

Juraj Kurimský

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

Príspevok k testovaniu a analýze elektrickej pevnosti PP fólie

Abstrakt. V článku je porovnávacia štúdia vlastností troch druhov PP fólií na základe výsledkov testov prierazného napätia. Počas testov boli vzorky podrobené tepelnému starnutiu. V popise experimentu sú uvedené informácie o elektródovom usporiadaní, o geometrii skúšobných vzoriek ako aj o aparatuře, pomocou ktorej boli vykonané merania. Výsledky meraní sú spracované štatistickými metódami a použité analytické postupy sú stručne popísané.

Kľúčové slová: polypropylén, polypropylénová fólia, starnutie dielektrik, prierazné napätie, elektródový systém, Weibullova analýza

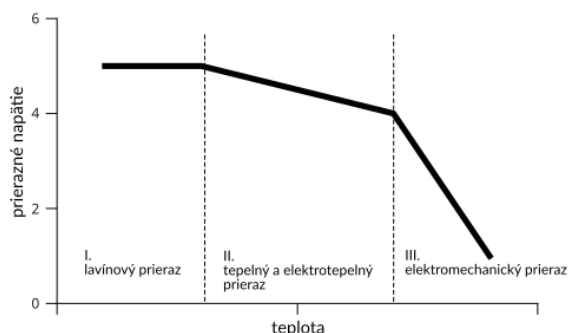
Úvod

V súčasnosti zápasíme s hrozbou blízkeho nedostatku fosílnych palív, kolapsom ekosystémov alebo hrozbou výpadkov strategických systémov ako napr. elektrizačných sústav. V oblasti elektroenergetiky sú aktuálnymi riešeniami inovácie zabezpečujúce zvyšovanie kvalitatívnych parametrov prvkov sústav, kroky k zvyšovaniu účinnosti konverzie energií, alebo odvážne vízie, pri ktorých je však potrebné prekonať resp. nahradiť súčasné rozvinuté technológie, na využívaní ktorých závisia ekonomiky i sociálne prostredia v širokom slova zmysle. Elektromobilita, ako možnosť pre znižovanie spotreby fosílnych palív v doprave, jednosmerné prenosy energie, pre znižovanie strát prenosových vedení a jednosmerné spojky sústav, pre zvyšovanie stability prepájaním elektrických sústav sú často skloňované pojmy. V každom z týchto odborov používajú kondenzátory, od ktorých sa požaduje dlhá životnosť, stabilita parametrov.

Polypropylén (PP) je jeden z najpoužívanejších materiálov na výrobu elektrických kondenzátorov. PP kondenzátory sú známe schopnosťou uchovávať vysokú hustotu elektrickej energie v malom objeme. Nedostatkom je, že takáto veľká energia pôsobí na zníženie celkovej životnosti. V súčasnosti sa dosahujú hustoty 2000 J/l [1].

Elektrická pevnosť PP

Určenie elektrickej pevnosti novovyvíjaných PP fólií je stále trvajúca požiadavka i bežná prax na preukázanie ich kvality. Elektrická pevnosť sa interpretuje ako výška prierazného napätia a sú známe tri oblasti vzájomne vykazujúce iný charakter elektrického prierazu: I. lavínový, II. tepelný a elektrotepelný prieraz a III. elektromechanický prieraz, obr. 1 [2].

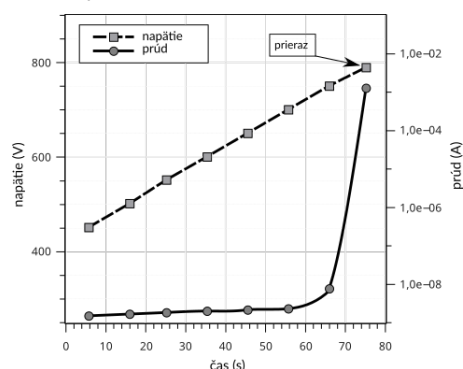


Obr.1. K interpretácii prierazu v PP (prevzaté z [2]).

Vykonávanie testov elektrickej pevnosti a dosiahnutie opakovateľnosti výsledkov merania nie je jednoduchá záležitosť, pretože do procesu merania vstupuje niekoľko

parametrov výrazne ovplyvňujúcich výsledky merania. Sú to najmä tlak, teplota, vlhkosť, geometria, kryštalinita apod. Rovnako dôležitým parametrom je efektívna veľkosť testovanej plochy. V zásade sa merania vykonávajú buď s „malými“ alebo „veľkými“ elektródami. Experimentálne bolo preukázané, že jednosmerné testy elektrickej pevnosti PP fólií sú menej závislé od znižujúcej sa testovanej plochy [3].

Z hľadiska priebehu testu elektrickej pevnosti jednosmerným napätím je zaujímavé sledovať aj vzájomnú súvislosť medzi testovacím napätím a prúdom, ktorý preteká objemom testovanej vzorky, obr. 2 [4]. Lavínový prieraz je charakteristický významnou časovou i amplitúdovou dynamikou.



Obr.2. Rozvoj prúdu a napätia v čase do prierazu v PP (prevzaté z [4]).

Metódy a materiály

Aby boli merania elektrickej pevnosti výpovedes schopné, je potrebné vykonať niekoľko opakovaných meraní. Štatistické metódy. Ak bolo meranie jedného typu prevádzkané v malom meradle, t.j. s malým počtom opakovaných meraní, stačí určiť niektoré nenáročné parametre ako napríklad priemerné, najmenšie a najväčšie prierazné napätie, jeho medián a následne ich vykresliť do jednoduchých grafov. Takýto postup je síce jednoduchý, ale neposkytuje žiadne informácie, ktoré by poskytli možnosti predikcie, kedy by mohlo dôjsť k prerazu počas prevádzky. Je však známe toto je možné aplikáciou pokročilejších metód známych z teórie rozdelenia pravdepodobnosti.

Weibullové rozdelenie (WR) a jeho parametre

V súčasnosti je WR štandardom vyhodnocovaní prierazných napätí dielektrik a používajú ho ako výskumníci [5][6], tak aj samotní výrobcovia. Interpretácia WR umožňuje kontrolu kvality pri vývoji nie len dielektrických fólií ale aj izolačných materiálov vo všeobecnosti.

Pre štatistické vyhodnotenie prerezov použijeme dvojparametrické ER. Pravdepodobnosť prerazu bude sledovať Weibullovu funkciu kumulatívnej pravdepodobnosti, danú ako [7]:

$$F(BDS; \eta, \beta, \gamma) = 1 - e^{-\left(\frac{BDS - \gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

kde F je kumulatívna pravdepodobnosť prerazu a η -- je 'scale' parameter, ktorý korešponduje s charakteristickou priraznou pevnosťou. β -- je 'shape' parameter. Tieto parametre nazývajú parametre Weibullového rozloženia. Vo výpočtoch použijeme dvojparametrické rozloženie. Preto je γ rovná nule. Charakteristická prirazná pevnosť je potom hodnota, pri ktorej platí: $F=63.2\%$, čo je pravdepodobnosť prerazu. WR sa často prezentuje vo forme log-log grafov.

Polypropylén je termoplast. PP fólia je priehľadná. PP dobre odolný voči kyselinám, zásadám a alkoholom. Má nízky stratový činiteľ ($3 \cdot 10^{-4}$), rezistivitu približne $1 \cdot 10^{15} \Omega$, relatívnu permitivitu približne 2,2. Elektrická pevnosť PP fólií je od 250 do 500 V/ μm . To je však závislé aj od hrúbky fólie a jej kvality.

Pri experimente sme použili fólie s hladkým povrchom, ktorá sa všeobecne používajú pri výrobe metalizovaných kondenzátorov. Zvitky boli navinuté z PP fólií s hrúbkami, tab. 1.

Tabuľka 1 Vlastnosti PP materiálu pre prípravu vzoriek

druh fólie	hrúbka fólie [μm]	šírka zvitku [mm]	počet zvitkov
1	6,5	500	15
2	6,5	400	15
3	6	500	15

Cieľom testu bolo sledovať vplyv starnutia na elektrickú pevnosť. Vzorky rozdelené na dávky: jedna dávka obsahovala vzorky pre čisto tepelné starnutie, vzorky v druhej dávke boli určené kombinované starnutie. Pre tepelné starnutie bola zvolená teplota 65 °C. Kombinované starnutie obsahovalo kombináciu teploty 65 °C a napätia 900 V aplikovaného na vzorky. Použitá prístrojová technika: sušiareň Memmert UN 110 a jednosmerný tester izolačného stavu GW Instek GPT-815.

Starnutie štvoretapové. Každá etapa trvala mala približne 350 h, (tab. 2). Po uplynutí etapy bola sušiareň otvorená bez vypnutia a vybratý jeden zvitok z každého typu vzorky. Po vybratí boli vzorky uložené do desikátora a vzduchotesne uzavreté až do testovania elektrickej pevnosti.

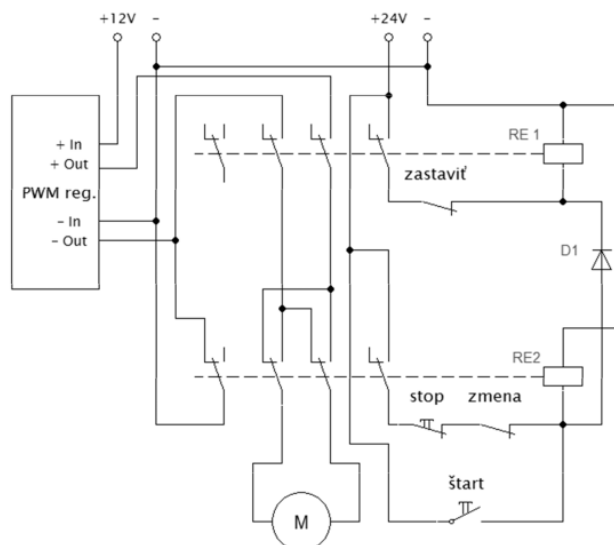
Tabuľka 2 Vlastnosti PP materiálu pre prípravu vzoriek

etapa	nestarnuté	1	2	3	4
označenie	0 h	350 h	700 h	1050 h	1400 h
reálny čas [h]	0	336	672	1008	1344

Nevýhoda dostupného zdroja jednosmerného napätia – ručná manipulácia pri riadení napätia bola prekonaná konštrukciou elektromechanického regulátora polohy. Elektrická časť je schematicky znázornená na obr. 2.

Elektródový systém sa skladal z dvoch hliníkových fólií, na ktoré boli pripojené prírody vn zdroja. Medzi vzorku a elektródu je umiestnená takzvaná maska, alebo maskovacia fólia. Je to vrstva z izolačného materiálu

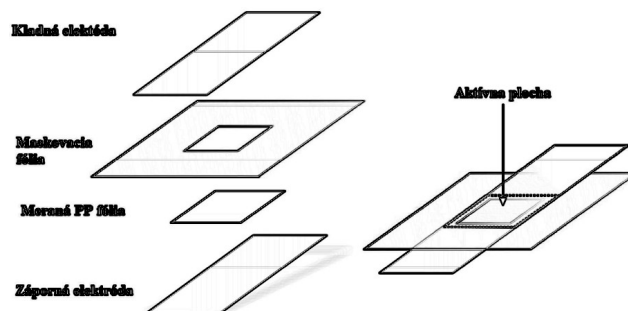
s hrúbkou väčšou ako je hrúbka vzorky. V experimente bola hrúbka izolačnej fólie 100 μm . Maska bola štvorcová so stranou 30 mm. Celková testovaná plocha bola teda 900 mm^2 . Maskovacia vrstva bola prekrytá vrchnou elektródou, obr.4.



Obr.3. Elektrická schéma regulátora nárastu testovacieho napätia.

Pre každý typ fólie bolo vykonaných 50 – 55 meraní, pri teplote 21 °C a štandardnom atmosférickom tlaku.

Pre označovanie vzoriek bol použitý jednoduchý kód, ktorý pozostával zo štyroch sekvencií znakov. Ako prvé bolo označenie typu fólie a to 1,2,3. Ako druhý nasledoval typ starnutia a to TT pre čisto tepelné a TU pre kombinované starnutie. V tretej skupine znakov nasledovalo označenie etapy a to: 0000, 350, 700, 1050 a 1400. Poslednou dvojcifernou je poradové číslo vzorky. Napríklad kód 1_TT_700_46 označuje vzorku vyrobenú z fólie typu 1, starnutú 700 h čisto tepelne a je určená pre 46. meranie.



Obr.4. Štruktúra elektródového systému použitá pri testovaní materiálu.

Výsledky a diskusia

Z meraní bola vytvorená tabuľka prirazných napätí, v ktorej boli zapísané všetky namerané hodnoty pre jednotlivé etapy a typy fólie. Následne bola táto tabuľka upravená odstránením odľahlých hodnôt. Takto korigované údaje o elektrickej pevnosti boli prepočítané na hodnoty intenzity elektrického poľa. Ďalej boli vyhodnotené najpodstatnejšie stredné hodnoty výsledkov merania a štandardná chyba, ktoré boli spracované do grafov.

Tabuľka 3: Výsledky meraní elektrickej pevnosti na troch druhoch PP fólií

typ fólie	etapa	n	E_{BD} (V/ μ m)	E_{min} (V/ μ m)	E_{max} (V/ μ m)	Medián (V/ μ m)	SE (V/ μ m)	Rozptyl (V ² / μ m ²)
1	0 h	48	419,17	162,46	648,62	449,39	23,00	25 385,83
	350 h	54	399,79	158,92	686,31	376,85	21,15	24 147,14
	750 h	54	490,93	135,54	717,08	559,62	22,05	26 247,15
	1050 h	52	386,10	160,00	655,23	341,92	20,25	21 328,20
	1400 h	53	432,75	175,08	668,31	452,15	18,23	17 614,41
2	0 h	49	399,90	76,62	643,69	398,62	18,86	17 425,46
	350 h	52	442,12	193,08	656,62	488,62	20,29	21 400,64
	750 h	51	421,40	164,62	687,85	403,08	23,76	28 785,36
	1050 h	51	398,75	176,15	641,23	414,00	17,23	15 132,38
	1400 h	51	393,22	148,31	659,54	366,31	23,31	27 721,02
3	0 h	51	421,28	159,33	664,00	438,83	21,86	24378,21
	350 h	52	492,86	168,83	679,50	505,58	20,47	21789,80
	750 h	53	517,57	215,50	659,17	541,17	16,77	14,916,63
	1050 h	51	447,06	185,67	679,67	484,83	21,13	22784,41
	1400 h	53	338,54	150,50	583,17	316,83	17,88	16946,22

n – počet vzoriek, E_{BD} - stredná hodnota elektrickej pevnosti, E_{min} a E_{max} – minimálna a maximálna hodnota elektrickej pevnosti, SE – štandardná chyba.

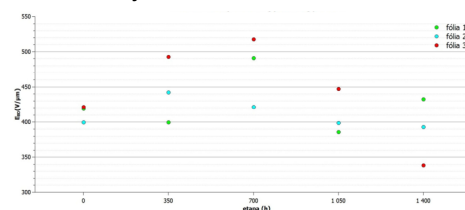
Pre porovnanie testov na všetkých troch fóliách bola vykonaná pravdepodobnostná analýza podľa dvojparametrického WR. Vypočítané parametre β a η sú v tab. 4.

Tabuľka 4: Parametre Weibullového rozdelenia

typ fólie	etapa	n	β	η	E_{BDVSA}
1	0 h	48	2,89	467,03	419,17
	350 h	54	3,01	443,40	399,79
	750 h	54	2,98	550,78	490,93
	1050 h	52	3,25	426,46	386,10
	1400 h	53	3,57	480,09	432,75
2	0 h	49	3,05	448,93	399,90
	350 h	54	3,28	483,65	442,12
	750 h	51	2,88	468,07	421,40
	1050 h	51	3,59	441,65	398,75
	1400 h	51	2,80	435,62	393,22
3	0 h	51	3,14	466,87	421,28
	350 h	52	3,34	549,35	492,86
	750 h	53	4,42	567,26	517,57
	1050 h	51	3,21	497,43	447,06
	1400 h	53	3,21	373,98	338,54

Ako je možné vidieť výsledky nenaznačujú jednoduché, predpokladané zhoršenie prieraznej pevnosti s časom starnutia, porov. obr. 5. Merania poukázali, že po 350 h starnutia dochádza k poklesu dielektrickej pevnosti a v nasledujúcej etape k jej nárastu o 91,14 V/ μ m. Najpravdepodobnejší prieraz nestarnej, iba vysušenej fólie je pri intenzitách 100-130 V/ μ m. Intenzity od 130 V/ μ m do 260 V/ μ m najviac ohrozujú prierazom fólie starnuté 350 h. Ak intenzita prevyšuje približne 260 V/ μ m, nastane prieraz po starnutí 1050 h. 99 % vzoriek z tejto etapy prerazia pri intenzite elektrického poľa 680 V/ μ m. K najmenej prierazom dochádzalo na vzorkách z etapy 1400 h, a to do hodnoty 235 V/ μ m. Nad touto hranicou je

najmenej pravdepodobný prieraz vzorky starnutej 750 h. 99 % vzoriek starnutých 750 hodín bude prerazených pri intenzite elektrického poľa 920 V/ μ m, čo je o 240 V/ μ m viac ako pri starnutí trvajúcim 1050 hodín.



Obr.5. Stredné hodnoty elektrickej pevnosti testovaných vzoriek

Záver

Experiment bol zameraný na zdokonalenie metodiky testovania a vyhodnocovania elektrickej pevnosti polypropylénových fólií. Vzorky boli navíjané profesionálne – výrobcom. Boli testované fólie určené na metalizáciu. Zvitky neboli impregnované. Pre budúci výskum by bolo vhodné použiť tento typ hladkých fólií už s metalickým povlakom. Nevýhodou tohto postupu je však to, že je potrebné veľké množstvo kondenzátorov. Skúška elektrickej pevnosti je deštruktívny test. Pri použití navrhovaného postupu, je potrebné testovať približne 1350 ks kondenzátorov. Na druhej strane sa takýmto testovaním získa podrobný prehľad o vývoji prieraznej pevnosti počas postupujúceho starnutia PP vzoriek.

Podakovanie

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a inovácie pre projekt: Inovatívne postupy testovania pre priemysel 21. storočia ITMS: 313011T565, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja“.

Literatúra

- [1] P. Michalczyk, M. Bramouille, Ultimate properties of the polypropylene film for energy storage capacitors. In: IEEE Transactions on Magnetics. 2003, č. 1, s. 362–365
- [2] M. Ieda, M. Nagao, and M. Hikita, "High-field conduction and breakdown in insulating polymers. Present situation and future prospects," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 1, no. 5, pp. 934–945, Oct. 1994. doi: 10.1109/94.326660
- [3] S. J. Laihonon, U. Gafvert, T. Schutte, and U. W. Gedde, "DC breakdown strength of polypropylene films: area dependence and statistical behavior," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 14, no. 2, pp. 275–286, Apr. 2007. doi: 10.1109/TDEI.2007.344604
- [4] J. Kurimský, M. Kostelec and B. Vargová, "Breakdown voltage of polypropylene film during C and thermal ageing," 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/EPE.2017.7967279
- [5] M. Ritamäki, I. Rytöluoto, K. Lahti, T. Vestberg, S. Pasanen, T. Flyktman, Large-area approach to evaluate DC electro-thermal ageing behavior of BOPP thin films for capacitor insulation systems, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 24 (2017) 826–836. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006405>.
- [6] I.J. Rytöluoto, Large-Area Multi-Breakdown Characterization of Polymer Films: A New Approach for Establishing Structure–Processing–Breakdown Relationships in Capacitor Dielectrics, Thesis for the degree of Doctor of Science in Technology, Tampere University of Technology. Publication 1356, 2016.
- [7] W. Weibull, others, A statistical distribution function of wide applicability, Journal of applied mechanics 18 (3) (1951) 293–297.

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