

Ludovít Csányi, Roman Cimbala, Martin Marci, Milan Kvakovský

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

## IRC analýza vplyvu polovodivej ochrany 6kV asynchrónneho motora na jeho polarizačné spektrum

**Abstrakt.** Na elektrické točivé stroje sú v súčasnosti kladené požiadavky z hľadiska bezpečnosti, spoľahlivosti a úspornosti. Tento článok sa zaoberá meraním cievky bez polovodivej ochrany z asynchrónneho 6 kV motora. Uskutočnené boli dve merania na cievke a ich následné porovnanie. Prvé meranie bolo simulovanie uloženia cievky v drážke statora pomocou vodivej sieťoviny po celej dĺžke statora a druhé meranie bolo simulovanie uloženia cievky len v štyroch bodoch drážky statora. Meranie bolo uskutočnené pomocou izotermickej relaxačnej prúdovej analýzy (IRC analýza), ktoré predstavuje nedeštruktívnu jednosmernú meraciu metódu.

**Abstract.** The electric rotary machines have to be up to standards of safety, reliability and efficiency. This article discusses the measurement of 6 kV coil of an induction motor. Two measurements were made on the reel and then the measurements were compared. The first measurement was to simulate the stator grooves with a conductive mesh around the stator slot and second measurement was to simulate the stator grooves on four points. The measurements were carried out using isothermal relaxation current analysis (IRC analysis), which is one-way non-destructive measurement method.

**Kľúčové slová:** IRC analýza, asynchrónny motor, cievka, izolácia

**Keywords:** IRC analysis, asynchronous rotating machine, coil, insulation

### Úvod

V súčasnej dobe sú na vysokonapäťové elektromotory kladené veľké požiadavky z hľadiska bezpečnosti a spoľahlivosti a pretože izolácia patrí medzi najdôležitejšie časti elektrických motorov, vzťahujú sa tieto požiadavky aj na ňu (až štvrtina zlyhania elektrických strojov súvisí so zlyhaním izolácie [1,2,3])

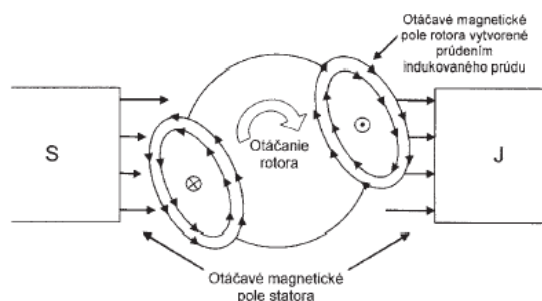
Na kvalitu izolácie najviac pôsobí proces starnutia izolácie, je to jav, ktorý je v podstate neovplyvniteľný.

Jedna z metód na zisťovanie stavu zostarnutia izolácie je IRC analýza (izotermická prúdová relaxačná analýza). IRC analýza je nedeštruktívna metóda a je založená na princípe merania nabíjajúcich respektíve vybijajúcich prúdov.

### Asynchrónny motor

Elektrický motor je zariadenie, ktoré slúži na premenu elektrickej energie na mechanickú.

Najčastejším druhom elektromotora je asynchrónny (indukčný) elektromotor (Obr.1). Jeho výkon sa pohybuje od stoviek wattov až do mnoho sto kilowattov. Predpokladá sa že až 60 % vyrobenej elektrickej energie sa používa na pohon v rôznych priemyselných a domácich prostrediach [4].



Obr.1 Princíp činnosti AM [4].

Rotor sa obvykle skladá zo sady vodivých tyčí, usporiadaných do tvaru valcovej kľetky. Tyče sú na koncoch vodivo spojené a rotor sa potom nazýva „kotva nakrátko“.

Pri stojacom motore rotujúce magnetické pole statora budí (indukuje) v tyčiach rotora elektrické prúdy, ktoré

vytvárajú elektromagnetické pole rotora. Obe magnetické polia potom vzájomnou interakciou vytvárajú elektromotorickú silu. Otáčky rotora vzrastajú. Priblížením otáčok rotora "otáčkam" magnetického poľa statora klesajú indukované prúdy a intenzita nimi vytváraného poľa, klesajú tým i otáčky rotora a zároveň točivý moment motora.

Pokiaľ je motor aspoň minimálne zaťažený, nikdy nedosiahne otáčky danými frekvenciou napájacieho napätia - nikdy s nimi nebude synchronný - z toho názov *asynchrónny motor*.

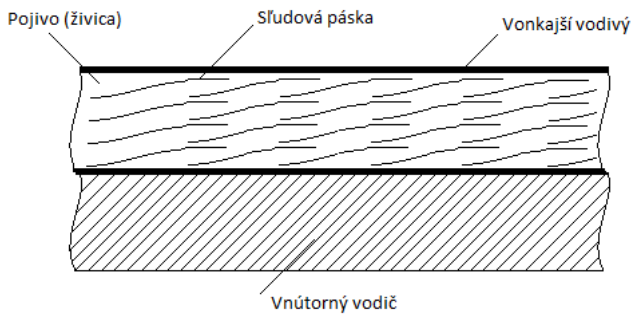
### Izolácia vinutia (cievky)

Základné a najbežnejšie izolácie vinutí sú na báze sludy (veľmi dobré tepelné a elektrické vlastnosti). Poznáme dva základné druhy sludy a to prírodnú a syntetickú sludu. Z rôznych slúd sú pre elektrotechniku najdôležitejšie *muskovit* (draselná sluda) a *flogopit* [5].

- *muskovit* (prírodná sluda): je bezfarebný, ohybný, mechanicky pevný, používa sa pre teploty 500 až 600 °C. Kvôli svojej elektrickej pevnosti sa používa ako izolant v strojoch.

- *flogopit* (prírodná sluda): používa sa na menej dôležité účely, pretože má horšie elektrické vlastnosti ako muskovit. Použitie pri teplotách do 800 °C.

Sluda sa používa ako mletá sluda, ktorá slúži pri výrobe lisovaných izolantov, ďalej sa používa ako mikanty (doskové sludové izolanty vyrobené vrstvením), mikafólium (má vláknitý podklad na ktorom sú uložené dve vrstvy sludových plátov zlepených pojivom), sludová páska (na podkladový materiál sa lepi len jedna vrstva sludy na ktorú sa ukladá papier alebo tkanina) (Obr. 2).



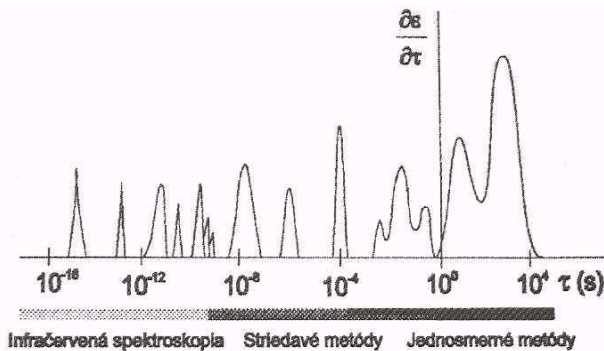
Obr.2 štruktúra vinutia sfudovej pásky [6].

Ďalšou možnosťou môže byť syntetická sfuda. Ide o kryštály vyrobené v laboratóriách. Táto sfuda má však mnohé nedostatky ako napríklad chybný rast kryštálov, trhliny a praskliny. Je stála pri teplote 800 °C.

Hlavný význam syntetickej sfudy je v jej ľahkom získaní oproti obmedzeným zdrojom prírodnej sfudy.

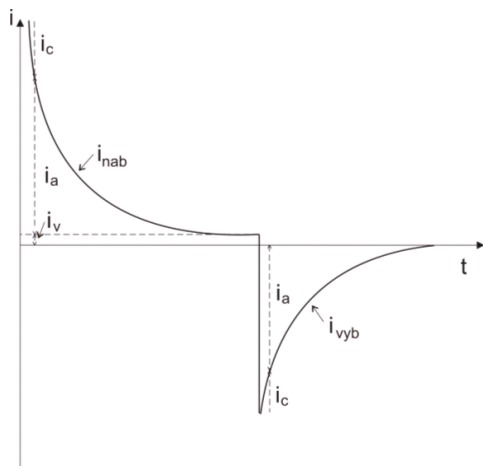
**IRC analýza**

Polarizačné spektrum je jednou zo základných elektrofyzikálnych charakteristík materiálu. Toto polarizačné spektrum popisuje závislosť zvolenej dielektrickej veličiny na frekvencii vnúteného signálu. Hlavná časť polarizačného spektra sa nachádza v oblasti  $10^{-3} \div 10^5$  s (Obr.3). Túto oblasť je možné sledovať jednosmernými meracími metódami. Tieto metódy sú založené na sledovaní napäťových (prúdových) odoziev.



Obr. 3 Polarizačné spektrum izolačného materiálu [7,8]

Priebeh prúdovej odozvy po pripojení a odpojení jednosmerného napätia (nabíjací a vybíjací prúd) (Obr.3)



Obr. 4 Prúdová odozva na vnútený impulz [7,8,9]

Pre nabíjací prúd  $i_n(t)$  platí vzťah:

$$i_n(t) = i_c(t) + i_v + i_a(t) \quad (1)$$

kde

$i_c(t)$  - prúd od geometrickej kapacity,

$i_v$  - vodivostný prúd,

$i_a(t)$  - absorpčný prúd.

V prípade vybíjacieho prúdu nie je prítomná zložka vodivostného prúdu, nakoľko vonkajšie elektrické pole pôsobiace na dielektrikum je nulové.

Celkový prúd pretekajúci dielektrikom je vyjadrený na základe predpokladu existencie nezávislých Debyeových polarizačných procesov a Maxwell-Wagnerovho náhradného modelu ako sumu prúdov s exponenciálne klesajúcou amplitúdou a s časovo nezávislou zložkou ako:

$$i(t) = \frac{U}{R_0} + \sum_{i=1}^n I_{mi} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (2)$$

kde:

$U$  - aplikované jednosmerné napätie

$R_0$  - jednosmerný izolačný odpor po nekonečne dlhom čase

$I_{mi}$  - amplitúda  $i$  - tej zložky Debyeovho elementárneho prúdu

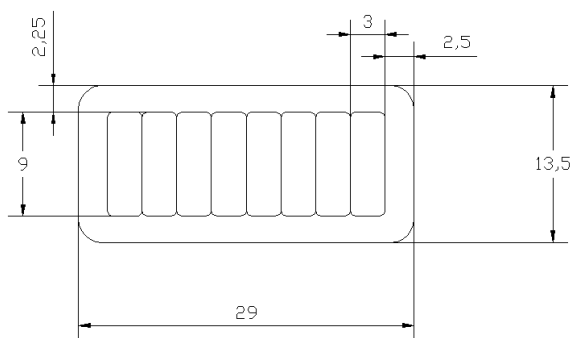
$\tau_i$  - časová relaxačná konštanta  $i$  - tej zložky

**Meranie**

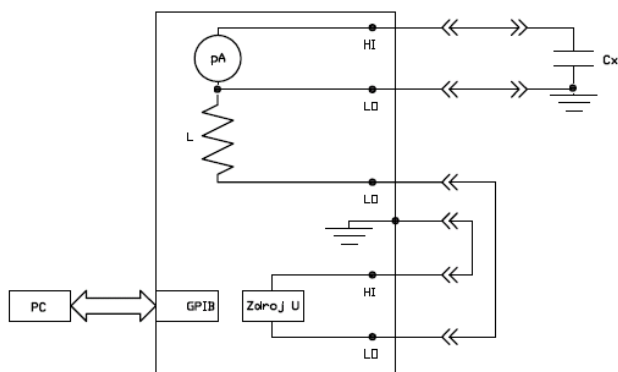
Cieľom experimentu bolo porovnanie dvoch meraní na cievke bez polovodivej ochrany asynchrónneho 6 kV motora (Obr.5) s rozmermi (Obr.6). Tieto merania boli realizované pomocou IRC analýzy. Porovnaním získaných dát bolo následne rozhodnuté buď o potrebe merania cievok pomocou štyroch bodov alebo pomocou vodivej sieťoviny. Schéma merania je zobrazená na (Obr.7), kde  $C_x$  predstavuje meranú cievku.



Obr. 5 Cievka bez polovodivej ochrany 6 kV asynchrónneho motora



Obr.6 Rozmery cievky v mm



Obr.7 Schéma merania

Ako prvé bolo uskutočnené meranie na cievke so štyrmi bodmi. Štyri body znamená to, že sa na cievke simulovalo jej uloženie v drážke statora len na štyroch bodoch ako je to zobrazené na (Obr.8). Následne sa tieto štyri body navzájom skratovali a uzemnili. Rovnako sa uzemnila a skratovalo aj vinutie cievky. Po týchto prípravách sa prešlo k meraniu.



Obr. 8 Meranie cievky bez polovodivej ochrany 6 kV asynchrónneho motora metódou štyroch bodov uzemnenia

Po štyroch bodov sa prešlo k meraniu cievky na ktorej bolo simulované jej uloženie v drážke statora po celej jej dĺžke pomocou vodivej sieťoviny (Obr.9)



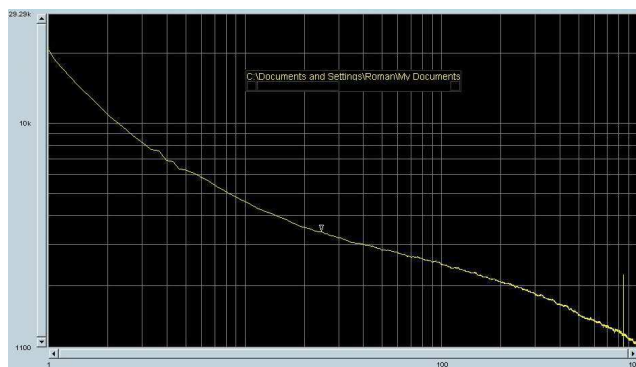
Obr. 9 Meranie cievky bez polovodivej ochrany 6 kV asynchrónneho motora s celkovým pokrytím vynutia

Podrobnejší popis oboch meraní ako aj použitých prístrojov je popísaný v diplomovej práci [10].

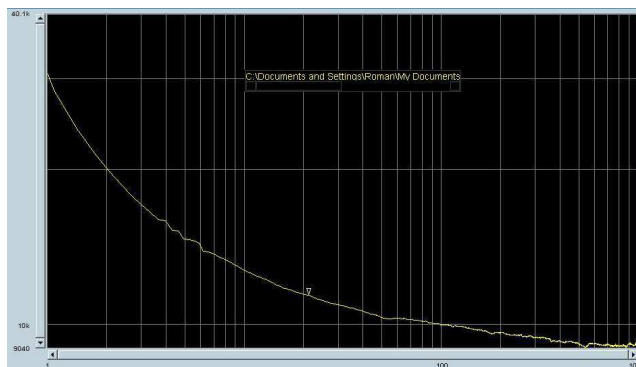
**Výsledok merania**

Na grafoch sú zobrazené oba namerané priebehy. Na (Obr.10) je zobrazené meranie na cievke s celkovým pokrytím a na (Obr.11) je zobrazené meranie štyroch bodov.

Na zobrazených priebehoch nie je odlišnosť až taká jasná a preto kvôli názornejšiemu porovnaniu boli namerané dáta prefiltrované a zapísané do tabuliek (Tab. 1 a Tab. 2).



Obr. 10 Prúdová charakteristika cievky bez polovodivej ochrany 6 kV asynchrónneho motora s celkovým pokrytím



Obr. 11 Prúdová charakteristika cievky bez polovodivej ochrany 6 kV asynchrónneho motora meraná metódou štyroch bodov uzemnenia

Tabuľka 1. Číselné vyjadrenie merania 4 bodov

	Metóda 4 bodov uzemnenia	
	relaxačné časy $\tau$ [s]	relaxačné prúdy I [pA]
<b>1. aproximácia</b>	5732,750	10326,184
<b>2. aproximácia</b>	2,977	25920,662
	7555,771	10049,315
<b>3. aproximácia</b>	0,872	55932,871
	22,979	5017,207
	11482,796	9751,614
<b>4. aproximácia</b>	0,562	82602,951
	7,753	7968,871
	164,416	1754,889
	198027231,909	9115,650
<b>5. aproximácia</b>	0,563	82337,575
	7,812	7944,297
	168,540	1762,656
	207377260,250	-6208342,298
	1016890629,895	6217437,214
<b>6. aproximácia</b>	0,563	82337,61
	7,812	7944,31
	168,540	1762,66
	670934482,814	0,00
	679977695,692	-22435208,10
	2447894624,720	22444303,02

Tabuľka 2. Číselné vyjadrenie merania s celkovým pokrytím

	Metóda celkového pokrytia vynutia	
	relaxačné časy $\tau$ [s]	relaxačné prúdy I [pA]
<b>1. aproximácia</b>	743,250	3159,596
<b>2. aproximácia</b>	1,934	29762,362
	883,632	2845,390
<b>3. aproximácia</b>	0,731	59625,733
	15,663	4567,914
	1067,773	2560,829
<b>4. aproximácia</b>	0,485	89200,047
	5,324	7806,300
	96,654	1408,421
	1487,931	2152,886
<b>5. aproximácia</b>	0,262	215742,795
	1,374	17717,314
	9,333	4268,824
	136,261	1259,627
	1684,743	2019,562
<b>6. aproximácia</b>	0,213	337209,387
	0,982	23700,562
	5,585	5531,956
	32,567	1157,379
	245,625	1204,113
	2396,015	1687,234

Ako je z týchto dvoch tabuliek vidieť, tieto dve merania na totožnej cievke 6 kV asynchrónneho motora sú už na prvý pohľad odlišné.

V tabuľke 1 je už zo 4 aproximácie zrejmé, že namerané výsledky sú nesprávne a pri 5. A 6. aproximácii sú prakticky nemožné, pretože nie je možné aby prúdy prechádzali do záporných hodnôt. S týchto výsledkov jednoznačne vyplýva nevhodnosť metódy štyroch bodov pre IRC analýzu. Toto tvrdenie nevychádza len z jedného merania. Meraní bolo uskutočnených niekoľko a dáta, ktoré sú zobrazené sú len jednými z mnohých získaných.

Oproti tomu sú namerané dáta v tabuľke 2 bez záporných hodnôt a iných anomálií. Z týchto nameraných údajov vyplýva vhodnosť meracej metódy IRC analýzy použitej pri cievke s celkovým pokrytím.

Rozdielnosť oboch priebehov je spôsobená pravdepodobne vytváraním povrchového náboja na polovodivej resp. vodivej vrstve reprezentujúcej zemnú elektródu a následných uvoľňovaním tohto náboja. Okrem iného je prípad reprezentujúci celkové pokrytie drážkovej časti cievky blízky reálnemu usporiadaniu v praxi.

#### Záver

Záverom môžeme jednoznačne povedať, že porovnanie merania na cievke bez polovodivej ochrany 6 kV asynchrónneho motora prinieslo jednoznačný výsledok o nevhodnosti používania meracej metódy IRC analýzy pri meraní cievky na štyroch bodoch, pretože namerané dáta vykazovali anomálie (záporné hodnoty prúdov), čo sa pri meraní celkového pokrytia neprejavovalo.

#### Literatúra

- [1] THORSEN, O.V., DALVA, M., „ A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals and oil refineries,“ IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 5, pp. 1186-1196, Sep./Oct. 1995
- [2] IEEE Motor Reliability Working Group, „ Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations: Part I and Part II,“ IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-21, no.4, pp. 853-872, Jul./Aug. 1985
- [3] SRB, N., „Erfahrungen mit Stossspannungsprüfungen an elektrischen Maschinen,“ Allianz report 70, Heft 2, pp. 58-62, Apr. 1997.
- [4] JOVANKOVIČ, J., ŽALMAN, M.: Mechatronické pohybové systémy (5). Technika pohonov, AT&P journal 6/2006. STU v Bratislave.
- [5] HASSDENTEUFEL, J. – kol.: Elektrotechnické materiály, ALFA SNTL, Praha, 1978.

- [6] VOGELSANG, R., WEIERS, T., FRÖHLICH, K., BRÜTSCH, R., Electrical Breakdown in High-Voltage Winding Insulations of Different Manufacturing Qualities, IEEE, Electrical insulation magazine, vol. 22, no. 3, May/June 2006
- [7] CIMBALA, R.: Starnutie vysokonapäťových izolačných systémov, TUKE, 2007.
- [8] SEMANČIK, P.: Tepelná degradácia izolačných systémov : Dizertačná práca, Košice, TUKE, 2007
- [9] KOLCUNOVÁ, I.: Diagnostika v elektroenergetike, Prednášky pre 5. ročník, KEE Košice, 2006, Dostupné na internete: <http://web.tuke.sk/fei-kee/predmety/dvee.html>
- [10] CSÁNYI, L.: Tepelná starnutie v izolačných materiáloch: Diplomová práca, Košice, TUKE, 2009

*Táto práca vznikla aj na základe podpory projektov VEGA 1/0368/09 a APVV-20-006005.*

**Autori:** *Ludovít Csányi, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [ludovit.csanyi@tuke.sk](mailto:ludovit.csanyi@tuke.sk)*

*Roman Cimbala, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [roman.cimbala@tuke.sk](mailto:roman.cimbala@tuke.sk)*

*Martin Marci, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [martin.marci@tuke.sk](mailto:martin.marci@tuke.sk)*

*Milan Kvakovský, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: [milan.kvakovsky@tuke.sk](mailto:milan.kvakovsky@tuke.sk)*