

Ing. Marián Ivanič

Autoreferát dizertačnej práce

**ASPEKTY NESYMETRIE PARAMETROV A VELIČÍN
V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**

v študijnom odbore 5.2.30 Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 30.06.2017

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Marián Ivanič

Autoreferát dizertačnej práce

**ASPEKTY NESYMETRIE PARAMETROV A VELIČÍN
V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 30.06.2017

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. Marián Ivanič**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

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

Oponenti: **prof. Ing. Juraj Altus, PhD.**
Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta
Katedra výkonových elektrotechnických systémov
Univerzitná 1, 010 26 Žilina

Ing. Ľuboš Skurčák, PhD.
VUJE, a.s.
Okružná 5, 918 64 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: 21. augusta 2017 o 10:00 hod

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

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

OBSAH

ÚVOD	4
TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE	5
1 SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	6
1.1 Nesymetria v elektrizačnej sústave.....	6
1.2 Riešenie skratových pomerov podľa normy STN EN 60909.....	9
1.2.1 Vonkajšie elektrické vedenia.....	9
1.2.2 Výpočet začiatočného rázového skratového prúdu.....	9
2 NESYMETRIA PARAMETROV VEDENÍ	3
2.1 Vplyv nesymetrie parametrov vedení na ustálené stavy	5
2.1.1 Vplyv nesymetrie parametrov vedení na úbytky napätí.....	6
2.1.2 Vplyv nesymetrie parametrov vedení na straty na vedení	10
2.2 Vplyv nesymetrie impedancií vedení na prechodné javy	11
2.2.1 Nesymetria skratových prúdov na 400 kV vedeniach.....	11
2.2.2 Nesymetria skratových prúdov v časti sústavy	25
3 NÁVRH ODPORÚČANÍ PRE NORMU STN EN 60909	26
3.1 Korekčný súčiniteľ nesymetrie pre impedanciu netransponovaných vedení	26
3.2 Korekčný súčiniteľ nesymetrie pre začiatočný rázový skratový prúd so zahrnutím vplyvu nesymetrie impedancií vedení	28
PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE PRE PRAX.....	29
ZÁVER.....	30
POUŽITÁ LITERATÚRA	32
ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ AUTORA SÚVISIACICH S PROBLEMATIKOU DIZERTAČNEJ PRÁCE	34

Úvod

Na výrobu, rozvod a prenos elektrickej energie sa najčastejšie používa trojfázová striedavá sústava, ktorá je prirodzene parametrovo nesymetrická.

Nesymetria sa môže týkať elektrických parametrov zariadení (impedancia, admitancia) alebo elektrických prevádzkových veličín (napätie, prúd a výkon).

Nesymetria elektrických parametrov energetických zariadení, ktorá ovplyvňuje nesymetriu prevádzkových veličín, sa v elektrizačnej sústave všeobecne zanedbáva, čím sa značne zjednodušujú riešenia ustálených stavov a prechodných dejov.

Avšak zanedbaním nesymetrie v sústave vznikajú určité chyby výsledkov pri riešení ustálených stavov a prechodných dejov, ktoré závisia od úrovne nesymetrie parametrov zariadení. Pri symetrickom napájaní zariadenia sú symetrické aj prevádzkové veličiny závislé od tohto napájania, ktoré pri uvažovaní nesymetrie parametrov zariadenia sú nesymetrické.

V práci som sa zamerlal na nesymetriu parametrov vedení, ktoré sa dajú vypočítať z geometrie stožiaru, teda z usporiadania jednotlivých vodičov na vedení.

Najprv je riešený vplyv nesymetrie parametrov vedení s rôznymi typmi stožiarov na nesymetriu prevádzkových veličín pri symetrickom napájaní vedenia, ktorá je vyjadrená pomocou uplatňujúcich sa symetrických zložiek prostredníctvom koeficientov nesymetrie a koeficientov nevyváženosti.

Pomocou symetrických zložiek je vyjadrená aj nesymetria skratových prúdov pri trojfázovom skrate a trojfázovom zemnom skrate na vedeniach, pričom tieto dva typy skratov v prípade symetrie parametrov predstavujú rovnaké a symetrické poruchy.

Nakoniec porovnávam riešenie skratových prúdov podľa normy STN EN 60909 s riešením skratových prúdov s uvažovaním nesymetrie parametrov vedení, kde poukazujem na to, že zanedbaním nesymetrie impedancií vedení môžu vzniknúť značné rozdiely skratových prúdov. Preto výpočtom podľa skratovej normy nie sú stanovené maximálne skratové prúdy, ktoré sú dôležité napr. pri určení skratovej odolnosti vedenia, resp. zariadenia. Potom v prípade vysokej miery nesymetrie parametrov zariadenia možno očakávať, že zanedbaním nesymetrie parametrov bude nesprávne stanovená skratová odolnosť zariadenia.

Tézy dizertačnej práce

- Stanovenie nesymetrie parametrov vedení pre používané typy stožiarov na napäťových hladinách 400 kV, 220 kV a 110 kV z pohľadu definícií nesymetrie.
- Riešenie nesymetrických prechodných dejov s uvažovaním nesymetrie parametrov vedení.
- Analýza výsledkov riešenia nesymetrických prechodných dejov a porovnanie s riešením metódou zložkových sústav.
- Návrh odporúčaní pre výpočet skratových pomerov v zmysle normy STN EN 609 09.

1 Súčasný stav riešenej problematiky

1.1 Nesymetria v električkej sústave

Električná sústava je jeden veľký systém, ktorý pozostáva zo zariadení so svojimi elektrickými parametrami. Ďalej tieto zariadenia sú prevádzkované a na opis tejto prevádzky sa používajú elektrické prevádzkové veličiny: napätie, prúd, výkon.

Podľa „klasickú“ definície nesymetrie sa pri trojfázových sústavách za nesymetrické vo všeobecnosti považujú také tri fázory (napätia alebo prúdy), ktorých veľkosti nie sú rovnaké alebo ich vzájomné natočenie v komplexnej rovine nie je rovnaké (teda rôzne od 120°) [1].

Na základe tejto definície teda platí, že ak je splnená už len jedna podmienka, tak tri fázory sú nesymetrické. Ďalej je možné nesymetriu klasifikovať podľa týchto podmienok na [2]:

- amplitúdová → rôzne veľkosti fázorov,
- fázová → rôzne vzájomné natočenia fázorov,
- všeobecná → rôzne veľkosti fázorov i vzájomné natočenia fázorov.

Ďalšie rozdelenie nesymetrickej sústavy [2]:

- vyvážená → súčet fázorov sústavy je nulový,
- nevyvážená → súčet fázorov je rôzny od nuly.

I keď je nesymetria napätia resp. prúdu definovaná jednoznačne, existujú rozdielne spôsoby jej hodnotenia, pričom aj vypočítané hodnoty nesymetrie týchto veličín nie sú rovnaké.

Definícia podľa IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [3] - v trojfázovom systéme je stupeň napät'ovej nesymetrie vyjadrený pomerom medzi maximálnou odchýlkou troch fázových napätí od priemernej hodnoty fázových napätí a priemernej hodnoty fázových napätí

$$\text{Nesymetria}_{\text{napätia}} = \frac{\max(|\Delta U_{f1}|; |\Delta U_{f2}|; |\Delta U_{f3}|)}{U_{f,pr}} \cdot 100, \quad (1.1)$$

$$U_{f,pr} = \frac{U_{f1} + U_{f2} + U_{f3}}{3} \text{ - priemerná hodnota fázových napätí,}$$

$\Delta U_{f1} = U_{f1} - U_{f,pr}$ - odchýlka fázového napätia v prvej fáze od priemernej hodnoty fázových napätí, analogicky platí vzťah pre odchýlky vo zvyšných dvoch fázach.

Definícia podľa NEMA (National Electrical Manufacturers Association) [3] – postup výpočtu je rovnaký ako v predchádzajúcom prípade s tým rozdielom, že namiesto hodnôt fázových napätí sa používajú vo výpočte hodnoty združených napätí

$$\text{Nesymetria}_{\text{napätia}} = \frac{\max(|\Delta U_1|; |\Delta U_2|; |\Delta U_3|)}{U_{pr}} \cdot 100, \quad (1.2)$$

$$U_{pr} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3} \text{ - priemerná hodnota združených napätí,}$$

$\Delta U_1 = U_1 - U_{pr}$ - odchýlka združeného napätia v prvej fáze od priemernej hodnoty združených napätí, analogicky platí vzťah pre odchýlky vo zvyšných dvoch fázach.

Definícia pomocou symetrických zložiek (tzv. pravá definícia, ktorá zahŕňa veľkosť a uhol) – ďalší spôsob, ako určiť hodnotu nesymetrie, je pomocou koeficientu napäťovej nesymetrie, resp. prúdovej, na ktorého výpočet sa využíva Fortescueova metóda symetrických zložiek [4].

Uvedenie tejto metódy sa pripisuje C. L. Fortescueovi. V roku 1918 publikoval prácu, v ktorej zaviedol nulovú zložku a s tým aj metódu pre výpočet viacvodičových systémov. Táto výpočtová metóda sa vďaka zverejneniu rýchlo rozšírila do celého sveta.

Metóda symetrických zložiek je dôležitý analytický nástroj na riešenie ľubovoľného javu trojfázového obvodu a je využívaná v oblasti energetických sústav. Iba symetrické zložky môžu poskytnúť spôsob, ako získať rozsiahle a presné analytické obvody energetickej sústavy, ktorá zahŕňa generátory, vedenia, vybavenie staníc ako aj záťaž [5].

Základom je rozklad troch fázorov napätí (resp. prúdov) do symetrických zložiek a to na súslednú (+), spätnú (-) a nulovú zložku (0).

Prevod z pôvodnej sústavy, ktorá môže byť nesymetrická alebo symetrická, do symetrickej sa uskutočňuje pomocou symetrizačnej matice. V prípade prevodu trojfázového napätia z pôvodnej sústavy do symetrickej platí vzťah

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_+ \\ \bar{U}_- \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

$$\mathbf{U}_S = \mathbf{S} \cdot \mathbf{U}$$

kde \mathbf{S} je symetrizačná matica

\mathbf{U} – pôvodné trojfázové napätie fáz A, B, C: $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$,

\mathbf{U}_S – napätie v symetrických zložkách: $\bar{U}_+, \bar{U}_-, \bar{U}_0$ – súsledná, spätná, nulová

$\bar{a} = 1 \cdot e^{j \cdot 120^\circ}$ – operátor natočenia [6]

V prípade opačného procesu je prevod napätia zo symetrickej zložkovej sústavy do pôvodnej daný vzťahom

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_+ \\ \bar{U}_- \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix}, \quad (1.4)$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{U}_S = \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{U}_S$$

kde \mathbf{D} je desymetrizačná matica, ktorá je zároveň inverznou maticou k matici \mathbf{S} . Pre tieto matice platí, že ich súčin je rovný jednotkovej matici

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{D} = \mathbf{1} \quad (1.5)$$

Tieto vzťahy rovnako platia aj pre prevod prúdu v obidvoch smeroch, čo možno zapísať:

$$\mathbf{I}_S = \mathbf{S} \cdot \mathbf{I}; \text{ resp. } \mathbf{I} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{I}_S = \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{I}_S \quad (1.6)$$

Usporiadanie hodnôt symetrizačnej matice \mathbf{S} vyplýva z možných kombinácií sledu fáz a možných symetrizácií. Toto usporiadanie potom ovplyvní aj usporiadanie desymetrizačnej matice \mathbf{D} [20].

Výpočet koeficientu nesymetrie napätia, resp. prúdu je potom daný vzťahom [7]

$$k' = \frac{U_-}{U_+} \cdot 100, \text{ resp. } k' = \frac{I_-}{I_+} \cdot 100. \quad (1.7)$$

Na základe tejto definície ale nie je zabezpečená „klasická“ definícia nesymetrie, pretože môže vzniknúť nulová zložka, ktorá ovplyvňuje posunutie uzla voči symetrickej sústave (teda ak platí: $U_- = 0$).

Na základe nevyváženosti sústavy sa definuje ďalší koeficient nevyváženosti napätia, resp. prúdu vzťahom

$$k_0 = \frac{U_0}{U_+} \cdot 100, \text{ resp. } k_0 = \frac{I_0}{I_+} \cdot 100, \quad (1.8)$$

ktorý definuje mieru posunutia uzla spotrebiča voči uzlu súmernej sústavy [2].

Na hodnotenie nesymetrie je možné použiť ďalšie súčinitele definované nasledovne [8]:

Celkový koeficient nesymetrie:

$$k = k' + k_0^0 \quad (1.9)$$

Komplexný koeficient nesymetrie:

$$\bar{k}' = \frac{\bar{U}_-}{\bar{U}_+} \cdot 100 \quad (1.10)$$

Komplexný koeficient nevyváženosti:

$$\bar{k}_0 = \frac{\bar{U}_0}{\bar{U}_+} \cdot 100 \quad (1.11)$$

Aby bola splnená definícia nesymetrie, musí v prípade využitia symetrických zložiek platiť, že aspoň jeden koeficient (nesymetrie alebo nevyváženosti) je rôzny od nuly. V opačnom prípade trojfázové napätia, resp. trojfázové prúdy sú symetrické.

Od toho, ktorý koeficient je nenulový, závisia aj vlastnosti nesymetrie trojfázového napätia, prípadne trojfázového prúdu.

V prípade, ak je koeficient nevyváženosti nulový a koeficient nesymetrie je rôzny od nuly, tak platí, že trojfázová sústava napätí, resp. prúdov je vyvážená, t.j. ich súčet je rovný nule.

V opačnom prípade, kedy je koeficient nesymetrie rovný nule a koeficient nevyváženosti je rôzny od nuly, tak platí, že trojfázová sústava napätí, resp. prúdov je nevyvážená a vrcholy fázorov ležia v rovnostrannom trojuholníku. Pre napätia platí, že fázové napätia sú nesymetrické, ale združené napätia sú symetrické.

1.2 Riešenie skratových pomerov podľa normy STN EN 60909

Praktický výpočet skratových prúdov stanovuje norma STN EN 60909 (skratová norma), ktorá uvažuje parametrovo symetrickú sústavu.

1.2.1 Vonkajšie elektrické vedenia

Pre vedenia skratová norma uvádza, že [33]:

- Súsledná zložka skratovej impedancie vedenia môže byť vypočítaná z dát vodičov – prierez vodičov a vzdialenosti vodičov.
- Súsledná a nulová zložka skratovej impedancie vedenia môže byť stanovená meraním.
- Nulovú zložku je možné stanoviť aj náklade podielov nulovej a súslednej zložky rezistancie a reaktancie.

Reaktancia na jednotku dĺžky X_L transponovaného vedenia môže byť vypočítaná podľa

$$X_L = f\mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right), \quad (1.12)$$

$d = \sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ca}}$ stredná geometrická vzdialenosť medzi vodičmi,

r polomer jednoduchého vodiča, v prípade zväzkových vodičov treba použiť

ekvivalentný polomer zväzku r_{zv} ,

n počet vodičov v jednom zväzkovom vodiči, pre jednoduchý vodič: $n = 1$,

f frekvencia siete,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$ H/km permeabilita vákuu.

1.2.2 Výpočet začiatočného rázového skratového prúdu

Výpočet skratových prúdov vychádza z týchto predpokladov:

- Počas skratu nedochádza k zmene skratu.
- Nemení sa konfigurácia siete počas skratu.
- Vplyv odporu oblúka sa neuvažuje.
- Zanedbáva sa priečna admitancia

Metóda výpočtu je založená na zavedení ekvivalentného napät'ového zdroja do miesta skratu, ktorý je jediným aktívnymi napätím v sústave. Všetky ostatné sieťové napájače (tvrdé siete), synchronne a asynchronne stroje sú nahradené svojou vnútornou impedanciou.

Skratové pomery sa riešia pomocou jednofázových náhradných schém v súslednej, spätnej a nulovej zložkovej sústave, tzn. že sa predpokladá trojfázová symetrická sústava elektrických parametrov zariadení. Potom vzťahy pre výpočet začiatočných rázových skratových prúdov pri trojfázovom a jednofázovom skrate sú nasledovné:

$$\bullet \text{ Trojfázový skrat: } I''_{k3} = \frac{|\bar{U}_+|}{|\bar{Z}_+|} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_+} \quad (1.13)$$

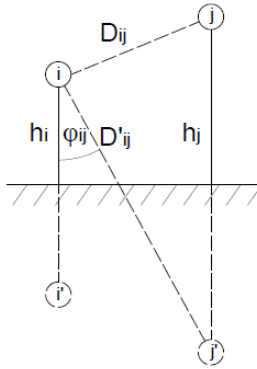
$$\bullet \text{ Jednofázový skrat: } I''_{k1} = \frac{3U_+}{|2\bar{Z}_+ + \bar{Z}_0|} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2\bar{Z}_+ + \bar{Z}_0|} \quad (1.14)$$

2 Nesymetria parametrov vedení

Vlastné a vzájomné impedancie vedení boli vypočítané podľa Carsonových vzťahov, ktorých nesymetria bola stanovená prostredníctvom nesymetrie prevádzkových veličín.

Carsonova metóda predstavuje štandard frekvenčne závislej metódy pre výpočet vlastných a vzájomných impedancií vedenia napriek tomu, že bola publikovaná v roku 1926. Táto metóda predpokladá, že zem pod vedením je homogénny, rovný, pevný a nekonečný povrch s konštantnou rezistivitou.

Uvedené sú výsledné vzťahy s označením podľa Obr. 2-1 a na jednotku dĺžky vedenia.



Obr. 2-1: Usporiadanie vodičov i, j a ich obrazov

Vlastná impedancia vodiča i je daná vzťahom:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{ii} &= R_{ii} + jX_{ii} + \Delta\bar{Z}_{N,ii} = R_{ii} + j\omega L_{ii} + \Delta\bar{Z}_{N,ii} \\ &= R_{ii} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_i}{\xi_i r_i}\right) + \Delta\bar{Z}_{N,ii} \quad [\Omega/km]\end{aligned}\quad (2.1)$$

Vzájomná impedancia medzi vodičmi i, j je daná vzťahom:

$$\bar{Z}_{ij} = jX_{ij} + \Delta\bar{Z}_{N,ij} = j\omega L_{ij} + \Delta\bar{Z}_{N,ij} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\frac{D'_{ij}}{D_{ij}} + \Delta\bar{Z}_{N,ij} \quad [\Omega/km]\quad (2.2)$$

Pre vplyv zeme podľa Carsona platia tieto vzťahy [21]:

$$\Delta\bar{Z}_{N,ii} = \Delta R_{N,ii} + j\Delta X_{N,ii}\quad (2.3)$$

$$\Delta\bar{Z}_{N,ij} = \Delta R_{N,ij} + j\Delta X_{N,ij}\quad (2.4)$$

$$\Delta R_{N,ii} = 4 \cdot 10^{-4} \omega \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1 k_{ii} + b_2 [(C_2 - \ln k_{ii}) k_{ii}^2] + b_3 k_{ii}^3 - d_4 k_{ii}^4 - \dots \right\}\quad (2.5)$$

$$\begin{aligned}\Delta X_{N,ii} &= 4 \cdot 10^{-4} \omega \left\{ \frac{1}{2} (0.6159315 - \ln k_{ii}) + b_1 k_{ii} - d_2 k_{ii}^2 + b_3 k_{ii}^3 \right. \\ &\quad \left. - b_4 [(C_4 - \ln k_{ii}) k_{ii}^4] - \dots \right\}\end{aligned}\quad (2.6)$$

$$\Delta R_{N,ij} = 4 \cdot 10^{-4} \omega \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1 k_{ij} \cos \varphi_{ij} + b_2 [(C_2 - \ln k_{ij}) k_{ij}^2 \cos 2\varphi_{ij} + \varphi_{ij} k_{ij}^2 \sin 2\varphi_{ij}] + b_3 k_{ij}^3 \cos 3\varphi_{ij} - d_4 k_{ij}^4 \cos 4\varphi_{ij} - \dots \right\} \quad (2.7)$$

$$\Delta X_{N,ij} = 4 \cdot 10^{-4} \omega \left\{ \frac{1}{2} (0.6159315 - \ln k_{ij}) + b_1 k_{ij} \cos \varphi_{ij} - d_2 k_{ij}^2 \cos 2\varphi_{ij} + b_3 k_{ij}^3 \cos 3\varphi_{ij} - b_4 [(C_4 - \ln k_{ij}) k_{ij}^4 \cos 4\varphi_{ij} + \varphi_{ij} k_{ij}^4 \sin 4\varphi_{ij}] - \dots \right\} \quad (2.8)$$

$$b_1 = \frac{\sqrt{2}}{6}; b_2 = \frac{1}{16}; b_i = b_{i-2} \frac{1}{i(i+2)}; d_i = \frac{\pi}{4} b_i \quad (2.9)$$

$$C_2 = 1.3659315; C_4 = 1.7825982 \quad (2.10)$$

$$k_{ii} = 4 \cdot 10^{-4} \pi \sqrt{5} (2h_i) \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (2.11)$$

$$k_{ij} = 4 \cdot 10^{-4} \pi \sqrt{5} D'_{ij} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (2.12)$$

$$\varphi_{ij} = \sin^{-1} \left(\frac{x_{ij}}{D'_{ij}} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{h_i + h_j}{D'_{ij}} \right) \quad (2.13)$$

Význam parametrov:

$\Delta \bar{Z}_{N,ij}$ - Carsonove korekčné činitele pre vplyv zeme ako spätného vodiča,

R_{ii} - rezistencia vodiča i ,

X_{ii} - vlastná reaktancia vodiča i ,

L_{ii} - celková indukčnosť vodiča i ,

X_{ii} - vzájomná reaktancia medzi vodičmi $i-j$,

L_{ij} - vzájomná indukčnosť medzi vodičmi $i-j$,

ξ_i - koeficient vodiča i , ktorý zahŕňa permeabilitu materiálu a je daný rovnicou

$$\frac{1}{4} \mu_{r,i} = \ln \frac{1}{\xi_i} \quad (2.14)$$

$$\xi_i = \exp \left(-\frac{\mu_{r,i}}{4} \right) \quad (2.15)$$

μ_0 - permeabilita vákua, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4} \text{H/km}$,

$\mu_{r,i}$ - relatívna permeabilita materiálu vodiča i ,

h_i - priemerná výška vodiča i nad zemou,

r_i - polomer vodiča i ,

D'_{ij} - vzdialenosť medzi vodičom i a obrazom vodiča j ,

x_{ij} - vzdialenosť medzi vodičmi $i-j$ premietnutá do osi x rovnobežnej so zemou.

φ_{ij} - uhol, ktorý zvierajú trojica: obraz vodiča i , vodič i a obraz vodiča j v tomto poradí, tento uhol je znázornený na Obr. 2-1.

2.1 Vplyv nesymetrie parametrov vedení na ustálené stavy

Vzťah medzi úbytkami napätí, prúdmi a impedanciami pre trojfázové vedenie je možné všeobecne zapísať v maticovej podobe nasledovne

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{U}_a \\ \Delta \bar{U}_b \\ \Delta \bar{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} \\ \bar{Z}_{ba} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} \\ \bar{Z}_{ca} & \bar{Z}_{cb} & \bar{Z}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Po roznásobení matice s prúdmi potom úbytky napätí v jednotlivých fázach sú dané vzťahmi

$$\begin{aligned} \Delta \bar{U}_a &= \bar{Z}_{aa} \bar{I}_a + \bar{Z}_{ab} \bar{I}_b + \bar{Z}_{ac} \bar{I}_c \\ \Delta \bar{U}_b &= \bar{Z}_{ba} \bar{I}_a + \bar{Z}_{bb} \bar{I}_b + \bar{Z}_{bc} \bar{I}_c \\ \Delta \bar{U}_c &= \bar{Z}_{ca} \bar{I}_a + \bar{Z}_{cb} \bar{I}_b + \bar{Z}_{cc} \bar{I}_c \end{aligned} \quad (2.17)$$

Hodnoty vlastných a vzájomných impedancií môžu byť zadané buď pre celé vedenie alebo na jednotku dĺžky vedenia (spravidla na 1 km). Od tohto závisí, či úbytky napätí jednotlivých fáz sú vypočítané pre celé vedenie alebo na jednotku dĺžky vedenia.

Vyčíslenie predchádzajúcich rovnic pre reálne vedenia by ukázalo, že úbytky napätia vo fázach sú rôzne, a vedenie je impedančne nesymetrické. Aby veľkosti úbytkov napätí vo všetkých troch fázach boli rovnaké, tak musia byť splnené tieto dve podmienky:

1. vedenie musí byť napájané trojfázovou symetrickou sústavou prúdov, ktoré je možné vyjadriť rovnicami

$$\bar{I}_a; \bar{I}_b = \bar{a}^2 \bar{I}_a; \bar{I}_c = \bar{a} \bar{I}_a; \text{ kde } \bar{a} = 1 \angle 120^\circ \quad (2.18)$$

2. vedenie musí byť impedančne symetrické, t.j. vlastné impedancie majú rovnaké hodnoty a vzájomné impedancie majú rovnaké hodnoty

Ak sú splnené obidve podmienky, tak úbytky napätí na vedení sú symetrické.

Na základe týchto podmienok je možné určiť pôvod nesymetrie úbytkov napätí vedenia. Ak je splnená iba prvá podmienka, tak nesymetria úbytkov napätí je spôsobená nesymetriou vlastných a vzájomných impedancií vedenia. Ak je splnená len druhá podmienka, tak nesymetria úbytkov napätí na vedení je spôsobená nesymetriou prúdov.

Cieľom bolo určiť vplyv nesymetrie vlastných a vzájomných impedancií vedenia na nesymetriu úbytkov napätí na vedení. Preto stanovenie nesymetrie úbytkov napätí bolo urobené pri predpoklade napájania vedenia trojfázovou symetrickou sústavou prúdov, čím sa eliminoval vplyv nesymetrie napájacej sústavy.

Vzťahy pre úbytky napätí jednotlivých fázových vodičov vedenia pri napájaní trojfázovou symetrickou sústavou prúdov sú nasledovné

$$\begin{aligned} \Delta \bar{U}_a &= \bar{Z}_{aa} \bar{I}_a + \bar{Z}_{ab} \bar{I}_b + \bar{Z}_{ac} \bar{I}_c = (\bar{Z}_{aa} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{ab} + \bar{a} \bar{Z}_{ac}) \bar{I}_a \\ \Delta \bar{U}_b &= \bar{Z}_{ba} \bar{I}_a + \bar{Z}_{bb} \bar{I}_b + \bar{Z}_{bc} \bar{I}_c = (\bar{Z}_{ba} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{bb} + \bar{a} \bar{Z}_{bc}) \bar{I}_a \\ \Delta \bar{U}_c &= \bar{Z}_{ca} \bar{I}_a + \bar{Z}_{cb} \bar{I}_b + \bar{Z}_{cc} \bar{I}_c = (\bar{Z}_{ca} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{cb} + \bar{a} \bar{Z}_{cc}) \bar{I}_a \end{aligned} \quad (2.19)$$

Na základe predchádzajúcich vzťahov pre úbytky napätí jednotlivých vodičov pri predpoklade napájania trojfázovou symetrickou sústavou prúdov sa potvrdilo, že nesymetria úbytkov napätí závisí len od vlastných a vzájomných impedancií vedenia.

Výpočet symetrických zložiek úbytkov napätí je daný nasledovne

$$\Delta \mathbf{U}_s = \mathbf{S} \cdot \Delta \mathbf{U}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{U}_+ \\ \Delta \bar{U}_- \\ \Delta \bar{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{ab} + \bar{a} \bar{Z}_{ac} \\ \bar{Z}_{ba} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{bb} + \bar{a} \bar{Z}_{bc} \\ \bar{Z}_{ca} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{cb} + \bar{a} \bar{Z}_{cc} \end{bmatrix} \bar{I}_a \quad (2.20)$$

Na základe vzniku symetrických zložiek úbytkov napätí bol stanovený vplyv nesymetrie impedancií vedenia na nesymetriu úbytkov napätí. Vyhodnotenie nesymetrie úbytkov napätí bolo vyhodnotené podielom spätnej, resp. nulovej zložky k súslednej zložke, teda pomocou koeficientov nesymetrie a koeficientov nevyvážeností, ktoré sú nezávislé od prúdu \bar{I}_a .

Vplyv nesymetrie impedancií vedenia na nesymetriu úbytkov napätí bol stanovený aj pre dvojsystémové vedenia pri zanedbaní vplyvu druhého systému na prvý.

2.1.1 Vplyv nesymetrie parametrov vedení na úbytky napätí

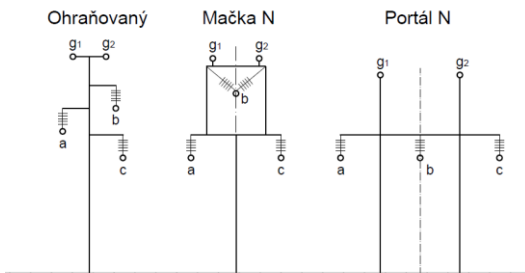
Nesymetria parametrov 400 kV vedení bola stanovená prostredníctvom vznikajúcich symetrických zložiek prevádzkových veličín. Nesymetria impedancií vedení bola stanovená prostredníctvom uplatňujúcich sa symetrických zložiek úbytkov napätí pri prúde 1 A.

Nesymetria prevádzkových veličín bola stanovená pre rôzne typy stožiarov, ktoré rozhodujú o usporiadaní vodičov na vedení a teda o parametroch vedenia.

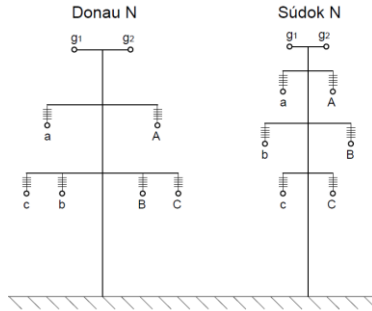
Všetky fázy 400 kV vedení pozostávajú z trojzväzku a každý vodič vo zväzku je tvorený oceľovo-hliníkovým lanom s označením 434-AL1/56-STIA. Uzemňovacie laná sú tvorené jednoduchým vodičom, ktorý pozostáva z lana 184-AL1/30-STIA.

Pre označenie stožiarov sú použité zaužívané názvy stožiarov na Slovensku. Písmeno N za označením stožiara vyjadruje nosný stožiar. Rímske čísllice I, II a III sú použité pre označenie kotevných stožiarov s rôznymi verziami.

Typy vybraných stožiarov sú zobrazené na nasledujúcom obrázku.



Obr. 2-2: Stožiare 400 kV vedení



Obr. 2-3: Stožiare 400 kV vedení

Pre vybrané typy stožiarov boli najprv vypočítané jednotlivé vlastné a vzájomné impedancie vedení podľa Carsonových vzťahov. Keďže súčasťou vedení sú aj dve uzemňovacie láná, tak v prípade ich uvažovania bola použitá Kronova redukcia. Následne boli vypočítané prevádzkové veličiny na vedení s daným typom stožiaru, ktorých nesymetria bola stanovená pomocou uplatňujúcich sa symetrických zložiek. V prípade dvojsystémových vedení sa jeden systém zanedbáva.

Nesymetria prevádzkových veličín bola riešená pre dva prípady, pri neuvažovaní uzemňovacích lán na vedení a pri ich uvažovaní. Výsledky úbytkov napätí vztiahnuté na jednotku dĺžky, ich symetrické zložky a koeficienty nesymetrie a nevyváženosti sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 2-1: Úbytky napätí na vedení bez uzemňovacích lán

Stožiar	$\Delta U_a \left[\frac{V}{km}; ^\circ \right]$		$\Delta U_b \left[\frac{V}{km}; ^\circ \right]$		$\Delta U_c \left[\frac{V}{km}; ^\circ \right]$		$\frac{\Delta U_+}{\left[\frac{V}{km} \right]}$	$\frac{\Delta U_-}{\left[\frac{V}{km} \right]}$	$\frac{\Delta U_0}{\left[\frac{V}{km} \right]}$	k' [%]	k_0 [%]
Ohraňovaný	0,274	83,78	0,265	-36,38	0,267	-151,61	0,268	0,010	0,005	3,7	1,8
Mačka N	0,291	83,25	0,284	-34,40	0,289	-152,12	0,288	0,009	0,005	3,0	1,7
Mačka I	0,292	82,78	0,283	-34,42	0,289	-151,62	0,288	0,011	0,006	3,7	2,0
Mačka III	0,301	81,93	0,288	-34,33	0,298	-150,49	0,295	0,015	0,008	5,1	2,7
Portál N	0,315	79,04	0,289	-34,41	0,310	-147,14	0,303	0,029	0,015	9,6	4,8
Portál I	0,315	79,04	0,289	-34,41	0,310	-147,14	0,303	0,029	0,015	9,6	4,8
Portál II	0,320	79,21	0,294	-34,34	0,315	-147,18	0,308	0,029	0,015	9,4	4,7
Portál III	0,325	79,36	0,298	-34,27	0,320	-147,23	0,313	0,029	0,015	9,3	4,6
Ypsilon	0,315	79,04	0,289	-34,41	0,310	-147,14	0,303	0,029	0,015	9,6	4,8
V-kotvený	0,304	78,63	0,277	-34,60	0,298	-147,03	0,292	0,029	0,015	10,0	5,0
Donau N	0,289	85,71	0,275	-40,77	0,271	-148,66	0,277	0,023	0,011	8,2	3,9
Donau I	0,284	85,63	0,273	-39,47	0,270	-150,02	0,275	0,018	0,008	6,4	3,0
Súdok N	0,297	79,27	0,271	-35,00	0,290	-147,56	0,285	0,027	0,013	9,3	4,4
Súdok I	0,307	79,40	0,279	-34,90	0,299	-147,37	0,294	0,028	0,013	9,4	4,4
Súdok II	0,307	79,45	0,280	-34,85	0,299	-147,46	0,294	0,027	0,013	9,3	4,4
Súdok III	0,308	79,74	0,281	-35,17	0,299	-147,42	0,294	0,027	0,013	9,2	4,3

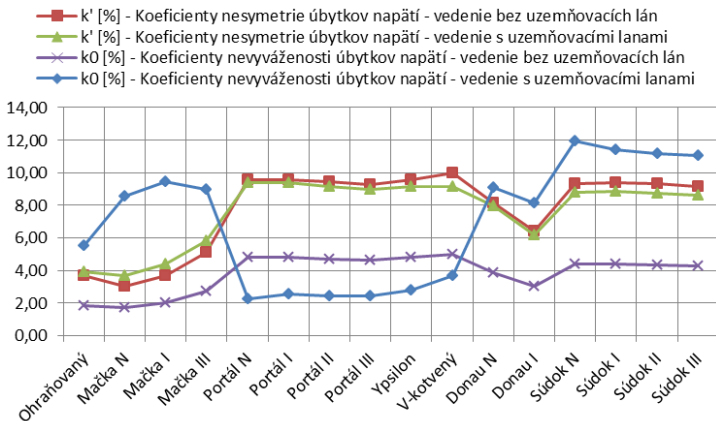
Úbytky napätí na vedeniach s vodorovným usporiadaním vodičov na stožiaroch sú nižšie v strednej fáze voči krajným fázam a vzdalovanie krajných vodičov od strednej spôsobuje nárast úbytkov napätí. Veľkosti úbytkov napätí vplyvom vlastných impedancií sú takmer rovnaké. Avšak úbytky napätí vplyvom vzájomných impedancií sú závislé od usporiadania vodičov. Keďže stredná fáza voči krajným fázam má menšiu vzdialenosť v porovnaní so vzdialenosťou krajných fáz, tak vzájomné impedancie strednej fázy od krajných fáz sú väčšie ako vzájomná impedancia krajných fáz. Potom výsledný úbytok napätí na strednej fáze vplyvom krajných fáz je väčší ako výsledné úbytky na krajných fázach vplyvom strednej a zvyšnej krajnej fázy. Tieto výsledné úbytky napätí sú takmer v protifáze s úbytkami napätí vplyvom vlastných impedancií. A tak v strednej fáze bude výsledný úbytok napätia menší, ako je v krajných fázach.

To isté platí aj pre vedenia so zvislým usporiadaním vodičov, ku ktorému najbližšie zodpovedá usporiadanie vodičov na typoch stožiarov Súdok.

V prípade, ak sa stredná fáza bude vzdalovať od krajných fáz pri dodržaní rovnakej vzdialenosti od týchto krajných fáz, tak vzájomné impedancie tejto strednej fázy od krajných budú klesať. Tím klesajú aj úbytky napätí vplyvom vzájomných impedancií. Výsledné úbytky napätí v jednotlivých fázach budú vyššie, avšak najväčší bude v strednej fáze, pokiaľ vzdialenosť strednej fázy voči krajným fázam je väčšia ako vzdialenosť medzi krajnými fázami. Medzný prípad je daný rovnakými vzdialenosťami medzi jednotlivými vodičmi, teda usporiadanie do vrcholov rovnostranného trojuholníka, kedy výsledné úbytky napätí sú takmer rovnaké. Nepatrný vplyv na úbytky napätí má aj rezistivita zeme. Toto správanie potvrdzujú stožiare Mačka, kedy vzdialenosť stredného vodiča od krajných je menšia ako vzdialenosť krajných vodičov, a stožiare Donau, kedy vzdialenosť stredného vodiča (fáza *a*) od krajných je väčšia ako vzdialenosť krajných vodičov.

Tab. 2-2: Úbytky napätí na vedení s uzemňovacími lanami

Stožiar	$\Delta \bar{U}_a \left[\frac{V}{km}; ^\circ \right]$		$\Delta \bar{U}_b \left[\frac{V}{km}; ^\circ \right]$		$\Delta \bar{U}_c \left[\frac{V}{km}; ^\circ \right]$		ΔU_+ [V/km]	ΔU_- [V/km]	ΔU_0 [V/km]	k' [%]	k_0 [%]
Ohraňovaný	0,272	87,22	0,251	-38,97	0,281	-153,04	0,268	0,010	0,015	3,9	5,5
Mačka N	0,301	88,16	0,251	-35,68	0,305	-156,34	0,286	0,011	0,024	3,7	8,5
Mačka I	0,303	88,26	0,246	-35,95	0,307	-156,34	0,285	0,013	0,027	4,4	9,5
Mačka III	0,312	87,46	0,250	-35,90	0,316	-155,34	0,293	0,017	0,026	5,8	9,0
Portál N	0,316	80,36	0,281	-34,65	0,313	-148,55	0,302	0,028	0,007	9,4	2,3
Portál I	0,316	80,21	0,282	-34,62	0,312	-148,38	0,302	0,028	0,008	9,4	2,5
Portál II	0,320	80,40	0,286	-34,54	0,317	-148,49	0,307	0,028	0,008	9,2	2,5
Portál III	0,324	80,54	0,291	-34,47	0,322	-148,58	0,311	0,028	0,007	9,0	2,4
Ypsilon	0,314	80,12	0,282	-34,60	0,311	-148,48	0,301	0,028	0,008	9,1	2,8
V-kotvený	0,300	79,37	0,273	-34,73	0,297	-148,35	0,289	0,026	0,011	9,1	3,6
Donau N	0,274	85,68	0,283	-43,07	0,280	-146,43	0,277	0,022	0,025	7,9	9,1
Donau I	0,269	85,68	0,280	-41,84	0,278	-147,84	0,274	0,017	0,022	6,2	8,2
Súdok N	0,265	79,61	0,281	-40,29	0,309	-144,48	0,283	0,025	0,034	8,8	12,0
Súdok I	0,276	79,83	0,289	-39,95	0,318	-144,54	0,292	0,026	0,033	8,8	11,4
Súdok II	0,276	79,84	0,289	-39,80	0,318	-144,66	0,292	0,026	0,033	8,8	11,2
Súdok III	0,277	80,05	0,290	-39,91	0,317	-144,66	0,292	0,025	0,032	8,6	11,1



Obr. 2-4: Nesymetria úbytkov napätí vplyvom impedancií vedení

Ak má vedenie uzemňovacie laná, tak týmito lanami budú tiecť prúdy, ktoré sú závislé od vzájomných impedancií medzi týmito lanami a fázovými vodičmi a pretekajúcich prúdov vo fázových vodičoch. Potom prúdy v uzemňovacích lanách spôsobia vo fázových vodičoch úbytky napätí vplyvom vzájomných impedancií medzi uzemňovacími lanami a fázovými vodičmi, ktoré sa komplexne pripočítavajú k výsledným úbytkom napätí pre vedenie bez uzemňovacích lan.

Vplyv prítomnosti uzemňovacích lan na vedení v porovnaní s vedením bez uzemňovacích lan je, že hodnoty úbytkov napätí sa znížia pre tú fázu, ktorá je najbližšie k uzemňovacím lanám, naopak zvýšia, ktorá je najďalej od uzemňovacích lan.

Z pohľadu symetrických zložiek úbytkov napätí platí, že koeficient nesymetrie (k') úbytkov napätí závisí najmä od vzájomnej polohy fázových vodičov, pričom prítomnosť alebo neprítomnosť uzemňovacích lan na vedení nemala výrazný vplyv na tento koeficient, resp. podiel spätnej a súslednej zložky. Úbytky napätí vo fázových vodičoch od prúdov v uzemňovacích lanách nemajú presne rovnaký smer, keďže uhly vzájomných impedancií uzemňovacích lan a fázových vodičov sa líšia, takže mierne sú ovplyvnené aj koeficienty nesymetrie úbytkov napätí.

Naopak prítomnosťou uzemňovacích lan boli výrazne ovplyvnené koeficienty nevyváženosti (k_0) úbytkov napätí, keďže úbytky napätí vo fázových vodičoch od prúdov v uzemňovacích lanách majú takmer rovnaký smer a teda v konečnom dôsledku spôsobia posun fázorov úbytkov napätí jedným smerom. Od smeru posunu závisí, či koeficient nevyváženosti, resp. podiel nulovej a súslednej zložky úbytkov napätí bude narastať alebo klesať, čo závisí aj od polohy uzemňovacích lan vzhľadom k polohe fázových vodičov.

2.1.2 Vplyv nesymetrie parametrov vedení na straty na vedení

Vplyv nesymetrie parametrov 400 kV vedení na činné straty bol riešený v Písomnej práci k dizertačnej skúške [44]. Preto v tejto časti sú uvedené niektoré výsledky celkových činných strát na parametrovo nesymetrickom a symetrickom vedení spolu s vyhodnotením, o koľko sa zvýšili straty vplyvom nesymetrie parametrov vedení.

Na konci vedenia 400 kV je uvažované konštantné symetrické trojfázové napätie:

$$\bar{U}_a = 231 \text{ kV}; \bar{U}_b = 231 \text{ kV} \angle -120^\circ; \bar{U}_c = 231 \text{ kV} \angle 120^\circ \quad (2.21)$$

Odoberaný trojfázový výkon na konci vedenia je vyjadrený pomocou prúdu, pričom boli uvažované tieto zaťaženia na konci vedenia s účinníkom 1:

Stav naprázdno: $\bar{I}_a = \bar{I}_b = \bar{I}_c = 0$; $\bar{S} = 0$

Zaťaženie 100 A: $\bar{I}_a = 100 \text{ A}$, $\bar{I}_b = 100 \text{ A} \angle -120^\circ$, $\bar{I}_c = 100 \text{ A} \angle 120^\circ$; $\bar{S} = 69,3 \text{ MVA}$

Zaťaženie 1 000 A: $\bar{I}_a = 1 000 \text{ A}$, $\bar{I}_b = 1 000 \text{ A} \angle -120^\circ$, $\bar{I}_c = 1 000 \text{ A} \angle 120^\circ$; $\bar{S} = 693 \text{ MVA}$

Nesymetria celkových činných strát bola analyzovaná na vedeniach s dĺžkami 20 km a 100 km a s typmi nosných stožiarov Mačka a Portál. Celkové činné straty na vedení sú vypočítané rozdielom celkového činného výkonu na začiatku a na konci vedenia.

Tab. 2-3: Výsledky činných strát na vedení

Stožiar		Mačka N			Portál N		
l [km]	I_2 [A]	ΔP_N [kW]	ΔP [kW]	δP [%]	ΔP_N [kW]	ΔP [kW]	δP [%]
20	0	0,119	0,118	0,455	0,109	0,107	1,385
	100	13,768	13,767	0,004	13,649	13,648	0,011
	1000	1364,993	1364,992	0,000	1354,155	1354,154	0,000
100	0	14,860	14,793	0,455	13,587	13,402	1,385
	100	83,104	83,036	0,081	81,290	81,104	0,229
	1000	6839,230	6839,162	0,001	6783,820	6783,634	0,003

l - dĺžka vedenia

I_2 - veľkosť trojfázového prúdu na konci vedenia

ΔP_N - celkové činné straty na vedení s uvažovaním vplyvu nesymetrie parametrov vedení

ΔP - celkové činné straty na vedení bez uvažovania vplyvu nesymetrie parametrov vedení

δP - relatívne odchýlky celkových činných strát, ktoré sú vypočítané podľa vzťahu

$$\delta P = \frac{\Delta P_N - \Delta P}{\Delta P} 100 = \left(\frac{\Delta P_N}{\Delta P} - 1 \right) 100 \quad (2.22)$$

Vplyv nesymetrie parametrov vedení má veľmi malý vplyv na zvýšenie celkových činných strát na vedení. Najväčšie zvýšenie strát na vedení vplyvom nesymetrie je v stave naprázdno. Dôvod je ten, že vedením tečú len kapacitné nabíjacie prúdy, ktorých nesymetria je daná kapacitnými koeficientmi. Zvyšovaním zaťaženia vedenia sa znižuje nesymetria prúdov na začiatku vedenia, pretože sa znižuje pomer medzi kapacitnými nabíjacími prúdmi a odoberanými prúdmi na konci vedenia. Potom sa znižujú aj celkové straty na vedení vplyvom nesymetrie parametrov vedení.

2.2 Vplyv nesymetrie impedancií vedení na prechodné javy

Nesymetria impedancií vedení má vplyv aj na skratové prúdy.

Praktický výpočet skratových prúdov stanovuje norma STN EN 60909, ktorá použitím metódy symetrických zložiek zanedbáva nesymetriu parametrov zariadení, teda aj vedení.

Začiatkové rázové skratové prúdy pri uvažovaní nesymetrie impedancií vedení sú v niektorých fázach väčšie a iných menšie ako tieto prúdy vypočítané podľa skratovej normy. Preto tieto prúdy na impedančne nesymetrickom a symetrickom vedení boli porovnané pomocou relatívnych odchýlok prúdov v jednotlivých fázach. Vzťah pre relatívnu odchýlku začiatkových rázových skratových prúdov pri jednofázovom, trojfázovom alebo trojfázovom zemnom skrate je nasledovný

$$\delta I''_{kSi} = \frac{I''_{kSi} - I''_{kS}}{I''_{kS}} 100 = \left(\frac{I''_{kSi}}{I''_{kS}} - 1 \right) 100 [\%] \quad (2.23)$$

kde index S vyjadruje typ skratu:

1	jednofázový skrat
3	trojfázový skrat
3N	trojfázový zemný skrat

Skratové prúdy pri týchto skratoch na transponovaných vedeniach sú rovnaké pre všetky tri fázy, ktoré sú odlišené od prúdov na netransponovaných vedeniach neoznačením fáz.

Rozdiely medzi týmito skratmi sú nasledovné:

- Trojfázový (zemný) skrat môže vzniknúť len jedným spôsobom, kedy sa vyhodnotia relatívne odchýlky skratových prúdov v troch fázach voči symetrickému stavu.
- Jednofázový skrat môže vzniknúť tromi spôsobmi, spojením určitej fázy so zemou, takže sa vyhodnotí pre každú situáciu odchýlka skratového prúdu postihnutej fázy.

Pomocou relatívnych odchýlok boli porovnané aj nárazové skratové prúdy na impedančne nesymetrickom vedení od prúdov vypočítaných podľa skratovej normy.

2.2.1 Nesymetria skratových prúdov na 400 kV vedeniach

Porovnanie skratových prúdov bolo riešené na 400 kV vedeniach s dĺžkou 50 km.

Pre vybrané typy sú uvedené skratové prúdy ako na impedančne symetrickom vedení tak aj na impedančne nesymetrickom vedení a ich relatívne odchýlky.

Cieľom tejto časti bolo zistiť, nakoľko sa výsledky začiatkových rázových skratových prúdov, resp. nárazových prúdov vypočítaných podľa normy STN EN 60909 líšia od výsledkov týchto prúdov v prípade uvažovania nesymetrie parametrov vedení.

Skratová norma stanovuje postup výpočtu maximálnych začiatkových rázových skratových prúdov, takže iným presnejším výpočtom by nemali byť dosiahnuté väčšie výsledky skratových prúdov. Tieto prúdy sú dôležité najmä pri návrhu zariadení, pretože sú vstupom pre určenie skratovej odolnosti zariadenia.

Avšak vplyvom nesymetrie impedancií vedení v niektorých fázach sú skratové prúdy väčšie ako prúdy vypočítané podľa normy, čím nemusí byť správne stanovená skratová odolnosť zariadenia pri jeho návrhu.

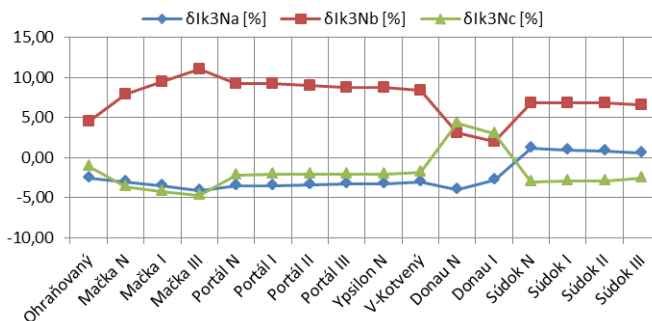
V prípade existujúcich zariadení, ktoré sú na hranici svojej skratovej odolnosti, je potrebné overiť ich skratovú odolnosť s uvažovaním nesymetrie impedancií vedení. Vplyvom tejto nesymetrie skratová odolnosť zariadenia môže byť prekročená.

2.2.1.1 Trojfázový zemný skrat

Tab. 2-4: Výsledky začiatočných rázových skratových prúdov – trojfázový zemný skrat

Stožiar	I''_{k3N} [kA]	I''_{k3Na} [kA]	I''_{k3Nb} [kA]	I''_{k3Nc} [kA]	$\delta I''_{k3Na}$ [%]	$\delta I''_{k3Nb}$ [%]	$\delta I''_{k3Nc}$ [%]
Ohraňovaný	18,11	17,66	18,93	17,92	-2,52	4,52	-1,09
Mačka N	16,97	16,46	18,33	16,36	-3,04	7,97	-3,62
Mačka I	17,01	16,42	18,62	16,28	-3,47	9,50	-4,29
Mačka III	16,57	15,89	18,40	15,78	-4,11	11,05	-4,77
Portál N	16,06	15,49	17,55	15,70	-3,50	9,28	-2,21
Portál I	16,05	15,49	17,53	15,71	-3,48	9,23	-2,11
Portál II	15,80	15,26	17,21	15,46	-3,39	8,97	-2,11
Portál III	15,58	15,06	16,93	15,25	-3,29	8,71	-2,10
Ypsilon N	16,09	15,56	17,50	15,76	-3,27	8,79	-2,03
V-Kotvený	16,78	16,28	18,20	16,48	-3,03	8,45	-1,79
Donau N	17,53	16,83	18,06	18,28	-3,99	3,07	4,33
Donau I	17,68	17,19	18,04	18,21	-2,79	2,06	2,99
Súdok N	17,16	17,36	18,33	16,65	1,15	6,80	-3,00
Súdok I	16,62	16,77	17,76	16,13	0,90	6,90	-2,91
Súdok II	16,60	16,75	17,73	16,12	0,87	6,82	-2,91
Súdok III	16,58	16,67	17,68	16,16	0,52	6,63	-2,52

Najväčšie skratové prúdy sú v stredných fázach. Výnimku tvoria vedenia so stožiarimi Donau, kedy stredný vodič od krajných vodičov aj od uzemňovacích lán má veľké vzdialenosť. Vplyvom toho je v jednej z krajných fáz dosiahnutý najväčší skratový prúd. Odchýlky maximálnych skratových prúdov pri trojfázovom zemnom skratoe od normy predstavujú značné hodnoty, pričom najväčšia odchýlka je pre stožiar Mačka III, ktorá dosahuje hodnotu 11 %.



Obr. 2-5: Relatívne odchýlky prúdov od normy – trojfázový zemný skrat

Pre trojfázový zemný skrat boli určené aj špičkové skratové prúdy spolu s koeficientmi K .

Tab. 2-5: Výsledky nárazových skratových prúdov – trojfázový zemný skrat

Stožiar	Norma	Simulácia					Relatívne odchýlky			Norma	Simulácia		
	i_{p3N} [kA]	i_{p3N} [kA]	i_{p3Na} [kA]	i_{p3Nb} [kA]	i_{p3Nc} [kA]	δi_{p3Na} [%]	δi_{p3Nb} [%]	δi_{p3Nc} [%]	K [-]	K_a [-]	K_b [-]	K_c [-]	
Ohraňovaný	45,64	45,41	44,38	47,08	45,05	-2,75	3,15	-1,29	1,78	1,78	1,76	1,78	
Mačka N	43,00	42,78	41,75	45,37	41,58	-2,90	5,51	-3,30	1,79	1,79	1,75	1,80	
Mačka I	43,04	42,83	41,65	45,87	41,42	-3,23	6,56	-3,78	1,79	1,79	1,74	1,80	
Mačka III	42,04	41,83	40,43	45,35	40,27	-3,81	7,89	-4,21	1,79	1,80	1,74	1,80	
Portál N	40,94	40,74	39,34	44,18	39,82	-3,89	7,91	-2,74	1,80	1,80	1,78	1,79	
Portál I	40,92	40,73	39,34	44,14	39,84	-3,88	7,86	-2,66	1,80	1,80	1,78	1,79	
Portál II	40,34	40,14	38,80	43,44	39,26	-3,80	7,69	-2,66	1,81	1,80	1,78	1,80	
Portál III	39,81	39,62	38,33	42,80	38,75	-3,72	7,51	-2,66	1,81	1,80	1,79	1,80	
Ypsilon N	40,98	40,78	39,45	44,10	39,89	-3,73	7,62	-2,64	1,80	1,79	1,78	1,79	
V-Kotvený	42,49	42,28	40,96	45,69	41,41	-3,61	7,52	-2,54	1,79	1,78	1,78	1,78	
Donau N	44,31	44,09	42,33	45,28	45,77	-4,48	2,18	3,29	1,79	1,78	1,77	1,77	
Donau I	44,66	44,44	43,14	45,26	45,63	-3,40	1,35	2,18	1,79	1,78	1,77	1,77	
Súdok N	43,42	43,20	43,18	46,01	41,98	-0,55	5,97	-3,32	1,79	1,76	1,78	1,78	
Súdok I	42,17	41,97	41,87	44,75	40,80	-0,72	6,10	-3,27	1,79	1,77	1,78	1,79	
Súdok II	42,14	41,94	41,83	44,68	40,77	-0,74	6,03	-3,26	1,79	1,77	1,78	1,79	
Súdok III	42,09	41,89	41,65	44,56	40,87	-1,06	5,87	-2,89	1,80	1,77	1,78	1,79	

Hrubým písmom sú zvýraznené nárazové prúdy a koeficienty K podľa normy, najväčšie nárazové prúdy na impedančne nesymetrickom vedení, relatívne odchýlky a koeficienty K pre najväčšie nárazové skratové prúdy.

Nárazové skratové prúdy na impedančne symetrickom vedení boli vypočítané podľa normy. Tieto prúdy v jednotlivých fázach na impedančne symetrickom vedení boli určené zo simulácie vždy pre najhorší okamih vzniku skratu, kedy napätie prechádza nulou v danej fáze. Hodnoty týchto prúdov určených zo simulácie boli vždy rovnaké, preto je uvedená len jedna hodnota. Zo simulácie boli určené aj nárazové skratové prúdy na impedančne nesymetrickom vedení.

Porovnaním nárazových prúdov podľa normy a zo simulácie pre impedančne symetrické vedenie je potvrdené, že výpočet nárazového prúdu podľa normy poskytuje maximálne skratové prúdy, ktoré v simuláciách pre impedančne symetrické vedenia neboli prekročené. Navyše výsledky pre tieto dva prípady sa líšia málo, preto nárazové prúdy je možné určiť pomocou simulácie aj na impedančne nesymetrickom vedení.

Nakoniec z nárazových skratových prúdov a začiatkových rázových skratových prúdov na impedančne nesymetrickom vedení boli vypočítané koeficienty K pre jednotlivé fázy a porovnané s koeficientom K na impedančne symetrickom vedení.

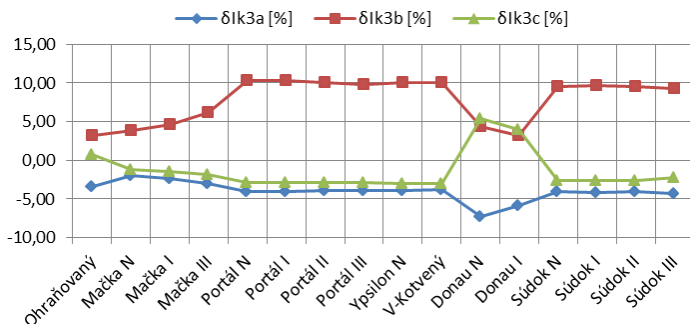
Najväčšie hodnoty nárazových skratových prúdov boli dosiahnuté v tých fázach, kde boli dosiahnuté aj najväčšie hodnoty začiatkových rázových skratových prúdov. Avšak maximálne odchýlky nárazových skratových prúdov od normy, ktoré sú zvýraznené hrubým písmom, sú menšie ako maximálne odchýlky začiatkových rázových skratových prúdov od normy. Dôsledkom čoho je, že koeficienty K týchto fáz sú v konečnom dôsledku nižšie, ako určuje norma a preto nie je potrebné korigovať tieto koeficienty K , resp. nárazové skratové prúdy vplyvom nesymetrie impedancií vedenia.

Vzhľadom na to, že začiatkové rázové skratové prúdy vypočítané s uvažovaním nesymetrie impedancií vedenia sú vyššie ako skratové prúdy vypočítané podľa normy, tak je potrebné zaviesť nové korekčné koeficienty reflektujúce nesymetriu impedancií pre výpočet skratových pomerov. Keďže nárazové prúdy sú závislé od začiatkových rázových skratových prúdov, tak vplyv nesymetrie impedancií vedenia bude potom zahrnutý v týchto prúdoch.

2.2.1.2 Trojfázový skrat

Tab. 2-6: Výsledky – trojfázový skrat

Stožiar	I''_{k3} [kA]	I''_{k3a} [kA]	I''_{k3b} [kA]	I''_{k3c} [kA]	$\delta I''_{k3a}$ [%]	$\delta I''_{k3b}$ [%]	$\delta I''_{k3c}$ [%]
Ohraňovaný	18,11	17,49	18,71	18,25	-3,44	3,26	0,74
Mačka N	16,97	16,63	17,62	16,76	-2,04	3,79	-1,25
Mačka I	17,01	16,60	17,79	16,76	-2,38	4,58	-1,48
Mačka III	16,57	16,07	17,59	16,26	-3,01	6,16	-1,89
Portál N	16,06	15,41	17,71	15,58	-4,04	10,30	-2,94
Portál I	16,05	15,39	17,71	15,58	-4,06	10,35	-2,93
Portál II	15,80	15,17	17,39	15,34	-3,96	10,08	-2,92
Portál III	15,58	14,97	17,11	15,12	-3,86	9,83	-2,91
Ypsilon N	16,09	15,46	17,70	15,61	-3,90	10,03	-2,96
V-Kotvený	16,78	16,14	18,47	16,27	-3,81	10,03	-3,05
Donau N	17,53	16,24	18,28	18,46	-7,33	4,32	5,36
Donau I	17,68	16,65	18,24	18,39	-5,80	3,20	4,02
Súdok N	17,16	16,47	18,80	16,71	-4,04	9,58	-2,65
Súdok I	16,62	15,93	18,22	16,19	-4,12	9,65	-2,59
Súdok II	16,60	15,93	18,19	16,17	-4,06	9,55	-2,62
Súdok III	16,58	15,87	18,13	16,21	-4,31	9,34	-2,24



Obr. 2-6: Relatívne odchýlky prúdov od normy – trojfázový skrat

Najväčšie hodnoty začiatkových rázových skratových prúdov boli v stredných fázach s výnimkou stožiarov Donau. Preto v týchto fázach boli dosiahnuté maximálne odchýlky skratových prúdov od normy, ktoré sú v tabuľke zvýraznené hrubým písmom.

Trojfázový skrat a trojfázový zemný skrat na impedančne symetrickom vedení predstavujú rovnaké poruchy, ktoré je potrebné rozlišovať na impedančne nesymetrickom vedení. Preto skratové prúdy týchto dvoch porúch boli porovnané.

Skratové prúdy v prípade trojfázového skratu vzhľadom k trojfázovému zemnému skratu sa zvýšili na vedeniach s vodorovným usporiadaním vodičov a na vedeniach so stožiarimi Donau, kde stredný vodič má veľké vzdialenosti od krajných vodičov a uzemňovacích lán. Naopak sa znížili skratové prúdy na vedeniach s usporiadaním vodičov do vrcholov takmer rovnostranného trojuholníka. Takže v prípade uvažovania nesymetrie impedancií skratové prúdy pri trojfázovom skrate a trojfázovom zemnom skrate sú rôzne a ich veľkosť závisia od usporiadania vodičov na vedení, čím je ovplyvnená nesymetria impedancií vedenia a teda aj nesymetria skratových prúdov. Pri trojfázovom skrate boli dosiahnuté najväčšie hodnoty skratových prúdov na vedeniach s vodorovným usporiadaním vodičov.

Nárazové prúdy pri trojfázovom skrate boli určené rovnakým spôsobom ako tieto prúdy pri trojfázovom zemnom skrate.

Tab. 2-7: Výsledky nárazových skratových prúdov – trojfázový skrat

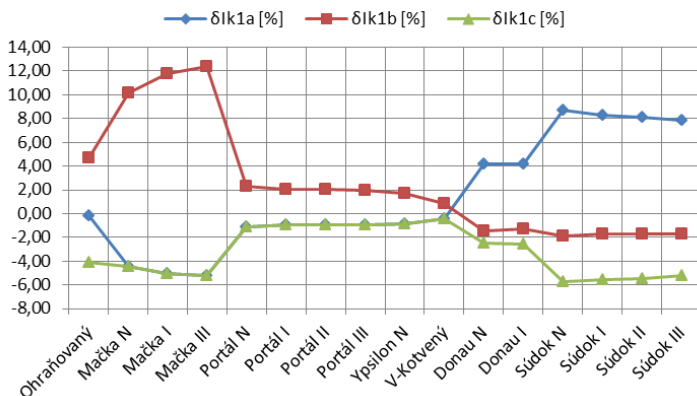
Stožiar	Norma	Simulácia					Relatívne odchýlky			Norma	Simulácia		
	i_{p3} [kA]	i_{p3} [kA]	i_{p3a} [kA]	i_{p3b} [kA]	i_{p3c} [kA]	δi_{p3a} [%]	δi_{p3b} [%]	δi_{p3c} [%]	K [-]	K_a [-]	K_b [-]	K_c [-]	
Ohraňovaný	45,64	45,41	44,38	47,08	45,05	-2,75	3,15	-1,29	1,78	1,78	1,77	1,77	
Mačka N	43,00	42,78	41,75	45,37	41,58	-2,90	5,51	-3,30	1,79	1,79	1,77	1,79	
Mačka I	43,04	42,83	41,65	45,87	41,42	-3,23	6,56	-3,78	1,79	1,79	1,77	1,78	
Mačka III	42,04	41,83	40,43	45,35	40,27	-3,81	7,89	-4,21	1,79	1,79	1,77	1,79	
Portál N	40,94	40,74	39,34	44,18	39,82	-3,89	7,91	-2,74	1,80	1,80	1,78	1,80	
Portál I	40,92	40,73	39,34	44,14	39,84	-3,88	7,86	-2,66	1,80	1,80	1,78	1,80	
Portál II	40,34	40,14	38,80	43,44	39,26	-3,80	7,69	-2,66	1,81	1,80	1,78	1,80	
Portál III	39,81	39,62	38,33	42,80	38,75	-3,72	7,51	-2,66	1,81	1,80	1,78	1,80	
Ypsilon N	40,98	40,78	39,45	44,10	39,89	-3,73	7,62	-2,64	1,80	1,79	1,78	1,79	
V-Kotvený	42,49	42,28	40,96	45,69	41,41	-3,61	7,52	-2,54	1,79	1,78	1,77	1,78	
Donau N	44,31	44,09	42,33	45,28	45,77	-4,48	2,18	3,29	1,79	1,79	1,77	1,77	
Donau I	44,66	44,44	43,14	45,26	45,63	-3,40	1,35	2,18	1,79	1,79	1,77	1,77	
Súdok N	43,42	43,20	43,18	46,01	41,98	-0,55	5,97	-3,32	1,79	1,78	1,77	1,78	
Súdok I	42,17	41,97	41,87	44,75	40,80	-0,72	6,10	-3,27	1,79	1,79	1,77	1,79	
Súdok II	42,14	41,94	41,83	44,68	40,77	-0,74	6,03	-3,26	1,79	1,79	1,77	1,79	
Súdok III	42,09	41,89	41,65	44,56	40,87	-1,06	5,87	-2,89	1,80	1,79	1,77	1,79	

Keďže najväčšie nárazové skratové prúdy boli dosiahnuté v tých istých fázach ako v prípade trojfázového zemného skratu, tak pre koeficienty K platí rovnaký záver, ako bol uvedený pri trojfázovom zemnom skrate: koeficienty K nie je potrebné korigovať vzhľadom na nesymetriu impedancií vedenia.

2.2.1.3 Jednofázový skrat

Tab. 2-8: Výsledky –jednofázový skrat

Stožiar	I''_{k1} [kA]	I''_{k1a} [kA] $I''_{k1b} = 0$ $I''_{k1c} = 0$	$I''_{k1a} = 0$ I''_{k1b} [kA] $I''_{k1c} = 0$	$I''_{k1a} = 0$ $I''_{k1b} = 0$ I''_{k1c} [kA]	$\delta I''_{k1a}$ [%]	$\delta I''_{k1b}$ [%]	$\delta I''_{k1c}$ [%]
Ohraňovaný	11,41	11,39	11,95	10,95	-0,22	4,70	-4,10
Mačka N	11,53	11,02	12,70	11,02	-4,42	10,15	-4,42
Mačka I	11,84	11,25	13,24	11,25	-5,03	11,80	-5,03
Mačka III	11,79	11,17	13,24	11,17	-5,23	12,34	-5,23
Portál N	11,19	11,07	11,44	11,07	-1,10	2,27	-1,10
Portál I	11,09	10,98	11,31	10,98	-0,97	2,00	-0,97
Portál II	11,07	10,96	11,29	10,96	-0,98	2,01	-0,98
Portál III	11,04	10,94	11,26	10,94	-0,96	1,98	-0,96
Ypsilon N	11,28	11,19	11,47	11,19	-0,82	1,69	-0,82
V-Kotvený	11,67	11,62	11,77	11,62	-0,42	0,85	-0,42
Donau N	10,62	11,06	10,46	10,35	4,20	-1,46	-2,49
Donau I	10,72	11,16	10,58	10,44	4,14	-1,31	-2,58
Súdok N	11,03	12,00	10,82	10,40	8,73	-1,90	-5,76
Súdok I	10,85	11,75	10,66	10,25	8,26	-1,71	-5,57
Súdok II	10,85	11,73	10,66	10,26	8,10	-1,70	-5,46
Súdok III	10,84	11,69	10,66	10,27	7,83	-1,72	-5,24



Obr. 2-7: Relatívne odchýlky prúdov od normy – jednofázový skrat

Skratové prúdy pri jednofázovom skrate sú závislé od vlastných impedancií vedenia, navyše v prípade geometricky symetrických stožiarov podľa stredy stožiara sú hodnoty skratových prúdov v krajných fázach rovnaké.

Na vedeniach s vodorovným usporiadaním vodičov vzhľadom k zemi sú vlastné impedancie troch fáz rovnaké a teda hodnoty skratových prúdov by mali byť rovnaké. Avšak vplyvom prítomnosti dvoch uzemňovacích lán na vedení nie sú tieto prúdy rovnaké. Čím sú fázové vodiče bližšie k uzemňovacím lanám, tak aj skratové prúdy sú väčšie. Najväčšie skratové prúdy boli dosiahnuté na vedeniach so stožiarimi Mačka.

Nárazové skratové prúdy sú určené najprv výpočtom a potom simuláciou ako na impedančne symetrickom tak aj nesymetrickom vedení. Odchýlky prúdov od normy a koeficienty K sú určené z vypočítaných nárazových skratových prúdov.

Rozdiely nárazových skratových prúdov od normy sú vyjadrené relatívnymi odchýlkami, kde najväčšie odchýlky prúdov sú zvýraznené hrubým písmom. Nárazové skratové prúdy boli určené aj zo simulácie kvôli porovnaniu s výpočtom. Potvrďilo sa, že všetky nárazové prúdy určené zo simulácie sú menšie ako nárazové prúdy určené výpočtom. Preto výpočtom sú určené najväčšie nárazové skratové prúdy pri jednofázovom skrate v jednotlivých fázach, ktoré môžu nastať na impedančne nesymetrickom vedení.

Najväčšie nárazové skratové prúdy boli dosiahnuté vo fázových vodičoch, ktoré sú najbližšie k uzemňovacím lanám. Rovnaký záver platil aj pre začiatkové rázové skratové prúdy pri jednofázovom skrate. Podobne aj odchýlky nárazových prúdov od normy sú dosiahnuté v týchto fázach, kedy najväčšie odchýlky sú dosiahnuté na vedeniach so stožiarimi Mačka.

Tab. 2-9: Výsledky nárazových skratových prúdov – jednofázový skrat – časť 1/2

Stožiar	Výpočet				Relatívne odchýlky		
	i_{p1} [kA]	i_{p1a} [kA]	i_{p1b} [kA]	i_{p1c} [kA]	δi_{p1a} [%]	δi_{p1b} [%]	δi_{p1c} [%]
Ohraňovaný	27,19	27,16	28,17	26,31	-0,14	3,60	-3,24
Mačka N	27,38	26,45	29,45	26,45	-3,40	7,56	-3,40
Mačka I	27,93	26,87	30,32	26,87	-3,81	8,58	-3,81
Mačka III	27,83	26,72	30,32	26,72	-3,97	8,98	-3,97
Portál N	26,74	26,50	27,21	26,50	-0,87	1,78	-0,87
Portál I	26,55	26,34	26,97	26,34	-0,77	1,58	-0,77
Portál II	26,50	26,30	26,93	26,30	-0,78	1,60	-0,78
Portál III	26,45	26,25	26,87	26,25	-0,78	1,59	-0,78
Ypsilon N	26,88	26,70	27,25	26,70	-0,67	1,36	-0,67
V-Kotvený	27,57	27,47	27,79	27,47	-0,38	0,77	-0,38
Donau N	25,65	26,52	25,34	25,12	3,40	-1,19	-2,04
Donau I	25,83	26,68	25,57	25,29	3,28	-1,04	-2,09
Súdok N	26,46	28,25	26,09	25,23	6,76	-1,42	-4,67
Súdok I	26,10	27,78	25,77	24,91	6,45	-1,26	-4,56
Súdok II	26,09	27,74	25,77	24,93	6,30	-1,25	-4,46
Súdok III	26,07	27,64	25,74	24,96	6,04	-1,26	-4,24

Tab. 2-10: Výsledky nárazových skratových prúdov – jednofázový skrat – časť 2/2

Stožiar	Výpočet				Simulácia			
	K [-]	K_a [-]	K_b [-]	K_c [-]	i_{p1} [kA]	i_{p1a} [kA]	i_{p1b} [kA]	i_{p1c} [kA]
Ohraňovaný	1,68	1,69	1,67	1,70	27,04	27,01	28,02	26,17
Mačka N	1,68	1,70	1,64	1,70	27,23	26,30	29,29	26,30
Mačka I	1,67	1,69	1,62	1,69	27,77	26,71	30,16	26,71
Mačka III	1,67	1,69	1,62	1,69	27,67	26,57	30,16	26,57
Portál N	1,69	1,69	1,68	1,69	26,59	26,35	27,06	26,35
Portál I	1,69	1,70	1,69	1,70	26,40	26,20	26,82	26,20
Portál II	1,69	1,70	1,69	1,70	26,36	26,15	26,78	26,15
Portál III	1,69	1,70	1,69	1,70	26,30	26,10	26,72	26,10
Ypsilon N	1,69	1,69	1,68	1,69	26,73	26,55	27,10	26,55
V-Kotvený	1,67	1,67	1,67	1,67	27,42	27,31	27,63	27,31
Donau N	1,71	1,70	1,71	1,72	25,50	26,37	25,20	24,98
Donau I	1,70	1,69	1,71	1,71	25,69	26,53	25,42	25,15
Súdok N	1,70	1,67	1,70	1,72	26,32	28,09	25,94	25,09
Súdok I	1,70	1,67	1,71	1,72	25,96	27,63	25,63	24,77
Súdok II	1,70	1,67	1,71	1,72	25,95	27,58	25,62	24,79
Súdok III	1,70	1,67	1,71	1,72	25,92	27,49	25,60	24,82

Koeficienty K impedančne nesymetrického vedenia v niektorých fázach sú väčšie ako určuje norma, avšak v týchto fázach sú dosiahnuté menšie začiatočné rázové skratové prúdy, resp. nárazové prúdy ako určuje norma. Dôležité sú koeficienty K tých fáz, kde sú dosiahnuté nárazové prúdy väčšie, ako určuje norma. Tieto koeficienty K sú zvýraznené hrubým písmom, ktoré sú menšie alebo rovné koeficientom podľa normy. Preto nárazové skratové prúdy nie je opäť potrebné korigovať o vplyv nesymetrie impedancií vedení.

2.2.2 Nesymetria skratových prúdov v časti sústavy

Vplyv nesymetrie impedancií vedení na nesymetriu začiatočných rázových skratových prúdov bol riešený aj v časti sústavy, ktorej súčasťou boli impedančne symetrické zariadenia.

Nesymetria skratových prúdov v jednotlivých uzloch sústavy bola nižšia ako nesymetria skratových prúdov na jednom vedení s typom stožiara, ktorý spôsoboval najväčšiu nesymetriu skratových prúdov. Preto na základe jedného vedenia s typom stožiara, ktorý spôsobuje najväčšiu nesymetriu skratových prúdov, je možné určiť hranicu nesymetrie skratových prúdov, ktorá v časti sústavy bude nižšia.

Nesymetria skratových prúdov závisela od týchto faktorov:

- Typ skratu
- Miesto skratu
- Rozloženie jednotlivých vedení s danými typmi stožiarov v sústave

3 Návrh odporúčaní pre normu STN EN 60909

V predchádzajúcich častiach bolo ukázané, že nesymetria impedancií vedení má vplyv na veľkosť skratových prúdov. Rozdiely skratových prúdov porovnaním s vypočítanými hodnotami podľa skratovej normy STN EN 60909 nie sú zanedbateľné. Preto je vhodné vplyv nesymetrie impedancií vedení na nesymetriu skratových prúdov zahrnúť do normy.

Na základe dosiahnutých výsledkov odporúčam upraviť výpočet skratových prúdov podľa normy STN EN 60909 tým spôsobom, že by sa zaviedol korekčný súčiniteľ pre korigovanie nesymetrie impedancií vedení.

Ako prvý návrh uvádzam korekčný súčiniteľ nesymetrie pre impedanciu netransponovaného vedenia. Tento návrh korešponduje so skratovou normou a spôsobmi korekcie impedancie iných zariadení ES (generátor a transformátor).

Ako druhý, jednoduchší, spôsob korekcie nesymetrie uvádzam korekčný súčiniteľ, ktorým by sa upravila výsledná hodnota začiatočného rázového skratového prúdu. Vzhľadom na to, že impedancia vedenia predstavuje väčšinou väčšiu časť skratovej impedancie, je aj tento druhý spôsob korekčný.

Ako bolo možné vidieť v predchádzajúcich analyzovaných prípadoch, stanovenie hodnoty tohto súčiniteľa závisí od viacerých faktorov:

- typ skratu,
- typ stožiaru na napät'ovej hladine,
- rezistivita zeme,
- miesto skratu v prípade časti sústavy

3.1 Korekčný súčiniteľ nesymetrie pre impedanciu netransponovaných vedení

Prvý návrh sa týka korekcie symetrických zložiek impedancie netransponovaného vedenia pomocou korekčných súčiniteľov. Ako bolo uvedené, korekčné súčinitele sú definované aj v skratovej norme, ktorými je stanovená korekcia impedancií napr. generátorov, elektrárenských blokov.

Pri tomto návrhu odporúčam korigovať súslednú zložku impedancie transponovaného vedenia \bar{Z}_{+V} o vplyv nesymetrie impedancií nasledovným vzťahom

$$\bar{Z}_{+NV} = K_{+NV} \bar{Z}_{+V} \quad (3.1)$$

K_{+NV} je korekčný súčiniteľ nesymetrie pre súslednú zložku impedancie netransponovaného vedenia,

\bar{Z}_{+NV} je súsledná zložka impedancie vedenia so zahnutím vplyvu nesymetrie.

Pri stanovení hodnoty súčiniteľa vychádzam zo vzťahu podľa skratovej normy pre skratový prúd pri trojfázovom skrate. Pri uvažovaní korekcie súslednej zložky impedancie je potom možné vzťah pre výpočet začiatočného rázového skratového prúdu I''_{k3N} pri trojfázovom skrate s uvažovaním nesymetrie zapísať nasledovne

$$I''_{k3N} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}K_{+NV}Z_{+V}} \quad (3.2)$$

Podelením skratového prúdu so zahrnutím vplyvu nesymetrie impedancií vedenia a prúdu bez zahrnutia tohto vplyvu platí

$$\frac{I''_{k3N}}{I''_{k3}} = 1 + \frac{\delta I''_{k3max}}{100} = \frac{Z_{+V}}{K_{+NV}Z_{+V}} \quad (3.3)$$

$\delta I''_{k3max}$ - maximálna relatívna odchýlka skratového prúdu pre daný typ stožiaru.

Potom korekčný súčiniteľ pre súslednú zložku impedancie netransponovaného vedenia je daný vzťahom

$$K_{+NV} = \frac{1}{1 + \frac{\delta I''_{k3max}}{100}} \quad (3.4)$$

Trojfázový a trojfázový zemný skrat sú rôzne poruchy v prípade uvažovania nesymetrie impedancií vedenia. Preto pri výpočte korekčného súčiniteľa uvažujem typ skratu, pri ktorom je spôsobená najväčšia nesymetria skratových prúdov na jednom vedení.

Hodnoty korekčných súčiniteľov nesymetrie pre impedanciu netransponovaného vedenia sú stanovené pre:

- 400 kV vedenia so stožiarimi zo skupiny stožiarov Mačka,
- 400 kV vedenia so stožiarimi zo skupiny stožiarov Portál,
- 110 kV vedenia so stožiarimi zo skupiny stožiarov F-tvar,
- 110 kV vedenia so stožiarimi Stromček.

Napr. najväčšia nesymetria skratových prúdov je na jednom vedení so stožiarimi Mačka III pri trojfázovom zemnom skrate a so stožiarimi Portál N pri trojfázovom skrate. Pre oba typy stožiarov hodnota korekčného súčiniteľa nesymetrie pre súslednú zložku impedancie netransponovaného vedenia je v tomto prípade približne rovnaká $\rightarrow K_{+NV} = 0,9$.

Nulová zložka impedancie vedenia \bar{Z}_{0V} je korigovaná podobne, ako súsledná zložka

$$\bar{Z}_{0NV} = K_{0NV}\bar{Z}_{0V} \quad (3.5)$$

K_{0NV} je korekčný súčiniteľ nesymetrie pre nulovú zložku impedancie netransponovaného vedenia,

\bar{Z}_{0NV} je nulová zložka impedancie vedenia so zahrnutím vplyvu nesymetrie.

Potom vzťah pre začiatočný rázový skratový prúd I''_{k1N} pri jednofázovom skrate s korekciou nesymetrie impedancií je možné zapísať nasledovne

$$I''_{k1N} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2K_{+NV}Z_{+V} + K_{0NV}\bar{Z}_{0V}|} \quad (3.6)$$

Podelením skratového prúdu so zahrnutím vplyvu nesymetrie impedancií vedenia a prúdu bez zahrnutia tohto vplyvu platí

$$\frac{I''_{k1N}}{I''_{k1}} = 1 + \frac{\delta I''_{k1max}}{100} = \frac{2\bar{Z}_{+V} + \bar{Z}_{0V}}{2K_{+NV}\bar{Z}_{+V} + K_{0NV}\bar{Z}_{0V}} \quad (3.7)$$

Potom korekčný súčiniteľ pre nulovú zložku impedancie netransponovaného vedenia K_{0NV} je daný vzťahom

$$K_{0NV} = \left| \frac{2\bar{Z}_{+V} + \bar{Z}_{0V}}{1 + \frac{\delta I''_{k1max}}{100}} - 2K_{+NV}\bar{Z}_{+V} \right| \frac{1}{Z_{0V}} \quad (3.8)$$

kde korekčný súčiniteľ K_{+NV} bol určený pri trojfázovom skrate.

Na základe vykonaných výpočtov skratových prúdov s uvažovaním nesymetrie vedení navrhujem nasledovné hodnoty korekčných súčiniteľov nesymetrie pre symetrické zložky impedancie netransponovaného vedenia.

Tab. 3-1: Návrh odporúčaných korekčných súčiniteľov nesymetrie pre impedanciu vedenia

Stožiar (Napät'ová hladina)	K_{+NV}	K_{0NV}
Mačka (400 kV)	0,90	0,87
Portál (400 kV)	0,90	1,03
F-tvar (110 kV)	0,94	1,01
Stromček (110 kV)	0,96	1,00

Korekčné súčinitele nesymetrie pre nulovú zložku impedancie vedení, ktoré sú rovné alebo väčšie ako 1, neodporúčam použiť na korekciu nulovej zložky impedancie. Bez korekcie tejto zložky budú vypočítané skratové prúdy pri jednofázovom skrate väčšie ako skratové prúdy po korekcii. V týchto prípadoch stačí korigovať len súslednú zložku impedancie.

V prípade stožiarov Mačka treba korigovať obidve symetrické zložky impedancie vedenia.

3.2 Korekčný súčiniteľ nesymetrie pre začiatočný rázový skratový prúd so zahrnutím vplyvu nesymetrie impedancií vedení

Pri tomto návrhu odporúčam korigovať začiatočné rázové skratové prúdy o vplyv nesymetrie impedancií vedení nasledovným vzťahom

$$I''_{kN} = K_N I''_k \quad (3.9)$$

I''_k je začiatočný rázový skratový prúd pri konkrétnom type skratu

I''_{kN} je začiatočný rázový skratový prúd s korekciou nesymetrie impedancií vedení

Určenie hodnôt týchto korekčných koeficientov pre skratové prúdy navrhujem na základe typu stožiara, ktorý spôsobuje najväčšiu nesymetriu skratových prúdov, na danej napät'ovej hladine vedenia. Tým sa zabezpečí výpočet maximálnych skratových prúdov v časti sústavy a zároveň aj jednoduchosť výpočtu.

Najväčšia nesymetria skratových prúdov je spôsobená:

- Na 400 kV vedení so stožiarom Mačka III pri jednofázovom skrate
- Na 110 kV vedení so stožiarom F-tvar III pri trojfázovom skrate

Potom navrhované hodnoty korekčných koeficientov nesymetrie impedancií vedení sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tab. 3-2: Návrh odporúčaných korekčných koeficientov nesymetrie impedancií vedenia

Napät'ová hladina vedenia U_n [kV]	400	110
Korekčný koeficient pre skratové prúdy so zahrnutím vplyvu nesymetrie impedancií vedení K_N [-]	1,12	1,07

Prínosy dizertačnej práce pre prax

Hlavnými prínosmi dizertačnej práce sú:

- podrobný rozbor vplyvu nesymetrie parametrov vedení na
 - nesymetriu prevádzkových veličín pri symetrickom napájaní vedenia,
 - nesymetriu skratových prúdov,
- návrh odporúčani pre normu STN EN 60909

Jednotlivé prínosy dizertačnej práce sú nasledovné:

- Zistenie a kvantifikovanie, ktoré typy stožiarov prispievajú najviac k nesymetrii prevádzkových veličín:
 - Najväčšia nesymetria úbytkov napätí:
 - Vedenia s vodorovným usporiadaním vodičov na stožiaroch z pohľadu vzniku najväčšej spätnej zložky.
 - Vedenia s usporiadaním vodičov do vrcholov takmer rovnostranného trojuholníka z pohľadu vzniku najväčšej nulovej zložky.
 - Najväčšia nesymetria kapacitných nabíjajúcich prúdov na vedeniach s vodorovným usporiadaním vodičov z pohľadu vzniku najväčšej spätnej zložky ako aj vzniku najväčšej nulovej zložky.
- Definovanie vplyvu nesymetrie parametrov vedení na veľkosť ukazovateľa kvality – nesymetria napätia – podľa normy STN EN 50160 definovaný podielom spätnej a súslednej zložky napätia.
- Zistenie a kvantifikovanie vplyvu nesymetrie parametrov vedení na veľkosť celkových činných strát na vedení.
- Analýza a definovanie vplyvu prítomnosti uzemňovacích lán iných vedení v súbahu na nulovú zložku impedancie vedenia a na skratové prúdy na tomto vedení.
- Analýza a kvantifikovanie vplyvu nesymetrie impedancií vedení na skratové prúdy. Na základe analýzy vplyvu nesymetrie parametrov vedení na začiatkové rázové skratové prúdy boli navrhnuté dva spôsoby korekcie (súčiniteľ nesymetrie pre impedanciu netransponovaného vedenia a súčiniteľ nesymetrie pre začiatkové rázové skratové prúdy).
- Analýza vplyvu nesymetrie na nárazové skratové prúdy, resp. koeficienty K vypočítané podľa skratovej normy, podľa ktorej nie je potrebné korigovať výpočet koeficientu K s uvažovaním vplyvu nesymetrie impedancií vedení.

Odporúčania pre prax

- Pri návrhu nových vedení zohľadňovať, aby použitý typ stožiaru na vedení spôsobil najnižšiu mieru nesymetrie prevádzkových veličín.
- Pri návrhu nových typov stožiarov realizovať analýzu vplyvu geometrického rozloženia vodičov na nesymetriu prevádzkových veličín v ustálenom aj prechodnom stave v súlade s definovanými koeficientmi nesymetrie a nevyváženosti
- Odporúčania pre normu STN EN 60909 - vhl'adom na to, že rozdiely skratových prúdov na impedancie nesymetrickom vedení a skratových prúdov vypočítaných podľa skratovej normy sú v niektorých prípadoch väčšie ako 10 %, navrhujem zaviesť do skratovej normy korekčné súčinitele nesymetrie (viď predchádzajúca kapitola).
- Overiť skratovú odolnosť starších zariadení ES alebo zariadení ES na hranici skratovej odolnosti so skratovými pomermi vypočítanými s uvažovaním nesymetrie parametrov vedení.
- Vykonať výmenu fáz pri výstavbe nových vedení, resp. ak je to technicky možné na existujúcich vedeniach. Výmena fáz zníži úroveň nesymetrie prevádzkových veličín a taktiež pozitívne ovplyvňuje skratové pomery v ES.

Záver

Nesymetria je jeden z faktorov v elektrizačnej sústave, ktorý sa vo väčšine prípadov zanedbáva. Preto som sa v tejto práci venoval nesymetrii prevádzkových veličín, ktorá je spôsobená najmä nesymetriou elektrických parametrov vedení.

Nesymetria elektrických parametrov vedení bola stanovená prostredníctvom nesymetrie prevádzkových veličín pomocou uplatňujúcich sa symetrických zložiek. Pomocou týchto zložiek bola stanovená aj nesymetria skratových prúdov trojfázového a trojfázového zemného skratu s uvažovaním nesymetrie impedancií vedenia. Hodnoty skratových prúdov na impedančne nesymetrickom vedení boli porovnané s riešením podľa normy STN EN 60909 ako na jednom vedení tak aj v časti sústavy.

Nesymetria parametrov vedení prostredníctvom nesymetrie prevádzkových veličín bola stanovená pre 400 kV, 220 kV a 110 kV vedenia s rôznymi typmi stožiarov.

Najväčšia nesymetria prevádzkových veličín vyjadrená najväčším podielom spätnej a súslednej zložky je spôsobená na vedeniach s usporiadaním vodičov v jednej rovine.

Výška vodičov nemala vplyv na vlastné a vzájomné impedancie vedení a teda ani na nesymetriu prevádzkových veličín. Avšak nárast tejto výšky ovplyvnil nesymetriu kapacitných nabíjajúcich prúdov na vedeniach.

Rezistivita zeme mala vplyv na vlastné a vzájomné impedancie vedení, pričom jej nárast spôsobil nárast nesymetrie prevádzkových veličín. Vplyv rezistivity zeme na nesymetriu kapacitných nabíjajúcich prúdov nebol analyzovaný, keďže rezistivita zeme nemá vplyv na potenciálové koeficienty vedenia a teda ani na kapacitné koeficienty.

Ako zaujímavý aspekt sa ukázala nesymetria parametrov vedení s geometricky symetrickými stožiarmi podľa stredu. Napriek uvažovaniu trojfázovej symetrickej sústavy prúdov vo vodičoch, úbytky napätí v krajných vodičoch majú rôznu veľkosť. Je to spôsobené rôznymi uhlami vzájomných impedancií.

V práci bol analyzovaný aj vplyv nesymetrie parametrov vedení na celkové činné straty na vedení. Porovnané boli celkové činné straty na parametrovo nesymetrickom a symetrickom vedení. Záver je, že nesymetria parametrov vedení má malý vplyv na zvýšenie týchto strát.

Nesymetria skratových prúdov bola analyzovaná na 110 kV a 400 kV vedeniach pri trojfázovom a trojfázovom zemnom skrato. Tieto skraty sú v prípade impedančne symetrického vedenia rovnaké a navyše symetrické poruchy. Avšak v prípade uvažovania nesymetrie impedancií vedení to neplatí.

Nakoniec boli analyzované rozdiely skratových prúdov vypočítaných s uvažovaním nesymetrie impedancií vedení a skratových prúdov určených podľa normy STN EN 60909 na 110 kV a 400 kV vedeniach. Rozdiely boli kvantifikované pomocou relatívnych odchýlok skratových prúdov.

Výsledkom skratových pomerov vypočítaných podľa skratovej normy by mali byť maximálne skratové prúdy, ktoré sú vstupnými veličinami pri určení skratovej odolnosti zariadenia pri jeho návrhu. Avšak výsledky vykonaných výpočtov s uvažovaním nesymetrie parametrov vedení ukázali, že skratové prúdy v niektorých fázach sú väčšie ako prúdy vypočítané podľa skratovej normy.

Najväčšie rozdiely začiatkových rázových skratových prúdov s uvažovaním nesymetrie a prúdov vypočítaných podľa skratovej normy sa pohybovali v širokom rozsahu od 2 % až po maximálnu hodnotu 12 %. Najväčší rozdiel bol dosiahnutý pri jednofázovom skrate na 400 kV vedení s typom stožiara Mačka III.

Pre 400 kV vedenia boli vyhodnotené aj najväčšie rozdiely nárazových skratových prúdov s uvažovaním nesymetrie a prúdov vypočítaných podľa skratovej normy. Rozdiely boli menšie, nanajvýš rovné najväčším rozdielom začiatkových skratových prúdov. Preto nárazové skratové prúdy nie je potrebné korigovať o vplyv nesymetrie impedancií vedenia, keďže tento vplyv je už zahrnutý v nesymetrii začiatkových rázových skratových prúdoch.

Nesymetria skratových prúdov bola ovplyvnená týmito faktormi – typ skratu, typ stožiara, sled fáz a rezistivita zeme.

Rezistivita zeme mala vplyv na nesymetriu skratových prúdov, ktoré majú spojenie so zemou. Zvyšovanie rezistivity zeme spôsobilo zvýšenie nesymetrie skratových prúdov. Rezistivitou zeme bola najviac ovplyvnená nesymetria skratových prúdov pri jednofázovom skrate na vedeniach s typmi stožiarov Mačka. Rezistivita zeme mala minimálny vplyv na nesymetriu skratových prúdov pri skratoch bez spojenia so zemou.

Vplyv sledu fáz na nesymetriu skratových prúdov bol určený na 110 kV vedeniach s typmi stožiarov, ktoré sú geometricky nesymetrické. Pre dva možné sledy fáz je nesymetria skratových prúdov rôzna, pretože veľkosti prúdov v jednotlivých fázach sú rôzne.

V práci bol stanovený aj vplyv prítomnosti uzemňovacieho lana druhého vedenia na impedanciu v symetrických zložkách prvého vedenia. Približovanie uzemňovacieho lana k vedeniu spôsobilo znižovanie nulovej zložky impedancie tohto vedenia. Tým sú ovplyvnené aj skratové prúdy pri skratoch, ktoré sú závislé od nulovej zložky impedancie, resp. ktoré majú spojenie so zemou.

Rozdiely začiatkových rázových skratových prúdov s uvažovaním nesymetrie parametrov vedení a prúdov vypočítaných podľa skratovej normy boli analyzované aj v časti elektrizačnej sústavy. Súčasťou tejto sústavy boli okrem impedančne nesymetrických vedení aj impedančne symetrické zariadenia (generátory, transformátory).

Nesymetria skratových prúdov pri trojfázovom a trojfázovom zemnom skrate v jednotlivých uzloch sústavy bola nižšia ako nesymetria skratových prúdov na jednom vedení s typom stožiara, ktorý spôsobil najväčšiu nesymetriu skratových prúdov. Preto najväčší rozdiel skratových prúdov na jednom vedení s typom stožiara, ktorý spôsobuje najväčšiu nesymetriu prúdov, je možné použiť ako hranicu pre rozdiely skratových prúdov v časti sústavy.

Na základe rozdielov skratových prúdov s uvažovaním nesymetrie parametrov a prúdov vypočítaných podľa skratovej normy odporúčam zahrnúť vplyv nesymetrie impedancií vedení do skratovej normy zavedením korekčných súčiniteľov nesymetrie.

Elektrizačná sústava je prirodzene parametrovo nesymetrická. Od úrovne nesymetrie parametrov zariadení závisí aj nesymetria skratových prúdov. Preto v prípade vysokej miery nesymetrie parametrov zariadení budú aj značné rozdiely skratových prúdov s uvažovaním nesymetrie a prúdov vypočítaných podľa skratovej normy, čím pri návrhu zariadenia nemusí byť správne určená skratová odolnosť zariadenia.

Použitá literatúra

- [1] Pokorný, M., Altus, J., Novák, M., Otčenášová, A.: Analýza a dôsledky nesymetrického zaťaženia trojfázovej siete. Žilinská univerzita, Žilina, 2011
- [2] Kubinda, P.: Modelovanie nesymetrie v elektrizačnej sústave. Žilina: Žilinská univerzita, 2006, Diplomová práca
- [3] Szathmáry, P., Kanálik, M., Rusnák, J., Hvizdoš, M.: Nepriaznivé vplyvy nesymetrie napätia na elektrické zariadenia a možnosti ich eliminácie. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2010
- [4] Happoldt, H., Oeding, D.: Elektrische Kraftwerke und Netze. Berlin: Springer-Verlag, 1978
- [5] Hase, Y.: Handbook of Power System Engineering. Chichester, West Sussex: John Wiley&Sons, Ltd, 2007
- [6] Reváková, D., Eleschová, Ž., Beláň, A.: Prechodné javy v elektrizačných sústavách. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2008
- [7] Jouanne, A. v., Banerjee, B.: Assessment of Voltage Unbalance. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, NO. 4, October 2001
- [8] Chindris, M., Cziker, A., Miron, A., Bălan, H., Sudria, A.: Propagation of Unbalance in Electric Power Systems. 9th International Conference – Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, 9-11 October 2007
- [9] Escarela-Perez, R., Kulkarni, S. V. , Alvarez-Ramirez, J., Kaushik, K.: Analytical Description of the Load-Loss Asymmetry Phenomenon in Three-Phase Three-Limb Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 2, pp. 695-702, 2009
- [10] Hill, R.J.: Electric railway traction. Part 3 Traction power supplies. Power Engineering Journal, December 1994
- [11] Plummer, I.: Asymmetry in Distribution Systems: Causes, Harmful Effects and Remedies. Louisiana State University, May 2011
- [12] Siddique, A., Yadava,G.S., Singh, B.: Effects of Voltage Unbalance on Induction Motors. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, In USA 19-22 September 2004
- [13] Kostic, M., Nikolic, A.: Negative Consequence of Motor Voltage Asymmetry and Its Influence to the Unefficient Energy Usage. WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS, Issue 8, Volume 9, August 2010
- [14] Edan, M. k.: Effect of Unbalance Voltage on the Operation and Performance of a Three Phase Distribution Transformers. Journal of Babylon University, Engineering Sciences, No.(5) / Vol.(21), 2013
- [15] Muljadi, E., Batan, T., Yildirim, D., Butterfield, C. P.: Understanding the Unbalanced-Voltage Problem in Wind Turbine Generation. Presented at the 1999 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting Phoenix, Arizona October 3-7, 1999
- [16] Lakshmi kantha, B.R., Mudaliar, M., Balaraman, K., Nagaraja, R.: Mitigation of Voltage Unbalance in Traction System. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS 2008, October 22 – 24, 2008, San Francisco, USA
- [17] Varga, L., Ilenin, S., Leščinský, P.: Prenos a rozvod elektrickej energie. Košice: Mercury - Smékal, 2003
- [18] Kurokawa, S., Filho, J. P., Tavares, M. C., Portela, C. M., Prado, A. J.: Behavior of Overhead Transmission Line Parameters on the Presence of Ground Wires. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 2, APRIL 2005
- [19] Reváková, D., Eleschová, Ž., Beláň, A.: Prenos a rozvod elektrickej energie. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2004
- [20] Fecko, Š., Reváková, D., Varga, L., Lago, J., Ilenin, S.: Vonkajšie elektrické vedenia. Bratislava: STU FEI, 2010

- [21] Umarji, H.: Calculation of Parameters of Overhead Power Lines. Instituto Superior Técnico Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa
- [22] Hodinka, M., Kučera, D., Haluzík, E.: Příklady z elektrických sítí I. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1980
- [23] Kundur, P.: Power System Stability and Control. USA: Electrical Power Research Institute, 1994
- [24] Kolcun, M., Chladný, V., Varga, L.: Počítačová analýza elektrizačných sústav. Košice: Mercury - Smékal, 2003
- [25] El-Hawary, M. E.: Electrical Power Systems - Design and Analysis. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1995
- [26] Kersting, W. H.: The Computation of Neutral and Dirt Currents and Power Losses. IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 2003
- [27] Schwab, A. J.: Elektroenergie systeme. Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. Berlin Heidelberg, Springer, 2012
- [28] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: FYZIKA. Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno: VUTIMUM, 2001
- [29] Ivanič, M.: Nesymetria v elektrických sieťach. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014, Diplomová práca
- [30] Kron Reduction. [online]. 30. Júl 2013 [cit. 2017.01.10.]. Dostupné na internete: <http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Kron_Reduction>
- [31] Dommel, H. W.: Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book), Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
- [32] STN EN 60909-0: Skratové prúdy v trojfázových sústavách striedavého prúdu. Časť 0: Výpočet prúdov, 2016.
- [33] IEC International standard 60909-0: Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents, 2001.
- [34] STN EN 50160: Charakteristiky napätia elektrickej energie dodávanej z verejnej elektrickej siete. 2011.
- [35] STN EN 50341-1: Vonkajšie elektrické vedenia so striedavým napätím nad 1 kV. Časť 1: Všeobecné požiadavky. Spoločné špecifikácie. 2013.
- [36] Strezoski, L. V., Prica, M. D.: Short-circuit Analysis in Large-scale Distribution Systems With High Penetration of Distributed Generators. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 4, no. 2, April 2017.
- [37] Ahmadi, H., Armstrong, M.: Transmission line impedance calculation using detailed line geometry and HEM soil resistivity measurements. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2016.
- [38] Trojánek, Z., Hájek, J., Kvasnica, P.: Pechodné jevy v elektrizačných soustavách. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [39] Irwin, J. D.: Basic Engineering Circuit Analysis. New York: Macmillan Publishing Company, 1987.
- [40] Crow, M. L.: Computational Methods for Electric Power Systems. New York: CRC Press, 2009.
- [41] Das, J. C.: Power System Analysis. Short-Circuit Load Flow and Harmonics. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [42] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Beaty, H. W.: Electrical Power Systems Quality. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [43] Greenwood, A.: Electrical Transients in Power Systems. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [44] Ivanič, M.: Aspekty nesymetrie parametrov a veličín v elektrizačnej sústave. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016. Písomná práca k dizertačnej skúške.

Zoznam publikácií autora súvisiacich s problematikou dizertačnej práce

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- [1] IVANIČ, Marián - ELESCHOVÁ, Žaneta - KOVÁČ, Matúš. The impact of line parameters on unbalance in the electrical network. In *Power Engineering 2014. Energy - Ecology - Economy 2014 : Proceedings of the 12th International Scientific Conference EEE 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; May 20-22, 2014*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, USB, [5] s. ISBN 978-80-89402-69-4.
- [2] IVANIČ, Marián - ELESCHOVÁ, Žaneta - KONÍČEK, Michal. The impact of line parameters asymmetry on power system unbalance. In *ELITECH'15 [elektronický zdroj] : 17th Conference of doctoral students*. Bratislava, Slovak Republic, May 25, 2015. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2015, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-4358-7.
- [3] IVANIČ, Marián - ELESCHOVÁ, Žaneta - KONÍČEK, Michal. The impact of overhead power lines parameters asymmetry on voltages and currents depending on the operating conditions. In *Elektroenergetika 2015 [elektronický zdroj] : 8th International scientific symposium on electrical power engineering*. Stará Lesná, Slovakia. September 16-18, 2015. Košice : Technical University of Košice, 2015, CD-ROM, S. 552-555. ISBN 978-80-553-2187-5.
- [4] IVANIČ, Marián - ELESCHOVÁ, Žaneta - KONÍČEK, Michal. Determining the minimal number of terms in the carson's formulae. In *Power engineering 2016. Energy-Ecology-Economy 2016 : 13th International scientific conference*. Tatranske Matliare, Slovakia. May 31 - June 2, 2016. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2016, S. 154-158. ISBN 978-80-89402-86-1.
- [5] IVANIČ, Marián - ELESCHOVÁ, Žaneta. The faults with consideration of line parameters asymmetry. In *Power engineering 2016. Control of Power Systems 2016 : 12th International scientific conference*. Tatranské Matliare, Slovakia. May 31 - June 2, 2016. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2016, S. 73-77. ISBN 978-80-89402-84-7.
- [6] IVANIČ, Marián - ELESCHOVÁ, Žaneta - KONÍČEK, Michal. The impact of overhead line parameters asymmetry on faults. In *ELITECH'16 [elektronický zdroj] : 18th Conference of doctoral students*. Bratislava, Slovakia. June 8, 2016. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-4561-1.
- [7] IVANIČ, Marián - ELESCHOVÁ, Žaneta - BENDÍK, Jozef - CENKÝ, Matej. The differences of fault currents on untransposed and transposed power lines. In *ELITECH'17 [elektronický zdroj] : 19th Conference of doctoral students*. Bratislava, Slovakia. May 24, 2017. 1. ed. Bratislava : Spektrum STU, 2017, CD-ROM, [4] p. ISBN 978-80-227-4686-1.

Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

- [1] ELESCHOVÁ, Žaneta - IVANIČ, Marián. Impact of asymmetry of over-head power line parameters on short-circuit currents. In *Transactions on Electrical Engineering*. Vol. 5, No. 4 (2016), s. 112-115. ISSN 1805-3386.