

Michal Kosterec, Juraj Kurimský, Roman Cimbala, Michal Špes

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

Analýza rozloženia teploty vo vn cievkach točivého stroja

Abstrakt. Príspevok sa zaoberá rozložením teploty vo vn vinutí a izolácii točivých strojov. Je popísaný vznik a šírenie tepla v točivých strojoch. Teoretický model a realizácia modelu v programe ANSYS Workbench sú predložené. V závere sú prezentované výsledky zo simulácie pre oteplenie a diskusia.

Kľúčové slová: teplo, teplota, tepelné pole, elektrická izolácia, točivý stroj

Abstract. The paper deals with the distribution of temperature field in the winding and insulation of high voltage rotating machines. The heat generation in rotating machinery is explained. Theoretical model is described and realization in ANSYS Workbench is presented. Results from simulation and discussion are presented in conclusion.

Keywords: heat, temperature, thermal field, electrical insulation, rotating machine

Úvod

Tepelná analýza elektrických strojov je veľmi dôležitá a v súčasnosti sa jej venuje veľká pozornosť. Táto analýza sa týka všetkých elektrických strojov, pretože v každom stroji pri prevádzke dochádza k premeně elektrickej energie na teplo, čím dochádza k otepľovaniu častí stroja. Toto teplo vzniká v dôsledku strát vo vinutí, v železe, mechanických strát a dodatočných strát.

Na začiatku prevádzky elektrického stroja sa veľká časť tepla spotrebuje na zvýšenie teploty elektrického stroja. Len malá časť tepla sa odvádza do okolia. S rastúcim oteplením sa viac tepla odvádza do okolia a menej tepla sa spotrebuje na ohriatie elektrického stroja a tým sa prestup tepla zlepšuje. Po určitej hodnote oteplenia nastane rovnovážny stav kedy sa už elektrický stroj viacej neotepľuje pričom všetko vzniknuté teplo sa odvádza do okolia (Obr. 1)[1][2].

Tepelné stavy popísané vyššie sú veľmi dôležité pre prevádzku stroja, najmä z hľadiska pre izoláciu a jej tepelného zaťaženia. Izolácia je elektricky nevodivý materiál, ktorý zabraňuje vodivému spojeniu vinutia s okolím, alebo vodivému spojeniu vinutia medzi sebou. Izolácia je najdôležitejšia časť stroja a pri jej poškodení nastáva porucha stroja. Preto sa pri návrhu elektrického stroja musí tepelnej problematike venovať veľká pozornosť [3][4][5]. V tejto práci je prezentovaný model s prestupom tepla cez viacej vrstiev vn točivého stroja v ustálenom stave

Metódy

Najväčšie teplo vzniká pri skratoch. Teplo vzniká aj pri nedokonalom spojení elektricky vodivých častí, pri prechode elektrického prúdu ohmickým odporom, pri elektrickom oblúku, pri elektrickej indukcií a použití vysokofrekvenčného ohrevu. Dôsledky vzniku tepla pri správnom odvetrávaní môžu byť zanedbateľné, ale môže dôjsť ku prehriatiu elektrického stroja, ktoré často krát vedie ku zlyhaniu stroja [1][3][5].

Rovnica tepelnej energetickej bilancie opisuje, aká časť elektrickej energie premenenej na teplo sa prejaví v podobe prírastku tepelného obsahu elektrického stroja a aké množstvo tepla sa odvedie do okolitého prostredia. Matematický zápis je nasledovný:

$$(1) \quad \Delta P d = cV \Delta \vartheta + \alpha S \Delta \vartheta d$$

príčasť $cV \Delta \vartheta$ je prírastok tepelného obsahu telesa a $\alpha S \Delta \vartheta dt$ je teplo odovzdané do okolia.

kde: c – merné teplo materiálu, V – objem telesa, $\Delta \vartheta$ – oteplenie telesa, α – súčiniteľ prestupu tepla, S – plocha chladiaceho povrchu telesa. Pre ustálený stav platí, že časová zmena oteplenia je nulová:

$$(2) \quad \frac{\Delta \vartheta}{dt} = 0$$

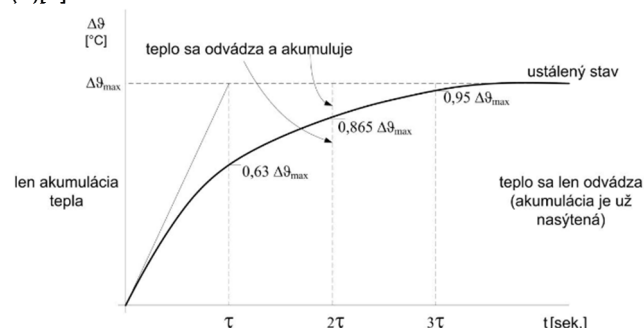
Najprv upravíme rovnicu (1) vydelením dt :

$$(3) \quad \Delta P = cV \frac{\Delta \vartheta}{dt} + \alpha S \Delta \vartheta$$

Ak teraz rešpektujeme (2), dostaneme rovnicu pre ustálený stav:

$$(4) \quad \Delta P = \alpha S \Delta \vartheta$$

Z rovnice (4) je zrejmé, že vzniknuté teplo sa už v elektrickom stroji neakumuluje, ale sa odvádza do okolitého prostredia so súčiniteľom prestupu tepla α cez plochu S . Množstvo odvedeného tepla je pritom priamo úmerné rozdielu teplôt medzi telesom a okolím. Ustálený stav nastáva až po ustálení prechodových stavov, ktoré skúmame riešením diferenciálnej rovnice prvého rádu (3)[6].



Obr. 1 Exponenciálna funkcia ohrevu [6]

Na veľkosť oteplenia a dobu jeho trvania je citlivý najmä izolačný materiál stroja. Druh izolácie je závislý od typu stroja aj od veľkosti stroja, od napätia a pretekajúceho prúdu a od konštrukčného riešenia stroja. V točivom elektrickom stroji rozlišujeme tri typy izolácie [4][6]:

- izoláciu vodičov
- izoláciu čiel cievok vinutia
- drážkovú izoláciu

Izolácia by sa nemala tepelne namáhať nad určité hodnoty, ktoré sú dané vlastnosťami použitých materiálov, aby sa neporušili izolačné schopnosti a mechanická pevnosť materiálu. Prehrievanie izolačného materiálu narušuje celistvosť organických izolačných materiálov vinutia, čo má za následok zrýchlenie ich tepelného starnutia. Pozvoľné opotrebovávanie izolácie vedie k jej porušeniu, čo môže spôsobiť trvalé poškodenie motora [4][6].

Tepelné starnutie izolačných materiálov je zložitý komplex a mechanizmus starnutia sa líši pri rôznych izolačných materiáloch a za rôznych prevádzkových podmienok.

Pre prvú aproximáciu, môže byť oxidačný proces vyjadrený Arrhenius-ovým zákonom. Životnosť izolácie (L, v hodinách) sa vzťahuje k teplote (T, v °K):

$$(5) \quad L = A \cdot e^{(B/T)}$$

kde A a B sú považované za konštanty. Pre orientáciu bude životnosť izolácie znížená o 50% pri zvýšenej teplote o 10°C nad povolenú hodnotu. Je zrejmé, že čím je vyššia teplota, tým je kratšia životnosť izolácie. Arrhenius-ov zákon je základom všetkých testov urýchleného starnutia, ktoré sa používajú na odhad tepelnej životnosti vinutia a tiež sa používa na definovanie tepelnej triedy izolácie [7][8].

Od veľkosti dovoleného oteplenia závisí, ako dlho bude pracovať elektrický stroj bez poruchy. Čím je vyššie dovolené oteplenie, tým vyšší výkon možno získať z elektrického. Tepelné triedy klasifikujú tepelnú odolnosť izolačných materiálov. Je to maximálna teplota, pri ktorej izolačný materiál pri trvalom tepelnom namáhaní vykazuje optimálnu životnosť. Jednotlivé tepelno-izolačné triedy sú dané normou STN-EN-61857 (Tab. 1).

Tabuľka 1 Tepelno-izolačné triedy podľa STN-EN-61857

Spôsob chladenia	Trieda izolácie/ medzná teplota (°C)					
	A	E	B	F	H	200
Vzduch alebo plyn	125	145	170	195	220	240
Olej	115	140	155	180	200	220

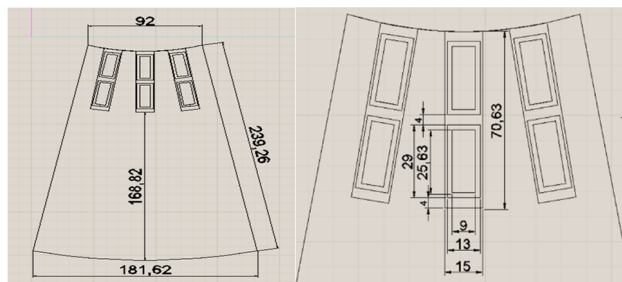
Model

Daný elektrický točivý stroj je asynchrónny trojfázový 6kV motor. Modelovanie motora pozostávalo z troch častí:

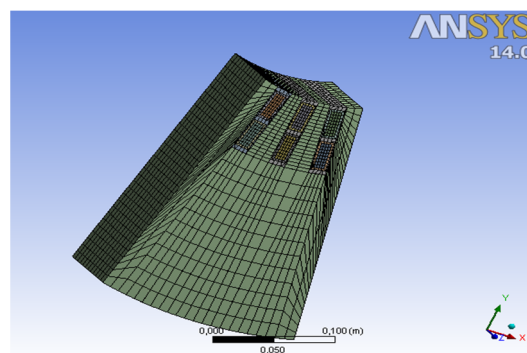
1. Vinutie- vinutie je tvorené medeným pásmom s prierezom 225 mm² a dĺžky 81 cm.
2. Statorová časť- stator pozostáva z pospájaných statorových oceľových plechov.
3. Izolácia vinutia- je tvorená izolačnou páskou z epoxidovej sludy. Tepelná trieda izolácie je F a hrúbka izolácie je 2mm.

Model v 3D zobrazení je kópia výrezu 1/16-ny motora s 3 drážkami a 6 medenými vodičmi. Pre symetričnosť motora je to postačujúce pre simuláciu. Geometria modelu je zobrazená na Obr. 2. Model bol realizovaný v CAD programe a následne načítaný do simulačného prostredia programu ANSYS pre ďalšiu analýzu (Obr. 3). Model je zjednodušený a stator pozostáva z jedného statorového plechu o hrúbke 81 cm. Dané zjednodušenie modelu sa odrazí v malej odchýlke teploty medzi simuláciou a reálnym motorom. Teplota získaná zo simulácie bude o niečo nižšia. Je to spôsobené tým, že jeden statorový plech predstavuje jeden tepelný odpor, pričom simulácia obsahuje jeden

statorový plech a stator reálneho motora pozostáva z 81 statorových plechov.



Obr. 2 Geometria statora a vinutia



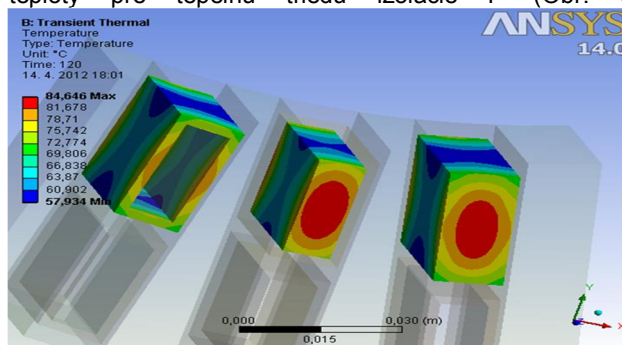
Obr. 3 3D model mriežky

Na vytvorenom modeli boli vykonané 2 analýzy:

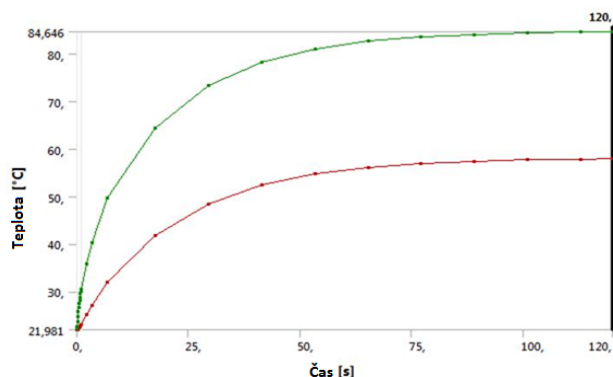
1. Analýza- výpočet pri normálnych podmienkach s chladením:
 - teplota okolia: 22°C
 - napájacie napätie: 6 kV
 - menovitý prúd: 380 A
 - prenos tepla vzduchu: 200 W/m²*K
 - prenos tepla izolácie: 150 W/m²*K
2. Analýza- výpočet pri preťažení motora 1,2-násobku menovitého prúdu o trvaní 2 minút s chladením :
 - teplota okolia: 22°C
 - napájacie napätie: 6 kV
 - elektrický prúd: 456 A
 - prenos tepla vzduchu: 200 W/m²*K
 - prenos tepla izolácie: 150 W/m²*K

Výsledky a diskusia

Počiatočná teplota všetkých častí modelu bola 22 °C a simulácia mala dĺžku 120 s. Na Obr. 4 je zobrazené teplotné rozloženie pre prípad s teplotou okolia 22°C a umelou cirkuláciou vzduchu. Teplota vinutia – zelená krivka – dosahuje maximálnu teplotu 84.6 °C a teplota izolácie – červená krivka – dosahuje teplotu v priemere 59.4 °C čo je približne jedna tretina z dovolenej hodnoty teploty pre tepelnú triedu izolácie F (Obr. 5).

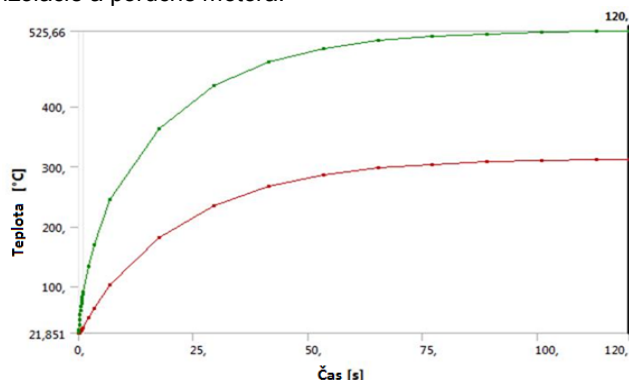


Obr. 4 3D reprezentácia teploty s teplotou okolia 22°C a s umelou cirkuláciou vzduchu



Obr. 5 Grafická závislosť zvyšovania teploty vinutia a izolácie s teplotou okolia 22°C a umelou cirkuláciou vzduchu

Na Obr. 6 je znázornený graf zvyšovania teploty vinutia a izolácie pre prípad preťaženého motora. Tak isto ako v predchádzajúcom prípade, tak aj v tomto je postačujúca dĺžka simulácie 120 s. Teplota vodiča – zelená krivka – dosahuje hodnotu 525 °C čo je až 5- násobok teploty vinutia pri normálnej prevádzke. Teplota vinutia – červená krivka – dosahuje hodnotu 300 °C čo je o 105 °C viac ako povoľuje norma STN-EN-61857. V tomto prípade by došlo k narušeniu celistvosti izolácie a následnému prierazu izolácie a poruche motora.



Obr. 6 Grafická závislosť zvyšovania teploty vinutia a izolácie s teplotou okolia 22°C, umelou cirkuláciou vzduchu a preťažením motora

Záver

Použitím simulácie v programe ANSYS sa môže určiť elektro-teplná stabilita reálnych strojov. Navrhnutý model môže byť použitý na overenie výpočtov jednotlivých parametrov ale tak isto aj na doplnenie informácií z praktického merania. Zohľadňuje použité charakteristiky a materiály izolácie a tak isto aj rôzne prevádzkové podmienky. Môžu byť identifikované najviac namáhané, najviac rozťažné a najviac odolné časti stroja. Dané časti sa môžu nadimenzovať na vypočítané namáhanie a tým sa môže predísť poruchám stroja.

Podakovanie

Túto prácu podporili: Vedecká grantová agentúra MŠVVaŠ SR a SAV projektami VEGA č. 1/0311/15, VEGA č. 2/0141/16.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0438.

Literatúra

- [1] V. Chudý, R. Palenčár, E. Kureková, M. Halaj: Meranie technických veličín, Vydavateľstvo STU, Bratislava 1999, 688 s. ISBN 80-227-1275-2
- [2] Transformer diagnostics. Facilities instructions, standards and techniques (2000). Testing solid insulation of electrical equipment. Volume 3-1, Hydroelectric Research and Technical Services Group, 2003

- [3] L. Lamarre, E. David: Temperature dependence of the resistance of modern epoxy mica insulation of HV rotating machines, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Volume: 15, Issue: 5, October 2008
- [4] O. Shimizu: Temperature Classes of Electrical Insulation, ThreeBond Technical News, 1. December 1985, no. 13 [online], [prístup 23.11.2016] URL:<http://www.threebond.co.jp/en/technical/technicalnews/pdf/tech13.pdf>
- [5] Tepelno-ventilačná problematika elektrických strojov, [online], [prístup:23.11.2016], URL:<http://cpd.utc.sk/kvesnew/dokumenty/VSES/Tepelno%20ventilacna%20problematika%20ES.pdf>
- [6] Tepelná problematika elektrických strojov, [online], [prístup:23.11.2016], URL:<http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/VSES/Tepelná%20problematika%20elektrických%20strojov.pdf>
- [7] F. Aymonino, T. Lebey, D. Malec: Degradation and Dielectrics measurements of rotating machines insulation at high temperature (200-400°C), IEEE Solid Dielectrics, 2007, ICSD '07
- [8] A. C. Gjerde: Multifactor Ageing Models, Origin and Similarities, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, Issue 1, 1997 Corporation, Trafford, PA, Final Report, Dec. 1983.

Autori: Michal Kosterec, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: michal.kosterec@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

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

Michal Špes, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: michal.spes@tuke.sk