



PUBLIKÁCIA TECHNICKEJ UNIVERZITY V KOŠICIACH

STARNUTIE ELEKTROIZOLAČNÝCH SYSTÉMOV

Jún 2007

Číslo 2/2007

ISSN 1337-0103

Obsah

Karol Marton, Juraj Kurimský Diagnostika transformátorov	3
Iraida Kolcunová, Ivan Ferenc Meranie dielektrických vlastností rastlinných olejov	14
Roman Cimbala Dielectric Modeling of Liquid Insulations	20
Dušan Medveď Aplikácia waveletov v procesoch vysokého napätia	23
Bystrík Dolník Nedeštruktívna diagnostika vn zvodíčov prepätia	26
Jaroslav Petráš , Dušan Medveď, Jaroslav Džmura Aplikácia metód spektrálnej analýzy pri akustických meraniach častkových výbojov	29
Miroslav Bánes, František Koval' Častkové výboje a ich vplyv na PE izoláciu	31
František Koval', Miroslav Bánes Izolačný systém transformátorov	34
Zoltán Csomos, Juraj Kurimský Modelovanie defektného miesta izolačného systému	36

Vybrané kapitoly z elektroenergetiky

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

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

Diagnostika transformátorov

Abstrakt. Príspevok je orientovaný na výber takých diagnostických metód na diagnostikovanie vn resp. vvn transformátorov, ktoré je možné v súčasnosti aplikovať v elektroenergetike SR, vychádzajúc z momentálneho stavu prístrojovej techniky v laboratórnych podmienkach, vo výskume a v priemyselnom zázemí. Výber metód sa opiera o poznanie fyzikálnej podstaty výpovedechopných veličín a o ich spracovanie súčasnými prostriedkami výpočtovej techniky.

Je poukázané na spoľahlivý a bezporuchový prenos elektrickej energie v sústave vedení vn a vvn a zdôrazňuje sa plánovaná a kontinuálna diagnostika základných prvkov prenosovej sústavy s poukázaním na zložitý izolačný systém sledovaného prvku – transformátora.

Kľúčové slová: výkonový transformátor, čiastkové výboje, akustická emisia, plynová chromatografia, prenosová funkcia..

Úvod

Spoľahlivý a bezporuchový prenos elektriny v sústave vedení vysokého a veľmi vysokého napätia je v súčasnosti nemysliteľný bez plánovanej kontinuálnej diagnostiky jej základných prvkov, ktoré sú reprezentované výkonovými transformátormi vysokého, resp. veľmi vysokého napätia. Dôraz je kladený na diagnostiku izolačných systémov sledovaných prvkov vysokého napätia predovšetkým z kombinovanej sústavy olej-papier, v návaznosti na interakciu s vodičmi (Cu) a magnetickým obvodom (FeSi).

Ciele diagnostiky

Poruchy výkonových transformátorov na základe štatistických údajov v rozsahu 60% spôsobujú defekty v izoláciách vinutí. Z toho dôvodu väčšina pracovísk sa zameriava hlavne na diagnostiku týchto zložiek, pričom dominuje kontinuálne sledovanie stavu izolačného systému celého objektu.

Ciele diagnostiky transformátorov zhrnieme do nasledovných bodov:

- Poukázať na vznik produktov starnutia s požiadavkou získať výpoveď o zbytkovej životnosti izolácie.
- Poukázať na prítomnosť vlhkosti ako na urýchľujúci prostriedok procesu starnutia izolačného systému ako aj na element stimulujúci elektrický prieraz izolácie (zníženie jej elektrickej pevnosti) pri uvádzaní do chodu, prípadne aj v prevádzke transformátora.
- Poukázať na „horúce miesta“ v transformátore, na nedokonalé (uvoľnené) spoje, ktoré môžu spôsobiť termické poškodenie v objekte transformátora.

Všeobecným makroskopickým prejavom elektrofyzikálnych procesov, ktoré v transformátore sledujeme, vrátane kombinácie elektromagnetických a mechanických spojov, je už spomínaná zmena teploty stroja (vrátane magnetických obvodov). V tomto prípade, diagnostickou veličinou je infačervené žiarenie, čo sa dá zaznamenať termovíziou, infraľuškou, prípadne konvenčným teplomerom.

Do kategórie cieľov diagnostiky je potrebné zaradiť tiež niektoré parametre, ktoré slúžia na výber diagnostických veličín. Popredné miesto tu zastáva mechanické kmitanie, jeho efektívna hodnota, frekvenčné spektrum a z toho rezultujúce diagnostické veličiny, ako sú: amplitúda kmitov,

rýchlosť ich postupu, ich zrýchlenie, prípadne sa stretávame s kombináciou týchto veličín.

Dôležitým diagnostickým ukazovateľom je hluk zariadenia a z toho vyplývajúca jeho efektívna hodnota, spektrum, stav magnetického jadra, chvenie, prípadne hluk vychádzajúci od magnetických obvodov a pod. Šírenie sa akustických signálov podmieňuje tlak vzduchu, počet a intenzita rázov a ultrazvuková emisia.

Akékoľvek nové trendy v diagnostike vn a vvn prvkov a zariadení musia vychádzať zo základných fyzikálnych fenoménov, odohrávajúcich sa v objemeizolačného systému. V uplynulom období boli tieto javy u nás analyzované, preto v ďalších statiach poukážeme na súhrn ferekvencovaných metód, prípadne postupov v diagnostike, resp. upozorníme na menej využívané metódy, ktoré vhodne doplnia doteraz známe poznatky.

Zosúladenie diagnostických metód, resp. postupov

Problémy diagnostiky transformátorov spočívajú v komplikovanej štruktúre zariadenia, v izolačnom systéme, kde má dominantnú úlohu vysokonapäťové vinutie, v kombinácii pevnej a kvapalnej fázy izolácie, a čo je veľmi závažné: vysokonapäťový transformátor disponuje malým počtom „prístupných“ ciest, umožňujúcich bezprostredné pripojenie sa k meracím bodom, resp. k takzvaným bodom na snímanie diagnostických veličín.

Neexistuje univerzálna metóda, ktorá by súborne mohla posúdiť stav transformátora, buď on-line alebo off-line metódou. Existuje značný počet jednotlivých, samostatných spôsobov, ktoré umožňujú získať čiastkovú diagnózu dôležitých samostatných prvkov izolačného systému transformátorov, prípadne izolačného oleja a komponentov majúcich charakter stavebných prvkov transformátora.

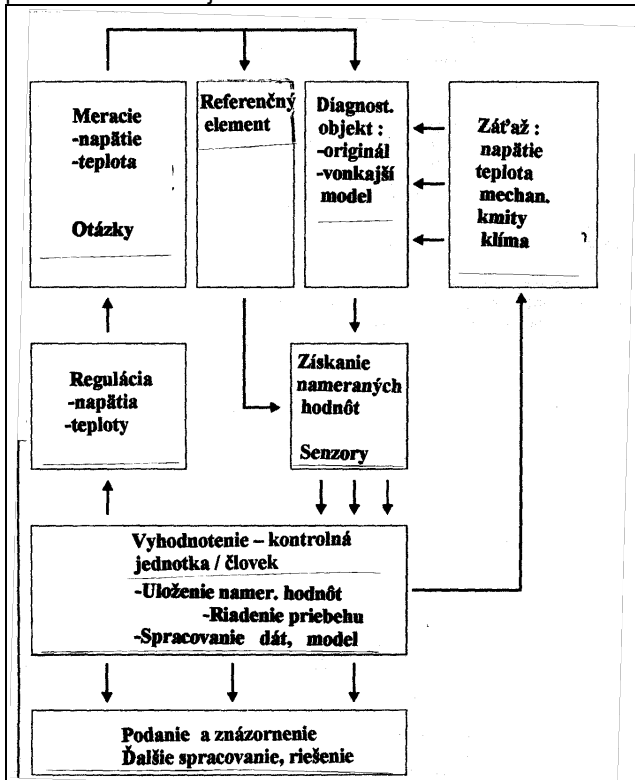
K významným diagnostickým metódam vn a vvn transformátorov môžeme zaradiť:

- Analýzy plynov, sústredených v kontrolnom objeme, za predpokladu, že uvoľnené plyny majú rozdielne zloženie.
- Analýza plynov extrahovaných z izolačného oleja plynovou chromatografiou, resp. hmotovou spektroskopiou.
- Meranie čiastočných výbojov širokopásmovým meracím zariadením, elektrickými a akustickými metódami.
- Dielektrická diagnostika celého transformátora využitím svorkovnice transformátora a súčasného

odberu vzorky oleja, za účelom stanovenia polarizačného spektra objektu.

- Diagnostika impulznými metódami, stanovujúcimi pomery v priestorovej impedancii transformátora, vzhľadom na tranzientné pochody vo vinutiach transformátorov pri impulznom namáhaní napäťovými, resp. bleskovými prúdmi. Sledovanie transférovej funkcie..
- Diagnostika tepelných polí v objeme transformátora. Sledovanie technických anomálií nasadením termografie.

Všeobecná bloková schéma diagnostického systému prvkov a zariadení je na obr.1.



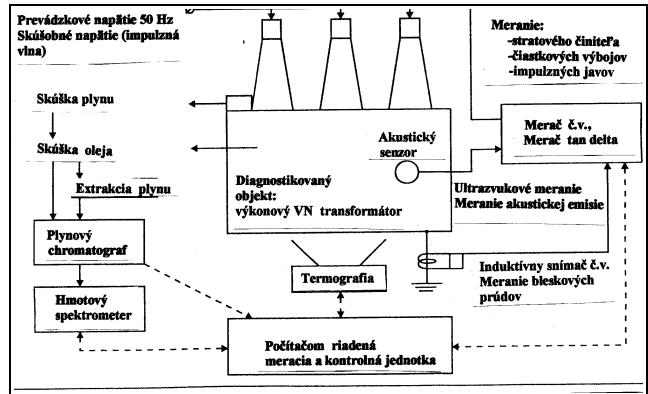
Obr. 1 Všeobecná bloková schéma diagnostického systému pre zariadenia v elektroenergetike [1][3]

Aplikáciu princípu na obr. 1 zostavíme model diagnostického systému pre vn a vvn transformátory. „Vybudenie“, resp. generovanie výpovedeschopnej veličiny dosiahneme týmito prostriedkami:

- striedavým napätím o frekvencii 50 Hz,
- tranzientnými procesmi (impulzné napätia, resp. prúdy, spínacie pochody, tlmené harmonické priebehy a pod.).

Pri prevádzkových teplotách, resp. pri teplotách vyšších, daných tepelnou triedou systému, sledujeme odpovede (echá) na vyššieuvedené zaťaženie vo forme týchto výpovedeschopných veličín:

- dielektrické veličiny (kapacita, stratový činiteľ $\text{tg}(\delta)$)
- čiastkové výboje (č.v.),
- veličiny charakterizujúce prenosové funkcie (prenosová admitancia),
- komponenty uvoľnených plynov (napr. zo vzoriek oleja extrakciou),
- zvýšenie teploty – termografia, termovízia.



Obr. 2 Princíp diagnostikovania transformátora [1]

Na obr.2 sú schématicky znázornené najčastejšie aplikované meracie metódy, ktoré slúžia na off-line sledovanie diagnostických výpovedeschopných veličín. Pri on-line metóde sú využité indukčné, kapacitné alebo piezoelektrické snímače.

V predloženej štúdií poukážeme na tie diagnostické metódy, resp. systémy, ktoré sú v súčasnosti v Slovenskej republike dostupné a ktoré sú prístupné pre Slovenskú elektrizačnú prenosovú sústavu a nachádzajú sa na vedecko-výskumných pracoviskách (skúšobniach) vo VÚJE a.s., Trnava, prípadne na technických univerzitách.

Analýza plynov uvoľňovaných olejmi

Pôsobenie teploty, vzdušného kyslíka, vlhkosti a elektrického poľa v prítomnosti metalických látok ako katalyzátorov, vedie v priebehu trvalého namáhania izolačného systému ku vzniku plynových produktov starnutia, čo súčasne spôsobuje odbúravanie kvality izolačnej kvapaliny a komponentov celulózy v transformátore. Stav izolačného oleja podáva tým integrovaný obraz izolačného stavu celého transformátora.

Plynová chromatografia umožňuje analyticky sledovať rozkladové produkty rozdelením jednotlivých komponentov plynov vzniknutých v oleji. Metóda sa veľmi dobre hodí na zistenie kvantitatívneho a kvalitatívneho zloženia plynov vylúčených olejom. Tieto produkty rozkladu sa navzájom odlišujú v dôsledku rozdielnych energetických pôsobení porúch, existujúcich v transformátore, nakoľko sa tu jedná o rozdielne chemické väzby (väzbové energie), čím sa mení aj ich disociačná entalpia. Poukážeme na tieto tri prípady:

a) Nízka intenzia čiastkových výbojov (drobné uzávery plynov, nedokonalá impregnácia) spôsobuje vznik nízkej hustoty energie, pričom, vzniklé plynné zložky sú zastúpené nasledovne: majoritne vodík H_2 , malý podiel nasýtených väzieb – metán CH_4 (420kJ/mol), C_2H_6 , C_3H_8 (300-320kJ/mol).

b) Čiastkové výboje vysokej aktivity (závadné kontakty, oblúky, čiastkové prierazy, krátke oblúky). Tieto procesy disponujú spravidla vysokou hustotou energie (>1000 K). Vzniklé plyny sú: vodík H_2 , väčšie množstvo nenasýtených uhľovodíkov C_2H_4 (550kJ/mol) a C_2H_2 (800 kJ/mol). Stála prítomnosť C_2H_2 – pričom podiel voči C_2H_4 je väčší.

c) Hraničný prípad: termický rozklad (preťaženie, prechodové odpory na kontaktoch) – z toho vyplýva hustota energie menšia ako 1000 K. Uvoľňované plyny – uhľovodíky: C_2H_4 , C_2H_2 , CO , CO_2 .

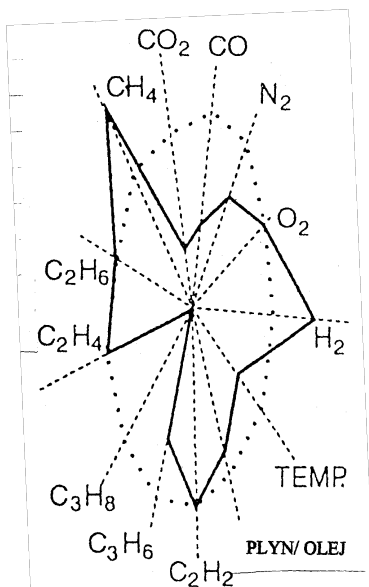
Zlepšená výpovedeschopnosť chemickej plynovej analýzy sa ukázala zavedením kriteriálnych kvocientov vyjadrujúcich pomer jednotlivých chemických zložiek podľa Portzela [1]:

Veličina / chem.pomer	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$	$\frac{H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_4}{C_3H_6}$	$\frac{CO_2}{CO}$
vysoká teplota	0,1	0,5	5,0	2,0	7,0
výboje vysokej energie	4,0	2,5	7,0	5,0	3,0

Ďalšou z možných interpretácií pomerov chemických zložiek rozptýlených plynov je podľa IEC, ktorú uvádza Muhr [8]:

prejav poruchy	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
čiasťkové výboje	-	< 0,1	< 0,2
výboje s nízkou energiou	> 1	0,1–0,5	> 1
výboje s vysokou energiou	0,6–2,5	0,1–1	> 2
$T < 300\text{ }^\circ\text{C}$	-	> 1	< 1
$300\text{ }^\circ\text{C} < T < 700\text{ }^\circ\text{C}$	< 0,1	> 1	1–4
$T > 700\text{ }^\circ\text{C}$	< 0,2	> 1	> 4

V prípade, že sledujeme reálny diagnostikovaný objekt a vyhodnocujeme jednotlivé zložky uvoľňovaných plynov tzv. pavučinovou metódou, potom pozorujeme zložky voči limitným hodnotám plynov vyznačených bodkovanou hranicou v tvare elipsy. Namerané hodnoty v prípade H_2 , CH_4 , prípadne C_2H_4 , svedčia o vývoji plynov pôsobením čiasťkových výbojov, obr. 3.



Obr. 3. Zastúpenie plynov vzniknutých v oleji [1]

Plynová analýza v transformátorových olejoch vedie k jednoznačnému priradeniu zložiek plynu k príčine, ktorá vyvolá poruchu, čím sa dá stanoviť pôvod poruchy.

Nasadením hmotnostného spektrometra sa dá rozlíšiteľnosť komponentov plynu zvýšiť v podstatnej miere. Priame napojenie hmotnostného spektrometra na objekt v dôsledku extrakcie plynov umožní rýchlu a precíznu indikáciu zložiek plynov, čo je zvlášť dôležité pri tzv. „sušiacich“ procesoch v oleji, resp. v transformátore, kedy sa musia vylúčiť ich rozklady (vznik CO a CO_2). Oddelenie sa hmotnostných komponentov vody (H_2O) od CO a CO_2 a sledovanie ich vývoja v závislosti od času je rozhodujúce pre optimalizáciu doby sušenia v prípade drahých transformátorov veľkého výkonu. Nasadenie hmotnostného spektrometra umožňuje vysoké rozlíšenie jednotlivých komponentov a tým aj ich exaktné stanovenie.

Diagnostika výkonových transformátorov metódou čiasťkových výbojov

Čiasťkové výboje môžu vznikať v transformátoroch v defektných miestach, ktorých pôvod spočíva v nedokonalnej výrobe, resp. technologických krokoch, prípadne vznikajú počas dlhodobého prevádzkovania transformátorov. Táto výbojová činnosť v podstatnej miere ovplyvňuje vlastnosti izolačného systému.

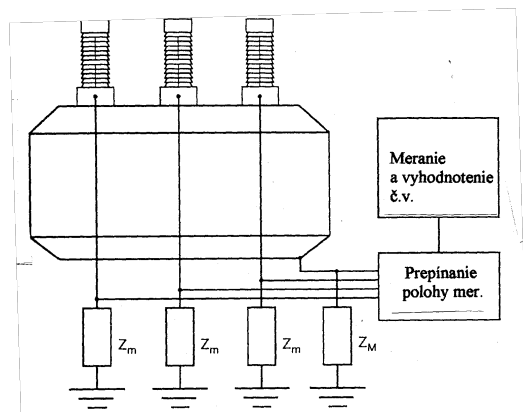
Existenciu čiasťkových výbojov sledujeme buď v izolácii závitov jednotlivých cievok, taktiež v cievkach samotných, ako aj v priechodkách transformátorov. Z toho dôvodu diagnostika transformátorov reprezentuje jednu z metód aplikovaných na skúšaný objekt. Odporúča sa zaviesť merania priamo po výrobe ako aj počas prevádzky, v definovaných časových intervaloch priamo na mieste, prípadne po revízii v skúšobnej hale.

Obvykle sa kombinujú dve metódy, ktoré sú navzájom zlučiteľné, prípadne sa môžu aplikovať oddelene. Ide o priame meranie čiasťkových výbojov galvanickou metódou vysokocitlivými komerčnými prístrojmi, ako aj prostredníctvom induktívnych snímačov, ktoré sú vhodné na on-line sledovanie výbojovej aktivity. Ďalší spôsob, veľmi významný pri lokalizovaní defektných miest, je meranie akustických signálov priamo v nádobe transformátora piezoelektrickými snímačmi, ktorých minimálny počet je stanovený na tri, maximálny na dvanásť. Piezoelektrické snímače sú spravidla tvorené baryum-stroncium-titanátmi.

Ak dochádza ku vzniku čiasťkových výbojov v izolácii vinutia transformátora, je treba počítať s útlmom signálu. Tento útlm je závislý od polohy a frekvencie, takže v rôznych polohách vinutia pri napojení meracieho systému sú pozorovateľné rozdielne frekvenčné spektrá.

Tieto signály sa môžu ďalej spracovať širokopásmovým, prípadne úzkopásmovým zosilňovačom. Širokopásmové merania sa uprednostňujú z toho dôvodu, že zaznamenávajú rozloženie po sebe nasledujúcich výbojov v tvare impulzov čiasťkových výbojov. V prípade použitia úzkopásmového zosilňovača sa úspešne potláčajú nežiaduce signály, pôsobiace ako rušivé signály, napríklad rozhlasové vlny.

Pripojenie objektu, v ktorom sa nachádza zdroj čiasťkových výbojov k meraciemu zariadeniu, sa realizuje galvanickým spôsobom, prostredníctvom meracej impedancie Z_m . Pre pripojenie sa využívajú meracie polepy kondenzátorových priechodiek, prípadne uzlové body vyústenia cievok vysokonapäťových transformátorov. Principiálna schéma je znázornená na obr. 4.



Obr. 4. Principiálna schéma pripojenia meracích bodov transformátora k meraciemu zariadeniu [1]

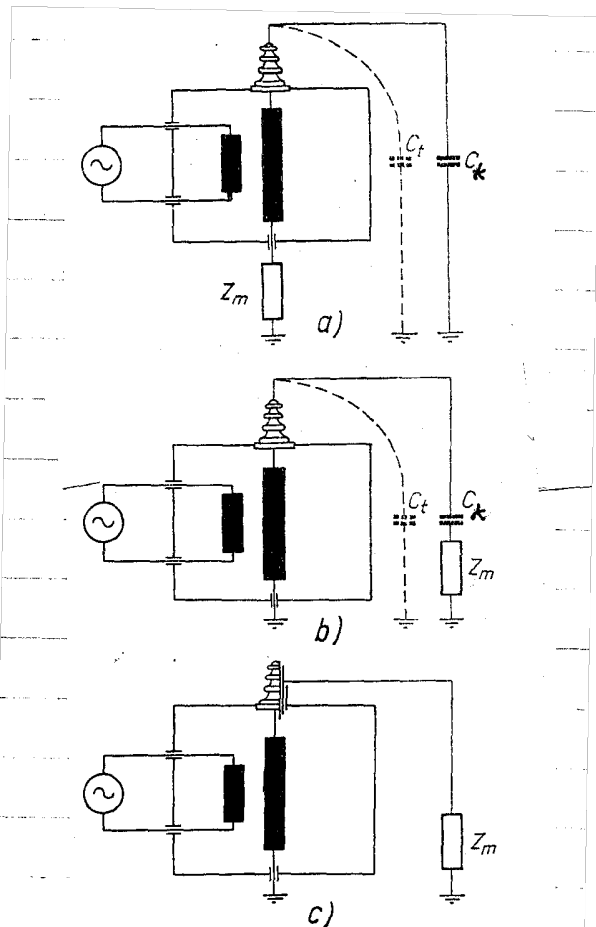
Pri aplikovaní sond na báze indukčnosti sa tieto – za čelom on-line monitoringu – zaradia do obvodu: merací bod – meracia impedancia.

Merací systém sa musí kalibrovať (napr. v rozsahu od 1 pC do 100 000 pC), čím získame objektívny obraz o intenzite čiastkových výbojov v hodnotách zdanlivého náboja (pC). Namerané hodnoty č.v. počas prevádzky je možné takto porovnať s hraničnými hodnotami za účelom stanovenia limity, kedy sú objekty výbojovou aktivitou nebezpečne ohrozované.

Elektrické merania čiastkových výbojov v transformátoroch sa v súčasnosti vyznačujú vysokou citlivosťou, avšak pri porovnaní meracích metód v kábeloch, kábelových súboroch, alebo v elektrických strojoch točivých, má meranie integrálny charakter a nedostatočne lokalizuje miesto vzniku, prípadne výskyt trvalej výbojovej aktivity vo vnútri nádoby transformátora.

Pri galvanickom spôsobe snímania čiastkových výbojov je dôležité umiestnenie meracej impedancie. Na obr. 5. sú uvedené tri možnosti, znázornené na jednofázovom transformátore. Kapacita C_t predstavuje celkovú kapacitu transformátora voči zemi, pričom je Z_m zapojená do uzla transformátora (a). Väzobná kapacita C_k znižuje v tomto prípade vysokofrekvenčnú impedanciu obvodu, avšak tým sa zvyšuje citlivosť meracej metódy. Hodnota C_k sa pohybuje okolo niekoľkotisíc pikofaradov.

V prípade jednofázových transformátorov sa odporúča priamo uzemniť nulový bod transformátora, potom impedancia Z_m je zapojená v sérii s kondenzátorom C_k (b). Citlivosť metódy voči (a) sa nemení.

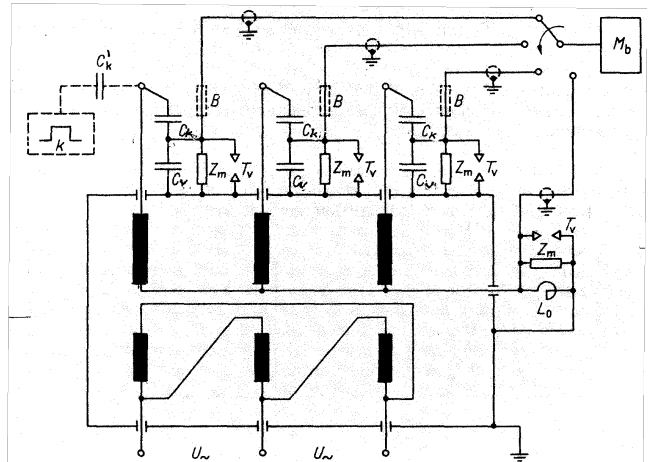


Obr. 5 Zapojenie meracích impedancií pri meraní č.v. v jednofázových transformátoroch [2]

V prípade, že umiestnenie C_k v obvode je nepohodlné, potom sa využívajú meracie polepy kondenzátorovej priechodky, v dôsledku čoho sa Z_m pripojí priamo na výstup

z meracích polepov (c). Na transformátoroch vn trojfázových s veľkým výkonom sa rovnako aplikuje táto metóda.

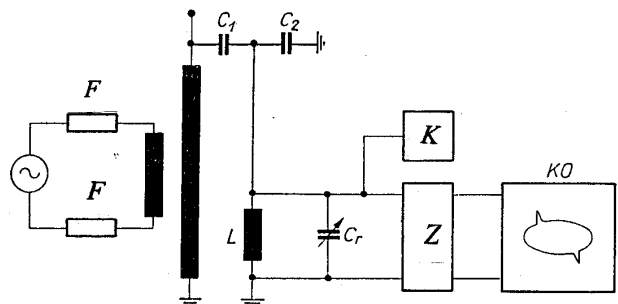
Iný spôsob merania č.v. na trojfázových transformátoroch je znázornený na obr. 6.



Obr. 6 Všeobecná schéma na meranie č.v. v prípade trojfázového transformátora [2]

Meracie impedancie Z_m sú paralelne pripojené ku vstupnej kapacite meracieho obvodu (M_b), ktorý je chránený iskrikom T_v . Väzobná kapacita C_k je v sérii spojená s vinutím vn transformátora. Odporúča sa z hľadiska bezpečnosti práce zaradiť do obvodu k meraciemu zariadeniu poistku (B). Kalibrátor (k) sa aktuálne pripojí k meraciemu kondenzátoru C_k prostredníctvom kapacity C'_k ($C'_k=50-100$ pF).

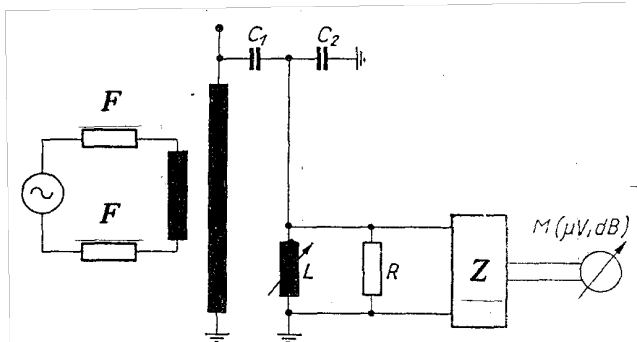
Priemysel v súčasnosti ponúka viacero typov meracích zariadení na stanovenie hodnoty čiastkových výbojov v transformátoroch vn a vn. Tieto sa líšia od seba prispôbením zosilňovača na širokopásmové, prípadne úzkopásmové spracovanie signálov č.v. Rozdiel spočíva v zapojení vstupných elektrických obvodov medzi vn stranou a vyhodnocovacou časťou.



Obr. 7 Širokopásmová metóda 40-220 kHz [2]

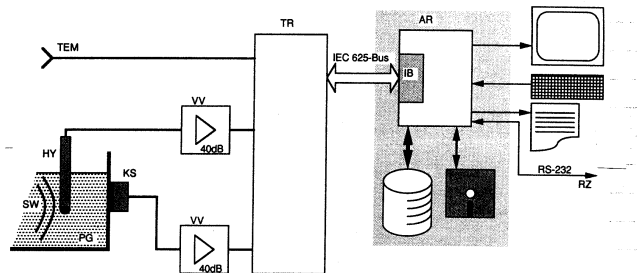
Vstup primárneho vinutia vn transformátora je opatrený filtermi (F) za účelom odstránenia rušivých signálov v oblasti 500 kHz. Zosilňovač je pred každým meraním kalibrováný zabudovaným kalibrátorom (K).

Úzkopásmová metóda, využívajúca pásmo 9 kHz, môže byť nasadená v širokom pásme frekvencií od niekoľko sto kHz, resp. 1-2 MHz.



Obr. 7 Širokopásmová metóda merania č.v. [2,3]

Veľmi dôležitou a v súčasnosti nevyhnutnou doplnkovou diagnostickou metódou je metóda založená na snímaní akustickej emisie, generovanej čiastkovými výbojmi. Princiálna schéma je uvedená na obr. 8.



Obr. 8 Schéma diagnostického zariadenia na lokalizáciu č.v. meraním akustickej emisie [4]

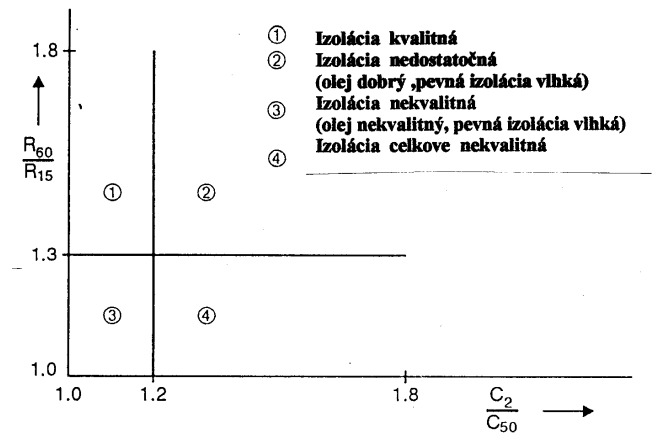
Ide o kombinované diagnostické zariadenie, ktoré umožňuje nielen integrálne stanovenie aktivity čiastkových výbojov, ale aj presnú lokalizáciu poruchy v objekte. V skúšobnej nádobe (PG) je umiestnený hydrofón (HY), ktorý zasahuje postupujúce zvukové vlny (SW). Získaný signál je vedený do predzosilňovača (VV-40dB). Súčasne piezoelektrická akustická sonda (KS) sníma signál z nádoby transformátora a vedie ho cez zosilňovač do tranzientného zapisovača (TR). Paralelne snímanie elektrických signálov od čiastkových výbojov (TEM) je taktiež zavedené do TR. Prostredníctvom rozhradia IEC625 sa signály dostávajú do počítača (AR) a sú ukladané pre prípadené ďalšie spracovanie. Referenčný signál z elektrického merania č.v. je vhodný na určenie doby postupujúcej akustickej vlny od miesta vzniku č.v. a polohou akustického senzora. Je treba poznamenať, že prenos akustického signálu v prostredí kvapalnom (olej) a pevnom (drevo, kov, vláknité materiály) v dôsledku ich rozdielnych vlastností môže lokalizáciu zdrojov č.v. skomplikovať.

Diagnostické metódy založené na skúmaní dielektrických vlastností objektov

Pri skúmaní a definovaní základných výpovedeschopných veličín patriacich do kategórie dielektrík (v prípade transformátorov do kategórie zložitých izolačných systémov), musíme sa zamerať na tieto postupy:

- Diagnostické veličiny sledované v časovej závislosti: zvodový prúd, regeneračné, resp. zotavené napätie. Obe tieto veličiny poskytujú informácie o obsahu vlhkosti v izolačnom systéme.
- Kontrola izolačného odporu (R_{iz} po 60s, 600s), zvlášť, ak túto veličinu meriame v závislosti na čase počas prevádzky zariadenia. Výsledky merania poukazujú taktiež na obsah vlhkosti v objeme izolácie a v nemalej miere na vyvíjanie sa produktov starnutia (chemické procesy).

Z týchto meraní boli definované faktory charakterizujúce pomer meraných veličín, napr. K60, čo je dané podielom R_{60} ku R_{15} (pozri obr. 9)



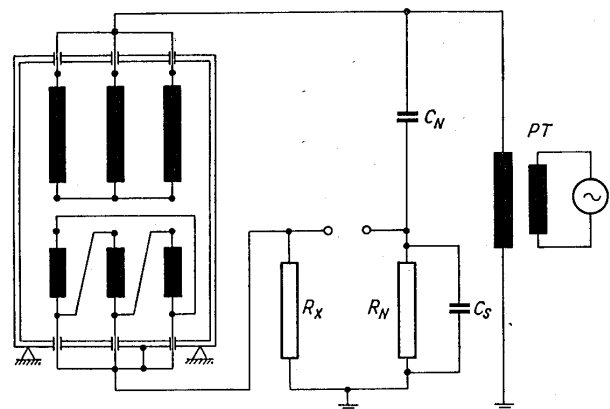
Obr. 9 Závislosť faktora K60 ku pomeru kapacít

Rovnako dôležitou pomerovou veličinou je hodnota kapacity meraného objektu pri frekvencii 2 Hz a frekvencii 50 Hz, čo vyjadrujeme takto: C_2/C_{50} . V súčasnosti sú k dispozícii zariadenia (napätové zdroje) nastaviteľné už na podstatne nižšiu frekvenciu, napr. 0,1 Hz. Z obr. 9 môžeme odčítať hranice kvality izolácie transformátora v štyroch rôznych oblastiach:

1. izolácia jednoznačne kvalitná,
2. izolácia nevhodná (nekvalitná), olej je dobrý, pevná izolácia je vlhká,
3. izolácia je nekvalitná, olej nevyhovuje, pevná izolácia je suchá,
4. izolácia je absolútne nevyhovujúca.

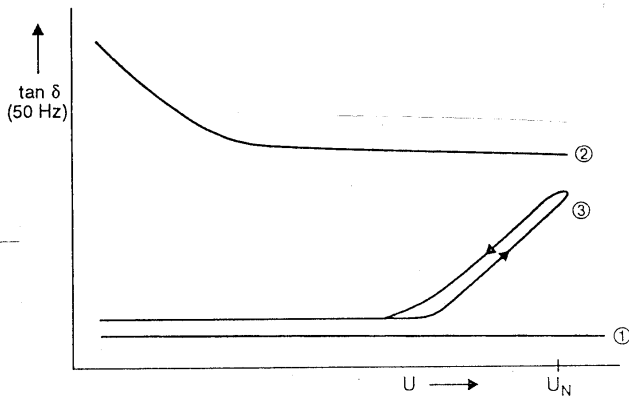
Diagnostické veličiny vo frekvenčnej oblasti 50 Hz sú menej vhodné, pretože vykazujú pomerne málo informácií o javoch vnútri transformátora (pozri relaxačné procesy v širokom polarizačnom spektre).

Stratový činiteľ pri 50 Hz v závislosti od skúšobného napätia je dôležitou výpovedeschopnou veličinou. Zapojenie trojfázového transformátora ako diagnostikovaného objektu je na obr. 10. Zdrojom je jednofázový skúšobný transformátor (PT), ktorý negeneruje čiastkové výboje.



Obr. 10 Meranie stratového činiteľa na trojfázových transformátoroch

Stratový činiteľ získame meraním na klasickom Scheringovom mostíku, prípadne na mostíku riadenom mikropočítačom. Očakávané výsledky sú na obr. 11.



Obr. 11 Priebehy stratového činiteľa v závislosti od napätia [1]

Krivky 1-3 charakterizujú kvalitu diagnostikovaného transformátora nasledovne:

- Kvalitná izolácia, nenavlnnutá (1). Startová činiteľ je nízky, nezávislý od priloženého skúšobného napätia.
- Navlnnutá izolácia (2), pomerne vysoká a stabilná hodnota strát. Obsah vlhkosti v izolácii vedie pri zvyšovaní napätia k poklesu stratového činiteľa, čo je spôsobené tým, že činná zložka tvorená iónmi, sa rýchle z izolantu odvádza, resp. ióny sa sústreďujú na hraničnej ploche. Z toho dôvodu klesá činná zložka, tým aj hodnota stratového činiteľa pri zvyšovaní napätia.
- Suchá, kvalitná izolácia (3), pri nízkych hodnotách nevykazuje na priebehu podstatné zmeny. Avšak pri aktivácii čiastkových výbojov dochádza k nárastu stratového činiteľa v tzv. „ionizačnom kolene“. Na tomto mieste je pozorovaná aj značná hysterézia v dôsledku zmeny pomerov v defektných miestach ako aj vplyvom zmien výšky zápalného a zhášacieho napätia pri nasadení tzv. ionizácie. Nárast stratového činiteľa sa tiež odôvodňuje tým, že výbojové impulzy majú síce stochastický charakter, čo komplikuje meranie, ale činná zložka prúdu nárastom napätia stúpa.

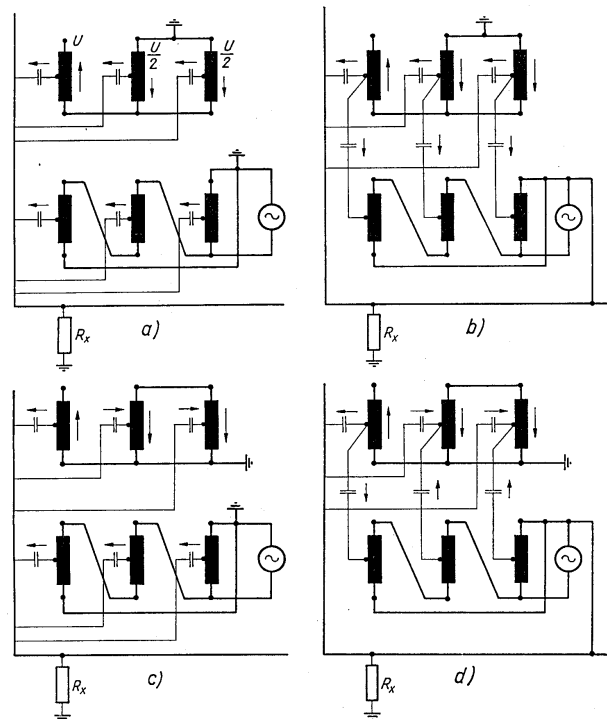
Dôležité upozornenie: pri trojfázovom buzení vn (vvn) transformátora z hľadiska napájania pri meraní stratového činiteľa nedostávame požadované (očakávané) výsledky o stave izolačného systému. Preto odporúčame diagnostikovať trojfázové transformátory jednofázovým napájaním, pričom zapojenie meracieho obvodu môže byť variabilné. Aplikácie tejto myšlienky sa dá využiť u transformátorov zapojených do hviezdy s vyvedeným uzlovým bodom, prípadne zapojení do trojuholníka, podľa obr. 12.

Na obr. 12a sledujeme vinutia vyššieho napätia, ktoré sú navzájom prepojené a uzemnené. Transformátor je napájaný zo strany nižšieho napätia, napájací zdroj je uzemnený. V priebehu merania je skúmaný izolačný systém vysokonapäťovej strany voči transformátorovej nádobe ako aj systém nízkonapäťového (primárneho) vinutia voči nádobe uzemnený. Na obr. 12a až 12d kapacity modelujú skúmaný izolačný systém.

Kapacitné, resp. izolačné pomery medzi vinutiami vn a vvn je možné merať za podmienky, ak napájací zdroj odpojíme od zemného potenciálu a pripojíme k nádobe transformátora.

K nedeštruktívnym diagnostickým metódam, založeným na sledovaní dielektrických vlastností izolačného systému transformátorov patrí metóda snímania kriviek regeneračného (tiež zotaveného) napätia, ďalej kriviek vybíjacieho napätia ako aj metóda absorpčných kriviek (relaxačných prúdov) a IRC analýza (izotermické relaxačné

prúdy). Vyššieuvedené metódy sú popísané na inom mieste.



Obr. 12 Meranie stratového činiteľa na trojfázových transformátoroch s jednofázovým napájaním [2]

Informatívne údaje, ktoré môžeme očakávať z meraní, uvádzame v nasledovnom slede:

- V prevádzkyschopnom transformátore je stratový činiteľ v rozmedzí od $200 \cdot 10^{-4}$ do $300 \cdot 10^{-4}$ pri teplote 20°C .
- Izolačný odpor izolačného systému: 800-1000M Ω .
- Absorpčný koeficient: 1,3-1,5 a viac, obr. 9. Kapacitný koeficient C_2/C_{50} má byť menší ako 1,2. Reprezentuje v prevažnej miere nízkofrekvenčné polarizačné pochody v izolácii. Tieto dva prvky poskytujú použiteľné informácie pre vn transformátory.

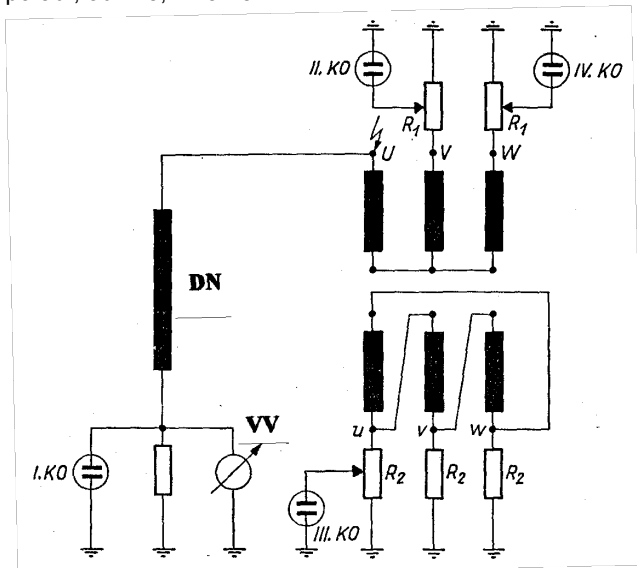
Všeobecne konštatujeme, že prítomnosť vlhkosti v transformátore sa dá určiť pri aplikovaní nižších frekvencií od 0,1 Hz do 2 MHz. Diagnostika technického starnutia využíva frekvencie od 0,6 MHz do 1 MHz.

Diagnostika transformátorov impulznými napät'ovými resp. prúdovými vlnami

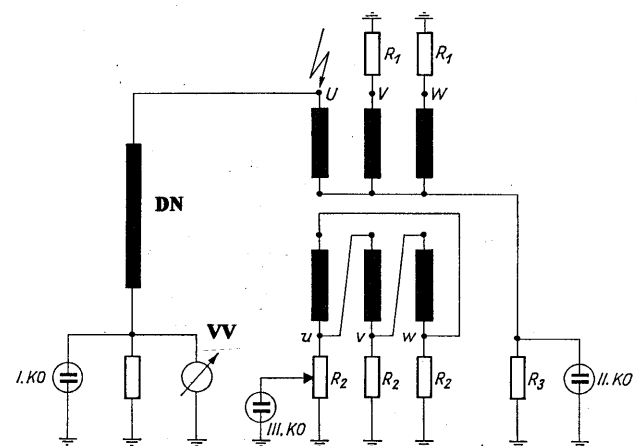
Diagnostické skúšky impulznými vlnami je potrebné realizovať za podmienok, ktoré najviac zodpovedajú prevádzkovým podmienkam. V prípade jednofázových transformátorov je skúšobné impulzné napätie pripojené na určenú svorku vinutia. Za prevádzky uzemnená svorka vinutia ostáva na zemnom potenciáli. Ak pri jednofázových transformátoroch obidve svorky vinutia sú pod napätím, potom impulzné napätie je potrebné pripojiť postupne na obe svorky. Svorky vinutí, ktoré nie sú podrobené skúškam je nutné priamo, prípadne prostredníctvom odporov uzemniť. Trojfázové transformátory skúšame jednotlivo po fázových vinutiach, pričom voľné vinutia sú priamo alebo prostredníctvom odporu uzemnené. Pri voľbe uzemňovacích odporov je potrebné zohľadniť niektoré hľadiská. Prevádzkované transformátory sú pripojené na vedenia prostredníctvom vzdušného vedenia alebo káblom.

V tomto prípade je treba vziať do úvahy vlnové impedancie aplikovaných vedení. Vlnová impedancia vzdušného vedenia sa spravidla udáva v rozmedzí 300-500 Ω , v prípade káblov je hodnota vlnovej impedancie 50-70 Ω . To sú teda hodnoty, ktoré aplikujeme pri meraní v závislosti od vonkajších impedančných pomerov. Úloha týchto zakončovacích impedancií spočíva tiež v to, aby sa zabránilo prieniku signálu zo skúšaného vinutia impulzným napätím a ďalších fázových vinutí. Odporúča sa voliť hodnoty impedancií na takej výške, aby sa na svorkách vinutí nevyskytlo napätie vyššie ako 75% amplitúdy skúšobného napätia. Ak túto podmienku nie je možné splniť, odporúča sa hodnoty odporov 50 Ω , resp. 500 Ω upraviť. Posledné hľadisko je smerované na citlivosť merania. Zakončovacia impedancia – ak je totiž vyššia – zvyšuje aj citlivosť metódy, avšak môže ohroziť bezpečnosť práce pri meraní. Jedná sa o obvod pripojeného osciloskopu.

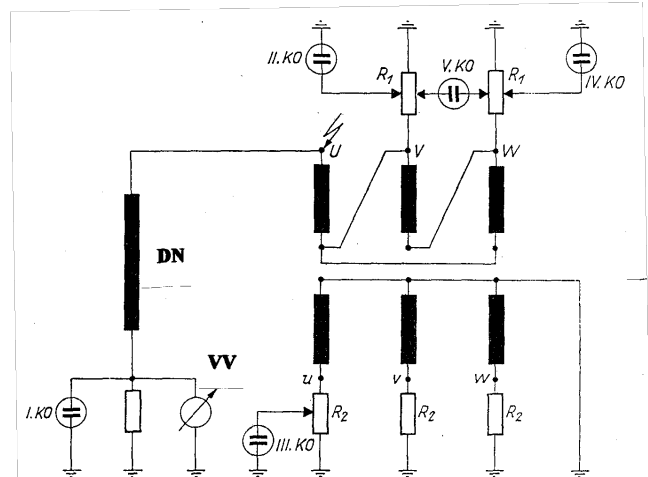
Diagnostické merania impulzným napätím (napr. 1,2/50) na trojfázových transformátoroch sú realizované podľa overených zapojení, ktoré sú uvedené v nasledujúcom poradí, obr. 13, 14 a 15.



Obr. 13 Schéma zapojenia skúšky transformátora s uzlovným bodom vinutí zapojených do hviezdy cez odpor R_3 [2]



Obr. 14 Impulzná skúška trojfázového transformátora s izolovaným uzlovným bodom vinutí zapojených do hviezdy [2]



Obr. 15 Schéma zapojenia skúšky transformátora typu trojuholník/hviezda s vyvedeným uzlovným bodom s priamym uzemnením [2]

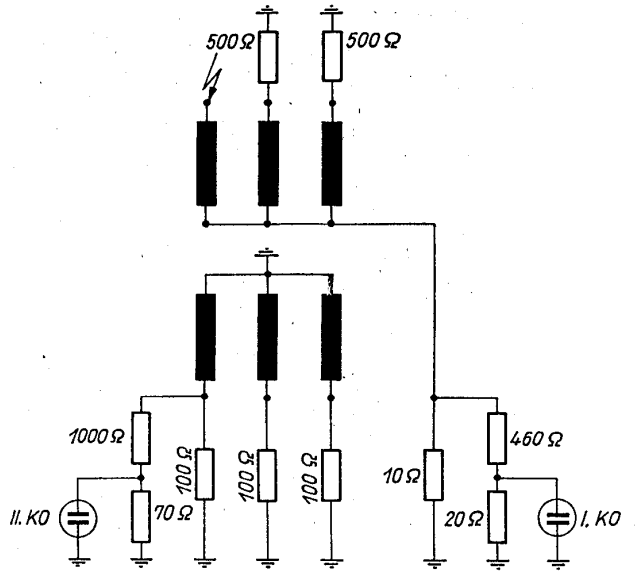
Z jednotlivých vinutí trojfázového transformátora sú snímané odozvy po aplikovaní impulzného napätia. Pôvodne boli na vizualizáciu poruchy aplikované katódové osciloskopy. V súčasnosti sú do obvodu zaradené digitálne pamäťové osciloskopy, vyznačujúce sa vysokou citlivosťou. V závislosti od skúmaného izolačného systému vinutia sa cyklicky premiestňuje merací systém na jednotlivé svorky transformátora.

Poruchy v izolačných systémoch vinutí transformátorov vn sa dokážu veľmi presne identifikovať a charakterizovať nielen na základe získaných priebehov z osciloskopického pozorovania, ale aj na základe dlhoročných pozorovaní a skúseností skúšobných technikov. Aplikáciu skúšobného napätia nie je vhodné považovať za deštruktívnu diagnostickú metódu. Z tvaru odozvy na snímanej vlne sa dá veľmi presne zistiť poruchu a odhaliť ju, pretože pracujeme z hľadiska odozvy v mikrosekundovej oblasti.

Prehľad schém, poukazujúcich na možnosti diagnostikovania transformátorov impulzným napätím, doplníme meraním transformátora so zapojením hviezda/hviezda, pričom vysokonapäťová strana nech má uzol prepojený na zemný potenciál cez odpor 10 Ω s paralelne pripojeným deličom a impedančným prispôbením k snímaciemu osciloskopu. Uzlový bod sekundárnych vinutí je priamo uzemnený, pričom aktívne svorky sú spojené so zemou počas merania odporom o hodnote 100 Ω , pozri obr. 16.

Predložené zapojenie umožňuje pri dvoj a viacstopovom osciloskope snímať nielen definované vinutie, ale aj javy, ktoré sa odohrávajú vo vedľajších vinutiach.

K ďalším diagnostickým skúškam impulzného charakteru na transformátoroch vn sú skúšky spínacími vlnami. Tvar spínacích vln sa odlišuje od pôvodne definovaných napäťových vln. Sú spravidla generované prúdovými generátormi a doba čela vlny, ako aj doba pohtyly je niekoľkonásobne vyššia, napr. 10/350.



Obr. 16 Schéma zapojenia trojfázového transformátora v zapojení hviezda/hviezda za účelom impulzných skúšok [2]

Diagnostika transformátorov metódou prenosových funkcií

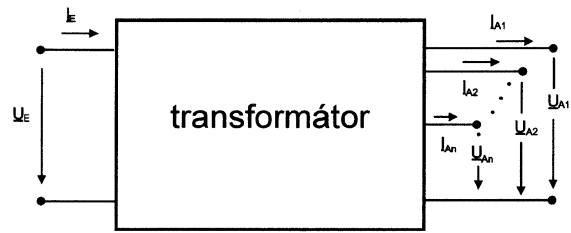
Vo zvýšenej miere sa rozširuje aplikácia impulzných skúšok na transformátoroch tiež z hľadiska sledovania pomerov pri účinkovaní bleskových napätí, prípadne bleskových prúdov, ktoré pôsobia na transformátor ako na impedanciu. Pozorovanie a vyhodnotenie časovej závislosti odozva U_{imp} , $J_{imp}=f(t)$ sa sťažuje získaním malých rozdielov vo zmenách prúdových impulzov pri poruche v porovnaní s dobrou izoláciou. Zreteľne citlivejším postupom sa javí určenie a vyhodnotenie vo frekvenčnej oblasti, v ktorej sa transformátor pozoruje ako štvorpól. Prenosová admitancia je rovná pomeru vstupného bleskového prúdu ku výstupnému bleskovému napätiu.

Defekty v izolácii, napr. od čiastkových výbojov, sa dajú vo frekvenčnej oblasti podstatne zreteľnejšie stanoviť, pretože prúdový impulz, ako aj napätový impulz je možné riešiť a upraviť prostredníctvom Laplaceovej alebo Fourierovej transformácie s ohľadom na veličiny, ktoré sú pre štvorpól charakteristické. Autor [6] publikoval úvahu o využití prenosových funkcií na monitorovanie vlastností výkonových transformátorov. Podstatnú časť tejto práce uvádzame v nasledovnom znení:

V oblasti slaboprúdovej elektrotechniky už dávnejšie boli aplikované metódy frekvenčnej analýzy štvorpólov. Táto metóda bola použitá aj v diagnostike silnoprúdových zariadení a veľmi dobre sa uplatnila, nakoľko nebola náročná na frekvenčný rozsah generátorov sínusového (prípadne tvarovaného) signálu a bolo možné zvládnuť tieto merania aj pri nízkych hladinách (niekoľko voltov) napätia. To isté platí aj o napätiach, prípadne prúdoch impulzného charakteru.

Systematické sledovanie frekvenčných vlastností izolačného systému vysokonapäťového transformátora môže prebiehať aj počas prevádzky objektu (on line) ako aj mimo prevádzky (off line). Pre vyššie uvedené účely je možné nasadiť aj vysokonapäťové zdroje, avšak s určitým obmedzením.

Vychádzajúc zo systémovej teórie môžeme dospieť k poznatku, že transformátor sa dá popísať ako komplexný, pasívny, lineárny a časovo invariálny obvod. Obr. 17 prehľadne znázorňuje vn transformátor ako komplexný obvod obsahujúci prvky RLC.



Obr. 17 Transformátor ako komplexný RLC obvod [6]

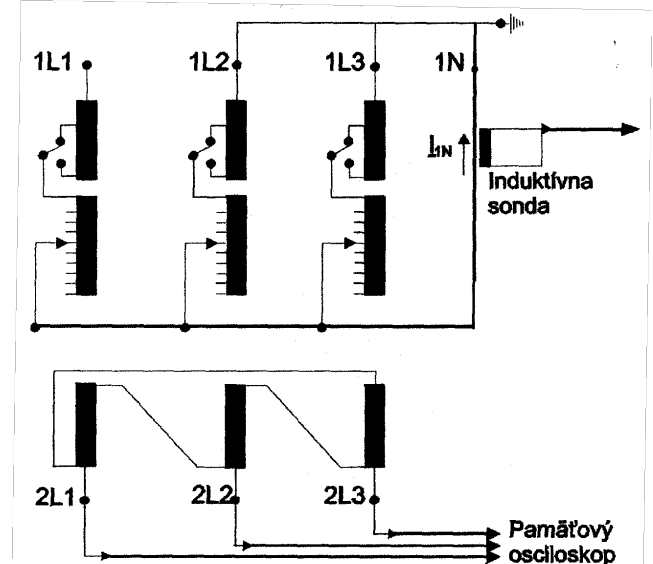
Vstupné veličiny vyvolávajú na výstupe odozvy. V závislosti od počtu vinutí a výstupov sledovaného objektu môžeme napísať celý rad prenosových funkcií, ktoré zdefiniujeme:

$$TF_{E}(f) = \frac{I_E(f)}{U_E(f)}$$

$$TF_{A_{i,v}}(f) = \frac{U_{A,v}(f)}{U_E}$$

$$TF_{A_{i,v}}(f) = \frac{I_{A,v}(f)}{U_E}$$

Jednotlivé prenosové funkcie reprezentujú vzhľadom na detekovateľné efekty v transformátore veľmi rozdielne citlivosti [6]. Ako sme už vyššie uviedli, reálny transformátor je prostredníctvom rôznych resp. viacerých prenosových funkcií (transferové funkcie) – označenie $TF(f)$ v plnom rozsahu popísaný. Táto úvaha môže byť konkretizovaná na 125MVA transformátore v zapojení hviezda/trojuholník, obr. 18.



Obr. 18 Príklad zapojenia transformátora za účelom získania prenosových funkcií [6]

Pri experimente boli aplikované impulzné napätové vlny, snímané indukčným snímačom, pričom jednotlivé cievky vinutia, zapojeného do trojuholníka boli vyvedené na vstup pamäťového osciloskopu. Na primárne vinutie L1 bol privedený napätový impulz, za predpokladu, že fázy L2 a L3 sú prepojené nakrátko a uzemnené. Prúd I_{1N} bol snímaný indukčným snímačom. Na základe toho môžeme zostaviť štyri typy transférových funkcií.

$$TF_1(f) = \frac{I_{1N}(f)}{U_{1L1}(f)}$$

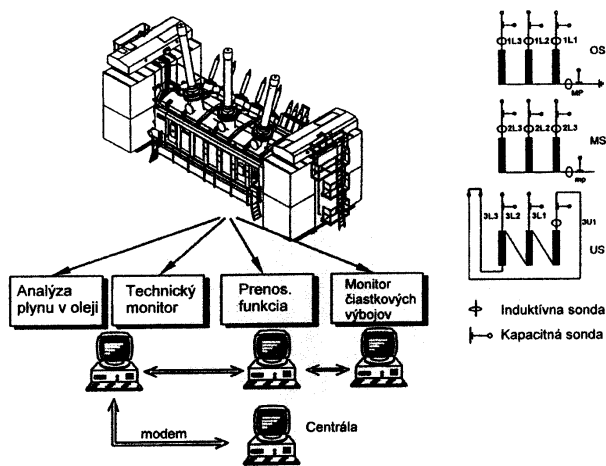
$$TF_2(f) = \frac{I_{2L1}(f)}{U_{1L1}(f)}$$

$$TF_3(f) = \frac{I_{2L2}(f)}{U_{1L1}(f)}$$

$$TF_4(f) = \frac{I_{2L3}(f)}{U_{1L1}(f)}$$

Popis elektrického obvodu pomocou štyroch prenosových funkcií nepoukazuje priamo iba na elektrické pomery v transformátore, ale tiež popisuje pomery medzi jednotlivými vinutiami, oddelenými izolačným systémom. Za účelom dosiahnutia reprodukovateľných výsledkov, je možné odporučiť realizáciu kvalitného uzemnenia a prenos signálov je nutné zabezpečiť kvalitnými prepojeniami.

Pre prípad aplikácie injektáže vysokonapäťových signálov na vstup transformátora sa používa sensorika na sledovanie odozvy indukčnými a kapacitnými snímačmi, ako je to znázornené na obr. 19.



Obr. 19 Rozšírenie diagnostického systému [6]

Celkový diagnostický systém pozostáva okrem sledovania tranzientných pochodov zo zariadenia na sledovanie plynu v oleji, monitoring termických pomerov, merača častkových výbojov a výstupu na určenie veličín pre prenosové funkcie, celé zariadenie je s príslušným prenosom dát prepojené s diagnostickým centrom.

Akustická emisia častkových výbojov v transformátoroch s olejovým médiom

Metóda snímania akustickej emisie je vhodná pre vyhodnocovanie aktivity častkových výbojov aj počas prevádzky a je založená na detekovaní a lokalizácii zdrojov tlakových vln spôsobených elektrickým výbojom v dielektriku. Počiatky aplikácie tejto metódy siahajú do šesťdesiatych rokov 20. storočia.

Častkový výboj v izolácii olejom plnených transformátorov vygeneruje elektromagnetický impulz, ktorého energia sa transformuje na mechanickú energiu v podobe tlakovej vlny. Transformácia z jednej formy energie na druhú sa nedá popísať jednoduchou funkciou, ale závisí od mnohých parametrov, napríklad: typ a intenzita častkových výbojov, typ dielektrika, v ktorom vznikajú. V závislosti na týchto parametroch trvanie tlakovej vlny môže byť rôzne. Tieto vlny sa šíria olejovým médiom až kým jej čelo nenarazí na nádobu transformátora alebo tuhý predmet, ktorý je súčasťou konštrukcie transformátora. Existuje niekoľko spôsobov ako tento elektrofyzikálny proces využiť pre diagnostické merania. Tlakové pole

vytvorené akustickou vlnou je vyjadrené diferenciálnou rovnicou druhého rádu:

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

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

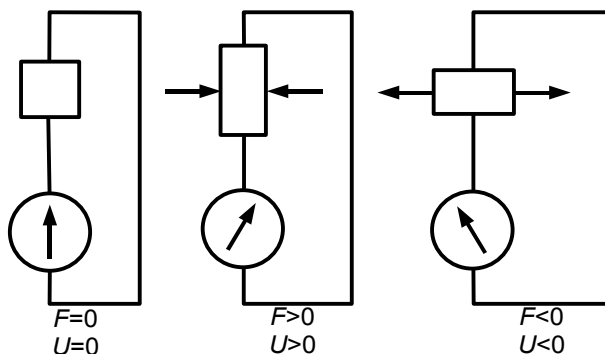
Po náraze čela tlakovej vlny na dosku transformátora sa excitujú dva druhy vlnení – priečne a pozdĺžne – s odlišnými rýchlosťami šírenia.

	v _l (m/s)	v _s (m/s)
tr. olej	1 400	–
ocel	5 900	3 200

v_l – rýchlosť zvuku pozdĺžnej vlny
v_s – rýchlosť zvuku priečnej vlny

Piezokeramické akustické meniče

Od počiatkov implementácie metódy snímania akustickej emisie sa používali akustické meniče na princípe piezoelektrického javu. Podstatou tohto javu je skutočnosť, že sila F aplikovaná na kryštálový segment spôsobí zmenu rozloženia elektrických nábojov v mriežke kryštálu a tým aj elektrického náboja na jeho povrchu, čo sa prejaví zmenou výchylky napätia U na voltmetri.



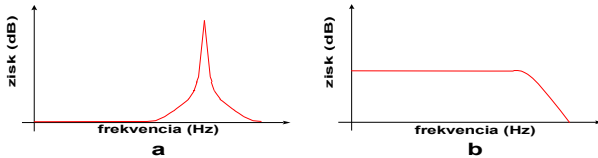
Obr. 20 Princíp piezoelektrického javu

Pri experimentoch sa používajú tieto druhy piezokeramických akustických meničov:

- hydrofóny,
- širokopásmové kontaktné a mikrofónové meniče,
- rezonančné kontaktné meniče.

Hydrofóny umožňujú získavať akustické vlastnosti kvapalín, ich použitie je určené najmä pre presné laboratórne merania. Obmedzené možnosti použitia majú aj širokopásmové meniče, ktoré svojou citlivosťou a šírkou frekvenčného pásma prenášajú signály z rôznych zdrojov tlakových vln, ktoré sú aktívne počas prevádzky transformátorov.

Svojou frekvenčnou charakteristikou umožňujú rezonančné kontaktné meniče snímať užitočný signál s dostatočným odstupom od ostatných rušivých signálov. Viacerí autori uvádzajú, že frekvenčné pásmo tlakových vln spôsobených zdrojmi častkových výbojov sa pohybuje od 100 do 500 kHz. Rezonančná frekvencia meničov používaných pre snímanie akustickej emisie častkových výbojov sa volí práve v uvedenom frekvenčnom pásme.



Obr. 21 Frekvenčná charakteristika akustického meniča:
a – rezonančného,
b - širokopásmového

Piezokeramické akustické meniče, ktoré sú umiestnené na rozličných miestach nádoby transformátora, môžu detekovať akustické tlakové vlny:

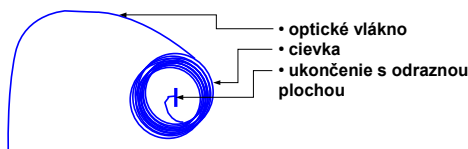
- priamu tlakovú vlnu, čelo vlny širacej sa olejovým médiom,
- vlnu šíriacu sa nádobou transformátora (excitovanú nárazom tlakovej vlny v oleji na nádobu transformátora),
- vlny tlmené,
- vlny odrazené a rozptýlené vplyvom konštrukčných prvkov transformátora.

V súčasnosti sú metódy merania akustickej emisie externými meničmi úspešné pri poruchách vyskytujúcich sa v blízkosti nádoby transformátora a ktorých zdanlivý náboj je väčší ako 300 pC. Takéto miesta sa môžu nachádzať na spojoch začiatkov a koncov vinutí, vo vonkajších vrstvách izolácie vinutia, na povrchoch izolačných bariér a podobne.

Akustické meniče z optických vlákien

Sú známe dve koncepcie akustických meničov, ktoré používajú svetelný lúč ako nosné médium informácií o aktivite častkových výbojov.

Prvá spočíva v závislosti zmien optických a mechanických vlastností optických vlákien na zmenách tlaku prostredia, v ktorom sa nachádzajú. Náraz akustickej tlakovej vlny na povrch vlákna spôsobuje mechanické namáhanie jeho jadra. To má vplyv ako na zmenu dĺžky vlákna, tak i na jeho index odrazu. Ak vláknom prechádza svetelný lúč, potom v dôsledku vyššie spomínaných javov sa menia jeho vlastnosti. Svetelný lúč je fázovo modulovaný akustickou tlakovou vlnou. Informácie o aktivite častkových výbojov sa získavajú jeho demoduláciou a ďalším spracovaním. Menič je v tomto prípade konštruovaný tak, že optické vlákno sa navinie do tvaru valca. Na konci vlákna je zrkadlová plocha. Požadované frekvenčné pásmo a citlivosť sa dosahuje vhodnou geometriou meniča a dĺžkou použitého optického vlákna.

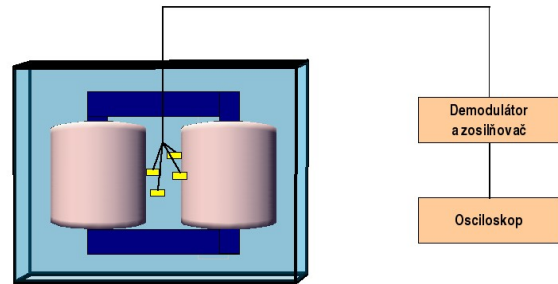


Obr. 22 Akustický menič z optického vlákna navinutého do cievky

Druhá koncepcia využíva interferometer s flexibilnou zrkadlovou membránou, ktorý sa umiestni na koniec optického vlákna. Keď tlaková vlna narazí na membránu mení vlastnosti odrazeného lúča, jeho fázu a intenzitu. Požadované parametre meniča-interferometra sa získavajú presnými analytickými výpočtami.

Akustické meniče z optických vlákien implementované do vysokonapäťových transformátorov, kde vytvárajú senzorové pole ponorené v transformátorovom oleji. Optické vlákno spája menič s vonkajším optoelektronickým

systémom. Pri vyhodnotení odozvy meniča sa používajú interferometrické metódy. Interferometrický signál, ktorý je vysielaný do optického vlákna je modulovaný tlakovými vlnami dopadajúcimi na menič. Takto modulovaný signál sa prevedie na elektrické veličiny v demodulátore a zaznamená sa pomocou vhodného pamäťového zariadenia, napríklad v číslicovom osciloskope. Pre lokalizáciu zdrojov častkových výbojov sa používajú ďalšie matematické výpočty. Na obrázku 23 je zjednodušeným spôsobom znázornená jedna z možných aplikácií meracieho systému s akustickým meničom pre meranie častkových výbojov.



Obr. 23 Aplikácia optických akustických meničov pri detekcii častkových výbojov v olejovom transformátore

Využitie snímania akustickej emisie predstavuje perspektívny trend v diagnostike olejom plnených transformátorov vn, vvn a zvn. Z množstva prínosov je potrebné spomenúť najmä možnosť ich nasadenia v tzv. on-line diagnostike – to znamená v diagnostike počas prevádzky zariadenia – a možnosť určenia polohy zdrojov častkových výbojov. Vonkajšie detekčné systémy sú vhodné ako pre ojedinelé – kontrolné merania, tak aj pre trvalé riešenia, ktoré poskytujú kontinuálne informácie o vývoji aktivity častkových výbojov. Použitie vnútorných detekčných systémov, vzhľadom na potrebu zásahov do štruktúry izolačného systému transformátorov, možno považovať za perspektívu pre budúce technologické riešenia.

Záver

V predloženej štúdii sme poukázali na klasické ako aj na súčasné tendencie vo vývoji diagnostických metód, aplikovaných na sledovanie spoľahlivosti, stability a životnosti transformátorov. Pritom sme sa orientovali na také diagnostické metódy, ktoré je možné aplikovať pri projektovaní a prevádzkovaní v laboratórnych podmienkach na pôde univerzity. Na podporu tohto trendu je treba uviesť, že táto myšlienka ovplyvnila aj výskum a vývoj snímania užitočných signálov skúmaných výpovedeschopných veličín od metódy off-line k metóde on-line, pričom požiadavkou je spracovať a získať výsledky v reálnom čase. Súčasný výskum a vývoj pri nasadení výpočtovej techniky vedie k tomu, aby bolo možné poruchu, prípadne vznik defektného miesta v transformátore kontinuálne sledovať a pri indikácii havarijného stavu objekt odpojiť od napäťovej sústavy. K tomu bude viesť cesta prostredníctvom rýchlych elektronických ochrán, reagujúcich v časových intervaloch nižších, než je doba potrebná na vývoj kanálu elektrického prúdu. Perspektíva je teda v kontinuálnej diagnostike.

Autori štúdie vychádzali z optimálnych podmienok, ktoré by v prvej etape zabezpečili spoľahlivý chod diagnostického centra.

PodĎakovanie

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] Portzel, R., Neudert, E., Sturm, M.: Diagnostik der Elektrischen Energietechnik. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1966.
- [2] Karsai, K., Kerémyi, D., Kiss, L.: Nagytranszformátorok. Muszak: Konyvkiadó. Budapest, 1973.
- [3] Marton, K.: Diagnostika izolácií prvkov elektrických vedení. Edičné stredisko VŠT. Príručka pre PGŠ, 126 str. 1987.
- [4] Hartje, M.: Erfassung von Teilentladungen an Leistungstransformatoren im Netzbetrieb. VDI Verlag, Dusseldorf, 1989.
- [5] Kováčik, J.: Ultrasonic discharge location in transformers. Proc. of 2nd I.C.D.I., Stará Lesná, 2000.
- [6] Christian, J.: Probleme und Grenzen des Einsatzes der Übertragungsfunktion im Monitoring an Transformatoren. Symposium Haefely. Stuttgart, 1998.
- [7] Marton, K., Kolcunová, I., Cimbala, R.: Diagnostika elektrických strojov. Vydavateľstvo TU v Košiciach. ISBN 80-8073-477-1.

- [8] Muht, M: Development in Diagnostics of HV Apparatus. Proc ISH2007. Ljubljana, 2007.
- [9] Zagari, A., Phung, B.,T., Blackburn T.,R., An ultrasonic optical fibre sensor for partial discharge detection, 9th ISH Proc., Dielectric diagnostics and expert systems, Graz University of Technology, Subject 5, 5581-1, August 28–September 1, 1995
- [10] Skubis, J., Emisja akustyczna w badaniach izolacji urzadzen elektroenergetycznych, Polska akademia nauk, Instytut podstawowych problemow techniki, ISSN 1429-6063, Opole, 1998
- [11] Boczar, T., Identification of a specific Type of PD from Acoustic emission Frequency spectra, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 4, August 2001, str. 598

Autori:

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

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

Iraida Kolcunová, Ivan Ferenc

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

Meranie dielektrických vlastností rastlinných olejov

Abstrakt. Cieľom práce bolo preskúmať elektroizolačné vlastnosti rastlinných olejov a porovnať ich s elektroizolačnými vlastnosťami olejov bežne používaných v elektroenergetických zariadeniach. Dielektrické vlastnosti také ako dielektrická permitivita a stratový činiteľ boli merané pri zvyšovaní napätia od 0.1 do 2kV krokom 200V. Napäťové závislosti boli získané pri zmene teploty od 20 do 100°C. Elektrická pevnosť olejov bola nameraná pri zmene vzdialenosti medzi elektródami. Všetky tieto veličiny boli získane a porovnané pre rôzne typy olejov.

Abstract. The aim of this work was to investigate the electrical properties in vegetable oils and to compare them with the most commonly used insulating liquids.

The properties such as the Breakdown voltage, Electrical stability, permittivity and dissipation factor ($\tan \delta$) of different types of oils were compared. The dissipation factor and permittivity were measured at increased voltage (0,1 - 2kV) and changed in temperature (20 – 100°C). The breakdown voltage and electrical stability were tested at different insulation gap. It is shown, that the vegetable oil RACIOL is the most suitable in comparison to transformer oil ITO 100.

Kľúčové slová: Izolačné kvapaliny, transformátorový olej, rastlinný olej, elektrická pevnosť, prierazné napätie.

Keywords: Insulation liquid, transformer oil, natural oil, electric strength, breakdown voltage.

ÚVOD

Rast spotreby elektrickej energie a hospodárnosť jej prenosu podmieňuje stavbu transformátorov stále väčších výkonov a rast ich počtu v elektrizačnej sústave. Zvyšujúce sa požiadavky na výkonnosť a prevádzkovú spoľahlivosť sa prejavujú na zvýšených kvalitatívnych nárokoch na ich konštrukčné a izolačné materiály. V súčasnosti sa väčšinou používajú pre distribúciu elektrickej energie transformátory s klasickou koncepciou konštrukcie. Magnetický obvod takého transformátora, tvorený plechmi valcovanými za studena, je aj s vinutím z hliníkových alebo medených vodičov ponorený v izolačnej kvapaline.

Kvapalné izolanty predstavujú jednu z rozhodujúcich zložiek izolačného systému výkonových zariadení elektrizačnej sústavy. Táto zložka významne ovplyvňuje nielen funkčné vlastnosti, ale aj celkovú životnosť zariadenia. Z tohto dôvodu sa ich príprave a vlastnostiam venuje neustále veľká pozornosť.

Konkrétne požiadavky na jednotlivé druhy kvapalín vychádzajú jednak z celkového usporiadania a konštrukcie zariadenia, jednak z prevádzkových podmienok, v ktorých budú pracovať.

Kvapalné izolanty prešli v poslednom období množstvom vývojových etáp, súvisiacich s novými aspektmi. Výrobcovia i prevádzkovatelia izolačných kvapalín kladú zvýšené nároky na ich kvalitu, spoľahlivosť a dlhšiu životnosť, ale v neposlednom rade i na ekologickú nezávadnosť. Významné zmeny sa preto v posledných rokoch pokúšame dosiahnuť v ich zložení a zvýšenej odolnosti proti pôsobeniu prevádzkových činiteľov.

V poslednom období sa kladú zvýšené nároky na ekologickú nezávadnosť kvapalných izolantov a dielektrík, a preto sa mnohí výrobcovia izolačných kvapalín vo svete i u nás snažia nájsť prijateľné riešenie problému a venujú sa vývoju a výrobe syntetických kvapalných izolantov a dielektrík majúcich spomínanú vlastnosť.

Cieľom práce je získať informácie o základných vlastnostiach rastlinných olejov. Úlohou je zmerať dielektrické vlastnosti a elektrickú prieraznú pevnosť rastlinných olejov RACIOL a slnečnicového oleja a porovnať ich so zmeranými vlastnosťami transformátorového oleja ITO 100. Toto porovnanie sa robí za účelom ich alternatívneho použitia v elektroenergetike.

POŽIADAVKY KLADENÉ NA KVAPALNÉ IZOLANTY PRE TRANSFORMÁTORY

Medzi materiálmi používanými v elektrotechnike má transformátorový olej mimoriadne postavenie nielen pre svoj pôvod, ale aj preto, že súčasne plní viaceré úlohy, predovšetkým ako izolačné a chladiace médium. Ďalšou zvláštnosťou transformátorového oleja je, že za určitých okolností môže v pôvodnom stave v plnej miere spĺňať všetky naň kladené požiadavky, a naopak, môže túto schopnosť pomerne rýchle strácať. Strata funkčných vlastností transformátorového oleja môže viesť k vážnym poruchám elektrických zariadení, výpadku dodávky elektrickej energie a zapríčiniť tak rozsiahle škody. Na druhej strane však možno znehodnocovaniu oleja zabrániť, alebo už znehodnotenému oleju takmer v plnej miere vrátiť jeho pôvodné vlastnosti, čím sa podstatne znižuje spotreba čerstvého oleja, čo má výrazný ekologický a ekonomický efekt.

Izolačná kvapalina v transformátoroch má dve základné úlohy:

- vypĺňa všetky dutiny a póry v tuhej zložke izolácie a spolu s ňou vytvára dobre izolačné prostredie, ktoré zaručuje prevádzku bez porúch a požadovanú životnosť transformátora.
- odvádza teplo z aktívnych častí transformátora, ktoré vzniká ako následok strát v elektrickom a magnetickom obvode do okolitého prostredia.

Z uvedených základných funkcií vyplývajú hlavné požiadavky na vlastnosti kvapalného dielektrika pre distribučné transformátory, ktoré možno stručne charakterizovať takto:

- nízky stratový činiteľ,
- relatívnu permitivitu porovnateľnú s permitivitou izolačných materiálov v transformátore,
- čím vyššie prierazné napätie (pri vzdialenosti elektród 2,5mm),
- nízky súčiniteľ teplotnej rozťažnosti,
- vysoký bod vzplanutia,
- nízky bod tuhnutia,
- nízku mernú hmotnosť,
- nízku viskozitu a malú teplotnú závislosť viskozity,

- i) vysokú oxidačnú stálosť,
- j) dobrú znášateľnosť s ostatnými materiálmi v transformátore,
- k) nízku navlhavosť,
- l) ekologickú nezávadnosť a iné.

Okrem toho treba ešte zobrať do úvahy aj ekonomické hľadisko, ktoré je v súčasnej dobe veľmi dôležité a rozhodujúce. [1]

Vlastnosti izolantov

Izolanty používané v elektrotechnike sa vyznačujú určitými vlastnosťami. Medzi hlavné vlastnosti poukazujúce na kvalitu a stav izolantu patria:

1. Elektrická vodivosť
2. Permittivita
3. Polarizácia dielektrík
4. Stratový činiteľ $\text{tg}(\delta)$
5. Dielektrické straty
6. Elektrická pevnosť
7. Prierazné napätie
8. Viskozita
9. Starnutie izolačných olejov a iné.

Súčasný stav a sortiment používaných kvapalných izolantov

Z kvapalných izolantov, ktoré sa používajú pri výrobe transformátorov je a v blízkej dobe aj naďalej ostane najpoužívanejším izolačným materiálom minerálny olej, ktorý v súčasnosti dosahuje vysoké technické parametre. Problémy, ktoré vystupujú do popredia pri jeho používaní v transformátoroch sú: vysoká horľavosť, výbušnosť, ekologická závadnosť a prechod z výroby oleja z neparafínických rôp na parafínické sírne ropy. [2]

Vzhľadom na horľavosť oleja sa hľadala cesta ako ho nahradiť. Neosvedčilo sa však použitie polychlórovaných bifenylov (PCB), keďže testy potvrdili škodlivé účinky na organizmus a životné prostredie. Sprísnené ekologické požiadavky viedli k hľadaniu kvapalín, ktoré by boli rovnocennou náhradou, ale ekologicky nezávadné. Vo svete sa ako kvapalné izolanty presadzujú silikónové kvapaliny vyznačujúce sa ekologickou nezávadnosťou ako napr.: Midel, Reolec, Ugilec, Edekon a iné. [3]

MERANIE VLASTNOSTÍ OLEJOV

Popis objektov merania

Objektmi merania boli rastlinné oleje, transformátorový olej ITO 100 a taktiež silikónový olej. Merania boli robené na šiestich vzorkách olejov a výsledky boli porovnávané medzi sebou.

K dispozícii sme mali 6 vzoriek oleja a na informatívne meranie bol taktiež použitý silikónový olej.

Označovanie vzoriek:

- Vzorka 1.1 - neodstatý, nefiltrovaný slnečnicový olej, čerstvo naliaty do fľaše
- Vzorka 1.2 - odstatý (2 mesiace) nefiltrovaný slnečnicový olej, čerstvo naliaty do fľaše
- Vzorka 1.3 - odstatý (3 mesiace) nefiltrovaný slnečnicový olej, čerstvo naliaty do fľaše
- Vzorka 2 - slnečnicový olej, naliaty 3 mesiace vo fľaši bez vzduchovej medzery
- RACIOL - repkový olej, filtrovaný, chemicky upravovaný
- ITO 100 - inhibovaný transformátorový olej

Surový slnečnicový olej bol získaný vylisovaním z čiastočne odšupkovaného semena slnečnice ročne (trhový druh A podľa STN 46 2300-6). Olej bol hneď po vylisovaní naliaty do štyroch fliaš. Olej z prvej fľaše som si

označil ako vzorku 1.1 a bol hneď podrobený meraniu kapacity C a stratového činiteľa $\text{tg}(\delta)$. Slnečnicový olej v druhej fľaši (vzorka 1.2) sa nechal odstáť 2 mesiace bez manipulácie a po tom čase bol podrobený meraniu. Olej v tretej fľaši (vzorka 1.3) sa nechal odstáť ešte dlhšiu dobu, a to 3 mesiace od naliatia do fľaše. Do štvrtej fľaše (vzorka 2) bol olej naliaty takým spôsobom, že vo fľaši neostala vzduchová medzera.

Repkový olej RACIOL bol dodaný v plastových fľašiach PET 2L. Ide o repkový olej, filtrovaný a chemicky upravovaný (rafinovaný) pre použitie v potravinárskom priemysle.

Inhibovaný transformátorový olej ITO 100 je vysokorafinovaný minerálny olej s prísadou 2,6-di-terc-butyl-metylfenolu. Výrobcom oleja je firma Petrochema a.s. Dubová a olej je vhodný ako náplň do všetkých typov transformátorov s výnimkou transformátorov veľmi vysokých napätí a výkonov.

Z hľadiska použitia v distribučných transformátoroch je možné tento olej vyhodnotiť ako vyhovujúci, s priaznivými tepelno-viskozitnými vlastnosťami. Hlavným nedostatkom tohto výrobku je nízky bod vzplanutia a horenia. [4]

Meracie prístroje a merania

V nasledujúcej časti budú popísané meracie prístroje a postupy pri meraní základných vlastností meraných olejov.

Meranie stratového činiteľa $\text{tg}(\delta)$ a kapacity C

Stratový činiteľ $\text{tg}(\delta)$ a kapacita C izolačného oleja sa meria plne automatickým meracím mostíkom za použitia meracieho článku stratového činiteľa. Taktiež bola nameraná a zostrojená frekvenčná závislosť $\text{tg}(\delta)$ a C, meraná pri napätí 20 V, pomocou dielektrickej spektroskopie.

Ako meracie zariadenie sa používa Scheringov plne automatický mostík TETTEX AG – Type 2818/5283 (obr. 1) pre meranie kapacity a dielektrických strát s vysokonapäťovým zdrojom pre 50 Hz. Používame externú kapacitu CN a rozsah merania je 0–2 kV s rozlíšením 0,001 kV. Citlivosť meracieho mostíka musí byť dostatočná a to, aby bola zaistená presnosť merania $\text{tg}(\delta)$ s citlivosťou $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ a kapacity C s citlivosťou $\pm 0,05\%$.

Zvláštna pozornosť sa musí venovať správne uzemneniu a odrušeniu. Vplyv rozptylových kapacít a kapacít fázy prívodu musí byť kompenzovateľný pomocou vetvou alebo iným vhodnými opatreniami.



Obr. 1 Merací mostík

Postup pri meraní:

Pred začiatkom každého merania odmeriame kapacitu C_0 a stratový činiteľ $\text{tg}(\delta)$ meracieho článku bez oleja – stav naprázdno, pri 1 kV a 2 kV. Pripravená vzorka oleja sa bez

filtrácie naplní do meracieho článku. Na naplnenie nádoby bola použitá injekčná striekačka. Prvé meranie sa urobí pri izbovej teplote oleja. Postupne sa zvyšuje priložené napätie od 0,1 kV až po 2 kV krokom približne 200 V. V tomto rozmedzí sa z displeja mostíka odčítajú hodnoty $\text{tg}(\delta)$ a C pri desiatich až jedenástich hodnotách napätia. Postupne sa zvyšuje teplota krokom 20 °C až do 100 °C krokom 10 °C. Pri každej teplote sa urobí napätová závislosť C a $\text{tg}(\delta)$.

Po poslednom meraní sa nechá olej vychladnúť a na druhý deň sa nádobka dôkladne očistí vyššie spomenutým postupom. Nechá sa opäť vysušiť a celý proces merania sa opakuje s novou vzorkou oleja.

Keďže tesne po naliatí oleja do nádoby sa nalievaním mohli vytvoriť mikrobublínky, tak som olej nechal v nádobe postáť minimálne 60 minút a začal som meranie pri izbovej teplote.

Z nameraných hodnôt kapacity oleja C a nameranej kapacity prázdnej nádoby bez oleja C_0 sa vypočíta hodnota permitivity oleja ϵ_r podľa vzťahu:

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

Meranie preskokového napätia olejov U_p

Pri tomto meraní bolo snahou a úlohou zistiť hodnotu preskokového napätia rôznych druhov oleja a porovnať tieto hodnoty jednak medzi sebou a taktiež s hodnotami bežne používaných transformátorových olejov. Merania boli robené u troch druhov olejov (slniečnicový olej, repkový olej RACIOL a transformátorový olej ITO 100). Meranie sa robilo skúšobným zariadením TUR na meranie prierazného napätia (obr. 2). Postup pri meraní bol u každej vzorky rovnaký a taktiež použité prístroje boli tie isté, čím sa zabezpečila porovnateľnosť výsledkov.



Obr. 2 Prístroj TUR na meranie preskokového napätia

Nádobka bola pred samotným meraním vyčistená technickým benzínom aj benzénom a nechala sa postáť asi 30 minút bez toho, aby sme do nej naliatli olej. Potom bol do nádoby naliaty z fľaše olej tak, aby prekryval obe hribové elektródy a počkalo sa ďalších 30 minút nech sa olej ustáli. Olej sa do nádoby nalieval takým spôsobom, že bol nalievajú na jednu z elektród a po nej stekal ďalej do nádoby. Tento postup bol zvolený preto, aby sa obmedzil vznik bublínok pri nalievaní na čo najmenšiu možnú mieru.

Už pred samotným nalievaním oleja do skúšobnej nádoby sa nastavila vzdialenosť 2,5 mm medzi hrotmi elektród. Urobilo sa 10 meraní, pričom medzi jednotlivými meraniami bola pauza cca 7 minút, kvôli ustáleniu pomerov v oleji medzi elektródami.

Meranie sa zopakovalo u každej vzorky aj po 96 hodinách a výsledky sa porovnali medzi sebou.

Z nameraných hodnôt sa vypočítala priemerná hodnota podľa nasledujúceho vzťahu (pričom najnižšia a najvyššia hodnota sa nebrala pri výpočte do úvahy):

$$U_p = \frac{\sum U}{n} \quad (2)$$

kde: U_p - prierazné napätie
n - počet meraní

Meranie elektrickej prieraznej pevnosti olejov

Pri tomto meraní bola porovnávaná elektrická prierazná pevnosť troch druhov olejov, a to slnečnicového oleja, repkového oleja RACIOL a transformátorového oleja ITO 100.

Meranie bolo robené na tom istom prístroji ako meranie preskokového napätia, a to skúšobným zariadením na meranie preskokového napätia kvapalných izolantov značky TUR Dresden.

Pred samotným meraním je potrebné nádobu opäť vyčistiť. Do vyčistenej nádoby bola naliata vzorka skúšaného oleja o objeme 400 ml tak, aby olej prekryval obe hribové elektródy a počkalo sa ďalších 30 minút, nech sa olej ustáli.

Urobilo sa desať meraní pri každej vzdialenosti elektród, pričom medzi jednotlivými meraniami bola pauza 3 minúty, kvôli ustáleniu pomerov v oleji medzi elektródami. Meranie sa robilo pri rôznych vzdialenostiach elektród od 0,1 mm až po 3 mm (0,1; 0,2; 0,5; 0,8; 1; 1,5; 2; 2,5 a 3 mm). Počas merania mal olej vždy izbovú teplotu, nakoľko bol uskladnený v skúšobnej miestnosti. Namerané hodnoty sa zapísali do tabuľky pre vyhodnotenie merania.

Z nameraných hodnôt sa vypočítala priemerná hodnota (pričom najnižšia a najvyššia hodnota sa pri výpočte zanedbala):

$$U_p = \frac{\sum U}{n} \quad (3)$$

kde: U_p - prierazné napätie
n - počet meraní

Hodnotu preskokového napätia sa predelí vzdialenosťou a dostaneme hodnotu elektrickej prieraznej pevnosti oleja:

$$E_p = \frac{\sum U_p}{d} \quad (4)$$

kde: E_p - prierazná pevnosť
d - vzdialenosť elektród

Z nameraných hodnôt sa zostrojili charakteristiky $E_p = f(d)$ a $U_p = f(d)$.

Meranie viskozity

Viskozita olejov bola meraná Ubbelohdeho viskozimetrom. Viskozita bola nameraná u štyroch druhov olejov (ITO 100, Silikónový olej, RACIOL a Slniečnicový olej). Aby sa zistila závislosť viskozity na teplote oleja, tak meranie viskozity bolo robené pri troch rôznych teplotách u všetkých typoch olejov. Na meranie viskozity bolo potrebné množstvo oleja o objeme 0,1 litra.

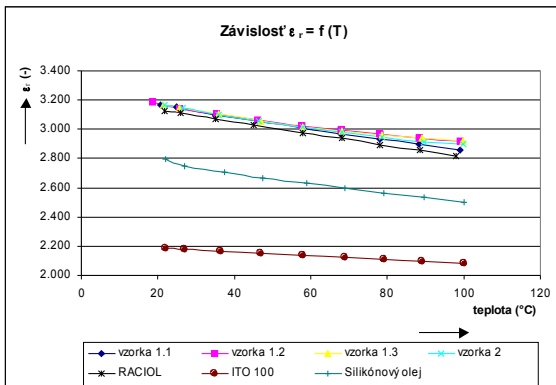
VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANIA

Vyhodnotenia bolo robené tým spôsobom, že sa zostrojili teplotné a napätové charakteristiky kapacity C

a stratového činiteľa $tg(\delta)$ všetkých druhov oleja. Tieto charakteristiky boli medzi sebou porovnávané. Porovnávané boli aj prierezová pevnosť, preskokové napätia a viskozita všetkých druhov olejov.

Stratový činiteľ $tg(\delta)$ a kapacita C

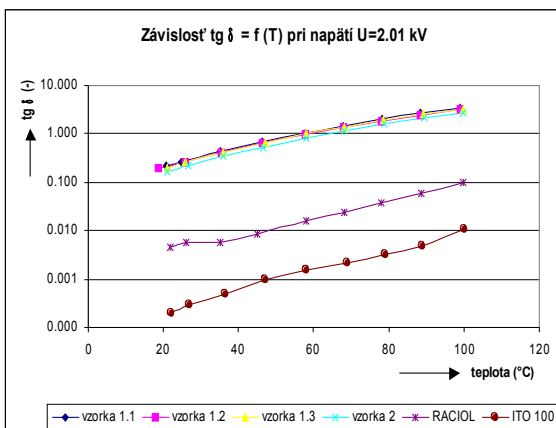
Zo zostrojených charakteristík vidieť, že hodnota stratového činiteľa $tg(\delta)$ kvapalných izolantov s teplotou rastie. Ukázalo sa aj to, že $tg(\delta)$ rastie s výškou priloženého napätia len veľmi pomaly. Pri nízkych napätiach do 0,7 kV dokonca mierne klesá. Naopak, ako vidieť z grafu (obr. 3), permitivita olejovej izolácie klesá s teplotou.



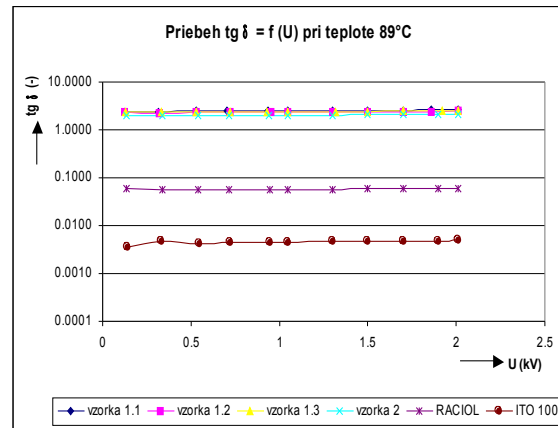
Obr. 3 Závislosť $\epsilon_r = f(T)$

Hodnota permitivity ϵ_r všetkých meraných vzoriek olejov je vyššia ako permitivita transformátorového oleja. U oleja ITO 100 som nameral hodnoty v rozmedzí 2,0 až 2,2 a u rastlinných olejov som nameral hodnoty v rozmedzí 2,8 až 3,2. Keďže permitivita u silikónového oleja je v rozmedzí 2,5 až 2,8, naše hodnoty nie sú ničím výnimočné. U oleja ITO 100 sa pri ohriatí vzorky o 80 °C zmenila hodnota ϵ_{r0} hodnotu 0,1, ale pri rastlinných olejoch až o hodnotu 0,3. Z toho vidieť, že transformátorový olej je stálejší pri zmene teploty.

Hodnoty $tg(\delta)$ sú už viditeľne odlišné pre rôzne druhy olejov. Transformátorový olej má pri teplote 89 °C a napätí 2 kV $tg(\delta)$ rovný 0,0048. U rastlinných olejov sa najlepšie javí olej RACIOL, ktorý má pri tej istej teplote a napätí hodnotu $tg(\delta) = 0,06$. Táto hodnota sa už blíži hodnotám transformátorových olejov. U slnečnicového oleja, konkrétne u vzorky 2, to bola hodnota $tg(\delta) = 2,12$.



Obr. 4 Závislosť $tg(\delta) = f(T)$ pri napätí 2,01 kV



Obr. 5 Závislosť $tg(\delta) = f(U)$ pri teplote 89 °C

Preskokové napätie U_p

Meranie preskokového napätia bolo robené pre 3 druhy olejov: ITO 100, RACIOL a Slnečnicový olej – vzorka 2. Merania boli robené pri izbovej teplote 22 °C. Olej nebol počas merania nijako premiešavaný. Olej bol od naliatia do nádoby bez zásahu a bez manipulácie.

Z nameraných hodnôt je vidieť, že vzorka, ktorá sa nechala postáť v nádobe dlhšiu dobu bez manipulácie mala vo všetkých prípadoch vyššiu hodnotu preskokového napätia. To môže byť spôsobené tým, že sa v oleji nalieváním zrejme vytvorili vzduchové mikrobublinky, ktoré nie sú voľným okom pozorovateľné a negatívne vplyvajú na meranie. Po naliatí vzorky nefiltrovaného oleja do nádoby sa v ňom mohli taktiež zvíříť nečistoty, ktoré sa do začatia merania nestihli usadiť na dne a aj táto skutočnosť mohla mať vplyv na výsledok merania. Tým, že olej stál niekoľko hodín v nádobe sa tieto mikrobublinky stratili a nečistoty usadili na dno nádoby a nepriaznivé pomery v ňom sa ustálili. Namerané hodnoty preskokového napätia boli preto podstatne vyššie.

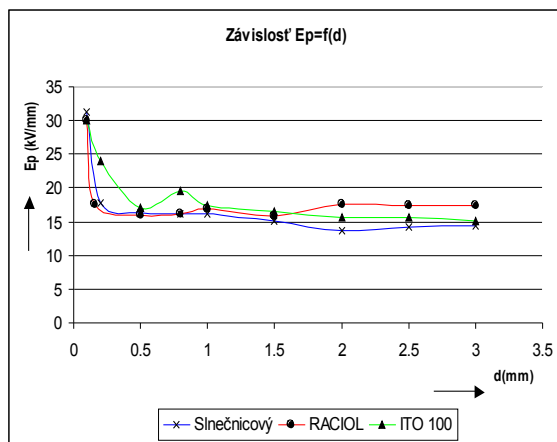
U repkového oleja RACIOL som urobil aj tri informatívne merania preskokového napätia s odstupom 24 hodín. To znamená, že olej som naliat do nádoby a zmrazil som 10 hodnôt preskokového napätia. Po ďalších 24 hodinách som meranie zopakoval a to isté som zopakoval aj po 48 hodinách od naliatia. Hodnota preskokového napätia sa zakaždým o niečo zvýšila oproti predchádzajúcemu dňu. Tým sa dokázalo to, že čím dlhšie som nechal olej po naliatí do nádoby postáť, tým výraznejší rozdiel v hodnote preskokového napätia bolo možné pozorovať. Spôsobené je to tým, že mikrobublinky sa postupne zo vzorky oleja naliatého v nádobe vytrácajú a mikročastice sa postupne usádzajú. Tesne po naliatí oleja do skúšobnej nádoby sa ešte mikrobublinky a mikročastice nečistôt nestihli usadiť na dno nádoby a po priložení napätia na elektródy sa tie formovali v priestore medzi elektródami a s rastúci napätím vytvárali tzv. vodivostný mostík, ktorý znižoval hodnotu preskokového napätia.

Tento vodivostný mostík bol nakoniec pre tieto pokusy umelo vytvorený, aby sme mohli potvrdiť jeho existenciu. Do vzorky oleja boli nasypané maličké umelé vlákna a olej sa premiešal. Po pripojení a následnom zvyšovaní napätia bolo v nádobe možné pozorovať, ako sa tieto častice v elektrickom poli polarizujú a vytvárajú v medzelektródovom priestore vodivostný mostík. Ten sa v momente preskoku zdeformoval a častice boli plynovou

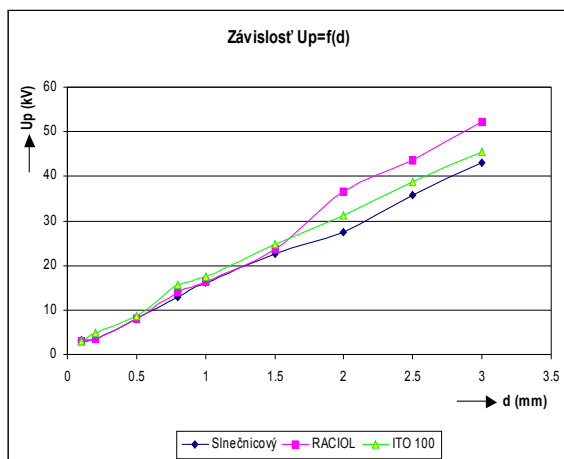
bublinou, ktorá vznikla pri preskoku vytlačené na hladinu oleja. Po opätovnom pripojení a zvyšovaní napätia sa tieto častice opäť začali polarizovať a proces sa opakoval.

Elektrická prierezná pevnosť EP

Ako vidieť z grafov (obr. 6 a obr. 7), na ktorých boli porovnávané závislosti UP a EP od vzdialenosti elektród, tak všetky tri druhy olejov majú takmer rovnaké tvary charakteristík. Do vzdialenosti elektród 1,5 mm sú hodnoty preskokoového napätia aj elektrickej prieraznej pevnosti rovnaké. Pri väčších vzdialenostiach sa najlepšie javí repkový olej RACIOL. Pri vzdialenosti 2 mm má už o 5 kV vyššie preskokoové napätie a pri vzdialenosti 3 mm dokonca o 7 kV vyššiu hodnotu preskokoového napätia ako transformátorový olej ITO 100. Pri tejto vzdialenosti má automaticky aj vyššiu prieraznú pevnosť EP, a to o 2 kV. Krivka slnečnicového oleja je len tesne pod krivkou oleja ITO 100.



Obr. 6 Závislosť EP = f (d)



Obr. 7 Závislosť $U_p = f(d)$

Z týchto výsledkov možno vysloviť záver, že z hľadiska elektrickej prieraznej pevnosti sú si všetky tri druhy olejov rovnocenné. Rastlinné oleja sú v tomto ohľade vyhovujúce a porovnateľné s bežne používanými transformátorovými olejmi.

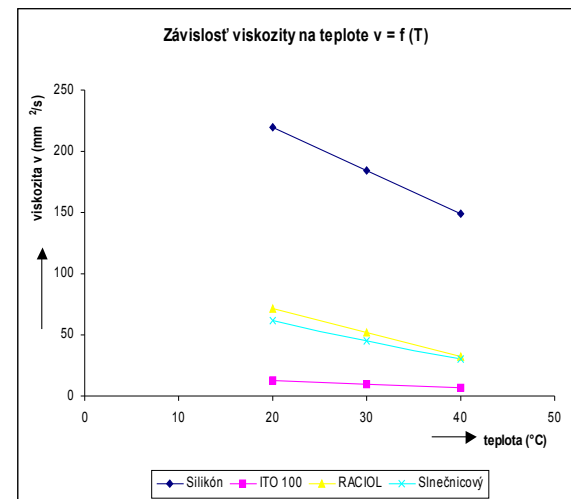
Viskozita

Bola nameraná viskozita u štyroch druhov olejov. Namerané hodnoty pri troch teplotách sú v nasledujúcej tabuľke:

	druh oleja			
	Silikónový	ITO 100	RACIOL	Slnečnicový
20°C				
Viskozita (mm ² /s)	219.8	12.48	72	62.08
30°C				
(mm ² /s)	184.8	9.5	52	44.96
40°C				
(mm ² /s)	149	6.6	31.97	29.97

Tab. 1 Tabuľka nameranej viskozity

Z výsledkov merania viskozity je zrejme, že najlepšie výsledky dosahuje transformátorový olej ITO 100. Rastlinné oleje dosahujú viditeľne vyššiu hodnotu viskozity ako transformátorový olej. Silikónový olej bol už na prvý pohľad hustejší ako ostatné oleje, čo sa aj meraním potvrdilo (obr. 6).



Obr. 8 Teplotná závislosť viskozity

ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo zmerať a porovnať základné vlastnosti rastlinných olejov a transformátorového oleja. Merania boli robené na vzorkách rastlinných olejov RACIOL a slnečnicového oleja a taktiež transformátorového oleja ITO 100. Výsledky meraní boli porovnané medzi sebou.

Zo zostrojených charakteristík vidieť, že hodnota stratového činiteľa $\text{tg}(\delta)$ kvapalných izolantov s teplotou rastie. Ukázalo sa aj to, že $\text{tg}(\delta)$ rastie s výškou priloženého napätia len veľmi pomaly. Naopak, permitivita olejovej izolácie s teplotou klesá.

Hodnota permitivity ϵ_r všetkých meraných vzoriek rastlinných olejov je vyššia ako permitivita transformátorového oleja. U oleja ITO 100 boli namerané hodnoty v rozmedzí 2,0 až 2,2 a u rastlinných olejov v rozmedzí 2,8 až 3,2. Keďže permitivita u silikónového oleja je v rozmedzí 2,5 až 2,8, naše hodnoty nie sú ničím výnimočné. U oleja ITO 100 sa pri ohriatí vzorky o 80 °C zmenila hodnota ϵ_{r0} hodnotu 1, ale pri rastlinných olejoch až o hodnotu 3. Z toho vidieť, že rastlinné oleje nie sú dostatočne stále pri zmene teploty.

Hodnoty stratového činiteľa $\text{tg}(\delta)$ sú už viditeľne odlišné pre rôzne druhy olejov. Transformátorový olej má pri teplote 89 °C a napätí 2 kV $\text{tg}(\delta)$ rovný 0,0048. U rastlinných olejov sa najlepšie javí olej RACIOL, ktorý má pri tej istej teplote a napätí hodnotu $\text{tg}(\delta) = 0,06$. Táto hodnota sa už blíži

hodnotám transformátorových olejov. U slnečnicového oleja, konkrétne u vzorky 2, to bola hodnota $tg(\delta) = 2,12$.

Ako je vidieť zo závislosti zostrojených z výsledkov merania, slnečnicový olej má tým lepšie dielektrické vlastnosti, čím dlhšie po vylisovaní ho necháme postáť. Keďže olej nebol po vylisovaní filtrovaný, tak sa v ňom nachádzajú nečistoty. Tie sa časom usádzajú na dno, čo je možné vidieť na dne fľaše. V prípade repkového oleja je situácia iná, keďže olej je po filtrácii.

Na hodnotu $tg(\delta)$ má vplyv aj navlhnutie oleja. Preto bola časť oleja ponechaná vo fľaši, kde nebola vzduchová medzera. To sa prejavilo aj na výsledkoch merania, keďže hodnoty $tg(\delta)$ aj ϵ_r boli nižšie ako u toho istého oleja uskladneného vo fľaši so vzduchovou medzerou.

Z výsledkov merania preskokového napätia je vidieť, že vzorka, ktorá sa nechala postáť v nádobe dlhšiu dobu bez manipulácie mala u všetkých olejoch vyššiu hodnotu preskokového napätia ako čerstvo naliaty olej. Je to spôsobené tým, že sa v oleji nalievaním zrejme vytvorili vzduchové mikrobublinky, ktoré nie sú voľným okom pozorovateľné a negatívne vplyvajú na meranie podobne ako prítomnosť nečistôt. Namerané hodnoty preskokového napätia u rastlinných olejoch sú však porovnateľné ako u transformátorového oleja ITO 100. Z pohľadu preskokového napätia sú preto rastlinné oleje vyhovujúce pre prax.

Z výsledkov merania prieraznej pevnosti olejov vidieť, že všetky tri druhy olejov majú takmer rovnaké tvary charakteristík. Do vzdialenosti elektród 1,5 mm sú hodnoty preskokového napätia aj elektrickej prieraznej pevnosti rovnaké. Pri väčších vzdialenostiach sa najlepšie javí repkový olej RACIOL. Krivka $E_p = f(d)$ slnečnicového oleja je len tesne pod krivkou oleja ITO 100.

Z týchto výsledkov možno vysloviť záver, že z hľadiska elektrickej prieraznej pevnosti sú si všetky tri druhy olejov rovnocenné. Rastlinné oleja sú v tomto ohľade vyhovujúce a porovnateľne s bežne používanými transformátorovými olejmi.

Z merania viskozity olejov vyplýva, že rastlinné oleje majú viditeľne vyššiu viskozitu ako transformátorový olej ITO 100. Pre dostatočný odvod tepla je žiadaná nižšia viskozita izolačného oleja, ako dosahujú rastlinné oleje. Preto možno povedať, že z hľadiska viskozity nie sú

rastlinné ideálne pre použitie v distribučných transformátoroch. Hodnota viskozity však nie je až príliš vysoká v porovnaní so silikónovým olejom.

Z pohľadu vlastností, ktoré boli merané a porovnávané v tejto diplomovej práci sa javia rastlinné oleje ako konkurencie schopné transformátorovému oleju. Najlepšie sa prejavil repkový olej RACIOL, najmä vďaka relatívne nízkej hodnote stratového činiteľa $tg(\delta)$, nakoľko v prieraznej pevnosti ani v preskokovom napätí nie je problém ani u slnečnicového oleja. Pre objektívne posúdenie použiteľnosti rastlinných olejov by bolo potreba preveriť viacej druhov rastlinných olejov. Rovnako je potrebné zmerať a porovnať aj ostatné nemenej dôležité vlastnosti izolačných olejov, čo by mohlo byť témou ďalších prác.

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

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] C. Perrier, A. Beroual, J-L. Bessede, Improvement of Power transformers by using Mixtures of Mineral Oil with Synthetic Esters, IEEE, 2006.
- [2] Forster E. O.: Progess in the field of Electric properties of dielectric liquids. IEEE Transactions on electrical insulation, 1990.
- [3] [Hán M., Pokorná A., Plávka J., : Použitie silikónových kvapalín v distribučných transformátoroch. Transformátory, 1982, str. 30.
- [4] PND 26-368-84: Inhibovaný transformátorový olej 100.š.p. Petrochema Dubová, 1984

Autori:

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

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

Roman Cimbala

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

Dielectric Modeling of Liquid Insulations

Abstract. Paper deals with theoretical background of dielectric modeling of liquid insulation materials. At present three methods exist and are worldwide in use: the analysis of relaxation currents (PDC, Polarisation and Depolarisation Current), analysis of the dissipation factor $\tan \delta$ over a wide frequency range (FDS, Frequency Domain Spectroscopy) and analysis of the recovery voltage (RVM, Recovery Voltage Measurement). In practice, different methods applied on the same It is well-known that different results for chosen properties are caused only by modeling the insulation system and the material samples for getting basic dielectric measurements.

Keywords: dielectrics, polarization and depolarization current, Maxwell-Wagner equivalent model, izotermal relaxation current analysis

Introduction

Electrical insulation systems are evaluated based on economic, safety, and environmental standpoints using total life cycle analysis. Because of the inherent high efficiency of liquid-cooled object designs, new developments focus on improving the environmental and safety properties of fire resistant (less-flammable, high fire point) fluids. This article reports the dielectric analysis results findings on dielectric systems using natural ester (vegetable oil) fluids. Because esters naturally have lower oxidation resistance than mineral oils, a novel blend of base oils and additives were developed to overcome this potential handicap. The installations using these new dielectric coolants are discussed.

Experimentation using natural ester fluids as dielectric coolant began around the same time as the early mineral oil trials. They proved less desirable than mineral oil due to inferior oxygen stability and higher pour point, permittivity, and viscosity values [1]. To this day, liquid-filled insulation systems primarily use mineral oils as the insulating fluid. Other alternatives to mineral oil-filled distribution transformers, such as dry and essentially nonflammable liquid-filled types, were commercialized decades ago for use in specialty applications [10].

The banning of further production and commercialization of PCBs and increasingly restrictive Common used regulations led to the introduction of other fire-resistant insulation system types [4]. Dry-type insulation system manufacturers responded by adding a more robust dry design, using vacuum-pressure impregnation (VPI), and increasing power and voltage ratings. A few insulation system manufacturers and refilling service companies promoted other nonflammable dielectric coolants that did not contain PCBs. These coolants included perchloroethylene, trichlorobenzene, and chlorofluorocarbons. However, most replacements of the Askarel-filled transformers selected for removal used less-flammable fluids [5], [6].

We made experiment on raw vegetable oil in various temperatures.

I. Polarisation and deepolarization current analysis

Recent state of insulation system diagnostics is based on observing of electro – physical changes in material. There is not any method that can determine the state of insulation material itself. The set of methods has to be used to reach the complex view to material properties. Generally electrical methods can be divided according to applied

voltage or current as AC and DC methods [8]. Not so far ago DC methods measured current flowing through insulation material. The resistance or polarization indices were calculated in past.

When applying external direct voltage forming an internal electrical field inside the material, the total current shown in Fig.1 consists of several components. While charging with direct voltage currents from the geometrical capacity, absorptive and steady current are present. There is not steady current during discharging, because there is no external electrical field.

i_{pol} (Polarisation and Depolarisation Analysis, PDC)

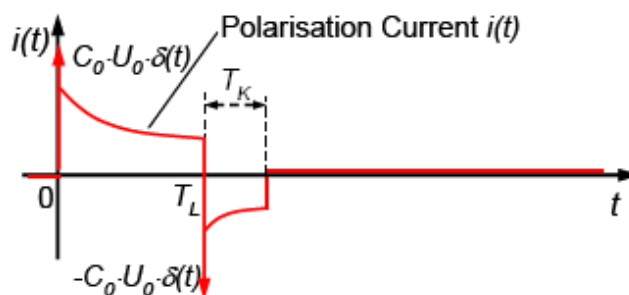
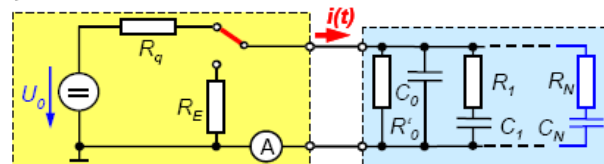


Fig 1. Polarization and depolarization currents

$$i_{nab}(t) = i_c(t) + i_a(t) + i_v(t) \quad (1)$$

where $i_{nab}(t)$ - total current, $i_c(t)$ - geometrical capacity current, $i_a(t)$ - absorption current, i_v - steady current.

Geometrical capacity current is so fast, that it can be neglected (about 10^{-12} s). Then the total current can be described as:

$$i_t(t) = i_s + i_a(t) \quad (2)$$

For a macroscopic description of current responses the equivalent Maxwell – Wagner model can be used for

dielectric materials. The equivalent model of the insulating material shown in Fig.2 is based on n independent Debye's polarization processes. Each process has its own time constant of stabilization τ_i and maximum of elementary current I_{mi} , and by observing its changes we can obtain information about the state of insulation electro – physical structure and its changes [3].

$$i_t(t) = i_s + \sum_{i=1}^n I_{mi} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (3)$$

$$i_s = \frac{U_0}{R_0} \quad (4)$$

$$I_{mi} = \frac{U_0}{R_i} \quad (5)$$

$$\tau_i = R_i C_i \quad (6)$$

$$i_t(t) = \frac{U_0}{R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_i} \exp\left(\frac{-t}{R_i C_i}\right) \quad (7)$$

Then calculation is made and all parameters is known, it is possible to calculate one minute polarization index $P_1 = I_{15}/I_{60}$ and ten minute polarization index $P_{10} = I_{60}/I_{600}$, where I_{15} , I_{60} and I_{600} are currents at 15, 60, and 600 seconds after charging. There is a big advantage when calculation is carried out on data without disturbances after digital filtering due to replacing model. If exactly on calculated time noise exists, model doesn't accept it according its ratio.

Another point of view to theory of relaxation currents is very well described in the literature [1, 2, 3]. With $Rq \approx 0$, a step voltage $s(t) \cdot U_0$ results in a polarisation current according to

$$\dot{i}_t(t) = s(t) \cdot \frac{U_0}{R_0} + \varepsilon_{r0} \cdot C_0 \cdot U_0 \cdot \delta(t) + s(t) \cdot C_0 \cdot U_0 \cdot f^*(t) \quad (8)$$

The ideal voltage step function can not be realised in practise. Furthermore, the measurement begins after a certain time $t = t_0$. Thus, the Dirac pulse will not be measured and the result in practise is:

$$\dot{i}_t(t) = s(t) \cdot \left[\frac{U_0}{R_0} \cdot C_0 \cdot U_0 \cdot f^*(t) \right] \quad (9)$$

$$i_t(t) = s(t) \cdot \left[\frac{U_0}{R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{U_0}{R_i} \exp\left(\frac{-t}{R_i C_i}\right) \right] \quad (10)$$

The dielectric response function $f^*(t)$ can be modeled by a sum of decaying exponential functions. This corresponds to exactly that number of parallel RC series branches in the network model of the dielectric which are required for an exact approximation of $f^*(t)$. The measured polarisation current $i(t)$ of a dielectric due to excitation with a voltage step is identical with the dielectric response function $f^*(t)$ besides a constant part coming from the finite conductivity of the material [9].

II. Modeling

Up to now, only the homogenous part of the insulation system between the windings is modelled (e. g. between HV and LV windings). The electric field at both ends of the

windings is not taken into consideration since it is very complex and varies much from transformer to transformer. The insulation system between the windings consists of a cylinder symmetrical arrangement made by barriers, spacers and the oil channels. The electric field is a cylinder field which can be described analytically in an easy manner. Now, in order to simplify the model, the winding is regarded to be enroled. This leads to a trapezoid. Due to the big diameter of transformer windings the error of regarding a rectangle instead of a TRAPEZ can be neglected. Then, all the barriers, spacers and oil channels are brought together and are combined. This leads to a kind of block arrangement with the 3 insulating parts oil, spacers and barriers. If the geometric parameters of the insulation system are known, the geometry of this block arrangement can be calculated. The required data are usually available at least in the archive of the transformer manufacturer. Every dielectric can be modelled in principal by its RC network model (Figure 1) consisting of a paralel arrangement of an ohmic resistor, the capacitance of the insulation system and the RC series branches for modelling the polarisation characteristics. Thus, in the block arrangement every material is replaced by its network representation. This results in the RC network model for the complete insulation system and is the dielectric model for the insulation system. In the case of the solid insulation material, the complete model must be applied, whereas for modelling the oil in the time range above 1 s any time-dependent polarisation effects do not need to be considered. Therefore, oil channels are modelled by the conductivity of the oil and the capacity of the oil channels. Now, the parameters (R and C values) of the individual materials are required. The model depends on the temperature of the insulation system and the moisture content of the transformer. Establishing such models requires measurements on material samples with different moisture contents at different temperature. Due to the variety of parameters a huge number of measurements had to be carried out. The RC models for different moisture contents at different temperatures are available in the software of the commercially available measuring systems. Now the difficulty consists in determining the RC network model parameters for the individual materials such as spacers and barriers and also the oil. Here, material samples have been measured in the past. Commercially available diagnostic systems use these models in their software.

III. TEST

The test voltage was 100V DC and was controlled with the instrument 100V DC supply. Current responses to DC voltage were measured. Measuring instrument electrometer Keithley 617 was controlled by PC and connected with PC through IEEE 488.2 interface. Control software was written in Hewlett Packard Virtual Engineering Environment. Calculation was done in Matlab. Samples were placed in electrode system Tettex 2903/AT, temperature was controlled by Tettex 2965/ZH from 20°C to 100°C.

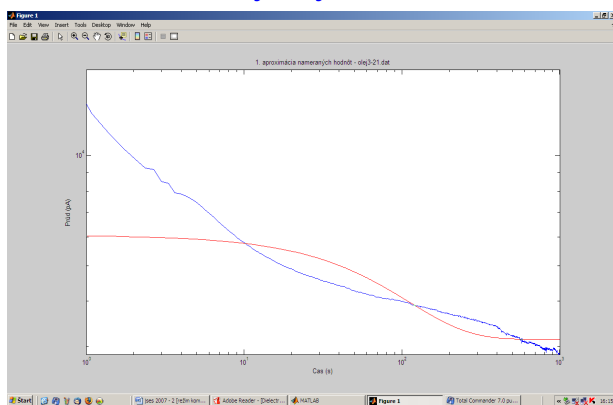


Fig. 2 One elementary Debye's process

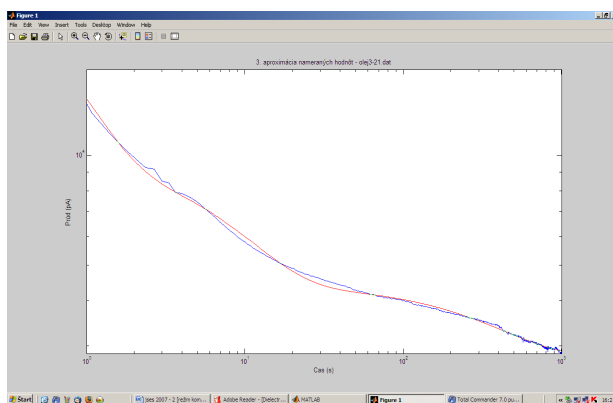


Fig. 3 Three elementary Debye's processes

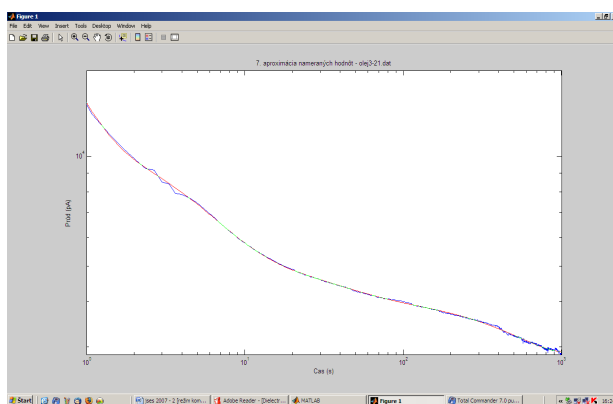


Fig. 4 Seven elementary Debye's processes

Electrometer Keithley 617 can measure currents down to 10-16A and it is suitable for these purposes. Measurements were done under temperatures varied from 20°C to 100°C. Measuring equipment was connected to liquid test chamber.

Vegetable oil based on natural esters was analyzed. Current responses on 100 V direct voltage were observed. As oil is quite homogenous material, one elementary

Debye's process was decided first [7]. There is approximation of measured data (blue) with one elementary polarization process on Figure 2.

Increasing of number of elementary processes to three is shown on Figure 3.

Final state is shown in Figure 4, where seven independent elementary Debye's polarization processes are calculated.

IV. Conclusion

It is the initial work for complex diagnostic parameter measurements of raw vegetable oil and computation of parameters of equivalent Maxwell-Waagner's model. Samples were achieved directly from manufacturer. Current responses under various temperatures were observed. Time constants of oil create moal oil samples have. But it is necessary to add that vegetable oil samples were without any additives. Polarization indeeces of vegetable oil varied not too much In the case of inhibited oil the variation is higher. It is can't be said that there is direct relation to temperature. We measured breakdown voltage, capacitance and dissipation factor too, but it is a contents of other paper.

BIBLIOGRAPHY

- [1] F.M. Clark, *Insulating Materials for Design and Engineering Practice*. New York: Wiley, 1962.
- [2] Toxic Substance Control Act, U.S. Public Law 94-469.
- [3] PCB Regulations, EPA, Part 761, 40 CFR, 1979.
- [4] Disposal of Polychlorinated Biphenyls (PCBs), EPA, Parts 750-761, 40 CFR, 1998.
- [5] Mark Earley, "Minimizing the hazards of transformer fires," *Fire J.*, pp 73-74, Jan./Feb. 1988.
- [6] D.A. Hallerberg, "Less-flammable liquids used in transformers," *IEEE Ind. Applicat. Mag.*, vol. 5, pp. 50-55, Jan./Feb. 1999.
- [7] Cimbala R., Kolcunová I., Kršňák I., Current Response of Insulation Systems Based on ReMica Materials and Accelerated Thermal Degradation, *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol.3, No.1 2004, str. 23-27. ISSN 1682-0053
- [8] V. Der Houhanessian; *Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems.*; PhD Thesis, ETH Zuerich 1998
- [9] [W.S. Zaengl; *Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment (Trans Transformers, Cables etc.)*; 12th ISH, Bangalore India, Aug.2001
- [10] A. Küchler; T. Leibfried; Berücksichtigung geometrischer und parasitärer Einflüsse bei der Bestimmung des Wassergehaltes in Öl-Papier-Isolationen durch dielektrische Diagnose; ETGFachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, Köln 2004

Address of author

Assoc. Prof. Ing. Roman Cimbala, PhD., Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, technical University Košice, Mäsiarska 74, 042 00 Košice, Slovakia, E-mail: Roman.Cimbala@tuke.sk

This article was supported by APVV 20-006005 and VEGA 1/3142/06 projects.

Dušan Medveď

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

Aplikácia waveletov v procesoch vysokého napätia

Abstrakt. Meranie rôznych fyzikálnych veličín a následne ich spracovanie je v mnohých prípadoch závislé od použitej vyhodnocovacej metódy. Výber správnej vyhodnocovacej metódy je preto dôležité pre prezentovanie správnych a presných výsledkov z meracieho zariadenia. V tomto príspevku je bližšie popísaná aplikácia waveletovej transformácie použitá pre vyhodnocovanie a ďalšie spracovanie signálov vo vysokonapäťových procesoch.

Abstract. This paper deals with application of wavelets in high voltage processes. There are compared its benefits versus Fourier transformation. Basic forms and expressions refer to steps sequence for result evaluating. These results and application of wavelet transformation are illustrated in some examples.

Kľúčové slová: waveletová transformácia, Fourierová transformácia, aplikácia waveletov

Keywords: Wavelet Transformation, Fourier Transformation, Wavelet Applications

Úvod

Základnou myšlienkou waveletovej transformácie je znázornenie rôznych funkcií ako superpozíciu množiny waveletov (bázových funkcií). Wavelety sú matematické funkcie definované na konečnom intervale a ich priemerná hodnota sa rovná nule. Bázové funkcie sú získavané z jediného waveletu, tzv. materskej funkcie a to rozťahnutím alebo zmenou veľkosti a následne posunutím. Wavelety majú výhodu oproti tradičným metódam Fourierovej transformácie pri analýze fyzikálnych dejov, v ktorých sa objavujú nespojitosti v signáli a ostré impulzy [1]. V tomto príspevku bude predstavené využitie waveletovej transformácie v niektorých zaujímavých aplikáciách ako napr. vo vysokonapäťových procesoch a poukazané na rozdiely medzi Fourierovou transformáciou.

WAVELETOVÁ A FOURIEROVA TRANSFORMÁCIA

Podobnosti medzi Fourierovou a waveletovou transformáciou:

Matematické vlastnosti matic FFT a DWT zahrnutých v transformáciách sú podobné. Inverzná transformačná matica pri FFT a DWT je transponovaná matica pôvodnej. Výsledkom oboch transformácií je akoby rotácia funkcie v priestore do odlišnej oblasti. Pre FFT táto oblasť obsahuje bázové funkcie (sínusy a kosínusy) a pre waveletovú transformáciu táto oblasť obsahuje zložitejšie bázové funkcie, tzv. wavelety, materské wavelety alebo analyzujúce wavelety.

Odlíšnosti medzi Fourierovou a waveletovou transformáciou:

Najdôležitejšia odlíšnosť medzi týmito druhmi transformácií je skutočnosť, že samostatné waveletové funkcie sú umiestnené v priestore, pri Fourierovej analýze nie sú. Táto vlastnosť má mnohé využitie v rôznych aplikáciách ako kompresia dát, detekcia rôznych vlastností v obrázkoch a odstraňovanie šumu zo signálu [1].

Výhodou waveletovej transformácie oproti Fourierovej transformácii je meniac sa šírka okna. Aby sa izolovali nespojitosti, niekto môže požadovať veľmi krátke bázové funkcie. V rovnakom čase, aby sa získala detailnejšia frekvenčná analýza, niekto môže požadovať veľmi dlhé bázové funkcie. Spôsob, ako toto dosiahnuť je mať krátke vysokofrekvenčné bázové funkcie a dlhé nízkofrekvenčné.

Tento zvláštny prostriedok je presne to, čo sa dá získať prostredníctvom waveletovej transformácie.

Jedna dôležitá vlastnosť waveletových transformácií, je že nemajú jeden súbor bázových funkcií, ako pri Fourierovej transformácii, ktoré využívajú len sínusy a kosínusy. Teda, waveletové transformácie majú nekonečný súbor bázových funkcií, čo poskytuje okamžitý prístup k informáciám, ktoré by inak mohli byť skryté pri iných metódach ako napr. pri Fourierovej analýze.

WAVELETOVÁ ANALÝZA

Diskrétna waveletová transformácia

Rozťahnutia a posunutia „materskej funkcie“ definujú ortogonálnu bázu, t.j. bázu nášho waveletu:

$$(1) \quad \Phi_{(s,l)}(x) = 2^{-\frac{s}{2}} \cdot \Phi(2^{-s} \cdot x - l)$$

Premenné s a l sú celé čísla, ktoré menia mierku a rozširujú materskú funkciu $\Phi(x)$, ako napr. druh waveletu Daubechies. Mierkový index s predstavuje šírku waveletu a index l udáva jeho pozíciu. Poznamenajme, že materské funkcie je možné meniť buď mierkou alebo predĺžením o mocninu dvoch a posunúť o celé číslo. Čo robí bázy waveletov predovšetkým zaujímavými je „samo-podobnosť“ dosiahnutá mierkou a predĺžením. Ak poznáme materské funkcie, poznáme všetko o bázach.

Pre rozšírenie oblasti sú údajmi do iného rozlíšenia, materská funkcia sa využije v mierkovej rovnici:

$$(2) \quad W(x) = \sum_{k=-1}^{N-1} (-1)^k \cdot c_{k+1} \cdot \Phi(2 \cdot x + k)$$

kde $W(x)$ je mierková funkcia pre materskú funkciu $\Phi(x)$ a c_k sú koeficienty waveletu. Koeficienty waveletu musia zodpovedať lineárnym a kvadratickým obmedzeniam v tvare

$$(3) \quad \sum_{k=0}^{N-1} c_k = 2; \quad \sum_{k=0}^{N-1} c_k \cdot c_{k+2l} = 2 \cdot \delta_{l,0}$$

Jedna z najdôležitejších vlastností waveletov je ľahkosť, s akou vedci môžu zdefinovať koeficienty pre daný waveletový systém. Autorka Daubechies analyzovala

v príspevku [2] špecifický druh systému waveletov, ktoré veľmi dobre znázorňovali tvar polynómov. Autor Haar využíva jednoduchšie wavelety a preto sa dosť často využívajú pre výukové účely.

Je užitočné, ak uvažujeme koeficienty ako určité filtre. Filter alebo koeficienty sa vložia do transformačnej matice, ktoré sa následne použijú na spracovanie prvotných údajov. Koeficienty sa zoradia využitím dvoch hlavných šablón. Jedna, ktorá slúži ako vyhladzovací filter (ako pohyblivý priemer) a druhá, ktorá získa detailné informácie z údajov. Detailnejší popis transformačnej matice je napr. v lit. [3].

Matica koeficientov waveletu sa ďalej použije v hierarchickom algoritme, často nazývanom tiež pyramidový algoritmus. Koeficienty waveletu sú usporiadané tak, aby nepárne riadky obsahovali poradie koeficientov waveletu, ktoré sa podieľajú na získavaní detailov z údajov. Matica sa najprv aplikuje na pôvodný vektor (celá dĺžka vektora). Potom sa vektor vyhladí a vyberie sa každý druhý prvok vektora a matica sa znova aplikuje. Potom vyhladený polovičný vektor je vyhladený a rozdelený znova na polovice a matica sa znova aplikuje. Tento proces sa opakuje až pokiaľ nezostane malý počet „vyhladených-vyhladených-...“ údajov. Teda, každá matica získava vyššie rozlíšenie údajov v rovnakom čase zvyšných údajov pre vyhladenie. Výstup z DWT pozostáva z „vyhladených-...atď.“ prvkov a všetkých nazbieraných „detailov“ týchto prvkov.

Rýchla waveletová transformácia

Matica DWT nie je vo všeobecnosti riedka, takže v skutočnosti sa stretávame s rovnakou obťažnosťou problému ako sme sa stretli pri Fourierovej transformácii [4]. Riešime to ako pri FFT, rozkladom DWT na súčin veľmi málo riedkych matíc využitím vlastnosti „samo-podobnosti“. Výsledkom je algoritmus, ktorý vyžaduje len zoradenie n operácií pre transformovanie n -prvkového vektora. Toto je „rýchla“ DWT podľa druhu waveletu Mallat a Daubechies.

APLIKÁCIE WAVELETOVEJ TRANSFORMÁCIE

Spracovanie signálov

Z odvodenia waveletovej transformácie ako alternatívy k okienkovej Fourierovej transformácii je jasné, že hlavnou aplikáciou je analýza nestacionárnych signálov.

Ďalšou aplikáciou waveletov je rozklad v numerickej analýze, ako napr. pri riešení parciálnych diferenciálnych rovníc, kde vlastnosť „zoomovania“ dovoľuje veľmi dobré zobrazenie nespojitostí, voči Fourierovej transformácii.

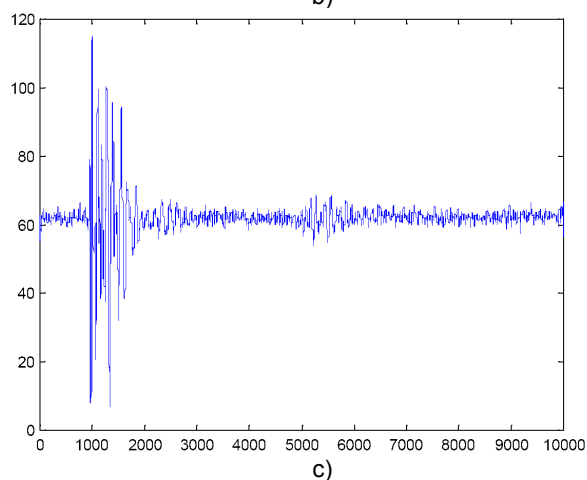
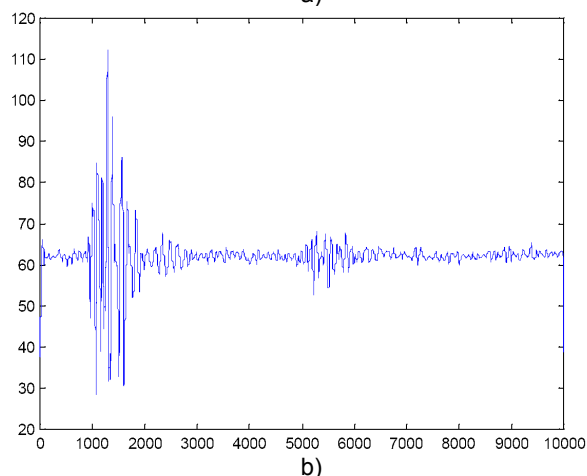
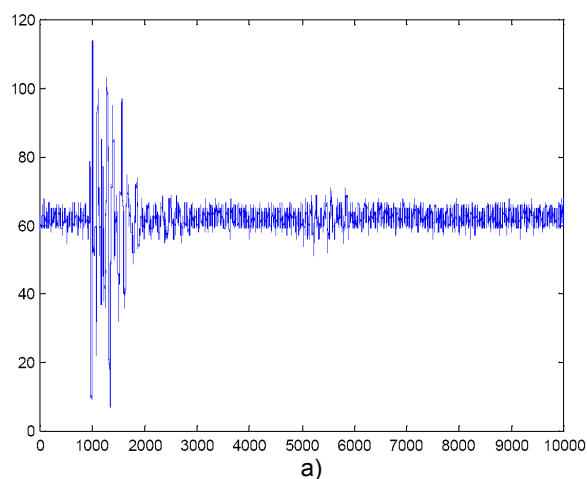
Pomerne veľký potenciál waveletov sa uplatnil v kompresii signálov. Teda diskkrétne waveletové transformácie sú v zásade čiastkovou podskupinou kódovacích systémov a tak uplatnenie našli v kompresii reči a obrázkov.

Odšumenie rušených signálov

V rôznych oblastiach fyziky, ako napríklad v spektroskopii sa objavili problémy s extrahovaním pravého signálu z nekompletného alebo zašumeného signálu. Riešením tohto problému bolo práve použitie metódy, nazvanej ako Metóda waveletového zrážania a prahovania, na ktorej David Donoho pracoval niekoľko rokov [5].

Technika pracuje nasledovným spôsobom. Najprv sa rozloží súbor dát prostredníctvom waveletov, s využitím filtrov, ktoré pôsobia ako priemerovacie filtre a iné, ktoré vytiahnu detaily [6]. Niektoré z výsledných waveletových koeficientov odpovedajú detailom v súbore dát. Ak detaily sú malé, môžu sa zanedbať bez podstatného vplyvu na hlavné vlastnosti dátového súboru. Cieľom prahovania (thresholding) je nastaviť všetky koeficienty na nulu tak, aby

boli menšie ako čiastková prahová hodnota. Tieto koeficienty sú použité v inverznej waveletovej transformácii pre rekonštrukciu súboru dát. Obrázok 1 ilustruje signál „predtým“ a „potom“ čiastkového výboja vo vysokonapäťovom kábli. Signál je zosilnený, prahovaný a spätne zoslabený. Použitá technika je dôležitým krokom vpred v spracovaní dát, pretože odšumenie je uskutočnené bez vyhladenia ostrých hrán. Výsledkom je „vyčistený“ signál, ktorý ešte stále poskytuje informáciu o dôležitých detailoch.



Obr. 1 Zobrazenie signálu "predtým" a "potom" čiastkového výboja. Pôvodný signál je navrchu a) odšumený signál je v strede b) v spodnej časti c) [7]

Pre zvýšenie presnosti sa môže použiť rozklad waveletu na odstránenie vysokofrekvenčného šumu zo signálu. Postupné aproximácie sa stávajú menej rušivé ako keď sa odfiltruje vysokofrekvenčný signál. Teda, poskytuje

jednoduchú metódu na odšumenie signálu. Obrázok 1b znázorňuje odšumený signál použitím 5-stupňovej aproximácie a waveletom Daubechies db3. V porovnaní s pôvodným signálom na obr. 1a, je oveľa čistejší a odrazené impulzy je možné jasne vidieť. Meraný odrazený čas odpovedá dvojnásobku dĺžky kábla. Z obrázka je vidieť, že chyba je skôr v zakončení kábla ako vo vnútri kábla [7].

Jednou nevýhodou tejto metódy je, že sa stratia rýchlo sa meniace rysy pôvodného signálu. Vyhladzovací proces je možné pozorovať v čele vlny na obr. 1b. Toto môže znížiť presnosť časového oneskorenia medzi prvým impulzom a jeho odrazom. Vhodnou alternatívou pre vyriešenie tohto problému je technika spomínaná vyššie, tzv. prahovanie, pomocou ktorej sú detaily vyradené len ak ich amplitúda prekračuje určitú hranicu. Princíp spočíva vo vytvorení vektorov detailov rozkladu waveletu, výberom správnych koeficientov prahovania a rekonštrukciou nových signálov s detailmi. Po aplikovaní funkcie prahovania a následne funkcie odšumenia bol získaný priebeh signálu na obr. 1c. Zostáva ešte zaostriť detaily originálneho signálu. Je to možné vylepšiť výberom iného prahovania [7].

Ďalšie aplikácie waveletovej transformácie vo vysokonapäťových procesoch:

- rozpoznávanie rušenia v kvalite dodávky elektrickej energie
- diagnostika porúch v elektromotoroch
- diagnostika porúch nelineárnych analógových obvodov
- monitorovanie častkových výbojov vo vysokonapäťových kábloch
- kompresia obrázkov signálov
- a mnohé ďalšie

ZÁVER

Teória týkajúca sa waveletov je viac-menej vypracovaná matematikmi do jemných detailov. Vylepšenie metódy vyžaduje zovšeobecnenie a rozšírenie waveletov o rôzne waveletové techniky.

Jednou z aplikácií jej využitia je odšumenie rušivých signálov vo vysokonapäťovej technike, ku ktorým dochádza pri meraní rôznych fyzikálnych veličín [8]. Preto je jednou z volieb medzi alternatívami pri vyhodnocovaní signálov.

Literatúra

- [1] Graps, A.L.: *An Introduction to Wavelets*. IEEE Computational Sciences and Engineering. Volume 2. Number 2. Summer 1995, pp 50-61.
- [2] Daubechies, I.: *Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets*. Comm. Pure Appl. Math. Vol. 41, 1988. pp. 906-966.
- [3] Press, W. et al.: *Numerical Recipes in Fortran*. Cambridge University Press. New York. 1992. pp. 498-499, 584-602.
- [4] Wickerhauser, V.: *Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software*. AK Peters. Boston. 1994. pp. 213-214, 237, 273-274, 387.
- [5] Donoho, D.: *Nonlinear Wavelet Methods for Recovery of Signals, Densities, and Spectra from Indirect and Noisy Data*. Different Perspectives on Wavelets. Proceeding of Symposia in Applied Mathematics. Vol. 47. I. Daubechies ed. Amer. Math. Soc. Providence, R.I., 1993. pp. 173-205.
- [6] Vidakovic, B., Muller, P.: *Wavelets for Kids*. 1994. unpublished. Part One, and Part Two.
- [7] Phung, B. T., Liu, Z. Z., Blackburn, T. R., James, R. E.: *Wavelet Transform Analysis of Partial Discharge Signals*. 1999. in Proc. of AUPEC/EECON eds., Sept.26-29. Darwin. Australia. Northern Territory. Australia. pp. 275 – 280
- [8] Cimbala R., Kolcunová I., Kršňák I.: Current Response of Insulation Systems Based on ReMica Materials and Accelerated Thermal Degradation, Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering., Vol.3, No.1 2004, str. 23-27. ISSN 1682-0053

Táto práca vznikla za podpory Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu APVV-20-006005

Autor: Dušan Medved', Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: Dusan.Medved@tuke.sk

Bystrík Dolník

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

Nedeštruktívna diagnostika vn zvodičov prepätia

Abstrakt. Z hľadiska elektromagnetickej kompatibility (EMC) a nepretržitej dodávky elektrickej energie k odberateľovi treba zisťovať prevádzkový stav zvodičov prepätia. Cieľom je získať informácie, na základe ktorých možno rozhodnúť o tom, či možno alebo nemožno ponechať zvodič prepätia naďalej v prevádzke. Na nedeštruktívne zisťovanie stavu zvodičov prepätia existujú známe metódy a postupy. V článku sa pojednáva o možných priebežných nedeštruktívnych diagnostických skúškach vn zvodičov prepätia. Pozornosť je sústredená najmä na skúšobné metódy a postupy získané z experimentálnych meraní, ktoré nie sú náročné na prístrojové vybavenie.

Abstract. Know of about operating condition of the ZnO surge arrester is very important from the electromagnetic compatibility and continuous electric power supply point of view. The purpose consist in information gaining which can determine on next operating of the surge arrester. Known methods exists for the non-destructive detection of the surge arrester behaviour. In this article possible continuous non-destructive diagnostic tests performed on the high voltage surge arresters are discussed. Attention is mainly centered on the test methods and procedures obtained from experimental measurements with relatively simple equipments. (**Non-destructive Diagnostic of the High Voltage Surge Arresters**).

Kľúčové slová: nedeštruktívna diagnostika, zvodič prepätia, ZnO varistor, zvodový prúd, činiteľ dielektrických strát.

Keywords: non-destructive diagnostics, surge arrester, ZnO varistor, leakage current, power loss factor.

Úvod

Pripájaním elektroenergetických zariadení do elektrizačnej sústavy vznikali problémy, ktoré sa týkali odolnosti izolácie týchto zariadení voči účinkom elektrického, tepelného a mechanického namáhania [1] a prepätí. Počas prevádzky elektrické zariadenia sú trvale namáhané menovitým napätím, na ktoré boli navrhované.

Konštruktéri a prevádzkovatelia snažia sa znižovať úroveň izolačných hladín elektrických zariadení, čím sa však zvyšujú požiadavky na prepäťové ochrany, ktoré musia odolávať účinkom všetkých druhov namáhání vyskytujúcich sa počas prevádzky. Na prepäťové ochrany pôsobí elektrické napätie (trvalým prevádzkovým, impulzným atmosférickým, resp. spínacím a pod.), a navyše aj neelektrické degradačné činitele, napr. klimatické podmienky, nadmorská výška, ročné obdobie, znečistenie lokality a pod.

Vývoj vn zvodičov prepätia, z hľadiska konštrukčného, prešiel od jednoduchej konštrukcie k zložitejšej s postupným prechodom na relatívne jednoduchú konštrukciu. V súčasnosti je najrozšírenejšia prepäťová ochrana pre vn siete zvodič prepätia vyrobený na báze oxidov kovov (obmedzovač prepätia).

Energetické podniky v 90. rokoch minulého storočia inštalovali hromadne obmedzovače prepätia do vn sietí. Na trhu boli obmedzovače prepätia s vonkajším plášťom vyrobeným z porcelánu (elektrotechnický porcelán) alebo z plastickej hmoty – zosieťovaný polyetylén, neskôr na báze silikónu.

Predpokladala sa takmer nulová poruchovosť a niektorí zástupcovia firiem vyrábajúcich obmedzovače prepätia tvrdili, že diagnostika obmedzovačov prepätia nie je potrebná. Avšak po uplynutí niekoľkých rokov ukázalo sa, po analýzach poškodených obmedzovačov prepätia, že dochádza k poruchám obmedzovačov prepätia, pričom hlavná príčina porúch bola v nesprávnom dimenzovaní vn obmedzovača (hlavne v prvých rokoch inštalovania), neskôr boli poruchy označované ako neznáma príčina [2].

Príčiny porúch obmedzovačov prepätia

Určiť poruchu vn zvodiča prepätia nie je triviálna záležitosť, pretože konštrukčne je zložený z elektrických a mechanických častí.

Elektrická časť je zostavená z nelineárnych rezistorov na báze oxidov kovov, ktoré sú radené sériovo, mechanická časť zasa z vonkajšieho plášťa a prírub, pričom vonkajší plášť môže byť vyrobený alebo z porcelánu alebo z plastickej hmoty. Vonkajší plášť vyrobený z plastickej hmoty nezabezpečuje však požadovanú mechanickú pevnosť, preto sa používajú prídavné izolačné materiály, ktoré stĺpec sériovo radených varistorov spevňujú. Podľa konštrukcie triedia sa obmedzovače prepätia do troch hlavných skupín: otvorená (klietková) konštrukcia, zatvorená konštrukcia a rúrkovitá konštrukcia.

Zo skúseností z prevádzky, laboratórnych experimentov a tiež podľa typu konštrukcie obmedzovača prepätia, možno príčiny porúch zvodičov prepätia rozdeliť nasledovne: preťaženie aktívnych prvkov nadmernou energiou, vnikanie vlhkosti, čiastočné výboje, tepelná nestabilita spôsobená silným vonkajším znečistením, dlhotrvajúce prechodné prepätia, poškodenie bloku varistora impulznými prúdmi s následným preťažením varistorov, mechanické preťaženie spôsobujúce následné elektrické poruchy [3].

Prístupy k diagnostike vn zvodičov prepätia

Obmedzovač prepätia je elektrické zariadenie, ktoré obmedzuje prepätie. Okrem zriedkavých prípadov správa sa ako izolátor. Jeho izolačné vlastnosti sú dôležité pre prevádzkovú spoľahlivosť napájacej sústavy.

Zisťovanie elektrických vlastností obmedzovačov prepätia realizuje sa pomocou rôznych skúšobných postupov. Možno použiť alebo postupy uvedené v príslušných normách alebo postupy, ktoré nie sú uvádzané v normách, ale sú osvedčené na stanovenie izolačných vlastností obmedzovača prepätia.

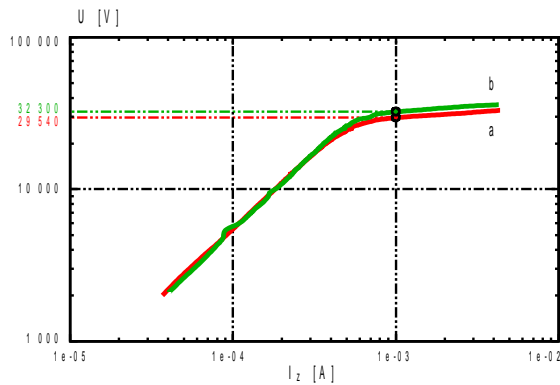
Skúšky a skúšobné postupy podľa noriem

V normách sú uvedené typové, kusové a preberacie skúšky, z ktorých možno vymenovať tieto: skúška overenia zvyškového napätia, skúška odolnosti pri dlhom impulze prúdu, skúška prevádzkovej funkčnosti, skúška tlakového odľahčenia, skúška pri umelom znečistení, skúška čiastočných výbojov, meranie referenčného napätia [4].

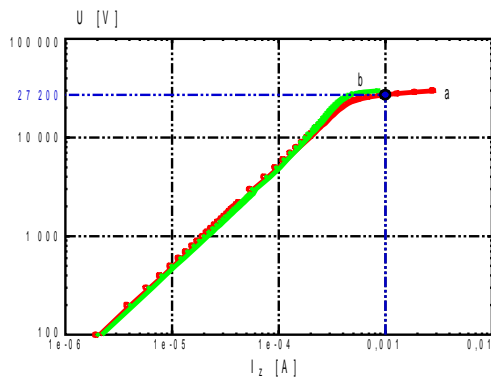
Typové (konštrukčné) skúšky musí výrobca realizovať zakaždým, keď uvádza na trh nový výrobok..

Kusové skúšky realizujú sa na každom vyrobenom obmedzovači prepätia v stanovenom rozsahu..

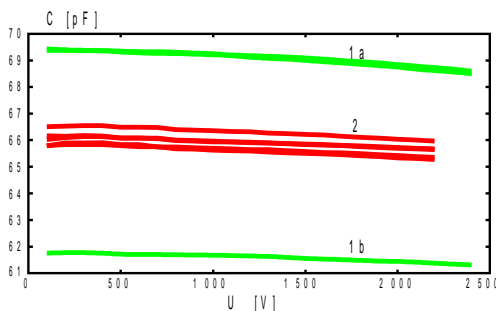
Preberacie skúšky, musia sa vykonať, keď ich odberateľ v kúpnej zmluve požaduje.



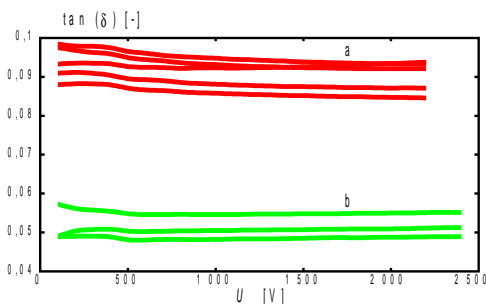
Obr. 1. Porovnanie napäťovo-prúdových charakteristík rovnakého vn obmedzovača prepätia: a – merané bežnými meracími prístrojmi, b – meraná skutočná efektívna hodnota napätia a prúdu



Obr. 2. Napäťovo-prúdová charakteristika vn obmedzovača prepätia od rôznych výrobcov



Obr. 3. Celková kapacita kompletného obmedzovača prepätia



Obr. 4. Činiteľ dielektrických strát kompletného obmedzovača prepätia

Diagnostické metódy a indikátory

Na odhalenie možného zhoršenia alebo zlyhania izolačných vlastností obmedzovača prepätia používajú sa aj rôzne diagnostické metódy a indikátory.

Rozsah diagnostických metód siaha od indikátorov poškodenia a odpájačov na indikovanie úplného zlyhania obmedzovača prepätia, až po prístroje, ktoré sú schopné merať malé odchýlky v činnom unikajúcom prúde alebo činných stratách.

Ako diagnostické indikátory sa používajú: indikátory poruchy, odpájače, počítadlá zaúčinkovania obmedzovača, monitorovacie iskrišká, merania teploty a merania unikajúceho prúdu obmedzovačov prepätia. Podrobné informácie o meraní, vlastnostiach a vyhodnotení unikajúceho prúdu sú v [5].

Avšak vn obmedzovače prepätia sú zväčša prevádzkované bez diagnostických indikátorov.

Stanovenie izolačných vlastností inými postupmi

Izolačný stav obmedzovača prepätia možno stanoviť aj na základe postupov, ktoré normy priamo nevyžadujú. Metódy a postupy môžu byť buď deštrukčné alebo nedeštrukčné. Z nedeštrukčných metód možno uviesť: meranie napäťovo-prúdovej charakteristiky, resp. jedného dohodnutého bodu na napäťovo-prúdovej charakteristike, meranie referenčného napätia, meranie činiteľa dielektrických strát a kapacity v závislosti od napätia. Pozornosť treba venovať meraniu zvodového prúdu a jeho kmitočtovej analýze.

Okrem toho realizovali sa experimentálne merania absorpčného a resorpčného prúdu a zotaveného napätia na ZnO varistoroch [6].

Nedeštrukčné metódy

Ako už bolo spomenuté vyššie, na zisťovanie izolačných vlastností obmedzovača prepätia možno použiť niektorú nedeštrukčnú metódu. Tuná spomenieme len niektoré.

Napäťovo-prúdová charakteristika

Pomerne jednoduchá metóda je meranie napäťovo-prúdovej charakteristiky. Túto metódu možno realizovať alebo jednosmerným napätím alebo striedavým napätím.

Pri meraní striedavým napätím treba brať do úvahy tú skutočnosť, že zvodový prúd je deformovaný vyššími harmonickými. Merať efektívnu hodnotu možno alebo priamo prístrojom merajúcim skutočnú efektívnu hodnotu alebo výpočtom podľa rovnice

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_n^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^n U_i^2} \quad (1)$$

kde: U – efektívna hodnota periodického (neharmonického) napätia v ustálenom stave, U_0 – jednosmerná zložka napätia, U_1 – základná harmonická zložka napätia, U_n – n-tá harmonická zložka napätia.

Amplitúda vyšších harmonických zvodového prúdu možno merať buď priamo prístrojmi merajúce harmonické zložky periodickej veličiny alebo záznamom v časovej oblasti s následnou transformáciou do frekvenčnej oblasti, napr. pomocou Fourierovej transformácie. Amplitúda zvodového prúdu je závislá od veľkosti priloženého napätia, teploty varistorových blokov a od harmonického skreslenia použitého striedavého zdroja napätia, pozri obr. 1.

Treba poznamenať, že teplota varistorových blokov závisí od veľkosti prechádzajúceho prúdu, činných strát a iných vonkajších zdrojov tepla, ako napr. slnečné žiarenie.

Napäťovo-prúdová charakteristika obmedzovačov prepätia od rôznych výrobcov je odlišná, pozri obr. 2. Túto metódu možno zjednodušiť meraním jedného dohodnutého bodu na napäťovo-prúdovej charakteristike, napr. napätie pri prietoku prúdu s amplitúdou 1 mA.

Zmeny napäťovo-prúdovej charakteristiky, resp. zmena polohy dohodnutého bodu na charakteristike poukazuje na zmeny izolačných vlastností obmedzovača prepätia.

Meranie referenčného napätia

Referenčné napätie je vrcholová hodnota napätia priemyselného kmitočtu delená hodnotou $\sqrt{2}$, ktoré sa privedie na obmedzovač prepätia s cieľom dosiahnuť referenčný prúd.

Referenčný prúd obmedzovača prepätia je vrcholová hodnota (vyššia vrcholová hodnota z dvoch polarít, ak je prúd nesymetrický) činnej zložky prúdu priemyselného kmitočtu, použitého na stanovenie referenčného napätia obmedzovača prepätia. Referenčný prúd je zvyčajne v rozsahu od 0,05 mA do 1,0 mA na centimeter štvorcový plochy disku pre jednotlivé obmedzovače prepätia.

Ak je trend vrcholovej hodnoty referenčného napätia stúpajúci, potom treba skúšaný obmedzovač prepätia demontovať a overiť jeho izolačné vlastnosti v skúšobni.

Meranie kapacity a činiteľa dielektrických strát

Meranie kapacity a činiteľa dielektrických strát v závislosti od napätia možno realizovať alebo pomocou špeciálnej meracej techniky alebo osciloskopickými metódami. Pri malých napätíach je harmonické skreslenie zvodového prúdu malé avšak pri trvalom prevádzkovom napätí je harmonické skreslenie zvodového prúdu veľké.

Na obr. 3 je zobrazená závislosť celkovej kapacity kompletného obmedzovača prepätia od priloženého napätia. Namerané hodnoty celkovej kapacity sú v rozsahu od 60 pF do 70 pF. Priebeh celkovej kapacity označené na obr. 3 ako 1a a 1b patria tomu istému typu. Rozdiel v nameraných hodnotách celkovej kapacity je spôsobený poškodením tesnosti vonkajšieho plášťa (priebeh 1b) spôsobené zvýšenou vonkajšou teplotou.

Keďže materiál z ktorého je vyrobený vonkajší plášť obmedzovača prepätia mení svoj objem pri zmenách teploty, po vychladnutí na teplotu okolia (20–25 °C) nepriliehajú už tesne k vnútorným častiam obmedzovača. Priestor medzi vonkajším plášťom a vnútornými časťami ostal vyplnený plynom. Takáto porucha môže byť príčinou vzniku čiastočných výbojov.

Na obr. 4 je zobrazená závislosť činiteľa dielektrických strát od napätia pre obmedzovače prepätia v rozsahu od 0 % do 8 % menovitého napätia. Namerané hodnoty celkového činiteľa dielektrických strát sú v rozsahu od 0,047 9 do 0,098 4. V meranom rozsahu napätí bol činiteľ dielektrických strát od 0,084 6 do 0,098 4 pre typ s porcelánovým plášťom (a) a od 0,047 9 do 0,057 2 pre typ s plášťom z plastickej hmoty (b). Činiteľ dielektrických strát obmedzovača prepätia s porcelánovým plášťom je približne 1,77-krát väčší ako činiteľ dielektrických strát obmedzovača prepätia s plášťom z plastickej hmoty.

Záver

Nedeštrukčnými diagnostickými metódami možno odhaliť zhoršenie izolačných vlastností obmedzovača prepätia. Medzi nedeštrukčné diagnostické metódy patria napr. meranie napäťovo-prúdovej charakteristiky, referenčného napätia, zvodového prúdu a jeho harmonická analýza, meranie činiteľa dielektrických strát a kapacity v závislosti od napätia, ktoré sa realizujú pravidelne v určitých dohodnutých časových intervaloch. Tieto merania možno realizovať aj v prevádzke, niektoré z nich aj pod napätím. Okrem toho treba kontrolovať teplotu obmedzovača počas merania, napr. pomocou termovíznej kamery.

Z praktického hľadiska je vhodné, ak zaznamenané údaje z meraní sa archivujú v databáze, aby bolo možné tieto údaje porovnávať a vyhodnocovať. Výhoda spomínaných metód je v tom, že netreba meraný obmedzovač prepätia demontovať a previezť do skúšobne; jedná sa o pomerne jednoduché merania. Nevýhody sú najmä v tom, že niektoré merania nemožno realizovať pod prevádzkovým napätím, niektoré zasa v zhoršených klimatických podmienkach.

Literatúra

- [1] Cimbala R., Kolcunová I., Kršňák I.: Current Response of Insulation Systems Based on ReMica Materials and Accelerated Thermal Degradation, Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol.3, No.1 2004, str. 23-27. ISSN 1682-0053
- [2] Dolník B.: Harmonická analýza zvodového prúdu obmedzovačov prepätia. Doktorská dizertačná práca. Školiteľ: prof. Ing. K. Marton, DrSc. Košice. TU v Košiciach, 1996.
- [3] Smeets, R. P. P., Barts, H., Van der Linden, W. A., Stenström, L.: Modern ZnO Surge Arresters Under Short-circuit Current Stresses: Test Experiences and Critical Review of the IEC Standard. [on-line]. [cit. 2007-04-11]. In: Proc. Cigré Conference, Paris, France. 30. August – 3. September 2004. Cigré, 2004. EPS-30 [06.11]. Dostupné z: <[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerifyDisplay/D0A372BE1B68812BC1256F1600448A14/\\$File/A3-105.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT245.NSF/VerifyDisplay/D0A372BE1B68812BC1256F1600448A14/$File/A3-105.pdf)>
- [4] STN EN 60099-4 Zvodiče prepätia. Časť 4: Beziskriskové zvodiče prepätia na báze oxidov kovov (obmedzovače prepätia) pre siete so striedavým napätím. August 1993.
- [5] [STN EN 60099-5/A1 Zvodiče prepätia. Časť 5: Odporúčania na voľbu a použitie. Zmena A1. December 1999. Rok vydania 2001.
- [6] Mardira, K. P., Saha, T. K.: Investigation of Diagnostic Techniques for Metal Oxide Surge Arresters. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 12, No. 1, 2006.

Tento príspevok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja, v rámci projektu APVV 20-006005 a VEGA 1/3142/06.

Autori: Bystrík Dolník, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: Bystrik.Dolnik@tuke.sk

Jaroslav Petráš , Dušan Medveď, Jaroslav Džmura

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

Aplikácia metód spektrálnej analýzy pri akustických meraniach čiastkových výbojov

Abstrakt. Tento príspevok sa popisuje aplikáciu Waveletovej transformácie pre signály čiastkových výbojov za predpokladu ich využitia pri vyhodnocovaní časových priebehov týchto signálov. Autori poukazujú aj rozdiel medzi Waveletovou a Fourierovou transformáciou pri spektrálnej analýze signálov čiastkových signálov.

Abstract. This paper describes the application of Waveletovej transform in the area partial discharge signals assuming its usage in waveform recognition and evaluation process. Authors would like to point out the differences between Waveletovej and Fourierovej transform in spectral analysis of partial discharge signals.

Kľúčové slová: čiastkové výboje, fourierova transformácia, waveletova transformácia

Keywords: Partial discharge, Fourier transform, Wavelet transform

Úvod

Čiastkové výboje z hľadiska klasifikácie signálov v časovej oblasti vzhľadom na ich charakter možno považovať za náhodné – stochastické signály, ktorých výskyt v čase je náhodný. Analýza signálov čiastkových výbojov môže byť súčasťou komplexných vyhodnocovacích metód merania čiastkových výbojov v elektroenergetických zariadeniach a môže prispievať najmä k presnejšej lokalizácii čiastkových výbojov a defektnej časti izolačného systému. Na Katedre elektroenergetiky FEI TU Košice boli vykonané laboratórne merania simulovaných čiastkových výbojov akustickou metódou [4]. Výsledky týchto meraní sú podrobované metódam analýzy a vyhodnotenia za účelom detekcie typu čiastkového výboja pomocou signálov akustickej emisie čiastkových výbojov. Bola vypracovaná metóda základného štatistického triedenia nameraných signálov s výsledkom získania šablóny impulzov čiastkových výbojov (ČV) pre skupinu signálov akustickej emisie (AE) ČV získaných za rovnakých podmienok [3]. V priebehu ďalšej analýzy predchádza voľba časovej alebo spektrálnej domény, ako najvhodnejšej z hľadiska analýzy, voľbu vhodnej metódy vyhodnocovania. V tomto článku je poukázané na použitie Waveletovej a Fourierovej transformácie pri spektrálnej analýze signálov akustickej emisie ČV.

Fourierova transformácia ako nástroj spektrálnej analýzy

Transformácie vo všeobecnosti sú vhodným nástrojom na získavanie detailnejších informácií o signále. Medzi najčastejšie využívané transformácie patrí Fourierova transformácia, pomocou ktorej je možné zobrazit' spektrálny obsah signálu reprezentovaného v časovej doméne svojím priebehom.

Fourierova transformácia (FT) je zovšeobecnením komplexného Fourierovho radu. Fourierov rad je rozšírením periodickej funkcie $f(x)$ na nekonečný súčet sínusov a kosínusov, využívajúc ortogonalitu týchto funkcií. Výpočet a štúdium Fourierovho radu je známy ako harmonická analýza funkcie, a je dobre použiteľná na rozklad ľubovoľnej periodickej funkcie na jednoduché časti, ktoré sa dajú jednoducho riešiť, následne získať riešenie celkového problému alebo jeho aproximáciu

Nech $f(x)$ je spojitá integrovateľná funkcia reálnej premennej x . Fourierovu transformáciu funkcie $f(x)$ definujeme, ako

$$F(k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot e^{-i2\pi kx} \cdot dx$$

Nech $F(k)$ je integrovateľná funkcia, potom pre inverznú Fourierovu transformáciu platí:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(k) \cdot e^{i2\pi kx} \cdot dx$$

Výsledkom Fourierovej transformácie (FT), v praxi často realizovanej vo forme diskretnej FT alebo rýchlej FT (FFT) je amplitúdová resp. fázová frekvenčná charakteristika, ktorá dáva prehľad o obsahu jednotlivých harmonických frekvenčných zložiek v pôvodnom časovom priebehu signálu AE ČV. Nevýhodou tejto transformácie je, že neposkytuje informáciu o časovom rozložení jednotlivých harmonických frekvenčných zložiek signálu. V prípade nestacionárnych signálov, akými sú aj impulzy akustickej emisie ČV je však táto informácia dôležitá z hľadiska ďalšej analýzy, napr. pri rozpoznávaní impulzov akustických vln odrazených od prekážok v izolačnom systéme. Je preto vhodnejšie využit' transformáciu, ktorá okrem rozkladu na jednotlivé spektrálne zložky zachováva aj informáciu o čase výskytu frekvenčných zložiek v rámci časového priebehu impulzu.

Waveletova transformácia

Problém neurčitosti časového rozloženia spektrálnych zložiek signálu ČV vyplýva z fyzikálneho princípu – Heisenbergovho princípu neurčitosti: buď sa získa rozklad spektrálnych zložiek s vysokým rozlíšením vo frekvencii, ale s nízkym časovým rozlíšením, alebo je možné presnejšie lokalizovať v čase jednotlivé frekvencie, ale s nízkym frekvenčným rozlíšením. Riešením je MRA – Multiresolution Analysis: rôzne frekvenčné zložky signálu sú analyzované s rôznym časovým rozlíšením. Takýto prístup je zvlášť vhodný v prípade nestacionárnych signálov AE ČV.

Východiskom k takémuto riešeniu môže byť Krátkodobá Fourierova transformácia (Short Time Fourier Transform - STFT). V prípade STFT je signál rozdelený na časovo

krátko trvajúce segmenty, o ktorých je možné predpokladať, že v rámci nich je analyzovaný signál stacionárny. Pre tento účel sa zavádza funkcia okna "w". Šírka tohto okna je rovnaká ako trvanie segmentu signálu, ktorý je stacionárny. Ak ako oknovú funkciu zvolíme funkciu špeciálneho tvaru „vlnky – wavelet-u“, ktorá má konečný definičný obor, potom spojitá Waveletová transformácia funkcie $x(t)$ je definovaná nasledovne:

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \Psi_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \Psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt$$

kde $x(t)$ je časový priebeh analyzovaného signálu, t je čas.

Transformovaný signál CWT je funkciou 2 premenných, τ a s , funkcia $\psi(t)$ je transformujúca funkcia nazývaná materská Waveletová funkcia (wavelet znamená vlnka), t je čas. Je známy veľký počet funkcií vhodných pre voľbu Waveletovej funkcie určenej pre analýzu nestacionárnych signálov. Vychádzajúc z princípov Krátkodobej Fourierovej transformácie je transformačná funkcia - Wavelet s „krátkodobým“ priebehom posúvaná po časovej osi, čo korešponduje s časovou informáciou v transformovanej doméne a parametrom translácie τ . Waveletová funkcia je potom násobená priebehom analyzovanej funkcie a po integrácii a energetickej normalizácii je vypočítaný koeficient pre daný časový posuv. Tento postup je opakovaný pre ďalšie hodnoty parametra s . Premenná s zodpovedá škálovaciemu faktoru transformačnej funkcie, takže vlnka používaná ako transformačný signál mení svoju šírku, dochádza ku kontrakcii alebo k dilatácii Waveletovej funkcie v závislosti od hodnoty parametra s .

Grafickým zobrazením transformovanej funkcie dvoch premenných v rovine translácia-škála môže byť obrázok s viac alebo menej jasnými bodmi. Jas jednotlivých bodov zodpovedá vypočítanému koeficientu spektrálnej zložky pôvodného signálu v určitej translácii τ s určitou škálou zložky, ktorá korešponduje s frekvenciou.

Porovnanie spektier a spôsobov transformácie

Na obrázkoch 1 a 2 sú zobrazené časové priebehy signálov akustickej emisie čiastkových výbojov (obr. 1 a 2 vľavo), ich amplitúdová frekvenčná charakteristika získaná pomocou Fourierovej transformácie, (obr. 1 a 2 vpravo) a graf Waveletovej transformácie tohto signálu (obr. 3).

Priebehy boli získané v laboratóriu za podmienok uvedených v [4].

Pri porovnaní FT ČV a šumového signálu je zrejmy rozdiel v obsahu spektrálnych zložiek. Amplitúdová frekvenčná charakteristika nám však už neumožňuje zistiť, aké bolo časové rozloženie zložiek. Graf Waveletovej transformácie dáva navyše informáciu o časovom rozložení jednotlivých spektrálnych zložiek (časová os b v grafe). Je možné tiež rozlíšiť odrazené impulzy ČV.

V prípade šumového signálu vidno, že energia je rovnomernejšie rozložená v čase, čo vyplýva z rozdielu medzi jednorázovým impulzom ČV spolu s jeho odrazmi a šumom, ktorého signál sa skladá z viacerých energeticky podobných, menších, časovo posunutých impulzov, aj po stránke spektrálneho zloženia sú oba signály iba málo odlišné.

Záver

V tomto príspevku sme sa snažili ukázať použitie veľmi užitočného nástroja – Waveletovej transformácie pre analýzu nestacionárnych priebehov akými sú aj priebehy signálov akustickej emisie čiastkových výbojov.

Táto práca vznikla v rámci riešenia projektu APVV 20-006005 a VEGA 1/3142/06.

Literatúra

- [1] Skubis J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urzadzen elektroenergetycznych, Opole (1998).
- [2] Prchal J.: Signály a soustavy, SNTL, Praha 1987
- [3] 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.
- [4] Petráš, J.: Akustická emisia čiastkových výbojov, ELEN 2006, ČVUT, Praha, 18. - 19. 9. 2006, ISBN 80-239-3565-8.
- [5] The Wavelet Tutorial, <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTpart3.html>

Autori

Ing. Jaroslav Petráš; Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita Košice, Mäsiarska 74, 041 20 Košice; e-mail: jaroslav.petras@tuke.sk

Ing. Dušan Medved; Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita Košice, Mäsiarska 74, 041 20 Košice; e-mail: dušan.medved@tuke.sk

Ing. Jaroslav Džmura PhD.; Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita Košice, Mäsiarska 74, 041 20 Košice; e-mail: jaroslav.dzmura@tuke.sk

Miroslav Bánes, František Koval'

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

Čiastkové výboje a ich vplyv na PE izoláciu

Abstrakt. Tento článok popisuje vplyv čiastkových výbojov na izoláciu. Popisuje fyzikálny rozbor vzniku a rozvoja elektrických stromčekov. Ďalej sa v tomto článku popisuje meracia metóda a výroba polyetylénovej vzorky. Poslednou témou je experiment pri ktorom sa namáha PE vzorka, a výboje sa zaznamenávajú až do prerazu izolačného materiálu.

Abstract. This article described effect of partial discharges for insulation. Article described analysis inception and growth of electrical trees. Next is described measuring method and production of PE pattern. Last theme described stress of PE pattern and record of discharge until breakdown of insulation material. (**Partial discharges and their effect for PE insulation**).

Kľúčové slová: čiastkové výboje, elektrický stromček, polyetylénová izolácia.

Keywords: Partial discharges, electrical tree, PE insulation.

1. Úvod

V dnešnej dobe nie je nutné nikoho presvedčať o užitočnosti diagnostiky elektrických strojov točivých aj netočivých. Izolačné systémy jednotlivých elektrických strojov a zariadení sú jednou zo zložiek ovplyvňujúcich celkovú spoľahlivosť elektrického zariadenia (elektrárni, rozvodní,...). Diagnostikou vysokonapäťových izolačných systémov sa zaoberá veľa pracovísk a sú vytvorené komplexné systémy pre diagnostické merania konkrétnych celkov. Pre správne pochopenie procesov prebiehajúcich v izolácii je nevyhnutné vypracovať teóriu rozrušenia dielektrík s ohľadom na ich molekulovú štruktúru pri krátkodobom a dlhodobom účinku napätia, poznať štatistické zákonitosti výboja v pevnej izolácii, sledovať správanie tenkých vrstiev dielektrík v elektrických poliach, ktoré vznikajú tesne pred prerazom. Potrebujeme poznať mechanizmus vzniku stromčekovitých útvarov postupne rastúcich od jednej elektródy k druhej elektróde a vedúcich k prerazu izolácie.

2. Vplyv čiastkových výbojov na izoláciu

Pre všetky druhy vnútorných čiastkových výbojov je charakteristické, že majú deštruktívny vplyv na izolačný systém (izolačné médium je prevažne pevné alebo kvapalné médium). Toto spôsobuje skracovanie životnosti izolantu a znižovanie jeho elektrickej pevnosti, až na hranicu prerazu. Vonkajšie čiastkové výboje sa prevažne vyskytujú na hranách a malých zakrivených elektródach v plynnom izolante a trvalý deštruktívny vplyv nemajú. [1]

Výboje v izolante môžu mať účinky: elektro – erózívne, chemické a tepelné [1].

- Elektro – erózívne účinky: pokiaľ sa vyvinie v dutinke oblúk, je jeho pravdepodobným následkom vytvorenie vodivej dráhy. Pri vysokých hodnotách intenzity elektrického poľa môže koncentrácia elektrického poľa spôsobiť v tomto mieste čistý elektrický preraz a vodivá dráha sa môže postupne šíriť izolantom. Ničivé účinky majú tiež ióny a elektróny tým, že bombardujú steny dutinky, čím spôsobujú eróziu stien dutinky. Dutinka sa postupne zväčšuje a pri pokračujúcej erózii môže dôjsť k prerazu celého izolantu. [1]
- Chemické účinky: Ak obsahuje dutinka kyslík, výboje v dutinke vytvárajú ozón, ktorý má intenzívne oxidačné účinky. Ozón a oxidy dusíka môžu pri vysokých teplotách vytvárať aj kyselinu dusičnú, ktorá je veľmi agresívna. Chemickú deštrukciu

izolantu spôsobujú aj produkty rozkladu niektorých izolantov pri výbojoch. Z hľadiska možnosti vzniku tepelného prerazu izolantu je veľmi dôležitý fakt, že produkty rozkladu môžu difundovať do pevného izolantu a vytvárať tak vodivejšiu oblasť. [1]

- Tepelné účinky: priamym dôsledkom čiastkových výbojov môže vzniknúť tepelná nestabilita, alebo opakovaným pôsobením čiastkových výbojov sa izolant otepluje a tým klesá hladina napätia tepelného prerazu. [1]

Aj keď sa pri výrobe izolačných materiálov a systémov robí kontrola kvality jednotlivých výrobkov a aj keď sa stále zlepšujú výrobné metódy a technológie, nie je možné zabrániť povrchovým a objemovým nehomogenitám, ktoré môžu byť zdrojom čiastkových výbojov. Čiastkové výboje, aj keď sú relatívne málo energetické, majú, hlavne svojím opakovaním, škodlivý vplyv na izoláciu – skracujú jej životnosť a postupne znižujú jej elektrickú pevnosť až do prerazu izolantu. Obecné je možné považovať čiastkové výboje v pevných, alebo kvapalných izolantoch za nebezpečné a stupeň ich nebezpečenstva závisí od typu materiálu a umiestnenia zdroja výbojovej činnosti. [1] Z tohto pohľadu sú čiastkové výboje vo vonkajšom vzduchovej (atmosférickej) izolácii málo nebezpečné, čiastkové výboje v kábloch sú však veľmi nebezpečné [1].

- Pevné izolanty tvoria hlavnú súčasť izolačného systému, predovšetkým u elektrických strojov točivých a v kábloch. Z hľadiska citlivosti na účinky čiastkových výbojov môžu byť pevné izolanty rozdelené do dvoch základných skupín [1]:

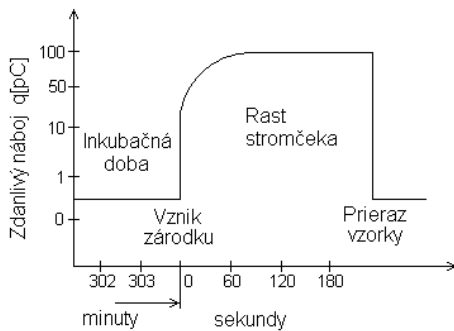
- Materiály ako slúda, porcelán sú voči čiastkovým výbojom veľmi odolné. Ani dlhodobé pôsobenie čiastkových výbojov nespôsobuje na týchto materiáloch podstatné zhoršenie ich izolačných vlastností. Navyše sú tieto materiály aj veľmi odolné voči teplotám.
- Vysokomolekulárne plasty, ako polyetylén (PE), zosieťovaný polyetylén (XPE), polytetrafluoretylen (PTFE, teflón) sú na čiastkové výboje veľmi citlivé. Dlhodobé pôsobenie čiastkových výbojov v týchto izolantoch vedie až ku prerazu izolácie. V súčasnej dobe sa venuje veľká pozornosť tzv. elektrickým stromčekom, ktoré sa vyskytujú v silne namáhaných jednovrstvových izolantoch, napr. v kábloch.

3. Fyzikálny rozbor vzniku a rozvoja elektrických stromčekov

Elektrický stromček je dráha, vytvorená elektricky v tuhých dielektrikách. Pozostáva z dutých kanálov v tvare stromčeka, vytvorených pomocou opakovaného čiastkového prerazu dielektrika, objavujúceho sa lokálne v oblastiach veľmi silného elektrického poľa [2]. Stromček môže byť definovaný, ako proces rastu takýchto dutých kanálov. Iniciácia stromčeka si vyžaduje po aplikácii striedavého napätia určitý charakteristický čas. Ten bol nazvaný inkubačnou dobou stromčeka, ktorá zvyčajne klesá pri narastajúcom aplikovanom napätí, vid. obr.1. [2]

Počas inkubačnej doby nie je možné registrovať ani čiastkové výboje, ani vizuálne zmeny pri mikroskopickom pozorovaní v mieste najväčšieho namáhania vzorky elektrickým poľom [2]. Po tejto inkubačnej dobe dochádza k iniciácii elektrického stromčeka a je možné kvantitatívne meraním dokázať existenciu čiastkových výbojov.

Pri pôsobení intenzity elektrického poľa počas inkubačnej doby dochádza ku kumulatívnym procesom, ktoré predchádzajú a zároveň pripravujú iniciáciu stromčeka, vid. obr.1.



Obr.1: Rast elektrického stromčeka

Sú možné dva hlavné druhy procesov [2]. Prvý je ten, že injektované nosiče nábojov sú zachytené blízko hrotu ihly v usporiadaní hrot - doska a vytvárajú priestorový náboj, čím zosilňujú pole. Tento priestorový náboj môže snáď vysvetliť skutočnosť, že iniciácia stromčeka je odštartovaná prvým kladným impulzom čiastkového výboja. [2]

Druhý je proces oxidácie a tvorby mikrodier, iniciovaný napadnutím reťazcov polyméru injektovanými nábojovými nosičmi o vysokej energii [3]. Výmena náboja sa uskutočňuje medzi elektródou a izolantom. Výmena sa môže uskutočniť priamo medzi nimi, alebo prostredníctvom plynej fázy, ktorej existencia sa niekedy predpokladá. Preto fázové rozhranie je jedným z najdôležitejších činiteľov, ktoré podmieňujú vznik stromčekov. Je niekoľko činiteľov, ovplyvňujúcich výmenu náboja medzi dvomi materiálmi, na ktoré pôsobí vysoká intenzita elektrického poľa. Najdôležitejšie sa zdajú byť [2]:

- výstupná práca kovu elektródy,
- možná existencia plynov medzi dvomi materiálmi.

Elektróny, ktoré sú injektované, alebo emitované z elektródy a extrahované späť, majú možnosť nadobudnúť dostatočnú energiu, aby mohli atakovať polymérne reťazce, iniciovať chemickú reakciu, prípadne spôsobiť degradáciu polyméru.[2]

Degradácia môže viesť k utvoreniu veľmi úzkeho kanála. Ak sa kanál dostatočne zväčší natoľko, že môžu začať výboje v plyne, stromček začne rásť.

Stojí za povšimnutie, že v dielektriku sa stromček nevytvára počas prvej štvrtiny cyklu aplikovaného napätia, ale po niekoľkých tisíckach cyklov. [2] Vznik stromčeka, vytvoreného jedným impulzným napätím je vylúčený. Experimentálne údaje tak rýchlo získané pre iniciáciu

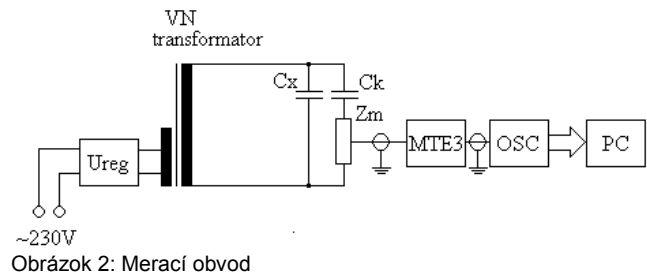
stromčeka v skutočnosti však odhaľujú len relatívne krátku periódu, napr. od 10 s do 10 dní. [2] Neodporúča sa aplikovať model, navrhnutý v tej to časovej oblasti pre javy starnutia v dobách od 1 do 10 rokov.

Charakter opakovaných kladných a záporných cyklov striedavého napätia musí byť kumulatívny. Procesy reprezentujúce takýto kumulatívny charakter môžu byť klasifikované nasledovne [3]:

- injektovanie a extrahovanie nábojov
- elektrostriekčná sila
- výboj v dutinke
- tepelné starnutie.

4. Popis meracej metódy a výroba vzorky

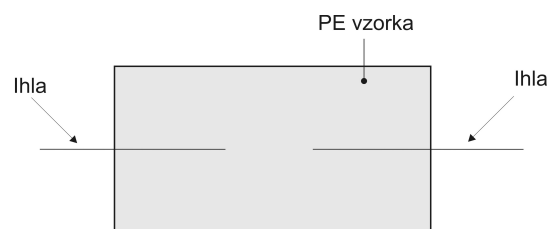
Výbojové deje odohrávajúce sa v skúšanom objekte sa navonok prejavujú prúdovými impulzmi, ktoré sa superponujú na kapacitné prúdy uzatvárajúci sa meracím obvodom. Tieto ekvivalentné prúdové pulzy sú teda merateľnou odozvou sledovaných výbojových procesov a ich zaznamenanie vo vyhovujúcom meracom obvode sa dá vyjadriť veľkosťou čiastočných výbojov. Na nasledujúcom obr. č.2 je schematicky zachytený obvod umožňujúci meranie impulzných prúdov čiastočných výbojov. Obvod bol napájaný striedavým napájacím napätím 230V. Napätie sme zvyšovali cez regulátor napätia a vysokonapäťový transformátor. Prúdový impulz čiastkových výbojov bol spracovaný cez väzobný kondenzátor C_x , meraciu impedanciu Z_m a zosilňovač čiastkových výbojov MTE-3 na napätový signál. Na MTE-3 bol pripojený osciloskop, ktorý zaznamenával signály čiastkových výbojov a následne posielal do počítača, kde boli spracované a vyhodnotené. Osciloskop, Lite runner, LP 142, 100 MHz, 500 MS/s, pracuje aj ako rýchly analógovo – digitálny prevodník.



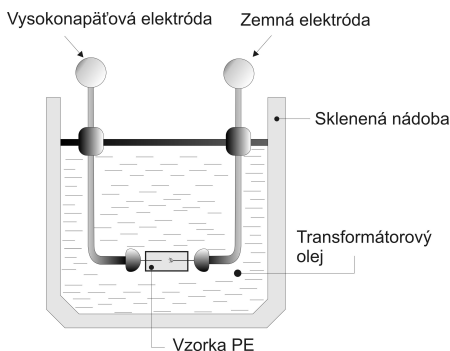
Obrázok 2: Merací obvod

Meracie vzorky boli zhotovené z polyetylénu. Výroba vzoriek spočívala v tom, že bralen vo forme granulátu, bol nasypávaný do formy, kde sa potom zohrial s ihlami na 135 °C. Pri tejto teplote sa granulát zmenil na tekutú formu a vytvorila sa PE vzorka, ktorú môžeme vidieť na obrázku 3. Medzi ihlami bolo vzdialenosť 1,5mm.

Ďalšou závažnou úlohou bolo umiestnenie skúšobných vzoriek, do prostredia v ktorom, by nevznikali rušivé výboje, ako napríklad koróna. Preto sme sa rozhodli, že vzorky umiestnime do sklenenej nádoby v ktorej bude transformátorový olej. Táto nádoba aj spolu so vzorkou je zobrazená na obrázku 4.



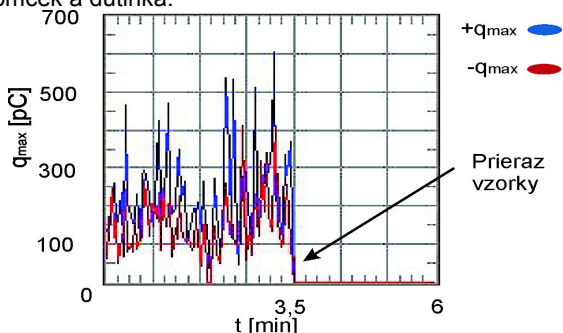
Obrázok 3: PE vzorka



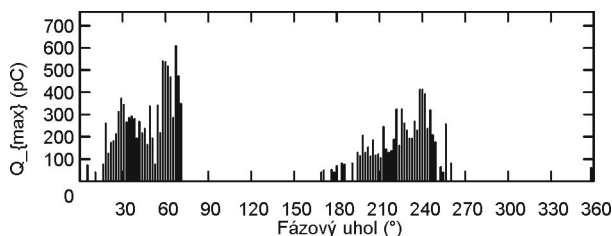
Obrázok 4: Nádoba so vzorkou

5. Experiment

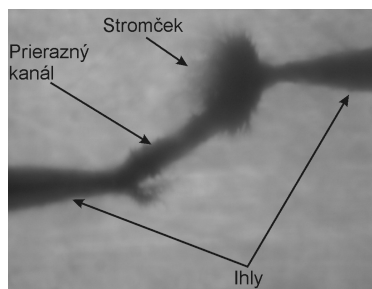
V tomto experimente bol zaznamenaný a pod mikroskopom vyfotený prierez polyetylénovej vzorky. PE vzorku sme namáhali postupne napätím od 5kV, až kým nezačali vznikať čiastkové výboje, čiže do napätia U_{poc} . Napätie sme zvyšovali krokom 1kV. Na každý kV pripadal čas namáhania 30 minút. Pri napätí 19kV sa nám objavili prvé výboje o hodnote $+q_{max} = 300pC$ a $-q_{max} = 300pC$, ako to môžeme vidieť na obrázku 5. Na tomto obrázku je tiež zaznamenaná výbojová činnosť, až do prierazu. Maximálny náboj pri tomto namáhaní vzorky bol $+q_{max} = 605pC$ a náboj $-q_{max}$ dosahoval hodnotu 430pC. Táto zaznamenaná výbojová činnosť trvala 3,5 minúty. Za tento čas sa vyvinul elektrický stromček, ktorý potom prerástol do prierazu. Na obrázku 7 je vyfotená PE vzorka, kde je zobrazený elektrický stromček, tzv. BUSCH – LIKE a prierazný kanál. Na obrázku 6 je zaznamenaný maximálny náboj q_{max} v závislosti na fázovom uhle. Ako si môžeme všimnúť na tomto obrázku sa čiastkové výboje pohybujú vo fázovom uhle v kladnej polvine od 0° do 90° a v zápornej polvine sa pohybujú čiastkové výboje od 180° až do 270° , čo je typické pre vnútorné čiastkové výboje, medzi ktoré patria elektrický stromček a dutinka.



Obr.5: Zaznamenaná výbojová činnosť, až do prierazu



Obr.6: Fázové rozloženie maximálnych hodnôt zdanlivého náboja



Obr. 7: Fotografia PE vzorky s elektrickým stromčekom a s prierazným kanálom

6. Záver

V tomto článku sme sa zamerali na vplyv čiastkových výbojov na polyetylénovú izoláciu, nakoľko sa tento izolant aplikuje v káblovej technike. Ako si môžeme všimnúť z experimentu, tak čiastkové výboje majú na izoláciu degradačné účinky, preto sú výpovedeschopnou veličinou pri meraní izolačných materiálov. Z tohto hľadiska je potrebné a výhodné vykonávať pravidelné merania izolácie elektrických zariadení. Týmto spôsobom vieme posúdiť stupeň degradácie celého systému a včas reagovať na prípadné nežiaduce zmeny. Tu sa vytvára priestor na vývoj a zdokonaľovanie nových metód na princípe on-line monitoringu. Získané výsledky nám môžu pomôcť pri vyhodnocovaní neznámych porúch v prevádzkových podmienkach.

Literatúra

- [1] Záliš K.: Částečné výboje v izolačných systémoch elektrických strojů. ISBN 80-200-1358-X. Praha 2005
- [2] Czako, Š.: Analýza vnútornej výbojovej činnosti v izolačných systémoch. Košice 2006
- [3] Kolcunová, I.: Výskum predprierazného stavu vysokonapäťovej izolácie metódou čiastkových výbojov, Kandidátska dizertačná práca, Košice 1993
- [4] Kolcunová, I., Kurimský, J.: Čiastkové výboje v izolačnom systéme XPE káblov. In Zborník 16. medzinárodnej konferencie, DISEE 2006. STU v Bratislave, 12.-14. 9. 2006, 92-95, Častá – Píla, ISBN 80-227-2470-X

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.

Autori:

Ing. Miroslav Banes, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: miroslav.banes@tuke.sk

Ing. František Koval, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: frantisek.koval@tuke.sk

František Koval', Miroslav Bánes

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

Izolačný systém transformátorov

Abstrakt. Tento článok popisuje izolačný systém transformátorov, parametre ktoré ovplyvňujú kvalitu tohto izolačného systému, druhy plynov ktoré sa vytvárajú vplyvom tepelného namáhania transformátorového oleja a spôsoby monitorovania týchto škodlivých parametrov v oleji.

Abstract. This article describe transformers insulation systems, parameters which influence to quality of insulation system, gas types which are creating due to thermal stress of transformer oil and methods for monitoring of this damaging parameters in oil.

Kľúčové slová: transformátorový olej, rozkladové plyny

Keywords: transformer oil, scanning gases.

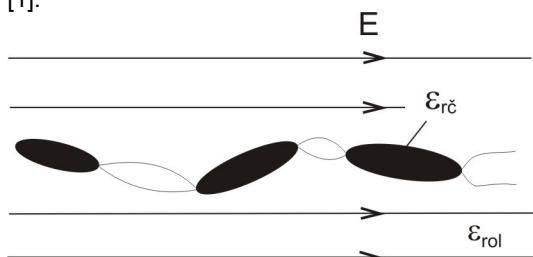
1. Úvod

Výkonové transformátory sú kľúčové zariadenia, ktoré sú určené na prenos a distribúciu elektrickej energie. Transformátorové poruchy majú teda značný ekonomický dopad na prevádzku elektrickej siete. Vzhľadom na neustály nárast prenášaných výkonov musí byť konštrukcia transformátorov stále zložitejšia a odolnejšia voči poruchám. So zvyšovaním zaťažovacieho prúdu sa zvyšuje aj teplota aktívnych častí. Po prekročení určitej hraničnej teploty sa podstatne urýchlí proces starnutia izolácie aktívnych častí a tým sa zníži ich životnosť a spoľahlivosť.

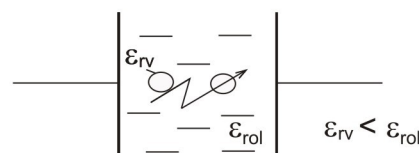
2. Parametre ovplyvňujúce kvalitu transformátorového oleja

Podstatný vplyv na elektrickú pevnosť izolačnej kvapaliny majú nečistoty, ktoré tvoria s izolačnou kvapalinou koloidnú sústavu. Tieto častice majú väčšinou relatívnu permitivitu väčšiu ako je permitivita oleja ($\epsilon_{rc} > \epsilon_{rol}$), takže potom dochádza k sústreďovaniu siločiar elektrického poľa do cudzích častíc (obr.1a), čím sa priestor medzi elektródami oslabí a dochádza k prerazu [1].

Ak sa nachádza v oleji vzduch, potom prriezna pevnosť vzduchu je približne osemnásobne menšia ako oleja, v dôsledku čoho dochádza ku vzniku ionizácie v plyných dutinkách a ku vzniku častkových výbojov, vedúcich v konečnej fáze k elektrickému prerazu (obr.1b) [1].



a)



b)

Obr.1: Prítomnosť nečistôt (plynu) v izolačnom oleji [1]

3. Druhy plynov vytvárajúcich sa v dôsledku poruchy izolačného systému transformátora

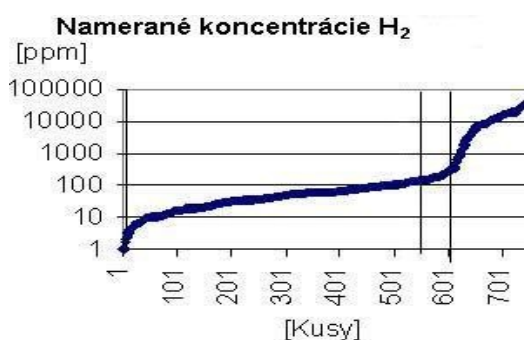
V izolačnom oleji sa môžu rozpúšťať okrem kyslíka, dusíka a oxidu uhoľnatého zo vzduchu aj plyny, ktoré vznikajú vo vnútri transformátora rozkladom izolačnej sústavy následkom prirodzeného starnutia alebo poruchovými dejmi. Tepelné, elektrické alebo kombinované poruchy spôsobujú štiepenie uhľovodíkových reťazcov a tieto pochody sú charakterizované určitým zložením a množstvom rozkladových plynov, ktoré závisia na druhu a dobe trvania poruchy. Charakteristické zložky plynnej zmesi pre rôznu stupeň namáhania sú zobrazené v tab.1.

Výkonný oblúk		Predvýbojové iskry	
olej	olej-papier	olej	olej-papier
C ₂ H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂
H ₂	H ₂	H ₂	H ₂
CH ₄	CH ₄	CH ₄	CH ₄
		C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
		C ₂ H ₈	C ₃ H ₈
	CO	C ₂ H ₄	CH ₄
	CO ₂	C ₃ H ₆	C ₃ H ₆
			CO
			CO ₂
Energeticky chudé zdroje		Čiastkové výboje	
olej	olej-papier	olej	olej-papier
C ₂ H ₄	C ₂ H ₄	H ₂	H ₂
H ₂	H ₂	(CH ₄)	(CH ₄)
CH ₄	CH ₄		CO ₂
C ₂ H ₂	C ₂ H ₂		(CO)
C ₃ H ₈	C ₃ H ₈		
	CO		
	CO ₂		

Tab.1: Druhy plynov, ktoré sa vytvárajú v transformátorovom oleji v závislosti od typu poruchy [2]

Podľa množstva plynu a na základe pomerov jednotlivých zložiek rozpuštených v izolačnom oleji je možné usudzovať o aký druh poruchy sa jedná. Pokiaľ vznikajú veľmi slabé, tepelne nevýrazné čiastkové výboje, kedy sa teplota oleja pohybuje v rozmedzí asi 80 až 120°C, objavuje sa v plyne iba vodík. Vodík vzniká predovšetkým ako produkt štiepenia aromatických uhľovodíkov. Pri teplote 120 až 200°C môžeme indikovať okrem vodíka aj metán a etylén. U teplôt 200 až 500°C (silné čiastkové výboje) je plyn obohatený

o vyššie uhľovodíky s jednoduchou alebo dvojitou väzbou. Pri teplotách nad 500°C (vznik iskry alebo oblúka) vzniká v plyne najširšia paleta uhľovodíkov. K spomínaným plynom sa pridá ešte acetylén poprípade vyššie uhľovodíky s trojitou väzbou alebo uhľovodíky s dvoma a viacerými dvojitými väzbami a diolefiny a polyolefiny. Čím je iskra alebo oblúk výkonnejší, tým je reakčná zmes bohatšia na vodík a nenasýtené uhľovodíky. Pri teplotách nad 1000°C sa zničia všetky viacatómové uhľovodíky a preto je v reakčnej zmesi prítomný len vodík, metán acetylén, poprípade aj elementárny uhlík. Prítomnosť oxidu uhoľnatého signalizuje degradáciu papierovej izolácie [2]. Pri diagnostike transformátorov neexistuje priama súvislosť medzi koncentráciou plynov rozpustených v oleji a hodnotou prierazného napätia. Dominantným plynom u transformátorov býva najčastejšie vodík (H₂). Vodík je zároveň prvým plynom, ktorý sa vytvára pri poruche transformátora. Na obr.1 je znázornený príklad znázorňujúci merania koncentrácie vodíka u 750 transformátorov.



Obr.2: Hodnoty koncentrácií vodíka v transformátorovom oleji meraných na 750 transformátoroch

Priebeh je rozdelený na tri časti do 120 ppm, 120 až 350 ppm a nad 350 ppm. Pri určovaní koncentrácie plynov rozpustených v oleji sa hodnota do 120 ppm považuje s určitou rezervou za stabilnú (dobrý stav). Medzi hodnotu 120 až 350 ppm sú väčšinou zahrnuté transformátory, u ktorých sa koncentrácia vodíka skôr alebo neskôr presunie k vyšším alebo nižším hodnotám a pri koncentrácii asi od 350 ppm nahor môžeme takmer s istotou očakávať ďalší nárast s možnosťou zlyhania izolačného systému. Interval 120 až 350 ppm je teda oblasť, kedy sa vývoj koncentrácie sleduje vzhľadom k jeho predchádzajúcemu stavu.

Rozkladový plyn	Bez závad
vodík [ppm]	do 120
metán [ppm]	do 60
etán [ppm]	do 150
Ohrozený	Kritický stav
120 až 1000	nad 1000
60 až 500	nad 500
150 až 300	nad 300

Tab.2: Kritéria určujúce stav hermetizovaných transformátorov [3]

4. Spôsoby monitorovania vývoja plynov v oleji

Určenie množstva obsahu plynov v izolačnom oleji je možné vykonať buď pomocou pevne zabudovaných prístrojov, alebo prenosnými prístrojmi ako aj prostredníctvom laboratórneho rozboru. Pri odbere vzorky oleja musíme však dbať na to, aby boli dodržané podmienky správneho odberu a nedošlo tak k okysličeniu oleja, k jeho navlhnutiu a pod..

Prenosné prístroje a súpravy sú určené pre testovanie a chemickú analýzu priamo v teréne alebo v laboratóriách. Dnešné prístroje sú plne automatické, napájané z batérií. Merajú koncentráciu rozpustených horľavých plynov na základe odobratej vzorky transformátorového oleja (cca 3 ml). Tieto prístroje možno odporučiť pre doplnenie periodických laboratórnych skúšok a meraní, pri ktorých je potrebné rýchlo overiť podozrenie na vznikajúcu poruchu.

Hlavnou výhodou prenosných prístrojov je, že na meranie parametrov v izolačnom oleji vo viacerých transformátoroch postačuje jeden prístroj zatiaľ čo pevne zabudované systémy musia byť inštalované na každý transformátor zvlášť čo výrazne navyšuje finančné investície na monitorovanie transformátorov. Ich nevýhodou je, že merajú okamžité hodnoty parametrov v oleji. Nezachytávajú deje kedy sa vlhkosť pri nízkej teplote absorbuje do pevnej izolácie a pri zohrievaní sa znovu rozpúšťa v oleji. Pevne zabudované systémy nám poskytujú možnosť historického nadhľadu v akom sa olej nachádzal v minulosti v porovnaní so súčasným stavom a tým nám poskytujú možnosť sledovania a hodnotenia priebehu starnutia. Môžu uchovávať historické záznamy o stave izolačného oleja staré aj niekoľko mesiacov a o prekročení nastavených hodnôt škodlivých parametrov nás okamžite informujú pomocou alarmu a tým znižujú riziko neplánovaného výpadku z prevádzky a zabraňujú, alebo minimalizujú poškodenie transformátora [4].

Literatúra

- [1] K. Marton, J. Banský, K. Kluch, M. Somora: Elektrotechnické materiály, Bratislava, alfa, 1978
- [2] ELDIAG, s.r.o, elektrotechnická diagnostika, Praha, 7/2000,
- [3] ELDIAG, s.r.o, elektrotechnická diagnostika, 1999 - 2006
- [4] F.Kovaľ, Diplomová práca, Obmedzenie údržbárskych zásahov za pomoci diagnostických meraní

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.

Autori:

Ing. František Kovaľ, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: frantisek.koval@tuke.sk

Ing. Miroslav Banes, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: miroslav.banes@tuke.sk

Zoltán Csomos, Juraj Kurimský

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

Modelovanie defektného miesta izolačného systému

Abstrakt. Predmetom príspevku je skúmanie javu čiastkových výbojov v izolačnom systéme pomocou matematického a fyzikálneho modelovania. Je popísaný súčasný stav problematiky, popis, rozdelenie a vznik čiastkových výbojov. Ďalej je pozornosť venovaná matematickému modelovaniu defektného miesta s počítačovou simuláciou. Sú prezentované výsledky experimentálneho overenia na fyzikálnom modeli a zhodnotenú nameranú výsledky porovnaním matematického a fyzikálneho modelu, spracované grafy a odporúčania pre prax.

Kľúčové slová: fyzikálny model, matematický model, modelovanie, analýza, matlab, čiastkové výboje.

Úvod

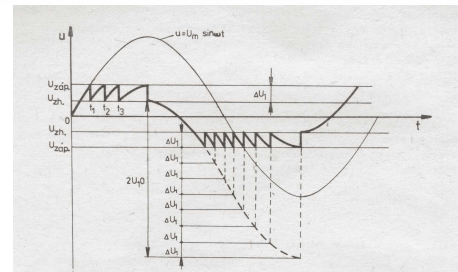
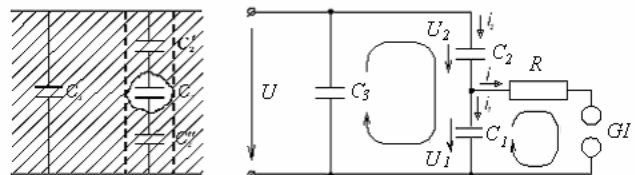
Počas prevádzky stroja, kábla, motorov dochádza k starnutiu izolačného systému elektrického zariadenia, čo vedie k havárii zariadenia a následne k odstaveniu celého zariadenia z prevádzky. Na čiastočné zamedzenie škôd, ktoré vznikajú počas prevádzky zariadenia je potrebné diagnostikovanie. Cieľom diagnostických metód je zabezpečiť čo najdlhšiu životnosť zariadenia, samozrejme pri dodržaní maximálnej hospodárnosti, kvality a spoľahlivosti. V praxi sa vyskytujú poruchové stavy, ktoré izolačný systém neznesie bez následkov na jeho kvalite, zistí sa že parametre izolácie sa zhoršili. Zhoršené parametre izolácie dávajú podnet k vzniku čiastkových výbojov v izolácii.

Na skúmanie čiastkových výbojov sa používa rád metód, ktoré podajú výpovede schopné informácie o stave a kvalite používanej izolácie. Meranie čiastkových výbojov sa dá robiť rôznymi spôsobmi: elektrický a neelektrický. Medzi elektrické metódy patrí on line a off line meranie, a medzi neelektrické patrí: optické, akustické a chemické[6]. Čiastkové výboje sú pre ktorýkoľvek izolačný systém veľmi nebezpečné, na ochranu sa používajú rôzne druhy ochrán ako sú napríklad dielektrické pásy vysokej permitivity, izolácie rôzneho tvaru atď. Neplánované odstávky zariadení spôsobia škody, ktoré niekoľko násobne prevyšujú náklady na údržbu a pravidelné kontroly stavu zariadenia. Jednou z možných diagnostických metód ako overiť kvalitu izolácie je zvýšenie namáhania izolácie priloženým striedavým alebo rázovým napätím. Na včasné zistenie defektu v izolácii sa používajú nedeštruktívne meracie metódy: meranie izolačného odporu pri jednosmernom napätí, zisťovanie činiteľa dielektrických strát a kapacity a meranie čiastkových výbojov. Táto práca je zameraná na modelovanie defektného miesta pomocou matematického modelu a na vytvorenie fyzikálneho modelu za účelom ich vzájomného porovnania.

Pojem čiastkový výboj a model izolácie s dutinou

Pod pojmom čiastkový výboj sa rozumie samostatný, neúplný výboj, ktorý vzniká pod vplyvom kritickej intenzity elektrického poľa napr., v plynnom dielektriku, prípadne v dutinkách plynom vyplnených v kvapalných alebo pevných izolantoch, t.j. v miestach so zníženou elektrickou pevnosťou. Výboje trvajú veľmi krátku dobu (10^{-8} - 10^{-9} s) a majú spravidla impulzný charakter. Elektrická pevnosť tuhej izolácie je mnohonásobne väčšia než elektrická pevnosť plynu v dutinke. Z týchto dôvodov dochádza k výbojom v dutinkách pri podstatne nižšom napätí, než je prierazné napätie pevnej izolácie. Výboje v týchto dutinkách nazývame čiastkové, pretože nepresiahnu celú vzdialenosť

medzi elektródami [2]. Plynné dutinky sa objavujú v izolácii počas výroby alebo počas prevádzky, vznikajú v dutinkách a predstavujú najslabšie miesta v izolácii, pretože dutinka je vyplnená plynom a plyny majú menšiu elektrickú pevnosť ako pevné a kvapalné dielektriká. Ak chceme tento problém namodelovať použijeme najčastejšie používaný náhradný model izolácie s dutinkou. Základný model dutiny a priebehy napätia na nej, pri striedavom napätí zdroja, vidíme na obr.1

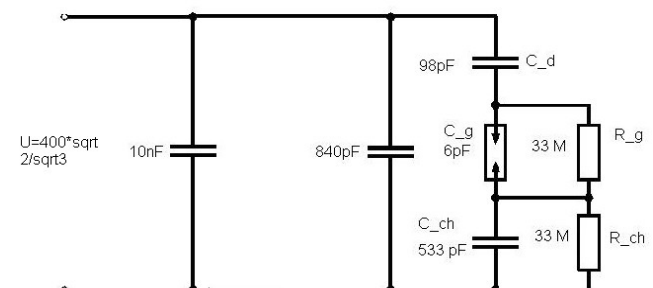


- C_1 - kapacita dutinky
- C_2 - kapacita dielektrika pripojeného do série s kapacitou dutiny C_1
- C_3 - kapacita nepoškodenej časti dielektrika
- R - odpor výbojového kanála
- GI - guľové iskrište

Obr. 1 Model izolácie s dutinkou a napaťové pomery v obvode.

Matematický a fyzikálny model defektného miesta

Miesto poruchy bolo simulované náhradným modelom dielektrika.



Obr. 2 Parametrický náhradný model dielektrika

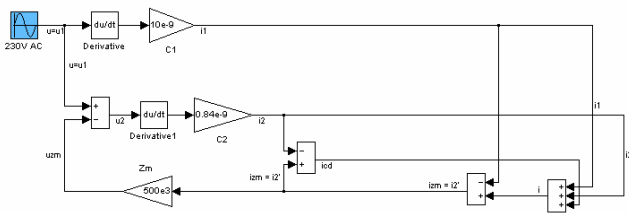
Obvodová analýza pre napätia:

$$\begin{aligned}
 u &= u_1, \\
 u_1 &= u_{zm} + u_2, \\
 u_2 &= u_{cd} + u_{cg} + u_{cch}, \\
 u_{cch} &= u_{rch}, \\
 u_{cg} &= u_{rg}, \\
 u &= u_{zm} + u_{cd} + u_{cg} + u_{cch}, \\
 u_{zm} &= R \cdot i_{zm}, \\
 u_{cg} &= R_{cg} \cdot i_{cg} = u_{rg} = R_{rg} \cdot i_{rg}, \\
 u_{cd} &= R_{cd} \cdot i_{cd}, \\
 u_{cch} &= R_{cch} \cdot i_{cch}, \\
 u &= R \cdot i_{zm} + R_{cg} \cdot i_{cg} + R_{cd} \cdot i_{cd} + R_{cch} \cdot i_{cch}.
 \end{aligned}$$

Obvodová analýza pre prúdy:

$$\begin{aligned}
 i &= i_1 + i_2', \\
 i_2' &= i_{cd} + i_2, \\
 i_{cd} &= i_{cg} + i_{rg} = i_{cch} + i_{rch}, \\
 i_{zm} &= i_2 + i_{cd}, \\
 i &= i_1 + i_{zm}, \\
 i &= i_1 + i_2 + i_{cg} + i_{rg}, \\
 i &= C_1 \cdot du_1/dt + C_2 \cdot du_2/dt + C_{cg} \cdot du_{cg} + u_{cg}/R_g,
 \end{aligned}$$

Pre túto sústavu rovníc bol v prostredí Matlab vytvorený počítačový model, ktorého bloková schéma je znázornená na obr. 3



Obr. 12 Obvodová analýza modelu izolácie v programe Matlab, Simulink

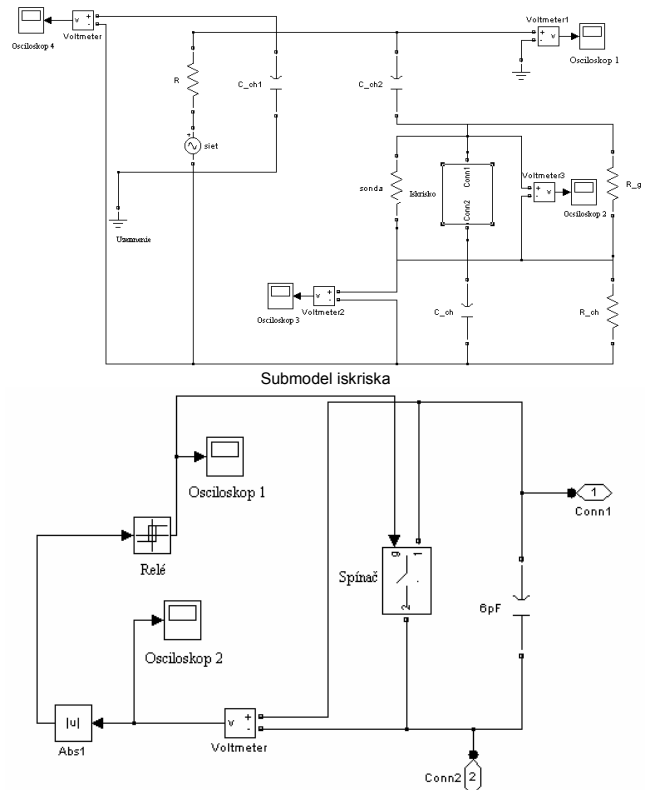
Kritickým prvkom tohto modelu je iskrište, v ktorom zhášacie napätie je 25 V a zápalné je 75 V. Na zhotovenie celkového matematického modelu bol použitý súbor vhodne pospájaných blokov.

K sieťovému napätiu $u=326,6 \cdot \sin(\omega t)$ je pripojený odpor o veľkosti 1Ω , paralelne k zdrojovému napätiu je pripojená kapacita s veľkosťou 10 nF , ďalším paralelným pripojením ku kapacite 10 nF je kapacita 840 pF , čo je vlastne v skutočnosti kapacita dutinky, treťou časťou schémy na obr.11 je sérioparalelné zapojenie odporov a kapacít, pričom kapacita C_d je kapacita predstavujúca nepoškodenú časť izolácie a jej hodnota je $98,7 \text{ pF}$. Kapacita C_{ch} je kapacita izolácie zapojenej do série s dutinkou. Hodnoty odporov zapojených paralelne ku kapacitám sú $R_g = R_{ch} = 33 \text{ M}\Omega$. Na správne odsledovanie žiaducich priebehov sú použité virtuálne osciloskopy. Tieto virtuálne osciloskopy sa zapájajú do obvodu cez voltmetre.

Aby bola namodelovaná schéma prehľadnejšia je rozdelená na hlavnú časť a tzv. podsystém (submodel), kde je namodelované iskriško (submodel na obr. 4).

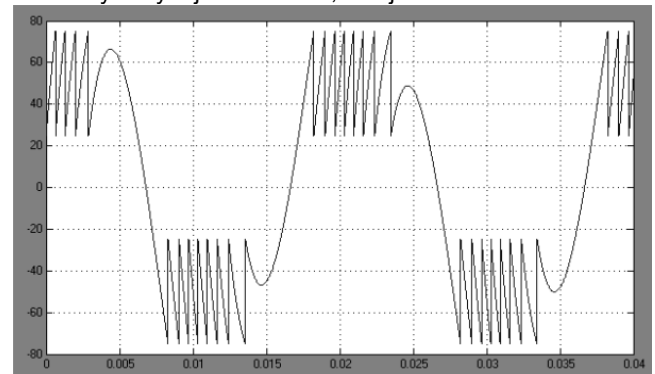
Submodel iskriska je tvorený blokmi relé (relay) a prepínač (switch). V bloku Relé je nastavené zhášacie napätie a zápalné napätie. Blok prepínača je modelovaný ideálnym spínačom, ktorého ideálny vnútorný odpor je 10000Ω . Kapacita iskrišťa je 6 pF . V modeli je použitý aj blok absolútnej hodnoty preto, aby model rovnaké

vykazoval parametre v kladnej i zápornej polperióde napätia zdroja. Je zrejme, že tento jednoduchý model neuvažuje s existenciou polaritného efektu. Upravený matematický model je znázornený na obr. 4.



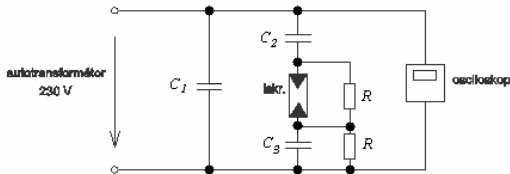
Obr. 4 Matematický model a submodel iskriska

Vyladením obvodu, získame vzorový priebeh napätia čiastkových výbojov na dutine, ako je znázornené na obr. 5.



Obr. 5 Priebeh napätia na dutine. Výsledok z matematického modelu.

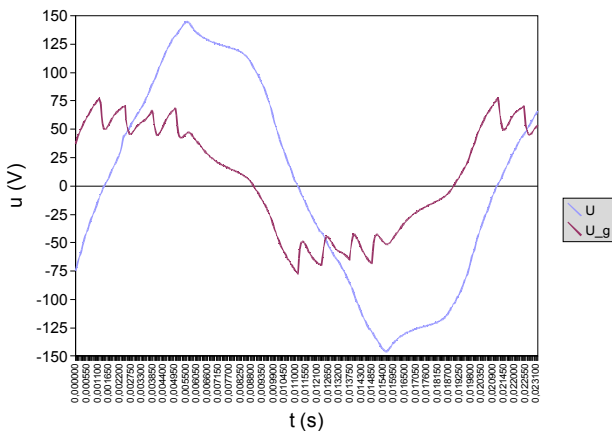
Fyzikálny model (obr. 6) bol vztvorený obvodom obsahujúcim kapacity, odporov a iskrište. Model bol napájaný zo zdroja striedavého napätia $0-230 \text{ V}$ (autotransformátor). Napätie bolo plynule zvyšované až po hladinu zápalného napätia. Údaje boli zaznamenávané pomocou digitálneho osciloskopu.



- Zdroj: autotransformátor
- C1 - Tko 2764IF 500/120 Up 5KV
- C2 - 10000 pF +, - 20% 3800 V=
- C3 - 36/42 Tko 2676 100 pF +, - 5%
- Iskrište
- Zapisovač alebo osciloskop: LeCroyLP147
- HV-40, vn sonda, deliaci pomer 1:1000

Obr. 6 Schéma fyzikálneho modelu a meracie pracovisko.

Výsledky z merania na fyzikálnom modeli sú reprezentované napríklad priebehom relaxácií na modelovanej dutine, ako je znázornené na obr. 7



Obr. 7 Priebeh napätia na dutine, výsledok z merania na fyzikálnom modeli.

Záver

Cieľom porovnania popísaných modelov bolo zostaviť matematický model a jemu odpovedajúci fyzikálny model dutiny v izolácii. Modely je konfigurovateľné a dajú sa použiť pre vyšetrovanie aj zložitých konfigurácií modelov porúch v izolácii. Simulované javy sú overiteľné experimentálnym meraním. Bola potvrdená zhoda vo výstupoch matematického aj fyzikálneho modelu.

Táto práca bola podporená agentúrou na podporu výskumu a vývoja, v rámci projektu APVV 20- 006005 a VEGA 1/3142/06.

Literatúra

- [1] Kršňák, I. : Čiastkové výboje vo vn strojoch a zariadeniach, Košice 1998,
- [2] Marton , K. : Technika vysokých napätí, Bratislava 1983,
- [3] Matlab <http://www.kirp.chtf.stuba.sk/%7Ecirka/vyuka/matlab/index.ph>,
- [4] Jozef Jenčo: Regulovanie rozloženia napätia po povrchu izolácie vn zariadení, Diplomová práca, Košice , 2004,
- [5] Kučinský, G. S. a kol.: Technika vysokého napätia, Energoatomizdat, Sankt - Petersburg, 2003,
- [6] Kolcunová I.: Diagnostika elektroenergetických zariadení, Mercury- Smékal, Košice, 2003,
- [7] Veverka, A.:Technika vysokých napätí, STNL/ALFA, Praha, 1978.
- [8] Kučinský, G. S.: Častičnyje razrjady v vysokovoľtných konstrukciach, Izdatel'stvo Energija, Leningrad, 1979,
- [9] Böning, A.: Luftgehalt und Luftspaltverteilung geschichter Dielektrika I., Archiv für Elektrotechnik, 1963, č. 1 Springer Verlag
- [10] Lemke, E., Schmiegel, P.: Progres in PD-probe Measuring Technique, 7-th ISH, Dresden., 1991,
- [11] Fuhr, J.: 7-th ISH, Dresden, 1991,
- [12] Kranz, H.G.: Hochspannungstechnik, Skriptum Fachbereich Elektrotechnik, BUGH Wuppertal, 1993,
- [13] Marton, K.: Analýza procesov vo vn izolácii, spôsobených čiastkovými výbojmi, Habilitačná práca, EF VŠT Košice, 1980,
- [14] Heller – Veverka, A.: Technika vysokých napätí, SNTL/ALFA Praha, 1978.
- [15] Balogh, J: Snímanie čiastkových výbojov na rozšírenom RLC modeli „9. MEDZINÁRODNÁ VEDECKÁ KONFERENCIA TECHNIKA VYSOKÝCH NAPÄTÍ “ Košice, september 1999.

Autori:

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

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