

Bystrík Dolník, Juraj Kurimský

EMC a zemné spojenia

Abstrakt. Distribučné spoločnosti sa snažia dôsledne eliminovať zdroje rušenia, ktoré majú vplyv na kvalitu elektriny. Emisné limity sú vo väčšine zahrnuté v normách IEC. V tejto súvislosti je potrebné upozorniť na techniky merania a analýzy, rovnako ako určovanie impedancie siete. Garantom elektromagnetickej kompatibility sú limity rušenia v akceptovateľných úrovniach. Naďalej však ostáva problémom krokové a dotykové napätie v súvislosti so zemnými spojeniami v sieťach vysokého napätia. Vyváženie zemného spojenia v distribučných sieťach súvisí so zariadeniami na kompenzáciu kapacitného zemného poruchového prúdu. Správna kompenzácia prispieva k rýchlemu zhášaniu oblúka, znižovaniu povrchového napäťového gradientu a možnosti udržať sieť v prevádzke. V príspevku sa uvádza teoretický základ rezonančného uzemnenia. Okrem toho je prezentovaná charakteristika obvodu s Petersenovou cievkou a prípadová štúdia diagnostických meraní na posúdenie stavu cievky.

Kľúčové slová: EMC, Petersenová tlmivka, kompenzácia, zemný poruchový prúd, testovanie

I. ÚVOD

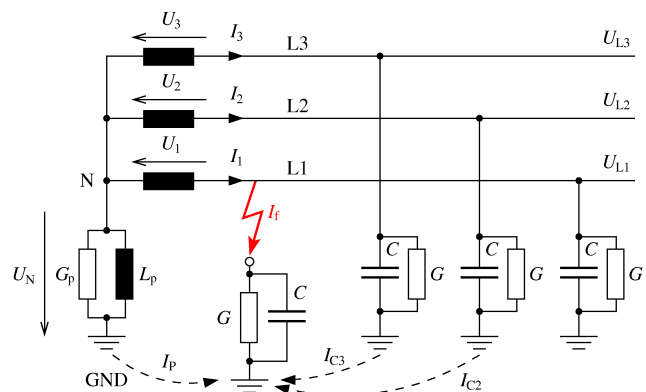
V distribučných sieťach vn existuje niekoľko možností prevádzky uzla transformátora: izolovaný, kompenzovaný, uzemnený cez impedanciu a priame uzemnenie na zem. Z vymenovaných možností prevádzka s kompenzovaným uzlom transformátora vzrástla [1, 2]. Spôsob uzemnenia neutrálneho bodu transformátora určuje, ako sa bude správať distribučná sieť počas zemného spojenia. Z bezpečnostného hľadiska zemný poruchový prúd spôsobí vznik nebezpečného napätia medzi zariadením s poruchou a zemou. Na riešenie tohto stavu používa sa kompenzácia. Kompenzované distribučné siete sú uzemnené cez Petersenovu cievku, ktorá je pripojená medzi neutrálnym bodom transformátora a zemou. Správne prevádzkované (naladené) kompenzačné zariadenia znížia hodnotu zemného poruchového prúdu. Distribučné siete s izolovaným a kompenzovaným uzlom transformátora majú zásadný význam pre zabezpečenie optimálneho napájania a kvality elektrickej energie.

Hlavnou výhodou je možnosť pokračovať v prevádzke siete počas trvalého zemného spojenia. Týmto spôsobom možno znížiť počet prerušení dodávky elektrickej energie pre zákazníka [3]. Autori v [4] preberajú možnosti a výhody kompenzovaných sietí v prípade káblových vedení, ktoré počas zemného spojenia prispievajú k činnnej zložke poruchového zemného prúdu.

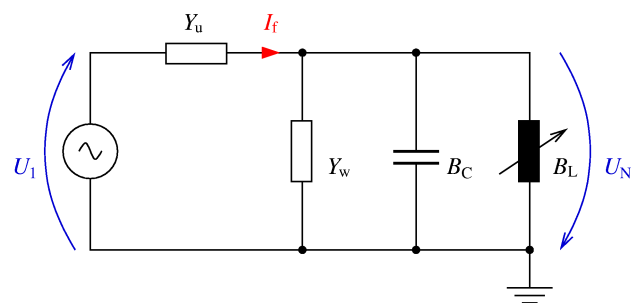
Ďalší problém, ktorý sa týka kompenzovaných distribučných sietí, je spojený s detekciou zemného spojenia [5, 6]. Taktiež bolo publikovaných veľa prác zaoberajúcich sa simuláciou horenia oblúka a parametrov distribučnej siete, napr. v [7–9]. Petersenová cievka má byť presne naladená v určitých stanovených medziach. Všeobecne platí, že treba oddeliť rezonančné procesy spôsobené poruchou od reálnej rezonancia. Existuje niekoľko spôsobov na zlepšenie presnosti ladenia Petersenovej cievky [10].

II. TEORETICKÉ ZÁKLADY

V distribučných sieťach vysokého napätia používa sa na zníženie zemného poruchového prúdu počas zemného spojenia Petersenová cievka. Petersenová cievka je naladená tak, aby sa dosiahlo vykompenzovanie kapacitného prúdu pomocou indukčného prúdu. Na opísanie elektrických parametrov distribučnej sústavy so zemným spojením používa sa často zjednodušená náhradná schéma podľa obr. 1.



Obr. 1. Náhradná schéma elektrickej siete vysokého napätia s kompenzovaným uzlom transformátora.



Obr. 1. Jednofázová náhradná schéma elektrickej siete s kompenzovaným uzlom transformátora.

Uvažuje sa ideálny symetrický trojfázový zdroj napätia a zanedbateľne malé hodnoty odporu a indukčnosti siete. Model poruchového stavu možno pretransformovať pomocou Théveninovej vety. V bezporuchovom stave uvažuje sa fázové napätie U v mieste poruchy, čím vznikne zjednodušený podiel podľa obr. 2.

Označenie veličín na obr. 1 je nasledovné: U_1, U_2, U_3 napätie zdroja, U_{L1}, U_{L2}, U_{L3} fázové napätie, U_N napätie medzi neutrálnym bodom a zemou, N neutrálny bod, C kapacita voči zemi, G zvod, L_p a G_p indukčnosť a zvod Petersenovej cievky; poruchový prúd I_f tečie v mieste zemného spojenia a spôsobí prietok prúdu I_p cez Petersenovu

cievku. Fázy L2 a L3 sú bez poruchy a tečie nimi len kapacity prúd I_{C2} a I_{C3} . V náhradnom obvode na obr. 2 možno napätové pomery jednoducho analyzovať použitím metódy uzlových napätí:

$$U_N (Y_u + Y_w + jB_C - jB_L) = -Y_u U_1, \quad (1)$$

kde: U_N – fázové napätie, Y_u – admítancia v mieste poruchy, Y_w – reálna časť Y_0 , B_C – kapacitná zložka Y_0 , B_L – indukčná zložka Y_0 , U_1 – napätie zdroja, $\omega = 2\pi f$ a f – priemerný kmitočet.

V rovnici (1) použili sa zjednodušenia vyplývajúce z predpokladov pre poruchový stav, ktorý sa uvažuje počas jednofázového zemného spojenia:

$$Y_u = \Delta G + j\omega C, \quad (2)$$

$$Y_w = 3G + G_p, \quad (3)$$

$$B_C = 3\omega C, \quad (4)$$

$$B_L = 1 / \omega L_p. \quad (5)$$

Úpravou (1) možno vzájomnú súvislosť medzi napätím U_N a napätím zdroja U_1 vyjadriť v tvare frekvenčne závislého deliča napätia ako

$$U_N = (Y_u U_1) / [Y_u + Y_w + j(B_C - B_L)] = -Y_u U_1 / (Y_u + Y_0), \quad (6)$$

pričom

$$Y_0 = Y_w + j(B_C - B_L). \quad (7)$$

VLASTNOSTI PETERSENOVEJ CIEVKY

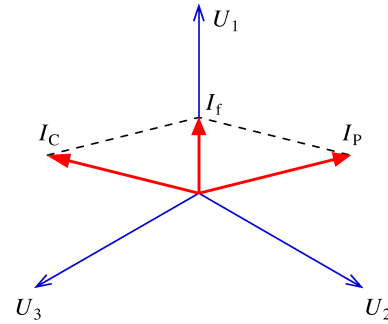
Na opísanie vlastností technickej Petersenovej cievky existuje niekoľko možností. V ďalšom texte sú ponúknuté informácie o funkcii Petersenovej cievky v elektrickej sieti. Ako pomôcku použijeme základnú charakteristiku Petersenovej cievky pomocou grafickej interpretácie elektro-fyzikálnych parametrov v poruchovom stave.

Hlavnú úlohu pre odstránenie poruchového prúdu má indukčná reaktancia Petersenovej cievky, pričom cievka je pripojená medzi neutrálny bod elektrickej siete a zem. Hodnota indukčnej reaktancie je naladená tak, aby sa dosiahla celková minimalizácia kapacitného prúdu v mieste poruchy. Pre celkovú analýzu treba vziať do úvahy činné straty cievky, vedenia, transformátorov, straty korónou a zvod izolátorov, ktoré spôsobujú vznik tzv. zvyškového poruchového prúdu.

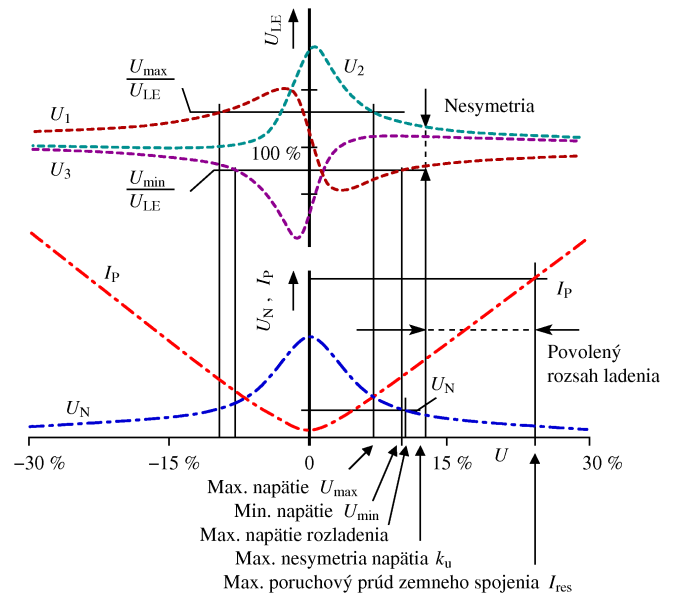
Vektorový diagram vyjadrujúci stav po kompenzácii jednofázového zemného spojenia je na obr. 3. Trojfázový zdroj napätia je symetrický, vzájomný fázový posun je 120°. Zemný poruchový prúd je kompenzovaný súčtom celkového kapacitného prúdu a indukčnej zložky prúdu tečúceho Petersenovou cievkou. Vektorový diagram znázorňuje ideálny prípad, v ktorom vektor zemného poruchového prúdu je vo fáze s vektorom napätím zdroja.

Všeobecne platí, že činný odpor Petersenovej cievky je omnoho menší ako jej indukčná reaktancia a preto aj jej činné straty sú pripočítané k činným stratám vznikajúcim na vedení. Hodnota impedancie je maximálna vtedy, keď imaginárna časť v (7) je rovná nule, t. j. cievka je presne naladená – v paralelnej rezonancii, pričom rezonančný obvod tvorí: kapacita voči zemi, indukčnosť Petersenovej cievky a celkový odpor prispievajúci k činným stratám.

Rezonančnú kruhovú frekvenciu ω_r paralelného rezonančného obvodu možno vypočítať



Obr. 3. Vektorový diagram trojfázovej elektrickej siete s kompenzovaným uzlom transformátora a jednofázovým zemným spojením.



Obr. 4. Napätie a zvyškový prúd pre jednofázové zemné spojenie; napätie na cievke v bezporuchovom stave.

$$U_N (Y_u + Y_w + jB_C - jB_L) = -Y_u U_1, \quad (8)$$

pričom C_e – kapacita voči zemi. Poruchový prúd možno vyjadriť pomocou činiteľa útlmu siete α činiteľa rozkladu v nasledovne:

$$I_f \approx [3U_1 \omega C_e (\alpha + jv)]^{0.5}, \quad (9)$$

pričom

$$\alpha = G / (\omega C_e), \quad (10)$$

$$v = 1 - 1 / (3\omega^2 C_e L_p). \quad (11)$$

V prípade dobre vyladeného stavu ($v = 0$) poruchový prúd je čisto ohmický prúd

$$I_{fr} = [3U_1 \omega C_e \alpha]^{0.5}. \quad (12)$$

Petersenova cievka je zvyčajne vyrobená ako cievka s plynulým ladením. Postupným ladením sa cievka dostáva do rezonancie. Na obr. 4 je zobrazená vzájomná súvislosť medzi napätiami a zvyškovým prúdom pre jednofázové zemné spojenie a napätie na cievke v bezporuchovom stave. Vrchná časť obr. 4 zobrazuje súvislosť medzi

činiteľom rozladenia a fázovými napätiami U_1 , U_2 , U_3 s dvomi kritickými hodnotami U_{\max} / U_{LE} and U_{\min} / U_{LE} , pričom maximálne a minimálne prípustné hodnoty (U_{\max} , U_{\min}) sú definované v príslušných normách.

Petersenova cievka môže pracovať v troch režimoch: úplné naladenie ($\nu = 0$), výsledkom čoho je čisto ohmický poruchový prúd v mieste zemného spojenia; „podladienie“ ($\nu < 0$) s ohmicko-kapacitným poruchovým prúdom a napokon „preladienie“ ($\nu > 0$) spôsobujúce prietok ohmicko-indukčného poruchového prúdu. V praxi sa odporúča režim malého „preladienia“ do $\nu = 10\%$ kvôli zmenám kapacity v prípade zmeny konfigurácie elektrickej siete. Ďalší faktor, ktorý obmedzuje rozsah ladenia Petersenovej cievky je hodnota fázového napätia (maximálne a minimálne prípustné hodnoty, prípustná asymetria trojfázovej siete), ktorá je definovaná pre rôzne faktory naladenia. Konečným výsledkom je prípustný rozsah ladenia 12–22%. Z obr. 4 vyplýva, že napätie na Petersenovej cievke je maximálne v stave rezonancie, pričom amplitúda napätia závisí od symetrie kapacít a od strát v cievke; prúd však bude minimálny. Podrobný opis ladenia Petersenovej cievky je napr. v [11], skúmanie algoritmu ladenia zasa v [12].

VLASTNOSTI MODERNÝCH PETERSENOVÝCH CIEVOK

Moderné technológie priniesli vynikajúcu možnosť automatizácie procesov. Súčasné regulátory sú navrhované ako voľne programovateľné zariadenia, ktoré umožňujú plynulé ladenie Petersenovej cievky. Navyše umožňujú ovládanie všetkých meraní a záznamov súvisiacich s činnosťou Petersenovej cievky, výhodné je použitie E-LAN systému zberníc. Výsledky výskumu poskytli možnosť pre použitie dvoch metód ovládania: prvá metóda sa nazýva „bez injekcie prúdu“, druhá metóda „s injekciou prúdu“. Vlastnosti prvej metódy ovládania „bez injekcie prúdu“ sú dané požiadavkou na ladenie Petersenovej cievky len pomocou nulovej zložky napätia na cievke. Mení sa pozícia cievky a navyše sa požaduje dostatočná amplitúda napätia. Keď sa použije druhá metóda, procedúra umožňuje nájsť správnu polohu Petersenovej cievky aj v prípade malej alebo žiadnej nulovej zložky napätia, dokonca aj v prípade rušenia superponovaného na nulovú zložku napätia. Existujúce algoritmy, ktoré sa používajú na stanovenie parametrov siete, respektíve na vyladenie Petersenovej cievky možno zoradiť do nasledovne:

- umelé zemné spojenie,
- stanovenie maximálneho zvyškového napätia,
- metóda najmenších štvorcov na základe inverznej rezonančnej krivky,
- diagram zvyškového napätia,
- umelé injektovanie prúdu do neutrálneho bodu systému v prípade neasymetrického prúdu vyvolaného prirodzenou asymetriou.

Podrobný opis menovaných metód možno nájsť napr. v literatúre [13–15].

III. EXPERIMENT

V súčasnosti existuje už veľa moderných riadiacich zariadení pre využitie v elektrickej sieti, existuje celý rad zariadení, ktoré možno klasifikovať ako staršie bez možnosti automatického testovania. To je dôvod, prečo chceme predstaviť jednoduchý postup pre testovanie takýchto zariadení.

Skúšanie Petersenových cievok predpisuje norma STN 33 3070 (aj ČSN). Pri uvedení Petersenovej cievky do prevádzky musí byť preukázaná jej správna činnosť – rezonančnou krivkou obvodu, t. j.

meraním napätia na cievke pri jej rôznom nastavení. Petersenova cievka, nastavená na minimálnu hodnotu prúdu, pripojí sa na sieť bez zemného spojenia a postupne sa odčítava pre každé nastavenie hodnota prúdu cez kompenzačnú tlmivku I_P a hodnota indukovaného napätia U_P na meracom vinutí. Počas merania sa v sieti nevykonávajú žiadne zmeny v radení, meria sa pri obvyklom zapojení vedení a transformátorov. Meranie sa realizuje postupne v celom rozsahu regulácie, pričom sa ešte určí prúdové nastavenie pre najväčšie napätie na tlmivke. Výsledky merania sa zakreslia do grafu $U_P = f(I_P)$. Z rezonančnej krivky určujú sa potrebné charakteristické hodnoty siete. Veľkosť zemného kapacitného prúdu oblasti je totožná s veľkosťou prúdu cievky pre najvyššie rezonančné napätia U_{Pr} vzťahnuté k menovitému napätiu cievky

$$I_C = I_r, \quad (13)$$

kde: I_C – celkový kapacitný prúd, I_r – prúd tečúci cez Petersenovu cievku v stave rezonancie. Veľkosť zvodového prúdu zemného spojenia (zvodový prúd siete a stratový prúd cievky) určí sa z rezonančnej krivky nasledovne: pre napätie $U_P = 0,707U_{Pr}$ zistia sa hodnoty prúdov I_{P1} , I_{P2} . Zvodový prúd zemného spojenia je

$$I_w = 0,5 (I_{P1} - I_{P2}), \quad (14)$$

kde: I_w – zvodový prúd zemného spojenia. Činiteľ útlmu siete určí sa z pomeru činného prúdu k zemnému kapacitnému prúdu

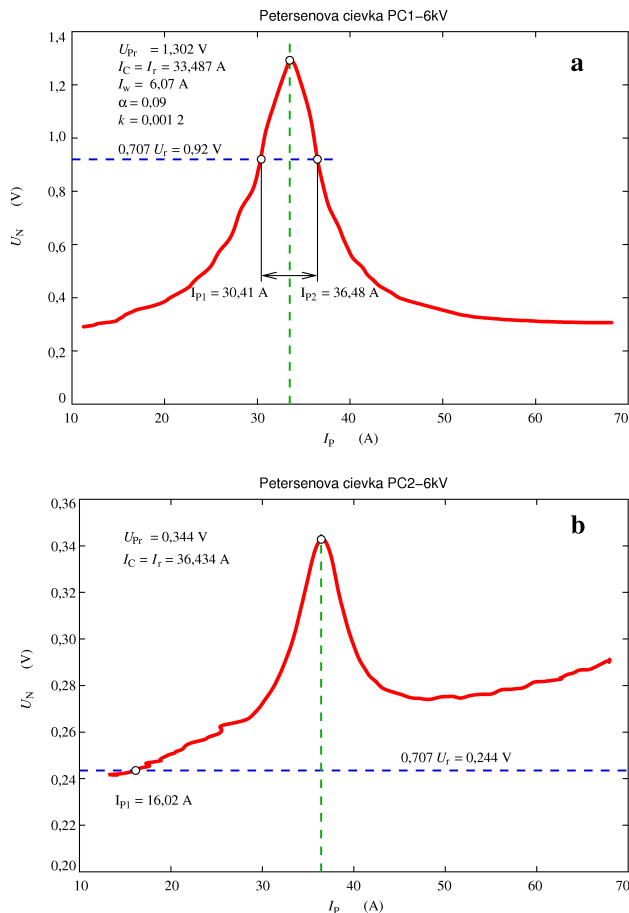
$$k = \alpha U_{Pr} / 100. \quad (15)$$

Veľkosť činiteľa asymetrie má byť pod hodnotou 0,01; t. j. pod 1%. Aby sa takéto testovanie jednoduchšie, bol pre tento účel vyvinutý experimentálny merací systém spolu s algoritmom analýzy. Experimentálny merací systém pozostáva z bežne používaných meracích prístrojov s možnosťou transferu dát do riadiaceho počítača. Automatizovaná analýza využíva jednoduchú procedúru, ktorú možno použiť v rôznych programoch pre numerickú analýzu v rôznych platformách. Pre účel vykreslenia spojitej rezonančnej krivky (získanie analytického vyjadrenia krivky) je vhodná napr. metóda kubických splajnov.

IV. DISKUSIA

Program bol urobený vo virtuálnom programovacom prostredí. Po vyriešení problémov, ktoré sú spojené s komunikáciou meracích zariadení a prenosom dát, boli nastavené globálne premenné potrebné pre funkciu meracej procedúry. Výsledky analýzy v grafickej podobe boli urobené pomocou aproximácie metódou kubických splajnov. Jadro procedúry je založené na troch základných podprogramoch.

Po nájdení maximálnej hodnoty (extrému) nameraného napätia nasleduje porovnávacie kritérium nameraných dát s hodnotami, ktoré sú stanovené v relevantnej norme. Výsledkom podprogramu je konečné rozhodnutie o stave meranej cievky s dvomi stavmi: cievka je dobrá alebo zlá. Na prvý pohľad je to jednoduché, ale k takémuto spôsobu vyhodnotenia pristúpilo veľa inžinierov pracujúcich v tejto problematike. Matematické výpočty možno realizovať buď „volaním“ externých matematických nástrojov alebo pomocou programového kódu v rámci hlavného programu. Uvedený postup bol prakticky odskúšaný v rozvodni s napäťovou hladinou 6 kV a 22 kV. Realizovali sa merania na dvoch Petersenových cievkach s cieľom odhaliť skryté chyby vo funkčnosti cievok.



Obr. 5. Grafická interpretácia výsledkov.

Merané elektrické veličiny boli merané on-line pomocou počítača. Grafická interpretácia analyzovaných dát je zobrazená na obr. 5. Z obr. 5a je zrejмый výsledok procedúry: meraná cievka PC1 je schopná kompenzovať zemné spojenia v elektrickej sieti. Naopak, z obr. 5b vidno, že meraná cievka PC2 nie je schopná kompenzovať poruchu počas jednofázového zemného spojenia tým, že sa nedá dobre naladiť do stavu blízko rezonancie.

V. ZÁVER

Kompenzované siete majú neutrálny bod uzemnený cez Petersenovu cievku, ktorá kompenzuje kapacitný prúd siete. Správne naladená Petersenova cievka, účinne zníži prúd zemného spojenia a tak oddiali následnú reakciu prúdových ochrán. Z hľadiska plánovania, testovaním starších zariadení možno predchádzať vzniku vážnych porúch v sieti. Návrh meracieho systému a programového rozhrania je určený na dosiahnutie vysokej presnosti kritických parametrov za súčasného rešpektovania požiadaviek elektromagnetickej kompatibility.

POĎAKOVANIE

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu „Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky“, ITMS 26220120055.



LITERATÚRA

- [1] T. Grima, J. Flatermeier, „A new generation of materials for medium voltage compensated neutral networks“, 14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED, IEE Conference, Birmingham, 2–5 June 1997.
- [2] A. Robert, E. De Jaeger, J. Hoeffelman, „POWER QUALITY & EMC“, 15th International Conference, Special report on Session 2. [on-line] <<http://www.cired.be/documents/cired1999SpecialReport2ang.doc>>.
- [3] M. Boukhenaf, A. Haddouche, N. Guersi: „Three Phases to Earth Reactors for the State Evaluation of Zero-Sequence Systems“, In: Asian Journal of Information Technology, 2 (2007), n. 6, 200–206.
- [4] A. Guldbrand, O. Samuelsson, „Central or Local Compensation of Earth-Fault Currents in Non-Effectively Earthed Distribution Systems“, Power Tech, (1–5 July 2007), IEEE Lausanne, 1129–1134.
- [5] N. I. Elkalashy, M. Lehtonen, H. A. Darwish, A.-M. I. Taalab, M. A. Izzularab, „A Novel Selectivity Technique for High Impedance Arcing Fault Detection in Compensated MV Networks“, European Transactions on Electrical Power, ETEP, 18 (2008), n. 4, 344–363.
- [6] W.-Y. Huang, R. Kaczmarek, „SLG Fault Detection in Presence of Strong Capacitive Currents in Compensated Networks“, IEEE Transaction on Power Delivery, 22 (2007), 2132–2135.
- [7] M. Kizilcay, P. La Seta, „DIGITAL SIMULATION OF FAULT ARCS IN MEDIUM-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS“, In 15th PSCC, (22–26 August 2005), Session 36, Paper 3, 1–7.
- [8] R. Živanović, P. Schegner, O. Seifert, G. Pilz, „Identification of the Resonant-Grounded System Parameters by Evaluating Fault Measurement Records“, In: IEEE Trans. on Power Delivery, 19 (2004), n. 3, 1085–1090.
- [9] S. Hänninen, „Single phase earth faults in high impedance grounded networks“, Characteristics, indication and location, Dissertation for the degree of Doctor of Technology, TECHNICAL RESEARCH CENTRE OF FINLAND, (2001), ISBN 951–38–5960–6 (soft back ed.).
- [10] G. Druml, A. Kugi, B. Parr, „Control of Petersen Coils“, In: Proceedings of XI. International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, August 2001, Linz, Austria, 1–7.
- [11] S. Schlabbach, „Short-circuit Currents“, IEE Power & Energy, Series 51, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, (2005), ISBN 0–86341–514–8.
- [12] G. Druml, „Petersen – Coil Controller“, Operating Manual, REGSys, [on-line] <http://www.aeberle.com>, (2007).
- [13] G. Druml, A. Kugi, O. Seifert, „Ein neues Wischerrelais für hochohmige Erdschlüsse“, In: Proceedings of 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 12–15 May 2003, 1–6.
- [14] G. Druml, S. Steger, O. Seifert, A. Kugi, „Operational Experiences With the New Method to Control Petersen Coils by Injection of Two Frequencies“, In: Proceedings of 19th International Conference on Electricity Distribution, (2007), 1–4.
- [15] J. Lorenc, W. Hoppel, „Technical methods supporting operation of earth fault protections in medium voltage networks“, In: Przegląd Elektrotechniczny, 85 (2009), n. 9.
- [16] R. Kosztaluk, Z. Flisowski, „Methods of overvoltage reduction in power networks“, In: Przegląd Elektrotechniczny, 77 (2001), n. 11.
- [17] A. Chojnacki, „Structural reliability assessment of low-voltage / medium-voltage transformer-distribution stations“, In: Przegląd Elektrotechniczny, 84 (2008), n. 5.

ADRESY AUTOROV

Bystrík Dolník, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: bystrik.dolnik@tuke.sk
 Juraj Kurimský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: juraj.kurimsky@tuke.sk