

Optimalizace tepelně-ventilačních výpočtů vzduchem chlazených turbogenerátorů

Disertační práce je zcela jistě přínosem pro optimalizaci návrhu vzduchem chlazených turbogenerátorů, které jsou v současné době preferovány před stroji s vodíkovým nebo kombinovaným chlazením (voda –vodík). Důvodem je vyloučení složitého plynového a vodního hospodářství a také odklon od velkých jednotek (1000 MVA a vyšších). Hranice výkonu vzduchem chlazených dvoupólových turbogenerátorů se posunula k cca 300 MVA a narostly požadavky na minimální hmotnost, variabilitu chladících systémů (otevřené, uzavřené s chladiči voda-vzduch, ...), spojení s bezkartáčovými buďiči a pilotními generátory s PM. Vzhledem k dopravě pak v uspořádání „package“ s odpruženým jádrem na tzn. „spring-barech“.

V úvodu práce je popsán současný stav a cíle disertační práce. Ve třetí části práce jsou uvedeny teoretické vztahy pro proudění a šíření tepla, krátce jsou zmíněny metody MKP, MKO, sdružené úlohy včetně odpovídajících SW produktů. Tvorba digitálního modelu v rámci SW Ansys s využitím programu Fluent a Mechanical. Pro ověření výpočtů byl použit analogový výpočet zahrnující zkušenosti z minulosti ve formě SW „In-house“, v jazyce Visual Basic v prostředí MS Excel. Přehledné ventilační schéma generátoru je uvedeno na obr.4.3. Výpočty jsou ověřovány z měření naprázdno, nakrátko a mechanického chodu. Konstatováno, že open source SW je finančně náročný a výpočet pro kompletní numerický model je náročný na paměť a délku výpočtu. Důsledkem je zjednodušení zadání.

Okrajové a počáteční podmínky výpočtu jsou uvedeny v tab.4.1. na str. 27. Vzhledem k symetrii generátoru je uvažována jen 1/2 stroje v axiálním směru. Celkové ztráty v železe, mědi statoru a rotoru jsou přepočítány na jednotku objemu. Ve vinutí není uvažována izolace, u statorového vinutí je koš vinutí zjednodušen, stejně jako i uspořádání čel vinutí rotoru. Výchozí varianta uspořádání je uvedena na obr.4.5. na str.31. Jako řešené varianty jsou: kruhové přepouštěcí kanály komorové ventilace (4,8, a 12), v rozích kostry s různými blokacemi; redukce průřezu vzduchové mezery; radiální a šikmé ventilační kanály ve vinutí rotoru; šikmé a různě hluboké poddrážkové kanály. Množství, rychlosti a tlaky chladícího vzduchu jednotlivých variant jsou uvedeny názorně v odpovídajících grafech. V dalších grafech je znázorněno rozložení teplot ve statoru a rotoru.

Z porovnání výsledků oteplení vypočteného a změřeného je patrné, že vypočtená oteplení jsou nižší, než změřená, což může být způsobeno výše uvedenými zjednodušeními. Zvláště pak nerespektováním rozložení ztrát v jednotlivých částech generátoru. Naopak jako významné je určení rozložení oteplení pro jednotlivé konfigurace statoru a rotoru.

Lze konstatovat, že všechny cíle uvedené v odst.2. práce byly splněny.

Práce v celkovém rozsahu 90 stran psaného textu, tabulek, obrázků, schémat a grafů je psána čtivou formou, gramaticky, graficky i logicky na vysoké úrovni. V seznamu literatury je uvedeno celkem 31 referencí a 12 publikací, z toho jedna impaktovaná, týkající se šikmých chladících kanálů u stroje 40 MW.

V rámci diskuse by bylo vhodné, aby se doktorand vyjádřil k připomínkám uvedeným v posudku.

**Disertační práci doktoranda Ing. Jiřího France doporučuji,
(dle zákona č.111/1998 Sb. § 47), k obhajobě.**

V Plzni 30.7.2019

Ing.Petr Rada, CSc.



V rámci obhajoby mám následující otázky:

1. Jaký byl výkon počítaného TBG ?
2. Uvažuje se zahrnout do výpočtu i tzv.“termosifonové chlazení čel rotoru“ ?
3. Máte zkušenosti z měření teplot skelným vláknem?
4. Jaké problémy se mohou vyskytnout při realizaci šikmých ventilačních kanálů při ražení otvorů ve vinutí rotoru ?

Posudek doktorské disertační práce

Doktorand: Ing. Jiří Franc

Oponent: Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc

Doktorand předložil k posouzení doktorskou disertační práci na téma „Optimalizace tepelně-ventilačních výpočtů vzduchem chlazených turbogenerátorů“. Práce má celkem 85 stran a je rozdělena do pěti kapitol. První kapitola obsahuje literární rešerši a hodnocení současného stavu na trhu turbogenerátorů. Ve druhé kapitole jsou shrnuty cíle disertační práce, třetí kapitola obsahuje teorii bezprostředně spjatou s řešenými problémy disertační práce. Pojednává o teorii a druzích proudění a výpočetních metodách.

Jádrem práce je čtvrtá kapitola obsahující postup a metody řešení. Jako první byla provedena ventilační analýza celého stroje, druhý krok byl zaměřen na modelování oteplení jednotlivých částí stroje a provedeny úpravy ventilačního obvodu s cílem zlepšení tepelných poměrů.

V páté kapitole je porovnání výsledků z numerických analýz s naměřenými hodnotami. Specifikou problematiky turbogenerátorů velkých výkonů je skutečnost, že z hlediska nákladů na výrobu není možné vyrobít speciální funkční vzorek jenom na testování, takže většina testů se provádí na strojích, vyrobených pro konkrétní zakázku a různé simulované varianty není možné reálně otestovat. Z výsledků, prezentovaných v této kapitole je vidět důležitost vzduchové mezery, která má zásadní vliv na celkové oteplení stroje. Jako důležité se jeví zmenšení vzduchové mezery na konci stroje, které způsobí větší množství vzduchu do přepouštěcích kanálů a způsobí pokles oteplení statoru.

Posouzení disertační práce:

- a) **Zhodnocení významu práce:** Práce se zabývá aktuální problematikou vzduchového chlazení turbogenerátorů. Problematika chlazení je závislá na mnoha parametrech, které se navzájem ovlivňují a změna jednoho parametru ovlivňuje parametry jiné a má, nebo může mít vliv na parametry elektromagnetické. Komplexní počítačové simulace a porovnání s již vyrobenými podobnými stroji jsou nutností pro výrobu konkurenceschopného stroje.
- b) **Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle:** Postup řešení často postrádá jasně definované a zdůvodněné podmínky řešení. Jako příklad uvádím:
- c) – proč byl „statorovému jádru“ stroje přiřazen materiál „železo“, bez udání jakýchkoliv parametrů tepelné vodivosti? Není blíže specifikováno, jestli se jedná o masivní železo, nebo plechy!! Šíření tepla v masivním železe je zcela odlišný od materiálu složeného z plechů!! Elektrotechnické plechy mají jinou vodivost než nspecifikované „železo“!
– Zanedbání izolace měděných vodičů při tepelném výpočtu je velmi hrubé zjednodušení.
- d) **Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu:** Za daných předpokladů a hrubých zjednodušení jsou výsledky pro aplikaci na skutečný stroj diskutabilní.
- e) **Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni:** Práce má standardní grafickou úroveň. Chybí ale seznam symbolů. V práci je řada překlepů a bohužel i hrubých pravopisných chyb, především v případech shody podmětu s přísudkem. Autorovi práce doporučuji, aby nespolehal na automatickou kontrolu počítačem. Počítač nerozezná chyby ve slově vinutí –vynutí


Otázky k obhajobě:

- 1) Název práce je „Optimalizace tepelně – ventilačních výpočtů vzduchem chlazených turbogenerátorů“. V „Závěru“ se uvádí, že: „Lze tedy využít představený numerický model a pomocí parametrizace klíčových oblastí lze snadno spočítat několik různých variant a optimalizovat tak jakýkoliv stroj“. Prosím o bližší vysvětlení. Byly použity nějaké konkrétní optimalizační metody?
- 2) Pod rovnicemi (3.17) a (3.18) je kromě jiné uvedeno, že „K“ je hydraulický odpor, ale v uvedených rovnicích se žádné „K“ nevyskytuje.
- 3) Vzhledem k použitému systému chlazení má velký vliv „ventilační efekt“ otáčejícího se rotoru. Byly výpočty provedeny při otáčejícím se rotoru?

Závěr:

Předložená práce splňuje zákonné požadavky na disertační práce a v případě úspěšné obhajoby doporučuji udělení titulu PhD.

V Brně 19. 8. 2019


Čestmír Ondrůšek

doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2
616 69 Brno

Posudek doktorské disertační práce

Doktorand: Ing. Jiří Franc

Oponent: doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Disertační práce pana Jiřího France na téma „Optimalizace tepelně-ventilační výpočtů vzduchem chlazený turbogenerátorů“ má celkem 85 stran, což je možné považovat za kratší práci. V úvodních třech kapitolách je pojednáno o motivaci pro řešení chlazení turbogenerátorů na základě rozboru současného stavu dané problematiky. Z tohoto úvodního pojednání jsou stanoveny cíle práce, které mají být řešeny v této práci. V třetí kapitole je stručně rozebrána teorie týkající se modelování proudění, tepla a využití metody konečných prvků a objemů pro modelování chlazení elektrických strojů.

Hlavní část disertační práce je popsána ve čtvrté kapitole. Zde je velmi stručně popsán „in-house software“. V další části jsou provedeny ventilační a tepelné analýzy řešeného turbogenerátoru, kdy bylo simulováno několik variant uspořádání ventilačního systému a posouzen jejich vliv na chlazení stroje jako celku.

Poslední pátá kapitola popisuje měření na reálném stroji a porovnání výsledků s provedenými simulacemi. Je pochopitelné, že není možné provést na reálném stroji všechny možné varianty ventilačního systému, které byly simulovány. Proto je zde uvedeno jenom několik konfigurací, které byly na reálném stroji realizovatelné. Experiment prokázal důležitost některých úprav ventilačního systému a potvrdil tím i věrohodnost CFD simulací.

Posouzení disertační práce:

a) Zhodnocení významu práce

Problematika chlazení velkých strojů je stále aktuální a využití CFD simulací při jejich návrhu je v současné době nezbytné. Navíc výsledky simulací je vhodné použít při identifikaci parametrů analytických výpočtů, které jsou mnohonásobně rychlejší na výpočet a dávají základní představu o průtočných poměrech uvnitř stroje.

b) Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

V názvu práce je slovo „optimalizace“ a jeden z cílů práce je „tvorba a optimalizace výpočetní sítě“. V práci však optimalizaci není věnována žádná část, pouze je zde uvedeno, že optimalizace spočívala v porovnání dvou variant. Práce by měla obsahovat alespoň jednu kapitolu zabývající se optimalizací.

Postup řešení je v podstatě v pořádku, ale po obsahové stránce je velmi stručný, přičemž je velice těžké posoudit, zdali byly simulace provedeny správně. Ve všech simulacích chybí, jaké byly nastaveny okrajové podmínky, materiálové modely, jaká byla použita síť a zdali byl posouzen vliv rotace respektive, jaké jsou nominální otáčky turbogenerátoru. Často jsou zmíněna zjednodušení výpočetního modelu, ale chybí posouzení, jaký vliv to bude mít na přesnost řešení.

c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu

Výsledky práce zejména simulací jsou velmi stručně analyzovány. V práci postrádám hlubší analýzu výsledků. S ohledem na nejasnost jaké byly okrajové podmínky pro jednotlivé výpočtové modely, je verifikace na reálný stroj nejistý.

d) Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni

Grafická úprava práce je dobrá a nemám žádné připomínky. V práci se však objevují překlepy i pravopisné chyby. Popis některých obrázků je nejednoznačný a tím se hůře orientuje při jejich porovnání. V celé práci nejsou uvedeny parametry řešeného turbogenerátoru. Chybí představa jaký výkon, základní rozměry a další parametry má analyzovaný turbogenerátor.

e) Vyjádření k publikacím:

Publikace studenta hodnotím jako dostačující, zvláště cenná je publikace s impakt faktorem.

Otázky k obhajobě:

- 1) Na straně 16 popisujete možnost sdružené úlohy, ale nakonec jí nepoužijete, i když popisujete její výhodu v nižší výpočetní náročnosti. Vysvětlete konkrétněji proč je to pro tak velký stroj nevýhodné? Označení ploch a nastavení mezi bloky není tak složité jak píšete.
- 2) Jeden z cílů je „Tvorba parametrického modelu vzduchem chlazeného turbogenerátoru“. Jaké jsou parametry tohoto modelu? Jak byla parametrizace provedena?
- 3) Jak byla provedena optimalizace výpočetní sítě, jak je uvedeno v jednom z cílů práce?
- 4) Proč nejdu stanovit ventilační ztráty? CFD software umí spočítat třetí moment.
- 5) Je u CFD simulaci uvažována rotace, zejména u radiálních kanálů? Je uvažován tlakový účinek radiálních kanálů u analytického výpočtu (program v Matlabu str. 44)?
- 6) Jaké byly okrajové podmínky pro CFD simulace uvedené na stranách 30-40? Kde byly aplikovány?
- 7) Jak velký vliv má zjednodušení materiálového modelu vinutí při nahrazení pouze mědí? Jaký to má vliv na teploty? Je vůbec možné při takovém zjednodušení posoudit rozložení teploty po délce vinutí?
- 8) Jaké byly okrajové podmínky pro tepelné výpočty? Kde byly aplikovány?
- 9) Jak byla stanovena střední teplota vinutí?
- 10) Byly využity CFD simulace k upřesnění parametrů analytického výpočtu („in-house software“)? Pokud ano, jaké a jak?
- 11) V čem spočívá optimalizace tepelně-ventilačních výpočtů? Jaká byla použita optimalizační metoda?

Závěr

Předložená práce splňuje zákonné požadavky na disertační práci. Práci doporučuji k obhajobě a při uspokojivých odpovědích na otázky doporučuji udělení titulu PhD.