

Jaroslav Džmura, Matúš Stolár

Elektrické vlastnosti biaxiálne orientovaného polypropylénu pri tepelnom namáhaní

Témou tohto článku je experimentálne meranie vplyvu tepelného namáhania na vzorkách zvitkových kondenzátorov vyrobených z biaxiálne orientovaného polypropylénu. Použitá meracia metóda zahŕňa monitorovanie meraných parametrov počas celej dĺžky tepelného namáhania. Jednotlivé vzorky kondenzátorov boli uložené v prostredí s teplotou 100°C a v určitých časových úsekoch bola meraná kapacita a stratový činiteľ. Výsledky ukazujú ako tepelné namáhanie ovplyvnilo merané parametre zvitkových kondenzátorov.

Kľúčové slová: polypropylénová fólia; tepelné namáhanie; kapacita dielektrika; stratový činiteľ; elektrické vlastnosti dielektrika

The topic of this article is the experimental measurement of the effect of thermal stress on samples of coil capacitors made of biaxially oriented polypropylene. The used measurement method includes monitoring of the measured parameters during the entire length of the thermal stress. Individual samples of capacitors were stored in an environment with a temperature of 100°C and the capacity and loss factor were measured at certain time intervals. The results show how thermal stress affected the measured parameters of coil capacitors. (**Electrical properties of biaxially oriented polypropylene under thermal stress**)

Keywords: polypropylene film; thermal stress; dielectric capacity; loss factor; electrical properties of the dielectric

I. ÚVOD

Starnutie izolačných materiálov je jeden z najhlavnejších problémov v oblasti elektroenergetiky, kde spoľahlivosť a efektívnosť zariadení často závisí na kvalite použitých izolačných materiálov.

Pri súčasnom rozvoji obnoviteľných zdrojov narastá využitie prenosu elektrickej energie technológiou jednosmerného prúdu [1]. Technológia jednosmerného prúdu s meničom napätia sa využíva na pripojenie obnoviteľných zdrojov energie podobne aj stacionárnych úložisk energie do siete striedavého prúdu. Napäťové meniče v spojení s úložiskami energie majú pozitívny vplyv na zlepšenie kvality energie a to tým, že zlepšujú stabilitu napätia, znižujú straty a vylepšujú tlmenie oscilácií výkonu [1]. Kľúčové komponenty využívané v systéme meničov napätia sú kondenzátory. Od týchto kondenzátorov sa očakáva extrémna technická výkonnosť a bezchybná dlhodobá spoľahlivosť [2]. V súčasnosti sa vo výkonových kondenzátoroch využívajú fóliové dielektriká [3]. Na výrobu takýchto fóliových dielektrik sa využíva polypropylén, ktorý poskytuje výborné dielektrické vlastnosti. Jedná sa napríklad o nízku vodivosť, nízke dielektrické straty či vysokú elektrickú pevnosť [4]. Najmodernejšie výkonové kondenzátory využívajú takzvaný biaxiálne orientovaný polypropylén ako hlavnú izoláciu [3]. Názov biaxiálne orientovaná polypropylénová fólia vyjadruje postup jeho samotnej výroby a to, že počas jej výroby je fólia naťahovaná dvoma smermi. Na základe tohto postupu táto fólia vďaka skvelej prieraznej pevnosti a malým dielektrickým stratám [5]. Povrch tejto fólie je ešte pokrytý veľmi tenkou kovovou vrstvou, ktorá tvorí elektródy kondenzátora. Tento proces sa nazýva metalizácia fólie [6]. A vďaka tomu kondenzátory vyrobené z metalizovaného biaxiálne orientovaného polypropylénu majú špeciálnu vlastnosť. Ak sa v dielektriku nachádza znečistenie v podobe cudzích častíc alebo vzniknú trhlinky poprípade póry tak na takýchto miestach môže dôjsť k prierazu dielektrika pri zaťažení napätím. Počas vytvoreného dielektrického prierazu sa týmto miestom uvoľňuje časť uloženého náboja a tým sa v tomto mieste zvyšuje teplota a pôsobiaci tlak. Pod pôsobením týchto dvoch veličín sa tenká kovová vrstva rýchlo vyparuje a je z miesta prierazu samovoľne vytlačená. Týmto spôsobom sa miesto prierazu

stane elektricky izolované a preruší sa oblúk plazmy. Takáto vlastnosť biaxiálne orientovanej polypropylénovej fólie sa nazýva samoliečenie [7]. Jeden takýto samoliečivý proces vedie k veľmi malému poklesu kapacity, následkom zmenšenia sa samotnej plochy elektród kondenzátora [6]. V súčasnosti sa kondenzátory využívané technológiu metalizovanej biaxiálne orientovanej polypropylénovej fólie aplikujú v dvoch hlavných oblastiach. Prvou aplikovanou oblasťou je nízke napätie, kde sa používajú takzvané nízkonapäťové suché kondenzátory. Tieto kondenzátory sa využívajú pri vyšších teplotách okolia a tak sú veľmi žiadané hlavne v inteligentných sieťach a automobilových aplikáciách. Druhá oblasť kde sa tieto kondenzátory aplikujú je vysoké napätie [5]. Pri týchto kondenzátoroch sa využíva aromatická syntetická kvapalina, ktorá slúži na impregnáciu a výplň medzier vzniknutých medzi polypropylénovou fóliou a kovovou vrstvou a taktiež medzi zvyšnými rozhraniami vo vnútri obalu kondenzátora. Vďaka vyplneniu touto kvapalinou je možné docieľiť dielektrikum bez vzniknutia dutín. Aby bolo možné tejto kvapaline impregnovat' všetky časti vo vnútri tohto obalu je potrebné povrch polypropylénovej fólie upraviť. Takáto úprava povrchu fólie má veľký vplyv na výkon takéhoto vysokonapäťového kondenzátora. Realizuje sa zdrsnením povrchu fólie z jednej alebo z oboch strán [8].

II. MATERIÁL A METÓDY

Meranie vplyvu starnutia na vybrané merané parametre bolo realizované na šiestich vzorkách zvitkových kondenzátorov. Tieto vzorky boli dvoch rôznych typov s označením XT2BYL a T1BYL, z každého typu boli vybrané tri kusy (obr. 1). Pre jednoduchšie rozlíšenie a jednoduchšie zapisovanie meraných hodnôt boli jednotlivé vzorky označené číslom. Všetky merané vzorky mali veľmi podobnú veľkosť kapacity a to aj napriek rozdielnym typom. Líšili sa len vo veľkosti stratového činiteľa $\tan \delta$, kde mali vzorky prvého typu XT2BYL o čosi menšiu hodnotu obzvlášť pri menších frekvenciách oproti typu T1BYL.

Samotné dielektrikum týchto kondenzátorov bolo vytvorené z biaxiálne orientovanej polypropylénovej fólie s rôznymi štruktúrami vzhľadom na dva rôzne použité typy.



Obr. 1. Merané vzorky zvitkových kondenzátorov.

Teplné starnutie bolo realizované pomocou laboratórnej pece s názvom Memmert UN55plus. Teplné starnutie bolo realizované pri teplote 100°C. Laboratórna pec poskytovala veľmi presné a stabilné teploty kde rozdiel medzi požadovanou a skutočnou hodnotou bol veľmi malý a nepresahoval hodnotu 0,5°C. V stanovených časových úsekoch (tab. 1) boli vzorky kondenzátorov vybrané z pece, prirodzene ochladené na teplotu okolia a následne na nich bolo urobené meranie kapacity a stratového činiteľa. Po meraní boli znovu vložené do laboratórnej pece.

TABUĽKA I
Časový harmonogram merania vlastností vzoriek

Poradové číslo merania	Čas starnutia vzorky v hodinách
1	0
2	7
3	49
4	347
5	2440

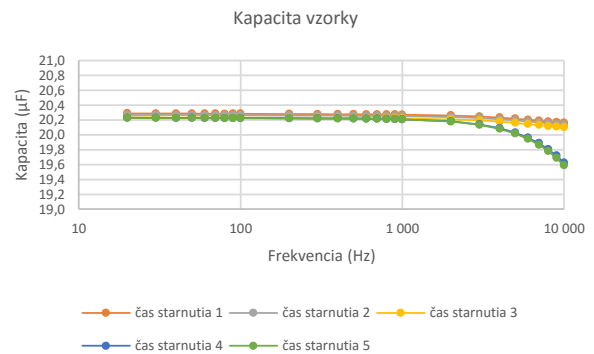
Na meranie bol použitý RLC meter Agilent E4980A (obr. 2), ktorým boli merané vybrané parametre a to kapacita C a stratový činiteľ $\text{tg } \delta$ pri zvolenom rozsahu frekvencií a napätí 1 V. Celé meranie bolo riadené pripojeným počítačom, ktorý ukladal namerané hodnoty do textového súboru.



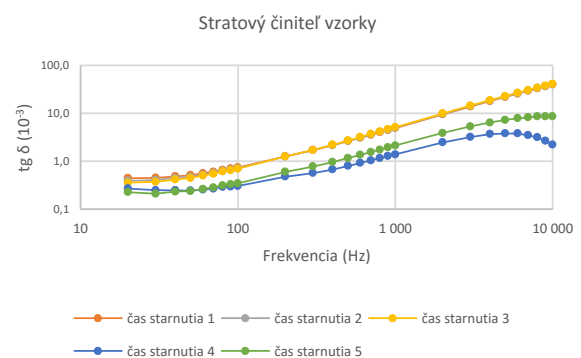
Obr. 2. RLC meter Agilent E4980A s vloženou meranou vzorkou.

III. VÝSLEDKY

Na každej vzorke bolo vykonané meranie kapacity a stratového činiteľa vo frekvenčnom rozsahu 20 Hz – 10 kHz. Pri každej meranej frekvencii bolo uskutočnených 10 meraní a výsledná hodnota bola získaná ako aritmetický priemer desiatich nameraných hodnôt. Riadiaci počítač ukladal do súboru každú meranú hodnotu a výslednú priemernú hodnotu. Grafická závislosť nameranej kapacity vzorky na frekvencii je na obr. 3 a grafická závislosť stratového činiteľa na frekvencii je na obr. 4.



Obr. 3. Grafická závislosť kapacity vzorky na frekvencii.

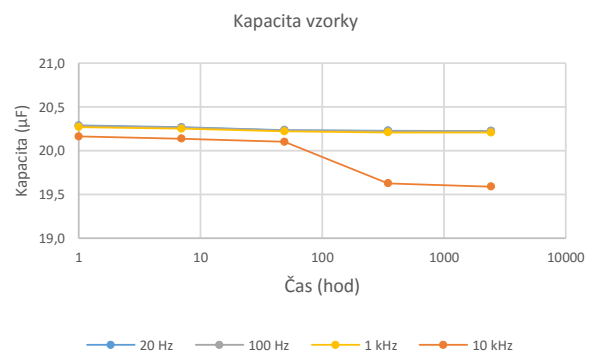


Obr. 4. Grafická závislosť stratového činiteľa vzorky na frekvencii.

Uvedené priebehy ukazujú, že po 49 hodinách starnutia sa ani kapacita ani stratový činiteľ výrazne nemenili, mierne zmeny sa prejavili až po 347 hodinách.

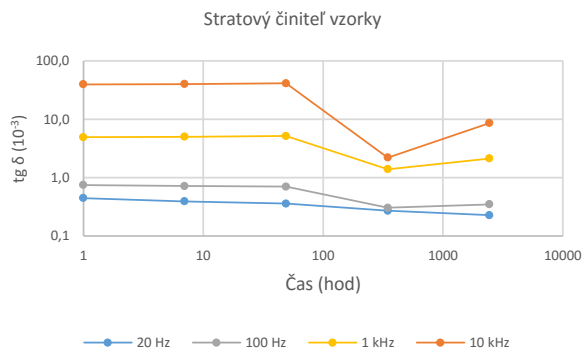
Závislosť kapacity na frekvencii má mierne klesajúcu tendenciu a výrazne sa nemení. Stratový činiteľ má pri krátkom starnutí (do 49 hodín) výrazne stúpajúci charakter a jeho hodnota pri frekvencii 10 kHz stúpne skoro stokrát oproti hodnote pri 20 Hz. Po dlhšom starnutí (viac ako 347 hodín) je priebeh menej strmý a hodnota sa zmení približne desať násobne.

Na obr. 5 je zobrazená grafická závislosť kapacity vzorky na čase starnutia a na obr. 6 je zobrazená grafická závislosť stratového činiteľa vzorky na čase starnutia.



Obr. 5. Grafická závislosť kapacity vzorky na dobe starnutia.

Z grafu na obr. 5 vyplýva, že kapacita vzorky sa pri nízkych frekvenciách prakticky nemení pri frekvencii 10 kHz s časom starnutia mierne klesá.



Obr. 6. Grafická závislosť stratového činiteľa vzorky na dobe starnutia.

Z grafickej závislosti stratového činiteľa na obr. 6 vyplýva, že tento sa pri nízkych frekvenciách s časom starnutia prakticky nemení, pri vyšších frekvenciách po 347 hodinovom starnutí klesol výrazne a po 2440 hodinách znovu stúpol.

IV. DISKUSIA

Z výsledkov merania kapacity a stratového činiteľa zvitkových kondenzátorov s dielektrikom s biaxiálne orientovanej polypropylénovej fólie vyplýva, že pri krátkych dobách tepelného namáhania sa ich hodnoty výrazne nemenia. Malé zmeny hodnôt kapacity a stratového činiteľa nastali až po 340 hodinách tepelného namáhania. Kapacita vzoriek sa menila len minimálne a jej zmena nepresiahla 3% pôvodnej hodnoty.

Stratový činiteľ sa menil výraznejšie. Po 347 hodinách tepelného namáhania stratový činiteľ klesol 20 násobne, čo svedčí o tom, že straty v dielektriku výrazne klesli. Po 2440 hodinách tepelného namáhania stratový činiteľ stúpol štvornásobne.

V. ZHRNUTIE A ZÁVER

Z nameraných výsledkov vyplynulo, že tepelné namáhanie v nami stanovenom čase 2440 h pri teplote 100°C nijako závažne neovplyvnilo merané parametre zvitkových kondenzátorov. Je možné sledovať minimálny pokles kapacity a o čosi väčší pokles stratového činiteľa.

Meranie bolo realizované v pomerne krátkom časovom úseku 2440 h, ktorý úplne nekorešponduje so životnosťou týchto kondenzátorov, čo sa preukázalo na základe meraní, keďže sa

neprejavili žiadne výrazné zmeny. Na sledovanie vývoja zmien kapacity a stratového činiteľa je potrebné podstatne viac času tepelného namáhania.

Z nameraných výsledkov vyplýva, že zvitkové kondenzátory s dielektrikom s biaxiálne orientovanej polypropylénovej fólie pri tepelnom zaťažení 100°C výrazne nemenia svoje parametre.

POĎAKOVANIE

Táto práca bolo podporená Agentúrou na podporu vedy a výskumu v rámci projektu APVV-22-0115 a Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaM SR a SAV VEGA 1/0627/24.

LITERATÚRA

- [1] G. C. Montanari, P. Seri, M. Ritamäki, K. Lahti, I. Rytöluoto, M. Paajanen, „Performance of nanoparticles in the electrical behavior of DC capacitor films,“ *12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, Xi'an, China, 2018, pp. 41-44.
- [2] M. Ritamäki, I. Rytöluoto, K. Lahti, „DC Voltage Endurance of Capacitor BOPP Films at High Temperature,“ *IEEE 2nd International Conference on Dielectrics*, Budapest, Hungary, 2018, pp. 1-4.
- [3] M. Ritamäki, I. Rytöluoto, K. Lahti, „High temperature and ageing test methods to characterize the dielectric properties of BOPP capacitor films,“ *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon*, Budapest, Hungary, 2017, pp. 266-269.
- [4] Z. Wang, C. Cui, Y. Ma, „Experimental Investigation on Breakdown Characteristics of Metallized Film Capacitors Under AC and DC Superimposed Voltage,“ *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 50, no. 2, pp. 478-488, Feb. 2022.
- [5] J. Kurimský, M. Kostelec, B. Vargová, „Breakdown voltage of polypropylene film during DC and thermal ageing,“ *18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*, Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2017, pp. 1-4.
- [6] M. Horák, P. Mach, „Study of thermal ageing of polypropylene film capacitors. IEEE 21st International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging, Brasov, Romania, 2015, pp. 57-60.
- [7] B. Yi, et al, „Breakdown Behavior of Metallized BOPP Film under the DC Superimposed Harmonic Condition,“ *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Richland, WA, USA, 2019, pp. 797-800.
- [8] C. Zhang, S. J. Rigby, R. C. Kempke, C. L. Fellers, M. J. Mason, X. Shen, „Evaluation of surface alteration of polypropylene film for power capacitors,“ *Electrical Insulation Conference*, Annapolis, MD, USA, 2011, pp. 511-515.
- [9] M. Stolar, *Starnutie izolačného materiálu na báze fólií*, Bakalárska práca, TU v Košiciach, 2024.

ADRESY AUTOROV

Jaroslav Džmura, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, jaroslav.dzmura@tuke.sk
 Matúš Stolar, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, matus.stolar@student.tuke.sk