

Štefan Hužvár, Roman Cimbala, Samuel Bucko, Juraj Kurimský

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

## Impedančná spektroskopia pevných izolačných materiálov

**Abstrakt.** Predkladaný príspevok sa zaoberá meraním dielektrických parametrov XLPE izolácie vn káblov metódou impedančnej relaxačnej spektroskopie. Hlavnou úlohou práce je spojiť namerané údaje frekvenčného spektra získané pomocou troch meracích prístrojov s rôznymi princípmi resp. modelmi merania. Vyhodnotenie práce spočíva v poukázaní prebiehajúcich polarizačných dejov v XLPE izolácii v závislosti na frekvencii meracieho signálu a navrhnutí meracej techniky pre meranie dielektrických materiálov pomocou širokopásmovej frekvenčnej analýzy.

**Kľúčové slová:** impedančná spektroskopia, dielektrikum, XLPE izolácia

**Abstract.** The present paper deals with the measurement of dielectric parameters of XLPE insulated high voltage cables by the impedance spectroscopy relaxation. The main part of this work is to combine the measured data of three measuring instruments with a different frequency measurement principles or measurement models. Evaluation of presented work shows a certain polarizations in XLPE insulation and it contains suggestion of measurement technic for measurement of dielectric materials using wideband frequency analysis.

**Keywords:** Impedance spectroscopy, Dielectric, XLPE insulation

### Úvod

Na diagnostiku dielektrických vlastností izolačných materiálov sa používa široké spektrum analytických metód. V popísanom experimente bola venovaná pozornosť metóde impedančnej relaxačnej spektroskopie (IRS), ktorá patrí medzi nedeštruktívne diagnostické metódy. Skúmanými prvkami boli vzorky pevnej izolácie XLPE vysokonapäťových 23 kV káblov.

Cieľom tohto experimentu bolo pomocou metódy IRS zistiť elektrofyzikálnu charakteristiku XLPE izolácie v širokom spektre frekvencií od  $10^{-4}$  do  $10^{+9}$  Hz. Takéto široké spektrum frekvencií bolo nutné vytvoriť spojením frekvenčných oblastí troch meracích prístrojov. Spojením údajov nameraných v celom frekvenčnom spektre sa dospelo k vytvoreniu kontinuálnych grafických závislostí dielektrických parametrov od frekvencie. V príspevku je venovaná pozornosť skúmaniu javov prebiehajúcich v XLPE izolácii, no poukazuje sa taktiež na techniku merania a jej skvalitňovanie v prípade použitia viacerých meracích prístrojov.

### Teoretické východiská

Na sledovanie dejov prebiehajúcich v dielektriku existuje rad metód a jednou z nich je metóda impedančnej relaxačnej spektroskopie, v odbornej literatúre je možné sa stretnúť tiež s pojmom dielektrická relaxačná spektroskopia (DRS), ktorá zaberá špeciálne miesto medzi mnohými modernými nedeštruktívnymi metódami používanými pre fyzikálne a chemické analýzy materiálov v mnohých oblastiach (elektrotechniky, fyziky, chémie, materiálového inžinierstva a biomedicíny). Metóda umožňuje skúmanie

dielektrických relaxačných procesov v extrémne širokom rozsahu časov  $10^{-12} - 10^{+15}$  s. Princíp metódy IRS (resp. DRS) je založený na skúmaní odrazov mikrofyzikálnych mechanizmov testovanej látky na vonkajšie podnety. V našom prípade je to nepriame meranie polarizácie polárnych alebo polarizovateľných materiálov pomocou odozvy vyvolanej zmenou vonkajšieho elektrického poľa. Vo všeobecnosti môžeme dielektrikum charakterizovať pomocou jednosmernej vodivosti  $\sigma_0$ , relatívnej permitivity  $\epsilon_\infty$  a funkcie dielektrickej odozvy  $f_t$ . [1][2]

Tieto polarizačné mechanizmy je možné merať pomocou pôsobenia striedavého elektrického poľa danej frekvencie, čím rozdeľujeme impedančnú spektroskopiю na metódy merané vo frekvenčnej oblasti a na metódy merané v časovej oblasti, kde polarizačné mechanizmy sú sledované v jednosmernom elektrickom poli, resp. kvázijednosmernom elektrickom poli pri pomalej zmene amplitúdy testovaného signálu [1][2]. Pri meraní z časovej oblasti zvyčajne nedochádza k zmene polarity aplikovaného napätia.

V časovej oblasti sledujeme polarizačný a depolarizačný prúd tečúci dielektrikom, ktoré bolo vložené do jednosmerného elektrického poľa, resp. zaznamenáva sa časový priebeh prúdu dielektrika na skokovú zmenu napätia. V prípade, ak je dielektrikum možné popísať ako lineárny systém, je možné namerané hodnoty previesť z časovej do frekvenčnej oblasti. Je to výhodné, pretože sa namerané hodnoty takto skúmaného dielektrika dajú vo frekvenčnej oblasti jednoduchšie a ľahšie porovnať.

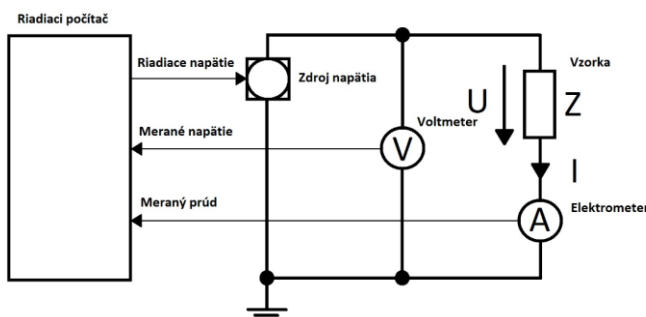
Aj dielektrikum nie je lineárne, je možné linearizovať priebeh nabíjacieho a vybíjacieho prúdu v log-log súradniciach aplikovaním Debyeovho modelu na princípe nezávislých elementárnych polarizačných dejov.

Vo frekvenčnej oblasti sa IRS zameriava na vyhodnotenie frekvenčnej závislosti stratového činiteľa  $tg \delta(\omega)$  a komplexnej kapacity  $C(\omega)$  resp. komplexnej permitivity. Pre meranie dielektrickej odozvy vo frekvenčnej oblasti je používané striedavé napätie rôznych frekvencií, čo môže byť dosť obtiažné, ak sa frekvenčná oblasť stane veľmi rozsiahlou. Sofistikované meracie prístroje dokážu pokryť niekoľko dekád frekvencií. Na hodnotenie aktuálneho stavu izolačného systému sa používajú klasické metódy na meranie komplexnej kapacity  $C^*$  a stratového činiteľa  $tg \delta(\omega)$  v závislosti na frekvencií. Tieto merania sú vykonávané mostíkovými obvodmi, ktoré sú zložené z ladených kondenzátorov. Hlavným problémom týchto meraní je, že sa v nameraných hodnotách pomocou týchto zariadení nedajú rozlíšiť straty spôsobené jednosmernou vodivosťou a straty spôsobené dielektrickou polarizáciou [1][2].

V súčasnosti sa pre káblové vedenia pre distribučné siete na napätiach od 6 do 30 kV používajú takmer výlučne káble s vulkanizovanou zosieťovanou polyetylénovou izoláciou, preto sa v experimente zameriavame na meranie dielektrického spektra XLPE izolácie vn kábľa.

### Metodika merania

Meranie komplexnej permitivity a stratového činiteľa pevných izolačných materiálov metódou IRS sa v našom prípade uskutočňuje pomocou zariadení generujúcich striedavé napätie v širokej škále frekvencií. Tieto zariadenia s generátorom striedavého vopred stanoveného napätia zaznamenávajú komplexnú veľkosť prúdu, ktorý preteká meraným dielektrikom. Princiálna schéma zapojenia je na obrázku 1 [3].



Obr. 1 Schéma zapojenia merania vzoriek [3]

Z hodnôt nameraných napätí a komplexných hodnôt prúdu tieto zariadenia vyhodnocujú impedanciu meraného dielektrika. Z vypočítanej hodnoty impedancie  $Z$  sú následne vypočítané hodnoty meranej kapacity  $C$ , účinníka  $\cos \varphi$  a stratového činiteľa  $\tan \delta$  dielektrika podľa nasledujúcich vzťahov :

$$(1) \quad C' = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{j\omega Z} \right\}$$

$$(2) \quad \cos \varphi = \frac{\operatorname{Re}\{Z\}}{|Z|}$$

$$(3) \quad \tan \delta = -\frac{\operatorname{Re}\{Z\}}{\operatorname{Im}\{Z\}}$$

kde:  $C'$  – reálna časť kapacity,  $Z$  – vypočítaná impedancia dielektrika

Diagnostika dielektrika závisí na charaktere materiálu, a preto sú pre jednotlivé druhy materiálov používané náhradné modely (dielektrický, odporový, sériový, paralelný). Aby bolo možné definovať parametre materiálu z meranej impedancie  $Z$ , je potrebné vypočítať na základe geometrie vzorky veľkosť geometrickej kapacity  $C_0$ . V prípade, že medzi elektródami nie je žiadny materiál, len samotné vákuum, tak sa meraná kapacita skladá len z geometrickej kapacity. Po vložení dielektrika medzi elektródy dochádza k zmene veľkosti pretekajúceho prúdu. Použitím dielektrického modelu môžeme jednotlivé parametre dielektrika vypočítať nasledujúcimi vzťahmi [3]:

$$(4) \quad Z = \frac{1}{j\omega C}$$

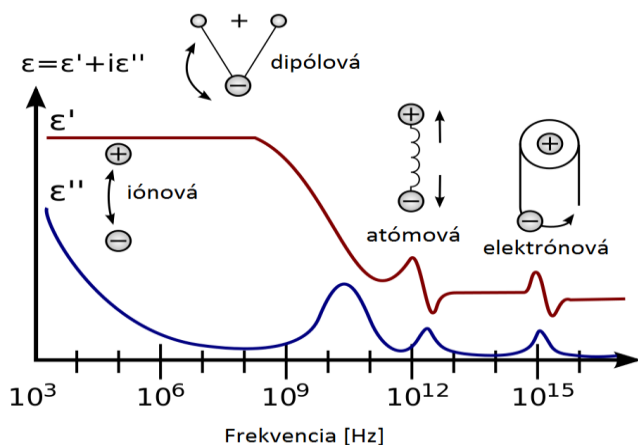
$$(5) \quad C = C_0(\varepsilon' - j\varepsilon'')$$

$$(6) \quad \varepsilon' = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{j\omega C_0 Z} \right\}$$

$$(7) \quad \varepsilon'' = -\operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{j\omega C_0 Z} \right\}$$

kde:  $C$  – komplexná kapacita meranej vzorky,  $C_0$  – hodnota geometrickej kapacity,  $\varepsilon'$  – reálna zložka komplexnej permitivity,  $\varepsilon''$  – imaginárna zložka komplexnej permitivity,  $\omega$  – uhlová rýchlosť.

Pomocou takto nameraných a vypočítaných parametrov dielektrika môžeme pre určité frekvenčné spektrum vytvoriť grafickú závislosť týchto parametrov od frekvencie na obrázku 2, ktoré nám môžu napomôcť ku identifikácii jednotlivých polarizačných dejov prebiehajúcich v meranej vzorke.



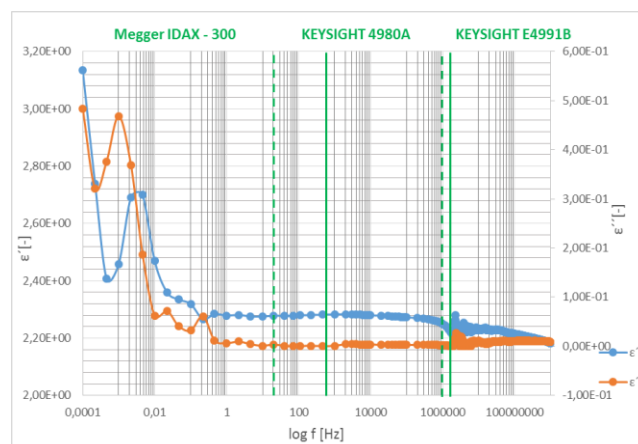
Obr. 2 Frekvenčné spektrum reálnej a imaginárnej permitivity [4]

### Experiment

V tomto príspevku je venovaná pozornosť zisteniu dielektrických parametrov (reálnej a imaginárnej časti komplexnej permitivity a stratového činiteľa) vzoriek zosieťovaného polyetylénu XLPE v rozsahu frekvencií od 0,1 mHz do 1 GHz. Merané vzorky boli vyhotovené z nového vn jednožilového silového kábla s XLPE izoláciou typ NA2XS2Y 12/20kV HD620 1x150RM/25. Jednotlivé vzorky boli získané odpichovaním na strojárskom sústruhu. Odpichnuté vzorky bolo potrebné zbaviť vnútornej polovodivej a vonkajšej ochrannnej vrstvy a ich povrch zbrúsiť do čo najhladšieho stavu z dôvodu, aby počas merania bol čo najväčší styk medzi meranou vzorkou a elektródami meracieho systému. Meranie jednotlivých vzoriek prebiehalo pomocou troch meracích prístrojoch na dvoch elektródových systémoch. Tieto prístroje boli použité na meranie kapacity a stratového činiteľa XLPE vzoriek v jednotlivých frekvenčných pásmach, pomocou ktorých sa namerala časť frekvenčného spektra izolácie a výsledný rozsah približne 14 dekád času (0,1 mHz – 1 GHz) vznikol spojením jednotlivých častí do celku. Megger IDAX – 300 (0,1 mHz – 1 kHz), Keysight 4980A (20 Hz – 2 MHz), Keysight E4991B (1 MHz – 1 GHz) pri konštantnej hodnote napätia  $U_{RMS} = 500$  mV. Samotné meranie bolo uskutočňované spôsobom, že každá meraná frekvencia bola opakovaná 5x premeraná a z nej vypočítaná priemerná hodnota dielektrických parametrov vzoriek.

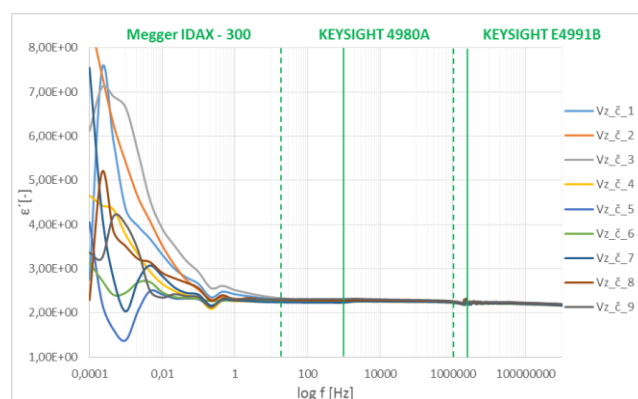
### Analýza nameraných údajov

Spojením údajov nameraných tromi meracími prístrojmi a ich vyobrazením sme dosiahli grafickú závislosť dielektrických parametrov v širokom frekvenčnom pásme.



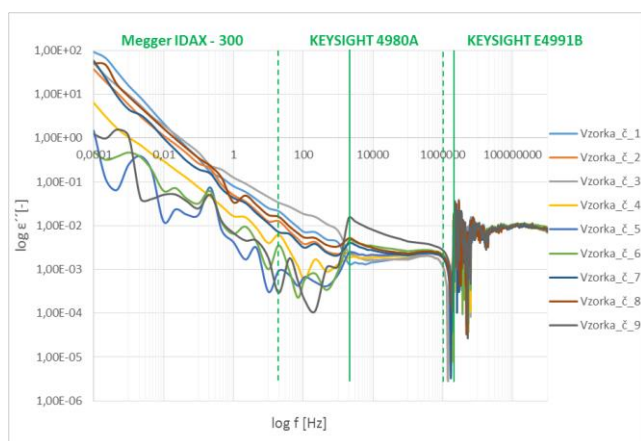
Obr. 3 Frekvenčné spektrum reálnej a imaginárnej zložky permitivity vzorky č. 7

Na obrázku 3 je spojenie priebehov reálnej  $\epsilon'$  a imaginárnej  $\epsilon''$  zložky permitivity v celom spektre frekvencií 0,1 mHz – 1 GHz namerané tromi prístrojmi. Plné zelené čiary označujú horné hranice použitých údajov podľa meracieho prístroja, z ktorého boli zaznamenané. Čiarkované zelené čiary označujú spodné rozsahy frekvencií, v ktorých meracie prístroje merali. Hlavným dôvodom tohto rozdielu bol, že pre frekvencie 10 – 1000 Hz boli použité údaje, ktoré boli namerané prístrojom Megger IDAX – 300, keďže sú to frekvencie blízke 50 Hz a tento prístroj vykazuje relevantnejšie údaje ako prístroj Keysight 4980A. Z rovnakého dôvodu, boli hodnoty namerané prístrojom Keysight E4991B použité až od 2 MHz a do tej frekvencie boli použité údaje namerané prístrojom Keysight 4980A.



Obr. 4 Frekvenčné spektrum reálnej zložky permitivity všetkých vzoriek

Na obr. 4 je priebeh reálnej zložky permitivity  $\epsilon'$  všetkých vzoriek, veľký rozptyl v oblasti nízkych frekvencií je spôsobený tým, že niektoré body frekvencie dielektrik s pomerne malou kapacitou (veľká hrúbka dielektrika) neboli premerané prístrojom. Vysoká hodnota  $\epsilon'$  pri veľmi nízkych frekvenciách je spôsobená vodivostnými stratami v dielektriku. Hodnota  $\epsilon'$  pri frekvenciách vyšších ako 100 Hz je blízka relatívnej permitivite XLPE materiálu  $\epsilon_r = 2,2$ . Rastúcou frekvenciou hodnota  $\epsilon'$  mierne klesá, čo môže súvisieť s poklesom reálnej zložky permitivity na obrázku 2 pri frekvenciách nad 100 MHz.



Obr. 5 Frekvenčné spektrum imaginárnej zložky permitivity všetkých vzoriek

Na obrázku 5 môžeme vidieť, že imaginárna zložka permitivity  $\epsilon''$  dosahuje pri nízkych hodnotách frekvencií vysoké hodnoty, ktoré je možné prisúdiť vplyvu elektródovej polarizácie. Nárastom frekvencie (nad 1000 Hz) môžeme vidieť nárast hodnoty  $\epsilon''$  čo korešponduje s teoretickými poznatkami, ktoré pozorujeme na obrázku 2, kde od 100 MHz dochádza k nárastu imaginárnej zložky permitivity. Rozdiely v jednotlivých krivkách najmä v nízkych frekvenciách môžu byť spôsobené rozdielnym geometrickým tvarom vzoriek, ktorý bol závislý od najmensej možnej hrúbky odpichu na sústruhu.

## Záver

Experimentom bolo dosiahnuté kontinuálne spojenie meraných údajov vzoriek XLPE izolácie pomocou troch meracích prístrojov a dvoch meracích fixtúr. Tieto prístroje boli použité na meranie kapacity a stratového činiteľa XLPE vzoriek v jednotlivých frekvenčných pásmach Megger IDAX – 300 (0,1 mHz – 1 kHz), Keysight 4980A (20 Hz – 2 MHz), Keysight E4991B (1 MHz – 1 GHz). Príspevok poukazuje

na fakt, že je možné pri správnom postupe merať metódou impedančnej relaxačnej spektroskopie dielektrické parametre nami požadovaných materiálov pomocou aplikácie všetkých troch prístrojov. Taktiež poukazuje na možnosť použitia meracej fixtúry Keysight 16451B na merania vykonávané prístrojom Megger IDAX – 300.

Z praktických poznatkov sa zistilo, že pre najhodnovernejšie výsledky je potrebné, aby tieto merania najmä v prípade merania nízkych frekvencií na prístroji Megger IDAX – 300 boli ošetrené od nasledujúcich okolitých vplyvov (zmena teploty, zmena vlhkosti, vonkajšie elektrické polia), ktoré v prípade merania extrémne nízkych hodnôt prúdu a dlhšej doby trvania merania majú za následok zhoršenú relevantnosť výsledkov. Návrhom pre ďalšie experimenty na vyriešenie tohto nedostatku je použitie špeciálnej tieniacej aparatúry na odrušenie vonkajších elektrických polí od meracej aparatúry resp. meracieho elektródového systému.

## Podakovanie

Praca vznikla na základe podpory projektov VEGA 1/0311/15, VEGA 2/0141/16 a APVV-15-0438.

## Literatúra

- [1] Zaengl, Walter S.: Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, Part I: Theoretical Considerations. Zurich: Swiss federal institute of technology, 2001
- [2] Farahani, M., Borsi, H., Gockenbach, E.: Dielectricspectroscopy in Time and Frequency Domain on Insulation System of High Voltage Rotating Machines. In 8th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). Toulouse, France, 2004.
- [3] IDAX user manual, dostupné na internete: [http://www.pewa.de/DATENBLATT/DBL\\_ME\\_IDAX300\\_MANUAL\\_ENGLISCH.pdf](http://www.pewa.de/DATENBLATT/DBL_ME_IDAX300_MANUAL_ENGLISCH.pdf)[4] Basics of measuring the dielectric properties of materials. Hewlett Packard Application Note 1217-1, USA, 1992

**Autori:** Štefan Hužvár, Roman, Cimbala, Samuel Bucko, Juraj Kurimský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: huzvar.stefan@gmail.com