

OPONENTNÍ POSUDEK

Disertant: Ing. Martin Sirový

Oponent: Ing. František Bernat, C.Sc.

Název práce: Control and Energy Efficiency Optimization of High – Power Pump and Fan Systems

Dizertant se zabývá energetickými úsporami velkých regulovaných elektrických pohonů při otáčkové regulaci ve srovnání s jinými způsoby regulace a dále pak optimalizací provozu skupiny čerpadel. Pro obor elektrických pohonů a jejich ekonomiku je to záslužná práce, neboť autor navázal na předchozí známá řešení, které propracoval teoreticky do hloubky a přinesl též nová samostatná řešení.

Při řešení postupoval systematicky od podrobného řešení individuálního pohonu čerpadla a ventilátoru, kde provedl srovnání s jinými (převážně ztrátovými) způsoby regulace. Navázal pak optimalizací provozu skupiny čerpadel. Není zřejmé, proč se autor nezabýval též řešením skupiny ventilátorů např. v blízké aplikaci skupiny ventilátorových mlýnů, zvláště když výchozí podmínky a postupy jsou téměř identické.

Přesto lze konstatovat, že určený cíl práce byl splněn. Jako hlavní přínos práce považuji vytvoření algoritmu pro optimální řízení skupiny čerpadel, který značně posouvá vpřed dosud používané metody založené spíše na zkušenostech.

Důležité je, že autor v celé práci používal důsledně pouze běžně dostupná data motorů, čerpadel, ventilátorů a transformátorů od výrobců včetně provozních režimů provozovatelů a tedy výsledky jsou snadno aplikovatelné v technické praxi. Velmi pozoruhodná je verifikace výsledků typických aplikací v závodech ČEZu a ABB. Konečným výsledkem práce určeným pro praktické využití je výpočetní program úspor a návratnosti investice VSD Pump Save 2012 a obdobný Fan Save, který je již v průmyslu používán. Přínosem těchto programů je, že se již nerozlišují systémy s nulovou a nenulovou statickou výškou.

K práci mám několik dotazů, resp. připomínek:

1. Jaká je přesnost aproximací charakteristik jednotlivých částí pohonu na základě základních údajů výrobců a tedy i přesnost vyčíslených úspor energie. V kterých aplikacích lze očekávat přesnost vyšší a kde naopak nižší?
2. Dosadíme-li v rovnicích 2.1 a 2.2 jejich další členy, vyjde v rovnici 2.1 člen H_{ssd} s kladným znaménkem, kdežto ve významově totožné rovnici 2.2 je znaménko záporné. Chyba může být způsobena definicí znaménka sací výšky, která však v práci není uvedena.
3. Str. 49: Předpokládat konstantní účinnost měniče frekvence mi připadá jako příliš zjednodušující – ztráty v měniči se mohly alespoň odhadnout na konstantní a závislé na zatížení podobně jako to autor uvedl v případě transformátoru.
4. Str. 48: U transformátoru se vůbec neuvažuje zhoršení jeho účinnosti proudem harmonických.

Přes tyto připomínky je práce autora jednoznačně pozitivní z hlediska rozvoje oboru. Je graficky velmi dobře upravena, výsledky jsou prezentovány přehlednými grafy. Dizertant se velmi dobře orientuje v typických aplikacích pohonů velkých výkonů včetně např. hydraulických spojek, kde správně upozorňuje na nutnost pokud možno používat detailnější podklady výrobců.

Rád bych však upozornil, že v provozní praxi je nutno např. při volbě strategie řízení brát v úvahu i další kritéria, kde např. u skupiny pohonů napáječek se např. musíme zabývat dopady na jejich životnost při častějším odstavení. Podobně u zvláště velkých projektů bude asi nutno brát v úvahu i

podrobnější a tedy přesnější data komponent, což však nikterak nesnižuje přínos předložené práce a může být tak podnětem pro další postup.

Práce je předložena v anglickém jazyce na velmi dobré úrovni.

Je uvedeno 44 odkazů na literaturu a 52 příspěvků vlastních případně s kolektivem řešitelů projektů, softwaru a výzkumných zpráv. Práce autora považuji za hodnotné, není však odděleně uvedeno, které z nich vyšly v impaktovaných časopisech.

Protože práce splňuje zákonné podmínky, jednoznačně ji doporučuji k obhajobě.

V Praze 11.8. 2014

Ing. František Bernat, CSc

ABB s.r.o., Praha

Západočeská univerzita v Plzni

Doručeno: 15.08.2014

ZCU 025486/2014

listy: 4 přílohy:

druh:



zcupesd617af

Oponentní posudek disertační práce

Název: CONTROL AND ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION OF HIGH-POWER PUMP AND FAN SYSTEMS

Autor: Ing. Martin SIROVÝ

Oponent: Doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.
Katedra elektroniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
VŠB-Technická univerzita Ostrava
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba
Tel. 596 995 935, e-mail: ivo.neborak@vsb.cz

a) Zhodnocení významu disertace pro obor

Předkládaná disertační práce se zabývá velice aktuální tematikou a to řízením a optimalizací účinnosti čerpacích a ventilátorových systémů velkého výkonu, které se v současné době řadí mezi nejvýznamnější spotřebiče elektrické energie.

V důsledku rozvoje výkonové elektroniky, zejména frekvenčních měničů tyto nabízejí možnosti regulace otáček střídavých strojů a tedy nové možnosti v regulaci čerpacích a ventilátorových systémů za účelem zlepšení jejich účinnosti a tedy zmenšení ztrát, což v dané použité oblasti velkých výkonů přináší značný finanční efekt.

Dosažené výsledky disertace mohou účinně napomoci budoucím řešením při úspoře elektrické energie systémů velkých výkonů.

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

Práce je logicky členěna a začíná shrnutím aktuálního stavu poznání v řešené problematice, dále jsou uvedené cíle disertační práce, které jsou zformulovány na straně 23.

Následují kapitoly, které řeší (do určité míry) samostatné problémy. Jedná se o kapitoly zaměřené na optimalizaci hydraulických systémů s jedním čerpadlem (nejrozsáhlejší část práce), pneumatických systémů s jedním ventilátorem, a následně konfigurace s čerpadly pracujícími paralelně do společného hydraulického systému.

V rámci každého tohoto problému je postupováno tak, že jsou nejprve stanoveny matematické modely jednotlivých komponentů pohonu (hydraulická, resp. pneumatická část, převodovka, motor, měnič). Navržené matematické modely byly poté implementovány do softwarových nástrojů pro optimalizaci energetické účinnosti hydraulických a pneumatických aplikací - MVD Pump Save, resp. MVD Fan Save a následně byla provedena analýza pomocí těchto produktů. Výsledkem je velké množství závislostí sledovaných veličin, důležitých pro zhodnocení celého systému. Toto zhodnocení uvedených systémů následuje na konci každé kapitoly. Na konci práce je pak uvedené zhodnocení výsledků celé práce.

Toto členění je dle mého názoru velice vhodné pro zdokumentování splnění vytýčených cílů práce.

c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a původního konkrétního přínosu práce

Výsledky uvedené v práci jasně deklarují splnění cílů uvedených v 1. kapitole.

Velký přínos práce vidím v tom, že sestavené algoritmy výpočtů pro všechny jednotlivé případy vychází z běžně dostupných dat a není tedy třeba provádět složitá a drahá měření, což by činilo největší problémy u zařízení s velkými výkony.

Verifikace algoritmů byla provedena na konkrétních zařízeních ABB a ČEZ a to pomocí vyvinutého softwarového produktu MVD Pump Save, resp. MVD Fan Save, jak plyne z konkrétních řešených příkladů uvedených v práci. Ve vytvořených produktech MVD Pump Save, resp. MVD Fan Save vidím největší praktický přínos celé práce.

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

Jak již bylo konstatováno v bodě b), je práce zpracována přehledně a s logickým sledem. Rovněž po stránce grafické je na velmi dobré úrovni. Jelikož je práce psána anglickým jazykem, necítím se kompetentní posuzovat úroveň jazykové stránky, nicméně gramatické chyby jsem zde nenalezl.

e) Vyjádření k publikacím disertanta

Seznam publikací disertanta, resp. řešitelského týmu obsahuje 9 publikací prezentovaných na konferencích domácích, 9 publikací je z konferencí mezinárodních, zde je autor vždy členem řešitelského týmu. Dále následuje výčet funkčních vzorků, prototypů a zařízení (11), vytvořených softwarových produktů (8) a podílu na výzkumných zprávách (15).

Celkový počet publikačních aktivit disertanta činí 52 titulů, což mnohokrát přesahuje běžný, resp. požadovaný počet.

Bohužel ze seznamu není zřejmé, které publikace jsou uvedeny na Web of Science, resp. v databázi Scopus.

f) Doporučení

Disertační práce představuje cenný příspěvek vysoce aktuální problematice řízení a optimalizace účinnosti čerpacích a ventilátorových systémů velkého výkonu. Práci proto **doporučuji** k obhajobě.

Následují dotazy určené k diskusi při vlastní obhajobě.

- a) Na str. 49 je uvedeno, že účinník měniče kmitočtu je pro matematický model obvykle uvažován rovný jedné. Neprojeví se na přesnost modelu negativně vliv harmonických, který způsobí snížení celkového účinníku (total power factor)?
- b) V práci je jako výhoda uvedeno to, že algoritmy výpočtů pro všechny jednotlivé případy vychází z běžně dostupných dat a není tedy třeba provádět složitá a drahá měření. Přesto, kdyby byla provedena některá měření, nevedlo by to k možnému zlepšení přesnosti modelu? Která z měření by byla dle disertanta vhodná (pokud nějaká)?
- c) V příloze u popisu softvéru MVD Pump (Fan) Save je uvedeno, že je možno studovat i poruchové stavy. O jaké poruchové stavy se jedná a co je možno u nich sledovat?



Oponentní posudek disertační práce

Ing. Martin Sirový:

"Control and Energy Efficiency Optimization of High-Power Pump and Fan Systems (Řízení a optimalizace energetické účinnosti čerpacích a ventilátorových systémů velkého výkonu)"

a) Zhodnocení významu disertace pro obor

Čerpadla, ventilátory nebo kompresory velkých výkonů jsou nedílnou součástí tepelných a jaderných elektráren, chladících zařízení a produktovodů. Regulaci množství a výstupního tlaku dopravovaného média lze provádět různými způsoby jak na straně čerpadla, ventilátoru nebo kompresoru anebo na straně elektrického pohonu. Moderní měniče výkonové elektroniky přinesly pro tuto regulaci nové možnosti. Vypracování vhodné metodiky pro stanovení energetické účinnosti porovnávaných způsobů regulace při různých provozních režimech je proto významným přínosem pro obor. Práce ukazuje současně, jak je nutné pro odborníka v elektrických pohonech mít znalosti i o vlastnostech a charakteristikách poháněných strojních zařízení.

b) Vyjádření k postupu řešení problému, k použitým metodám, ke splnění stanoveného cíle

Z rozsáhlé problematiky, spojené se systémy pro dopravu kapalin a plynů a jejich řízení, se disertand ve své práci zabývá především systémy s odstředivými rotačními čerpadly a ventilátory. Disertand si stanovil celkem šest dílčích cílů pro systémy s čerpadly a pět dílčích cílů pro systémy s ventilátory.

Hlavní část práce je rozdělena do celkem tří kapitol, které jsou věnovány problematice aplikací s jedním čerpadlem (kap. 2), problematice aplikací s jedním ventilátorem (kap. 3) a problematice aplikací s více čerpadly (kap. 4).

V úvodu kap. 2 jsou popsány typické aplikace systému s odstředivým čerpadlem velkého výkonu, vlastnosti a matematické modely hlavních částí systému tj. hydraulické soustavy, čerpadla, elektropohonu a jeho částí (motor, převodovka, měnič frekvence, transformátor) pro určení účinnosti, výkonu, příkonu v závislosti na průtoku a výstupním tlaku nebo jiných veličinách. Na jejich základě je potom vypracován aplikační program, který umožňuje pro zadané parametry jednotlivých částí systému vypočítat spotřebu a energetickou účinnost pro různé způsoby regulace dopravovaného množství. S ohledem na to, že většina potřebných závislostí je zadávána grafickými charakteristikami, zvolil autor metodu převedení charakteristik do číselných tabulek.

V další části kap. 2 je provedeno ověření metody z úvodu této kapitoly pro dva případy a pro každý případ jsou porovnávány dvě varianty. První případ propočítává systém kotelní napáječky, která je charakteristická velkou dopravní výškou v porovnání s rychlostní výškou. Jsou porovnávány dvě varianty lišící se způsobem regulace dopravní výšky. První varianta udržuje konstantní výtlačnou výšku nezávisle na dodávaném množství vody, druhá varianta mění výtlačnou výšku lineárně s dodávaným množstvím vody. Pro obě varianty je vypočteno množství dílčích i celkových závislostí účinností a spotřeby pro různé způsoby regulace

množství. Jako způsob regulace s nejmenší spotřebou byl určen způsob regulace pomocí regulace otáček čerpadla a řízení dopravní výšky lineárně s množstvím dodávané vody. Druhý propočítávaný případ je oběhové čerpadlo chladicí vody, které je charakteristické malou dopravní výškou v porovnání s rychlostní výškou. Varianty se liší rozsahem regulace dopravovaného množství chladicí vody (50 – 100% a 80 – 100%). I v tomto případě vychází jako nejvhodnější způsob řízení množství chladicí vody způsob regulace otáček čerpadla.

V úvodu kap. 3 jsou popsány typické aplikace systému s radiálním a axiálním ventilátorem velkého výkonu, vlastnosti a matematické modely hlavních částí systému tj. pneumatické soustavy, ventilátoru, elektropohonu a jeho částí (motor, převodovka, měnič frekvence, transformátor) pro určení účinnosti, výkonu, příkonu v závislosti na průtoku a výstupním tlaku nebo jiných veličinách. Na jejich základě je opět vypracován aplikační program, který umožňuje pro zadané parametry jednotlivých částí systému vypočítat spotřebu a energetickou účinnost pro různé způsoby regulace dopravovaného množství.

V další části kap. 3 je provedeno ověření metody z úvodu této kapitoly pro dva případy a pro každý případ jsou porovnávány dvě varianty. První případ propočítává systém recirkulačního radiálního ventilátoru. Jsou porovnávány dvě varianty lišící se rozsahem změny množství cirkulujícího média. První varianta uvažuje rozsah změny 75 až 100% a druhá varianta uvažuje rozsah změny 90 až 100%. Pro obě varianty je vypočteno množství dílčích i celkových závislostí účinnosti a spotřeby pro různé způsoby regulace množství. Jako způsob regulace s nejmenší spotřebou byl určen způsob regulace pomocí regulace otáček ventilátoru.

Druhý propočítávaný případ je axiální ventilátor chladicí věže. Varianty se liší způsobem regulace dopravovaného množství chladicího vzduchu, regulací otáček ventilátoru a natáčením lopatek axiálního ventilátoru. Je zajímavé, že z hlediska spotřeby energie vychází regulace natáčením lopatek o něco příznivěji, než regulace změnou otáček.

V úvodu kap. 4 je uveden důvod pro zpracování metodiky výpočtu ukazatelů pro určení optimálního řízení skupiny odstředivých čerpadel s využitím podkladů o systému s jedním čerpadlem z kap. 2. Obecná studie, hledající optimální rozdělení celkového dopravovaného množství mezi dvě shodná čerpadla prokazuje formou trojrozměrného grafu, že z hlediska nejlepší účinnosti existují dvě oblasti dopravovaného množství. V oblasti do jmenovitého množství jednoho čerpadla je výhodné provozovat pouze jedno čerpadlo a v oblasti nad jmenovitým množstvím jednoho čerpadla musí být v provozu obě čerpadla s rovnoměrným rozdělením dopravovaného množství mezi obě čerpadla.

V dalších částech kap. 4 jsou stejným způsobem propočítávány případy paralelní spolupráce dvou různých čerpadel a čtyř čerpadel. Výsledkem jsou podobné závěry jako pro případ dvou čerpadel.

Disertand v závěru své práce specifikuje osm hlavních výsledků své práce, které se shodují co do obsahu s cíli práce v úvodu práce. Proto lze konstatovat, že hlavní cíle doktorské práce byly splněny v přiměřeném rozsahu po teoretické i praktické stránce. Velmi pozitivně hodnotím především to, že se doktorandovi podařilo sestavit výsledky své práce do aplikačních programů, které pod označením MVD Pump Save 2012 a MVD Fan Save 2012 jsou používány při návrhu, optimalizaci a technickoekonomickém hodnocení aplikací v projekčních organizacích.

c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a původního konkrétního přínosu disertanta

Za hlavní výsledek disertační práce považuji obsah kapitol 2, 3 a 4. Jejich obsah a zhodnocení jsem uvedl v části **b)** tohoto posudku.

Za původní přínos doktoranda považuji:

- shromáždění vstupních dat a charakteristik o čerpadlech, ventilátorech a dalších komponentech studovaných systémů,
- vytvoření matematických modelů studovaných systémů a vypracování postupů jejich řešení
- ověření vypracovaných postupů řešení na konkrétních příkladech a variantách,
- vypracování programů pro praktické použití včetně názorných výstupních závislostí a grafů.

d) Vyjádření k systematickosti, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Předložená disertační práce je napsána velmi přehledně a systematicky a má dobrou úpravu po formální i jazykové stránce.

K práci mám následující dvě společné připomínky:

- Použité barvy v grafech a diagramech se od sebe velmi špatně rozpoznávají.
- V rovnicích části 2, 3, 4 je zavedeno zbytečně mnoho proměnných, které mají shodný význam nebo se již nikde jinde nepoužívají.

Dále mám k práci následující dotazy nebo připomínky:

- a. str.28 Rovnice (2.1) a soustava rovnic (2.2) až (2.4) dovoluje vypočítat proměnnou $H_{ST}(Q)$ dvěma způsoby. Výsledky se ale liší o znaménko u H_{SSd} .
- b. str.29 poslední odstavec – Proč není uveden praktický příklad systému s rozhodující složkou statické výšky Fig. 2.3 jako je tomu u ostatních dvou případů.
- c. str.46 – V předposledním odstavci se konstatuje, že průběhy účinnosti na Fig.2.19 a účinníku na Fig. 2.20 byly vypočteny z náhradního schématu pro ustálený stav, ale že tento postup nemůže být použit v praxi, kdy parametry náhradního schématu nejsou k dispozici. Jak toto tvrzení autor práce zdůvodňuje?
- d. 132 – Z Fig. 4.1 C,D je zřejmé, že při provozu dvou stejných čerpadel se nejlepší účinnosti dosáhne chodem jednoho čerpadla do polovičního množství a chodem dvou čerpadel od polovičního do plného množství při stejných otáčkách obou čerpadel. Jak se pro tento případ změní provoz jednoho čerpadla s plnými otáčkami a druhého s regulovanými otáčkami?
- e. Proč není v práci zmíněno omezení provozu rotačních čerpadel a kompresorů z hlediska kavitace nebo pompáže?

e) Vyjádření k publikacím disertanda

Disertační práce je doplněna rozsáhlým seznamem použité literatury o 44 položkách, seznamem vlastních publikací disertanda o 18 položkách a seznamem funkčních vzorků a prototypů o 10 položkách. To svědčí o vysoké aktivitě disertanda během doktorského studia.

Předložená disertační práce také dokumentuje, s kolika rozdílnými oblastmi techniky se musel disertand podrobně seznámit, aby mohl splnit zadání své práce.

f) Jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě

Předložená disertační práce prokazuje, že její autor má vědeckou erudici a je schopen zadaný problém nejen nastudovat a teoreticky řešit, ale i dotáhnout řešení do v praxi použitelné metodiky.

Předložená disertační práce splňuje požadavky na takovou práci, odpovídá uznávaným požadavkům na udělení akademického titulu PhD, a proto ji doporučuji k obhajobě.

Prof. Jiří Pavelka, DrSc.
katedra elektrických pohonů a trakce
Elektrotechnická fakulta
ČVUT v Praze

V Praze 06.08.2014

