

Roman Cimbala, Ľudovít Csányi

Katedra elektroenergetiky, FEI TU v Košiciach, Slovenská republika

## Kumulatívna frekvenčná závislosť činiteľa dielektrických strát izolačného materiálu

**Abstract.** The paper deals with polarization spectrum of insulation material used in high voltage rotating machines. Two area of frequency spectrum are observed. Low frequency area was examined using current response analyzing and high frequency area is measured by direct impedance measurement.

**Keywords:** izolačný systém, polarizačné spektrum, činiteľ dielektrických strát.

### Úvod

Najdôležitejšia vlastnosť, ktorou disponuje ľubovoľný izolačný systém, je jeho elektrická pevnosť. Je daná veľkosťou napätia, pod úrovňou ktorého ešte nedôjde k elektrickej deštrukcii materiálu, k vzniku trvale vodivého kanálu. Exaktne získať veľkosť tejto veličiny je možné iba skúškou elektrickej pevnosti. Je nutné si uvedomiť, že pri izolačných systémoch tvorených pevným dielektrikom je to skúška deštruktívna. Izolačný systém je po skúške nenávratne poškodený a vyradený z užívania. Tento spôsob určenia elektrickej pevnosti je pre prevádzkové podmienky nevhodný.

V prevádzkovej diagnostike sa uplatňujú iba skúšky čiastočne alebo potenciálne deštruktívne a nedeštruktívne. K čiastočne deštruktívnym skúškam môžeme zaradiť skúšky priloženým napätím s veľkosťou nominálneho alebo definovaného násobku nominálneho napätia. Niektoré ďalšie metódy si vyžadujú priamo zásah do izolačného systému elektrického zariadenia. Dôležitosť merania a sledovania elektrických vlastností izolačných materiálov rastie neustále tým viac, čím viac nových izolačných systémov elektrotechnický a chemický priemysel dáva na trh. Je známe, že počas starnutia materiály menia svoje fyzikálne a chemické vlastnosti [1] a môžu spôsobovať poruchy nie len jedného systému ale aj celej siete [2] či sústavy [3].

Existuje veľa metód, ktoré sledujú tendencie vlastností materiálov počas doby ich života. Dnes však nie je dostupná jediná metóda, ktorá by sama dokázala určiť stupeň degradácie materiálu. Tento článok sa zaoberá jednou z nich, a to je určenie polarizačného spektra izolačného materiálu na báze sfuda – epoxid, ktorý sa používa pre vysokonapäťové izolačné systémy elektrických strojov točivých [4].

### Teoretické východiská

Ako už bolo spomínané, doposiaľ nie je známa charakteristická veličina alebo parameter, ktorý by samotný, bez pomoci iných, doplnujúcich, jednoznačne dokázal určiť stav izolačného systému. Navyše, systémy sú namáhané degradačnými činiteľmi, ktoré sa buď nevyskytovali, alebo o nich doposiaľ neboli dostatočné vedomosti, napr. radiačné žiarenie.

Jedným zo súborov metód, ktoré tvoria komplex diagnostických meraní pre elektrotechnické zariadenia sú aj jednosmerné a striedavé metódy založené na sledovaní napäťových alebo prúdových odoziev v izolačných systémoch. Na základe vhodne zvoleného matematicko – fyzikálneho modelu dielektrika sú vypočítavané alebo priamo odmerané jeho jednotlivé prvky a pomocou ich zmien je analyzovaný stav sledovaného objektu.

Je nutné si však uvedomiť, že matematický aparát slúži na kvantifikovanie fyzikálnych veličín, resp. na stanovenie kvality ich vzájomných vzťahov. Akokoľvek úspešne zostavený a overený matematický model, v ktorom sa stráca fyzikálna podstata javu, je schopný len málo vypovedať o skúmanom probléme. Týka sa to rôznych úprav prvotného matematického modelu, ktoré majú za následok síce jednoduchšie riešenie, alebo umožnenie riešenia výpočtovou technikou, ale na druhej strane sa nie raz tým stratí fyzikálna interpretácia.

### IRC analýza dielektrika

V polyméri sú pre izotermický relaxačný prúd odpovedajúce záchytné hladiny nad celkovým pásmom dier, ako aj diskkrétne rozdelené energetické hladiny. Pri zanedbaní rekombinácie nosičov náboja je možné priame stanovenie záchytných hladiny z nameraného polarizačného alebo relaxačného prúdu. Túto úvahu je možné na základe Debyeovho modelu existencie nezávislých elementárnych polarizácií rozšíriť aj na kompozitné izolačné materiály.

Úvaha zo základnej symetrie, že časť záchytných hladín leží nad Fermiho hladinami a môžu byť obsadené zápornými nosičmi náboja, je postačujúca. Inicializácia obsadenia záchytných hladín, a teda počet vzbudených elektrónov v týchto hladinách je po priložení elektrického poľa dosť vysoký, pretože nosiče náboja sa pohybujú bez obnovenia energie. Preto sa hodnota meraného prúdu určí len z emisie záporných nosičov náboja.

Priamo odmerať jednotlivé parametre popisujúce zmenu energetického spektra skúmaného materiálu nie je v reálnych podmienkach možné. Je preto nevyhnutné sledovať vonkajší prejav polarizácie dielektrika, a tým je absorpčný alebo resorpčný prúd generovaný pripojeným jednosmerným napätím na izolačný systém.

Celkový prúd je možné považovať za sumu elementárnych relaxačných prúdov exponenciálne klesajúcich v čase rovnicou (1), čo je plne v zhode s mikroskopickým prejavom na úrovni rozloženia energetických hladín vyjadrených popísaných rovnicou v [5]

$$i_N(t) = \frac{U}{R_0} + \sum_{i=1}^n I_{mi} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (1)$$

$$\tau_i = R_i \cdot C_i \quad (2)$$

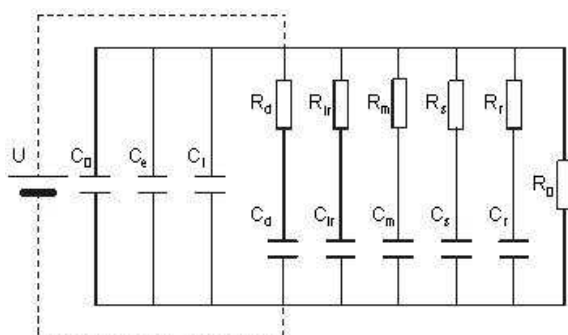
$$I_{mi} = \frac{U_0}{R_i} \quad (3)$$

kde

$U_0$  - aplikované jednosmerné napätie,

$R_0$  - izolačný odpor v čase  $\infty$ ,  
 $I_{mi}$  - amplitúda  $i$ -teho elementárneho prúdu,  
 $\tau_i$  - časová konštanta  $i$ -teho elementárneho prúdu  
 $n$  - počet elementárnych prúdov.

Všetky dielektriká je možné nahradiť ich ekvivalentným modelom pozostávajúci zo sústavy odporov a kondenzátorov. Tento model, popisujúci správanie sa systému v časovej, resp. frekvenčnej oblasti, má elektrofyzikálny základ a je možná jeho fyzikálna aplikácia [6]. Najčastejšie používanou schémou je Maxwell-Wagnerov model dielektrika Obr. 1. Jeho výhoda spočíva v tom, že vystihuje relaxačné procesy v celom objeme dielektrika. Jednotlivé prvky v náhradných schémach charakterizujú javy, ktoré prebiehajú v dielektriku po jeho pripojení na elektrické napätie [7].



Obr.1 Maxwell-Wagnerov náhradný model dielektrika

Polarizačné spektrum v dielektriku sa modeluje pomocou tzv. Maxwellovej náhradnej schémy, kde jednotlivé  $R_i$  a  $C_i$  členy zapojené v sérii reprezentujú druh polarizácie s dobou ustálenia.  $C_0$  je geometrická kapacita,  $R_0$  je izolačný odpor pri jednosmernom napätí a  $\tau_i$  je časová konštanta, ktorá charakterizuje polarizačný dej. Ostatné kapacity a im odpovedajúce náboje sú podmienené jednotlivými druhmi polarizácie. Odpory  $R_i$  s príslušnými indexmi odpovedajú stratám energie pri jednotlivých polarizáciách.

#### Výpočet prvkov Maxwell-Wagnerovho náhradného modelu

Polarizačné spektrum bolo merané na materiáli založeného na báze epoxidovej živice a sľudy. Jedná sa o v súčasnosti najrozšírenejší materiál používaný na izolačné systémy elektrických strojov točivých. Merané vzorky boli kruhového tvaru s elektródami vytvorenými pomocou nanosenia strieborného filmu. Vzorky boli umiestnené v špeciálnej elektródovej komore Keithley 8008, ktorá umožňuje merať extrémne vysoké hodnoty odporov až do  $10^{+18} \Omega$ .

Analýzu a rozklad celkového prúdu do elementárnych zložiek a výpočet  $I_{mi}$  a  $\tau_i$  vykonáva prostredníctvom izotermickej relaxačnej analýzy (IRC – Isothermal Relaxation Current analysis). Pomocou matematického rozkladu celkového prúdu sa určí jednosmerná zložka a časovo závislé zložky. Z jednosmernej zložky sa určí izolačný odpor v čase  $\infty$ . Počet časovo závislých zložiek je určený zložitou štruktúrou materiálu a časovým oknom zodpovedajúcim dobe aplikovania vonkajšieho elektrického poľa formou aplikovaného jednosmerného napätia. Princíp výpočtu Maxwell-Wagnerovho modelu dielektrika a tým aj určenie polarizačného spektra je uvedený v [5].

Pribeh nameraného prúdu bol zaznamenaný pomocou riadiaceho programu v programovacom prostredí Agilent VEE.

Zaznamenaný pribeh prúdu je následne analyzovaný v prostredí Matlab, v ktorom sú vypočítané jednotlivé neznáme

$I_{mi}$  a  $\tau_i$  z rovníc (2) a (3). Člen  $C_0$  sa vypočítal z geometrického usporiadania elektród s uvažovaním vákuu v medzielektródovom priestore a člen  $R_0$  bol vypočítaný programom v Matlabe pri výpočte aproximácie do 7 členného rozvoja s uvažovaním vodivostnej zložky  $I_0$ .

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{Re}\{Y\}}{\operatorname{Im}\{Y\}} = \frac{1}{R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i \cdot (\omega C_i)^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (4)$$

Tab. 1 Vypočítané prvky Maxwell-Wagnerovho náhradného modelu dielektrika

$I_{mi}$ [pA]	$\tau_i$ [s]	$R_i$ [GW]	$C_i$ [pF]
1709	0,19	59	3,25
315	0,89	317	2,80
80	4,46	1250	3,57
32	15,36	3125	4,92
12	56,77	8333	6,81
6	192,34	16667	11,54
9	3574,44	11111	321,70

Priamy prepočet medzi časovou a frekvenčnou doménou je možné vykonať na základe vzťahu (4) resp. vzťahov uvedených v [8], [9] a [10]. Výsledky pre homogénnejší typ izolačného materiálu sú uvedené v [11] a [12].

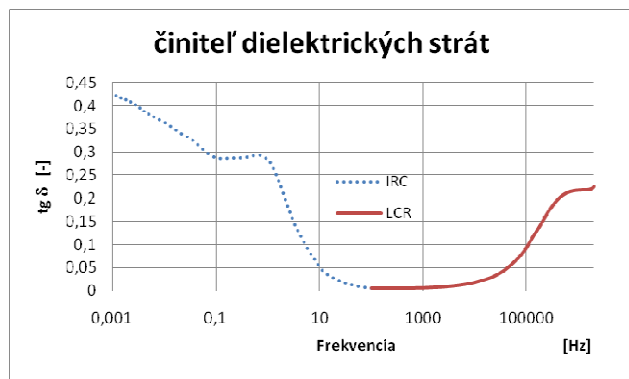
#### Meranie polarizačného spektra priamou metódou

Vyššie popísaný spôsob je vhodný na určenie polarizačného spektra pomocou výpočtu prvkov Maxwell-Wagnerovho náhradného modelu v oblasti nízkych frekvencií. Uvažuje totiž z meraní v oblasti 0,05 sek a vyššie, t. z. vo frekvenčnej oblasti 20 Hz a nižšie. Meracia metóda patrí medzi jednosmerné metódy. Pre oblasť vyšších frekvencií je potrebné použiť metódu založenú na sledovaní odozvy v striedavej oblasti. Na to je vhodná metóda merania komplexnej admitancie dielektrika pomer jej reálnej a imaginárnej zložky je priamo úmerný stratám pri danej frekvencii merania. Bolo vykonané meranie na vzorke izolačného materiálu skúmaného izotermickou relaxačnou analýzou a následným výpočtom Maxwell-Wagnerovho náhradného modelu. Meranou veličinou bola admitancia v komplexnej oblasti a jej priame meranie pomocou LCR metri Agilent E4980A vo frekvenčnej oblasti 20 Hz až 2 MHz.

#### Kumulatívne polarizačné spektrum izolačného materiálu

Výsledky merania činiteľa dielektrických strát nepriamou metódou výpočtom prvkov náhradného modelu bolo potrebné pomocou vzťahu (4) pretransformovať do frekvenčnej oblasti. Vzhľadom na časovú oblasť merania sú data platné do frekvencie 20 Hz.

Data získané priamym meraním komplexnej admitancie sú vzhľadom na použité prístrojové vybavenie platné od frekvencie 20 Hz do frekvencie 2 MHz.



Obr.2 Kumulatívna frekvenčná závislosť činiteľa dielektrických strát

Na Obr. 2 je uvedená kumulatívna závislosť činiteľa dielektrických strát zložená z vypočítaného spektra pre nízke frekvencie do 20 Hz z IRC analýzy a závislosť získaná priamym meraním pomocou LCR. Vypočítaná hodnota činiteľa dielektrických strát pre frekvenciu 20 Hz bola 0,0257 a nameraná LCR metrom 0,0178.

### Záver

Výsledkom experimentu je definovanie polarizačného spektra materiálu v oblasti, ktorú nie je možné určiť jednou meracou metódou. Oblasť, v ktorej sa metódy prekrývajú, je frekvencia 20 Hz. Správnosť výpočtu pre prepočet z časovej oblasti do frekvenčnej a priameho merania činiteľa dielektrických strát bola overená jeho porovnaním v oblasti, kde sa tieto metódy prekrývajú. Bola zistená zhoda meraného parametra.

Kombinácia oboch meracích techník umožňuje získať polarizačné spektrum izolačného materiálu vo veľmi širokej frekvenčnej oblasti a následne ho využiť pri diagnostifikovaní stupňa zostarnutia izolačného systému.

### PodĎakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Centrum výskumu účinnosti integrácie kombinovaných systémov obnoviteľných zdrojov energií, kód ITMS: 26220220064, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

### LITERATÚRA

- [1] R. Cimbala, "Ageing of high voltage insulation systems", science monograph, TU Košice 2007
- [2] L. Geschwinder, P. Toman: Possibilities of Using Multi - Dimensional Statistical Analyses Methods when Evaluating Reliability of Distribution Networks, 11th International Scientific Conference on Electric Power Engineering 2010, pp. 587-591
- [3] R. Goňo, M. Krátký, S. Rusek: Analysis of Distribution Network Failure Databases. In Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review), 2010, vol. 86, čís. 8/2010, s. 168-171, 4 s. ISSN 0033-2097
- [4] E. Németh, T. Horvath, „Fundamental of the Stimulation of Dielectric Processes of Insulations”, 8-th ISH, Yokohama, Japan 1993
- [5] M. Beigert, H.-G. Kranz, D. Kaubisch, D. Meurer, "Computer – Aided Destruction Free Ageing Diagnosis for Medium – Voltage Cables", 8-th ISH Yokohama, Japan, paper 67.11, 1993
- [6] B. Dolník, J. Kurimský, " The Change of Relaxation Current Pattern Due to Forced Thermal Aging of Sintered Ceramics", Electric Power Engineering 2010, proceedings of the 11th International Scientific Conference, Brno, pp.. 739-742.
- [7] K. Marton, J. Balogh, J. Petráš, et al."Situation analysis of electric field on boundary-line of solid state electrode and gas" Preglad elektrotechniczny, Volume: 86, Issue: 8, Poland 2010, pp. 307-311
- [8] T. Leibfried, "Comparability of Dielectric Analysis Results on Power Transformers", Institute of Electric Energy Systems and High-Voltage

Technology, University of Karlsruhe Manfred Stach, E.ON Engineering GmbH, Gelsenkirchen, Germany, 2005

- [9] V., D. Houhaneessian, "Measurement and analysis of dielectric response in oil-paper insulation systems", Dissertation work, Swiss Federal Institute of Technology Zürich, Diss. ETH No. 12832, Zürich, 1998
- [10] T. K. Saha, P. Purkait, F. Muller, "An Attempt to Correlate Time and Frequency Domain Polarisation Measurements for the Insulation Diagnosis of Power Transformer", School of Information technology and Electrical Engineering, University of Queensland, Australia 2005.
- [11] Cimbala, R., Kolcunová, I., Dedinská, L., Čáčková, V. Thermal dependency of dielectric properties of liquid insulating materials, Electric Power Engineering 2010, proceedings of the 11th international scientific conference Brno, 2010, pp. 743-747
- [12] Semančík, P., Tepelná degradácia izolačných systémov, dizertačná práca, TU Košice, 2009

**Autor:** Roman Cimbala, Department of Electric Power Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical University Košice, Slovakia, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [roman.cimbala@tuke.sk](mailto:roman.cimbala@tuke.sk)

Ludovít Csányi, Department of Electric Power Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Technical University Košice, Slovakia, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [ludovit.csanyi@tuke.sk](mailto:ludovit.csanyi@tuke.sk)