

Ludovít Csányi, Roman Cimbala, Matúš Katin

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

Meranie stratového činiteľa a kapacity na cievke s polovodivou ochranou

Abstrakt. Zrýchlené tepelné namáhanie bolo rozsiahlo používané na izolačných systémoch motorov a generátorov na simuláciu zhoršujúcich sa podmienok počas krátkého obdobia. Tento článok sa zaoberá meraním na cievke s polovodivou ochranou a jej chovaním sa pri rôznych teplotách. Na cievke boli uskutočnené merania meranie stratového činiteľa ($tg\delta$) a kapacity. Tieto merania sa uskutočnili pri izbovej teplote (20°C), pri teplote 60°C, pri teplote 80°C, pri teplote 100°C a pri teplote 120°C. Následne boli namerané výsledky pri jednotlivých teplotách navzájom porovnávané a vyhodnocované. Meranie bolo uskutočnené pomocou prístroja AGILENT E4980A.

Abstract. Accelerated thermal ageing test was widely use on machines and generators insulation system to simulate in a short time period deterioration mechanism. This article talk about coil with semiconductive protection and different temperatures of his behavior. On coil was measured dissipation factor ($tg\delta$) and capacitance. This measurement was made at room temperature, at 60°C, at 80°C, at 100°C and at 120°C. Than was results each to other compared and evaluated. Diagnostics device AGILENT E4980A were using to measurement.

Kľúčové slová: cievka, izolácia, teplota, statorová cievka, AGILENT E4980A, diagnostika

Keywords: coil, insulation, thermal, stator coil, AGILENT E4980A, Diagnostics

Úvod

Elektroizolačný systém vysokonapäťových točivých strojov je jedným s najdôležitejších častí sa zreteľom na výrobné náklady ako aj na údržbu a životnosť strojov [1]. Takmer jedna tretina výpadkov v generátorových stanicach a priemyselných závodoch je zapríčinená zlyhaním izolačného systému statorového vinutia [2].

Výskum správania sa izolačných systémov podrobených rôznym namáhaniam počas prevádzky je veľmi dôležitý v elektroenergetike na zlepšenie dizajnu a kvality izolačných systémov, tak aby mohli lepšie odolávať faktorom, ktoré spôsobujú starnutie [3].

Izolačný systém používaný v elektrických strojoch točivých musí odolávať rôznym vplyvom starnutia a musí vykazovať požadovanú dobu životnosti. Avšak starnutie izolácie je jav, ktorý je v podstate neovplyvniteľný, preto sa používajú rôzne diagnostické metódy a testy na zisťovanie stupňa zostarnutia rovnako ako aj životnosti izolácie ako v prípade tohto článku meranie prúdových charakteristík, stratového činiteľa a kapacity.

Samozrejme sa merajú aj iné veličiny na správnu diagnostiku elektroizolačných vlastností ako napr. čiastkové výboje, polarizačné indexy atď., ale týmto sa článok venovať nebude.

Izolácia vinutia (cievky)

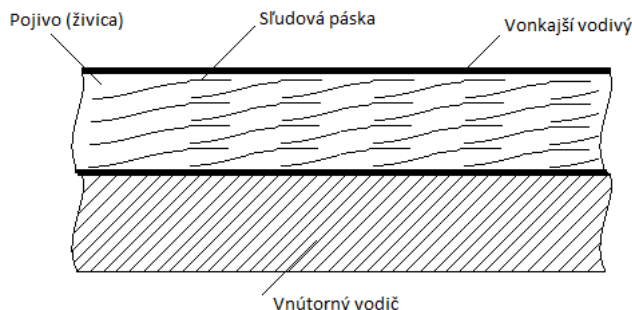
Základné a najbežnejšie izolácie vinutí sú na báze sľudy (veľmi dobré tepelné a elektrické vlastnosti). Poznáme dva základné druhy sľudy a to prírodnú a syntetickú sľudu. Z rôznych sľúd sú pre elektrotechniku najdôležitejšie muskovit (draselná sľuda) a flogopit [4].

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

Sľuda sa používa ako mletá sľuda, ktorá slúži pri výrobe lisovaných izolantov, ďalej sa používa ako mikanýt

(doskové sľudové izolanty vyrobené vrstvením), mikafólium (má vláknitý podklad na ktorom sú uložené dve vrstvy sľudových plátov zlepených pojivom), sľudová páska (na podkladový materiál sa lepí len jedna vrstva sľudy na ktorú sa ukladá papier alebo tkanina) (Obr. 1).



Obr.1 štruktúra vinutia sľudovej pásky [5].

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

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

Tepelné namáhanie

Tepelné namáhanie je doposiaľ najviac preskúmaný degradačný proces [6].

Teplota je činiteľ, ktorý má zásadný vplyv na prevádzkovú schopnosť dielektrika. Hlavné aspekty tepelného starnutia zahŕňajú postupnosť chemických a fyzikálnych zmien ako sled chemických degradačných procesov [7]. Ovplyvňuje ju pôsobením vysokých alebo nízkych okolitých teplôt, teplotami zvýšenými nad teplotu okolia, nárastom dielektrických strát vznikajúcimi v elektrickom zariadení, ktorého súčasťou je izolácia. Tepelné preťažovanie izolácie spôsobuje jej zrýchlené starnutie a spolu s tým aj zhoršenie jej elektroizolačných vlastností. U kvapalných a plyných izolantov je možné elektroizolačné vlastnosti obnovovať na rozdiel od pevných izolantov.

Čas, ktorý uplynie do limitujúcej hodnoty, kedy izolácia už nie je schopná bezpečne plniť predpísanú funkciu, môžeme zapísať podľa Arrhénia [8,9]:

$$\tau = A \cdot \exp \frac{B}{T} \quad (1)$$

kde:

τ - doba životnosti,

T - absolútna teplota,

A, B - konštanty determinované aktivačnou energiou reakcie.

Arrhéniov vzťah je založený na opise závislosti rýchlostí chemických reakcií prvého rádu [10].

Rozbor procesov, ktoré vznikajú v izolácii, pri rešpektovaní časovej zmeny koncentrácie zložiek materiálu a ich súvislosť so zmenami ďalších fyzikálnych veličín môžeme urobiť z viacerých pohľadov. Základ bude tvoriť Arrhéniová teória. Označme si jednu zo skúmaných veličín symbolom z . Predpokladajme, že sa jedna z fyzikálnych (elektrických) veličín z zmení. To súvisí so zmenou koncentrácie c - chemickej skladby látky, takže môžeme napísať: $z = f(c)$ alebo $c = F(z)$. Časová zmena koncentrácie je vyjadrená rovnicou [8]:

$$\frac{dc}{d\tau} = -k \cdot c^n \quad (2)$$

kde:

k - reakčná (rýchlostná) konštanta závislá od teploty,

n_r - exponent vyjadrujúci rád chemických reakcií v materiáli ($n = 1 - 3$).

Pri monopolárnej reakcii je $n_r = 1$. Potom po úprave môžeme napísať vzťah pre zmenu koncentrácie.

$$\ln \frac{c}{c_0} = -k \cdot \tau \quad (3)$$

kde:

c_0 - koncentrácia pri $\tau = 0$

Podľa Arrhénia je rýchlostná reakčná konštanta, vyjadrujúca priebeh reakcie v závislosti od teploty daná vzťahom:

$$k = A \cdot \exp \left(\frac{-B}{T} \right) \quad (4)$$

kde:

A, B - konštanty

Po dosadení do rovnice (3) dostaneme:

$$\ln \frac{c}{c_0} = -A \cdot \tau \cdot \exp \left(\frac{-B}{T} \right) \quad (5)$$

Diferenciálnu rovnicu (2) môžeme prepísať do vzťahu:

$$\frac{dc}{d\tau} = A \cdot \exp \left(\frac{-B}{T} \right) \cdot c \quad (6)$$

Táto rovnica vyjadruje vzťah medzi tromi premennými a to koncentráciou, teplotou a časom. Nezistujeme však koncentráciu ale niektorú ľahšie merateľnú veličinu z .

Keďže $z = f(c)$, môžeme napísať s ohľadom na počiatkový a konečný stav:

$$\ln \frac{f(z_h)}{f(z_0)} = -A \cdot \tau \cdot \exp \left(\frac{-B}{T} \right) \quad (7)$$

Jej úpravou vzhľadom na závislosť doby životnosti od teploty dostávame:

$$\tau = \frac{1}{A} \ln \frac{f(z_0)}{f(z_h)} \cdot \exp \left(\frac{B}{T} \right) = \frac{1}{A} \ln \frac{c_0}{c} \cdot \exp \left(\frac{B}{T} \right) \quad (8)$$

keď:

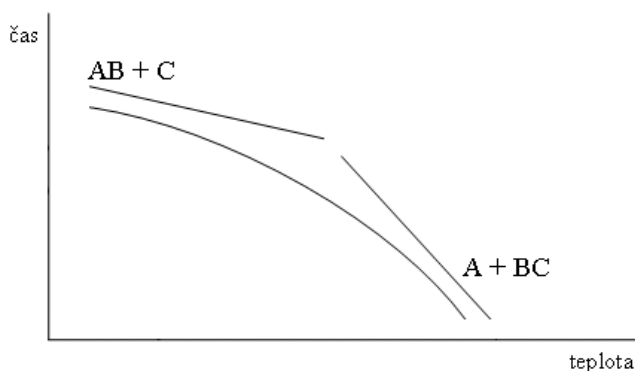
$$\frac{1}{A} \ln \frac{c_0}{c} = \tau_\infty \quad (9)$$

potom:

$$\ln \tau = \frac{B}{T} + \ln \tau_\infty \quad (10)$$

čo vyjadruje krivku životnosti izolantov vo funkcionálnej závislosti ($x = 1/T, y = \ln \tau$).

Ak zmeny v izolante nespôsobuje jediná chemická zmena, ale viacero procesov paralelne napríklad ($ABC \rightarrow AB + C$) alebo ($ABC \rightarrow A + BC$), potom krivka životnosti má tvar lomenej závislosti ako je znázornené na (Obr.2).



Obr. 2 Životnosť materiálu pri viacerých chemických zmenách [7], [8].

Montsingerovo pravidlo, ktoré platí pre väčšinu materiálov a aj zariadení hovorí, že zvýšenie teploty o 8 až 10 °C skráti životnosť izolačnej sústavy približne o polovicu [11]. Kontinuálny záznam teploty stroja umožňuje objaviť „horúce“ miesta s teplotou prevyšujúcou prevádzkovú. Ak sa tak stane, musí byť zistená a odstránená príčina prehrievania stroja.

Teplotná odolnosť izolantov je rozdelená do teplotných tried.

trieda Y – max. teplota 90°C, napr. bavlna,

trieda A - max. teplota 105°C, napr. lakovaná bavlnená tkanina, polyamidy atd.,

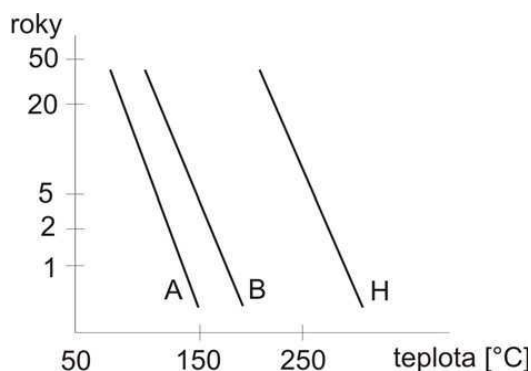
trieda E - max. teplota 120°C, napr. tie isté materiály ako v triede A, u ktorých sa zistilo, že môžu pracovať v prevádzke pri teplote o 15°C vyššej,

trieda B - max. teplota 130°C, napr. kombinácia s ľudašlak, tereftaláty,

trieda F - max. teplota 155°C, anorganické materiály s organickými impregnantami,

trieda H - max. teplota 180°C, anorganické materiály so silikónovými impregnantami, silikónové kaučuky a laky, silikónové oleje,

trieda C – teplota väčšia ako 180°C, s ľuda, teflón, keramika, sklo atd.



Obr. 3 Krivky životnosti tepelných tried A, B, H podľa Montsingera

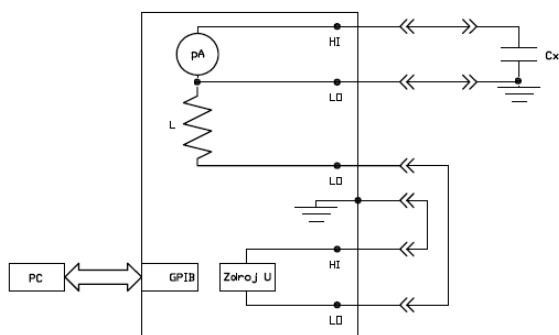
Meranie

Cieľom meraní bolo porovnanie vplyvu teploty na skúmaný objekt a to pri izbovej teplote, pri teplote 60°C, pri teplote 80°C, pri teplote 100°C a pri teplote 120°C. Skúmaný objekt predstavovala statorová cievka s polovodivou ochranou navinutou vo firme Duslo Šafa.

Boli uskutočnené merania stratového činiteľa a kapacity. Merania stratového činiteľa a kapacity bolo uskutočnené pomocou prístroja AGILENT E4980A.

Schéma zapojenia merania je zobrazená na obr. 4, kde objekt C_x predstavuje meranú cievku.

Meracie pracovisko je zobrazené na obr.5. Na zahrievanie cievky na teploty 60°C, 80°C, 100°C a 120°C bola použitá priemyselná pec MLW TS400 nemeckej výroby s výkonom špirál 2500 kW s rozsahom teplôt 60°C až 300°C.



Obr.4 Schéma merania



Obr.5 Meracie pracovisko

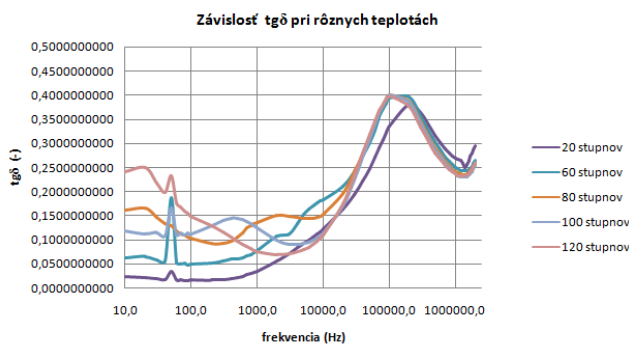
Ako prvé boli uskutočnené merania pri izbovej teplote, pretože pri týchto meraniach nebolo nutné zahrievať cievku.

Merania kapacity a stratového činiteľa sa opakovali dva krát, čo bolo pre nás postačujúce z hľadiska získania dát. Obe merania boli vyhodnotené a na základe vyhodnotenia boli vybrané dáta na porovnanie pri všetkých piatich teplotách pri izbovej teplote, pri teplote 60°C, pri teplote 80°C, pri teplote 100°C a pri teplote 120°C.

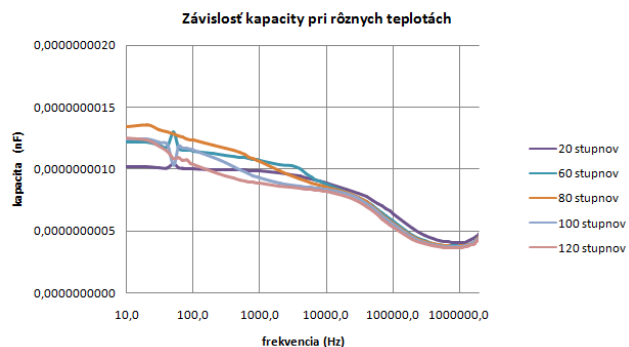
Na nasledujúcich dvoch obrázkoch (graf č. 1 a 2) vidíme zobrazené závislosti kapacity a stratového činiteľa od frekvencie.

Je viditeľné, že pri nižších frekvenciách sú v prípade stratového činiteľa závislosti rozptýlené a stúpajú ku vyšším hodnotám stratového činiteľa, čo je viditeľné až po frekvenciu 1 000 000 Hz. Rovnako je vidieť pri frekvencii 1 000 000 Hz má stratový činiteľ svoje maximum.

V prípade kapacity pri rôznych teplotách majú kapacity pri jednotlivých teplotách v závislosti od frekvencie klesajúci charakter.



Graf.č. 1 Závislosť stratového činiteľa od frekvencie pri izbovej teplote, pri teplote 60°C, 80°C, 100°C a 120°



Graf.č. 2 Závislosť kapacity od frekvencie pri izbovej teplote, pri teplote 60°C, 80°C, 100°C a 120°

Záver

Na záver môžeme povedať, že tak ako sme predpokladali vplyvom vyšších teplôt nastáva zmena elektroizolačných vlastností izolačného systému.

V prípade stratového činiteľa a kapacity v závislosti od kapacity pri izbovej teplote, pri teplote 60°C, pri teplote 80°C, pri teplote 100°C a pri teplote 120°C.

Stratový činiteľ má až po hodnotu 1 000 000 Hz závislosti so stúpajúcim charakterom a v tejto hodnote dosahuje svoje maximum pri všetkých teplotách.

Kapacita v závislosti od frekvencie klesajúci charakter a pri frekvencii 10 000 Hz nastáva vyrovnanie závislostí a rovnako ako pri stratovom činiteli nastáva pri frekvencii 1 000 000 Hz minimu pri všetkých teplotách.

Literatúra

- [1] M. Kaufhold, K. Schaefer, K. Bauer, A. Bethge and J. Risse, "Interface Phenomena in Stator Winding Insulation – Challenges in Design, Diagnosis and Service Experience", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 18, No. 2, pp. 27-36, 2002.
- [2] B.K Gupta and W.T Fink, "A Proposed Type Test for Interturn Insulation in Multi-turn Coils", IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul. (ISEI), Montreal, Quebec, Canada, pp. 235-238, 1996.
- [3] FARAHANI, M., GOCKENBACH, E., BORSI, H., SCHÄFER, K., KAUFHOLD, M., Behavior of Machine Insulation Systems Subjected to Accelerated Thermal Aging Test, IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical insulation, vol. 17, no.5, pp. 1364-1372, October 2010.
- [4] HASSDENTEUFEL, J. – kol.: Elektrotechnické materiály, ALFA SNTL, Praha, 1978.
- [5] 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
- [6] CIMBALA, R.: Starnutie vysokonapäťových izolačných systémov, TUKE, 2007.
- [7] SEMANČÍK, P.: Tepelná degradácia izolačných systémov : Dizertačná práca, Košice, TUKE, 2007
- [8] MARTON, K.: Diagnostika VN a VVN zariadení, ČSVTS, Stará Lesná, 1987.
- [9] SIMONI, L. - MAZZANTI, G. - MONTANARI, G. C. - LEFEBRE, J.: A general Multi-stress Life Model for Insulation Materials with or without Evidence for Thresholds, IEEE Transaction on Electrical Insulation, Volume 28, Number 3, 1993.
- [10] LELÁK, J.: Starnutie, stanovenie zvyškovej životnosti a kvalifikácia elektrotechnických prvkov a zariadení, STU, Bratislava, 1996.
- [11] BARTÁK, A. - MRAVINAČ, L. - NEUMANN, J.: Diagnostika poruch izolací elektrických strojů, STNL, PRAHA, 1984.

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*

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

Matúš Katin, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: matus.katin@tuke.sk