



PUBLIKÁCIA TECHNICKEJ UNIVERZITY V KOŠICIACH

STARNUTIE ELEKTROIZOLAČNÝCH SYSTÉMOV

November 2007

Číslo 3/2007

ISSN 1337-0103

Obsah

Karol Marton, Juraj Kurimský, Jozef Balogh, Marek Boga Aktivita častkových výbojov pri zvýšených teplotách prostredia	3
Marton K.*, Tomčo L.**, Herchl F.***, Kolcunová I.*, Koneracká M.***, Kopčanský P.***, Timko M.*** Magnetodielektrická anizotropia magnetických kvapalín	9
Ján Tkáč, Juraj Kurimský, Bystrík Dolník Akustická detekcia častkových výbojov	14
Roman Cimbala Tepelná závislosť izolačného stavu rastlinného oleja	19
Jaroslav Džmura Vyhodnocovanie parametrov signálov akustickej emisie častkových výbojov	21
Juraj Kurimský, Iraida Kolcunová Modelovanie častkových výbojov v izolačnom systéme transformátorov	25
Vybrané kapitoly z elektroenergetiky	
Marek Hvizdoš, Ján Tkáč Influence of Soil Properties to Arcing Phenomena during Ground Faults	30

Editor
Juraj Kurimský, Technická univerzita v Košiciach

Redakčná rada
Roman Cimbala, Technická univerzita v Košiciach
Bystrík Dolník, Technická univerzita v Košiciach
Karol Marton, Technická univerzita v Košiciach
Michal Kolcun, Technická univerzita v Košiciach
Iraida Kolcunová, Technická univerzita v Košiciach

Starnutie elektroizolačných systémov
Publikácia Technickej univerzity v Košiciach
(c) 2007 Technická univerzita v Košiciach
ISSN 1337-0103

Karol Marton, Juraj Kurimský, Jozef Balogh, Marek Boga

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

Aktivita čiastkových výbojov pri zvýšených teplotách prostredia

Abstrakt

Príspevok je venovaný problematike pôsobenia teploty v kombinovanom izolačnom systéme na vznik čiastkových výbojov v defektných miestach izolácie v rozsahu teplôt od 268 K do 360 K, pri súčasnom pôsobení striedavého elektrického poľa. Experimenty boli realizované na modeli napätovom a prúdovom, generujúcom čiastkové výboje, pričom defektné miesto – dutina – bola vytvorená iskrikom o presne definovaných geometrických rozmeroch, v hermeticky uzavretom prostredí. Bol vypracovaný softvér, na základe ktorého boli vyhodnotené sledované výpovedeschopné veličiny čiastkových výbojov. V závere je vyhodnotená výbojová činnosť aj z hľadiska tlakových pomerov v modelovej dutinke.

Abstract

In this paper the influence of insulation's temperature on discharge activity in insulation's defective location is analyzed (cavity, electric tree etc.) with the help of models containing passive elements (R-L-C). In the first part of the paper the possible influence of thermal energy on model's elements and on defective location is shown from technical point of view, as well as the respecting of reduced Paschen's law in gaseous environment of defective location. A hypothesis is uttered in discharge processes development in discontinuous cavity with defined dimensions. In the second part defective locations in composite – laminated insulations of electric machines are analyzed, which results the proposal of creation a 3-dimensional model of partial discharge in insulation system..

Kľúčové slová: čiastkový výboj, fázové rozloženie.

Keywords: partial discharge, phase distribution

Úvod

Relatívne málo publikovaných prác orientovaných na fyzikálne javy vedúce k vzniku a rozvinutiu čiastkových výbojov v izolačných systémoch pri teplotách odpovedajúcich tepelnej triede aplikovanej izolácie sa venuje fenoménu vzájomného pôsobenia elektrického a tepelného poľa. Doterajšie skúsenosti v praxi však poukázali na to, že v jednoduchých prípadne zložitých (vrstvených) systémoch, resp. komplikovaných izoláciách je mechanizmus výbojovej činnosti v extrémne malých objemoch plynných uzáverov odlišný. Boli tendencie, ktoré na základe modelovania procesov v defektnom mieste izolácie viedli k separátnemu skúmaniu napätových, prúdových, tlakových a teplotných pomerov v mikropriestore.

Defektné miesto sme modelovali modifikovaným Boeningovým [8] modelom a v rámci výskumu vyvinutým prúdovým [4] modelom. Merania boli realizované pri separátnom ohreve modelu plynného uzáveru, ako aj so zohľadnením celkového ohrevu modelu defektného miesta. Ukázalo sa, že polarizačné a vodivostné pomery obklopujúceho makropriestoru izolácie v značnej miere ovplyvňujú javy v defektnom mieste. Táto skutočnosť viedla autorov predkladanej práce k tomu, aby poukázali na elementárne zmeny výpovedeschopných veličín pri zmenách teploty, resp. tlaku v skúmanom médiu za spoluúčinkovania elektrického poľa.

Bol zvolený nekonvenčný prístup k riešeniu nastoleného problému prostredníctvom výpovedeschopnej veličiny (početnosť výbojov n , zdanlivý náboj q), ktorá je odvodená od prúdových impulzov, reprezentujúcich elementárne (diferenciálne) zmeny vo výbojovom priestore (plynnom uzávère). Metóda skúmania (analýzy) fázového rozloženia výpovedeschopných veličín v dvojrozmernej rovine, prípadne trojrozmernom priestore umožňuje prostredníctvom výpočtovej techniky detailne rozobrať pomery v defektnom mieste buď modelu alebo reálneho izolačného systému.

Výsledky, ktoré boli dosiahnuté sú veľmi povzbudivé a sú konfrontované s modelovými dutinami v homogénnom elektrickom poli (platnosť Paschenovho zákona) s dutinou

vytvárajúcou nehomogénne pole (redukovaný Paschenov zákon). Komplexný pohľad na tieto javy umožní teoretický rozbor základných fyzikálnych javov jednak v plynnom uzávère ako aj v samotnom izolante pri súčasnom pôsobení elektrickej a tepelnej energie.

Vývoj poznatkov o aktivite čiastkových výbojov v defektnom mieste

Medzi prvých autorov, ktorí študovali na základe modelov prúdovú odozvu na zmeny napätia počas výboja v plynnom vyplnenej dutine boli Arman a Starr [5]. Konštatovali, že prechodnému napätovému javu po zapálení výboja v dutine (plynnový uzáver) odpovedá prúdový impulz i_2 , ktorému predchádza pri zmene napätia v oblasti prechodu nulou prechodný jav prúdový i_1 o nízkej amplitúde s dlhšou dobou trvania t_1 . Vychádzajúc z klasickej modelovej predstavy z následnej matematickej analýzy Arman a Starr dospeli k názoru, že rovnica prúdového impulzu bude mať tvar:

$$(1) \quad i_k = \frac{U_{ci}}{R} \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right)$$

pričom časová konštanta τ_k zohľadňuje RC prvky obvodu v tejto forme:

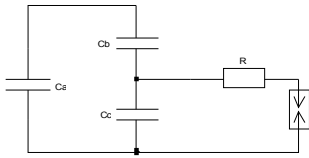
$$(2) \quad \tau_k = \frac{R(C_a C_b + C_a C_c + C_b C_c)}{C_a + C_b}$$

a v zjednodušenom tvare:

$$(3) \quad \tau_k \cong R(C_b + C_c) \cong RC_c$$

Táto úvaha bola z fyzikálneho hľadiska podporená tým, že elektrická pevnosť dutinky sa pomaly regeneruje, po zániku výboja sa rozloženie potenciálu na obvode zachová určitou zotrvačnosťou nábojov. Táto skutočnosť zodpovedá predstave o tom, akoby v defektnom mieste bol výboj, ktorý pri prechode napätia nulou zaniká. K opätovnému nabíjaniu dutiny dochádza po zmene polarity napätia na modeli. Z toho dôvodu celkový prúd i_k pozostáva z dvoch komponentov, pričom i_1 je dôsledkom zmeny polarity a trvá $t_1=3-4$ ms a náboj odpovedá hodnote $Q = C_c(U_{ci}+U_{ck})$,

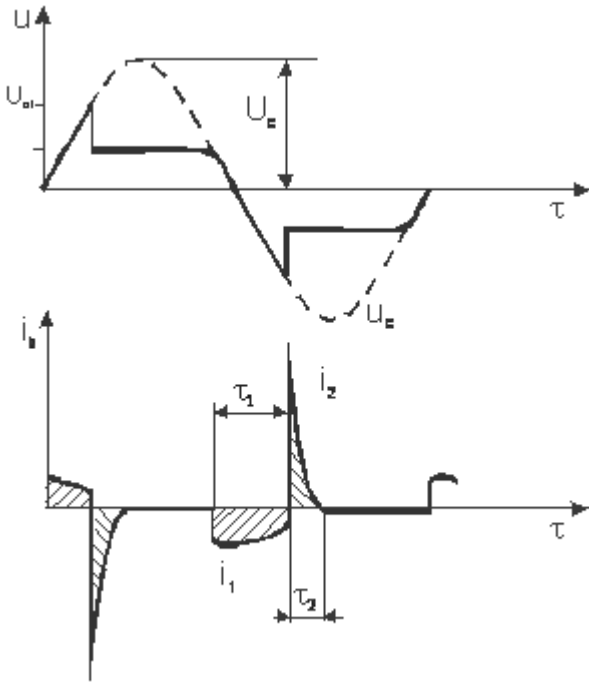
pričom prúd i_2 , trvajúci iba $\tau_2 = 10^{-7}-10^{-9}$ s predstavuje náboj $Q_2 = C_c(U_{ov}-U_{ck})$. Obe zložky prúdov i_1 a i_2 je možné ďalej analyzovať Fourierovým rozvojom (pozri Vajda [6]), ktorého výsledkom je pomer $i_1/i_2 = 1/40$.



Obr. 1: Náhradná schéma modelu poruchy v izolácii [6]

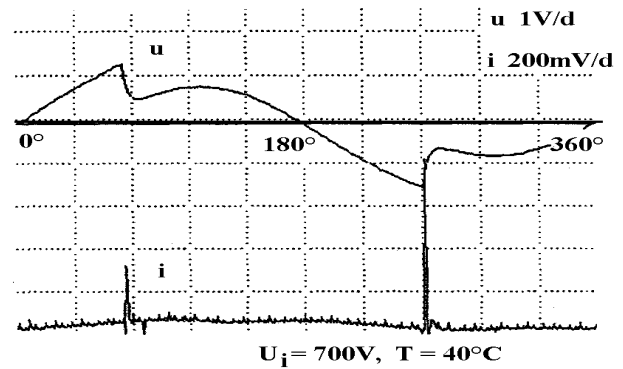
Proces nábojových, prúdových a napätových zmien môžeme sledovať na obrázku 2.

Ako neskôr Veverka [7] popísal, nábojové a napätové pomery a zmeny na defektnom mieste prispievajú aj ku zmenám na vzorkách modelu, takže okamžitá zmena náboja na dutinke bude $Q_c = C_c \Delta U_c$, čo vyvolá posun napätia na svorkách o ΔU_c . Vzhľadom na to, že pozorované deje odohrávajú v extrémne krátkom čase a vlastnosti zdroja a obvodu (indukčnosť, odpor a pod.) nedovoľujú za ten krátky čas kompenzáciu napätia resp. zabraňujú vzniku vyrovnávacích prúdov. Podrobnejšie pozri: Vajda [6]. Z uvedenej analýzy vyplynie, že podstatnú úlohu tu hrajú komponenty náhradného modelu (R, C zložky), z ktorých je najviac ovplyvnená pri zmene teploty elektrická vodivosť skúmanej sústavy.



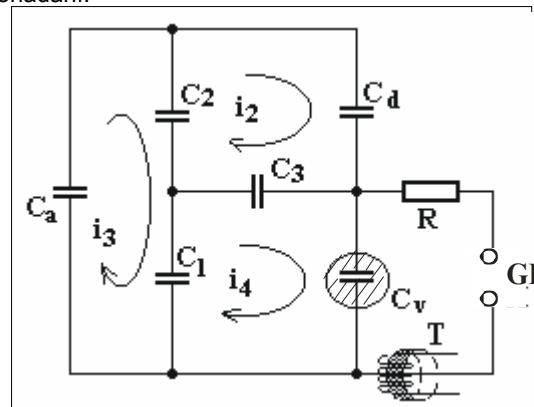
Obr. 2: Prúdové impulzy ako odozva na napätové zmeny počas výboja (Arman a Star [5])

Rozšírený model Armana a Stara Boeningom [14] a nami modifikovaným modelom defektného miesta v izolačnom systéme umožňuje snímať priebeh napätových a prúdových závislosti počas výboja digitálnym osciloskopom (pozri obrázok 3). Frekvencia napätia $f=50$ Hz, doba periódy $T=20ms$.

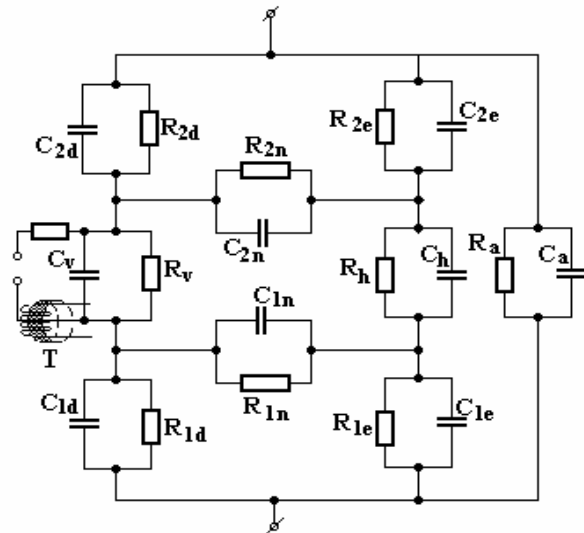


Obr. 3: Priebeh napätového a prúdového signálu z digitálneho osciloskopu

V izolačných systémoch sa vyskytuje v priebehu starnutia väčší počet defektných miest. Tento stav riešia viacčlánkové modely (obrázok 13), prípadne mnohočlánkové modely (obr. 14) podľa Kučinského. Tieto modely môžu byť realizované aj v priestorovom usporiadaní.



Obr. 4: Viacčlánkový model s kapacitným premostením



Obr. 5: Mnohočlánkový model podľa Kučinského

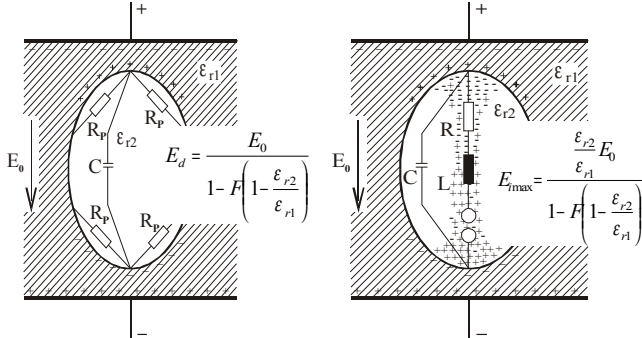
Najnovšie poznatky, podporené digitalizáciou signálu a schopnosťou prístrojovej techniky zaznamenávať elektrofyzikálne prechodné javy v extrémne krátkom čase, prispeli k tomu, že sme úpravou resp. modifikáciou náhradného modelu napätového dokázali [4] nielen vizualizovať, ale aj matematicky zdôvodniť reálny tvar prúdového impulzu.

Vychádzali sme zo skutočnosti, že autori Arman a Star [5] ako aj Gemant, Philipoff a Veverka [7] riešením

základných diferenciálnych rovníc operátorovým počtom a ich transformáciou na:

$$(4) \quad F(p) = p \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-pt} dt$$

Nepoukázali na procesy, odohrávajúce sa v čele impulzu vyjadreného vzťahom $i = i_0 \exp(-\kappa t)$ Progresívnejším riešením sa ukázal náš výskum zameraný priamo na riešenie prúdových procesov počas výboja v dutine (pozri Marton [4]). Na základe toho sme zaviedli modelovanie dejov priamo v dutine (obrázok 6).



a) pomery pred nasadením výboja b) pomery po vzniku výboja
Obr. 6

Obvod je rozšírený o mikroi indukčnosť L , ktorá predstavuje dráhu výboja. Pre obvod napíšeme diferenciálnu rovnicu

$$(5) \quad L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = 0$$

ktorej riešením je (ak korene charakteristickej rovnice $\alpha_1 \neq \alpha_2$) priebeh prúdového impulzu

$$(6) \quad i(t) = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t} \equiv i(t) = I_0 \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right)$$

Ďalšou analýzou dostávame:

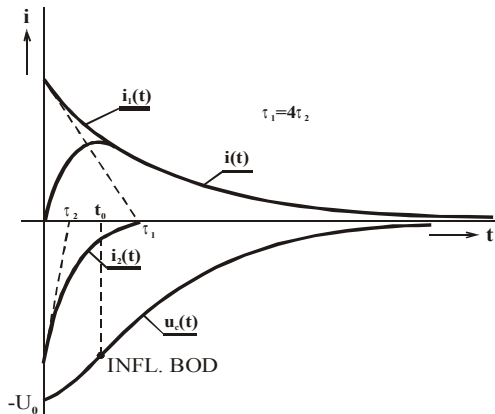
$$i(0) = 0$$

$u_C = -U_0$ – pred výbojom je na C_d napätie U_0

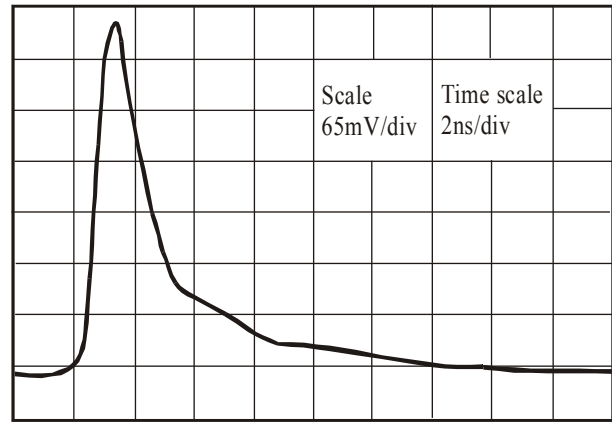
Ďalšia podmienka je viazaná na $i'(0)$ v bode $t = 0$

$$(7) \quad L \left(\frac{di}{dt} \right)_{t=0} + Ri(0) + u_0(0) = 0 \text{ z čoho } i'(0) = \frac{U_0}{L}$$

Aperiodický priebeh impulzu čiastkového výboja získaného z prúdového modelu na základe odvodených výsledkov vidíme na obrázku 7. Prúdový impulz strímrového výboja podľa meraní fy TETTEX [15] je na obr. 8.



Obr. 7



Obr. 8

Z podmienky $\frac{di}{dt} = 0$, pričom $I_0 \neq 0$ dostávame pre maximum prúdového impulzu čas, vyjadrený rovnicou:

$$(8) \quad t_m = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \ln \frac{\tau_1}{\tau_2}$$

Krivky na obrázku 7 poukazujú na spustenie mechanizmov po nasadení výboja, reprezentovaného impulzom, čo znamenalo, že v nanosekundovej oblasti sme dokázali analyzovať prechodné javy, ktoré sa v skúmanom mikroobjeme odohrávajú v závislosti od času.

Súčasné pôsobenie elektrického a tepelného poľa na defektné miesto v izolačnom systéme

Sledovanie vplyvu elektrického a tepelného poľa bolo zamerané na systém kvapalných a pevných izolantov, prípadne ich kombinácií. Na základe toho odôvodnenie javov pri tomto procese namáhania budeme hľadať vo fyzike dielektrík a izolačných systémov.

Z teórie dielektrík a izolačných systémov vyplýva, že vplyv teploty na izoláciu je značný. Zvyšovaním teploty sa zvyšuje energia elementárnych stavebných častíc, pričom sa aktivujú aj ďalšie nosiče nábojov. Zvyšovaním teploty sa zväčšuje nielen ich počet, ale aj pohyblivosť. Nakoľko v nami sledovanom prípade sa musíme sústrediť aj na defektné miesta (dutiny) s plynným médiom, zdôrazňujeme, že v plynch zvyšovaním teploty stúpa tlak, avšak pohyblivosť klesá v menšej miere voči zvyšovaniu početnosti častíc. Z toho dôvodu aj merná vodivosť izolačných látok s teplotou stúpa, čo dokazuje, že teplotný koeficient narastá (je pozitívny a dá sa vyjadriť:

$$(9) \quad \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial T}$$

pričom [6]:

$$(10) \quad \gamma = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$$

Prípadne v menšom teplotnom intervale bude:

$$(11) \quad \gamma = \gamma_0 \exp[C(\vartheta - \vartheta_0)]$$

kde A,B,C sú konštanty.

Experimenty dokazujú, že aj malé zmeny teploty vyvolávajú radové zmeny vodivosti.

Keďže v predkladanej práci sa budeme orientovať na výpovedeschopnú veličinu, definovanú prúdovými impulzmi, našu pozornosť zameriame na zovšeobecňujúcu rovnicu, platnú pre zmeny priebehov hustoty prúdu i_c v závislosti od teploty T v tejto forme:

$$(12) \quad \frac{\partial i_c}{\partial T} = \frac{1}{\tau} \left[\frac{\partial m_i}{\partial T} - \frac{m_i}{\tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial T} \left(1 - \frac{t}{\tau_i} \right) \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) = 0$$

Touto rovnicou je vyjadrená vzájomná súvislosť medzi elementárnymi zmenami dipólového momentu m_i ako aj časovej konštanty τ_i pri malých zmenách teploty T v pozorovanom objeme. Z fyzikálneho hľadiska je tým dokázané, že aj stabilizujúci sa ustálovací proces dipólového momentu sa mení podľa exponenciálnej rovnice:

$$(13) \quad m(t) = m_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right]$$

a taktiež elementárna zmena dipólového momentu v závislosti na čase, prúdová hustota i_c a má exponenciálny charakter:

$$(14) \quad \frac{dm}{dt} = i_c = \frac{m_i}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)$$

Z vyššie uvedených rovníc môžeme vypočítať okrajové podmienky, stanovujúce kritickú hodnotu teploty T . K analogickému výsledku sa dostaneme, ak riešime priebeh relaxačného prúdu i_a pri konštantnom čase t . Vzhľadom na to, že pri vzniku (aktivizácii) čiastkových výbojov v plynnom uzavretej dutine dochádza v časovom intervale (10^{-8} – 10^{-9}) s k prudkým zmenám vodivosti, musíme rešpektovať v pozorovanom mikroobjeme túto zmenu, čo sa prejaví predovšetkým na zmene časovej konštanty τ (zmena R , C vychádzajúc z náhradného modelu v dutine aj v samotnej izolácii).

Úvahy, ktoré sme v predchádzajúcej stati predložili k diskusi, nepodávajú kompletný pohľad na stav výbojovej činnosti v defektných miestach izolácie pri znížených teplotách. Pri prechodných javoch počas výbojovej činnosti v prevádzke, zmena teploty vyvolá zmenu tlaku v objeme plynného uzáveru, čo na základe Paschenovho zákona v homogénnom elektrickom poli spôsobí zmenu tzv. „zápalného“ napätia. Tento jav je vyvolaný pri zvýšení tlaku v mikroobjeme zmenou koncentrácie častíc a tým aj ovplyvnením strednej voľnej dráhy. Koeficient vyjadrujúci zmenu pozorovanej veličiny od tlaku p je v prípade relatívnej permitivity ϵ_r a stratového činiteľa $\tan(\delta)$ kladný, tzn.:

$$(15) \quad \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \frac{\partial \epsilon_r}{\partial p} > 0$$

a

$$(16) \quad \frac{1}{\tan \delta} \cdot \frac{\partial (\tan \delta)}{\partial p} > 0$$

Avšak pri diferenciálnej zmene mernej elektrickej vodivosti γ je koeficient záporný:

$$(17) \quad \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial p} < 0$$

čo je treba pri vyhodnotení uvedených procesov zohľadniť. Zmeny preskokového („zápalného“) napätia v plynnom prostredí v závislosti od tlaku p , sú na obrázku 9: zmeny v homogénnom poli (a) a zmeny v nehomogénnom poli (b).



Obr. 9: Paschenové krivky platné pre homogénne elektrické pole (a) a pre nehomogénne pole (b)

Je nutné upozorniť na to, že v prípade nehomogénnych elektrických polí v defektom mieste sa vyskytuje lokálne maximum a lokálne minimum, takže vstupuje do platnosti redukovaný Paschenov zákon, ktorého všeobecné vyjadrenie má tvar

$$(18) \quad U_z = f\left(p \cdot d, \frac{r}{d}\right)$$

kde r je polomer elektród, deformujúcich elektrické pole a d – vzdialenosť elektród

Preskokové napätie je v prípade (b) niekoľkonásobne nižšie a vyznačuje sa lokálnym maximom a následným minimom, pričom v úzkom intervale je dU/dp záporné, čo svedčí o poklese „zápalného“ napätia spôsobeného ionizačnými procesmi súvisiacimi so zvýšenou aktivitou priestorového náboja.

Tesná fyzikálna spätosť tlaku a teploty vyplýva aj z Boyle-Mariottovho zákona (Ilkovič [9]). Akonáhle sa mení tlak plynu vplyvom teploty, rovnica zhrňujúca tieto pomery pri vyjadrení zápalného napätia podľa Veverku [7] bude mať tvar

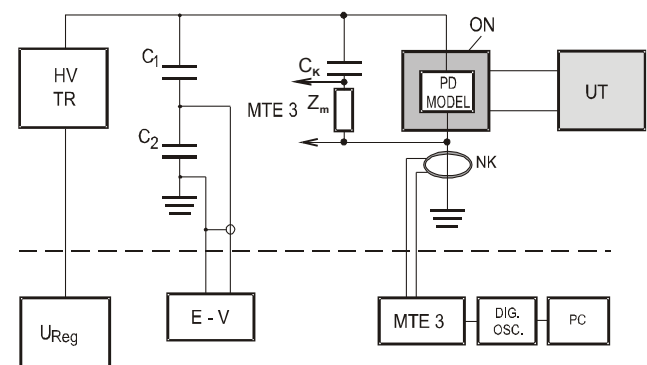
$$(19) \quad U_z = \frac{B \cdot p \cdot d \left(\frac{T_0}{T}\right)}{A \cdot p \cdot d \left(\frac{T_0}{T}\right) \ln \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right)}$$

kde A , B sú konštanty, d – vzdialenosť elektród, $T_0=293$ K, T – absolútna teplota prostredia (K) a κ – súčet sekundárnych činiteľov.

Ako je dokázané v [2], hladina zápalného napätia U_z v modelovej dutinke v závislosti od teploty plynného prostredia v iskrisku kvazilineárne klesá, čo sa prejaví aj na Paschenovej krivke v oblasti teplôt od 0 °C do 80 °C poklesom a posunom k vyšším tlakom.

Experimentálne sledovanie výbojovej aktivity pri súčasnom pôsobení elektrického a tepelného poľa

Meracie stanovište bolo zostavené tak, aby bolo umožnené snímanie výpovedeschopnej veličiny čiastkových výbojov galvanickým a induktívnym spôsobom z modelu defektného miesta, ktorý bol vytvorený modifikovaným Boeingovým modelom a prúdovým modelom [4]. Snímanie bolo podporené výpočtovou technikou a stupňovité zvyšovanie teploty bolo nastaviteľné ultratermostatom v rozsahu teplôt od 20 °C do 80 °C. Pri nízkych teplotách do – 5 °C bola stabilizácia teploty zabezpečená nízkoteplotným mraziacim systémom. Schéma zapojenia je na obrázku 10.



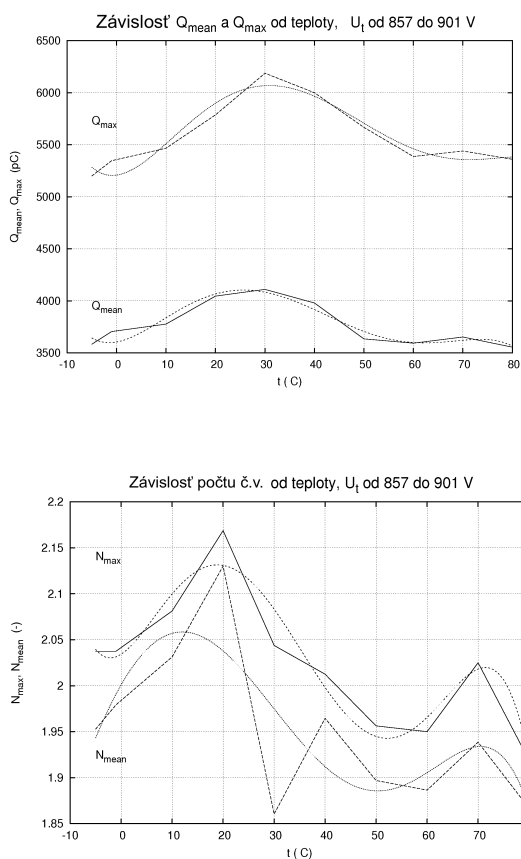
Obr. 10: Komplexné meracie stanovište

Popis jednotlivých komponentov: HV-TR – neionizujúci vysokonapäťový transformátor, C_1 , C_2 – napäťový delič, C_k – väzobný kondenzátor, Z_m – meracia impedancia, pripojená k meraču čiastkových výbojov MTE3, PD – model umiestnený v nádobe (ON) s vysokokvalitným

transformátorovým olejom. UT – ultratermostat zabezpečujúci ohrev oleja. Induktívny snímač NK na toroidnom jadre z kompaktnej zliatiny PREMALLOY, prípadne z nanokryštalického materiálu. Konce vinutí snímača sú vedené do vstupu merača čiastkových výbojov MTE3 s prepojením na digitálny osciloskop a počítač PC. Regulačným transformátorom U_{Reg} sa ovláda zvyšovanie napätia a obvod je doplnený ochrannými prvkami. Softvér [2] bol vypracovaný tak, aby bolo možné sledovať výpovedeschopné veličiny v časovej i fázovej doméne a vykonať štatistickú fázovú analýzu. Do pozornosti čitateľa predkladáme tieto závislosti výpovedeschopných veličín [2]:

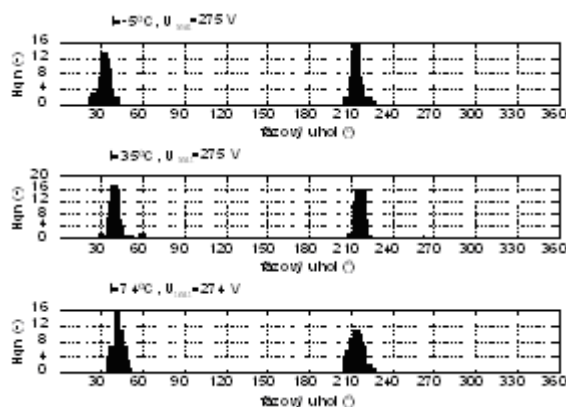
- počet impulzov od testovacieho napätia
- stredné a maximálne hodnoty zdanlivého náboja od napätia
- hodnoty zdanlivého náboja a početnosti v závislosti od teploty
- fázové rozloženia početnosti zdanlivého náboja
- fázové rozloženia maximálnych hodnôt zdanlivého náboja
- amplitúdové spektrá zdanlivého náboja pri rôznych teplotách

Výsledky charakterizujúce vplyv teploty na aktivitu čiastkových výbojov zhrnieme do týchto grafických zobrazení na obrázok 11.

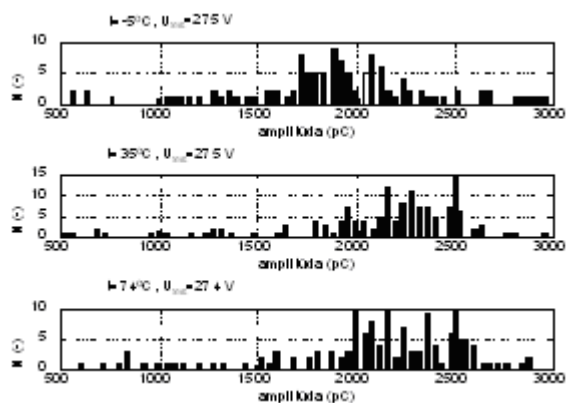


Obr 11: Teplotné závislosti zdanlivého náboja a početnosti [2]

Výbojovú dráhu v plynnom uzávere reprezentovalo iskriko hermeticky uzatvorené, o vzdialenosti elektród 450 μm . Fázové rozloženia početnosti zdanlivého náboja pri teplotách $-5^\circ C$, $35^\circ C$ a $74^\circ C$ sú na obrázku 12.



Obr. 12: Fázové rozloženie početnosti

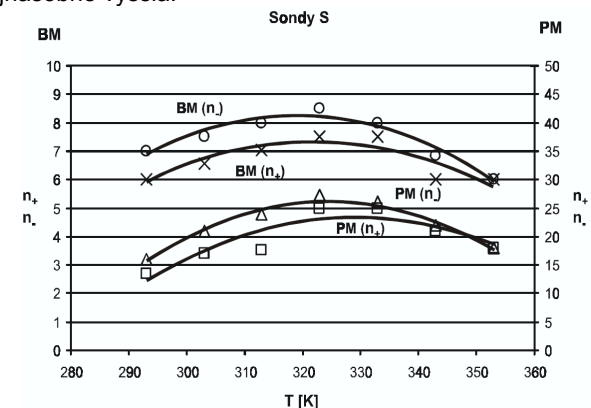


Obr. 13: Amplitúdové spektrá zdanlivého náboja [2]

Pri zvyšovaní teploty je pozorovateľný posun nasadenia výbojov vo fázovom rozložení o 15 % smerom k vyšším hodnotám, čo je pozorujeme aj na priebehoch amplitúdových spektier zdanlivého náboja pri prechode od $-5^\circ C$ cez nulovú izotermu. Maximálna amplitúda spektra sa posúva od hodnoty 1 800 pC ($-5^\circ C$) na hodnotu 2 200 pC (pri $35^\circ C$), pozri obrázok 13.

Poznamenávame, že boli dosiahnuté analogické výsledky aj pri galvanickom snímaní aktivity čiastkových výbojov, ako aj pri aplikovaní dvoch typov induktívnych snímačov na Boeingovom a prúdovom modeli.

Na obrázku 14. sú znázornené priebehy početnosti snímaných impulzov n_+ v kladnej a n_- v zápornej polperióde harmonického priebehu. na Boeingovom modeli (BM) a na prúdovom modeli (PM). Citlivosť PM je približne trojnásobne vyššia.



Obr. 14: Porovnanie citlivosti prúdového modelu (PM) a Boeingovho modelu (BM) defektného miesta v izolácii [3]

ZÁVER

Predbežné výsledky z experimentov sú v súlade s teoretickými predpokladmi. Ukázalo sa, že v prípade

vzoriek, ktoré boli pred exponovaním ako aj počas merania vystavené nízkym teplotám (obr. 5 a obr. 7), vykazujú už pri nižších teplotách zvýšené hodnoty početnosti a amplitúdy zdanlivého náboja, čo môže spôsobiť v okolí bodu mrazu kondenzácia existujúcich vodných pár v mikroobjeme a tieto menia tlakové pomery v plynných uzáveroch. Menia tiež zloženie náplne plynovej dutinky, čo na základe Paschenovho zákona môže spôsobiť presun výbojovej aktivity k nižším teplotám.

Táto práca vznikla za podpory vedeckej grantovej agentúry ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA č. 1/3142/06 a v rámci projektu APVV-20-006005

LITERATÚRA

- [1] Marton, K., Balogh, J.: Partial discharge activity at temperature $T > 20^{\circ}\text{C}$, Scientific Colloquium on High Voltage Engineering Proceedings, pp. 173-180, Slovak Electrotechnical Society, FEI TU of Košice 2002, ISBN 80-89061-54-0.
- [2] Kurimský, J.: Výboje v transformátoroch, Doktorandská dizertačná práca, FEI TU v Košiciach, str. 109, Košice 2002
- [3] Balogh, J.: Lineárne a toroidálne induktívne sondy a ich aplikácie v elektroenergetike, Doktorandská dizertačná práca, FEI TU v Košiciach, str. 109, Košice 2001
- [4] Marton, K.: Current model of defect place in insulation systems, 43rd International Scientific Colloquium '98 Proceedings, pp. 281-286, TU Ilmenau 1998, Germany
- [5] Arman, A.N., Starr, A.T.: The measurement of discharge in dielectrics, Journal of IEE, 79 67 (1936)
- [6] Vajda, G.: A szigetelés romlása és romlásuk vizsgálata, Akadémia Kiadó Budapest, 1964, pp. 526
- [7] Veverka, A.: Technika vysokých napětí, SNTL Praha – ALFA Bratislava, 1978
- [8] Kršňák, I.: Detekcia častkových výbojov a analýza výpovedeschopných veličín, Doktorandská dizertačná práca, FEI TU v Košiciach, str. 109, Košice 1996
- [9] Marton, K., Balogh, J., Kurimský, J.: Partial discharge activity in the cavity models at higher temperatures, Proc. Of 2nd Int. Conference on Dielectric and insulation, High Tatras, FEI TU Košice, pp. 177-182
- [10] Boga, M.: Pisomná práca k dizertačnej skúške, FEI TU v Košiciach, 2005
- [11] Marton, K.: Electrophysical Basic of Scanning the PD by Capacitive and Inductive Sensor. 6th Symposium EUI, Krakow-Zakopane 1997, pp. 205-214,
- [12] Kučinskij, G. S.: Častičnije razriady. Izdatel'stvo Energia, Leningrad 1979
- [13] Kranz, H. G.: Hochspannungstechnik. Skriptum Fachbereich Elektrotechnik, BUGH Wuppertal 1993
- [14] Boening, A.: Luftgehalt und Luftspalt Verteilung geschichteter Dielektrika, Archiv für Elektrotechnik, No 1, 1963
- [15] TETTEX Information № 407, Zürich-Dietikon 1987
- [16] MARTON, K., BOGA, M., BALOGH, J., DŽMURA, J., PETRÁŠ, J.: Vplyv teploty na rozvoj častkových výbojov, III. Medzinárodné sympóziu Elektroenergetika 2005, Stará Lesná, ISSN 80-8073-305-8.

AUTORI:

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

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

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

Ing. Marek Boga, MBtech Bohemia s.r.o. Praha,

Marek.Boga@mbtech-group.com

Marton K.*, Tomčo L.**, Herchl F.***, Kolcunová I.*, Koneracká M.***, Kopčanský P.***, Timko M.***

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

** Letecká fakulta, Technická univerzita v Košiciach

*** UEF Slovenská akadémia vied, Košice

Magnetodielektrická anizotropia magnetických kvapalín

Abstract. There are described characteristic dielectric and magnetodielectric properties of magnetic fluids in a contribution. The behaviour of magnetic fluids in AC electric field with frequency $f = 50$ Hz and also at higher frequencies is defined. Measurements were carried out in combined electric and magnetic field, when fields were parallel ($E \parallel H$), perpendicular ($E \perp H$) and without presence of magnetic field ($H = 0$). Analysis of these properties were done for magnetic fluids based on inhibited transformer oil ITO 100 with volume concentrations of magnetite particles ($FeO \cdot Fe_2O_3$) in range from 0,185 % up to 3,214%.

Úvod

Výskum dielektrických a magnetodielektrických vlastností magnetických kvapalín je úzko spojený s magnetodielektrickým javom, ktorý sa prejavuje magnetodielektrickou anizotropiou [1] v týchto materiáloch. Týmto otázkam sa venovali viacerí autori [2] v prvej a čiastočne v druhej polovici osemdesiatych rokov, avšak práce mali prevažne teoretický charakter a boli menej podporované experimentom. V závere predchádzajúceho storočia a najmä v uplynulých rokoch bola z dielektrických vlastností skúmaná elektrická pevnosť magnetických kvapalín v kombinovanom elektrickom poli s poľom magnetickým pri usporiadaní: E -variabilné; $H=0$; $E \parallel H$ a $E \perp H$, pričom aplikované elektrické pole bolo vyvolané jednosmerným napätím, prípadne striedavým napätím (50Hz a 800Hz) sinusového priebehu (pozri tiež [3],[4],[5]). Výsledky výskumu elektrickej pevnosti magnetických kvapalín s rôznymi koncentraciami magnetitových častíc (0,125%-4%) pri voľbe vyššie uvedeného usporiadania taktiež poukázali na magnetodielektrickú anizotropiu, ktorá sa prejavuje značnou odlišnosťou elektrickej pevnosti sledovanej magnetické kvapaliny v závislosti od orientácie elektrického a magnetického poľa. Jednou z pozorovaných makroskopických výpovedeschopných veličín je relatívna permitivita (ϵ_r) magnetické kvapaliny. Permitivita je funkciou aplikovaného poľa [1] a vzájomnej orientácie intenzity elektrického a magnetického poľa (resp. indukcie magnetického poľa). Magnetodielektrické správanie sa magnetických kvapalín môže byť vysvetlené buď orientáciou nesférických častíc [3] alebo priestorovým rozdelením magnetických častíc pod vplyvom vonkajšieho magnetického poľa (vytváranie klastrov a retiazkových štruktúr). V prípade, že sa predpokladá nesférický tvar magnetických častíc, orientácia častíc môže meniť celkovú elektrickú susceptibilitu magnetické kvapaliny, čo vyvolá magnetodielektrický jav. Podľa [3] je známe, že dipól – dipólová interakcia medzi magnetickými časticami má za následok vzájomné priťahovanie susedných častíc. Za prítomnosti magnetického poľa magnetické častice vytvárajú retiazky a retiazkové klastre, v rámci ktorých sú častice spojené magneticky. Teoretické výsledky klastrového a retiazkového modelu umožňujú vysvetliť vzrast magnetodielektrického javu aj o niekoľko percent.

Magnetické kvapaliny v striedavom elektrickom poli pri súčasnom pôsobení magnetického poľa

Magnetodielektrické vlastnosti magnetických kvapalín s koncentraciami 0,185%, 0,24%, 0,46%, 0,85%, 1,849%, 3,214% boli analyzované v kombinovanom magnetickom a striedavom elektrickom poli intenzity $E = E_m \cos(\omega t)$ so

zameraním sa na zmenu relatívnej permitivity ϵ_r pri zvyšovaní napätia a tým intenzity elektrického poľa medzi elektródami systému. Pozornosť bola venovaná sledovaniu stratového činiteľa $\text{tg}\delta$, pričom výskumu bola podrobená aj tendencia priebehov skúmaných makroskopických parametrov v závislosti od priloženého napätia, koncentrácie magnetických častíc v MK a od hodnoty magnetickej indukcie B v magnetickom poli permanentných magnetov, ktorá dosahovala hodnoty 0mT – 20mT – 30mT do 40mT.

Magnetická kvapalina bola pripravená na báze inhibovaného transformátorového oleja ITO 100, so surfaktantom kyselinou olejovou a rôznymi objemovými koncentraciami magnetitových častíc ($FeO \cdot Fe_2O_3$) nanometrickej veľkosti ($d \approx 10$ nm). Prítomnosť slabo polárnej kyseliny olejovej a častíc Fe_3O_4 definovanej koncentrácie predurčuje charakteristiku meranej kvapaliny (polárnosť) a tým aj jej správanie sa v elektrickom poli striedavého napätia, obzvlášť so zreteľom na hodnotu stratového činiteľa $\text{tg}\delta$. Všeobecne platí: $D(t) = D_m \cdot \cos(\omega t - \delta)$, pričom $D_m = \epsilon_0 \epsilon_r E$.

Sledované boli procesy odohrávajúce sa v makroskopickom prostredí elektródového systému a mikroskopickom prostredí medzi časticami samotnými a vytvorenými zhlukmi – klastrami častíc ihličkovitého tvaru z komplexného hľadiska. Jednou z ciest je riešenie, ktoré poskytuje rovnica vyjadrujúca silové účinky elektrického a magnetického poľa v prostredí.

Sila, spôsobujúca mobilitu častíc v elektrickom poli je funkciou ich hmotnosti, ktorá je závislá od koncentrácie c jej zložiek $m(c)$, ďalej od lokálnej mernej hmotnosti, ktorú spôsobujú zhluky častíc. Pri aplikovaní striedavého elektrického poľa frekvencie 50Hz nie je zanedbateľná Stokesova sila, vyjadrujúca účinky dynamickej viskozity média. Takže všeobecne platný vzťah pre silové pôsobenie polí zapíšeme rovnicou [4][5]

$$m(c) \frac{dv}{dt} = qE + qv \times B \quad (1)$$

Z hľadiska spoluúčinkovania magnetického poľa indukcie B hrá dôležitú úlohu rýchlosť častíc v a orientácia jej zložiek (v_{\parallel} , resp. v_{\perp}) vzhľadom na vektor E , prípadne B .

Naznačíme riešenie troch prípadov:

a) E - variabilné; $B=0$ mT, potom v striedavom elektrickom poli E :

$$m(c) \frac{dv}{dt} = qE_m \cos(\omega t) \quad (2)$$

Sila spôsobí vo vnútri kvapaliny aj mechanické namáhanie (tlakové a ťahové), čo vyjadríme takto [7]

$$\mathbf{f}_n = \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon \quad (3)$$

Ak prijmeme hypotézu o lokálnych diferenciálnych zmenách permitivity a mernej hmotnosti v MK pôsobením silného elektrického poľa, potom objemovú silu \mathbf{f}_D vyvolanú nehomogenitou poľa a anizotropiou izolačného média vyjadríme vzťahom:

$$\mathbf{f}_D = \frac{1}{2} \nabla \left(E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial \gamma_0} \gamma_0 \right) \quad (4)$$

Z výskumu vzniku a existencie priestorového náboja v medzielektródovom systéme v magnetickej kvapaline vyplýva [4], že pôsobením elektrického poľa dochádza k polarizácii zložiek MK v nanometrických rozmeroch. Potom gradientová sila pôsobiaca na polarizované častice bude:

$$\mathbf{f}_e = \mathbf{f}_{\text{grad}} = r^3 \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_{r0}}{\varepsilon_r + 2\varepsilon_{r0}} \mathbf{E} \cdot \text{grad} \mathbf{E} \quad (5)$$

kde r – predpokladaný polomer častice, ε_{r0} – relatívna permitivita oleja, ε_r – relatívna permitivita zhluku častíc a surfaktantu. Pri pohybe častíc resp. ihličiek v rytme frekvencie 50Hz dochádza ku interakcii zložiek v oleji, čo sa dá vyjadriť Stokesovou silou $f = -6\pi\eta r v(x)$.

b) Súčasný vplyv elektrického a magnetického poľa na magnetodielektrické vlastnosti magnetických kvapalín

Budú analyzované prípady, ktoré poukážu na to, aké usporiadanie aplikovaného elektrického prípadne magnetického poľa bude dominujúce pri určení permitivity a stratového činiteľa magnetickej kvapaliny pri rešpektovaní anizotropie v skúmanom médiu. Vychádzame z rovnice (1) a z princípu superpozície polí, pričom pôsobenie každého typu poľa možno sledovať aj oddelene. Keďže skúmame $\mathbf{E} \parallel \mathbf{B}$ a $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$, rozložme vektory rýchlosti \mathbf{v} častíc a intenzity poľa \mathbf{E} na zložky paralelné a kolmé k vektoru magnetickej indukcie \mathbf{B} : $\mathbf{v} = \mathbf{v}_{\parallel} + \mathbf{v}_{\perp}$ a

$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\parallel} + \mathbf{E}_{\perp}$. Potom rovnica (1) nadobudne tvar:

$$m(c) \frac{d\mathbf{v}_{\parallel}}{dt} + m(c) \frac{d\mathbf{v}_{\perp}}{dt} = q\mathbf{E}_{\parallel} + q\mathbf{E}_{\perp} + q\mathbf{v}_{\parallel} \times \mathbf{B} + q\mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B} \quad (7)$$

V tejto rovnici je člen $q\mathbf{v}_{\parallel} \times \mathbf{B} = 0$ a členy obsahujúce zložky \mathbf{v}_{\parallel} a \mathbf{E}_{\parallel} rovnobežné s vektorom \mathbf{B} sú navzájom rovnaké, t.j.

$$m(c) \frac{d\mathbf{v}_{\parallel}}{dt} = q\mathbf{E}_{\parallel} \quad (8)$$

Z tejto rovnice vyplýva, že ku zmene rýchlosti častíc, resp. zhlukov častíc (\mathbf{v}_{\parallel}), môže dôjsť iba v dôsledku pôsobenia zložky intenzity elektrického poľa \mathbf{E} , pričom magnetické pole (\mathbf{B}) na túto rýchlosť nemá vplyv.

Pre prípad zložky rýchlosti kolmej k vektoru \mathbf{B} dostávame:

$$m(c) \frac{d\mathbf{v}_{\perp}}{dt} = q\mathbf{E}_{\perp} + q\mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B} \quad (9)$$

Touto rovnicou sa dá popísať súčasné pôsobenie elektrického a magnetického poľa na elektricky nabitú časticu, prípadne zhluky elektricky nabitých častíc. Pri celkovom pohľade na vektor rýchlosti \mathbf{v} zisťujeme, že tento vektor je súčtom dvoch zložiek

$\mathbf{v}_{\perp} = \mathbf{v}_E + \mathbf{v}_{\perp}'$, pričom \mathbf{v}_E je určené intenzitou elektrického poľa \mathbf{E} . Z podmienky konštantnej rýchlosti \mathbf{v}_{\perp} dostávame

$$\mathbf{E}_{\perp} + \mathbf{v}_E \times \mathbf{B} = 0 \quad (10)$$

V takom prípade $\mathbf{E}_{\perp} = -\mathbf{v}_E \times \mathbf{B}$. Vynásobením obidvoch strán rovnice vektorovo vektorom \mathbf{B} dostávame

$\mathbf{E}_{\perp} \times \mathbf{B} = -(\mathbf{v}_E \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$. Ľavá časť rovnice predstavuje vektor orientovaný opačne ako vektor \mathbf{v}_E , pričom jeho absolútna hodnota bude $v_E B^2 = |(\mathbf{v}_E \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}|$. Z toho, vyplýva, že:

$\mathbf{v}_E = \mathbf{E}_{\perp} / B$ a rýchlosť \mathbf{v}_E nezávisí od elektrického náboja častice. Pri pôsobení striedavého elektrického poľa $E = E_m \cdot \cos(\omega t)$ aj rýchlosť častíc v tomto polí má harmonický priebeh a je ovplyvňovaná mechanizmom dielektrických vodivostných strát. V závere týchto úvah doplníme pohybovú rovnicu (9) o zložku rýchlosti \mathbf{v}_{\perp}' , čím dostávame

$$m(c) \frac{d\mathbf{v}_E}{dt} + m(c) \frac{d\mathbf{v}_{\perp}'}{dt} = q\mathbf{E}_{\perp} + q\mathbf{v}_E \times \mathbf{B} + q\mathbf{v}_{\perp}' \times \mathbf{B} \quad (11)$$

Rešpektovaním predchádzajúcich podmienok výsledná pohybová rovnica bude mať tvar

$$m(c) \frac{d\mathbf{v}_{\perp}'}{dt} = q\mathbf{v}_{\perp}' \times \mathbf{B} \quad (12)$$

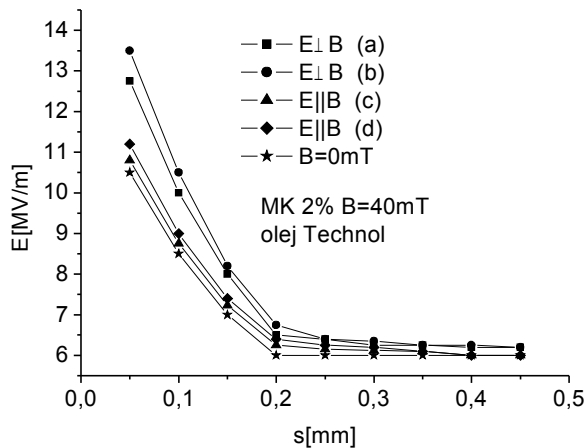
čím sme dostali rovnicu pre určenie rýchlosti pohybu častice po kružnici. Ďalšou analýzou sa dá ukázať, že pohyb nabitých častíc v prípade $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ je charakterizovaný dvoma typmi pohybu: driftom s konštantnou rýchlosťou \mathbf{v}_E a pohybom po kružnici s rýchlosťou \mathbf{v}_{\perp}' vyvolanou iba magnetickým poľom. V kombinovaných poliach pri existencii \mathbf{v}_E , častice sa posúvajú v smere kolmom k vektorom \mathbf{E} a \mathbf{B} , čo spôsobuje ich pohyb po špirále.

Magnetodielektrické vlastnosti kvapalín a parameter anizotropie

V prácach, v ktorých sa diskutuje magnetodielektrický jav je uvedená definícia parametra anizotropie $g(B)$ [1],[2]:

$$g(B) = - \frac{\varepsilon_{\parallel}(B) - \varepsilon(0)}{\varepsilon_{\perp}(B) - \varepsilon(0)}$$

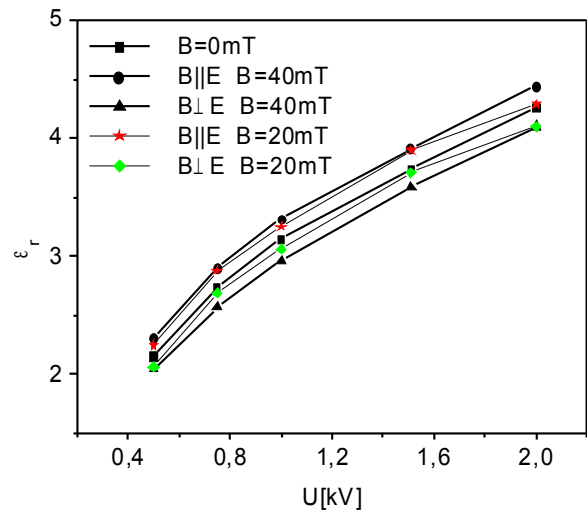
kde $\varepsilon_{\parallel}(B)$ a $\varepsilon_{\perp}(B)$ sú permitivity pre $\mathbf{E} \parallel \mathbf{B}$ a $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ a $\varepsilon(0)$ pre $\mathbf{B}=0$. Pri výskume elektrickej pevnosti magnetickej kvapaliny a definovaných koncentráciách aj pri aplikovaní jednosmerného vysokého napätia bola objavená anizotropia. Pribeh $E = f(s)$ je znázornený na obr.1, pričom krivky boli snímané pri konštantnej hodnote indukcie $B=40\text{mT}$. V priebehu merania elektrickej pevnosti boli okrem orientácie elektrického poľa \mathbf{E} menené aj orientácie vektorov \mathbf{B} . Najvýraznejší prejav anizotropie bol pozorovaný v oblasti silných polí (nad 10^7V/m).



Obr. 1: Elektrická pevnosť magnetickej kvapaliny pri rôznych orientáciách \mathbf{E} a \mathbf{B} (b-opačná orientácia \mathbf{B} oproti prípadu a, c-parallelne, d-antiparalelne)

Skúmanie magnetodielektrických vlastností magnetickej kvapaliny bolo orientované na sledovanie funkcionálnych závislostí relatívnej permitivity ε_r od koncentrácie magnetickej kvapaliny, ako aj od hodnoty priloženého napätia na elektródový systém v oblasti slabých elektrických polí do $2,5 \cdot 10^6 \text{ Vm}^{-1}$. Súčasne boli sledované dielektrické straty v magnetickej kvapaliny v závislosti od veľkosti priloženého elektrického napätia a koncentrácie kvapaliny. Vyšetrované boli priebehy výpovedeschopných parametrov charakterizujúcich elektrofyzikálne procesy v magnetickej kvapaliny počas polarizačných procesov.

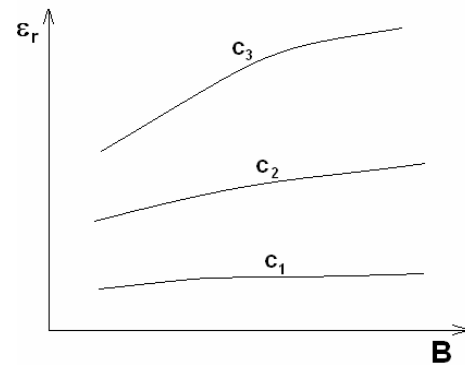
Zmeny relatívnej permitivity ε_r magnetickej kvapaliny pri nízkej koncentrácii (0,185 %) magnetickej častíc v závislosti od napätia (0,5kV-2 kV) dosahujú nízke hodnoty do 1,48%. Pri vyšších koncentráciách magnetickej častíc (v intervale od 1% do 3,5%) je závislosť $\varepsilon_r = f(U)$ nelineárna.



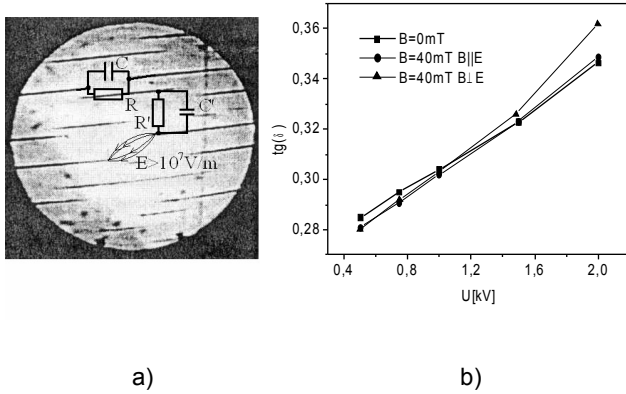
Obr. 2: Závislosť ε_r od priloženého napätia pri rôznych orientáciách \mathbf{B} a \mathbf{E} .

Hodnoty ε_r pri $\mathbf{E} \parallel \mathbf{B}$, $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ a $\mathbf{B}=0\text{mT}$ výrazne poukazujú na stupeň anizotropie v magnetickej kvapaliny (pozri vzťah (13)). So zvyšujúcou sa koncentráciou magnetickej kvapaliny sa zvyšuje aj hodnota relatívnej permitivity, čo je dané z fyzikálneho hľadiska zvýšením polarizovateľnosti kvapalného média ako aj predĺžením ihličkovitých klastrov a ich vyššou koncentráciou v jednotke objemu. Dominujúco sa prejavila aj orientácia elektrického a magnetickej poľa pri paralelnom (rovnobežnom) usporiadaní, čím sa dokázal výrazný vplyv elektrického poľa na polarizačné procesy v medzielektródovom systéme.

Zovšeobecňujúci priebeh relatívnej permitivity ε_r v závislosti od aplikovanej magnetickej indukcie B má analogický charakter, pričom parametrom je koncentrácia magnetickej kvapaliny (Obr.3).



Obr. 3: Vplyv magnetickej indukcie na zmenu ε_r koncentrácie $c_1 < c_2 < c_3$.



Obr. 4: a) Modelovanie pomerov v magnetickej kvapaline koncentrácie 0,185%

b) Závislosť stratového činiteľa od priloženého napätia pri nízkej koncentrácii (0,185%) magnetitových častíc.

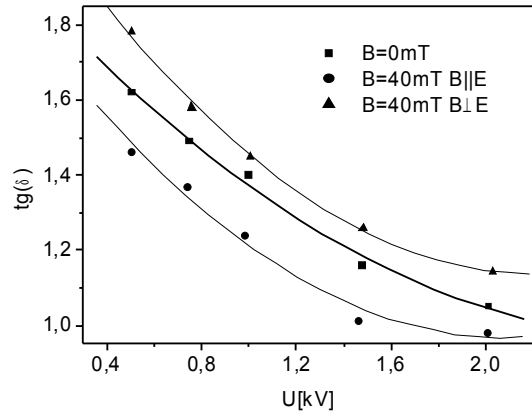
Miera nárastu relatívnej permitivity nezodpovedá lineárnemu nárastu hodnoty koncentrácie v skúmanom médiu.

Dielektrické straty v magnetickej kvapaline sú definované činiteľom dielektrických strát $\text{tg}\delta$. Boli súčasne merané vysokonapäťovým Scheringovým mostíkom ako aj kapacita merného kondenzátora s vyšetřovaným médiom ako dielektrikom. Veľmi výrazne sa prejavil vplyv nízkej koncentrácie častíc na vývoj dielektrických strát v magnetickej kvapaline (Obr.4b). Vychádzajúc z mikroskopického skúmania usporiadania zhlukov a modelovania pomerov navzájom medzi nimi RC členmi je možné vysloviť hypotézu, že medzi klastrami sa vytvára lokálne gradientové elektrické pole $E > 10^7 \text{ V.m}^{-1}$, ktoré intenzívne prispieva k rastu strát pôsobením ionizujúcich polí (obr.4a). Ďalšie narastanie strát je spôsobené zvýšenou vodivosťou média v silných poliach. ($I = I_0 \exp(CU)$).

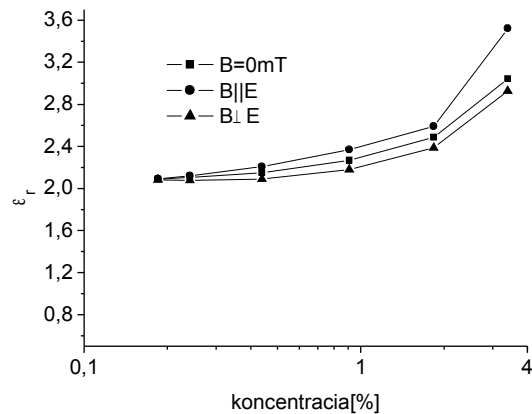
Pozvoľný zvrät do zmeny mechanizmu dielektrických strát pri zvyšovaní koncentrácie magnetickej kvapaliny spôsobuje aktivizácia priestorových nábojov, predovšetkým pri narastaní napätia. Aplikovaním komplexnej permitivity a vodivosti na riešenie pomerov v zložitej izolačnej sústave (komponenty: transformátorový olej, kyselina olejová, Fe_3O_4 nanočastice) dá sa vysloviť predpoklad, že objemový (priestorový) náboj sústavy pri zvyšovaní napätia (intenzity elektrického poľa) narastá a svojou objemovou zotrvačnosťou ako aj zníženou pohyblivosťou v medzielektródovom priestore nie je schopný sledovať zmeny elektrického poľa pri frekvencii 50 Hz (perióda $T=20\text{ms}$). V dôsledku toho stratový činiteľ $\text{tg}\delta$ klesá v závislosti od napätia a kvantitatívne jeho hodnota je niekoľkonásobne vyššia než pri pôvodnej nízkej koncentrácii (Obr.5).

V oblasti slabých polí ($E=2,5 \cdot 10^6 \text{ V.m}^{-1}$) bola vyšetřovaná závislosť relatívnej permitivity od koncentrácie média. Predchádzajúce výsledky svedčiace o exponenciálnom náraste ϵ_r pri zvyšujúcej sa koncentrácii média (magnetickej kvapaliny) sa potvrdili. Prejavil sa dominantný vplyv intenzity elektrického poľa E pri usporiadaní $E||B$ voči $E \perp B$ (Obr.6), o čom svedčí aj parameter anizotropie $g(B)$.

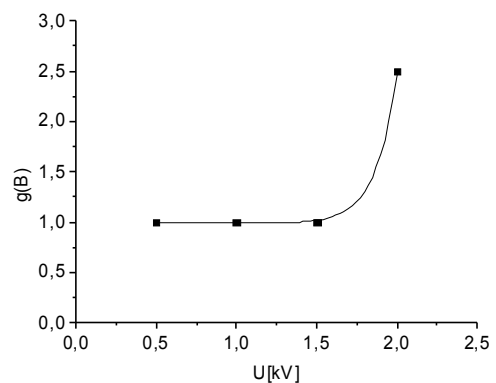
Stupeň (parameter) anizotropie pri sledovaní permitivity ϵ_r aplikovaním magnetického poľa o indukcii $B=40\text{mT}$ je na obr.7.



Obr. 5: Závislosť stratového činiteľa od priloženého napätia pri vysokej koncentrácii (3,214%) magnetitových častíc.



Obr. 6: Závislosť relatívnej permitivity od koncentrácie MK.



Obr.7: Závislosť parametra magnetodielektrickej anizotropie $g(B)$ od priloženého napätia.

Záver

Predložená práca je príspevkom k štúdiu magnetodielektrických vlastností kvapalných izolačných médií obsahujúcich monodomérové magnetické častice nanometrickej veľkosti z kategórie feritov na báze oxidov železa. Výskum bol realizovaný v kombinovanom elektrickom a magnetickom poli, pričom orientácia aplikovaných polí bola $E \parallel B$, $E \perp B$ a E variabilné pri $B=0$ mT poukázala na výskyt anizotropie v tomto druhu magnetodielektrických médií, čo bolo dokázané experimentom. Účelovo bolo zvolené striedavé elektrické pole 50Hz, pretože výskum uvedených vlastností by mal poukázať na možnosť použitia magnetických kvapalín vo výkonových transformátoroch v elektrických sieťach. Bola vyvinutá metóda na meranie statickej relatívnej permitivity pri $f=0$ Hz, ktorá dopĺňa poznatky o anizotropných vlastnostiach magnetických kvapalín v týchto podmienkach.

PodĎakovanie

Za podporu pri riešení tejto úlohy v rámci grantu VEGA MŠ SR pod číslom 1/3142/06 a 2/6166/26 a APVT 51-027904.

Literatúra

- [1] Espurz A., Alameda J.M., In: J.Phys.D: Appl.Phys. 22 (1989) 1174.
- [2] Maifert A.J., Nahounou B., Dielectric behaviour of a ferrofluid subjected to a uniform magnetic field. In: IEEE Trans.Magn.16 (1980) 254.
- [3] Tomčo L.: Habilitačná práca, UPJŠ Košice, 2007.
- [4] Marton K., Tomčo L., Kopčanský P., Herchl F., Timko M., Koneracká M.: The development of electric breakdown in magnetic fluids in combined magnetic and electric fields. In: Przegląd Elektrotechniczny 1, 161, ISSN 1731-6103.
- [5] Marton K., Tomčo L., Herchl F., Kopčanský P., Dolník B., Timko M., Koneracká M.: Priestorové náboje v magnetických

kvapalinách pri formovaní sa kanála prerazu. In: Proc. DISEE 2006, 16, ISBN 80-227-2470.

- [6] Kúdelčík J., Gutten M., Brandz M.: Development of electrical breakdown in transformer oil, Advances in Electrical and Electronic Eng. 5 (2006) 277, ISSN 1336-1376.
- [7] Marton, K.: Classification on Volume Forces Contributed to Ageing of Polymeric Insulation. Electroinsulating and Cables Technology (EKT), Vol 53, No.3(2000), pp. 92-96, ISSN 1335-0076

Autori:

prof. Ing. Karol Marton, DrSc.; Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach; Letná 9, 042 00 Košice; e-mail: karol.marton@tuke.sk

RNDr. Ladislav Tomčo, PhD.; Katedra aerodynamiky a simulácií, Technická univerzita v Košiciach, Rampová 7; 041 21 Košice; e-mail: ladislav.tomco@tuke.sk

RNDr. František Herchl; Ústav experimentálnej fyziky; Slovenská akadémia vied; Watsonova 47, 040 01 Košice; e-mail: herchl@saske.sk

doc. RNDr. Peter Kopčanský, CSc.; Ústav experimentálnej fyziky; Slovenská akadémia vied; Watsonova 47, 040 01 Košice; e-mail: kopcan@saske.sk

RNDr. Milan Timko, CSc.; Ústav experimentálnej fyziky; Slovenská akadémia vied; Watsonova 47, 040 01 Košice; e-mail: timko@saske.sk

doc. Ing. Irida Kolcunová, PhD.; Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach; Letná 9, 042 00 Košice; e-mail: irida.kolcunova@tuke.sk

Ing. Martina Koneracká, CSc.; Ústav experimentálnej fyziky; Slovenská akadémia vied; Watsonova 47, 040 01 Košice; e-mail: konerac@saske.sk

Ján Tkáč, Juraj Kurimský, Bystrík Dolník

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

Akustická detekcia čiastkových výbojov

Abstrakt. V príspevku sa zaoberáme analýzou akustického signálu získaného z experimentov realizovaných v nehomogénom elektrickom poli. Akustický signál sme analyzovali pomocou akustického snímača v počuteľnom pásme. Použitie merania výbojovej aktivity v akustickom pásme je obmedzené na objekty v okolí ktorých sa vyskytuje nízka úroveň rušivých akustických signálov. Výhoda metódy spočíva v jednoduchosti kvantitatívneho vyhodnotenia.

Abstract. In this paper we introduce results from the analysis of the acoustic signal obtained from experiments realized in non-homogeneous electric field. We analysed acoustic signal from acoustic sensor in audible band from 1 kHz to 20 kHz. The acoustic signal transmitted from object is unique for specific conditions. Exploitation of audible band for PD detection is difficult in outdoor bias level. The advantage of this method consists in simple results evaluation. (**Acoustic detection of partial discharges**).

Kľúčové slová: čiastočný výboj, akustický signál, rušenie, meranie, optické oddelenie.

Keywords: partial discharge, acoustic signal, disturbance, measurement, optical coupling.

Úvod

Konštrukčné riešenia energetických zariadení sú rôzne, avšak skladajú sa z podobných druhov elektródových usporiadaní a ich kombinácií. Výsledné rozdiely sú hlavne v tvare elektrických polí, ktoré majú za následok rôznu stupeň elektrického namáhania izolácie, vyplývajúci z geometrického uporiadania a vlastností použitých materiálov. Spoľahlivú funkciu zariadenia zabezpečuje použitý izolačný materiál. Izolačný materiál môže byť umiestnený v nasledovných prostrediach:

- homogénne pole,
- mierne nehomogénne pole,
- silne nehomogénne pole.

Homogénne elektrické pole je charakteristické konštantnou intenzitou elektrického poľa v každom bode. Typickým príkladom výboja vznikajúceho v homogénnom elektrickom poli je tzv. Townsendov výboj a Reather-Meekov výboj.

Mierne nehomogénne elektrické pole má vlastnosti len veľmi málo odlišné od homogénneho poľa. Nehomogénne elektrické pole vzniká hlavne medzi elektródovým systémom s veľkým rozdielom v polomere zakrivenia. Veľký vplyv na tvar nehomogénneho poľa a následne na formovanie výbojovej dráhy má priestorový náboj. Výbojové procesy v nehomogénnom elektrickom poli prebiehajú počas ionizačných a deionizačných procesov, ktoré majú veľmi výrazný vplyv na formovanie výbojovej dráhy a na vlastnosti výboja v medzielektródovom priestore. Medzi ionizačné procesy možno zaradiť pružné a nepružné zrážky častíc, fotoionizáciu a termoionizáciu. Medzi deionizačné procesy patria: rekombinácia častíc, absorpcia elektrónov a difúzia iónov.

Výbojové procesy sú vo väčšine prípadov nežiadúcim javom pri prevádzke vysokonapäťových zariadení nakoľko spôsobujú postupnú degradáciu izolačných ako aj elektródových materiálov.

Výbojové javy v nehomogénnom poli

Výbojové procesy triedime podľa trvania na prechodné a ustálené. Ustálené výboje ďalej triedime na samostatné a nesamostatné. Kritériom pre toto triedenie sú podmienky vedúce ku vzniku a udržaniu výbojovej dráhy. Do skupiny samostatných výbojov patria: tichý výboj, korónový výboj, iskrový výboj a oblúkový výboj. Nesamostatné výboje

potrebujú zdroj nosičov náboja alebo zdroj energie schopný ionizovať atómy, prípadne molekuly vo výbojovej dráhe.

Korónový výboj – vzniká v okolí elektród s malým polomerom zakrivenia, ktoré vytvárajú nehomogénne elektrické pole vo výbojovej dráhe. Ak sa vyskytuje koróna iba na jednej elektróde, potom sú väčšinou k dispozícii iba ióny s polaritou danej elektródy. Korónu takéhoto druhu nazývame unipolárnou. Koróna vzniká pri určitom napätí, ktorému hovoríme počiatkové napätie koróny. Ak je napätie na elektródach nižšie ako počiatkové napätie koróny, potom vzniká tzv. tichý výboj. Tento výboj je nesamostatný a vzniká ionizáciou atómu vo výbojovej dráhe kozmickým alebo iným žiarením. Ak je napätie na elektródach podstatne väčšie ako počiatkové napätie koróny, rozšíri sa plazma až k druhej elektróde a nastane prieraz výbojovej dráhy – korónový výboj sa zmení na iskrový alebo oblúkový výboj. V jednosmernom elektrickom poli môže vzniknúť negatívna koróna alebo pozitívna koróna. V striedavom elektrickom poli vzniká striedavá koróna, ktorej vlastnosti sú funkciou času.

Kízavý výboj – vyvíja sa v nehomogénnom elektrickom poli na rozhraní pevná fáza-plyn. Ide teda o výboj šíriaci sa po povrchu izolantu. Toeplerov model sa považuje za doteraz najlepší na opísanie kízavých výbojov. Vznik kízavých výbojov je nežiadúci, pretože výboje poškodzujú pevné izolanty aj po ich krátkom trvaní. Na elimináciu ich vzniku používajú sa polovodivé povlaky nanosené na povrchu izolácie.

Iskrový výboj – javí sa ako prechodná forma elektrického výboja v plyne. Je to výboj nestabilný a nestacionárny. Jasne svietiace kanálky majú vysokú teplotu a dochádza v nich k tepelnej ionizácii.

Tieto procesy majú degradačný účinok na použité materiály a preto sa snažíme o včasnú detekciu ich vzniku aby bolo možné včas vykonať príslušné opatrenia na zamedzenie vzniku poruchy.

Možnosti detekcie výbojovej činnosti

Výbojová činnosť je sprevádzaná rôznymi fyzikálnymi prejavmi, ktoré je možné využiť pre jej meranie a detekciu. Tieto prejavy sú elektrické a neelektrické. Elektrickým prejavom je generovanie elektromagnetických impulzov. Veľmi perspektívne sú neelektrické – chemické, svetelné, tepelné a akustické prejavy čiastkových výbojov.

Pre diagnostické účely sa v súčasnosti sa používa niekoľko principiálne odlišných prístupov na zhodnotenie aktivity častkových výbojov. Sú to:

- elektrické metódy,
- plynová chromatografia oleja,
- meranie akustickej emisie,
- meranie optického vyžarovania,
- termovízne merania.

Princíp elektrických metód spočíva v snímaní zmien elektromagnetického poľa alebo v detekcii prúdových impulzov. Posledne zmienaná metóda poskytuje možnosť kvantifikovať veľkosť detekovaného zdanlivého náboja a tak určiť veľkosť pôsobiacej degradačnej energie. Tieto metódy sa vyznačujú vysokým stupňom prepracovania avšak vyžadujú pomerne náročné pripájanie k meraným objektom v priestoroch s vysokou úrovňou elektromagnetického smogu. V našich podmienkach sa tieto merania vykonávajú, keď sú zariadenia mimo prevádzky.

U kvapalných izolantov sa prítomnosť častkových výbojov môže prejavovať aj zmenou ich chemických vlastností. Výsledky plynovej chromatografie môžu poukázať na prítomnosť plynov, ktoré vznikajú pri ionizačných procesoch v oleji, prípadne pri rozklade tuhých dielektrík vplyvom častkových výbojov. Metóda je založená na extrakcii produktov starnutia zo vzorky oleja. Odobratie vzorky sa môže vykonávať počas prevádzky avšak celkové zhodnotenie je pomerne náročné a má len obmedzenú výpovedeschopnosť čo sa týka miesta výbojovej činnosti.

Metóda snímania akustickej emisie je užitočná pre zhodnocovanie aktivity častkových výbojov aj počas prevádzky bez galvanického spojenia s meraným objektom, často aj na väčšiu vzdialenosť. Je založená na snímaní a lokalizácii zdrojov akustických signálov – tlakových vln spôsobených elektrickým výbojom v dielektriku alebo na jeho povrchu. Počiatky aplikácie tejto metódy sú v šesťdesiatych rokoch 20. storočia.

Akustická emisia častkových výbojov

Častkový výboj v kombinovanej izolácii papier-olej 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. Je potrebné zohľadniť druh a intenzitu častkových výbojov, typ dielektrika, počiatkové tlakové pomery, mechanické namáhanie a iné fyzikálne faktory. V závislosti na týchto parametroch trvanie tlakovej vlny môže byť rôzne. Tieto vlny sa šíria izolačným materiálom, až kým ich čelo nenarazí na materiál iných akustických vlastností, ktorý je súčasťou konštrukcie vysokonapäťového zariadenia. Takýto prípad nastáva napr. u transformátorov, kde vzniknutá tlaková vlna šíri sa izolačným olejom a odráža sa od kovových stien nádoby transformátora.

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

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

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/m^2),
- akustický tlak p (Pa),

4. hladina akustickej intenzity L_I (dB) a hladina akustického tlaku L_p (dB).

Akustická vlna sa šíri olejovým médiom všetkými smermi. Takáto tlaková vlna sa nazýva tiež *gulová vlna* a miesto vzniku častkových 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 gulovú vlnu je:

$$I_r \approx I_0 \cdot 1/r,$$

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:

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

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. Akustické rýchlosti v rôznych materiáloch

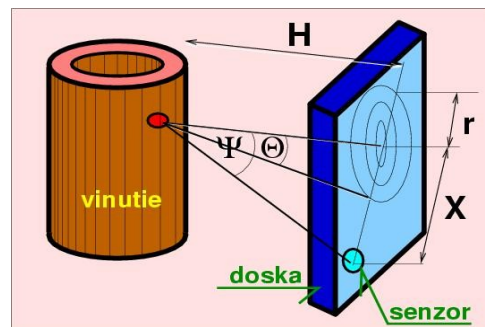
Typ	v_l [m/s]	v_s [m/s]
vzduch	343	–
oceľ	5 960	3200
meď	4 760	2 325
hliník	6 420	3 040
tr. olej	1 400	–

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 prostrediach. V skutočnosti existuje mnoho dráh s rozličnými uhlami dopadu θ na stenu nádoby transformátora, ktorými ultrazvukový signál môže dosiahnuť senzor.



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 čiastkových výbojov k akustickému senzoru je:

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

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

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

kde α predstavuje hodnotu kritického uhla dopadu Θ čela vlny na nádobu 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 , kedy čelo vlny dorazí k senzoru, platí:

$$t_I = \frac{H}{v_{v(\text{olej})} \cdot \cos \alpha} + \frac{X - \tan \alpha}{v_{I(\text{ocel})}}$$

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

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

V praxi však akustický senzor zachytí všetky interferujúce vlnenia prichádzajúce z rôznych smerov. Najviac dôležitým smerom je ten, v ktorom vlnenie postupuje najrýchlejšie. Existuje niekoľko známych metód lokalizácie zdrojov čiastkových výbojov pomocou merania akustickej emisie. Spomenieme dve najznámejšie.

Prvá metóda je jednoduchšia a spočíva v meraní amplitúdy signálu akustickej emisie v rôznych vzdialenostiach od zdroja čiastkových výbojov. Hľadá sa miesto s najvyššou amplitúdou. Pri tejto metóde je potrebné sledovať tieto faktory: amplitúdu akustickej emisie, tvar signálov 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.

Experimentálne merania

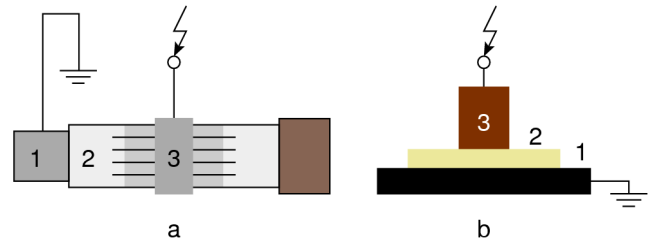
Reálne technické izolácie používané v technike vysokých napätí pozostávajú z tuhých, kvapalných alebo plyných dielektrík a ich kombinácií. Problémy najčastejšie vo forme výbojovej činnosti, vznikajú na rozhraniach týchto materiálov v dôsledku ich rôznych fyzikálno-chemických vlastností. V technickej praxi sa vyskytujú tieto typy rozhraní:

- homogénne elektrické pole s výlučne tangenciálnym pôsobením poľa na rozhraní,
- nehomogénne elektrické pole s tangenciálnym pôsobením poľa za spoluúčinkovania malej normálovej zložky,
- rozhranie dvoch izolantov smeruje kolmo k siločiarom v homogénnom elektrickom poli,

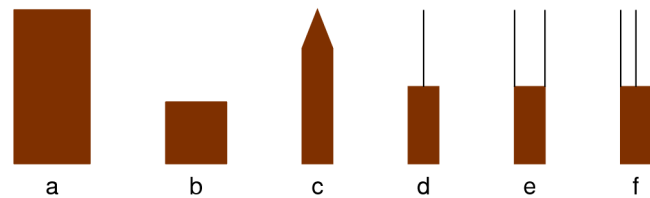
- nehomogénne elektrické pole s tangenciálnym pôsobením za spoluúčinkovania silnej normálovej zložky.

Pre prevádzku je najnepriaznivejší prípad (d), ktorý sme použili na meranie a analýzu výbojovej činnosti.

Pre experimentálne merania boli použité elektródové systémy podľa obr. 2A, 2B a elektródy podľa obr. 3.



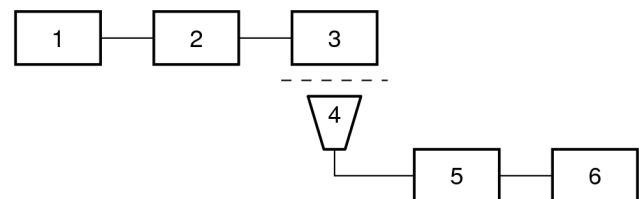
Obr. 2 Elektródový systém na sledovanie výbojovej činnosti



Obr. 3 Typy elektród pre meranie na elektródovom systéme podľa obr. 2b

Elektródový systém podľa obr. 2a pozostáva z posuvného kovového jadra 1 umožňujúceho meniť kapacitu elektródového systému, keramickej rúrky 2, tenkej kovovej objímky 3 a upevňovacej armatúry 4.

Elektródový systém podľa obr. 2b umožňuje rôzne kombinácie izolantov, elektródových materiálov a ich tvarov. Konštrukčne pozostáva z uzemnenej doskovej elektródy 1, izolačného materiálu 2 (prípadne vzduch) a výmenných vysokonapäťových elektród 3, ktoré sú znázornené na obr. 3. Elektródy A a B majú valcový tvar a boli vo vzájomnom dotyku s dielektrikom, elektróda C je hrotová s polomerom zakrivenia 0,5 mm. Elektródy D–F sú ihlové elektródy s extrémne malým polomerom zakrivenia. V prípade E a F boli použité 2 a 3 ihlové elektródy so vzájomnou vzdialenosťou 5 mm. Meracia aparátúra bola zostavená podľa blokovej schémy na obr. 4

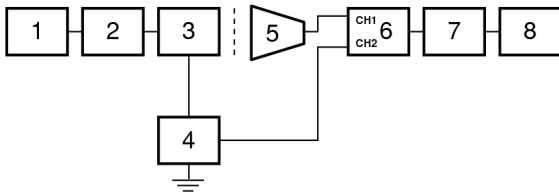


Obr. 4. Bloková schéma meracej aparátúry

Regulačný autotransfórator 1 napája vysokonapäťový transformátor 2 s výstupným striedavým napätím do 80 kV, na ktorý je pripojený elektródový systém 3. Vo vzdialenosti 0,3 až 1 m je umiestnený akustický snímač 4 z ktorého signál je spracovaný A/D prevodníkom a vyhodnocovaný pomocou počítača 5 napájaný prostredníctvom oddeľovacieho transformátora 6, ktorý galvanicky oddeľuje meraciu aparátúru od napájacej siete.

Vysoké napätie priložené na elektródový systém bolo regulované tak, aby sa umožnilo merať jednotlivé fázy výbojovej činnosti až do preskoku, resp. prerazu.

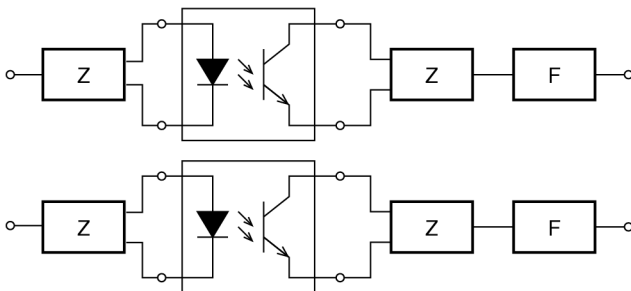
Signál z akustického snímača bol zaznamenávaný na pamäťové médium pre následné spracovanie nameraných výsledkov. Pri meraniach sa ukázalo, že by bolo veľmi prospešné porovnať výsledky získané akustickou cestou s meraním pomocou priamej metódy elektrickou cestou. Za týmto účelom bola pôvodná aparátúra doplnená obvodom s optickým oddelením meracej aparátúry od vysokonapäťového obvodu. Bloková schéma doplneného zapojenia meracej aparátúry je na obr. 5.



Obr. 5. Bloková schéma dvojkanalovej meracej aparátúry

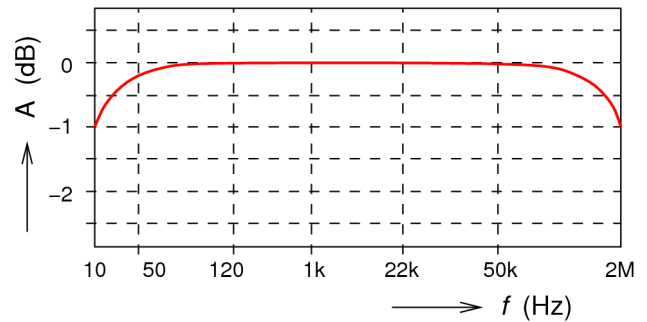
Regulačný autotransformátor 1 napája vysokonapäťový transformátor 2 s výstupným striedavým napätím do 80 kV, na ktorý je pripojený elektródový systém 3, ktorý je uzemnený prostredníctvom meracej impedancie 4 z ktorej meraný signál postupuje na vstupný zosilňovač s optickým oddelením 5 na kanál CH2. Signál získaný akustickým senzorom 6 postupuje na kanál CH1, ktorý je konštrukčne identický kanálu CH2. Zosilnený signál obidvoch kanálov postupuje do A/D prevodníka 7 a vyhodnocovaný pomocou PC 8.

Zariadenie je konštruované tak, aby bolo možné pripojenie rôznych snímacích elementov (optických, akustických, elektromagnetických a pod.) za účelom možnosti sledovania prejavov výbojovej činnosti pomocou rôznych fyzikálnych prejavov súčasne. K zariadeniu je možné pripojiť aj slúchadlá umožňujúce kvalitatívne hodnotiť výbojovú aktivitu obsluhou zariadenia. Bloková schéma obvodu je na obr. 6. Prichádzajúci signál sa zosilňuje a mení na optický signál, ktorý je prostredníctvom prijímača optočlenu opäť premenený na elektrický signál, ktorý je podľa potreby znova zosilňovaný a frekvenčne upravovaný filtrom F.



Obr. 6. Bloková schéma zariadenia na optické oddelenie

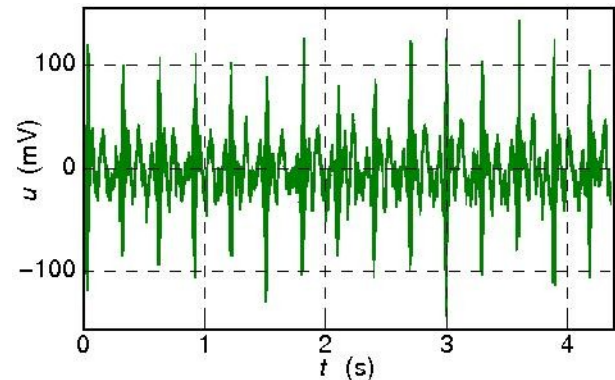
Výsledná frekvenčná charakteristika celého obvodu je na obr. 7. Aj keď v našom prípade frekvenčný rozsah snímacieho elementu je 20 Hz až 20 kHz, zariadenie bolo konštruované tak, aby bol umožnený prenos signálu až do frekvencie 1 MHz, prípadne s poklesom 1 dB do 2 Mhz.



Obr. 7. Frekvenčná charakteristika

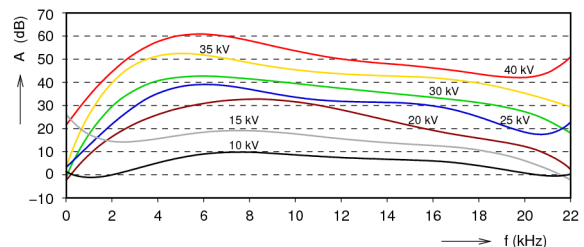
Vyhodnotenie experimentov

Meraný signál je značne deformovaný s obsahom množstva vyšších harmonických a ako taký neposkytuje priamo výpovedeschnú informáciu, pozri obr. 8. Pre vyhodnotenie meraného signálu je potrebné tento signál určitý čas zaznamenávať aby bolo možné jeho ďalšie spracovanie.



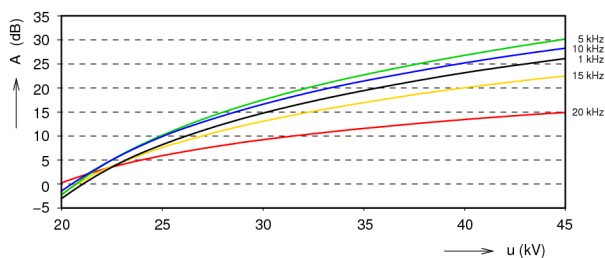
Obr. 8. Záznam signálu z akustického snímača

Zaznamenané signály od výbojovej činnosti boli analyzované pomocou Fourierovej transformácie, pomocou FFT, ktoré po grafickom zobrazení poskytujú informácie o výskyte jednotlivých frekvenčných zložiek pozdĺž sledovaného frekvenčného rozsahu pri sledovaných napätíach. Výsledky ukázali, že amplitúda signálu je pozdĺž akustického pásma pomerne rovnomerne rozložená, obsahuje však niekoľko maxim, ktoré sa menia v súvislosti s tvarom elektródy, vzdialenosťou elektródy a priloženým napätím. Namerané priebehy poukázali na skutočnosť, že frekvenčné zloženie signálu sa s výškou priloženého napätia príliš nemení ale pomerne rovnomerne stúpa amplitúda signálu pozdĺž sledovaného pásma.



Obr. 9. Frekvenčná charakteristika signálu z akustického snímača

Zaujímavé výsledky prinieslo porovnanie nárastu amplitúdy signálu na frekvenciách 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 15 kHz a 20 kHz od priloženého vysokého napätia. Z grafickej závislosti vyplýva, že najväčšie zastúpenie majú signály s frekvenciou 5 kHz a 10 kHz.



Obr. 10. Nárast amplitúd v závislosti od priloženého napätia

Podobné priebehy boli namerané aj s ostatnými elektródovými usporiadaniami.

Záver

Meranie výbojovej aktivity v akustickom pásme je však výrazne ovplyvnené akustickým pozadím okolitého prostredia a preto jeho praktické použitie je obmedzené na objekty v okolí ktorých sa vyskytuje nízka úroveň rušivých akustických signálov na sledovaných frekvenciách. Merania preto boli realizované v laboratórnych podmienkach bez okolitého rušenia. Výhoda metódy spočíva v jednoduchosti kvantitatívneho ako aj možnosti okamžitého kvalitatívneho vyhodnotenia. V prostrediach so silným akustickým rušením je výhodné orientovať sa na meranie signálov v ultrazvukovom pásme. V ďalšom období si merania budú vyžadovať vyhodnotenie množstva nameraných výsledkov so zameraním na vplyv tvaru elektródy, elektródového usporiadania, frekvenčného zloženia signálu, veľkosti priloženého napätia, druhu použitej izolácie. Vysoké nároky si bude vyžadovať štandardizácia pomerov a meracích podmienok pre dosiahnutie objektívne porovnateľných výsledkov.

Snímanie akustickej emisie čiastkových výbojov otvorilo nové možnosti v diagnostike vn a vvn zariadení. Hlavnými výhodami sú: odolnosť voči elektromagnetickému rušeniu, možnosť monitorovania počas prevádzky aj bez galvanického spojenia s meraným objektom. Umožňuje

určiť polohu zdrojov výbojovej činnosti. Metóda je užitočná nie len 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, pp. 144–152.
- [2] Phung, B. T., Blackburn, T. R., and Liu, Z.: Acoustic measurements of partial discharge signals. [online]. 01. 05. 2002. [cit. 19. 12. 2003]. <http://www.itee.uq.edu.au>
- [3] Lundgaard, L. E.: Acoustic partial discharge detection – practical application. In IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol. 8, No. 5, pp. 34–43.
- [4] Kováčik, J.: Ultrasonic discharge location in transformers. In Proc. of Second International Conference on Dielectric and Insulation. Technical University of Košice, 2002, pp. 165–170.
- [5] Kreyghton, Y. L. M., Rutgers, W. R., Van Veldhuizen, E. M.: In-Situ Investigation of pulsed corona discharge. UNIVERSITY OF TECHNOLOGY NETHERLANDS, 1993. ISBN 90-6144-289-6
- [6] Kolcunová, I., Kurimský, J.: Čiastkové výboje v izolačnom systéme XPE káblov. In Zborník 16. medzinárodnej konferencie, DISEE 2006. STU v Bratislave. 12.–14. 09. 2006. pp. 92–95. Častá – Píla. ISBN 80-227-2470-X

Tento článok bol vypracovaný na základe podpory APVV, číslo projektu APVV-20-006005 a VEGA 1/3142/06.

Autori: Ján Tkáč, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Mäsiarska 74, 042 00 Košice, E-mail: Jan.Tkac@tuke.sk

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

Bystrík Dolník, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Mäsiarska 74, 042 00 Košice, E-mail: Bystrik.Dolnik@tuke.sk

Roman Cimbala

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

Tepelná závislosť izolačného stavu rastlinného oleja

Abstrakt. Príspevok sa zaoberá tepelnou závislosťou izolačného stavu rastlinného oleja pomocou dielektrickej spektroskopie. Boli skúmané základné dielektrické vlastnosti rastlinných olejov v závislosti na teplote a čase. Na získaných dátach bola vykonaná izotermická relaxačná analýza jednosmerných nabíjajúcich prúdoch. Ďalej bol analyzovaný jednosmerný zvodový prúd v čase konvergujúcom do nekonečna.

Kľúčové slová: izolačný odpor, dielektrická spektroskopia, prírodné estery, tepelná závislosť.

Úvod

Elektrické stroje a prístroje na vysoké a veľmi vysoké napätie obsahujúce izolačný olej, najmä transformátory, regulačné cievky a spínače, sú nevyhnutnými a dôležitými článkami zariadení pre prenos a rozvod elektrickej energie. Prudký nárast spotreby a s ňou súvisiacej aj výroby elektrickej energie očakávaný v nasledujúcich rokoch, taktiež neustály rast cien elektrickej energie a deregulácia trhu s elektrickou energiou, kladie zvýšené požiadavky na elektrické zariadenia všetkých druhov nielen z kvantitatívnej, kvalitatívnej, ale aj zo spoľahlivostnej a ekologickej stránky. Keďže technické parametre a prevádzková spoľahlivosť podstatnej časti týchto zariadení závisia v značnej miere od kvality ich olejovej náplne, je nanajvýš potrebné venovať tomuto materiálu pozornosť.

Rastlinný olej

Dnešný priemysel je stále založený na z ropy získavaných minerálnych druhoch oleja. Používajú sa ako mazadlá, chladivá a izolačné médiá. Sú však neobnoviteľné a pri kontaminácii okolia značným spôsobom zafažujú prostredie.

Dnes je najviac používaný transformátorový olej. Transformátorový olej patrí do skupiny kvapalných izolantov. Podľa pôvodu tento olej možno rozdeliť na olej minerálny (prírodný) a olej syntetický.

Základnou surovinou na výrobu minerálneho oleja je ropa, z ktorej sa pripravuje asi 90% všetkého oleja. Chemická skladba ropy pozostáva z 98% z uhlíkovíkov, zvyšok tvoria kyslík, síra, dusík, organické soli, piesok a voda [1].

Preto je nutné hľadať vhodné alternatívy včítane rastlinných olejov z plodín ako repka olejná či sója [2].

Jednou z overených aplikácií, kde rastlinný olej nahradil minerálny je jeho použitie pre výkonové transformátory. Spoločnosť Iowa Light a Power a California's Sacramento Municipal Utility District z Iowa používa pre svoje transformátory výhradne rastlinné oleje. Rozhodnutie nie je samoúčelné. Asi 40% z existujúcich transformátorov je zamorených PCB látkami, nariaďujúci drahý environmentálny vyčistiť keď rozliali sa. U.S. Agentúra na ochranu životného prostredia požaduje ekologickú likvidáciu rozliateho oleja dokázateľne bez PCB kontaminácie. Rastlinné druhy oleja môžu byť používané pri dopĺňaní existujúcich olejových náplní transformátorov, pretože sú úplne miešateľné s minerálnymi olejmi a majú tiež schopnosť chladenia a elektrického izolovania [2].

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. Následkom toho sa voda vytesňuje z izolačného papiera do okolitého oleja a chráni papier pred hydrolyzou. Testy vykonané v Cooper Power Systems pre ovn a vvn zariadenia dokázali, že rastlinné oleje zvyšujú životnosť papiera päť až osemnásobne. Podľa štúdie Light and Power and California's Sacramento Municipal Utility District napriek počiatočnej vysokej cene transformátorov s rastlinnými druhmi oleja sú tieto nakoniec o 10–20% lacnejšie než bežné transformátory pretože typické transformátory založené a bio-oleji majú životnosť 40 rokov miesto 30 u klasických minerálnych [2].

Meranie izolačného stavu

Priamo od výrobcu boli získané vzorky repkového oleja. Ako metódu pre skúmanie jeho izolačného stavu bola použitá izotermická relaxačná analýza patriaca do oblasti dielektrickej spektroskopie [3].

Po pripojení jednosmerného napätia na dielektrikum ním začne pretekať prúd, ktorého veľkosť závisí nielen od veľkosti priloženého napätia, ale aj na dobe počas ktorej je pripojené napätie a na stave skúmanej izolácie. Pretekajúci prúd je ovplyvnený v podstate dvomi základnými procesmi vznikajúcimi po pripojení elektrického napätia:

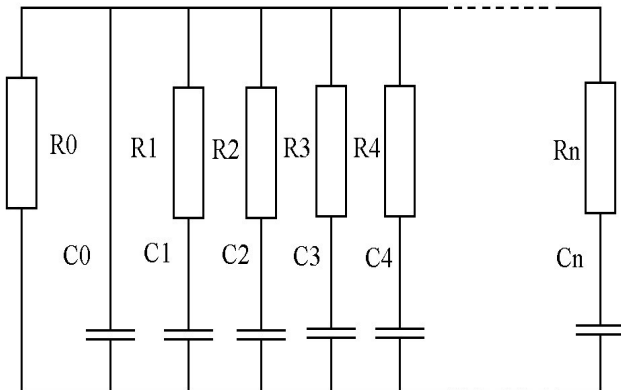
- vodivostné procesy, ktoré charakterizuje zvodový prúd resp. zvodový odpor,
- polarizačné procesy, ktoré charakterizuje absorpčný prúd pretekajúci dielektrikom.

Pre nabíjací prúd $i_n(t)$ pretekajúci dielektrikom po pripojení jednosmerného napätia platí:

$$i_n(t) = i_c(t) + i_a(t) + i_v(t) \quad (1)$$

- **kapacitný prúd $i_c(t)$** – Táto hodnota klesá od okamžiku priloženia napätia. Kapacitný prúd tečie geometrickou kapacitou C_0 po dobu nabíjania, ktorá je určená časovou konštantou $\tau = R_0 \cdot C_0$, kde R_0 je jednosmerný izolačný odpor
- **absorpčný prúd $i_a(t)$** resp. polarizačný prúd – Súvisí s transportom viazaných nábojov medzi vrstvami nehomogénnej izolácie, ktorá je s časom klesajúca.
- **zvodový prúd $i_{zv}(t)$** resp. vodivostná zložka prúdu – Tento prúd preteká izolačným odporom R_0 . Súvisí to

s existenciou voľných nosičov náboja v dielektriku. Spočiatku sa tento prúd mení v dôsledku zmien napätia na izolácii pred dosiahnutím ustáleného stavu. Neskôr nadobúda konštantnú hodnotu I_{zv} .



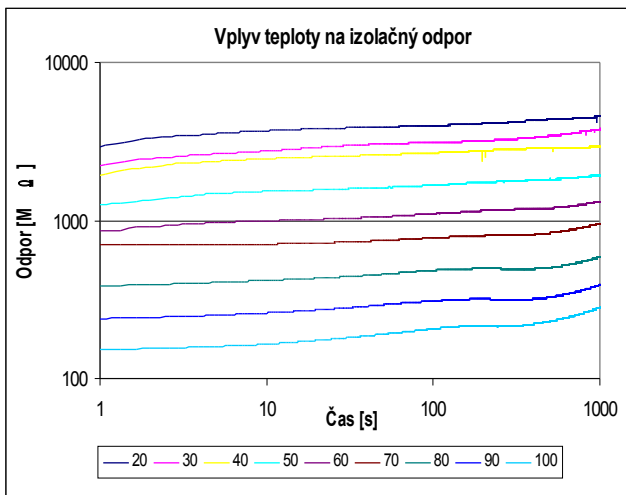
Obr. 1 Náhradný Maxwell-Wagnerov model dielektrika

Pomocou IRC analýzy, podľa ktorej je možné celkový prúd tečúci izolačným systémom na základe Maxwellovho náhradného modelu po pripojení na jednosmerné napätie vyjadriť ako

$$i_{nab}(t) = \frac{U}{R_0} + \sum_{i=1}^n I_{mi} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2)$$

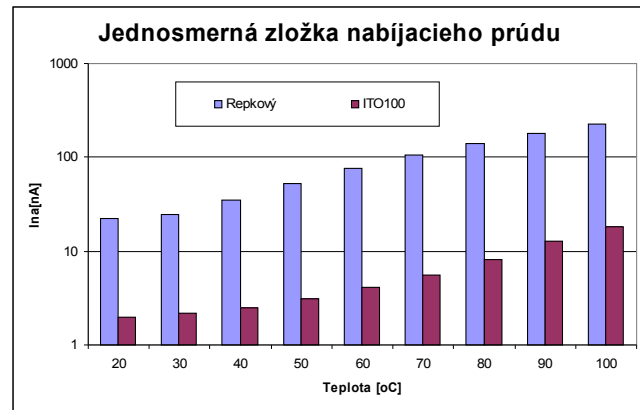
Test

Rastlinný repkový olej bol podrobený jednosmernému napätiu. Olej bol umiestnený v elektródovom systéme Tettex Instruments pre meranie kvapalných dielektrík. Bol meraný izolačný odpor kvapalného izolantu pri rôznych teplotách [4]. Výsledky získané z meraní sú uvedené na Grafe 1.



Graf 1: Tepelná závislosť izolačného odporu rastlinného oleja

Ďalej boli analyzované hodnoty jednosmernej zložky nabíjacieho prúdu pri aplikovaní jednosmerného napätia v čase konvergujúcom k nekonečnu. Výsledky sú uvedené v Grafe 2. Pre porovnanie boli zistené aj hodnoty jednosmernej zložky nabíjacieho prúdu pre transformátorový olej ITO 100 [4].



Graf 2: Tepelná závislosť jednosmernej zložky nabíjacieho prúdu

Záver

Prezentovaný test mal za úlohu zistiť vstupné izolačné a dielektrické parametre izolačného systému založeného na rastlinnom oleji. Bola sledovaná tepelná závislosť izolačného odporu a tepelná závislosť pre jednosmernú zložku nabíjacieho. Pre porovnanie bol analyzovaný aj bežne používaný transformátorový olej ITO 100.

Literatúra

- [1] Tichý V., Pallo V., Mašek V.: Transformátorový olej, STNL, Bratislava, 1962.
- [2] Kling J.: Vegetable Oil: From Kitchens to Power Lines, Web site of the American Chemical Society
- [3] Sidor A.: Starostlivosť o transformátorové oleje, Diplomová práca KEE FEI TU v Košiciach, 2005.
- [4] Kandala M.: Transportné procesy v izolačných systémoch, Diplomová práca KEE FEI TU v Košiciach, 2007.

Autor

doc. Ing. Roman Cimbala, Ph.D.; Oddelenie techniky vysokých napätí, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach; Mäsiarska 74, 042 00 Košice; e-mail: roman.cimbala@tuke.sk

Táto práca bola podporená projektmi APVV-20-006005 a VEGA 1/3142/06.

Vyhodnocovanie parametrov signálov akustickej emisie častkových výbojov

Abstrakt. Tento príspevok popisuje spracovanie signálov získaných z akustickej emisie častkových výbojov a ich časové zarovnanie. Popisuje metódu štatistického spracovania signálov akustickej emisie založenú na časovom zarovnaní signálu za pomoci autokorelačnej funkcie. Táto metóda je presnejšia a spoľahlivejšia ako klasické spriemerovanie signálov.

Abstract. In this article a method of signal sorting is verified for partial discharge acoustic emission in time domain. Statistic method - sorting of acoustic emission signals based on time alignment with the help of autocorrelation function is described. This method was proved as more exact and more reliable than normal signal averaging. (**Evaluation of acoustic emission signals parameters of partial discharges**).

Kľúčové slová: častkový výboj, akustická emisia častkových výbojov, štatistické spracovanie signálov.

Keywords: partial discharge, acoustic emission of partial discharges, statistical sorting of signals.

Úvod

Ľudstvo je v súčasnej dobe značne závislé na elektrickej energii, preto sa na spoľahlivosť výroby a dodávky elektrickej energie kladie veľký dôraz. Spoľahlivosť výroby a dodávky elektrickej energie je daná spoľahlivosťou všetkých zariadení, ktoré sa na tom podieľajú. Vo väčšine prípadov sa jedná o zariadenia vysokého a veľmi vysokého napätia. U týchto zariadení je najcitlivejšou časťou izolačný systém, na vlastnosti ktorého vplyva množstvo faktorov (elektrické a tepelné namáhanie, čistota a kvalita materiálu atď.), pretože porucha v izolačnom systéme vedie ku skratu a vyradeniu zariadenia z prevádzky. Stav izolačného systému nie je možné zistiť jednoduchým meraním, preto existuje celý súbor meraní, pomocou ktorých je možné odhadnúť jeho momentálny stav. Jednou z metód, pomocou ktorej môže posúdiť stav izolačného systému, je meranie častkových výbojov. Samotné meranie častkových výbojov je možné realizovať viacerými metódami. Meranie akustickej emisie častkových výbojov je jednou z nich.

Akustická emisia častkových výbojov

Jedným z vonkajších prejavov častkových výbojov je emisia mechanického vlnenia. Miesto v dielektriku, v ktorom vznikajú častkové výboje, je zdrojom mechanického vlnenia. Mechanické vlnenie sa šíri všetkými smermi podľa zákonov známych z fyziky a frekvenčné spektrum tohto vlnenia sa nachádza v pásme akustických vln, prevažne v ultrazvukovej oblasti. Toto vlnenie je možné vhodným snímacím zariadením zaznamenať, prípadne ho transformovať na signál elektrický, ktorý sa jednoduchšie spracováva. Na zaznamenávanie signálu sa používajú akustické snímače, pomocou ktorých je možné akustický signál previesť na signál elektrický. Takto transformovaný signál je možné ďalej spracovávať a upravovať pomocou výpočtovej techniky.

Miesto, v ktorom vzniká akustická emisia, sa stáva akustickým vysielačom, ktorý okolo seba vytvorí akustické pole vyvolávajúce zmeny v prostredí v podobe akustických vln. Akustické vlny sa šíria všetkými smermi vytvárajú okolo seba guľové vlnoplochy.

Vlastnosti akustického signálu je možné charakterizovať:

5. fázová rýchlosť šírenia vln c_f :

$$c_f = \lambda \cdot f \quad (1)$$

1. Skupinová rýchlosť šírenia vln c_g :

$$c_g = c_f - \lambda \cdot \frac{dc_f}{d\lambda} \quad (2)$$

kde λ – vlnová dĺžka
 f – frekvencia

Činiteľ tlmenia α charakterizuje zníženie energie akustického signálu prechádzajúceho cez dielektrikum o dĺžke Δl vyjadrené v cm a je definovaný:

$$\alpha = \frac{20}{\Delta l} \cdot \log \frac{P(l)}{P(l + \Delta l)} \quad (3)$$

Pomocou akustickej metódy je možné detekovať, lokalizovať a čiastočne kvantifikovať častkové výboje.

Snímanie akustických signálov častkových výbojov

Premenu akustického signálu na signál elektrický je možné realizovať pomocou akustických meničov. Najčastejšie používané meniče určené na tento účel sú piezoelektrické meniče. Princíp činnosti je založený na snímaní mechanického chvenia častkových výbojov, ktoré sú ďalej transformované na elektrické signály. Zmeny tlaku spôsobené častkovými výbojmi vplyvajú na piezoelektrický snímač, ktorý je vo forme kryštalických alebo polykryštalických látok. Tieto ďalej vytvárajú deformáciu kryštálu, pri ktorej dochádza k vytvoreniu elektrického poľa.

V praxi sa často používajú tieto vyhotovenia piezoelektrických meničov:

1. rezonančné snímače,
2. mikrofónové snímače,
3. hydrofóny.

Rezonančný snímač alebo akcelerometer je vhodný hlavne na snímanie zrýchlenia. Mikrofónový snímač obsahuje obojstranne pokovovanú doštičku z piezoelektrického materiálu. Hydrofón je piezoelektrické zariadenie, ktoré slúži na premieňanie zvukových signálov na signály elektrické. Tieto signály je možné snímať vo vode alebo v inej tekutine. Rozdiel medzi hydrofónom a mikrofónom je, že hydrofón sa používa v látkach, ktoré majú kvapalnú skupenstvo a mikrofón v suchom prostredí.

Pri použití dotkových snímačov, ktoré pripevňujeme na stenu zariadenia, je potrebné uvažovať s nedokonalým pripevnením sondy na stenu snímaného objektu, preto aj pri príprave pracoviska je nutné uvažovať s minimalizáciou strát energie akustického signálu. Výhodou dotkových snímačov akustickej emisie je ľahká pripojiteľnosť na stenu meraného zariadenia, pri ktorej nie je nutné uvažovať s odpojením od napätia.

Signál získaný z piezoelektrického meniča je ďalej spracovávaný v predzosilňovači, kde sa zosilní. Ďalej je tento signál prenášaný do vyhodnocovacieho zariadenia, kde sa zaznamenáva pomocou komplexných charakteristík s uvažovaním zdroja signálu akustickej emisie a akustického kanálu, v ktorom sa signál šíri. Pri snímaní akustickou metódou je dôležité vybrať si určité parametre

signálu, ktoré budú ďalej spracovávané. Výber závisí hlavne na štatistickej povahe signálu.

- Pre dlhé trvanie signálu akustickej emisie je najvhodnejšie zvoliť si:
 - energiu signálu,
 - početnosť impulzov akustickej emisie.
- Pre krátke trvanie akustickej emisie (ojedinelé impulzy):
 - doba nábehu impulzu,
 - špičková amplitúda,
 - doba doznievania,
 - celkové trvanie impulzu,
 - tvar obálky impulzu,
 - iné parametre charakterizujúce impulz.
- Charakteristika signálu vo frekvenčnom pásme:
 - amplitúdové a fázovo frekvenčné charakteristiky,
 - výkonové spektrum.

Spracovanie signálov akustickej emisie

Pri meraní je k dispozícii celý časový rad signálov. Prvou úlohou pri získavaní parametrov je detekcia pravidelnosti v časovom rade. Je možné vytvoriť šablónu impulzu, ktorý meria daná sonda za nemienciach sa okolností:

- filtrácia signálu
- časové zarovnanie signálu (množina signálov nie je časovo zarovnaná, je potrebné ju zarovnať, aby šablóna nebola časovo rozmazaná)

Pri snímaní signálu akustickej emisie zo zdroja čiastkových výbojov je na základný signál zvyčajne superponovaný akustický šum. Tento šum je potrebné eliminovať, čo v niektorých prípadoch nie je možné. Ako vhodné riešenie je možné použiť úzko-pásmovú akustickú sondu. Najčastejšie sa využívajú pásmové filtre. Medzi iné vhodné riešenia patrí digitálne ofiltrovanie, Waveletová transformácia s využitím prahovania. Hlavnou nevýhodou pri využívaní týchto metód je časté zdeformovanie hlavného signálu a preto výpovedná schopnosť parametrov priebehu je nepresná. Na riešenie tohto problému je možné použiť morfológické filtre, ktoré odstraňujú šum impulzného charakteru.

Zarovňovanie je proces, ktorý spočíva v rozdelení množiny signálov s počtom 2^n , kde n je celé kladné číslo, na páry signálov, pre ktoré je nutné určiť koreláciu a zarovnať ich podľa indexu vzorky maximálnej korelácie.

Základné štatistické veličiny pri spracovávaní akustických signálov

Pri meraní súčasnými meracími systémami je k dispozícii celý časový rad signálov impulzov čiastkových výbojov. Tento príspevok sa zaoberá overením metódy triedenia signálov akustickej emisie čiastkových výbojov v časovej doméne. Úlohou je štatistické triedenie a vytvorenie šablóny triedy impulzov akustickej emisie. Triedu tvoria signály zaznamenané z jedného merania a jednej sondy za konštantných podmienok. Zarovňovanie je aplikované zároveň s priemerovaním impulzov a spočíva v rozdelení množiny signálov na páry signálov, pre ktoré sa zisťuje korelácia a zarovňávajú sa podľa indexu vzorky maximálnej korelácie. Z takto časovo zarovnaných impulzov je vytvorený priemer a výsledok je použitý pre výpočet nového páru (spolu $2^{n/2}$), na ktorý je aplikovaný rovnaký postup. Takýmto spôsobom sa pokračuje až kým nie je dosiahnutý jeden zarovnaný priemerovaný časový priebeh impulzu akustickej emisie čiastkových výbojov.

Všeobecná formulácia je nasledovná:

$$h_{m,i}(k), \quad k = 1, 2, \dots, N_m; \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (4)$$

je i -tý filtrovaný a amplitúdovo normalizovaný signál triedy

$$m, \quad m = 1, 2, 3, \dots, M \quad (5)$$

kde M je počet tried signálu, N_m je počet vzoriek a L je počet signálov v každej triede za konštantných podmienok.

Metóda spriemerovaného signálu je jedna z často využívaných operácií na estimáciu signálu z výsledkov náhodného procesu. Pri spriemerovaní signálu je však potrebné vyhnúť sa priamemu spriemerovaniu, ktoré vedie k nesprávnej časovej estimácii signálu v časovej doméne, pretože akustické signály nie sú zarovnané v danom časovom intervale. Celý proces je založený na rozdelení množiny signálov na dvojice, pričom ich počet je upravený tak na hodnotu 2^n signálov. Z daného počtu sú potom zvolené dvojice, na ktoré je aplikovaná korelácia. Nasledovným krokom je určenie maxima korelácie, ktoré umožní zarovnanie signálov. Po vykonaní celého postupu je možné signál akustickej emisie čiastkových výbojov spriemerovať.

Ak sa predpokladá, že L je celočíselným násobkom čísla dva, potom priemer

$$\bar{h}_{m,L}(k), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

Priemer z každého signálu

$$\bar{h}_{m,L}(k) = \frac{1}{2} \cdot [\bar{h}_{m,1 \rightarrow (L/2)}(k) + \bar{h}_{m,(L/2)+1 \rightarrow L}(k)] \quad (7)$$

kde

$$\bar{h}_{m,1 \rightarrow (L/2)}(k) = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=1}^{L/2} h_{m,i}(k), \quad k = 1, 2, \dots, N_m \quad (8)$$

je priemer z prvej polovice L signálov a

$$\bar{h}_{m,(L/2)+1 \rightarrow L}(k) = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=(L/2)+1}^L h_{m,i}(k), \quad k = 1, 2, \dots, N_m \quad (9)$$

je priemer z druhej polovice L signálov. Ďalším rozdelením množiny sa postupne dosiahne úroveň, keď podmnožiny už obsahujú iba jeden signál, a nie je možné ich ďalej deliť.

Na meranie podobnosti vzájomnej závislosti dvoch číselných premenných x , y sa používajú rôzne štatistické charakteristiky. K najčastejšie používaným patrí korelačný koeficient, ktorý sa značí r_{xy} . Je to pomer kovariancie s_{xy} obidvoch premenných k súčinu ich smerodajných odchýlok s_x a s_y , tzn.:

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad (10)$$

Kovarianciu sa nazýva priemer súčinov odchýlok hodnôt obidvoch premenných od ich priemerov. Z n dvojíc hodnôt (x,y) možno kovarianciu vypočítať podľa vzťahu:

$$s_{xy} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (11)$$

Jednoduchou úpravou možno vzťah upraviť na tvar:

$$s_{xy} = \overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y} \quad (12)$$

kde

$$\overline{x \cdot y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \quad (13)$$

je priemer súčinov hodnôt obidvoch premenných.

Smerodajné odchýlky s_x a s_y možno vyjadriť v tvare:

$$s_x = \sqrt{\overline{x^2} - \bar{x}^2}, \quad s_y = \sqrt{\overline{y^2} - \bar{y}^2} \quad (14)$$

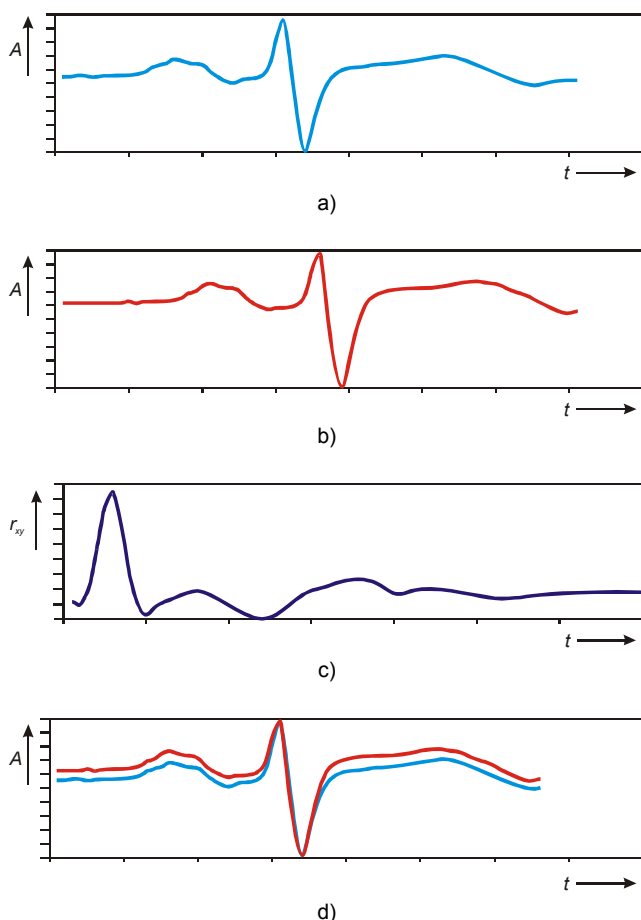
kde

$$\overline{x^2} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad \overline{y^2} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (15)$$

sú priemery druhých mocnín hodnôt obidvoch premenných. Dosadením predošlých vzťahov do vzťahu (10), získame vzťah

$$r_{xy} = \frac{\overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sqrt{(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)}} \quad (16)$$

použiteľný na numerický výpočet korelačného koeficientu.



Obr.1. Príklad zarovnania signálov s využitím korelácie

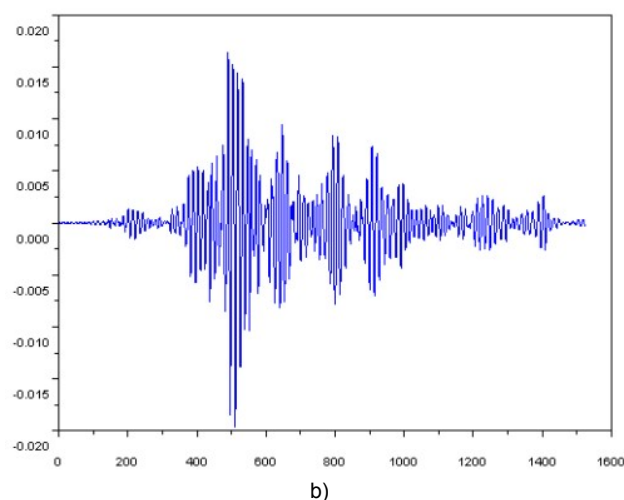
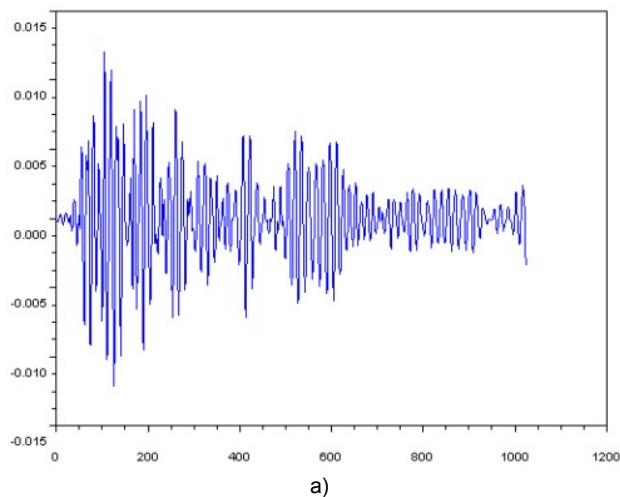
Korelačný koeficient nadobúda hodnoty z intervalu $<-1, 1>$. Podľa jeho znamienka sa posudzuje smer závislosti. Ak majú pri raste hodnôt premennej x hodnoty premennej y tendenciu rásť, je $r_{xy} > 0$, ak majú tendenciu klesať $r_{xy} < 0$. V prvom prípade sa hovorí o priamej závislosti oboch premenných, v druhom o ich nepriamej závislosti. Podľa absolútnej hodnoty korelačného koeficientu sa posudzuje podobnosť závislosti oboch premenných. Ak platí pre všetky dvojice hodnôt (x_i, y_i) vzťah $y_i = a + bx_i$ ($b \neq 0$), t.j. ak existuje medzi premennými x, y funkčná lineárna závislosť, je absolútna hodnota korelačného koeficientu rovná 1. Čím viac sa líši závislosť premenných x, y od funkčnej lineárnej závislosti, tým je absolútna hodnota korelačného koeficientu bližšia k nule. Ak $r_{xy} = 0$, sú obidve premenné lineárne nezávislé. O takýchto premenných sa hovorí, že sú nekorelované. Podľa toho, či sa absolútna hodnota korelačného koeficientu blíži k jednej alebo k nule, hovorí sa o silne či slabo korelovaných premenných.

Ak sa sleduje väčší počet číselných premenných, počítajú sa niekedy korelačné koeficienty medzi všetkými dvojicami premenných. Tieto párové korelačné koeficienty sú potom základom na výskum závislostí väčšieho počtu premenných.

Na obr. 1 a) a b) sú dva namerané signály, ktoré je veľmi podobné, ale nie sú zarovnané. Na ich zarovnanie sa použije korelácia (obr. 1 c)). Korelácia dosiahla maximálnu hodnotu v bode, podľa ktorého je možné signály zarovnať. Na obr. 1 d) sú zobrazené časovo zarovnané signály.

Šablóny signálov akustickej emisie

Merania boli realizované v rôznych kombináciách zdroja akustickej emisie voči sondám. Zdroj akustickej emisie bol vytvorený vzorkou s čiastkovými výbojmi a taktiež aj umelo generovaným šumom. Pred meraním bolo potrebné pre celú meraciu aparatúru vykonať kalibráciu. Na kalibráciu bola použitá kalibračná ceruzka, ktorej zlomením dôjde k akustickému vzruchu simulujúceho svojimi vlastnosťami priebeh impulzov akustickej emisie čiastkových výbojov. Po kalibrácii systému nasledovalo meranie. Merania boli vykonané bez bariér a s bariérami (zabráňovali priamemu prechodu signálu akustickej emisie k snímaču). Snímané impulzy boli spracované a zaznamenané v špeciálnej PC karte od Physical Acoustics.



Obr.2. Šablóny akustickej emisie vytvorené
a) obvyčajným spriemerovaním
b) s využitím korelácie a zarovnania

Za účelom overenia akustickej metódy boli vytvorené dva druhy šablón signálov akustickej emisie. Prvá trieda obsahuje šablóny, na ktoré bola použitá korelácia, zarovnanie a spriemerovanie a druhá trieda obsahuje šablóny s klasickým spriemerovaním.

Na vytvorenie šablóny triedy impulzov akustickej emisie je potrebné usporiadať a vyčleniť signály impulzov akustickej emisie. Z každej triedy je postupom uvedeným v predošlých odsekoch možné urobiť šablónu tried impulzov akustickej emisie. Na obr. 2 je znázornený príklad šablóny signálov akustickej emisie získanej popísanou metódou a obvyčajným spriemerovaním.

Záver

Príspevok sa venuje overeniu metódy triedenia signálov akustickej emisie čiastkových výbojov v časovej doméne. Overenie metódy triedenia signálov akustickej emisie čiastkových výbojov v časovej doméne bolo vykonané pomocou PC a programu SCILAB s potrebnými knižnicami. Na vyhodnotenie signálov bola použitá štatistická metóda založená na korelácii a spriemerovaní signálov. Takýmto postupom boli vytvorené šablóny tried signálov akustickej emisie. Kvôli porovnaniu a overeniu metód štatistického triedenia signálov akustickej emisie boli vygenerované aj šablóny tried vytvorené klasickým spriemerovaním. Použitá metóda bude ďalej použitá na spracovanie a analýzu signálov akustickej emisie čiastkových výbojov [8].

Literatúra

- [1] GURSKI, E.: Computer Aided Recognition of Partial Discharges Using Statistical Tools, Delf University Press, 1991.
- [2] KRŠŇÁK, I.: Detekcia čiastkových výbojov a analýza výpovedoschopných veličín, doktorská dizertačná práca, Košice, 1996.
- [3] SKUBIS, J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urzadzen elektroenergetycznych, Opole, 1998.

- [4] PETRÁŠ, J.: Akustická emisia čiastkových výbojov, ELEN 2006, ČVUT, Praha, 18. - 19. 9. 2006, ISBN 80-239-3565-8
- [5] PETRÁŠ, J.: Metodika vyhodnocovania meraní akustickej emisie čiastkových výbojov. In: Starnutie elektroizolačných systémov. č. 1 (2006), s. 17-21. Internet: <<http://www.tuke.sk/fei-kee/jses/>> ISSN 1337-0103.
- [6] VAIDYANATHAN, R. et al.: Parametric and non-parametric signal analysis for mapping air flow from ear canal to tongue movement, International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2004, Montreal
- [7] KIVADER, J.: Snímanie čiastkových výbojov akustickými metódami. Diplomová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2007. 60 s.
- [8] Kolcunová I., Kršňák I., Cimbala R.: Diagnostické meranie izolačného systému elektrických strojov, časopis Elektrotechnika v praxi, ročník 13, číslo 5-6/2003, str. 62-65 ISSN 0862-9730

Work on this paper was supported by grant VEGA No.4 – 1/3142/2006 and APVV-20-006005.

Autor: Jaroslav Džmura, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jaroslav.dzmura@tuke.sk

Juraj Kurimský, Irida Kolcunová

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

Modelovanie čiastkových výbojov v izolačnom systéme transformátorov

Abstrakt. Článok pojednáva o vplyve čiastkových výbojov na starnutie v izolačnej štruktúre vn a vvn transformátorov. Teoreticky je poukázané na tri základné vplyvy procesu starnutia: teplotu, vlhkosť a znečistenie malými časticami. Výsledky modelovania a analýzy sú príspevkom k znalostnej báze procesov starnutia potrebnej k správnej analýze zvyškovej životnosti vn a vvn transformátorov.

Abstract. The paper deals with the degradation influence of the partial discharges activity in the insulation structure of the power transformers insulation systems. The theoretical background of the oil-paper degradation cases shows three base influences to degradation process: the temperature, the moisture and the pollution by small particles. Results of the modelling and analysis from physical models of the oil-paper insulation system give the possibility to improve knowledge base and get proper analysis of real state of the power transformers remain life. (Modeling of Partial Discharges in insulation systems of the transformers)

Kľúčové slová: čiastkové výboje, izolácia olej-papier, starnutie materiálov

Keywords: partial discharges, oil-paper insulation, material deterioration

Úvod

Transformátory, generátory a spínacie zariadenia patria medzi hlavné časti energetických systémov. Preto sú na ich prevádzkovú spoľahlivosť kladené veľmi prísne požiadavky. V neustále rozrastajúcej sa energetickej sieti a pri raste prenášaných výkonov spôsobujú nečakané výpadky transformátorov rozsiahle škody. Cena škody na transformátore je zvyčajne mnohonásobne menšia ako celkové ekonomické straty spôsobené sekundárnymi dôsledkami havária (napríklad dočasné vyradenie celej transformátorovej stanice z prevádzky). Dôležitý je aj ekologický aspekt. Havária transformátora je neraz spojená s únikom oleja, čím sa zvyšuje nebezpečenstvo zamorenia pôdy a spodných vôd. Prvotnou príčinou takýchto havárií môže byť prieraz izolácie vinutí alebo zvýšená ionizácia v oleji. Tieto javy sa ešte pred haváriou prejavujú rovnako – zvýšenou hladinou čiastkových výbojov.

Kontrola stavu výkonových transformátorov je zložitá úloha hlavne v dôsledku obtiažnosti priamej obhliadky vinutí transformátora. Okrem toho, v dôsledku silných elektromagnetických polí v rozvodniach VVN a ZVN, vznikajú ťažkosti pri meraní transformátorov počas ich prevádzky. Celkový výkon výkonových transformátorov elektrizačnej sústavy niekoľkonásobne preyšuje inštalovaný výkon generátorov a spoľahlivosť ich prevádzky priamo ovplyvňuje spoľahlivosť celej elektrizačnej sústavy. Možno pozorovať veľký záujem o zdokonaľovanie meracích metód na zisťovanie stavu transformátorov a to nie len zo strany prevádzkovateľov, ale aj zo strany výrobcov výkonových transformátorov.

Dôsledkom rýchleho technického pokroku sú dnes dostupné meracie systémy umožňujúce nepretržité sledovanie výbojovej činnosti na týchto zariadeniach.

Starnutie vn izolácie transformátorov

Starnutie pevnej izolácie transformátorov ovplyvňujú tie isté faktory, ktoré pôsobia aj na olej. Proces starnutia pevnej izolácie je sprevádzaný znížením mechanickej a elektrickej pevnosti, nárastom dielektrických strát a vodivosti. Pre zabezpečenie dlhodobej a spoľahlivej prevádzky transformátora je potrebné kontrolovať stav ako kvapalnej, tak aj pevnej zložky izolácie transformátora.

Pri teplote 60 °C–70 °C sa oksiduje len časť hydroxylových skupín molekúl celulózy. Pri vyšších teplotách dochádza k značnému oksidovaniu, čo má za následok roztrhnutie reťazcov molekúl. Produkty oxidácie oleja ovplyvňujú proces starnutia pevnej izolácie.

Veľké škody spôsobuje vlhkosť, ktorá sa dostáva do pevnej izolácie cez kvapalnú izoláciu. Pri poklese teploty prechádza vlhkosť z oleja do pevnej izolácie, pri náraste teploty prebieha opačný proces. Pevná časť izolácie je schopná viazať na seba oveľa viac vody ako olej. Voda spôsobuje hydrolyzu celulózy – odštiepenie kyslíka a skrátenie dĺžky molekulových reťazcov.

V minulosti bolo navlhnutie pevnej izolácie na prvom mieste medzi príčinami poškodenia transformátorov. Za posledné desaťročie vyvinuté prostriedky na ochranu proti vniknutiu vlhkosti do oleja (nepretržité sušenie oleja, kontrola stavu vinutí s využitím plynovej chromatografie oleja a iné) posunuli tento typ poruchy na veľmi zriedkavú. Avšak veľký počet starých transformátorov potrebuje rozvíjať a vyvíjať spôsoby ochrany a metódy kontroly stavu navlhnutia.

Niektorí odborníci považujú vlhkosť 0,5 % za normálny stav. Prítomnosť 1,5 % vlhkosti sa považuje za vysokú. Pritom sa znižuje elektrická pevnosť, urýchľuje sa starnutie papierovej izolácie, rastie rýchlosť oksidovania oleja. Pri vlhkosti 3,3 % sa od papierovej izolácie začínajú oddeľovať vlákna celulózy, ktoré sa dostávajú do oleja [1].

Na základe dlhoročných skúseností, poľské energetiky používajú nasledovné kritériá navlhnutia papierovej izolácie transformátora [2]:

do 0,8 % - stav suchého nového stroja,
do 2 % - dobrý prevádzkový stav,
do 3,3 % - začiatok degradácie celulózy,
do 5,5 % - je možný prieraz izolácie pri 90 °C,
do 7% - je možný prieraz izolácie pri 50 °C,
pri 8% a viac – bezpodmienečná odstavka transformátora.

Okrem zníženia elektrickej pevnosti pevnej izolácie pri navlhnutí existuje nebezpečenstvo vzniku bublínok pri prechode vlhkosti do oleja v dôsledku zmeny teplôt. Migrácia vlhkosti z pevnej izolácie do oleja a späť súvisí

s nebezpečenstvom vzniku čiastkových výbojov pri vzniku plyných bublínok v dôsledku preťaženia transformátora. Bolo zistené, že prítomnosť bublínok môže znížiť elektrickú pevnosť izolácie až do jej prerazu [3].

Prítomnosť cudzích častíc a prímiesí vedie k znečisteniu oleja. Znečistenie oleja znižuje elektrickú pevnosť celej konštrukcie transformátora. Klasifikácia stupňov znečistenia oleja je vypracovaná pracovnou skupinou CIGRE 12.17 [4] a je uvedená v tabuľke č. 1.

Trieda znečistenia podľa ISO	Počet častíc na 100ml pri veľkosti 5/15µm	Stupeň znečistenia	Príklady stupňa znečistenia oleja vo výkonových transformátoroch
Do 8/5	250/32	nie je prítomný	
9/6 – 10/7	1000/130	nízky	Výborná čistota preberanie transformátora od zhotoviteľa
11/8 – 15/12	$32 \cdot 10^3 / 4 \cdot 10^3$	normálny	Typická hladina pre prevádzku
16/13 – 17/14	$130 \cdot 10^3 / 16 \cdot 10^3$	zvýšený	Hladina u značného počtu transformátorov
18/15 a viac	ešte viac	vysoký	Zriedkavý prípad znečistenia poukazujúci na prevádzkové problémy

Tab. 1: Tabuľka znečistenia oleja

Čiastkové výboje v izolácii olej-papier

Čiastkové výboje vznikajú v miestach so zvýšenou hladinou intenzity elektrického poľa. V izolačnom systéme transformátora môže takéto lokálne zvýšenie nastať na rôznych miestach – v oleji, alebo aj v pevných častiach izolačnej štruktúry. Výboje v oleji sú menej nebezpečné ako výboje takej istej amplitúdy vznikajúce v kombinovanej izolácii olej-papier, pretože posledné spôsobujú nevratné zmeny v papierovej izolácii. Okrem toho, pri experimentoch bolo zistené, že v dôsledku útlmu signálu pozdĺž vinutia, čiastkové výboje rovnakej amplitúdy, ktoré vznikajú v rôznych miestach pozdĺž vinutia, sú meracím odvodom detekované ako výboje, ktorých amplitúdy sú rôzne [7]. Toto je jeden z dôvodov, prečo je pri priamej metóde merania obtiažne určiť hodnotu nebezpečných čiastkových výbojov. V izolácii výkonových transformátorov čiastkové výboje sa môžu objaviť v nasledujúcich miestach [5]:

výboje v olejovom kanáli v mieste dotyku izolovaného vodiča s elektroizolačnou lepenkou alebo papierom,
 čiastkové výboje v olejovo – papierovej izolácii,
 čiastkové výboje v závitovej izolácii,
 kĺzavé výboje po povrchu elektroizolačnej bariéry,
 čiastkové výboje v miestach pripojenia priechodiek, prepínačov a iné.

Príčinou veľkej výbojovej činnosti môžu byť aj konštrukčné alebo technologické chyby. Medzi známe príčiny patria:

- nekvalitne vysušená izolácia,
- nekvalitná impregnácia,
- aktívna časť príliš dlho ostala na vzduchu,
- nepostačujúce vákuum pri naplnení nádoby transformátora olejom,
- prítomnosť cudzích predmetov,
- nekvalitné izolačné materiály,
- ostré hrany na kovových častiach,
- nekvalitné elektrické spoje.

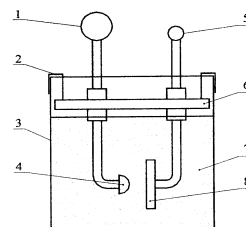
V dôsledku pôsobenia čiastkových výbojov v izolačnom systéme olej-papier dochádza k rozloženiu izolácie s uvoľňovaním plynu. V počiatočnom štádiu výbojovej činnosti sa vylučuje veľmi málo plynu a celé množstvo sa rozpustí v oleji. Pri rôznych typoch poškodení v transformátore zloženie rozpustného a vylúčeného plynu, sa môže značne líšiť. Analýza plynu umožňuje určiť tieto rozdiely. Môžeme vyčleniť nasledujúce typy poškodení v transformátoroch [5]:

- Oblúk v oleji. Uvoľnený plyn sa skladá z 60 %–80 % vodíka z celkového objemu, 10 %–25 % acetylénu, 1,5 %–3,5 % metánu, 1 %–2 % etylénu. Zvyšok sa skladá zo vzduchu rozpusteného v oleji. Veľmi malé množstvo CO a CO₂.
- Iskrové výboje v izolácii olej-papier. Plyn obsahuje veľké množstvo vodíka, acetylénu, metánu a 15 %–25 % CO z celkového objemu.
- Slabé čiastkové výboje v izolácii olej-papier. V tomto prípade je slabý vplyv teploty a vzniká hlavne vodík s prímiesou metánu, CO a CO₂ (oxid uhličitý). Acetylén nie je prítomný.
- Termický rozklad oleja, ktorý sa začína pri teplote nad 400 °C. Vznikajú nízkomolekulové uhľovodíky, etán, etylén a vodík. Pri teplotách nad 600 °C plyn sa skladá hlavne z metánu a vodíka. Za prítomnosti vzduchu vzniká taktiež oxid uhličitý.
- Termický rozklad izolácie olej-papier. Pri teplotách nad 500 °C vzniká hlavne oxid uhličitý, v menšom množstve oxid uhoľnatý a vodík.

Na základe množstva plynu a na pomere jednotlivých zložiek rozpustených v oleji, alebo plynnej fázy v plynovom relé je možné posúdiť o druhu poruchy v transformátore.

Modelovanie porúch v transformátore

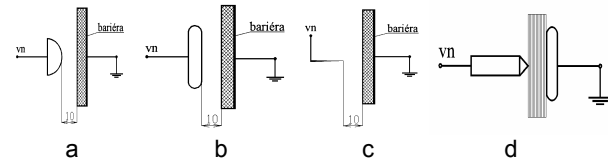
Za účelom spoľahlivej identifikácie typu poruchy v izolačnom systéme olej-papier boli vyhotovené modely usporiadani elektród, ktoré môžu byť zdrojom čiastkových výbojov v transformátoroch. Elektródy boli umiestnené v sklenenej nádobe naplnenej transformátorovým olejom (obr. 1).



- 1 – prívod vysokého napätia
- 2 – upevňovacia svorka z izolačného materiálu
- 3 – sklenená nádoba
- 4 – kovová elektróda
- 5 – uzemňovacia elektróda
- 6 – izolačná podložka
- 7 – transformátorový olej
- 8 – izolačná bariéra

Obr. 1 Meraný objekt

Na modelovanie výbojov objavujúcich sa v olejovom kanále bolo navrhnuté usporiadanie: kovová elektróda – izolačná bariéra. Ako kovové elektródy boli použité: polguľová elektróda s polomerom 15 mm (obr. 2a), elektróda tvaru Rogowského s polomerom 25 mm (obr. 2b) a hrotová elektróda (obr. 2c). Izolačná bariéra bola vyhotovená z tvrdého papiera impregnovaného olejom s polomerom 50 mm a hrúbkou 8 mm (obr. 2d).

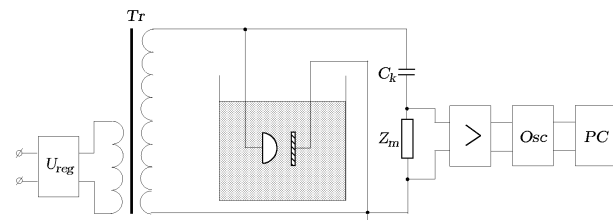


Obr. 2 Usporiadanie elektród

Ďalším zdrojom nebezpečných čiastkových výbojov v izolácii transformátora sú výboje vznikajúce v hrúbke medzivrstvovej izolácie. Medzi jednotlivými papierovými vrstvami v olejových kanálikoch môžu sa nachádzať vzduchové dutinky. Vznik dutiniek môže byť spôsobený zvýšenou teplotou, oxidáciou oleja, pôsobením elektrického poľa a inými faktormi. Na začiatku procesu dutinky majú mikroskopické rozmery, ale s časom ich veľkosť narastá a usadením sa na povrchu papierovej izolácii vytvárajú vhodné podmienky pre vznik čiastkových výbojov.

Výboje vznikajúce medzi jednotlivými vinutiami v papierovej izolácii boli namodelované tak, že medzi dve kovové elektródy (hrotová a disková) bol umiestnený navrstvený elektroizolačný papier. Usporiadanie je znázornené na obr.2d. V tomto prípade môžu vzniknúť výboje v dutinkách, ktoré sa zdržali medzi jednotlivými vrstvami papiera, výboje po povrchu papierovej izolácie v dôsledku prierazu jednotlivých vrstiev papiera.

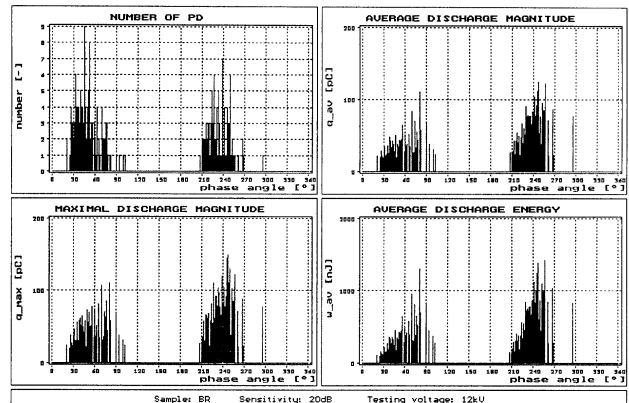
Schéma zapojenia elektrického detekčného obvodu na meranie čiastkových výbojov v olejovej nádobe pre vyššie uvedené usporiadania elektród je uvedená na obr. 3.



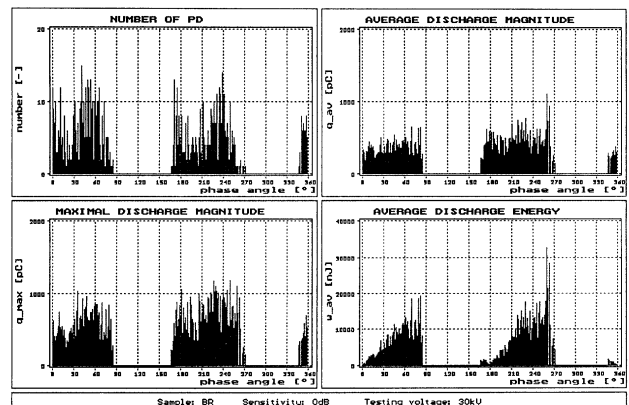
Obr. 3 Schéma zapojenia meracieho obvodu

Signál prúdových impulzov, spôsobený čiastkovými výbojmi bol spracovaný širokopásmovo, t.j. vo frekvenčnom rozsahu 20-300 kHz. Za účelom kvantifikácie výsledkov bol pred začiatkom merania merací systém kalibrován. Po integrácii a digitalizácii signálu boli jednotlivé vzorky prenesené do osobného počítača, kde boli ďalej štatisticky vyhodnotené. Vyhodnocovacia procedúra sa skladala z číslicovej filtrácie rušivých signálov, vyhodnotenia amplitúdy zdanlivého náboja čiastkových výbojov a z výpočtov rozložení štatistických parametrov v závislosti od fázového uhla. Boli vyhodnotené nasledovné štatistické rozloženia:

- rozloženie početnosti čiastkových výbojov, number [-],
- rozloženie maximálnej hodnoty zdanlivého náboja čiastkových výbojov, q_{max} [pC],
- rozloženie strednej hodnoty zdanlivého náboja čiastkových výbojov, q_{av} [pC],
- rozloženie strednej hodnoty energie čiastkových výbojov, w_{av} [nJ].

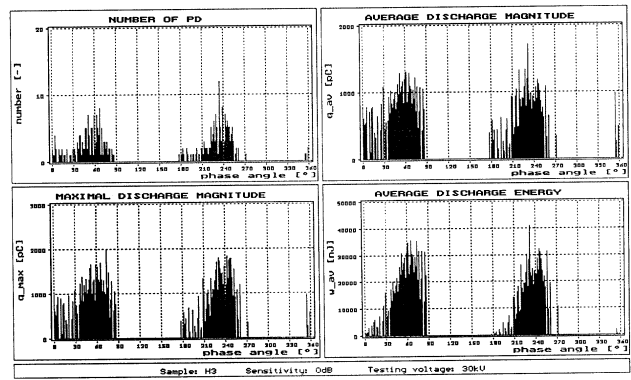


a

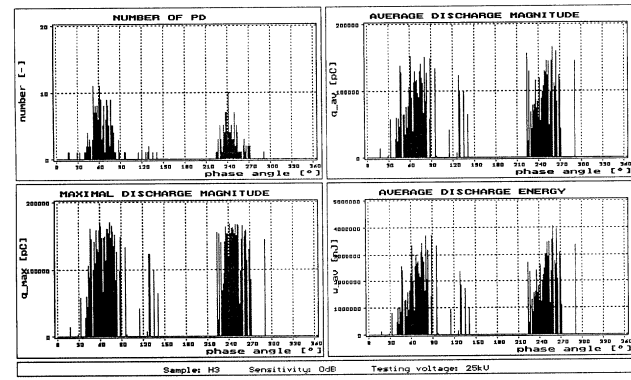


b

Obr. 4 Výsledky meraní čiastkových výbojov pre usporiadanie polguľová elektróda – bariéra



a



b

Obr. 5 Výsledky meraní čiastkových výbojov na vzorkenavrstveného papiera

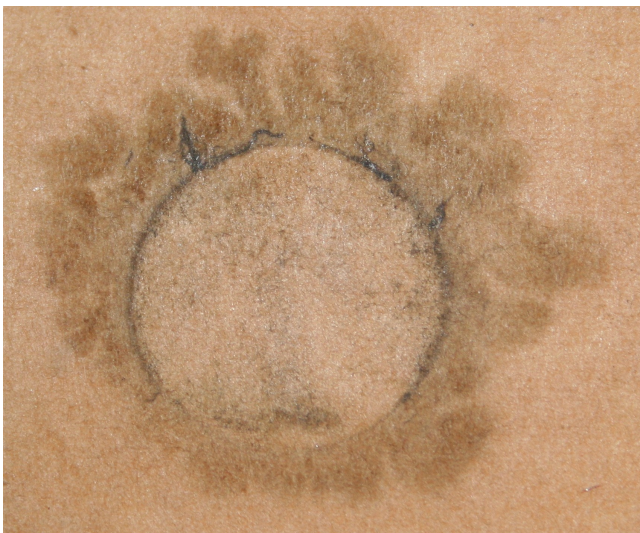
Vyhodnotenie nameraných výsledkov

Pri meraní čiastkových výbojov v usporiadaní elektród uvedených na obr. 2a-c, napätia pri ktorých sa objavili prvé (počiatočné) čiastkové výboje mali nasledovné hodnoty:

Upoč = 12 kV – pre polguľovú elektródu

Upoč = 11 kV – pre Rogowského elektródu

Upoč = 15 kV – pre hrotovú elektródu



Obr. 6 Poškodená štruktúra papierovej izolácie vplyvom čiastkových výbojov

Pri týchto hladinách napätia sa objavovali nestabilné výboje o hodnote zdanlivého náboja 100 pC. Pri zvyšovaní napätia narastala ako výbojová činnosť, tak aj hodnota zdanlivého náboja (do 1 000 pC). Podobný vývin výbojovej činnosti pri zvyšovaní napätia bol nameraný pre všetky typy usporiadaní.

Pre ilustráciu sú na obr. 4 uvedené výsledky meraní pre usporiadanie polguľová elektróda – bariéra pri hladine testovacieho napätia 12 kV (obr. 4a) a pri hladine 30 kV (obr. 4b). Tieto výboje pravdepodobne degradovali len olej, pretože po ukončení merania neboli pozorovateľné žiadne stopy erózie povrchu tvrdeného papiera.

Pri meraní čiastkových výbojov na vzorke navrstveného papiera podľa obr. 2d, prvé výboje sa objavili pri hladine testovacieho napätia 20 kV. Amplitúda čiastkových výbojov dosahovala hodnôt 2 000 pC (obr. 5a). Tu dochádzalo k výbojom v olejových kanálikoch a tvorbe plynu. Plyn sa hromadil medzi jednotlivými vrstvami papiera a pri zvyšovaní napätia došlo k zapáleniu výbojov v dutinke. Výsledky merania po 60 minútach namáhania napätím 30 kV sú uvedené na obr. 5b. Maximálna hodnota čiastkových výbojov dosahuje hodnoty 150 000 pC. Energia týchto výbojov je postačujúca na rozrušenie pevného dielektrika. V miestach výbojov vznikli na povrchu papiera zuhoľnatelé stopy (pozri obr. 6) a po určitom čase v najslabšom mieste došlo k prerazu papierovej izolácie [6].

Záver

V skúmaní vplyvu čiastkových výbojov na kvalitu izolačného systému transformátorov je potrebné pokračovať. Je známe, že prítomnosť vlhkosti, kyslíka, lokálne zvýšenie teploty znižujú životnosť izolačného systému. Je však málo známe, ako produkty oxidácie, navlhnutia a tepelného namáhania oleja ovplyvňujú elektrickú priernu pevnosť izolácie. Preto výskum podielu týchto produktov na degradácii izolačného systému transformátorov vyžaduje spojené úsilie odborníkov z oblasti chémie, fyziky a elektrotechnológie. Je prínosom, ak sa tento výskum opiera o výsledky získané z fyzikálnych modelov podporených meraniami na reálnych objektoch z prevádzky [8].

Táto práca vznikla za podpory vedeckej grantovej agentúry ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA č. 1/3142/06 a v rámci projektu APVV-20-006005

Literatúra

- [1] Určenie parametrov oleja v transformátore. Prospekty firmy SD Myers Inc. Akron, Ohio, USA 1998
- [2] Alexejev, B.A.: Kontrol' sostojenia krupnych silovych transformatorov, Moskva, Izdatel'stvo NCENAS, 2002
- [3] Stone, G. C., Sedding, H. G., Smith, J. W. R.: Advances in PD measuring Test Technology for Assessment of Operating Motors and Generators, 7th BEMA International Electrical Insulation Conference, 1990
- [4] Pracovná skupina CIGRE 12.17: Vplyv častíc v oleji na elektrickú pevnosť trasformátora, Electra, 2000, N 190, pp 135-139
- [5] Kurčinský, G. S., Kuzevetter, V. E., Pintaľ, J. S.: Izolacia ustanovok vysokého napriazenia, Moskva, Energoizdat, 1987
- [6] [Hrušovský, D.: Čiastkové výboje v izolácii olej – papier, diplomová práca, Košice, 1998
- [7] Záliš, K.: Evaluation of Partial Discharge Measurement. In: Proceedings of the VII Sympozjum "Problemy eksploatacji układow izolacyjnych wysokiego napiecia" (EUI'99). Zakopane (Polsko), 21.-23.10.1999, pp. 496-503
- [8] Kršňák, I., Kolcunová, I., Cimbala, R.: Development of partial discharges in stator insulation of high voltage rotating machines in dependens of applied voltage. Power and Electrical Engineering, Scientific Proceedings of Riga Technical University, Vol.4, No.11, Riga 2004, Latvia, pp 75-82, ISSN 1407-7345.

Autori:

Iraida Kolcunová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: iraida.kolunova@tuke.sk

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

Vybrané kapitoly z elektroenergetiky

Marek Hvizdoš, Ján Tkáč

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

Influence of Soil Properties to Arcing Phenomena during Ground Faults

Abstract. The downed-wires problem, known as high impedance faults, is described. The characteristics of these faults are described with the concentration to the network earthing methods, to the arcing phenomena on conductor - ground interface, and to the ground surface properties.

Keywords: high impedance faults, arcing phenomena, ground surface

Introduction

Detection of downed power conductors is a long-standing problem to electric utilities. These ground faults are difficult to detect when the impedance at the point of fault is too high. The fault currents can be lower than working ones, so that it is impossible to detect these high impedance faults (HIF) by conventional overcurrent and ground protection devices.

The high impedance fault exhibits arcing phenomena at the point of fault. The arcing faults result in waste of energy and they can damage the property. Protection against these faults is motivated mainly by improving the safety to persons and avoiding the ensuing utilities liability. The arcing phenomena analysis can contribute to the reliability of detection methods.

Characteristics of high impedance faults

The most frequent faults on overhead power lines are line-to-ground faults. The majority of the faults on distribution or transmission systems are low impedance faults (LIF). LIF is defined as a fault current above the maximum expected load current. LIF current can be easily detected by the overcurrent or ground relays.

A high impedance fault (HIF) may occur when an energized primary conductor falls down and makes contact with a dry tree limb, rock, sand, gravel, asphalt, concrete or insulators. HIF generally produces very low fault current due to the high fault impedance. The fault current in a HIF may range from zero to the pickup setting of overcurrent relays. Therefore, the overcurrent relays can not detect the HIF.

Fault circuit impedance and also fault currents during HIF are dependent on many circumstances. The most important are [1]:

- the method of transformer neutral earthing,
- the conductor - ground interface (especially arcing phenomena),
- the electric characteristics of ground material.

Methods of electric network earthing and influence on HIF

- Electric systems in Slovak Republic, respecting the connection of transformer windings neutral to ground, are operated by one of the follow methods [2]:
 - with solidly earthed neutral,
 - with isolated neutral,
 - with neutral earthed through earthing reactance (resonant earthed networks),

- with neutral earthed through earthing reactance, which is short-time gone round by small parallel impedance,
- with neutral permanently connected to ground through small impedance, usually through resistor.

Solidly earthed networks

Low-voltage and very high-voltage networks are operated with solidly earthed transformer neutral. Very high-voltage overhead lines have always earthing conductor to protect phase conductors against lightning. Metal towers have to be earthed well and connected to earthing conductor solidly. If the phase conductor is broken and fallen down to ground, solid return path for the fault current will be available through earthing of towers and through earthing conductor to transformer neutral. These low impedance faults (LIF) are detected easily except cases when the conductor is in contact with a dry asphalt, concrete, or rock. It is possible that arcing phenomena, which are typical for HIF, will be not developed in these cases.

There is a neutral conductor on the towers besides three phase conductors on low-voltage 0.4 kV overhead lines. Neutral conductor is connected solidly with transformer secondary neutral, and earthed in regular distances. When the phase conductor is downed, the earth fault current can be very small and sparking is not significant (stable arc is not developed). Switch fuses, which protect transformer secondary winding, detect this fault only if fault current is high. Usually the fault current during HIF is not high enough to be identified by these protective devices. As a result of these facts, it is very difficult to identify cases of HIF in low-voltage networks. Therefore these faults require special protection using different principle.

Isolated neutral networks

Networks with isolated transformer neutral have advantage in their simplicity and low investment costs. During line-to-earth faults, capacitive currents flow through the point of fault. Current magnitude depends on network largeness, respectively on capacitance magnitude between line conductor and ground C_0 . The disadvantage of these networks is risk of appearance of interrupted ground faults. Interrupted ground faults cause overvoltages (about 2.5 - 3.5 times of maximum phase voltage value). It leads to additional insulation weariness and to possibility of further fault developing in such network. Therefore these networks are represented nowadays by older overhead lines or by small networks in industry.

Capacitive character of fault current can cause further complications during HIF in isolated neutral network. The fault current depends on capacitive reactance of network, so that HIF will depend on network character. Electric charge accumulated on capacitances assists to arc developing in large networks (C_0 is higher). Arcing phenomenon will be not kept on conductor - ground interface in smaller networks (C_0 is lower), because of small fault current.

High impedance faults in solidly earthed networks have resistive character, although they originate in high inductance circuits. Isolated neutral networks are different by this feature.

Resonant earthed networks

Current and voltage relations are more favourable during earth fault in resonant earthed networks. Therefore distribution networks are usually resonant earthed.

Resonant earthed networks in resonant condition have the advantage during solidly earth fault. Stable overvoltage is not higher than interconnected voltage. The magnitude of voltage zero-sequence component U_0 (and also voltage of transformer neutral towards ground U_N) is decisive during arcing earth faults.

Downed conductor in resonant earthed network can disturb correct function of ground directional relay and voltage magnitude can be not sufficient for protective device.

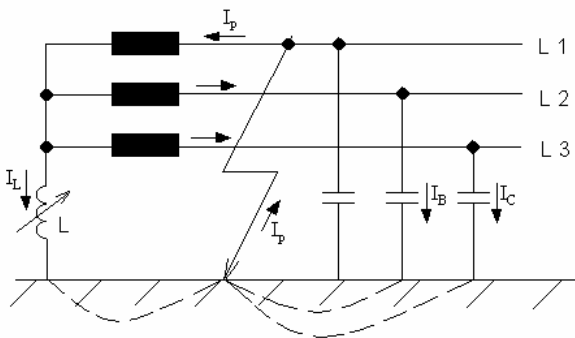


Fig. 1 Ground fault in resonant earthed network

The current flowing through the fault point will be limited by conductor - ground interface resistance, by ground resistance, and also by earthing reactance in transformer neutral (Fig. 1).

Residual current will be 3 - 5 % of capacitive current. This residual fault current has active character, but the current magnitude is relatively small, compared with that one in solidly earthed network during HIF. It makes HIF detection in resonant earthed networks more difficult.

Other networks with isolated neutral

Some low-voltage networks are operated with neutral earthed through small impedance. This method is not used for overhead lines. It is suitable to earth transformer neutral through resistance R in combined networks, if rate of cable length to overhead line length is more than 0.2. Character of earth fault is changed by earthing through resistance less than 100Ω . It will be line-to-earth short circuit limited by resistance in neutral and by ground resistance at the fault point. High impedance fault in these networks is similar to that one in solidly earthed networks.

The next type is network with earthing reactance, which is short-time gone round by small parallel impedance during fault. This concept is suitable for overhead and combined

networks. However, this method has no effect on HIF. High impedance fault has the same characteristics as that one in resonant earthed network.

Soil properties and conductor - ground interface

The important influence to the fault current has conductor - ground interface. The fault current magnitude is dependent on electric properties of surface ground material.

The resistance of various soil types can vary in wide ranges. According to physical-geological relations, it can be also changed 1000 - 10000 times for the same soil. It is caused by many factors, e.g.:

- per-unit electric resistance of the soil,
- H_2O content in the soil,
- physical structure of the soil,
- chemical composition of the soil,
- impact of external operating factors.

Generally, the ground can be considered as the resistance with linear properties. However, the impedance of HIF in series with arc is both resistive and non-linear.

The arc originates at the fault point during HIF in 99 % of cases. Its presence can be thus used for HIF detection. The arc phenomena have been extensively researched, but this research has been largely aimed on high current arcs and the mechanism of arc extinction. However, low current arcs perform in different conditions, as a part of high impedance fault.

Alternating arc causes periodic changes of current. Every current change brings up changes of arc temperature, internal energy quantum, electric and heat conductivity and arc column losses. The voltage and current waveforms are changed from period to period because of unstable arcing. Free burning arc, according to load circuit impedance, can be low impedance or high impedance arc. High impedance arcs have not high impedance of the arc column, but they originate at the circuit with high impedance. The ground arcing faults belong to this group. They have high impedance because of conductor - ground interface resistance and Petersen coil reactance [3].

In solidly earthed system, the stable arcing can lengthen to 10 - 50 cm. The initial arc current with some kA can warm the conductor and the developed metallic ions support the low impedance of the arc. The arc current of HIF has different characteristics. The initial current may be less than 100 A and the arc range of length may be less than 1 cm. This small current will be little metallic vaporised to supply the ions needed to sustain the arc. The arc resistance is combined with ground resistance. This resistance in series limits fault currents.

The voltage - current characteristic of an arcing ground fault is non-linear (Fig. 2). The arcing phenomenon associated with downed power lines occurs in a largely resistive circuit, and is characterised by short arc length, small current magnitude, and could persist for a long period of time.

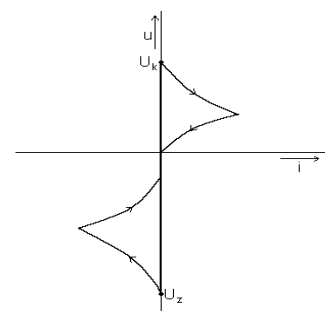


Fig. 2 Voltage - current characteristic of arc

The arc penetrating the soil has typical values of temperature at the arcing spot of the order of: 2000 to 3000 °C for metallic electrodes; 3000 to 4000 °C for carbon electrodes; and 5000 to 8000 °C in the gas column. The arc heat is enough to fuse sand and silica in the soil into a glass-like substance, silicon carbide (SiC) tubes. These SiC tubes have a linear resistance between 2 and 100 kΩ.m⁻¹ [4].

The arcing faults voltage - current characteristic and the fault current signal behaviour will be a result of a complex interaction of:

- the mechanical interaction on conductor - ground interface,
- the value of contact voltage,
- the outdoor meteorological conditions,
- the development of accessory electrochemical reactions,
- the heat capacity of the conductor, earth and arc gas,
- the progressive development of areas with high and low electric conductivity,
- the ground material itself.

As it was mentioned above, the arc originating during HIF causes high frequency current components. This fact can help us to identify these faults. The frequency spectrum of the arcing fault can be obtained by the Fourier analysis. Calculations of the magnitudes of spectral components of a gate function, which represents a spark, show that it contains frequencies near 10 kHz or less. To border of the harmonics varying widely under different loads, only signals above 2 kHz are considered. Due to deteriorating signal levels at higher frequencies, it has been chosen 10 kHz as the upper band limit of interest.

The fault current random behaviour can be described by current flicker and half-cycle asymmetry [4]. The rectifying action exhibited by the soil causes the asymmetry of the fault current. The arc voltage in the negative half-cycle is larger than that at the positive half-cycle. Consequently the current conduction period, and hence its magnitude is smaller in the negative half-cycle. Dry soil causes higher difference in arc voltages and larger degree of asymmetry than wet soil.

The fault current magnitude may vary greatly from one cycle to the other. It is a result of arcing at the fault, which rearranges the characteristics of the air gaps surrounding the downed conductor as well as accumulation of silicon carbide tubes around the conductor.

Fig. 3 and Fig. 4 show the voltage and current waveforms of a HIF on soils with different moisture. High impedance fault current behaviour is affected by the surface conditions.

Faults on dry soil are characterised by unsymmetrical half-cycles, and short current flow interval per half-cycle (Fig. 3).

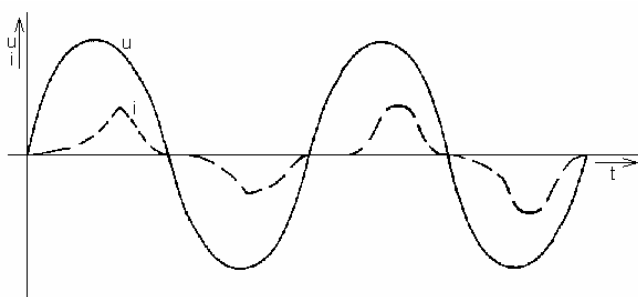


Fig. 3 Voltage and current waveforms of HIF on dry soil

Faults on wet soil cause small half-cycle asymmetry and fault current waveform is almost sinusoidal (Fig. 4). The degree of dryness or wetness and the surface conditions would result in a different combination of these features for a given ground material.

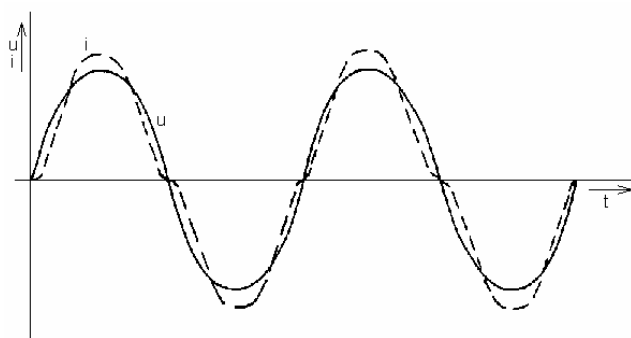


Fig. 4 Voltage and current waveforms of HIF on wet soil

HIF detection is complicated by some arcing loads, such as arc welders, arc furnaces and fluorescent lights loads, and by other loads with pulse sources, like computers. These fault-like loads cause higher harmonics similar to arcing HIF. The goal of the arcing faults detector is to distinguish between HIF and normal operation conditions, according to analysed current signal.

The HIF detector can utilise high frequency current components with frequency up to 10 kHz, generated by the arc, to identify arcing faults. It is suitable to combine this operation with monitoring of other current characteristics, such as current flicker and half-cycle asymmetry, because the random behaviour of fault current signal can identify fault-like loads.

Measurement of soil properties

The analysis of soil patterns from 8 places was made. These places are close to the important points of electric power system in Slovakia. Obtained patterns were analysed in regard to the influence of H₂O content to electric conductivity. Voltage - current characteristics were also studied.

Individual patterns were good dried-up to secure minimal moisture. After the exsiccation, a pattern was crushed to powder. Then it was filled to a ceramic ring and weighted by 1 kg metallic electrode. The porcelain ring was laid on copper pad (Fig. 5).

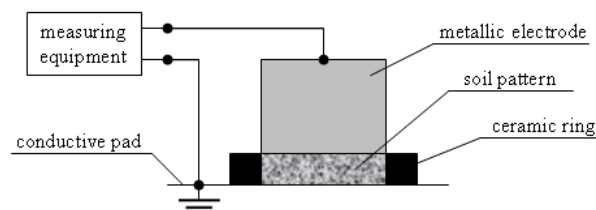


Fig. 5 Electrode system for soil properties measurement

The values of R, C, G of the prepared patterns were measured by RLCG-meter. After measurement, 2 ml of distilled water were added to the soil pattern, representing 6.67 % of H₂O content. The soil was mixed to achieve balanced moisture and the next values were measured. This procedure was repeated by additional 2 ml of H₂O up to 10 ml (33.33 % of H₂O content) for all patterns.

Voltage source was connected to the dry soil patterns for next measuring. The voltage was increased until current flow or arc origin. Voltage - current characteristic was measured up to 10 mA.

The measured relations are presented on Fig. 6 and Fig. 7. According to results, dry soil has properties of insulator. The resistance varied from 1 M Ω to 300 M Ω , representing the electric conductivity 3.3 nS - 1 μ S. The conductivity of soil patterns rose with the moisture increasing. The value reached 2.43 mS - 18.33 mS for the highest moisture, according to soil patterns (Fig. 6). During voltage - current characteristics measurement, the breakdown voltage varied from 11 kV to 18 kV. The pattern No. 7 has properties of conductor unlike other patterns. Fig. 7 shows different properties of each pattern.

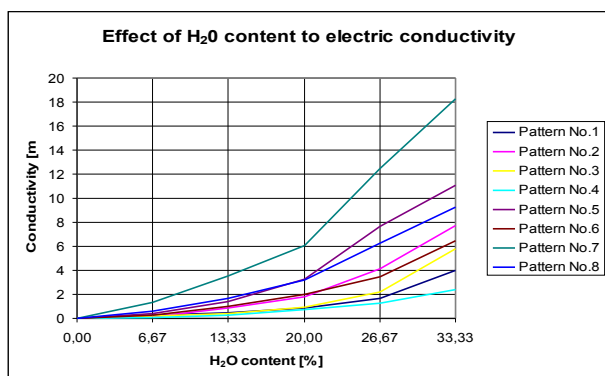


Fig. 6 Effect of H₂O content to electric conductivity

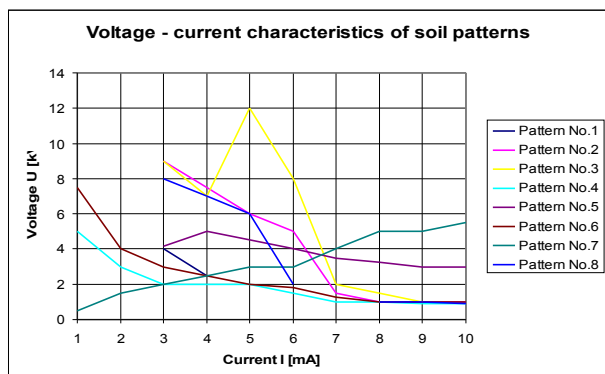


Fig. 7 Voltage - current characteristics of soil patterns

The laboratory test results show the important influence of the soil moisture and the fault place (i.e. soil type) to the current waveform during high impedance fault. The soil is dried in the area of the conductor contact point with ground. It causes the higher harmonic components and the fault current asymmetry increasing. This fact raises the probability of the HIF detection, although with time delay.

Conclusion

High impedance faults problem is very actual task, especially on overhead distribution systems. The fault currents can be lower than working ones, so that it is very difficult to detect these faults by conventional overcurrent or ground protection devices. The detection task is important because of possible property damage, and waste of energy. However, it is also essential to safety of persons, because the overhead lines are often situated in the areas of residential quarters with the heavy movement of persons. Thus, the result of that fault can be the hazardous contact with energized conductor, and also the appearance of dangerous step voltage.

The paper deals with high impedance faults and its characteristics. The fault circuit impedance and also fault currents during HIF are dependent on many circumstances. The most important are the method of transformer neutral earthing, the electric properties of ground material, the conductor - ground interface, and arc characteristics.

The fault current during HIF contains higher harmonic current components (2 - 10 kHz), generated by the arc at the fault point. The fault current random behaviour can be described by current flicker and half-cycle asymmetry. The rectifying action exhibited by the soil causes the asymmetry of the fault current. These fault current properties can be used by the arcing fault detector to identify HIF. The most suitable solution is to combine the detection of low impedance faults (short circuits and ground fault) and high impedance faults in one universal protection device.

References

- [1] Hvizdoš, M. – Chladný, V.: Analysis of Arcing Phenomena of High Impedance Faults. In: Engineering of Modern Electric Systems EMES '01, Oradea, Romania, 2001, pp. 236-239. ISSN 1223-2106
- [2] Chladný, V. – Hvizdoš, M.: Detekcia vysokoimpedančných porúch z hľadiska spôsobov prevádzky uzemia uzla sieťi. In: EE – Odborný časopis pre elektrotechniku a energetiku, Bratislava, Slovakia, Vol. 3, 1997, No. 3, pp. 4-6.
- [3] Sokanský, K.: Volně hořící elektrický oblouk a možnosti jeho identifikace v elektrizační soustavě. VŠB – TU Ostrava, Czech Republic, 1998.
- [4] Sultan, A.F. – Swift, G.W. – Fedirchuk, D.J.: Detecting Arcing Downed - Wires Using Fault Current Flicker and Half - Cycle Asymmetry. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, 1994, No. 1, pp. 461-470.

This work was supported by Research and Development Support Agency under the contract No. APVT-20-006005 and by Scientific Grant Agency of the Ministry of Education of Slovak Republic and the Slovak Academy of Sciences under the project VEGA No. 1/2178/05 and VEGA No. 1/3141/06.

Authors: Marek Hvizdoš, Ján Tkáč, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice,
E-mail: jan.tkac@tuke.sk, marek.hvizdos@tuke.sk