

Martin HORÁK

# SYSTÉMY CHRÁNENIA A AUTOMATIZÁCIE DISTRIBUČNÝCH ELEKTRICKÝCH SIETÍ 22 kV





---

---

# OBSAH

Úvod.....	9
<b>1. Kovové zemné spojenie .....</b>	<b>11</b>
1.1. Teoretická analýza – fázové veličiny .....	11
1.1.1. Napätie v sieti pri kovovom zemnom spojení .....	12
1.1.2. Tok prúdov zdravým vývodom pri kovovom zemnom spojení .....	13
1.1.3. Tok prúdov postihnutým vývodom pri kovovom zemnom spojení – kompenzovaná sieť .....	14
1.1.4. Tok prúdov postihnutým vývodom pri kovovom zemnom spojení – pripnutie odporníka v kompenzovanej sieti .....	15
1.1.5. Tok prúdu miestom kovového zemného spojenia – kompenzovaná sieť .....	16
1.1.6. Tok prúdov postihnutým vývodom pri kovovom zemnom spojení – sieť s odporovo uzemneným uzlom .....	18
1.1.7. Spôsob uzemnenia uzla siete z pohľadu elektrických ochrán .....	19
1.2. Teoretická analýza – symetrické zložky .....	19
1.2.1. Kovové zemné spojenie – kompenzovaná sieť .....	19
1.2.2. Kovové zemné spojenie – sieť s odporovo uzemneným uzlom .....	21
1.3. Simulácia kovového zemného spojenia .....	22
1.4. Experimentálne meranie kovového zemného spojenia .....	27
1.4.1. Zemné spojenie .....	27
1.4.2. Zemné spojenie – pripnutie odporníka.....	27
<b>2. Odporové zemné spojenie .....</b>	<b>30</b>
2.1. Teoretická analýza – fázové veličiny .....	30
2.1.1. Napätie neutrálneho bodu – kompenzovaná sieť .....	30
2.1.2. Prúd vnútený sekundárnym odporníkom.....	31
2.1.3. Napätie neutrálneho bodu – sieť s odporovo uzemneným uzlom .....	32
2.2. Teoretická analýza – symetrické zložky .....	33
2.3. Simulácia odporového zemného spojenia .....	34
2.4. Experimentálne meranie odporového zemného spojenia .....	39
2.4.1. Zemné spojenie .....	39
2.4.2. Zemné spojenie – pripnutie odporníka.....	39
2.4.3. Závislosť elektrických pomerov od odporu poruchy .....	42

2.5.	Tepelný výkon v mieste zemného spojenia.....	42
2.5.1.	Zemné spojenie – nepripnutý odporník .....	43
2.5.2.	Zemné spojenie – pripnutý odporník.....	44
<b>3.</b>	<b>Prechodné javy pri vzniku a zániku zemného spojenia.....</b>	<b>46</b>
3.1.	Vznik kovového zemného spojenia .....	46
3.1.1.	Ustálená zložka – kapacitný prúd .....	47
3.1.2.	Ustálená zložka – konduktančný prúd.....	47
3.1.3.	Vybíjací prechodný dej .....	47
3.1.4.	Nabíjací prechodný dej .....	49
3.1.5.	Jednosmerná zložka prúdu tlmivky.....	51
3.1.6.	Superpozícia jednotlivých zložiek prúdu.....	52
3.2.	Vznik odporového zemného spojenia.....	53
3.3.	Zánik zemného spojenia.....	55
<b>4.</b>	<b>Dvojpólové zemné spojenia.....</b>	<b>58</b>
4.1.	Teoretická analýza dvojpólového zemného spojenia.....	58
4.2.	Priamy kontakt postihnutej fázy so zemou .....	58
4.3.	Nepriamy kontakt postihnutej fázy so zemou.....	60
<b>5.</b>	<b>Metódy skúmania zemných porúch .....</b>	<b>62</b>
5.1.	Metóda symetrických zložiek.....	62
5.2.	Model siete 22 kV v programe MATLAB.....	63
5.3.	Meranie experimentálneho zemného spojenia .....	65
5.3.1.	Meracia súprava .....	66
5.3.2.	Postup merania experimentálnych zemných spojení .....	70
<b>6.</b>	<b>Zemné ochrany – funkcia a nastavenie .....</b>	<b>72</b>
6.1.	Zemné ochrany v kompenzovaných sieťach 22 kV.....	72
6.1.1.	Obvody merania napätia a prúdu .....	73
6.2.	Citlivá zemná smerová ochrana – funkcia a nastavenie.....	73
6.2.1.	Princíp citlivej zemnej smerovej ochrany.....	74
6.2.2.	Nastavenie smerovej charakteristiky.....	74
6.2.3.	Nastavenie napäťového kritéria ochrany .....	75
6.2.4.	Nastavenie prúdového kritéria ochrany.....	75
6.2.5.	Nastavenie časového oneskorenia.....	76
6.3.	Konduktančná ochrana – funkcia a nastavenie .....	76
6.3.1.	Princíp konduktančnej ochrany.....	76
6.3.2.	Nastavenie ochrán typu RYo.....	79

---

6.4.	Volba odporníka .....	79
6.4.1.	Kritérium – spoľahlivosť ochrán .....	79
6.4.2.	Kritérium – spoľahlivosť dodávky elektrickej energie .....	80
6.4.3.	Kritérium – bezpečnosť zariadení distribučného rozvodu a bezpečnosť osôb .....	80
6.5.	Zemné ochrany v sieťach 22 kV s odporovým uzemnením uzla .....	82
6.6.	Zemná smerová ochrana – funkcia a nastavenie .....	82
6.6.1.	Princíp zemnej smerovej ochrany .....	83
6.6.2.	Nastavenie smerovej charakteristiky .....	83
6.6.3.	Nastavenie prúdového kritéria ochrany .....	84
6.6.4.	Nastavenie časového oneskorenia .....	84
6.7.	Zemná nesmerová ochrana – funkcia a nastavenie .....	84
6.7.1.	Nastavenie prúdového kritéria ochrany .....	84
7.	<b>Systémy automatizácie sietí 22 kV .....</b>	<b>85</b>
7.1.	Riešenie poruchových stavov – vzdušné siete .....	85
7.1.1.	Riešenie poruchy – skrat v mieste B .....	86
7.1.2.	Riešenie poruchy – skrat v mieste D .....	86
7.2.	Riešenie poruchových stavov – káblové siete .....	86
7.3.	Inteligentný diaľkovo ovládaný odpínač .....	87
7.3.1.	Účel zariadenia .....	87
7.3.2.	Silová časť .....	87
7.3.3.	Vybavenie ovládacej skrine .....	88
7.3.4.	Elektrické ochrany .....	90
7.3.5.	Diaľkový dohľad .....	90
7.3.6.	Zariadenie z pohľadu dispečerského riadenia .....	90
7.4.	Systém diaľkovej lokalizácie porúch pre káblové siete .....	91
7.4.1.	Účel zariadenia .....	91
7.4.2.	Technický popis zariadenia .....	91
7.4.3.	Ochranné funkcie .....	93
7.4.4.	Diaľkový dohľad .....	93
7.4.5.	Zariadenie z pohľadu dispečerského riadenia .....	94
7.5.	Diaľkovo ovládaná distribučná TS .....	94
7.5.1.	Účel zariadenia .....	94
7.5.2.	Technický popis zariadenia .....	94
7.5.3.	Ochranné funkcie .....	96
7.5.4.	Diaľkový dohľad .....	96
7.5.5.	Zariadenie z pohľadu dispečerského riadenia .....	97

<b>8.</b>	<b>Automatiky ladenia tlmiviek</b> .....	98
8.1.	Zhášacie tlmivky.....	98
8.2.	Napätie neutrálneho bodu transformátora 110/23 kV .....	99
8.2.1.	Prevádzková nesymetria.....	101
8.2.2.	Jednopolové zemné spojenie.....	104
8.3.	Algoritmy ladenia tlmiviek.....	106
8.3.1.	Ladenie na maximum napätia $U_{NE}$ .....	106
8.3.2.	Ladenie na princípe merania fázora napätia $U_{NE}$ .....	106
8.3.3.	Ladenie na princípe vzťahu pre $U_{NE}$ .....	106
<b>9.</b>	<b>Poruchy v prevádzke – rozbor poruchových záznamov</b> .....	109
	<b>Literatúra</b> .....	124

---

---

# 1. KOVOVÉ ZEMNÉ SPOJENIE

Zemné spojenie je poruchový stav, pri ktorom dôjde k spojeniu jednej fázy elektrického systému so zemou. Na rozdiel od medzifázových porúch, napäťovo-prúdové pomery pri zemných poruchách sú zásadne závislé od spôsobu uzemnenia neutrálneho bodu napájacieho transformátora 110/23 kV. V distribučných elektrických sieťach 22 kV sa takmer výlučne používa uzemnenie neutrálneho bodu prostredníctvom zhášacej Petersenovej tlmivky (kompenzované siete) alebo prostredníctvom uzlového odporníka (siete s odporovo uzemneným uzlom). Výnimku tvoria siete s izolovaným neutrálnym bodom, ktoré sa ojedinele vyskytujú v priemyselných sieťach malého rozsahu. Izolovanými sieťami sa táto publikácia nezaobrá.

Kovové zemné spojenie je zemné spojenie, ktorého odpor poruchy je nulový, t. j. postihnutá fáza je v mieste poruchy galvanicky spojená s potenciálom zeme. Pojem kovové zemné spojenie je len teoretický. Zemné spojenia, ktoré sa vyskytujú v prevádzke sa vždy vyznačujú nenulovým odporom poruchy, t. j. fázový vodič je v mieste poruchy spojený s potenciálom zeme prostredníctvom nenulového odporu. Analýza kovového zemného spojenia nám však umožňuje odvodiť vzťahy medzi napätiami a prúdmi v sieti počas zemného spojenia, pričom tieto vzťahy sú následne platné aj v prípade zemného spojenia odporového.

Pri analýze zemných spojení zavádzame určité zjednodušujúce predpoklady, ktoré nemajú zásadný vplyv na výsledky výskumu popisovaných dejov:

- napájacie napätie je symetrické – predpoklad je v reálnych sieťach v zásade splnený,
- záťaž je nulová – tento predpoklad môžeme prijať, keďže záťaž je z pohľadu priečnych admitancií proti zemi symetrická a neovplyvňuje netočivú zložkovú sústavu,
- zanedbávame úbytky napätí pozdĺž vedení a zemnej cesty – predpoklad môžeme zaviesť na základe skutočnosti, že prúdy pri zemných spojeniach dosahujú menovité hodnoty (na rozdiel od porúch medzifázových, kde hodnoty prúdov dosahujú 10-násobky až 100-násobky menovitých hodnôt) a úbytky vznikajúce na pozdĺžnych impedanciách sú zanedbateľné.

Na úvod je potrebné vysvetliť značenie dôležitých potenciálov:

- N – neutral – potenciál neutrálneho bodu transformátora,
- E – earth – potenciál zeme.

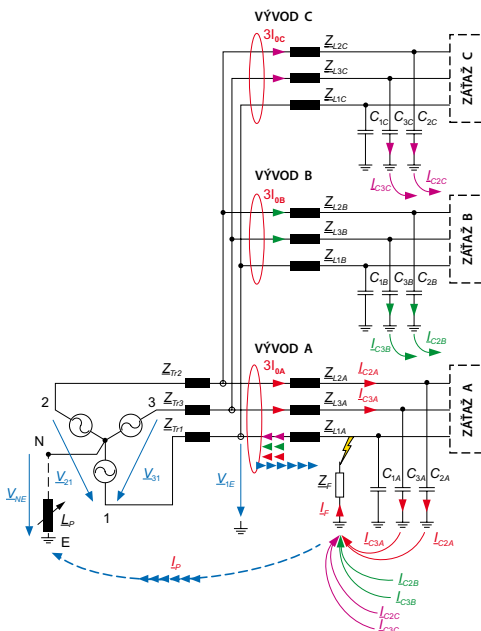
## 1.1. Teoretická analýza – fázové veličiny

Napäťové a prúdové pomery počas ustáleného stavu kovového zemného spojenia sú pre kompenzovanú sieť vysvetlené pomocou schémy na obr. 1.1 a pre sieť s odporovo uzemneným uzlom pomocou schémy na obr. 1.2. Sieť v oboch prípadoch pozostáva zo zdroja – napájací transformátor 110/23 kV a troch vedení napájaných z tohto transformátora. Vedenia B a C predstavujú zdravé vývody. Vedenie A predstavuje vývod postihnutý zemným spojením vo fáze L1, poruchu predstavuje odpor  $Z_F$ . V prípade kovového zemného spojenia  $Z_F = 0$ , v prípade odporového zemného spojenia  $Z_F \neq 0$ .

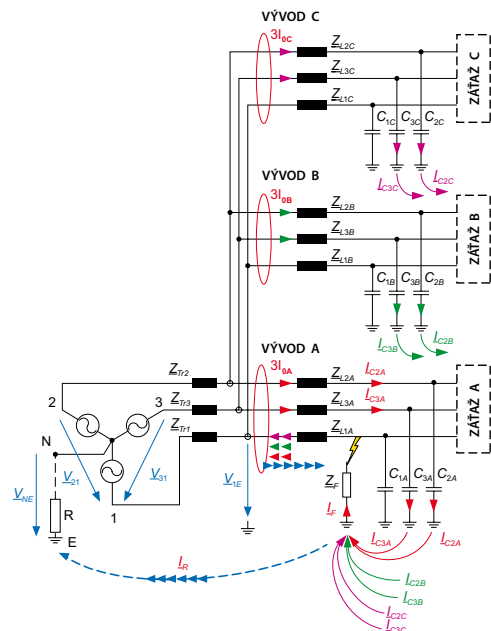
Neutrálny bod transformátora 110/23 kV je v kompenzovanej sieti uzemnený prostredníctvom laditeľnej zhášacej tlmivky, ktorej indukčnosť je možné meniť na základe povelov automatiky ladenia. Pre dosiahnutie spoľahlivého pôsobenia zemných ochrán sa v prípade

trvalého zemného spojenia pripína odporník pre zvyšovanie činnnej zložky zemného prúdu – sekundárny alebo primárny. Sekundárny odporník sa pripína výkonovým stykačom k pomocnému vinutiu tlmivky, primárny odporník sa pripína vypínačom paralelne k hlavnému vinutiu tlmivky.

V sieti s odporovo uzemneným uzlom je neutrálny bod transformátora 110/23 kV trvalo uzemnený prostredníctvom odporníka, ktorého menovitý prúd je 300 A alebo 600 A, v závislosti od kapacitného rozsahu siete.



Obr. 1.1 Schéma kompenzovanej siete 22 kV

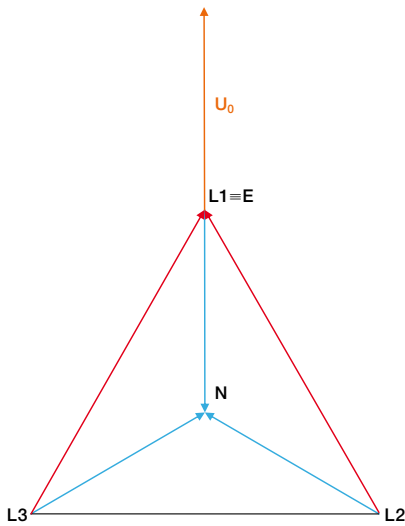


Obr. 1.2 Schéma siete 22 kV s odporovým uzemnením uzla

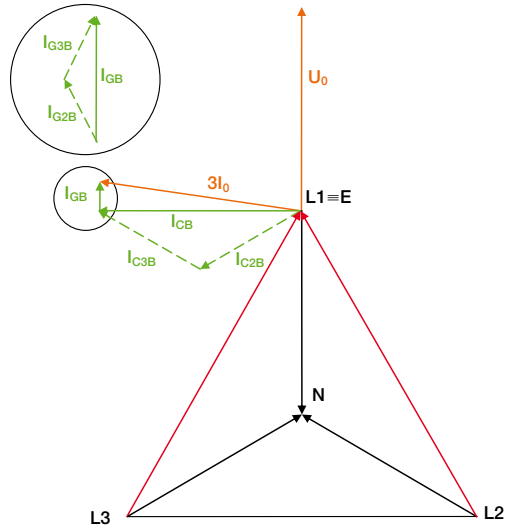
### 1.1.1. Napätie v sieti pri kovovom zemnom spojení

Predpokladáme, že pred poruchou sú napätia v sieti symetrické. Všetky tri fázové napätia proti zemi sú rovnako veľké a navzájom zvierajú uhly  $120^\circ$  (obr. 1.3 – modré). V okamihu vzniku zemného spojenia sa potenciál zeme E, ktorý pred poruchou ležal v neutrálnom bode N presunie tak, že sa stotožní s potenciálom fázy L1. Napätie postihnutej fázy proti zemi klesne na nulovú hodnotu a napätia zdravých fáz vzrastú na úroveň združených napätí (obr. 1.3 – červené). Netočivá zložka napätia  $U_0$ , ktorá mala pred vznikom poruchy nulovú hodnotu vzrástla na úroveň fázového napätia a má opačnú fázu ako napätie fázy L1 pred poruchou.





Obr. 1.3 Fázorový diagram fázových napätí pri zemnom spojení



Obr. 1.4 Fázorový diagram prúdov a napätí – zdravý vývod

### 1.1.2. Tok prúdov zdravým vývodom pri kovovom zemnom spojení

Toky prúdov tak postihnutým vývodom, ako aj zdravým vývodom pri zemnom spojení súvisia so vznikom napätovej nesymetrie v celej sieti. Toky prúdov zdravým vývodom sú odvodené na obr. 1.4. Zdravou fázou L2 tečie kapacitný prúd  $I_{C2B}$ , ktorý je kolmý na napätie fázy L2 proti zemi (L2-E) a konduktančný prúd  $I_{G2B}$ , ktorý je vo fáze s napätím fázy L2 proti zemi. Zdravou fázou L3 tečie kapacitný prúd  $I_{C3B}$ , ktorý je kolmý na napätie fázy L3 proti zemi (L3-E) a konduktančný prúd  $I_{G3B}$ , ktorý je vo fáze s napätím fázy L3 proti zemi. Postihnutou fázou L1 prúd netečie (uvažujeme nezatažený vývod). Súčet oboch kapacitných prúdov zdravého vývodu  $I_{CB}$  je kolmý na napätie  $U_0$  a súčet oboch konduktančných prúdov zdravého vývodu  $I_{GB}$  je vo fáze s napätím  $U_0$ . Zemná ochrana zdravého vývodu nameria v tomto prípade trojnásobok netočiavej zložky napätia  $3U_0$  a prúdu  $3I_0$ , ktorý sa rovná súčtu kapacitného prúdu  $I_{CB}$  a konduktančného prúdu  $I_{GB}$ . Vo všeobecnosti je možné povedať, že ochrana zdravého vývodu počas zemného spojenia meria fázový posun medzi  $3U_0$  a  $3I_0$  mierne menší ako  $90^\circ$ . Merania ukazujú, že tento uhol sa pohybuje v rozsahu  $86^\circ \div 89^\circ$  v závislosti od kvality izolácie siete a veľkosti konduktančného prúdu. Použitím komplexnej vektorovej analýzy je možné závislosť medzi  $3I_0$  a  $3U_0$  vyjadriť takto:

$$3\vec{I}_0 = \vec{U}_0 \cdot (j\omega 3C_B + 3G_B) \quad (1.1)$$

kde  $C_B$  je prevádzková kapacita zdravého vývodu B,

$G_B$  prevádzková konduktancia zdravého vývodu B.

### 1.1.3. Tok prúdov postihnutým vývodom pri kovovom zemnom spojení – kompenzovaná sieť

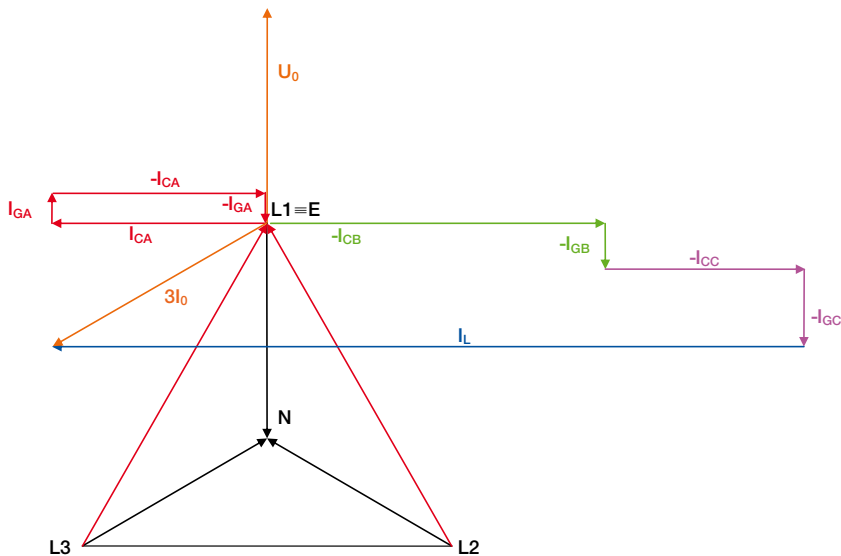
Toky prúdov postihnutým vývodom v kompenzovanej sieti sú odvodené na obr. 1.5. Zdravými fázami L2 a L3 tečie kapacitný prúd  $I_{CA}$  vývodu A a konduktančný prúd  $I_{GA}$  vývodu A, podobne ako pri zdravom vývode. Postihnutou fázou L1 vývodu A tečú späť (so záporným znamienkom) kapacitné prúdy všetkých vývodov  $-I_{CA}$ ,  $-I_{CB}$ ,  $-I_{CC}$ , konduktančné prúdy všetkých vývodov  $-I_{GA}$ ,  $-I_{GB}$ ,  $-I_{GC}$  a prúd kompenzačnej zhášačnej tlmivky  $I_L$ . Ak je tlmivka vyladená, platí:

$$\vec{I}_{CA} + \vec{I}_{CB} + \vec{I}_{CC} = -\vec{I}_L \quad (1.2)$$

V tomto prípade výsledný prúd  $3I_0$  meraný zemnou ochranou sa rovná súčtu kapacitného prúdu postihnutého vývodu  $I_{CA}$ , ktorý je kolmý na napätie  $U_0$ , a konduktančného prúdu celej siete okrem postihnutého vývodu  $I_{GB} + I_{GC}$ , ktorý je v protifáze s napätím  $U_0$ . Vo všeobecnosti je možné povedať, že ochrana postihnutého vývodu počas zemného spojenia meria fázový posun medzi  $3U_0$  a  $3I_0$  mierne väčší ako  $90^\circ$ . Merania ukazujú, že tento uhol sa pohybuje v rozsahu  $91^\circ \div 97^\circ$  v závislosti od kvality izolácie siete a veľkosti konduktančného prúdu. Použitím komplexnej vektorovej analýzy je možné závislosť medzi  $3I_0$  a  $3U_0$  vyjadriť takto:

$$3\vec{I}_0 = \vec{U}_0 \cdot (j\omega 3C_A - 3G_B - 3G_C) \quad (1.3)$$

kde  $C_A$  je prevádzková kapacita postihnutého vývodu,  
 $G_B$  prevádzková konduktancia zdravého vývodu B,  
 $G_C$  prevádzková konduktancia zdravého vývodu C.



Obr. 1.5 Fázorový diagram prúdov a napätí – postihnutý vývod

### 1.1.4. Tok prúdov postihnutým vývodom pri kovovom zemnom spojení – pripnutie odporníka v kompenzovanej sieti

Ak zemné spojenie v kompenzovanej sieti trvá dlhšie ako 1s, automatika pripínania odporníka vyšle povel na zopnutie stýkača sekundárneho odporníka (resp. vypínača primárneho odporníka). V prípade kovového zemného spojenia sa napätové pomery takmer nezmenia. Nezmení sa ani tok prúdov zdravými vývodmi. Pripnutie odporníka spôsobí len zmenu toku prúdu postihnutou fázou L1 postihnutého vývodu A, ktorou začne tiecť prúd vnútený odporníkom  $I_R$ . Situáciu popisuje obr. 1.6. Prúd vnútený odporníkom je v protifáze s napätím  $3U_0$  a jeho veľkosť vyjadruje rovnica 1.4.

$$\vec{I}_R = -\vec{U}_0 \cdot G_R \quad (1.4)$$

kde  $G_R$  je konduktancia odporníka prepočítaná na primárne hodnoty.

Celkový prúd  $3I_0$  meraný ochranou postihnutého vývodu je možné vyjadriť rovnicou:

$$3\vec{I}_0 = \vec{U}_0 \cdot (j\omega 3C_A - 3G_B - 3G_C - G_R) \quad (1.5)$$

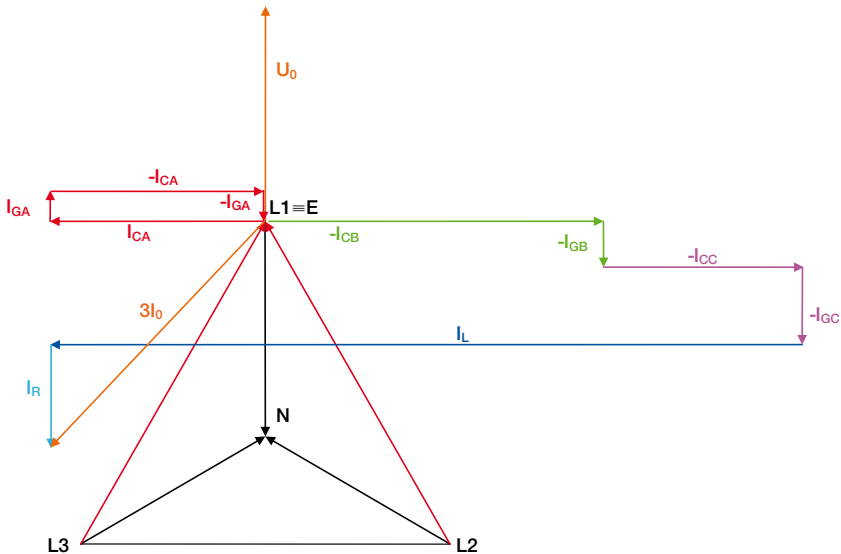
kde  $C_A$  je prevádzková kapacita postihnutého vývodu,

$G_B$  prevádzková konduktancia zdravého vývodu B,

$G_C$  prevádzková konduktancia zdravého vývodu C,

$G_R$  konduktancia odporníka prepočítaná na primárne hodnoty.

Vo všeobecnosti je možné povedať, že ochrana postihnutého vývodu počas zemného spojenia po pripnutí odporníka meria fázový posun medzi  $3U_0$  a  $3I_0$  výrazne väčší ako  $90^\circ$ . Veľkosť tohto uhla závisí na vyladení tlmivky a na veľkosti prúdu vnúteného odporníkom. Z obr. 1.6 je zrejmé, že za určitých okolností môže tento uhol dosiahnuť hodnotu až  $180^\circ$  (zhašacia tlmivka podladená o kapacitný prúd  $I_{CA}$ ).



Obr. 1.6 Fázorový diagram prúdov a napätí – postihnutý vývod + pripnutý odporník

### 1.1.5. Tok prúdu miestom kovového zemného spojenia – kompenzovaná sieť

Tok prúdu miestom zemného spojenia v kompenzovanej sieti je odvodený pomocou obr. 1.7. Miestom zemného spojenia sa vracia kapacitný prúd všetkých vývodov  $-I_{CA}-I_{CB}-I_{CC}$  a konduktančný prúd všetkých vývodov  $-I_{GA}-I_{GB}-I_{GC}$ . Zároveň týmto miestom tečie indukčný prúd tlmivky, ktorý kompenzuje kapacitný prúd celej siete. Ak je zhášacia tlmivka vyladená a je dosiahnutý stav rezonancie, kapacitný prúd siete je rovnako veľký ako indukčný prúd tlmivky. V tomto prípade je prúd tečúci miestom zemného spojenia  $I_F$  minimálny a pozostáva len z konduktančného prúdu siete. Dostávame sa k princípu kompenzácie kapacitného prúdu zhášacou tlmivkou. Minimalizácia prúdu tečúceho miestom zemného spojenia umožňuje uhasenie horiaceho oblúka a dáva predpoklady na úspešnú elimináciu prechodných porúch.

Keď je indukčný prúd tlmivky menší ako vo vyladenom stave, kompenzuje len určitú časť kapacitného prúdu – hovoríme o podkompenzovanom stave. Prúd  $I_{F<}$  pozostáva z nevykompenzovanej časti kapacitného prúdu a konduktančného prúdu celej siete. V tomto prípade je prúd  $I_{F<}$  väčší oproti prúdu  $I_F$ , ktorý tečie miestom zemného spojenia vo vyladenom stave.

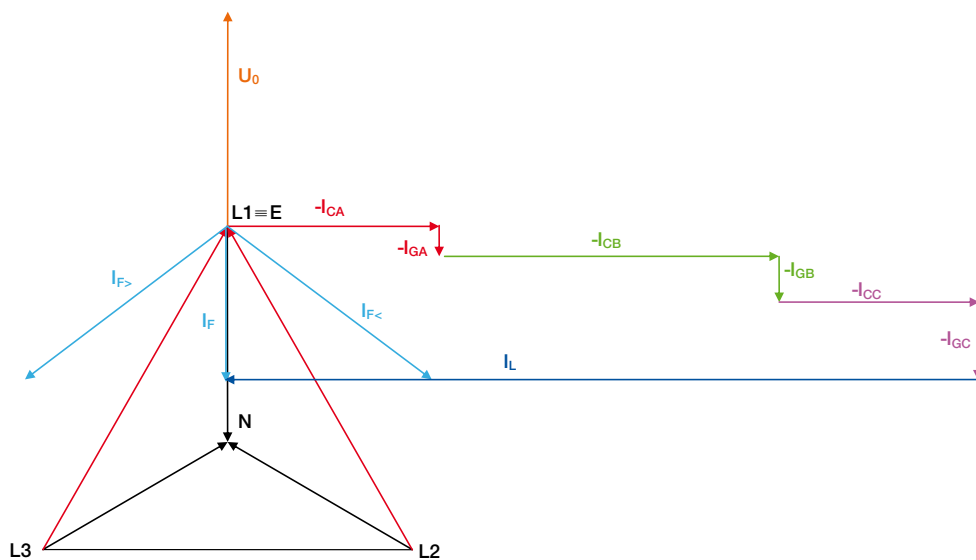
Ak je indukčný prúd tlmivky väčší ako vo vyladenom stave, kompenzuje celý kapacitný prúd siete a zároveň prispieva do prúdu miestom poruchy indukčnou zložkou – hovoríme o prekompenzovanom stave. Prúd  $I_{F>}$  pozostáva zo zložky indukčného prúdu, ktorý presahuje kapacitný prúd siete a konduktančného prúdu celej siete. V tomto prípade je prúd  $I_{F>}$  taktiež väčší oproti prúdu  $I_F$ , ktorý tečie miestom zemného spojenia vo vyladenom stave.

Závislosť veľkosti prúdu tečúceho miestom zemného spojenia od vyladenia zhášacej tlmivky pre parametre siete  $I_C = 50$  A a  $I_G = 3$  A je na obr. 1.8.

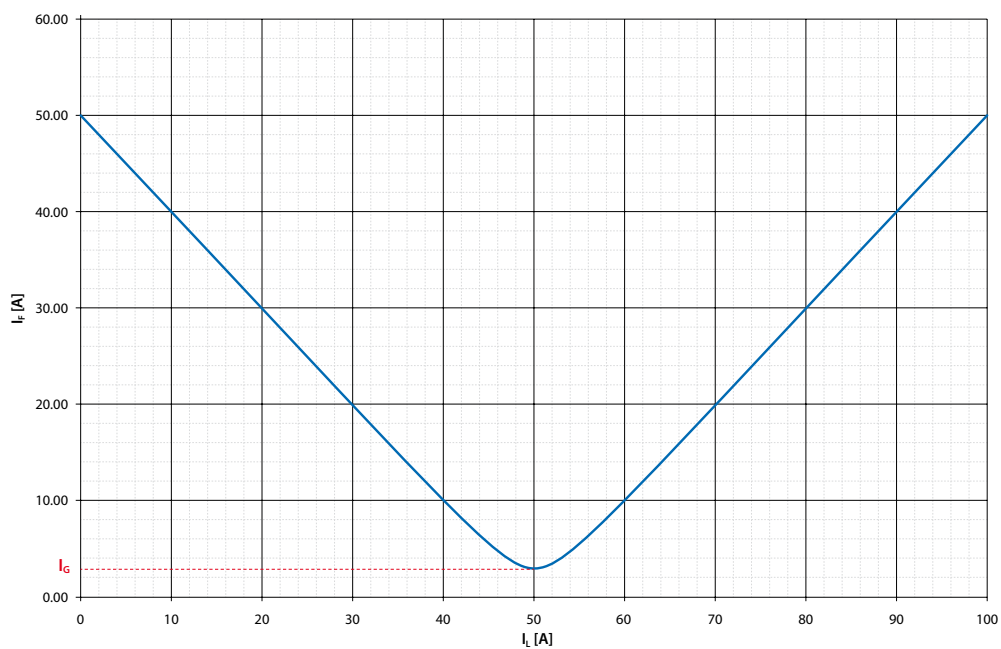
Použitím komplexnej vektorovej analýzy je možné prúd tečúci miestom zemného spojenia vyjadriť vzťahom:

$$\vec{I}_F = \vec{U}_0 \cdot \left[ -3G + j \left( -\omega 3C + \frac{1}{\omega L} \right) \right] \quad (1.6)$$

- kde  $G$  je prevádzková konduktancia siete,  
 $C$  prevádzková kapacita siete,  
 $L$  indukčnosť tlmivky.



Obr. 1.7 Fázorový diagram prúdov a napätí – miesto zemného spojenia



Obr. 1.8 Závislosť prúdu tečúceho miestom zemného spojenia od naladenia tlmivky

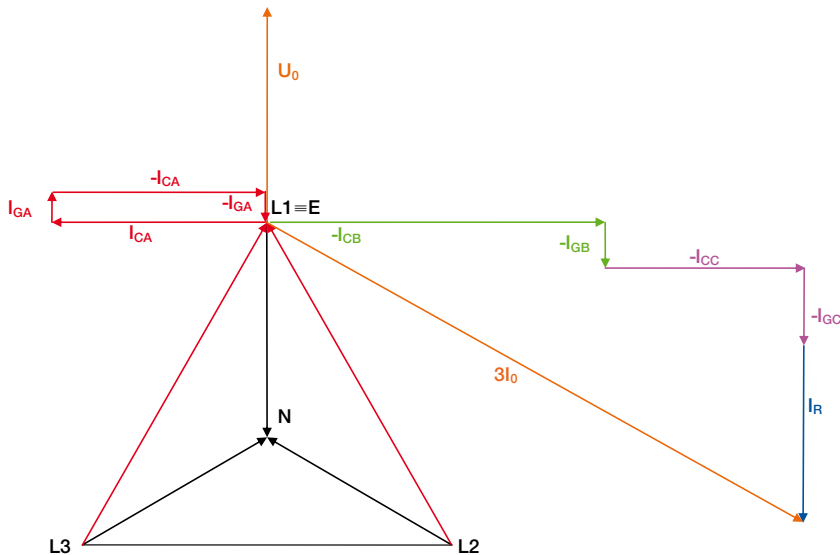
### 1.1.6. Tok prúdov postihnutým vývodom pri kovovom zemnom spojení – sieť s odporovo uzemneným uzlom

Toky prúdov postihnutým vývodom v sieti s odporovo uzemneným uzlom sú odvodené pomocou obr. 1.9. Zdravými fázami L2 a L3 tečú kapacitný prúd  $I_{CA}$  vývodu A a kondukčančný prúd  $I_{GA}$  vývodu A, podobne ako pri zdravom vývode. Postihnutou fázou L1 vývodu A tečú späť (so záporným znamienkom) kapacitné prúdy všetkých vývodov  $-I_{CA}$ ,  $-I_{CB}$ ,  $-I_{CC}$ , kondukčančné prúdy všetkých vývodov  $-I_{GA}$ ,  $-I_{GB}$ ,  $-I_{GC}$  a prúd odporníka  $I_R$ .

Výsledný prúd  $3I_0$  meraný zemnou ochranou sa rovná súčtu kapacitných prúdov zdravých vývodov  $-I_{CB}-I_{CC}$ , ktoré sú kolmé na napätie  $3U_0$ , kondukčančných prúdov zdravých vývodov  $-I_{GB}-I_{GC}$ , ktoré sú v protifáze s napätím  $3U_0$  a prúdu vnúteného odporníkom  $I_R$ . Vo všeobecnosti je možné povedať, že ochrana postihnutého vývodu počas zemného spojenia meria fázový posun medzi  $3U_0$  a  $3I_0$  v rozmedzí  $180^\circ \div 270^\circ$ . Použitím komplexnej vektorovej analýzy je možné závislosť medzi  $3I_0$  a  $3U_0$  vyjadriť takto:

$$3\vec{I}_0 = \vec{U}_0 \cdot (-j\omega 3C_B - j\omega 3C_C - 3G_B - 3G_C - G_R) \quad (1.7)$$

- kde  $C_B$  je prevádzková kapacita zdravého vývodu B,  
 $C_C$  prevádzková kapacita zdravého vývodu C,  
 $G_B$  prevádzková konduktancia zdravého vývodu B,  
 $G_C$  prevádzková konduktancia zdravého vývodu C,  
 $G_R$  konduktancia primárneho odporníka.



Obr. 1.9 Fázorový diagram prúdov a napätí – postihnutý vývod

Kým v kompenzovanej sieti vo vyladenom stave tečie miestom zemnej poruchy len kondukčančný prúd siete (rádovo jednotky A), v sieti s odporovým uzemnením uzla tečie miestom poruchy prúd výrazne vyšší. Tento prúd pozostáva z kondukčančného prúdu siete, kapacitného prúdu siete (rádovo desiatky A) a prúdu vnúteného uzlovým odporníkom (rá-

dovo stovky A). Z tohto dôvodu v kompenzovanej sieti hovoríme o zemnom spojení a v sieti s odporovým uzemnením uzla o zemnom skrate. Kým prevádzka vývodu so zemným spojením je možná až do vyhľadania poruchy, zemný skrat je nutné urýchlene vypnúť.

### 1.1.7. Spôsob uzemnenia uzla siete z pohľadu elektrických ochrán

Porovnaním obr. 1.5 a obr. 1.6 s obr. 1.9 dochádzame k hlavnému rozdielu kompenzovanej siete a siete s odporovým uzemnením uzla z pohľadu elektrických ochrán. V sieti s odporovo uzemneným uzlom sa prúd  $3I_0$  postihnutého a zdravého vývodu z hľadiska veľkosti výrazne líšia, preto je v týchto sieťach možné použiť nesmerové ochrany. V kompenzovanej sieti sa prúd  $3I_0$  postihnutého a zdravého vývodu z hľadiska veľkosti nedajú rozlíšiť, rozdiel je vo vzájomnom uhle medzi  $3I_0$  a  $3U_0$ . Preto je v kompenzovaných sieťach nutné použiť smerové ochranné funkcie.

## 1.2. Teoretická analýza – symetrické zložky

### 1.2.1. Kovové zemné spojenie – kompenzovaná sieť

Uvažujeme jednoduchú schému podobnú schéme na obr. 1.1 so zdrojom 22 kV a dvomi vedeniami. Transformátor 110/23 kV je nahradený symetrickým napäťovým zdrojom pracujúcim do jednej prípojnice. Zemné spojenie je vo fáze L1 na vývode A (postihnuté vedenie). Na rovnakej prípojnici sa nachádza aj vývod B (zdravé vedenie).

V nasledujúcich úvahách neuvažujeme záťaž, lebo táto je symetrická a nemá vplyv na veľkosť zemného prúdu. Keďže zemné spojenie uvažujeme na konci vývodu A je zrejmé, že platí

$$\bar{I}_B = 0 \quad ; \quad \bar{I}_C = 0 \quad (1.8)$$

Pre symetrické zložky pomocou vzťahu 5.4 dostávame

$$\bar{I}_F = \begin{pmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{I}_A \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_A \\ \bar{I}_A \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

Z rovnice 1.9 vyplýva vzťah 1.10, na základe ktorého je možné v mieste zemného spojenia prepojiť jednotlivé symetrické zložkové sústavy tak, ako je znázornené na obr. 1.10. Pri tomto zapojení platí nasledujúca rovnica

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_A \quad (1.10)$$

V náhradnej schéme zložkových sústav na obr. 1.10 sú veličiny na začiatku vedení označené ako bezčiarkové. Tieto veličiny v skutočnosti merajú ochrany vývodov 22 kV. Ochrana postih-

nutého vývodu A meria prúdy s dolným indexom A, ochrana zdravého vývodu B meria prúdy s dolným indexom B. Napätia na prípojnici merajú obe ochrany rovnako. Veličiny čiarkované sa vzťahujú na miesto zemného spojenia. Odvodíme teraz zo schémy jednotlivé veličiny.

Pre napätia na prípojnici merané ochranami platí

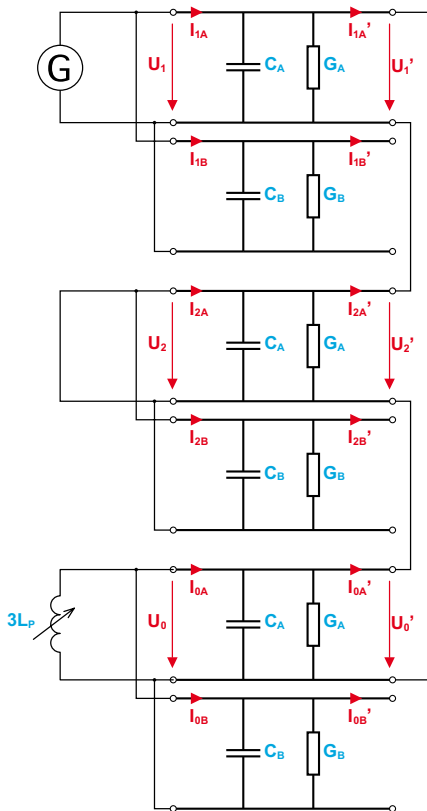
$$\vec{U}_2 = 0 \quad \vec{U}_0 = -\vec{U}_1 \tag{1.11}$$

Pre prúdy merané ochranou postihnutého vývodu platí

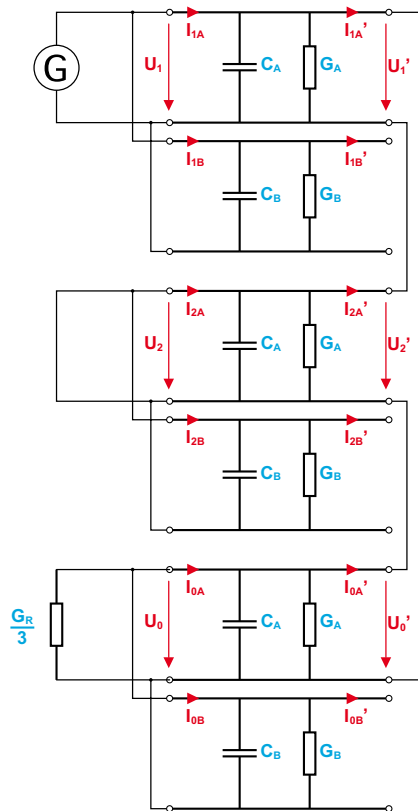
$$\vec{I}_{1A} = \vec{U}_1 \cdot (G_A + j\omega C_A) - \vec{U}_0 \cdot \left( G_A + G_B + j\omega C_A + j\omega C_B - j\frac{1}{\omega 3L_p} \right)$$

$$\vec{I}_{2A} = \vec{U}_1 \cdot (G_A + G_B) \tag{1.12}$$

$$\vec{I}_{0A} = \vec{U}_0 \cdot \left( -G_B - j\omega C_B + j\frac{1}{\omega 3L_p} \right)$$



Obr. 1.10 Prepojenie náhradných schém zložkových sústav pri zemnom spojení



Obr. 1.11 Prepojenie náhradných schém zložkových sústav pri zemnom spojení



Ak uvažujeme kompenzačnú tlmivku vyladenú na súčet kapacitného prúdu oboch vedení, môžeme sústavu rovníc 1.12 zjednodušiť:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{1A} &= \bar{U}_1(G_A + G_B + j\omega C_A) \\ \bar{I}_{2A} &= \bar{U}_1(G_A + G_B) \\ \bar{I}_{0A} &= \bar{U}_0(-G_B + j\omega C_A)\end{aligned}\tag{1.13}$$

Pre prúdy merané ochranou zdravého vývodu platí:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{1B} &= \bar{U}_1(G_B + j\omega C_B) \\ \bar{I}_{2B} &= 0 \\ \bar{I}_{0B} &= \bar{U}_0(G_B + j\omega C_B)\end{aligned}\tag{1.14}$$

V tejto kapitole uvažujeme len jeden postihnutý a jeden zdravý vývod. Pre tri vývody z oboch rovníc pre netočivú zložkovú sústavu v 1.13 a 1.14 dostávame rovnaké výsledky, aké boli odvodené v kapitole 1.1 pomocou fázových veličín.

$$3\bar{I}_{0A} = \bar{U}_0(-3G_B - 3G_C + j\omega 3C_A)\tag{1.15}$$

$$3\bar{I}_{0B} = \bar{U}_0(3G_B + j\omega 3C_B)\tag{1.16}$$

### 1.2.2. Kovové zemné spojenie – sieť s odporovo uzemneným uzlom

Uvažujeme jednoduchú schému podobnú schéme na obr. 1.2 so zdrojom 22 kV a dvomi vedeniami. Rovnako ako v predošlom prípade je možné súslednú, spätnú a netočivú zložkovú sústavu prepojiť v mieste poruchy podľa obr. 1.11.

Pre napätia na prípojnici merané ochranami platí

$$\bar{U}_2 = 0 \quad \bar{U}_0 = -\bar{U}_1\tag{1.17}$$

Pre prúdy merané ochranou postihnutého vývodu platí

$$\begin{aligned}\bar{I}_{1A} &= \bar{U}_1(G_A + j\omega C_A) - \bar{U}_0\left(G_A + G_B + j\omega C_A + j\omega C_B + \frac{G_R}{3}\right) \\ \bar{I}_{2A} &= \bar{U}_1\left(G_A + G_B + j\omega C_A + j\omega C_B + \frac{G_R}{3}\right) \\ \bar{I}_{0A} &= \bar{U}_0\left(-G_B - j\omega C_B - \frac{G_R}{3}\right)\end{aligned}\tag{1.18}$$

Pre prúdy merané ochranou zdravého vývodu platí

$$\begin{aligned} \vec{I}_{1B} &= \vec{U}_1 \cdot (G_B + j\omega C_B) \\ \vec{I}_{2B} &= 0 \end{aligned} \tag{1.19}$$

$$\vec{I}_{0B} = \vec{U}_0 \cdot (G_B + j\omega C_B)$$

V tejto kapitole uvažujeme len jeden postihnutý a jeden zdravý vývod. Pre tri vývody z oboch rovníc pre netočivú zložkovú sústavu v 1.18 a 1.19 dostávame rovnaké výsledky, aké boli odvodené v kapitole 1.1 pomocou fázových veličín.

$$3\vec{I}_{0A} = \vec{U}_0 \cdot (-3G_B - 3G_C - j\omega 3C_B - j\omega 3C_C - G_R) \tag{1.20}$$

$$3\vec{I}_{0B} = \vec{U}_0 \cdot (3G_B + j\omega 3C_B) \tag{1.21}$$

### 1.3. Simulácia kovového zemného spojenia

Účelom simulácie kovového zemného spojenia je overiť teoretické predpoklady odvodené v kapitole 1.1. Model kompenzovanej siete 22 kV bol vytvorený v programe MATLAB. Podrobný popis modelu je uvedený v kapitole 5.2. Uvažujeme sieť s jedným postihnutým vývodom a dvomi vývodmi zdravými. Každé z vedení má kapacitný prúd 50 A. V neutrálnom bode transformátora 110/23 kV je zapojená zhášacia tlmivka, ktorá je naladená na kapacitný prúd siete 150 A.

Vstupné parametre simulácie boli takéto:

$L_{\text{SOURCE}}$	$= 1 \cdot 10^{-4} \text{ F}$	$R$	$= 0,1 \ \Omega$
$R_{\text{SOURCE}}$	$= 3 \cdot 10^{-3} \ \Omega$	$L$	$= 1 \cdot 10^{-1} \text{ H}$
$L_{\text{COMP}}$	$= 0,2822 \text{ H}$	$C$	$= 4 \cdot 10^{-6} \text{ F}$
$R_X$	$= 1 \cdot 10^{-3} \ \Omega$	$G_R$	$= 4000 \ \Omega$

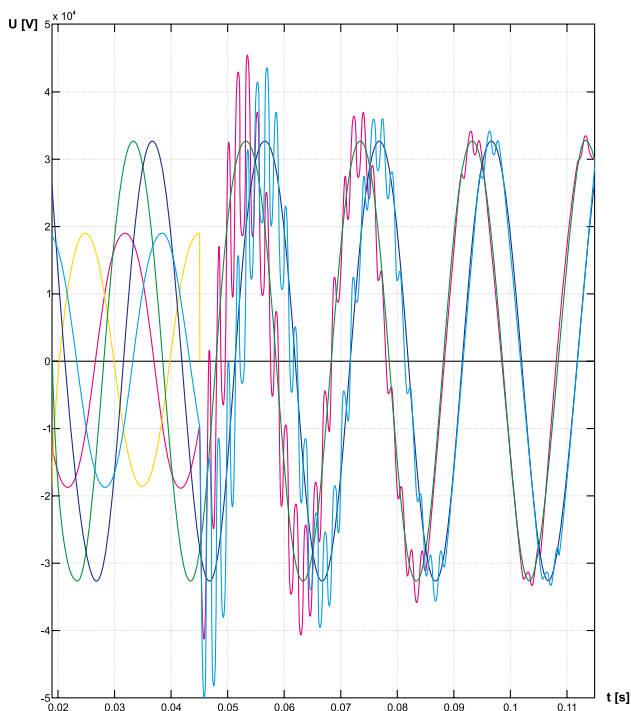
Celková dĺžka simulácie je 800 ms. Zemné spojenie vznikne v čase napätového maxima fázy L1 v čase 45 ms. Odporník pre zvyšovanie činnnej zložky zemného prúdu je pripnutý v čase 300 ms až 500 ms. Zemné spojenie sa odpína (zaniká) v čase 600 ms. Pre názornejšie zobrazenie prechodných dejov sú ohmické odpory parametrov modelovej siete nižšie ako v reálnej sieti. V reálnej sieti sú prechodné javy tlmené intenzívnejšie a trvajú kratšie ako je uvedené vo výsledkoch simulácie.

Výsledky simulácie sú zobrazené na obr. 1.12 – 1.17. Priebehy jednotlivých veličín sú farebne rozlíšené takto: L1 – červená farba, L2 – modrá farba, L3 – zelená farba, netočivá zložka – fialová farba.

Model umožňuje vypočítať fázory jednotlivých veličín a následne zobrazit v komplexnej rovine (obr. 1.18). Z obrázka je zrejмый pohyb koncového bodu fázora napätia  $3U_0$  (červená), prúdu  $3I_0$  postihnutého vývodu (zelená) a prúdu  $3I_0$  zdravého vývodu (žltá). V okamihu vzniku zemného spojenia vzrastie napätie  $3U_0$  na úroveň 3-násobku fázového napätia. Pri kovovom zemnom spojení sa veľkosť napätia  $3U_0$  vplyvom pripnutia odporníka pre zvyšovanie činnnej zložky poruchového prúdu nezmení. Prúd  $3I_0$  zdravého vývodu je zložený z kapacitného prúdu (kolmý na  $3U_0$ ) a konduktančného prúdu (vo fáze s  $3U_0$ ). Prúd  $3I_0$  postihnutého vývodu je zložený z kapacitného prúdu (kolmý na  $3U_0$ ) a konduktančného prúdu (v protifáze s  $3U_0$ ).

Taktiež je na obrázku znázornený pohyb koncového bodu fázora prúdu  $3I_0$  postihnutého vedenia v okamihu pripnutia odporníka pre zvýšenie činnnej netočivej zložky prúdu. Pripnutím odporníka sa zmení len prúd  $3I_0$  postihnutého vývodu. Prúd  $3I_0$  zdravého vývodu sa nemení.

Výsledky simulácie potvrdzujú teoretické predpoklady uvedené v kapitole 1.1.



Obr. 1.12 Časový priebeh okamžitých hodnôt fázových napätí