



STARNUTIE ELEKTROIZOLAČNÝCH SYSTÉMOV

NOVÉ VEDECKÉ POZNATKY A ICH APLIKÁCIE

Október 2009

Číslo 7/2009

ISSN 1337-0103

Obsah

Karol Marton, Jozef Balogh, Jaroslav Petráš, Jaroslav Džmura Rozbor elektrických pomerov na rozhraní elektróda – pevná fáza – plyn	3
Marton, K., Tomčo, L., Cimbala, R., Kolcunová, I., Kopčanský, P., Koneracká, M., Timko, M. Využitie magnetickej kvapaliny v izolačnom systéme transformátora	7
Iraida Kolcunová, Viera Vančová Vplyv viskozity na elektroizolačné vlastnosti rastlinných olejov	12
Bystrík Dolník, Juraj Kurimský Vplyv teploty na zafarbenie povrchu XPE vzoriek	16
Bystrík Dolník, Juraj Kurimský, Ján Tkáč Možnosti ochrany izolácie veterných elektrární pomocou aktívnych bleskozvodov	19
Jozef Kováčik Monitoring neštandardných javov v napäťových systémoch rozvodní ES SR	22
Marek Pípa, Attila Kment Modeling of Operational Conditions for Development of Measuring System for High Current on High Voltage Potential	25
Jaroslav Lelák, Attila Kment, Michal Váry Porovnanie prejavov čiastkových výbojov na vysokonapäťovom kábli so spojkou pomocou vysokonapäťových meraní	28
Attila Kment, Jaroslav Lelák, Michal Váry Vyhodnotenie fázového rozloženia čiastkových výbojov na vysokonapäťovom kábli so spojkou	30
Barbara Florkowska, Marek Florkowski, Jakub Furgał, Józef Roehrich, Paweł Zydrón Impact of High Frequency Risks in Insulation Systems of Electric Machines	33
Jaroslav Petráš, Jozef Balogh, Jaroslav Džmura Sledovanie aktivity čiastkových výbojov v izolačných systémoch pomocou indukčívnej a piezoelektrickej sondy	38
Juraj Kurimský Matematický model šírenia akustickej vlny vo vn transformátoroch s olejovým médiom	42

Starnutie elektroizolačných systémov

nové vedecké poznatky a ich aplikácie

ISSN 1337-0103

Vydavateľ

Energo Consulting s.r.o.

Copyright

Publikácie na tejto stránke sú predmetom autorských zákonov krajiny. Kopírovanie, používanie a všetky spôsoby využívania spadajúce pod autorský zákon musia byť písomne autorizované vydavateľom. Súborny na stiahnutie a kópie tejto stránky alebo jej častí sú preto dovolené len pre súkromné použitie. Informácie o citovaní príspevkov sa posielajú autorom príspevkov na adresy uvedené na konci.

Zodpovednosť za obsah

Zodpovednosť za obsah, berúc do úvahy jeho presnosť a komplexnosť majú autori príspevkov.

Karol Marton, Jozef Balogh, Jaroslav Petráš, Jaroslav Džmura

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

Rozbor elektrických pomerov na rozhraní elektróda – pevná fáza – plyn

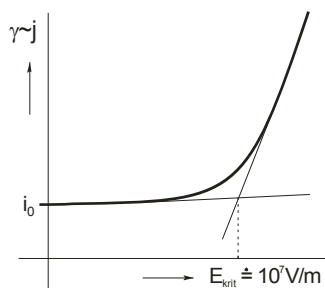
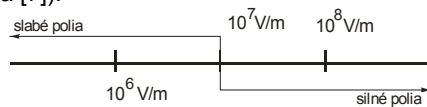
Abstrakt. Príspevok je zameraný na vznik a existenciu nekonvenčných kĺzavých výbojov, vyskytujúcich sa v elektrotechnike nielen na povrchoch izolačných systémov vn a vvn zariadení, ale aj v elektronike a v mikroelektronike. Sú vysvetlené podmienky vzniku výboja s poukázaním na vonkajší prejav výbojov ako aj na kapacitný model rozhrania. Je urobený rozbor rozloženia napätia, intenzity elektrického poľa a priestorového náboja medzi elektródami. Autori poukazujú na súvislosť relatívnej permitivity materiálu s uhlom lomu siločiar na rozhraní pre rôzne pomery permitív stýkajúcich sa dielektrických vrstiev. Je navrhnutý experiment pre skúmanie signálu z kĺzavých výbojov galvanickou cestou ako aj pomocou induktívnej sondy. Sú uvedené výsledky z experimentov pre materiály, ktoré sú v elektrotechnike bežné v aplikačnej sfére.

Kľúčové slová: ionizácia, priestorový náboj, kĺzavý výboj, izolačný systém.

Keywords: ionisation, space charge, creeping discharge, insulating system.

Úvod

V príspevku je uvedený nekonvenčný postup pri sledovaní elektrických pomerov pri tvorbe respektíve vzniku kĺzavých výbojov medzi plochými elektródami o malom polomere zakrivenia, ktoré sú pevne fixované na podložku z izolačného materiálu. Rovnako sa tento fenomén vzťahuje aj na odporové povlaky o definovanom odpore, ktoré sa nanášajú na izoláciu vodičov, vystupujúcich z drážky za účelom potlačenia kĺzavých výbojov. V oboch prípadoch dochádza na rozhraní pri intenzitách elektrického poľa na hranici slabých a silných polí 10^6 V/m až 10^7 V/m (pozri obr. 1) k degradácii súčasne aj k zostarnutiu izolácie, ako aj poškodeniu odporového povlaku, prípadne pásky s definovaným elektrickým odporom (pozri Cimbalá [6], Kolcunová [7]).



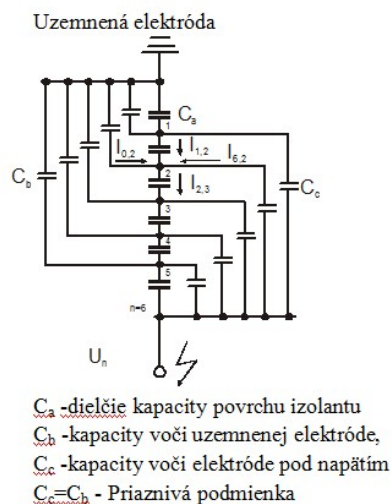
Obr.1 Rozhranie slabých neionizujúcich a silných ionizujúcich polí [8]

Nastolený elektrofyzikálny problém sme riešili zovšeobecnením pomerov v reťazci: elektróda – dielektrikum (izolant) a obklopujúce plynné prostredie (vzduch).

Je pozoruhodné, že ako pri aplikovaní jednosmerného poľa, tak aj pri pôsobení striedavého napätia pôsobia silové účinky elektrických polí, ktoré je treba rešpektovať.

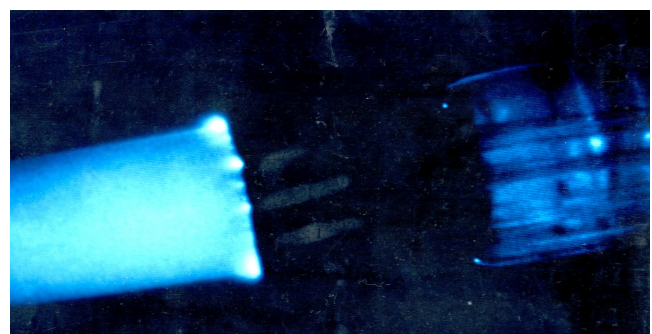
Fyzikálne pomery v medzielektródovom priestore

V medzielektródovom priestore riešime pomery modelovaním spravidla kapacitným modelom – pozri obrázok 2.



Obr.2 Všeobecný kapacitný model rozhrania

Vychádzame pritom z predpokladu, že protiľahlé elektródy majú tvar hrotov, prípadne nožových elektród (Lesch [1], Marton [2]). V elektroenergetike je častý prípad náhleho prechodu na rozhraní pri ukončení kábla (napr: káblové koncovky), kedy sledujeme rozvíjanie sa kĺzavých výbojov medzi izoláciou jadra kábla a plášťom kábla (Obr. 3).

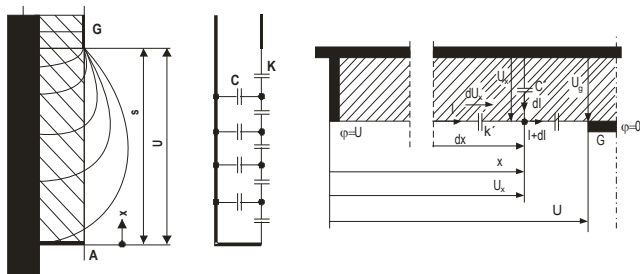


Obr.3 Rozhranie elektróda – pevná fáza – vzduch (ukončenie kábla)

Analogické riešenie poskytuje model vysokonapäťovej priechodky (Obr. 4). Model bol vytvorený pre hraničné podmienky od $x = 0$ po $x = s$, pričom s – je dĺžka povrchu izolácie priechodky. Napätie medzi vodičom a plášťom priechodky káblovej koncovky nech je U . Potom prostredníctvom reálneho tvaru elektrického poľa na

rozhraní (Obr. 4a), náhradnej schémy útvaru (Obr. 4b) a detailu kapacitného modelu, znázorneného v diferenciálnej forme (Obr. 4.c) zostavíme diferenciálnu rovnicu druhého radu bez pravej strany

$$(1) \quad \frac{d^2 U}{dx^2} - \frac{C'}{K'} U_x = 0$$



Obr. 4 Rozloženie elektrického poľa (a), náhradný model (b), detail usporiadania priečných C' a pozdĺžnych K' kapacít (c) a rozpracovanie elektrických pomerov

Zohľadnenie počiatkových podmienok: $x = 0; U_x = 0$ a pre $x = s$ a $U_x = U$ dostávame pre $K_1 = K_2 = K$:

$$(2) \quad K = \frac{U}{e^{\gamma s} - e^{-\gamma s}} = \frac{\gamma U}{\sinh \gamma s}$$

kde

$$(3) \quad \lambda_{1,2} = \pm \gamma = \pm \sqrt{\frac{C'}{K'}} = \pm \sqrt{\frac{C_{celk}}{K_{celk}}}$$

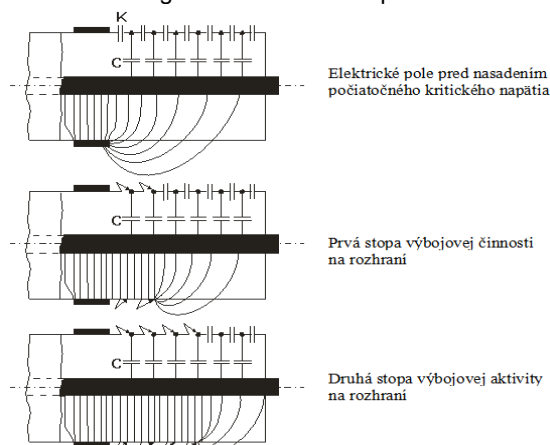
Takže riešenie diferenciálnej rovnice vedúcej ku vzťahu medzi U_x a U bude:

$$(4) \quad U_x = U \frac{\sinh(\gamma x)}{\sinh(\gamma s)}$$

Poznmenávame, že výsledok vznikol riešením charakteristickej rovnice

K rovnakému $U_x = K_1 e^{\lambda_1 x} + K_2 e^{\lambda_2 x}$ výsledku by sme

dospeli aj riešením kapacitného modelu podľa Obr. 2. Mechanizmus šírenia sa kľzavých (plazivých) výbojov na rozhraní (pozri tiež Obr.3) je znázornený na Obr. 5. Ide o postupné skratovanie pozdĺžnych kapacít K , v dôsledku čoho sa mení konfigurácia elektrického poľa.



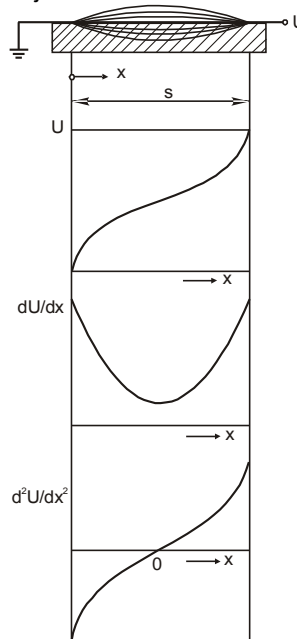
Obr. 5 Postupné skratovanie pozdĺžnych kapacít K na rozhraní po nasadení výboja

Všeobecne sa dá konštatovať, že vo všetkých analyzovaných prípadoch priebeh potenciálu sleduje funkciu \sinh .

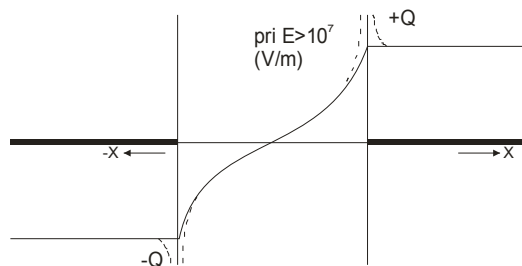
Deriváciou funkcie napätia $U=f(x)$ dostávame priebeh intenzity elektrického poľa v medzielektródovej oblasti (Obr. 6). V tejto oblasti má intenzita elektrického poľa tangenciálnu E_t aj normálovú E_n zložku. Najväčšia intenzita

je na okrajoch elektród a na týchto miestach je aj najväčšie nebezpečenstvo vzniku čiastkových výbojov, ktoré poškodzujú aj povrch substrátu. Druhou deriváciou funkcie $U=f(x)$ dostávame ideálne rozloženie priestorového náboja medzi elektródami. K anomálnemu priebehu náboja pri okrajoch elektród (Obr. 7) môže dôjsť vtedy, ak intenzita elektrického poľa je tak veľká, že dochádza k ionizácii obklopujúceho izolačného, resp. dielektrického prostredia. Sústavu preto treba dimenzovať tak, aby intenzita elektrického poľa v žiadnom mieste neprekročila hodnotu $\sim 10^7$ V/m (oblasť silných polí).

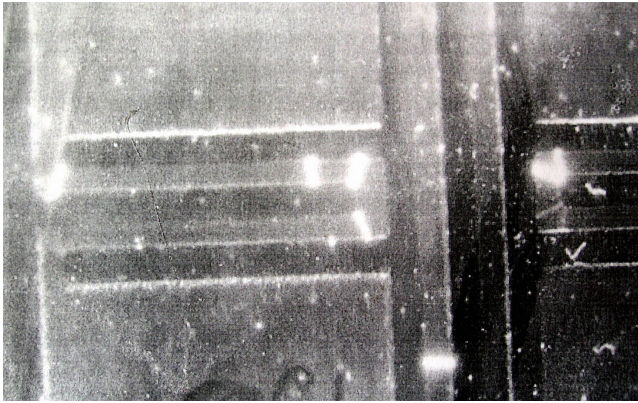
Elektrické náboje nie sú teda rozložené po povrchu izolantu rovnomerne, čo je znázornené na Obr.7. V blízkosti zakončenia elektród s malým polomerom zakrivenia pri výskyte silného elektrického poľa môže intenzita elektrického poľa prekročiť hranicu slabých polí. V takom prípade hodnota priestorového ($+Q, -Q$) náboja exponenciálne extrémne stúpa, čo je vidieť aj na experimentálnom modelovom takzvanom hrebeňovom usporiadaní, ktoré je znázornené na Obr. 8.



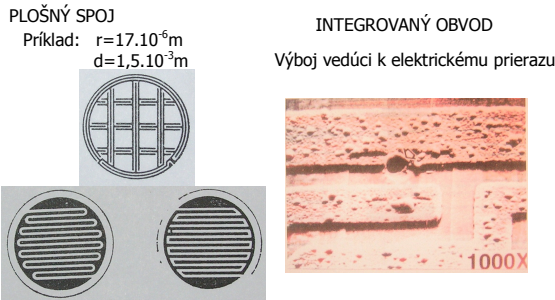
Obr. 6 Priebeh potenciálu, intenzity elektrického poľa a náboja v medzielektródovej oblasti



Obr. 7 Priebeh potenciálu, intenzity elektrického poľa a náboja v medzielektródovej oblasti



Obr. 8 Hrebeňové usporiadanie elektród na povrchu izolantu [5]



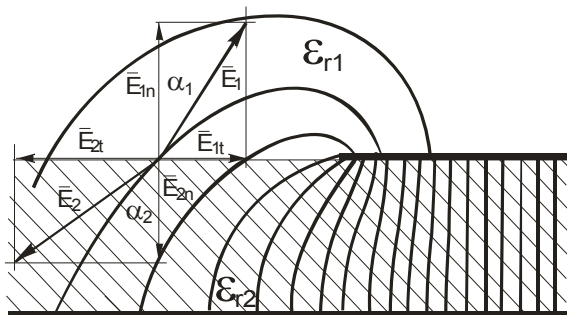
Obr. 9 Príklady z elektroniky a mikroelektroniky

Pre tento účel boli vyhotovené plošné spoje v rôznom usporiadaní, ktoré boli podrobené elektrickému namáhaniu. Výbojová činnosť bola registrovaná fototechnickou metódou, resp. pozorovaním elektrónovým mikroskopom.

Tento fyzikálny jav však vedie k prekročeniu elektrickej pevnosti prostredia a ku vzniku kízavých výbojov a k elektrickému preskoku na mieste, ktoré sa vyznačuje najvyšším stupňom mikroskopickej nehomogenity na okraji elektród s malým polomerom zakrivenia.

Tvar a prienik siločiar na rozhraní elektróda – izolant – plynné prostredie

Pri riešení tejto otázky vychádzame z predpokladu, že rozloženie a lom siločiar v blízkosti elektródy na rozhraní usporiadania bude podľa Veverku [4] nasledovný:



Obr. 10 Elektrické pomery na rozhraní troch prostredí (kov - izolant - plyn) – Veverka [4]

Vzhľadom na rôzne hodnoty relatívnych permitívít vrstiev, jednotlivé vrstvy sa podieľajú nerovnakou mierou na distribúcii tangenciálnych a normálových zložiek intenzity existujúceho elektrického poľa. Uhol α medzi výslednou zložkou intenzity elektrického poľa a normálou, možno vyjadriť vzťahom:

$$(5) \quad \alpha = \arctg \frac{E}{E_n}$$

Príčom všeobecne platí pre rozhranie dvoch prostredí

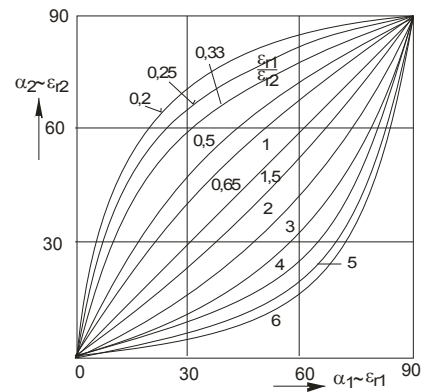
$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} = \frac{E_{2n}}{E_{1n}}$$

(6)

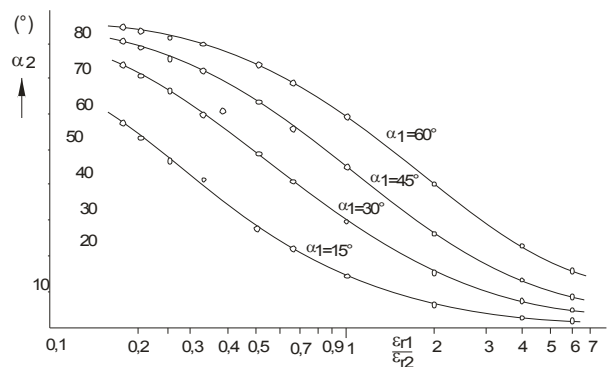
Číže z toho vyplýva, že uhol α priamo súvisí s relatívnou permitivitou prostredí stýkajúcich sa dielektrických (izolačných) vrstiev. Z toho dôvodu matematický pomer permitívít týchto dvoch vrstiev má značný vplyv na priebeh funkcie $\alpha_2 = f(\alpha_1)$, pričom pomer

$\epsilon_{r1} : \epsilon_{r2}$ je parametrom (Obr. 11) v sieti kriviek.

V našom prípade to znamená, že siločiar vychádzajúce z okrajov elektród prenikajú do dielektrika tým menej, čím je jeho permitivita väčšia. Zvolené hodnoty $\epsilon_{r1} : \epsilon_{r2}$ zodpovedajú kombináciám dielektrických vrstiev v skúmanej štruktúre. Je zrejmé, že pri kombinácii dvoch dielektrických vrstiev s rozdielnymi permitivitami, bude prevládať tangenciálna zložka nad normálovou, ak siločiar vstupuje do látky s väčším ϵ_r (obrázok 7).



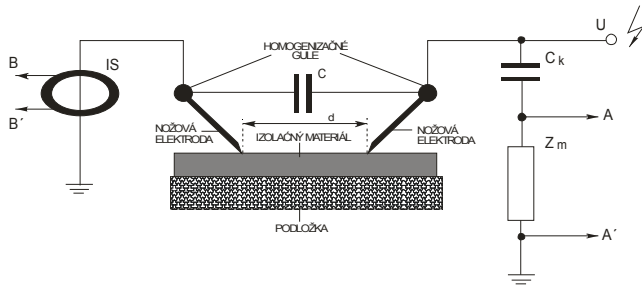
Obr. 11 Závislosti uhla lomu siločiar α_2 v dielektrickej vrstve s permitivitou ϵ_{r2} od uhla dopadu α_1 , pre rôzne pomery relatívnych permitívít stýkajúcich sa dielektrických vrstiev $\epsilon_{r1} : \epsilon_{r2}$



Obr. 12 Uhol lomu α_2 siločiar pri prenikaní do prostredia s relatívnou permitivitou ϵ_{r2} z prostredia s relatívnou permitivitou ϵ_{r1} v závislosti od pomeru permitívít $\epsilon_{r1} : \epsilon_{r2}$, parametrom je uhol dopadu α_1 siločiar.

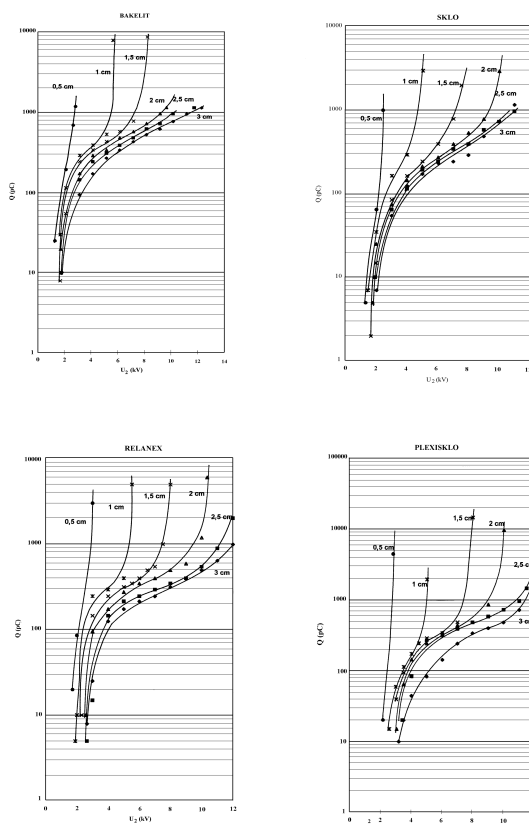
Experimenty

Za účelom dôkazu o nelineárnom rozložení nábojov po povrchu izolantu medzi nožovými elektródami uloženými na skúmanej izolačnej podložke bolo realizované meranie čiastkových výbojov galvanickou a induktívnou metódou. Zvolené vzdialenosti elektród boli určené tak, aby čo najtesnejšie odpovedali praxi. Usporiadanie bolo nasledovné:



Obr. 13 Nožové elektródy na izolovanej podložke. A – A' snímanie signálu z kĺzavých výbojov galvanickou metódou. B – B' snímanie signálov prostredníctvom induktívnej metódy.

Z oboch snímačov bol vedený signál do merača čiastkových výbojov a bol spracovaný PC technikou. Pri zvyšovaní napätia a tým aj intenzity elektrického poľa získané krivky odpovedali teoretickým predpokladom. Meranie bolo realizované na materiáloch: sklo, bakelit, (fenolformaldehydová živica), Relanex a plexisklo (pozri obrázky 14a, 14b, 14c, 14d).



Obr. 14 Závislosť veľkosti náboja čiastkových výbojov v dôsledku kĺzavých výbojov od hodnoty priloženého napätia pri rôznej vzdialenosti elektród.

Výpovedeschopnou veličinou bol náboj čiastkových výbojov, pričom parametrom bola vzdialenosť elektród. Krivky $Q=f(u)$ vypovedajú o troch mechanizmoch výbojovej aktivity:

–prvá oblasť: zodpovedá nárastu kritických čiastkových výbojov (hodnota náboja čiastkových výbojov sa pri malej zmene napätia skokovite mení o jeden rád)

–druhá oblasť: etapa stabilizácie (závisí od polohy elektród t. j. od ich vzdialenosti zväčšovaním vzdialeností medzi elektródami sa táto etapa predlžuje a mení sa tiež kapacita C medzi elektródami)

–tretia oblasť: - etapa predprieraznej oblasti (veľkosť náboja sa pri malej zmene napätia prudko zvyšuje)

Záver

Bola urobená analýza na rozhraní pevná fáza – plynné prostredie, pričom samostatný zreteľ bol venovaný dielektrickým vlastnostiam podložky, na ktorej vznikli kĺzavé výboje pri pôsobení elektrických polí presahujúce kritickú hodnotu počiatočného tzv. ionizujúceho napätia. Bolo dokázané teoreticky aj experimentom, že rozloženie náboja počas pôsobenia kĺzavých výbojov v závislosti od priloženého napätia je nelineárne a priebeh $Q=f(u)$ korešponduje s teoretickými úvahami, ktoré boli naznačené na obrázku 3 v predložennom článku. Rovnako aj náhradný model povrchu izolantu (obrázok 1) odpovedá rozloženiu potenciálu v značne nehomogénom elektrickom poli.

Literatúra

- [1] Lesch, G.: Lehrbuch der Hochspannungstechnik, Springer Verlag Berlin, 1959
- [2] Marton, K.: Technika vysokých napätí, ALFA Bratislava 1983
- [3] Vajda, Gy.: Szigetelés villamos terei, Akadémia kiadó Budapest, 1970
- [4] [Veverka, A.: Technika vysokých napätí, SNTL Praha 1979
- [5] [Marton, K., Guldán, A.: Slaboproudý obzor, roč. 49(1988), č. 10 str. 474-479, SNTL Praha, 1988
- [6] Cimbala, R.: Starnutie vn izolačných systémov. Vydavateľstvo TU v Košiciach, 2007, ISBN 978-80-8073-904-1
- [7] [Kolcunová, I.: Diagnostika elektroenergetických zariadení metódou čiastkových výbojov, Vydavateľstvo TU v Košiciach, 2008, ISBN 978-80553-0031-3
- [8] [Balogh, J.: Doktorandská dizertačná práca: Lineárne a toroidálne induktívne sondy a ich aplikácia v elektroenergetike, FEI TU v Košiciach 2001.
- [9] Kolcunová, I., Kurimský, J.: Čiastkové výboje v izolačnom systéme XPE káblov. In Zborník zo 16. medzinárodnej konferencie, DISEE 2006. STU v Bratislave, 12.-14. 9. 2006, Častá – Píla, ISBN 80-227-2470-X

Táto práca vznikla v rámci riešenia projektu APVV 20-006005 a VEGA 1/0368/09.

Autori:

prof. Ing. Karol Marton, DrSc., Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Karol.Marton@tuke.sk

Ing. Jozef Balogh, PhD., Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Jozef.Balgh@tuke.sk

Ing. Jaroslav Džmura, PhD., Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Jaroslav.Dzmura@tuke.sk

Ing. Jaroslav Petráš, PhD., Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Jaroslav.Petrás@tuke.sk

Marton, K., Tomčo, L., Cimbala, R., Kolcunová, I., Kopčanský, P., Koneracká, M., Timko, M.

Využitie magnetickej kvapaliny v izolačnom systéme transformátora

Abstrakt: Príspevok sa zaoberá možnosťou nahradenia transformátorového oleja magneticou kvapalinou v transformátoroch vysokého napätia. Sú porovnané vlastnosti magnetickej kvapaliny a transformátorového oleja. Je uvedená výnimočnosť magnetickej kvapaliny, ktorá obsahuje magnetitové nanočastice. V príspevku sú skúmané základné výpovedeschopné vlastnosti charakterizujúce nevodivú kvapalinu, ktorými sú elektrická pevnosť a magneto-dielektrická anizotropia pri súčasnom pôsobení elektrického a magnetickeho poľa. Magnetickej kvapalina s transformátorovým papierom (od 1 do 15 vrstiev) tvorí izolačný systém impregnovaný kvapalinou definovanej koncentrácie. Poukazuje sa tiež na vplyv nečistôt (kalu) na elektrickú pevnosť transformátorového oleja.

Úvod

V priebehu výskumu magnetických kvapalín, ktoré sú zložené z transformátorového oleja, ferimagneticých nanočastíc na báze FeO. Fe₂O₃ (priemer cca 10 nm) a kyseliny olejovej (CH₃ – (CH₂)₇ – CH = CH – (CH₂)₇ – COOH) patriacej do kategórie olefinokarbónových kyselín v kombinovanom elektrickom (E) a magneticom (H) poli bol dokázaný značný vplyv týchto polí na ich elektrickú pevnosť. Pri skúmaní jednotlivých kvapalných komponentov sa ukázalo, že najvyššiu elektrickú pevnosť má kyselina olejová. Pridanie magnetitových častíc vhodnej koncentrácie spôsobujú na prevapenie zvýšenie elektrickej pevnosti magnetickej kvapaliny oproti čistému transformátorovému oleju. Z teoretického hľadiska bol sledovaný aj vplyv orientácie vektorov aplikovaných polí. V našom prípade sme skúmali účinok intenzity elektrického poľa s rovnobežne ako aj s protichodne smerovanými vektormi \vec{E} na \vec{B} s možnosťou voľby smeru daného vektora. Merania boli realizované aj na znečistených (zostarnutých) transformátorových olejoch a prirodzene bol kvôli porovnaniu skúmaný plynný izolant vzduch pri teplote 23°C a pri bežnom atmosférickom tlaku. Ako zdroj magnetickeho poľa bol použitý magneticky tvrdý materiál s možnosťou nastavenia magnetickej indukcie \vec{B} od 5,0 mT do 40 mT.

V prvej etape prác sme aplikovali v čase nezávislú hodnotu intenzity elektrického poľa, prostredníctvom zdroja jednosmerného vysokého napätia. V druhej etape skúšok elektrickej pevnosti pri zachovaní konštantnej hodnoty magnetickeho poľa sme skúmali elektrickú pevnosť transformátorového oleja pri striedavom napätí 50 Hz.

Táto problematika je riešená v prácach [1], [2] a [3]. Na prvý pohľad je zrejmé, že tematika je príliš zúžená, pretože nezohľadňuje komplexný izolačný systém tvoriaci súčasť celého transformátora. Ide o interakciu viacerých zložiek: transformátorového oleja, magnetických častíc (Fe₃O₄) nanometrickej veľkosti, kyseliny olejovej a v prípade transformátorového papiera impregnovaného magneticou kvapalinou ešte vláknitého materiálu (transformátorový papier, lepenka a pod.).

Izolačný systém používaný v technológii výroby transformátorov sa skladá z určitého počtu vrstiev papiera, pričom tieto vrstvy tvoria systém v sérii zapojených kondenzátorov, v ktorých dominuje migračná polarizácia, resp. polarizácia vrstvených materiálov. Príspevkom predkladanej práce v teórii dielektrík a izolačných systémov má byť upozornenie na existenciu monodoménových nanočastíc feritického materiálu s dielektrickými vlastnosťami, ktoré efekt polarizácie zvyšujú, čím narastá príspevok k zmene relatívnej permitivity sústavy a tým k zmene jej kapacity.

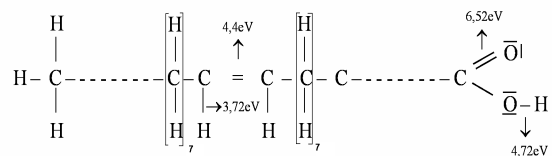
Porovnanie transformátorového oleja s magneticou kvapalinou z makroskopického hľadiska

Transformátorový olej bol v literatúre dostatočne popísaný (pozri [4], [7], [8] a iní), preto sa v tejto stati nebudeme s jeho elektrickými a fyzikálnymi vlastnosťami zaoberať. V uplynulých dvoch desaťročiach sa však pozornosť sústredila na kvapalnú izolačné médium na báze inhibovaného transformátorového oleja pod názvom magnetickej kvapalina, ktorá obsahuje tieto zložky (príklad):

- transformátorový olej ako nosné médium
- kyselina olejová ako povrchovo aktívna látka (surfaktant) patriaca do skupiny vyšších olefinokarbónových kyselín
- magnetitové nanočastice (magnetický mäkký ferit FeO.Fe₂O₃ resp. magnetit Fe₃O₄).

Molekuly kyseliny olejovej obsahujú polárnu (hydrofilnú) hlavičku a dlhý nepolárny (hydrofóbny) reťazec. Polárne hlavičky adsorbovaných molekúl fyzikálne resp. chemicky interagujú s povrchom magnetických nanočastíc, pričom tvoria okolo neho obálku, tzv. solvátový obal. Nepolárne reťazce, tzv. chvosty molekúl musia mať dielektrické vlastnosti podobné vlastnostiam okolitého kvapalného prostredia, tzv. nosiča (transformátorový olej). Kyselina olejová tvorí „mikrobal“ nanočastice FeO.Fe₂O₃.

Štruktúrny vzorec kyseliny olejovej vyplýva z nasledovného zobrazenia:

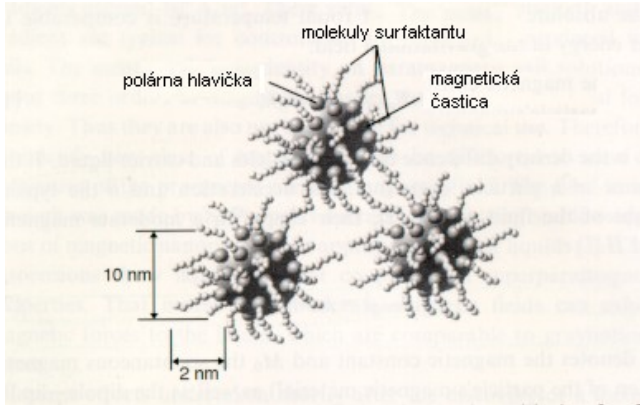


Vzhľadom na to, že sa pripisované zložky vyskytujú v elektrickom poli a v reťazci sa vyskytujú väzby zabezpečované sigma (σ) ako aj pí (π) elektrónmi, uvádzame aj hodnoty väzbových energií:

C-H ... 3,72 eV C=C ... 4,4 eV C=O ... 6,52 eV O-H .. 4,72 eV.

Interakcia medzi nanočasticami magnetitu a surfaktantom je znázornená na obr. 1.

Častica tvorí Weissovu doménu (monodoménu) so spontánnou magnetizáciou. Tieto domény sú spravidla sú tvorené nesférickými časticami s rozmermi cca 10 až 15 nm. Usporiadanie nanočastíc s orientovanými zložkami surfaktantu je modelovo znázornené takto:



Obr. 1 Surfactant a magnetit

Úlohou povrchovo – aktívnej látky je zabrániť zhlukovaniu magnetických nanočastíc do ťažkých klastrov a tak zabrániť ich sedimentácii v nosnej kvapaline.

Predtým, než bude prediskutované usporiadanie nanočastíc v nosnej kvapaline, uvedieme základné dielektrické parametre navzájom interagujúcich zložiek. Vychádzajúc z literárnych prameňov ([5], [9], [2]) dostávame tieto hodnoty:

Merná objemová rezistivita magnetitových nanočastíc: $10 - 10^6 - 10^8 \Omega m$

• Ich relatívna permitivita: 11,2 – 13,0 ... pri 4,16 GHz

• 12,5 – 13,0 ... pri 9,4 GHz

• 15,0 – 24,0 ... pri 50 Hz

• Merná objemová vodivosť kyseliny olejovej: $2,6 \cdot 10^{-9} Sm^{-1}$

• Relatívna permitivita kyseliny olejovej: 2,35 – 2,5 pri 50 Hz

• Relatívna permitivita ITO 100: 2,2 ... pri 50 Hz

• Merná objemová vodivosť ITO 100: $2,7 \cdot 10^{-12} Sm^{-1}$

Z fyziky dielektrík je známe, že pri existencii dvoch zložiek dielektrík o dvoch rôznych relatívnych permitivitách (napr. olej – pevná fáza), je výsledná relatívna permitivita sústavy pri dvoch rôznych koncentráciách p_1, p_2 odvodená vzťahom Lorenz – Lorentza:

$$\frac{\epsilon_{12} - 1}{\epsilon_{12} + 2} = p_1 \frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_2 + 2} + (1 - p_1) \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2 + 2}, \text{ kde } p_2 = 1 - p_1$$

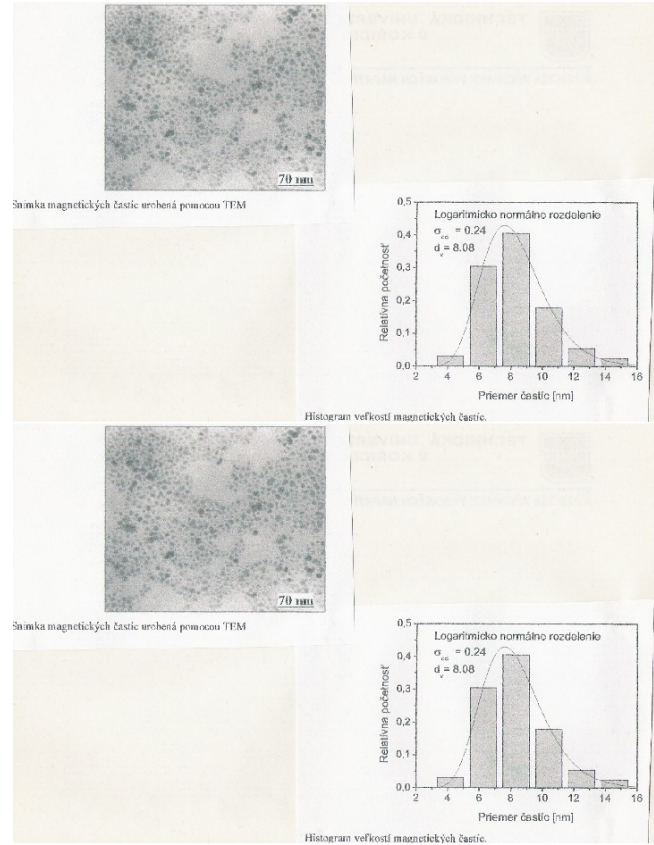
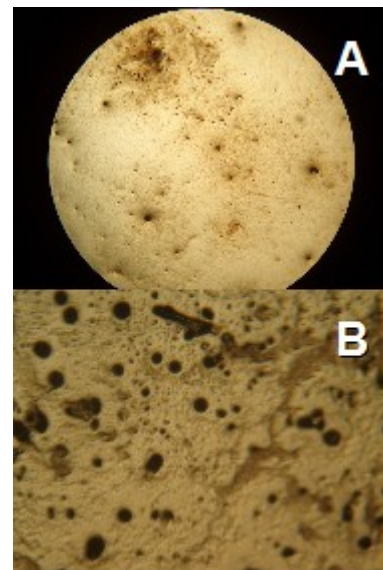
Z čoho:

$$\epsilon_{12} = \frac{p_1(\epsilon_1 - \epsilon_2)(\epsilon_2 + 2)}{(\epsilon_1 + 2) - p_1(\epsilon_1 - \epsilon_2)} + \epsilon_2$$

Vyššie uvedený vzťah veľmi dobre korešponduje s výsledkami nameraných hodnôt ([2], [3]).

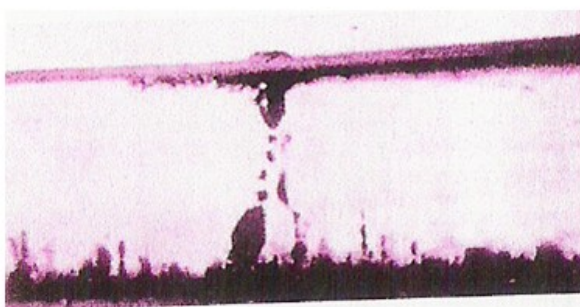
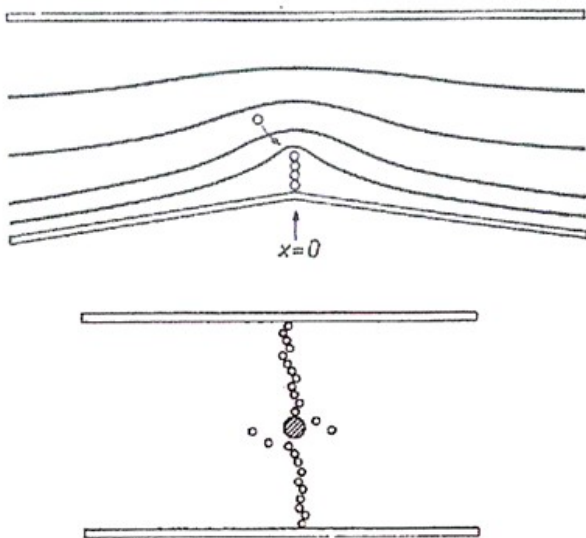
Rozptýlenie nanočastíc magnetitu (Fe_3O_4) v inhibovanom transformátorovom oleji pri rešpektovaní rozloženia ich početnosti podľa priemeru je na obr. 2 a,b. Snímok bol realizovaný elektrónovým mikroskopom bez pôsobenia elektrického ako aj bez magnetického poľa na rozptýlené častice v magnetickej kvapaline.

Keď pozorujeme optickým mikroskopom transformátorový olej, obsahujúci nečistoty (kal), zistíme, že rozloženie splodín po preskoku je analogické ako v predchádzajúcom prípade, avšak ku guľovitým časticiam grafitu pribúdajú aj vlákniny mikroskopických rozmerov (obr. 3).

Obr. 2 Usporiadanie častíc Fe_3O_4 v magnetickej kvapaline (2a) a ich logaritmicke-normálne rozdelenie (2b) [10]

Obr. 3 Nečistoty v transformátorovom oleji po dlhej dobe prevádzky pred výmenou oleja - A, prítomnosť vláknin - B

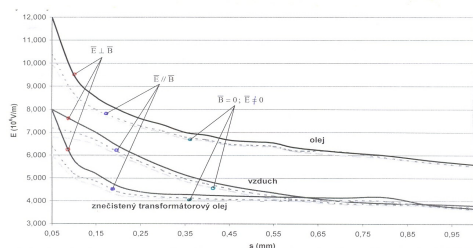
Bolo dokázané [6], že častice kalu mikro a makro veľkosti vytvárajú v kvapalnej izolačnej tekutine pri pôsobení elektrického poľa „mostíky“, čím znižujú elektrickú pevnosť kvapalného média a vyvolávajú elektrický preraz (pozor obr. 4).



Obr. 4 Tvorba elementárnych mostíkov pod vplyvom elektrického poľa [6]

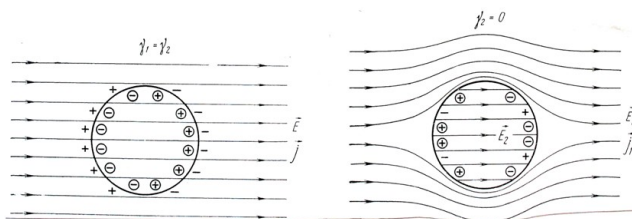
Na doplnenie týchto úvah uvedme, že s magnetickými kvapalinami pracujeme v kombinovanom elektrickom a magnetickom poli ($\vec{E} \parallel \vec{B}$ alebo $\vec{E} \perp \vec{B}$). Po aplikovaní magnetického poľa magnetické častice vytvárajú drobné klastre, ktoré sa usporadúvajú v smere aplikovaného magnetického poľa. Tieto malé klastre nazývame mikroklastami. Mikroklastre, ktoré sú menšie než vlnová dĺžka viditeľného svetla sú pozorovateľné elektrónovým mikroskopom. Pri zvýšenej intenzite magnetického poľa vznikajú makroklastre tvorené magnetickými časticami. Za makroklastre považujeme štruktúry, ktoré sú omnoho väčšie než je vlnová dĺžka viditeľného svetla. Takéto štruktúry je možno pozorovať optickým mikroskopom.

Pozoruhodné pri pôsobení kombinovaného elektrického a magnetického poľa na znečistený transformátorový olej časticami kalu je to, že tieto elementy mikroskopickej veľkosti po získaní elektrického náboja v elektrickom poli súčasným pôsobením magnetického poľa sledujú dráhu po špirále, čo priaznivo pôsobí na hodnotu elektrickej pevnosti (pozri obr. 5).



Obr. 5 Elektrická pevnosť čistého oleja v závislosti od vzdialenosti elektród voči znečistenému oleju v porovnaní so vzduchom (23°C)

K procesu zhromažďovania nábojov nedôjde, ak $\varepsilon_2\gamma_1 - \varepsilon_1\gamma_2 = 0$, prípadne $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = \gamma_1/\gamma_2$. Rozloženie elektrického poľa v nanočastici pri rozdielnych hodnotách mernej vodivosti voči kvapaline je na obr. 6.



Obr. 6 Rozloženie elektrického poľa v nanočastici pri rozdielnych hodnotách mernej vodivosti

V skutočnosti nemusia nastať dva vyznačené extrémne prípady, t.j. $\gamma_1 = \gamma_2$, resp. $\gamma_2 = 0$. Spravidla majú vodivosť resp. permitivita charakterizujúca kvapalinu definované hodnoty. Z toho dôvodu môžeme konštatovať, že po stabilizácii dielektrickej polarizácie na rozhraní prebieha pomalý proces zhromažďovania sa voľných nábojov. Príčinou toho sú rozdielne hodnoty normálovej zložky prúdovej hustoty na rozhraní (častica – kvapalina). Z toho vyplýva, že aj ekvivalentný dipólový moment (p) častice bude časovo závislý $p(t)$. Po nastavení stacionárneho stavu bude $\gamma_1 E_{n1} = \gamma_2 E_{n2}$

$$\gamma_1 E_1 + \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{dE_1}{dt} = \gamma_2 E_2 + \varepsilon_0 \varepsilon_2 \frac{dE_2}{dt}$$

pričom predpokladáme, že $E = f(p)$. Riešením diferenciálnej rovnice vychádza:

$$p(t) = \text{konšt.} \exp\left(-\frac{(\gamma_2 - \gamma_1)}{(\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1)\varepsilon_0} t + 4\pi\varepsilon_1 \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_2 + 2\gamma_1} R^3 E\right)$$

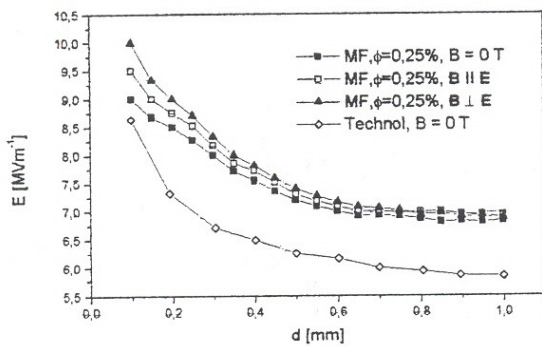
Táto rovnica má všestrannú platnosť a potvrdzuje to, že kombinované elektrické a magnetické pole pôsobí silovými účinkami nielen na častice magnetitu, ale aj na nano, resp. mikro častice nežiaducich spodín transformátorového oleja. Vyslovujeme preto hypotézu, že na základe vyššieuvedeného fyzikálneho fenoménu je možné využiť pôsobenie elektrického a magnetického poľa v režime E-vonkajšie elektrické pole $B = 0$; $\vec{E} \parallel \vec{B}$ a $\vec{E} \perp \vec{B}$ ako diagnostickú metódu na vyšetrenie kvality transformátorového oleja. Aplikovať je možné jednosmerné a striedavé napätie o definovaných frekvenciách (50 Hz ÷ 800 Hz). Výhodou tejto metódy je možnosť sledovania anizotropie, a jeho koeficientu vyskytujúcej sa pri aplikovaní zvolených smerov vektorov intenzity elektrického (\vec{E}) a magnetického (\vec{H}) poľa, resp. magnetickej indukcie \vec{B}

Sledovanie vybraných výpovedeschopných veličín

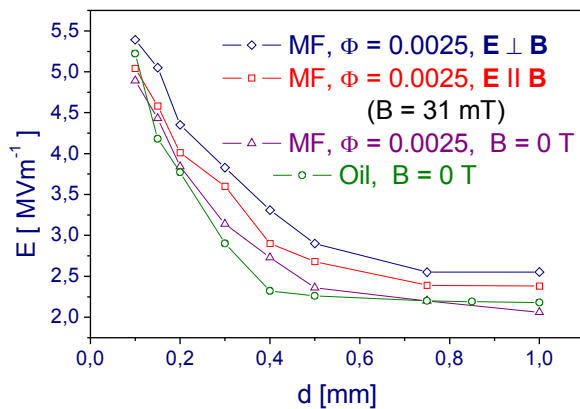
Elektrická pevnosť pri jednosmernom a striedavom napätí

Merania boli realizované podľa príslušnej normy s možnosťou nastavenia vzdialenosti Rogowského elektród od 0,05 mm do 1,0 mm pri teplote kvapalného média 21°C. Merania boli vykonané s nosnou kvapalinou na báze transformátorového oleja TECHNOL US 4000 ako aj ITO 100. Požadovaná orientácia magnetického poľa bola zabezpečená pri všetkých meraniach permanentnými magnetmi (Fe Nd B). Magnetická indukcia B (5 mT ÷ 50 mT) bola v medzere elektródového systému konštantná do vzdialenosti 5 mm. Koncentrácia magnetickej kvapaliny bola zvolená v rozmedzí od 0,25 % do 3,214 %. Kvôli porovnaniu priebehu $E = f(s)$ uvedieme výsledky merania pre magnetickej kvapalinu o koncentracii 0,25 % pri aplikovaní

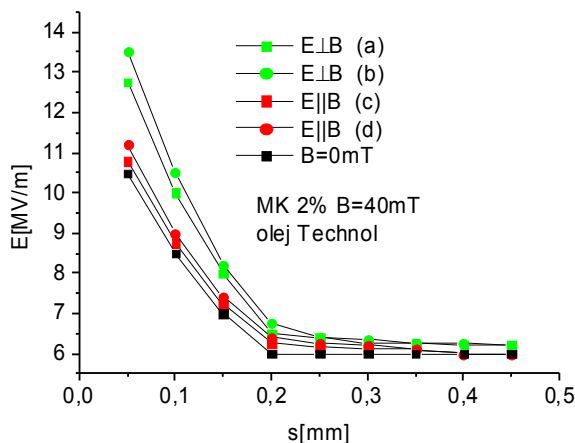
jednosmerného (obr. 7) a striedavého elektrického poľa (obr. 8).



Obr. 7 Elektrická pevnosť magnetickej kvapaliny na báze nosnej kvapaliny TECHNOL. Koncentrácia 0,25 %. Aplikované jednosmerné pole.



Obr. 8 Elektrická pevnosť magnetickej kvapaliny ako na obr. 7 pri aplikovaní striedavého napätia



Obr. 9 Anizotropia v prípade rozdielnych orientáciách vektorov \vec{E} a \vec{B}

Porovnaním oboch priebehov pozorujeme pri striedavom napätí pri určitých vzdialenostiach vytváranie sa určitých stabilizačných oblastí („platô“). Tento jav je pravdepodobne zapríčinený vznikom priestorového náboja pri frekvencii 50 Hz, ktorý podľa našej hypotézy (pozri [11]) mení rozloženie objemových nábojov medzi elektródami, čím sa vytvára fiktívny kondenzátor s difúznym prechodom rozhrania medzi medenou elektródou, priestorovým nábojom a magneticou

kvapalinou. Dôležité upozornenie: pri akejkoľvek zmene medzielektrodovej vzdialenosti boli elektródy uzemnené a navzájom prepojené (skratované).

Elektrická pevnosť magnetickej kvapaliny v porovnaní so znečisteným transformátorovým olejom (kal a pod.) vykazuje taktiež magnetodielektrickú anizotropiu. Miera anizotropie v prípade znečisteného oleja je porovnateľná, avšak výsledné hodnoty sú nižšie. Značný výrazný rozdiel v prípade oleja vykazuje pri meraní E_p orientácia vektorov \vec{E} a \vec{B} pri aplikovaní jednosmerného napätia (obr. 9).

V ďalšej etape prác boli podrobené výskumu nasledovné výpovedeschopné veličiny: relatívna permitivita, činiteľ dielektrických strát a merná elektrická konduktivita. Výsledky boli zverejnené v prácach K. Martona a kol. ([1], [2] a [3]). Súčasne boli skúmané závislosti týchto veličín od stupňa koncentrácie uvedených kvapalín. Ukázalo sa, že najlepšia koncentrácia magnetitových nanočastíc v MK pre použitie v transformátoroch je 0,25% (obr.7 a 8).

Izolačný systém transformátora v kombinácii: magnetickej kvapaliny – transformátorový papier

Štúdané boli tri druhy n – vrstvových izolačných systémov: (Marton a kol. [1])

- transformátorový papier hrúbky $8,5 \cdot 10^{-5}$ m ($n = 15$ vrstiev)
- transformátorový papier impregnovaný transformátorovým olejom ITO 100
- transformátorový papier impregnovaný magneticou kvapalinou s objemovou koncentráciou magnetitových nanočastíc 0,239 % a 3,214 %

Transformátorový papier bol impregnovaný v kvapalnom médiu počas 24 hodín. Orientačné hodnoty relatívnych permitív meraných na troch vzorkách kvapalín a transformátorového papiera pri frekvencii 800 Hz sú zhrnuté v tabuľke [12]:

TABUĽKA I

Izolačný systém	Transformátorový papier	TP + ITO 100	TP + MK1 (0,239%)	TP+MK2 (3,214%)
Relatívna permitivita (ϵ_r)	1,162	2,63	2,72	5,565

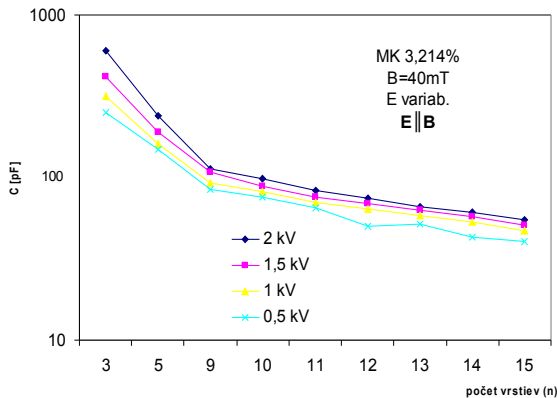
Bol zvolený rovinný systém elektród kruhového prierezu, čím sa vytvoril kondenzátor s vrstveným dielektrikom (olej MK – papier) umiestnený v mernej nádobe s možnosťou úpravy (nastavenia) magnetickej indukcie od 5 do 40 mT. Orientácia \vec{B} bola nastavená kolmo, prípadne rovnobežne vzhľadom na smer vektora intenzity elektrického poľa \vec{E} . Ako sme na to poukázali v práci [12] a odviedli sme rovnicu pre výpočet ϵ_{rx} pre dve rôzne hrúbky vrstvenej izolácie (h_1 – hrúbka transformátorového papiera impregnovaného kvapalným médiom a h_2 – hrúbka impregnantu, spájajúceho ďalšiu vrstvu papiera).

Meranie boli realizované pri frekvencii 800 Hz a 50 Hz ako, aj pri koncentráciách MK 0,239 % a 3,21 %. V príspevku sú uvedené výsledky meraní pri 50 Hz a 3,21 % koncentrácií.

Priebeh $C = f(n)$ naznačuje, že pri najnižšom počte vrstiev tvoriacich izolačný systém je stúpanie kapacity najprudšie a po dosiahnutí cca 10 vrstiev sa hodnota C ustáľuje. Tento fyzikálny fenomén sa prejaví aj na závislosti $C(n)$, kde je parametrom meracie napätie ($0,5 \div 1,0 \div 1,5 \div 2,0$ kV). Prvá derivácia funkcie C (dC/dn) v definovanom bode poukazuje na tendenciu priebehu funkcie pri zvolených kombináciách relatívnych permitív aplikovaných materiálov (transformátorový papier – tekutý impregnant) pozri obr. 10.

Magnetodielektrická anizotropia bola pozorovaná iba v nepatrnej miere (jednotky pF). Parametrom bolo napätie

v naznačenom rozsahu. Bolo nastavené tak, aby intenzita elektrického poľa bola v oblasti pod 10^6 V/m.



Obr. 10 Priebeh $C(n)$ po postupnom pridávaní vrstiev impregnovaného transformátorového papiera pri 50 Hz

Záver

Detailná analýza priebehov intenzity elektrického poľa E od vzdialenosti elektród poukázala na príspevok magnetického poľa o indukciu B na zvýšenie hodnoty elektrickej pevnosti nielen čistého ale aj znečisteného transformátorového oleja a vzduchu. Najvyššiu elektrickú pevnosť vykázalo kolmo orientované elektrické a magnetické pole. Najnižší účinok sa prejavil pri čistom elektrickom priereze bez pôsobenia magnetickej indukcie ($B=0$). Zdôvodnenie zvýšenej elektrickej pevnosti vidíme v predĺžovaní dráhy, ktorú častice vykonávajú pri tvorbe mostíkov, smerujúcich ku vzniku kanála prierazu.

Výsledky experimentálnych prác, zameraných na výskum elektrického prierazu všeobecne v kvapalinách za spoluúčinkovania elektrického a magnetického poľa umožňuje využiť metódu aplikovanú v experimente aj na klasifikáciu transformátorových olejov z hľadiska ich kvality (čistoty).

V súvislosti s aplikáciou magnetickej kvapaliny ako izolačnej zložky v transformátoroch boli realizované aj merania niektorých elektrických vlastností transformátorového papiera impregnovaného magneticou kvapalinou. Merania boli vykonané s dvoma objemovými koncentraciami magnetitových nanočastíc. V ďalšej etape prác sa bude potrebné zamerať na sledovanie výpovedeschopných veličín aj pri teplotách vyšších v intervale 293K až 360K.

PodĎakovanie

Táto práca vznikla na základe podpory VEGA MŠ SR a SAV, č. projektov 1/0368/09, FEI a LF TU Košice, SAV ÚEF Košice, č. projektu 2/0077/09 a APVV 0509-07

Literatúra

- [1] Marton, K., Tomčo, L., et.al.: The development of electric breakdown in magnetic fluids in combined magnetic and electric fields, *Przeglad elektrotechniczny*, Vol. 3 No.1, 2005, Warszawa, str. 161-164
- [2] Marton, K., Tomčo, L., et.al.: Dielectric and magnetodielectric properties of the magnetic fluids, *Przeglad elektrotechniczny*, Dodatek A-1-3, Vol. 5, No. 1, 2007, Warszawa
- [3] Marton, K., Tomčo, L., Cimbala, R., et.al.: Konduktivita magnetických kvapalín na báze transformátorového oleja, *Nové smery v diagnostike a opravách elektrických strojov a zariadení*, ŽU Elektrotechnická fakulta, Žilina – Zuberec, 2008, str. 3-9
- [4] Tichý, V., Pallo, V., Mašek, V.: *Transformátorový olej*, SVTL Bratislava 1962
- [5] Schultz, W.: *Dielektrische und Magnetische Eigenschaften der Werkstoffe*, Vierweg Verlag, Braunschweig 1970, Germany
- [6] Kok, J.A.: *Der elektrische Durchschlag in flüssigen Isolierstoffen*, Philips Verlag Eindhoven 1963
- [7] Mosch, W., Hauschild, W.: *Einführung in die Hochspannungstechnik*, VEB Verlag Technik, Berlin 1973
- [8] Artbauer, J.: *Izolanty a izolácie*, ALFA Bratislava, 1969
- [9] Kittel, Ch.: *Intraduction to Solid State Physics*, John Wiley and Sons, New York 1975
- [10] Herchl, F.: *Doktorandská dizertačná práca ÚEF SAV, Košice 2008*
- [11] Marton, K., Tomčo, L. et.al.: *DISEE 2004, Zborník FEI STU Bratislava 2004*
- [12] Marton, K., Tomčo, L. et.al.: *DISEE 2008 Zborník FEI STU Bratislava 2008*

Autori: prof. Ing. Karol Marton, DrSc., *Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, karol.marton@tuke.sk*

doc. RNDr. Ladislav Tomčo, PhD., *Katedra aerodynamiky a simulácií, LF TU v Košiciach, Rampová 7, 041 21 Košice, ladislav.tomco@tuke.sk*

prof. Ing. Irida Kolcunová, PhD., *Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, irida.kolcunova@tuke.sk*

doc. Ing. Roman Cimbala, PhD., *Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, roman.cimbala@tuke.sk*

doc. RNDr. Peter Kopčanský, CSc., *ÚEF, Slovenská akadémia vied, Watsonova 47, 040 01 Košice, kopcan@saske.sk*

Ing. Martina Koneracká, CSc., *ÚEF, Slovenská akadémia vied, Watsonova 47, 040 01 Košice, konerack@saske.sk*

RNDr. Milan Timko, CSc., *ÚEF, Slovenská akadémia vied, Watsonova 47, 040 01 Košice, timko@saske.sk*

Iraida Kolcunová, Viera Vančová

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

Vplyv viskozity na elektroizolačné vlastnosti rastlinných olejov

Abstrakt. Základným elektrotechnickým materiálom sú izolanty, ktoré sú neoddeliteľnou súčasťou elektrotechnických zariadení, bez ktorých by zariadenia nemohli fungovať. Práca je zameraná na meranie viskozity kvapalných izolantov, predovšetkým rastlinných a transformátorových olejov. Nakoľko v dnešnej dobe je veľmi dôležitá ekologická nezávadnosť používaných olejov. Práca obsahuje základné poznatky o viskozite kvapalných izolantov a výsledky z meraní viskozity rastlinných a transformátorových olejov, ich porovnanie a možnosti využitia v elektropríemysle.

Abstract. Insulators are basic electrotechnical material and they are inseparable from electrotechnic equipment. Without insulators, electrotechnical equipment wouldn't function. Work is focused towards viscosity measurement of liquid insulators, mainly vegetable oils. Because in this age ecological aspect of liquid insulators is very important. This work covers basic knowledge about viscosity of liquid insulator and test results of viscosity measurement of vegetable and transformer oils. Also covered in the research is comparison of vegetable and transformer oils and possible application of vegetable oils in electrotechnic industry.

Kľúčové slová: rastlinné oleje, minerálne oleje, viskozita, dynamická viskozita, kinematiská viskozita, teplota

Keywords: vegetable oils, mineral oils, viscosity, dynamic viscosity, kinematic viscosity, temperature

Úvod

Rast spotreby elektrickej energie podmieňuje stavbu transformátorov stále väčších výkonov a rast ich počtu v elektrizačnej sústave. V poslednom období sa kladú zvýšené nároky na ekologickú nezávadnosť kvapalných izolantov a dielektrík. Preto kvapalné izolanty predstavujú jednu z rozhodujúcich zložiek izolačného systému výkonových zariadení elektrizačnej sústavy. Táto zložka ovplyvňuje nielen funkčné vlastnosti, ale aj celkovú životnosť zariadenia.

V dnešnej dobe minerálne oleje patria k najpoužívanejším tekutým izolantom, ktoré sa vyrábajú z ropy. Ropa je neobnoviteľný zdroj a jej zásoby sú odhadované na niekoľko desiatok rokov. Minerálne oleje nám značne znečisťujú životné prostredie.

Výhodou rastlinných olejov je, že sú vyrábané z obnoviteľných zdrojov a neznečisťujú životné prostredie. Cieľom bolo zmerať viskozitu rastlinných olejov, porovnať ich s bežne používanými transformátorovými olejmi a popísať vplyv viskozity na zmenu ich elektroizolačných vlastností.

Rastlinné oleje a minerálne oleje

Rastlinné oleje sú šetrnejšie k transformátorovému papieru založenému na buničine. Okrem iného, atmosférická vlhkosť si stále nájde cestu do transformátorového oleja a zostatková kyselina v papieri napomáha hydrolyze a degraduje tak buničinu. Rastlinné oleje stlmia tento proces pretože majú väčšiu absorpčnú kapacitu než bežné druhy oleja. Taktiež bolo dokázané, že rastlinné oleje zvyšujú životnosť papiera päť až osemnásobne. Podľa štúdie aj napriek počiatočnej vysokej cene transformátorov s rastlinnými druhmi oleja sú tieto o 10 – 20 % lacnejšie než bežné transformátory, pretože typické transformátory sú založené na bio – oleji majú životnosť 40 rokov miesto 30 u klasických minerálnych [1]. K rastlinným olejom patria:

• Slnecnicový olej

• Repkový olej

• Ricínový olej - získava sa zo semien skočce. Je tekutým polárnym izolantom. Pre vysokú permitivitu ($\epsilon = 4 \div 5$) a nejedovatosť sa používa k napúšťaniu papierových kondenzátorov hlavne pre jednosmerné obvody.

• Ľanový olej – získava sa zo semien ľanu. Hustota 900 kg/m³, viskozita pri 20 °C okolo 50 m².s, $\epsilon = 3,27$, bod tuhnutia – 20 °C.

• Tungový alebo drevený olej – získava sa zo semien tungového stromu. Je výhodnejší ako olej ľanový, nakoľko schne rýchlejšie v pomerne hustej vrstve, pričom ľanový olej schne len od povrchu. Nevýhodou dreveného oleja je jeho tepelné starnutie, pri ktorom krehne, praská a odlupuje sa od povrchu, na ktorý bol nanesený. Okrem týchto dvoch vysychavých olejov poznáme ďalšie, ktoré sa získavajú eterifikáciou mastných kyselín vyrobených z minerálnych olejov. V elektrotechnike používame vysychavé oleje hlavne pre výrobu elektroizolačných lakov [2].

Prakticky celé množstvo minerálnych izolačných olejov sa získava z ropy ako jedna frakcia pri jej destilácii. Vhodným spracovaním minerálnych olejov získavame jednotlivé druhy izolačných olejov v dobrej kvalite. Dobré technické vlastnosti splňajúce požiadavky na kvapalné izolanty pre rôzne účely na jednej strane a na druhej strane nízka cena. Ďalej sa minerálne oleje používajú ako zložka izolácie silových káblov, kondenzátorov, vysokonapäťových priechodiek a v olejových spínačoch. Najväčšiu časť spotreby kvapalných izolantov predstavujú transformátorové oleje [3].

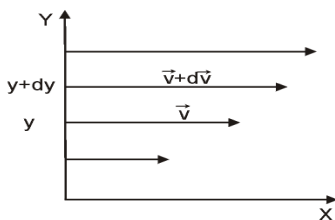
Transformátorový olej – jeho hlavnou funkciou je sprostredkovať dobrý odvod tepla. Teplo sa v oleji prenáša hlavne konvenciou, z čoho vyplýva požiadavka, aby olej mal čo najnižšiu viskozitu. To je potrebné aj na dobré preimpregnovanie papierovej a vláknaťej izolácie v transformátoroch. Nižšiu viskozitu majú destilačné produkty s nižším bodom varu, tieto však obsahujú zložky, ktoré sa pri vyšších teplotách už odparujú. Čo má za následok jednak vznikajúce pary, ktoré sú horľavé a to je v prevádzke transformátorov neprípustné. Preto sa pre transformátorové oleje predpisuje bod vzplanutia, t.j. minimálna teplota pod ktorou sa nesmú z oleja uvoľňovať zápalné pary. Viskozita, ktorá sa s klesajúcou teplotou zvyšuje, nesmie byť ani pri najnižšej teplote okolia, pri ktorej má transformátor pracovať, príliš veľká.

Viskozita olejov

Viskozita je najdôležitejšou neelektrickou vlastnosťou kvapalných izolantov, a to ako z technologického, tak aj z funkčného hľadiska. Kvapaliny netečú rovnakou rýchlosťou ani za rovnakých podmienok. Príčinou tejto vlastnosti je vnútorné trenie (viskozita) ktoré vzniká medzi jednotlivými vrstvami prúdiacej tekutiny na rozdiel od vonkajšieho trenia, ktoré vzniká na rozhraní medzi tekutinou a stenami prostredia. Vonkajšie trenie je dosť veľké (teoreticky nekonečné, ak tekutina zmáča steny), takže vrstva tekutiny, ktorá prilieha k stene prostredia sa vôbec nepohybuje. So stúpajúcou vzdialenosťou od steny prostredia stúpa aj rýchlosť pohybu častíc kvapaliny, pričom sa pomalšie vrstvy snažia rýchlejšie vrstvy spomaľovať a opačne. Ak sa tekutina pohybuje v rúrke tak, akoby sa súosové kvapalinové valce s rovnakou rýchlosťou pohybovali za sebou, pričom vnútorne sa pohybujú rýchlejšie ako vonkajšie, potom je to laminárne prúdenie. Pri väčších rýchlostiach dochádza následkom pôsobenia dotýčnicového napätia k vzniku vírov a nepravidelnému splietaniu prúdových vlákien. Takéto prúdenie nazývame vírivé alebo tiež turbulentné [3].

Na vysvetlenie dynamickej viskozity použijeme obrázok číslo 1. Vnútorné trenie alebo viskozita kvapaliny je mierou jej vlastnosti tečúť. Kvapaliny s menšou viskozitou (voda) tečú ľahšie ako kvapaliny s väčšou viskozitou (med).

Predstavme si kvapalinu prúdiacu v potrubí v smere osi X, na obrázku 1. Rozdelíme ju na veľmi tenké vrstvy, ktoré v závislosti od vzdialenosti od steny potrubia, t.j. od súradnice Y, sa pohybujú rôznymi rýchlosťami v, a to tak, že rýchlosť prúdenia kvapaliny sa zvyšuje s rastúcou vzdialenosťou od steny potrubia. Najvyššia je v strede potrubia, najmenšia pri jeho stenách, lebo tam sú najväčšie väzbové sily medzi časticami kvapaliny a časticami materiálu potrubia. [3]



Obr. 1 Vysvetlenie viskozity

Z obrázku vyplýva, že medzi jednotlivými vrstvičkami kvapaliny pohybujúcimi sa rôznou rýchlosťou vzniká tangenciálne napätie, ktoré má smer prúdenia kvapaliny. Príčinou tohto napätia je tepelný pohyb častíc, v dôsledku ktorého dochádza k prenosu častíc medzi dvoma susednými vrstvami v oboch smeroch. Častice prichádzajúce z pomalšej vrstvy do rýchlejšej vrstvy tak spomaľujú tečenie rýchlejšej vrstvy a naopak.

Na základe takéhoto modelu možno pre veľkosť tangenciálneho napätia existujúceho medzi dvoma susednými vrstvami prúdiacej kvapaliny odvodiť vzťah:

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

Kde $\frac{\partial v}{\partial y}$ je gradient (zmena) rýchlosti v smere osi y

η je koeficient dynamickej viskozity

V technickej praxi sa používa *kinematická viskozita* (ν), čo je pomer dynamickej viskozity (η) a hustoty skúšanej kvapaliny (ρ) pri tej istej teplote, vzťah:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (m^2 \cdot s^{-1}) \quad (2)$$

Podstatou je stanovenie doby prietoku stáleho objemu kvapaliny kapilárou kalibrovaného viskozimetra pri určitej hydrostatickej výške kvapaliny a pri prísne kontrolovanej a presne meranej teplote. Meraním kinematickej viskozity olejov sa sleduje či olej spĺňa svoju funkciu, čím sa predchádza nadmernému opotrebeniu častí. Limitnou hodnotou pre zmenu kinematickej viskozity je $\pm 10\%$.

Popis objektov merania

Merania boli realizované na štyroch vzorkách olejov: Venus - 100% slnečnicový olej vyrobený zo slnečnicových semien bez konzervačných látok pre použitie v potravinárskom priemysle. Prinesený na katedru 23.5.2008.

Raciol - repkový olej, filtrovaný a chemicky upravovaný (rafinovaný) pre použitie v potravinárskom priemysle. Prinesený na katedru 1.11.2006.

Zostarnutý inhibovaný transformátorový olej ITO 100

Nový Inhibovaný transformátorový olej ITO 100

Postup pri meraní

Viskozimeter postavíme proti bielemu osvetlenému pozadiu. Na začiatku merania si vyčistíme padajúcu trubicu destilovanou vodou a saponátom na riad, utrieme ju antistatickou handričkou a necháme vyschnúť.

Po vyschnutí Höpplerov viskozimeter najprv uzavrieme zospodu zátkou. Meranú kvapalinu o malej viskozite do padajúcej trubice privádzame cez sklenené hrdlo. Trubicu naplníme asi do výšky 25 mm pod okraj a pomocou priloženej pinzety vložíme guľôčku do trubice. Ak sú pod guľôčkou vzduchové bublinky, zatlačíme ich pomocou sklenenej tyčky.

Trubicu uzavrieme zátkami a vekom a ľahkým tlakom zašraubujeme zatváracie veko. Potom sledujeme pád guľôčky. Až guľôčka dosiahne prvú kruhovú značku začneme merať čas až dotedy pokiaľ guľôčka nedosiahne poslednú kruhovú značku.

Meranie doby sa prevádzame pomocou dobrých stopiek. Lepšie rozoznanie spodného okraja guľôčky dosiahneme tým, že k zadnej strane viskozimetra priložíme čierny kartónový prúžok - u sklenených guľôčok trochu nad kruhovou značkou, u kovových guľôčok naproti tomu trochu pod kruhovou značkou. Obrysy guľôčky sa nám potom javia výraznejšie.

Takto opakujeme meranie päť krát. So všetkých meraní spravíme aritmetický priemer, ktorý použijeme na výpočet viskozity podľa vzorca:

$$t = \frac{\sum_{k=1}^k t_k}{k} \quad (s) \quad (3)$$

Kde k je počet meraní

t_k je čas padania guľôčky pri danom meraní

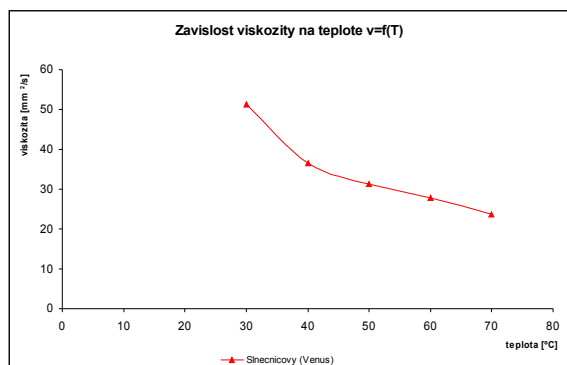
Vyhodnotenie výsledkov

Z nameraných a vypočítaných hodnôt som zostrojila závislosti $\nu = f(T)$ všetkých olejových vzoriek a navzájom som ich porovnávala.

V tabuľke 1 sú uvedené namerané a vypočítané hodnoty viskozity v pre slnečnicový olej Venus v závislosti od teploty.

Tab. 1 Hodnoty viskozity a času slnečnicového oleja.

T [°C]	t [s]	η [mPa.s]	v [mm ² /s]	
30	58,40	49,95	54,89	G = 3
40	46,24	39,55	43,46	K = 0,1187
50	42,24	36,13	39,70	$\rho_1 = 8,115 \text{ g/cm}^3$
60	38,88	33,25	36,54	$\rho_2 = 0,910 \text{ g/cm}^3$
70	31,24	26,72	29,36	



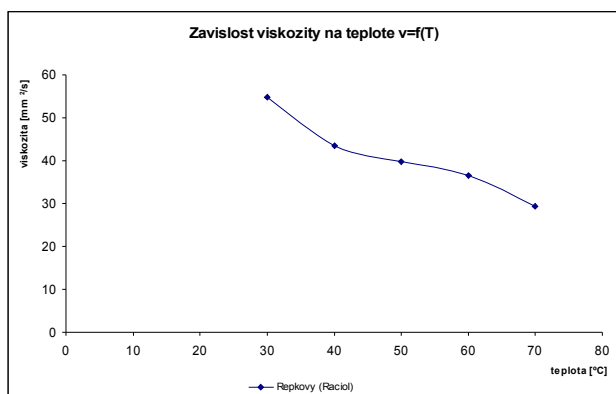
Obr. 2 Závislosť viskozity slnečnicového oleja Venus od teploty.

Zo závislosti $v = f(T)$ obr.(2) je vidieť, že zo zvyšujúcou teplotou nám viskozita slnečnicového oleja klesá. Pri nižších teplotách je pokles viskozity výraznejší a zo zvyšujúcou teplotou sa pomaly znižuje. Od teploty 40°C môžeme pozorovať priam lineárny charakter závislosti viskozity na teplote.

V tabuľke 4 sú uvedené namerané a vypočítané hodnoty viskozity v pre repkový olej Raciol v závislosti od teploty.

Tab. 2 Hodnoty viskozity a času repkového oleja.

T [°C]	t [s]	η [mPa.s]	v [mm ² /s]	
30	54,20	46,39	51,26	G=3
40	38,72	33,14	36,62	K=0,1187
50	33,12	28,34	31,32	$\rho_1 = 8,115 \text{ g/cm}^3$
60	29,46	25,21	27,86	$\rho_2 = 0,905 \text{ g/cm}^3$
70	25,14	21,52	23,77	



Obr. 3 Závislosť viskozity repkového oleja Raciol od teploty.

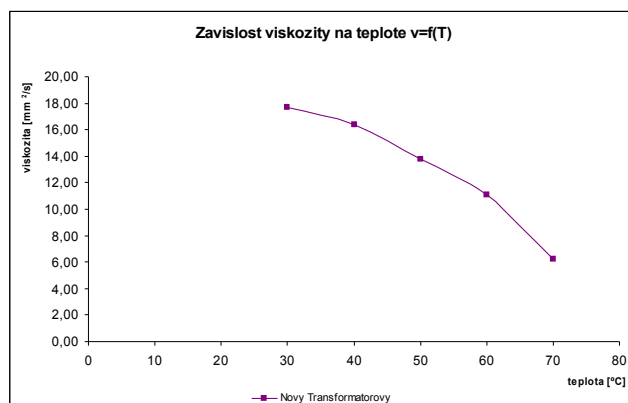
Zo závislosti $v = f(T)$ obr.(3) je vidieť, že zo zvyšujúcou teplotou nám viskozita repkového oleja klesá. Ako

u predchádzajúcej vzorky môžeme aj tu pozorovať väčší pokles pri nižších teplotách, kde so zvyšujúcou teplotou sa tento pokles znižuje.

V tabuľke 3 sú uvedené namerané a vypočítané hodnoty viskozity v pre zostarnutý transformátorový olej ITO 100 v závislosti od teploty.

Tab. 3 Hodnoty viskozity a času zostarnutého transformátorového oleja ITO 100.

T [°C]	t [s]	η [mPa.s]	v [mm ² /s]	
30	139,42	15,47	17,68	G=2
40	129,26	14,35	16,40	K=0,07273
50	108,52	12,04	13,76	$\rho_1 = 2,401 \text{ g/cm}^3$
60	87,60	9,72	11,11	$\rho_2 = 0,875 \text{ g/cm}^3$
70	49,06	5,44	6,22	



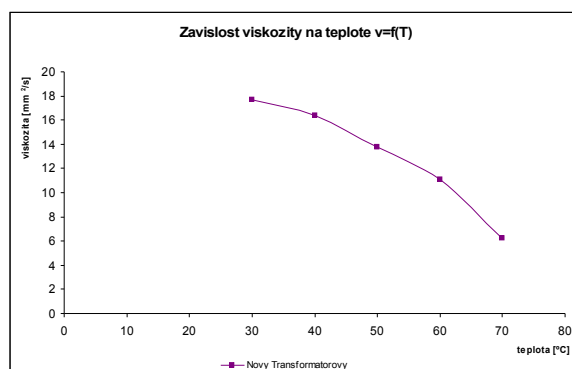
Obr. 4 Závislosť viskozity zostarnutého transformátorového oleja ITO 100 od teploty.

Zo závislosti $v = f(T)$ obr.(4) je vidieť, že zo zvyšujúcou teplotou nám viskozita starého transformátorového oleja ITO 100 klesá. Pri teplotách 30°C až 40 °C môžeme pozorovať veľmi malý pokles viskozity a postupne od teploty 40 °C sa tento pokles zväčšuje.

V tabuľke 4 sú uvedené namerané a vypočítané hodnoty viskozity v pre nový transformátorový olej ITO 100 v závislosti od teploty.

Tab. 4 Hodnoty viskozity a času nového transformátorového oleja ITO 100.

T [°C]	t [s]	η [mPa.s]	v [mm ² /s]	
30	152,62	16,83	19,01	G=2
40	147,58	16,27	18,39	K=0,07273
50	123,96	13,67	15,44	$\rho_1 = 2,401 \text{ g/cm}^3$
60	110,76	12,21	13,80	$\rho_2 = 0,885 \text{ g/cm}^3$
70	72,74	8,02	9,06	



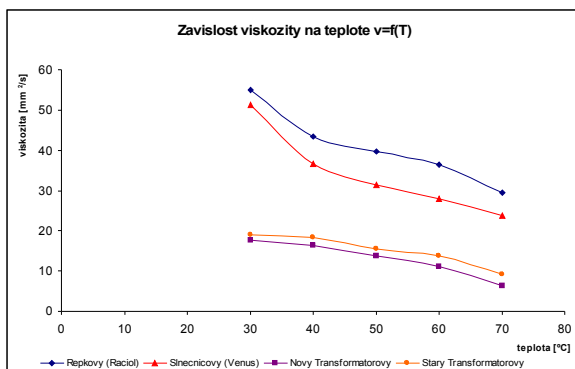
Obr. 5 Závislosť viskozity nového transformátorového oleja ITO 100 od teploty.

Zo závislosti $v = f(T)$ obr.(5) je vidieť, že zo zvyšujúcou teplotou nám viskozita nového transformátorového oleja ITO 100 klesá. U tej vzorky môžeme sledovať podobnú zmenu viskozity ako u predchádzajúcej vzorky avšak tu môžeme vidieť postupný nárast zmeny viskozity už od 30 °C.

Porovnanie výsledkov

Zo zostrojených závislostí viskozity na teplote u rastlinných a transformátorových olejov je vidieť, že viskozita sa nám s rastúcou teplotou znižuje. Ako vidieť z obr.(7.) viskozita sa u rastlinných olejov pri rastúcej teplote znižuje oveľa výraznejšie ako u transformátorových olejov. Zmena viskozity v rozmedzí od 30°C do 70 °C je u rastlinných olejov cca 25mm²/s a u transformátorových olejov je zmena viskozity v rozmedzí od 30 °C do 70 °C len 10mm²/s. Z toho vyplýva, že merané rastlinné oleje majú menší viskozitný index ako transformátorové oleje.

Ak by sme mali porovnať merané rastlinné oleje navzájom slnečnicový olej mal v celom meranom rozmedzí teplôt nižšiu viskozitu ako repkový olej, avšak pokles viskozity bol približne rovnaký teda aj meraný repkový a slnečnicový olej majú rovnaký viskozitný index.



Obr. 6 Závislosť viskozity meraných olejov od teploty.

Pri porovnaní meraných transformátorových olejov môžeme vidieť, že nový transformátorový olej má v celom meranom rozsahu nižšiu viskozitu ako zostarnutý transformátorový olej avšak tak ako u rastlinných olejov a j u transformátorových olejov je pokles viskozity približne rovnaký. Z čoho vyplýva, že aj viskozitný index u meraných transformátorových olejov je rovnaký.

Záver

Cieľom práce bolo zmerať viskozitu rastlinných olejov a porovnať ich s používanými transformátorovými olejmi a taktiež zistiť vplyv viskozity na zmenu elektroizolačných vlastností rastlinných olejov. Pre meranie som si zvolila slnečnicový olej Venus, repkový olej Raciol a porovnávala som ich s novým a zostarnutým transformátorovým olejom ITO 100. Z nameraného času a pomocou vzorcov som si vypočítala dynamickú viskozitu a následne kinematickú viskozitu.

Hodnoty viskozity sa so zvyšujúcou teplotou zmenšovali pri všetkých meraných olejoch. Najnižšie hodnoty viskozity boli namerané pri transformátorových olejoch ITO 100 a najvyššie pri rastlinných olejoch. Z porovnávaní nameraných výsledkov vyplynulo, že rastlinné oleje majú nižší viskozitný index ako transformátorové oleje teda aj zmena viskozity je v závislosti na teplote oveľa výraznejšia. Z meraných rastlinných olejov mal nižšiu viskozitu slnečnicový olej, ktorý by sa v tomto prípade skôr javil ako eventuálna náhrada transformátorového oleja. Zaujímavé by bolo určite zmerať viskozitu aj iných rastlinných olejov a porovnať tak viskozitu jednotlivých rastlinných olejov s doteraz používanými transformátorovými olejmi. Určite by pri porovnávaní rastlinných a transformátorových olejov

napomohol aj širší rozsah teplôt pri ktorých by sa viskozita merala.

Pri porovnávaní nameraných transformátorových olejov sa ukázalo, že zostarnutý transformátorový olej má vyššiu viskozitu ako nový transformátorový olej. Z čoho vyplýva, že postupným starnutím sa viskozita transformátorového oleja zvyšuje. Ďalšou alternatívou by bolo meranie viskozity zostarnutého rastlinného oleja, aby bolo možné porovnať zmenu viskozity nového a zostarnutého rastlinného oleja.

Na základe vlastností, ktoré som v tejto práci merala a porovnávala vyplýva, že merané rastlinné oleje nie sú schopné nahradiť transformátorové oleje. Pre lepšie posúdenie by bolo vhodné merať viac vzoriek rastlinných olejov ako aj nové a zostarnuté vzorky daných olejov.

Literatúra

- [1] Cimbala R.: Dielektrická spektroskopia olejov, FEI TU Košice
- [2] Hassdentefel a kolektív: Elektrotechnické materiály. SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1978
- [3] Artbauer, J. – Šedovič, J. – Adamec, V1.: Izolanty a izolácie. Nakladateľstvo ALFA, Bratislava, 1969.

Táto práca vznikla v rámci riešenia projektov APVV 20-006005 a VEGA 1/0368/09.

Autori: Irida Kolcunová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: irida.kolcunova@tuke.sk

Viera Vančová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice

Bystrík Dolník, Juraj Kurimský

Technická univerzita v Košiciach

Vplyv teploty na zafarbenie povrchu XPE vzoriek

Abstrakt. Príspevok sa zaoberá problematikou skúmania zmien zafarbenia povrchu XPE vzoriek vplyvom pôsobenia zvýšeného tepelného poľa a možnosti využitia získaných poznatkov pre účely odhadu životnosti skúmaných vzoriek.

Abstract. The contribution deals with the examination of changes in surface color samples XPE interaction effects of increased thermal field and the possibility of acquired knowledge for purposes of estimating the life of samples tested.

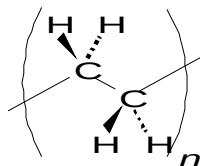
Kľúčové slová: polyetylén, XPE, oxidácia, starnutie
Keywords: polyethylene, XPE, oxidation, ageing

Úvod

Materiály XPE (skrátene termínu sieťovaný polyetylén) často sa používajú ako izolácia v elektrických zariadeniach. Tento materiál je jedinečný z rodiny polyetylénov (PE) tým, že reťazce molekúl sú navzájom viazané v trojrozmernej sieti. Má veľkú pevnosť a tuhosť aj pri nízkych teplotách a lepšiu tepelnú stabilitu voči polypropylénu (PP). Počas pôsobenia elektrického poľa a tepla na XPE materiál dochádza k jeho starnutiu, čo môže vyvrcholiť zmenami v štruktúre XPE materiálu. Následkom týchto zmien vznikajú, za súčasného pôsobenia tepelného a elektrického poľa, poruchy typu dutinka, elektrický stromček a im podobné, ktoré výrazne skracujú prevádzkovú životnosť izolácie elektrického zariadenia. Účinok tepelného poľa prejaví sa zmenou zafarbenia povrchu XPE materiálu, ktorá je spôsobená urýchlennými oxidačnými reakciami. Zmena zafarbenia a odhad životnosti XPE izolačného materiálu je predmetom výskumu, ktorým sa zaoberá príspevok.

Niektoré základné elektrofyzikálne vlastnosti XPE materiálu

Materiál polyetylén (PE) začal sa vyrábať začiatkom 30. rokov 20. storočia. Už v tomto období mal univerzálne použitie ako izolačný materiál vodičov a káblov. Jedná sa o termoplastický polymér, vyrábaný polymerizáciou etylénu $(CH_2=CH_2)_n$. Využíva radikálovú polymerizáciu, alebo aniónovú resp. kationovú adičnú polymerizáciu ako aj iónovú koordinačnú polymerizáciu. Každá z uvedených metód poskytuje PE s rôznymi fyzikálno-mechanickými vlastnosťami.



Obr. 1. Geometrický vzorec polyetylénu

Polyetylén je klasifikovaný do niekoľkých kategórií. Tieto kategórie líšia sa navzájom hlavne z hľadiska molekulovej hmotnosti, stupňa rozvetvenia reťazcov a mernej hmotnosti, čo sa prejavuje v ich fyzikálno-mechanických vlastnostiach.

Rozoznávame:

- UHMWPE (Ultra High Molecular Weight PE) – PE s ultravysokou molekulovou hmotnosťou,
- HMWPE (High Molecular Weight PE) – PE s vysokou molekulovou hmotnosťou,
- HDPE (High Density PE) – PE s vysokou mernou hmotnosťou (vysokohustotný PE),

- HDXLPE (High Density Cross-Linked PE) – sieťovaný PE s vysokou mernou hmotnosťou (vysokohustotný sieťovaný PE),
- XPE (Cross-Linked PE) – sieťovaný PE,
- MDPE (Medium Density PE) – PE so strednou mernou hmotnosťou (strednohustotný PE),
- LDPE (Low Density PE) – PE s nízkou mernou hmotnosťou (nízkohustotný PE),
- LLDPE (Linear Low Density PE) – lineárny PE s nízkou mernou hmotnosťou (lineárny nízkohustotný PE),
- VLDPE (Very Low Density PE) – PE s veľmi nízkou mernou hmotnosťou.

Sieťovaný PE (XPE) pripravuje sa vo väčšine z HDPE. V XPE sú jednotlivé reťazce PE spájané do polymérnej siete vhodnými sieťovacími systémami, čím sa mení pôvodný termoplastický PE na elastomér. Sieťovaním sa zlepšia fyzikálno-mechanické vlastnosti pôvodného PE. XPE si zachováva mechanickú pevnosť až do teploty 120–150 °C. Taktiež lepšie odoláva organickým rozpúšťadlami, zlepšuje sa rázová húževnatosť, pevnosť v ťahu a odolnosť voči krehkému lomu pri nízkych teplotách. Má vynikajúce dielektrické vlastnosti, ktoré umožňujú používať XPE izolačný materiál v širokom napäťovom rozsahu od 600 V do 500 kV. V tab. 1 sú uvedené niektoré elektrické vlastnosti rôznych druhov polyetylénu [1].

TABUĽKA I
 Vlastnosti rôznych druhov polyetylénu

Vlastnosť	Druh polyetylénu			
	LDPE	HDPE	PE so zníženou horľavosťou	XPE
Dielektrická konštanta (–)	2,28	2,34	2,50	2,3
Činiteľ dielektrických strát (–)	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Špecifický odpor ($\Omega \cdot \text{cm}$)	10^{16}	10^{16}	10^{16}	10^{16}
Elektrická pevnosť (V/m)	550	500	–	550

Tepelná degradácia polyetylénu

Proces tepelnej degradácie polymérov je molekulová degenerácia vplyvom prehriatia. Pri vysokých teplotách zložky tvoriace dlhý hlavný reťazec polyméru začínajú sa oddeľovať (štiepenie molekúl) a vzájomnými reakciami menia vlastnosti polyméru. V skutočnosti aj po vykonaní opatrení proti prehriatiu, tepelná degradácia môže vzniknúť pri teplote, ktorá je oveľa nižšia ako teplota, pri ktorej je mechanické poškodenie pravdepodobné. Chemické reakcie spolu s tepelnou degradáciou spôsobujú zmeny fyzikálnych

a optických vlastností. Tepelná degradácia vyvoláva zmeny molekulovej hmotnosti (ako aj rozloženie molekuly) polyméru. Medzi typické zmeny patrí: znížená ťažnosť, skrehnutie materiálu, rozprášenie, zmena zafarbenia, praskanie povrchu, celkové zmenšovanie iných mnohých iných žiadaných fyzikálnych vlastností [2, 3].

Zvyčajný model tepelnej degradácie je založený na autooxidačnom procese, ktorého súčasťou je iniciácia, šírenie, vetvenie a ukončenie.

Iniciácia tepelnej degradácie je spôsobená úbytkom atómov vodíka z reťazca polyméru vplyvom tepla alebo svetla, čím sa vytvorí silne reaktívny a nestabilný voľný radikál (R^*) a atóm vodíka s nespárovaným elektrónom (H^*). Šírenie tepelnej degradácie môže obsahovať množstvo reakcií. Jedna z nich je, keď voľný radikál (R^*) reaguje s molekulou kyslíka (O_2) a vznikne radikál peroxidu (ROO^*), ktorý sa môže naviazať na iný atóm vodíka v reťazci polyméru, vytvorí hydroperoxid ($ROOH$) a potom znovu obnoví voľný radikál (R^*). Vzniknutý hydroperoxid môže sa potom rozštiepiť na dva nové voľné radikály (RO^*) + (*OH), ktoré spôsobujú šírenie reakcie na iné molekuly polyméru. Opísaný proces môže sa zrýchľovať podľa toho, ako ľahko možno vytrhnúť vodík z reťazca polyméru.

Ukončenie tepelnej degradácie dosiahne sa „likvidáciou“ voľných radikálov a vytvorením inertných produktov, čo sa môže udiť prirodzene kombináciou voľných radikálov alebo použitím stabilizátorov v plastickej hmote. Hlavné druhy tepelnej degradácie polyméru sú: depolymerizácia, náhodné štiepenie reťazca polyméru, eliminácia priečných skupín.

Depolymerizácia – pôsobením tepla koniec polymérového reťazca odchádza, čím sa vytvorí voľný radikál s malou aktivitou. Následne dochádza k postupnej strate monomérov, ktorý je podmienený reakciami, avšak reťazec molekúl sa nemení veľmi rýchlo. Tento proces je bežný pre polymetylmetakrylát.

Náhodné štiepenie reťazca polyméru – hlavný reťazec sa náhodne pretrhne na niektorom mieste, čím dôjde k extrémnemu poklesu molekulovej hmotnosti a zároveň nevznikne monomér. Je to spôsobené vytvorením nového voľného radikálu s veľkou aktivitou s možnosťou prenosu reťazca medzi molekulami a neprimeraným zakončením CH_2 skupinou.

Eliminácia priečných skupín – molekuly na konci reťazcov sú viazané slabšími väzbami v porovnaní s väzbami vo vnútri reťazca. Keď polymér bol ohriaty, konce reťazcov opúšťajú hlavný reťazec skôr než by sa rozštiepili na malé čiastočky (napr. PVC uvoľňuje HCl pri teplote okolo 100–120 °C).

Rastrová grafika

Rastrová grafika v počítačovej terminológii označuje spôsob uloženia grafickej informácie popisom jednotlivých bodov usporiadaných v pomyselnej mriežke (rastrovými obrázkami sú napríklad digitálne fotografie). Každý bod (pixel) má v mriežke určenú svoju presnú polohu, farbu a iné parametre, napr. priehľadnosť (alfa kanál). Farba bodu (pixelu) môže byť určená farebným modelom, ktorý opisuje jednotlivé body miešaním základných farieb, alebo farby a jas. Množstvo použitých bitov potrebných na opis závisí od zvolenej farebnej hĺbky. Napr. ak je použitá len čierna a biela farba, stačí pre opis farby jedného bodu jediný bit. Ak treba zaznamenať odtiene sivej farby, možno použiť kódovanie pomocou ôsmich bitov: čím bude bod svetlejší, tým väčšia hodnota sa do pamäte uloží. Potom bod čiernej farby bude uložený ako 0 a bod bielej farby ako maximálna možná hodnota 255.

Pri farebnom kódovaní obrázku všetky farebné modely kódujú farbu tromi nezávislými hodnotami. Najvýhodnejšie je každý pixel obrázu zakódovať pomocou troch pamäťových miest – troch bajtov. Opísaný spôsob uloženia obrázka (keď je každý bod kódovaný pomocou niekoľkých bitov – 4, 8, 16 alebo 24) sa používa formát, ktorý sa volá

bitová mapa. Pri plnej farebnosti je každý bod obrázka zakódovaný 24 bitmi, čo sú tri pamäťové miesta počítača; 255 0 0 je syta červená farba (R), 0 255 0 je syta zelená farba (G), 0 0 255 je syta modrá farba (B), 0 0 0 je čierna farba a 255 255 255 je biela farba (jedná sa o farebný režim RGB založený na miešaní farebného svetla a používajú ho všetky obrazovky).

Na zníženie pamäťovej náročnosti obrázka používa sa paleta farieb a/alebo kompresia, ktorá môže byť bezstratová a stratová. Medzi štandardnú metódu stratovej kompresie používanú pre ukladanie počítačových obrázkov vo fotorealistickej kvalite patrí JPEG a formáty súborov, ktoré túto kompresiu používajú tiež sa bežne nazývajú JPEG (používajú sa prípony .jpg, .jpeg, .jif, .jpe). Vhodný je pre fotografické snímky alebo maľby realistických scenérií s hladkými prechodmi v tóne a farbe. V tomto prípade funguje omnoho lepšie ako čisté bezstratové metódy, pričom poskytuje stále veľmi dobrú kvalitu obrazu.

Experiment

Experiment prebiehal v dvoch fázach v Laboratóriu techniky vysokých napätí na Katedre elektroenergetiky TU v Košiciach. V prvej fáze prebiehali testy urýchleným starnutím na XPE vzorkách, na ktoré súčasne pôsobilo zvýšené striedavé elektrické pole s priemerným kmitočtom a zvýšené tepelné pole. Teplota vzoriek bola 105 °C ±3 °C, elektrické pole bolo nastavené na: 10, 15 a 20 kV/mm.

Po vložení vzoriek do teplovzdušnej pece a stabilizácii teploty vzoriek, priložilo sa na vzorky striedavé napätie zabezpečujúce požadované namáhanie elektrickým poľom a súčasne začal sa merať čas. Po prerazení skúmanej vzorky a odčítaní stavu počítadla vypočítal sa celkový čas do prerazu pre každú skúmanú vzorku. Vypočítané údaje archivovali sa na záznamové médium v tabuľkovej forme.

Druhá fáza experimentu mala niekoľko dielčích úloh, ktoré navzájom na seba nadväzovali. Najprv sa urobil farebný snímok vybraného počtu skúmaných vzoriek do JPEG formátu. Celkovo bolo použitých 9 vzoriek, ktorých povrchy boli sfarbené od syto bielej farby cez bledohnedú farbu až po hnedú farbu. Vizualne bolo vidno, že čím je povrch XPE vzorky viac oxidovaný, tým je farba povrchu tmavšia. Následne sa z každého miesta na obrázku, ktorý prislúchal jednotlivej vzorke vybral (digitálnou technikou) presne definovaný výrez s rozmermi 120 krát 120 bodov. Takto získalo sa 9 súborov rastrovej grafiky.

Po tejto príprave zistili sa farebné vlastnosti súborov s cieľom zistiť, aké je zastúpenie jednotlivých zložiek farby RGB. Každý súbor bol reprezentovaný tromi štvorcovými maticami s rozmerom 120x120. Každá matica obsahovala číselné hodnoty úrovne základnej farby. Ako kritérium vyhodnotenia použila sa priemerná hodnota zo všetkých úrovní príslušnej zložky farby podľa rovníc

$$R_{avg} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij}, \quad (1)$$

$$G_{avg} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij}, \quad (2)$$

$$B_{avg} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij}, \quad (3)$$

kde: R_{avg} , G_{avg} , B_{avg} je priemerná hodnota úrovne červenej, zelenej a modrej farby, n – počet prvkov v riadku (stĺpci) štvorcovej matice, $i, j = 1, 2 \dots n$ – prirodzené číslo. Vypočítala sa ešte aj priemerná hodnota úrovne odtieňov sivej farby (Gray) podľa rovnice

$$Gray = 0,3 \cdot R + 0,59 \cdot G + 0,11 \cdot B, \quad (4)$$

čím sa získali usporiadané dvojice v rovine, pričom horizontálnu os tvorí čas a vertikálnu os úroveň zložky farby,

resp. úroveň odtieňa sivej farby. Zo štatistického súboru vybralo sa päť bodov na časovej osi a k nim prislúchajúce hodnoty úrovne základnej farby a odtieňa sivej farby. Závislosť úrovne zložky farby od času vyjadriala sa pomocou logaritmickej regresnej krivky v tvare

$$y_{\text{RGB}} = a + b \cdot \ln(t + c) \quad (5)$$

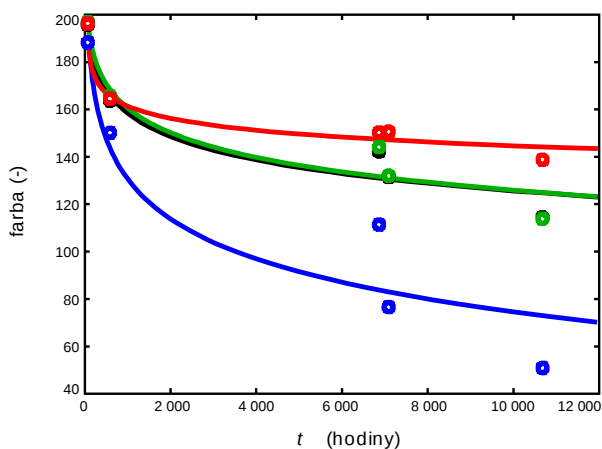
alebo v tvare

$$y_{\text{RGB}} = a + b \cdot \ln(t) \quad (6)$$

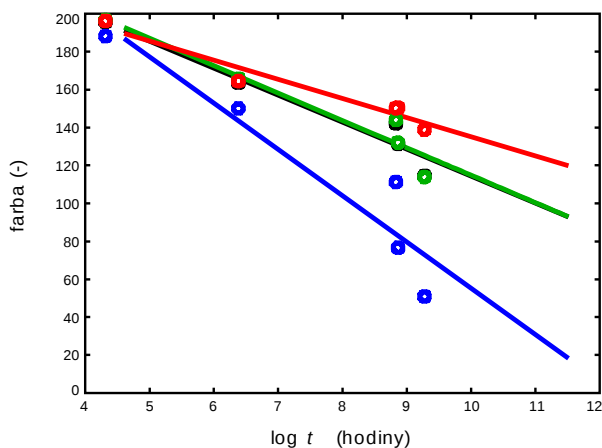
v prípade lineárnej časovej osi. Pre časovú os vyjadrenú ako prirodzený logaritmus času, použila sa lineárna regresná krivka v tvare:

$$y_{\text{RGB}} = a \cdot t + b \quad (7)$$

Na obr. 2 je zobrazená grafická závislosť úrovne zložky farby povrchu testovanej vzorky od času namáhania zvýšeným elektrickým a tepelným poľom. Z grafickej závislosti vidno, že najmenšiu odchýlku má regresná krivka zodpovedajúca úrovni červenej farby, najväčšiu odchýlku zasa regresná krivka zodpovedajúca úrovni modrej farby. Regresná krivka pre úroveň zelenej farby a odtiene sivej farby sa navzájom líšia iba veľmi málo.



Obr. 2. Závislosť úrovne zložky farby (R, G, B, Gray) povrchu vzorky od času – lineárna časová škála



Obr. 3. Závislosť úrovne zložky farby (R, G, B, Gray) povrchu vzorky od času – logaritmická časová škála

Na obr. 3 je opäť zobrazená grafická závislosť úrovne zložky farby povrchu testovanej vzorky od času namáhania zvýšeným elektrickým a tepelným poľom, pričom použitá je logaritmická časová škála. Podobne ako v prvom prípade (obr. 2) vidno, že najmenšiu odchýlku má regresná krivka

zodpovedajúca úrovni červenej farby, najväčšiu odchýlku regresná krivka zodpovedajúca úrovni modrej farby a regresná krivka pre úroveň zelenej farby a odtiene sivej farby sa navzájom líšia iba veľmi málo.

Pre vzájomné porovnanie v tab. 2 (lineárna časová škála) a tab. 3 (logaritmická časová škála) sú uvedené namerané a vypočítané hodnoty času namáhania a vypočítaná relatívna chyba pre vybrané štyri vzorky. Vypočítané hodnoty relatívnej chyby pre každú úroveň zložky farby potvrdzujú už spomenutý čiastkový záver, že najmenšiu odchýlku má regresná krivka zodpovedajúca úrovni červenej farby.

TABUĽKA II
Tabuľka nameraných a vypočítaných časov

nameraný	Čas (hod.)				Relatívna chyba (%)			
	R	G	B	Gray	R	G	B	Gray
81	78	90	115	90	-3,7	-116	-59,8	-115
7 643	4 927	6 681	9 233	6 745	-55,1	98	99,2	98
11 094	7 899	12 482	18 496	12 212	-29,1	99	99,7	99

TABUĽKA III
Tabuľka nameraných a vypočítaných časov

nameraný	log t				Relatívna chyba (%)			
	R	G	B	Gray	R	G	B	Gray
1,908 485	69	91	115	90	-17,6	11,2	29,5	9,7
3,883 264	5 206	6 701	9 233	6 744	-46,8	-14,1	17,2	-13,3
4,008 345	7 267	12 890	18 496	12 210	-40,3	20,9	44,9	16,5

Záver a diskusia

Vzájomná súvislosť medzi trvaním urýchleného starnutia a zafarbením povrchu XPE vzoriek bola skúmaná metódou experimentu. Realizovala sa štatistická analýza súborov rastrovej grafiky pre každú úroveň zložky farby povrchu testovanej vzorky. Zistilo sa, že najmenšiu odchýlku má regresná krivka zodpovedajúca úrovni červenej farby. V nasledujúcom experimente bude sa zvažovať možnosť lepšieho zosnímania povrchu testovaných vzoriek.

PodĎakovanie

Autori vyjadrujú poďakovanie Agentúre na podporu výskumu a vývoja za podporenie tejto práce v rámci projektu APVV-20-006005 a Vedeckej grantovej agentúre Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA-1/0368/09.

Literatúra

- [1] W. Tillar Shugg, Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials. NJ: IEEE Press, 1995. ISBN 0-7803-1030-6.
- [2] M. Nedjar, "Effect of thermal aging on the electrical properties of crosslinked polyethylene," in *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 111, no. 4, 2009, pp. 1985–1990.
- [3] Y. Mecheri, L. Boukezzi, A. Boubakeur, and M. Lallouani, "Dielectric and Mechanical Behavior of Cross-Linked Polyethylene under Thermal Aging," *IEEE, 2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 560–563, 2000.

AUTORI: Bystrík Dolník, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Bystrik.Dolnik@tuke.sk

Juraj Kurimský, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Juraj.Kurimsky@tuke.sk

Bystrík Dolník, Juraj Kurimský, Ján Tkáč

Technická univerzita v Košiciach

Možnosti ochrany izolácie veterných elektrární pomocou aktívnych bleskozvodov

Abstrakt. Inštalovanie veterných elektrární si vyžaduje riešiť problematiku ochrany zariadení a izolácie pred pôsobením atmosférickej elektriny a prepätiami. Potvrdzujú to prevádzkové skúsenosti ako aj vysoké škody na technologických zariadeniach veterných elektrární. Príspevok je zameraný na aplikovanie ochrany veterných elektrární pomocou aktívnych bleskozvodov.

Abstract. Installation of wind turbines needs to address issues of protection and isolation devices from exposure to atmospheric electricity and overvoltages. This is confirmed by operational experience and high technology equipment damage, wind power. The contribution is focused on the application of overvoltage protection of wind power by active lightning.

Kľúčové slová: izolácia, prepätie, veterná elektrárň
Keywords: insulation, overvoltage, wind turbines

Úvod

V súčasnosti sa v elektroenergetike na celom svete okrem centralizovaných zdrojov čoraz viac presadzujú aj tzv. decentralizované zdroje vo forme malých zdrojov elektriny využívajúcich potenciál obnoviteľných zdrojov energie (OZE). V súčasnosti tieto zdroje dosahujú inštalovaný výkon takmer 100 GW a počet inštalovaných jednotiek niekoľko desiatok tisíc. V energetickej bilancii Slovenska majú tieto zdroje zatiaľ zanedbateľný podiel, ale záujem investorov o ich budovanie je veľmi veľký. Využívanie OZE prinieslo aj nové technológie, s ktorými neboli doposiaľ prevádzkové skúsenosti. Jedným z problémov týchto zdrojov je aj potreba zvýšenej ochrany pred účinkami atmosférickej elektriny a prepätiami, ktorá ochrana vyplýva zo samotnej konštrukcie zariadenia ako aj z charakteru lokality, v ktorej takéto zdroje pracujú.

Najvýraznejšie sa tento problém vyskytuje počas prevádzky veterných elektrární (VE). Ich budovanie sa sústreďuje na lokality s výhodnými veternými podmienkami, ktoré sa však vyskytujú najmä vo väčších výškach a na hrebeňoch hôr, kde je aj vyšší predpoklad zásahu bleskom. Prírodzene, všetky veterné elektrárne majú realizované príslušné opatrenia na ochranu pred atmosférickou elektrinou podľa príslušných noriem. Napriek tomu bolo v uplynulom období poškodených zásahom blesku približne 8 % všetkých veterných elektrární.

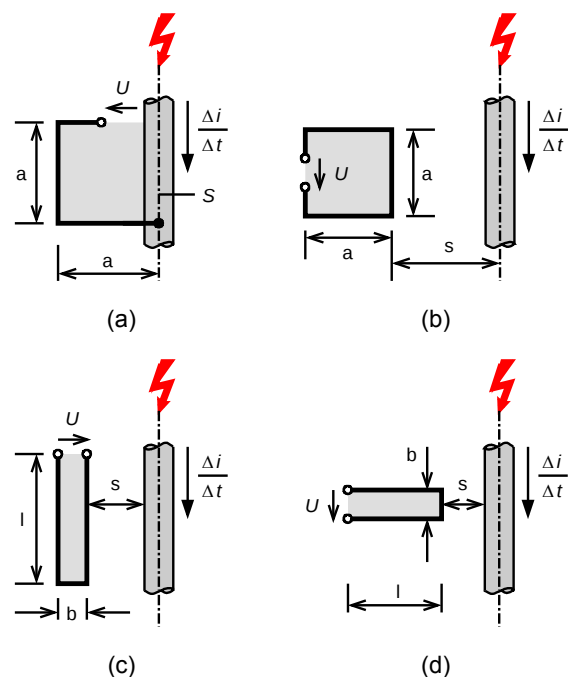
Niektoré účinky blesku

Blesk, ako prejav atmosférickej elektriny sa vyskytuje v rôznej forme. Napätie blesku dosahuje stovky kilovoltov a prúdy niekoľko desiatok až stoviek kiloampérov, pričom trvanie je veľmi krátke, približne 250 μ s [1, 3]. Účinky atmosférického výboja sú: optické, akustické, tepelné, elektrické – prirazy, elektromagnetické, elektrodynamicke a elektrochemické. Jednotlivé účinky sa pri svojom pôsobení vzájomne kombinujú, pričom najvýraznejšie sa prejavujú elektrické a tepelné účinky. Vzhľadom na veľmi rýchly nárast a pokles napätia a prúdu pri zásahu blesku dochádza k vzniku indukovaného napätia v blízkych vodivých častiach. Časovou zmenou prúdu blesku vzniká indukované napätie u_i , ktoré možno vypočítať [2]

$$u_i = M \cdot \Delta i / \Delta t, \quad (1)$$

kde u_i je indukované napätie (kV), M vzájomná indukčnosť (μ H) a $\Delta i / \Delta t$ časová zmena prúdu blesku (kA/ μ s). Z rovnice (1) vyplýva, že veľkosť indukovaných napätí závisí od časovej zmeny prúdu a vzájomného (geometrického) usporiadania bleskozvodu voči iným vodivým častiam.

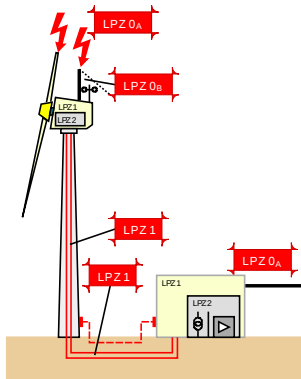
Usporiadania vyskytujúce sa najčastejšie sú uvedené na obr. 1. Jedná sa o slučku tvorenú vodičmi uzemnenia elektrickej inštalácie galvanicky spojenými s bleskozvodom alebo slučka tvorená samotnou elektrickou inštaláciou s rôznym geometrickým usporiadaním voči bleskozvodu. Poznamenajme, že aj samotný zvod môže vytvárať slučku. Vzhľadom na časovú zmenu prúdu treba uvažovať všetky inštalácie s priestorovo rozloženými parametrami.



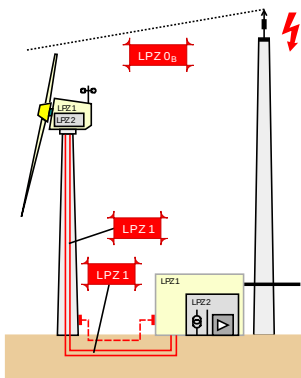
Obr. 1. Vznik indukovaných prepätí v elektrickej inštalácii blízko zvodu

Pre niektoré usporiadania indukované napätia dosahujú také hodnoty, ktoré presahujú izolačné schopnosti ako aj možnosti použitých izolantov (pozri tab. I). Vzhľadom na tieto skutočnosti je potrebné dimenzovať príslušné zariadenia podľa IEC EN 62305. Norma definuje štyri úrovne ochrany pred bleskom (LPL) a štyri triedy ochrany (LPS): energeticky najnáročnejšia trieda ochrany je označená „I“ kde sa uvažuje prúd blesku s amplitúdou $I = 200$ kA a náboj prúdu blesku $Q_{imp} = 100$ C [1, 2, 4]. Konceptia pomocou zón ochrany pred bleskom (LPZ) definuje postup rozdelenia chráneného objektu do zón s rozdielnou citlivosťou voči rušeniu a prepätiam. Prepätia

spôsobené priamymi údermi blesku do objektu ako aj blízky údermi blesku, sa na hraniciach zón redukujú na úroveň, ktorým nasledujúce systémy majú odolávať bez poruchy. Tlmenie elektromagnetického poľa sa dosahuje vhodným tienením alebo vhodným priestorovým usporiadaním trás inštalácií, prípadne ich kombináciou [3]



Obr. 2. Zóny ochrany pred bleskom veternej elektrárne



Obr. 3. Ochrana veternej elektrárne vzdialeným bleskozvodom

Podobne sa ochrana pred bleskom rieši aj pri veterných elektrárnach, ako je to znázornené na obr. 2. V zóne LPZ 0_A sa predpokladá priamy zásah bleskom. LPZ 0_B je už chránená pred priamym zásahom zariadením (lopatkami rotora) nachádzajúcim sa v zóne LPZ 0_A.

Z toho však vyplýva, že lopatky turbíny by mali byť dimenzované tak, aby zvládli prúdy tečúce bleskami v ich celom prúdovom rozsahu (cca 250 kA)..

Poškodenie veterných elektrární bleskom

Pri výbere lokality (VE) je dôležitým hľadiskom výskyt vetra a jeho parametre. Budujú na hladine mora, v nížinách, ale aj vo vyšších nadmorských výškach. Na búrkovú činnosť, početnosť výskytu bleskov a ich prúdových a napätových parametrov sa nedáva vždy dostatočný dôraz. Očakáva sa, že veterná elektrárňa nebude poškodená ich pôsobením.

Z praktických skúseností vieme, že pri zásahu bleskom dochádza pomerne často k poškodeniu veterných elektrární. Požiar veternej elektrárne je na obr. 4. Približne 8 % všetkých VE je v dôsledku zásahu bleskom vyradených z prevádzky. Veterná elektrárňa je svojou výškou často najvyšším bodom v širokom okolí a stáva sa sama bleskozvodom. Riziko zásahu bleskom rastie kvadraticky s výškou objektu. Súčasné veterné elektrárne s výkonom až 5 MW dosahujú výšku veže 100–120 m a polomery rotorov aj vyše 60 m. Celková výška tak dosahuje až 180 m nad úrovňou terénu. Rotačný pohyb lopatiek vytvára pulzujúce elektrické pole v dôsledku meniacej sa výšky najvyššieho bodu VE. Mení sa pri tom aj počet uzemnených bodov na koncoch lopatiek smerujúcich v ústrety blesku a ich poloha v priestore. VE tak predstavuje v priestore bleskozvod,

ktorého výška a konfigurácia sa neustále mení medzi 1–2 zberačmi medzi výškou 120–180 m.

TABUĽKA I
Vlastnosti rôznych druhov polyetylénu

Konfigurácia podľa obr. 1	Indukčnosť (vlastná, vzájomná)	Indukované napätie
a	16 μH	1 600 kV
b	4,8 μH	480 kV
c	0,6 nH / m	600 V
d	0,48 nH / m	144 V

Vzhľadom na uzemnenie lopatiek vytvára tak veterná elektrárňa v elektrickom poli zeme výraznú nehomogenitu a prináša potenciál zeme do maximálnej konštrukčnej výšky. Vytvárajú sa tak podmienky pre vznik výbojovej činnosti na koncoch lopatiek aj bez zásahu bleskov. Lopatky turbíny sa stávajú zberacím zariadením bleskozvodného systému veternej elektrárne, ktorý v dôsledku rotácie neustále mení konfiguráciu elektród v elektrickom poli zeme, čím vytvára optimálne podmienky pre zásah blesku.

Napriek tomu, že VE sú vybavené bleskozvodným systémom dochádza k haváriám, ktoré majú často mimoriadne vážne dôsledky na ďalšiu prevádzku. Najčastejšie sú poškodzované lopatky veternej turbíny, pretože ako prvé prichádzajú do styku s bleskom a jeho účinkami aj keď je potrebné konštruktovať, že sa ich výrobe a testovaniu venuje veľká pozornosť [5].

Vzhľadom na parametre blesku je veľmi obtiažne v lopatkách zabezpečiť dostatočne vodivé a bezpečné prepojenie od kontaktných miest na ich konci, cez pohyblivé kontakty strojovne až po zemniacu sústavu pre celý rozsah vyskytujúcich sa prúdov bleskov. Blesk dosahuje prúdy až do 250 kA, pri ktorých sa uplatňujú aj malé impedancie. Napríklad na impedancii 1 ohm vyvolá prúd blesku 250 kA úbytok napätia až 250 kV. Na takýto potenciál a prúd je prakticky nemožné zabezpečiť nielen dostatočnú elektrickú, ale aj tepelno-mechanickú pevnosť. Blesky do 20 kA sa vyskytujú najčastejšie. Niekoľkokrát v roku sa však vyskytujú blesky s 10-násobnou amplitúdou čomu by odpovedal aj rozsah poškodenia.

Z hľadiska ďalšej prevádzky sú v každom prípade takto poškodené lopatky nepoužiteľné. Veľkým nebezpečením pre poškodenie lopatky je obsah vlhkosti v materiáloch lopatky, ktorá pri intenzívnom ohreve prúdom blesku spôsobuje vývoj vodnej pary s vysokým tlakom. Poškodené sú vo väčšine prípadov nielen lopatky ale aj riadiaci systém, meteorologická stanica, prípadne generátor, ktorého rotor je prostredníctvom lopatky priamo zasiahnutý. Použitie vzdialených bleskozvodov a aktívnych bleskozvodov

Objekty možno chrániť pred účinkami atmosférickej elektriny buď pasívnymi bleskozvodmi alebo aktívnymi bleskozvodmi. Pasívne bleskozvody predstavujú najstaršie technické zariadenie na ochranu pred bleskom a aj väčšina veterných elektrární má na streche strojovne inštalovaný pasívny bleskozvod. Tento však vzhľadom na svoju polohu v zóne LPZ 0_B sa zúčastňuje ochrany veternej elektrárne až sekundárne a nemá možnosť ovplyvniť zásah blesku do lopatky VE. Životnosť VE a schopnosť odolávať atmosférickej elektrine je možné zvýšiť len bleskozvodným systémom v ktorého ochrannej zóne by sa nachádzali aj špičky lopatiek turbíny veternej elektrárne. Takúto funkciu by mohol plniť pasívny bleskozvod umiestnený mimo konštrukciu VE na vysokých bleskozvodných stožiaroch, ktoré by boli vyššie o 20–30 % ako dosahujú inštalované veterné elektrárne. Jedná sa o takzvaný vzdialený bleskozvod (pozri obr. 3), ktorého úlohou je dostať chránený objekt do svojej ochrannej zóny. Na ochranu VE by bolo

možné využiť aj najnovšie konštrukcie tzv. aktívnych bleskozvodov vytvárajúcich ústretový predvýboj umožňujúci zachytávanie bleskov do vzdialenosti 60 m od hrotovej elektródy. Pracujú na princípe vytvárania dobrých podmienok pre šírenie blesku v blízkosti zberača, ktorý aktívne pôsobí na vznik ionizácie a vytváranie predvýboja, tzv. vzostupného stopovača, ktorého úlohou je priviesť blesk k zberaču. Tento druh bleskozvodov by bolo vhodné použiť aj na streche strojovne veternej elektrárne, kde by mohol do určitej vzdialenosti zabrániť zásahu lopatky.



Obr. 4. Veterná elektrárňa po zásahu bleskom



Obr. 5. Konštrukcia aktívneho bleskozvodu

Predĺženie pôsobenia aktívneho bleskozvodu oproti pasívnemu o vzdialenosť ΔL v dôsledku predionizácie, môže dosahovať až 60 m. Táto vzdialenosť vymedzuje priestor z ktorého sú zachytávané blesky a to aj v spolupráci so susednými aktívnymi bleskozvodmi. Predstih aktivácie ΔT je približne 650 μ s a rýchlosť šírenia stopovača dosahuje až 10^6 m/s. Samotný predvýboj vytvára sa pomocou vysokonapäťového generátora napájaného solárnym článkom s akumuláciou energie. Pre ochranu veterných elektrární sú však vhodné len tie, ktoré na základe výsledkov zo snímača elektrického poľa riadia veľkosť výstupného napätia a prípadne aj jeho polaritu, nakoľko sa vyskytujú blesky kladnej aj zápornej polarít. Aktívne bleskozvody vhodné pre ochranu veterných elektrární sú na obr. 5 a podrobnejšie sú popísané v [6], [7]. Záver a diskusia

Zásahy blesku do veterných elektrární a ich následky vyžadujú hľadanie účinných opatrení na elimináciu nepriaznivých dôsledkov. Z prevádzky veterných elektrární ako aj z výskumu v relevantnej oblasti vyplývajú nasledovné skutočnosti:

1. Nové lopatky bez vodivých častí nie sú zasiahnuté bleskom kým sa na ich povrchu nevytvorí vrstva znečistenia.
2. Kontakty vytvárané na koncoch listov sú nedostatočné a poškodzované aj prúdmi najčastejších bleskov s amplitúdou 10 kA.
3. Bezpečné zvedenie prúdu blesku bleskozvodom vo vnútri, alebo aj na povrchu lopatky, cez pohyblivé kontakty rotora a strojovne je veľmi problematické.

4. Podobne aj bezpečné zvedenie bleskov s prúdmi 200 a viac kA prostredníctvom lopatky je problematické.
5. Za najúčinnjšiu ochranu možno považovať vzdialený bleskozvod umiestnený na stožiaroch v takej výške, aby veterná elektrárňa bola v zóne ochrany [7].
6. Pre bleskozvod na strojovni veternej elektrárne ako aj vzdialený bleskozvod by bolo optimálnejšie použitie aktívneho bleskozvodu s rozlišovaním polarít [6–8].
7. Dôležité je analyzovať lokalizáciu veterných elektrární z hľadiska pôsobenia prevádzkových činiteľov a výskytu atmosférickej elektriny.

Na základe štatistík a analýzy porúch bolo zistené, že okrem poškodenia lopatiek bleskom dochádza aj k poškodeniu riadiaceho systému (51 %), generátora a jeho príslušenstvo (20 %). V týchto prípadoch má poškodenie taký rozsah, že oprava agregátu je neefektívna. Ochrana pomocou vzdialených bleskozvodov je účinná, ale aj nákladná.

Riešenie tohto problému je možné dosiahnuť:

- a) výberom lokality,
- b) optimálnym bleskozvodným systémom,
- c) použitím prepäťových ochrán,
- d) prijatím prevádzkových opatrení.

Problematikou ochrany veterných elektrární pred účinkami atmosférickej elektriny je potrebné venovať zvýšenú pozornosť, aby prevádzka tohto obnoviteľného zdroja nebola negatívne ovplyvňovaná.

Poďakovanie

Autori vyjadrujú poďakovanie Agentúre na podporu výskumu a vývoja za podporenie tejto práce v rámci projektu APVV-20-006005 a Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA-1/0368/09. Vďaka za podporu projektu VaV operačného programu, Centrum excelentnosti výkonových elektronických systémov a materiálov pre ich komponenty. Projekt je financovaný zo zdrojov ES, ERDF - Európsky fond regionálneho rozvoja.

Literatúra

- [1] J. Kutáč, *Nový pripravovaný súbor evropských norem v teorii a praxi, EN / IEC 62305, Ochrana před bleskem*. Ostrava: SPBI, 2006. 117 s. ISBN 80-86634-80-9.
- [2] P. Hasse, *Überspannungsschutz von Niederspannungsanlagen, Betrieb elektronischer Geräte auch bei direkten Blitzeinschlägen*. 4. vyd. Kolín, SRN: TÜV-Verlag, 1998. 320 s. ISBN 3-8249-0474-8.
- [3] J. Balog et al., "Inštalácia systému vonkajšej ochrany pred bleskom, odpovedajúca voľbe stupňa ochrany", 2. časť in *Elektrotechnický magazín ETM*, vol. 18, no. 5, 2008, pp. 61–63, ISSN 1210-5422.
- [4] J. Burant, *Blesk a přepětí, Systémová řešení ochrán*. Praha: FFC Public s. r. o., 2006. 256 s. ISBN 80-86534-10-3.
- [5] F. M. Larsen, New Lightning Qualification Test Procedure for Large Wind Turbine Blade [online]. http://www.lmglassfiber.com/Flemming_Moeller.
- [6] Saint Elme Active 2D [online]. http://www.zinkovo.sk/vyroba_bleskozvodov/aktivne_bleskozvody/art150/
- [7] Indelec lightning protection product [online]. Wind turbine plant on Nadachi. <http://www.nps.com.au/media/products/>
- [8] M. Krempa, Pulzar: Aktivny bleskozvod s včasnou emisiou výboja [online]. Košice: Nessy image, 1998. <<http://www.el-projekt.sk/pulsar.html>>.
- [9] L. Řihánek, J. Postránecký, *Bouřky a ochrana před bleskem*. Praha: ČSAV, 1957. 507 s.

Autori: Bystrík Dolník, Juraj Kurimský, Ján Tkáč, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, bystrik.dolnik@tuke.sk, juraj.kurimsky@tuke.sk

Jozef Kováčik

VUJE, a.s. Trnava

Monitoring neštandardných javov v napät'ových systémoch rozvodní ES SR

Abstrakt: Príspevok pojednáva o on-line monitorovaní neštandardných javov v napät'ových systémoch rozvodní. Popísaný je spôsob monitoringu, zariadenie k tomuto účelu využité. Uvedené sú záznamy rôznych registrovaných neštandardných udalostí z prevádzky elektrických staníc.

Úvod

Aktuálny technický stav inštalovaných prvkov v elektrických staniach je neustále konfrontovaný rôznymi prevádzkovými stavmi napät'ových systémov. Významným spôsobom je ovplyvnená zvyšková životnosť jednotlivých prvkov v elektrických staniach najmä neštandardnými javmi ktoré sa vyskytujú v napät'ových systémoch rozvodní. K takýmto javom patria najmä rôzne prepätia spojené v niektorých prípadoch s extrémnymi napät'ovými namáhaniami izolačných systémov ako aj skraty spojené s dynamickými silovými účinkami pôsobiacimi na inštalované prvky v elektrických staniach.

Definícia prepätia

Normy definujú prepätie ako napätie, ktoré je vyššie ako najvyššie prevádzkové. Krátkodobé impulzné prepätia (transienty) trvajú niekoľko desiatok nanosekúnd až niekoľko milisekúnd a sú väčšinou spôsobené výbojmi blesku a spínacími pochodmi. Blesk je osobitný prípad prúdu s vysokou frekvenciou, intenzitou niekoľko desiatok kiloampér a napätím niekoľko megavoltov.

Prepätia majú najčastejšie charakter prechodných dejov, ktoré môžeme rozdeliť na:

- slabo tlmené prepätia – relatívne dlho trvajúce prepätia (až niekoľko sekúnd) v dôsledku skratov, ferorezonančných javov, nelineárnych efektov; v niektorých prípadoch môže ísť aj o netlmené tzv. oscilačné prepätia
- silno tlmené prepätia - trvajú veľmi krátky čas rádovo mikrosekundy, desiatky mikrosekúnd napr. atmosférické prepätia, spínacie prepätia.

prúdu daný vysokou energiou uvoľnenou v krátkom okamihu. Nebezpečné sú aj prepätia indukované pri blízkejších úderoch blesku, ktoré sa šíria vzduchom až do vzdialenosti 2 km, po vedeniach až niekoľko km.

Spínacie prepätie vzniká pri spínaní a odpojovaní (v obvodoch s napätím od 1kV do 750kV) veľkých odporových, indukčných a kapacitných záťaží a pri skratoch. Tieto impulzy, ktorých maximálne hodnoty presahujú aj desiatky kV, sú po rozvodnej sieti prenášané cez kapacitné a indukčné väzby. Dopad majú podobný ako vzdialený úder blesku. Spínacie prepätia môže byť výrazne eliminované využitím tzv. riadeného synchronného spínania veľkých indukčných resp. kapacitných záťaží.

Funkcie a Popis zariadenia pre monitorovanie prepätí

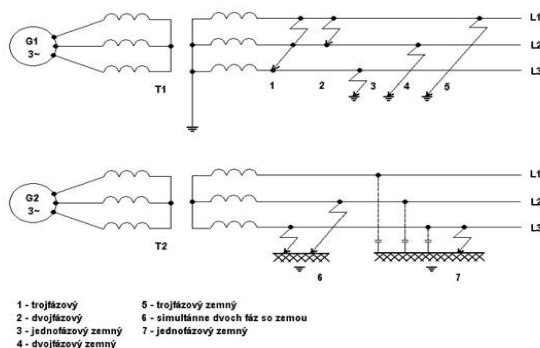
Monitor prepätia je určený pre záznam prechodových napät'ových javov v sieťach VN a VVN 6 až 400 kV. Tieto monitory môžu byť nasadené prechodne resp. trvale ve vývodoch 400kV, 220kV, 110kV pre záznam všetkých zapnutí a vypnutí vedení (sledovanie správnej funkcie vypínačov) resp. môžu byť využité pre zosnímanie spínacích procesov výkonových transformátorov. Monitor spoľahlivo zaznamenáva rôzne druhy prepätí, deformáciu krivky napätia a taktiež priebehy napätí pri skratoch. Monitor pracuje na princípe trvalého sledovania napätí na sekundárnych vinutiach prístrojových transformátorov napätí a spustenia záznamov časových priebehov napätí vo všetkých fázach v prípade výskytu odchýlky napätí voči neskreslenému sínusovému priebehu väčšom než 10%. Šírka pásma zaznamenávaných javov je obmedzená najmä prenosovými vlastnosťami prístrojových transformátorov napätí. Presný záznam prechodových javov je v pásme 50 - 5000 Hz. Pretože prenosové vlastnosti prístrojových transformátorov napätí sú známe, je možné zo záznamov odvodiť časové priebehy v šírke pásma 10 – 10 000 Hz, tzn. pre oblasť spínacích prepätí vypínačov vvn.

Monitor prepätia je postavený na báze zásuvných meracích dosiek v priemyslovom PC a je ovládaný príslušným programom. Výhodou tohto prevedenia je použitie štandardných hardwarových prostriedkov vo výhodných ekonomických reláciách, možnosť flexibilného rozšírenia systému v prípade požiadavky monitorovania väčšieho počtu veličín, ľahké napojenie do sietí LAN a WAN.

Pre účely záznamu prechodných dejov sa využívajú dve meracie karty, ich spustenie je odvodnené od spoločného spúšťačieho impulzu. Na prvú kartu sa zaznamenáva veľmi rýchla zložka prechodného deja počas doby 0.5s vysokou vzorkovacou rýchlosťou. Pomocou druhej karty sa zaznamenáva doznievajúca zložka prechodného deja alebo sled udalostí, ktoré sa vyskytnú v krátkom časovom rozmedzí (0-5s).

Pre záznam rýchlych javov je využitá meracia karta PCI.6123 od firmy National Instrument s ôsmymi nezávislými kanálmi so vzorkovacou rýchlosťou 500 kSample/s na jeden kanál a celkovou pamäťou 16MB. Pre

ZÁKLADNÉ MOŽNÉ DRUHY SKRATOV



Obr. 1. Druhy skratov.

Zatiaľ čo v sieťach s podzemnými káblami a v rozsiahlych priemyselných sieťach prevládajú spínacie prepätia, v prenosovej a v distribučných sieťach, ktoré sú prevažne realizované vonkajšími vedeniami, výrazne prevládajú tak počtom ako aj veľkosťou atmosférické prepätia. Najnebezpečnejšími sú atmosférické prepätia vyvolávané predovšetkým búrkami s výbojmi blesku. Pri priamom údere blesku do zariadenia je deštruktívny účinok bleskového

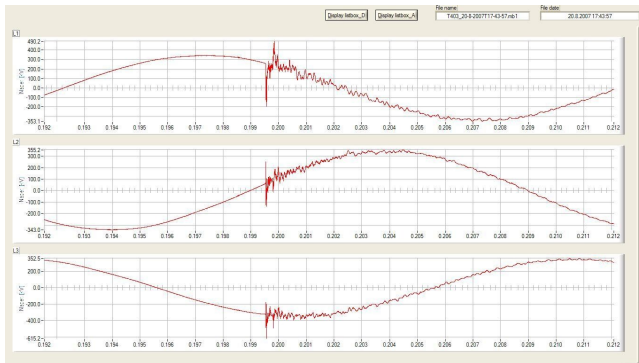
záznam pomalých prechodových dejov (rádovo desiatky sekúnd) a spoľahlivého záznamu sekvencie niekoľkých po sebe nasledujúcich udalostí, je súčasťou monitora prepätia zásuvná meracia karta NI 6023E firmy National Instruments. Obidve meracie karty pracujú paralelne, každá v samostatnej aplikácii. Obidve aplikácie si predávajú informácie cez systém DDE. Spustenie obidvoch meracích kariet zabezpečuje externé trigrovacie zariadenie, ktoré je vybavené procesorom DSP (digital signal processing). Podmienky spustenia sú kontrolované programom, ktorý je vypálený v pamäti EPROM. Trigger pracuje na princípe porovnávania sínusového signálu s frekvenciou siete s reálnymi priebehmi napätí. Akonáhle dôjde k okamžitej odchýlke meraného priebehu od ideálnej sínusovky (prepätie, pokles napätia, zmena fázy napätia), dôjde ku spusteniu záznamu.

Zaznamenané priebehy sú ukladané na pevný disk s veľkou kapacitou, takže nemôže dôjsť k jeho prepĺneniu. Priebehy je možné prenášať na diaľku pomocou internetového pripojenia, počítač monitora je server, do ktorého adresára je možné sa pripojiť z ľubovoľného počítača v sieti po zadaní vopred definovaného hesla. Pokiaľ nie je v mieste merania pripojenie na internet, je možnosť použiť mobilné pripojenie na internet pomocou GPRS.

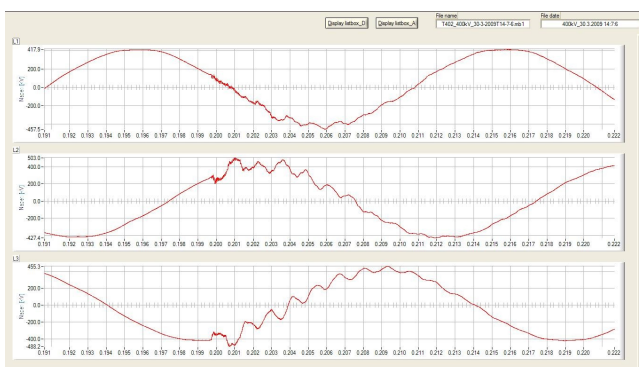
Zaznamenané neštandardné javy v napätových systémoch

Pri vyhodnocovaní informácií (počty registrovaných udalostí) získaných monitorovacím prístrojom odporúčame zohľadňovať najmä nasledujúce okolnosti:

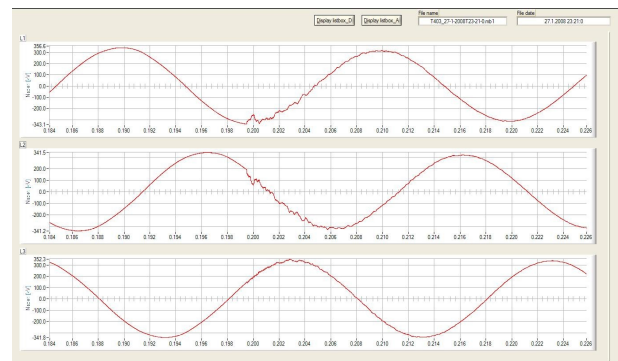
- doba sledovania - krátkodobé sledovanie, tzn. v dňoch alebo týždňoch má len veľmi obmedzenú vypovedaciu hodnotu
- výskyt búrkovej činnosti v blízkom okolí v sledovanom období
- miesto nasadenia monitorovacieho prístroja - prepätia prichádzajúce z externej rozvodnej siete sa vetvením a dĺžkou vedenia utlmujú, analogicky to platí vo vzťahu k zdrojom prepätia vo vnútornej rozvodnej sieti.



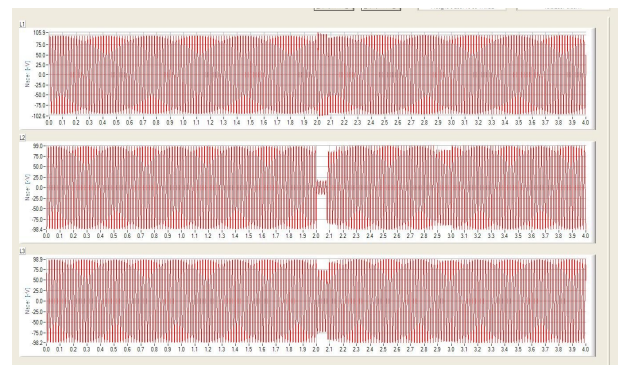
Obr. 2. Registrácia atmosférického prepätia - úder blesku do zemného lana vedenia 400kV.



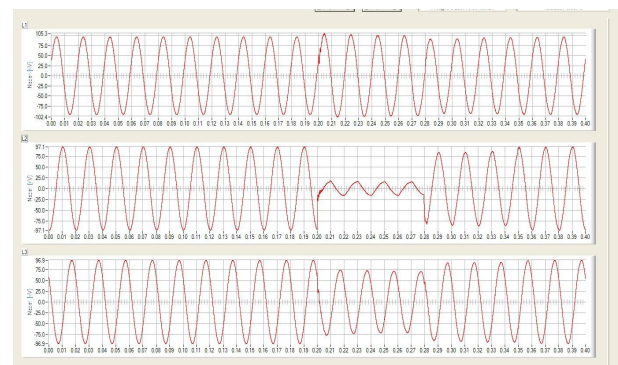
Obr. 3. Registrácia spínacieho prepätia - spínanie 400kV vývodu.



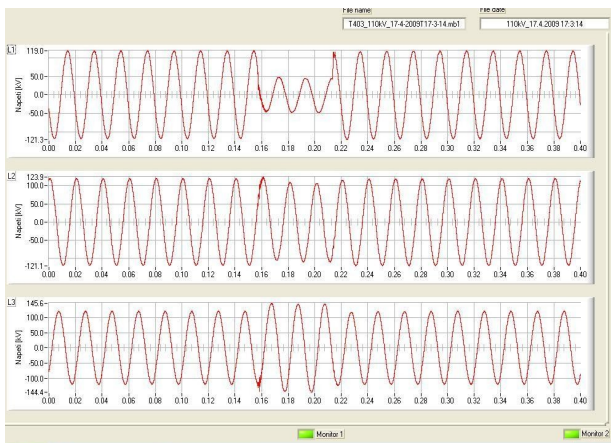
Obr. 4. Registrácia poruchového javu - vzdialený medzifázový skrat na 400kV vedení.



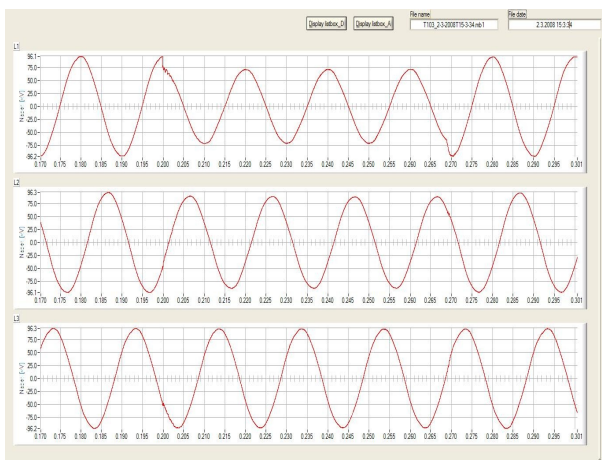
Obr. 5. Registrácia celkového priebehu poruchového javu - blízky skrat na 110kV vývode rozvodne.



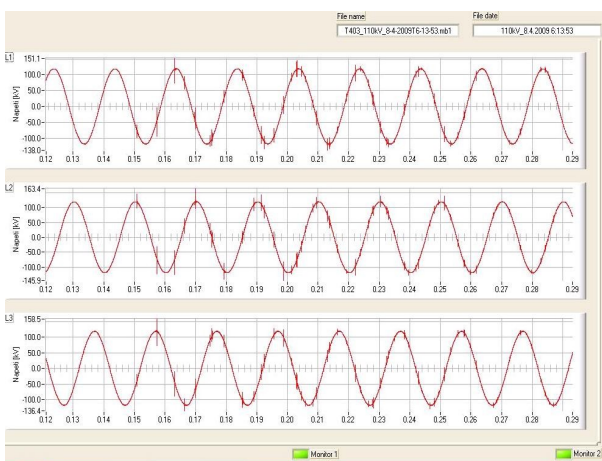
Obr. 6. Registrácia poruchového javu - blízky skrat na 110kV vývode rozvodne.



Obr. 7. Registrácia funkcie automatiky opätovného zapínania 110kV vývodu rozvodne.



Obr. 8. Registrácia poruchového javu - preskok medzi križujúcimi 110kV a 22kV vedeniami.



Obr. 9. Registrácia prepätí - manipulácia 400kV odpojovač.

Záver

Neštandardné javy vyskytujúce sa v napäťových systémoch rozvodní významným spôsobom majú vplyv na zvyškovú životnosť jednotlivých prvkov v elektrických staniách. K takýmto javom patria najmä rôzne prepätia s extrémnymi napäťovými namáhaniami izolačných systémov ako aj skraty s veľkými silovými dynamickými a tepelnými účinkami. Je preto trvalou výzvou eliminovať tieto nepriaznivé vplyvy na minimálnu možnú mieru.

Literatúra

- [1] Greenwood, A., "Electrical Transients in Power Systems", John Wiley&Sons, New York, ISBN 0-471-62058-0, 1991.
- [2] Gert, R.: Provozní přepětí v elektrizačních soustavách. Vydavatelství SNTL, Praha, 1994.
- [3] Hasman, T. (): Přepětí v elektroenergetických soustavách, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1997.
- [4] Chladný, V., Janíček, F., Beláň, A.: Digitálne ochrany v elektrizačných sústavách; Košice : Mercury - Smékal, 2003; ISBN: 80-89061-73-7..
- [5] Janíček, F., Arnold, A., [Gorta, Z.](#): Elektrické stanice. Bratislava : STU v Bratislave, 2001, ISBN: 80-227-1630-8.
- [6] Janíček, F., Ferenc, M., Kovács, Z., Mucha, M., Poljovka, P.: Optimization of Preventive Maintenance for Equipment in electrical Power Industry. In: Energomatika 2007 : Mezinárodní odborná a vědecká konference. Praha, CZ, 17. – 18. 4. 2007. – Praha : Wirelsscom, s.r.o., 2007. – ISBN 978-80-239-9076-8.
- [7] učinsky, G. S. a kol.: Technika vysokého napätia, Energoatomizdat, Sankt - Petersburg, 2003.
- [8] Marton, K.: Technika vysokých napätí, Vydavatelstvo ALFA, Bratislava, 1984.
- [9] Marton, K.: Ochrana elektrických zariadení vn, vvn, zvn pred prepätím, ELMAX-Zborník prednášok, Bratislava, 2002.
- [10] Reváková, D., [Eleschová, Ž.](#), Beláň, A.: Prechodné javy v elektrizačných sústavách (anglicky: Transient Phenomena in Power System); Bratislava : STU v Bratislave, 2008; ISBN: 978-80-227-2868-3.
- [11] Šandrik, P.: Technika vysokých napätí. STU, Bratislava, ISBN 80-227-2137-9, 2004.
- [12] Veverka, A.: Technika vysokých napätí, Vydavatelství SNTL, Praha, 1981.

AUTOR: Jozef Kováčik, VUJE, a.s. Trnava, Okružná 5, Trnava, SK 918 64, Slovenská Republika; kovacik@vuje.sk

Marek Pípa, Attila Kment

Modeling of Operational Conditions for Development of Measuring System for High Current on High Voltage Potential

Abstract: Contribution deals with modeling of a high voltage power line. The model may be effective by the further development of an automated measuring system based on Rogowski coil. On the one hand is necessary to verify the evolving measuring system's current transfer-characteristic density, on the other hand the model has to ensure safe in-service operation. One of possible solutions can be the galvanic separation of measuring unit from indication device.

Introduction

A workplace for verifying the current transfer-characteristic invariance in strong electric field is necessary for the needs of equipment research, which may be applicable in wide range of applied voltage.

As the level of applied voltage rises, the question of galvanic separation of measuring and indication units becomes essential for the functional safety.

Workplace build-up

Initially a reversely connected instrument current transformer in conjunction with a high-voltage transformer was considered as a source of high-current at high-voltage level. Because protection of the instrument current transformer was impossible it was necessary to design an alternative wiring.

The suggested design concept of workplace, more precisely its wiring schematic is shown in Figure 1.

Current transformer (type Elektrovod Jevišovice TS-24/6) marked by a letter T in Figure 1, is supplied by a booster B (type TuR Dresden REOGs 32/380-1M). A short-circuited middle-voltage cable (NA2XS(F)2Y 1x300RM/25 - 18/30 kV) was chosen as a secondary winding of the current transformer (R letter in Fig.1). The reason for this selection is, that the selected cable is insulated by its working insulation (30 kV AC between the cable core and cable shielding, stated by the manufacturer) from current transformer. The shielding at one end of the cable is grounded.

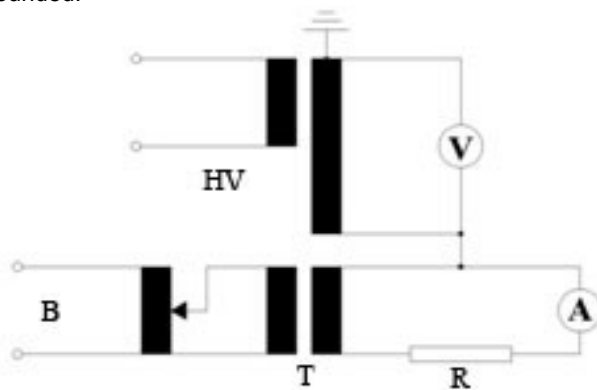


Figure 1. Circuit diagram of suggested workplace

The second end's shielding is cut, which warrants the voltage-protection of current transformer. Both ends of the skinned core of the cable are connected. At the connection is applied high-voltage from high voltage transformer HT (type TuR Dresden GPT 6/12,5). The current loading capacity of loop circuit is limited by the type of high-voltage cable used, more precisely by prescribed maximum core temperature. The maximum applicable voltage is defined by the cable insulation type.

The measuring point of designed workplace is the uninsulated core of applied high-voltage cable. Figure 2 shows the real connection of devices, when the measurement of current transfer-characteristic consistency took place.[1] At this point, no high voltage was applied.

To demonstrate the functionality of the research equipment according to its current range a series of comparative measurements

were accomplished by using ammeter clamp (Metra PK-310) simultaneously with the new measuring system with Rogowski coil. The applied current range was chosen by respecting the short-time current loading capacity of selected circuit, and the maximum ranges of measuring devices. A maximum current value achieved during this test was 2kA. The temperature of cable core was continually controlled by a digital thermometer to ensure, that the maximum allowed overload temperature was not exceeded [2].

The observed difference between both ammeters is not bigger than 2 % from the range. The ammeter clamp and the current sensor cable, a flexible inductive coil, are shown in the upper detail of Figure 2. The lower detail shows the electronic box of evolving precision flexible AC current probe based on Rogowski principle.

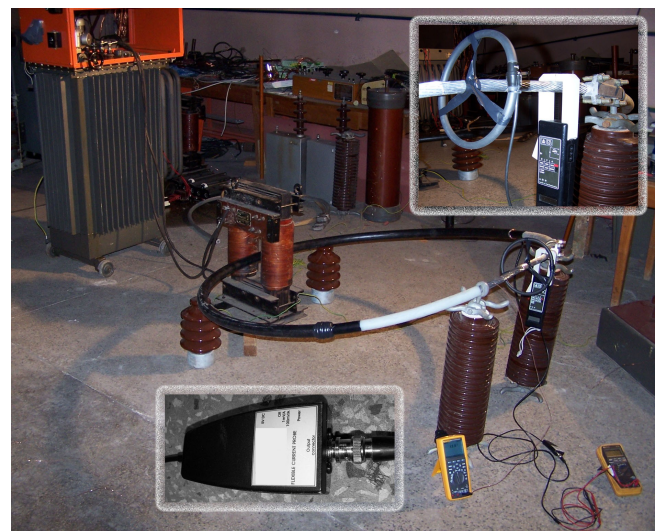


Figure 2. Workplace set up with details

High-voltage measurements

After the verification of scheme's functionality from the view of current supply, applying of high-voltage followed. The maximum allowed voltage of the measuring device in touch with a non-insulated conductor is 600 V. To reach a higher value, the current sensor cable had to be taken away from the surface of non-insulated cable core. The maximum applied voltage was 3 kV, because in current stage of development the producer of current sensor cable states this voltage as maximum allowed value. Figure 3 shows the

arrangement used by voltage tests. The voltage was measured by a 30 kV voltage probe in conjunction with a digital multimeter (HP 947A).

According to the ambition of producer in regard to increase the maximum allowed in-service voltage, a series of measurement is under consideration in wider range of applied voltage, ideally at all voltage-levels of power system. Then an upgrade of existing, or a new workplace design will be necessary.

If the in-service voltage-increase of evolving equipment is under consideration, a galvanic separation between measuring and indication or evaluation units seems to be a necessity.

One of possible solution may be usage of two optical cables. One of them could be used to supply the media converter and the electronic box, which needs a voltage of 3V for reliable operation, and the other one could assure data communication. Usage of regular, on-the-market available optical cables is considered. The problem is that the producer of mentioned optical cables does not state the recommended intensity of electric field, where these cables are able to operate properly.



Figure 3. High-voltage measurement

Deploying a research in this field may provide some valuable information about the selected optical cables. Primarily was decided to verify the simplest arrangement of two equally long optical cables with their terminals on (shown in Figure 4).

Before providing withstand test by applied AC high-voltage, the insulation resistance measurement took place by using the MEGGER S1-1052 insulation tester. The resistance evaluated by applied 10 kV DC was >500 G Ω . Breakdown voltage of 1m long optical cable pair was determined by 5 measurements to be 360 kV in relation to the earth under normal atmospheric conditions. Insulation resistance measurements ended with the same result as those carried out before withstand testing. This fact proves that either within the cable or on the surface of selected optical cable no conductive path was formed.

Specimen was during withstanding tests damaged at their terminal sides as illustrates Figure 5.

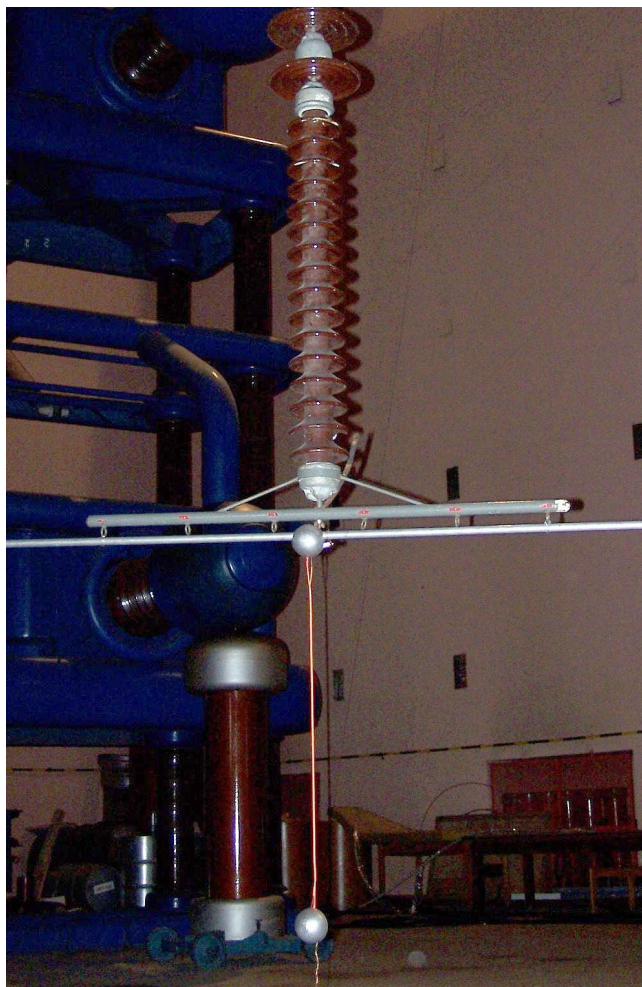


Figure 4. Withstand voltage test

Presented results were obtained by using new 1m long optical cables as specimen. In the future measurements under different atmospheric conditions, different arrangements of specimen, long-time aging test and leakage current measurement will be performed. These tests are needed to accomplish for different kinds and lengths of optical cables. A series of new specimen is already prepared to be tested in our laboratory. The workplace for providing long-time aging tests is prepared as well.



Figure 5. Damaged terminals of optical cables

Conclusion

The main aim of the designed workplace is to enable to performing of necessary tests at the evolving measuring system by applied high current and voltage simultaneously. It is also important to develop a galvanic separation between components of measurement system at high-voltage level and at the ground potential. This separation may be carried out by using desirable optical cables. Attention is also given to the future problem-solving approach of presented research.

Acknowledgment

Contribution arose during the work on project APVV-0546-07.

References

- [1] STN EN 60060-2 High voltage test techniques – Part 2: Measuring systems
- [2] STN EN 60865-1 Short-circuit currents. Calculation of effects. Definitions and calculation methods.

Bratislava, Department of Electrical Power Engineering, Ilkovičova 3, Bratislava, SK 81219, Slovak Republic, marek.pipa@stuba.sk

Attila Kment, Faculty of electrical engineering and information technology of Slovak university of Technology in Bratislava, Department of Electrical Power Engineering, Ilkovičova 3, Bratislava, SK 81219, Slovak Republic, attila.kment@stuba.sk

AUTHORS: Marek Pípa, Faculty of electrical engineering and information technology of Slovak university of Technology in

Jaroslav Lelák, Attila Kment, Michal Váry

Porovnanie prejavov čiastkových výbojov na vysokonapäťovom kábli so spojkou pomocou vysokonapäťových meraní

Abstrakt: V príspevku sa venujeme možnosti lokalizácie miesta vzniku čiastkových výbojov na 22 kV systéme kábel – spojka – kábel pomocou konvenčne používaných vysokonapäťových meraní. Na dodanej vzorke s dĺžkou približne sedem metrov bolo miesto, kde podľa profylaktického merania mali byť na kábli lokalizované čiastkové výboje. Miesto čiastkových výbojov (č.v.) bolo reflektometrickou metódou určené v tesnej blízkosti spojky. V príspevku porovnáваме výsledky jednotlivých konvenčných vysokonapäťových meraní na celej vzorke a po rozdelení na časti, pričom porovnáваме metódy z hľadiska výpovede schopnosti a najmä možnosti odhaliť čiastkové výboje danej intenzity.

Úvod

Počas pravidelných, resp. aj sporadických profylaktických meraní na kábloch pre napätie 22 kV sa môže na testovanom kábli vykonávať aj meranie čiastkových výbojov. Miesto vzniku čiastkových výbojov je možné lokalizovať najčastejšie pomocou reflektometrického merania napr. metódou OWTS. Pri celkových dĺžkach káblov približne stovky metrov, je štandardná presnosť lokalizácie miesta poruchy jednotky metrov. Presnosť lokalizácie je daná homogenitou vlnovej impedancie, ale najmä stanovením korektnej rýchlosti šírenia. V prípade existencie čiastkových na káblovej trase, sa v závislosti od dôležitosti káblovej trasy, miesto s lokalizovanými čiastkovými výbojmi nahradí novým káblom s použitím spojky, alebo sa celá káblová trasa nahradí novým káblom.

Na vzorke kábla dodanej do nášho laboratória, s dĺžkou cca. 7 metrov, ktorá obsahovala približne v strede jednu spojku, sme vykonali experimenty zamerané na určenie miesta vzniku čiastkových výbojov. Úlohou bolo lokalizovať miesto vzniku č.v. na kábli a na lokalizovanom mieste vykonať analýzu zameranú na príčinu tohto stavu zosieteného polyetylénu v mieste vzniku výbojov [3].

Cieľom práce bolo nájsť miesto poruchy a stanoviť, či išlo o poruchu kábla výrobného charakteru, resp. o poruchu kábla, ktorá bola spôsobená jeho montážou, prevádzkovým poškodením, alebo degradáciou [1,2].

Na kábli je v mieste poruchy možné vykonať mikroskopickú analýzu izolácie narezaním vzorky na tenkú skrutkovicu s následným zafarbením materiálu izolácie pomocou vhodného farbiva. Analýzou sa dá zistiť, či ide o poruchu spôsobenú nejakou nečistotou, prasklinou, vodivým hrotom, resp. inou príčinou [3]. Podľa toho sa môže prevádzkovateľ rozhodnúť, či vykoná výmenu celého kábla, alebo len opravu.

Prvotnou úlohou je však nájsť najst' vadné miesto. Tu nám pre jednoznačné určenie miesta vzniku čiastkových výbojov nepomohol ani ultrazvukový hľadač čiastkových výbojov. Preto sme pristúpili k všetkým dostupným elektrickým meraniam, ktorých výsledky tu popíšeme.

Vykonané experimenty

Po vizuálnej obhliadke, pri ktorej nebolo na dodanej vzorke zistené žiadne významnejšie mechanické poškodenie, sme pristúpili k elektrickým meraniam.

Vzorka ako celok bola najskôr podrobená napäťovej skúške postupne a zvyšujúcim napätím, pri ktorom sme sa pokúšali nájsť miesto výbojov ultrazvukovým hľadačom čiastkových výbojov.

Pri tomto, ale aj pri všetkých nasledujúcich experimentoch, bolo pre zamedzenie výbojov na konci kábla potrebné realizovať jeho korektné ukončenie.

Ukončenie, ktoré by neovplyvňovalo vysokonapäťové merania. S ohľadom na naše potreby neprichádzali do úvahy komerčne vyrábané koncovky, tak z pohľadu ceny,

pracnosti montáže, ale aj z dôvodu významného skrátenia vzorky po delení.

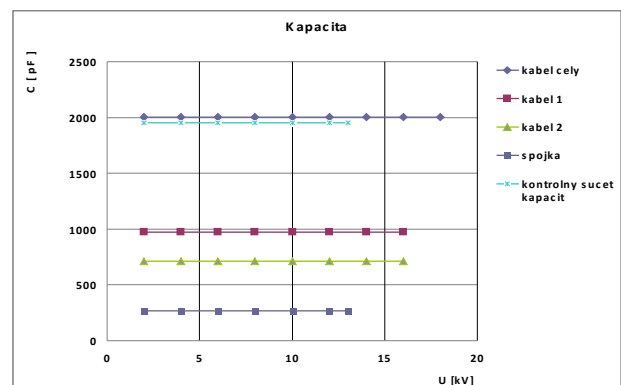
Preto sme sa rozhodli pre použitie deflektorového ukončenia tienenia kábla s ponorením do silikónového oleja. Káblovým orezávačom sme z povrchu izolácie žíl v dostatočnej dĺžke odstránili polovodivú vrstvu. V dielňach sme dali zhotoviť deflektor na riadenie elektrického poľa pri zakončení polovodivého tienenia. Deflektor a mosadze mal vnútorný tvar dosadajúci na vonkajšiu polovodivú vrstvu kábla. S ohľadom na problémy so zhotovenými deflektormi z hľadiska nerovnakého priemeru káblov, sme zabezpečili a ďalej používali deflektory, používaný pre olejové vysokonapäťové káble.

Na konce jadier sme pripevnili guľové plochy, ktoré zabraňovali vzniku výbojov na konci jadier pri vyššej intenzite elektrického poľa.

Po vykonaní všetkých vstupných meraní, t.j. po meraní napäťových závislostí kapacity a stratového činiteľa, izolačného odporu a čiastkových výbojov, bola dodaná vzorka rozdelená na tri časti, konkrétne na: Kábel 1, Kábel 2 a Spojku.

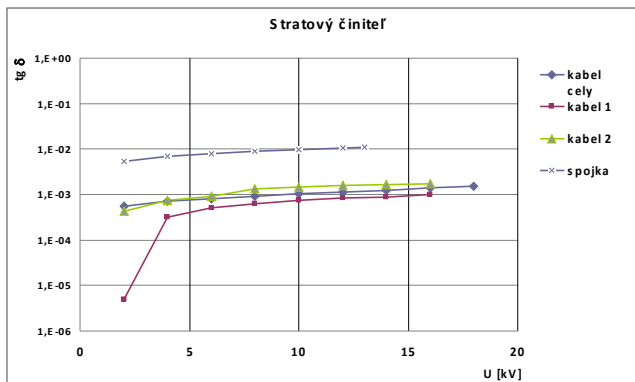
Cieľom delenia, ako sme už spomenuli, bolo nájsť oblasť, ktorá by mala odlišné dielektrické vlastnosti, t.j. na ktorej by sa čiastkové výboje prejavili. Na tom mieste kábla by sa mohla nachádzať porucha.

Na meranie napäťovej závislosti kapacity a stratového činiteľa bol použitý vysokonapäťový Scheringov mostík firmy Tettex. Výsledky sú uvedené na obr. 1 a 2



Obr. 1 Napäťová závislosť kapacity celej vzorky a po delení na tri časti.

Na obr. 1 je uvedený priebeh napäťovej závislosti kapacity na celej vzorke a na vzorke po delení a aj kontrolný súčet nameraných kapacít po delení. Hodnota kontrolného súčtu je s ohľadom na nutnosť realizácie koncoviek menšia, ako celá vzorka. Je to spôsobené nižšou aktívnou dĺžkou vzoriek. Vzorky po rozdelení majú s ohľadom na skrátenie aktívnej dĺžky nižšiu kapacitu ako bola pôvodná pred delením.

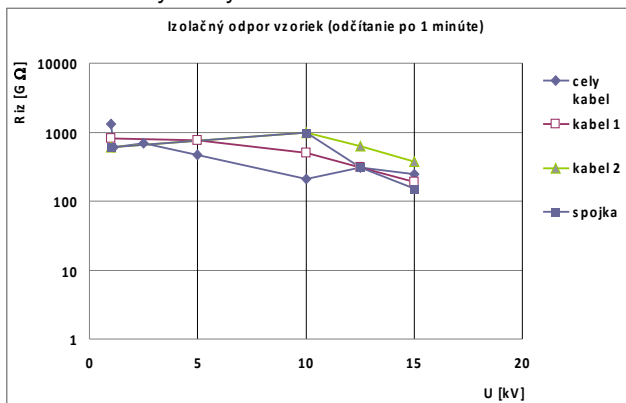


Obr. 2 Napätová závislosť izolačného odporu

Na obr. 2 je uvedená napätová závislosť stratového činiteľa toho istého systému, t.j. celej dodanej vzorky – kábel celý a po delení na kábel 1 a kábel 2.

Ako vidieť z obr. 2, najhoršou časťou v rámci dodanej vzorky je spojka. Tá vykazuje najvyššiu hodnotu stratového činiteľa. Napätové závislosti sú s ohľadom na logaritmické stupnice použité v zobrazenej závislosti čiastočne opticky potlačené.

Meranie izolačného odporu bolo na vzorkách vykonané pomocou prístroja BAUR 50 kV a Megger S1-1052 10 kV. Usporiadanie bolo zhodné ako pre merania kapacity a stratového činiteľa, samozrejme bez väzobného kondenzátora. Výsledky sú uvedené na obr. 3.



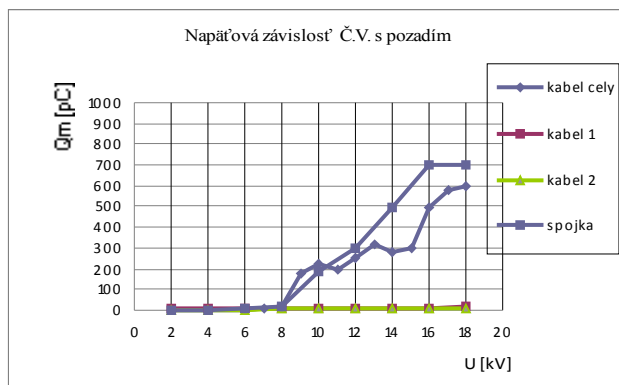
Obr. 3 Napätová závislosť izolačného odporu

Posledným meraním na každej sade vzoriek bolo meranie napätovej závislosti čiastkových výbojov. Meracia aparátúra pre meranie čiastkových výbojov pozostávala z Analógového merača výbojovej činnosti Tettex 9124, zdroja vysokého napätia, väzobného kondenzátora 1000 pC, väzobnej impedancie AKV 573 - HAEFELY TRENCH a ďalšieho príslušenstva.

Namerané napätové závislosti maximálneho zdanlivého náboja Q_m sú uvedené na nasledujúcej grafickej závislosti obr. 4.

Vyhodnotenie meraní

Ako je zrejmé z uvedených grafických závislostí obr. 1 až 4, najvýznamnejšie prejavy čiastkových výbojov sú identifikovateľné len z merača čiastkových výbojov. Je pravdou, že priebehy sú zobrazením v logaritmickom zobrazení sústave čiastočne potlačené, ale napriek tomu sú nárasty napr. stratového činiteľa pozorovateľné. Tu je pomerne ťažké vysvetliť prvý nameraný bod na kábli 1, ktorý by mohol byť takýmto spôsobom nameraný pre veľmi nízku hodnotu užitočného signálu na Scheringovom mostíku. Tým mohla vzniknúť pri tomto bode významná chyba merania.

Obr. 4 Napätová závislosť Q_m maximálneho zdanlivého napätia na vzorke celý kábel a rozdelený kábel na kábel 1, kábel 2 a spojku

Napriek známym teóriám o vzraste $\tan \delta$ sú prejavy čiastkových výbojov (presnejšie Q_m) na úrovni 300 až 700 pC veľmi ťažko identifikovateľné pomocou merania napätovej závislosti stratového činiteľa. Ešte horšia je situácia pri meraní izolačného odporu, alebo kapacity.

Záver

Záverom je možné konštatovať, že základe meraní bolo zistené, že na dodanej vzorke bola miestom vzniku čiastkových výbojov spojka. Pri diagnostikovaní prejavov výbojovej činnosti na vzorke a vzorke po delení možno konštatovať, že najspoločnejšou metódou zistenia poruchy bolo práve priame merania čiastkových výbojov. Iné metódy nemusia existenciu čiastkových výbojov vôbec zaznamenať.

Čiastkové výboje na spojke svedčia pravdepodobne o vadnej montáži spojky, prípadne o nejakej materiálnej poruche na spojke. Tu poznamenávame, že technické podmienky pre spojky na káble pre napätie 22 kV pripúšťajú podľa VDE 0220 a v zmysle CENELEC HD 628.S1 a HD 629.1 S1 pri napätí 22 kV maximálne hodnoty čiastkových výbojov do 10 pC.

Výrobcom stredno-napätových káblov (22 kV- káblov) však v rámci výstupnej kontroly pripúšťajú maximálne hodnoty zdanlivého náboja do 2 pC.

Na záver ešte poznamenávame, že napriek existencii čiastkových výbojov v spojke, všetky káble aj spojka vydržali skúšku priloženým napätím 55 kV počas 10 minút bez prerazu.

Literatúra

- [1] Zališ, K.: Evaluation of Partial Discharge Measurement. In: Proceedings of the VII Symposium (EUI '99). Zakopane (Polsko), 21.-23.10.1999, pp. 496-503.
- [2] Cimbal, R.: Starnutie vysokonapätových izolačných systémov. TU v Košiciach, 2007, ISBN 978-80-8073-904-1
- [3] Kolcunová I., Kurimský J.: Čiastkové výboje v izolačnom systéme XPE káblov. In.: Proc 16th Int. Conf. DISEE 2006, ISBN 80-227-2470-X pp. 92 - 95

AUTORI: Doc. Ing. Jaroslav Leľák, CSc. Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, 812 19 Bratislava, Ilkovičova 3 Slovenská Republika, Jaroslav.lelak@stuba.sk

Ing. Attila Kment, PhD., Ing. Michal Váry, PhD. Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, 812 19 Bratislava, Ilkovičova 3 Slovenská Republika,

Práca vznikla za podpory Grantu VEGA č. 1/4086/07

Attila Kment, Jaroslav LeLák, Michal Váry

Vyhodnotenie fázového rozloženia čiastkových výbojov na vysokonapäťovom kábli so spojkou

Abstrakt: V príspevku sa venujeme jednej z možností lokalizácie miesta vzniku čiastkových výbojov na 22 kV systéme kábel – spojka – kábel. Na vzorke kábla s dĺžkou cca. sedem metrov bolo potrebné odhaliť miesto s poruchou. Zisteným miestom vzniku čiastkových výbojov (ČV) bolo blízke okolie spojky. V príspevku sa zameriame na vyhodnotenie fázového rozloženia zdanlivého náboja výbojovej činnosti porovnaním tvaru a vytypovaných štatistických operátorov.

Úvod

Počas profylaktických meraní na vysokonapäťových kábloch jedným zo súboru meraní môže byť aj meranie ČV. Na lokalizáciu pôvodu výbojovej aktivity sa osvedčili merania metódou OWTS. Presnosť lokalizácie Č.V. je daná homogenitou vlnovej impedancie, ale najmä stanovením korektnej rýchlosti šírenia.

Na dodanej, cca. 7 m dlhej vzorke kábla so spojkou v strede, sme vykonali experimenty zamerané na určenie miesta vzniku čiastkových výbojov. Cieľom bolo stanoviť pôvod poruchy, či je to výrobného charakteru, alebo bola spôsobená montážou, resp. prevádzkovým poškodením.

Diagnostické merania

Pri vizuálnej obhliadke na vzorke neboli zistené žiadne významnejšie znaky mechanického poškodenia, pristúpili sme preto k elektrickým meraniam.

Pre zamedzenie výbojov na koncoch kábla bolo potrebné realizovať korektné ukončenie, ktoré neovplyvňovalo merania. Do úvahy neprichádzali komerčne vyrábané káblivé koncovky z pohľadu ceny, prácnosti montáže. Rozhodli sme sa použiť deflektorové ukončenia tienenia kábla ponorené do silikónového oleja. Na konce jadier sme pripevnili guľové plochy zabraňujúce vzniku výbojov pri vysokej intenzite elektrického poľa.

Vzorka, ako celok, bola najskôr podrobená skúške postupne sa zvyšujúcim napätím, pri ktorom sme sa pokúšali lokalizovať výboje ultrazvukovým hľadačom čiastkových výbojov.

Po meraniach napäťových závislostí kapacity, stratového činiteľa, čiastkových výbojov a izolačného odporu bola vzorka rozdelená na tri časti: kábel 1, kábel 2 a spojku, na ktorých sme realizovali rovnakú postupnosť meraní. Cieľom bolo nájsť oblasť, ktorá mala odlišné dielektrické vlastnosti, na základe čoho sa porucha lokalizovala.

Meranie napäťovej závislosti fázového rozloženia zdanlivého náboja výbojovej činnosti

Galvanická metóda je normou odporúčaná metóda na sledovanie stavu izolačných systémov zariadení vn a vvn. Patrí ku globálnym metódam merania čiastkových výbojov. Je založená na priamom snímaní prúdových impulzov čiastkových výbojov zo snímacej impedancie. Norma STN EN 60270 odporúča použitie zdanlivého náboja q , ako meranej veličiny. Ostatné veličiny sa používajú v špeciálnych prípadoch[1].

Meracia aparatúra pre meranie ČV pozostávala z analógového merača výbojovej činnosti Tettex 9124, zdroja vysokého napätia, väzbového kondenzátora 1000 pC, väzobnej impedancie AKV 573 - HAEFELY TRENCH, vysokonapäťového kábla, externého kalibrátora KAL 451 TT- HAEFELY TRENCH.

Pre potreby následného vyhodnocovania nameraných výsledkov bolo potrebné namerané údaje digitalizovať a vytvoriť tak fázové rozloženie zdanlivého náboja. Pomocou dvoch tienených káblov s koncovkami BNC o

impedancii 50 Ω , bolo realizované prepojenie analógového meracieho systému s digitálnym pamäťovým osciloskopom HP54522A. Jeden vstupný kanál digitálneho osciloskopu slúžil na synchronizáciu dát, kým druhý je analógovým vstupom meraného napätia. Pomocou USB kábla je osciloskop prepojený s počítačom, ktorý zaznamenal fázové rozloženie zdanlivého náboja. Pracovný priestor pri realizácii meraní napäťovej závislosti fázového rozloženia zdanlivého náboja uvádzame pre ilustráciu na obr. 1.



Obr. 1 Pracovný priestor pri meraní napäťovej závislosti fázového rozloženia zdanlivého náboja ČV

Aplikácia galvanickej metódy merania za použitia analógového merača čiastkových výbojov v kombinácii s opísaným zariadením na digitalizáciu nameraného priebehu a potrebného softvérového vybavenia vytvára vhodné podmienky na vytvorenie digitálneho záznamu. Aby záznam bol dostatočne výpovedeschný, a meranie sa zbytočne nepredlžovalo, je vhodné si zvoliť 5000 meraných bodov a 30 nasnímaných periód za predpokladu, že vonkajšie rušenie je nemenné [2].

Na tomto mieste je potrebné poznamenať, že merania boli vykonávané mimo tienenej kabíny, pretože rozmery vzoriek neumožňovali (najmä pri celej vzorke s dĺžkou takmer 7 metrov) ich umiestnenie v kabíne. Pozadie počas väčšiny meraní bolo na úrovni do 3 pC, čo bolo pre dané meranie vyhovujúce. Len v jednom prípade bolo pozadie až 10 pC.

Záznam a vyhodnotenie meraní

Softvér vyvinutý v grafickom programovacom prostredí Agilent Visual Engineering Environment 7.0 ukladal namerané údaje kódovane do súboru s príponou .wf (waveform) z dôvodu zrýchlenia procesu a úspory operačnej pamäte. Na ich vyhodnotenie slúžil ďalší softvér

vytvorený v tom istom grafickom prostredí, ktorý umožňoval ako grafické, tak i štatistické spracovanie dát.

Optické porovnanie obrazov výbojovej činnosti (fázových rozložení zdanlivého náboja), by bolo málo presvedčivé bez následného štatistického spracovania. Na tento účel boli vybrané niektoré štatistické ukazovatele, resp. operátory, pomocou ktorých sa dá vykonať analýza nameraných veličín. Aplikácia výpočtovej techniky umožňuje vypočítať jednotlivé štatistické operátory, čo umožňuje analyzovať aj komplexnejšie deje. Začalo sa s uvažovaním diskretnej distribučnej funkcie $f(x)$ [3], definovanej podľa vzorca (1).

$f(x) = P(X = q_i) = p_i$	(1)
---------------------------	-----

kde P je pravdepodobnosť,
 p_i – pravdepodobnosť výskytu zdanlivého náboja q_i .

Možno definovať nasledujúce momenty rozdelenia:

- prvý moment μ , čo je stredná hodnota rozdelenia,
- druhý moment σ^2 , alebo variancia rozdelenia,
- tretí moment šikmost' Sk , je ukazovateľ asymetrie rozdelenia v porovnaní k normálnemu rozdeleniu, a definuje sa ako :

$Sk = \frac{\sum (q_i - \mu)^3 \cdot p_i}{\sigma^3}$	(2)
--	-----

- štvrtý moment, ostrosť Ku – ukazovateľ ostrosti rozdelenia v porovnaní k normálnemu rozdeleniu, $k=4, a=\mu$.

$Ku = \frac{\sum (q_i - \mu)^4 \cdot p_i}{\sigma^4} - 3$	(3)
--	-----

Šikmost' vyjadruje asymetriu rozdelenia, má nulovú hodnotu, ak sa jedná o symetrické rozdelenie, kladné je ak rozdelenie je zľava asymetrické a záporné v prípade asymetrie sprava.

Ostrosť má nulovú hodnotu v prípade normálneho rozdelenia, pre rozdelenie ostrejšie ako normálne má hodnotu kladnú, a keď rozdelenie je tupšie, rovnejšie je hodnota tohto operátora záporná[4].

Výboje počas periódy sa objavujú v dvoch sekvenciách, resp. postupnostiach. Pre obe polaroty periódy (polperiódy), môže mať výbojová činnosť iný charakter. Z tohto dôvodu sa veličiny $H_{qn}(\varphi)$ a $H_n(\varphi)$ rozdelili na $H_{qn}(\varphi)^+$ a $H_n(\varphi)^+$, pre kladnú polperiódu, a $H_{qn}(\varphi)^-$, resp. $H_n(\varphi)^-$ pre zápornú. Je zrejmé, že potom jednotlivé časti priebehu sú charakterizované Sk^+ a Sk^- a tiež Ku^+ a Ku^- . Okrem toho sú rozdelenia $H_{qn}(\varphi)$ a $H_n(\varphi)$ ešte opisované strednou hodnotou a počiatočnou fázou. Pre tento účel sa definovali tieto veličiny:

- výbojová asymetria Q – je podiel strednej hodnoty súčtového náboja čiastkových výbojov v kladnej a zápornej polperióde,

$Q = \frac{\frac{Q_s^-}{N_q^-}}{\frac{Q_s^+}{N_q^+}}$	(4)
---	-----

kde Q_s^\pm je súčtový náboj v kladnej (zápornej) polperióde, N_q^\pm – početnosť výbojov v kladnej (zápornej) polperióde.

- krížovo korelačný faktor cc sleduje rozdiel v rozdeleniach $H_{qn}(\varphi)^+$ a $H_{qn}(\varphi)^-$ vyjadruje sa podľa[5] vzťahu (5).

$cc = \frac{\sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum \frac{y_i}{n}}{\sqrt{(\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}) \cdot (\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n})}}$	(5)
--	-----

kde x_i je stredná hodnota náboja v kladnej polperióde, y_i – stredná hodnota náboja v zápornej polperióde, n – počet výbojov za polperiódu.

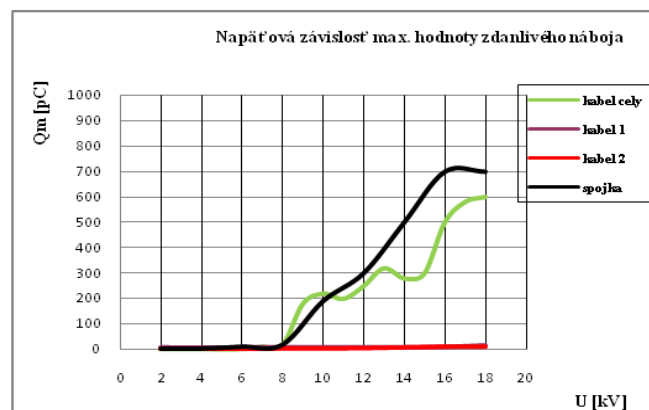
Výbojová a fázová asymetria majú hodnotu 1 v prípade dokonalej symetrie kladnej i zápornej časti priebehu, inak sú od 1 menšie.

Krížovo korelačný faktor cc sa rovná jednej v prípade stopercentnej symetrie a nula značí stopercentnú asymetriu polperiód[6].

Opísané štatistické operátory spolu z obrazmi výbojovej činnosti sa použili na porovnanie nameraných napätových závislostí fázového rozloženia zdanlivého náboja ČV pre celý objekt a pre jednotlivé jeho súčasti.

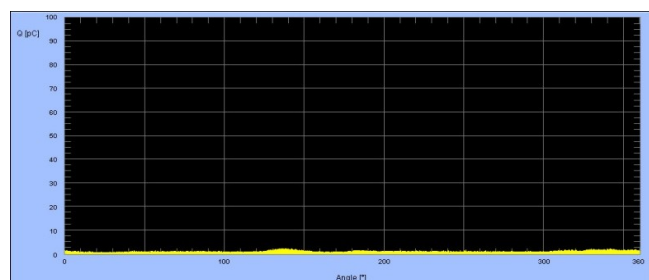
Výsledky meraní

Najprv sa zmerala napätová závislosť maximálnych hodnôt zdanlivého náboja pre jednotlivé vzorky (t.j. celý objekt, kábel 1, kábel 2 a spojka). Výsledok týchto meraní graficky zachytáva obr.2.

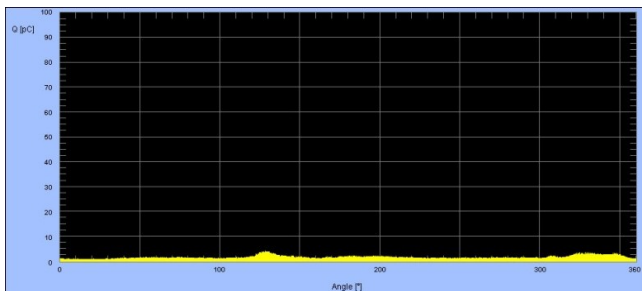


Obr.2 Napätová závislosť maximálnych hodnôt zdanlivého náboja na jednotlivých vzorkách

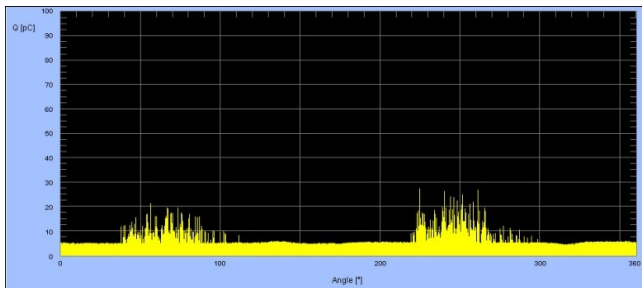
Z Obr. 2 je evidentné, že najvyššie hodnoty zdanlivého náboja boli pozorované na celom kábli, resp. na spojke. V ďalšom sme sa zamerali na zaznamenanie napätovej závislosti fázového rozloženia zdanlivého náboja hlavne pre celý kábel a pre káblovú spojku (pre káble 1 a 2 boli maximálne hodnoty zdanlivého náboja ČV rádovo menšie obr. 2) od 8kV po 18 kV s krokom 2 kV. Pre ilustráciu tu uvádzame obr. 3 až 8 zachytávajúcích v rovnakej mierke túto závislosť pri 8kV, 14kV a 18kV.



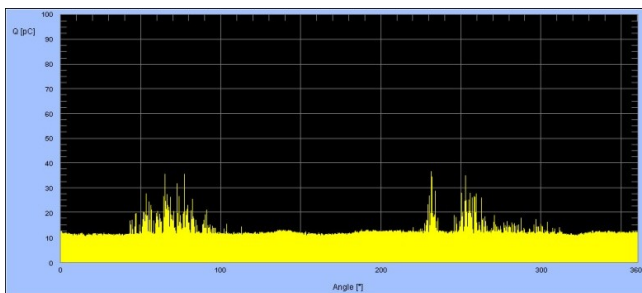
Obr.3 Fázové rozloženie zdanlivého náboja zachytené na celom objekte, 8kV



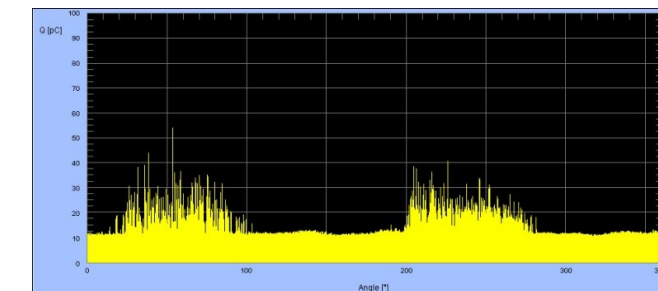
Obr. 4 Fázové rozloženie zdanlivého náboja zachytené na spojke, 8kV



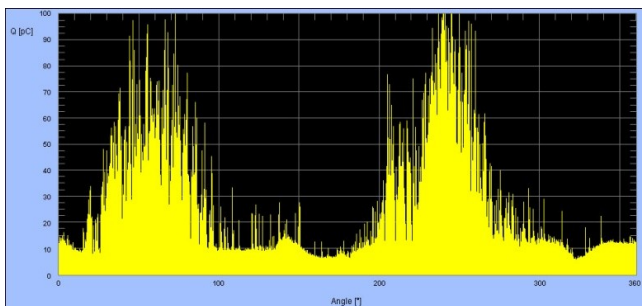
Obr. 5 Fázové rozloženie zdanlivého náboja zachytené na celom objekte, 14kV



Obr. 6 Fázové rozloženie zdanlivého náboja zachytené na spojke, 14kV



Obr. 7 Fázové rozloženie zdanlivého náboja zachytené na celom objekte, 18kV



Obr. 8 Fázové rozloženie zdanlivého náboja zachytené na spojke, 18kV

V Tab. 1 sú uvedené uvažované štatistické operátory vypočítané pre napätia 8, 14 a 18 kV. Aj keď hodnoty jednotlivých štatistických operátorov sa nerovnajú, (merania boli vykonané za rôznych atmosférických podmienok, pri

rôznej úrovne vonkajších rušivých vplyvov a taktiež v iný deň) ich charakter dovoľuje jednotlivé poruchy stotožniť s poruchami v spojke po porovnaní s hodnotami nameranými aj na jednotlivých kábloch.

Tab. 1 Vytýpané štatistické operátory

Objekty	8 kV		14 kV		18 kV		
	Celý kábel	Spojka	Celý kábel	Spojka	Celý kábel	Spojka	
Štatistické operátory [-]	Sk (H_{gn}^{+})	1,81	2,05	3,56	4,54	3,03	1,70
	Ku (H_{gn}^{+})	3,04	4,70	14,76	28,17	13,01	2,65
	Sk (H_{gmax}^{+})	1,88	1,27	2,76	3,75	1,99	0,80
	Ku (H_{gmax}^{+})	4,96	1,00	7,02	14,70	3,03	-1,06
	Sk (H_{gn}^{-})	0,77	1,16	3,44	5,55	1,98	1,80
	Ku (H_{gn}^{-})	-0,24	0,38	14,31	42,00	4,63	2,94
	Sk (H_{gmax}^{-})	2,02	1,72	2,41	4,17	1,59	0,83
	Ku (H_{gmax}^{-})	5,66	3,28	4,73	18,69	2,25	-1,04
	Q (H_{gn})	1,17	1,18	1,10	1,03	1,04	1,18
	Q (H_{gmax})	1,12	1,06	1,21	0,96	0,97	1,02
	Cc (H_{gn})	0,29	0,08	0,34	0,25	0,43	0,67
	Cc (H_{gmax})	0,34	0,63	0,39	0,27	0,49	0,65

Záver

Záverom je možné konštatovať, že na dodanej vzorke bola miestom vzniku čiastkových výbojov spojka. Pri diagnostickom meraní na kábli v prevádzke, bolo pravdepodobne vplyvom nepresne stanovenej rýchlosti šírenia udávané miesto na kábli v blízkosti spojky. Meraniami sme však dokázali existenciu poruchy v spojke dvoch káblov, a súčasne sme vylúčili prítomnosť porúch v izolačnom systéme jednotlivých káblových častí.

Literatúra

- [1] STN EN 60270. Technika skúšok vysokým napätím - Meranie čiastkových výbojov. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2002. s. 10-14
- [2] KMENT, A., Simulácia výbojovej činnosti pre potreby diagnostickej starostlivosti. Dizertačná práca, FEI STU Bratislava 2008
- [3] HAUSCHILD, W., MOSCH, W., Statistik für Elektrotechniker, VEB Verlag Technik, Berlin, 1984, s. 25-33
- [4] HAYS, W.L., Statistics, Holt, Rinehar und Winston, Tokyo, 1981, s. 166-168
- [5] MULLER, G.W., KICK, T., Basic-programme für die angewandte statistik, R Oldenbourg Verlag München Wien, 1983, s. 57-64
- [6] BARTNIKAS, R., A commentary on partial discharge measurement and detection, IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol. E1-22, No. 5, Oct. 1987, s. 629-653

AUTORI: Ing. Attila Kment, PhD., doc. Ing. Jaroslav Lelák, Csc., Ing. Michal Váry, PhD., Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Katedra elektroenergetiky, Ilkovičova 3, Bratislava, SK 812 19, Slovenská Republika, attila.kment@stuba.sk, jaroslav.lelak@stuba.sk, , michal.vary@stuba.sk

Barbara Florkowska, Marek Florkowski, Jakub Furgał, Józef Roehrich, Paweł Zydróń

Impact of High Frequency Risks in Insulation Systems of Electric Machines

Abstract: Exploitation stresses are causing degradation of high voltage insulation systems. The assessment of intensity and dynamics of these processes, being a consequence of local, working electric field strength is considered mainly at the sinusoidal voltage. However in applications where power electronics converters are used the voltage stress has usually a form of fast switching pulses composed of repetitive sequences. Such pulse trains pose usually a modulated width and fast rise- and fall-times. Such conditions have essential influence on inception and development of partial discharges in insulating systems subjected to non-sinusoidal stimulus. The insulation degradation mechanism is especially important for cables and electrical machines subjected to non-sinusoidal waveforms. The paper will present experimental results of application of non-sinusoidal waveforms on polymer cable insulation with special focus on rise time influence. The correlation with the spectral content will be also considered.

INTRODUCTION

Voltage source pulse with modulated (PWM) inverter drives are the most common type of inverter drives which are currently in use to supplying of electric machines. In the past special attention was paid to voltage distortion caused by harmonics, whereas last decade the effect of step waveform introduced by converters with fast switches like IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) started to be treated as even more dangerous [1,2,3]. The introduction of Adjustable/Variable Speed Drives (ASD/VSD) had a significant impact on the supply voltage of electrical motors, thus also on the motor insulation system.

The process of obtaining the required frequency involves converting the incoming alternating voltage to DC by means of a rectifier, smoothing the DC in an intermediate DC link with capacitive energy storage, then inverting back to an alternating current. General scheme of a PWM inverter drive is presented in Figure 1.

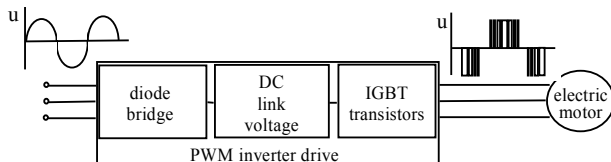


Figure 1. Block scheme of a PWM inverter drive

The pulsed output voltage is applied to the motor and the resultant current, modified by the significant motor inductance, consists mainly of the fundamental sinewave at the required operating frequency with a superimposed low magnitude ripple component based on the switching frequency.

In those drives the control unit is based on pulse-width modulated train of fast pulses with slew rate up to $100 \text{ kV } \mu\text{s}^{-1}$ and frequency repetition up to 100 kHz. In consequence large spikes, overshoots and oscillations are visible on motor terminals.

What is also crucial is the length of cable connecting the drive with a motor in terms of impedance matching. There are special rules for proper selection of the cable length and inverter parameters, as the drive pulse rise time determines the critical cable distance. The electrical stress caused by such distorted supply voltage frequently leads to the insulation system degradation and breakdown of electrical machines.

The insulation failure might occur when the magnitude and rise time of the repetitive transient voltage stress exceeds the withstand capability of the insulating system [4]. The breakdown of insulation will most commonly occur at the highest voltage stress spot, i.e. the first turn of the line end coil to the last turns of the coil group as well as in

the endwinding region, where wires from different coils can come into contact.

Modelling and recorded results of overvoltages risked insulation system of electric machines supplied by use of pulse with modulated inverter drives are presented in the first part of this paper. In the second part the analysis impact of high frequency risks in isolation systems of electric machines on basis of measurement results of partial discharges is shown.

I. MODELLING OF ELECTRIC MACHINES SUPPLIED BY USE OF PWM INVERTERS

The PWM pulse rise-times are so short that their propagation along the supply cable to the electric machine can change the pulse shape and may produce an overvoltage. Drive designers generally aim to use the highest practical switching frequency, since this has a variety of benefits including reducing the audible noise from the motor. Faster power switching devices give shorter rise-times, which are contributory to steep wave fronts. At each pulse edge, the drive has to charge the inductance and capacitance of the cable, so a pulse of energy is delivered into the cable (Fig. 2). The velocity of propagation of a pulse in a typical supply cable is about $170 \text{ m}/\mu\text{s}$. It varies little over the variety of cable types in general use, since it is determined mainly by the permittivity of the internal insulating material.

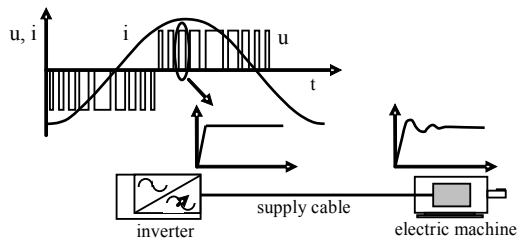


Figure 2. The block scheme of PWM inverter drive-connection cables-electric motor system

The pulse travels from the drive along the cable to the motor. When voltage waves reaches the motor it is reflected, because the motor's high frequency impedance is higher than that of the cable. This causes the voltage to rise towards twice its original peak voltage. The voltage can be represented as having two components, the forward pulse and the reflected pulse. The reflected pulse returns to the drive and because the drive's impedance is very low, the pulse is reflected in a negative sense. The second reflection, which returns from the drive in the reverse polarity, is also reflected and is doubled at the motor. It counteracts the original motor voltage increase. Overvoltages generated at electric machines supplied by pulse with modulated inverter drives can be simulated by use of Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP). In order to perform numerical simulations, the parameters of all devices the system: PWM inverter-connection cables-electric machine should be determined. The simplified equivalent circuit used for overvoltages simulations at high frequency stimulus is shown in Figure 3 [5].

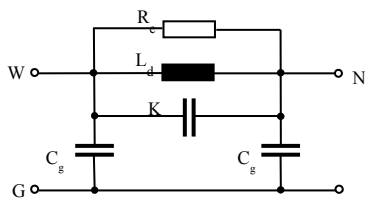


Figure 3. Electric machine equivalent circuit: L_d - phase leakage inductance, C_g - distributed ground capacitance, R_e - loss resistance comprising eddy currents in stator, K - input winding capacitance

The value of the leakage inductance L_d can be obtained both from numerical calculations and from the measurements. The calculations methodology can be found e.g. in [6, 7, 8]. The simplified cross-section of a winding coil of an electric machine, used in calculations of inductance is presented in Figure 4. The distribution of turns in the coil cross-section is irregular (Fig. 3b).

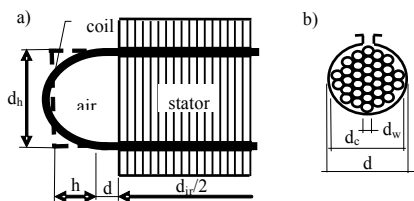


Figure 4. The simplified scheme of the motor winding coil: a - basic dimensions of coil, b - cross-section

Electric motor parameters presented in this paper have been obtained from measurements at different frequencies. This approach refers both to the leakage inductance L_d and capacitance C_g in the machine model, which represent capacitance between winding coils and stator and between winding of phase windings.

The resistance R_e , which represents the losses in the stator, has been determined from frequency dependence of the winding impedance $Z(f)$. The resistance determined

according to that approach is equal to the impedance at the current resonance. The equivalent capacitance K has been obtained from resonance frequency f_{res} . According to paper [6]:

$$K = \frac{1}{4\pi^2 f_{res}^2} \frac{1}{L_d} \quad (1)$$

The parameters of the equivalent motor circuits presented in Figure 3 have been calculated for the low voltage motor of 3 kW. The measurement results of inductance and impedance in wide frequency range performed on one phase was as a base of the calculations. The main resonance frequency is occurring at 32 kHz. It corresponds to the parallel $L_d K$ resonance, what is also visible in phase transition in Figure 5. The list of the equivalent electrical parameters is summarized in Table 1.

The simulation results of dependencies $Z=g(f)$ and $\Phi=g(f)$ obtained for equivalent circuits of experimental electric motor with parameters shown in Table 1 are presented in Figure 6.

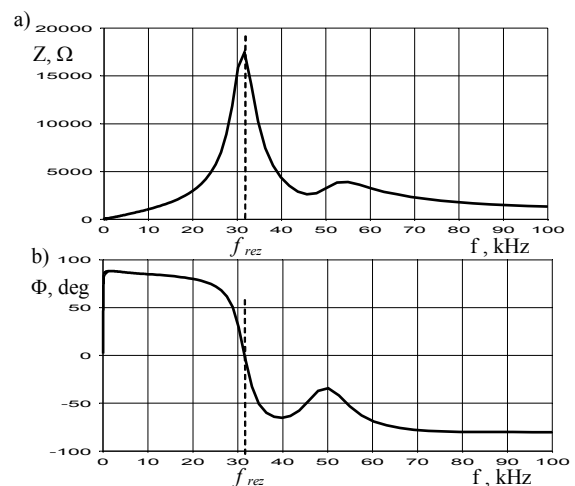


Figure 5. Experimental frequency dependence of the impedance of the one phase of the motor winding: a - dependence $Z = g(f)$, b - dependence $\Phi = g(f)$

TABLE 1
The equivalent parameters of one phase of the motor winding

L		2 C _g		K	R _e
120 Hz	1 kHz	120 Hz	1 kHz		
mH		nF		nF	kΩ
18.07	16.58	2.417	2.388	1.5	17.5

The PWM inverter drive is modeled by using of ramp voltage source implemented in EMTP-ATP package. The supply cable model can be considered as a long string of distributed parameters. Frequency dependencies of cable parameters should be taken into account. In this paper the model of supply cable was generated by use of procedure of Jmarti Setup in EMTP-ATP. The simulations of overvoltages have been performed in the setup composed of a fast PWM like generator, cable and a low voltage motor of 3 kW. The IGBT based signal generator is supplying the motor winding by use of one phase screened cable. The rise time of the switching device is below 0.1 μs.

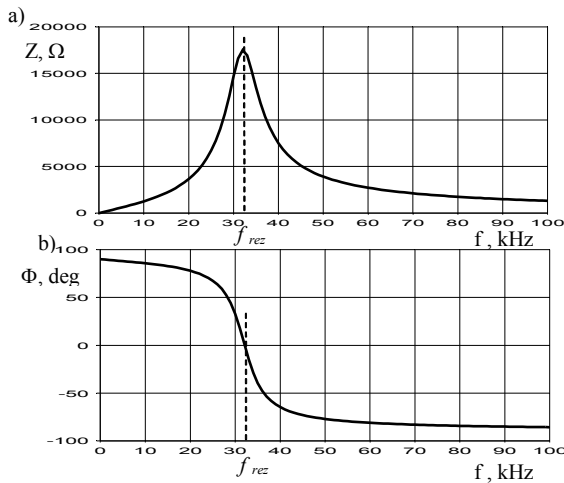


Figure 6. Theoretical frequency dependence of the impedance of the one phase of the motor winding: a - dependence $Z = g(f)$, b - dependence $\Phi = g(f)$

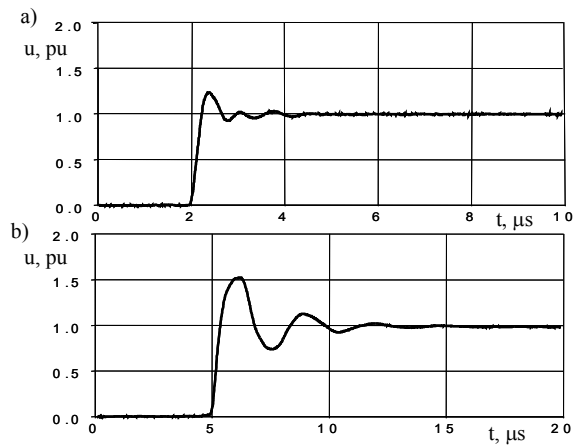


Figure 8. Overvoltages recorded at the motor clamps for short and long supply cable: a - overvoltage at the motor for short (5 m) cable, b - overvoltage at the motor for long (85 m) supply cable

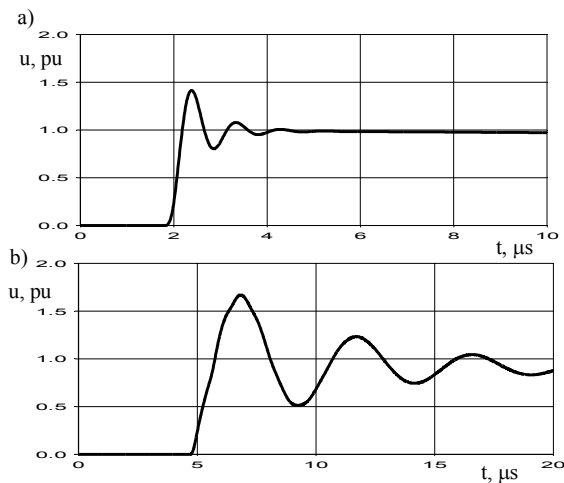


Figure 7. Overvoltages simulated at the motor clamps for short and long supply cable: a - overvoltage at the motor for short (5 m) cable, b - overvoltage at the motor for long (85 m) supply cable

The results of computer simulations of overvoltages at the terminals of electric motor winding obtained for supply cable with different length are presented in Figure 7. Maximal value of overvoltages for system with the supply cable with the length of 5 m is equal to 1.4 pu but overvoltages for 85 m length cable reach about 1.6 pu. They confirm the influence of the length of the supply cables on the maximal value and frequency of overvoltages at the electric machine.

II. EXPERIMENTAL RESULTS OF OVERVOLTAGES

The measurements have been obtained for short (5 m) and long (85 m) supply cable. As it is well known, the impedance of the motor is very large comparing to the cable surge impedance, thus the impedance mismatch will cause the reflection on the load end. The overvoltage occurring with an oscillating component for short and long cable is presented in Figure 8. The amplitude of the overvoltage reaches 1.2 pu for short cable and 1.5 pu for long cable (1 pu is related to inverter voltage level).

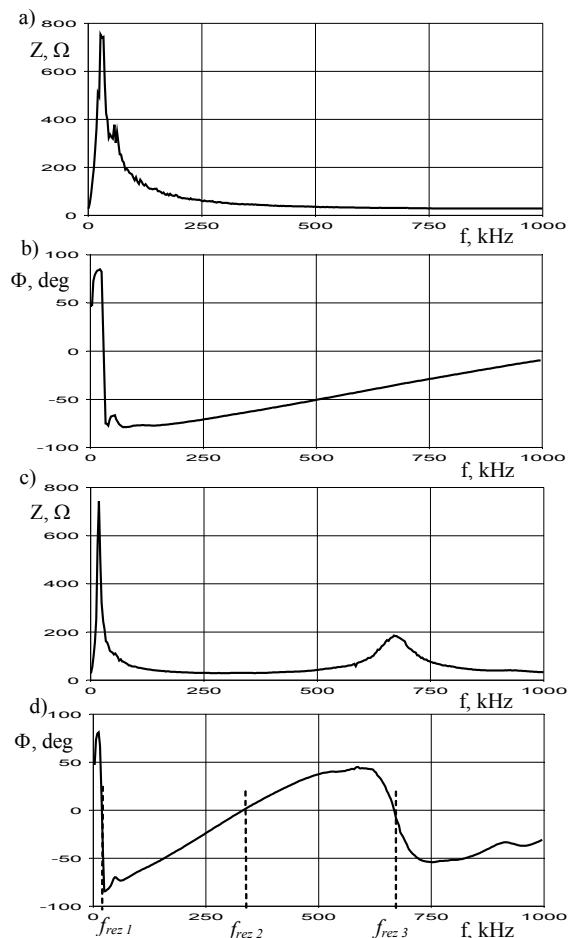


Figure 9. Frequency dependences of the impedance of the cable-motor setup for short and long supply cables: a, b - frequency dependences of the impedance at the motor for short (5 m) cable, c, d - frequency dependences of the impedance at the motor for long (85 m) supply cable ($f_{rez1} \approx f_{rez}$, $f_{rez2} = 340$ kHz, $f_{rez3} = 670$ kHz)

The frequency response analysis has been performed on cable-motor configuration to obtain the localization of the main resonances. The main peak corresponds to the resonance of the motor at about 32 kHz (Fig. 9). In case of the long cable (85 m) the first minimum occurs at 340 kHz and reflects the oscillations occurring in the cable terminated with a high motor impedance. The oscillation frequency f_{osc} can be approximated by:

$$f_{osc} = \frac{c}{4l\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

where: c - speed of light, l - cable length, ϵ_r - cable dielectric permittivity.

In the case of the short cable (5 m) the resonant frequency do not appear in the frequency range from 50 Hz up to 1 MHz (Fig. 9 c,d).

The rise time of the voltage pulse arriving at the motor terminal has an influence on the overvoltage, occurrence of the oscillating component and capacitive voltage distribution along the motor winding. In order to verify the influence of the inverter pulse rise time the measurements have been performed in a configuration, where cable-motor forming transmission line-load setup have been energized by a voltage pulses with a controlled rise time. The rise time has been changed in the range from 10 ns to 10 μ s. The upper traces in Figure 10a represent a voltage slope at the inverter output, whereas the lower traces are registered at the motor terminal for a rise time 0.3, 1, 5 and 10 μ s respectively. As the high spectral content is embedded in the pulse slope, the rise time below 1 μ s results in the oscillations "induced" in the cable. Simultaneously the overvoltage reaching 1.5 pu for rise time 0.3 μ s can be observed in Figure 10b.

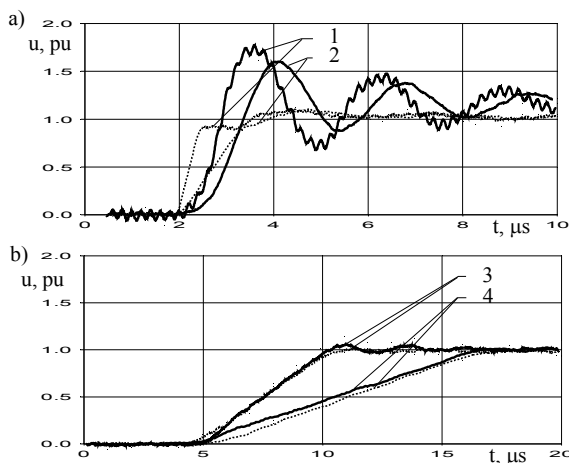


Figure 10. Overvoltages at the motor terminals and at the inverter output for different rise time: a - overvoltage courses for rise time of 0.3 μ s and 1 μ s, b - overvoltage courses for rise time of 5 μ s and 10 μ s: 1 - rise time of 0.3 μ s, 2 - rise time of 1 μ s, 3 - rise time of 5 μ s, 4 - rise time of 10 μ s — overvoltage at the motor terminals, - - - voltage at the inverter output

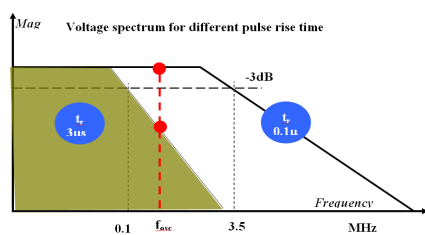


Figure 11. Voltage spectrum for different pulse rise time (3 μ s and 0.1 μ s): f_{osc} - depicts the cable oscillating frequency

The occurrence of the oscillations in a supply cable treated as a distributed transmission line depends on the relationship between frequency f_{osc} resulting from the cable length and properties determining the speed of the wave propagation, in reference to the spectral content of the pulse. The high frequency content of the pulse is embedded in the rise time as illustrated in Figure 11, for two pulses having the slope 0.1 μ s and 3 μ s.

III. PARTIAL DISCHARGES AT CHANGING RISE TIME

The repetitive overvoltages occurring in insulation system of inverter fed low voltage motors may result in partial discharges occurring in the void inside the insulation system or in the endwinding part of the slot. In order to investigate the influence of fast switching stimulus, the model of insulating sample with a single PD source (thickness 0.1 mm, diameter 40 mm) of epoxy-mica thermosetting insulation have been used in the experiments. The comparison of PD patterns has been performed for:

- sinusoidal waveform 50 Hz,
- square (trapezoidal) waveform 50 Hz with different values of rise times: 3 ms, 1.5 ms, 0.9 ms, and 0.14 ms.

The PD patterns obtained for trapezoidal waveform (Fig. 10b) are fundamentally different, than PD pattern at sinusoidal voltage (Fig. 10a) and consist of two groups of pulses: first group represents discharges appearing on the rising slope of the trapezoidal voltage whereas the second one corresponds to the flat part of the waveform.

In a classical PD model the maximum charge Q_m is proportional to the voltage pulse drop δV , and their value shouldn't depend on the stimulus rise time [9, 10]. The charge of individual pulses at sinusoidal and trapezoidal voltage stimulus with various rise times should be theoretically identical considering the simplified model. However, the above statement is not confirmed by experimental measurements. It has been observed, that increasing the steepness of the trapezoidal stimulus, the recorded maximum charge magnitude is also increasing. Hence, one has to take into account also other factors influencing PD at fast changing voltage, like inception time lag with relation to the static level V_i .

The inception delay is directly related to time delay of free electron formation in a gas and development of an avalanche. It means initiation of PD at voltage level $V_i > V_i$, what leads to narrowed phase range $z_{\varphi 2}$ in relationship to the range $z_{\varphi 1}$ appearing without inception delay.

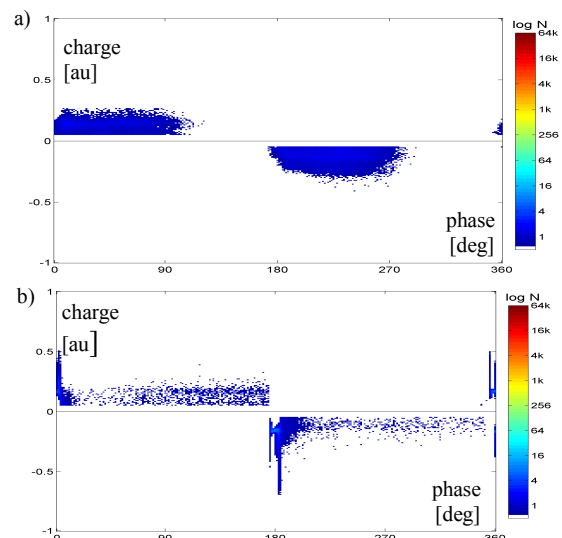


Figure 12. The PD patterns at: a - sinusoidal voltage, b - trapezoidal voltages with rise time 0.14 ms

At the same extinction voltage level in the discharge source, which is dependent on the surface conditions, the voltage PD pulse $\delta V > \delta V$, thus also the maximum charge is growing. The above effect may accelerate due to erosion processes on the surface of solid material, leading to the decrease of surface resistivity. In consequence it means the further grow of discharge magnitude.

For fast switching stimulus, despite the reduction of the phase range within the period, the degradation processes are caused by the higher PD magnitude and in case of PWM like stresses the additional factor is due to the high repetition rate.

IV. CONCLUSIONS

The low voltage motors supplied by modern IGBT based inverters are subjecting the insulation to additional stress resulting from fast switching, especially fast du/dt slope of the voltage at motor terminal. Depending on the pulse rise time and the cable length, the oscillations in the cable forming the high impedance ended transmission line are formed. If the slope of the incident pulse is containing the spectral part covering the frequency resulting from the transmission line oscillating criteria, the corresponding oscillation mode will be induced.

The frequency response analysis has been employed to obtain the characteristic frequencies of the cable-motor setup, for both short- and the long-cable supply system.

Since the overvoltages resulting from oscillations may exceed the partial discharge inception level, the insulation deterioration in case of fast du/dt may occur. Both sinusoidal and trapezoidal stimulus has been compared with respect to PD formation.

It was noticed, that increasing the steepness of the trapezoidal stimulus, the recorded maximum charge magnitude was also increasing. This effect is related to PD mechanism and might be influenced by inception delay, which has been observed on PD phase resolved-images in form of narrower phase range.

ACKNOWLEDGMENT

The work described in the paper was partly carried out in project No. N R01 0019 04 sponsored by the Polish Ministry of Science and Higher Education

REFERENCES

- [1] A. H. Bonnett, "Analysis of the impact of pulse-width modulated inverter voltage wave forms on ac induction motors," *IEEE Annual Pulp & Paper Ind. Techn. Conf.*, 1994, pp. 68 - 75
- [2] R. J. Kerkman, D. Leggate, G. Skibinski, "Interaction of drive modulation and cable parameters on AC motor transients," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 33, No. 3, 1997, pp. 722 - 731
- [3] G. Suresh, H. A. Toliyat, D. A. Rendusara, P. N. Enjeti, "Predicting the transient effects of PWM voltage waveform on the stator windings of random wound induction motors," *IEEE Trans. on Pow. Electron.*, Vol. 14, No. 1, 1999, pp. 23 - 30
- [4] J. C. G. Wheeler, "Effects of converter pulses on the electrical insulation in low and medium voltage motors," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 21, No. 2, 2005, pp. 22 - 29
- [5] A. Boglitteli, A. Cavagnino, M. Lazzari, "Experimental high frequency parameter identification of ac electrical motors," *IEEE on Ind. and Appl.*, vol. 43, No. 1, pp. 5 - 10, Jan./Febr., 2007
- [6] G. Grandi, D. Casadei, A. Massarini, "High frequency lumped parameter model for ac motor windings," *EPE Conf. Proc.*, 1997, pp. 2.578 - 2.583
- [7] B. Heller, A. Veverka, "Surge phenomena in electrical machines," *Iliffe Books Ltd*, London, 1968
- [8] M. Florkowski, J. Furgał, "The detection of winding faults in electrical machines using the frequency response analysis method," *Meas. Scien. and Technology*, 2004, No. 15, pp. 2067 - 2074
- [9] B. Florkowska, M. Florkowski, R. Włodek, P. Zydrón, "Mechanisms, measurements and analysis of partial discharges in diagnostics of high voltage insulating systems (written in Polish)," Ed. IPPT PAN, ISBN 83-910387 - 5 - 0, Warszawa, 2001
- [10] B. Florkowska, P. Zydrón, "Analysis of conditions of partial discharges inception and development at non-sinusoidal testing voltages," *IEEE CEIDP'2006 Annual Report*, October 2006, pp. 648 - 651

AUTHORS: Barbara Florkowska, Jakub Furgał, Józef Roehrich, Paweł Zydrón: AGH University of Science and Technology, Department of Electrical Engineering and Power, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30, Poland, beflor@agh.edu.pl

Marek Florkowski: ABB Corporate Research, 31-038 Kraków, ul. Starowiślna 13A, Poland, marek.florkowski@pl.abb.com

Jaroslav Petráš, Jozef Balogh, Jaroslav Džmura

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

Sledovanie aktivity čiastkových výbojov v izolačných systémoch pomocou indukčívnej a piezoelektrickej sondy

Abstrakt. V príspevku je popísané experimentálne sledovanie aktivity čiastkových výbojov. Čiastkové výboje boli merané indukčívnu metódou a zároveň bola sledovaná akustická emisia čiastkových výbojov pomocou piezoelektrických senzorov. Príspevok sa zameriava na porovnanie metód snímania aktivity čiastkových výbojov a ich využiteľnosti pre diagnostiku izolačného systému.

Abstract. This paper describes experimental monitoring of partial discharge activity. Partial discharges were measured by inductive method simultaneously with their acoustic emission measurement. We focused on both method comparison and their usability in insulation system diagnostics.

Kľúčové slová: čiastkové výboje, akustická metóda, indukčívna metóda.

Keywords: partial discharges, acoustic method, inductive method.

Úvod

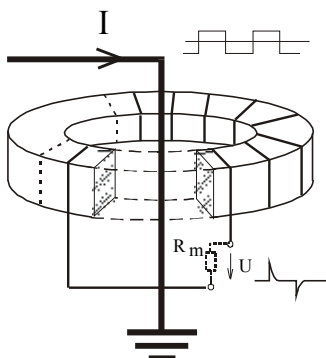
V súčasnosti najpoužívanjšou metódou pre diagnostiku izolačných systémov je priama galvanická metóda. Jej nevýhodou však je, že zariadenie musí byť vyradené z prevádzky a neumožňuje on-line monitorovanie. Z tohto dôvodu sú v tomto príspevku popísané alternatívne metódy snímania aktivity čiastkových výbojov, akými sú snímanie čiastkových výbojov indukčívnu metódou a snímanie akustickej emisie čiastkových výbojov.

INDUKČÍVNA (NEPRIAMA) METÓDA SNÍMANIA ČIASTKOVÝCH VÝBOJOV

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

Z hľadiska kontinuálneho monitorovania stavu izolačného systému má nepriama indukčívna metóda oproti priamej galvanickej metóde výhodu najmä v tom, že je možné meraný objekt sledovať aj priamo počas prevádzky.

Toroidný indukčívny snímač ako jeden z možných vyhotovení indukčívneho snímača je možné umiestniť v obvode pracovného uzemnenia meraného objektu, pretože prúdové obvody sú navzájom elektromagneticky previazané. Navyše jeho transformačný koeficient nezávisí od tvaru (prierezu) vodiča primárneho obvodu.



Obr. 1 Umístění indukčívneho snímača v prípade toroidálnej sondy

Indukčívne snímače toroidálne boli vyvinuté na našom pracovisku a používajú sa aj na meranie zvodového prúdu pri frekvenciách 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.

Keďže výbojovú činnosť možno považovať za náhodný proces, vo fáze vyhodnocovania sa najčastejšie používajú štatistické metódy spracovania nameraných hodnôt. V laboratóriách na pracovisku Katedry elektroenergetiky FEI TU v Košiciach je rozšírený spôsob vyhodnotenia nameraných výsledkov pomocou fázovej analýzy, a to ako v prípade priamej galvanickej, tak aj v prípade nepriamej indukčívnej metódy snímania čiastkových výbojov. Následný postup vyhodnotenia je teda pre indukčívnu metódu vhodný s prípadom priamej galvanickej metódy.

SLEDOVANIE AKUSTICKEJ EMISIE 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.

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 v piezoelektrických látkach (vo forme kryštalických, polykryštalických alebo polymérnych látok), kedy pri deformácii kryštálu dochádza k vytvoreniu elektrického poľa.

Každý snímač vplyva tvarom svojej prenosovej charakteristiky na tvar vlny akustického signálu generovaného čiastkovým výbojom. Pri meraniach je preto potrebné poznať aj prenosovú charakteristiku snímača a vo vyhodnocovaní výsledkov ju zohľadniť.

Výhodou dotkových snímačov akustickej emisie je to, že je možné ich umiestniť na vonkajšiu stenu zariadenia, ktoré nemusí byť odpojené od napätia. Zároveň sondy nie sú ovplyvňované elektro-magnetickým poľom tak, ako by boli ovplyvňované pri umiestnení napr. hydrofónu, ktorý sa umiestňuje vo vnútri zariadenia.

Súčasťou snímacích sond môže byť predzosilňovač, ktorý má úlohu zvýšiť pomer signál/šum celej elektrickej časti prenosovej cesty.

Po nasnímaní akustického signálu piezoelektrickou sondou a po jeho zosilnení v predzosilňovači je koaxiálnym káblom vedený do vyhodnocovacieho alebo záznamového zariadenia. 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.

Výpovedeschopnosť akustickej metódy detekcie a lokalizácie čiastkových výbojov závisí hlavne od toho, ako je signál interpretovaný, t.j. ktoré parametre signálu je potrebné extrahovať. Závisí to najmä na štatistickej povahe signálu:

a) pri dlhšom trvaní signálu akustickej emisie s viacerými energetickými impulzmi je vhodné zvoliť štatistické veličiny časového priebehu signálu:

- energia signálu,
- početnosť impulzov akustickej emisie,

b) v prípade ojedinelých impulzov je možné skúmať časový priebeh samotného impulzu 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,

c) rovnako dôležité je skúmať charakteristiku signálu vo frekvenčnej doméne:

- amplitúdová a fázová frekvenčná charakteristika,
- výkonové spektrum.

Pre analýzu výsledkov experimentov pri meraní akustickou metódou je preto k dispozícii viac nástrojov a metód. V základe je možné rozdeliť analýzu podľa oblastí, v ktorej je vykonávaná:

- časová
- frekvenčná (použitie Fourierovej transformácie)
- škálografická (použitie Waveletovej transformácie)

Pomerne rozpracovanou metódou lokalizácie ČV je práve lokalizácia pomocou akustickej emisie. Metóda je v súčasnosti využívaná v existujúcich systémoch od rôznych výrobcov s viacerými vstupnými kanálmi, pomocou ktorých je možné za vhodných podmienok relatívne presne lokalizovať zdroj ČV.

Akustické metódy lokalizácie čiastkových výbojov sú založené na dvoch rôznych princípoch:

- a) na určení veľkosti amplitúd impulzov AE v rôznej vzdialenosti od predpokladaného zdroja ČV,
- b) na určení pomeru časových oneskorení snímaných impulzov AE pomocou geometricky vhodne rozmiestnených sond.

V praxi sa pri prvej metóde hľadá pomocou akustickej sondy miesto, kde má snímaný impulz akustickej emisie čiastkových výbojov najväčšiu amplitúdu. Výhody tejto metódy sú napr. použitie iba jednej sondy, použitie metódy aj počas prevádzky monitorovaného zariadenia a jednoduchosť metódy. Nevýhodou je nepresnosť metódy spôsobená nehomogénnym akustickým kanálom, t.j. v praxi je často prostredie v ktorom sa signál AE šíri k akustickej sonde rôznorodý a navyše neznámy. Zvýšenie presnosti spočíva v poznaní vplyvu akustického kanálu na signál akustickej emisie čiastkového výboja.

Pri druhej metóde sa používajú najmenej tri snímače (často však aj 10 a viac) vhodne v priestore rozmiestnené. Každý zo snímačov nasníma AE signál, ale s rôznym oneskorením oproti referenčnému času. Zo známych geometrických rozmerov elektrického zariadenia, známych polôh jednotlivých snímačov a časov oneskorení je možné vypočítať polohu zdroja signálu AE riešením sústavy nelineárnych rovníc.

Nevýhodou tejto metódy je rovnako ako v prvom prípade nepresnosť daná nehomogénnym akustickým kanálom.

Lokalizácia, teda určenie miesta vzniku čiastkových výbojov je dôležitá z niekoľkých dôvodov:

- a) z miesta vzniku ČV je možné usudzovať na nebezpečnosť procesu a na následné procesy v elektroenergetickom zariadení,
- b) z hľadiska servisu zariadenia je možné pomocou lokalizácie urýchliť a zjednodušiť proces opráv alebo servisných zásahov.

Nasnímaný signál akustickej emisie zdroja čiastkových výbojov obsahuje často akustický aj elektrický šum. Tento šum generovaný okolím je na signál impulzu ČV superponovaný a najmä pri akustickom šume je veľmi obtiažne, ba niekedy až nemožné ho eliminovať. Čiastočným riešením môže byť použitie úzkopásmovej sondy, ale v prípade, že nie je možné vyhnúť sa použitiu širokopásmovej sondy, v užitočnom signáli sa uplatňujú celá škála rušivých signálov.

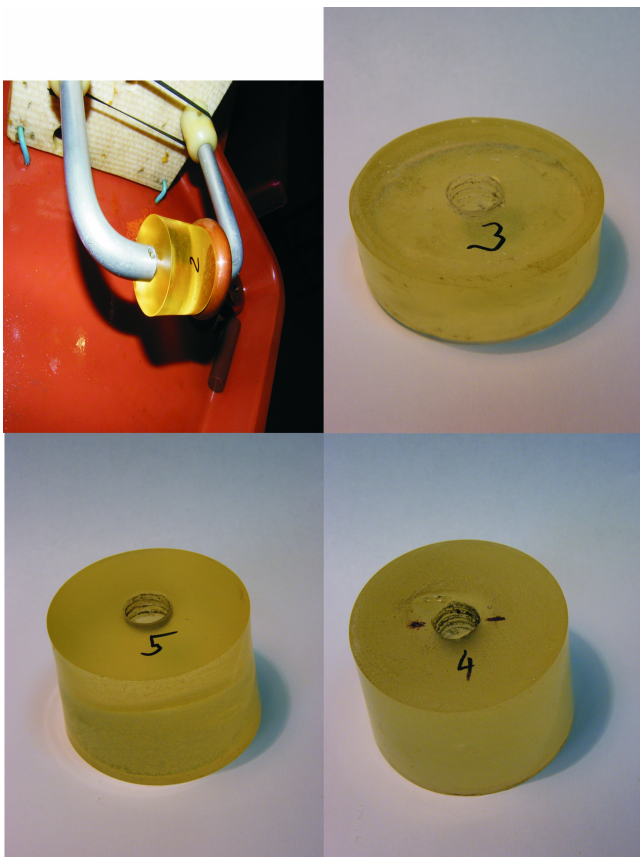
Bežným riešením je filtrovanie elektrického signálu zo sondy. Možnosti použitia filtrov sú dosť rozsiahle, avšak pri výbere vhodného typu filtra je potrebné poznať základný charakter užitočného a rušivého signálu. Asi najbežnejším spôsobom filtrácie je použitie pásmových filtrov. Dnešná úroveň technológií umožňuje aj použitie digitálnych filtrov okrem analógových pásmových filtrov. Ďalšou alternatívou je Waveletová transformácia, niekedy spojená aj s prahovaním, ktorú je tiež možné použiť pre účely odfiltrovania šumu v signáli. Nevýhodou týchto spôsobov je ovplyvňovanie časového priebehu užitočného signálu takým spôsobom, že analýza výpovedeschopných parametrov priebehu nie je presná. Príkladom je skreslenie nábehového času impulzu ČV (odfiltrovanie vyšších harmonických zložiek užitočného signálu, smoothing efekt), čo má za následok nepresné určenie oneskorenia impulzu oproti referenčnému času. Chyba sa teda preniesie až do určenia polohy zdroja AE.

K skresleniu užitočného signálu takýmto spôsobom nedochádza pri použití morfologických filtrov, ktoré odstraňujú zo signálu šum impulzného charakteru, ktorého impulzy majú trvanie kratšie, než vopred definovaný časový interval. Pritom však užitočný signál vrátane vyšších frekvencií zostane neskreslený.

EXPERIMENT

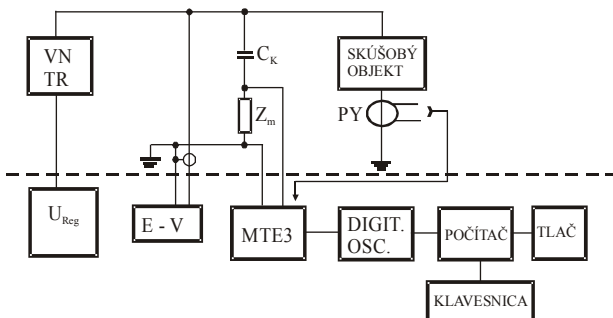
Experiment bol realizovaný na vzorkách, ktoré boli vyrobené z vytvrnenej epoxidovej živice, v ktorej sa nachádzali umelo vytvorené vzduchové bubliny. Tieto slúžia na modelovanie defektného miesta, v ktorom dochádza k čiastkovým výbojom. Epoxidové vzorky boli odliate do foriem tvarov valcov, z ktorých sa po vytvrdnutí vybrali tak, aby sa vzorky nepoškodili na povrchu. Následne po vybratí sa plochy týchto vzoriek mechanicky opracovali.

Obr. 2 zobrazuje použité vzorky.



Obr. 2 Vzorky použité pri meraní aktivity častkových výbojov

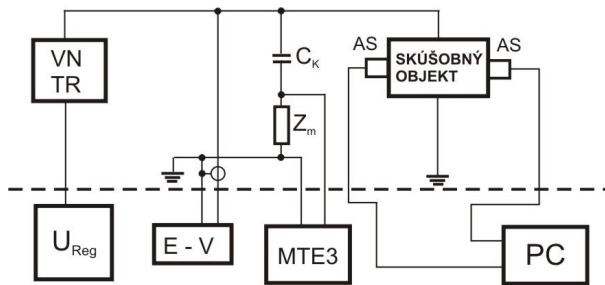
Meranie aktivity častkových výbojov bolo vykonávané paralelne indukčnou nepriamou a akustickou metódou. Zapojenie nepriamej indukčnej metódy (spolu so zapojením priamej galvanickej metódy merania) je znázornené na obr. 3.



Obr. 3 Bloková schéma zapojenia indukčnej metódy

VN TR – VN tranformátor
 U_{Reg} – regulátor napätia
 E-V – kilovoltmeter
 MTE3 – merač častkových výbojov MTE 3
 OSC – osciloskop

Obr. 4. ukazuje blokú schému zapojenia podľa akustickej metódy merania častkových výbojov (spolu so zapojením pre priamu galvanickú metódu merania).



Obr. 4 Blokú schéma zapojenia pre akustickú metódu merania

VN TR – vysokonapäťový transformátor
 U_{Reg} – regulátor napätia
 E-V – kilovoltmeter
 MTE3 – merač častkových výbojov MTE 3
 C_K - väzobný kondenzátor 1000pF
 Z_m – meracia impedancia
 AS – akustický (piezoelektrický) snímač – výrobca Physical Acoustics Corporation, typ R151-AST

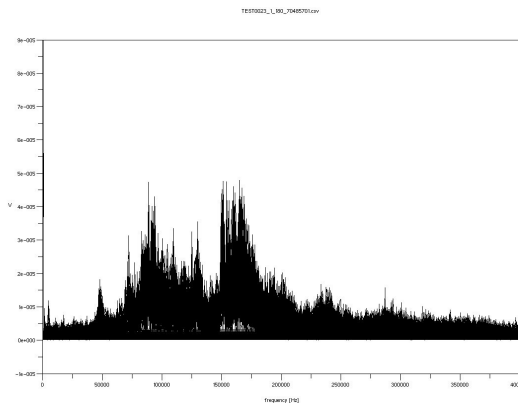
ZÁVER

Uvedené vzorky, ktoré simulovali prípad výskytu častkových výbojov v plynom vyplnenej dutinke v dielektriku boli podrobené meraniu aktivity častkových výbojov nepriamou indukčnou metódou a zároveň bola meraná akustická emisia vznikajúcich častkových výbojov. Pomocou indukčnej sondy bolo zmerané fázové rozloženie častkových výbojov, ktoré umožňuje vyhodnotenie typu vznikajúcich častkových výbojov spôsobom, aký je použiteľný aj pri meraní priamou galvanickou metódou.

Paralelné meranie akustickej emisie častkových výbojov umožňuje dodatočnú lokalizáciu miesta vzniku častkových výbojov v izolačnom systéme. Navyše namerané impulzné signály akustickej emisie častkových výbojov možno použiť na ďalšiu analýzu. Cieľom tejto analýzy je rozpoznať z charakteru týchto impulzných signálov napr. typ častkových výbojov.

Obr. 5 zobrazuje amplitúdové frekvenčné charakteristiky signálov akustickej emisie častkových výbojov pre prípad vzorky č. 5.

Nepriama indukčná meracia metóda sa ukázala byť ako alternatívnou k priamej galvanickej, meranie akustickej emisie častkových výbojov umožňuje doplnkovú lokalizáciu miesta výskytu častkových výbojov v elektro - izolačnom systéme.



Obr. 5 Amplitúdová frekvenčná charakteristika impulzných signálov

POĎAKOVANIE

This work was supported by scientific Grant Agency of the ministry of Education of the Slovak Republic project VEGA No. 1/0368/09 and APVV-20-006005.

Literatúra

- [1] PETRÁŠ, Jaroslav: Lokalizácia miest defektnej izolácie v elektroenergetických zariadeniach pomocou akustických metód : Dizertačná práca. Košice 2008. 118 s.
- [2] BALOGH, Jozef: Partial discharge sensing by inductive and capacitor sensors. Košice : FEI TU, 1996.
- [3] DŽMURA, Jaroslav et al. : Snímanie čiastkových výbojov akustickou metódou. In: DISEE 2008 : Dielektrické a izolačné systémy v elektrotechnike a energetike : 17. medzinárodná konferencia : September 17-19, 2008, Demänovská Dolina. Bratislava : STU, 2008. s. 163-166. ISBN 978-80-227-2933-8.
- [4] PETRÁŠ, Jaroslav et al. : Snímanie čiastkových výbojov galvanickou, induktívnou a akustickou metódou. In: Nové smery v diagnostike a opravách elektrických strojov a zariadení : Zborník prednášok 7. medzinárodnej vedeckej a odbornej konferencie : Zuberec, 27.5.2008 - 29.5.2008. Žilina : ŽU, 2008. s. 145-149. ISBN 978-80-8070-850-4.

Autori: Ing. Jaroslav Petráš, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Jaroslav.Petras@tuke.sk

Ing. Jaroslav Džmura, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Jaroslav.Dzmura@tuke.sk

Ing. Jozef Balogh, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Jozef.Balogh@tuke.sk

Juraj Kurimský

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

Matematický model šírenia akustickej vlny vo vn transformátoroch s olejovým médiom

Abstrakt. Detekcia čiastkových výbojov a lokalizácia ich zdrojov v olejom plnených transformátoroch je možná pomocou akustických techník. V tomto príspevku sú popísané základy ultrazvukovej detekcie čiastkových výbojov. Čitateľ sa oboznámi s matematickým modelom popisujúcim vznik a šírenie akustickej emisie v dôsledku čiastkových výbojov v kombinovanej izolácii olej-papier.

Abstract. The principle of acoustic detection of partial discharges sources is described and the ability of localization of defect places in insulation systems of power transformers is explained. The mathematical model of the acoustic emission due to partial discharges in oil-filled transformer is presented.

Kľúčové slová: čiastkové výboje, olejový transformátor, izolačný systém, akustická emisia
Keywords:

Úvod

Za účelom sledovania starnutia izolačného systému a ostatných častí výkonových transformátorov --- teda pre diagnostiku výkonových transformátorov --- sa používajú rôzne metódy, ktoré sú založené na registrácii fyzikálnych a chemických zmien prítomných materiálov alebo na sledovaní fyzikálnych prejavov procesov poškodzujúcich ich izolačný systém.

Pre diagnostické účely sa v súčasnosti sa používajú tri principiálne odlišné prístupy na zhodnotenie aktivity čiastkových výbojov. Sú to: elektrické metódy, plynová chromatografia oleja, meranie akustickej emisie.

Princíp elektrických metód spočíva v snímaní zmien elektromagnetického poľa alebo v detekcii prúdových impulzov. Posledne zmienaná metóda poskytuje možnosť kvantifikovať veľkosť detekovaného zdalivého náboja a tak určiť veľkosť pôsobiacej degradačnej energie. V našich podmienkach sa tieto merania vykonávajú, keď sú zariadenia mimo prevádzky.

Prítomnosť čiastkových výbojov sa môže prejaviť zmenou chemických vlastností oleja. Výsledky plynovej chromatografie môžu poukázať na prítomnosť plynov, ktoré vznikajú pri ionizačných procesoch v oleji, prípadne pri rozklade tuhých dielektrik vplyvom čiastkových výbojov. Metóda je založená na extrakcii produktov starnutia zo vzorky oleja. Odobratie vzorky sa môže vykonávať počas prevádzky avšak celkové zhodnotenie nie je triviálnou záležitosťou.

Metóda snímania akustickej emisie je užitočná pre zhodnocovanie aktivity čiastkových výbojov aj počas prevádzky a je založená na detekovaní a lokalizácii zdrojov tlakových vln spôsobených elektrickým výbojom v dielektriku. Počiatky aplikácie tejto metódy sú v šesťdesiatych rokoch 20. storočia.

Čiastkové výboje a akustická emisia

Čiastkový výboj v izolácii olejom plnených transformátorov vygeneruje elektromagnetický impulz, ktorého energia sa transformuje na mechanickú energiu v podobe tlakovej vlny. Transformácia z jednej formy energie na druhú sa nedá popísať jednoduchou funkciou, ale závisí od mnohých parametrov, napríklad: typ a intenzita čiastkových výbojov, typ dielektrika, v ktorom vznikajú.

V závislosti na týchto parametroch trvanie tlakovej vlny môže byť rôzne. Tieto vlny sa šíria olejovým médiom až kým jej čelo nenarazí na nádobu transformátora alebo tuhý predmet, ktorý je súčasťou konštrukcie transformátora.

Existuje niekoľko spôsobov ako tento elektrofyzikálny proces využiť pre diagnostické merania. Tlakové pole vytvorené akustickou vlnou je vyjadrené diferenciálnou rovnicou druhého rádu:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (1)$$

kde p je tlakové pole, ∇ je Laplaceov operátor, v je rýchlosť šírenia zvuku v médiu, t je čas.

Základnými parametrami, ktoré kvantifikujú akustickú tlakovú vlnu sú:

- akustická rýchlosť v (m/s),
- intenzita akustického vlnenia I (W/m²),
- akustický tlak p (Pa),
- hladina akustickej intenzity L_I (dB) a hladina akustického tlaku L_p (dB).

Akustická vlna sa šíri olejovým médiom všetkými smermi. Takýto typ tlakovej vlny nazýva sa tiež guľová vlna a miesto vzniku čiastkových výbojov vytvára bodový akustický zdroj. Vzniká pozdĺžne vlnenie a v reálnom prostredí sa uplatňuje niekoľko mechanizmov: priestorový útlm, akustická absorpcia, rozptyl, odraz a lom. Priestorový útlm pre guľovú vlnu je

$$I_r \approx I_0 \cdot 1/r, \quad (2)$$

kde I_0 je intenzita generovaného akustického tlaku a I_r je intenzita akustického tlaku vo vzdialenosti r čela vlny od zdroja vlnenia.

Akustická absorpcia je zapríčinená premenou časti mechanickej energie na teplo. Dá sa vyjadriť podobne ako pri optickej absorpcii -- Lambertovým zákonom:

$$I(r) = I_0 \cdot e^{-\beta r}, \quad (3)$$

kde β je koeficient absorpcie.

Rozptyl -- difrakcia nastáva v nehomogénnych materiáloch. V oleji to môžu byť plynové bublinky alebo koagulované častice. Rozptyl sa javí ako absorpcia, ale straty spôsobené rozptylom môžu byť omnoho väčšie. Odraz a lom tlakovej vlny nastáva na rozhraní dvoch prostredí, ktorými postupuje. V rôznych prostrediach sa tlaková vlna šíri rôznymi rýchlosťami. Platia tu ako Huyghensov princíp tak aj Snellov zákon lomu, ktoré sú známe z optiky.

Po náraze čela tlakovej vlny na dosku transformátora sa excitujú dva druhy vlnení -- priečne a pozdĺžne -- s odlišnými rýchlosťami šírenia.

Tabuľka 1

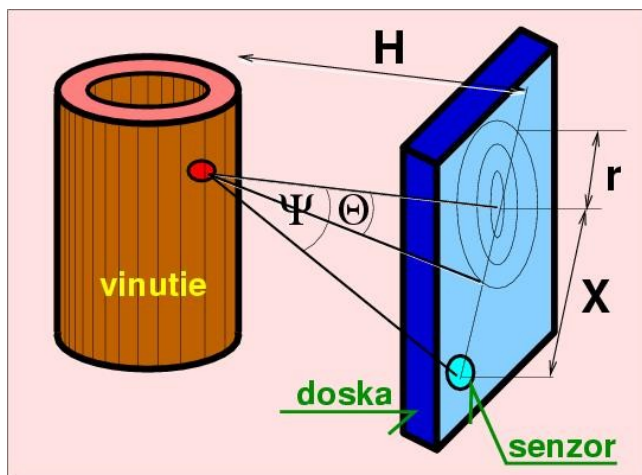
	v_l (m/s)	v_s (m/s)
tr. olej	1 400	–
ocel	5 900	3 200

v_l – rýchlosť zvuku pozdĺžnej vlny

v_s – rýchlosť zvuku priečnej vlny

Model šírenia akustického vlnenia

Uvažujme situáciu podľa obr. 1. Z vyššie uvedených faktov vyplýva, že priama dráha akustickej vlny k senzoru nemusí byť najrýchlejšia, a to kvôli odlišným rýchlostiam šírenia akustickej vlny v daných prostredniach. V skutočnosti existuje mnoho dráh s rozličnými uhlami dopadu Θ na stenu nádoby transformátora, ktorými ultrazvukový signál môže dosiahnuť senzor [2].



Obr. 1 Model šírenia akustického vlnenia

Predpokladajme, že uhol spojnice senzor-porucha a normály k nádobe transformátora je Ψ . Potom čas, ktorý je potrebný, aby čelo vlny prešlo od zdroja častkových výbojov k akustickému senzoru je:

$$t = \frac{\sqrt{r^2 + H^2}}{v_{l(\text{olej})}} + \frac{X - r}{v_{l(\text{ocel})}} \quad (4)$$

Riešením podmienky $dt/dr=0$ získame matematický výraz pre časové minimum, ktoré potrebuje čelo akustickej vlny na dosiahnutie pozície akustického senzora:

$$\frac{v_{l(\text{olej})}}{v_{l(\text{ocel})}} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + H^2}} = \sin(\alpha), \quad (5)$$

kde α predstavuje hodnotu kritického uhla dopadu Θ čela vlny na nádobe transformátora. Dosadením čísel z tab. 1 do rovnice (5) získame hodnotu $\alpha=13,727^\circ$.

Pri analýze šírenia akustickej vlny od zdroja k senzoru rozlišujeme dva prípady. Prvým je, ak platí $\Psi > \alpha$. Potom podľa rovnice (5), pre čas t_l , kedy čelo vlny dorazí k senzoru, platí:

$$t_l = \frac{H}{v_{v(\text{olej})} \cdot \cos \alpha} + \frac{X - \tan \alpha}{v_{l(\text{ocel})}} \quad (6)$$

Druhý prípad nastane, ak $\Psi \leq \alpha$. Vtedy akustická vlna dorazí k senzoru priamo za čas:

$$t_p = \frac{\sqrt{H^2 + X^2}}{v_{v(\text{olej})}} \quad (7)$$

V praxi však akustický senzor zachytí všetky interferujúce vlnenia prichádzajúce z rôznych smerov. Najviac dôležitým smerom je ten, v ktorom vlnenie postupuje najrýchlejšie.

Možnosti lokalizácie zdrojov častkových výbojov

Existuje niekoľko známych metód lokalizácie zdrojov častkových výbojov pomocou merania akustickej emisie. V tomto príspevku spomenieme dve najznámejšie.

Prvá metóda je jednoduchšia a spočíva v meraní amplitúdy signálu akustickej emisie v rôznych vzdialenostiach od zdroja častkových výbojov [3]. Hľadá sa miesto s najvyššou amplitúdou. Pri tejto metóde je potrebné sledovať tieto faktory: amplitúdu akustickej emisie, tvar signálu a vnútornú stavbu testovaného transformátora.

Pri druhej metóde sa užitočné signály registrujú v reálnom čase vo viacerých snímačoch a potom prebieha výpočet pozície napríklad tzv. triangulačnou metódou.

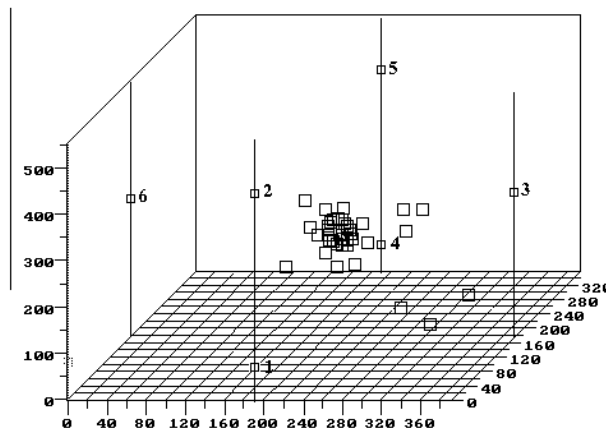
Fyzikálne overenie matematického modelu

Bol vytvorený model olejovej nádoby transformátora. Do neho bol uložený na známu pozíciu zdroj častkových výbojov o známej hodnote zdanlivého náboja. Bol použitý prúdový model, popísaný v [4, 5].



Obr. 2 Experimentálne pracovisko

Na plášť olejovej nádoby boli umiestnené akustické senzory, pozri obr. 2. Akustická emisia bola sledovaná monitorovacím multikanálovým systémom Spartan. Tento systém sa využíva aj pri diagnostike transformátorov [6]. Výsledky lokalizácie sú na obr. 3.



Obr. 3. Lokalizácia modelu poruchy v experimentálnej olejovej nádobe

Merania potvrdili, že lokalizácia zdrojov častkových výbojov na modeli je možná už od hodnoty zdanlivého náboja rádovo niekoľkých stovák pC.

Záver

Pomocou analýzy akustickej emisie je možné detekovať a lokalizovať závady v izolačnom systéme alebo aj poruchy v magnetickom obvode vysokonapäťových transformátorov s olejovým médiom.

Intenzity výbojovej činnosti vnútorných zdrojov častkových výbojov môžu byť nestabilné, čo možno prekonať dlhodobým meraním akustickej emisie.

Na základe výsledkov je možné potvrdiť vývoj vady a poukázať na charakter ohrozenia celého zariadenia.

Snímanie akustickej emisie čiastkových výbojov otvára nové možnosti v diagnostike vn a vv olejom plnených transformátorov. Hlavnými výhodami sú: odolnosť voči elektromagnetickému rušeniu, možnosť monitorovania transformátorov počas prevádzky a určenie polohy zdrojov čiastkových výbojov. Metóda je užitočná najmä pri riešení kritických stavov zariadení, ale aj pri preventívnej diagnostike.

Literatúra

- [1] Skubis, J. A state of development of the acoustic method for assesment of partial discharges and directions of its improvement. 2nd I.C.D.I, High Tatras, Slovakia, 2000, s. 144--152.
- [2] Phung, B. T., Blackburn, T. R., and Liu, Z. Acoustic measurements of partial discharge signals [online]. 1.5.2002, <http://www.itee.uq.edu.au> [cit. 20.10.2007]
- [3] Džmura, J., Petráš, J., Balogh, J., Partial discharge measurements using acoustic mehods. In: Electrotehnica, Electronica, Automatica. vol. 56, no. 4 (2008), p. 10-12. ISSN 1582-5175.]

- [4] Marton, K., in VI. Sympozjum Problemy eksploatacji ukladow izolacyjnych wysokiego napiecia, s. 205, 23–25, Zakopane pazdziernik, 1997, Polska
- [5] Marton, K., Džmura, J., Balogh, J., Aktivita čiastkových výbojov modelovaná prúdovým modelom. In: Diagnostika 2001: Mezinárodní konference : Nečtiny, 4.-6. září 2001. Plzeň: ZČU, 2001. p. 38-41. ISBN 80-7082-742-4
- [6] Kováčik, Jozef: Prevádzkové skúsenosti s on-line monitorovacími systémami výkonových transformátorov. In: Control of Power Systems '08 : 8th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, 11.-13.6.2008. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2008. - ISBN 978-80-227-2883-6

Táto práca vznikla v rámci riešenia projektov: APVV 20-006005 a VEGA 1/0368/09.

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