

Jozef Balogh

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Spôsoby merania čiastkových výbojov

Abstrakt. Článok popisuje modely používané pre modelovanie rôznych typov čiastkových výbojov v izolačných systémoch vysokonapäťových elektrických zariadení. Sú popísané metódy merania čiastkových výbojov.

Abstract. This paper describes models used for modeling various types of partial discharges in insulation systems of high voltage electric power devices. Methods of partial discharge measurement are described.

Kľúčové slová: meranie čiastkových výbojov, čiastkové výboje.

Keywords: partial discharge measurement, partial discharge.

Úvod

Meranie čiastkových výbojov sa vykonáva metódami, ktoré sa líšia spôsobom snímania v závislosti od sledovaného prejavu čiastkových výbojov. V súčasnosti najpoužívanejšia metóda je priama galvanická metóda merania, ktorá z nameraných elektrických prejavov čiastkových výbojov zhromažďuje súbory výpovede schopných veličín.

Tento súbor veličín je ďalej použiteľný na analýzu a určenie závažnosti poruchy v elektroenergetickom zariadení. Nevýhodou tejto metódy je, že ju nemožno použiť on-line. Ďalšími spôsobmi merania čiastkových výbojov sú napr. induktívna metóda a metóda merania akustickej emisie čiastkových výbojov.

Modelovanie čiastkových výbojov

V izolácii objektov vn a vvn zariadení môžu byť plynom vyplnené malé dutinky, poprípade môžu takéto dutinky vznikáť účinkom veľkého lokálneho elektrického namáhania. Dutiny môžu mať rôzny tvar. Ak zvyšujeme striedavé napätie priložené k elektródam objektu, objavajú sa v okolí určitého napätia v dutinách čiastkové výboje. Za účelom objasnenia špecifických vlastností čiastkových výbojov, sledujeme mechanizmus ich vzniku pomocou náhradných modelov.

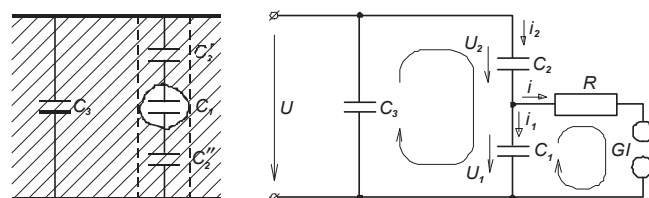
Model pri jednoduchom usporiadaní

Náhradná schéma dielektrika veľmi často používaná na účel modelovania výbojových procesov je uvedená na obr. 1 [3].

Kde C_1 je kapacita dutinky, $C_2 = C_2' + C_2''$ je kapacita dielektrika pripojeného do série s kapacitou dutinky C_1 a C_3 je kapacita nepoškodenej časti dielektrika. Rezistor R predstavuje odpor výbojového kanála a GI je guľové iskrište, ktorého zapálenie modeluje čiastkový výboj. Iskrište je pripojené paralelne ku kapacite dutinky C_1 .

Podľa [1] dostaneme pre veľkosť zdanlivého náboja q_{cv} vzťah:

$$q_{cv} = \Delta U_x C_x = \Delta U_1 C_2 = q \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (1)$$

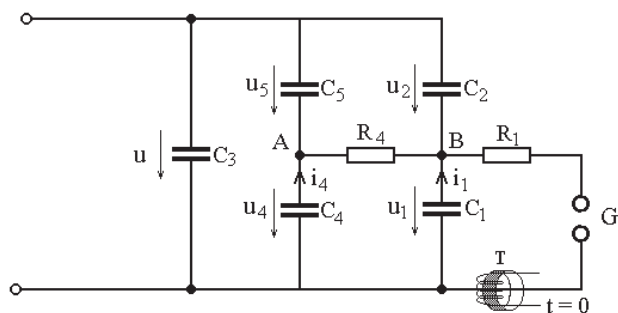


Obr. 1 Náhradný model dielektrika pri jednoduchom usporiadaní

V predpokladanom súčasnom stave problematiky najčastejšie používané napäťové typy modelov sú:

- Böningov model
- Kranzov model
- Kučinského model

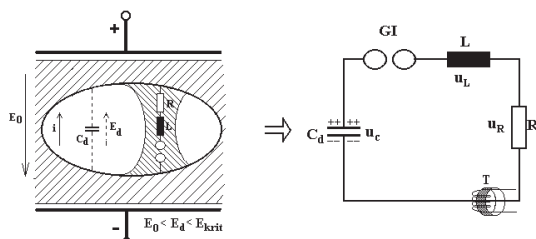
Pre Böningov model platí, že vplyv okolia vzduchovej medzery je možné sledovať prostredníctvom dodatočného pripojenia kapacity C_4 paralelne ku kapacite vzduchovej medzery C_1 v náhradnom modeli (obr. 2).



Obr. 2 Rozšírený náhradný obvod prvku vzduchovej medzery. Prvok C_4R_4 zohľadňuje vplyv okolia vzduchovej medzery

Ďalším z modelov je prúdový model (podľa Marton [4]). Elektrofyzikálne procesy vystihuje obr. 3.

V plynom vyplnenej dutinke je po priložení napätia na elektródy intenzita elektrického poľa E_d . Objem dutiny predstavuje mikrokapacitný útvar o hodnote C_d (obr. 3a). Po prekročení intenzity poľa v dutine z hodnoty E_d na E_{krit} pričom $E_{krit} > E_d$ dochádza k „zapáleniu“ výboja, kedy výbojovým kanálom a odporom R a indukčnosťou L tečie prúd i (obr. 3a). Na obr. 3b je náhradný model dutinky znázornený prúdovým impulzným generátorom a umiestnenie toroidnej sondy na snímanie čiastkových výbojov nepriamou metódou.

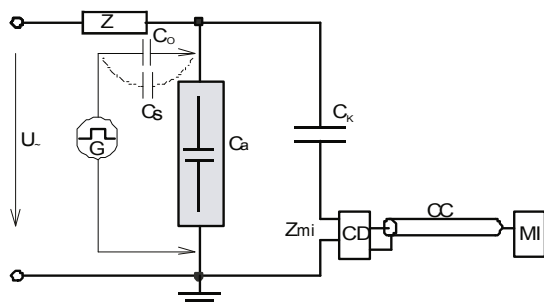


Obr. 3 Náhradný model dutinky znázornený prúdovým impulzným generátorom

Spôsoby merania čiastkových výbojov

Priama (galvanická) metóda snímania čiastkových výbojov

V súčasnej dobe je priama (galvanická) metóda merania čiastkových výbojov jednou z najmodernejších metód na sledovanie stavu izolačných systémov v zariadeniach vn a vvn [6]. Je založená na priamom snímaní prúdových impulzov čiastkových výbojov z meracej impedancie Z_m . Na obr. 4 je zobrazené najčastejšie používané základné zapojenie obvodu pre meranie čiastkových výbojov touto metódou.



Obr. 4 Základné zapojenie podľa IEC 60270 [5]

- U- - vysokonapäťový zdroj,
- Z_{mi} - vstupná impedancia meracieho systému
- CC - prepojovací kábel
- MI - merací prístroj
- CD - väzobné zariadenie – meracia impedancia
- C_a - testovací (skúšaný) objekt
- C_k - väzobný kondenzátor
- C_o - kalibračný kondenzátor
- C_s - rozptyľová kapacita
- G - generátor pravouhlých impulzov (kalibrátor)
- Z - filter

Hlavnou úlohou testovacieho obvodu čiastkových výbojov je detekovať čiastkové výboje pri špecifikovanom napätí s adekvátnou citlivosťou a nízkou úrovňou šumu, t.j. stanoviť prúdové impulzy čiastkových výbojov v rámci obvodu s veľkosťami a tvarmi, ktoré sú najpriaznivejšie pre ich detekciu a meranie.

Výhodou priamej (galvanickej) metódy merania čiastkových výbojov je vysoká citlivosť merania, dostatočná výpovede schopnosť metódy, neohrozenie izolačného systému v priebehu merania.

Nevýhodou priamej (galvanickej) metódy merania čiastkových výbojov je potreba meracej impedancie a väzobného kondenzátora, rušenie z rôznych zdrojov, potreba odstavenia meraného objektu z prevádzky, ciachovanie prístrojov.

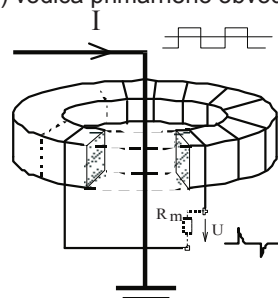
Nepriama (induktívna) metóda snímania čiastkových výbojov

V praxi je dôležité vedieť ako sa mení stav izolačného systému elektrických strojov v závislosti od doby prevádzkovania. Z ekonomického hľadiska by bolo nevýhodné, ak by sme museli sledovaný objekt pri každom meraní odpájať od siete.

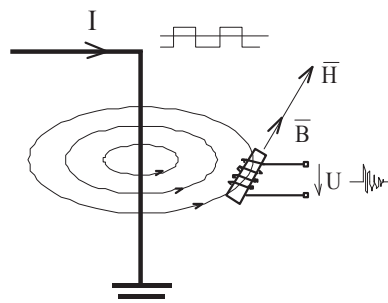
Z hľadiska kontinuálneho sledovania (monitorovania) stavu prevádzkovej techniky v energetike nepriama (induktívna) metóda má oproti priamej (galvanickej) metóde výhodu najmä v tom, že môžeme meraný objekt sledovať priamo počas prevádzky.

Pre monitorovanie výskytu čiastkových výbojov v izolačných systémoch zariadení vysokého a veľmi vysokého napätia boli nami vyvinuté indukčné sondy lineárneho typu [7] a sondy toroidálne [8] a [9].

Toroidný snímač je možné umiestniť v obvode pracovného uzemnenia meraného objektu (obr. 5), nakoľko prúdové obvody sú navzájom elektromagneticky previazané. Navyše jeho transformačný koeficient nezávisí od tvaru (prierezu) vodiča primárneho obvodu.



Obr. 5 Umiestnenie indukčného snímača v prípade toroidálnej sondy



Obr. 6 Umiestnenie indukčného snímača v prípade lineárnej sondy

Lineárny snímač sa musí umiestniť do elektromagnetického poľa vyžarovaného signálu tak, aby vektor magnetickej indukcie B a intenzity magnetického poľa H bol orientovaný do osi snímača (obr. 6). Experimenty ukázali, že pri kolmom uložení snímača zachytí tento iba 40% vyžiarenej energie a pri rovnobežnom uložení s vodičom sníma iba 15% vyžiarenej energie.

Z ekonomického dôvodu je výhodnejšie použitie lineárnych sond. Ich výhoda voči toroidným spočíva v tom, že nie je nutné meraný obvod prerušiť za účelom nasadenia indukčnej sondy toroidného tvaru.

Lineárne snímače boli vyvinuté na našom pracovisku a boli aplikované pri revíziách vysokonapäťových strojov, najmä izolácie statorových vinutí trakčných strojov, hydro a turbogenerátorov a 6kV točivých strojov.

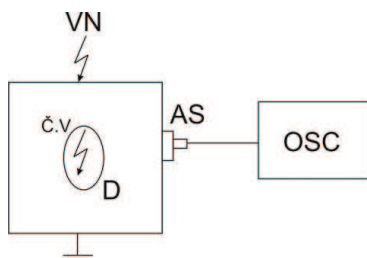
V širšom rozsahu boli aplikované na detekciu čiastkových výbojov v káblových sieťach, v prístrojových transformátoroch napätia a prúdu v suchom vyhotovení ako aj v distribučných "suchých" 22kV transformátoroch.

Toroidálne induktívne snímače boli taktiež vyvinuté na našom pracovisku a používajú sa aj na meranie zvodového prúdu pri frekvencii 50 Hz a sú zapojené do pracovného uzemnenia objektu. Majú funkciu prúdového meniča. Signál z vinutia snímača na toroidnom feromagnetickom jadre je ďalej spracovaný a vyhodnocovaný elektronicky PC technikou.

Akustická metóda merania čiastkových výbojov

Princíp tejto metódy je založený na tom, že čiastkové výboje sú zdrojom akustických signálov, tzn. pri čiastkových výbojoch sa časť elektrickej energie mení na mechanickú energiu. Týmto sa miesto v dielektriku, kde dochádza k čiastkovým výbojom stáva zdrojom mechanického vlnenia, ktoré sa potom od zdroja šíri všetkými smermi. Charakter zdroja vlnenia je taký, že frekvenčné spektrum vlnenia spadá do pásma akustických vln. To znamená, že je možné detekovať ho akustickými snímačmi a následne signál previesť na elektrický signál pre ďalšie spracovanie.

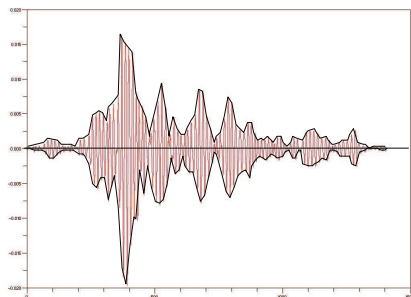
Na obr.5 je schematicky znázornená základná zostava pre detekciu akustických signálov čiastkových výbojov, ako aj cesta šírenia sa akustických signálov od ich zdroja až po osciloskop [9].



Obr. 7 Schematické zobrazenie snímání signálov akustickej emisie čiastkových výbojov [9]

Dutinka D vo vysokonapäťovom zariadení VN je miestom výskytu čiastkových výbojov, čím sa stáva zdrojom akustického vlnenia, ktoré sa šíri od zdroja všetkými smermi. Vlnenie sa šíri cez akustický kanál, ktorý je tvorený homogénnym alebo nehomogénnym prostredím. Pri dosiahnutí akustického snímača AS, ktorý je pripevnený na stene zariadenia sa signál pretransformuje na elektrický signál, je zosilnený a následne privedený na vstup osciloskopu alebo iného záznamového zariadenia alebo zariadenia, ktoré takýto signál spracuje.

Akustická metóda merania čiastkových výbojov patrí medzi nedeštruktívne metódy, je vhodná pre detekciu a lokalizáciu čiastkových výbojov a čiastočne aj pre ich kvantifikáciu. Jej veľkou výhodou je jej imúnosť voči rušeniu elektromagnetického charakteru.

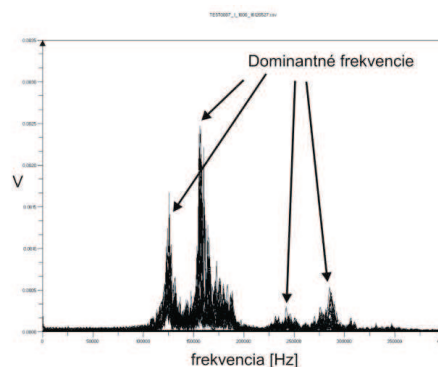


Obr. 8 Typický priebeh impulzu akustickej emisie čiastkových výbojov

Úlohou mechanicko-elektrického meniča v obvodoch merania akustickej emisie čiastkových výbojov je lineárna

transformácia mechanických signálov – zmeny tlaku – na elektrické signály. Na tento účel sú vhodné najmä piezoelektrické meniče. Tieto využívajú fyzikálny jav, ktorý je možné pozorovať u piezoelektrických látok (vo forme kryštálických, polykryštálických alebo polymérnych látok), kedy pri deformácii kryštálu dochádza k vytvoreniu elektrického poľa.

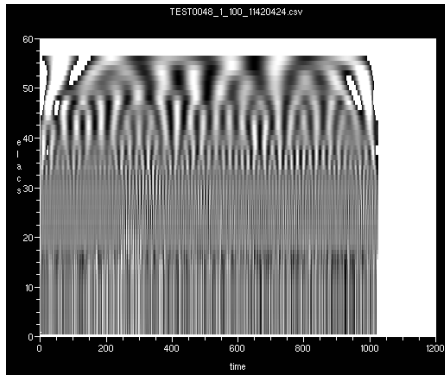
Po nasnímaní akustického signálu piezoelektrickou sondou a po jeho zosilnení v predzosilňovači je koaxiálnym káblom vedený do vyhodnocovacieho alebo záznamového zariadenia (obr. 8). V prípade vyhodnocovacieho zariadenia je potrebné charakteristiky signálu merať on-line za použitia algoritmov, ktorých výsledkom je komplexná charakteristika signálu akustickej emisie vzhľadom na zdroj signálu akustickej emisie (AE) a na akustický kanál, ktorým sa signál šíri. V prípade záznamového zariadenia je signál AE iba uložený na pamäťové médium a neskôr je možné ho spracovať a vyhodnotiť.



Obr. 9 Amplitúdové frekvenčné spektrá viacerých signálov akustickej emisie čiastkových výbojov

Výpovede schopnosť akustickej metódy detekcie a lokalizácie čiastkových výbojov je daná hlavne tým, ako je signál interpretovaný, t.j. ktoré parametre signálu je potrebné extrahovať. Závisí to najmä na štatistickej povahe signálu:

- pri dlhšom trvaní signálu akustickej emisie s viacerými energetickými impulzmi je vhodné zvoliť štatistické veličiny časového priebehu signálu:
 - energia signálu,
 - početnosť impulzov akustickej emisie,
- v prípade ojedinelých impulzov je možné skúmať časový priebeh samotného impulzu (obr. 8) a extrahovať parametre ako:
 - doba nábehu impulzu,
 - špičková amplitúda,
 - doba doznievania,
 - celkové trvanie impulzu pri určitej definovanej hladine priebehu,
 - tvar obálky impulzu a ďalšie parametre charakterizujúce impulz,
- rovnako dôležité je skúmať charakteristiku signálu vo frekvenčnej doméne (obr. 9):
 - amplitúdová a fázová frekvenčná charakteristika,
 - výkonové spektrum.



Obr. 10 Príklad 2D grafu koeficientov CWT (kontinuálna Waveletová transformácia)

Výsledky experimentov sa analyzujú najmä v troch oblastiach:

- časová,
- frekvenčná (použitie Fourierovej transformácie),
- škálografická (použitie Waveletovej transformácie - **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**)

Záver

Prínosom tejto práce sú porovnávacie merania realizované galvanickou a indukčnou metódou so súčasným snímaním výbojovej činnosti pomocou iných typov snímačov (kapacitných, akustických) na rôznych izolačných objektoch.

V priebehu skúmania sme mali možnosť poukázať na výhody snímania a vyhodnocovania čiastkových výbojov v prevádzkových ako aj laboratórnych podmienkach (modelovanie čiastkových výbojov). V práci je zdôraznený význam pre diagnostiku.

Za účelom spracovania nameraných signálov bol použitý software, umožňujúci vyhodnotiť a prezentovať tieto výsledky vo forme fázových rozložení smerodajných veličín. Vlastné overovacie merania poukázali na to, že po určitých technických úpravách bude možné tento spôsob detekcie čiastkových výbojov využiť na kontinuálne monitorovanie výbojovej činnosti. Tento systém je možné aplikovať nielen pri elektrických zariadeniach vn a vvn, ale aj pri kábloch, káblových koncokách, spojkách na zvodičoch prepätia, respektíve na izolátoroch.

Všeobecne možno konštatovať, že pri použití prenosnej techniky a po prepojení snímača optoelektrickým káblom je možné zaručiť on-line monitoring vytypovaných zariadení. Tento navrhovaný spôsob zaručuje zvýšenú bezpečnosť pri práci a všeobecne odhalenie porúch vyvíjajúcich sa v izolačnom systéme zariadenia.

Ďalej odporúčame, aby bol pre indukčné sondy navrhnutý prenosový merač čiastkových výbojov spojený s prenosnou PC technikou (notebook), ktorý by bol koncipovaný pre meranie elektrických zariadení nachádzajúcich sa v prevádzke, ale môže sa rovnako použiť pre skúšobné a vývojové účely v laboratóriách.

Literatúra

- [1] Balogh, J.: Lineárne a toroidálne sondy a ich aplikácia v elektroenergetike, Dizertačná práca, FEI TU v Košiciach, 2001, 117 str.
- [2] Marton, K., Boga, M., Balogh, J., Džmura, J., Petráš, J.: Vplyv teploty izolácie na rozvoj čiastkových výbojov. Zborník z III. vedeckého sympózia Elektroenergetika 2005, Stará Lesná, 2005. ISBN 80-8073-305-8
- [3] Kučinský, G. S.: Častičnyje razrjady v vysokovoľtných konstrukciach, Izdatel'stvo Energia, Leningrad, 1979
- [4] Marton, K.: Elektrofyzikálne základy snímania čiastkových výbojov senzormi kapacitnými a indukčnými, In: Proc. VI.

SYMPOZJUM, Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia, AGH Krakow, 1997, str. 205 – 214

- [5] Partial Discharge Measurements, IEC 60270, 1998
- [6] Kurimský, J., Cimbala, R., Kolcunová, I.: Multi-scale decomposition for partial discharge analysis. In: Przeglad Elektrotechniczny. vol. 84, no. 9 (2008), p. 169-173. ISSN 0033-2097.
- [7] Marton, K. a kol.: Výskumná správa GAV č.1/990345/92, EF TU Košice, 1992.
- [8] Marton, K. a kol.: Výskumná správa GAV č.1/990345/92, EF TU Košice, 1992.
- [9] Marton, K., Balogh, J.: Elektrofyzikálna analýza odo-zvy čiastkových výbojov modelovaných Diracovym impulzom. Zborník, Diagnostika 93, ZČU Plzeň, 1993.
- [10] PETRÁŠ, Jaroslav: Lokalizácia miest defektnej izolácie v elektroenergetických zariadeniach pomocou akustických metód : Dizertačná práca. Košice 2008. 118 s.



Európska únia



Operačný program
VÝSKUM A VÝVOJ

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.

Autori: Jozef Balogh, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jozef.balogh@tuke.sk