

Miroslav Kmec, Ľubomír Beňa, Zsolt Čonka

Simulácia digitálnych dištančných ochrán pomocou programu Matlab / Simulink

Digitálne ochrany sú výsledkom použitia mikroprocesorovej technológie v ochranárskom priemysle. Tieto ochrany oproti svojim starším predchodcom poskytujú mnohé výhody, medzi ktoré patria prehľadnejšia a jednoduchšia manipulácia s ochranou, rýchlejší reakčný čas, kvalitnejšie možnosti komunikácie medzi sebou ale aj s nadradeným systémom a jedna z hlavných je variabilita nastavenia impedančných charakteristík. Tento článok popisuje základný princíp činnosti digitálnej dištančnej ochrany, vytvorenie jej modelu v programe Matlab/Simulink a grafické znázornenie výsledných impedancií snímaných nasimulovanou ochranou pri vzniku medzifázovej a zemnej poruchy v komplexnej rovine ($R-X$ diagrame).

Kľúčové slová: Dištančná ochrana, Matlab/Simulink, $R-X$ diagram, impedančné charakteristiky, skraty, IED

Digital relays are the result of the application of microprocessor technology in relay industry. These protections in relation to its older predecessors provide many advantages, which include more clearly and easier handling with protection, faster response time, better ways to communicate with each other and with the superior system and one of the main advantages is the variability of the impedance characteristic adjustment. This article describes the basic principles of operation of digital distance protection, distance relay model built using Matlab/Simulink environment and graphical representation of the results in the complex plane ($R-X$ diagram) measured by simulated protection when phase-to-phase and phase-to-earth fault occurs. (**Simulation of digital distance relays using program Matlab/Simulink**)

Keywords: Distance relay, Matlab/Simulink, $R-X$ diagram, impedance characteristics, faults, IED

ÚVOD

Dištančné ochrany vedení merajú impedanciu poruchovej slučky od miesta zabudovania ochrany po miesto poruchy. Dištančné ochrany môžu byť konštrukčne riešené tak, že budú reagovať na iné parametre ako je impedancia, napr. budú reagovať na reaktanciu, rezistanciu, admitanciu a pod. Závisí to od vhodného výberu parametrov pre ich činnosť. Pre analýzu charakteristík impedančného pôsobenia dištančných ochrán sa najčastejšie používa zobrazenie impedancií v komplexnej rovine, tzv. $R-X$ diagram.

Hlavnou úlohou dištančných ochrán je chrániť ES pred účinkami porúch a to iniciovaním výkonového vypínača, ktorý odpojí poškodený úsek (vedenie) ES alebo zariadenie od jej zdravej časti. Konštrukcia dištančných ochrán musí zabezpečovať za každých podmienok jej nepretržitú správnu činnosť. Pri vzniku poruchy ochrana musí dostatočne rýchlo obmedziť jej vplyvy, pričom nesmie nastať odpojenie ďalších zariadení alebo častí ES, ktoré nie sú zasiahnuté poruchou a ktoré by mohli prehĺbiť jej nežiaduci účinok.

Na štúdium činnosti a správania sa dištančnej ochrany počas poruchy nám slúžia rôzne simulačné programy, medzi ktoré patrí aj Matlab/Simulink. Posudzovanie správania sa ochrany pomocou takýchto programov nám pomáha určiť, či impedancia videná ochranou pri medzifázových alebo zemných poruchách ovplyvnená rôznymi prevádzkovými stavmi siete je správne alebo nesprávne zaradená pre daný impedančný dosah (zónu chránenia).

Tieto simulácie nám slúžia na korekciu impedančných charakteristík jednotlivých zón dištančnej ochrany, čím sa docielí zníženie počtu nežiaducich vypnutí alebo chybných blokování rôznych stavov, ktoré môžu vzniknúť na prenosových vedeniach v reálnych podmienkach. Takýmto korektným vylepšeniami

impedančných charakteristík prispievame k zvýšeniu spoľahlivosti prevádzky elektrizačnej sústavy [1].

ZÁKLADNÝ PRINCÍP ČINNOSTI DIŠTANČNÝCH OCHRÁN

Dištančné ochrany využívajú princíp merania impedancie poruchovej slučky, ktorý vychádza zo sledovania podielu poruchových veličín (skratového prúdu a napätia) v mieste zabudovania ochrany (v elektrickej stanici). Veľkosť impedancie chráneného obvodu kontroluje impedančný merací člen ochrany. Tento člen meria veľkosť impedancie skratovej slučky vedenia od miesta zabudovania ochrany po miesto skratu a naspäť k ochrane. Pričom čas vypnutia poruchy t je priradený na základe veľkosti odmeranej impedancie Z_F .

Pre túto impedanciu Z_F môžeme písať jednoduchý vzťah:

$$Z_F = \frac{U_F}{I_F} \quad (1)$$

kde: U_F je napätie v mieste ochrany

I_F je skratový prúd

Dištančná ochrana sa radí medzi tzv. sekundárne ochrany, čo znamená, že je pripojená k chránenému objektu pomocou prístrojových transformátorov prúdu a napätia (PTP a PTN). Ochrana preto nevidí primárnu impedanciu vedenia ale iba sekundárnu impedanciu, ktorá je daná prevodom prístrojových transformátorov a to :

$$Z_{sek} = \frac{\frac{I_{prim}}{U_{sek}}}{\frac{I_{sek}}{U_{prim}}} Z_{prim} \quad (2)$$

Merania impedancie skratovej slučky zdokonaľuje princíp chránenia vedení, pretože v sebe integruje súčasne zmeny dvoch poruchových veličín a to pokles napätia pri súčasnom náraste prúdu. Impedancia skratovej slučky klesá smerom k miestu zabudovania ochrany [2].

DIGITÁLNE DIŠŤANČNÉ OCHRANY

Digitálna dišťančná ochrana (DDO) zo známych vzoriek v poruchovom stave po *k*-tu vzorku vypočíta veľkosť fázorov napätí u_{L1} , u_{L2} , u_{L3} a veľkosť fázorov prúdov i_{L1} , i_{L2} a i_{L3} . Z týchto fázorov napätí a prúdov sa ďalej vypočíta všetkých šesť impedancií poruchových slučiek. Každá hodnota poruchovej impedancie je porovnávaná s nastavenou charakteristikou ochrany. Z týchto vypočítaných hodnôt impedancií bude iba jedna hodnota správna, ktorá určí typ a miesto poruchy. Ďalej vo výpočtovom programe určí dišťančná ochrana pre daný typ poruchy zónu, odmeria vypínací čas a dá povel na vypnutie výkonového vypínača.

Dnešné DDO sa vyhotovujú ako jedno alebo viacsystémové ochrany. Medzi Najpoužívanejšie DDO patrí šesťsystemová ochrana ktorá obsahuje šesť nezávislých meracích členov, z ktorých tri sú určené pre medzifázové skraty a tri pre jednofázové skraty. Touto kombináciou je vykrytých všetkých jedenásť typov porúch. Viacsystémové dišťančné ochrany sú spoľahlivejšie v porovnaní s jednosystémovými dišťančnými ochranami.

Ako bolo vyššie spomenuté, dnešné šesťsystemové DDO využívajú šesť meracích členov, pomocou ktorých sa určí jednoznačne typ skratu. V dôsledku rôznych typov porúch v sieti musia byť v DDO implementované aj rôzne vzorce pre výpočet poruchovej impedancie.

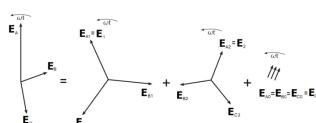
Tab. 1 uvádza vzorce pre výpočet všetkých typov porúch, ktoré môžu vzniknúť na prenosových sieťach. Akýkoľvek typ poruchy sa dá zistiť využitím jedným z daných výpočtov [3].

TABULKA I

Vstupné signály pre výpočet zemných a medzifázových porúch

| Merací člen | Napät'ový signál | Prúdový signál |
|-----------------|------------------|-----------------------|
| Fáza A | V_a | $I_a + K_n \cdot I_n$ |
| Fáza B | V_b | $I_b + K_n \cdot I_n$ |
| Fáza C | V_c | $I_c + K_n \cdot I_n$ |
| Fáza A - Fáza B | $V_a - V_b$ | $I_a - I_b$ |
| Fáza B - Fáza C | $V_b - V_c$ | $I_b - I_c$ |
| Fáza C - Fáza A | $V_c - V_a$ | $I_c - I_a$ |

V dnešných digitálnych dišťančných ochránach sa určuje typ poruchy z výpočtu symetrických zložiek prúdov alebo napätí. Pre tento účel možno použiť rozklad nesymetrickej sústavy na symetrické zložky pomocou jednej z najvyužívanejších metód a to *DTF* – *The Discrete Fourier Transform* (Obr. 1).



Obr. 1. DTF – The Discrete Fourier Transform

Pri poruche na vedení dochádza k silnému skresleniu prúdových a napät'ových signálov. Tieto signály môžu obsahovať jednosmerné zložky a rôzne prechodové a vyššie oscilačné frekvencie. Vyššie frekvencie môžu byť eliminované použitím dolno-priepustných filtrov, kde tento filter ale nedokáže odstrániť jednosmernú zložku z týchto signálov. To robí prácu s fázormi ťažšiu a tým ovplyvňuje aj výkon DDO. Preto sa DTF využíva na korekciu niektorých nedostatkov vzniknutých pri skrate, medzi ktoré hlavne patrí odstránenie jednosmernej zložky z vstupných signálov prúdu a napätia [4].

IMPEDANČNÉ VYHODNOCOVANIE MEDZIFÁZOVÝCH A ZEMNÝCH PORÚCH DIŠŤANČNOU OCHRANOU

Impedančný dosah použitých zón je potrebné nastaviť na meracích členoch pre všetky typy porúch, ktoré sa môžu v chránenej sústave vyskytnúť. Z tohto dôvodu je dôležité zistiť, ktoré elektrické parametre vedení je potrebné pre tento účel použiť. U dišťančných ochrán sa nastavuje jedna vypínacia charakteristika, ktorá ďalšími parametrami ochrany musí byť doplnená tak, aby vyhovovala pre všetky typy porúch.

Pri medzifázových skratoch v mieste poruchy *F* bude platiť rovnosť symetrických zložiek napätí ($U_{1F} = U_{2F}$).

$$U_{1F} = U_{2F} = U_1 - Z_{1L} I_1 = U_2 - Z_{1L} I_2 \quad (3)$$

Súsledná a spätná zložka impedancie vedenia po miesto poruchy je rovnako veľká, teda platí $Z_{1L} = Z_{2L}$. Úpravou rovnice (3) získame poruchovú impedanciu videnú dišťančnou ochranou v mieste jej zabudovania.

$$Z_{1L} = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2} \quad (4)$$

Pre rozdiel združených napätí (napr. medzi fázami L2 – L3) platí vzťah :

$$U_{L2} - U_{L3} = (a^2 - a) \cdot (U_1 - U_2) \quad (5)$$

podobným spôsobom môžeme vypočítať aj rozdiel prúdov ako :

$$I_{L2} - I_{L3} = (a^2 - a) \cdot (I_1 - I_2) \quad (6)$$

Po dosadení rovnice (4) do rovnice (5) a (6) môžeme napísať výslednú poruchovú impedanciu z nameraných napätí a prúdov aj pre ostatné typy medzifázových skratov ako:

$$Z_{1L} = \frac{U_{L1} - U_{L2}}{I_{L1} - I_{L2}} = \frac{U_{L2} - U_{L3}}{I_{L2} - I_{L3}} = \frac{U_{L3} - U_{L1}}{I_{L3} - I_{L1}} \quad (7)$$

Z rovnice (7) je vidieť, že poruchovú impedanciu vedenia možno identifikovať na základe nameraného združeného napätia poškodených fáz v mieste zabudovania ochrany deleného rozdielom prúdov poškodených fáz, ktoré tečú do ochrany [5].

Väčšina dišťančných ochrán meria súslednú zložku impedancie poruchy, preto sa musia pri jednofázových skratoch využiť určité formy kompenzácie. Za týmto účelom dišťančná ochrana modifikuje fázový prúd I_a , I_b alebo I_c tak, že sa k nemu pridá časť zemného prúdu I_n . Existuje mnoho techník ako docieľiť správny výpočet poruchovej impedancie. Každá firma preferuje inú techniku využívanú v ich dišťančných ochránach [6].

Jeden z postupov známy ako zemná kompenzácia využíva prídanie konštanty K_N a zemného prúdu I_N k fázovému prúdu I . Taktó upravený prúd využívajú dištančné ochrany pri meraní impedancie pri jednofázových zemných skratoch nasledovne:

$$Z_1 = \frac{V_a}{I_a + K_N \cdot I_N} \quad (8)$$

kde: K_N je zemný kompenzačný pomer,

I_N je zemný prúd ($I_N = 3I_0$),

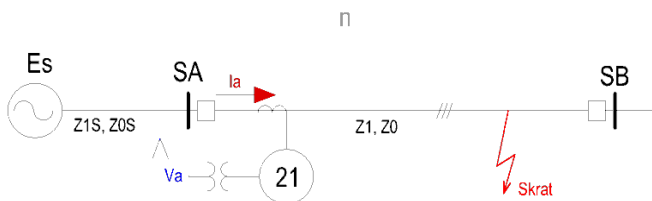
I_0 je netočivá zložka skratového prúdu.

$$K_N = \frac{(Z_0 - Z_1)}{3 \cdot Z_1} = \frac{\left(\frac{Z_0}{Z_1} - 1\right)}{3} \quad (9)$$

PARAMETRE SIMULOVANEJ SIETE

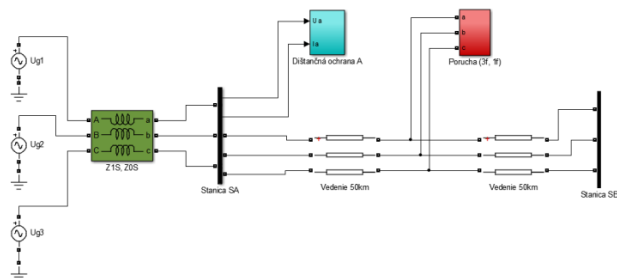
Jednoduchá schéma simulovanej siete o napätí 110 kV, frekvencii 50 Hz a dĺžke 100 km je zobrazená na Obr. 2. Súsledné a netočivé impedancie zdroja a vedenia sú nasledovné:

$$\begin{aligned} Z_{0S} &= 4 + j31.4 \text{ (}\Omega\text{)} & Z_0 &= 0.121 + j0.391 \text{ (}\Omega\text{/km)} \\ Z_{1S} &= 2 + j15.7 \text{ (}\Omega\text{)} & Z_1 &= 0.363 + j1.176 \text{ (}\Omega\text{/km)} \end{aligned}$$



Obr. 2. Simulovaná 110kV sieť

Táto sieť bola následne zadaná do programu Matlab/Simulink (Obr. 3), konkrétne silové časti schémy boli z knižnice SimPowerSystem. Všetky bloky okrem bloku dištančná ochrana sú základnými prvkami uvedenými v tomto toolboxe. Blok Dištančná ochrana bol osobitne naprogramovaný celok, ktorý obsahuje vyššie spomenuté výpočty fázorov pomocou DTF a výpočet impedancií pre jednotlivé typy skratov obsiahnutý v jednom subsysteme (Obr. 3).



Obr. 3. Simulovaná 110 kV sieť zadaná v programe Matlab/Simulink

V tejto simulácii je poukázané na mnohostranné možnosti využitia programu Matlab/Simulink pri simulácii snímania poruchovej impedancie dištančnými ochranami. Pri tejto simulácii sa kvôli zjednodušeniu zanedbal vplyv oblúka, čiže sa predpokladá, že všetky

poruchové impedancie by mali ležať na priamke vedenia.

Pri tejto simulácii sa nastavila iba jedna impedančná zóna a to na 90 % dĺžky chráneného vedenia čo predstavovalo hodnotu:

$$Z_{(Zóny 1)} = 10.89 + j35.24 = 36.88 e^{j72.83^\circ} \text{ (}\Omega\text{)}$$

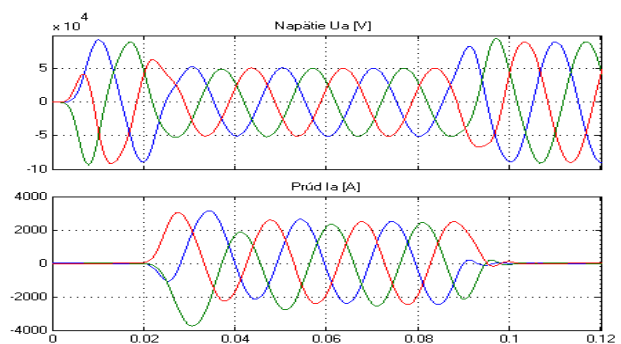
Tento impedančný dosah zóny bol vylepšený zvýšením rezistančného dosahu v jednom smere. Toto vylepšenie bolo navrhnuté pre budúce simulácie, pri ktorých sa bude uvažovať aj s vplyvom odporového charakteru elektrického oblúka.

VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ

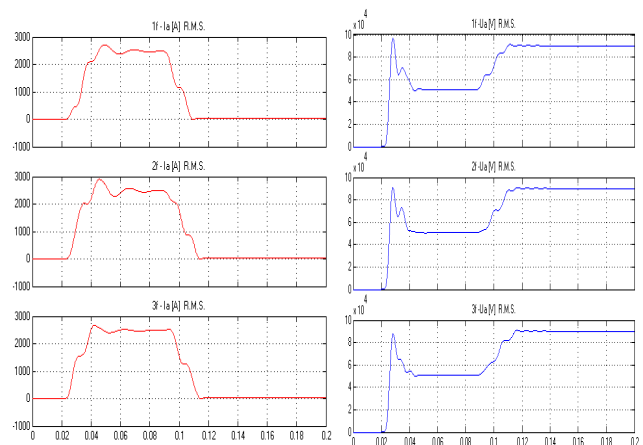
Ako bolo už vyššie spomenuté, simulovala sa medzifázová porucha (trojfázový skrat) a jednofázová porucha so zemou pri zanedbaní vplyvu oblúka. Tieto poruchy boli umiestnené v polovici dĺžky vedenia (tzv. 50 km). Pri týchto simuláciách sa sledovala správnosť výpočtu a umiestnenia výslednej poruchovej impedancie na priamke vedenia.

Prípad číslo 1.

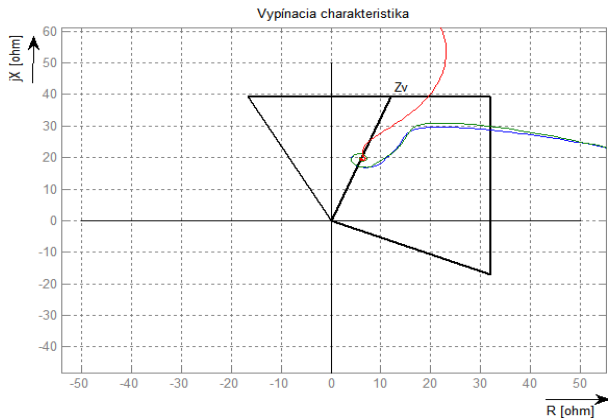
Vznik trojfázového skratu vo vzdialenosti 50 km od stanice SA. Napätový a prúdový signál sa počas celej simulácie privádzal na model ochrany. Obr. 4 poukazuje na priebeh prúdu a napätia počas trojfázového skratu. Tento signál bol prevedený na hodnoty R.M.S s prislúchajúcimi uhlami (grafické znázornenie prislúšných uhlov sa pre nedostatok miesta v publikácii neuvádza) ako pre prúd (Obr. 5 vľavo) tak aj pre napätie (Obr. 5 vpravo), s ktorými ochrana ďalej pracovala. Na Obr. 6 je zobrazený priebeh trajektórie impedancie pre všetky tri fázy, kde konečná hodnota impedancií sa ustálila na priamke vedenia, ktorá prechádza počiatkom súradnicového systému a má odchýlku od reálnej osi $\varphi = 72.83^\circ$ (uhol vedenia).



Obr. 4. Priebeh napätia a prúdu počas vzniku trojfázového skratu na vedení v okamžitých hodnotách



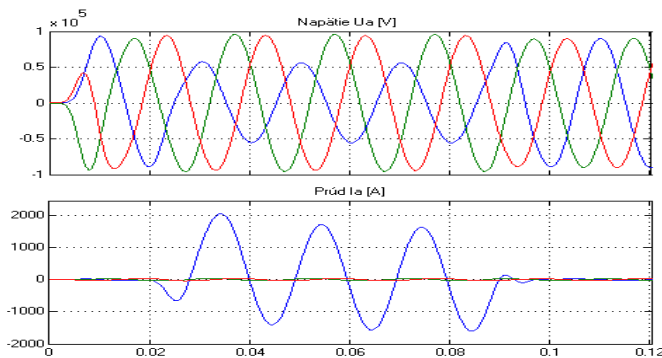
Obr. 5. Priebeh prúdu a napätia počas vzniku trojfázového skratu na vedení v R.M.S. hodnotách



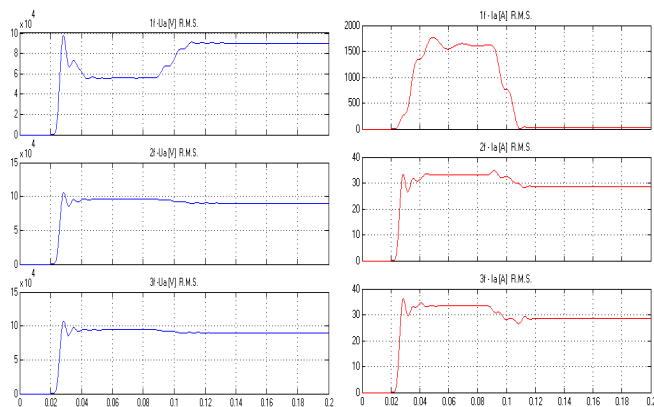
Obr. 6. Priebek trajektórie impedancie pre všetky tri fázy

Prípád číslo 2.

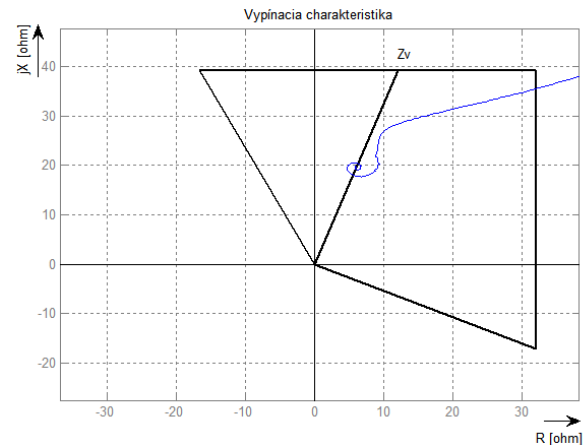
Vznik jednofázového skratu so zemou vo vzdialenosti 50 km od stanice SA. Napätový a prúdový signál sa počas celej simulácie privádzal na model ochrany podobne ako pre trojfázový skrat. Obr. 7 poukazuje na priebeh prúdu a napätia počas jednofázového skratu. Tento signál bol podobne prevedený na hodnoty R.M.S s prislúchajúcimi uhlami ako pre prúd (Obr. 8 vľavo) tak aj pre napätie (Obr. 8 vpravo). Na Obr. 9 je zobrazený priebeh trajektórie impedancie pre poškodenú fázu, kde konečná hodnota impedancie sa ustálila na priamke vedenia (zvyšné dve fázy vid' Obr. 10 nezasahovali do impedančného dosahu prvej zóny).



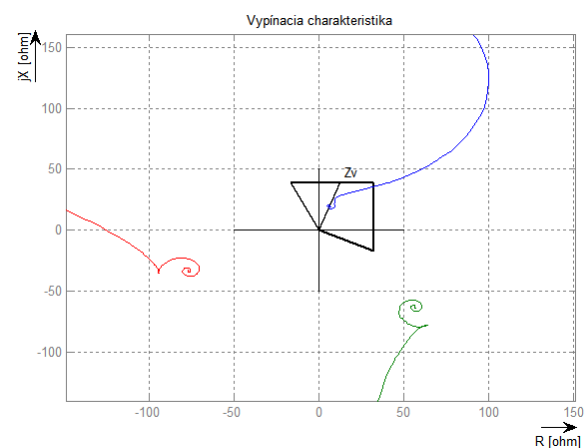
Obr. 7. Priebeh napätia a prúdu počas vzniku jednofázového skratu so zemou na vedení v okamžitých hodnotách



Obr. 8. Priebeh prúdu a napätia počas vzniku jednofázového skratu so zemou na vedení v R.M.S. hodnotách



Obr. 9. Priebek trajektórie impedancie pre poškodenú fázu



Obr. 10. Priebek trajektórie impedancie pre všetky tri fázy

Vo všetkých prípadoch, výsledky, ktorými sú výstupné trajektórie impedancií zobrazené v komplexnej rovine ($R-X$ diagrame) mali očakávané správanie, kde tento výpočet trajektórie začal v oblasti záťaže, pred skratom a skončil v oblasti pôsobenia ochrany.

ZÁVER

Pri požiadavkách na zvyšovanie spoľahlivosti prevádzky ES by sa nemalo zabudnúť ani na venovanie pozornosti prevádzke dištančných ochrán, ktoré sú v dnešnej dobe najčastejšie využívané ochrany v prenosových sieťach vvn a zvn.

Tento článok poukazuje na program Matlab/Simulink ako na jednu z možností, ktorá nám pomôže bližšie študovať činnosť a správanie sa digitálnej dištančnej ochrany v reálnych podmienkach, a ktorá poskytuje možnosť adaptácie budúcich zmien v konfigurácii sietí a logiky ochrany.

Cieľom tohto článku je popísať činnosť digitálnej dištančnej ochrany od základných princípov až po samotné vykreslenie poruchovej impedancie v komplexnej rovine.

Vďaka takýmto simulačným programom sa môžeme priblížiť alebo dokonca napodobniť reálne prevádzkové podmienky, v ktorých sa digitálna dištančná ochrana nachádza.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA č. 1/0388/13.

LITERATÚRA

- [1] KASZTENNY, Bogdan – FINNEY, Dale: Fundamental of Distance relays, [online] [cit.2014-13-2] dostupné na : < <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4515045&queryText%3DKasztenny+Fundamentals+of+Distance+Protection> >
- [2] CHLADNÝ, Vladimír: Ochrany v elektrizačných sústavách, návody na cvičenia. Košice. 1992. ISBN 80-7099-133-X
- [3] JANÍČEK, František – CHLADNÝ, Vladimír – BELÁŇ, Anton – ELESCHOVÁ, Žaneta: Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave. Bratislava. 2004. ISBN 80-227-2135-2
- [4] ABDLRAHEM, Abdlnnam A. – Sherwali, Hamid H.: Modelling of numerical distance relays using matlab[online] [cit.2014-13-2] dostupné na : < <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5356435&queryText%3DMODELLING+OF+NUMERICAL+DISTANCE+RELAYS+USING+MATLAB> >
- [5] CHLADNÝ, Vladimír: Digitálne ochrany v ES. Košice. 2007. ISBN 978-80-8073-798-6
- [6] VERZOSA Q.: Ground Distance Relays–Understanding the Various Methods of Residual Compensation, [online] [cit.2014-13-2] dostupné na: <http://www.pacw.org/fileadmin/_doc/Ground_Distance_Relays-residual_Compensation_JV.pdf>

ADRESY AUTOROV

Ing. Miroslav Kmec, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 041 20, Košice, Slovenská republika, Miroslav.Kmec@tuke.sk
doc. Ing. Ľubomír Beňa, PhD., Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 041 20, Košice, Slovenská republika, Lubomir.Bena@tuke.sk
Ing. Zsolt Čonka, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 041 20, Košice, Slovenská republika, Zsolt.Conka@tuke.sk