

Posudek disertační práce

Autor disertační práce: **Ing. Václav Mužík**

Vedoucí práce: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, Dr.Sc., dr. h. c.

Pracoviště: ZČU v Plzni

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Oponent: doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.

Katedra elektrických pohonů a trakce,

ČVUT FEL, Technická 2, 166 27 Praha 6

Název dizertační práce: „**Optimalizace výroby a spotřeby elektrické energie v režimu ostrovního provozu**“

Předložená disertační práce je zaměřena na aktuální problémy související s provozem elektroenergetické sítě za podmínek vznikající nerovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektrické energie a možnostmi přechodu části sítě do ostrovního provozu.

V souvislosti s touto situací nastává řada problémů se stabilitou energetické sítě a rizikem rozsáhlého blackoutu.

Doktorand se v této souvislosti zaměřil na oblast města Plzně a jeho blízkého okolí. Na základě celoročních dat o spotřebě elektrické energie dílčích oblastí uvažovaného regionu a výkonových možnostech jednotlivých lokálních zdrojů elektrické energie stanovil podmínky pro možnosti bezvýpadkového přechodu do ostrovních provozů jednotlivých oblastí.

Pro potřeby této analýzy doktorand nejprve shromáždil velký objem dat o časovém průběhu lokální výroby a spotřeby elektrické energie a posoudil výkonové možnosti jednotlivých energetických zdrojů.

Protože se jedná o poměrně rozsáhlý a komplexní dynamický systém, použil k simulaci jeho chování programové prostředí Matlab- Simulink. V tomto prostředí matematicky popsal chování jednotlivých elementů studovaného systému a následně provedl velké množství výpočtů, které umožnily posoudit chování energetického systému za různých okrajových podmínek. Důležitým kritériem přitom byla udržitelná stabilita energetického systému pracujícího v ostrovním režimu z hlediska velikosti a rychlosti časových změn kmitočtu generovaného napětí s ohledem na působení generátorových ochran.

Tyto veličiny úzce souvisí s disponibilním výkonem energetických zdrojů a jejich kinematickou energií uloženou v setrvačných hmotách generátorů.

Navržený a realizovaný počítačový model energetické soustavy všechny tyto významné vlivy respektuje a umožňuje tak se značnou přesností modelovat chování energetické soustavy ve fázi přechodu do ostrovního režimu.

Specifickým problémem simulací je problém získání hodnověrných dat pro matematický model. Protože se jedná o rozsáhlý dynamický systém s více zdroji energie, je důležitá časová koincidence jednotlivých datových řad. To klade na jejich sběr a přípravu pro výpočet značné nároky.

Zde musím ocenit houževnatost a trpělivost autora práce. Jsem přesvědčen, a z práce to též vyplývá, že právě sběr a příprava dat byla nejnáročnější a dovoluji si podotknout, že též jednou z nejprínosnějších, částí práce. Jde o data, která mají i svým způsobem choulostivý charakter s ohledem na bezpečnost provozu energetické soustavy a proto jejich poskytnutí bylo i důkazem velké důvěry příslušných autorit energetických podniků v autora práce.

Na druhou stranu, výsledky práce jsou cenné nejen pro poskytovatele dat, ale i pro vedoucí autority města Plzně pro případ vzniku krizových situací v zásobování elektrickou energií. Z tohoto pohledu je práce velice přínosná a má potenciál pro využití i v jiných regionech.

Z hlediska věcného obsahu, mimo několika překlepů, nemám k práci žádné závažné připomínky. Práce má logickou strukturu a je napsána přehledně.

Nicméně s ohledem na téma práce bych si dovolil položit několik otázek:

1. S ohledem na rychlost prováděných simulací může model pracovat téměř v reálném čase. Bylo by možné jej kontinuálně používat jako nástroj pro posouzení možnosti reálného přechodu do ostrovního režimu?
2. Jak rychlá je adaptace vstupních veličin počítačového modelu v případě změn konfigurace energetických zdrojů a propojení energetického systému uvažovaného ostrova?
3. Uvažujete o experimentálním ověření modelu?

Závěrečné hodnocení

Doktorand během svého studia prokázal dlouhodobé působení v oblasti energetické bezpečnosti. Za dobu doktorského studia publikoval osm příspěvků s výskytem v databázi SCOPUS nebo WOS. Dále je spoluautorem šesti příspěvků na odborných konferencích a osmi odborných zpráv. Vše z oblasti, která je předmětem doktorské práce.

Vlastní doktorskou práci považuji za originální a velice přínosnou z hlediska bezpečnosti provozování energetických sítí.

Doporučuji ji bez výhrad k obhajobě.



V Praze, 17. 5. 2019

doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.

Optimalizace výroby a spotřeby elektrické energie v režimu ostrovního provozu

Obsah

V předložené práci se autor zabývá analýzou a modelováním komplexních jevů vznikajících při přechodu části elektroenergetického systému do ostrovního provozu. Jedná se o tematiku vysoce aktuální, poněvadž její úspěšné vyřešení by bylo možno využít jakožto nástroje krizové infrastruktury (například pro zmírnění následků rozsáhlého blackoutu). Ačkoli samotná teorie takového přechodu začala být zkoumána už přibližně před padesáti lety, jednotlivé modely přechodu je možné řešit až nyní, kdy kapacita dostupné výpočetní techniky dovoluje dostatečně rychle zpracovávat velké datové soubory on-line.

Cílem této práce je sestavit a ověřit model zmíněného přechodu na ostrovní provoz o velikosti (v měřítku ČR) velkoměsta. Tento provoz je z hlediska výroby a spotřeby centralizovaný a z pohledu stability je odlišný od provozu nadřazené soustavy. Autor konkretizuje navrženou metodologii pro město Plzeň, kde se mu podařilo získat všechna důležitá vstupní data.

Práce o rozsahu 103 stran psaného textu je členěna následujícím způsobem: úvodních pět nečíslovaných stran obsahují titulní stránku, abstrakt s klíčovými slovy v českém a anglickém jazyce, následuje prohlášení a poděkování, poté obsah a seznam použitých symbolů a zkratk. Dále již pokračuje samotná práce o šesti kapitolách, závěr, seznam literatury a dvě kratší přílohy.

První kapitola (1 stránka) představuje úvod, v němž autor uvádí motivaci své práce, a sděluje, jaké poznatky by měla přinést pro provozovatele elektroenergetického systému na území města Plzně.

V následující kapitole o pěti stránkách, nazvané poněkud nešťastně „Teoretický úvod“, autor definuje problém – ostrovní provoz města – a analyzuje odděleně současný stav znalostí ve čtyřech oblastech: stabilita soustavy, její řízení a regulace, modelování elektrárenských bloků v ostrovním provozu a dostupnost takového provozu.

Třetí kapitola o čtrnácti stranách definuje ostrovní provoz se všemi jeho aspekty. Tento provoz je jednak definován ve smyslu Kodexu Přenosové Soustavy, dále ve smyslu Pravidel Provozování Distribuční Soustavy a také ve smyslu vyhlášky 80/2010 Sb. o stavu nouze v elektrotechnice a náležitostech havarijního plánu. Poslední část shrnuje legislativní rámec pro definice ostrovního provozu.

Rozsáhlá čtvrtá kapitola o dvaceti sedmi stranách je věnována stabilitě a provozu elektroenergetického systému. První část je věnována teorii stability (úhlová, napěťová a kmitočtová stabilita) a porovnávají se zde odlišnosti v domácích a zahraničních zdrojích. Druhá část analyzuje provoz izolované distribuční soustavy z hlediska bilance činných výkonů, setrvačnosti, řízení soustavy, regulaci kmitočtu a činného výkonu v ČR a zabývá se i přechodem do ostrovního provozu. Poslední část analyzuje dílčí modely vhodné pro modelování přechodu do ostrovního provozu. Jedná se zejména o model turbíny, generátoru, zátěže, dále regulace a vyhodnocuje se kompletní model bloku pro účely simulace.

Pátá kapitola o třiceti šesti stranách již představuje vlastní přínos autora k tématice – Výpočet přechodu města Plzeň do ostrovního provozu. Nejprve jsou shrnuta dostupná data pro elektrizační síť vstupující do výpočtu a je navrženo zapojení bloků do sítě při ostrovním provozu. Jedná se hlavně o data dodávky (Plzeňská Energetika, a.s. a Plzeňská Teplárenská, a.s. a data příslušející distribuované výrobě a obnovitelným zdrojům) a data spotřeby. Údajů za rok 2014 je více než 34 milionů v minutových vzorcích. K jejich zpracování disertant použil výpočetní prostředí Matlab 2018a SIMULINK. Z těchto dat autor získal histogramy o spotřebě dílčích ostrovů a poté i o jejich výrobě a určil podmínky pro přirozený výskyt dostupnosti ostrovního provozu. Vytvořil simulační model ostrova, doplnil jej vhodnými konstantami a vypočetl zatěžovací charakteristiky dílčích alternátorů v ostrovním provozu. Výpočty jsou však náročné a nemohly by být prováděny on-line. Proto autor navrhl jiný algoritmus, který dobu jednotlivých výpočtů podstatně zkracuje. Cenné jsou výpočty časových průběhů kmitočtu při skokových změnách činného výkonu v případě jednotlivých ostrovů a rozhodnutí o aspektech, které jsou pro úspěšný přechod do ostrovního provozu zásadní.

Šestá kapitola o třech stránkách zahrnuje závěr, shrnutí dosažených výsledků, a autor se v ní zamýšlí, do jakých směrů je možno orientovat další výzkum.

Následuje seznam publikací doktoranda, použitá literatura, seznam obrázků a tabulek.

Celkové zhodnocení, poznámky a komentáře

Zhodnocení významu disertační práce studenta.

Tématika disertační práce je v současné době vzhledem k dalšímu rozvoji elektroenergetiky vysoce aktuální, neboť představuje nástroj krizové infrastruktury pro redukci nebezpečí blackoutu a jiných rozsáhlejších havárií. Komplexními i dílčími otázkami se v této oblasti zabývá řada vědeckých pracovišť a rozvodných podniků na celém světě. Po této stránce jsou požadavky na práci splněny.

Vyjádření k postupu řešení problému, k použitým metodám a splnění určitého cíle.

Specifikované cíle práce podle mne byly splněny rovněž. Autor navrhl a otestoval možnost přechodu části elektrizační soustavy o velikosti města do ostrovního provozu a stanovil mezní podmínky, za nichž je ještě tento přechod realizovatelný. Situaci ilustroval na případu města Plzeň, pro jejíž elektroenergetický systém získal dostatečné množství vstupních dat. Postup řešení pokládám za korektní a odpovídající současným znalostem. Určitá zjednodušení v modelování zdrojů a zátěží, jež autor použil, jsou přípustná.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele

Teoretické podklady práce byly vytvořeny během několika posledních dekád a nebyly v práci předmětem dalšího rozvoje a zdokonalování (například modely jednotlivých prvků elektroenergetického systému). Hlavním přínosem je shromáždění dat pro vytvoření detailního modelu realizovaného v prostředí Matlab-SIMULINK, jeho řešení a posouzení dostupnosti přechodu systému do nahodilého ostrovního provozu. Doba výpočtu již téměř vyhovuje požadavkům na on-line řízení. Získané výsledky se jeví jako korektní.

Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni

Po formální stránce je, až na anglický abstrakt (s řadou chyb), práce celkem v pořádku (našel jsem málo drobných nepřesností či typografických nedostatků, jakož i ne zcela obratných formulací), obrázky mají patřičnou kvalitu a jsou dobře vysvětleny. Právě tak dobře jsou zpracovány i tabulky. Disertační práce je čtivá, autor velmi dobře pracuje s textem a pro jeho způsob psaní je již viditelný i určitý nadhled.

Autor hojně využíval při studiu tématiky odbornou literaturu domácí i zahraniční provenience. Cituje celkem 37 prací, hlavně knih a různých standardů, z toho asi polovina v českém jazyce. Chybí zde však odkazy na nejnovější zahraniční časopisecké články.

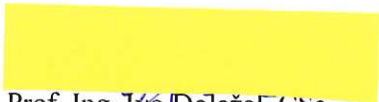
Vyjádření k publikacím studenta

Jádro práce bylo již prezentováno v anglickém jazyce na osmi konferencích indexovaných v databázi WoS, časopisecký článek však autor zatím nemá. Celkově je disertant spoluautorem čtrnácti konferenčních příspěvků a osmi výzkumných zpráv.

Jednoznačné vyjádření oponenta, zda práci doporučuje či nedoporučuje k obhajobě

Ing Václav Mužík přesvědčil, že zadané téma umí dobře zpracovat a výsledky jeho práce představují přínos pro vědeckou komunitu. Není pochyb o tom, že je schopen samostatné vědecké práce a dalšího rozvoje své osobnosti. Předloženou práci pokládám za disertabilní, doporučuji, aby byla přijata k obhajobě, a aby mu po jejím úspěšném zakončení byl udělen titul Ph.D.

V Praze dne 25. května 2019


Prof. Ing. Ivo Doležel, CSc.
Elektrotechnická fakulta ZČU Plzeň

Dotazy k práci:

1. Nakolik je vytvořený model přechodu robustní? Data získaná pro model pocházejí z roku 2014 a obecně se řada z nich může v čase měnit. Ideální by zřejmě bylo pracovat s daty trvale aktualizovanými, průběžně obnovovanými v příslušné databázi. Pokud by došlo v krátkém čase k nutnosti přechodu k ostrovnímu provozu, nebyl by na tuto přípravu čas.
2. Asi nikdy nebudou všechna potřebná data známa zcela přesně, ale s určitými nejistotami. Jakých hodnot mohou tyto nejistoty dosahovat a jak se s nimi umí model vyrovnat?
3. Došlo by k nějakým principiálním změnám v modelu, kdyby se mezi zátěží vyskytly mohutné nelineární spotřebiče (indukční pece apod.)?

POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Oponent: **doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav elektroenergetiky

Autor: **Ing. Václav Mužík**

Název: **„Optimalizace výroby a spotřeby elektrické energie v režimu ostrovního provozu“**

Předložená disertační práce Ing. Václava Mužíka je zaměřena na problematiku energetické bilance systému po přechodu do ostrovního provozu (dále OP). V teoretické části práce (kap. 3 a 4) autor nejprve vymezuje pojem OP z hlediska různých předpisů (Kodex PS, PPDS, Vyhl. č. 80/2010 Sb.), následně představuje problematiku stability a řízení ES a nakonec uvádí simulační modely jednotlivých součástí ES. Následuje praktická část práce (kap. 5), kdy autor specifikuje použitá data a provádí praktické posouzení možností přechodu města Plzeň do OP vč. zhodnocení.

Úvod práce působí v některých částech zmateně; autor hovoří o různých OP, ačkoliv práce se nadále věnuje jednomu dosti specifickému případu. Mezi tzv. off-grid systémy a OP velkého města je výrazný rozdíl. Rešerše požadavků na OP v kapitole 3 je provedena vhodně, nicméně většinu kapitoly tvoří přepis legislativy, který by měl tudíž být vložen jako přímá citace.

Kapitola 4 o stabilitě a provozu je pojata velice široce, autor na začátku kapitoly hovoří o obecně známých věcech ohledně rozdělení stability, přechodných dějů a výkonové bilanci. Většina věcí je patrně převzata z publikace [3]. Lze tak usoudit na základě komentářů k rozdělení stability v 4.1.4; tato podkapitola je nevhodně umístěna až za výklad o jednotlivých druzích stability. Jelikož autor v práci dále pracuje s frekvenční stabilitou, považuji za nadbytečné detailně popisovat úhlovou stabilitu. V popisu jsou navíc nepřesnosti. Naopak vysvětlení pojmu napětíová stabilita je velmi stručné a zasloužilo by si delší komentář. Z textu není zřejmé, že frekvenční charakteristiky zatížení obecně nejsou lineární, ale pro zjednodušení se v okolí jmenovité frekvence sítě linearizují (viz Obrázek 4.16). Jednotlivé stupně frekvenční regulace by měly být podrobněji popsány. Není jasné, co vlastně autor myslí plánovaným přechodem do OP – kdy k takovému přechodu v praxi dojde. U simulačních modelů autor uvádí, že jsou úpravou stávajících modelů z programu MODES. Z textu však není zřejmé, jaké úpravy byly provedeny.

Praktická část je popsána v kapitole 5, kde autor nejprve uvádí zdroje použitých dat (r. 2014), řeší jejich zpracování a následnou analýzu. Ačkoliv se autor v kapitole 4 prakticky distancoval od pojmu dynamická stabilita, zde jej v textu používá. Popis jednotlivých oblastí je čtenáři bez geografické znalosti Plzně nicneříkající, bylo by vhodné uvést alespoň přehledovou mapku nebo schéma s respektováním geografického rozložení. V kapitole 5.6 je použitý pojem ostrov zavádějící – nejedná se totiž o stav, kdy by jednotlivé oblasti skutečně pracovaly v OP. RoCoF se do češtiny překládá jako míra změny frekvence, někdy také jen df/dt . Není zřejmé, z jakého zdroje autor převzal spojení „derivační měření“. Autor v závěru kapitoly 5 hodnotí jednotlivé OP, pro přehlednější srovnání by bylo vhodné shrnout výsledky v tabulce.

V závěru práce je provedeno shrnutí a jsou identifikovány další možné směry navazujícího výzkumu. S těmito lze souhlasit.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Disertační práce je zaměřena na analýzu možností provozu města, resp. jeho částí v ostrovním režimu. Práce přináší návrh způsobu hodnocení možností udržení napájení města či jeho částí při

výpadku např. systémové rozvodny přenosové soustavy. Toto je velmi důležité z pohledu bezpečnosti kritické infrastruktury, kterou distribuční soustava ve městě je.

Z toho důvodu považuji téma práce za **vysoce aktuální a současně velmi dobře využitelné v elektroenergetické praxi.**

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

Autor při řešení práce postupoval standardním způsobem. Nejprve se seznámil s řešenou problematikou a shrnul základní znalosti a informace potřebné ke splnění cílů práce. Následně zpracoval a analyzoval data a pro vybrané stavy soustavy pomocí simulace provedl zhodnocení pravděpodobné úspěšnosti přechodu oblastí do ostrovního režimu.

Použitý postup řešení problému považuji za správný. Navržený postup se jeví jako využitelný jak v dalším výzkumu, tak i v praxi.

Cíle práce jsou definovány v kapitole 2.4; nutno říct, že některé formulace jsou poměrně nevhodné. „Zúžení problematiky jen na OP velikosti města“ bylo splněno, autor se v práci žádným větším systémem nezabýval (jde spíše o zaměření než o cíl práce). Aplikování teoretických poznatků na detailní model bylo provedeno. Konfrontace prvních tří cílů s limity v práci provedena byla – autor u jednotlivých OP popsal omezení u bloků i u spotřeby. Splnění posledního cíle práce, tedy posoudit aplikovatelnost na případ jiného města, je diskutabilní. Autor uvádí pouze obecné formulace, že uvedený postup použít lze, navíc jako součást kapitoly Směr dalšího zkoumání. Z práce však vyplývá, že každé město je specifické a byť obecné postupy použité v této práci využít lze, vyžaduje řešení vždy podrobnou analýzu místních podmínek.

Konstatuji, že **cíle práce byly splněny.**

Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Autor v práci zpracoval základní legislativu k problematice ostrovního provozu a základní poznatky k hodnocení stability soustavy s využitím výpočetních modelů. V této části se zaměřil na ověřené existující modely, které v poslední části práce využil k hodnocení úspěšnosti přechodu čtyřech částí elektrické sítě města Plzeň do ostrovního režimu. Pro vlastní vyhodnocení navrhl postup, který lze považovat za aplikovatelný i v dalších sítích/městech.

Za původní přínos autora považuji zejména návrh metodiky hodnocení možnosti provozu sítě v ostrovním režimu aplikovatelné na kritickou infrastrukturu a využitelné pro bezpečnostní analýzy.

Připomínky

Název práce nekoresponduje s obsahem – není zřejmé, že by bylo během řešení něco optimalizováno. Úroveň práce značně snižuje řada formálních chyb, které by se u tohoto typu práce již neměly vyskytnout. Zejména v prvních čtyřech kapitolách se často vyskytuje řada vět, kde není dodržena shoda přísudku s podmětem nebo kde sloveso zcela chybí. To pak často komplikuje porozumění textu. V práci se občas objevují překlepy, některé formulace nejsou vhodně zvoleny.

Anglický abstrakt není přesným překladem, mimo to obsahuje několik chyb. Seznam zkratk není úplný, seznam veličin by bylo vhodnější uvést samostatně. Oba seznamy by měly být řazeny abecedně. Jednotky se vždy píší stojatě, nikoliv kurzívou, mezi hodnotou a jednotkou je mezera (u procent vynechání mezery mění význam na procentní). Seznam citací nedrží žádný jednotný formát, bylo by vhodné citovat v souladu s ISO 690. U disertační práce bych očekával více použitých pramenů (provedení důkladnější rešerše).

Větší pozornost měla být věnována také formátování textu a obrázků. Např. jednopísmenné předložky patří na nový řádek, české uvozovky mají být ve tvaru 9966. Grafu na Obrázku 5.12 zcela chybí popisy os, text na Obrázcích 2.1 a 4.16 je prakticky nečitelný.

Dotazy

- Bylo analyzováno zapojení sítě 110 kV (případně i důležitých částí sítě 22 kV) z pohledu možností rekonfigurace zapojení, které by mohlo přispět k vyšší úspěšnosti přechodu jednotlivých částí systému do ostrovního provozu?

Závěr

Konstatuji, že **práce splnila zadaný cíl a obsahuje původní části s přínosem pro praxi.** Disertační práce je zpracována na **přijatelné jazykové úrovni s dobrou grafickou úpravou a stylizována formou umožňující také pedagogické využití práce.** Uvedené připomínky jsou převážně formálního charakteru.

V seznamu vlastních publikací je uvedeno 14 záznamů, z toho 11 článků ve sbornících mezinárodních konferencí a tři články ve sbornících národních konferencí. Na WoS je ke dni zpracování posudku evidováno 8 záznamů, h-index 1.

Jádro disertační práce bylo dostatečně publikováno. Celkově považuji publikační činnost autora za mírně nadprůměrnou, drobným nedostatkem je absence časopisecké publikace.

Předložená disertační práce dokládá autorovy teoretické znalosti a schopnost aktivně využívat vědecké metody práce pro konkrétní řešení velmi aktuální technické problematiky.

Disertační práce splňuje požadavky kladené na doktorské disertační práce, a proto ji v souladu s §47 zákona č.111/1998 Sb. **doporučuji** k obhajobě před komisí pro doktorské disertační práce.

V Brně dne 30.8.2019

.....
podpis oponenta