

Patrik Výrostko, Juraj Kurimský

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

Variácia prierazného napätia polypropylénovej fólie počas urýchleného starnutia

Abstrakt. V príspevku je spracovaný experiment s problematikou testovania polypropylénových fólií, ktoré sa používajú ako dielektrikum pre kondenzátory. Experimenty boli prevádzané na pripravených vzorkách o celkovom počte cca 20 ks na jednu etapu starnutia. V testoch na elektrickú prieraznú pevnosť boli spracované štyri etapy s koncovým časom 1000 hodín. Výsledky poukazujú na postupné znižovanie prieraznej pevnosti. Čisto teplotné a kombinované teplotno-elektrické namáhanie vykazujú rozdielne trendy s exponenciálne klesajúcim charakterom.

Kľúčové slová: teplota, teplo, izolácia, točivý stroj, teplotná trieda

Abstract. The paper deals with an experiment testing of the polypropylene film which is widely used as a raw dielectric for capacitors production. Experiments were conducted on prepared samples on a total of about 20 pieces at one stage of aging. In tests on electrical breakdown strength they are processed four stages, where the final-time was 1000 hours. The results point to a gradual reduction in breakdown strength. Purely thermal and combined-temperature electrical stress exhibit different trends with exponentially decreasing characteristics.

Keywords: temperature, heat, electrical insulation, rotating machine, thermal class

Úvod

Krátko po objavení polypropylénu (PP) sa zistilo, že má vynikajúce vlastnosti pre využitie v elektrotechnickom priemysle. Anderson a McCall poukázali na nízke dielektrické straty laboratórne vyrobených vzoriek [1]. Výskum pokračoval a Buckingham a Redish potvrdili na vzorke hromadne vyrábaného PP, že je vhodný ako izolačný materiál a dokonca vysoko odporúčaný pre mikrovlnné aplikácie [2]. Pokrok výrobných technológií viedol ku kombinovaniu (laminovaniu) papiera s polypropylénom, až k nahradzovaniu papiera za polypropylén v kábloch aj v kondenzátoroch.

Súčasný výskum naznačuje, že PP je jeden z najvhodnejších materiálov na výrobu kondenzátorov s vysokou hustotou uskladnenej energie, pričom je reálne dosiahnuť až 2000 J/l, avšak za cenu zníženia životnosti [3]. V porovnaní s inými perspektívnymi polymérmi má však PP nízku permitivitu. Napríklad, polyvinylidenfluorid (PVDF) má pomernú permitivitu 12, pričom PP má relatívnu permitivitu okolo 2,2. To má za následok, napríklad, že popri menších geometrických rozmeroch môže dosiahnuť vyššiu kapacitu. Veľkou nevýhodou PVDF je však 90 násobný stratový faktor v porovnaní s PP, čo je problém takmer pri všetkých polyméroch [4].

Pre súčasné energetické zariadenia je požadovaná dlhodobá životnosť a spoľahlivosť. Práve túto podmienku kvalitne vyrobený PP spĺňa. Spoľahlivosť kondenzátorov úzko súvisí s kvalitou fólií a technológií použitých na výrobu. Je známy prípad, kde bol porovnaní fólií od dvoch výrobcov preukázaný značný rozdiel pri laboratórnych meraniach ako aj pri použití v praxi [5]. Práve nekvalitná fólia v kombinácii s namáhaním pri používaní môže mať nebezpečné následky. Príkladom môže byť porucha spôsobená filtračnými kondenzátormi vo vlaku, kde došlo k explózií vo vnútri obalu kondenzátora a následne k poškodeniu susediacich zariadení vo vnútri lokomotívy [6]. Práve z týchto dôvodov je potrebné samotné fólie a taktiež vyrobené kondenzátory testovať rôznymi metódami, čo je aj jedným z motívov pre testovanie popísané v ďalšom texte.

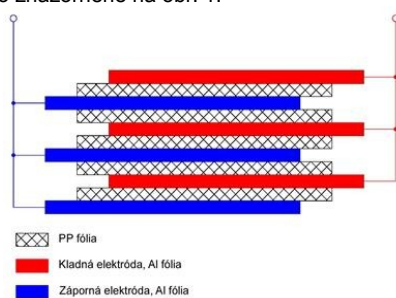
Materiál polypropylén a príprava vzoriek

Základné elektro-fyzikálne parametre PP sú uvedené v tab. 1. [3][7][8].

Tab. 1 Základné elektro-fyzikálne vlastnosti polypropylénu

Teplota použitia	Teplota tavenia	Hustota	Relatívna permitivita	Dielektrická pevnosť
-5 až 100 °C	175 °C	910 kg.m ⁻³	2,2	119,9 kV.mm ⁻¹

Pri experimente bola použitá celopolypropylénová fólia, ktorá sa v zahraničnej literatúre označuje ako *all-polypropylene (APP) film*. Z biaxiálne orientovanej polypropylénovej (BOPP) fólie a hliníkovej fólie boli skladané vrstvy o rozmere 60 mmx100 mm, v usporiadaní tak, ako je to znázornené na obr. 1.



Obr.1. Vrstvenie kondenzátora pre experiment

Ako referenčný materiál poslúžila sada 15 vzoriek, ktoré boli pred meraním vysušené v elektrickej sušiarňi. Takýmto spôsobom sa predišlo skresleniu výsledkov od obsahu vlhkosti vo vzorkách [9]. Táto fólia bola považovaná za novú a nepoužitú.

Urýchlené starnutie polypropylénu

Vo všeobecnosti má PP vysokú životnosť. Testy spontánne podmienenej životnosti by boli veľmi zdĺhavé, preto sa jeho starnutie urýchľuje rôznymi postupmi. Aby bolo možné vyhodnotiť starnutie materiálu, musia sa pred ním a aj po ňom vykonať merania výpovedeschopných parametrov. Rovnako ako samotné testy, tak aj zaťažovanie sa robí na fóliách alebo aj na testovacích kondenzátoroch.

Spôsob starnutia sa volí podľa použitia v praxi, čiže ak sú potrebné kondenzátory pre jadrovú elektrárňu, je vhodné poznať, aký vplyv má na nich teplota, napätie a taktiež rádioaktívne žiarenie [10].

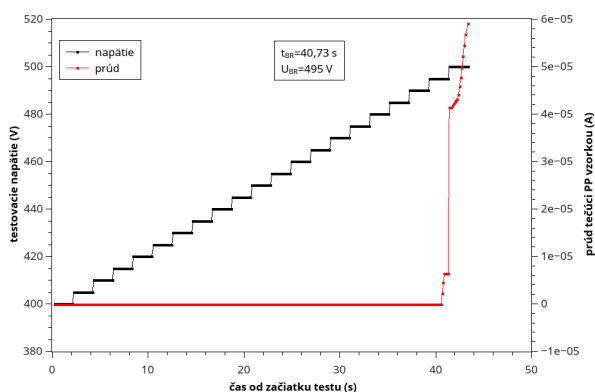
Keďže proces starnutia je pomerne časovo náročný, boli určené 4 etapy starnutia a to po nasledujúcom počte hodín,

počas ktorých budú pripravené vzorky vystavené pôsobeniu iba tepelného alebo tepelného a súčasne elektrického poľa: 250 h, 500 h, 750 h a 1000 h. Po každej etape bola časť vzoriek odobratá a testovaná, pričom ostatné vzorky boli ponechané pre ďalšiu etapu urýchleného starnutia.

Meranie prierazného napätia

Skúška prierazného napätia určuje, pri akom napätí dôjde k elektrickému prierazu fólie. Vykonáva sa jednosmerným alebo striedavým napätím. Hodnota napätia vo väčšine opísaných prípadov lineárne narastá s rýchlosťou 500 V/s [11][12 alebo 1000 V/s [13] až dôjde k prierazu. Menej častý je spôsob skokovej zmeny, keď napätie stúpne o 1 kV, nasleduje napríklad 15 s výdrž na danej hladine napätia a znova nasleduje zvýšenie o 1 kV [13]. Meranie sa väčšinou odohráva s elektrónovým systémom a vzorkou zaliatou v impregnačnom oleji, napr. silikónovom [12][13]. Toto opatrenie predchádza absorpcii vlhkosti vzorkou a hlavne povrchovým výbojom. Výhodou použitia oleja je dobrá tepelná vodivosť, čo umožňuje presnejšie meranie závislosti prierazného napätia od teploty. Toto meranie sa vykonáva na množstve vzoriek, pretože prieraz je ovplyvnený množstvom súvisiacich, niekedy deterministicky náhodných javov. Údaje sa spracovávajú štatistickými metódami, napr. Weibullovou metódou [14].

V našom experimente bolo použité jednosmerné napätie s priemernou rýchlosťou nárastu približne 150 V/min. Napätie bolo zvyšované s krokom 5 V a na danej hladine bola vzorka namáhaná po dobu 2 s. Záznam z merania prierazného napätia je na obr. 2.



Obr.2. Záznam z merania prierazného napätia

Výsledky a diskusia

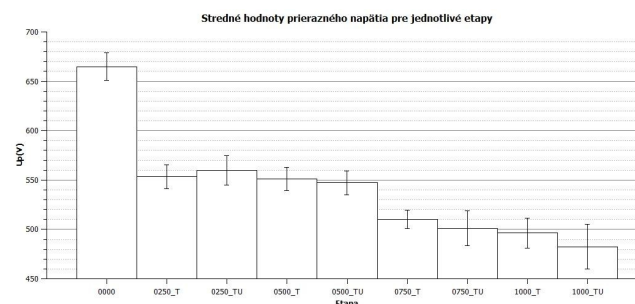
V experimente bolo použitých 135 vzoriek a aby bolo možné zistiť spojitosť jednotlivých výsledkov, bolo nutné jednotlivé vzorky označovať. Preto bol použitý pre vzorku reťazec v tvare XXXX_YY_ZZ. Prvá časť reťazca označovala o akú dávku, teda etapu vzoriek ide, čiže koľko hodín boli starnuté (0000, 0250, 0500, 0750 a 1000). Nasledovalo označenie typu starnutia, a to „T“ pre tepelné a „TU“ pre kombinované. Pre nestarnuté vzorky (0000) bola táto časť vynechaná. Ako posledné bolo použité číslo vzorky v danej etape, napríklad „01“, „02“, „03“, atď. Na označovanie bola použitá čierna fixka OHP 2636F, priamo určená na popisovanie fólií, so stopou 0,6 mm. Výsledky meraní sú interpretované pomocou uvedeného označovania.

Z výsledkov môžeme potvrdiť, že pre všetky etapy okrem 250 h platí synergický efekt. To znamená, že vzorky pri kombinovanom namáhaní degradujú viac. Zároveň možno konštatovať, že dielektrická pevnosť časom klesá. Najväčší pokles izolačnej schopnosti je zaznamenaný po 250 h starnutia o viac ako 111 V v porovnaní s tepelne

starnutými alebo 105 V v porovnaní s elektro-tepelne namáhanými vzorkami. Ak sa porovnajú výsledky pre etapy 500 h, 750 h a 1000h, môžeme skonštatovať, že rozdiel medzi prierazným napätím pri oboch typoch namáhaniach narastá s časom stráveným v prevádzke porov, tab. 2 resp. obr. 3.

Vzorky	n	U_p (V)	U_{pmin} (V)	U_{pmax} (V)	Medián (V)	σ (V)	Rozptyl (V ²)
0000	19	664,739	560	770	675	60,952	3 715,205
0250_T	20	553,5	485	700	542,5	53,732	2 887,105
0250_TU	19	559,706	465	680	550	61,783	3 817,096
0500_T	22	551,136	440	635	557,5	56,419	3 183,171
0500_TU	14	547,143	465	630	545	44,493	1 979,67
0750_T	31	510,161	400	635	505	52,528	2 759,139
0750_TU	13	501,154	405	605	510	63,053	3 975,64
1000_T	12	496,25	440	595	477,5	51,748	2 677,841
1000_TU	12	482,5	380	610	465	78,058	6 093,182

Tab. 2 Výsledky meraní prierazných napätí



Obr.3. Graf prierazných napätí pre etapy starnutia PP fólie

Z nameraných hodnôt kapacít je vidno ich veľký rozptyl a zároveň aj určitú chybu merania. V začiatkových fázach meraní boli za príčinu týchto rozdielov považované problémy s kontaktmi na meracom prípravku. Predchádzalo sa im vyhotovením nerozoberateľných spojov. Vyskytuje sa tu však ešte ďalší faktor: nerovnosť povrchu vzorky vedie k vzniku vzduchových medzier medzi vzorkou a elektródami. Práve tieto medzery sú primárnou príčinou chýb pri meraní [15]. Tomuto problému je potrebné v budúcom výskume venovať zvláštnu pozornosť.

Záver

Prezentovaný experiment je časovo náročný. Preto by bolo výhodné merať na viacerých prístrojoch súčasne, čo však predstavuje zvýšené investičné náklady. Spracovanie výsledkov je taktiež časovo náročné, ale je možné spracovať jednotlivé analýzy pomocou vhodne navrhnutých procedúr v niektorom zo súčasných nástrojov na spracovanie vedeckých údajov. To je predmetom nášho ďalšieho postupu pri riešení vyšetrovania vlastností PP fólie počas urýchleného starnutia.

Podakovanie

Táto práca je podporená projektom VEGA č.1/0311/15.

Literatúra

- [1] Anderson, E. W. - McCall, D. W.: The dielectric constant and loss of polypropylene. In: Polymer Science. 1958, č. 31, s. 241.
- [2] Buckingham, K. A. - Reddish, W.: Low-loss polypropylene for electrical purposes. In: Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1967, č. 11, s. 1810–1814.
- [3] Michalczyk, P. - Bramouille, M.: Ultimate properties of the polypropylene film for energy storage capacitors. In: IEEE Transactions on Magnetics. 2003, č. 1, s. 362–365.

- [4] Rabuffi, M. - Picci, G.: Status quo and future prospects for metallized polypropylene energy storage capacitors. In: IEEE Transactions on Plasma Science. 2002, č 5, s. 1939–1942.
- [5] Ratra, M. C. - Nagamani, H. N.: Evaluation of polypropylene film as insulation for power capacitors. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. 1991, s. 879–882.
- [6] Buiatti, G. M. et al.: Condition Monitoring of Metallized Polypropylene Film Capacitors in Railway Power Trains. In: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009, č. 10, s. 3796–3805.
- [7] Bulinski, A. et al.: Dielectric properties of polypropylene loaded with synthetic organoclay. In: IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2009, s. 666–671.
- [8] Tököly, F. – Chaternuch, L. – Nemeč, P.: Elektrotechnológia. Bratislava: Alfa, 1973, 440s. ISBN 63-3503-73
- [9] Li, W. et al.: Comparison Between the DC and AC Breakdown Characteristics of Dielectric Sheets in Liquid Nitrogen. In: IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2014, č. 6, s. 1–6.
- [10] Cygan, S. P. – Laghari, J. R.: Effects of multistress aging (radiation, thermal, electrical) on polypropylene. In: IEEE Transactions on Nuclear Science. 1991, č. 3, s. 906–912.
- [11] Cygan, P. et al.: Lifetimes of polypropylene films under combined high electric fields and thermal stresses. In: IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1989, č. 4, s. 619–625.
- [12] Gadoum, A. et al.: Accelerated AC degradation of impregnated PP films. In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995 č. 6, s. 1075–1082.
- [13] Kannus, K. et al.: Electrical properties of polypropylene and polyaniline compounds. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. 2004. s. 67–70.
- [14] Bulinski, A. et al.: Dielectric properties of polypropylene loaded with synthetic organoclay. In: IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2009, s. 666–671.
- [15] Keysight Technologies: Solutions for Measuring Permittivity and Permeability with LCR Meters and Impedance Analyzers, Application note [online]. USA: Keysight Technologies, 2014. [cit. 2015-05-16] Dostupné <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5980-2862EN.pdf>

Autori:

Patrik Výrostko, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: patrik.vyrostko@student.tuke.sk

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