

Ing. Tomáš Škumát

Autoreferát dizertačnej práce

**VYBRANÉ PRECHODNÉ A PORUCHOVÉ DEJE VO VN DISTRIBUČNEJ SIETI SO
ZAMERANÍM SA NA PORUCHU SPÔSOBENÚ PRERUŠENÍM FÁZY**

**na získanie akademického titulu
doktor (philosophiae doctor, PhD.)**

v doktorandskom študijnom programe: Elektroenergetika

v študijnom odbore: Elektrotechnika

Miesto a dátum: Bratislava, máj 2022

Ing. Tomáš Škumát

Autoreferát dizertačnej práce

**VYBRANÉ PRECHODNÉ A PORUCHOVÉ DEJE VO VN DISTRIBUČNEJ SIETI SO
ZAMERANÍM SA NA PORUCHU SPÔSOBENÚ PRERUŠENÍM FÁZY**

**na získanie akademického titulu
doktor (philosophiae doctor, PhD.)**

v doktorandskom študijnom programe: Elektroenergetika

v študijnom odbore: Elektrotechnika

Miesto a dátum: Bratislava, máj 2022

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia

Na Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Predkladateľ **Ing. Tomáš Škumát**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ **doc. Ing. Žaneta Eleschová, Ph.D.**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti **doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.**
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
Ústav elektroenergetiky
Technická 3082/12, Královo Pole, 61600, Brno, Česká republika

prof. Ing. Juraj Altus, Ph.D.
Elektrotechnická fakulta – KVES
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný:.....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:o.....hod

Na Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3, miestnosť: C-417

.....
prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan fakulty

Obsah

Úvod	6
Ciele práce	7
Tézy dizertačnej práce	7
1 Teoretická analýza vybraných poruchových dejov	8
1.1 Prerušenie 1 fázy	8
1.1.1 Prerušenie fázy v kombinácii so zemnou poruchou	10
2 Metódy pre identifikáciu a lokalizáciu porúch s prerušenou fázou – súčasný stav problematiky	13
2.1 Pomerné zemné relé	13
2.2 Metóda napät'ovej nesymetrie	13
2.3 Pomer I_2/I_1	14
3 Simulácie vybraných VN porúch s prerušením fázy	14
3.1 Model pre analýzu vplyvu záťaže a R_P na napät'ové a prúdové pomery vo VN sieti s poruchou typu prerušená fáza	14
3.2 Zhrnutie simulovaných výsledkov pre jednotlivé typy porúch	15
3.3 Vplyv rozptýlenej výroby na VN napät'ové pomery pri poruche s prerušenou fázou	19
4 Prínosy dizertačnej práce pre prax	20
4.1 Odporúčania z hľadiska prevádzky a chránenia VN distribučnej siete	20
4.1.1 Prevádzka naladenia tlmivky	20
4.1.2 Dopad VN porúch s prerušením fázy na paralelnú prevádzku DTr z rôznych úsekov vedení	21
4.1.3 Zmena filozofie merania napätia na regulátore zhášacej tlmivky	21
4.1.4 Využitie pripnutia odporníka – zatlmenie prepätia v kombinácii so zmenou ladenia	21
4.1.5 Využitie wattmetrickej metódy k určeniu vývodu s prerušenou fázou	22
4.1.6 Využitie pomerov zložkových prúdov I_2/I_1 a I_2/I_0	22
4.1.7 Využitie zmeny absolútnej hodnoty VN U_{Zdr} a pomeru ich U_2/U_1 za poruchou	23
4.1.8 Využitie pomeru zložiek U_2/U_1 a U_2/U_0 z VN U_f za miestom poruchy	23
4.1.9 Využitie pomeru zložiek U_2/U_0 z VN U_f ako kritérium rozlíšenia porúch	23
4.1.10 Doplnenie ochrán ANSI 59Q (Negative Sequence Overvoltage) alebo ANSI 51Q (Negative Sequence Time Overcurrent)	24
4.1.11 Pomerná prúdová nesymetria – nevhodné kritérium	24
4.1.12 Vplyv rozptýlenej výroby	25
4.1.13 Hrubý a jemný spôsob lokalizácie úseku s poruchou	25
4.1.14 Záverečné doplnenia	26
4.2 Odporúčania pre ďalšiu prácu	28
Záver	28

Použitá literatúra.....	29
Publikácie autora	31
Publikácie autora k téme dizertačnej práce	31

Zoznam veličín a symbolov

U_f	Fázové napätie	[V]
U_{Zdr}	Združené napätie	[V]
a, a^2	Komplexné čísla – operátory natočenia	[-]
I_A, I_B, I_C	Prúdy prerušenými, resp. neprerušenými fázami	[A]
U_A, U_B, U_C	Fázové napätia A, B, C	[V]
$\Delta U_A, \Delta U_B, \Delta U_C$	Úbytok napätia na fázach v mieste rozpojenia	[V]
U_1, U_2, U_0	Napätia jednotlivých zložkových sústav	[V]
$\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_0$	Úbytky napätí jednotlivých zložkových sústav	[V]
U_1^*, U_2^*, U_0^*	Napätia zložkových sústav za miestom prerušenia	[V]
I_1, I_2, I_0	Prúdy jednotlivých zložkových sústav	[A]
I_0'	Prúd jedнопólovej priečnej poruchy pri viacnásobne poruche	[A]
I_1^*, I_2^*, I_0^*	Prúdy zložkových sústav za miestom prerušenia	[A]
Z_1, Z_2, Z_0	Impedancie jednotlivých zložkových sústav	[Ω]
Z_1^*	Impedancia súslednej zložkovej sústavy za prerušením	[Ω]
R_p	Odpor v mieste poruchy	[Ω]
p_0, p_1, p_2	Prevody ideálnych transformátorov zložkových sústav	[-]
m	koeficient vyjadrujúci miesto poruchy na vedení z celkovej dĺžky	[-]
E	Vnútorne napätie zdroja súslednej zložky	[V]
E_A, E_B, E_C	Vnútorne napätie zdroja vo fázach, A, B, C	[V]
U_N	Napätie uzla transformátora	[V]
Z_N	Impedancia v uzle transformátora	[Ω]
Z_T	Impedancia transformátora	[Ω]
Z_V	Impedancia vedenia	[Ω]
Z_{Zat}	Impedancia záťaže	[Ω]
$Z_{T,1}, Z_{T,2}, Z_{T,0}$	Zložkové impedancie transformátora	[Ω]
$Z_{V,1}, Z_{V,2}, Z_{V,0}$	Pozdĺžne zložkové impedancie vedenia	[Ω]
$Z_{C,1}, Z_{C,2}, Z_{C,0}$	Priečne zložkové impedancie vedenia	[Ω]
$Z_{Zat,1}, Z_{Zat,2}, Z_{Zat,0}$	Zložkové impedancie záťaže	[Ω]
I_C	Kapacitný prúd siete voči zemi	[A]
I_W	Zvodový (činný) prúd siete	[A]
I_L	Induktívny prúd zhášacej tlmivky	[A]
R_A, R_B, R_C	Odpory záťaže	[Ω]
S''_K	Skratový výkon	[MVA]
S_N	Nominálny zdranlivý výkon	[MVA]
I_{MAX}	Maximálna efektívna hodnota prúdu meraná teletmetriou	[A]
I_{MIN}	Minimálna efektívna hodnota prúdu meraná teletmetriou	[A]

Úvod

Úlohou, cieľom a snahou každého prevádzkovateľa distribučnej sústavy (PDS) je mať spoľahlivú a neprerušovanú distribúciu elektrickej energie. Prerušená z titulu porúch nie je samozrejme možné v technickej praxi úplne vylúčiť. Sústavný tlak je cítiť v oblasti znižovania hodnôt ukazovateľov plynulosti distribúcie – SAIDI a SAIFI. Významne boli taktiež skrátené časy na riešenie porúch z legislatívneho pohľadu – regulátor (ÚRSO).

Z prevádzky uzla N na transformátore VVN/VN vyplýva rôznorodosť porúch v porovnaní s inými sieťami. Väčšina VN distribučných sietí je neúčinne uzemnená buď cez zhášaciu Petersenovu tlmivku alebo cez odporník – rezonančné a nízko impedančné uzemnenie uzla N. Ďalším dôvodom prečo dochádza k špecifickým poruchám je radiálne prevádzkovanie siete. Analýza sa nezaobrá izolovanými VN sieťami – podmienkach SR sa tento spôsob nevyužíva na úrovni regionálneho PDS.

Zhrnuté sú jednotlivé typy základných porúch s prerušením fázy, ktoré sa v praxi bežne vyskytujú, pričom sú zároveň aj teoreticky analyzované. Ide teda o poruchy s mechanickým prerušením prúdovej dráhy živej časti (fázového vodiča), kde je zároveň poukázané na možnú nebezpečnosť pri prevádzkovaní sústavy s touto poruchou. Popísaný je zároveň súčasný stav chránenia, detekcie a následného riešenia jednotlivých typov porúch.

Veľký dôraz je kladený na porovnanie 2 základných prevádzkových stavov naladenia zhášacej tlmivky – podladený a preladený, pričom siete prevádzkované so zhášacou tlmivkou v Západoslovenskej distribučnej, a. s. sú prevádzkované ako mierne podladené (o 5 A). V reálnej prevádzke boli pri poruchách s prerušením fázy zaznamenané prepätia nad úrovňou nominálneho U_{Zdr} VN siete 22 kV – dôležité je poznamenať, že celá príslušná sústava nadobudla kvazistacionárny stav s prepätím nad touto nominálnou hodnotou, a teda nešlo iba o prechodný dej (zákmit). Toto je hlavným dôvodom skúmania dopadu porúch s prerušením fázy na pomery vo VN distribučnej sieti – napäťové aj prúdové, s rezonančným spôsobom uzemnenia uzla N. V sieťach s uzlom N uzemneným cez nízku impedanciu (odporník) neboli analogické prepätia zaznamenaná – odporník nedovolí sieti nadobudnúť taký stav – hlbšie vysvetlené v teoretickej časti práce.

Simulované sú rôzne scenáre jednotlivých typov porúch, ku ktorým najčastejšie dochádza v praxi. Skúmaný je vplyv záťaže za miestom poruchy, resp. vplyv odporu v mieste poruchy. Prínos dizertačnej práce by mal spočívať v zlepšení v oblastiach chránenia, správnej detekcie a lokalizácie porúch s prerušením fázy. Zároveň by mala zlepšiť metodiku postupovania dispečerskej obsluhy pri riešení daných porúch.

Ciele práce

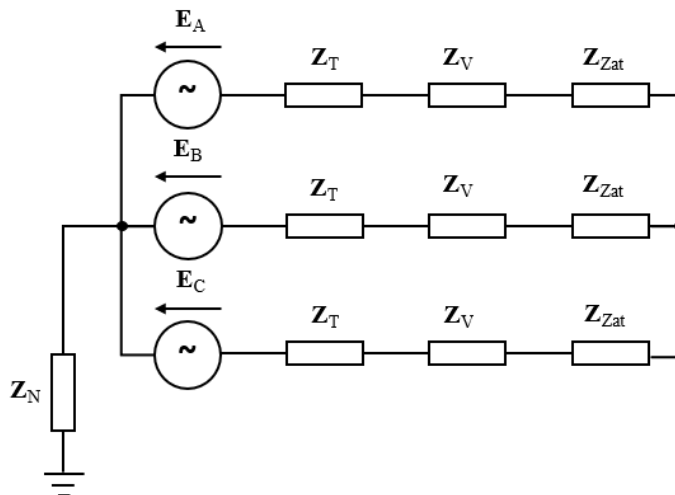
Cieľom práce je spracovať teoretický rozbor porúch s prerušením fázového vodiča v neúčinne uzemnenej distribučnej VN sieti. Z hľadiska praxe ide o tri typy porúch – prerušenie fázy bez spojenia so zemou (základný typ poruchy), prerušenie fázy a súčasné spojenie so zemou, kde navyše rozlišujeme, či je galvanické spojenie so zemou smerom k rozvodni alebo smerom k záťaži – v oboch prípadoch ide o kombinovaný typ poruchy (prerušená fáza a jednofázové spojenie so zemou). Ďalej vytvoriť model VN distribučnej siete a simulovať ňom spomenuté vybrané poruchy s prerušením fázového vodiča. Nakoľko do dvoch typov porúch vstupuje odpor poruchy, tak bude skúmaný aj jeho vplyv na napäťové a prúdové pomery, nakoľko je pre reálnu prax tento poznatok dôležitý. Vzhľadom na to, že sú poruchy s prerušením fázy ovplyvňované záťažou, tak je analyzovaný aj jej vplyv, pričom je skúmaný aj vplyv nesymetrie záťaže. Okrem vplyvu záťaže je cieľom analyzovať v rámci simulácií aj vplyv rozptýlenej výroby na poruchu s prerušením fázy s ohľadom na prúdové a napäťové pomery. Mojm osobným cieľom je zistiť, či existuje také kritérium, pomocou ktorého je možné rozlíšiť niektoré z najčastejších typov porúch s prerušením fázy. V záujme potvrdenia poznatkov z teórie a simulácií vykonať merania v reálnej VN distribučnej sústave. Na margo zistení zo simulácií a meraní, resp. priebehov z reálnych VN porúch, navrhnúť opatrenia z pohľadu prevádzkovania a chránenia VN distribučných sietí pri poruche spôsobenej prerušením fázy. Vzhľadom na spomenuté ciele práce sú definované nasledujúce tézy dizertačnej práce.

Tézy dizertačnej práce

1. Teoretický rozbor vybraných prechodných a poruchových dejov vo VN sieti so zameraním sa na poruchu spôsobenú prerušením fázy.
2. Analýza vplyvu nesymetrie VN siete a rozptýlenej výroby na priebeh poruchy spôsobenej prerušením fázy vo VN sieti.
3. Modelovanie VN sietí a simulácie vybraných prechodných a poruchových stavov so zameraním sa na poruchu spôsobenú prerušením fázy.
4. Návrh opatrení v oblasti chránenia VN sietí pri poruche spôsobenej prerušením fázy.

1 Teoretická analýza vybraných poruchových dejov

Majme všeobecný model sústavy s neúčinne uzemneným uzlom transformátora na obr. 1. Zatiaľ je nešpecifikované zariadenie pripojené medzi uzol sústavy N a zem. Uvažujeme trojfázovú symetrickú sústavu. Z tohto modelu vychádza zapojenie najčastejších typov porúch s prerušením fázy v náhradnej zložkovej sústave. Sú uvedené v ďalšom texte.

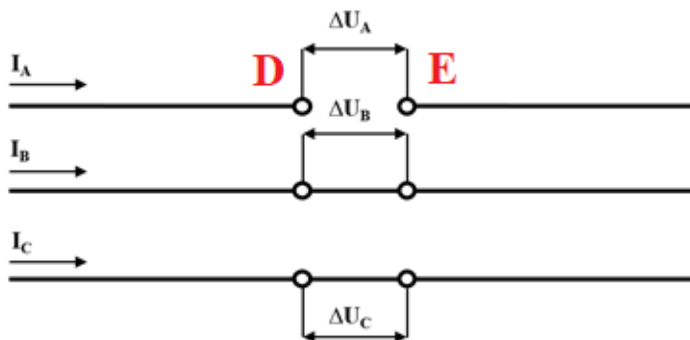


Obr. 1 Všeobecný model sústavy s neúčinne uzemneným uzlom transformátora

1.1 Prerušenie 1 fázy

Tento typ poruchy môžeme chápať ako zapojenie nesymetrického článku v mieste poruchy, charakterizovaného úbytkami napätí v jednotlivých fázach. Uvažujme prerušenie vo fáze A medzi bodmi D a E. Na základe obr. 2 môžeme napísať charakteristické rovnice 1.1 [9]:

$$\bar{I}_A = 0 \text{ [A]}; \quad \Delta \bar{U}_B = 0 \text{ [V]}; \quad \Delta \bar{U}_C = 0 \text{ [V]} \quad (1.1)$$



Obr. 2 Zjednodušené schematické znázornenie prerušenia 1 fázy

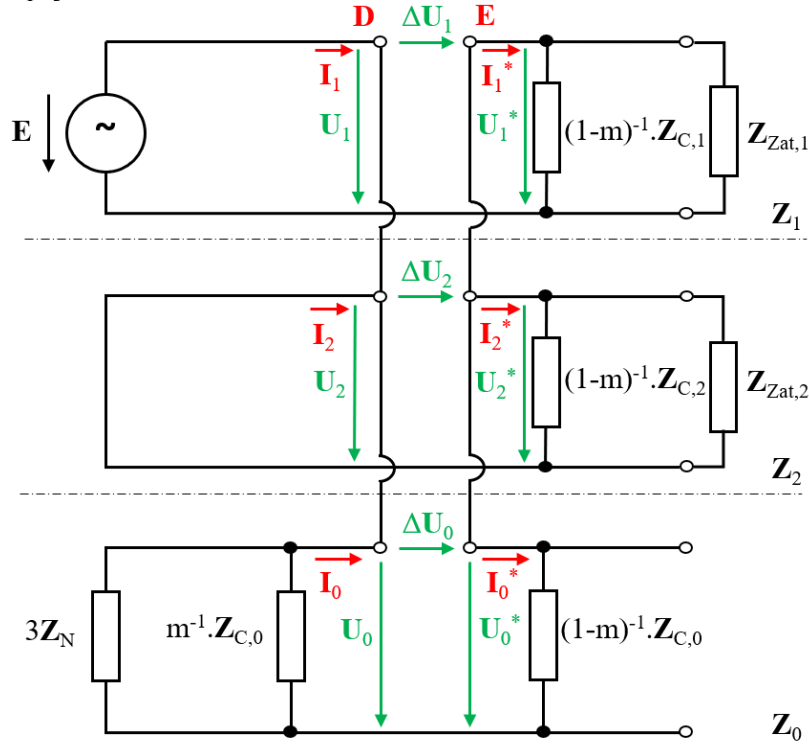
Uvažujme model všeobecnej siete s neúčinne uzemneným uzlom transformátora N z obr. 1 s prerušením vo fáze A. Ďalej uvažujme určité zjednodušenia – pozdĺžne impedancie Z_T a $Z_V \ll$ ako priečna impedancia vedenia Z_C . Tým pádom môžeme zanedbať $Z_{T,1}, Z_{T,2}, Z_{T,0}, Z_{V,1}, Z_{V,2}, Z_{V,0}$, a rovnako aj $Z_{C,1}, Z_{C,2}$. Analogické zjednodušenia sa realizujú aj pri jedнопólovej zemnej poruche, pričom majú zanedbateľný vplyv na analytický výpočet. Obvod je v Z_0 na strane záťaže galvanicky rozpojený. Vyplýva to zo zapojenia záťaže v reálnych VN distribučných sieťach z pohľadu primárnej strany – izolovaná Y alebo D. Zapojenie zložkových sústav je na obr. 3 – prerušenie uvažujeme v ľubovoľnom mieste pozdĺž vedenia, ktoré je pomerne vyjadrené koeficientom „m“, kde $m = 1$ je celé vedenie (porucha na konci) a $m = 0$ je porucha na začiatku vedenia. Priečnu impedanciu Z_C nie je možné zanedbať na strane za bodom E (za prerušením), nakoľko všeobecne neplatí, že $Z_{Zat} \gg Z_C$. Záťaž

uvažujeme sústredenú na konci vedenia. Úbytky napätí dostaneme dosadením výstupov z charakteristických rovníc 1.2 do matice zložkových napätí:

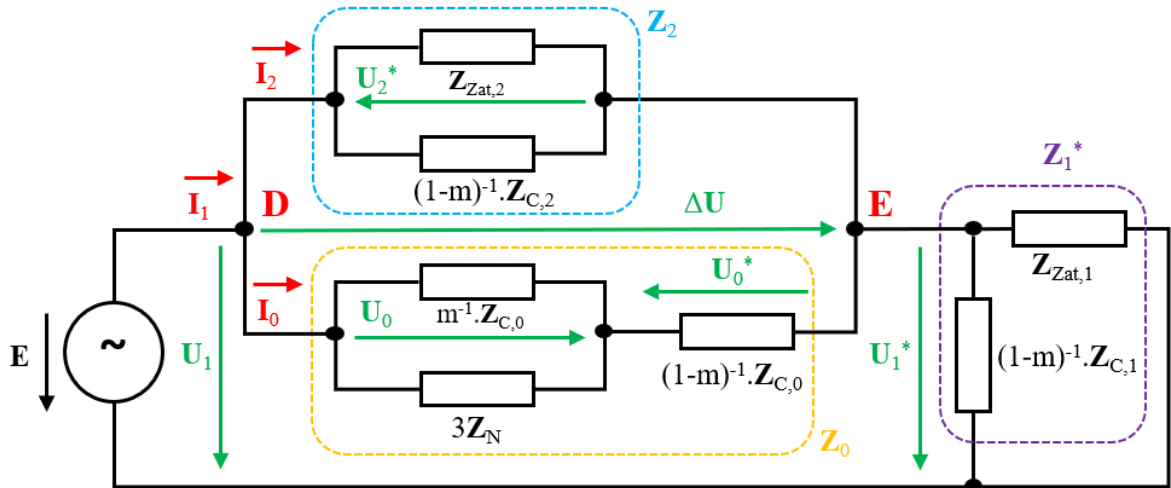
$$\begin{bmatrix} \Delta\bar{U}_1 \\ \Delta\bar{U}_2 \\ \Delta\bar{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\bar{U}_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\bar{U}_A \\ \Delta\bar{U}_A \\ \Delta\bar{U}_A \end{bmatrix} \quad [\text{V}] \quad (1.2)$$

$$\Delta\bar{U}_1 = \Delta\bar{U}_2 = \Delta\bar{U}_0 = \Delta\bar{U} = \frac{1}{3} \cdot \Delta\bar{U}_A \quad [\text{V}] \quad (1.3)$$

Z čoho vyplýva zapojenie na obr. 3 a obr. 4:



Obr. 3 Náhradná schéma zložkových sústav pre prípad prerušenia jednej fázy



Obr. 4 Zjednodušená náhradná schéma zložkových sústav pri prerušení 1 fázy

Pre zložkové prúdy v bodoch D a E platí I. Kirchoffov zákon podľa 1.4:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \quad [\text{A}]; \quad \bar{I}_1^* = \bar{I}_2^* + \bar{I}_0^* \quad [\text{A}] \quad (1.4)$$

Pre úbytky napätia $\Delta\bar{U}$ platia 1.5 a 1.6:

$$\Delta\bar{U} = -\bar{I}_2 \cdot \bar{Z}_2 \quad [\text{V}] \quad (1.5)$$

$$\Delta\bar{U} = -\bar{I}_0 \cdot \bar{Z}_0 \quad [\text{V}] \quad (1.6)$$

Z 1.5 a 1.6 vyplýva pomer 1.7:

$$\frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_0} = \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_2} \quad [-] \quad (1.7)$$

Z II. Kirchhoffovho zákona pre obvod na obr. 4 platia 1.8 a 1.9:

$$\bar{E} = \bar{U}_1 = \Delta\bar{U} + \bar{U}_1^* \quad [\text{V}] \quad (1.8)$$

$$\bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_1^* + \Delta\bar{U} - \bar{E} = 0 \quad [\text{V}] \quad (1.9)$$

Pre zložkový prúd I_1 platí 1.10:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1^* + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}} \quad [\text{A}] \quad (1.10)$$

Pre zložkový prúd I_2 platí 1.11:

$$\bar{I}_2 = \frac{-\Delta\bar{U}}{\bar{Z}_2} = \frac{\bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_1^* - \bar{E}}{\bar{Z}_2} \quad [\text{A}] \quad (1.11)$$

Pre zložkový prúd I_0 platí 1.12:

$$\bar{I}_0 = \frac{-\Delta\bar{U}}{\bar{Z}_0} = \frac{\bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_1^* - \bar{E}}{\bar{Z}_0} \quad [\text{A}] \quad (1.12)$$

Vyjadrením úbytku napätia ΔU z 1.9 a dosadením 1.10 do tohto vyjadrenia za I_1 dostaneme po úprave:

$$\Delta\bar{U} = \bar{E} \cdot \left(1 - \frac{\bar{Z}_1^*}{\bar{Z}_1^* + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}} \right) \quad [\text{V}] \quad (1.13)$$

Je zaujímavé sa pozrieť na extrémny výrazu 1.13, a síce:

- Keď je zložený zlomok v zátvorke rovný 0, vtedy pre ΔU platí:

$$\Delta\bar{U} = \bar{E} \quad [\text{V}] \quad (1.14)$$

- Keď je zložený zlomok v zátvorke rovný 1, vtedy pre ΔU platí:

$$\Delta\bar{U} = 0 \quad [\text{V}] \quad (1.15)$$

Teoreticky môže výraz 1.13 v absolútnej hodnote dosiahnuť aj veľkosť rovnú násobkom napätia E – v situácii, keď sa menovateľ zlomku v limite blíži k nule.

Označme zlomok v zátvorke 1.13 ako Z , a vyjadrime pomocou 1.13 ΔU_A , ΔU_B a ΔU_C :

$$\begin{bmatrix} \Delta\bar{U}_A \\ \Delta\bar{U}_B \\ \Delta\bar{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E} \cdot (1 - Z) \\ \bar{E} \cdot (1 - Z) \\ \bar{E} \cdot (1 - Z) \end{bmatrix} \quad [\text{V}] \quad (1.16)$$

Dostaneme:

$$\Delta\bar{U}_A = 3\bar{E} \cdot (1 - Z) \quad [\text{V}]; \quad \Delta\bar{U}_B = \Delta\bar{U}_C = 0 \quad [\text{V}] \quad (1.17)$$

Koeficient m (miesto poruchy) ovplyvňuje:

- Zložkové prúdy I_2 , I_0 , a tým pádom aj I_1 .
- Úbytok napätia $\Delta U - U_2^*$, U_0 , U_0^* , a samozrejme aj U_1^* .
- Ak by sme v obvode neuvažovali zjednodušenia, tak je samozrejme koeficientom m ovplyvňovaná aj U_1 .

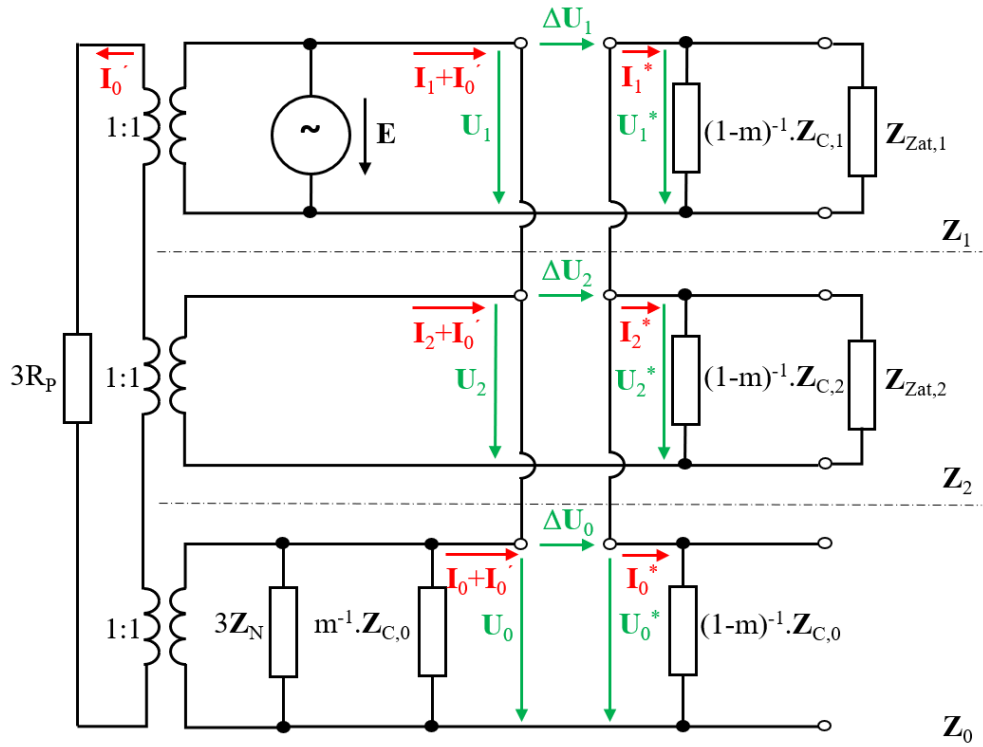
Je evidentné, že napäťové a prúdové pomery pri tomto type poruchy sú významne závislé od toho v akej mieste sústavy k nej došlo na rozdiel od spojenia jednej fázy so zemou. Na tento typ poruchy (prerušenie fázy) má taktiež významný vplyv záťaž.

Pri stave naprázdno sú na obr. 4 jednotlivé záťaže v zložkových sústavách odpojené a platí, že kapacita pred poruchou sa nerovná kapacite po poruche – časť kapacity fázy s poruchou je odpojená (bez napätia). Porucha sa javí ako kapacitná nesymetria v uzle N.

1.1.1 Prerušenie fázy v kombinácii so zemnou poruchou

Z pohľadu teórie ide o tzv. viacnásobné nesymetrie v elektrizačnej sústave. Je samozrejme možné uvažovať ľubovoľné kombinácie typov porúch – z hľadiska rozsahu tejto práce a početnosti výskytu určitých typov kombinovaných porúch s prerušenou fázou v praxi budeme uvažovať 2 typy viacnásobnej nesymetrie, ktoré sú nasledovne:

- Prerušená fáza a spojenie so zemou na strane smerom k rozvodni – obr. 5.
- Prerušená fáza a spojenie so zemou na strane smerom k záťaži – obr. 6.



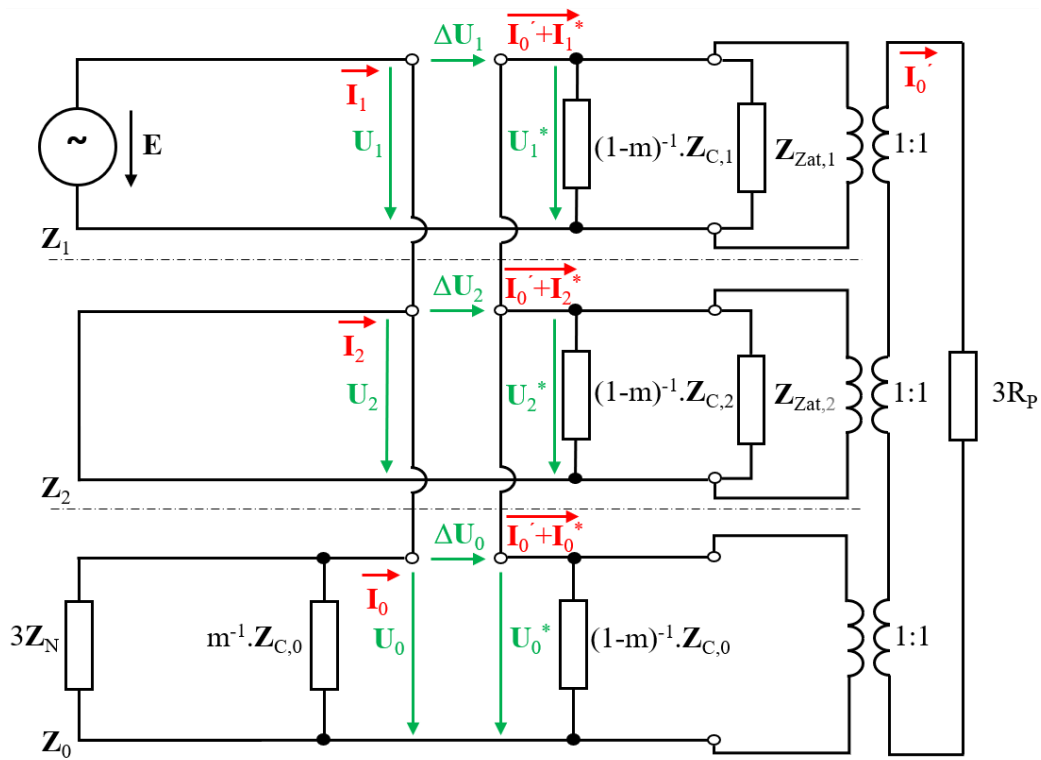
Obr. 5 Zložková schéma – roztrhnuté lano na zemi smerom k rozvodni

Z hľadiska napät'ových pomerov na napájacej rozvodni sa porucha z obr. 5 javí ako jedнопólová zemná porucha – spojenie 1 fázy so zemou (sériové prepojenie zložkových sústav za ideálnymi transformátormi). Spojenie 1 fázy so zemou je porucha nezávislá od záťaže a koeficientu m . Čiže U_f postihnutej fázy klesá a U_f zdravých fáz narastajú – v závislosti od pomeru medzi Z_0 a R_P . Na vedení za miestom poruchy sú napät'ové a prúdové pomery ovplyvnené prerušením fázy. Prúdové pomery na vývode s poruchou sú oproti zdravým vývodom významne ovplyvnené v spätnej zložkovej sústave.

Porucha na obr. 6 je tzv. spätne napájaná zemná porucha (v anglickej literatúre back-fed ground fault alebo back-fed earth fault). Oproti zjednodušenej schéme z obr. 4 pribudla na strane za rozpojením jedнопólová zemná porucha (sériové prepojenie zložkových sústav za ideálnymi transformátormi), čiže celkové pomery v sústave budú navyše ovplyvnené odporom v mieste poruchy – R_P . Od štandardnej zemnej poruchy sa významne odlišuje z hľadiska napät'ových pomerov, nakoľko platia 1.8, 1.9 a zároveň napätia U_0 a U_0^* pôsobia proti sebe. Vzhľadom na to, že pri štandardnej zemnej poruche napätie U_0 pôsobilo fázorovo proti elektromotorickému napät'iu, tak U_f fázy s poruchou klesalo s klesajúcim R_P . Ak by sme z 1.8 odvodili napätie U_0 , tak dostaneme:

$$\bar{U}_0 = \bar{E} + \bar{U}_0^* - \bar{U}_1^* \quad [\text{V}] \quad (1.18)$$

Ak by sme uvažovali, že $U_0^* = U_1^* = 0$, tak z 1.18 je evidentné, že $U_0 = E$, čo je inverzná situácia voči štandardnej zemnej poruche.

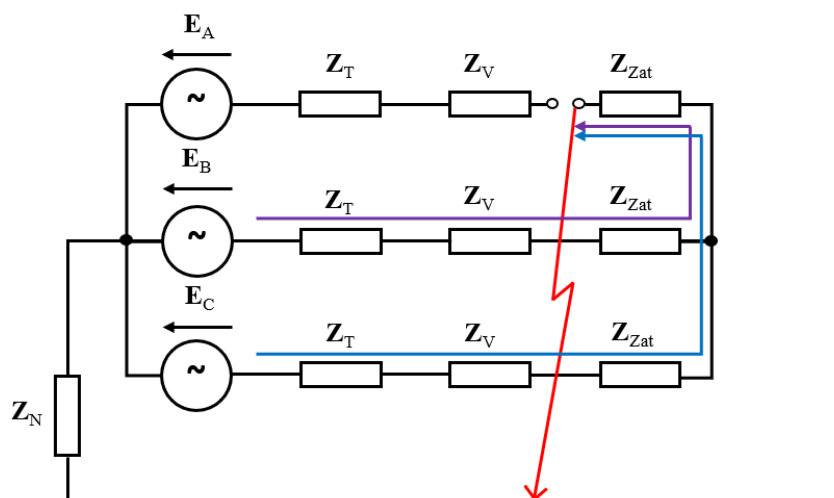


Obr. 6 Zložková schéma – roztrhnuté lano na zemi smerom k záťaži

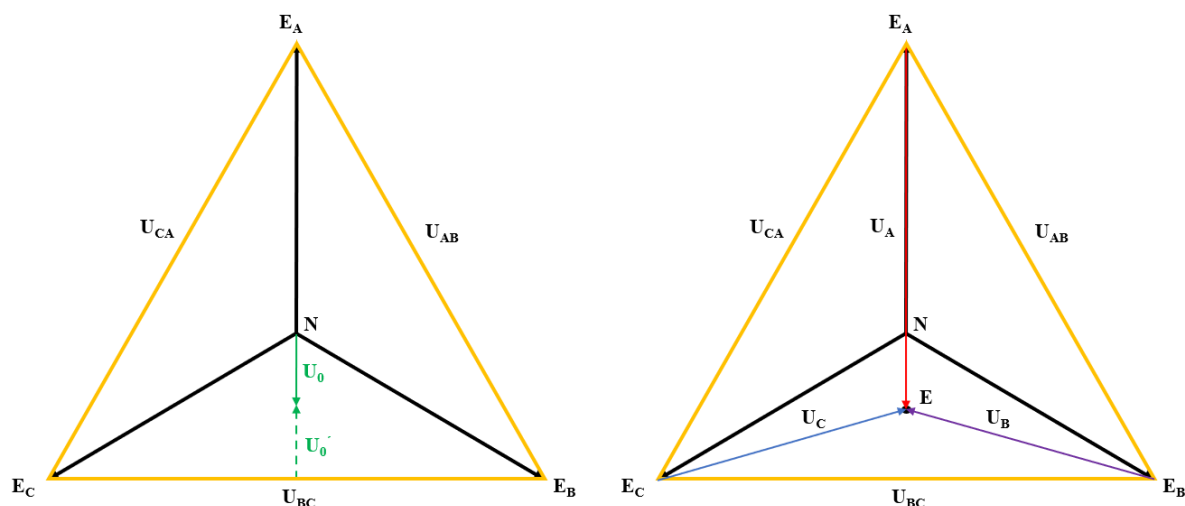
V oboch prípadoch vyššie spomenutých kombinovaných porúch ide o roztrhnuté lano, ktoré je padnuté na zemi. V náhradných zložkových schémach kombinovaných porúch nie je možné vytvoriť galvanické prepojenie medzi týmito poruchami, nakoľko každá z nich má svoje špecifické prepojenie zložkových sústav. Z tohto dôvodu sa využívajú tzv. ideálne transformátory, ktorých transformačný prevod jednotlivých zložkových sústav je [9] [10]:

$$p_0 = 1 [-]; \quad p_1 = 1 [-]; \quad p_2 = 1 [-] \quad (1.19)$$

Prevody v 1.19 nemajú charakter komplexného čísla, nakoľko sú obe poruchy v rovnakej fáze. Neplatí to v prípade viacnásobných porúch (kombinovaných), ktoré sú v rôznych fázach. Vtedy prevody v súslednej a spätnej zložkovej sústave nadobúdajú komplexný charakter. To prečo je porucha z obr. 6 inverzná voči štandardnej jedнопólovej zemnej poruche jednoduchšie ilustruje obr. 7 – zjednodušený model siete. Je evidentné, že prostredníctvom záťaže sa vytvára galvanické spojenie medzi poruchou a fázami B, C – zobrazené modrou a fialovou. R_P a záťaž sú hlavné faktory ovplyvňujúce $U_f - U_A, U_B, U_C$.



Obr. 7 Zobrazenie kombinovanej poruchy z obr. 6 na zjednodušenom modeli siete



Obr. 8 Napät'ové pomery pri poruche z obr. 7 – U_f a napätia nulových zložkových sústav pred a za prerušením

2 Metódy pre identifikáciu a lokalizáciu porúch s prerušenou fázou – súčasný stav problematiky

Prerušená fáza ako fenomén reprezentuje významnú oblasť, nakoľko môže ísť o poruchy s vodičmi padnutými na zemi, pričom konvenčne využívané systémy chránenia nie sú schopné túto poruchu správne identifikovať vo všetkých prípadoch. Vodič padnutý na zemi samozrejme predstavuje veľké nebezpečenstvo, nakoľko sa zvyšuje riziko vzniku požiarov a v neposlednom rade je potrebné určite zdôrazniť aj bezpečnosť osôb. Metódy na správnu identifikáciu tejto poruchy sú veľkou výzvou v oblasti chránenia [15]. Problém s voľne padnutými vodičmi spočíva v tom, že sa môžu prejavovať ako vysoko impedančné poruchy z rôznych dôvodov (najmä v prípade poruchy z obr. 7). Identifikácia tejto poruchy s konvenčnou wattmetrickou metódou, ktorá je v praxi často využívaná, nemusí byť teda úspešná v mnohých prípadoch, čo je pre PDS nežiadúce [15]. V nasledujúcom texte budú menované jednotlivé metódy, ktoré sa objavujú v odbornej literatúre, či už aktívne využívané v prevádzke alebo len vyvinuté v laboratórnych podmienkach a overené prostredníctvom simulácie.

2.1 Pomerné zemné relé

Tento princíp vychádza z práce osemdesiatych rokov – elektromechanické relé pre detekciu padnutých distribučných vodičov. Ochrana porovnáva štvorec I_0 s rozdielom štvorcov I_1 a I_2 . Išlo o významný posun vpred v oblasti identifikácie padnutých vodičov v danej dobe. Ochrana bola citlivejšia na tieto poruchy v porovnaní s vtedajšími konvenčnými metódami [15]. V súvislosti s daným relé bolo vyvinutých niekoľko algoritmov, niektoré výskumné tímy vychádzali z pomeru I_0 k I_1 [16].

2.2 Metóda napät'ovej nesymetrie

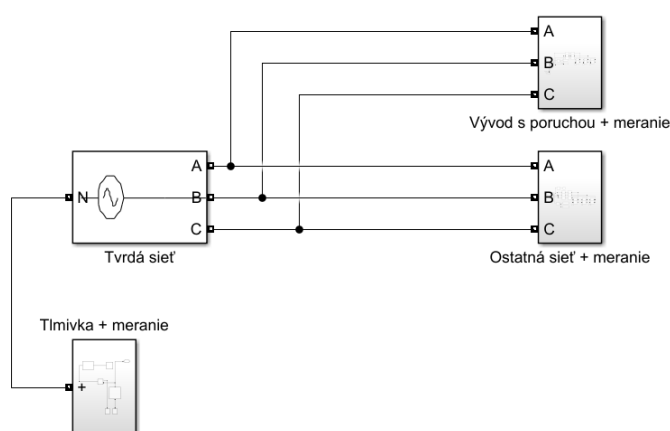
Prerušenie fázy vyvolá v radiálne napájanej sieti značnú nesymetriu napätí v porovnaní so zdravou časťou siete pred týmto miestom poruchy. Na základe tohto poznatku boli rozpracované dva hlavné prístupy – meranie elektrického poľa bezkontaktnými indikátormi [14] a meranie napätí (na primárnej, resp. sekundárnej strane DTr VN/NN). Prvý prístup vychádza z merania elektrických polí na koncoch odbočiek a na konci vedenia samotného. Zdôrazniť treba dve nevýhody, a to množstvo odbočiek na reálnych VN sieťach, a ďalej bežnú zmenu zapojenia siete, či už v súvislosti s plánovanými prácami alebo z iných dôvodov – čím sa nám dynamicky mení predmetný koniec vedenia. Druhý prístup sa v dnešnej dobe javí ako výhodnejší najmä s príchodom smart NN rozvádzačov s meraním napätí na NN strane DTr, resp. aj s využitím existujúcej infraštruktúry smart metrov. Publikácia [18] komplexne analyzuje dopad prerušenia fázy na rôzne zapojenia vinutí DTr.

2.3 Pomer I_2/I_1

Metóda vychádza zo základnej myšlienky pri prerušení fázy, a to dopadu na prúdové pomery, resp. následne vytvorenú prúdovú nesymetriu. Je nadstavbou ešte elementárnejšieho kritéria postaveného čisto na hodnote I_2 . Priame nastavenie hodnoty I_2 v súvislosti s poruchami s prerušenou fázou sa v praxi javí ako problém z hľadiska možných kombinácií dopadov porúch. Ako jednoduchšie kritérium je urobiť pomer zložkových prúdov, čím zvýšime nielen spoľahlivosť, ale aj citlivosť metódy. Citlivosť tejto metódy bude logicky závislá na záťaži, a teda umiestnení poruchy. Je veľmi zaujímavou z pohľadu aplikácie, nakoľko je kritérium dostupné v širokom spektre ochrán. Technická literatúra odporúča nastaviť prah na hodnotu 20% - skúsenosť z nadradených sústav [22] [23].

3 Simulácie vybraných VN porúch s prerušením fázy

Simulácie sú realizované v softvérovom prostredí MATLAB Simulink, resp. EXCEL.



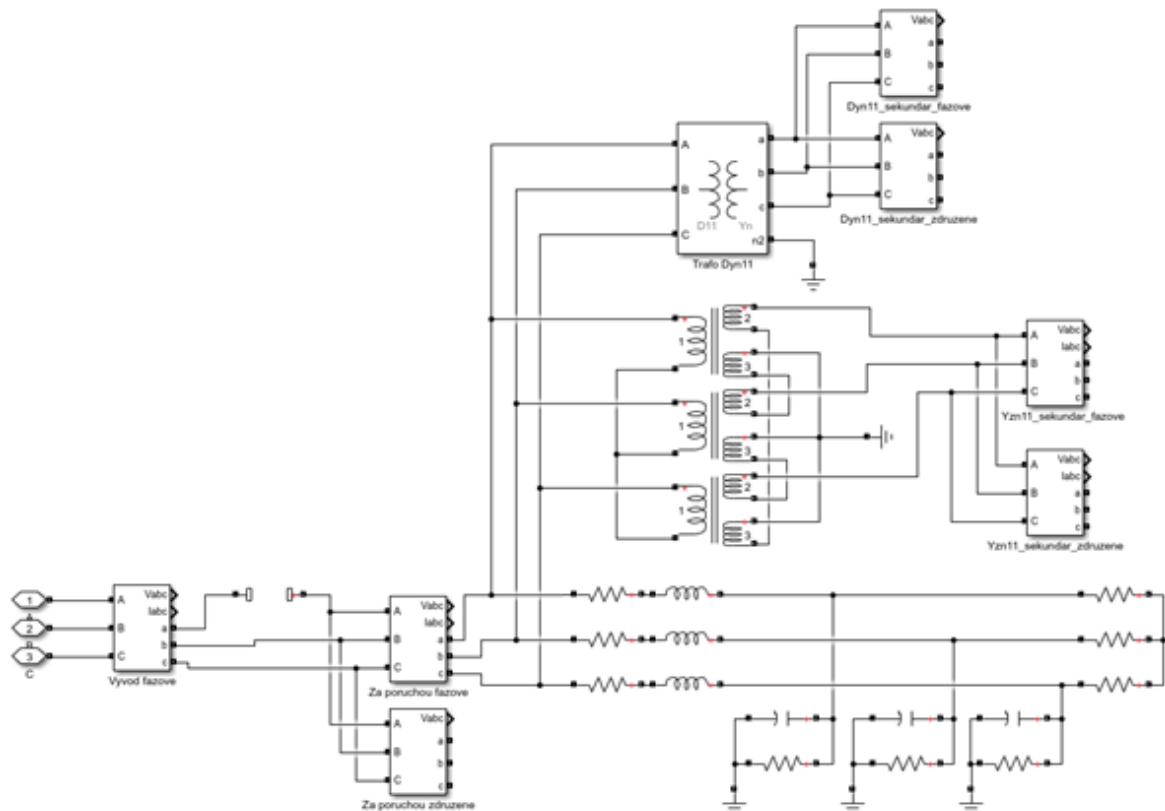
Obr. 9 Zjednodušený model VN siete s podsystémami

V rámci dizertačnej práce sú simulované nasledovné situácie:

- Prerušenie fázy na VN strane DTr (Yzn a Dyn) – lokálny vplyv na NN sieť.
- Prerušenie fázy bez spojenia so zemou naprázdno – vplyv rozladenia tlmivky.
- Prerušenie fázy bez spojenia so zemou s uvažovaním záťaže.
- Lano padnuté na zemi smerom k rozvodni s uvažovaním záťaže a aj R_p .
- Lano padnuté na zemi smerom k záťaži s uvažovaním záťaže a aj R_p .
- Vplyv rozptýlenej výroby za miestom prerušenia (poruchou).

3.1 Model pre analýzu vplyvu záťaže a R_p na napät'ové a prúdové pomery vo VN sieti s poruchou typu prerušená fáza

Do podsystému vývodu s poruchou je za miestom prerušenia pripojená záťaž zapojená do hviezdy – obr. 10. Pri poruchách s prerušením fázy je záťaž za poruchou kľúčovým faktorom na rozdiel od bežnej jednopólovej zemnej poruchy. Na záťaži vzniká úbytok napätia, ktorý ovplyvňuje napätie na kapacite voči zemi za miestom prerušenia – záťaž bude teda ovplyvňovať pomer I_L / I_C , a teda celkové napät'ové pomery v sieti. V modeli je zaťažená aj ostatná sieť. V tomto prípade je ďalšou vstupnou premennou modelu práve záťaž. Prerušenie je vytvorené na začiatku vedenia vo fáze A. Za miestom prerušenia je pripojená dvojica DTr Yzn11 a Dyn11 naprázdno – monitorovanie napät'ových pomerov na sekundárnej strane.



Obr. 10 Podsystem modelu z obr. 9 – vývod s poruchou doplnený o záťaž (Y) a Dyn11 + Yzn11 (oba naprázdno)

Modelovaná sústava:

Priečne parametre siete – $I_C = 100 \text{ A}$, $I_w = 0,02 \cdot I_C$, všetky admitancie voči zemi sú modelované ako symetrické. I_C vývodu s poruchou bude na fázu rovné rozladeniu siete, I_C ostatnej siete je zvyšok do 100 A. Tlmivka (I_L) – staticky podladená alebo preladená. Pozdĺžna impedancia ostatnej siete a vývodu s poruchou – $Z = 0,57 \angle 45^\circ \Omega$. Záťaže sú čisto odporové, statické články bez magnetických väzieb medzi fázami. Záťaž na vývode s poruchou – premenlivá v jednotlivých krokoch simulácie. Záťaž ostatnej siete – statická. DTr Dyn11 a Yzn11 – prevod 22/0,4 (kV), nakoľko sú v stave naprázdno, tak ostatné parametre nie sú pre účely tejto simulácie podstatné. Vyhodnocované sú napätia – U_N , U_2 pred a za miestom poruchy, U_0 za miestom poruchy, U_1 za miestom poruchy, U_A , U_B a U_C pred a za miestom poruchy. Zložkové napätia za miestom poruchy sú z vyhodnocované z U_f aj U_{Zdr} . Prúdy na vývode s poruchou I_A , I_B , I_C , I_1 , I_2 , I_0 pred a za miestom poruchy. U_f a U_{Zdr} na sekundárnej strane Yzn11 a Dyn11. Model priamo vyhodnocuje zložkové veličiny cez blok – „sequence analyzer“. Pu systém – VN $U_f - 1 \text{ pu} = (23 \cdot 10^3) / \sqrt{3} \sim 13,3 \text{ kV}$, VN $U_{Zdr} - 1 \text{ pu} = 23 \text{ kV}$, Prúdy – 1 pu = 376 A (I_N tlmivky 5000 kVAr), NN (sekundárne) $U_f - 1 \text{ pu} = 230 \text{ V}$, NN (sekundárne) $U_{Zdr} - 1 \text{ pu} = 400 \text{ V}$. Z hľadiska simulácie roztrhnutého a padnutého lana na zemi je model pri týchto poruchách spojený so zemou na jednej strane prerušenia (podľa typu poruchy), pričom je vtedy skúmaný aj vplyv R_p na napäťové a prúdové pomery.

3.2 Zhrnutie simulovaných výsledkov pre jednotlivé typy porúch

Tlmivka je v prvom kroku modelovaná ako podladená o 5 A a v druhom kroku ako preladená o 5 A. Ostatná sieť $I_C = 85 \text{ A}$, vývod s poruchou má $I_C = 15 \text{ A}$. Záťaž ostatnej siete je statická a symetrická počas celej simulácie – 15 k Ω , čo zodpovedá málo zaťaženej sieti. so symetrickou záťažou vývodu s poruchou a následne s nesymetrickou v R_B . V rámci autoreferátu sú uvedené iba priebehy napätia na VN prípojnici tvrdej siete a na NN strane DTr za miestom poruchy. Uvedené sú taktiež len niektoré zo simulovaných scenárov.

Prerušená fáza bez spojenia so zemou (s uvažovaním záťaže za poruchou):

- Záťaž vývodu za miestom poruchy ovplyvňuje pomery v sieti, čo potvrdzuje teoretické predpoklady. Rôzne scenáre tejto záťaže sú predmetom tohto zhrnutia.
- Vplyvom záťaže za miestom poruchy dochádza k prepätiu v U_f vo VN sieti v preladenom aj podladenom stave, avšak stále platí, že sa tieto 2 prevádzkové stavy vzájomne významne odlišujú – v podladenom stave dochádza k prepätiu pri nízkej aj vysokej záťaži – s narastajúcou záťažou prepätie narastá – treba brať do úvahy zvolený pu systém a fakt, že významné sú hodnoty, keď sa U_f dostane nad hodnotu U_{Zdr} sústavy ($\sqrt{3} \cdot 1$ pu systému U_f). V preladenom stave nedochádza k prepätiu pri nízkej záťaži, s narastajúcou záťažou dochádza k prepätiu. V podladenom stave nedochádza k prepätiu VN U_{Zdr} v sieti za miestom poruchy, zatiaľ čo v podladenom stave je prepätie nad 1 pu U_{Zdr} – tento fakt významne ovplyvňuje NN sieť za miestom poruchy. Väčšie prepätie U_f za miestom poruchy bolo zaznamenané v preladenom stave.
- Dopad na napäťové pomery v NN sieti (koncoví odberatelia) za miestom poruchy – v oboch stavoch dochádza k ovplyvneniu kvality napätí na NN strane DTr. V preladenej sieti na NN strane DTr nedochádza k prepätiu U_f ani U_{Zdr} – súvisí s priebehom VN U_{Zdr} za miestom poruchy. V podladenej sieti na NN strane DTr dochádza k prepätiu U_f a aj U_{Zdr} – súvisí s priebehom VN U_{Zdr} za miestom poruchy. Deje sa to pri nízkej záťaži.
- V rámci simulovanej škály zaťaženia bolo väčšie prepätie VN U_f zaznamenané pri podladenom stave. Napäťové pomery sú závislé od pomeru admitancie záťaže na vedení voči priečnej admitancii vedenia. Prírastok zvodu a kapacity voči zemi neprerušených fáz na vedení s poruchou (prerušením) je funkciou záťaže za poruchou [24].
- Najnižšie U_f poukazuje na fázu s poruchou iba v preladenom stave. Platí pre scenár so symetrickou aj nesymetrickou záťažou.
- Meraním a vyhodnocovaním napätí za miestom poruchy je možné prerušenú fázu identifikovať (lokalizovať) – buď zo zmeny absolútnej hodnoty U_f , ešte lepšie sa javí vyhodnotenie zo zmeny absolútnej hodnoty U_{Zdr} – zdravé U_{Zdr} ostáva nezmenené a fakt, že U_f nie sú vo VN distribučnej sieti pevne zadefinované (vplyv U_N), no najspoľahlivejšie sa javí použitie U_2/U_0 z U_f , ktoré sú v oboch stavoch naladenia tlmivky málo závislé od zaťaženia. Pomer U_2/U_0 z U_{Zdr} nebol vynesovaný do závislosti, nakoľko U_0 z U_{Zdr} je za miestom poruchy veľmi malé – v pu rádovo od 10^{-9} – 10^{-13} .
- Ako kritérium určenia vývodu s poruchou je možné použiť pomery zložiek – I_2/I_1 alebo I_2/I_0 . Pri vyššej záťaži je reprezentatívnejší pomer I_2/I_0 . Pomer I_2/I_1 je stabilnejší s ohľadom na veľkosť záťaže. Ohľad treba brať na symetriu zaťaženia sústavy. S klesajúcou záťažou sú obe kritériá menej reprezentatívne v preladenom aj podladenom stave.
- Tento typ poruchy vytvára zanedbateľnú U_2 z U_f na prípojnici – rádovo 10^{-6} až 10^{-3} pu (čiže U_2 pred miestom poruchy). Z tohto dôvodu nie je táto hodnota vynesovaná do grafickej závislosti a nie je ju možné použiť ako kritérium identifikácie tejto poruchy z pohľadu prípojnicových meraní.
- Vplyv nesymetrie záťaže na prípojnicové VN U_f a U_N tvrdej siete – pri nesymetrickom ztážení je nižšie prepätie v stave veľkého zaťaženia pri preladení. Pre nesymetricky zaťažené siete je teda lepšie tlmivku preladiť.
- Vplyv nesymetrie záťaže na NN napätia DTr za miestom poruchy – v podladenom stave dochádza k prepätiu U_f a U_{Zdr} aj pri vysokom zaťažení, pričom v preladenom stave k tomu nedochádza.
- Nesymetria záťaže vzhľadom na vyššie popísané vplyva samozrejme aj na priebeh U_f prerušenej fázy za miestom poruchy.

Odborná literatúra [25] [26] a vedecký, odborný článok [24] uvádzajú, že preladenie tlmivky je opatrením ako riešiť prepätia vo VN sieti s rezonančným uzemnením. Zo simulácie vyplýva, že fixný stav preladenia nie je finálnym riešením ako sa vyhnúť možným prepätiam v sústave s uvažovaním zaťaženia. V [25] sa odporúča prevádzkovať vzdušné (zmiešané) siete s preladenou tlmivkou – analýza siete neuvažuje záťaž.

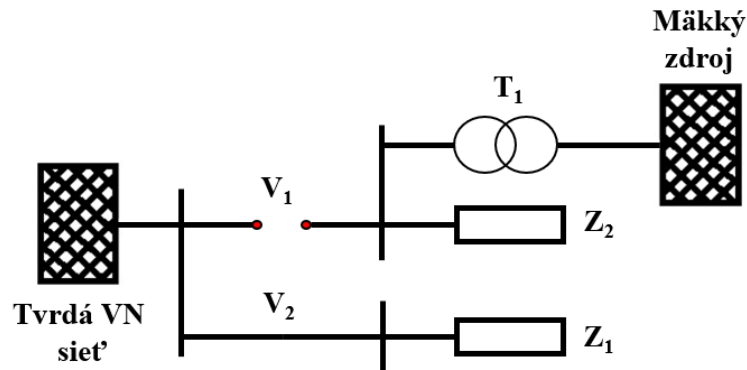
Lano na zemi smerom k záťaži:

- Tento typ poruchy je tiež závislý od záťaže vývodu s poruchou (za poruchou), ktorej rôzne scenáre sú predmetom tohto zhrnutia.
- Vplyv nesymetrie záťaže – prepätie prípojnicových VN U_f tvrdej siete a U_N je vyššie pri nesymetrickom zaťažení. Z hľadiska úrovne prepätí jednotlivých VN U_f a U_N je výhodnejšie tlmivku preladiť. Prepätie VN U_{Zdr} za poruchou je vyššie pri nesymetrickom zaťažení – horší stav je pri podladenej tlmivke. Pri nesymetrickej záťaži je zaznamenané prepätie NN U_f a U_{Zdr} aj pri stave vysokého zaťaženia. Horší stav je pri podladenej tlmivke. Pri symetrickom zaťažení NN U_f bez zaznamenaného prepätia v simulovanom rozsahu záťaže, avšak v podladenom stave je trend smerujúci k prepätiu. Pri NN U_{Zdr} zaznamenané prepätie iba v podladenom stave. Pri symetrickejšej záťaži nedochádza k prepätiu VN U_f s narastajúcou záťažou – rozdiel oproti prerušenej fáze bez spojenia so zemou. Trend smerujúci k prepätiu je pri znižujúcom sa zaťažení v podladenom stave.
- Pre potreby lokalizácie tejto poruchy (úseku) na vedení je rovnako ako pri poruche s prerušením fázy bez spojenia so zemou možné použiť ako kritérium pomery zložkových napätí, či už z U_f , resp. z $U_{Zdr} - U_2/U_1 - U_f$ aj U_{Zdr} , $U_2/U_0 - U_f$, resp. použiť zmenu absolútnej hodnoty $U_{Zdr} - U_f$ – platí pre všetky scenáre.
- Na určenie vývodu s poruchou je možné ako kritérium použiť oba pomery zložkových prúdov – I_2/I_0 aj I_2/I_1 – platí pre všetky scenáre. Rovnako platí, že pomer I_2/I_0 je reprezentatívnejší pri vyššej záťaži vývodu s poruchou. Rastúci R_p a klesajúca záťaž zhoršujú reprezentatívnosť týchto kritérií – podladený aj preladený stav.
- Tento typ poruchy je možné od prerušenia fázy bez spojenia so zemou odlišiť z pohľadu VN U_f na prípojnici tvrdej siete a miernej nesymetrii záťaže, a to pre oba prevádzkové stavy – s nárastom záťaže dochádza k znižovaniu 2 napätí – klesajú až k úrovni polovice U_{Zdr} . Stav nalaďenia tlmivky sa medzi sebou odlišujú s ohľadom na zmenu VN U_f fázy s poruchou – to je málo závislé od zaťaženia v simulovanom rozsahu pri podladenom stave a naopak viac závislé v preladenom stave – pri vyššom zaťažení sa v oboch prevádzkových stavoch ustáli hodnota tohto napätia na 1,5 pu.
- Tento typ poruchy je možné od prerušenia fázy bez spojenia so zemou rozlíšiť v procese lokalizácie – určenia úseku s poruchou na vedení, a to použitím kritéria U_2/U_0 z U_f za miestom poruchy – v oboch stavoch nalaďenia tlmivky, avšak iba pri mierne nesymetrickom zaťažení vývodu. Tento poznatok je kľúčový, nakoľko prerušenie fázy bez spojenia so zemou je možné vyriešiť zapnutím z opačnej strany na iný vývod tej istej rozvodne, resp. na vývod susednej rozvodne. Neplatí pri poruche na odbočke. Všetci odberatelia, tak môžu byť pod napätím bez dopadu na kvalitu napätia až do vyhľadania a odizolovania poruchy od zdravej časti sústavy. To isté nie je možné urobiť pri spätne napájanej zemnej poruche (back-fed ground fault) – v tomto prípade by došlo k zapnutiu do zemnej poruchy z opačnej strany, čo je nežiadúce. U_2/U_0 z VN U_f je vyššie pri podladenej tlmivke – priebeh U_2 a U_0 za miestom poruchy pri podladenej tlmivke voči priebehu pri preladenej tlmivke.
- Vplyv R_p – ovplyvňuje VN U_f na prípojnici tvrdej siete a U_N – dochádza k prepätiu v preladenom aj podladenom stave – o niečo menšie prepätie je pri podladení pri scenári s vysokou záťažou. V rámci scenára s nízkym zaťažením je menšie prepätie pri preladenej tlmivke – okrajovými podmienkami sa blížime k poruche s prerušením fázy bez spojenia so zemou – s nárastom R_p a znižovaním záťaže sa v zásade viac prejavuje kapacitná nesymetria. Má nezanedbateľný vplyv na priebeh napätia U_0 z VN U_f za miestom poruchy – U_0 rýchlejšie rastie v preladenom stave. Platí pre scenár s vysokým zaťažením. Má teda vplyv na kritérium U_2/U_0 , pomocou ktorého je v mierne nesym. zaťažených sieťach odlišiteľný tento typ poruchy od prerušenia bez spojenia so zemou.
- R_p má pri vysokej záťaži zanedbateľný vplyv na – VN U_{Zdr} a ich zložky za miestom poruchy, zložky U_2 , U_1 , U_2/U_1 z VN U_f za miestom poruchy, prúdy a ich zložky na vývode s poruchou, pomer zložkových prúdov I_2/I_1 na vývode s poruchou, napätia na NN strane DTr za poruchou (U_{Zdr} aj U_f).
- Pri malej záťaži sú v zásade všetky sledované veličiny veľmi málo (zanedbateľne) závislé od R_p , nezanedbateľný vplyv má na priebeh VN U_f prerušenej fázy za poruchou.
- R_p je zapojený do série so záťažou – preto je dôležitý celkový súčet R_p a záťaže za miestom poruchy. Podmienky pre určenie vývodu s týmto typom poruchy použitím bežnej wattmetrickej metódy sa zlepšujú s narastajúcou záťažou a klesajúcim R_p .
- U_2 z VN prípojnicových U_f nie je možné použiť na identifikáciu tohto typu poruchy.

Lano na zemi smerom k rozvodni:

- Zát'az na vývode za miestom poruchy ovplyvňuje tento typ poruchy. Rôzne scenáre tejto zát'aze sú predmetom tohto zhrnutia.
- Scenáre $R_P = 0$, mierne nesymetrickou (5 %) a s nesymetrickou zát'azou R_B majú analogické trendy priebehov veličín (malý vplyv nesymetrie zát'aze) samozrejme s výnimkou absolútnych hodnôt prúdov vzhľadom na veľkosť zát'aze.
- Podladený a preladený stav tlmivky nemá odlišný vplyv na scenáre s $R_P = 0$. Pri scenároch s $R_P \neq 0$ to už neplatí.
- V scenároch – nesymetrická zát'az R_B , premenlivý R_P s malou zát'azou platí oproti predchádzajúcim typom porúch, že najnižšie VN U_f na prípojnici tvrdej siete poukazuje na fázu s poruchou, výnimkou je iba scenár s veľkou zát'azou a premenlivým R_P , kde to platí v podladenom stave iba do určitej hodnoty R_P .
- VN U_f na prípojnici tvrdej siete - v oboch scenároch s premenlivým R_P došlo k prepätiu nad hodnotu $\sqrt{3}$ pu – v podladenej sieti pri malej zát'azi a pri veľkej zát'azi v podladenom aj preladenom stave. Prepätie rastie so zvyšujúcou sa hodnotou R_P pri malej zát'azi v podladenom stave a pri veľkej zát'azi v oboch prevádzkových stavoch.
- Možnosti lokalizácie tejto poruchy na vedení pomocou VN U_2/U_1 z U_{Zdr} , zmeny absolútnej hodnoty U_{Zdr} , resp. U_2/U_1 alebo U_2/U_0 z U_f – pri $R_P = 0$ a znižovaní zát'aze je problém s lokalizáciou tejto poruchy na vedení. Nesymetria zát'aze na to nemá odlišný vplyv. Pri malej zát'azi je pri nižších R_P lepšia preladená sieť z hľadiska lokalizácie – pomery veličín sú vyššie. Pri veľkej zát'azi (s nesymetriou 5 %) nie je problém s lokalizáciou v celej škále R_P . Veličiny sú veľmi málo závislé od R_P .
- VN U_{Zdr} za miestom poruchy – scenáre s $R_P = 0$ a vykazujú prepätie jedného U_{Zdr} v preladenom aj podladenom stave na úrovni 1,1 pu. Priebeh postihnutých U_{Zdr} má narastajúci trend. Nesymetria zát'aze na to nemá odlišný vplyv. Scenár s $R_P \neq 0$ a malou zát'azou – zaznamenané mierne prepätie (1,1 pu) v oboch stavoch naladenia tlmivky pri nízkom R_P , pričom pri podladenom stave má jedno U_{Zdr} trend narastať so zvyšujúcim sa R_P . Scenár s $R_P \neq 0$ a veľkou zát'azou – nebolo zaznamenané prepätie VN U_{Zdr} a to ani v jednom zo stavov naladenia tlmivky. Priebeh napätí je takmer nezávislý od R_P .
- Pri tejto poruche je ovplyvnená kvalita NN napätia na DTr za miestom poruchy – scenáre s $R_P = 0$ – mierne prepätie jedného U_{Zdr} a jedného U_f v oboch stavoch naladenia tlmivky pri znižovaní zát'aze. Nesymetria zát'aze na to nemá odlišný vplyv. Scenár s $R_P \neq 0$ a malou zát'azou – prepätie jedného U_{Zdr} a U_f pri malom R_P v oboch stavoch naladenia tlmivky, pričom prepätie zaniká v preladenom stave a má trend narastať v podladenom stave s rastúcim R_P . Scenár s $R_P \neq 0$ a veľkou zát'azou (mierne nesymetrickou – 5 %) – nebolo zaznamenané prepätie ani U_{Zdr} , ani U_f , a to v rámci oboch stavov naladenia tlmivky. Grafy sú v zásade ekvivalentné a nezávislé od R_P .
- Na určenie vývodu s poruchou je možné použiť obe pomerné kritériá zo zložkových prúdov – I_2/I_1 aj I_2/I_0 – opätovne treba brať ohľad na symetriu zát'aze v sústave a platí, že pri vyššej zát'azi je výhodnejšie kritérium I_2/I_0 . R_P má vplyv na pomery zložiek prúdov v stave s malou zát'azou (takmer naprázdno). Pri veľkom zaťažení vývodu s poruchou má R_P zanedbateľný vplyv – priebehy sú takmer konštantné. S klesajúcou zát'azou sa zhoršuje reprezentatívnosť týchto pomerných kritérií.
- U_2 z VN prípojnicových U_f nie je možné použiť na identifikáciu tohto typu poruchy.
- Na určenie vývodu s týmto typom poruchy je možné použiť bežnú wattmetrickú metódu. Pôsobenie ochrany využívajúcej tento princíp sa zhoršuje s nárastom R_P .

3.3 Vplyv rozptýlenej výroby na VN napät'ové pomery pri poruche s prerušenou fázou



Obr. 11 Model vplyvu rozptýlenej výroby na VN sieť

Základ modelu pozostáva z rovnakých častí ako na obr. 9 – tvrdá VN sieť – 23 kV, 50 Hz.

Priečne parametre siete – $I_C = 100$ A, $I_w = 0,02 \cdot I_C$, pričom ostatná sieť je sústredená do V_2 – $I_C = 85$ A. Vývod s poruchou má teda $I_C = 15$ A. Oba vývody sú modelované ako gama článok, ktorého pozdĺžna impedancia je symetrická $Z = 0,57 \angle 45^\circ \Omega$. $T_1 - S_N = 1$ MVA, zapojenie vinutí Dyn1, prevod $22 \cdot 10^3 / 0,4 \cdot 10^3$ (kV). Zát'aže – Z_1 je symetrická, čisto odporová – 15 k Ω na fázu, Z_2 je symetrická, čisto odporová 460 Ω na fázu (~1 MW). Mäkký zdroj – pomer X/R = 7, S''_K – premenlivé od 500 kVA do 2000 kVA (do vývodu s poruchou pribudne zdroj pripojený za miestom poruchy). Zdroj je modelovaný ako mäkký zdroj s premenlivým S''_K – vstupná premenná jednotlivých scenárov). Pu systém – VN $U_f - 1$ pu = $(23 \cdot 10^3) / \sqrt{3} \sim 13,3$ kV, VN $U_{zdr} - 1$ pu = 23 kV, NN (sekundárne) $U_f - 1$ pu = 230 V, NN (sekundárne) $U_{zdr} - 1$ pu = 400 V. Tlmivka je modelovaná ako podladená. Analyzovaná je iba porucha s prerušenou fázou bez spojenia so zemou – pri ostatných dvoch typoch porúch je vždy na jednej strane poruchy spojenie so zemou, čo je silnejšia okrajová podmienka ako zdroj – ten v danom prípade nedokáže postihnúť fázu symetrizovať. Roztrhnuté a padnuté lano na zemi je teda možné identifikovať buď s jestvujúcimi systémami chránenia a lokalizácie porúch, resp. s kritériami navrhnutými v predchádzajúcich kapitolách. Predpokladom je, že zdroj bude symetrizovať napätie za poruchou, a teda aj napätia na prípojnici VN tvrdej siete.

Zhodnotenie vplyvu rozptýlenej výroby:

- S rastúcim S''_K symetrizuje elektrické veličiny v NN sieti, do ktorej je pripojená (za miestom poruchy) – negatívny vplyv z hľadiska aplikácie nesymetrie napätia na NN strane DTr v procese lokalizácie poruchy.
- Potenciálne je možné využiť kritérium I_2/I_1 na prahu DTr – to avšak klesá k hodnote, ktorú je možné dosiahnuť aj v bezporuchovej prevádzke čisto nesymetriou zát'aže.
- S rastúcim S''_K symetrizuje VN U_f napätia na prípojnici tvrdej siete (klesá U_N v uzle), symetrizuje U_{zdr} za poruchou. Klesá rovnako pomer U_2/U_1 .
- Pomer U_2/U_0 z U_f za poruchou je od určitého bodu konštantný a nezávislý od tvrdosti zdroja – pomer je teda preferovanejším pre lokalizáciu úseku s VN poruchou vzhľadom na jeho robustnosť a nezávislosť.
- Rozptýlená výroba ovplyvňuje prúdy na vývode s poruchou – napriek tomu, je možné ďalej využívať pomery zložkových prúdov I_2/I_1 a I_2/I_0 ako kritéria na určenie vývodu s poruchou – I_2/I_1 je konštantné s ohľadom na tvrdosť zdroja a I_2/I_0 narastá.

Vzhľadom na vplyv rozptýlenej výroby je vhodné aplikovať kritériá I_2/I_1 , I_2/I_0 do vývodovej ochrany a telemetrií DO ÚO. Do telemetrií navyše aplikovať U_2/U_0 z U_f . Prostredníctvom týchto veličín je možné identifikovať poruchu s prerušením fázy aj pri rozptýlenej výrobe. DO ÚO sú navyše bližšie k zdrojom než vývodová ochrana vedenia – ohľad na možnú malú zmenu veličín z pohľadu ochrany.

4 Prínosy dizertačnej práce pre prax

Poruchy s prerušením fázy majú v určitom ohľade podobnosť s klasickou jedнопólovou zemnou poruchou, no existuje medzi nimi množstvo rozdielov:

- U_0 je v sieti pri oboch typoch porúch (v uzle sa oproti ustálenému stavu objaví vyššia úroveň U_0), pričom pri prerušenej fáze môže U_0 nadobúdať aj hodnoty vyššie ako 1 pu.
- Závažnosť za miestom poruchy významne ovplyvňuje napät'ové pomery pri poruche s prerušenou fázou, a to nie iba vo VN časti distribučnej sústavy, ale aj v NN časti.
- Na oba typy porúch má vplyv R_p , samozrejme pri prerušenej fáze nedochádza vo všetkých prípadoch k spojeniu s neživou časťou.
- Na niektoré typy porúch s prerušením fázy má významný vplyv nesymetria záťaže za miestom poruchy.
- Pripnutie odporníka môže mať pri niektorých typoch porúch s prerušenou fázou významne odlišný účinok oproti jedнопólovej zemnej poruche – dochádza k významnému poklesu. Napr. pri napät'ových pomeroch podobajúcich tzv. plnej jedнопólovej zemnej poruche ($U_0 = 100\%$).
- Pri lokalizovaní poruchy s prerušenou fázou oproti klasickej jedнопólovej zemnej poruche spôsobom postupného vypínania a následného zapínania vývodov môže dispečerská obsluha nadobudnúť dojem, že odopla od siete vedenie s poruchou typu prerušená fáza – na základe zmeny U_0 z vysokej na zanedbateľnú hodnotu – tento postup je aplikovateľný iba pri jedнопólovej zemnej poruche, dokonca pri podladenej sieti to môže viesť k výraznému zhoršeniu napät'ových pomerov – nadobudnutie stavu rezonancie. Porucha s prerušenou fázou sa prejaví po štarte ladiaceho cyklu tlmivky – s nárastom U_0 a dosiahnutím prahu signalizácie poruchy ($U_0 = 30\%$) sa porucha opäť prejaví. Korektné určenie vývodu s poruchou je pri tomto postupe skôr náhoda, pričom môže dochádzať k množstvu nadbytočných vypnutí.
- Poruchy s prerušenou fázou sú neprevádzkovateľné, nakoľko významne ovplyvňujú kvalitu v NN sieti za miestom poruchy. Poruchu s prerušením bez dotyku s neživou časťou (prerušená preponka) je možné prevádzkovať aj dlhodobejšie, pokiaľ k nej došlo na kmeni vedenia, a síce zapnutím z druhej strany -> tým sa ale vytvorí paralelný spôsob prevádzky VN vedenia, ktorý má samozrejme svoje úskalía.
- Na základe absolútnej hodnoty U_0 nie je možné rozlíšiť poruchu s prerušením fázy od jedнопólovej zemnej poruchy vo všetkých prípadoch.
- Pri poruchách s prerušením fázy veľmi záleží na tom v akom mieste k nim došlo – pokiaľ sa napr. rozpojí preponka na vzdušnej odbočke z vedenia pre 1 TS, tak je zmena U_0 nedostatočná a poruchu nesignalizujú žiadne konvenčné technológie. Rovnako to platí aj v prípade, že na takejto odbočke sa roztrhne a padne lano smerom k TS. Tieto typy porúch, ako už bolo konštatované, sú významne závislé od toho aká kapacitná nesymetria vznikne z ich titulu, resp. aká záťaž je za nimi zapojená.
- Najnižšie U_f fázy nepoukazuje na fázu s poruchou – platí to iba pre niektoré typy porúch s prerušenou fázou, a aj to iba za určitých podmienok.
- Oba typy porúch spôsobia vznik $3I_0$ na zdravých vývodoch – ten môže nadobúdať pri prerušenej fáze oveľa vyššie hodnoty než pri klasickej zemnej poruche. Prerušená fáza navyše zvýši hodnotu I_2 na vývode s poruchou.
- Z hľadiska chránenia je k určeniu vývodov s niektorými typmi porúch s prerušenou fázou je možné použiť wattmetrický princíp.

4.1 Odporúčania z hľadiska prevádzky a chránenia VN distribučnej siete

4.1.1 Prevádzka naladenia tlmivky

Zo simulovaných scenárov a zachytených prepätí pri prevádzkovaní tlmivky ako podladenej je nutné sa zamyslieť nad týmto spôsobom prevádzky s ohľadom na riziká pri poruchách s prerušením fázy – ohľad treba brať aj na prepätia v NN sieti pri podladenom režime a malým zaťažením za miestom poruchy. Odporúčaním tejto dizertačnej práce je jednoznačne prevádzkovať tlmivku ako mierne preladenú. Odborný článok [24] odporúča prevádzkovať tlmivku preladenú o 15 % (pri 150 A sieti analyzovanej v [24]). Takéto preladenie môže spôsobiť problémy pri úspešnom zhášaní prechodných porúch, a taktiež vytvorí výraznejšie prepätie pri zániku zemnej poruchy. Navyše aj pri preladenom

stave môže dochádzať v sieti k prepätiu pri vysokom stave zaťaženia za miestom poruchy – avšak stále na nižšej úrovni než v podladenom stave. Odporúčam menšie preladenie na úrovni 5 A, vzhľadom na ktoré boli realizované aj jednotlivé simulácie. Možné vznikajúce prepätia aj pri preladenom stave sa dá riešiť ďalším spôsobom. Pokiaľ je zvolený prístup väčšieho rozladenia (silne nesymetrické siete voči zemi), tak jednoznačne neodporúčam prevádzku v podladenom stave – môže dochádzať k prepätiam v násobkoch rovných jednotkám, teoreticky až desiatkam pu, čo už určite niektoré zo zariadení rozvodu nevydrží.

4.1.2 Dopad VN porúch s prerušením fázy na paralelnú prevádzku DTr z rôznych úsekov vedení

Zo simulácií a merania v reálnej distribučnej sieti je evidentné, že na NN strane DTr za miestom poruchy s prerušením fázy dochádza k významnému ovplyvneniu napät'ových pomerov (kvality) v príslušnej NN sieti. Ako nevýhodné sa javí mať v paralelnej prevádzke DTr z rôznych úsekov vedení, nakoľko pri VN poruche s prerušením fázy bude dochádzať k vyššiemu pretoku z nepostihnutého DTr k postihnutému. Môže a dochádza tak k rozpadu príslušnej NN siete (pretavenie poistiek slabej väzby, resp. aj ďalších). Naťahuje sa tak čas úplného odstránenia poruchového stavu – okrem procesu riešenia poruchy na úrovni VN je potrebné navyše riešiť vzniknuté problémy v NN distribučnej sústave. Z tohto titulu, okrem ďalších dôvodov, neodporúčam paralelnú prevádzku DTr z rôznych úsekov vedení a podľa možnosti túto situáciu riešiť investíciou.

4.1.3 Zmena filozofie merania napätia na regulátore zhášacej tlmivky

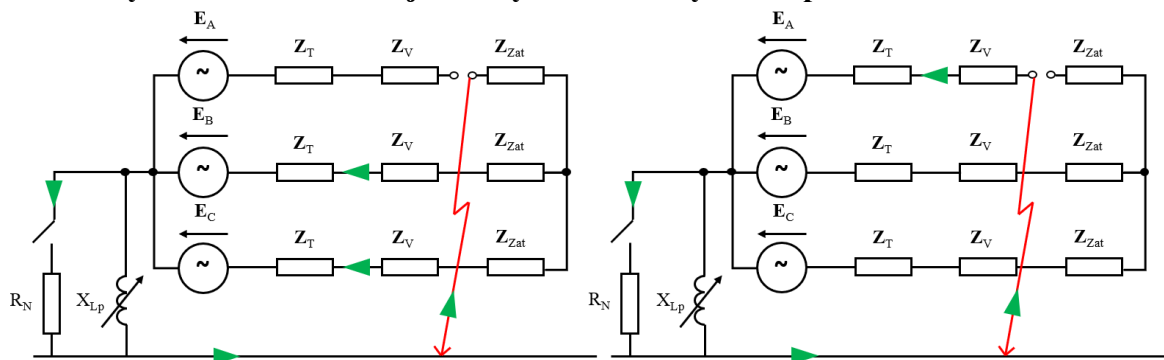
Regulátory zhášacích tlmiviek merajú na jednom z jej pomocných vinutí U_{NE} (U_N , resp. U_0). Zo simulácií je zrejmé, že na základe absolútnej hodnoty U_N nie je možné vo všetkých stavoch určiť, že je v sieti U_f nad úrovňou nominálneho U_{Zdr} , resp. jednoznačne odlišiť poruchy s prerušením fázy od klasickej jednopólovej zemnej poruchy. Toto technologické riešenie má samozrejme svoje opodstatnenie – je jednoduché a robustné. Navrhovaná zmena spočíva v dovedení merania U_f z priebežných napät'ových obvodov až do regulátora tlmivky – ohľad pri technickej realizácii treba ale brať na to, ku ktorému transformátoru je pripnutá daná zhášacia tlmivka (ktorú sieť kompenzuje) – v napät'ových obvodoch by teda musela byť navyše zakomponovaná logika prepínania podľa stavu prvkov (minimálne podľa stavu odpájačov v uzle). Samozrejme pri rozvodniach s jedným transformátorom VVN/VN tento problém odpadá.

4.1.4 Využitie pripnutia odporníka – zatlmenie prepätia v kombinácii so zmenou ladenia

Meranie aj simulácie potvrdili, že pripnutie odporníka má priaznivý vplyv na vzniknuté prepätia pri poruche s prerušením fázy. Problém je, že jestvujúce algoritmy ladenia tlmiviek fungujú v nasledovných režimoch – odporník je v bežnej prevádzke trvalo pripnutý k tlmivke alebo pomocnému vinutiu a pri zemnej poruche dochádza k jeho odopnutiu po definovanom čase, resp. je v bežnej prevádzke odopnutý a pri zemnej poruche (prekročení U_0) sa k tlmivke pripne na definovaný čas. Oba prístupy teda riešia vzniknuté prepätie iba na definovaný čas, čo nie je dostatočné. Je teda nutné doplniť do regulátorov zhášacích tlmiviek nové funkcionality (algoritmy), ktoré by umožnili pripnutie odporníka v novom režime. Nový algoritmus by zároveň mohol aktívne spolupracovať s ladením tlmivky. Pokiaľ by v sieti došlo k prepätiu niektorého U_f nad úroveň povedzme 1,2 pu združeného napätia siete alebo pokiaľ by bolo U_N nad 1,2 pu (v tomto prípade nad 1,2 násobok 13,3 kV), tak by došlo k pripnutiu odporníka na definovaný čas, rozbehla by sa automatika ladenia tlmivky, ktorá by pri preladenej tlmivke preladila navyše o fixne nastavenú hodnotu, a to aj pri podladenej prevádzke – v tomto prípade by ale preladila o súčet hodnoty podladienia a fixne nastavenej hodnoty v regulátore – do lokalizovania poruchy bude sústava v preladenom stave, čo je lepšie z hľadiska možného rizika vzniku ďalšej poruchy s prerušením fázy. Po ukončení ladiaceho cyklu by algoritmus odporník odopol a režim ladenia by sa prepol z automatického do ručného, aby náhodou nezačal laďiť naspäť – takto dosiahneme veľmi rýchle, v zásade okamžité zatlmenie prepätia z titulu prerušenej fázy a preladením dospeje sústava do prijateľnejšieho stavu s ohľadom na napät'ové pomery a dispečerská obsluha získa dostatočný čas na vymedzenie poruchy. Aktívny musí byť samozrejme tepelný model odporníka – ochranná funkcionality jestvujúcich regulátorov tlmiviek. Odborná publikácia [24] ako alternatívu k veľkému preladeniu navrhuje trvalé pripnutie odporníka. Toto neodporúčam, nakoľko sa diametrálne

zhorší identifikácia mákších porúch (poruchy s vyšším R_p), a taktiež je v tomto prípade otázne zhášanie prechodných porúch pri používaných sekundárnych odporníkoch.

4.1.5 Využitie wattmetrickej metódy k určení vývodu s prerušenou fázou



Obr. 12 Využitie wattmetrickeho princípu s pripínaním odporníka pri poruche s prerušením fázy – lanom padnutým na zemi

Wattmetrický princíp je v praxi bežne využívaný pre určenie vývodu s jednopólovou zemnou poruchou. Je možné ho aplikovať aj pri niektorých typoch porúch s prerušenou fázou v zmysle obr. 12 – keď je lano spadnuté smerom k napájacej elektrickej stanici (vpravo), a keď je lano spadnuté smerom k záťaži (vľavo). V oboch prípadoch sťažuje podmienky určenia vývodu s poruchou odpor v mieste poruchy R_p . V prípade lana padnutého smerom k záťaži to navyše sťažuje impedancia záťaže, ktorá stojí v ceste prúdu vnúteného odporníkom. Navzájom sa poruchy odlišujú ešte nasledovne – pokiaľ je lano padnuté smerom k záťaži, tak sa prúd odporníka vracia dvomi fázami namiesto jednej, čo ale nezohráva žiadnu úlohu z hľadiska sumáru reálnej zložky $3I_0$ meraného elektrickou ochranou vývodu. Pokiaľ sú podmienky vyhovujúce, tak zapôsobí napr. zemná alebo konduktančná ochrana vývodu. Wattmetrický princíp samozrejme nie je možné aplikovať pri poruche s prerušením fázového vodiča bez dotyku s neživou časťou (napr. prerušená preponka) – prúd vnútený odporníkom sa nemá kde uzavrieť. Wattmetrický princíp je možné teda využiť aj v ďalších telemetriách, napr. v DO ÚO na vedení a dokonca, pri vyhovujúcich podmienkach (dostatočne nízky R_p , resp. dostatočná záťaž) je následne možné identifikovať typ poruchy z kombinácie signalizácie prerušenej fázy a pôsobenia zemnej ochrany na vývode, resp. telemetrii DO ÚO. Wattmetrický princíp z hľadiska vyhodnocovania $3I_0$ nie je možné všeobecne aplikovať v telemetriách DO ÚO pri roztrhnutom a padnutom lane smerom k záťaži. Prejavuje sa paradox meraný telemetriou za miestom prerušenia – $\text{Re}\{3I_0\} = 0$.

4.1.6 Využitie pomerov zložkových prúdov I_2/I_1 a I_2/I_0

Zo simulácií je zjavné, že oba pomery sú aplikovateľné pre určenie vývodu s poruchou. Výhodou I_2/I_0 voči I_2/I_1 je, že pri vyššom stave zaťaženia dosahuje reprezentatívnejšie hodnoty – samozrejme závisí na pomere záťaže voči priečnej admitancii vedenia. Jednoznačným odporúčaním je mať nastavené na vývodových ochránach obe tieto kritériá, a to v režime signalizácie – bez pôsobenia na vypínač. Problém môže byť, že VN ochranné terminály, resp. vývodové ochrany nemajú tieto funkcionality dostupné buď vôbec alebo chýba jedna z nich. V ochránach je avšak možné doprogramovať pomerne kritériá prostredníctvom tzv. measurement supervision – nevýhodou je dlhší čas vyhodnocovania, čo na druhej strane nie je zásadným problémom, nakoľko je navrhovaný iba režim signalizácie. Režim signalizácie má tú istú výhodu ako pri bežnej jednopólovej zemnej poruche v kompenzovanej sieti – nie je potrebné vypínať celý vývod, no stačí odizolovať od ostatnej siete úsek s poruchou. Tieto pomerne kritériá by bolo možné taktiež implementovať do jestvujúcich DO ÚO – zásadným problémom oproti napätovým kritériám a ich pomerom je, že prúdová nesymetria bude ako pred miestom poruchy, tak aj za ním, čo implikuje všeobecne sťažujúcu aplikovateľnosť na úrovni telemetrií DO ÚO. Technické manuály odporúčajú nastavenie I_2/I_1 na úroveň 20 %. Odporúčaním tejto dizertačnej práce je zmapovať situáciu s nesymetriou záťaže s ohľadom na hľadanie extrému. V Západoslovenskej distribučnej je extrém prúdovej nesymetrie cca na úrovni 5 % - sumárne za celý napájací transformátor VVN/VN, pričom nesymetria na jednotlivých vývodoch je menšia. Nastavenie by teda mohlo byť aj na nižšej úrovni, napr. 15 % alebo 10 %, čím samozrejme zvýšime citlivosť metódy. Pomer I_2/I_0 je veľmi

výhodným kritériom pri prevažne vzdušných vedeniach, kde je vlastná I_0 vedení relatívne nízka. Tieto pomerné kritériá sú robustné z hľadiska jedнопólovej zemnej poruchy – aj v tomto prípade by signalizovali iba na vývode s poruchou, nakoľko na zdravých vývodoch je pri poruche prítomná iba I_0 , zatiaľ čo I_2 je zanedbateľne malá – opäť treba brať ohľad na symetriu záťaže ako takej. Robustnosť vyplýva zo zapojenia zložkových sústav pri jedнопólovej zemnej poruche – spätná zložková sústava zdravého vývodu je zapojená paralelne k spätnej zložkovej sústave vývodu s poruchou, pričom U_2 je v prípade tejto poruchy zanedbateľne malé, blížiac sa k nule – potvrdzujú simulácie všetkých typov porúch pri všetkých scenároch. U_2 z U_f na prípojnici tvrdej siete sa pohybuje rádovo v intervale hodnôt od 10^{-3} až 10^{-6} V. Pri nastavení časového oneskorenia týchto kritérií treba brať ohľad na nasledovný prevádzkový fakt – ÚO s komorami vo VN sieťach majú takú vlastnosť, že jednotlivé kontakty sa nezopnú synchronne v rovnakom čase, ale je tu nesymetria trvajúca rádovo 1 s, čo naznačuje spodnú hranicu časového oneskorenia prúdových kritérií. Reprezentatívnosť pomerných prúdových kritérií je horšia s klesajúcou záťažou a s rastúcim R_p . Jedným z problémov, ktoré by mohli nastať pri použití kritéria I_2/I_0 je, že obe hodnoty môžu byť v bezporuchovej prevádzke veľmi malé, no ich vzájomný pomer môže byť vyšší ako nastavený prah. Odporúčanim je uvoľňovať túto ochrannú funkcionalitu pomocou U_0 – napr. min 30 %, čo je prah signalizácie poruchy s dopadom na U_0 všeobecne.

4.1.7 Využitie zmeny absolútnej hodnoty VN U_{zdr} a pomeru ich U_2/U_1 za poruchou

Nastavenie zmeny absolútnej hodnoty U_{zdr} odporúčam nastaviť na 20 %, pričom stačí ak sa ktorékoľvek z 3 napätí zmení o túto hodnotu. Pomer U_2/U_1 pri väčšine poruchových scenárov neklesne pod 0,2 pu, čiže taktiež nastaviť 20 %. Pomer U_2/U_1 zo združených napätí je ekvivalentný s pomerom U_2/U_1 z fázových napätí. Menšie minimálne hodnoty sú v preladenom stave, čo súvisí s priebehom napätia prerušenej fázy za miestom poruchy. Odporúčam využívať obe kritériá súčasne s logikou OR s časovým oneskorením 1 s.

4.1.8 Využitie pomeru zložiek U_2/U_1 a U_2/U_0 z VN U_f za miestom poruchy

Oproti VN U_{zdr} určite neodporúčam využívať zmenu absolútnej hodnoty U_f za miestom poruchy, nakoľko nie sú vo všeobecnosti U_f vo VN distribučnej sieti pevne zadefinované a sú silne ovplyvňované napr. ladiacim cyklom alebo zemnými poruchami – bol by teda problém s nastavením takéhoto kritéria a mohlo by ľahko dochádzať k falošnej signalizácii. Pomer U_2/U_1 má pri niektorých scenároch minimum na úrovni pod 10 %, čo je ale veľmi malá hodnota s ohľadom na presnosť meracej technológie DO ÚO (často ide o kapacitné deliče), pri väčšine scenárov neklesá pod 20 % - odporúčam nastaviť túto hodnotu ako prah. Pomer U_2/U_1 z U_{zdr} je ekvivalentný s pomerom U_2/U_1 z U_f . Pomer U_2/U_0 je síce odporúčany na signalizáciu konkrétneho typu poruchy, je možné ho avšak stále využiť pre signalizáciu prerušenia všeobecne a to taktiež od úrovne 20 %. Oneskorenie 1 s.

4.1.9 Využitie pomeru zložiek U_2/U_0 z VN U_f ako kritérium rozlíšenia porúch

V rámci simulovania scenárov jednotlivých typov porúch s prerušenou fázou bolo poukázané na možnosť využitia kritéria U_2/U_0 z VN U_f za miestom poruchy, ako kritéria rozlišujúceho poruchu s prerušením bez dotyku s neživou časťou od spätne napájanej zemnej poruchy. Možnosť rozlíšenia týchto 2 typov porúch je kľúčová z hľadiska možného riešenia týchto 2 typov porúch pre dispečerskú obsluhu. Poruchu s prerušením bez spojenia s neživou časťou, pokiaľ k nej došlo na tzv. kmeni vedenia, je možné riešiť nasledovne – dispečerská obsluha zapne DO ÚO na konci vedenia, čím po miesto poruchy dostane napätie z druhej strany. Napätie je plne obnovené po miesto poruchy z vývodu napájajúcej elektrickej stanice, na ktorom porucha vznikla, a rovnako tak z druhej strany – môže ísť o vedenie vývodu z tej istej prípojnice, o vývod z druhej prípojnice, resp. o vývod zo susednej elektrickej stanice. Takto je možné poruchu prevádzkovať napr. aj celú noc, resp. pri sťažených atmosférických podmienkach, keď nie sú z pohľadu BOZP splnené podmienky na jej opravu a čaká sa až do rána. Ide samozrejme o neštandardný spôsob prevádzky napájania VN vedenia v našich distribučných sieťach, treba poznamenať, že je len dočasný a napomôže znížiť SAIDI & SAIFI. Pri takto zvolenom postupe navyše odporúčam vypnúť automatiku OZ na ochranách oboch vývodov a pokiaľ sa takýmto prepojením spoja 2 siete (2 zhášacie tlmivky), tak režim automatiky ladenia na regulátore jednej z nich je potrebné prepnúť do ručného. Sú tu samozrejme ďalšie ťažkosti spojené s týmto spôsobom obnovenia dodávky – takouto paralelnou prevádzkou sa vytvára nedokonalý spínač prípojnic, čo môže byť problém

pokiaľ sa napr. prepoja susedné elektrické stanice z rôznych VVN uzlových sústav. Ako každé iné ochranné kritérium, tak aj toto má svoje nevýhody:

- Je možné ho aplikovať iba v mierne nesymetricky zaťažených sieťach (pri nesymetrii na úrovni do 5 % úplne bez problémov).
- S narastajúcim R_P sa zhoršujú podmienky jeho pôsobenia – signalizácie.
- Kritérium je dostatočne reprezentatívne pri všetkých typoch porúch s prerušením iba v preladenej sieti.

Pre signalizáciu tohto typu poruchy odporúčam nastaviť prah pomeru na 1,5 pu – vzhľadom na to, že pri žiadnom scenári s iným typom poruchy a preladeným stavom nepresiahol hodnotu 1. Rezerva by teda mala byť dostačujúca. Časové oneskorenie 1 s.

4.1.10 Doplnenie ochrán ANSI 59Q (Negative Sequence Overvoltage) alebo ANSI 51Q (Negative Sequence Time Overcurrent)

- ANSI 59Q – prepäťová ochrana spätnej zložkovej sústavy.
- ANSI 51Q – nadprúdová, časová ochrana spätnej zložkovej sústavy.

Napät'ovú ochranu odporúčam realizovať z prípojnicových PTN (technicky by bolo možné ju realizovať aj z PTN transformátora VVN/VN, no ten nebýva za každej okolnosti v prevádzke). Táto ochrana by neriešila priamo identifikáciu poruchy s prerušením fázy v priľahlej VN sieti, nakoľko U_2 na prípojnici je pri týchto poruchách zanedbateľná. Zložková sústava U_2 môže avšak v celej VN sieti vzniknúť pokiaľ je porucha s prerušením fázy buď v nadradenej sústave VVN (napr. pri radiálnej prevádzke) alebo je táto porucha priamo v poli transformátora VVN/VN. V týchto prípadoch taktiež vznikne vo VN sústave U_0 , ktorá môže nadobúdať rôzne hodnoty a dispečerská obsluha si ju v prvom momente môže zameniť s poruchou vo VN sieti. Doplnením tejto ochrany by tak dispečerská obsluha mala ale jednoznačnú informáciu, že je to spôsobené poruchou od poľa transformátora vyššie až v nadradenej sústave. O poruche tohto typu pojednáva odborný článok [27], ktorý ako opatrenie navrhuje ochranu ANSI 46 (Phase unbalance protection) na ochránach VVN vedení. Tento návrh je v poriadku s ohľadom na VVN dispečerskú obsluhu, avšak nerieši situáciu z pohľadu VN dispečingu, keď VVN dispečer a VN dispečer vôbec nemusia sedieť v jednej miestnosti. Mohli by tak nastať situácie, v ktorých kým sa informácia od VVN dispečera dostane ku VN dispečerovi, tak ten by už začal proces lokalizácie zemnej poruchy postupným vypínaním vývodov, a to úplne zbytočne. Implementácia ochrán v zodpovednosti VN dispečera túto prípadnú situáciu rieši úplne. Ochrana ANSI 51Q spočíva v meraní prúdov a vyhodnocovaní ich I_2 na napájacom transformátore VVN/VN, ktorý by bol pri vyššie spomenutých poruchách taktiež značne nesymetrický. Niektorý PDS túto ochranu využívajú ako zálohu pri zlyhaní vypínača vývodu. Táto ochrana má samozrejme viac stupňov pôsobenia, preto je možné jeden stupeň stále využívať v režime zálohy, a teda s pôsobením na výkonový vypínač a druhý stupeň by fungoval iba v režime signalizácie pre poruchy s prerušením fázy buď v poli transformátora ako takého, resp. v nadradenej sústave VVN. Obe ochrany by fungovali v režime signalizácie bez pôsobenia na výkonový vypínač. K nastaveniu ochrán – vzhľadom na to, že sme na prahu elektrickej stanice s PTP a PTN, ktoré majú lepšiu úroveň presnosti než technológia použitá na DO ÚO, tak si môžeme dovoliť nižšie nastavenie úrovni. V bežnej prevádzke bez poruchy je zanedbateľná U_2 U_{Zdr} aj U_f na meraní prípojnice. Odporúčam nastaviť ANSI 59Q na 10 % a časové oneskorenie tak, aby preklenulo všetky nadprúdy, aj stav zlyhania vypínača vývodu. Postačovať by mali 2 s. Pokiaľ je využitá zároveň nadprúdová ochrana odporníka, ktorá sa nastavuje napr. až na 5 s, tak je potrebné obe kritériá nastaviť na min 5s. S ANSI 51Q je situácia zložitejšia pretože nie je možné nastaviť pomer – nastavuje sa priamo efektívna hodnota. Pre mierne nesymetrické siete odporúčam nastaviť na min 50 A a čas min 2 s.

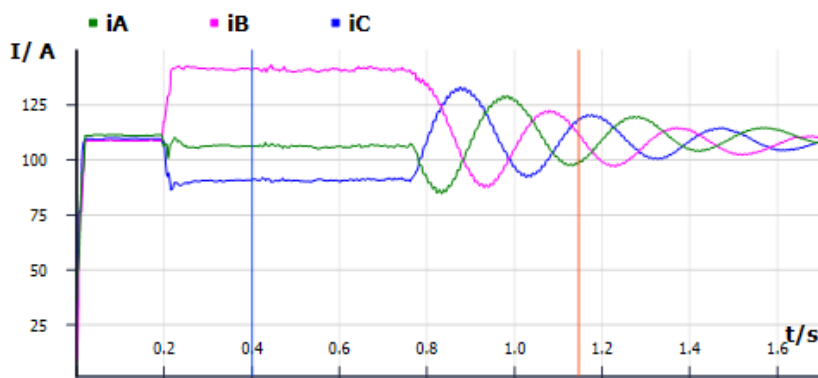
4.1.11 Pomerná prúdová nesymetria – nevhodné kritérium

Niektoré odborné publikácie odporúčajú využívať, ako na vývodových ochránach, tak aj telemetriách prvkov v sieti, prúdovú nesymetriu, ktorá je vyhodnocovaná nasledovne:

$$\frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX}} \cdot 100 \quad [-] \quad (1.20)$$

Kritérium je odporúčané nastaviť na $> 40 \%$ - dôvodom je samozrejme nepresnosť merania na telemetriách, avšak toto kritérium aj pri vyššom nastavení, môže signalizovať aj pri klasickej jednopólovej zemnej poruche, dokonca na zdravom vývode, resp. aj na DO ÚO vývode bez poruchy. Situáciu popisuje záznam z ochrany vývodu, ktorý prispieva do poruchy – obr. 13. Ide o vývod, ktorý

prispieval do jedнопólovej zemnej poruchy – pri tejto poruche sú prúdy vo fázach súčtom fázorov kapacitného prúdu a prúdu záťaže – v zásade v bežnej prevádzke dochádza k navýšeniu prúdu v jednej fáze a poklesu prúdu v dvoch fázach s ohľadom na uhol medzi kapacitou a záťažou, postihnutá fáza je vybitá, takže takmer úplne bez kapacitného prúdu (v závislosti od R_p) iba so záťažou. Zmena prúdových pomerov po vzniku zemnej poruchy na zdravom vývode závisí samozrejme od pomeru medzi záťažou a priečnou admitanciou (kapacitou). Pri tejto konkrétnej poruche bolo $I_{MAX} = 141$ A, $I_{MIN} = 91$ A, čo podľa 1.20 zodpovedá 35,46 %. Lahko sa teda môže stať, že pomer bude prekročený na zdravom vývode, ktorý prispieva do zemnej poruchy, čo je zavádzajúca informácia pre dispečerskú obsluhu. Je to samozrejme jeden z dôvodov, prečo je toto kritérium potrebné nastavovať vyššie a robiť ho tak menej citlivým. Na odlišenie medzi poruchou s prerušením fázy od klasickej jedнопólovej zemnej poruchy sa teda javí ako nevýhodné.



Obr. 13 Zdravý vývod prispievajúci do jedнопólovej zemnej poruchy – záznam z ochrany

4.1.12 Vplyv rozptýlenej výroby

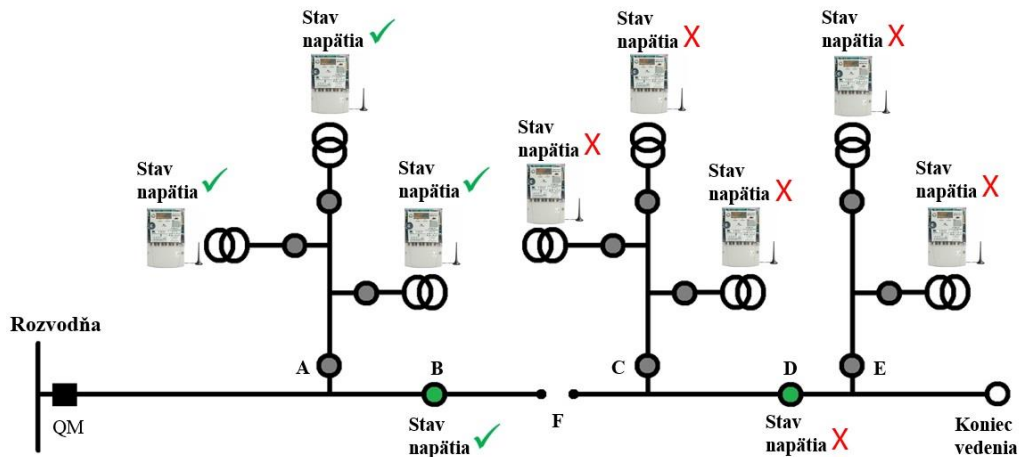
Rozptýlená výroba má vplyv na elektrické veličiny ako v NN sieti, tak samozrejme aj vo VN sieti. Symetrizuje napäťové a prúdové pomery, čím zhoršuje podmienky lokalizácie poruchy s prerušenou fázou pomocou navrhnutých kritérií a technológií. Aj napriek jej vplyvu je naďalej možné využívať nasledovné pomery pre lokalizáciu porúch vo VN sieti:

- U_2/U_0 z VN U_f za miestom poruchy.
- I_2/I_0 a I_2/I_1 na ochrane vývodu, resp. telemetrii DO ÚO – práve tieto telemetrie môžu byť veľmi nápomocné pri vyváženej situácii za miestom poruchy s ohľadom na zdroj a záťaž, nakoľko sú bližšie k zdrojom a zmena príslušných pomerov môže byť väčšia ako na vývodovej ochrane. Problém spočíva v tom, že prúdová nesymetria vzniká ako pred miestom poruchy, tak aj za ním.
- Odporúčam nastaviť pomer I_2/I_1 ako ďalšiu ochrannú funkčnosť na rozptýlených zdrojoch. Tým, že zdroje sú v bezporuchovej prevádzke silne symetrické, tak je možné ísť s kritériom nižšie – 10 % a čas 1s.

Treba určite vnímať fakt, že rozptýlená výroba je prevažne množinou malých zdrojov do výkonu 1 MW (ide o mäkké zdroje v porovnaní s tvrdou sieťou), ktoré len s veľmi malou pravdepodobnosťou dosiahnu vyvážení stav so záťažou za miestom poruchy. Navyše väčšina porúch s prerušením fázy je predchádzaná medzifázovým skratom, ktorý jednoznačne rozbehne jestvujúci systém chránenia pôsobiaci na HRM. Úplne vylúčiť pravdepodobnosť udržania zdroja avšak nemôžeme, takže k tomuto problému treba pristupovať a riešiť ho, a to najmä pri väčších zdrojoch.

4.1.13 Hrubý a jemný spôsob lokalizácie úseku s poruchou

Do procesu hrubého vymedzenia tejto poruchy vstupuje ochrana vývodu a telemetrie nasadené v rámci silovej technológie na vedení (DO ÚO, resp. DO TS), a to prostredníctvom kritérií zo zložkových prúdov – I_2/I_0 , I_2/I_1 a napäťových kritérií – zmena absolútnej hodnoty U_{zdr} , U_2/U_1 z U_{zdr} , U_2/U_1 , resp. U_2/U_0 z U_f . PDS si prešli kampaňami nasadenia IMS na prahu TS – centrálné meranie. Vzhľadom na to, že poruchy s prerušenou fázou významne ovplyvňujú napäťové pomery v NN sústave za miestom poruchy, tak tento fakt je možné využiť pre jemnejšiu (presnejšiu) lokalizáciu úseku s poruchou – dopytovaním sa na napätia z centrálnych meraní [14].



Obr. 14 Princíp hrubej a jemnej lokalizácie poruchy s prerušenou fázou [14]

Princíp lokalizácie poruchy na obr. 31 je z pohľadu dispečerskej obsluhy v zásade jednoduchý a je vysvetlený s aplikovaním napät'ového kritéria:

- Porucha (prerušenie) je v mieste s názvom „F“.
- Na hrubé vymedzenie úseku s poruchou na vedení poslúžia telemetrie DO ÚO prvkov s názvom „B“ a „D“, kde B by poruchu nesignalizoval, zatiaľ čo D áno. Takto získa dispečerská obsluha obraz o hrubom vymedzení úseku s poruchou s ohľadom na bežné vzájomné vzdialenosti týchto prvkov (10 a viac km, resp. min 5 km).
- Dispečerská obsluha by následne dopytovala centrálné merania v TS za DO ÚO B.
- Porucha sa vo všeobecnosti nachádza medzi prvou TS, ktorá už meria silne nesymetrické napätia na NN strane a poslednou, ktorá má napätia ešte v norme – porucha je indikovaná medzi DO ÚO B a odbočkou z vedenia „C“.

Vyššie popísaným princípom sa porucha lokalizuje aj momentálne, s tým rozdielom, že merania napätí v NN sieti realizuje prevádzkový personál fyzicky priamo v TS. Je zrejmé, aký čas sa ušetrí pri lokalizácii poruchy s prerušenou fázou využitím IMS. Proces oslovovania je možné automatizovať, napr. po OZ-och na vedeniach, keď najčastejšie dochádza k prerušeniu fázového vodiča. Ihneď po úspešnom OZ-te získa dispečerská obsluha obraz o tom, či je na vedení všetko v poriadku vrátane odbočiek. Úskalím tejto metódy, a v zásade napät'ovej metódy ako takej, je pokiaľ dôjde k poruche v úseku medzi odbočkou „E“ a koncovým ÚO (ten spravidla býva s DO ale bez merania elektrických veličín) – tzv. „slepé miesta“. V takomto prípade poruchu nebude signalizovať nič – môže ju nahlásiť človek idúci okolo volaním na poruchovú linku, resp. sa porucha prejaví zapnutím koncového ÚO, resp. pri pochôdzke. Je tu ešte jedna možnosť – koncový DO ÚO je samozrejme vyzbrojený napájacím transformátorom, na ktorom sa sleduje prítomnosť U_{Zdr} – to by sa pri takejto poruche mohlo stratiť (poklesnúť), čo samozrejme bude signalizované. Opäť sú tu ale 2 problémy – tento transformátor je a priori iba na jednej strane vedenia a navyše musí byť prerušená zrovna jedna z fáz, ku ktorým je pripojený. Vzhľadom na technologické možnosti IMS je všeobecne aplikovateľné kritérium zmeny absolútnej hodnoty napätí, a to formou nastavenia prahu mimo normy ($\pm 10\%$ nominálneho napätia). Niektoré typy IMS okrem veľkosti vyhodnocujú aj uhol – čiže teoreticky by bolo možné aplikovať zložkové kritériá, avšak veľkosť a uhol sú ukladané v rámci IMS do separátnych registrov – reálna aplikácia je teda sťažená o odčítanie týchto registrov (možnú zotrvačnosť na poslednú uloženú hodnotu) a v neposlednom rade treba vnímať fakt, že len veľmi obmedzené množstvo vyrábaných typov priamo vyhodnocuje zložkové veličiny – čiže výpočet by musel robiť napr. RIS (SCADA) alebo iný systém, ktorý dopytuje dáta z IMS pre potreby lokalizácie porúch.

4.1.14 Záverečné doplnenia

K všetkým navrhovaným napät'ovým kritériám je nutné uviesť, že menia filozofiu určenia úseku s poruchou – doposiaľ bolo u dispečerskej obsluhy zvykom, že poruchy ako napr. nadprúd / skrat, resp. jedнопólová zemná porucha sú signalizované za prvkami – smerom ku koncu vedenia. Napät'ové kritérium poukazuje na poruchu smerom k napájacej elektrickej stanici – platí samozrejme pri radiálnom spôsobe prevádzky, ktorý je na VN úrovni v našich podmienkach zabezpečený. Pri nastavovaní

časových parametrov jednotlivých kritérií treba brať ohľad na fakt, že niektoré vedenia sú v tzv. vypínačom pláne zemných ochrán, čo znamená, že po nastavenom časovom oneskorení zemná ochrana pôsobí na vypínač a vedenie s poruchou je vypnuté. Pri niektorých typoch porúch s prerušením fázy môže táto ochrana pôsobiť, a pôsobila by samozrejme korektne. V tomto ohľade neodporúčam moc tlačiť na časové nastavenia navrhovaných ochranných kritérií a zosúladiť ich s nastavením zemnej ochrany vývodu, ale navrhujem vykonať skúšobné zapnutie vedenia s poruchou pri vypnutej automatike pripnutia odporníka – vtedy budú mať všetky ochranné kritéria dostatočný čas na zapôsobenie a dispečerská obsluha bude mať zároveň možnosť osloviť centrálnu merania na jemné určenie úseku s poruchou. Pred začatím procesu lokalizácie poruchy s prerušenou fázou postupnými skúšobnými zapnutiami vývodu s poruchou odporúčam prepnúť režim automatiky ladenia zhášacej tlmivky do ručnej regulácie – napomôže to korektnému pôsobeniu / signalizácii všetkých odporúčaných kritérií, resp. ak tlmivka medzičasom naladila na nový stav, tak ju ručne doladiť naspäť do stavu pred poruchou. Táto zásada by mala platiť všeobecne aj pri lokalizácii jedнопólovej zemnej poruchy. Pomerné kritériá z prúdov, resp. napätí v rámci telemetrií na DO ÚO – na prvý pohľad by mohlo byť výhodné mať na DO ÚO aktívne ochranné, signalizačné funkcionality aj z prúdov a napätí pre pokrytie všetkých možných scenárov, treba avšak vnímať výhodu jednotného štandardu bez ohľadu na aktuálne zapojenie siete, filozofiu kritérií ako takých – ktorým smerom ochranná funkcionality poukazuje na poruchu, a síce či sa porucha nachádza za prvkom, resp. pred ním. Totiž napät'ové kritérium, ako už bolo spomenuté, poukazuje jednoznačne na poruchu pred prvkom smerom k napájajúcej elektrickej stanici, zatiaľ čo prúdové kritérium môže poukazovať na poruchu za, resp. pred prvkom – už spomenutá nevýhoda prúdového kritéria z hľadiska všeobecnej aplikovateľnosti. Okrem iného je nevýhodou merania prúdov na DO ÚO, že pri nízkych hodnotách (nízkom zaťažení) je ich chyba väčšia. Ďalší fakt je, že pokiaľ je DO ÚO s meraním zrovna v niektorej situácii vypnutý (netečie cez neho prúd). Napät'ové kritériá sa teda javia ako všeobecne aplikovateľné. Pripnutie odporníka ovplyvní napät'ové aj prúdové kritériá samozrejme aj vrátane pomerných. Tento fakt je potrebné zohľadniť pri nastaveniach časových oneskorení jednotlivých navrhnutých kritérií.

Konkrétne odporúčané nastavenie hodnôt pri niektorých kritériách je potrebné v reálnej prevádzke aktívne sledovať, vyhodnocovať a samozrejme v prípade potreby vykonať ich úpravu, aby sme predišli falošným pôsobeniam / signalizáciám.

Prínosy dizertačnej práce pre prax:

- a) Kompletné porovnanie stavu naladenia zhášacej tlmivky a zodpovedajúceho dopadu na napät'ové a prúdové pomery vo VN sieti – tlmivka by mala byť preladená.
- b) Porovnanie vplyvu podladeného a preladeného stavu naladenia zhášacej tlmivky na napät'ové pomery v NN distribučnej sieti za miestom poruchy – podladený stav môže spôsobiť prepätie na rozdiel od preladeného.
- c) Analýza vplyvu R_p na priebeh kombinovaných porúch s prerušením fázy (prerušená fáza a spojenie so zemou v I fáze ako tzv. viacnásobne nesymetrie) a v rámci simulácií s ohľadom na preladený a podladený stav naladenia zhášacej tlmivky.
- d) Porovnanie a zhrnutie rozdielov medzi klasickou jedнопólovou, pričnou poruchou (zemným spojením) a poruchami s prerušenou fázou.
- e) Analýza vplyvu rozptýlenej výroby na identifikáciu (lokalizáciu) týchto porúch v rámci simulácie. Analyzovaná je robustnosť ochranných kritérií poukazujúcich na poruchu s prerušenou fázou pri rozptýlenej výrobe. Záverom je že niektoré skúmané (navrhnuté) ochranné kritériá sú lepšie, resp. robustnejšie a nezávislé od rozptýlenej výroby.
- f) Analýza využitia IMS pre efektívnejšiu lokalizáciu porúch s prerušenou fázou.
- g) Na základe rešeršu a analýzy zo simulácií, resp. meraní, sú navrhnuté ochranné a signalizačné kritériá pre identifikáciu a lokalizáciu porúch s prerušenou fázou – vývodové ochrany a telemetrie smart prvkov. Je poukázané na nevhodnosť niektorých v praxi využívaných kritérií a do celkového súboru odporúčaných kritérií chránenia je zahrnutý komplexný uhol pohľadu dispečerskej obsluhy.
- h) Z analýzy priebehov veličín v rámci simulácií je navrhnuté kritérium, prostredníctvom ktorého je možné odlišiť spätne napájanú zemnú poruchu od prerušenia bez dotyku so zemou (kombinovanú poruchu od základnej).

- i) Zo simulácií, meraní a priebehov veličín z reálnych porúch sú navrhnuté na úpravu, resp. doplnenie algoritmy v regulátoroch zhášacích tlmiviek a celková technologická zmena merania týchto regulátorov.
- j) Meraním vplyvu kapacitnej nesymetrie v reálnej sieti boli v praxi overené východiská z teórie a simulácií. Taktiež bol experimentálne overený pozitívny vplyv pripnutia odporníka na priebeh U_f pri poruche s prerušenou fázou.
- k) Realizáciou merania vplyvu prerušenia fázy na VN strane DTr bola potvrdená možnosť využitia IMS na lokalizáciu tohto typu poruchy vzhľadom na vzniknutú napätovú nesymetriu v príslušnej NN sieti.

4.2 Odporúčania pre ďalšiu prácu

- Skúmať vplyv pripnutia odporníka na navrhnuté ochranné kritériá.
- Analyzovať činnosť šuntovania (uzemňovania postihnutej fázy na rozvodni) pri poruchách s prerušenou fázou, vzhľadom na napätové a prúdové pomery za poruchou.
- Analyzovať napätové pomery za miestom poruchy v izolovaných a nízko impedančne uzemnených sieťach.

Záver

Nebezpečné prepätia, ku ktorým dochádzalo v reálnych distribučných sieťach, napr. aj v sústave VVN [28] alebo VN [24], vrátane VN siete Západoslovenskej distribučnej, a. s. viedlo k potrebe hlbšej analýzy a pochopeniu problematiky porúch s prerušením fázového vodiča, kde tieto typy porúch majú určitú podobnosť s klasickou jedнопólovou zemnou poruchou, no na druhej strane sa významne odlišujú. Táto dizertačná práca ukázala, že pri poruchách s prerušením fázového vodiča sú napätové pomery vo VN a NN distribučnej sústave významne závislé od záťaže za miestom poruchy, a to aj v závislosti od toho, či ide o mierne nesymetrickú alebo silne nesymetrickú záťaž – celé napätie uzla U_N je v prípade týchto porúch, okrem ďalších veličín, aj funkciou záťaže [24]. Ide o významný rozdiel oproti klasickej jedнопólovej zemnej poruche, pri ktorej je U_N závislé od – sumárnych priečných parametrov celej siete (kapacitný a zvodový prúd), naladenia tlmivky (nastaveného prúdu tlmivky) a odporu poruchy, resp. odporu pripínaného odporníka – tento typ poruchy je navyše nezávislý od záťaže a v zásade aj nezávislý od miesta poruchy. Vo všetkých poruchových scenároch je analyzovaný vplyv prevádzky naladenia tlmivky – podladený a preladený stav. Nad rámec téz tejto dizertačnej práce bol analyzovaný vplyv R_P – odporu v mieste poruchy, ktorý je pre technickú prax veľmi kľúčový. V rámci práce je taktiež analyzovaný vplyv rozptýlenej výroby, pripojenej za miestom poruchy s prerušením fázy, a jej vplyv na pomery v sieti za miestom prerušenia. Teória a simulácie sú doplnené o reálne merania niektorých typov porúch. S ohľadom na zistenia zo simulácií a meraní sú navrhnuté opatrenia ako z pohľadu prevádzkovania distribučnej sústavy (tlmivka a DTr), tak aj z pohľadu chránenia siete a samozrejme v neposlednom rade z hľadiska procesu lokalizácie týchto typov porúch. Zistenia a odporúčania tejto dizertačnej práce môžu napomôcť PDS z pohľadu spôsobu prevádzkovania naladenia zhášacích tlmiviek. Taktiež sú zistenia a odporúčania nápomocné pre VN dispečerskú obsluhu, resp. prevádzkový personál pri lokalizovaní týchto typov porúch. Návrhy v rámci tejto práce zrejme vytvoria dopyt po doplnení nových algoritmov, najmä s ohľadom na regulátory zhášacích tlmiviek, resp. naštartujú proces technologickej zmeny z hľadiska meraných veličín z pohľadu spomenutých regulátorov tlmiviek.

Použitá literatura

- [1] Roberts J., Hector J. Altuve, Hou D., „Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems,“ [online]. 2001. 27th Annual Western Protective Relay Conference. [cit. 2019-12-01]. Dostupné na internete: <https://static.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6123.pdf?v=20151125-184914>
- [2] Shipp D., Angelini F.J., „Characteristics of different power systems neutral grounding techniques: fact and fiction,“ *Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference*, s. 107-116, 8-9 May 1991. [cit. 2019-12-01]. ISBN 0-7803-0053-X.
- [3] Grym R., Hochman P., Bermann J., Machoň J., Cichoň B., *Chránění II*. Havířov: Irena Satinská – IRIS, 2004. 305 strán. ISBN 80-903540-0-9.
- [4] Winter K. M., „Swedish Distribution Networks – a New Method for Earthfault Protection in Cable – and Overhead Systems,“ *5th International Conference on Developments in Power System Protection*, s. 268-270, 30 March – 2 April 1993. [cit. 2019-12-01]. ISBN 0-85296-559-1.
- [5] ABB, *Distribution Automation Handbook Section*, Section 3 Elements of power distribution systems, [online]. 2013, [cit. 2019-12-01]. Dostupné na internete: <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRS757294&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [6] Guldbrand A., „Earth faults in extensive cable networks“, [online]. 2009. Licentiate's thesis, Lund University. [cit. 2019-12-01]. ISBN 978-91-88934-49-9. Dostupné na internete: <https://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1057.pdf>
- [7] Horák M., *Systémy chránenia a automatizácie distribučných elektrických sietí 22 kV*. Banská Bystrica: PRO, s.r.o., 2011. 124 strán. ISBN 978-80-89057-37-5.
- [8] Pernica D., „Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení,“ [online]. 2011. Dizertačná práca, Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2019-13-01]. Dostupné na internete: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=43120
- [9] Trojánek Z., Hájek J., Kvasnica P., *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1987. 312 strán. 1. vydanie
- [10] Reiss L., Malý K., Pavlíček Z., *Teoretická elektroenergetika II*. Bratislava: Nakladateľstvo ALFA, 1971. 440 strán. 1 vydanie.
- [11] Procházka K., *Vybrané problémy provozu distribučních sítí VN*, VÚE Brno, 1992, 64 strán.
- [12] Hadáček Z., „Analýza provozu uzlu sítě 22 kV vzhledem k jednofázovým zemním poruchám,“ [online]. Diplomová práca, Západočeská univerzita v Plzni. [cit. 2019-01-05]. Dostupné na internete: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/3944/1/DP%20Hadacek%20Zdenek%202012%20-%20Analyza%20provozu%20uzlu%20site%2022%20kV%20vzhledem%20k%20jednofazovym%20zemnim%20porucham.pdf>
- [13] Tesařová M., Štroblová M., *Průmyslová elektroenergetika*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. 154 strán. 1. vydanie. ISBN 80-7082-703-3.
- [14] Škumát T., Eleschová Ž., „Open Phase Fault Localization in a Medium Voltage Distribution Grid Using Smart Meters,“ *20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*, 15-17 May 2019 Kouty nad Desnou, s. 1-6. ISBN 978-1-7281-1333-3.

- [15] Li L., Redfern M. A., „A Review of Techniques to Detect Downed Conductors in Overhead Distribution Systems,“ *Developments in Power System Protection*, 9-12 April 2001, s. 169-172. ISBN 0-85296-732-2.
- [16] Calhoun H. et al., „Development and Testing of an Electro-Mechanical Relay to Detect Fallen Distribution Conductors,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 6, June 1982, s. 1643-1650.
- [17] Jeerings D. I., Linders J. R., „A Practical Protective Relay for Down-Conductor Faults,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 2, April 1991, s. 565-574.
- [18] Norouzi A., „Open Phase Conditions in Transformers Analysis and Protection Algorithm,“ *66th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, TX, USA, 8-11 April 2013, s. 1-14.
- [19] Bjerkan E., Høidalen H. K., Hernes J. G., „Reliable Detection of Downed and Broken Conductors,“ *19th International Conference on Electricity Distribution*, 21-24 May 2007 Vienna, Austria, s. 1-4.
- [20] Lau S. K., Ho S. K., „Open-Circuit Fault Detection in Distribution Overhead Power Supply Network,“ *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 7, no. 1, 2017, s. 269-275.
- [21] Garcia et al., „Down – Conductor Fault Detection and Location via a Voltage Based Method for Radial Distribution Networks,“ *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 152, no. 2, March 2005, s. 180-184
- [22] Faubel U., „Broken Conductor Detection with SIPROTEC 7SJ80,“ Application Example for SIPROTEC Devices, [online]. [cit. 2019-11-06]. Dostupné na internete: http://sm-industry.ru/titan_img/ecatalog/7SJ80_Appl_Broken_Conductor_Detection.pdf
- [23] Rungseevijitprapa W., Pongthavornasawad A., „A Novel Detection System for Broken Distribution Conductor on Radial Scheme,“ *21st International Conference on Electricity Distribution*, 6-9 June 2011 Frankfurt, Germany, s. 1-4.
- [24] Kalyuzhny A., „Analysis of Temporary Overvoltages During Open-Phase Faults in Distribution Networks With Resonant Grounding,“ in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 420-427, Feb. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2327074.
- [25] Kvasnica P., *Vybrané problémy elektrizačnej sústavy – uzemňovanie uzla rozvodných sietí*, Edičné stredisko SVŠT, Bratislava 1981, s. 89.
- [26] Willheim R., Waters M., *Neutrak Grounding in High-Voltage Transmission*, New York, USA: Elsevier, 1956, s. 669.
- [27] Koudelka J., Topolánek D., Toman P., Fabian M., „Analysis of fault condition caused by phase interruption of HV overhead line,“ *CIREN – 26th International Conference on Electricity Distribution*, 20-23 September 2021 Madrid, s. 1-5, paper 0815.
- [28] Gustavsen B., Walseth A. J., "A Case of Abnormal Overvoltages in a Petersen Grounded 132 Kv System Caused by Broken Conductor," in *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, no. 9, pp. 63-63, Sept. 2002, doi: 10.1109/MPER.2002.4312608.

Publikácie autora

- [1] Škumát T., Skúsenosti so systémom lokalizácie porúch, ČK CIREC Tábor, 5-7 November 2017, s. 1-9.
- [2] Škumát T., Eleschová Ž., Open phase fault localization in a medium voltage distribution grid using smart meters, 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, 15-17 Máj 2019 Kouty nad Desnou, s. 1-6. ISBN 978-1-7281-1333-3.
- [3] Škumát T., Eleschová Ž., Open phase fault localization in a medium voltage distribution grid using smart meters. In KOZÁKOVÁ, A. ELITECH'19. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 29 Máj 2019, s. 1-6. ISBN 978-80-227-4915-2.
- [4] Horák M., Škumát T., Earth fault location in compensated MV network using a hand-held measuring device, 25th International Conference on Electricity Distribution, 3-6 Jún CIREC 2019 Madrid. Liege: AIM, 2019, s. 1-5. ISBN 978-2-9602415-0-1.
- [5] Horák M., Škumát T., Electric arc during power system fault is not pure resistance. Why does it contain „inductance“?, 26th International Conference on Electricity Distribution, 20-23 September CIREC 2021 (Online). Liege: AIM, 2021, s. 1-5.
- [6] Škumát T., Eleschová Ž., Negative sequence current as a breaker failure protection for medium voltage grids, Przegląd elektrotechniczny, 97. s. 136-143. ISSN 0033-2097, Scopus, WoS.

Publikácie autora k téme dizertačnej práce

- [1] Škumát T., Eleschová Ž., Open phase fault localization in a medium voltage distribution grid using smart meters, 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, 15-17 Máj 2019 Kouty nad Desnou, s. 1-6. ISBN 978-1-7281-1333-3.
- [2] Škumát T., Eleschová Ž., Open phase fault localization in a medium voltage distribution grid using smart meters. In KOZÁKOVÁ, A. ELITECH'19. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 29 Máj 2019, s. 1-6. ISBN 978-80-227-4915-2.
- [3] Škumát T., Eleschová Ž., Negative sequence current as a breaker failure protection for medium voltage grids, Przegląd elektrotechniczny, 97. s. 136-143. ISSN 0033-2097, Scopus, WoS.
- [4] Horák M., Škumát T., Earth fault location in compensated MV network using a hand-held measuring device, 25th International Conference on Electricity Distribution, 3-6 Jún CIREC 2019 Madrid. Liege: AIM, 2019, s. 1-5. ISBN 978-2-9602415-0-1.