

## OPONENTSKÝ POSUDOK

dizertačnej práce

### *„Regulace frekvence a napětí v ostrovních mikrosítích s fotovoltaickými systémy“*

Autor práce: Ing. Lenka Raková

Školiteľ: doc. Ing. Emil Dvorský, CSc.

Predložený posudok bol vypracovaný na základe žiadosti dekana Fakulty elektrotechnickej ZČU v Plzni zo dňa 19.9.2016.

#### 1. Zhodnotenie významu dizertačnej práce pre odbor Elektroenergetika

Rozvoj elektrizačnej sústavy hlavne z hľadiska pripájania decentralizovaných zdrojov do distribučnej sústavy prináša mnoho problémov pre prevádzku sústavy. Ťažko predikovatelné chovanie fotovoltaických a veterných systémov spôsobuje nepriaznivé vplyvy na kvalitu a spoľahlivosť dodanej elektrickej energie. Predložená dizertačná práca sa zaoberá reguláciou frekvencie a napätia v ostrovných mikrosieťach s fotovoltaickými systémami. Z tohto dôvodu považujem zvolenú tému dizertačnej práce za vysoko aktuálnu s veľkým významom v súčasnosti aj v budúcnosti pre odbor Elektroenergetika.

#### 2. Hodnotenie postupu riešenia, použitých metód a splnenie cieľov dizertačnej práce

Zvolený postup riešenia zadaného problému v dizertačnej práci považujem za správny. Práca obsahuje 186 strán, čo ďaleko presahuje rozsah štandardu takýchto prác. Práca je rozdelená do 12 kapitol. Úvodné kapitoly sú venované popisu súčasného stavu problematiky v Českej republike ako aj definovaniu cieľov dizertačnej práce a pracovných hypotéz. Ďalej sa autorka venuje popisu charakteristík mikrosietí, striedačov ako aj teórii regulácie frekvencií a napätia najmä z pohľadu možnosti regulácie fotovoltaických systémov. Hlavným prínosom dizertačnej práce sú kapitoly 7 až 12, ktoré sú venované matematickému modelovaniu a simulácii primárnej a sekundárnej regulácii frekvencie a napätia v konkrétnych ostrovných prevádzkach mikrosietí. Záver práce je venovaný porovnaniam zvolených metód výskumu pre riešenie zadaného problému a to konkrétne metódy virtuálnych výkonov a metódy virtuálnej frekvencie a napätia v teoretickej rovine ako aj výsledkom simulácie v programe MATLAB. Na základe zhodnotenia výsledkov simulácie v kapitole 11 bola navrhnutá úprava regulačného obvodu striedača určeného pre decentralizované zdroje, ktoré spolupracujú v ostrovných mikrosietiach. Celkový postup zadaného problému v dizertačnej práci ako aj zvolené metódy sú správne. Práca vychádza zo známych teoretických poznatkov zadaného problému a pokračuje v riešení zadaných cieľov dizertačnej práce a pracovných hypotéz. Dosiahnuté výsledky práce potvrdzujú správnosť postupov a zvolených metód pre dosiahnutie zadaných cieľov.

### 3. Stanovisko k výsledkom dizertačnej práce

Dizertačná práca obsahuje pôvodné výsledky riešenia v teoretickej aj praktickej rovine. Za teoretické môžeme považovať:

- Zjednodušenie metódy virtuálnej frekvencie a napätia a odvodenie vzťahov pre vymedzenie pracovnej oblasti.
- Návrh obvodov sekundárnej regulácie pre využitie virtuálnej metódy a ich parametrov.
- Návrh metódy umožňujúcej priestorové zobrazenie statických napäťových charakteristík.

V praktickej časti riešenia dizertačnej práce za pôvodné výsledky je možné považovať:

- Overenie možnosti spolupráce pomocou simulácie v programe MATLAB pre viac fotovoltických systémov na reguláciu napätia v ostrovnej mikrosieti a analýzu simulácie primárnej a sekundárnej regulácie.
- Návrh úpravy regulačného obvodu primárnej regulácie, ktorý je možné využiť pre striedače v ostrovnej prevádzke i paralelnú spoluprácu s inými zdrojmi.

### 4. Systémovosť, prehľadnosť, úprava dizertačnej práce, publikácie

Dizertačná práca je napísaná zrozumiteľne na dobrej odbornej úrovni a dostatočne citovaná. Jednotlivé kapitoly logicky na seba nadväzujú. Textová a grafická úprava práce je na veľmi dobrej úrovni. K jazykovej časti sa neviem vyjadriť. Práca obsahuje niekoľko preklepov. Publikačnú činnosť dizertantky je možné považovať za dobrú. Jadro dizertačnej práce publikovala na konferenciách a v časopisoch (19 prameňov).

### 5. Otázky na dizertantku k riešenej problematike:

1. Ako by sa realizovala primárna a sekundárna regulácia  $f$  a  $U$  ak by v systéme boli prevádzkované aj veterné elektrárne?
2. Ako sa realizuje primárna a sekundárna regulácia  $f$  a  $U$  v distribučných sústavách obsahujúcich fotovoltické a veterné elektrárne v Európe resp. vo svete?

### 6. Záver

Záverom môžem konštatovať, že dizertačná práca Ing. Lenky Rakovej je vypracovaná na dobrej vedeckej a odbornej úrovni. Dosiahnuté výsledky v práci sú pôvodné a majú význam pre rozšírenie poznatkov v odbore Elektroenergetika. Svojou publikačnou činnosťou preukázala vedeckú erudovanosť. Predloženú dizertačnú prácu na základe predchádzajúceho hodnotenia

**- odporúčam -**

k obhajobe a navrhujem po jej úspešnom priebehu udeliť autorke titul Ph.D.

V Košiciach, 14.10.2016

  
Dr.h.c. prof. Ing. Michal Kolcun, PhD.  
oponent

## Oponentský posudek doktorské disertační práce

Autor: Ing. Lenka Raková  
Školící pracoviště: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická  
Téma: Regulace frekvence a napětí v ostrovních mikrosítích s fotovoltaickými systémy  
Oponent: RNDr. Bohumil Sadecký, CSc.  
ČEPS, a.s.

### Zhodnocení významu práce pro obor:

Přínosem práce pro vědní obor „Elektroenergetika“ je získání významných poznatků o možnostech a způsobech regulace napětí a frekvence v ostrovní mikrosítí napájené fotovoltaickými zdroji s akumulací a návrh regulačních obvodů napěťového střídače s využitím inovované metody virtuální frekvence a napětí. Inovovaná metoda byla ověřena simulací na modelu v prostředí Matlab Simulink, vytvořeném v rámci disertační práce.

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

Zvolený metodický postup odpovídá požadavkům na vědeckou práci. Autorka použila vědeckou metodu zkoumání, formulovala šest hypotéz a postupně ověřila jejich platnost. Postupovala od teoretických principů primární a sekundární regulace  $U$  a  $f$ , vytvoření matematického modelu regulačního obvodu střídače FVE a provedla simulaci různých variant primární a sekundární regulace na modelu s využitím metod virtuálních výkonů a virtuální frekvence a napětí. Následovala analýza a porovnání výsledků modelování včetně posouzení jejich shody s teoretickými předpoklady. Tuto fázi vědecké práce zakončila určením směrů dalšího výzkumu v oblasti regulace  $f$  a  $U$  v mikrosítích.

Hlavním cílem práce bylo posoudit možnost využití FVE s akumulací pro primární a sekundární regulaci  $f$  a  $U$  v ostrovní mikrosítí, a to pomocí zjednodušené metody virtuální frekvence a napětí a navrhnout příslušný regulační obvod střídače s bloky primární a sekundární regulace. Stanoveného cíle bylo v předložené práci dosaženo, regulační procesy byly ověřeny na modelu v prostředí Matlab Simulink.

Kapitoly 2 - 4 představují úvodní popisnou část práce, shrnující problematiku FVE, mikrosítí nízkého napětí, funkce a vlastnosti střídačů. V kapitole 5 jsou vysvětleny principy primární a sekundární regulace  $f$  a  $U$  v různých typech sítí lišících se impedančními poměry. Jsou popsány virtuální metody regulace pro sítě, kde nelze zanedbat ani jednu ze složek impedance. Těmito metodami se práce dále podrobně zabývá. Kapitola 6 pojednává o možnostech regulace výroby FVE.

Kapitoly 7 - 11 jsou jádrem disertační práce. Je v nich popsán matematický model regulačního obvodu střídače, zjednodušená metoda virtuální frekvence a napětí, model jednoduché mikrosítě s jednou FVE v prostředí Matlab Simulink, výsledky simulace procesů primární a sekundární regulace na tomto modelu v různých stavech zatížení mikrosítě, porovnány výsledky metody virtuálních výkonů s metodou virtuální frekvence a napětí a učiněny závěry k jejich použitelnosti v různých podmínkách. Ověření funkcí regulačních obvodů bylo pak rozšířeno ještě simulacemi na modelu se dvěma systémy FVE a navržena úprava i pro případ paralelní spolupráce FVE se synchronním generátorem v mikrosítí.

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

Za hlavní původní přínos práce pro praktické obory elektroenergetiky považují inovaci metody virtuální frekvence a napětí pro regulaci  $f$  a  $U$  v mikrosítí, návrh příslušného regulačního obvodu a zhodnocení možností využití fotovoltaických systémů pro regulaci v ostrovní mikrosítí. V provedeném výzkumu je možno dále pokračovat, jak je naznačeno v kapitole 12. 2., včetně sestavení a ověření prototypu regulačního obvodu v laboratorních podmínkách a případného ověření virtuálních metod v praxi.

### **Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce:**

Práce má celkem 186 stran včetně přehledu literatury a příloh. Je rozdělena na 12 kapitol a systematicky postupuje od analýzy problému až k závěrům ze simulací na vytvořeném modelu. Práce je sestavena přehledně s velmi dobrou formální úpravou a jazykovou úrovní. Několik nepřesností nebo překlepů nijak nesnižuje úroveň práce:

- Seznam zkratk neobsahuje zkratku IGBT
- Str. 16, první odstavec, ... „frekvence lokálním parametrem a napětí parametrem globálním“ – zřejmě míněno naopak, na str. 28 je to už správně
- Str. 100, druhý odstavec, překlep „Z průběhu v Grafu 16...“, jde zřejmě o Graf 21
- Str. 105, druhý odstavec, překlep „... v kapitole 7.2.3“, jde zřejmě o kapitolu 7.2.2
- Str. 109, překlep v titulku Graf 36, jedná se o SR, nikoliv PR
- 

### **Vyjádření k publikacím předkladatele disertační práce:**

V přehledu vlastních publikací autorka uvádí celkem 19 položek, z toho 8 příspěvků na mezinárodních konferencích a symposiích. Úroveň publikační činnosti v rámci doktorského studia prokazují kvalitu vědecké práce autorky.

### **Dotazy na autorku práce:**

1. Je známo, jaký podíl FVE v ČR je vybaven hybridním regulátorem (regulačním obvodem napětového střídače), který umožňuje přejít od režimu sledování bodu maximálního výkonu FVE do režimu umožňujícího regulaci U a f v ostrovním provozu?
2. Jakým způsobem by mohla být při sekundární regulaci v mikrosíti realizována koordinace většího počtu regulovaných zdrojů. Je k tomu potřeba centrální regulační člen?

### **Závěrečné hodnocení:**

Podle mého soudu práce splnila stanovené cíle, obsahuje řadu nových poznatků a je přínosem pro vědní obor elektroenergetiky i pro praxi. Doktorandka prokázala osvojení vědeckých metod práce, schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce v dané oblasti a schopnost aplikovat výsledky v praxi. Disertační práce splňuje obecně uznávané požadavky na úroveň doktorských disertačních prací. Z výše uvedených důvodů doktorskou disertační práci

**d o p o r u č u j i k o b h a j o b ě .**



RNDr. Bohumil Šadecký, CSc.  
ČEPS, a.s.  
Elektrárenská 774/2  
101 52 Praha 10

V Praze, 5.10 2016

# POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

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

Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav elektroenergetiky

Autor: **Ing. Lenka Raková**

Název: **„Regulace frekvence a napětí v ostrovních mikrosítích**

**s fotovoltaickými systémy“**

---

Předložená disertační práce Ing. Lenky Rakové je zaměřena na problematiku řízení frekvence a napětí v elektrizační soustavě, zejména na možnosti využití fotovoltaických elektráren s akumulací pro primární a sekundární regulaci frekvence a napětí.

V úvodní části práce je představeno téma práce, uvedena stručná informace o současném stavu, jsou vydefinovány cíle práce, nastíněny pracovní hypotézy a dále jsou zde shrnuty vědecké metody, které byly použity při řešení práce.

V kapitolách 2 až 6 jsou podrobněji představeny jednotlivé části ES a procesy, kterých se práce týká. V kapitole 7 se již autorka věnuje matematickým modelům regulačního obvodu, nejprve obecně a poté modelu primární regulace s využitím metody virtuálních výkonů, metody virtuální frekvence a napětí a metody virtuální impedance, přičemž u druhé jmenované navrhuje určité zjednodušení. V kapitole 8 jsou popsány provedené simulace a analyzovány výsledky simulací. V kapitole 9 jsou podrobně porovnány zkoumané metody jak po stránce teoretické, tak z pohledu výsledků realizovaných simulací.

V kapitole 10 je zpracován modelový příklad mikrosítě s topologií vedení napájeného ze dvou stran se dvěma odběry a pak vedení napájeného z jedné strany s více odběry, přičemž je řešeno, jakým způsobem se zatížení rozdělí mezi uvažované zdroje.

V kapitole 11 je na základě výsledků simulací a porovnání virtuálních metod zpracován návrh úpravy regulačního obvodu střídače určeného pro decentrální zdroje.

V závěru práce je provedeno zhodnocení dosažených výsledků. Poslední část práce tvoří seznam literatury doplněný o vlastní publikace autora a přílohy.

## ***Zhodnocení významu disertační práce pro obor***

Disertační práce je zaměřena na analýzu možností využití fotovoltaických elektráren s akumulací pro primární a sekundární regulaci frekvence a napětí v ostrovních mikrosítích.

V současné době s rozvojem zdrojů rozptýlené výroby jsou stále více diskutovány nové koncepce provozu elektrických sítí předpokládající omezení současného využití distribuční soustavy na roli zálohy napájení v případě problémů s bilancí výroby elektrické energie. Standardní provoz je předpokládán jako provoz buď úplně ostrovního systému, nebo systému připojeného, vždy však s vyrovnanou energetickou bilancí. V ostrovním systému musí zdroje zajistit řízení napětí a frekvence, které v současné době zajišťují velké systémové zdroje.

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***

Autorka při řešení práce postupovala standardním způsobem. Nejprve se seznámila s řešenou problematikou a shrnula základní znalosti potřebné ke splnění cílů práce. Na základě teoretických poznatků navrhla a sestavila matematické modely jednotlivých částí regulačního obvodu střídače.

Navržené modely následně ověřila simulacemi v prostředí Matlab Simulink. Funkčnost navržených bloků primární a sekundární regulace byla testována v rámci malé ostrovní sítě. Na základě výsledků simulací byl proveden návrh úpravy regulačního obvodu střídače.

**Použitý postup řešení problému považuji za správný. Navržené modely vykazují dobré výsledky a jeví se jako využitelné jak v dalším výzkumu, tak i v praxi.**

Cíle práce definované v kapitole 1.2 zahrnují posouzení možností využití FVE s akumulací pro primární a sekundární regulaci, zjednodušení metody virtuální frekvence a napětí a zhodnocení aplikovatelnosti principu regulace frekvence a napětí podle statických charakteristik.

**Cíle práce byly splněny.**

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

Autorka v práci provedla zhodnocení vhodnosti využití FVE s akumulací pro regulaci frekvence a napětí v ostrovní mikrosíti, navrhla zjednodušení metody virtuální frekvence a napětí včetně vymezení pracovní oblasti, navrhla obvod sekundární regulace pro dvě virtuální metody včetně zhodnocení vlivu hodnoty časové konstanty regulace, navrhla metodu umožňující prostorové zobrazení statických napěťových charakteristik zdrojů pro různé impedanční poměry v síti, ověřila navržené metody pomocí simulací a navrhla úpravu regulačního obvodu střídače. Navržené modely vykazují dobré výsledky a lze předpokládat jejich využití pro další výzkum.

Za původní přínos autorky lze považovat zejména návrh zjednodušení metody virtuální frekvence a napětí, návrh obvodu sekundární regulace pro dvě řešené virtuální metody a návrh úpravy regulačního obvodu primární regulace pro střídače.

#### ***K práci mám následující připomínky:***

- práce obsahuje překlepy a gramatické chyby; kvalita některých obrázků je podprůměrná,
- str. 16, odstavec 1 – tvrzení „Z pohledu řízení celé ES a regulace toků výkonů je frekvence lokálním parametrem a napětí globálním“ je zavádějící,
- str. 25, Tabulka 3 – v tabulce je provedeno rozdělení instalovaného výkonu FVE dle provozovatelů sítě a napěťových hladin. V tabulce nesouhlasí součet,
- str. 37, obrázek 15 – pro vysvětlení chování sítě bez primární regulace by bylo vhodnější zakreslit v obrázku přímo charakteristiku zdroje bez regulace,
- str. 40, odstavec 1 – tvrzení autorky: „...na hladině nn, kde je reaktance zanedbatelná...“ je zavádějící,
- str. 50, odstavec 1 – tvrzení:“ V současné době se v České republice u FVE při výskytu přepětí v síti předpokládá regulace prostřednictvím snižování činného výkonu (100, 60, 30 a 0%  $P_i$ )...“ je zavádějící,
- str. 69 – rovnice 7.35 nekoresponduje s rovnicemi 7.36-7.38.

#### ***K práci mám následující dotazy:***

- Str. 78 – v textu je uvedeno, že pro práci je vybrána varianta s akumulacním zařízením, kdy je v sérii zapojena FVE, akumulacní zařízení a střídač s odvoláním na použití podobných schémat v odborných člancích. Jakým způsobem uvedená sériová kombinace pracuje?
- Str. 87, Graf 3 uvádí závislost frekvence na čase. Jakým způsobem bylo měření frekvence zpracováno (vyhodnoceno – ve vztahu k výpočetnímu kroku, délce periody, atp...)?

Konstatuji, že **práce splnila zadaný cíl a obsahuje původní části s přínosem pro praxi.** Disertační práce je zpracována na **velmi dobré jazykové úrovni s velmi dobrou grafickou**

**úpravou a stylizována formou umožňující pedagogické využití práce.** Uvedené připomínky jsou převážně formálního charakteru.

V seznamu vlastních publikací je uvedeno 19 záznamů, z toho 14 článků na národních a mezinárodních konferencích a dva články v časopisech. Na WoS je ke dni zpracování posudku evidováno 5 záznamů.

**Jádro disertační práce bylo dostatečně publikováno. Celkově považuji publikační činnost autorky za nadprůměrnou.**

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

Disertační práce plně 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 16.1.2017



.....  
*podpis oponenta*