

Iraida Kolcunová, Lukáš Lisoň, Jakub Tančák

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

Vplyv teploty na elektrickú prieraznú pevnosť impregnovanej papierovej izolácie

Abstrakt. V článku je skúmaný vplyv teploty na elektrickú prieraznú pevnosť papierovej izolácie impregnovanej izolačnými olejmi. Ako impregnant bol použitý izolačný olej vytvorený miešaním minerálneho a rastlinného oleja v presne definovaných pomeroch. Pripravené vzorky boli vystavené tepelnému namáhaniu po dobu 500 hodín pri teplote 90°C. Z nameraných hodnôt prierazného napätia bola vypočítaná elektrická prierazná pevnosť papierovej izolácie pred a po tepelnom namáhaní. Výsledky merania boli porovnané pre rôzne pomery impregnačných olejov.

Abstract. The goal of this paper is research of oil paper insulation system and the influence of the temperature on the breakdown voltage of the paper insulation and its electrical breakdown strength. Insulation oil which is composed from combination of the mineral oil and the vegetable oil was used as an impregnant. Samples of the paper insulation were exposed to the thermal stress during 500 hours with temperature 90°C. The values of the breakdown voltage and electrical breakdown strength were measured and compared for different proportion of impregnating oils.

Kľúčové slová: prierazné napätie, elektrická prierazná pevnosť, minerálny olej, rastlinný olej, miešanie izolačných olejov

Keywords: breakdown voltage, electrical breakdown strength, mineral oil, vegetable oil, mixing of insulating oils

Úvod

Izolačný systém olej-papier je v dnešnej dobe jedným z najpoužívanejších izolačných systémov v silnoprúdovej elektrotechnike. S takýmto prevedeným izolácie sa môžeme stretnúť v transformátoroch, VN kábloch, kondenzátoroch a mnohých ďalších zariadeniach.

Kvapalná časť tejto izolácie je v dnešnej dobe tvorená prevažne minerálnymi olejmi. Problémom týchto olejov je ale ich toxicita a nízka biologická odbúrateľnosť, pre ktorú začínajú byť ich možnosti limitované. Táto skutočnosť vedie mnohé výskumné tímy k hľadaniu iných alternatív k minerálnym olejom. Veľký potenciál v tomto smere je v použití rastlinných olejov, ktoré sú skoro plne biologicky odbúrateľné a vykazujú v určitom smere lepšie vlastnosti ako minerálne oleje.

Iné výskumné tímy sa zaoberajú možnosťou miešania minerálnych a rastlinných olejov v presne definovaných pomeroch a ich možnému použitiu v elektrických zariadeniach [1]. Hlavným cieľom predkladaného článku bolo porovnať elektrickú prieraznú pevnosť papierovej izolácie impregnovanej olejmi tvorenými miešaním minerálneho oleja a prírodného esteru. Takto pripravené vzorky podrobili tepelnému starnutiu a určiť vplyv teploty na izolačný systém olej-papier.

Impregnovaná papierová izolácia

Skúmaný izolačný systém sa skladá z kombinovanej izolácie, ktorej pevnú časť tvorí papierová izolácia a kvapalnej - izolačný olej.

Papierová izolácia je preferovanou voľbou ako pevná zložka izolácie vo výkonových transformátoroch. Základnou zložkou papierovej izolácie je celulóza, ktorá sa vyrába z dreva. Papierová izolácia je dostupná na trhu a má nízku cenu. Hlavnou nevýhodou papierovej izolácie je však jej schopnosť dobre absorbovať vlhkosť z okolia. Preto je dôležité, aby v elektrických zariadeniach nedochádzalo k navlhnutiu papierovej izolácie [2].

V izolačnej sústave olej-papier plní kvapalná izolácia okrem izolačnej funkcie aj funkciu chladiaceho média. Má však aj negatívne vlastnosti a to predovšetkým ako prenosový člen zložiek vonkajšieho prostredia (kyslík a vlhkosť), ktoré znehodnocujú izolačné vlastnosti oleja a taktiež aj papiera. Olej vplyvom oxidačného a tepelného starnutia je zdrojom rôznych plynných, kvapalných a

pevných produktov. A tak životnosť izolácie olej-papier ovplyvňujú rôzne degradačné činitele ako vlhkosť, teplota a oxidácia [3], [4].

Tepelné starnutie izolácie

V elektrických zariadeniach najväčší vplyv na degradáciu izolačného systému má tepelné starnutie. Tento proces v sebe zahŕňa chemické a fyzikálne zmeny, ktoré nepriaznivo pôsobia na vlastnosti izolačného systému. Tieto zmeny sa dejú pri všetkých teplotách, ale s rastúcou teplotou sa zrýchľujú.

Pri tepelnom starnutí transformátorového oleja dochádza k určitým zmenám, ktoré sú charakteristické pre daný typ degradácie, čo sa využíva pri jeho diagnostike. Môže sa takto zistiť stupeň zostarnutia oleja a taktiež aj druh poruchy, ktorá to zapríčinila. Pri tepelnom starnutí vzniká v oleji veľké množstvo plynov, ktoré sú výsledkom rôznych reakcií. Vznik týchto plynov vedie k vzniku plynných bublín, v ktorých sa časom začnú rozvíjať častkové výboje [5].

Elektrická prierazná pevnosť

Elektrická prierazná pevnosť patrí medzi najčastejšie merané parametre izolačného oleja. Jej hodnota závisí od obsahu vody, nečistôt, plynov alebo produktov starnutia v oleji. Je definovaná ako podiel prierazného napätia a vzdialenosti skúšobných elektród. Podľa hodnoty prieraznej pevnosti sa dá usúdiť, či izolačný olej neobsahuje emulgovanú vodu alebo rôzne nečistoty a plyny. Vzorec na výpočet elektrickej prieraznej pevnosti je nasledovný [6]:

$$(1) E_p = \frac{U_p}{d}$$

Kde: E_p – je elektrická prierazná pevnosť, U_p - je prierazné napätie, d – je medzi elektródová vzdialenosť.

Na veľkosť elektrickej prieraznej pevnosti vplyva aj usporiadanie elektród, pretože pri rôznom usporiadaní elektród sa mení stupeň homogenity. Okrem homogenity ovplyvňuje veľkosť elektrickej prieraznej pevnosti aj druh napätia, tvar krivky napätia, doba pôsobenia napätia, teplota izolačného materiálu a iné [3].

Príprava skúmaných vzoriek

Na prípravu kombinovanej izolácie olej-papier bol použitý transformátorový papier hrúbky 0,06 mm o veľkosti 5x5 cm. Izolačný papier bol impregnovaný olejmi, vytvorenými zmiešaním rôzneho percentuálneho pomeru minerálneho oleja ITO X a rastlinného oleja. Ako rastlinné oleje boli použité vzorky bodliakového a ľanového oleja. K miešaniu boli použité 3 litre minerálneho oleja a 1,5 litra bodliakového oleja a 1,5 litra ľanového oleja. Tieto oleje sa po zohriatí v sušičke na teplotu 45 °C miešali v nasledujúcich pomeroch:

- 90% minerálneho oleja ITO X – 10% ľanového oleja (90/10)
- 50% minerálneho oleja ITO X – 50% ľanového oleja (50/50)
- 10% minerálneho oleja ITO X – 90% ľanového oleja (10/90)
- 90% minerálneho oleja ITO X – 10% bodliakového oleja (90/10)
- 50% minerálneho oleja ITO X – 50% bodliakového oleja (50/50)
- 10% minerálneho oleja ITO X – 90% bodliakového oleja (10/90)

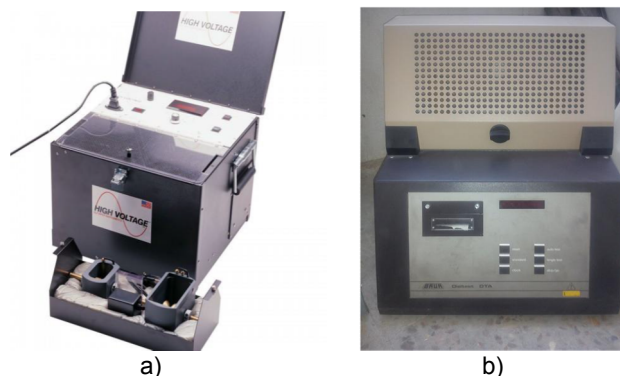
Vzorky papierovej izolácie boli umiestnené do sklenenej nádoby a zaliate namiešaným olejom. Do každej nádoby bolo pridaných 10g meď, aby boli čo najvernejšie namodelované prevádzkové podmienky. Pri prevádzke transformátorov dochádza ku styku oleja s meďou, kedy sa môžu uvoľniť ióny meď, ktoré majú taktiež vplyv na starnutie. Tepelné starnutie vzoriek izolácie olej - papier prebehlo v teplovzdušnej sušičke pri teplote 90 °C po dobu 500 hodín. Aby došlo ku kontaktu oleja s kyslíkom, ktorý spôsobuje oxidáciu izolačnej sústavy olej-papier, vzorky neboli uzatvorené hermeticky.

Meranie prierazného napätia a elektrickej prieraznej pevnosti

Pred samotným meraním kombinovanej izolácie olej - papier bolo vykonané meranie prierazného napätia kvapalných izolantov. Meranie izolačných olejov prebiehalo podľa normy IEC 60 156 s použitím meracieho prístroja BAUR DIELEST (Obr. 1b). Pre všetky tri vzorky izolačných olejov bol dodržaný nasledovný postup. Pred každým meraním merná nádobka na olej a meracie elektródy boli dôkladne vyčistené a vysušené po dobu 24 hodín pri izbovej teplote. Vzďialenosť medzi elektródami bola nastavená podľa normy na 2,5 mm. Olej do nádobky sa nalieval po stenách, aby sa zabránilo tvorbe vzduchových bublín pri nalievaní oleja. Po naliatí oleja pred prvým meraním sa čakalo 10 minút za účelom ustálenia oleja. Po každom vykonanom meraní bolo potrebné olej v nádobke premiešať, aby sa odstránili plynové bublinky a zuhoľnatené častice, ktoré mohli vzniknúť pri pieraze. Znovu sa čakalo 5 minút na ustálenie oleja. Takýmto postupom bolo vykonané 6 meraní a následne sa vypočítala priemerná hodnota prierazného napätia.

Meranie prierazného napätia izolácie olej - papier bolo vykonané na prístroji HighVoltage DTS-60D (Obr.1a). Nádobka bola pred každým meraním zbavená nečistôt a olej sa nalieval po povrchu jednej z elektród aby sa zabránilo tvorbe vzduchových bublín. Pierazné napätie impregnovanej papierovej izolácie sa meralo postupne od jednej vrstvy transformátorového papiera až po 10 vrstiev. Pri 6 vrstvách transformátorového papiera sa vykonalo 5 meraní pre presnejšie porovnanie výsledkov merania jednotlivých vzoriek. Medzi každým vykonaným meraním bol dodržaný odstup 5 minút na ustálenie oleja v nádobke.

Elektrická pierazná pevnosť sa následne vypočítala podľa vzorca (1), kde ako medzielektródová vzdialenosť bola udávaná hrúbka transformátorového papiera.



Obr. 1a) High Voltage DTS-60D, b) BAUR DIELEST

Výsledky merania elektrickej pieraznej pevnosti izolačných olejov

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené výsledky merania pierazného napätia a následne vypočítané hodnoty elektrickej pieraznej pevnosti použitých v experimente olejov: minerálneho oleja ITO X, rastlinného ľanového a rastlinného bodliakového oleja.

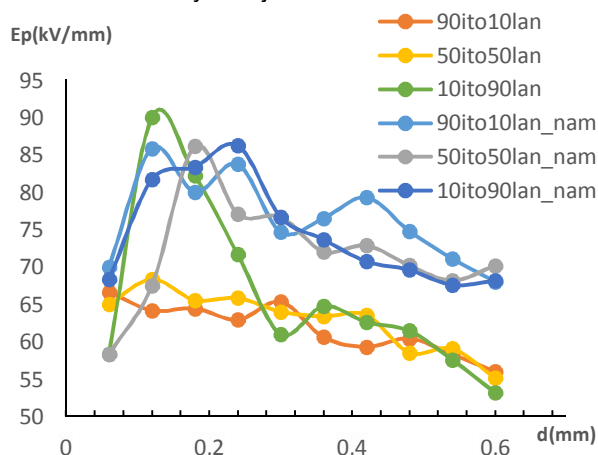
Tabuľka 1. Namerané hodnoty U_p a vypočítané hodnoty E_p kvapalných izolantov

č. meranie	minerálny olej ITO X	
	U_p [kV]	E_p [kV/mm]
1	56,2	22,48
2	44,8	17,92
3	50,2	20,08
4	45,5	18,2
5	45,1	18,04
6	30,3	12,12
priemer	45,35	18,14
č. merania	ľanový olej	
	U_p [kV]	E_p [kV/mm]
1	54,6	21,84
2	56,9	22,76
3	59,4	23,76
4	50,5	20,2
5	53,3	21,32
6	68,9	27,56
priemer	57,26	22,9
č. merania	bodliakový olej	
	U_p [kV]	E_p [kV/mm]
1	53	21,2
2	27,5	11
3	69,2	27,68
4	71,5	28,6
5	66,1	26,44
6	74,9	29,96
priemer	60,36	24,15

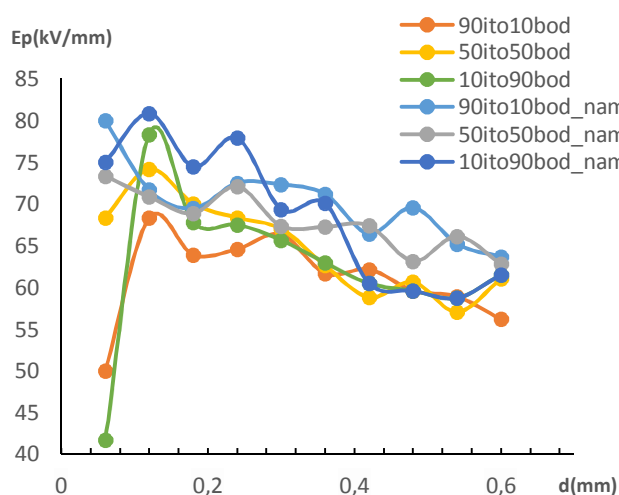
Z nameraných výsledkov môžeme vidieť, že najvyššie hodnoty prierného napätia dosiahol bodliakový rastlinný olej, ktorého priemerná hodnota prierného napätia bola 60,37 kV a priemerná elektrická pevnosť bola 24,15 kV/mm. Ľanový rastlinný olej dosiahol približne o 5% nižšie hodnoty prierného napätia a elektrickej priernosti. Naopak minerálny olej ITO X dosiahol najnižšie namerané hodnoty z nami porovnávaných olejov v priemere približne o 25% nižšie ako bodliakový rastlinný olej.

Výsledky merania elektrickej priernosti kombinovaného izolačného systému olej-papier

Závislosti elektrickej priernosti impregnovanej papierovej izolácie od jej hrúbky sú uvedené na nasledujúcich obrázkoch. Na obr.2 sú grafické závislosti pre papierovú izoláciu impregnovanú minerálnym a ľanovým olejom rôznej koncentrácie pred tepelným namáhaním a po 500 hodinovom tepelnom namáhaní. Na obr.3 sú výsledky merania pre miešaný impregnačný olej ITO X s bodliakovým olejom.



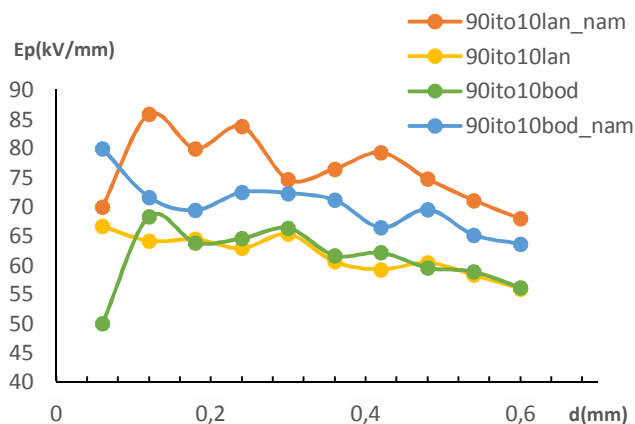
Obr.2 Porovnanie E_p v závislosti od hrúbky papierovej izolácie impregnovanej miešaným olejom zloženým z ITO X a ľanového oleja



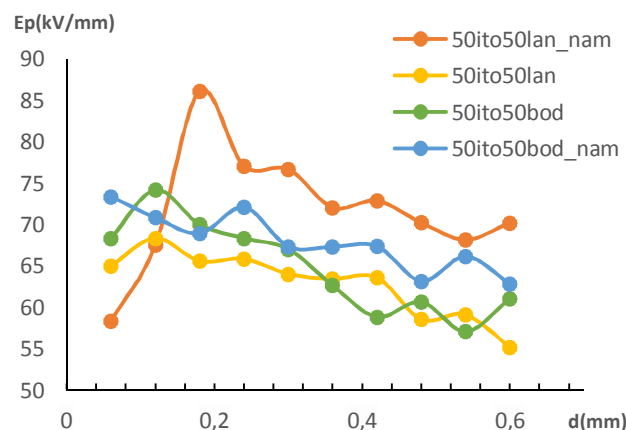
Obr.3 Porovnanie E_p v závislosti od hrúbky papierovej izolácie impregnovanej miešaným olejom zloženým z ITO X a bodliakového oleja.

S grafických závislosti je možné konštatovať, že po tepelnom namáhaní pre obidva typy miešaných olejov elektrická priernosť papierovej izolácie sa zväčšila. Mohlo to byť spôsobené prechodom vlhkosti z papierovej izolácie do oleja.

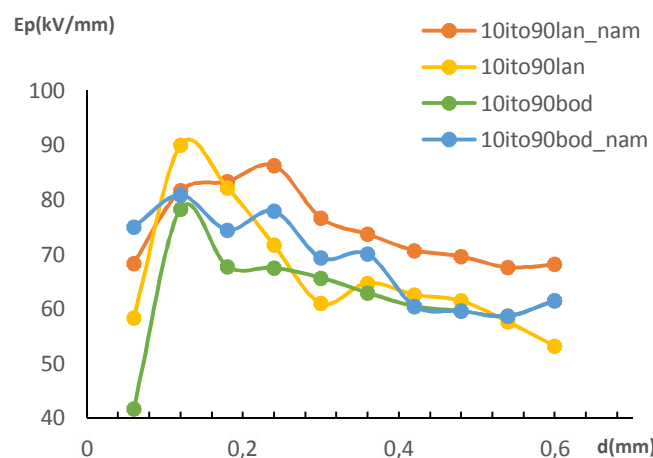
Na ďalších obrázkoch sú porovnávané grafické závislosti elektrickej priernosti papierovej izolácie pre rovnaký pomer koncentrácie minerálneho a rastlinného oleja. Na obr.4 prevláda koncentrácia minerálneho oleja. Pomer minerálneho a rastlinného oleja je 90/10 pre ľanový a bodliakový olej pred a po tepelnom namáhaní. Na obr.5 koncentrácia minerálneho a rastlinného oleja je rovnaká, t.j. 50/50. Na obr.6 zase prevláda koncentrácia rastlinného oleja a to 10/90.



Obr.4 Porovnanie E_p v závislosti od hrúbky impregnovanej izolácie pre zmiešaný olej: 90% ITO X - 10% ľanový olej a 90% ITO X - 10% bodliakový olej.



Obr.5 Porovnanie E_p v závislosti od hrúbky impregnovanej izolácie pre zmiešaný olej: 50% ITO X - 50% ľanový olej a 50% ITO X - 50% bodliakový olej



Obr.6 Porovnanie E_p v závislosti od hrúbky impregnovanej izolácie pre zmiešaný olej: 10% ITO X - 90% ľanový olej a 10% ITO X - 90% bodliakový olej

Pri porovnávaní výsledkov merania je možné skonštatovať, že hoci čistý bodliakový olej mal vyššiu elektrickú prieraznú pevnosť ako ľanový olej, ale papier impregnovaný ľanovým olejom mal vyššie hodnoty prierazného napätia. Pričom hodnota elektrickej prieraznej pevnosti narastala s nárastom koncentrácie rastlinného oleja. Rovnaký trend mali aj závislosti pre bodliakový olej, ale hodnoty elektrickej prieraznej pevnosti pri malej hrúbke izolácie (do 0,2mm) boli od 10 do 15 kV/mm menšie pri najväčšej koncentrácii rastlinného oleja pred tepelným namáhaním (obr.6). Pri väčších hrúbkach papierovej izolácie hodnoty elektrickej pevnosti sa vyrovnali. Po tepelnom namáhaní naopak väčšie rozdiely E_p boli pri väčšej hrúbke papierovej izolácie a činili od 5 do 10 kV/mm.

Záver

Hlavným cieľom experimentu bolo overiť možnosť miešania minerálnych olejov a prírodných esterov a zistiť ich vplyv na papierovú izoláciu po 500 hodinovom tepelnom namáhaní pri teplote 90°C. Na základe nameraných výsledkov je možné usúdiť, že krátkodobé tepelné namáhanie nespôsobuje degradáciu izolačného systému olej - papier. Pri takomto relatívne krátkom pôsobení teploty nemuseli ešte nastať procesy starnutia papierovej izolácie, ktoré by vyvolali nevratné fyzikálne a chemické zmeny a tým pádom negatívne ovplyvnili izolačné vlastnosti ako pevnej tak aj kvapalnej zložky izolačného systému olej – papier.

Literatúra

- [1] Toudja, T., Chetibi, F., Beldjilali, A., Moulai, F.: Electrical and physico chemical properties of mineral and vegetable oils mixtures. In Dielectric Liquids (ICDL), 2014 IEEE 18th International Conference. 29.6.2014 – 3.7. 2014. ISBN 978-14-7992-065-5
- [2] Prevost, T.A., Oommen, T.V.: Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers. In Part I—History and Development [online]. 2006. IEEE. Dostupné na internete: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1618969>>. ISSN 0883-7554
- [3] Kolcunová, I., Dedinská, L.: Prírodný olej ako impregnant papierovej izolácie. In Publikácie TUKE Starnutie elektroizolačných systémov, č. 6 (2011) ISSN 1337-0103
- [4] Trnka, P., Polanský, R.: Tepelné stárnutie izolačného systému olej-papír [online]. Dostupné na internete: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/389/r0c1c13.pdf?sequence=1>
- [5] Kolcunová, I., Lisoň, L., Cimbala, R.: Vplyv teploty na zmenu vlastností izolačných olejov. In Publikácie TUKE Starnutie elektroizolačných systémov, č. 8 (2013) ISSN 1337-0103
- [6] Mentík, V., Pihera, J., Polanský, E., Prosr, P., Trnka, P.: Diagnostika elektrických zariadení. In BEN-technická literatúra 1.vyd. Praha: 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9

Podakovanie



„Táto práca bola podporovaná Agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky pre štrukturálne fondy EÚ na základe projektu Vývoj unikátneho nízkoenergetického statického zdroja pre elektrosystémy (číslo projektu: 26220220029, prioritná os 2 Podpora výskumu a vývoja)“

Autori: Irida Kolcunová Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: irida.kolcunova@tuke.sk
 Lukáš Lisoň Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: lukas.lison@tuke.sk
 Jakub Tančák, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: jakub.tancak@student.tuke.sk