

Bystrík Dolník, Irida Kobunová, Juraj Kurimský

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

Príspevok k posúdeniu stavu izolačného systému nízkonapäťového elektromotora

Abstrakt. Článok je zameraný na experimenty urobené na statorovej izolácii cievok nn točivých strojov. Boli realizované experimentálne merania na izolačnom systéme elektromotora charakterizujúce stav izolácie. Analýzou a vyhodnotením nameraných elektrických veličín je poukázané na dva mechanizmy vodivosti v izolácii a spôsob určenia hranice medzi nimi.

Abstract. The article is focused on experiments made on the stator coils insulation in low-voltage rotating machines. Experimental measurements were realized on the rotating machine insulation system characterizing the state of insulation. Analysis and evaluation of the measured electrical quantities is assigned to the two mechanisms of conductivity in insulation and method of determining the boundaries between them. (**Contribution to Assessment of Low-Voltage Electric Motor Insulation System State**)

Kľúčové slová: elektrický točivý stroj, izolácia, dielektrické straty, zvodový prúd, výbojová činnosť.

Keywords: electric rotating machine, insulation, dielectric losses, leakage current, discharge activity.

Úvod

Pred vynájdением motorov a generátorov bola vyrobená široká škála rozličných typov elektrických strojov. V mnohých prípadoch rozličné firmy nazývajú rovnaký typ elektrického stroja, alebo rovnaké súčasti, úplne inými názvami. Elektrický točivý stroj je zložený zo štyroch základných funkčných celkov: elektrický obvod, magnetický obvod, mechanická konštrukcia a chladenie. Vnutie statora a vnutie rotora sa skladá z niekoľkých súčastí, z ktorých každá má svoju vlastnú funkciu. Okrem toho rozličné typy elektrických strojov majú rôzne súčasti. Hlavné súčasti statora sú: medené vodiče, jadro statora a izolácia. V motore prúd zavedený do statora vytvára točivé magnetické pole, ktoré poháňa rotor do pohybu. Vo väčšine motorov a malých generátorov, každá cievka sa skladá z niekoľkých závitov medeného vodiča, ktorý je tvarovaný do slučky.

Hlavná súčasť statorového vnutia je elektrická izolácia. Na rozdiel od medených vodičov a magnetickej ocele, ktoré reprezentujú aktívne súčasti, aby bol motor alebo generátor funkčný, izolácia je pasívna súčasť motora. To znamená, že nenapomáha vytvárať magnetickej pole ani upravovať jeho tok. Konštruktéri generátorov a motorov by najradšej odstránili elektrickú izoláciu, pretože izolácia zväčšuje veľkosť stroja, náklady na stroj a znižuje jeho účinnosť, bez toho aby prispela k vytváraniu momentu alebo prúdu. Funkcia izolácie je v zabránení vzniku skratov medzi vodičmi alebo voči zemi. Bez izolácie medené vodiče by mohli prísť do kontaktu navzájom alebo s uzemneným jadrom statora, následkom čoho by prúd tiekol neželateľnou cestou a bránil riadnemu fungovaniu stroja. Navyše pre stroje s nepriamym chladením treba splniť požiadavku, aby sa izolácia stala vodičom tepla, aby sa medené vodiče neprehrievali. Ďalej, izolačný systém musí fixovať medené vodiče pevne na mieste, aby sa zabránilo ich pohybu.

Funkcia izolačného systému statorového vnutia

Izolačný systém vnutia statora obsahuje niekoľko rôznych súčastí a viac funkcií, ktoré spoločne zaisťujú, aby nedochádzalo k skratom, aby Jouleove straty R^2I vo vodiči prenášali sa do chladiča a aby vodiče nevibrovali napriek účinku magnetických síl. Základné súčasti izolačného systému statora sú: medzizávitová izolácia, závitová izolácia a izolácia voči uzemneným častiam elektrického stroja. Okrem hlavných súčastí izolácie, izolačný systém môže obsahovať nátery na zmiernenie namáhania vysokým napätím a nosné súčasti koncov vnutia. Vlastnú izoláciu točivého stroja tvorí v zásade len vonkajšia izolácia cievky,

ktorá sa podľa napätia rozdeľuje na izoláciu točivého stroja vysokého napätia a izoláciu točivého stroja nízkeho napätia. Pri obidvoch druhoch izolácie spoločnú časť tvorí drážkový klin vyrobený z izolačného materiálu alebo zhotovený z kombinácie izolantu a feromagnetického materiálu ako magnetický drážkový klin. Osobitne treba izolovať čelá točivých strojov.

Použitie izolačné materiály obsahujú veľa vlhkosti prevzatej z okolitého vzduchu, ktorá zhoršuje izolačné vlastnosti. Preto sa vyžaduje po zhotovení vnutia operácia sušenia elektrického stroja a po nej impregnácia elektrického stroja, čím sa izolačné vlastnosti izolácie stabilizujú, príp. zlepšujú. Čo sa týka izolácie točivého stroja nízkeho napätia, jedná sa o súbor izolácií s napätím do 1 000 V. Z hľadiska technologického sa rozlišuje drážková izolácia a izolácia čela točivého stroja, ktoré sa navzájom líšia aj izolačnými materiálmi aj technológiou výroby.

Izolácia čela točivého stroja nízkeho napätia pozostáva z vložiek tvaru kruhových výsekov (tzv. mesiačikov), ktoré sa vkladajú medzi čelá jednotlivých cievok. Mesiačiky sa vystrihujú z tvrdeného papiera alebo z olejového plátna. Pri rúrkovej izolácii točivého stroja sa čelá izolujú izolačnou páskou (zo skla alebo sľudy na hodvábnom alebo sklenom podklade) s polovičným prekrytím v niekoľkých vrstvách podľa napätia. Pritom je výhodné pásy natreté impregnačným lakom navíjať za vlhka. Spojivom je šelak alebo asfaltový lak jemne nanosený na podklad. Používajú sa aj syntetické termosety. Mikafólium, ktorého šírka sa rovná dĺžke izolačnej rúrky, natáča sa na rovnú časť cievky, nažehlí sa teplom a nalisuje sa v špeciálnom prípravku. Koniec rúrky sa nožom nareže do ihlanu, aby sa vytvoril postupný prechod do izolácie čela točivého stroja.

Izolačný systém vnutia statora obsahuje organické materiály ako primárnu zložku. Všeobecne platí, že organické materiály mäknú pri oveľa nižšej teplote a majú oveľa nižšiu mechanickú pevnosť ako meď alebo oceľ. Preto životnosť vnutia statora je obmedzená v prevažnej miere elektrickou izoláciou ako vodičmi alebo oceľovým jadrom. Potvrďuje to aj prax, keď ukazovatele údržby vnutia statora a jeho testovanie takmer vždy poukazujú na testovanie a údržbu elektrickej izolácie [1], [2].

Konštrukcia statorového vnutia

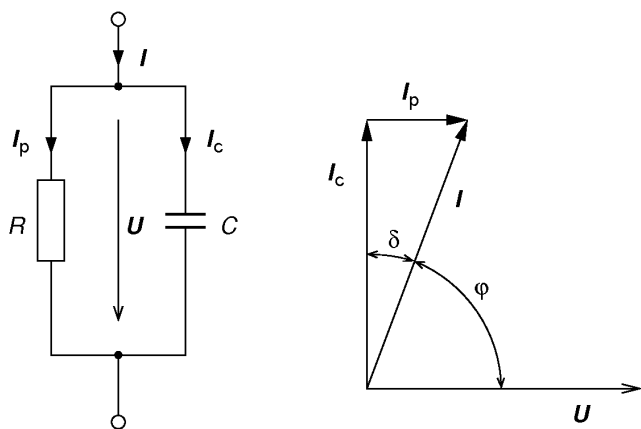
Statorové vnutie môže byť urobené buď v jednej vrstve, alebo v dvoch vrstvách. V prípade jednovrstvového vnutia je v každej drážke jedna cievková strana. Každá cievka má dve strany, preto počet všetkých cievok po obvode stroja sa rovná polovici počtu drážok. Jednovrstvové vnutie môže

byť buď dvojpolohové vinutie so sústredenými cievkami, alebo vinutie s rovnakými cievkami [3]. Takmer všetky veľké synchronne stroje a stredne veľké a veľké indukčné motory majú dvojvrstvové statorové vinutie. V každej drážke statorového vinutia sú dve oddelené strany dvoch cievok. Počet cievok na obvode sa rovná počtu drážok. Každá cievka má jednu stranu uloženú v spodnej časti drážky a druhú stranu v hornej časti drážky (bližšie k vzduchovej medzere).

Cievky statorového vinutia veľkých generátorov sú zhotovené z medeného pásu obdĺžnikového prierezu. Závity sú od seba vzájomne odizolované. Prúdová hustota nie je vo všetkých závitoch a na všetkých miestach rovnaká a straty spôsobené vírivými prúdmi môžu zapríčiniť lokálne prehriatie. Opatrením na zníženie strát je transpozícia závitov. Závity sú transponované pozdĺž stroja v priestore drážok (v stranách cievky). Tyč zložená z medených vzájomne odizolovaných transponovaných závitov, ktorá tvorí strany cievky statorového vinutia, dostala pomenovanie roebelova tyč – „roebel bar“ podľa svojho vynálezcu Ludwiga Roebela. Používa sa od roku 1912 dodnes [4].

Dielektrické straty v izolácii

Dielektrické straty spôsobujú ohrievanie dielektrika, ktoré sa nachádza v elektrickom poli, v dôsledku premeny elektrickej energie na tepelnú. Podľa fyzikálnej povahy procesu, pri ktorom nastáva premena elektrickej energie na teplo, rozlišujeme vodivostné, polarizačné a ionizačné dielektrické straty. Keď sú dielektrické straty také veľké, že sa teplo nestačí odvádzať do okolia, dochádza k ohrevu dielektrika nad prípustnú teplotu a dielektrikom sa vysokou teplotou poruší. Okrem zvodu dielektrika spôsobujú straty pomalé procesy, ktoré v dielektriku prebiehajú, keď je umiestnené v striedavom elektrickom poli. K týmto pomalým procesom patrí elektrónová a iónová polarizácia, vytváranie objemového náboja v nehomogénnom dielektriku a pod.



Obr. 1. Vektorový diagram prúdov a napätia pre izolant s dielektrickými stratami.

V praxi používajú sa reálne izolanty s dielektrikami, ktoré majú straty. Dielektrikum so stratami možno analyzovať pomocou jednoduchej náhradnej schémy pozostávajúcej z paralelne radeného kondenzátora s kapacitou C a odporníka s odporom R (obr. 1).

V ideálnom dielektriku predbieha vektor prúdu o 90° vektor napätia. Jedná sa o bezstratové dielektrikum, ktorým tečie iba kapacitný (jalový prúd) I_c . Naproti tomu vektor celkového prúdu v dielektriku so stratami nepredbieha vektor napätia o 90° , ale o uhol φ , ktorý je o uhol δ menší ako 90° . Uhol δ nazývame uhol dielektrických strát. Používa sa na vyjadrenie miery dielektrických strát, a to vo forme stratového činiteľa izolantu $\tan(\delta)$, ktorý má svoje fyzikálne opodstatnenie, ak platí nerovnosť $\delta \ll \varphi$, čo splňajú všetky kvalitné izolačné materiály. Dobré izolanty majú $\tan(\delta)$

vo rozsahu 10^{-3} až 10^{-4} , izolanty s $\tan(\delta)$ vo rozsahu 10^{-2} až 10^{-1} považujeme za nevyhovujúce [5].

Stratový činiteľ izolantu je daný pomerom stratového (činného) prúdu I_p ku čistému kapacitnému (jalovému) prúdu I_c podľa obr. 1

$$\tan(\delta) = \frac{I_p}{I_c} \quad (1)$$

Veľkosť strát v dielektriku možno vypočítať zo súčiny priloženého striedavého napätia a stratovej zložky prúdu

$$P = UI_p \quad (2)$$

Z vektorového diagramu na obr. 1 vyplýva

$$I_p = I_c \tan(\delta) \quad (3)$$

Platí

$$|I_c| = |U| \omega C \quad (4)$$

Dosadením (4) do (2) dostaneme

$$P = U^2 \omega C \tan \delta \quad (5)$$

Z rovnice (5) vyplýva, že straty v dielektriku sú priamo-úmerné stratovému činiteľu.

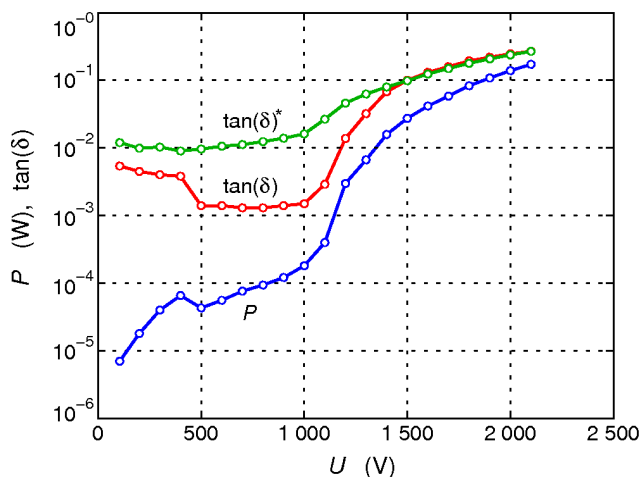
Experiment

Meranie dielektrických vlastností izolačného systému nn elektromotora bolo urobené pomocou automatického meracieho systému, ktorý pozostával z týchto prístrojov: automatický Scheringov mostík, zdroj striedavého napätia a kapacitný normál. Merali sa tieto elektrické veličiny: stratový činiteľ izolačného systému, kapacita izolačného systému, unikajúci prúd pretekajúci izolačným systémom, zdanlivé straty izolačného systému, činné straty izolačného systému a jalové straty izolačného systému. Izolácia vinutia elektromotora bola vyrobená zo šelaku.

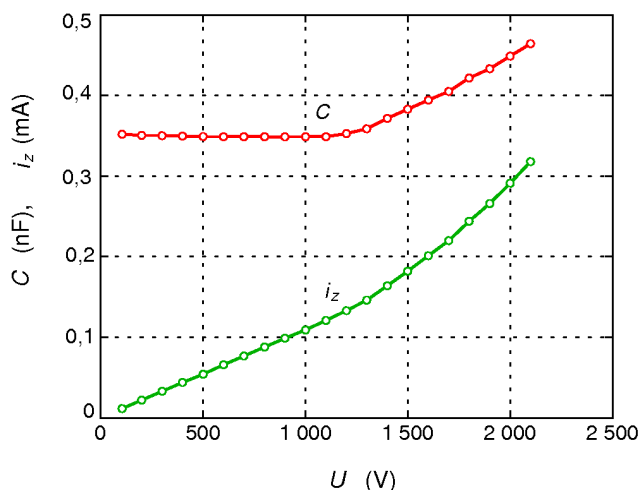
Na meraný objekt (elektromotor) sa priložilo striedavé napätie, ktoré bolo zvyšované od minimálnej hodnoty 100 V do maximálnej hodnoty 2 100 V a potom postupne zasa znižované do minimálnej hodnoty. Kovová konštrukcia motora sa spojila na nulový potenciál. Na digitálnom zobrazovači meracieho systému sa odčítali elektrické veličiny pri každej nastavenej hodnote napätia na meranom objekte.

Okrem merania kapacity a stratového činiteľa izolačného systému kompletného elektromotora realizovalo sa meranie kapacity a stratového činiteľa medzi hlavným a pomocným vinutím elektromotora, medzi hlavným vinutím a kovovou konštrukciou elektromotora a nakoniec medzi pomocným vinutím a kovovou konštrukciou elektromotora.

Počas merania vznikala po prekročení napätia 900 V intenzívna výbojová činnosť, ktorú bolo možné identifikovať sluchom v akustickom pásme. Táto skutočnosť sa prejavila aj nárastom hodnoty stratového činiteľa ako aj nárastom hodnoty činných strát (obr. 2). Pri napätí nad 1 900 V dosahovala úroveň výbojovej činnosti a ionizačná energia také vysoké hodnoty, že sa prejavili produkovaním ozónu okolo meraného objektu. Z obr. 2, ako aj z obr. 3, ktoré charakterizujú prúd tečúci izolačným systémom a tomu zodpovedajúce straty v izolácii vyplýva, že v izolačnom systéme prebiehajú dva mechanizmy vodivosti: vodivosť existujúca v slabých elektrických poliach a vodivosť v ionizujúcich elektrických poliach. Lineárnou náhradou týchto dvoch oblastí priamkami dostaneme ich priesečník, ktorý sa nachádza v intervale 1 200–1 300 V.



Obr. 2. Závislosť stratového činiteľa a činných strát izolácie od napätia U priloženého na izolačný systém elektromotora; $\tan(\delta)^*$ reprezentuje priebeh závislosti pri znižovaní napätia z 2 100 V na 100 V.



Obr. 3. Závislosť celkovej kapacity C a unikajúceho prúdu I_z od napätia U priloženého na izolačný systém elektromotora.

Záver

Realizovali sa merania elektrických parametrov izolačného systému jednofázového elektromotora nn. Izolačný systém hlavného a pomocného vinutia bol zo šelaku používaného v elektrotechnike. Namerané výsledky poukazujú na tú skutočnosť, že v izolačnom systéme prebiehajú dva mechanizmy vodivosti, ktoré možno priradiť dvom mechanizmom vodivosti: v slabých elektrických poliach a v ionizujúcich elektrických poliach.

Autori predpokladajú, na základe trendu závislosti stratového činiteľa izolačného systému, kapacity izolačného systému, unikajúceho prúdu a činných strát v izolačnom systéme od priloženého napätia, že hranica mechanizmu vodivosti je v oblasti napätí 1 200 V až 1 300 V. Táto hranica bola získaná ako priesečník dvoch lineárnych aproximácií v každej nameranej závislosti. Tuto skutočnosť potvrdzujú aj sekundárne procesy zistené počas experimentu, ktorými sú akustická emisia výbojovej činnosti v počutelnom pásme a generovanie ozónu pri vyšších testovacích napätiach.

Spomínané výsledky ako aj hypotézy z uvádzaných meraní možno ešte v budúcnosti dokázať napr. meraním závislosti výbojovej aktivity od priloženého napätia na izolačnom systéme zariadenia rozličnými meracími technikami ako: galvanická a indukčná metóda merania čiastočných výbojov, emisia v UV spektre.

Literatúra

- [1] Stone, G. C., Boulte, E. A., Culbert, I., Dhirani, H.: ELECTRICAL INSULATION FOR ROTATING MACHINES : Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair, IEEE Press Series on Power Engineering, IEEE PRESS, 2004. Kap. 1, Rotating machine insulation systems, s. 1–41. ISBN 0-471-44506-1.
- [2] Stone, G. C., Culbert, I. M., Lloyd, B. A.: STATOR INSULATION PROBLEMS ASSOCIATED WITH LOW VOLTAGE AND MEDIUM VOLTAGE PWM DRIVES. In: Cement Industry Technical Conference Record, 2007. IEEE 29. apríl – 2. máj 2007. [online]. [cit. 2011-10-10], s. 187–192. Dostupné na internete: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=4198217>>.
- [3] Hruškovič, L.: Elektrické stroje. STU v Bratislave, 1. vyd., 1999. 497 s. ISBN 80-227-1249-3.
- [4] Poopak Roshanfekar Fard.: ROEBEL WINDINGS FOR HYDRO GENERATORS. Division of Electric Power Engineering. Department of Energy & Environment. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Göteborg, Sweden 2007. [online]. [cit. 2011-10-10]. Dostupné na internete: <http://www.google.sk/url?q=http://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/RoshanfekarFardPoopakMSc.pdf&sa=U&ei=8-eSTuTeCckJ4gTDn5GSAQ&ved=0CA4QFJAA&usq=AFQjCNHC87MN6YhaEs7Ses8tmA_bHavmag>.
- [5] Turek, M. a kol.: Elektrotechnická keramika. SNTL, Praha, 1. vyd., 1964.
- [6] Adlerová, E. a kol.: Elektrotechnický náučný slovník, 7. zväzok Elektrotechnológia, ALFA. 1. vyd. 1977.

Uvedená publikácia bola vytvorená realizáciou projektu „Centrum výskumu účinnosti integrácie kombinovaných systémov obnoviteľných zdrojov energií“ ITMS 26220220064, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

This work was realized within the frame of the project “Centrum výskumu účinnosti integrácie kombinovaných systémov obnoviteľných zdrojov energií”, which is supported by the Operational Program “Research and Development” ITMS 26220220064, financed through European Regional Development Fund.

Autori: Bystrík Dolník, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: bystrik.dolnik@tuke.sk

Iraida Kolcunová, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: iraida.kolcunova@tuke.sk

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