplex						171,813702224826i Ω	
RTL	7158,904259 Ω	3RTLcomplex						21476,7127781032 Ω	
Ltl	0,183776298 H	vypočtená (odhad)							

Obr. 65: Ukázka zadání a výpočet parametrů ve výpočetním programu EXCEL

Analytický výpočet			
Rp	100	Ω	
Uf	12702	V	
ZT1	0,033275+1,39110208984639i	Ω	
ZV1	0,82+0,848230016469244i	Ω	
ZT2	0,033275+1,39110208984639i	Ω	
ZV2	0,82+0,848230016469244i	Ω	
Z10	1,4076966548127+173,193808941434i	Ω	
ZCOsit	3,808988181379-190,44940906895i	Ω	
Z20	508,790084770374+1758,02769669064i	Ω	
Z03	509,610084770374+1758,87592670711i	Ω	
ZCOvypvod	38,0898818137895-1904,49409068948i	Ω	
Z0	6155,03498299021-13,2720938483748i	Ω	
Z1	0,853275+2,23933210631563i	Ω	
Z2	0,853275+2,23933210631563i	Ω	
Zcelk	6456,74153299021-8,79342963574354i	Ω	
I1	1,967196967478+0,00267912352148232i	A	
U1	12700,0333616267-4,40749335784302i	V	
U2	-1,67256054510635-4,40749335784302i	V	
U0	-12108,2017108382+9,61872377213072i	V	
a	-0,5+0,866025403784439i		
a2	-0,5-0,866025403784439i		
UA	590,159090243393+0,80373705644468i	V	
UB	-18457,382111379-10985,9737828701i	V	
UC	-18457,382111379+11014,02621713i	V	
IA	5,901590902434+0,00803737056444696i	A	
IB	2,22044604925031E-16+2,2885339456824E-15i	A	
IC	2,22044604925031E-16+2,2885339456824E-15i	A	
Uavel	590,1596	V	0,078031015
Ubvel	21479,4454	V	-149,2385714
Ucvel	21493,8067	V	149,1743134
Iavel	5,9016	A	0,078031015
Ibvel	0,0000	A	84,45823332
Icvel	0,0000	A	84,45823332
Ip	-5,901590902434-0,00803737056444696i	A	
Ipvel	5,9016	A	-179,921969
UTL1	-12161,0182668268+63,317606645349i	V	
ZTL	1,3744216548127+171,802706851588i	Ω	
UTL=UN	-12063,3358010746+61,2665410809672i	V	
ITL	-0,615320167215463+210,643722424719i	A	
ITLvel	210,6446211	A	90,16736862
ICA	0,00577321126039869+0,309761627611679i	A	
ICB	5,57238857294495-9,80293602632501i	A	
ICC	-5,97461681084767-9,57199591864915i	A	
ICavel	0,3098	A	88,93226818
ICBvel	11,2760	A	-60,38433421
ICCvel	11,2836	A	-121,9714494
UNvel	12063,49138	V	179,7090122

Obr. 66: Ukázka výpočtů metodou Fortescue ve výpočetním programu EXCEL

B.2 Analytický výpočet v Matlabu metodou Fortescue a MUN

Matlab je využit za účelem kontroly výsledků řešení metodou Fortescue z Excelu. Skript obsahuje zadávání a výpočet základních parametrů soustavy. Dále jsou sestaveny tři cykly provádějící výpočty závislostí veličin na odporu poruchy, rozladění tlumivky a ladění tlumivky. Hlavní účel využití Matlabu je aplikace metody uzlových napětí v závěru skriptu, kde je pro řešení využita funkce maticového počtu.

```
function [ ] = Analytický_vypocet_Matlab( )
clear;
clc;

%Definice parametrů náhradního složkového schéma
```

```

%Transformátor 110/23kV
Un=22e3
Sn=40e6
uk=11.5
i0=0.15
dP0=19.5e3
dPk=110e3
Zk=uk/100*Un^2/Sn
Rk=dPk/Sn*Un^2/Sn
Xk=sqrt(Zk^2-Rk^2)
Gfe=dP0/110000^2
Rfe=1/Gfe
Yg=i0/100*Sn/110000^2
Xh=1/sqrt(Yg^2-Gfe^2)
Lh=Xh/(100*pi)
ZT1=Rk+Xk*i
ZT2=ZT1
ZT0=ZT1

%Vývod s poruchou
Uf=22e3/sqrt(3)
Ic01=20
C01=Ic01/(3*100*pi*Uf)
Xc01=1/(100*pi*C01)
R01=Xc01*100/2
ZC0vyvod=(R01*Xc01*-i)/(R01+Xc01*-i)
G01=1/R01
l=5
Rv=0.164*l
Xv=100*pi*0.54/1000*l
ZV1=complex(Rv,Xv)
ZV2=ZV1
ZV0=ZV1

%Sít
Ic0=200
C0=Ic0/(3*100*pi*Uf)
Xc0=1/(100*pi*C0)
R0=Xc0*100/2
ZC0sit=(R0*Xc0*-i)/(R0+Xc0*-i)

%Výpočet celkové sousledné a zpětné impedance
Z1=ZT1+ZV1;
Z2=ZT2+ZV2;

%Operátory natočení
a=-1/2+sqrt(3)/2*i;
a2=-1/2-sqrt(3)/2*i;

%Cyklus ladění tlumivky
Rp=1000000; %reprezentace sítě bez poruchy
L0=1/(3*(100*pi)^2*(C0+C01)); %předběžný návrh
L=0.8*L0; %počáteční hodnota indukčnosti
krok=0.0001;
for p=1:800
    Lp(p)=L+krok*p;
    XTLp(p)=100*pi*Lp(p);
    RTLp(p)=XTLp(p)*100/0.8;
    ZTLp(p)=(RTLp(p)*XTLp(p)*i)/(RTLp(p)+XTLp(p)*i);
    Z10p(p)=ZT0+3*ZTLp(p);

```

```

Z20p(p)=Z10p(p)*ZC0sit/(Z10p(p)+ZC0sit);
Z30p(p)=Z20p(p)+ZV0;
Z0p(p)=Z30p(p)*ZC0vyvod/(Z30p(p)+ZC0vyvod);
Zcelkp(p)=Z1+Z2+Z0p(p)+3*Rp;
I1p(p)=Uf/Zcelkp(p);
U0p(p)=-Z0p(p)*I1p(p);
UN1p(p)=U0p(p)*ZC0sit/(ZC0sit+ZV0);
UNp(p)=UN1p(p)*3*ZTLp(p)/(3*ZTLp(p)+ZT0);
end
%Výpis Lrez a vykreslení rezonanční křivky soustavy
[VelUN,pozice]=(max(abs(UNp)));
Lrez=Lp(pozice)
plot(Lp,abs(UNp));
title('Rezonanční křivka soustavy');
xlabel('LTL [H]');
ylabel('UN [V]');
grid on;

%Analytický výpočet dle schématu
XTL=100*pi*Lrez
RTL=XTL*100/0.8
ZTL=(RTL*XTL*i)/(RTL+XTL*i)
Z10=ZT0+3*ZTL
Z20=Z10*ZC0sit/(Z10+ZC0sit)
Z30=Z20+ZV0
Z0=Z30*ZC0vyvod/(Z30+ZC0vyvod)
%Cyklus pro hodnoty funkcí přechodového odporu
Rp=0;
for n=1:10001
    Zcelk(n)=Z1+Z2+Z0+3*Rp;
    I1(n)=Uf/Zcelk(n);
    Ip(n)=-3*I1(n);
    U1(n)=Uf-Z1*I1(n);
    U2(n)=-Z2*I1(n);
    U0(n)=-Z0*I1(n);
    UN1(n)=U0(n)*ZC0sit/(ZC0sit+ZV0);
    UN(n)=UN1(n)*3*ZTL/(3*ZTL+ZT0);
    ITL(n)=UN(n)/ZTL;
    UA(n)=U1(n)+U2(n)+U0(n);
    UB(n)=a2*U1(n)+a*U2(n)+U0(n);
    UC(n)=a*U1(n)+a2*U2(n)+U0(n);
    ICA(n)=UA(n)/ZC0vyvod;
    ICB(n)=UB(n)/ZC0vyvod;
    ICC(n)=UC(n)/ZC0vyvod;
    x(n)=Rp;
    Rp=Rp+1;
end
%Vykreslení závislostí hodnot na Rp
figure;
plot(x,abs(UA),x,abs(UB),x,abs(UC));
title('Závislost fázových napětí na přechodovém odporu');
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('U [V]');
legend('UA','UB','UC');
grid on;
figure;
plot(x,abs(Ip));
title('Závislost poruchového proudu na přechodovém odporu');
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('Ip [A]');
grid on;

```

```

figure;
plot(x,abs(ITL));
title('Závislost kompenzačního proudu na přechodovém odporu');
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('ITL [A]');
grid on;
figure;
plot(x,abs(UN));
title('Závislost napětí uzlu na přechodovém odporu');
xlabel('Rp [Ohm]');
ylabel('UN [V]');
grid on;
%Hodnoty veličin pro konkrétní Rp
Rp=100 %volba odporu poruchy
Ipkomplex=Ip(Rp+1)
Ipef=abs(Ipkomplex)
Uakomplex=UA(Rp+1)
UAef=abs(Uakomplex)
UBkomplex=UB(Rp+1)
UBef=abs(UBkomplex)
Uckomplex=UC(Rp+1)
UCef=abs(Uckomplex)
UNkomplex=UN(Rp+1)
UNef=abs(UNkomplex)

%Cyklus pro hodnoty v závislosti na rozladění tlumivky
%Rozladění tlumivky
Rp=100 %volba odporu poruchy
rozladieni=-20; %[%]
krok=1;
for r=1:(40/krok+1)
    Lr(r)=Lrez*(100+rozladieni)/100;
    XTLr(r)=100*pi*Lr(r);
    RTLr(r)=XTLr(r)*100/0.8;
    ZTLr(r)=(RTLr(r)*XTLr(r)*i)/(RTLr(r)+XTLr(r)*i);
    Z10r(r)=ZT0+3*ZTLr(r);
    Z20r(r)=Z10r(r)*ZC0sit/(Z10r(r)+ZC0sit);
    Z30r(r)=Z20r(r)+ZV0;
    Z0r(r)=Z30r(r)*ZC0vyvod/(Z30r(r)+ZC0vyvod);
    Zcelkr(r)=Z1+Z2+Z0r(r)+3*Rp;
    I1r(r)=Uf/Zcelkr(r);
    Ipr(r)=-3*I1r(r);
    U1r(r)=Uf-Z1*I1r(r);
    U2r(r)=-Z2*I1r(r);
    U0r(r)=-Z0r(r)*I1r(r);
    UN1r(r)=U0r(r)*ZC0sit/(ZC0sit+ZV0);
    UNr(r)=UN1r(r)*3*ZTLr(r)/(3*ZTLr(r)+ZT0);
    ITLr(r)=UNr(r)/ZTLr(r);
    UAr(r)=U1r(r)+U2r(r)+U0r(r);
    UBr(r)=a2*U1r(r)+a*U2r(r)+U0r(r);
    UCr(r)=a*U1r(r)+a2*U2r(r)+U0r(r);
    ICAr(r)=UAr(r)/ZC0vyvod;
    ICBr(r)=UBr(r)/ZC0vyvod;
    ICCr(r)=UCr(r)/ZC0vyvod;
    osax(r)=rozladieni;
    rozladieni=rozladieni+krok;
end
%Vykreslení závislostí hodnot na rozladění tlumivky
figure
plot(osax,abs(UAr),osax,abs(UBr),osax,abs(UCr));
title('Závislost fázových napětí na rozladění tlumivky');

```

```

xlabel('Rozladění [%]');
ylabel('U [V]');
legend('UA', 'UB', 'UC');
grid on;
figure;
plot(osax,abs(Ipr));
title('Závislost poruchového proudu na rozladění tlumivky');
xlabel('Rozladění [%]');
ylabel('Ip [A]');
grid on;
figure;
plot(osax,abs(ITLr));
title('Závislost kompenzačního proudu na rozladění tlumivky');
xlabel('Rozladění [%]');
ylabel('ITL [A]');
grid on;
figure;
plot(osax,abs(UNr));
title('Závislost napětí uzlu na rozladění tlumivky');
xlabel('Rozladění [%]');
ylabel('UN [V]');
grid on;

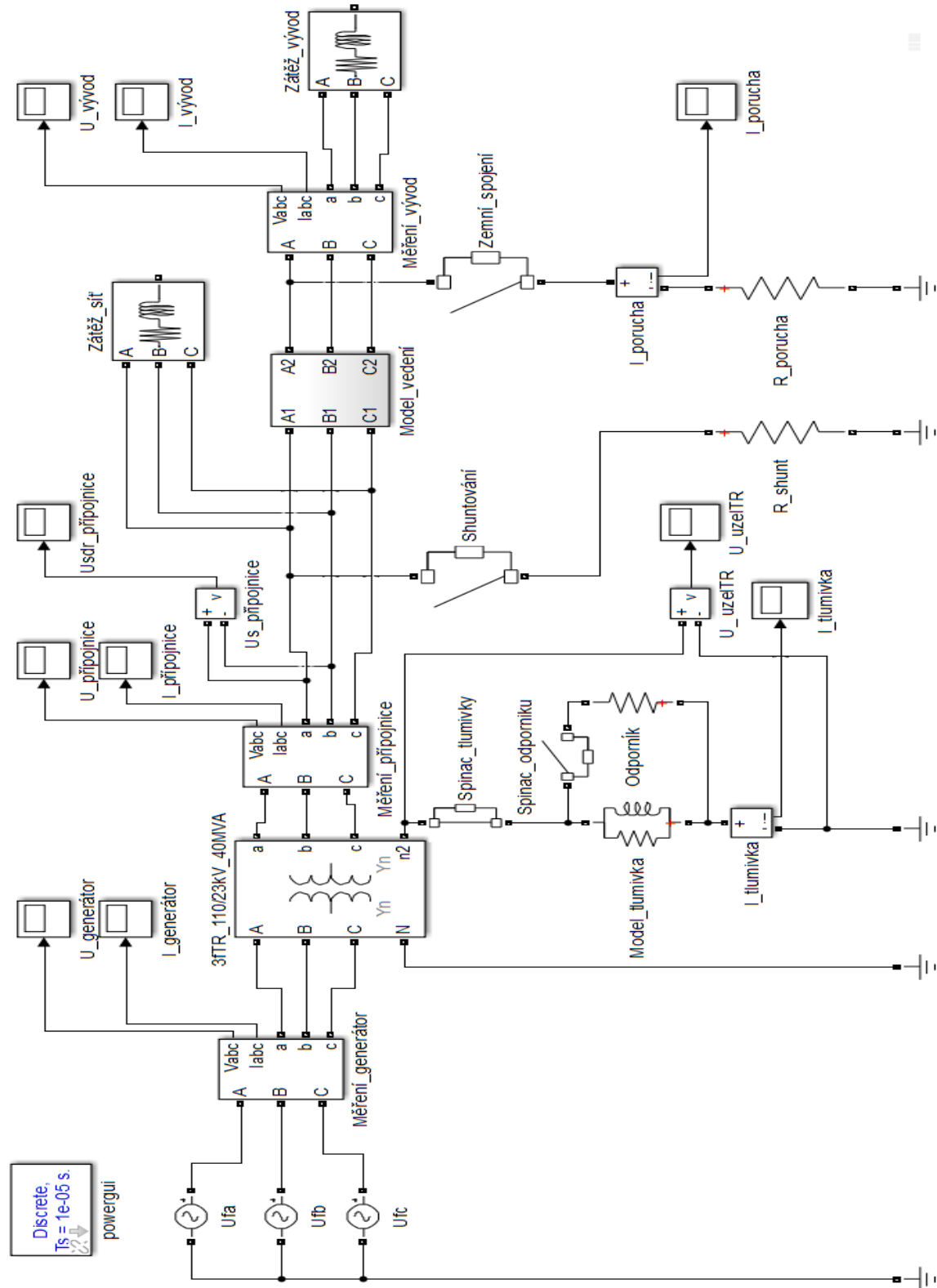
%Metoda uzlových napětí

Rp=100 %volba odporu poruchy
%Přepočítání impedancí zátěže do trojúhelníka
Zzv=3*(Un^2/3e6+Un^2/1e6*i)
Zzs=3*(Un^2/15e6+Un^2/2e6*i)
%Definice matice
Y=[1 0 0 0 0 0 0 0 0 -1;
    0 1 0 0 0 0 0 0 0 -1;
    0 0 1 0 0 0 0 0 0 -1;
    1/ZT1 0 0 -(1/ZT1+1/ZC0sit+1/ZV1+1/Zzs) 1/Zzs 0 1/ZV1 0 0 0;
    0 1/ZT1 0 0 -(1/ZT1+1/ZC0sit+1/ZV1+1/Zzs) 1/Zzs 0 1/ZV1 0 0;
    0 0 1/ZT1 1/Zzs 0 -(1/ZT1+1/ZC0sit+1/ZV1+1/Zzs) 0 0 1/ZV1 0;
    0 0 0 1/ZV1 0 0 -(1/ZV1+1/ZC0vyvod+1/Zzv+1/Rp) 1/Zzv 0 0;
    0 0 0 0 1/ZV1 0 0 -(1/ZV1+1/ZC0vyvod+1/Zzv) 1/Zzv 0;
    0 0 0 0 0 1/ZV1 0 1/Zzv -(1/ZV1+1/ZC0vyvod+1/Zzv) 0;
    0 0 0 1/ZC0sit 1/ZC0sit 1/ZC0sit (1/ZC0vyvod+1/Rp) 1/ZC0vyvod
    1/ZC0vyvod 1/ZTL];
%Definice vektoru pravých stran
b=[Uf; Uf*a2; Uf*a; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
X=Y\b; %Výpočet pomocí funkce Matlabu
%Výčet sledovaných uzlových napětí a dopočet poruchového proudu
UAkomples=X(7)
UA=abs(X(7))
fiUA=angle(UAkomples)*180/pi
UBkomples=X(8)
UB=abs(X(8))
fiUB=angle(UBkomples)*180/pi
UCkomples=X(9)
UC=abs(X(9))
fiUC=angle(UCkomples)*180/pi
UNkomples=X(10)
UN=abs(X(10))
fiUN=angle(UNkomples)*180/pi
Ipkomples=-X(7)/Rp
Ip=abs(Ipkomples)
fiIp=angle(Ipkomples)*180/pi
end

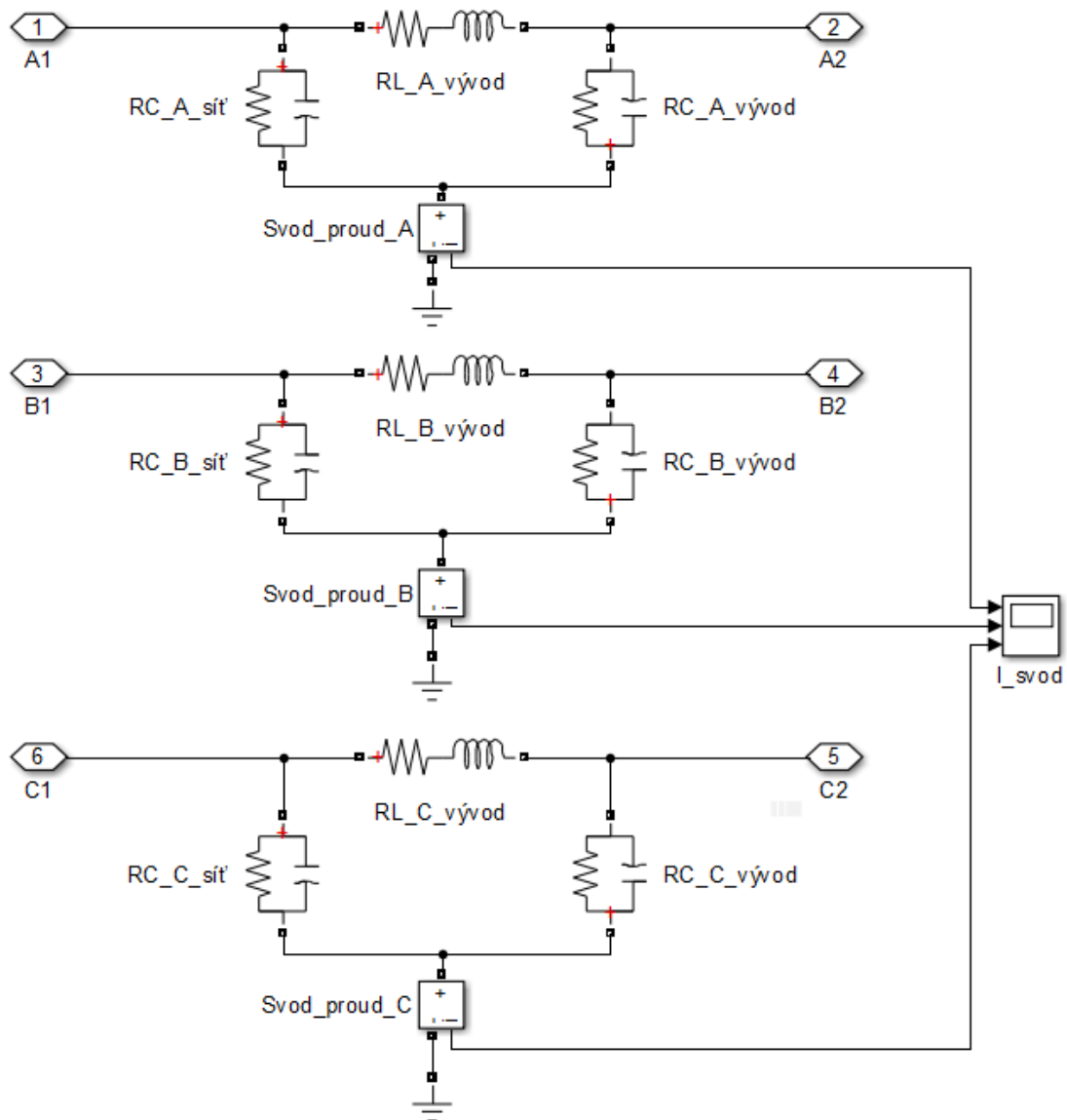
```

Příloha C: Simulace

C.1 Simulační schéma v Simulinku

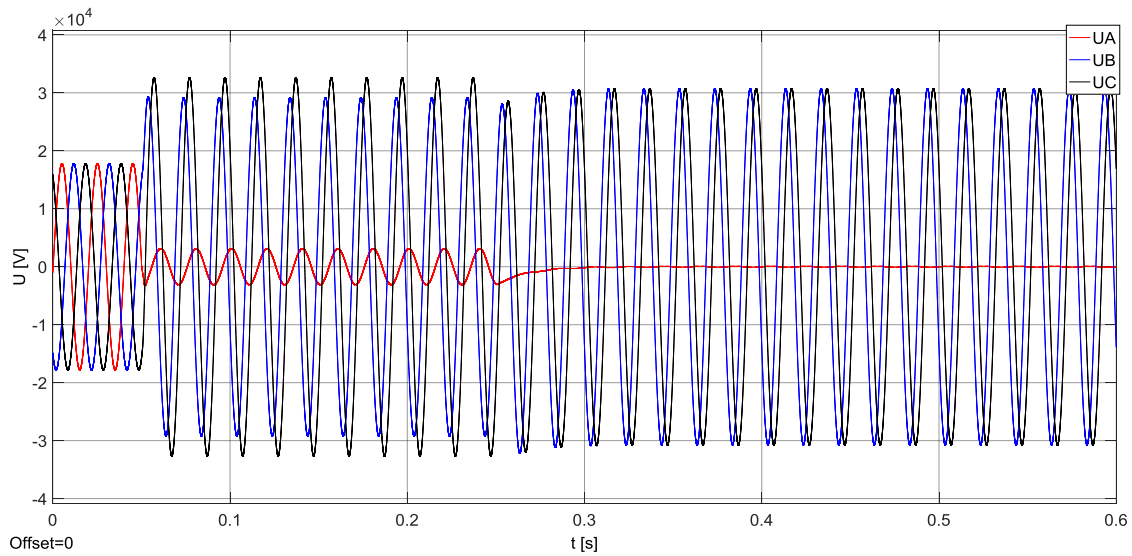


Obr. 67: Simulační schéma v Simulinku

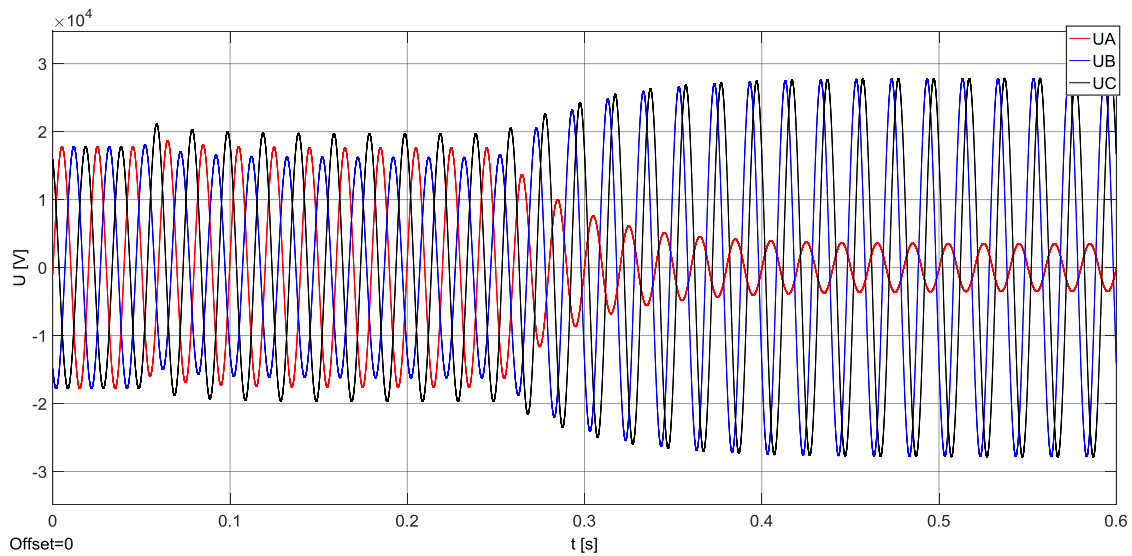


Obr. 68: Model vedení sítě a vývodu

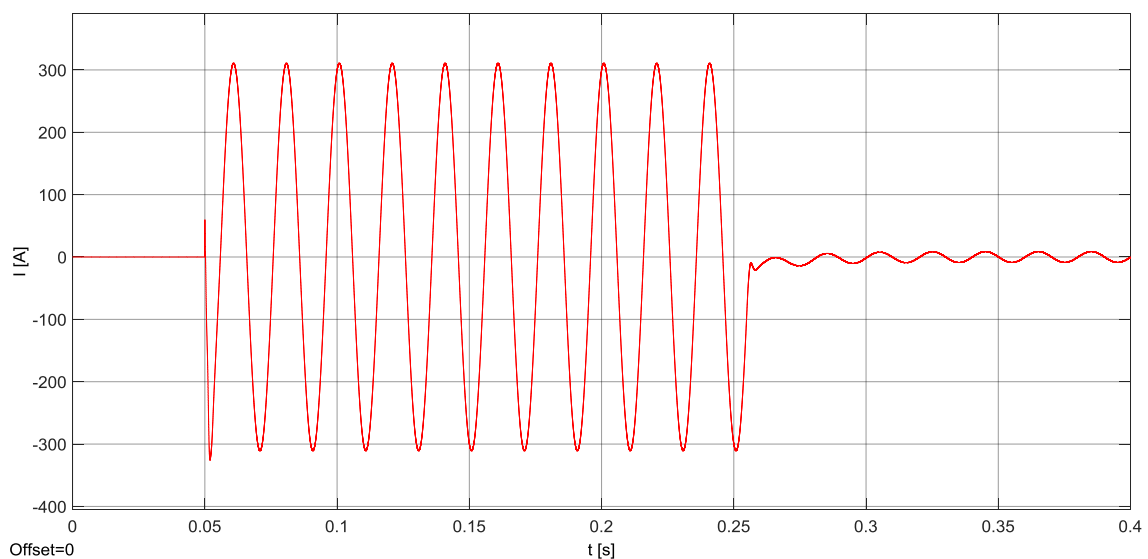
C.3 Doplnující nasimulované průběhy sledovaných veličin



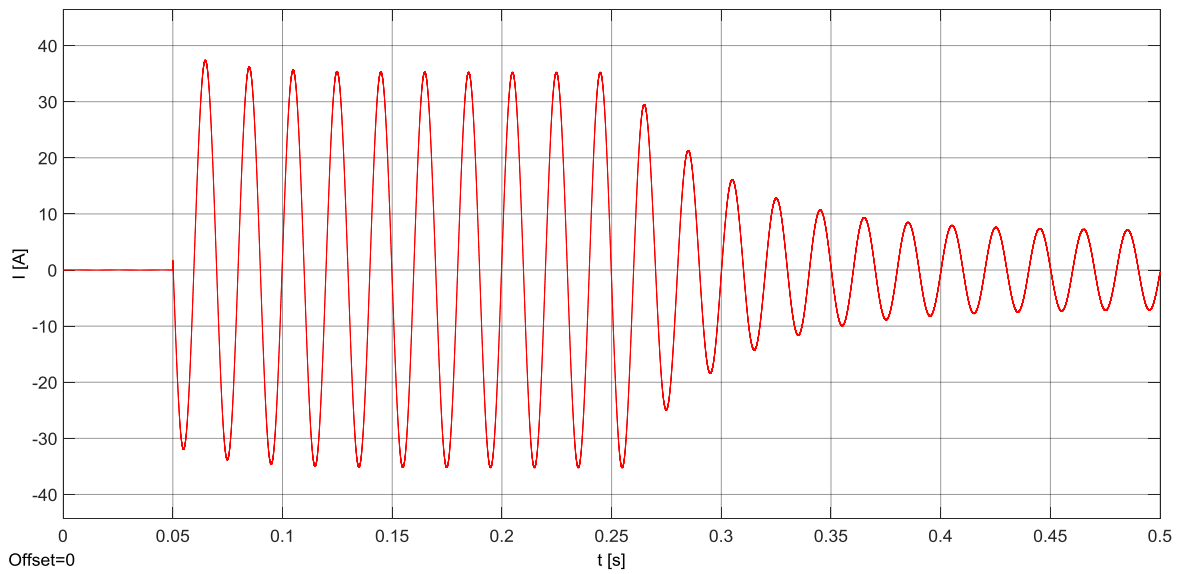
Obr. 70: Průběhy fázových napětí na vývodu v místě ZS o $R_P = 10 \Omega$



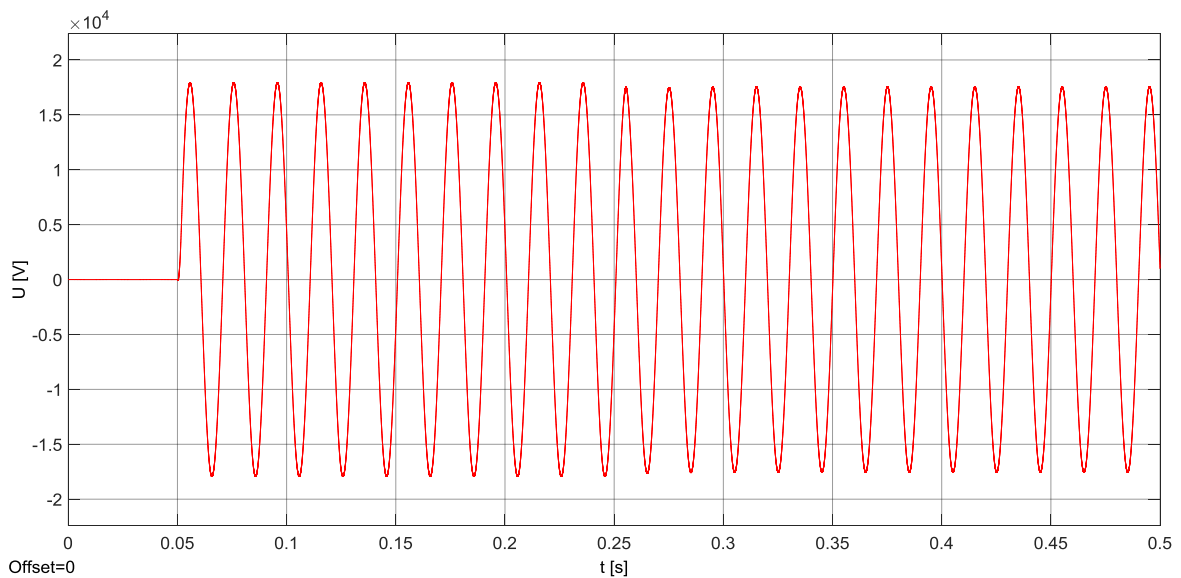
Obr. 71: Průběhy napětí ve fázích na vývodu v místě ZS o $R_P = 500 \Omega$



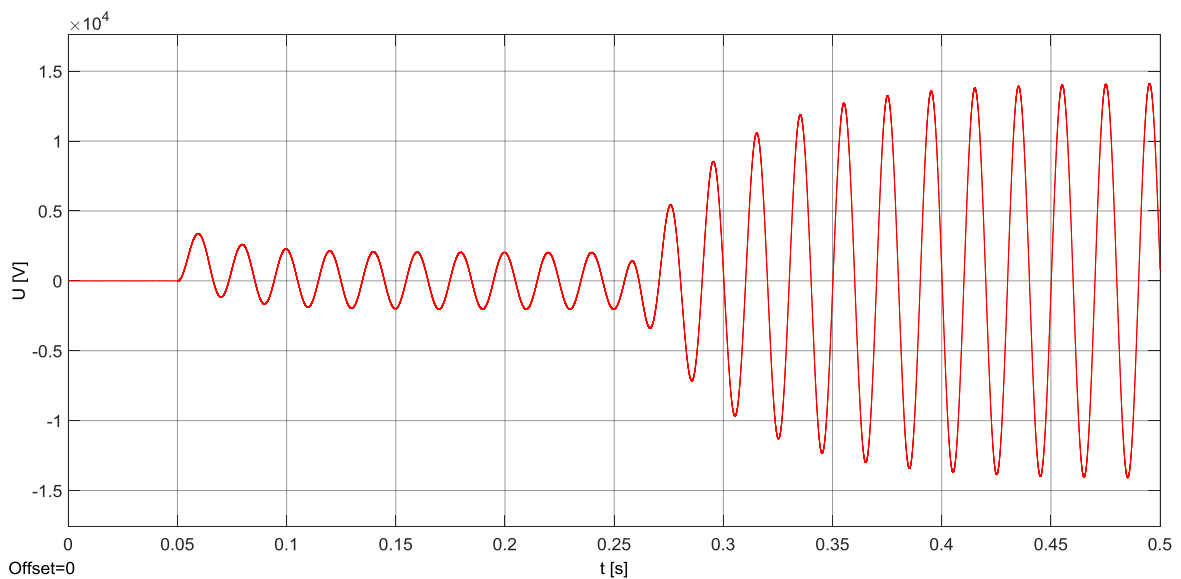
Obr. 72: Průběh poruchového proudu při ZS o $R_P = 10 \Omega$



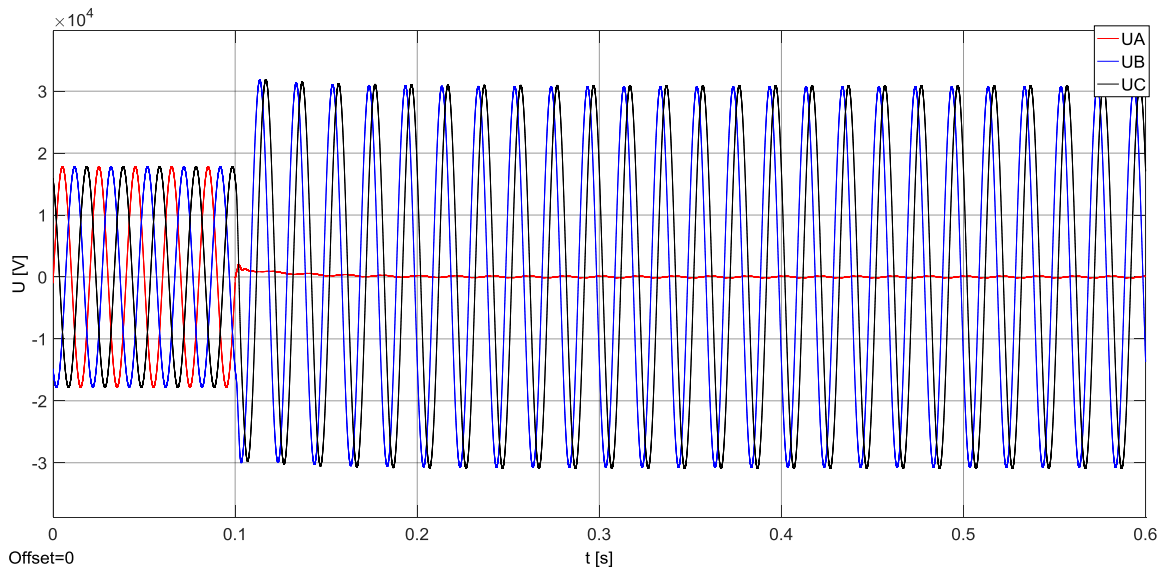
Obr. 73: Průběh poruchového proudu při ZS o $R_P = 500 \Omega$



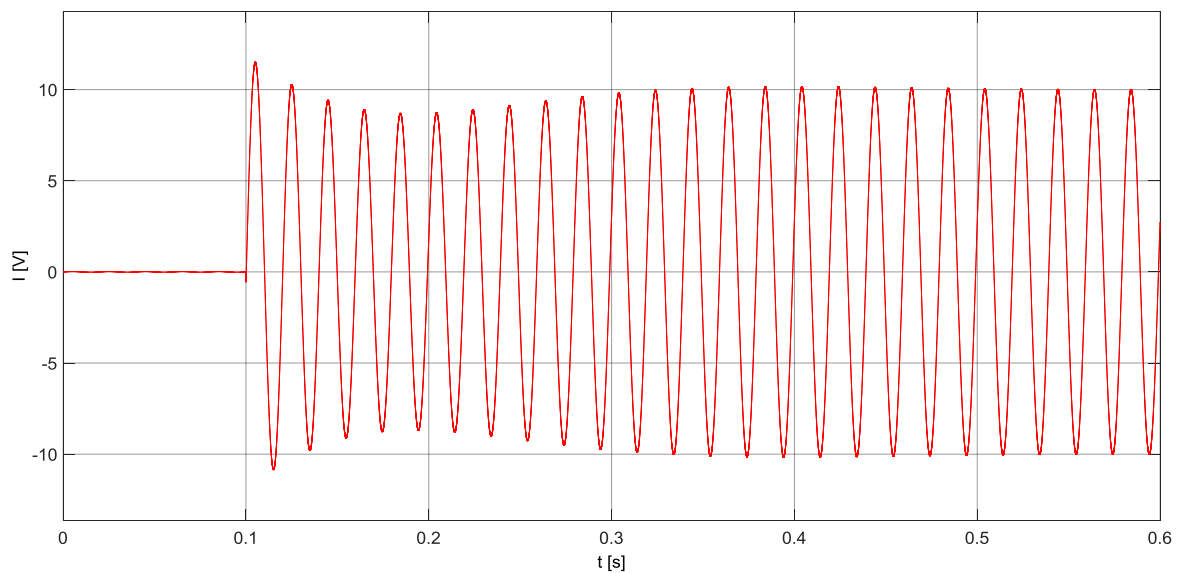
Obr. 74: Průběh uzlového napětí při ZS o $R_P = 10 \Omega$



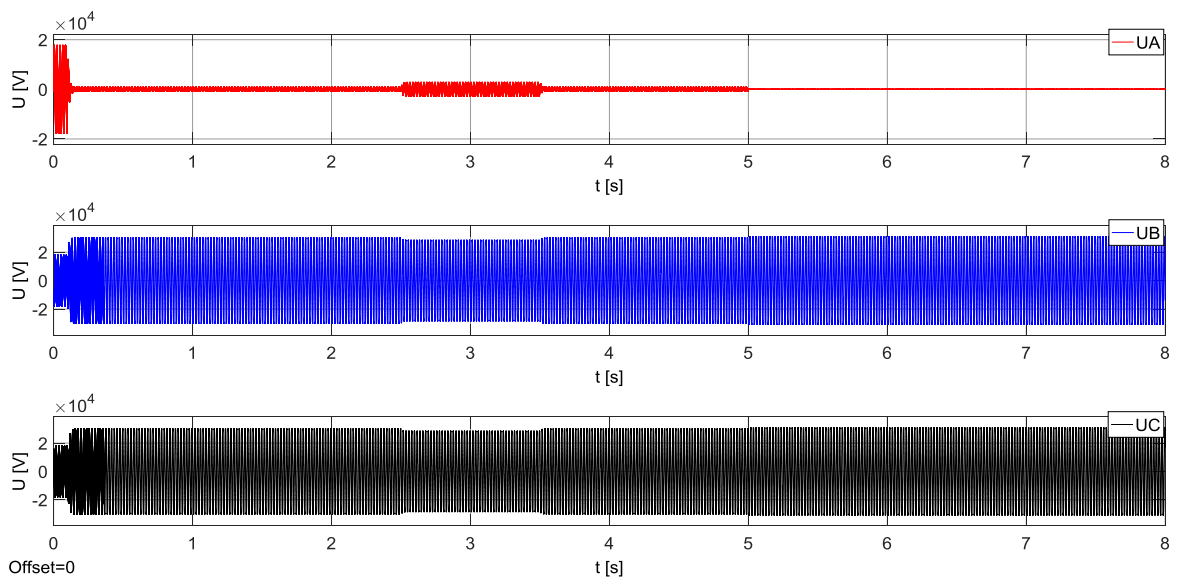
Obr. 75: Průběh uzlového napětí při ZS o $R_P = 500 \Omega$



Obr. 76: Průběhy napětí ve fázích při ZS o $R_P = 5 \Omega$ a rozladění +10%



Obr. 77: Průběh poruchového proudu při ZS o $R_P = 1500 \Omega$ a rozladění +10%



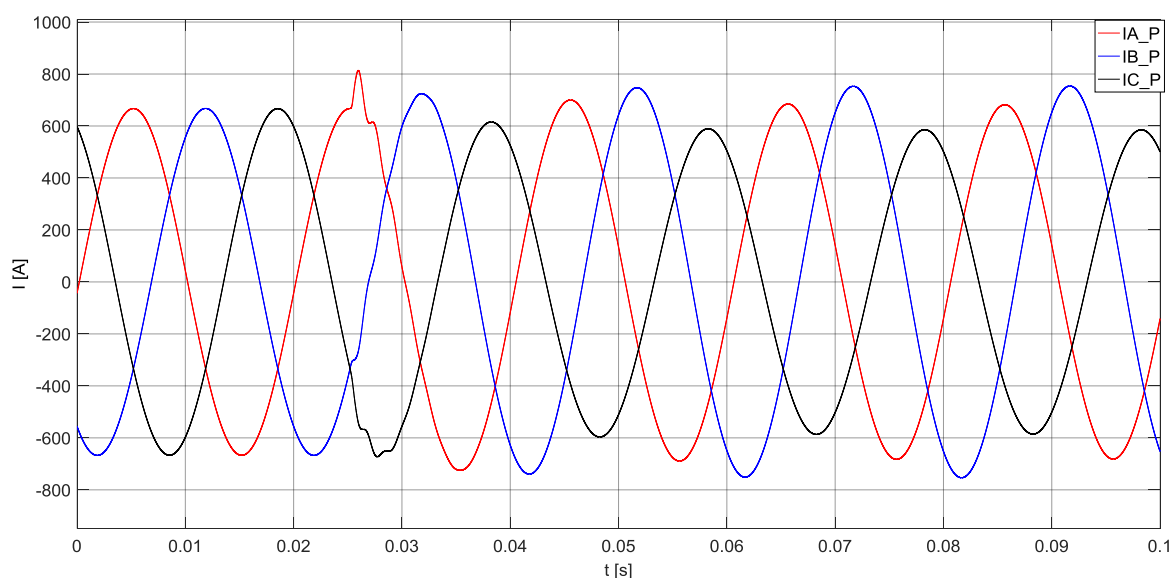
Obr. 78: Napětí ve fázích s připnutím odporů a shuntováním při ZS o $R_P = 100 \Omega$

C.4 Doplnující tabulka porovnání analytického a simulačního řešení

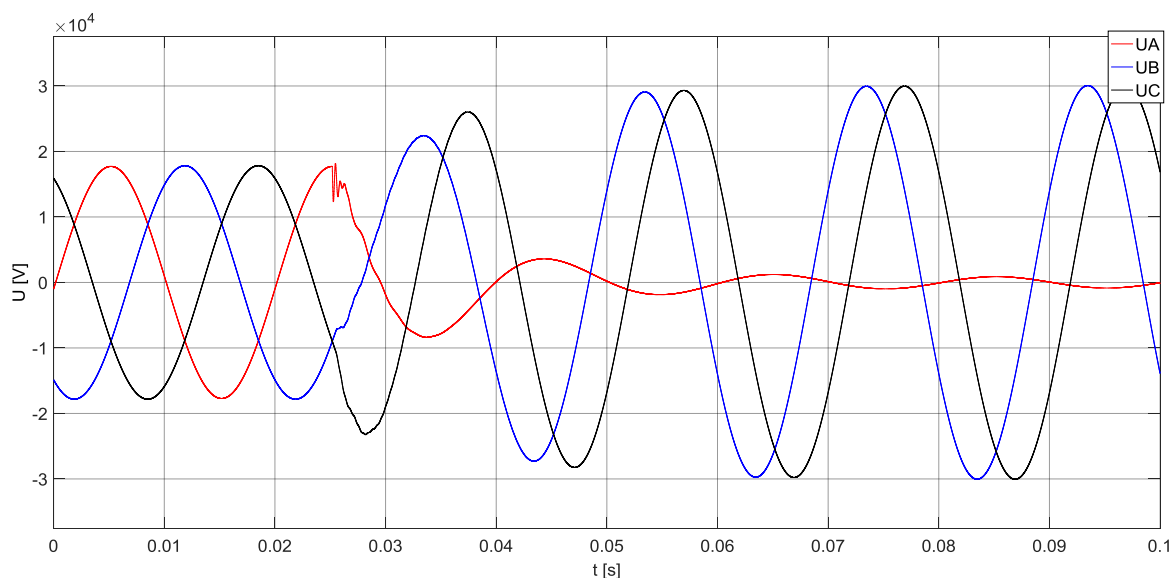
Tab. 5: Porovnání analytických výpočtů a simulačního řešení pro $R_p = 1500 \Omega$

	U_A [V]	U_B [V]	U_C [V]	U_N [V]	I_p [A]
Fortescue	5363,52	17550,87	17566,45	7309,07	3,58
MUM	5310,08	17619,21	17745,46	7370,38	3,54
Dynast	5267,95	17394,83	17366,50	7226,63	3,51
Simulink	5337,95	17352,40	17387,76	7177,13	3,56

C.5 Doplnující nasimulované průběhy pro hodnocení přechodových dějů



Obr. 79: Proud odebraný ze sítě při ZS o $R_p = 100 \Omega$ - vznik ZS v maximu U_A



Obr. 80: Napětí ve fázích v místě ZS o $R_p = 100 \Omega$ - vznik ZS v maximu U_A