

Ing. Tomáš Spielböck

Autoreferát dizertačnej práce

**LOKALIZÁCIA PORÚCH NA ELEKTRICKÝCH VEDENIACH
POMOCOU SYNCHRONIZOVANÝCH FÁZOROV**

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

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**

v študijnom odbore: 5.2.30. Elektroenergetika

Miesto a dátum: 08.07.2019

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Tomáš Spielböck

Autoreferát dizertačnej práce

**LOKALIZÁCIA PORÚCH NA ELEKTRICKÝCH VEDENIACH
POMOCOU SYNCHRONIZOVANÝCH FÁZOROV**

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

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**

Miesto a dátum: 08.07.2019

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia.

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

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

Školiteľ: **Doc. Ing. Anton Beláň, PhD.**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **Doc. Ing. Peter Bracíník, PhD.**
Žilinská Univerzita
Fakulta elektrotechniky a informačných technológií
Univerzitná 1, 010 26 Žilina
Slovenská republika

Doc. Ing. Petr Toman, PhD.
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
Ústav elektroenergetiky
61600 Brno – Poruba Technická 3082/12, Královo Pole
Česká republika

Autoreferát bol rozoslaný :.....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o hod

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

.....
Prof. Dr. Ing. Miloš Oravec, PhD.
dekan fakulty

Obsah

Úvod.....	4
Tézy dizertačnej práce	5
1. Vonkajšie silové vedenie	6
1.1. Jednoduché vonkajšie silové vedenie.....	6
1.2. Dvojité vonkajšie silové vedenie	9
1.3. Prúdové a napätové pomery na vonkajšom silovom vedení – ustálený chod	10
2. Lokalizátor porúch – algoritmy, súčasný stav	13
2.1. Jednostranný lokalizátor porúch, postavený na impedančnom princípe	13
2.2. Dvoj a viacstranný lokalizátor porúch, postavený na impedančnom princípe.....	18
2.3. Zhrnutie.....	22
3. Presná časová synchronizácia a meranie synchronizovaných fázorov	23
3.1. Presná časová synchronizácia	23
3.2. DFT – Diskrétna Fouriérova transformácia, vzorkovanie a zaznamenávanie meraných veličín	23
3.3. Zhrnutie.....	24
4 Impedančný lokalizátor porúch, zohľadňujúci topológiu vedenia – návrh algoritmov.....	25
4.1 Jednostranný lokalizátor porúch, zohľadňujúceho topológiu vedenia a zdrojové impedancie – návrh algoritmu	25
4.1.1 Neprestriedané vedenie – prúdové a napätové pomery pri poruche	25
4.1.2 Návrh algoritmu na výpočet vzdialenosti poruchy	27
4.1.3 Porovnanie navrhovaného algoritmu s používanými metódami impedančných lokalizátorov pri poruche.....	29
4.1.4 Navrhovaný algoritmus – použitie pre nehomogénne vedenia.....	36
4.2 Dvoj a viacstranný lokalizátor porúch, zohľadňujúceho topológiu vedenia a zdrojové impedancie – návrh algoritmu	37
4.2.1 Dvojstranný lokalizátor porúch - nesynchronizované merané veličiny	40
4.2.2 Dvojstranný lokalizátor porúch - synchronizované merané veličiny	41
5. Technické prevedenie výpočtu vzdialenosti poruchy	43
Záver.....	44
Literatúra.....	45
Publikácie autora príbuzné k téme dizertačnej práce.....	46

Úvod

Určenie vzdialenosti poruchy (od príslušnej elektrickej stanice) s čo najväčšou presnosťou, pri skrate na vonkajšom silovom vedení, je dôležitý údaj, ktorý má vplyv na čas vyhľadania skutočného miesta, následne odstránenie príčiny poruchy a celkovo doby kedy je vedenie mimo prevádzky.

Aj keď v súčasnosti vieme miesto poruchy najpresnejšie určiť pomocou vlnového lokalizátora, lokalizácia poruchy na impedančnom princípe (t.j. vzdialenosť poruchy je úmerná vypočítanej impedancii, resp., reaktancii) ostáva stále ako „základná“ a v súčasnosti najrozšírenejšia metóda určenia miesta poruchy. Dôvody sú ekonomické (vlnový lokalizátor je ďalšia investícia a navyše pre presné meranie musia byť zariadenia na oboch koncoch vedenia) ako aj technické (vlnové lokalizátory potrebujú presnú časovú synchronizáciu a taktiež pri poruche na vedení môžu byť z nejakého dôvodu nefunkčné). Lokalizátor porúch, pracujúci na impedančnom princípe, je súčasťou takmer každej digitálnej ochrany. V prípade samostatne pracujúcej ochrany (týchto ochrán je väčšina) ide o jednostranný lokalizátor porúch. V prípade ochrán oboch (viacerých) koncov vedenia vzájomne spolupracujúcich (pováčšine ide o rozdielové ochrany vedenia), môžu tieto využívať aj dvojstranný (viacstranný) lokalizátor porúch. Viacstranné lokalizátory porúch však v praxi nie sú veľmi využívané. Používané lokalizátory porúch sú opísané v kapitole 3.

Hlavný nedostatok jestvujúcich lokalizátorov porúch (či už jednostranných alebo viacstranných) je, že vychádza z predpokladu ideálne prestriedaného vedenia a vzdialenosť poruchy počíta s uvažovaním symetrických zložiek vedenia. Tieto lokalizátory nezohľadňujú topológiu vedenia, t.j., že impedancie jednotlivých fáz, resp. poruchových slučiek sú rôzne. Medzi ďalšie nedostatky algoritmov je, že nezohľadňujú vplyv vedení v čiastočnom súbehu a, v prípade jednostranných lokalizátorov, nedokážu zohľadniť úplne presne vplyv protiahle strany na výpočet vzdialenosti poruchy.

Táto práca si dáva za úlohu zohľadniť vyššie uvedené faktory ovplyvňujúce presnosť výpočtu vzdialenosti poruchy a navrhnuť spôsob (algoritmus) presnejšieho určenia miesta poruchy (ako pre jednostranný tak aj pre viacstranný lokalizátor porúch), ktorý pracuje na dištančnom princípe.

Tézy dizertačnej práce

Cieľom tejto dizertačnej práce je vytvorenie algoritmu (spôsobu a postupu) výpočtu vzdialenosti poruchy na vonkajších silových vedeniach na dištančnom princípe, ktorý počíta vzdialenosť na dištančnom princípe a ktorý berie do úvahy topológiu samotného vedenia (rôzne typy a počet fázových a zemných lán, usporiadanie vodičov, sled fáz) ako aj faktory ovplyvňujúce výpočet vzdialenosti (odpor poruchy, kapacita vedenia)

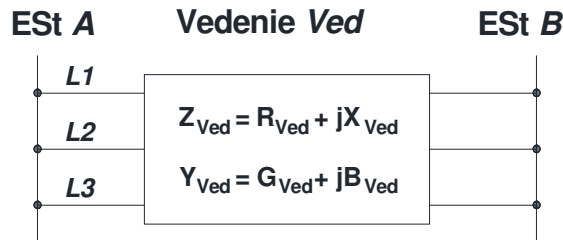
Postup

1. Metodika výpočtu vzdialenosti poruchy dvojitého vedenia a vedenia z čiastočným súbehom.
2. Určenie fázového posunu medzi meranými analógovými veličinami na oboch (viacerých) koncoch vedenia, s použitím synchronizovaných fázorov.
3. Určenie fázového posunu medzi meranými analógovými veličinami na oboch (viacerých) koncoch vedenia, bez použitia synchronizovaných fázorov.
4. Algoritmus výpočtu vzdialenosti poruchy z meraných hodnôt analógových veličín

1. Vonkajšie silové vedenie

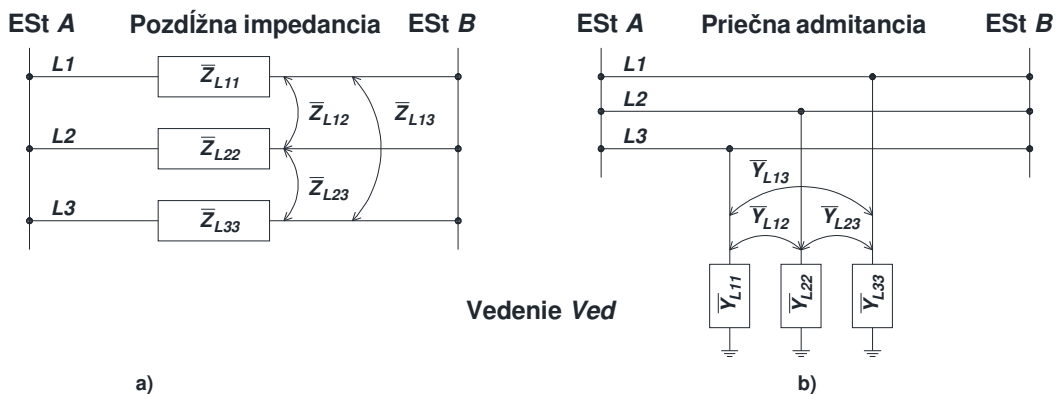
1.1. Jednoduché vonkajšie silové vedenie

Majme jednoduché trojfázové vedenie V_{ed} s dĺžkou l_{ved} medzi elektrickými stanicami (rozvodňami) A a B (obr. 1.1.). Označme jednotlivé fázy $L1$, $L2$ a $L3$.



Obr. 1.1 Jednoduché vedenie medzi rozvodňami A a B

Elektrické parametre takéhoto vedenia ako pasívneho prvku elektrizačnej sústavy, vieme vyjadriť pomocou pozdĺžnej impedancie Z_{Ved} , ktorá sa skladá z pozdĺžnej rezistencie R_{Ved} a reaktancie X_{Ved} – $Z_{Ved} = R_{Ved} + jX_{Ved}$, a priečnej admitanciu Y_{Ved} , ktorá sa skladá s priečného zvodu G_{Ved} a priečnej susceptancie B_{Ved} – $Y_{Ved} = G_{Ved} + jB_{Ved}$ [1]. Keďže ide o trojfázový elektromagnetický systém, každá fáza má nielen „vlastnú“ impedanciu (admitanciu) ale aj „vzájomnú“ medzi príslušnou fázou a zvyšnými dvoma fázami. Pozdĺžnu impedanciu a priečnu admitanciu silového vedenia (obr. 1.2 a), resp. 1.2 b)) je potom možné vyjadriť pomocou impedančnej, resp. admitančnej, matice [3x3].



Obr. 1.2 a) Pozdĺžna impedancia b) Priečna admitancia vedenia V_{ed}

Pre pozdĺžnu impedanciu vedenia platí [1]

$$Z_{Ved} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{L11} & \bar{Z}_{L12} & \bar{Z}_{L13} \\ \bar{Z}_{L21} & \bar{Z}_{L22} & \bar{Z}_{L23} \\ \bar{Z}_{L31} & \bar{Z}_{L32} & \bar{Z}_{L33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{L11} + jX_{L11} & R_{L12} + jX_{L12} & R_{L13} + jX_{L13} \\ R_{L21} + jX_{L21} & R_{L22} + jX_{L22} & R_{L23} + jX_{L23} \\ R_{L31} + jX_{L31} & R_{L32} + jX_{L32} & R_{L33} + jX_{L33} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Kde

\bar{Z}_{Lxx} – vlastná pozdĺžna impedancia fázy x

\bar{Z}_{Lxy} – vzájomná pozdĺžna impedancia medzi fázami x a y , pričom $\bar{Z}_{Lxy} = \bar{Z}_{Lyx}$

Vo všeobecnosti

Obdobne, pre priečnu admitanciu vedenia platí [1]

$$\mathbf{Y}_{\text{Ved}} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{L11} & \bar{Y}_{L12} & \bar{Y}_{L13} \\ \bar{Y}_{L21} & \bar{Y}_{L22} & \bar{Y}_{L23} \\ \bar{Y}_{L31} & \bar{Y}_{L32} & \bar{Y}_{L33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{L11} + jB_{L11} & G_{L12} + jB_{L12} & G_{L13} + jB_{L13} \\ G_{L21} + jB_{L21} & G_{L22} + jB_{L22} & G_{L23} + jB_{L23} \\ G_{L23} + jB_{ca} & G_{L32} + jB_{L32} & G_{L33} + jB_{L33} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Kde

\bar{Y}_{Lxx} – vlastná priečna admitancia fázy x

\bar{Y}_{Lxy} – vzájomná priečna admitancia medzi fázami x a y , pričom $\bar{Y}_{Lxy} = \bar{Y}_{Lyx}$

Impedančnú maticu trojfázového vedenia \mathbf{Z}_{Ved} vieme previesť, pomocou Fortescueovej metódy, na tzv. „symetrické“ zložky [1] – nulová, súsledná a spätná –, čím dostanem maticu pozdĺžnej impedancie vedenia $\mathbf{Z}_{\text{Ved}_012}$, zapísanú v zložkovej sústave, pričom platí

$$\mathbf{Z}_{\text{Ved}_012} = \mathbf{T}^{-1} \times \mathbf{Z}_{\text{Ved}} \times \mathbf{T} \quad (1.3)$$

Matica \mathbf{T} je transformačná matica a \mathbf{T}^{-1} je inverzná transformačná matica (1.4)

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}^{-1} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Kde a je operátor a platí

$$a = e^{j2 \times \pi / 3} \text{ resp. } a^2 = e^{j4 \times \pi / 3}$$

Maticu pozdĺžnej impedancie vedenia $\mathbf{Z}_{\text{Ved}_012}$ je možné s využitím vzťahov (1.3) a (1.4) vyjadriť

$$\mathbf{Z}_{\text{Ved}_012} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{00} & \bar{Z}_{01} & \bar{Z}_{02} \\ \bar{Z}_{10} & \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} \\ \bar{Z}_{20} & \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Kde

\bar{Z}_{00} – netočivá (nulová) zložka impedancie vedenia – $\bar{Z}_{0\text{Ved}} = \mathbf{R}_{0\text{Ved}} + j\mathbf{X}_{0\text{Ved}}$

\bar{Z}_{11} – súsledná zložka impedancie vedenia – $\bar{Z}_{1\text{Ved}} = \mathbf{R}_{1\text{Ved}} + j\mathbf{X}_{1\text{Ved}}$

\bar{Z}_{22} – spätná zložka impedancie vedenia – $\bar{Z}_{2\text{Ved}} = \mathbf{R}_{2\text{Ved}} + j\mathbf{X}_{2\text{Ved}}$

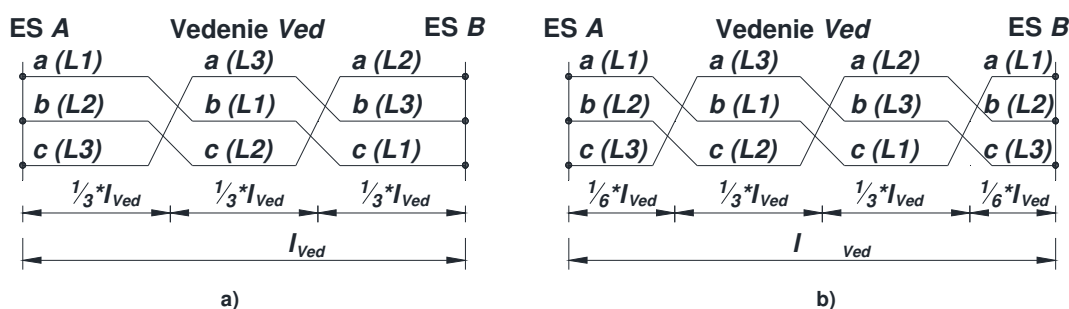
Súsledná a spätná zložka impedancie trojfázového vedenia sú rovnaké $\bar{Z}_{1\text{Ved}} = \bar{Z}_{2\text{Ved}}$. $\bar{Z}_{01}, \bar{Z}_{02}, \bar{Z}_{10}, \bar{Z}_{12}, \bar{Z}_{20}, \bar{Z}_{21}$ sú impedancie vzájomných väzieb medzi jednotlivými symetrickými zložkami. Obdobne je to s priečnou admitanciou vedenia \mathbf{Y}_{Ved} , ktorú vieme tým istým spôsobom previesť na admitanciu vedenia, zapísanú v zložkovej sústave $\mathbf{Y}_{\text{Ved}_012}$

$$\mathbf{Y}_{\text{Ved}_012} = \mathbf{T}^{-1} \times \mathbf{Y}_{\text{Ved}} \times \mathbf{T} \quad (1.6)$$

$$\mathbf{Y}_{\text{Ved}_012} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{00} & \bar{Y}_{01} & \bar{Y}_{02} \\ \bar{Y}_{10} & \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} \\ \bar{Y}_{20} & \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Kde $\bar{Y}_{11} = \bar{Y}_{22} = \bar{Y}_{1\text{Ved}} = \bar{Y}_{2\text{Ved}}$

Vo všeobecnosti (vzhľadom na usporiadanie fázových vodičov a zemných lán na stožiaroch, resp. stožiaroch) je matica pozdĺžnej impedancie \mathbf{Z}_{Ved} nesymetrická. Inak povedané $\bar{Z}_{L11} \neq \bar{Z}_{L22} \neq \bar{Z}_{L33}$ a $\bar{Z}_{L12} \neq \bar{Z}_{L23} \neq \bar{Z}_{L31}$. Rovnako je nesymetrická aj matica priečnej admitancie. Toto má vplyv na kvalitu elektrickej energie – napäťová a prúdová nesymetria – a zvýšené straty na danom vedení. Na zmiernenie, resp. odstránenie, vyššie spomenutej nesymetrie, sa na silových vedeniach prenosovej sústavy distribučnej sústavy robia tzv. „zákruty“, resp. prestriedanie fázových vodičov. V prípade úplne prestriedaného vedenia, (ďalej iba „prestriedaného“) bude každá fáza na príslušnej pozícii (na stožiaroch rovnakého typu) rovnakú vzdialenosť na dĺžke vedenia. V prípade jednoduchého trojfázového vedenia to v praxi znamená 3 alebo 4 zákruty (viď obr. 1.3).



Obr. 1.3 Úplne prestriedané vedenie a) tri zákruty b) štyri zákruty

Potom maticu pozdĺžnej impedancie a priečnej admitancie je možné vyjadriť nasledovne

$$\mathbf{Z}_{\text{Ved}_p} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{\text{vlást}} & \bar{Z}_{\text{vzáj}} & \bar{Z}_{\text{vzáj}} \\ \bar{Z}_{\text{vzáj}} & \bar{Z}_{\text{vlást}} & \bar{Z}_{\text{vzáj}} \\ \bar{Z}_{\text{vzáj}} & \bar{Z}_{\text{vzáj}} & \bar{Z}_{\text{vlást}} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}_{\text{Ved}_p} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{\text{vlást}} & \bar{Y}_{\text{vzáj}} & \bar{Y}_{\text{vzáj}} \\ \bar{Y}_{\text{vzáj}} & \bar{Y}_{\text{vlást}} & \bar{Y}_{\text{vzáj}} \\ \bar{Y}_{\text{vzáj}} & \bar{Y}_{\text{vzáj}} & \bar{Y}_{\text{vlást}} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Kde

$$\bar{Z}_{\text{vlást}} = \frac{1}{3} \times l_{\text{Ved}} \times (\bar{Z}_{L11} + \bar{Z}_{L22} + \bar{Z}_{L33}) \quad \bar{Y}_{\text{vlást}} = \frac{1}{3} \times l_{\text{Ved}} \times (\bar{Y}_{L11} + \bar{Y}_{L22} + \bar{Y}_{L33})$$

$$\bar{Z}_{\text{vzáj}} = \frac{1}{3} \times l_{\text{Ved}} \times (\bar{Z}_{L12} + \bar{Z}_{L23} + \bar{Z}_{L31}) \quad \bar{Y}_{\text{vzáj}} = \frac{1}{3} \times l_{\text{Ved}} \times (\bar{Y}_{ab} + \bar{Y}_{ac} + \bar{Y}_{bc})$$

Symetrické zložky prestriedaného vedenia je možné určiť pomocou vzťahu 1.3, resp. 1.6, s využitím vzťahu 1.4 a 1.7

$$\mathbf{Z}_{\text{Ved}_p_012} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{0\text{Ved}} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_{1\text{Ved}} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{2\text{Ved}} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}_{\text{Ved}_p_012} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{0\text{Ved}} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Y}_{1\text{Ved}} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Y}_{2\text{Ved}} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

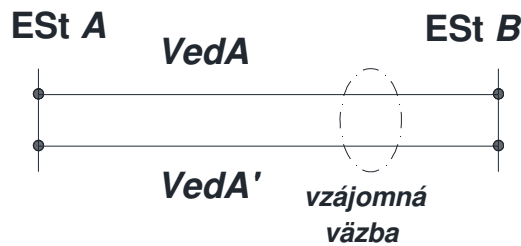
V prípade úplne prestriedaného vedenia je impedančná matica symetrických zložiek diagonálna, uplatňujú sa iba členy hlavnej diagonály, t.j. netočivá, súsledná a spätná zložka.

Členy mimo hlavnej diagonály (vzájomné väzby symetrických zložiek) sú nulové. V tomto prípade symetrické zložky (a počítanie s nimi) plne nahradzujú matice pozdĺžnej impedancie $Z_{Ved,p}$ a priečnej admitancie $Y_{Ved,p}$ vedenia.

Zaveďme ďalej termín „ideálne prestriedané“ vedenie. Pod „ideálne prestriedaným“ vedením budeme, pre ďalšie výpočty, uvažovať s matematickým modelom vedenia, ktoré je prestriedané „na každej svojej časti“, t.j. impedancia a admitancia akejkoľvek časti m bude $Z_{m_Ved,p} = m \times Z_{Ved,p}$, $Z_{m_Ved,p,012} = m \times Z_{Ved,p,012}$, $Y_{m_Ved,p} = m \times Y_{Ved,p}$ a $Y_{m_Ved,p,012} = m \times Y_{Ved,p,012}$

1.2. Dvojité vonkajšie silové vedenie

Majme dve paralelné trojfázové vedenia $VedA$ a $VedA'$ medzi elektrickými stanicami A a B (viď obr. 1.4), Tieto paralelné vedenia označovať ako dvojité vedenie $VedAA'$. V porovnaní s jednoduchým silovým vedením, sa v prípade dvojitého vedenia okrem „vlastnej“ pozdĺžnej impedancie (priečnej admitancie) každého vedenia, uplatňuje aj „vzájomná“ pozdĺžna impedancia (priečna admitancia) – vzájomná väzba – ktorou sa vedenia navzájom ovplyvňujú (viď obr. 1.4).



Obr. 1.4 Dvojité vedenie medzi rozvodňami A a B

Potom pozdĺžnu impedanciu takého dvojitého je možné potom vyjadriť nasledovne [1]

$$Z_{VedAA'} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \bar{Z}_{L11} & \bar{Z}_{L12} & \bar{Z}_{L13} & \bar{Z}_{L11'} & \bar{Z}_{L12'} & \bar{Z}_{L13'} \\ \bar{Z}_{L21} & \bar{Z}_{L22} & \bar{Z}_{L23} & \bar{Z}_{L21'} & \bar{Z}_{L22'} & \bar{Z}_{L23'} \\ \bar{Z}_{L31} & \bar{Z}_{L32} & \bar{Z}_{L33} & \bar{Z}_{L31'} & \bar{Z}_{L32'} & \bar{Z}_{L33'} \\ \hline \bar{Z}_{L1'1} & \bar{Z}_{L1'2} & \bar{Z}_{L1'3} & \bar{Z}_{L1'1'} & \bar{Z}_{L1'2'} & \bar{Z}_{L1'3'} \\ \bar{Z}_{L2'1} & \bar{Z}_{L2'2} & \bar{Z}_{L2'3} & \bar{Z}_{L2'1'} & \bar{Z}_{L2'2'} & \bar{Z}_{L2'3'} \\ \bar{Z}_{L3'1} & \bar{Z}_{L3'2} & \bar{Z}_{L3'3} & \bar{Z}_{L3'1'} & \bar{Z}_{L3'2'} & \bar{Z}_{L3'3'} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} Z_{AA} & Z_{AA'} \\ \hline Z_{A'A} & Z_{A'A'} \end{array} \right] \quad (1.10)$$

Kde

Z_{AA} – „vlastná“ impedancia vedenia $VedA$, matica [3x3]

$Z_{A'A'}$ – „vlastná“ impedancia vedenia $VedA'$, matica [3x3]

$Z_{AA'}$ – „vzájomná“ impedancia medzi $VedA$ a $VedA'$, matica [3x3]

$Z_{A'A}$ – „vzájomná“ impedancia medzi $VedA'$ a $VedA$, matica [3x3], pričom $Z_{A'A} = Z_{AA'}^T$

Obdobným spôsobom je možné vyjadriť priečnu admitanciu dvojitého vedenia

$$Y_{VedAA'} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{L11} & \bar{Y}_{L12} & \bar{Y}_{L13} & | & \bar{Y}_{L11'} & \bar{Y}_{L12'} & \bar{Y}_{L13'} \\ \bar{Y}_{L21} & \bar{Y}_{L22} & \bar{Y}_{L23} & | & \bar{Y}_{L21'} & \bar{Y}_{L22'} & \bar{Y}_{L23'} \\ \bar{Y}_{L31} & \bar{Y}_{L32} & \bar{Y}_{L33} & | & \bar{Y}_{L31'} & \bar{Y}_{L32'} & \bar{Y}_{L33'} \\ \hline \bar{Y}_{L1'1} & \bar{Y}_{L1'2} & \bar{Y}_{L1'3} & | & \bar{Y}_{L1'1'} & \bar{Y}_{L1'2'} & \bar{Y}_{L1'3'} \\ \bar{Y}_{L2'1} & \bar{Y}_{L2'2} & \bar{Y}_{L2'3} & | & \bar{Y}_{L2'1'} & \bar{Y}_{L2'2'} & \bar{Y}_{L2'3'} \\ \bar{Y}_{L3'1} & \bar{Y}_{L3'2} & \bar{Y}_{L3'3} & | & \bar{Y}_{L3'1'} & \bar{Y}_{L3'2'} & \bar{Y}_{L3'3'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{AA} & | & Y_{AA'} \\ \hline Y_{A'A} & | & Y_{A'A'} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Podobne ako pri jednoduchom silovom vedení, aj v prípade dvojitého vedenia je možné impedanciu (admitanciu), s využitím Fortescueovej metódy, vyjadriť pomocou symetrických zložiek [1].

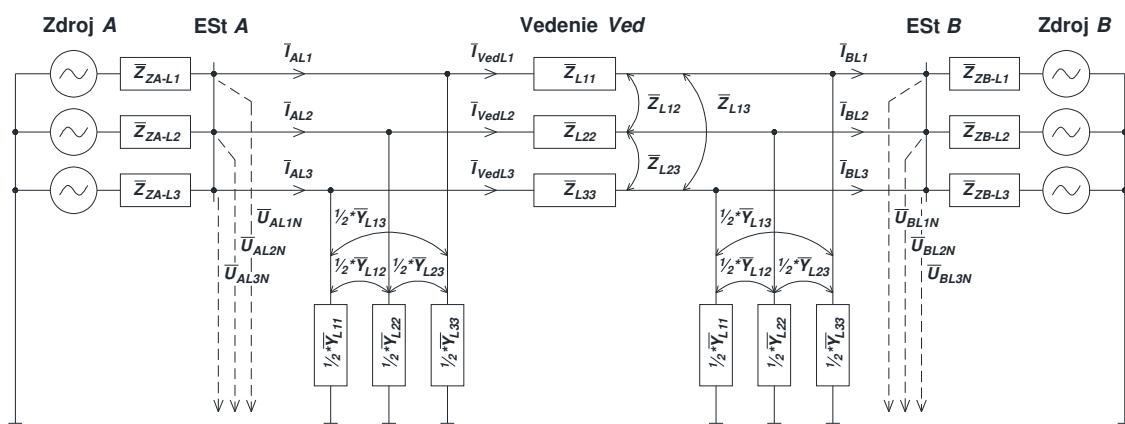
$$Z_{VedAA'_{012}} = \begin{bmatrix} Z_{AA_{012}} & | & Z_{AA'_{012}} \\ \hline Z_{A'A_{012}} & | & Z_{A'A'_{012}} \end{bmatrix} \quad Y_{VedAA'_{012}} = \begin{bmatrix} Y_{AA_{012}} & | & Y_{AA'_{012}} \\ \hline Y_{A'A_{012}} & | & Y_{A'A'_{012}} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Z rovnakých dôvodov, ako v prípade jednoduchého vedenia sa aj na paralelných vedeniach realizujú zákruty [5]. Výsledná impedancia (admitancia) dvojitého vedenia je potom, rovnako pri jednoduchom vedení, súčtom impedancií (admitancií) jednotlivých častí. Rovnakým spôsobom, ako pri jednoduchom vedení, vieme vypočítať symetrické zložky impedancie (admitancie) dvojitého vedenia [1,5]. V prípade prestriedaného dvojitého vedenia sa zo vzájomných impedancií (admitancií) uplatňuje iba zložka vzájomnej netočivej impedancie (admitancie) \bar{Z}_{0Mved} (\bar{Y}_{0Mved}), súsledná a spätná zložka vzájomnej impedancie (admitancie) sú nulové. Pre vzájomnú netočivú zložku impedancie platí [1]

$$\bar{Z}_{00'} = \bar{Z}_{00} = \frac{\sum_{x=1}^3 \sum_{y'=1}^3 Z_{Lxy'}}{9} = \bar{Z}_{vzajAA'} = \bar{Z}_{vzajA'A} = \bar{Z}_{0Mved} = R_{0Mved} + jX_{0Mved} \quad (1.13)$$

1.3. Prúdové a napät'ové pomery na vonkajšom silovom vedení – ustálený chod

Prúdové a napät'ové pomery na vonkajšom silovom vedení, ktoré je v prevádzke presne popisujú vlnové rovnice vedenia [2,4].



Obr. 1.5 π článok – trojfázové vedenie

Pre praktické výpočty prúdových a napät'ových pomerov na vedení sa používajú tzv. náhradné články [2,3]. Pre účely tejto práce, bude na výpočet prúdových a napät'ových

pomerov na vedení používaný ako náhradný článok (v prípade uvažovania s priečnou admitanciou) tzv. π článok [2,3], ktorý vykazuje dostatočnú presnosť pri dĺžkach vedení do 300 km [2]. Náhradný π článok pre jednoduché vedenie je zobrazený na obr. 1.5. Potom rovnice pre ustálený chod jednoduchého trojfázového vedenia, pri použití náhradného π článku a počítania s impedančnou a admitančnou maticou (obr. 1.5), budú nasledovné

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_A &= \left(\mathbf{JM}_{33} + \frac{1}{2} \times \mathbf{Z}_{Ved} \times \mathbf{Y}_{Ved} \right) \times \mathbf{U}_B + \mathbf{Z}_{Ved} \times \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_A &= \left(\mathbf{Y}_{Ved} + \frac{1}{4} \times \mathbf{Y}_{Ved} \times \mathbf{Z}_{Ved} \times \mathbf{Y}_{Ved} \right) \times \mathbf{U}_B + \left(\mathbf{JM}_{33} + \frac{1}{2} \times \mathbf{Z}_{Ved} \times \mathbf{Y}_{Ved} \right) \times \mathbf{I}_B \end{aligned} \quad (1.14)$$

Kde

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_A &= [\bar{U}_{AL1N} \quad \bar{U}_{AL2N} \quad \bar{U}_{AL3N}]^T - \text{napätie na stanici } A \\ \mathbf{U}_B &= [\bar{U}_{BL1N} \quad \bar{U}_{BL2N} \quad \bar{U}_{BL3N}]^T - \text{napätie na stanici } B \\ \mathbf{I}_A &= [\bar{I}_{AL1} \quad \bar{I}_{AL2} \quad \bar{I}_{AL3}]^T - \text{prúd na vedení, vytekajúci zo stanice } A \\ \mathbf{I}_B &= [\bar{I}_{BL1} \quad \bar{I}_{BL2} \quad \bar{I}_{BL3}]^T - \text{prúd na vedení, vtekajúci do stanice } B \\ \mathbf{I}_{Ved} &= [\bar{I}_{VedL1} \quad \bar{I}_{VedL2} \quad \bar{I}_{VedL3}]^T - \text{prúd pretekajúci vedením } Ved \\ \mathbf{JM}_{33} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{jednotková matica } 3 \times 3 \end{aligned}$$

Vzťah 1.14 je možné (pre naše účely) zapísať v tvare

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_A &= \mathbf{U}_B + \mathbf{A} \times \mathbf{U}_B + \mathbf{B} \times \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_A &= \mathbf{C} \times \mathbf{U}_B + \mathbf{I}_B + \mathbf{D} \times \mathbf{I}_B \end{aligned} \quad (1.15)$$

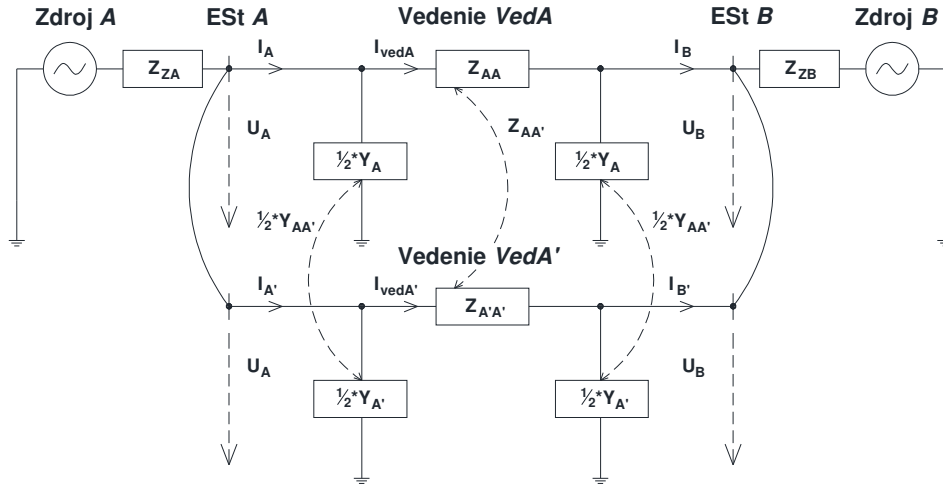
Kde

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \frac{1}{2} \times \mathbf{Z}_{Ved} \times \mathbf{Y}_{Ved} & \mathbf{B} &= \mathbf{Z}_{Ved} \\ \mathbf{C} &= \mathbf{Y}_{Ved} + \frac{1}{4} \times \mathbf{Y}_{Ved} \times \mathbf{Z}_{Ved} \times \mathbf{Y}_{Ved} & \mathbf{D} &= \frac{1}{2} \times \mathbf{Z}_{Ved} \times \mathbf{Y}_{Ved} = \mathbf{A} \end{aligned} \quad (1.16)$$

Elektrické ochrany silových vedení, z praktických dôvodov, priečnu admitanciu pri mnohých ochranných funkciách (aj v prípade lokalizátora porúch) neberú do úvahy. Prúdové a napätové pomery na vedení, pri zanedbanej priečnej admitancie budú potom nasledovné $\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_B = \mathbf{I}_{Ved}$

$$\mathbf{U}_A = \mathbf{Z}_{Ved} \times \mathbf{I}_{Ved} + \mathbf{U}_B \quad (1.17)$$

Náhradný π článok pre dvojité vedenie je zobrazený na obr. 1.6. Vyjadriť napätové a prúdové pomery na dvojitom vedení, pri uvažovaní s priečnou admitanciou, podľa obr. (1.6), nie je úplne jednoduché. S istým zjednodušením, $\mathbf{Y}_{AA} \cong \mathbf{Y}_{A'A'}$ a zanedbaním vzájomnej priečnej admitancie $\mathbf{Y}_{AA'} = \mathbf{0}$, je možné, s ohľadom na (1.14), (1.10) a (1.11) π článok pre dvojité vedenie vyjadriť pomocou vzťahu 1.18



Obr. 1.6 π článok – dvojité vedenie

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ - \\ \mathbf{U}_{A'} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \mathbf{JM}_{33} & \mathbf{0} \\ - & - & - \\ \mathbf{0} & \mathbf{JM}_{33} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \times \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA} & \mathbf{Z}_{AA'} \\ - & - & - \\ \mathbf{Z}_{A'A} & \mathbf{Z}_{A'A'} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{Y}_{A'A'} \\ - & - & - \\ \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{Y}_{A'A'} \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} \mathbf{U}_B \\ - \\ \mathbf{U}_{B'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA} & \mathbf{Z}_{AA'} \\ - & - & - \\ \mathbf{Z}_{A'A} & \mathbf{Z}_{A'A'} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{I}_B \\ - \\ \mathbf{I}_{B'} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ - \\ \mathbf{I}_{A'} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{0} \\ - & - & - \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{A'A'} \end{bmatrix} + \frac{1}{4} \times \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{Y}_{AA} \\ - & - & - \\ \mathbf{Y}_{A'A'} & \mathbf{Y}_{A'A'} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA} & \mathbf{Z}_{AA'} \\ - & - & - \\ \mathbf{Z}_{A'A} & \mathbf{Z}_{A'A'} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{Y}_{A'A'} \\ - & - & - \\ \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{Y}_{A'A'} \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} \mathbf{U}_B \\ - \\ \mathbf{U}_{B'} \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} \mathbf{JM}_{33} & \mathbf{0} \\ - & - & - \\ \mathbf{0} & \mathbf{JM}_{33} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \times \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{Y}_{AA} \\ - & - & - \\ \mathbf{Y}_{A'A'} & \mathbf{Y}_{A'A'} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA} & \mathbf{Z}_{AA'} \\ - & - & - \\ \mathbf{Z}_{A'A} & \mathbf{Z}_{A'A'} \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} \mathbf{I}_B \\ - \\ \mathbf{I}_{B'} \end{bmatrix}$$

Prúdové a napätové pomery pre vedenie *VedA* môžeme napísať v tvare

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_A &= \mathbf{U}_B + \mathbf{AA} \times \mathbf{U}_B + \mathbf{AA}' \times \mathbf{U}_{B'} + \mathbf{BB} \times \mathbf{I}_B + \mathbf{BB}' \times \mathbf{I}_{B'} \\ \mathbf{I}_A &= \mathbf{CC} \times \mathbf{U}_B + \mathbf{CC}' \times \mathbf{U}_{B'} + \mathbf{I}_B + \mathbf{DD} \times \mathbf{I}_B + \mathbf{DD}' \times \mathbf{I}_{B'} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Kde

$$\begin{aligned} \mathbf{AA} &= \frac{1}{2} \times \mathbf{Z}_{AA} \times \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{AA}' &= \frac{1}{2} \times \mathbf{Z}_{AA'} \times \mathbf{Y}_{A'A'} \\ \mathbf{BB} &= \mathbf{Z}_{AA} & \mathbf{BB}' &= \mathbf{Z}_{AA'} \\ \mathbf{CC} &= \mathbf{Y}_{AA} + \frac{1}{4} \times \mathbf{Y}_{AA} \times \mathbf{Z}_{AA} \times \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{CC}' &= \frac{1}{4} \times \mathbf{Y}_{AA} \times \mathbf{Z}_{AA'} \times \mathbf{Y}_{A'A'} \\ \mathbf{DD} &= \frac{1}{2} \times \mathbf{Y}_{AA} \times \mathbf{Z}_{AA} & \mathbf{DD}' &= \frac{1}{2} \times \mathbf{Y}_{AA} \times \mathbf{Z}_{AA'} \end{aligned} \quad (1.20)$$

V prípade zanedbania priečnej admittance, bude náhradná schéma dvojitého vedenia a napätové a prúdové pomery na ňom, s ohľadom na (1.17), vyzerat nasledovne.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ - \\ \mathbf{U}_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{AA} & \mathbf{Z}_{AA'} \\ - & - & - \\ \mathbf{Z}_{A'A} & \mathbf{Z}_{A'A'} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ - \\ \mathbf{I}_{A'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{U}_B \\ - \\ \mathbf{U}_B \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

2. Lokalizátor porúch – algoritmy, súčasný stav

2.1. Jednostranný lokalizátor porúch, postavený na impedančnom princípe

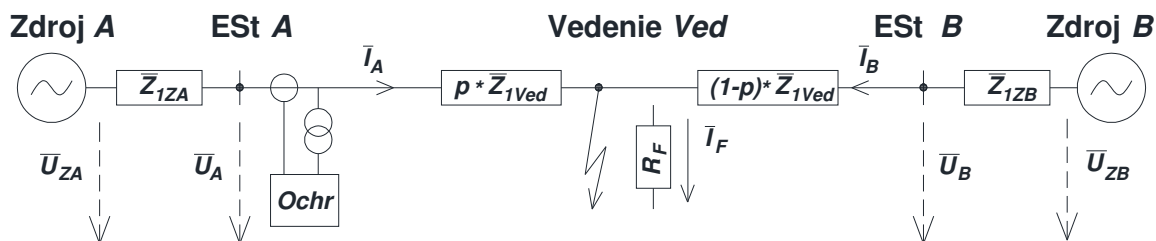
Jednostranný lokalizátor porúch vedenia prenosovej alebo distribučnej sústavy (postavený na impedančnom princípe) je v súčasnosti integrovaný medzi ochrannými funkciami digitálnej ochrany vedenia [5, 6, 7]. Digitálna ochrana je umiestnená na elektrickej stanici na jednom z koncov (povedzme *A*) chráneného vedenia. Pomocou prístrojových (napäťových a prúdových) transformátorov meria ochrana fázové napätia ($\bar{U}_{AL1N}, \bar{U}_{AL2N}, \bar{U}_{AL3N}$) a prúdy $\bar{I}_{AL1}, \bar{I}_{AL2}, \bar{I}_{AL3}, \bar{I}_{AN}$ na príslušnom konci vedenia. V prípade dvojitého vedenia, meria digitálna ochrana navyše aj zemný prúd paralelného vedenia \bar{I}_{pAN} na danom konci (elektrická stanica *A*)

Pre nastavenie parametrov lokalizátora porúch (v digitálnej ochrane) sa používajú symetrické zložky impedancie chráneného vedenia – súsledná zložka $\bar{Z}_{1Ved} = R_{1Ved} + j \times X_{1Ved} [\Omega]$ a netočivá zložka $\bar{Z}_{0Ved} = R_{0Ved} + j \times X_{0Ved} [\Omega]$ – a dĺžka vedenia $l_{Ved} [\text{km}]$. V prípade dvojitého vedenia, sa navyše nastavuje ešte impedancia vzájomnej väzby – vzájomná netočivá impedancia $\bar{Z}_{0MVed} = R_{0MVed} + j \times X_{0MVed} [\Omega]$. Pri niektorých ochránach je potrebné navyše nastaviť súslednú zložku zdrojových impedancií $\bar{Z}_{1ZA} [\Omega]$ a $\bar{Z}_{1ZB} [\Omega]$ na oboch koncoch vedenia. Konkrétne nastavenie parametrov lokalizátora býva u jednotlivých zariadení rôzne. Priechu admitanciu ($\bar{Y}_{1Ved}, \bar{Y}_{0Ved}$) neberú jednostranné lokalizátory do úvahy.

Pre impedanciu zeme \bar{Z}_{ZemVed} platí

$$\bar{Z}_{ZemVed} = \frac{\bar{Z}_{0Ved} - \bar{Z}_{1Ved}}{3} \quad (2.1)$$

Jednostranný lokalizátor porúch (podobne ako dištančná ochrana) meria 6 poruchových slučiek. Tri jednofázové (*L1 – N, L2 – N, L3 – N*) a tri medzifázové (*L1 – L2, L2 – L3, L3 – L1*). Pri poruche určí lokalizátor príslušnú slučku a z meraných hodnôt napätí (*U*) a prúdov (*I*), a nastavených parametrov (**ParSet**), vypočíta lokalizátor porúch vzdialenosť poruchy – $l_{por} = f(\mathbf{U}, \mathbf{I}, \text{ParSet})$. V prípade dvojfázovej zemnej poruchy, lokalizátor vyberie medzifázovú slučku a v prípade trojfázovej poruchy predefinovanú medzifázovú slučku (napr. *L1 – L2*) [7,8]. Jednopolový model (jednoduchého) vedenia pri poruche (vo vzdialenosti *p* od elektrickej stanice *A*) je možné vo všeobecnosti zobrazit' nasledovne (obr. 1.2) [7]



Obr. 1.2 Model jednoduchého vedenia pri poruche

Norma [7], resp. jednotlivé algoritmy [5, 7], definujú napätie pri poruche \bar{U}_A , prúd pri poruche \bar{I}_A a rozdiel prúdu $\Delta \bar{I}_A$ (rozdiel medzi prúdom pri poruche a prúdom pred poruchou) – vid' Tab. 2.1

Poruchová slučka	Napätie \bar{U}_A	Prúd \bar{I}_A	Prúd $\Delta\bar{I}_A$
Jednofázová slučka ($Lx - N$)	\bar{U}_{ALxN}	$\bar{I}_{ALx} + \bar{k}_N \times \bar{I}_{AN}$	$\bar{I}_{ALx} - \bar{I}_{ALxPr}$
Medzifázová slučka ($Lx - Ly$)	$\bar{U}_{ALxN} - \bar{U}_{ALyN}$	$\bar{I}_{ALx} - \bar{I}_{ALy}$	$(\bar{I}_{ALx} - \bar{I}_{ALxPr}) -$ $(\bar{I}_{ALy} - \bar{I}_{ALyPr})$

Tab. 2.1 Definícia napätia \bar{U}_A , prúdov \bar{I}_A a $\Delta\bar{I}_A$

Pričom

$$\bar{k}_N = \frac{\bar{Z}_{ZemVed}}{\bar{Z}_{1Ved}} = \frac{\bar{Z}_{0Ved} - \bar{Z}_{1Ved}}{3 \times \bar{Z}_{1Ved}} + \frac{\bar{Z}_{0MVed}}{3 \times \bar{Z}_{1Ved}} \times \frac{\bar{I}_{pAN}}{\bar{I}_{AN}} \quad (2.2)$$

Kde

\bar{I}_{pAN} - zemný prúd paralelného vedenia

Napätie \bar{U}_A s ktorým uvažuje ochrana, resp. lokalizátor porúch, na elektrickej stanici **A** je možné vyjadriť

$$\bar{U}_A = m \times \bar{Z}_{1Ved} \times \bar{I}_A + R_F \times \bar{I}_F = p \times \bar{Z}_{1Ved} \times \bar{I}_A + R_F \times (\bar{I}_A + \bar{I}_B) \quad (2.3)$$

a) Metóda vypočítanej jednoduchej reaktancie

Metóda „jednoduchej reaktancie“ [6] vychádza z faktu, že prídavná impedancia v mieste poruchy je odporového charakteru (obr. 2.2). V prípade že prúdy \bar{I}_A a \bar{I}_B sú vo fáze (obr. 2.3a)), je vzdialenosť poruchy l_{por} úmerná vypočítanej reaktancii $Im\{\bar{Z}_{1Vyp}\}$. Relatívnu vzdialenosť poruchy p je možné vypočítať podľa

$$p = \frac{Im\{\bar{Z}_{1Vyp}\}}{Im\{\bar{Z}_{1Ved}\}} = \frac{Im\left\{\frac{\bar{U}_A}{\bar{I}_A}\right\}}{Im\{\bar{Z}_{1Ved}\}} \quad (2.4)$$

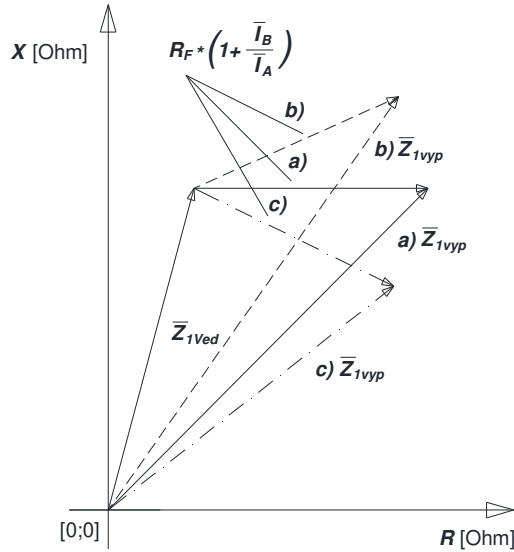
Skutočná vzdialenosť potom bude

$$l_{por} = p \times l_{ved} \quad (2.5)$$

Presnosť výpočtu tejto metódy je však silne ovplyvnená fázovým posunom prúdu \bar{I}_B oproti \bar{I}_A . Rovnicu (2.3) je možné upraviť

$$\frac{\bar{U}_A}{\bar{I}_A} = p \times \bar{Z}_{1Ved} + R_F \left(1 + \frac{\bar{I}_B}{\bar{I}_A}\right) \quad (2.6)$$

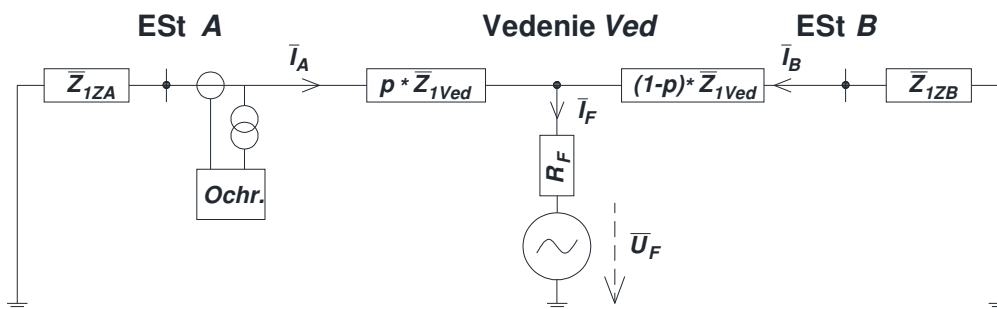
Potom pokiaľ $\varphi_{IA} \neq \varphi_{IB}$, tak $Im\{R_F(1 + \bar{I}_B/\bar{I}_A)\} \neq 0$. Vplyv odporu poruchy sa prejaví vo výpočte podľa rovnice (2.4) ako dodatočná reaktancia. Pokiaľ prúd \bar{I}_B zaostáva za prúdom \bar{I}_A bude vypočítaná reaktancia väčšia a lokalizátor porúch vypočíta väčšiu vzdialenosť poruchy ako je skutočná (obr. 2.3b)). Pokiaľ prúd \bar{I}_B predbieha prúd \bar{I}_A bude vypočítaná reaktancia menšia a lokalizátor porúch vypočíta menšiu vzdialenosť poruchy ako je skutočná (obr. 2.3c))



Obr. 2.3 Chyba pri výpočte metódou jednoduchej reaktancie

b) Metóda T. Takagiho – algoritmus bez použitia zdrojových impedancií

Algoritmus T. Takagiho [6,7,20] vylepšuje metódu výpočtu jednoduchej reaktancie tým, „eliminuje“ záťažový prúd z celkového poruchového prúdu – $\Delta \bar{I}_A = \bar{I}_A - \bar{I}_{APr}$. Metódou superpozície algoritmus „odpočíta“ od modelu sústavy pri poruche, stav pred poruchou. Vytvorí tak model sústavy tzv. „čistej poruchy“ [9] (obr. 2.4).



Obr. 2.4 Metóda T. Takagiho, model sústavy tzv. „čistej poruchy“

V tomto modeli sú zdrojové napätia vykrátené a jediné napätie, je napätie pred poruchou (\bar{U}_F) v mieste poruchy. Prúd v mieste poruchy je možné vyjadriť v tvare

$$\bar{I}_F = \left(\frac{\bar{Z}_{1ZA} + \bar{Z}_{1Ved} + \bar{Z}_{1ZB}}{(1-p) \times \bar{Z}_{1Ved} + \bar{Z}_{1ZB}} \right) \times \Delta \bar{I}_A = \frac{1}{\bar{D}_A} \times \Delta \bar{I}_A \quad (2.7)$$

Kde \bar{D}_A je koeficient rozdelenia prúdu pre elektrickú stanicu **A**. Pod dosadením rovnice (2.7) do rovnice (2.3) a vynásobením konjugovaným $\Delta \bar{I}_A^*$

$$\bar{U}_A \times \Delta \bar{I}_A^* = p \times \bar{Z}_{1Ved} \times \bar{I}_A \times \Delta \bar{I}_A^* + R_F \times \frac{1}{\bar{D}_A} \quad (2.8)$$

Zjednodušeným predpokladom tejto metódy je, že sústava je homogénna. To znamená že uhly zdrojových impedancií (\bar{Z}_{1ZA} , \bar{Z}_{1ZB}) sú rovnaké ako uhol impedancie vedenia $\varphi_{Z1ZA} =$

$\Phi_{Z_{1ZB}} = \Phi_{Z_{1Ved}}$. Potom distribučný faktor \bar{D}_A je reálne číslo a vzdialenosť poruchy je možné určiť s imaginárnych prvkov rovnice (2.8)

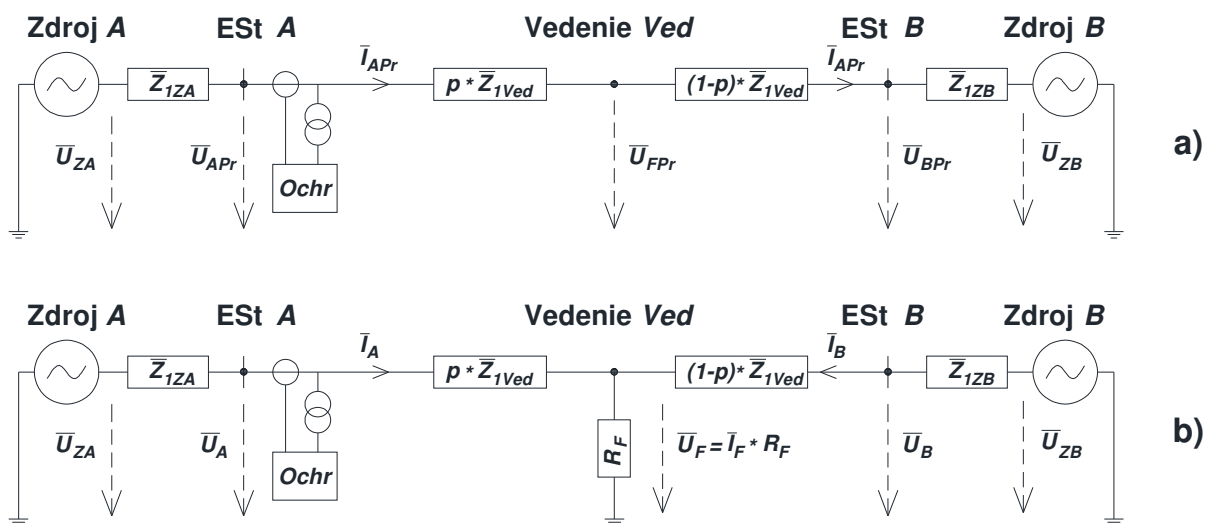
$$p = \frac{\text{Im}\{\bar{U}_A \times \Delta\bar{I}_A^*\}}{\text{Im}\{\bar{Z}_{1Ved} \times \bar{I}_A \times \Delta\bar{I}_A^*\}} \quad (2.9)$$

Modifikovaná Takagiho metóda [9] počíta vzdialenosť poruchy pomocou netočivých zložiek impedancie. Výhodou je, že ochrana používajúca tento algoritmus nepotrebuje poznať prúd pred poruchou. Nevýhoda, je, že algoritmus potrebuje vedieť netočivú zdrojovú impedanciu protiaľhlej stranu

c) Metóda L. Erikssona – algoritmus s použitím zdrojových impedancií

Metóda L. Erikssona [6,7,18] používa k výpočtu vzdialenosti poruchy súslednú zložku zdrojových impedancií oboch koncov vedenia. Tieto slúžia ku korektnému obrazu sústavy a eliminácii vplyvu protiaľhého konca pri odporovej poruche – tok prúdu \bar{I}_B cez odpor poruchy R_F , vid' rovnicu (2.3).

Podobne ako pri Takagiho metóde, algoritmus používa pri výpočte prúd \bar{I}_{APr} , ktorý tiekol vedením pred poruchou – obr. 2.5a). Pri poruche – obr. 2.5b) – algoritmus určí zmenu prúdu $\Delta\bar{I}_A = \bar{I}_A - \bar{I}_{APr}$, ktorý má vplyv na koeficient rozdelenia prúdu \bar{D}_A



Obr. 2.5 Metóda L. Erikssona, model vedenia a) Pred poruchou b) Počas poruchy

Relatívnu vzdialenosť poruchy p od elektrickej stanice **A**, algoritmus počíta podľa nasledujúceho vzťahu

$$p = \frac{\bar{U}_A - \frac{\bar{I}_{FA}}{\bar{D}_A} \times R_F}{\bar{I}_A \times \bar{Z}_{1Ved}} \quad (2.10)$$

Kde

\bar{I}_{FA} - zmena fázového prúdu spôsobeného poruchou. Pre zemné poruchy platí $\bar{I}_{FA} = 3/2 \times (\Delta\bar{I}_A - \bar{I}_0)$ a pre medzifázové poruchy $\bar{I}_{FA} = \Delta\bar{I}_A$, vid' Tab. 1

\bar{D}_A - distribučný faktor rozdelenia skratového prúdu pre miesto A – 2.11a) pre jednoduché vedenie, 2.11b) pre dvojité vedenia

$$\bar{D}_A = \frac{(1-p) \times \bar{Z}_{1Ved} + \bar{Z}_{1ZB}}{\bar{Z}_{1ZA} + \bar{Z}_{1ZB} + \bar{Z}_{1Ved}} \quad \text{a)} \quad (2.11)$$

$$\bar{D}_A = \frac{(1-p) \times (\bar{Z}_{1ZA} + \bar{Z}_{1ZB} + \bar{Z}_{1Ved}) + \bar{Z}_{1B}}{2 \times \bar{Z}_{1ZA} + 2 \times \bar{Z}_{1ZB} + \bar{Z}_{1Ved}} \quad \text{b)}$$

Po úprave je možné rovnicu (2.10) vyjadriť v tvare

$$p^2 - \bar{k}_1 \times p + \bar{k}_2 - \bar{k}_3 \times R_F = 0 \quad (2.12)$$

Kde

$$\begin{aligned} \bar{k}_1 &= \frac{\bar{U}_A}{\bar{I}_A \times \bar{Z}_{1Ved}} + \frac{\bar{Z}_{1ZB}}{\bar{Z}_{1Ved} + \bar{Z}_{ADD}} + 1 \\ \bar{k}_2 &= \frac{\bar{U}_A}{\bar{I}_A \times \bar{Z}_{1Ved}} \times \left(\frac{\bar{Z}_{1ZB}}{\bar{Z}_{1Ved} + \bar{Z}_{ADD}} + 1 \right) \\ \bar{k}_3 &= \frac{\bar{I}_{FA}}{\bar{I}_A \times \bar{Z}_{1Ved}} \times \left(\frac{\bar{Z}_{1ZA} + \bar{Z}_{1ZB}}{\bar{Z}_{1Ved} + \bar{Z}_{ADD}} + 1 \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Pričom $\bar{Z}_{ADD} = \bar{Z}_{1ZA} + \bar{Z}_{1ZB}$ pre paralelné vedenia

Rovnicu (2.12) je ďalej možné rozložiť na reálnu a imaginárnu časť, čo prináša dve rovnice s dvomi neznámymi (p a R_F). Následnou úpravou sa získava kvadratická rovnica s neznámou p . Hľadané riešenie je potom $p \in \langle 0; 1 \rangle$

d) Výpočet pri predpoklade rovnakej jednotkovej zemnej impedancie

Základom ďalšieho algoritmu [5,19], v prípade zemnej poruchy, je predpoklad homogénnej zemnej impedancie. To znamená, že prúdy \bar{I}_{AN} a \bar{I}_{BN} tečúce do oboch zdrojov, rovnako ako poruchový prúd \bar{I}_F , majú rovnaké uhly $\varphi_{IF} = \varphi_{IAN} = \varphi_{IBN} = \varphi_{IN}$. Lokalizátor porúch potom vypočíta reaktanciu poruchy podľa vzťahu

$$X_{vyp} = Z_{vyp} \times \frac{\sin(\varphi_k + \Delta\varphi)}{\sin(\varphi_{Z1Ved} + \Delta\varphi)} \times \sin(\varphi_{1Ved}) \quad (2.14)$$

Kde

$$\begin{aligned} Z_{vyp} &= \left| \frac{\bar{U}_{LxN}}{\bar{I}_{Lx} + \bar{k}_N \times \bar{I}_N + \bar{k}_M \times \bar{I}_{pN}} \right| & \Delta\varphi &= \varphi_{IN} - \varphi_k \\ \varphi_k &= \arg \left(\frac{\bar{U}_{LxN}}{\bar{I}_{Lx} + \bar{k}_N \times \bar{I}_N + \bar{k}_M \times \bar{I}_{pN}} \right) & \varphi_{Z1ved} &= \text{atan} \left(\frac{X_{1Ved}}{R_{1Ved}} \right) \\ \bar{k}_N &= \frac{\bar{Z}_{Zem_Ved}}{\bar{Z}_{1_Ved}} & \bar{k}_M &= \frac{\bar{Z}_{0M}}{\bar{Z}_{1_Ved}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Pri medzifázových poruchách počíta lokalizátor reaktanciu poruchy rovnako, ako dištančná ochrana, a to

$$X_{vyp} = \text{Im} \left\{ \frac{\bar{U}_{stALx} - \bar{U}_{stALy}}{\bar{I}_{VedLx} - \bar{I}_{VedLy}} \right\} \quad (2.16)$$

Vzdialenosť poruchy určí ochrana potom

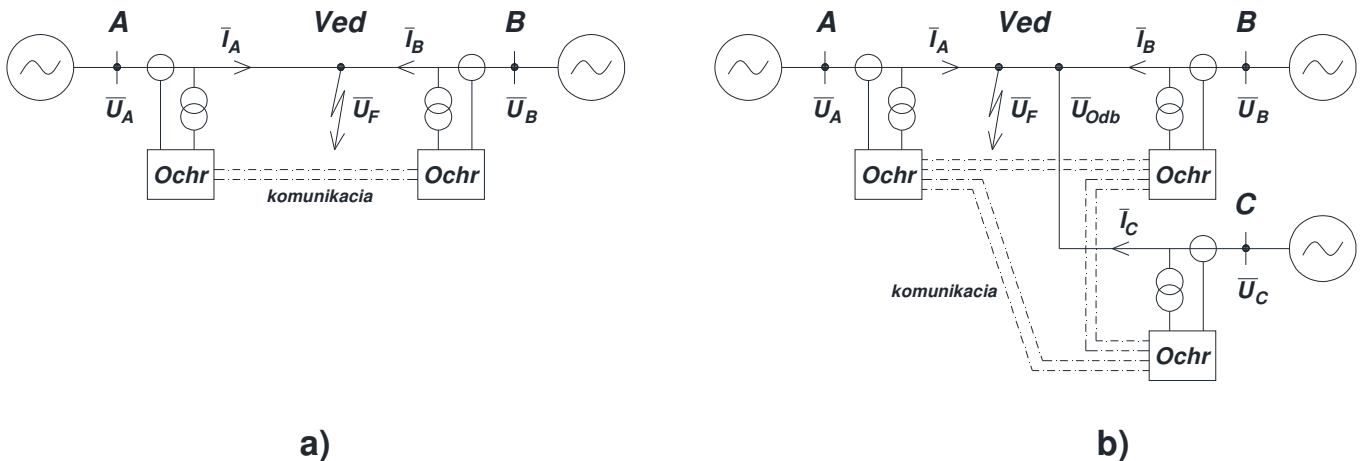
$$l_{por} = l_{ved} \times \frac{X_{Vyp}}{X_{1Ved}} \quad (2.17)$$

e) *Iné*

V [5] sú uvádzané ďalšie metódy jednostranných lokalizátorov porúch, ktoré sú však modifikáciou algoritmov spomenutých v tejto kapitole.

2.2. Dvoj a viacstranný lokalizátor porúch, postavený na impedančnom princípe

Dvoj a viacstranný lokalizátor porúch (integrováný medzi ochrannými funkciami digitálnej ochrany alebo ako samostatné zariadenie, resp. algoritmus mimo funkcií ktoré sú obsiahnuté v digitálnej ochrane) používa pre výpočet vzdialenosti poruchy tie isté merané hodnoty prúdov a napätí (v mieste inštalovania zariadenia – elektrická stanica *A*) a nastavené hodnoty symetrických zložiek parametrov vedenia ako jednostranný lokalizátor porúch (viď kap. 2.1.1 a)). Navyše, oproti jednostrannému lokalizátoru porúch, získava (musí získavať) dvoj a viacstranný lokalizátor príslušné (merané a/alebo počítané) údaje zo vzdialených koncov vedenia. Zariadenia na oboch (viacerých) koncoch musia vedieť spolu komunikovať (obr. 2.6)



Obr. 2.6 Komunikácia ochrán a) jednoduché vedenie b) odbočkové vedenie, všeobecná schéma

Vo všeobecnosti, pre poruchu na jednoduchom vedení (viď obr. 2.2) s ohľadom na 2.2 a 2.3 platí

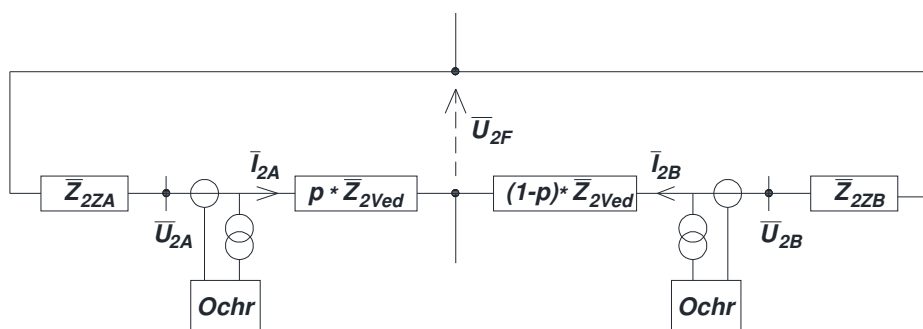
$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= p \times \bar{Z}_{1Ved} \times \bar{I}_A + R_F \times \bar{I}_F = p \times \bar{Z}_{1Ved} \times \bar{I}_A + R_F \times (\bar{I}_A + \bar{I}_B) \\ \bar{U}_B &= (1 - p) \times \bar{Z}_{1Ved} \times \bar{I}_B + R_F \times \bar{I}_F = (1 - p) \times \bar{Z}_{1Ved} \times \bar{I}_B + R_F \times (\bar{I}_A + \bar{I}_B) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Potom vzdialenosť poruchy p od elektrickej stanice A je možné vyjadriť

$$p = \frac{\bar{U}_A - \bar{U}_B - \bar{Z}_{1Ved} \times \bar{I}_B}{\bar{Z}_{1Ved} \times (\bar{I}_A + \bar{I}_B)} \quad (2.19)$$

a) Viacstranný lokalizátor porúch bez časovej synchronizácie merania

Algoritmus dvojstranného lokalizátora porúch [6] počíta vzdialenosť poruchy pomocou spätných zložiek. V prípade nesymetrickej poruchy na vedení Ved je sústava spätnej zložky načrtnutá na obr. 2.7



Obr. 2.7 Porucha na jednoduchom vedení, spätná zložka

Potom pre vzdialenosť p je možné (s ohľadom na 2.19) napísať

$$p = \frac{-\bar{U}_{2A} + \bar{U}_{2B} + \bar{Z}_{2Ved} \times \bar{I}_{2B}}{\bar{Z}_{2Ved} \times (\bar{I}_{2A} + \bar{I}_{2B})} \quad (2.20)$$

Keďže meranie analógových veličín protiľahlej strany nie je časovo synchronizované (meranie napätia \bar{U}_{2B} a prúdu \bar{I}_{2B} s pohľadu zariadenia umiestneného na stanici A), majú tieto hodnoty uhlovú chybu zodpovedajúcu času Δt . rovnicu (2.19) je potom možné vyjadriť

$$p = \frac{-\bar{U}_{2A} + \bar{U}_{2B} \times e^{2\pi f \times \Delta t} + \bar{Z}_{2Ved} \times \bar{I}_{2B} \times e^{2\pi f \times \Delta t}}{\bar{Z}_{2Ved} \times (\bar{I}_{2A} + \bar{I}_{2B} \times e^{2\pi f \times \Delta t})} \quad (2.21)$$

Po úprave rovnice (2.21) s ohľadom na obr. (2.7)

$$\bar{I}_{2B} \times e^{2\pi f \times \Delta t} = \frac{\bar{I}_{2A} \times \bar{Z}_{2A} + p \times \bar{Z}_{2Ved} \times \bar{I}_{2A}}{(\bar{Z}_{2ZB} + \bar{Z}_{2Ved}) - p \times \bar{Z}_{2Ved}} \quad (2.22)$$

Keďže $|\bar{I}_{2B} \times e^{2\pi f \times \Delta t}| = |\bar{I}_{2B}|$ tak

$$|\bar{I}_{2B}| = \frac{|\bar{I}_{2A} \times \bar{Z}_{2A} + p \times \bar{Z}_{2Ved} \times \bar{I}_{2A}|}{|(\bar{Z}_{2ZB} + \bar{Z}_{2Ved}) - p \times \bar{Z}_{2Ved}|} \quad (2.23)$$

Vzťah (2.23) je možné vyjadriť v tvare

$$|\bar{I}_{2B}| = \frac{|(a + jb) + p \times (c + jd)|}{|(e + jf) - p \times (g + jh)|} \quad (2.24)$$

Kde

$$\begin{aligned}\bar{I}_{2A} \times \bar{Z}_{2A} &= (a + jb) & \bar{I}_{2A} \times \bar{Z}_{2Ved} &= (c + jd) \\ \bar{Z}_{2ZB} + \bar{Z}_{2Ved} &= (e + jf) & \bar{Z}_{2Ved} &= (g + jh)\end{aligned}\quad (2.25)$$

Vzťah (2.24) je možné upraviť na kvadratickú rovnicu

$$A_1 \times p^2 + B_1 \times p + C_1 = 0 \quad (2.26)$$

Kde

$$\begin{aligned}A_1 &= |\bar{I}_{2B}|^2 \times (g^2 + h^2) - (c^2 + d^2) \\ B_1 &= -2 \times |\bar{I}_{2B}|^2 \times (e \times g + f \times h) - 2 \times (a \times c + b \times d) \\ C_1 &= |\bar{I}_{2B}|^2 \times (e^2 + f^2) - (a^2 + b^2)\end{aligned}\quad (2.27)$$

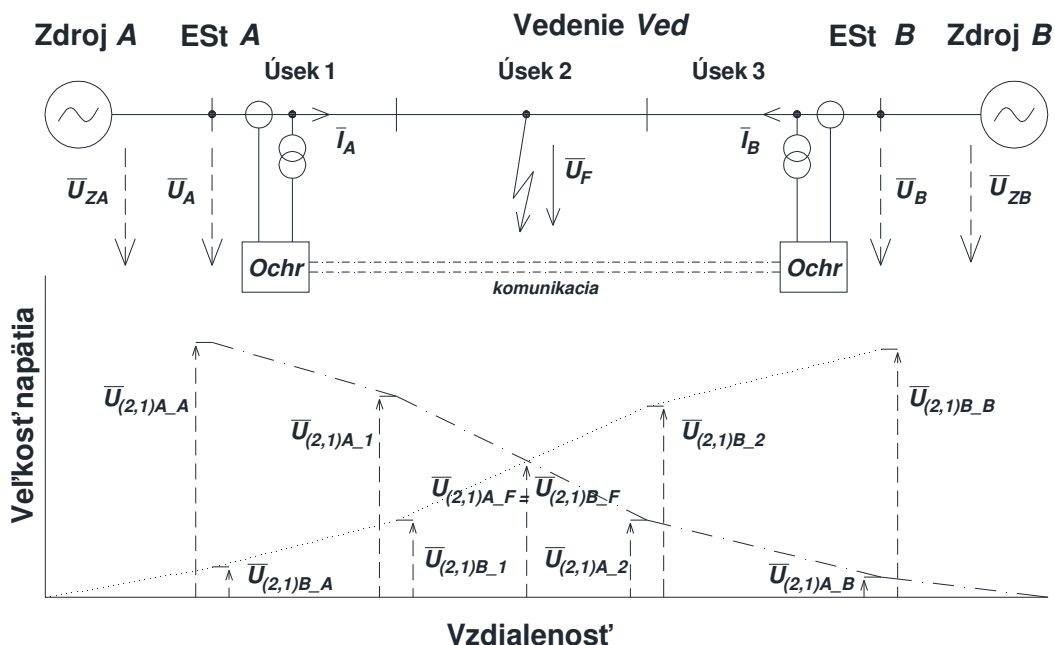
Z vyššie uvádzaných rovníc vyplýva, že zariadenia na protiľahlých koncoch si (kvôli správne výpočtu vzdialenosti poruchy) musia vymeniť informácie o veľkosti (amplitúde) spätnej zložky poruchového prúdu $|\bar{I}_{2B}|$ (resp. $|\bar{I}_{2A}|$) a veľkosť a uhol vypočítanej spätnej zložky zdrojovej impedancie $|\bar{Z}_{2ZB}|$ a φ_{ZZB} (resp. $|\bar{Z}_{2ZA}|$ a φ_{ZZA})

Algoritmus [6] taktiež umožňuje počítat' vzdialenosť pri trojstrannom vedení (odbočkové, resp. „T“ vedenie – obr. 2.6 b)). V tomto prípade ochrana na každom konci vedenia vypočíta napätie v mieste odbočky \bar{U}_{2ODB} (resp. jej absolútnu hodnotu $|\bar{U}_{2ODB}|$ a uhol $\varphi_{U2ODB-X}$) – $\bar{U}_{2ODB-X} = \bar{U}_{2X} - \bar{Z}_{2VedX} \times \bar{I}_{2ODB-X}$, kde X je miesto (rozvodňa) merania a \bar{Z}_{2VedX} je spätná zložka impedancie medzi miestom merania a miestom odbočky. Vypočítanú hodnotu $|\bar{U}_{2ODB-X}|$ a $\varphi_{U2ODB-X}$ pošle každá ochrana spolu s hodnotami $|\bar{I}_{2ODB-X}|$, a $\varphi_{I2ODB-X}$ ostatným ochranám na zvyšných koncoch vedenia. Každá ochrana vie následne upraviť takýto „trojstranný“ lokalizátor na „dvojstranný“ Porovnaním vypočítaných absolútnych hodnôt napätí v mieste odbočky $|\bar{U}_{2ODB-X}|$ je lokalizátor schopný určiť na ktorej časti vedenia je porucha. V prípade úsekov, na ktorých porucha nie je, bude vypočítané napätie $|\bar{U}_{2ODB-X}|$ rovnaké. Napr. pri poruche medzi elektrickou stanicou A a miestom odbočky, bude napätie $|\bar{U}_{2ODB-X}|$ merané na rozvodni B a C zhruba rovnaké – $|\bar{U}_{2ODB-B}| \cong |\bar{U}_{2ODB-C}|$. Keďže algoritmus vie, na ktorej časti vedenia je porucha, vie takýto „trojstranný“ lokalizátor „pretransformovať“ na dvojstranný lokalizátor tým že matematicky nahradí úseky, na ktorých nie je porucha, ako jeden úsek. Impedancia takéhoto úseku bude súčtom paralelných impedancií týchto dvoch úsekov. Keďže merania jednotlivých strán sú nezosynchronizované, musí lokalizátor upraviť vzájomný uhol prúdov \bar{I}_{2x} vzhľadom, na fázový posun vypočítaných napätí \bar{U}_{2ODB-X} . Vzdialenosť poruchy lokalizátor následne vypočíta podľa vzťahov (2.23) a (2.24). V prípade poruchy na vyššie zmienenom úseku medzi rozvodňou A a odbočkou bude $\bar{I}_{2B} = \bar{I}_{2ODB} = \bar{I}_{2ODB-B} + \bar{I}_{2ODB-C} \times e^{-j(\varphi_{U2ODB-B} - \varphi_{U2ODB-C})}$, $\bar{Z}_{2ZB} = \bar{U}_{2ODB-B} / \bar{I}_{2B}$, $\bar{Z}_{2Ved} = \bar{Z}_{2VedA}$, $\bar{I}_{2A} = \bar{I}_{2ODB-B}$ atď.

b) Dvojstranný lokalizátor porúch s využitím napät'ového profilu vedenia

Algoritmus určuje vzdialenosť poruchy vzhľadom na vypočítané napätie (resp. jeho úbytok) pozdĺž vedenia [6,8]. Výhoda tejto metódy, oproti metóde opísanej v predchádzajúcom bode 2.1.2. b), je že lokalizátor umožňuje vypočítat' vzdialenosť poruchy aj pre nehomogénne vedenie (napr. keď časť vedenia je vzdušné a časť káblové). Princíp tejto metódy je zobrazený na obr. 2.8. Na základe meraných veličín (U, I) a nastavenej impedancie jednotlivých úsekov

vedenia, lokalizátor pri poruche vytvorí z oboch strán vedenia tzv. „napäťový profil“ po jeho dĺžke. Miesto poruchy sa potom nachádza v bode, kde sa tieto „napäťové profily“ pretnú, resp. v bode, pre ktoré bude vypočítané napätie z oboch koncov rovnaké. Pri nesymetrických skratoch algoritmus počíta vzdialenosť poruchy prednostne pomocou spätných zložiek jednotlivých veličín.



Obr. 2.8 Dvojstranný lokalizátor porúch s využitím napäťového profilu vedenia, princíp

Majme vedenie *Ved* medzi elektrickými stanicami *A* a *B* ktoré má na svojej dĺžke *M* homogénnych úsekov (na obr. 2.8 to sú 3 úseky – $M = 3$). Pri poruche, pre akýkoľvek úsek *k* (od rozvodne *A*) je možné napätie na jeho koncoch vyjadriť, s ohľadom na merané napätie na stanici *A*, resp. *B*

$$\begin{aligned} \bar{U}_{2A_{(k-1)}} &= \bar{U}_{2A_A} - \sum_{i=1}^{k-1} \bar{Z}_{2_i} \times \bar{I}_{2A} & \bar{U}_{2B_{(k-1)}} &= \bar{U}_{2B_B} - \sum_{i=k}^M \bar{Z}_{2_i} \times \bar{I}_{2B} \\ \bar{U}_{2A_k} &= \bar{U}_{2A_A} - \sum_{i=1}^k \bar{Z}_{2_i} \times \bar{I}_{2A} & \bar{U}_{2B_k} &= \bar{U}_{2B_B} - \sum_{i=k+1}^M \bar{Z}_{2_i} \times \bar{I}_{2B} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Porucha bude potom na úseku na tom úseku *k*, pre ktorý bude platiť

$$\begin{aligned} \bar{U}_{2A_{(k-1)}} &\leq \bar{U}_{2B_{(k-1)}} \\ \bar{U}_{2A_k} &> \bar{U}_{2B_k} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Vzdialenosť poruchy *p* (pričom *p* je relatívna vzdialenosť v rámci úseku *k*) potom algoritmus vypočíta

$$|\bar{U}_{2A_{(k-1)}} - p \times \bar{Z}_{2_k} \times \bar{I}_{2A}| = |\bar{U}_{2B_k} - (1 - p) \times \bar{Z}_{2_k} \times \bar{I}_{2B}| \quad (2.30)$$

2.3. Zhrnutie

- **Jednostranný lokalizátor porúch**

Výhodou jednostranných lokalizátorov porúch je ich jednoduchosť, keďže okrem nastavených parametrov a meraných veličín nepotrebuje pre svoju činnosť žiadne ďalšie údaje a merania.

Hlavným nedostatkom vyššie uvedených metód výpočtu vzdialenosti poruchy je, že počítajú so symetrickými zložkami impedancie chráneného vedenia. Takýto model chráneného vedenia – obr. 2.1, resp. obr. 2.2 pri poruche – zodpovedá prestriedanému, vedeniu. V praxi často takýto model prenosového vedenia nezodpovedá impedancii jednotlivých fáz, resp. jednotlivých poruchových slučiek. Ako bude ukázané nižšie, impedancia poruchovej slučky v prípade reálneho (často neprestriedaného) vedenia, sa môže líšiť aj o 10% oproti impedancii slučky prestriedaného vedenia, počítanej pomocou symetrických zložiek. Táto nepresnosť bude výraznou mierou vplývať na výpočet vzdialenosti poruchy. Ďalšiu nepresnosť do výpočtu vnáša nedostatočná kompenzácia vplyvu sústavy. Aj keď jednotlivé algoritmy (okrem metódy výpočtu jednoduchej reaktancie) zahŕňajú vplyv sústavy do výpočtu vzdialenosti poruchy (koeficient rozdelenia prúdu \bar{D}_A , resp. predpoklad homogénnej zemnej impedancie), táto kompenzácia vychádza zo zjednodušených predpokladov (sústava, resp. jej časť, je homogénna, počítanie iba s vybranou zložkou zdrojovej impedancie). Algoritmy jednostranných lokalizátorov porúch taktiež nedokážu eliminovať vplyv paralelného vedenia pri čiastočnom súbehu vedení (kompenzáciu vplyvu paralelného vedenia dokáže lokalizátor zahrnúť iba pre celé vedenie a navyše musí mať možnosť merať zemný prúd paralelného vedenia)

- **Dvoj a viacstranný lokalizátor porúch**

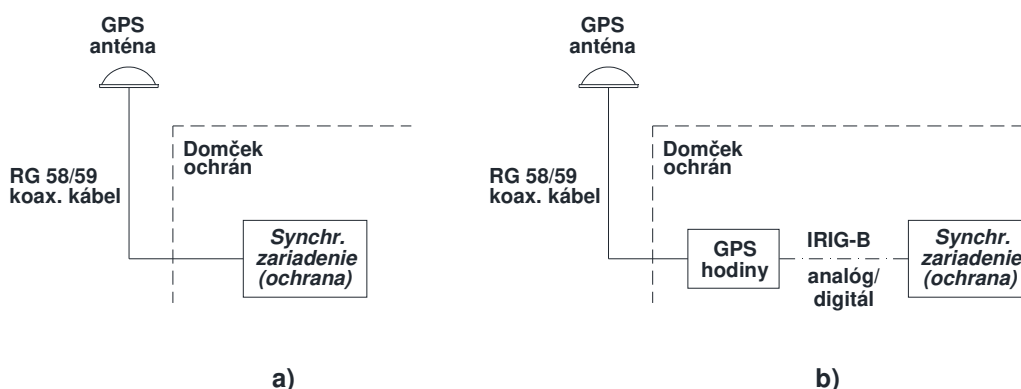
Dvojstranné, resp. viacstranné, lokalizátory porúch, počítajú vzdialenosť poruchy s využitím spätnej zložky prúdu a napätia a tým pádom dokážu (v porovnaní s jednostrannými lokalizátormi porúch) významne eliminovať vplyv paralelného vedenia, resp. vedenia v súbehu (aj čiastočného). Nevýhodou týchto lokalizátorov je, že na oboch koncoch musia byť rovnaké typy ochrán, ktoré musia vzájomne komunikovať, aby si tieto zariadenia vedeli vymeniť požadované údaje z opačnej strany.

Hlavným nedostatkom dvojstranných (viacstranných) lokalizátorov je, že hoci vedľa rozdeliť chránené vedenie na viacero úsekov (napr. pri kombinácii vzdušného vedenia a kábla), rovnako ako jednostranné lokalizátory počítajú vzdialenosť poruchy s použitím symetrických zložkami impedancie chráneného vedenia a nezohľadňujú rôzne impedancie jednotlivých fáz, resp. poruchových slučiek. Ako bude ukázané v kapitole 5 aj viacstranné lokalizátory porúch vykazujú pomerne veľkú nepresnosť pri vedeniach, ktorých impedančné slučky sa vzájomne výrazne líšia (napr. pri neprestriedanom vedení osadenom na stožiaroch typu „Mačka“ alebo „Donau“)

3. Presná časová synchronizácia a meranie synchronizovaných fázorov

3.1. Presná časová synchronizácia

Meranie synchronizovaných fázorov je technika, resp. spôsob, merania prúdov a napätí na rôznych miestach v sústave a ich vzájomného prepojenia, za účelom následnej analýzy, a pre potreby prevádzky sústavy [10]. Aby toto bolo možné, musia mať tieto merané elektrické veličiny presnú časovú synchronizáciu s presnosťou rádovo v mikrosekundách ($\sim\mu\text{s}$) [12,13]. K tomuto účelu je potrebné mať zdroj presnej časovej synchronizácie, ktorý je v súčasnosti realizovaný pomocou systému GPS („Global Positioning system“) [11]. Zariadenie (ochrana) je časovo synchronizovaná buď priamo cez GPS anténu a koaxiálny kábel (obr. 3.1 a)), ktorý je priamo pripojený do príslušného zariadenia, alebo pomocou GPS hodín (obr. 3.1 b)), ktoré majú synchronizáciu cez GPS anténu, a následne dokážu časovo synchronizovať ďalšie zariadenia príslušným časovým protokolom – napr. IRIG-B [13] – ktorý (spolu s presnosťou GPS hodín) spĺňa požiadavku na časovú presnosť ($\sim\mu\text{s}$)



Obr. 3.1 Časová synchronizácia a) priamo cez GPS anténu b) pomocou GPS hodín

Jednotlivé vzorky analógových veličín (vzorkovanie) meraných príslušným zariadením (ochranou) sú zaznamenávané s nepresnosťou rádovo $\sim\mu\text{s}$ oproti „absolútnemu“ GPS času. Nepresnosť $10\ \mu\text{s}$ zodpovedá uhlu $0,18^\circ$, čo je akceptovateľná nepresnosť. Takto časovo synchronizované merania na rôznych miestach elektrizačnej sústavy je možné následne použiť na ďalšiu analýzu vzájomných väzieb.

3.2. DFT – Diskrétna Fourierova transformácia, vzorkovanie a zaznamenávanie meraných veličín

Predpokladajme analógový signál (analógové meranie – prúd, napätie), ktorý má byť prevedený na signál digitálny. Prvým krokom je vzorkovanie danej veličiny. Vzorkovanie meranej veličiny je, príslušným zariadením, vykonávané v pravidelných intervaloch ΔT . Následne pomocou diskkrétnej Fourierovej transformácie (DFT) [10,12] a pomocných funkcií (napr. filter klesajúcej jednosmernej zložky [15]) je možné z týchto hodnôt vypočítať prvú harmonickú (prípadne aj vyššie harmonické), resp. fázor (hodnotu a uhol), merného analógového signálu

Takmer všetky digitálne ochrany, používané v elektrizačnej sústave, obsahujú funkciu „poruchového zapisovača“, ktorý pri poruche, resp. pri splnení podmienok na jeho spustenie, vytvorí oscilografický záznam udalosti. Tento záznam obsahuje (s ohľadom na nastavenie tejto funkcie) merané analógové a binárne vstupy, a prípadne aj vypočítané analógové veličiny

a ochranou vytvorené binárne informácie. Väčšina týchto ochrán vytvára tento záznam podľa IEEE normy pre vytvorenie záznamu udalosti pri prechodnom deji, tzv. štandardu „COMTRADE“ [16] a je uložený do pamäte (EPROM) zariadenia. Podľa príslušného COMTRADE štandardu, ochrana pri poruche vytvorí niekoľko súborov o udalosti, z ktorých sú dôležité a povinné konfiguračný a dátový. Konfiguračný súbor (*.cfg) je textový ASCII súbor, s presne definovanou štruktúrou ktorý obsahuje informácie potrebné pre korektné čítanie dátového súboru (*.dat). Dátový súbor obsahuje merané vzorky (prípadne počítané hodnoty) analógových a digitálnych signálov priradených do poruchového záznamu a opísaných v konfiguračnom súbore. Podobne ako konfiguračný súbor, aj dátový súbor presne definovanú štruktúru

3.3. Zhrnutie

Pokiaľ digitálne zariadenie, merajúce prúdy a napätia na niektorom mieste v sústave, (elektrická ochrana) vie vytvoriť záznam udalosti (poruchy) v COMTRADE formáte, je možné pomocou DFT vypočítať fázory (prvú harmonickú) jednotlivých analógových signálov a vzťahnuť ich k referenčnému kanálu (napr. \bar{U}_{L1N}). Ak rovnakom čase vytvorí záznam viacero zariadení, na rôznych miestach sústavy, pričom každé toto zariadenie má presnú časovú synchronizáciu, s nepresnosťou v rámci povolenej tolerancie (rádovo $\sim\mu\text{s}$) oproti „absolútnemu“ vzťažnému času (GPS), je možné záznamy vytvorené v týchto zariadeniach zlúčiť, resp. spojiť tie časti záznamov, ktoré „sa odohrávajú“ v tom istom čase. Následne je možné vypočítať fázory všetkých analógových signálov všetkých zariadení, vzťahnuť fázový posun k referenčnému signálu a urobiť celkovú analýzu meraných veličín.

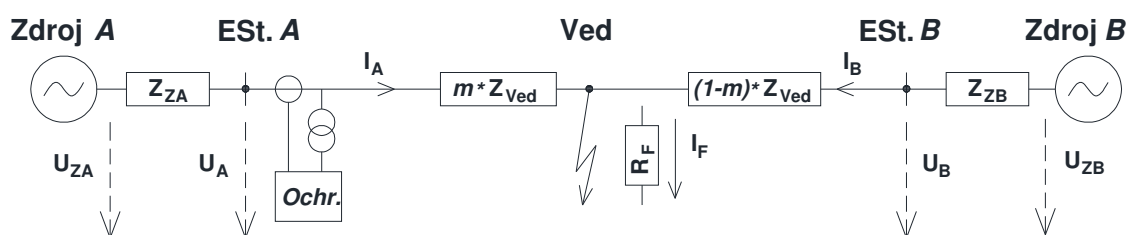
4 Impedančný lokalizátor porúch, zohľadňujúci topológiu vedenia – návrh algoritmov

4.1 Jednostranný lokalizátor porúch, zohľadňujúceho topológiu vedenia a zdrojové impedancie – návrh algoritmu

4.1.1 Neprestriedané vedenie – prúdové a napätové pomery pri poruche

- Porucha na jednoduchom vedení

Uvažujme jednoduché neprestriedané vedenie *Ved* medzi elektrickými stanicami *A* a *B*. Predpokladajme poruchu na tomto vedení vo vzdialenosti *m* a predpokladajme odpor poruchy R_F v mieste skratu (obr. 4.3)



Obr. 4.1 Porucha na jednoduchom vedení, maticový tvar

Vyjadriť pozdĺžnu impedanciu tohto vedenia *Ved* (viď rovnicu 1.1) impedančnou maticou $Z_{Ved} [3 \times 3]$. Z modelu prenosovej sústavy vieme vypočítať súslednú a netočivú zložku impedancie zdrojov *A* a *B* – $\bar{Z}_{1ZA(B)}$ a $\bar{Z}_{0ZA(B)}$. Impedancie zdrojov *A* a *B* je možné vyjadriť taktiež v maticovom tvare

$$Z_{ZA(B)} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{VlastZA(B)} & \bar{Z}_{VzajZA(B)} & \bar{Z}_{VzajZA(B)} \\ \bar{Z}_{VzajZA(B)} & \bar{Z}_{VlastZA(B)} & \bar{Z}_{VzajZA(B)} \\ \bar{Z}_{VzajZA(B)} & \bar{Z}_{VzajZA(B)} & \bar{Z}_{VlastZA(B)} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

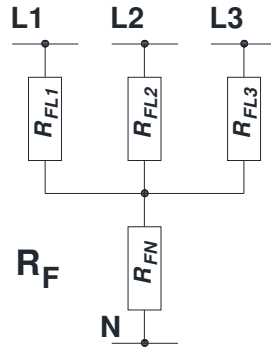
Pričom

$$\bar{Z}_{VlastZA(B)} = \frac{2 \times \bar{Z}_{1ZA(B)} + \bar{Z}_{0ZA(B)}}{3} \quad \bar{Z}_{VzajZA(B)} = \frac{\bar{Z}_{0ZA(B)} - \bar{Z}_{1ZA(B)}}{3}$$

Keďže impedancia vedenia a zdrojov je v maticovom tvare, odpor poruchy R_F je možné vo všeobecnosti taktiež vyjadriť v maticovom tvare (4.2), obr. 4.2

$$R_F = \begin{bmatrix} R_{FL1} + R_{FN} & R_{FN} & R_{FN} \\ R_{FN} & R_{FL2} + R_{FN} & R_{FN} \\ R_{FN} & R_{FN} & R_{FL3} + R_{FN} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

V prípade jednofázovej poruchy *Lx* – *N* bude odpor vo zvyšných fázach $R_{FLy} = R_{FLz} = \infty$, v prípade medzifázovej poruchy *Lx* – *Ly* bude $R_{FLz} = R_{FN} = \infty$ a pod.



Obr. 4.2 Odpor poruchy, všeobecný tvar

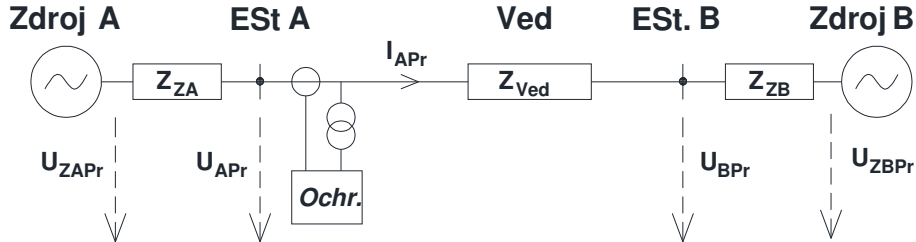
Taktiež prúdy a napätia na vedení a zdrojoch (viď obr. 4.1 a 4.3) budeme vyjadrovať v maticovom tvare $[3 \times 1]$ – $\mathbf{U}_A = [\bar{U}_{AL1N} \ \bar{U}_{AL2N} \ \bar{U}_{AL3N}]^T$ atď. Potom poruchu, videnú zo stanice A vieme potom, s použitím vzťahu (2.3), vyjadriť v maticovom tvare

$$\mathbf{U}_A = \mathbf{m} \times \mathbf{Z}_{\text{ved}} \times \mathbf{I}_A + \mathbf{R}_F \times (\mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B) \quad (4.3)$$

Prúd \mathbf{I}_B , vzhľadom na obr. 4.1 je možné vyjadriť

$$\mathbf{I}_B = (\mathbf{Z}_{ZB} + (1 - \mathbf{m}) \times \mathbf{Z}_{\text{ved}} + \mathbf{R}_F)^{-1} \times (\mathbf{U}_{ZB} - \mathbf{R}_F \times \mathbf{I}_A) \quad (4.4)$$

Predpokladajme, že pred poruchou sa vedením prenášal výkon, t.j. tiekol ním prúd (obr. 4.3). Na elektrickej stanici A umiestená ochrana meria pred poruchou prúd \mathbf{I}_{APr} .



Obr. 4.3 Jednoduché vedenie pred poruchou

Napätie \mathbf{U}_{ZBPPr} zdroja B pred poruchou (obr. 4.3), vieme, vzhľadom na (1.17), vyjadriť

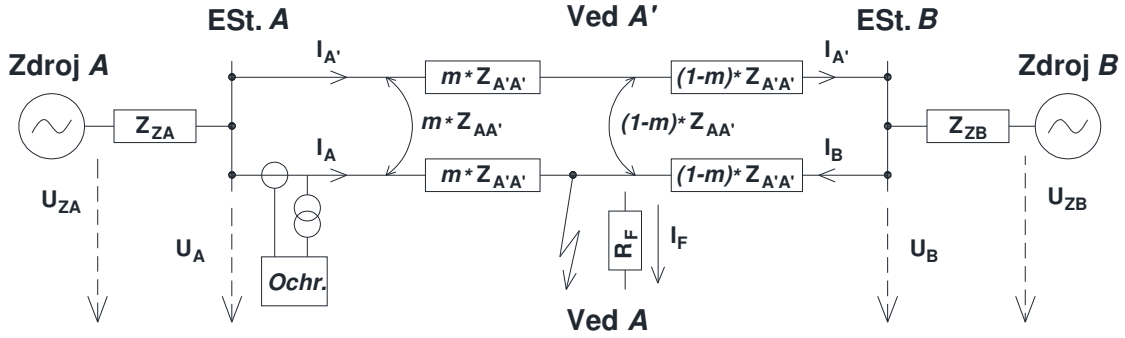
$$\mathbf{U}_{ZBPPr} = \mathbf{U}_{ZAPr} - (\mathbf{Z}_{ZA} + \mathbf{Z}_{\text{ved}} + \mathbf{Z}_{ZB}) \times \mathbf{I}_{\text{APr}} = \mathbf{U}_{\text{APr}} - (\mathbf{Z}_{\text{ved}} + \mathbf{Z}_{ZB}) \times \mathbf{I}_{\text{APr}} \quad (4.5)$$

V okamihu skratu sa napätie zdroja nezmení, $\mathbf{U}_{ZAPr} = \mathbf{U}_{ZA}$ a $\mathbf{U}_{ZBPPr} = \mathbf{U}_{ZB}$. Pre napätie \mathbf{U}_{ZAPr} , resp. \mathbf{U}_{ZA} platí

$$\mathbf{U}_{ZAPr} = \mathbf{U}_{ZA} = \mathbf{U}_{\text{APr}} + \mathbf{Z}_{ZA} \times \mathbf{I}_{\text{APr}} = \mathbf{U}_A + \mathbf{Z}_{ZA} \times \mathbf{I}_A \quad (4.6)$$

- Porucha na dvojitém vedení

Uvažujme paralelné neprestriedané vedenia \mathbf{VedA} a \mathbf{VedA}' medzi elektrickými stanicami A a B . Predpokladajme poruchu na jednom z týchto vedení (\mathbf{VedA}) vo vzdialenosti \mathbf{m} a predpokladajme odpor poruchy \mathbf{R}_F v mieste skratu (obr. 4.4)



Obr. 4.4 Skrat na jednom z paralelných vedení

V prípade paralelných vedení, poruchu na vedení **VedA** videnú zo stanice **A** vieme vyjadriť

$$U_A = m \times Z_{AA} \times I_A + m \times Z_{AA'} \times I_{A'} + R_F \times (I_A + I_B) \quad (4.7)$$

Kde I_B , vzhľadom na obr. 4.6 je možné vyjadriť

$$I_B = (Z_{ZB} + (1 - m) \times Z_{Ved} + R_F)^{-1} \times [U_{ZB} + (Z_{ZB} + (1 - m) \times Z_{AA'}) \times I_{A'} - R_F \times I_A] \quad (4.8)$$

Podobne, ako pri jednoduchom vedení $U_{ZAPr} = U_{ZA}$ a $U_{ZBPr} = U_{ZB}$. Pre napätie U_{ZB} platí

$$U_{ZB} = U_{ZBPr} = U_{APr} - (Z_{AA} + Z_{ZB}) \times I_{APr} - (Z_{AA'} + Z_{ZB}) \times I_{A'Pr} \quad (4.9)$$

Napätie U_{ZA} vyjadríme

$$U_{ZAPr} = U_{ZA} = U_{APr} + Z_{ZA} \times (I_{APr} + I_{A'Pr}) = U_A + Z_{ZA} \times (I_A + I_{A'}) \quad (4.10)$$

4.1.2 Návrh algoritmu na výpočet vzdialenosti poruchy

Keď porovnáme rovnice (4.3) až (4.6) pre poruchu na jednoduchom vedení a rovnice (4.7) až (4.10) pre poruchu na dvojitom vedení, môžeme vzťahy pre dvojité vedenie je možné použiť aj pre jednoduché vedenie. V prípade jednoduchého vedenia, keďže platí $I_{A'Pr} = I_{A'} = 0$, sa rovnice pre dvojité vedenie zjednodušia na rovnice jednoduchého vedenia. Ďalej teda budeme pracovať so vzťahmi (4.7) až (4.10). Rovnicu (4.10), zapísanú v maticovom tvare, je možné rozpísať na 3 algebrické rovnice pre tri fázy, resp. fázové napätia $\bar{U}_{AL1N}, \bar{U}_{AL2N}, \bar{U}_{AL3N}$.

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{AL1N} \\ \bar{U}_{AL2N} \\ \bar{U}_{AL3N} \end{bmatrix} = m \times \begin{bmatrix} \bar{Z}_{L11} & \bar{Z}_{L12} & \bar{Z}_{L13} \\ \bar{Z}_{L21} & \bar{Z}_{L22} & \bar{Z}_{L23} \\ \bar{Z}_{L31} & \bar{Z}_{L32} & \bar{Z}_{L33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_{AL1} \\ \bar{I}_{AL2} \\ \bar{I}_{AL3} \end{bmatrix} + m \times \begin{bmatrix} \bar{Z}_{L11'} & \bar{Z}_{L12'} & \bar{Z}_{L13'} \\ \bar{Z}_{L21'} & \bar{Z}_{L22'} & \bar{Z}_{L23'} \\ \bar{Z}_{L31'} & \bar{Z}_{L32'} & \bar{Z}_{L33'} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_{A'L1'} \\ \bar{I}_{A'L2'} \\ \bar{I}_{A'L3'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{FL1} + R_{FN} & R_{FN} & R_{FN} \\ R_{FN} & R_{FL2} + R_{FN} & R_{FN} \\ R_{FN} & R_{FN} & R_{FL3} + R_{FN} \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} \bar{I}_{AL1} \\ \bar{I}_{AL2} \\ \bar{I}_{AL3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{I}_{BL1} \\ \bar{I}_{BL2} \\ \bar{I}_{BL3} \end{bmatrix} \right) \quad (4.11)$$

Pri poruche na vedení budú kľúčové rovnice tých fáz, v ktorých nastala porucha. Pri využití rovníc (4.7) až (4.11) ďalej nahradíme „známu“ vzdialenosť m „neznámou“ p , keďže túto hodnotu budeme hľadať.

- **Jednofázová porucha**

Uvažujme jednofázovú poruchu medzi fázou x a zemou ($Lx - N$). Z rovnice (4.11) je možné vyjadriť napätie \bar{U}_{ALxN} (s ohľadom na $\bar{I}_{ALy} = -\bar{I}_{BLy}$ a $\bar{I}_{ALz} = -\bar{I}_{BLz}$ pre fázy v ktorých nie je porucha) nasledovne

$$\bar{U}_{ALxN} = \mathbf{p} \times \Delta \bar{U}_{VlastALxN} + \mathbf{p} \times \Delta \bar{U}_{Vzaj'LxN'} + (\mathbf{R}_{FLx} + \mathbf{R}_{FN}) \times (\bar{I}_{ALx} + \bar{I}_{BLx}) \quad (4.12)$$

Kde

$$\Delta \bar{U}_{VlastALxN} = \bar{Z}_{Lxx} \times \bar{I}_{ALx} + \bar{Z}_{Lxy} \times \bar{I}_{ALy} + \bar{Z}_{Lxz} \times \bar{I}_{ALz}$$

$$\Delta \bar{U}_{Vzaj'LxN'} = \bar{Z}_{Lxx'} \times \bar{I}_{A'Lx'} + \bar{Z}_{Lxy'} \times \bar{I}_{A'Ly'} + \bar{Z}_{Lxz'} \times \bar{I}_{A'Lz'}$$

Analógové hodnoty napätia \bar{U}_{ALxN} prúdov vlastného vedenia \bar{I}_{ALx} , \bar{I}_{ALy} , \bar{I}_{ALz} a prúdov paralelného vedenia (pri dvojitom vedení) $\bar{I}_{A'Lx'}$, $\bar{I}_{A'Ly'}$, $\bar{I}_{A'Lz'}$ sú merané lokalizátorom. Hodnoty impedancií vedenia \bar{Z}_{Lxx} , \bar{Z}_{Lxy} , \bar{Z}_{Lxz} a impedancií vzájomnej väzby (pri dvojitom vedení) $\bar{Z}_{Lxx'}$, $\bar{Z}_{Lxy'}$, $\bar{Z}_{Lxz'}$ sú určené výpočtom alebo meraním, a sú v lokalizátore nastavené. Neznámy prúd \bar{I}_{BLx} je možné, s ohľadom na $\bar{I}_{ALy} = -\bar{I}_{BLy}$ a $\bar{I}_{ALz} = -\bar{I}_{BLz}$, vyjadriť z rovnice (4.8)

$$\begin{aligned} \bar{I}_{BLx} = & [\bar{U}_{ZBLxN} + \bar{Z}_{VlastZB} \times \bar{I}_{A'Lx'} + \bar{Z}_{VzajZB} \times (\bar{I}_{ALy} + \bar{I}_{ALz} + \bar{I}_{A'Ly'} + \bar{I}_{A'Lz'}) + \\ & + (1 - \mathbf{p}) \times (\bar{Z}_{Lxy} \times \bar{I}_{ALy} + \bar{Z}_{Lxz} \times \bar{I}_{ALz} + \Delta \bar{U}_{Vzaj'LxN'}) - (\mathbf{R}_{FLx} + \mathbf{R}_{FN}) \times \bar{I}_{ALx}] \times \\ & \times [\bar{Z}_{VlastZB} + (1 - \mathbf{p}) \times \bar{Z}_{Lxx} + (\mathbf{R}_{FLx} + \mathbf{R}_{FN})]^{-1} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Napätie \bar{U}_{ZBLxN} (rovnako ako \bar{U}_{ZBlyN} a \bar{U}_{ZBLzN}) vie lokalizátor vypočítať z meraných hodnôt napätí \mathbf{U}_{APr} , prúdov \mathbf{I}_{APr} a $\mathbf{I}_{A'Pr}$ pred poruchou, a nastavených hodnôt impedancie \mathbf{Z}_{ZB} , \mathbf{Z}_{AA} , $\mathbf{Z}_{AA'}$, viď rovnica (4.9). Dosadením vypočítaného napätia \bar{U}_{ZBLxN} do rovnice (4.13) a následné dosadenie prúdu \bar{I}_{BLx} z rovnice (4.13) do rovnice (4.12), dostávame jednu kvadratickú rovnicu s dvoma neznámymi – \mathbf{p} a $\mathbf{R}_F = \mathbf{R}_{FLx} + \mathbf{R}_{FN}$.

$$\bar{K}_A \times \mathbf{p}^2 + \bar{K}_B \times \mathbf{p} + \bar{K}_{C1} \times \mathbf{R}_F + \bar{K}_{C2} = \mathbf{0} \quad (4.14)$$

Jednotlivé koeficienty \bar{K}_A , \bar{K}_B , \bar{K}_{C1} , \bar{K}_{C2} sú uvádzané v Tab. 4.1. Rovnicu (4.14) je možné rozdeliť na reálnu a imaginárnu časť, čím dostávame 2 rovnice s dvoma mi neznámymi

$$\begin{aligned} \text{Re}\{\bar{K}_A\} \times \mathbf{p}^2 + \text{Re}\{\bar{K}_B\} \times \mathbf{p} + \text{Re}\{\bar{K}_{C1}\} \times \mathbf{R}_F + \text{Re}\{\bar{K}_{C2}\} &= \mathbf{0} \\ \text{Im}\{\bar{K}_A\} \times \mathbf{p}^2 + \text{Im}\{\bar{K}_B\} \times \mathbf{p} + \text{Im}\{\bar{K}_{C1}\} \times \mathbf{R}_F + \text{Im}\{\bar{K}_{C2}\} &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Kvadratická rovnica (4.15) bude mať dve riešenia neznámej vzdialenosti poruchy \mathbf{p} , pričom použiteľné bude riešenie $\mathbf{p} \in (0; 1)$

- **Dvojfázová porucha, dvojfázová zemná a trojfázová porucha**

V prípade medzifázovej poruchy vyberieme zo vzťahu 4.11 rovnice fáz, v ktorých nastala porucha. V prípade trojfázovej poruchy sa vyberie sa jedna medzifázová slučka $Lx - Ly$ (alebo konkrétne $L1 - L2$) a rovnice príslušných dvoch fáz.

V prípade dvojfázovej zemnej poruchy budeme uvažovať

$$\bar{I}_{BLy} = \bar{I}_{BLx} \times \frac{\bar{I}_{ALy}}{\bar{I}_{ALx}} = \bar{I}_{BLx} \times \bar{K}_{IBxy} \quad (4.16)$$

V prípade trojfázovej poruchy budeme uvažovať

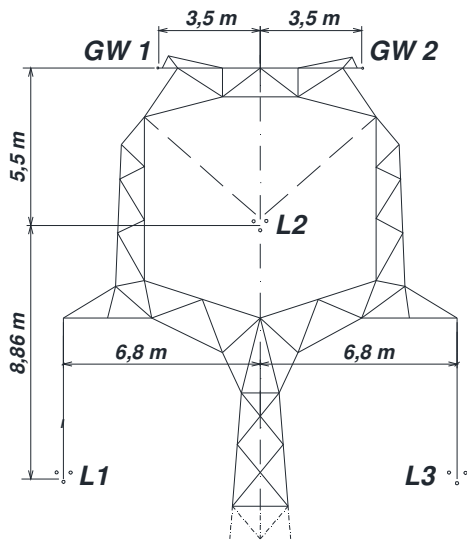
$$\bar{I}_{BLy} = \bar{I}_{BLx} \times \frac{\bar{I}_{ALy}}{\bar{I}_{ALx}} = \bar{I}_{BLx} \times \bar{K}_{IBxy} \quad (4.17)$$

$$\bar{I}_{BLz} = \bar{I}_{BLx} \times \frac{\bar{I}_{ALz}}{\bar{I}_{ALx}} = \bar{I}_{BLx} \times \bar{K}_{IBxz}$$

Tieto dve rovnice vieme následne spojiť a upraviť, čím dostávame, rovnako ako v prípade jednofázovej poruchy, kvadratickú rovnicu (4.21) s koeficientami \bar{K}_A , \bar{K}_B , \bar{K}_{C1} , \bar{K}_{C2} dvomi neznámymi – p a $R_F = R_{FLx} + R_{FLy}$. Jednotlivé koeficienty \bar{K}_A , \bar{K}_B , \bar{K}_{C1} , \bar{K}_{C2} pre rôzne typy porúch sú uvádzané v Tab. 4.1.

4.1.3 Porovnanie navrhovaného algoritmu s používanými metódami impedančných lokalizátorov pri poruche

Majme jednoduché 400 kV vedenie prenosovej sústavy V_{xyz} medzi stanicami A a B (v skutočnosti ide o vedenie V495 medzi rozvodňami Bošáca a Varín). Vedenie má dĺžku 100,423 km, je osadené na stožiaroch typu „Mačka“ (obr. 4.1). Stredná fáza je bližšie k zemným lanám ako dve krajné. Parametre jednotlivých vodičov sú uvedené v Tab. 4.1



Obr. 4.5 Stožiar typu „Mačka“

Fázové vodiče

Priemer fázového vodiča	29,31 mm
Počet vodičov na fázu	3
Vzdialenosť vodičov vo zväzku	400 mm
Odpor vodiča	0,0646 Ω/km

Zemné lano 1

Priemer zemného lana	21,00 mm
Odpor zemného lana	0,1580 Ω/km

Zemné lano 2

Priemer zemného lana	21,00 mm
Odpor zemného lana	0,1580 Ω/km

Zem

Rezistivita zeme	100 Ω.m
------------------	---------

Tab. 4.2 Parametre vodičov vedenia na obr. 4.1

Vedenie je neprestriedané na celej svojej dĺžke a fázové a zemné vodiče sú rovnaké na celej dĺžke. Admitanciu vedenia zatiaľ zanedbajme. Pozdĺžna impedancia takéhoto vedenia, vzhľadom jeho parametre (viď Tab. 4.2), je

	Jednofázová porucha – (Lx – N)	Dvojfázová porucha – (Lx – Ly)
\bar{K}_A	$(\Delta\bar{U}_{VlastALxN} + \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'}) \times \bar{Z}_{Lxx}$	$(\Delta\bar{U}_{VlastALxN} + \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'} - \Delta\bar{U}_{VlastALyN} - \Delta\bar{U}_{Vzaj'LyN'}) \times$ $\times (\bar{Z}_{Lxx} + \bar{Z}_{Lyy} - 2 \times \bar{Z}_{Lxy})$
\bar{K}_B	$-\bar{U}_{ALxN} \times \bar{Z}_{Lxx} - (\Delta\bar{U}_{VlastALxN} + \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'}) \times$ $\times (\bar{Z}_{VlastZB} + \bar{Z}_{Lxx})$	$-(\bar{U}_{ALxN} - \bar{U}_{ALyN}) \times (\bar{Z}_{Lxx} + \bar{Z}_{Lyy} - 2 \times \bar{Z}_{Lxy}) - (\Delta\bar{U}_{VlastALxN} + \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'} -$ $-\Delta\bar{U}_{VlastALyN} - \Delta\bar{U}_{Vzaj'LyN'}) \times (2 \times \bar{Z}_{1SB} + \bar{Z}_{Lxx} + \bar{Z}_{Lyy} - 2 \times \bar{Z}_{Lxy})$
\bar{K}_{C1}	$\bar{U}_{ALxN} - \bar{U}_{ZBLxN} - \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'} - \bar{Z}_{VlastZB} \times (\bar{I}_{ALx} +$ $+ \bar{I}_{A'Lx'}) - \bar{Z}_{VzajZB} \times (\bar{I}_{ALy} + \bar{I}_{ALz} + \bar{I}_{ALy'} + \bar{I}_{ALz'})$	$(\bar{U}_{ALxN} - \bar{U}_{ALyN}) - (\bar{U}_{ZBLxN} - \bar{U}_{ZBLYN}) - (\Delta\bar{U}_{VlastALxN} + \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'} -$ $-\Delta\bar{U}_{VlastALyN} - \Delta\bar{U}_{Vzaj'LyN'}) - \bar{Z}_{1SB} \times (\bar{I}_{ALx} + \bar{I}_{A'Lx'} - \bar{I}_{ALy} - \bar{I}_{A'Ly'})$
\bar{K}_{C2}	$\bar{U}_{ALxN} \times (\bar{Z}_{VlastZB} + \bar{Z}_{Lxx})$	$(\bar{U}_{ALxN} - \bar{U}_{ALyN}) \times (2 \times \bar{Z}_{1SB} + \bar{Z}_{Lxx} + \bar{Z}_{Lyy} - 2 \times \bar{Z}_{Lxy})$
	Dvojfázová zemná porucha – (Lx – Ly – N)	Trojfázová porucha – (Lx – Ly – Lz)
\bar{K}_A	$(\Delta\bar{U}_{VlastALxN} + \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'} - \Delta\bar{U}_{VlastALyN} - \Delta\bar{U}_{Vzaj'LyN'}) \times$ $[\bar{Z}_{Lxx} - \bar{Z}_{Lxy} + (\bar{Z}_{Lxy} - \bar{Z}_{Lyy}) \times \bar{K}_{IBxy}]$	$(\Delta\bar{U}_{VlastALxN} + \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'} - \Delta\bar{U}_{VlastALyN} - \Delta\bar{U}_{Vzaj'LyN'}) \times$ $[\bar{Z}_{Lxx} - \bar{Z}_{Lyy} \times \bar{K}_{IBxy} - \bar{Z}_{Lxy}(1 - \bar{K}_{IBxy}) + (\bar{Z}_{Lxz} - \bar{Z}_{Lyz}) \times \bar{K}_{IBxz}]$
\bar{K}_B	$-(\bar{U}_{ALxN} - \bar{U}_{ALyN}) \times [\bar{Z}_{Lxx} - \bar{Z}_{Lyy} \times \bar{K}_{IBxy} -$ $-\bar{Z}_{Lxy}(1 - \bar{K}_{IBxy})] - (\Delta\bar{U}_{VlastALxN} + \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'} -$ $-\Delta\bar{U}_{VlastALyN} - \Delta\bar{U}_{Vzaj'LyN'}) \times [\bar{Z}_{1SB} \times (1 - \bar{K}_{IBxy}) +$ $+ \bar{Z}_{Lxx} - \bar{Z}_{Lxy} + (\bar{Z}_{Lxy} - \bar{Z}_{Lyy}) \times \bar{K}_{IBxy}]$	$-(\bar{U}_{ALxN} - \bar{U}_{ALyN}) \times [\bar{Z}_{Lxx} - \bar{Z}_{Lyy} \times \bar{K}_{IBxy} -$ $-\bar{Z}_{Lxy}(1 - \bar{K}_{IBxy})] - (\Delta\bar{U}_{VlastALxN} + \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'} -$ $-\Delta\bar{U}_{VlastALyN} - \Delta\bar{U}_{Vzaj'LyN'}) \times [\bar{Z}_{1SB} \times (1 - \bar{K}_{IBxy}) +$ $+ \bar{Z}_{Lxx} - \bar{Z}_{Lxy} + (\bar{Z}_{Lxy} - \bar{Z}_{Lyy}) \times \bar{K}_{IBxy} + (\bar{Z}_{Lxz} - \bar{Z}_{Lyz}) \times \bar{K}_{IBxz}]$
\bar{K}_{C1}	$[(\bar{U}_{ALxN} - \bar{U}_{ALyN}) - (\bar{U}_{ZBLxN} - \bar{U}_{ZBLYN}) - (\Delta\bar{U}_{VlastALxN} +$ $+ \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'} - \Delta\bar{U}_{VlastALyN} - \Delta\bar{U}_{Vzaj'LyN'}) - \bar{Z}_{1SB} \times$ $\times (\bar{I}_{ALx} + \bar{I}_{A'Lx'} - \bar{I}_{ALy} - \bar{I}_{A'Ly'})] \times (1 - \bar{K}_{IBxy})$	$[(\bar{U}_{ALxN} - \bar{U}_{ALyN}) - (\bar{U}_{ZBLxN} - \bar{U}_{ZBLYN}) - (\Delta\bar{U}_{VlastALxN} +$ $+ \Delta\bar{U}_{Vzaj'LxN'} - \Delta\bar{U}_{VlastALyN} - \Delta\bar{U}_{Vzaj'LyN'}) - \bar{Z}_{1SB} \times$ $\times (\bar{I}_{ALx} + \bar{I}_{A'Lx'} - \bar{I}_{ALy} - \bar{I}_{A'Ly'})] \times (1 - \bar{K}_{IBxy})$
\bar{K}_{C2}	$(\bar{U}_{ALxN} - \bar{U}_{ALyN}) \times [\bar{Z}_{1SB} \times (1 - \bar{K}_{IBxy}) + \bar{Z}_{Lxx} -$ $-\bar{Z}_{Lxy} + (\bar{Z}_{Lxy} - \bar{Z}_{Lyy}) \times \bar{K}_{IBxy}]$	$(\bar{U}_{ALxN} - \bar{U}_{ALyN}) \times [\bar{Z}_{1SB} \times (1 - \bar{K}_{IBxy}) + \bar{Z}_{Lxx} -$ $-\bar{Z}_{Lxy} + (\bar{Z}_{Lxy} - \bar{Z}_{Lyy}) \times \bar{K}_{IBxy} + (\bar{Z}_{Lxz} - \bar{Z}_{Lyz}) \times \bar{K}_{IBxz}]$

Tab. 4.3 Tabuľka koeficientov \bar{K}_A , \bar{K}_B , \bar{K}_{C1} , \bar{K}_{C2} pre jednotlivé typy porúch

$$\mathbf{Z}_{V_{xyz}} = \begin{bmatrix} 5,458 + 43,896j & 3,342 + 12,791j & 3,197 + 14,191j \\ 3,342 + 12,791j & 5,868 + 38,116j & 3,342 + 12,793j \\ 3,197 + 14,191j & 3,342 + 12,793j & 5,458 + 43,899j \end{bmatrix} [\Omega]$$

Prevedme túto impedančnú vedenia pomocou vzťahov 2.4 a 2.5 na maticu $\mathbf{Z}_{V_{\text{ved}}_{012}}$, ktorá zodpovedá pozdĺžnej impedancii vedenia vyjadrenej v zložkovej sústave

$$\mathbf{Z}_{V_{xyz}_{012}} = \begin{bmatrix} 12,182 + 68,487j & 1,981 + 1,356j & -2,166 + 1,035j \\ -2,166 + 1,035j & 2,301 + 28,712j & 0,841 + 0,532j \\ 1,981 + 1,356j & -0,881 + 0,463j & 2,301 + 28,712j \end{bmatrix} [\Omega]$$

Z rovnice 2.8 vyplýva, že $\bar{Z}_{0V_{xyz}} = 12,182 + 68,487j$ a $\bar{Z}_{1V_{xyz}} = 2,301 + 28,712j$. V prípade, že by vedenie bolo prestriedané (uvažujme „ideálne prestriedané“), tak na základe vzťahov 2.12 a 2.13, by jeho impedančná matica vyzerala

$$\mathbf{Z}_{V_{xyz}_{p}} = \begin{bmatrix} 5,595 + 41,970j & 3,294 + 13,258j & 3,294 + 13,258j \\ 3,294 + 13,258j & 5,595 + 41,970j & 3,294 + 13,258j \\ 3,294 + 13,258j & 3,294 + 13,258j & 5,595 + 41,970j \end{bmatrix} [\Omega]$$

Nasimulujeme toto vedenie vo výpočtovom programe NEPLAN [17]. Ak sústavu na oboch koncoch vedenia nahradíme ekvivalentnými (zdrojovými) impedanciami, ich hodnoty, vypočítané s modelu prenosovej sústavy, sú nasledovné

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{1ZA} &= 2,407 + 21,833j \Omega & \bar{Z}_{1ZB} &= 2,015 + 15,503j \Omega \\ \bar{Z}_{0ZA} &= 2,895 + 22,468j \Omega & \bar{Z}_{0ZB} &= 3,596 + 17,694j \Omega \end{aligned}$$

Kvôli reálnosti uvažujme aj s priečnou admitanciou vedenia.

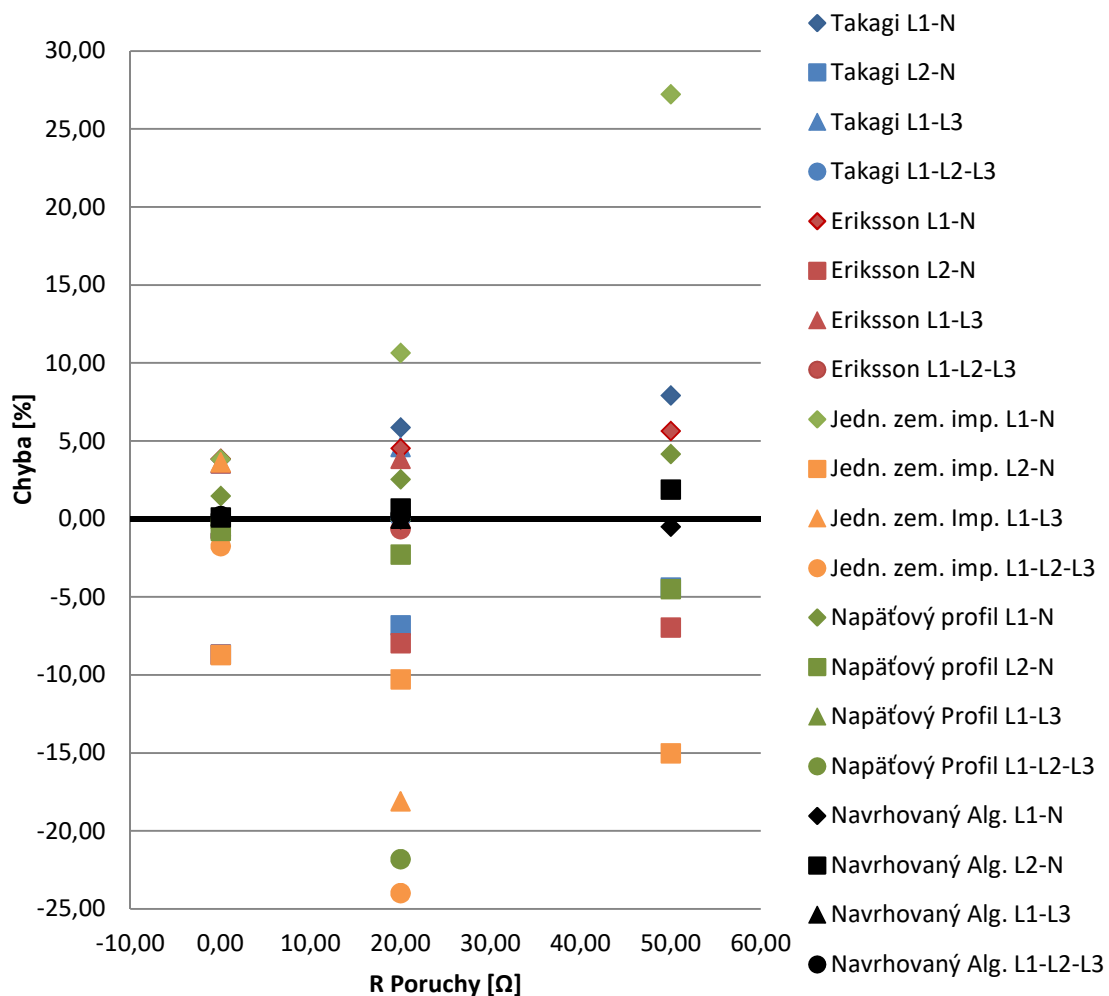
$$\mathbf{Y}_{V_{xyz}} = \begin{bmatrix} 348,66j & -54,077j & -38,141j \\ -54,077j & 361,017j & -54,085j \\ -38,141j & -54,085j & 348,655j \end{bmatrix} [\mu S]$$

Predpokladajme že, vedenie pred poruchou prenášalo výkon 800MW zo stanice **A** do stanice **B**. Uvažujme poruchu vo vzdialenosti dvoch tretín ($m = 67,273 \text{ km}$) dĺžky vedenia od elektrickej stanice **A** a uvažujme navyše aj s rôznymi odpormi poruchy pre medzifázovú a jednofázovú poruchu. Porovnajme vzdialenosti vypočítané podľa algoritmov jednostranných lokalizátorov (počítajúcich vzdialenosť od elektrickej stanice **A**) uvádzaných v kapitolách 3.1.1.c) až 3.1.1.e) – metóda T. Takagiho, metóda L. Erikssona a metóda pri predpoklade rovnakej jednotkovej zemnej impedancie – , podľa algoritmu dvojstranného lokalizátora opísaného v kap. 3.1.2.c) – metóda s využitím napätového profilu vedenia – a navrhovaného algoritmu, taktiež počítajúceho vzdialenosť od elektrickej stanice **A**. V tabuľke 4.3 sú (kvôli prehľadnosti) uvádzané výpočty iba pre vysoko ohmové poruchy (50Ω , resp. 20Ω) V grafe 4.1 sú porovnané výpočty pre rôzne typy porúch s rôznou hodnotou prídavnej rezistancie v mieste poruchy.

Vzdialenosť poruchy, 67% vedenia – 67,273 km											
Č.	Por.	Rf	Fáza	U Porucha [kV]	I Porucha [kA]	Výpočet	A	B	C	D	E
1	L1-N	50,00	L1	220,49∠-7,74°	2,63∠-14,44°	Vypočítaná vzdial. [km]	72,628	71,082	85,615	70,093	66,961
			L2	238,01∠239,86°	1,19∠243,25°	Chyba [%]	7,943	5,646	27,246	4,176	-0,479
			L3	238,22∠120,09°	1,11∠123,52°						
			N	35,82∠235,17°	1,60∠-29,54°						
2	L2-N	50,00	L1	237,97∠0,10°	1,12∠3,13°	Vypočítaná vzdial. [km]	64,331	62,614	57,189	64,269	68,559
			L2	221,26∠231,94°	2,73∠227,20°	Chyba [%]	-4,388	-6,940	-15,002	-4,480	1,895
			L3	238,13∠119,96°	1,11∠122,51°						
			N	36,85∠118,09°	1,67∠216,93°						
3	L3-L1	20,00	L1	151,00∠3,42°	4,09∠-73,80°	Vypočítaná vzdial. [km]	70,393	69,888	55,114	67,633	67,312
			L2	237,84∠239,93°	1,19∠243,64°	Chyba [%]	4,621	3,871	-18,087	0,520	0,042
			L3	199,76∠99,24°	4,95∠97,38°						
			N	0,62∠146,03°	0,09∠255,68°						
4	L1-L2-L3	20,00	L1	150,98∠-15,56°	5,20∠-48,99°	Vypočítaná vzdial. [km]	67,301	66,836	51,151	52,610	67,455
			L2	150,44∠222,17°	5,45∠193,15°	Chyba [%]	0,025	-0,665	-23,976	-21,808	0,255
			L3	152,32∠104,20°	5,18∠71,62°						
			N	7,06∠118,99°	0,36∠223,17°						

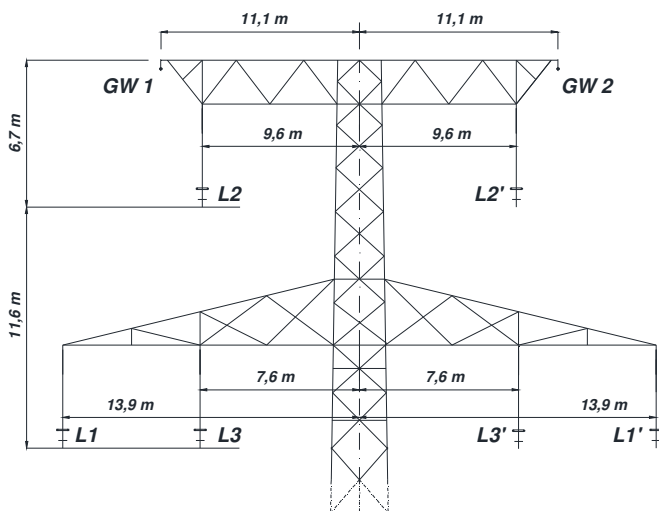
Tab. 4.3 Porovnanie vypočítanej vzdialenosti – A) Metóda T. Takagiho, B) Metóda L. Erikssona, C) Rovnaká jed. zemná imp., D) Napätový profil, E) Navrhovaný algoritmus

Porucha v dvoch tretinách jednoduchého vedenia Vxyz



Graf 4.1 Grafické porovnanie algoritmov podľa Tab. 4.3

Majme dvojité 400 kV vedenie prenosovej sústavy $V_{xyzAA'}$ medzi stanicami A a B (v skutočnosti ide o mierne upravené paralelné vedenia V477 a V478 medzi rozvodňami Lemešany a Krosno v Poľsku). Vedenia majú dĺžku 121,7 km, je osadené na stožiaroch typu „Donau“ (obr. 4.6). Stredná fáza je bližšie k zemným lanám ako dve krajné. Parametre jednotlivých vodičov sú uvedené v Tab. 4.4



Obr. 4.6 Stožiar typu „Donau“

Fázové vodiče	
Priemer fázového vodiča	26,69 mm
Počet vodičov na fázu	3
Vzdialenosť vodičov vo zväzku	400 mm
Odpor vodiča	0,0796 Ω /km
Zemné laná 1 a 2	
Priemer zemného lana	17,30 mm
Odpor zemného lana	0,2600 Ω /km
Zem	
Rezistivita zeme	100 Ω .m

Tab. 4.4 Par. vodičov vedenia na obr. 4.2

Vedenie je neprestriedané na celej svojej dĺžke a fázové a zemné vodiče sú rovnaké na celej dĺžke. Admitanciu vedenia zatiaľ zanedbajme. Pozdĺžna impedancia takéhoto vedenia, vzhľadom jeho parametre (viď Tab. 4.4) je

$$Z_{V_{xyzAA'}} = \begin{bmatrix} 8,480 + 55,578j & 5,544 + 17,698j & 5,187 + 24,953j & | & 5,067 + 14,027j & 5,332 + 12,362j & 5,123 + 15,689j \\ 5,544 + 17,698j & 9,443 + 50,415j & 5,564 + 17,832j & | & 5,332 + 12,362j & 5,666 + 12,387j & 5,425 + 13,762j \\ 5,187 + 24,953j & 5,564 + 17,832j & 8,533 + 55,081j & | & 5,123 + 15,689j & 5,425 + 13,762j & 5,176 + 18,041j \\ \hline 5,067 + 14,027j & 5,332 + 12,362j & 5,123 + 15,689j & | & 8,480 + 55,578j & 5,544 + 17,698j & 5,187 + 24,953j \\ 5,332 + 12,362j & 5,666 + 12,387j & 5,425 + 13,762j & | & 5,544 + 17,698j & 9,443 + 50,415j & 5,564 + 17,832j \\ 5,123 + 15,689j & 5,425 + 13,762j & 5,176 + 18,041j & | & 5,187 + 24,953j & 5,564 + 17,832j & 8,533 + 55,081j \end{bmatrix} [\Omega]$$

Netočivá, súsledná a vzájomná netočivá impedancia, vzhľadom na vzťah 2.8, sú $\bar{Z}_{0V_{xyzAA'}} = 19,682 + 94,014j$, $\bar{Z}_{1V_{xyzAA'}} = 3,387 + 33,530j$ a $\bar{Z}_{0MV_{xyzAA'}} = 15,890 + 42,494j$. V prípade, že by vedenie bolo prestriedané (uvažujme „ideálne prestriedané“), tak na základe vzťahov 2.12 a 2.13, by jeho impedančná matica vyzerala

$$Z_{V_{xyzAA'}.p} = \begin{bmatrix} 8,819 + 53,691j & 5,432 + 20,161j & 5,432 + 20,161j & | & 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j \\ 5,432 + 20,161j & 8,819 + 53,691j & 5,432 + 20,161j & | & 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j \\ 5,432 + 20,161j & 5,432 + 20,161j & 8,819 + 53,691j & | & 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j \\ \hline 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j & | & 8,819 + 53,691j & 5,432 + 20,161j & 5,432 + 20,161j \\ 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j & | & 5,432 + 20,161j & 8,819 + 53,691j & 5,432 + 20,161j \\ 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j & 5,297 + 14,231j & | & 5,432 + 20,161j & 5,432 + 20,161j & 8,819 + 53,691j \end{bmatrix} [\Omega]$$

Zdrojové impedancie, vypočítané s modelu prenosovej sústavy, sú nasledovné

$$\bar{Z}_{1ZA} = 2,030 + 17,037j \Omega$$

$$\bar{Z}_{1ZB} = 2,080 + 22,660j \Omega$$

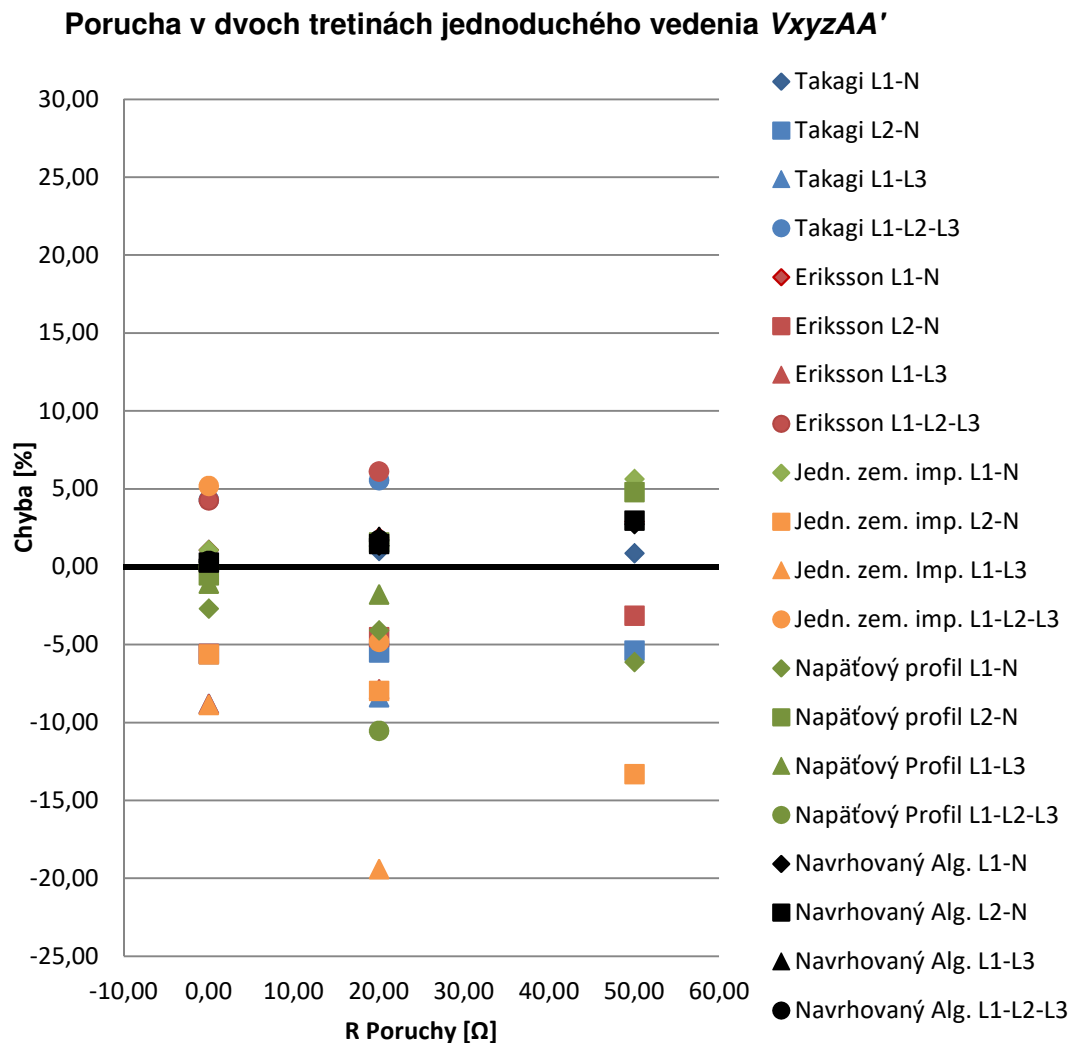
$$\bar{Z}_{0ZA} = 1,960 + 14,286j \Omega$$

$$\bar{Z}_{0ZB} = 6,180 + 33,400j \Omega$$

Priečna admitancia vedenia je .

$$Y_{V_{xyzAA'}} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 437,199j & -55,463j & -109,487j & -5,825j & -11,231j & -13,672j \\ -55,463j & 415,853j & -56,272j & -11,231j & -34,568j & -21,549j \\ -109,487j & -56,272j & 444,797j & -13,672j & -21,549j & -36,170j \\ \hline -5,825j & -11,231j & -13,672j & 437,199j & -55,463j & -109,487j \\ -11,231j & -34,568j & -21,549j & -55,463j & 415,853j & -56,272j \\ -13,672j & -21,549j & -36,170j & -109,487j & -56,272j & 444,797j \end{array} \right] [\Omega]$$

Nasimulujeme toto vedenie vo výpočtovom programe NEPLAN [17]. Predpokladajme, podobne ako v predchádzajúcom prípade, že vedenie pred poruchou prenášalo výkon 800MW zo stanice *A* do stanice *B*. Uvažujme opäť poruchu vo vzdialenosti dvoch tretín ($m = 81,539 \text{ km}$) dĺžky vedenia od elektrickej stanice *A* a uvažujme taktiež aj s rôznymi odpormi poruchy pre medzifázovú a jednofázovú poruchu. V tabuľke 4.5 sú (kvôli prehľadnosti) uvádzané výpočty iba pre vysoko ohmové poruchy (50Ω , resp. 20Ω). V grafe 4.2 sú porovnané výpočty pre rôzne typy porúch s rôznou hodnotou prídavnej rezistancie v mieste poruchy.



Graf 4.2 Grafické porovnanie algoritmov podľa Tab. 4.5

Vzdialenosť poruchy, 67% vedenia – 81,539 km												
Č.	Por.	Rf	Fáza	U Porucha [kV]	I Porucha [kA]	I Porucha Paralel [kA]	Výpočet	A	B	C	D	E
1	L1-N	50,00	L1	220,02∠-7,2°	2,193∠-18,8°	0,886∠-6,0°	Vypočítaná vzdial. [km]	82,264	83,919	86,142	76,564	83,783
			L2	236,36∠240,1°	0,565∠250,1°	0,565∠250,2°	Chyba [%]	0,890	2,919	5,645	-6,101	2,752
			L3	239,97∠119,5°	0,591∠132,4°	0,591∠132,4°						
			N	29,31∠233,0°	1,688∠-28,4°	0,346∠-33,0°						
2	L2-N	50,00	L1	238,00∠-0,5°	0,589∠6,5°	0,589∠6,5°	Vypočítaná vzdial. [km]	77,166	78,984	70,704	85,456	83,963
			L2	221,62∠232,8°	2,183∠222,7°	0,880∠236,4°	Chyba [%]	-5,362	-3,134	-13,288	4,804	2,972
			L3	236,53∠120,1°	0,561∠130,9°	0,561∠130,9°						
			N	29,75∠118,9°	1,703∠215,6°	0,362∠221,9°						
3	L3-L1	20,00	L1	151,57∠2,8°	4,121∠-80,2°	1,009∠-54,0°	Vypočítaná vzdial. [km]	74,724	75,144	65,718	80,089	83,105
			L2	238,18∠240,0°	0,574∠250,2°	0,574∠250,2°	Chyba [%]	-8,358	-7,843	-19,403	-1,778	1,921
			L3	201,73∠99,7°	4,566∠96,3°	1,353∠106,7°						
			N	1,76∠180,2°	0,062∠-81,5°	0,061∠-81,5°						
4	L1-L2-L3	20,00	L1	148,70∠-13,8°	5,009∠-56,0°	1,315∠-40,2°	Vypočítaná vzdial. [km]	86,070	86,514	77,614	72,965	82,938
			L2	156,66∠226,3°	4,776∠187,0°	1,256∠205,3°	Chyba [%]	5,557	6,101	-4,814	-10,515	1,716
			L3	160,88∠104,7°	4,741∠70,1°	1,267∠88,9°						
			N	8,45∠124,4°	0,427∠220,1°	0,160∠228,4°						

Tab. 4.5 Porovnanie vypočítanej vzdialenosti – A) Metóda T. Takagiho, B) Metóda L. Erikssona, C) Rovnaká jed. zemná imp., D) Napäťový profil, E) Navrhovaný algoritmus

Keď si porovnáme výpočty pre jednoduché a dvojité vedenie, vykonané v bodoch a) a b) tejto kapitoly, navrhovaný jednostranného lokalizátora určí pri takmer všetkých typoch poruchy je vzdialenosť najpresnejšie. Výnimku tvorí iba vzdialenosť poruchy počítaná metódou T. Takagiho pri jednofázovej poruche L1 – N pri dvojitém vedení s prídavnou rezistenciou v mieste skratu. Toto je však spôsobené skôr vhodne nasimulovanou situáciou, pretože pokiaľ by napr. bol tok výkonu pred poruchou opačný, nepresnosť by bola od 5,8 – 7,6%, pričom nepresnosť navrhovaného algoritmu by bola prakticky rovnaká (0,3 – 3,2%).

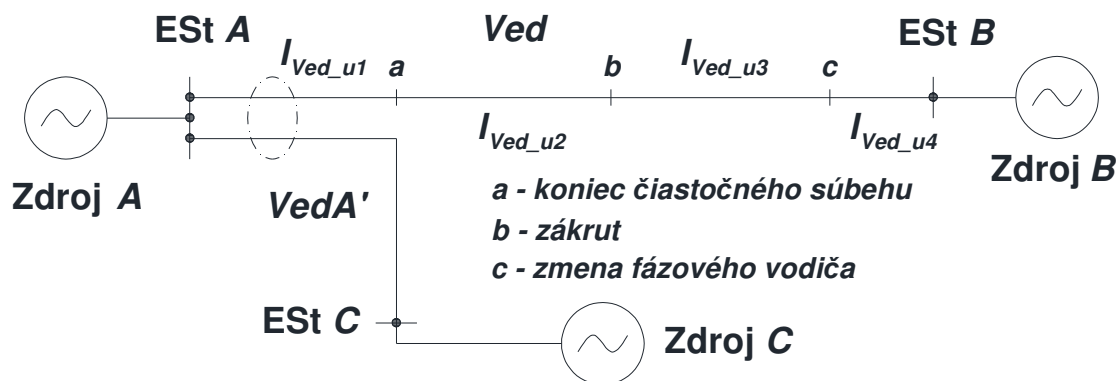
Na tomto skúmanom jednoduchom vedení Vxyz (ako bolo spomenuté jedná sa o vedenie V495 medzi rozvodňami Bošáca a Varín), skúmanom v tejto vznikol 7.9.2016 prechodný skrat vo fáze L2 (L2 – N) Ochrany so strany elektrickej stanice (ESt) A zamerali poruchu vo vzdialenosti 78,4 km, resp. 77,5 km (nepresnosť 3,72%, resp. 4,82%). Toto vedenie má aj na oboch koncoch vlnový lokalizátor porúch, ktorý určil vzdialenosť poruchy 81,43 km od ESt A. Túto hodnotu môžeme vziať ako reálnu vzdialenosť poruchy (odchýlka od skutočnosti mohla byť v tomto prípade niekoľko desiatok metrov). Navrhovaný algoritmus určil miest poruchy vo vzdialenosti 82,914 km (nepresnosť 1,82%) od ESt A Tabuľke 4.6 je porovnanie určenia vzdialenosti ochranami, ktoré počítajú vzdialenosť poruchy podľa algoritmov 3.1.1.d) a 3.1.1.e), a navrhovaným algoritmom.

Výpočet vzdialenosti 1 fázového skratu L2 – N od ES A								
Fáza	Napätie [kV]		Prúdy [kA]		Výpočet vzdialenosti a odchýlka			
	Pred Poruchou	Porucha	Pred Poruchou	Porucha		Podľa 3.1.1.d)	Podľa 3.1.1.e)	Podľa 4.2.2.
L1	239,00∠0,0	226,00∠358,4	0,330∠11,5	0,490∠2,0	l [km]	78,400	77,500	82,914
L2	240,83∠239,8	137,00∠240,2	0,370∠255,4	4,400∠163,8				
L3	239,00∠120,0	233,00∠119,7	0,356∠132,8	0,175∠113,4	Δ [%]	3,721	4,823	1,822
N	2,01∠144,7	88,08∠61,5	0,033∠249,2	4,056∠159,7				

Tab. 4.6 Porovnanie vypočítanej vzdialenosti pri reálnej poruche algoritmami (7), (9) a (19)

4.1.4 Navrhovaný algoritmus – použitie pre nehomogénne vedenia.

V kapitole 4.1.2 je opísaný návrh jednostranného lokalizátora porúch, zohľadňujúceho topológiu vedenia a v kap. 4.1.3. jeho porovnanie s používanými jednostrannými a viacstrannými algoritmi. Algoritmus rieši výpočet vzdialenosti poruchy pre „homogénne“ vedenie (jednoduché a dvojité), resp. pre vedenie, ktoré je vyjadrené ako „homogénne“. Teda vedenie, ktoré je na celej svojej dĺžke „rovnaké“ a je vyjadrené jednou impedančnou maticou Z_{Ved} . Každý úsek takéhoto vedenia má potom rovnakú jednotkovú impedanciu z_{Ved} (kde $z_{Ved} = Z_{Ved}/l_{Ved}$). S týmto predpokladom určujú vzdialenosť poruchy aj jestvujúce jednostranné (viď kap. 3.1.1.) a aj niektoré viacstranné (kap. 3.1.2.b)) lokalizátory porúch. Takéto vedenia sa nachádzajú v elektrizačnej sústave (viď kap. 4.1.1) avšak častejšie sa v sústave vyskytujú vedenia „nehomogénne“. Teda linky ktoré majú na svojej dĺžke zákruty (na zmiernenie impedančnej a admitančnej nesymetrie), nerovnaké fázové a/alebo zemné vodiče na svojej dĺžke, nerovnaké stožiare na ktorých sú vedené, prípadne majú druhé vedenie v čiastočnom súbehu alebo linka v súbehu končí na opačnom konci na inej prípojnici (rozvodni) a štandardný postup pre dvojité vedenie sa nedá použiť. Takéto nehomogénne vedenie je však možné rozdeliť na n homogénnych úsekov (obr. 4.7) a zistiť na ktorom úseku je porucha. Ďalej je možné vypočítať napätie na začiatku poruchy (z pohľadu merania ochranou) a impedanciu úsekov ZA úsekom na ktorom je porucha pripočítať k zdrojovej impedancii. Tým pádom je možné z malou obmenou použiť vzťahy pre výpočet vzdialenosti poruchy na homogénnom vedení. Neznáma p bude vyjadrovať vzdialenosť od začiatku úseku na ktorom porucha nastala.



Obr. 4.7 Nehomogénne vedenie $VedA$ rozdelené na N ($N = 4$) homogénnych úsekov

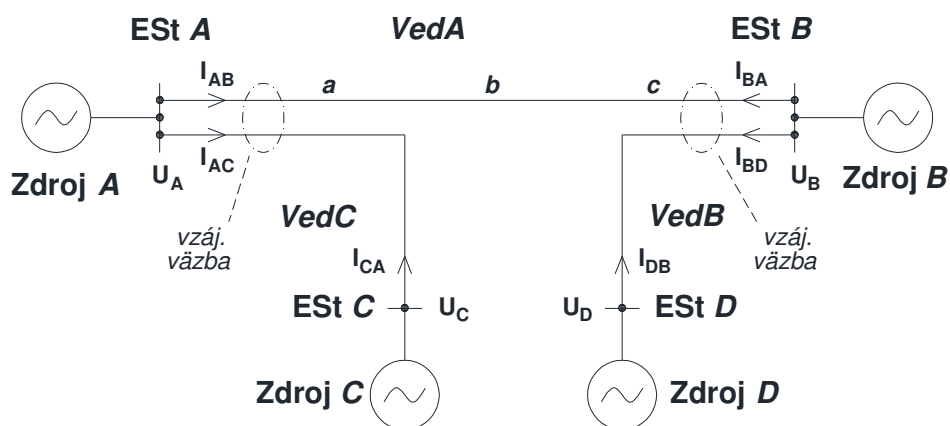
Vedenie prenosovej sústavy V494, medzi elektrickými stanicami Medzibrod a Sučany, má obdobný profil, ako vedenie zobrazené na obr. 4.7. Vedenie má celkovú dĺžku 62,03 km, pričom prvých 34,6 km ide v súbehu s vedením V461 (aj keď vedenia nie sú osadené na tých istých stožiaroch, vzájomná vzdialenosť osí stožiarov týchto vedení je 40 m a vzájomne sa ovplyvňujú). Obe vedenia sú na spoločnom úseku osadené na stožiaroch typu „Mačka“ (viď obr. 4.1) a nie sú prestriedané (jednotlivé impedančné slučky sa líšia). Keďže sa jedná o čiastočný súbeh, ochrany oboch vedení nemerajú zemný prúd paralelného vedenia. Taktiež impedancia vedenia (pre lokalizátor porúch) je vyjadrená „jedným číslom“, resp. jednou hodnotou veličín X_1, R_1, X_0, R_0 . Na tomto vedení prišlo 3.9.2016 k prechodnému skratu. Vedenia V461 a V494 majú spoločný vlnový lokalizátor ktorý zameria poruchu na „spoločnom vedení“ V461-V494. Keďže lokalizátor (kvôli istým technickým problémom) neurčil vzdialenosť spojením záznamov z oboch strán, bolo nutné určiť vzdialenosť poruchy jednostranne (priama a odrazená vlna). V takomto prípade je presnosť nižšia ako pri obojstrannom, avšak

nepresnosť (pri korektnom spracovaní) nie je vyššia ako niekoľko sto metrov (< 300 m). Lokalizátor na L. Mare ukázal vzdialenosť 76,4 km, čo predstavuje vzdialenosť 23,1 (± 300 m) od elektrickej stanice Medzibrod. Predpokladajme, že porucha bola na „spodnej hranici“, .t.j. vo vzdialenosti 22,8 km (ako bude ukázané nižšie, táto vzdialenosť je priaznivejšia pre používané algoritmy a menej priaznivá pre navrhovaný algoritmus). Jednostranné lokalizátory vedenia, počítajúce vzdialenosť poruchy podľa algoritmov 3.1.1.d) a 3.1.1.e), ukázali vzdialenosť poruchy vo vzdialenosti 19,49 km, resp. 19,64 km (nepresnosť 14,5% resp. 13,9%). Aj v prípade, že by ochrany merali zemný prúd a mali by nastavenú kompenzáciu paralelného vedenia (čo by však nepriaznivo vplývalo výpočet vzdialenosti poruchy na úseku vedenia bez súbehu s iným vedením), ukázali by miesto poruchy vo vzdialenosti 21,18 km resp. 21,35 km (nepresnosť 7,1, resp. 6,4%). Vzdialenosť vypočítaná podľa navrhovaného algoritmus by bola 23,25 km, čo predstavuje odchýlku 1,9%. V prípade, že by sme brali do úvahy vyššie uvedenú vzdialenosť 23,1 km, nepresnosť navrhovaného algoritmu by bola 0,6%.

4.2 Dvoj a viacstranný lokalizátor porúch, zohľadňujúceho topológiu vedenia a zdrojové impedancie – návrh algoritmu

Hoci jednostranný lokalizátor porúch, zohľadňujúci topológiu vedenia (opísaný v predchádzajúcej kapitole 4.1) je presnejší ako používané jednostranné a aj dvojstranné lokalizátory porúch, počítajúce vzdialenosť poruchy s využitím symetrických zložiek impedancie vedenia, potrebuje pre správny výpočet vzdialenosti poznať zdrojovú impedanciu protiľahlej strany vedenia. Tento lokalizátor taktiež nedokáže kompenzovať viaceré súbehy vedení a taktiež neuvažuje s priečnou admitanciou, ktorej vplyv nie pri vysoko ohmových poruchách úplne zanedbateľný

Majme vo všeobecnosti nehomogénne vedenie **VedA** medzi elektrickými **A** a **B**, ktoré je možné rozdeliť na n „homogénnych“ úsekov. Uvažujme, že vedenie **VedA** má, resp. môže mať, na začiatku a aj na konci svojej dĺžky v súbehu iné vedenie elektrizačnej sústavy (rovnakej napäťovej úrovne) – označme ich **VedC** a **VedB**. Vedenie **VedA** môžeme rozdeliť na tri časti. Časť **a** (ktorá obsahuje a_k úsekov) – vedenie **VedA** je v súbehu s vedením **VedC**, časť **b** (ktorá obsahuje b_k úsekov) – vedenie **VedA** nie je v súbehu so žiadnym vedením, a časť **c** (ktorá obsahuje c_k úsekov) – vedenie **VedA** je v súbehu s vedením **VedB** – vid' obr. 4.10. V prípade, že vedenie **VedA** má v súbehu iba jedno vedenie, situácia sa zjednoduší, keďže vedenie rozdelíme iba na dve časti a pri vedení bez súbehu bude celé vedenie **VedA** brané ako jedna časť.



Obr. 4.8 Vedenie **VedA** s viacerými súbehmi – všeobecné znázornenie

Predpokladajme, že lokalizátor porúch „pozná“ napätia a prúdy na oboch koncoch vedenia ako aj prúdy a napätia na začiatku/konci vedení v súbehu. Majme na tomto vedení poruchu na úseku k vo vzdialenosti p od začiatku úseku k v smere od elektrickej stanice A . Predpokladajme poruchy na prvej časti (a) vedenia. Potom s ohľadom na rovnice 4.41 a 2.27 platia pre napätie v mieste poruchy U_F nasledovné vzťahy, z pohľadu od elektrickej stanice A (4.18) a z pohľadu od elektrickej stanice B (4.19)

$$U_F = U_A + \sum_{ia=a_1}^{k-1} [DD_{ia} \times U_{iaz} + DD'_{ia} \times U'_{iaz} - BB_{ia} \times I_{iaz} - BB'_{ia} \times I'_{iaz}] +$$

$$+ p \times (DD_k \times U_{Ak} + DD'_k \times U'_{Ak} - BB_k \times I_{Ak} - BB'_k \times I'_{Ak}) \quad (4.18)$$

$$U_F = U_B + \sum_{ic=c_k}^{c_1} (DD_{ic} \times U_{ick} + DD'_{ic} \times U'_{ick} - BB_{ic} \times I_{ic} - BB'_{ic} \times I'_{ick}) +$$

$$+ \sum_{ib=b_k}^{b_1} (DD_{ib} \times U_{ibk} - BB_{ib} \times I_{ibk}) + \sum_{ia=a_k}^k (DD_{ia} \times U_{iak} + DD'_{ia} \times U'_{iak} -$$

$$- BB_{ia} \times I_{iak} - BB'_{ia} \times I'_{ia}) + (1 - p) \times (DD_k \times U_{Bk} + DD'_k \times U'_{Bk} -$$

$$- BB_k \times I_{Bk} - BB'_k \times I'_{Bk}) \quad (4.19)$$

Tieto rovnice upravíme

$$U_F = U_{Ak} + p \times (DD_k \times U_{Ak} + DD'_k \times U'_{Ak} - BB_k \times I_{Ak} - BB'_k \times I'_{Ak}) \quad (4.20)$$

$$U_F = U_{Bk} + (1 - p) \times (DD_k \times U_{Bk} + DD'_k \times U'_{Bk} - BB_k \times I_{Bk} - BB'_k \times I'_{Bk})$$

Napätie U_{Ak} predstavuje napätie na začiatku úseku k , v smere od elektrickej stanice A , a napätie U_{Bk} predstavuje napätie na konci úseku k , v smere od elektrickej stanice A (resp. na začiatku tohto úseku v smere od elektrickej stanice B). Podobne napätia U'_{Ak} a U'_{Bk} predstavujú napätia na začiatku a konci úseku k paralelného vedenia. Obdobné je to aj s prúdmi I_{Ak} , I_{Bk} , I'_{Ak} a I'_{Bk} . Pokiaľ vieme na ktorom úseku k sa nachádza porucha, vieme tieto prúdy a napätia vypočítať. Obdobným spôsobom je možné vyjadriť poruchu v druhej (b) alebo tretej časti (c) vedenia, na ktoromkoľvek ich úseku k (vo vzdialenosti p od začiatku úseku k). Pokiaľ poznáme (vieme merať) prúdy a napätia na všetkých relevantných vývodoch (elektrických staniaciach) v sústave a vieme na ktorom úseku vedenia k prišlo k poruche, vieme vypočítať (určiť) napätia U_{Ak} , U'_{Ak} , U_{Bk} , U'_{Bk} a prúdy I_{Ak} , I_{Bk} , I'_{Ak} , I'_{Bk} na „začiatku“ a „konci“ úseku.

Rovnice uvádzané v 4.20 je možné zlúčiť, čím dostávame jednu rovnicu v maticovom tvare

$$(U_{Bk} - U_{Ak}) + (DD_k \times U_{Bk} + DD'_k \times U'_{Bk} - BB_k \times I_{Bk} - BB'_k \times I'_{Bk}) =$$

$$= p \times [DD_k \times (U_{Ak} + U_{Bk}) + DD'_k \times (U'_{Ak} + U'_{Bk}) - BB_k \times (I_{Ak} + I_{Bk}) -$$

$$- BB'_k \times (I'_{Ak} + I'_{Bk})] \quad (4.21)$$

Túto rovnicu je možné ju rozpísať na tri algebraické rovnice pre tri fázy, resp. pre tri slučky fáza - zem. Podľa typu poruchy a fázy v ktorej skrat nastal, vyberieme patričnú rovnicu

(slučku), resp. patričné rovnice, a vypočítať neznámu vzdialenosť p (vid ďalej). Samotný úsek k je možné zistiť tak, že v prvom kroku budeme predpokladať že porucha je na prvom úseku a do rovníc dosadíme $k = 1$. Pokiaľ je porucha na tomto úseku, vypočítaná neznáma p bude v intervale $p \in (0; 1)$. Ak vypočítaná vzdialenosť p bude mimo tento interval, porucha nie je na tomto úseku. Budeme ďalej predpokladať, že porucha je na druhom úseku a do rovníc dosadíme $k = 1$ a vypočítame, či sa neznáma p nachádza v intervale $p \in (0; 1)$. Pokiaľ nie, skúsime ďalší interval. Šikovnejší postup môže byť použiť pre prvé priblíženie jednostranný lokalizátor porúch. Následne vieme približne na ktorom úseku vedenia sa porucha nachádza a vypočítať vzdialenosť na predpokladanom úseku vedenia a na úsekoch v okolí.

Majme jednoduché homogénne vedenie opísané v kapitole 4.1.3. Uvažujme jednofázové poruchy $L1 - N$ a $L2 - N$ v dvoch tretinách vedenia od elektrickej stanice A , s prídavnou rezistanciou v mieste skratu $R_F = 50 \Omega$, tak ako sú uvádzané v Tab. 4.3, v riadku 1, resp. 2. V týchto prípadoch bola nepresnosť pri výpočte vzdialenosti poruchy navrhovaným jednostranným algoritmom 0,479%, resp. 1,811% (určenie vzdialenosti poruchy používanými algoritmi boli výrazne vyššie). Napätia U_{Ak} , U_{Bk} a prúdy I_{Ak} , I_{Bk} pri poruche ako aj výpočet vzdialenosti poruchy dvojjstranným algoritmom a presnosť určenia vzdialenosti sú uvádzané v tabuľke 4.7

Vzdialenosť poruchy, 67% vedenia – 67,273 km dvojjstranným lokalizátorom porúch									
Č.	Por.	Rf	Fáza	U_{Ak} [kV]	U_{Bk} [kV]	I_{Ak} [kA]	I_{Bk} [kA]	Výpočet	Výpočet
1	L1-N	50,00	L1	220,49 \angle -7,74°	222,30 \angle -18,12°	2,63 \angle -14,44°	1,70 \angle -39,81°	Vypočítaná vzdial. [km]	67,239
			L2	238,01 \angle 239,86°	240,02 \angle 232,17°	1,18 \angle 243,25°	1,19 \angle 58,65°	Chyba [%]	-0,066
			L3	238,22 \angle 120,09°	237,43 \angle 112,65°	1,11 \angle 123,52°	1,10 \angle -61,46°		
			N	35,82 \angle 235,17°	48,13 \angle 235,35°	1,60 \angle -29,54°	2,67 \angle -23,16°		
2	L2-N	50,00	L1	237,97 \angle 0,10°	237,57 \angle -7,34°	1,109 \angle 3,13°	1,11 \angle 178,30°	Vypočítaná vzdial. [km]	67,215
			L2	221,26 \angle 231,94°	222,75 \angle 222,13°	2,73 \angle 227,20°	1,64 \angle 200,16°	Chyba [%]	-0,102
			L3	238,13 \angle 119,96°	240,25 \angle 111,86°	1,11 \angle 122,51°	1,10 \angle -62,41°		
			N	36,85 \angle 118,09°	36,85 \angle 118,09°	1,67 \angle 216,93°	2,62 \angle 215,22°		

Tab. 4.7 Výpočet vzdialenosti poruchy navrhovaným dvojjstranným lokalizátorom pre jednoduché homogénne vedenie

Vzdialenosť poruchy, 67% vedenia – 67,273 km dvojjstranným lokalizátorom porúch										
Č.	Por.	Rf	Fáza	U_{Ak} [kV]	U_{Bk} [kV]	I_{Ak} [kA]	I'_{Ak} [kA]	I_{Bk} [kA]	I'_{Bk} [kA]	Výpočet
1	L1-N	50,00	L1	213,4 \angle -7,2°	209,8 \angle -17,5°	2,16 \angle -18,7	0,89 \angle -6	1,8 \angle -34,4	0,89 \angle 166,9	I [km]
			L2	229,4 \angle 240,1°	238,1 \angle 234,6°	0,58 \angle 249,7	0,58 \angle 249,7	0,56 \angle 58,3	0,56 \angle 58,2	81,539
			L3	232,9 \angle 119,5°	226,5 \angle 117,1°	0,61 \angle 131,9	0,61 \angle 131,9	0,6 \angle -59	0,6 \angle -59	chyba [%]
			N	28,7 \angle 232,9°	68,9 \angle 233,7°	1,64 \angle -28,7	0,34 \angle -33,5	2,34 \angle -26,7	0,31 \angle 147,1	-0,154
2	L2-N	50,00	L1	231 \angle -0,5°	230,2 \angle -3°	0,61 \angle 6	0,61 \angle 6	0,6 \angle 174,3	0,6 \angle 174,3	I [km]
			L2	215 \angle 232,8°	208,6 \angle 222,3°	2,15 \angle 222,9	0,89 \angle 236,5	1,82 \angle 206,1	0,87 \angle 49,7	81,499
			L3	229,6 \angle 120,1°	237,7 \angle 114,6°	0,58 \angle 130,4	0,58 \angle 130,4	0,57 \angle -61,3	0,57 \angle -61,3	chyba [%]
			N	28,9 \angle 118,8°	67,9 \angle 109,8°	1,65 \angle 215,4	0,35 \angle 222	2,32 \angle 212,3	0,33 \angle 43,9	-0,049
3	L3-L1	20,00	L1	147,1 \angle 2,9°	124,2 \angle -4,3°	4,01 \angle -79,9	1 \angle -52,6	5,54 \angle 265,8	1,06 \angle 125	I [km]
			L2	231,2 \angle 240°	230,2 \angle 235,1°	0,59 \angle 249,7	0,59 \angle 249,7	0,58 \angle 58,6	0,58 \angle 58,6	81,508
			L3	195,6 \angle 99,8°	198,4 \angle 86,5°	4,46 \angle 96,3	1,35 \angle 107	5,1 \angle 88,9	1,33 \angle -77	chyba [%]
			N	1,8 \angle 180,4°	4,5 \angle -2,6°	0,06 \angle -81,6	0,06 \angle -81,7	0,07 \angle 97,9	0,07 \angle 98,1	-0,039
4	L1-L2-L3	20,00	L1	144,1 \angle -13,7°	132,1 \angle -30,2°	4,88 \angle -55,9	1,3 \angle -39,4	6,18 \angle -65,7	1,33 \angle 137,5	I [km]
			L2	151,9 \angle 226,4°	134,9 \angle 209,4°	4,65 \angle 187,1	1,24 \angle 206,1	5,96 \angle 175,9	1,26 \angle 23	81,521
			L3	156 \angle 104,8°	140,7 \angle 88,9°	4,62 \angle 70,3	1,26 \angle 89,6	5,88 \angle 58,5	1,27 \angle 266,5	chyba [%]
			N	8,2 \angle 124,9°	8,1 \angle 95,3°	0,42 \angle 220,2	0,16 \angle 228,8	0,38 \angle 209,3	0,16 \angle 49,9	-0,022

Tab. 4.8 Výpočet vzdialenosti poruchy navrhovaným dvojjstranným lokalizátorom pre dvojité homogénne vedenie

Majme dvojité homogénneho vedenie opísané v kapitole 4.1.3. Uvažujme jednofázové poruchy $L1 - N$ a $L2 - N$, medzifázovú poruchu $L3 - L1$ a trojfázovú poruchu $L1 - L2 - L3$ v dvoch tretinách vedenia $VedA$ od elektrickej stanice A , s prídavnou rezistanciou v mieste skraty $R_F = 50 \Omega$, resp. $R_F = 20 \Omega$, tak ako sú uvádzané v Tab. 4.5, v riadkoch 3, 6, 8 a 10. V týchto prípadoch bola nepresnosť pri výpočte vzdialenosti poruchy navrhovaným jednostranným algoritmom 2,59%, 3,226%, 1,951%, resp. 1,728%. (určenie vzdialenosti poruchy používanými algoritmiami bola vyššia). Napätia U_{Ak} , U'_{Ak} , U_{Bk} , U'_{Bk} a prúdy I_{Ak} , I'_{Ak} , I_{Bk} , I'_{Bk} pri poruche ako aj výpočet vzdialenosti poruchy dvojstranným algoritmom a presnosť určenia vzdialenosti sú uvádzané v tabuľke 4.8

Z výsledkov je vidieť, že navrhovaný obojstranný lokalizátor porúch (zohľadňujúci topológiu vedenia) ktorý pri počítaní vzdialenosti poruchy berie do úvahy aj priečnu admitanciu, je presnejší ako navrhovaný jednostranný lokalizátor porúch (zohľadňujúci topológiu vedenia). Otázkou ostáva akým spôsobom „spojiť“ veličiny (napätia a prúdy), merané na rôznych miestach v sústave, resp. na rôznych elektrických staniaciach, a ich vývodoch aby ich bolo možné použiť pre dvoj a viacstranný lokalizátor porúch

4.2.1 Dvojstranný lokalizátor porúch - nesynchronizované merané veličiny

Ako bolo uvedené v kapitole 3.4. takmer každá digitálna ochrana dokáže vytvárať oscilografický poruchový záznam (vo formáte COMTRADE), ktorý (okrem iného) obsahuje aj merané analógové veličiny, fázové napätia a fázové prúdy. Tieto veličiny sú zosnímané príslušnou vzorkovacou frekvenciou, ktorá je dostatočne veľká (min. 1000 Hz) na vytvorenie presného obrazu prvej harmonickej meraných prúdov a napätí. Keďže záznam obsahuje nasnímané vzorky jednotlivých veličín, je možné vytvoriť fázorový diagram týchto meraných napätí a prúdov. Inak povedané, v rámci vytvoreného záznamu je možné zistiť, resp. vidieť, fázový posun medzi jednotlivými meranými elektrickými veličinami. Ak teda zvolíme referenčný kanál, resp. referenčnú veličinu, vieme určiť, ako sú ostatné veličiny fázovo voči nej posunuté.

Majme jednoduché vedenie prenosovej sústavy medzi stanicami A a B . Pri poruche na ňom vytvoria ochrany na oboch koncoch takýto oscilografický záznam. Pokiaľ by sme tieto dva záznamy vedeli „spojiť“ a vedeli by sme určiť fázový posun medzi veličinami v jednom a druhom zázname, vedeli by sme následne tieto napätia a prúdy z oboch koncov vedenia použiť pre vzťahy na výpočet vzdialenosti poruchy, opísané v kap. 4.1.2. Ochrany na elektrickej stanici však štandardne nie sú synchronizované presnou časovou synchronizáciou, opísanou v kapitole 4. Oscilografický záznam vytvorený ochranou pri poruche však obsahuje aj priebeh situácie pred poruchou. Dĺžka časti záznamu, ktorý ukazuje stav pred poruchového býva spravidla 200 – 300ms. Uvažujme teda ako referenčný kanál v oboch záznamoch napätie vo fáze L1 pred poruchou \bar{U}_{APrL1N} a \bar{U}_{BPrL1N} . Uhly týchto napätí (v rámci záznamu) budú rovné $0^\circ - \varphi_{U_{APrL1N}} = 0^\circ$ a $\varphi_{U_{BPrL1N}} = 0^\circ$. Od týchto napätí (resp. ich fázového posunu) sú odvodené všetky ostatné fázové veličiny (či už pred poruchou alebo počas poruchy) v rámci záznamu. Otázkou ostáva, aký je fázový posun medzi napätiami $\varphi_x - \bar{U}_{APrL1N} = \bar{U}_{BPrL1N} \times e^{-j\varphi_x}$. Pokiaľ poznáme impedančnú a admitančnú maticu vedenia (čo je potrebné vôbec pre výpočet vzdialenosti poruchy navrhovaných algoritmov) tak s použitím rovníc pre π článok 1.15 je možné vypočítať tento fázový posun. Ak zvolíme ako známe napätia a prúdy pred poruchou na elektrickej stanici A , tak napätie vo fáze L1 na elektrickej stanici B pred poruchou, a jeho fázový posun, vypočítame

$$\bar{U}_{BPrL1N} = U_{BPrL1N} \times e^{-j\varphi_x} = \bar{U}_{APrL1N} \times e^{-j0} + D_1 \times U_{APr} - D_1 \times I_{APr} \quad (4.53)$$

Index 1 pri maticiach **D** a **B** označuje prvý riadok danej matice. Absolútna hodnota vypočítaného napätia U_{BPrL1N} by mala byť približne rovnaká ako meraná hodnota v zázname vytvorenom na elektrickej stanici **B**. Vypočítaným fázovým posunom, resp., koeficientom $e^{-j\varphi_x}$ potom vynásobíme všetky merané veličiny záznamu vytvorenom na elektrickej stanici **B** a vztiahnuté k napätiu U_{BPrL1N} .

Vedenie prenosovej sústavy V427 medzi elektrickými stanicami Rimavská Sobota a Moldava má dĺžku 93,7 km. Jedná sa o jednoduché vedenie osadené na stožiaroch „Portál“ a „Ypsilon“. Oba typy stožiarov sú si podobné. Fázové vodiče sú v jednej rovine a sú vzdialené od seba 12 m (krajné fázy sú od seba vzdialené 24 m). Horizontálna vzdialenosť k zemným lanám je rovnaká (6 resp. 18 metrov) a vertikálna sa líši málo (10,7 m verzus 11,9 m). Vedenie je takmer na celom úseku neprestriedané (prestriedanie je urobené na jednom konci vedenia kvôli zaústeniu do rozvodne). Na tomto úseku vznikol 11.4.2018 prechodný skrat vo fáze L2. Lokalizátory porúch v Rimavskej Sobote určili miesto poruchy vo vzdialenosti 26,2 resp. 26,5 km od rozvodne a lokalizátory porúch v Moldave určili poruchu vo vzdialenosti 62,8, resp. 64,8 km na Vlnový lokalizátor, použitý pre vedenia V426 + V427, určil miesto poruchy vo vzdialenosti 27,97 km od Rimavskej Soboty a 65,73 od Moldavy. Navrhovaný jednostranný lokalizátor by pri tejto poruche bol presnejší, avšak nie výrazne. Poruchu by určil vo vzdialenosti 26,8 km od R. Soboty (nepresnosť 4,3 %).. Ak by sme použili navrhovaný obojstranný lokalizátor porúch, vypočítaná vzdialenosť by bola 28,4 km, od R. Soboty, čo predstavuje nepresnosť 1,44 %. Výhodou pri tejto poruche bol fakt, že výkon prenášaný vedením pred poruchou bol malý (cca 22 MW) a fázové natočenie napätí na oboch koncoch voči sebe bolo iba 0,2°.

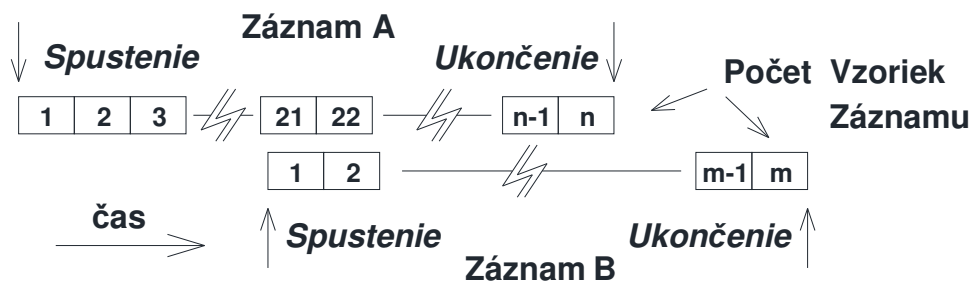
Obdobným spôsobom je možné zistiť fázový posun aj pre dvojité vedenie a aj vedenia v čiastočnom súbehu, ako je znázornené na obr. 4.7. V takomto prípade by ako referenčné napätie muselo byť použité napätie elektrickej stanice do ktorej je aj zaústené vedenie v čiastočnom súbehu.

4.2.2 Dvojstranný lokalizátor porúch - synchronizované merané veličiny

Spájania nesynchronizovaných poruchových záznamov má svoje úskalia a je pomerne pracné. Jednotlivé záznamy musia obsahovať veličiny merané pred poruchou (čo však väčšina ochrán/zariadení vykonáva) a tok výkonu pred poruchou musí byť ustálený (aby bolo možné korektne určiť fázový posun napätí pred poruchou. Oveľa väčší problém však môže predstavovať samotná porucha. Napätia a najmä prúdy totiž nie sú počas poruchy (cca 50 – 60 ms medzi vznikom poruchy a vypnutím poruchy výkonovým vypínačom) ustálené ale kolíšu (viď obr. 4.11 – a) RMS hodnoty, b) okamžité hodnoty) a tak určiť „správne“ poruchové veličiny pri nesynchronizovaných poruchových záznamoch nie úplne jednoduché (rovnakým nedostatkom trpia aj jednostranné lokalizátory porúch. Môžeme síce ako hodnoty pre výpočet vzdialenosti zvoliť povedzme priemernú hodnotu počas poruchy ale nevyhneme sa istému zjednodušovaniu. V prípade poruchových záznamov, ktoré sú vytvorené zariadením s presnou časovou synchronizáciou, je možné tieto záznamy spojiť.

Predpokladajme jednoduché vedenie *Veda* medzi elektrickými stanicami **A** a **B**. Predpokladajme digitálne ochrany (zariadenia) na oboch koncoch vedenia, ktoré majú presnú časovú synchronizáciu (s presnosťou rádovo $\sim\mu\text{s}$). Obe zariadenia pri skrate na vedení vytvoria poruchový záznam v COMTRADE formáte (viď kapitola 4.4). Predpokladajme, že obe

zariadenia majú rovnakú vzorkovaciu frekvenciu meraných veličín (povedzme 1 kHz, t.j. urobia 20 vzoriek za periódu, resp. vzorku každú milisekundu). Každé zariadenie však začne vytvárať záznam v inom čase, v závislosti od nábehu ochrany, a taktiež záznamy nemusia obsahovať rovnaký počet vzoriek (viď obr. 4.9).



Obr. 4.9 Vzorky dvoch časovo synchronizovaných poruchových záznamov

Oba záznamy však obsahujú vzorky meraných veličín počas poruchy ako aj vzorky meraných veličín pred poruchou a po poruche, keďže na skrat na vedení zareagujú (minimálne nábehom) ochrany na oboch koncoch. Iba na začiatku, resp. na konci záznamu oboch záznamov sa nachádzajú vzorky, ktoré na nenachádzajú na zázname z opačnej strany. Ak povedzme predpokladáme dĺžku záznamu 1,5 s (aj s opätovným zapnutím po beznapätvej pauze), tak obe ochrany vytvoria záznamy s 1500 vzorkami. Predpokladajme, že jedna ochrana (povedzme na rozvodni **B**) nabehne o jednu periódu neskôr (toto už veľký časový rozdiel, v skutočnosti je ten rozdiel pár milisekúnd). To znamená, že záznam vytvorený ochranou na elektrickej stanici **A** obsahuje prvých dvadsať vzoriek z času, kedy ešte ochrana na elektrickej stanici **B** nezačala vytvárať záznam. Naproti tomu ochrana na elektrickej **B** obsahuje posledných dvadsať vzoriek z času, kedy už ochrana na elektrickej stanici **A** prestala vytvárať záznam. Oba záznamy, skrátka, obsahujú vzorky ktoré (z časového hľadiska) „nemajú partnera“ v zázname z opačnej strany. S týmito vzorkami ďalej nebudeme uvažovať. Oстане nám teda 1480 „spoločných“ vzoriek, to znamená vzoriek ktoré boli vytvorené v rovnakom čase v záznamoch oboch ochrán. Ďalšou vecou, s ktorou pri spájaní takýchto záznamov treba uvažovať, je, že aj vytváranie záznamu nezačína v celej milisekunde. Inak povedané rozdiel medzi začatím vytvárania záznamu ochranami na oboch koncoch nemusí byť násobkom milisekundy. Čas s ktorým ochrana pri vzorkuje veličiny a vytvára poruchový záznam je udávaný v mikrosekundách. Poruchový záznam, vytvorený elektrickou ochranou v COMTRADE formáte, obsahuje čas spustenia záznamu, ktorý sa udáva s presnosťou na mikrosekundy. Ak teda porovnáme dva poruchové záznamy, opísané vyššie, zistíme, že časový rozdiel začatia vytvárania nie je presne 20 ms ale povedzme 20,356 ms (viď obr. 4.9). To znamená, že 1 vzorka druhého záznamu, ktorá by mala korešpondovať s 21 vzorkou prvého záznamu, je v skutočnosti časovo posunutá ešte o 356 μ s. S týmto sa však dá vysporiadať, keďže COMTRADE formát má pri popise analógových signálov položku, ktorá hovorí o časovom posunutí vzhľadom na čas spustenia záznamu a z neho odvodený čas jednotlivých vzoriek. Toto posunutie sa udáva v μ s.

Obdobným spôsobom je možné spojiť viacero poruchových záznamov z rôznych miest v elektrizačnej sústave a následne takto spojený COMTRADE súbor použiť pre dvojstranný (prípadne viacstranný) lokalizátor porúch pre jednoduché a dvojité vedenia, vedenia s čiastočnom súbehom, trojuholník vedení, „T-čkové“ vedenia a pod.

5. Technické prevedenie výpočtu vzdialenosti poruchy

V kapitole 3 bolo spomenuté, že takmer každá ochrana vytvorí pri poruche záznam o udalosti v štandardizovanom COMTRADE formáte. Tento záznam obsahuje údaje o situácii na vedení pred poruchou, počas poruchy a aj po poruche. V prípade presne časovo synchronizovaných ochrán, je možné záznamy týchto zariadení spojiť do jedného, ako bolo opísané v kapitole 5.3.5. Vytvorený záznam obsahuje merané vzorky analógových veličín, ktoré odpovedajú vzorkovacej frekvencii ochrany, resp. vzorkovacej frekvencii vytváraného záznamu. V praxi vzorkovacia frekvencia používaných zariadení nie je menšia ako 1kHz [18 – 20]. To znamená (vzhľadom na kap. 4.2.2) že pri tejto vzorkovacej frekvencii je možné zo záznamu pre jednotlivé veličiny určiť hodnoty zložiek od jednosmernej až po deviatu harmonickú. Nás bude zaujímať iba prvá harmonická, ktorá, vzhľadom na použitú vysokú vzorkovaciu frekvenciu (20 vzoriek za periódu), bude mať dostatočný počet vzoriek na presné určenie absolútnej efektívnej hodnoty a fázového posunu. Mnohé zariadenia majú vzorkovaciu frekvenciu výrazne vyššiu ako spomenutý 1kHz (nezriedka nad 4 kHz).

Z meraných vzoriek analógovej veličiny vieme eliminovať jednosmernú zložku a následne použitím DFT vieme vypočítať jej prvú harmonickú. Tu treba poznamenať, že na korektné určenie prvej harmonickej pri poruche (pred alebo po poruche) je nutné aby daný „ustálený“ stav trval aspoň jednu periódu. Keďže však čas medzi vznikom poruchy a jej vypnutím výkonovým vypínačom nebýva menší ako 40 ms (pri väčšine porúch je to okolo 50 – 60 ms) táto podmienka je splnená. Čo sa týka stavu pred poruchou a po nej, v parametroch vytvárania záznamu bývajú nastavené dĺžky týchto úsekov na 200 – 300 ms. Ak záznam obsahuje x_n vzoriek a počet vzoriek vytvorených za periódu je N , týmto spôsobom dostaneme $x_n - N$ hodnôt prvej harmonickej meraných veličín. Tieto vypočítané hodnoty predstavujú priebeh veličín pred poruchou, počas poruchy a po poruche, vzhľadom na nastavenie vytvárania poruchového záznamu. Takto vypočítané fázory jednotlivých meraných analógových veličín je možné následne použiť pre navrhované algoritmy lokalizátorov porúch

Záver

Medzi nevýhody navrhovaných algoritmov patrí komplikovanejší a pracnejší výpočet vzdialenosti porúch. Pri týchto metódach určenia vzdialenosti poruchy je potrebné poznať impedančnú maticu vedenia Z_{Ved} , resp. $Z_{VedAA'}$, prípadne impedančné matice jednotlivých homogénnych úsekov Z_{Ved_uk} , resp. $Z_{VedAA'_uk}$. Pokiaľ sa symetrické zložky \bar{Z}_{1Ved} , \bar{Z}_{0Ved} , \bar{Z}_{0MVed} konkrétneho vedenia počítajú (a nie „odhadujú“) – čo je v prípade prenosovej sústavy pravidlom – je pre výpočet týchto hodnôt potrebné najprv určiť práve maticu Z_{Ved} , resp. $Z_{VedAA'}$. Ak vedenie obsahuje viacero rôznych úsekov ktoré sa navzájom líšia (rozdielne fázové a/alebo zemné laná, čiastočný súbeh a pod.), počítajú sa čiastkové impedančné matice týchto úsekov Z_{Ved_uk} , resp. $Z_{VedAA'_uk}$. Údaje o impedančnej matici, resp. impedančných maticiach, sú tým pádom k dispozícii. Celkovú hodnotu matice Z_{Ved} je možné taktiež zmerať. V prípade navrhovaného jednostranného lokalizátora porúch je nutné určiť zdrojové impedancie $Z_{ZA(B)}$ sústavy na koncoch vedenia. Tieto je možné vypočítať z modelu elektrizačnej sústavy, ktorý je však v prípade prenosovej sústavy taktiež k dispozícii. Istým nedostatkom navrhovaného jednostranného lokalizátora porúch je situácia keď je vedenie zapnuté naprázdno, t.j. vedenie je zapnuté iba z jednej strany pod napätím a neprenáša výkon. Z pohľadu výpočtu sa jedná o vedenie ktoré je zapnuté z oboch strán ale neprenáša výkon. V prípade skratu s prídavnou rezistanciou potom algoritmus uvažuje aj s vplyvom protiahlej strany vedenia, čo vnáša nepresnosť do výpočtu vzdialenosti poruchy. Tento stav sa dá ošetriť „ručne“ (pracovník, ktorý robí rozbor poruchy, vie že vedenie bolo zapnuté naprázdno a nechá prepočítať vzdialenosť s príslušnou podmienkou) alebo úrovnou kapacitného prúdu pred poruchou, ktorý je úmerný kapacite vedenia a napätia v mieste merania ochrany. Doplnenie týchto metód do jestvujúcich ochrán nie je celkom možné, preto je nevyhnutné vytvoriť ich v samostatnom zariadení, ktoré bude obsahovať naprogramované algoritmy a bude vedieť načítať (alebo vytvoriť) poruchový záznam, resp. záznamy, a z nich určiť vzdialenosť poruchy.

Hlavnou výhodou navrhovaných algoritmov je ich výrazne vyššia presnosť určenia vzdialenosti poruchy, v porovnaní s používanými lokalizátormi porúch, ktoré počítajú vzdialenosť poruchy pomocou symetrických zložiek impedancie vedenia. Navrhované algoritmy zohľadňujú topológiu silového vedenia, čiastočné súbehy s inými vedeniami a v prípade obojstranného lokalizátora aj priečnu admitanciu chráneného vedenia, ktorá má vplyv na výpočet vzdialenosti poruchy pri vysoko ohmových poruchách. Ich presnosť bude ovplyvnená presnosťou vypočítaných parametrov vedenia a presnosťou prístrojových transformátorov prúdu a napätia (týmito faktormi sú však ovplyvnené všetky lokalizátory porúch, ktoré počítajú vzdialenosť poruchy na impedančnom princípe).

Literatúra

- [1] ANDERSON, P. M. – Analysis of Faulted Power Systems, Iowa State University Press, 1973, ISBN 0-7803-1145-0
- [2] REISS, L., MALÝ, K., PAVLÍČEK, Z., NĚMEČEK, F., *Teoretická elektroenergetika*. Alfa Bratislava, 1977
- [3] KERSTING, W. H. – Distribution System Modelling and Analysis, CRC Press LLC, 2002, ISBN 0-8493-0812-7
- [4] TLIES, N. – Power Systems Modelling and Fault Analysis. Elsevier Ltd., Oxford, 2008, ISBN-13: 978-0-7506-8074-5
- [5] ZIEGLER, G. – Numerical Distance protection, Principles and application, Siemens, 1999, ISBN 3-89578-266-1
- [6] C37.114-2014 - IEEE *Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines*, 2014, ISBN 978-0-7381-9422-6
- [7] DAS, S., SANTOSO S., GAIKWAD, A., PATEL, M. 2014. *Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application*. IEEE Access, April 2014, p. 537 – 557.
- [8] GONG, Y., a kol., “Automated fault location system for nonhomogeneous transmission networks,” proceedings of the 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, Apr. 2012.
- [9] IEEE Std C37. 118TM.1-2011, 28 December 2011, New York, USA
- [10] PHADKE, A. G., THORP, J. S. – *Synchronized Phasor Measurements and Their Application*, Springer Science, 2008, ISBN: 978-0-387-76535-8
- [11] GPS - GLOBAL POSITIONING SYSTEM WIDE AREA AUGMENTATION SYSTEM (WAAS) PERFORMANCE STANDARD, 2008
<https://www.gps.gov/technical/ps/2008-WAAS-performance-standard.pdf>
- [12] SUNDARARAJAN, D., *The Discrete Fourier Transform*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001, ISBN 981-02-4521.-1
- [13] IRIG Standard 200-04, RCC, 2004, New Mexico 88002-5110, USA
- [14] PHADKE, A. G., THORP, J. S. – *Computer Relaying for Power Systems*, Wiley Press, 2009, ISBN 978-0-470-05713-1
- [15] Centeno, V. – *Mimic circuit simulation in real time*, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1988
- [16] IEEE Std C37.111-1999, 18 March 1999, New York, USA
- [17] www.neplan.ch
- [18] Line distance protection REL670, Technical reference manual, ABB, 2012, Document ID: 1MRK 506 312-UEN
- [19] SIPROTEC Distance and Line Differential Protection, Breaker Management for 1-Pole and 3-Pole Tripping 7SA87, 7SD87, 7SL87, 7VK877SA6 Manual, Siemens, 2016, C53000-G5040-C011-8
- [20] SEL-421-4 -5, Protection, Automation and Control System, Instruction manual, SEL, 2018, 20181210

Publikácie autora príbuzné k téme dizertačnej práce

- [1] SPIELBÖCK T., BELÁŇ A. – *Design of a one-sided, impedance-based transmission line faultlocator using line topology and source impedances*, Electric Power System Reaserch 161, 2018, p.123 – 138