

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Michal Grega

Autoreferát dizertačnej práce

OSCILÁCIE V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE -

DETEKCIA, ANALÝZA A HODNOTENIE

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: Elektroenergetika

v študijnom odbore

Elektrotechnika

Miesto a dátum: Bratislava, 16.6.2021

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Michal Grega

Autoreferát dizertačnej práce

OSCILÁCIE V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE -

DETEKCIA, ANALÝZA A HODNOTENIE

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 16.6.2021

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia

Na	Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky Fakulta elektrotechniky a informatiky Slovenská technická univerzita v Bratislave			
Predkladateľ:	Ing. Michal Grega Slovenská technická univerzita v Bratislave Fakulta elektrotechniky a informatiky Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava			
Školiteľ:	doc. Ing. Žaneta Eleschová, PhD. Slovenská technická univerzita v Bratislave Fakulta elektrotechniky a informatiky Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava			
Oponenti:	prof. Ing. Petr Toman, Ph.D. Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií Ústav elektroenergetiky Technická 3082/12, Královo Pole, 61600, Brno, Česká republika			
	Ing. Peter Szathmáry, PhD. Spoločnosť: Peter Szathmáry – PSS Hlavná 12/25, 076 12 Kuzmice			
Autoreferát bol 1	ozoslaný:			
Obhajoba dizerta	ačnej práce sa koná: hod			
Na	Fakulta elektrotechniky a informatiky Slovenská technická univerzita v Bratislave Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava 1			

.....

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec dekan fakulty

Obsah

Obsah3
Úvod4
Ciele práce
Tézy dizertačnej práce
1 Synchrónne fázory a ich meranie7
1.1 Fázorový WAMS7
1.1 Implementácia WAMS v slovenskej prenosovej sústave7
1.2 PhasorPoint Workbench
2 Oscilačné udalosti v prepojenej sústave10
2.1 Analýza oscilačnej udalosti z 1. decembra 2016 systémom WAMS10
3 Návrh metodiky, definovanie parametrov oscilácii a nastavenie alarmov17
3.1 Popis vstupných dát17
3.2 Návrh metodiky na spracovanie údajov a definovanie prahových hodnôt pre
výstrahy a alarmy17
3.3 Definovanie prahových hodnôt oscilácií pre výstrahy a alarmy22
4 Verifikácia navrhnutej metodiky s modelovanými stavmi na dynamickom modeli
ES25
4.1 Prípad č.1
4.2 Prípad č.3
5 Záver
Zoznam použitej literatúry
Publikácie
Publikácie k téme

Úvod

S narastajúcou veľkosťou prepojených prenosových sústav narastajú problémy v spojitosti s osciláciami v sústave, ktoré majú nielen veľký vplyv na stabilitu prevádzky, ale môžu mať ťažké následky v podobe rozpadu sústavy na niekoľko ostrovov. Wide Area Monitoring System (WAMS) poskytuje informácie o prítomných módoch oscilácií v sústave a môže generovať rôzne nastavené alarmy. Pri tejto aplikácii je zjavná výhoda merania fázorov, pretože dispečer má k dispozíciií okrem frekvencie, amplitúdy a času útlmu oscilácie aj relatívnu fázu oscilácie, podľa ktorej je možné identifikovať proti sebe oscilujúce jednotlivé generátory alebo skupiny generátorov. Vhodným nastavením alarmov a kombináciou zobrazovaných údajov môže byť dispečer v okamihu informovaný o závažnosti oscilácií v sústave, o ktorých zvyčajne ani nevie.

Príkladom je medzi-oblastná oscilácia zaznamenaná 1.12.2016, ktorá siahala od Portugalska až po Turecko a ktorá mala potenciál rozdeliť sústavu kontinentálnej Európy na ostrovy. Oscilácia bola iniciovaná poruchovým vypnutím hraničného vedenia medzi Španielskom a Francúzskom. Španielski dispečeri identifikovali prítomnú osciláciu až tým, že zaťaženie jedného z 220 kV vedení oscilovalo nad a pod jeho prenosovú kapacitu. Po tomto zistení vykonali kroky, ktoré v konečnom dôsledku viedli k utlmeniu oscilácie. Ak by dispečeri mali k dispozícii vhodne nastavené alarmy a informácie zo systému WAMS, mohli by potrebné kroky vykonať skôr.

Táto práca sa zaoberá analýzou zaznamenaných oscilácií v sústave, definovaním ich parametrov a návrhom metodiky pre stanovenie a nastavenie prahových hodnôt varovaní a alarmov oscilácií.

Ciele práce

Cieľom práce je teoretické zhrnutie fázorového systému WAMS a problematiky oscilačnej stability v rozsiahlej prepojenej prenosovej sústave, na základe ktorého sú ďalej vyselektované závažné oscilačné udalosti z reálnej prevádzky. O týchto udalostiach združenie ENTSO-E vydáva oficiálne správy, voči ktorým sú porovnávané dáta zaznamenané a vypočítané systémom WAMS implementovaným v podmienkach prevádzkovateľa prenosovej sústavy na území Slovenska.

Porovnaním výsledkov systému WAMS so správami z oscilačných udalostí sú určené vlastnosti jednotlivých algoritmov pre analýzu oscilačnej stability a je potvrdená spoľahlivosť ich výsledkov. Zároveň je stanovená referencia závažnosti oscilácií.

Analýzou výstupných dát systému WAMS sú stanovené parametre jednotlivých oscilácií ako začiatok a koniec oscilácie jej závažnosť a pod. Na ich základe je potom navrhnutá metodika na stanovenie frekvenčných pásiem oscilačných módov a definovanie prahových hodnôt výstrah a alarmov tak, aby spustené výstrahy, či alarmy mali čo najväčšiu výpovednú hodnotu pre dispečerov prevádzkovateľa prenosovej sústavy.

Navrhnutá metodika je verifikovaná simuláciou rozruchov v sústave na dynamickom modeli.

Na naplnenie týchto cieľov sú stanovené nasledujúce tézy dizertačnej práce:

Tézy dizertačnej práce

- 1. Analýza udalostí v európskej elektrizačnej sústave z pohľadu zaznamenaných oscilácií systémom WAMS.
- 2. Definovanie parametrov oscilácií (frekvencia, amplitúda, útlm, čas trvania) pre filter zaznamenávania a spracovania udalostí v ES.
- 3. Návrh metodiky pre hodnotenie oscilácií v ES.
- 4. Stanovenie prahových hodnôt pre systém hodnotenia ES SR z pohľadu oscilácií, definovanie stavov ES SR a nastavenia alarmov.

1 Synchrónne fázory a ich meranie

1.1 Fázorový WAMS

Fázorový WAMS (Wide Area Monitoring System) je sieť synchronizovaných meraní napäťových a prúdových fázorov (synchrofázorov), ktorá umožňuje užívateľom monitorovať uhlovú stabilitu a dynamiku elektrizačnej sústavy. Uplatnenie nachádza najmä v prenosových sústavách, kde sa v čoraz väčšej miere využíva pre operatívne riadenie (napr. pre kontrolu využitia prenosovej kapacity vedení), sledovanie stability a kývania sústavy a pre včasnú výstrahu, ale aj pre plošné monitorovanie a vizualizáciu stavu siete v reálnom čase, či off-line analýzu udalostí. V distribučných sústavách sa WAMS taktiež využíva, a to napr. pri riadení distribuovaných zdrojov energie.

WAMS poskytuje niekoľko možností využitia, ktoré neposkytuje žiadny iný systém alebo má oproti iným systémom výhodu v danej aplikácii. Medzi hlavné využitie WAMS aplikačných nástrojov prevádzkovateľmi prenosových sústav kontinentálnej Európy patrí najmä nasledovné:

- Zaznamenávanie prechodných javov
- Monitorovanie teploty vedení
- Monitorovanie napäťovej stability
- Vyhodnocovanie oscilácií činného výkonu
- Nástroj na obnovu elektrizačnej sústavy
- Monitorovacie a informačné nástroje
- Online výpočet skratového výkonu

1.2 Implementácia WAMS v slovenskej prenosovej sústave

V rokoch 2011 až 2015 boli v regulačnej oblasti Slovenska PMU jednotkami postupne vybavené všetky hraničné vedenia a štyri vnútorné vedenia z obidvoch strán:

- V440 ESt Veľké Kapušany (UA),
- V448 ESt VE Gabčíkovo (HU),
- V449 ESt Levice (HU),
- V477, V478 ESt Lemešany (PL),
- V404 ESt Varín (CZ),

- V424 ESt Križovany (CZ),
- V497 ESt Stupava (CZ),
- o V270 ESt Považská Bystrica (CZ),
- V280 ESt Senica (CZ).
- o V427 ESt Rimavská Sobota, ESt Moldava,
- o V492 ESt Veľký Ďur, ESt Horná Ždaňa,
- o V407 ESt Liptovská Mara, ESt Spišská Nová Ves,
- V439 ESt Podunajské Biskupice, ESt Križovany.

V rámci projektu implementácie WAMS v prenosovej sústave Slovenska bolo celkovo nainštalovaných 18 PMU.



Obr. 1 Vedenia prenosovej sústavy Slovenska vybavené PMU v roku 2015

1.3 PhasorPoint Workbench

WAMS potrebuje okrem hardvéru aj softvérové vybavenie pre spracovanie a vizualizáciu dát koncovému užívateľovi. Vzhľadom na množstvo a komplexnosť dát generovaných PMU poskytnutie zrozumiteľnej informácie užívateľovi nie je jednoduchá úloha. Väčšinou sa preto využíva grafická vizualizácia s pomocou geografických máp sústavy a diagramov. Ako softvérové riešenie si PPS na Slovensku vybral Phasorpoint Workbench od spoločnosti General Electrics.

Pre online riadenie PhasorPoint poskytuje:

- Manažment oscilácií
- Manažment ostrovnej prevádzky
- Manažment porúch
- Uhlové obmedzenia
- Stav sústavy

Pre analýzu historických dát PhasorPoint poskytuje:

- ex-post analýzu udalostí,
- návrh riadenia a testovanie,
- zhodnotenie rizika nestability,
- analýza pripojiteľnosti obnoviteľných zdrojov elektriny,
- podporu dispečera.

Ako jediný systém implementovaný v podmienkach PPS na území Slovenska je PhasorPoint schopný poskytnúť analýzu oscilácií v sústave. Oscilácie sú sledované v kvázi reálnom čase, pretože dáta, z ktorých sú počítané, musia byť po nejaký čas dostupné. PhasorPoint pre tento účel používa dva rôzne algoritmy s názvom PDX1-3 a PDX2-n. PDX1-3 poskytuje rýchlejšiu, ale viac aproximovanú informáciu, pretože oscilácie vypočítava z dát prijatých za posledné tri minúty. Informácia o oscilácii môže byť v určitých prípadoch dostupná až tri minúty po jej vzniku, čo vysvetľuje pojem kvázi reálny čas. Výsledky výpočtov sú obnovované každých 5 sekúnd. Kvôli presnejšiemu výpočtu vlastností oscilácie je použitý algoritmus PDX2-n. Je podobný algoritmu PDX1-3 s rozdielom použitia dát za posledných *n* minút. Hodnota premennej *n* môže byť zvolená v rozsahu 20 – 180 minút. V súčasnosti má PPS systém nastavený na 20 minút. Výsledky algoritmu sú obnovované každých 20 sekúnd.

Jednou z najdôležitejších funkcionalít z pohľadu operatívneho riadenia sústavy je generovanie výstrah a alarmov. V súčasnosti sú prahové ich hodnoty nastavené tak, že len za rok 2019 systém vygeneroval 487 upozornení, z toho 282 alarmov. V takomto množstve upozornenia pre dispečera nemajú žiadnu výpovednú hodnotu, preto je nevyhnutné definovať prahové hodnoty tak, aby bol upozornení len v nevyhnutných prípadoch.

2 Oscilačné udalosti v prepojenej sústave

V tak rozsiahlej prepojenej sústave akou je elektrizačná sústava kontinentálnej Európy, sú oscilácie viac-menej prirodzeným javom. V prípade detekcie značnej oscilačnej udalosti v sústave, ENTSO-E vydá správu z jej analýzy, ktorá je verejne dostupná. Od roku 2011 boli vydané správy z troch oscilačných udalostí:

- 19.2.2011 o 8:00,
- 1.12.2016 o 11:18,
- 3.12.2017 o 1:09.

Všetky spomenuté oscilácie predstavovali riziko pre stabilitu prevádzky elektrizačnej sústavy. V čase prvej udalosti ešte nebol systém WAMS v podmienkach prevádzkovateľa prenosovej sústavy na území Slovenska implementovaný, preto z neho nebolo možné získať dáta o oscilácii. Systém bol finalizovaný v roku 2014, a teda ďalšie dve oscilácie boli systémom zaznamenané.

2.1 Analýza oscilačnej udalosti z 1. decembra 2016 systémom WAMS

2.1.1 Frekvencia oscilácie

Dáta exportované zo systému WAMS obsahujú údaje piatich dominantných módov oscilácií prítomných v sústave. Na Obr. 2 je vykreslená frekvencia všetkých piatich dominantných módov oscilácií, so zvýrazneným módom s označením 0 (ktorý bol na základe amplitúdy a času útlmu oscilácie identifikovaný ako mód predmetnej oscilácie), ktorému prislúcha frekvencia F0, vygenerované algoritmom PDX1-3.



Obr. 2 Frekvencie dominantných módov oscilácií – výsledky PDX1-3

Pre lepšie identifikovanie frekvencie oscilácie sú výsledky PDX1-3 pre mód F0 vykreslené na Obr. 3 samostatne (spolu s časom útlmu D0 pre zvýraznenie doby trvania oscilácie). Podľa času útlmu oscilácia trvala od cca 11:18 do 11:26, kedy je frekvencia zastabilizovaná na hodnote približne 0,15 Hz.



Obr. 3 Frekvencia módu predmetnej oscilácie – PDX1-3

Výsledky algoritmu PDX2-20 sú porovnateľné s výsledkami PDX1-3, avšak s určitými rozdielmi. Odlišujú sa najmä kvôli obnovovacej frekvencii, ktorá je v prípade PDX2-20 20 s. Za rovnaký čas je preto dostupných omnoho menej údajov, graf je vyhladenejší a hodnoty sú taktiež presnejšie, pretože je analyzované dlhšie okno dát. Na Obr. 4 sú vynesené frekvencie všetkých dominantných módov oscilácií so zvýraznenou frekvenciou F0, ktorá prislúcha predmetnej oscilácii.



Obr. 4 Frekvencie dominantných módov oscilácií – výsledky PDX2-20

Na Obr. 5 je vynesená len frekvencia módu predmetnej oscilácie pre lepšie určenie jej frekvencie, spolu s časom útlmu oscilácie. Počas celej doby oscilácie je frekvencia ustálená na hodnote približne 0,15 Hz.

Podľa oficiálnej správy ENTSO-E bola frekvencia oscilácie 0,15 Hz. Výsledky zo systému WAMS zachytili osciláciu a vypočítali jej frekvenciu rovnako i. e. 0,156 Hz. Systém WAMS teda určuje frekvenciu oscilácie dostatočne presne.



Obr. 5 Frekvencia módu predmetnej oscilácie – PDX2-20

2.1.2 Amplitúda oscilácie

Ďalším parametrom oscilácií, ktorý systém WAMS vypočítava je amplitúda oscilácie. Na Obr. 6 sú vynesené amplitúdy všetkých piatich dominantných módov oscilácii vypočítaných algoritmom PDX1-3. Z grafu je možné vidieť narastanie amplitúdy A0 predmetnej oscilácie z približne 2 na maximálnu hodnotu 8,84 mHz. Pri detailnejšom pohľade na výsledky amplitúdy PDX1-3 je možné vidieť, že priradzovanie indexu módu algoritmom nie je vždy konzistentné a môže byť priradený aj iný, a preto je to potrebné brať v úvahu. V tomto prípade ide o mód A1 (viď. Obr. 7).

Na Obr. 8 sú vynesené amplitúdy piatich dominantných módov oscilácií vypočítaných algoritmom PDX2-20. V porovnaní s výsledkami PDX1-3 amplitúda nedosahuje ani polovičnú hodnotu, konkrétne 4 mHz v maxime. PDX2-20 už ale netrpí problémom nekonzistentnej identifikácie módu oscilácie a index módu je vždy priradený správne.



Obr. 6 Amplitúda dominantných módov oscilácií frekvencie dňa 1.12.2016 – výsledky PDX1-3



Obr. 7 Prelínanie módov pri analýze PDX1-3



Obr. 8 Amplitúda dominantných módov oscilácií frekvencie dňa 1.12.2016 – výsledky PDX2-20

Na základe grafov uvedených v oficiálnej správe ENTSO-E je možné potvrdiť vysokú pravdepodobnosť takejto amplitúdy tejto oscilácie v prenosovej sústave Slovenska.

2.1.3 Čas útlmu

Phasorpoint, ako WAMS systém, vypočítava pre oscilácie v sústave čas útlmu (alebo inak čas rozpadu módu), ktorý je definovaný ako čas, za ktorý obálka pulznej odozvy módu poklesne na 36,78 % (i. e. $1/e^1$) počiatočnej hodnoty. Na Obr. 9 sú vynesené časy útlmu piatich dominantných módov vypočítané PDX1-3. Aj pri výpočte tohto parametra sa prejavuje nedostatok algoritmu v podobe priradenia času útlmu nesprávnemu módu (podobne ako pri výpočte amplitúdy). Na Obr. 10 sú vynesené časy útlmu piatich dominantných módov vypočítané PDX2-20.



Obr. 9 Čas útlmu dominantných módov oscilácií v deň 1.12.2016 – výsledky PDX1-3



Obr. 10 Čas útlmu dominantných módov oscilácií v deň 1.12.2016 – výsledky PDX2-20

Správa ENTSO-E na analýzu tlmenia oscilácie využila inú metódu, konkrétne Pronyho metódu. Túto metódu však nie je možné aplikovať pre dáta získané zo systému WAMS, pretože pre ňu nie sú dostupné správne dáta.

3 Návrh metodiky, definovanie parametrov oscilácii a nastavenie alarmov

3.1 Popis vstupných dát

Parametre boli vypočítané z údajov, ktoré boli manuálne exportované zo systému PhasorPoint za obdobie od 12.10.2016 do 29.11.2019 pre obidva algoritmy PDX1-3 a PDX2-20 pre systémovú frekvenciu. Návrh metodiky využíva dáta z PMU v ESt Varín, ktoré využíva kombinovaný prístrojový transformátor vedenia V404 (Obr. 1). Navrhovaná metodika je rovnako platná pre všetky PMU v sústave.

Celkový objem dát tvorilo 34 súborov s objemom 3,533 GB, čo predstavovalo 117 420 812 údajov oscilácií.

Vzhľadom na množstvo údajov bolo nevyhnutné využiť metodiky a moderné trendy z oblasti data science a big data:

- zber dát,
- príprava a očistenie dát,
- preskúmanie a vizualizácia dát,
- analýza dát,
- a interpretácia.

3.2 Návrh metodiky na spracovanie údajov a definovanie prahových hodnôt pre výstrahy a alarmy

3.2.1 Spracovanie dát

Vzhľadom na to, že oscilácia a tiež PDX analýzy sú procesy chronologické, nebolo možné úlohu dostatočne vektorizovať, preto bolo potrebné údaje čítať po riadkoch a v nich vyhodnocovať parametre piatich oscilácií.

Z pohľadu prevádzky sústavy je dôležité vyselektovať slabo tlmené, resp. netlmené oscilácie. Tlmené oscilácie, ktoré v sústave vznikajú pomerne často a zanikajú za krátky čas, je možné zanedbať, pretože nepredstavujú riziko pre stabilitu sústavy.

3.2.2 Definovanie uvažovaného začiatku oscilácie

Navrhovaný algoritmus pre analýzu dát číta údaje po riadkoch, teda v chronologickom poradí. Začiatok slabo tlmenej resp. netlmenej oscilácie je určený na základe hodnoty času rozpadu módu pre daný časový okamih. Vo všeobecnosti je oscilácia považovaná za slabo tlmenú, alebo predstavujúcu zásah do normálnych hraníc stability, ak je čas rozpadu módu väčší ako 12 s. Preto bola pre prvotnú analýzu zvolená všeobecne uznávaná hodnota 12 s. Na Obr. *11* je znázornený priebeh času rozpadu módu pre osciláciu z dňa 3.12.2017 a vyznačený jej začiatok.



Obr. 11 Priebeh času rozpadu módu oscilácie z dňa 3.12.2017 a s vyznačeným začiatkom

3.2.3 Definovanie uvažovaného konca oscilácie

Aby vyšetrovaná oscilácia nebola rozdelená na viacero častí, koniec oscilácie je potrebné určiť inak, ako bod poklesu času rozpadu módu na hodnotu rovnú resp. menšiu ako 12 s (Obr. *11* bod B). Pre metodiku sú stanovené nasledovné podmienky definovania konca oscilácie:

- Hodnota hranice času rozpadu módu bola zvolená nižšia ako hranica pre začiatok oscilácie, konkrétne 10 s. Pri hodnote 12 s mal algoritmus tendenciu rozdeľovať oscilačnú udalosť na viaceré časti. Preto bola hodnota znížená o 2 s.
- Doba, počas ktorej musí byť čas rozpadu menší ako zvolená hranica bola stanovená na 1,5 násobok priemerného času rozpadu módu, ak je väčší ako obnovovacia frekvencia algoritmu PDX.



Obr. 12 Priebeh času rozpadu módu oscilácie z dňa 5.10.2019

3.2.4 Definovanie a výpočet parametrov oscilácie

Po určení začiatku a konca oscilačnej udalosti, boli z dát vyselektované slabo tlmené, resp. netlmené oscilačné udalosti v celkovom počte za sledované obdobie pozostávajúce z 558 595 oscilácií z dát PDX1-3 a 3 684 z dát PDX2-20, pre ktoré boli následne vypočítané základné parametre oscilácie.

• Priemerná frekvencia oscilácie:

$$F_{AVG} = \frac{1}{t_n - t_1 + t_{vz}} \cdot \sum_{i=1}^n F_i \cdot (t_i - t_{i-1})$$

(1)

• Priemerná amplitúda oscilácie:

$$A_{AVG} = \frac{1}{t_n - t_1 + t_{vz}} \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot (t_i - t_{i-1})$$
(2)

• Priemerný čas rozpadu módu:

$$D_{AVG} = \frac{1}{t_n - t_1 + t_{vz}} \cdot \sum_{i=1}^n D_i \cdot (t_i - t_{i-1})$$
(3)

• Plocha pod amplitúdou:

$$A_{\rm s} = \sum_{i=1}^{n} A_i \cdot (t_i - t_{i-1})$$
(4)

• Plocha pod časom rozpadu módu:

$$D_{\rm s} = \sum_{i=1}^{n} D_i \cdot (t_i - t_{i-1})$$
(5)

• Maximálna amplitúda:

$$A_{\rm m} = \max_{1 \le i \le n} A_i \tag{6}$$

• Maximálny čas rozpadu módu oscilácie:

$$D_{\rm m} = \max_{1 \le i \le n} D_i \tag{7}$$

kde: $A_{\rm m}$ - je maximálna amplitúda oscilácie

*A*_s - je plocha pod priebehom amplitúdy oscilácie

AAVG - je priemerná amplitúda oscilácie

A_i - je amplitúda *i*-tej vzorky oscilácie

*D*_m - je maximálny čas rozpadu módu oscilácie

*D*_s - je plocha pod priebehom času rozpadu módu oscilácie

 D_{AVG} - je priemerný čas rozpadu módu oscilácie

D_i - je čas rozpadu módu *i*-tej vzorky

 F_{AVG} - je priemerná frekvencia oscilácie

 F_i - je frekvencia *i*-tej vzorky

 t_1 - je čas prvej vzorky oscilácie

 $t_{\rm vz}$ - je perióda vzorkovania

 t_i - je čas *i*-tej vzorky

 t_n - je čas poslednej vzorky oscilácie

n - je počet vzoriek oscilácie

3.2.5 Určenie frekvenčných pásiem módov oscilácií

Aplikácia pre detekciu oscilácií, ktorú PhasorPoint ponúka používa tzv. pásma módov oscilácií, čo je rozsah frekvencie oscilácií, ktoré do daného módu spadajú. Pásma módov by mali byť definované tak, aby ohraničovali úzky frekvenčný rozsah, do ktorého spadajú oscilácie podobných charakteristík. Definovanie hraníc módu sa zväčša uskutočňuje využitím zhromaždených dát PDX1-3 a PDX2-N z predchádzajúceho obdobia, ktoré sa vynesú do histogramov.

Frekvenčné pásma oscilácií je možné odčítať z histogramu dĺžky výskytu a závažnosti oscilácií s danou frekvenciou na **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**



Obr. 13 Histogram dĺžky výskytu a závažností jednotlivých módov oscilácií

Rovnakým spôsobom bol vynesený histogram oscilácií z dát PDX2-20. Hranice definovaných frekvenčných pásiem sú uvedené v Tab. 1

Tah	1	Manuhana	nánaa	tanomia	huania	náciom	mádu
<i>1 av</i> .	1	wavrnova	ne nas	iuvenie	nranic	pasiem	тоаи.
						1	

Číslo pásma	1	2	3	4	5	6	7
Rozsah frekvencií [Hz]	0,1-0,35	0,35 – 0,7	0,7 – 1,01	1,01 – 1,44	1,44 – 1,59	1,59 – 3,1	3,1 - 4

3.3 Definovanie prahových hodnôt oscilácií pre výstrahy a alarmy

Vzhľadom na rozdielne vyšetrované dáta generujú PDX1 a PDX2 rôzne výsledky. PDX1 vypočítava vyššiu amplitúdu a PDX2 väčší čas rozpadu módu. Stanovenie prahovej hodnoty času rozpadu módu je vykonané s dôrazom na analýzy oscilácií algoritmom PDX2-20 a stanovenie prahovej hodnoty amplitúdy s dôrazom na analýzy oscilácií algoritmom PDX1-3.

Vypočítané parametre oscilácií (priemerná a maximálna amplitúda a priemerný a maximálny čas rozpadu módu) sú vynesené v diagramoch rozptylu, z ktorých sú odčítané nastavenia prahových hodnôt alarmov (diagramy rozptylu maximálnych hodnôt) a výstrah (diagramy rozptylu priemerných hodnôt). Diagramy sú vytvorené pre všetky frekvenčné pásma uvedené v Tab. 1. Ďalej sú uvedené diagramy len pre frekvenčné pásmo č. 1.

Oscilácie so závažnosťou nad 98. percentilom sú vykreslené červenou a oranžovou farbou (Obr. 14 a Obr. 15).



Obr. 14 Diagram rozptylu maximálnej amplitúdy a času rozpadu módu pre pásmo č. 1 0,1 – 0,35 Hz podľa PDX1-3 a PDX2-20 s navrhovanými hranicami výstrahy a alarmu



Obr. 15 Diagram rozptylu priemernej amplitúdy a času rozpadu módu pre pásmo č. 1 0,1 – 0,35 Hz podľa PDX1-3 a PDX2-20 s navrhovanými hranicami výstrahy a alarmu

Pre monitorovanie oscilácií je toto pásmo najdôležitejšie a je potrebné dbať na správne nastavenie hraníc alarmov. Cieľom stanovenia hranice alarmu je zachytiť čo najviac závažných oscilácií a čo najmenej menej závažných. Väčšina oscilácií znázornených zelenou a tyrkysovou farbou je sústredených na jednom mieste. Na základe odporúčania dodávateľa systému WAMS, je nastavené pásmo necitlivosti pre čas rozpadu módu na 1 s a pre amplitúdu na 1 mHz. Aby menej závažné oscilácie neaktivovali alarm, jeho hranice navrhujem nastaviť na hodnotu 40 s pre čas rozpadu módu a 6 mHz pre amplitúdu, čím sa zabezpečí aktivácia alarmu pre závažnejšie oscilácie.

Z reálnych prevádzkových dát je možné vidieť, že najvážnejšie oscilácie sa najčastejšie vyskytujú v pásme č. 1, 0,1 - 0,35 Hz, do ktorého spadajú medzioblastné oscilácie. Vzhľadom na to, že sa vo veľkej väčšine oscilácie nespájajú s vážnymi problémami v sústave, ide o jej prirodzené správanie. Pri definovaní hraníc alarmov ich preto chceme vylúčiť a zachytiť len tie závažné. Navrhované prahové hodnoty re všetky pásma sú uvedené v Tab. 2.

M(1	Al	arm	Výstraha		
Mod	Čas rozpadu Amplitúda módu [s] [mHz]		Čas rozpadu módu [s]	Amplitúda [mHz]	
1. 0.1 – 0.35 Hz	40	6	20	3	
2. 0.35 – 0.75 Hz	30	4	20	2	
3. 0.7 – 1.01 Hz	40	4	20	2	
4. 1.01 – 1.44 Hz	40	4	12	2	
5. 1.44 – 1.59 Hz	60	4	12	2	
6. 1.59 – 3.1 Hz	40	3	12	2	
7. 3.1 – 4 Hz	30	3	12	2	

Tab. 2 Navrhované prahové hodnoty alarmov a výstrah

4 Verifikácia navrhnutej metodiky s modelovanými stavmi na dynamickom modeli ES

Pre účely tejto práce bol prevzatý a upravený dynamický model Paneurópskej siete (viď Obr. 16). Model bol doplnený o vnútroštátne vedenia a významné prenosové vedenia okolitých krajín. Chýbajúce dáta pre model boli doplnené na základe odborného odhadu, odbornej literatúry a katalógov dynamických dát iných softvérových prostriedkov.



Obr. 16 Jednopólová schéma siete stredoeurópskeho regiónu [63]

Na danom dynamickom modeli boli simulované nasledovné rozruchy v sústave, ktoré viedli k vzniku oscilácií:

- prípad č.1: zmena budiaceho napätia o 1% na vybranom bloku v Nemecku,
- prípad č.2: výpadok vedenia V433 v prenosovej sústave ČR,
- prípad č.3: vznik 3f kovového skratu v 50% dĺžky medzinárodného vedenia
 V497 s trvaním t_k = 100 ms.

Cieľom týchto simulácií bolo vyvolať systémové kyvy a overiť, či tieto oscilácie "spadnú" do predefinovaných pásiem alarmov (a teda budú úspešne v riadiacom systéme detegované). Všetky tri prípady sú v dizertačnej práci uvedené. Ďalej je ako príklad uvedený prípad č. 1.

4.1 Prípad č.1

Predpokladajme, že v čase t = 10 s dôjde k malej skokovej zmene budiaceho napätia na jednom výrobnom bloku v rámci nemeckej prenosovej sústavy. Priebeh oscilácií nameraných v rozvodni Varín je uvedený na Obr. 17 a).



Obr. 17 a) Priebeh oscilácie frekvencie pre prípad č. 1, b) FFT analýza frekvencie, c) oscilácia v rámci nastavenia alarmov

FFT analýza signálu časového okna od $t_1 = 150$ s do $t_2 = 330$ s tejto udalosti preukázala, že oscilácie dosahovali rms amplitúdu 8 mHz a frekvenciu 0,139 Hz (Obr. 17 b)). Bod oscilácie v rámci nastavenia alarmov v systéme je zobrazený na Obr. 17 c)

Vzhľadom na vysokú amplitúdu a dlhý čas rozpadu módu simulovaná oscilácia podľa očakávania spadá do pásma alarmu v rámci frekvenčného pásma oscilácií č.1. Potvrdil sa teda predpoklad, že daná simulovaná udalosť spôsobí závažnejšie oscilácie, ktoré by mali byť podľa navrhnutej metodiky zaznamenané.

4.2 Prípad č.3

Predpokladajme, že v čase t = 7 s dôjde k skratu v 50% dĺžky vedenia V497 CZ-SK. Priebeh oscilácií nameraných v rozvodni Varín je uvedený na Obr. 18 a).



Obr. 18 Priebeh oscilácie frekvencie pre prípad č. 3

FFT analýza signálu časového okna od $t_1 = 0$ s do $t_2 = 180$ s tejto udalosti preukázala, že oscilácie dosahovali rms amplitúdu 3 mHz pre frekvenciu 0,028 Hz a 2,9 mHz pre frekvenciu 0,15 Hz (Obr. 18 b)). Bod oscilácie v rámci nastavenia alarmov v systéme je zobrazený na Obr. 18 c).

Oscilácia v prípade č.3 nemá dostatočnú amplitúdu, ani čas rozpadu módu, preto nespadá ani do pásma pre varovanie v rámci frekvenčného pásma oscilácií č.1. Pri tretej simulovanej udalosti sa nepredpokladal vznik závažnejšej oscilácie, čo aj jej analýza potvrdila.

5 Záver

Predkladaná práca sa zaoberá možnosťami využitia analýzy oscilačnej stability zabudovanej vo WAM systéme inštalovanom v podmienkach prevádzkovateľa prenosovej sústavy na území Slovenska.

Problémy stability spôsobené osciláciami môžu mať následky rôzneho rozsahu od poruchového vypnutia generátora až po najzávažnejšiu poruchu typu blackout. Na detekciu oscilácií sa na území Slovenska využíva modul oscilačnej stability v rámci implementovaného systému WAMS, ktorý využíva dva separátne algoritmy spracovávajúce rôzne súbory dát. PPS na území Slovenska má tak k dispozícií výsledky tejto analýzy, no v súčasnom stave preňho predstavujú len ďalší súbor dát, ktoré je potrebné interpretovať. Práca mala preto úlohu dáta analyzovať, predostrieť ich interpretáciu a navrhnúť metodiku na ich spracovanie a využitie.

Aby bolo možné výstup z oscilačnej analýzy systému WAMS interpretovať, bolo potrebné nájsť referenciu závažnosti oscilácií resp. referenčné oscilácie a výsledky ich analýzy z reálnej prevádzky porovnať s výstupom analýzy systému WAMS. Boli analyzované tri najzávažnejšie oscilácie, ktoré sa vyskytli v prepojenej sústave kontinentálnej Európy od roku 2011. Ich analýza z reálnej prevádzky s využitím správ o týchto oscilačných udalostiach vydaných ENTSO-E, bola porovnaná s výslednými parametrami a priebehmi zo systému WAMS. Poznatky z tohto porovnania boli ďalej využité pri návrhu metodiky na spracovanie a využitie dát generovaných modulom oscilačnej stability, ako aj porovnanie ich umiestnenia v spektre všetkých oscilácií.

Najrelevantnejším a najzákladnejším využitím výsledkov oscilačnej analýzy je generovanie výstrah a alarmov upozorňujúcich riadiaci personál PPS na prítomnosť oscilácií v sústave. Aby boli výstrahy a alarmy spúšťané len v nevyhnutných prípadoch, je dôležité správne definovanie a nastavenie ich prahových hodnôt. Práca navrhuje metodiku pre analýzu dát a definovanie základných parametrov jednotlivých oscilácií. Surové dáta výsledkov analýzy obsahovali desiatky miliónov údajov. Navrhovaná metodika skúma parametre jednotlivých oscilácií od času ich začiatku až po čas ich skončenia. Dáta zo systému však obsahujú len parametre oscilácií vyskytujúcich sa v sústave v konkrétnom okamihu a nesleduje priebeh jednotlivých oscilácii počas ich trvania. Z tohto dôvodu som musel navrhnúť definíciu času začiatku oscilácie a času konca oscilácie. Vďaka týmto dvom

údajom som mohol jednotlivé namerané vzorky priradiť ku konkrétnej oscilácii, čím som získal časový priebeh každej oscilácie. Na základe tohto som mohol vypočítať základné parametre oscilácie ako maximálna a priemerná amplitúda, maximálny a priemerný čas rozpadu módu, plochu pod grafom priebehu amplitúdy a času rozpadu módu. Z nich som definoval závažnosť oscilácie. Následne som pomocou histogramov určil frekvenčné pásma módov oscilácií podľa toho, ako často a s akou závažnosťou sa v danom pásme oscilácie vyskytovali. Keďže algoritmy PDX1-3 a PDX2-20 majú svoje výhody aj nevýhody, spojením ich výstupov som v čo možno najväčšej miere eliminoval nedostatky jednotlivých algoritmov. Výsledky analýzy všetkých oscilácií som vyniesol do diagramov rozptylu, z ktorých som definoval parametre nastavenia alarmov. Pre väčšinu frekvenčných pásiem sa v reálnej prevádzke nevyskytovali závažné oscilácie, preto som navrhol prvotné nastavenie týchto hraníc na základe dostupných dát a odporúčam túto analýzu pravidelne opakovať po prevádzke aspoň jedného roka a na základe výsledkov hranice prípadne upraviť. Počas každého cyklu analýzy bude dôležité analyzovať konkrétne oscilácie, ktoré spadli do pásiem alarmov a výstrah a rozhodnúť, či bolo spustenie alarmu resp. výstrahy oprávnené. Správnosť metodiky a navrhovaných prahových hodnôt bola overená na dynamickom modeli v softvérovom programe MODES, v ktorom boli simulované tri rozruchy v sústave vedúce k osciláciám. Keďže podľa skúseností z reálnej prevádzky sústavy sa závažné oscilácie najčastejšie vyskytujú vo frekvenčnom pásme č. 1, simulácie boli naňho zamerané. Išlo o skokovú zmenu budiaceho napätia na zdroji v prenosovej sústave Nemecka, vypnutie vedenia V433 v Českej republike a skrat v polovici vedenia V497. Výsledné oscilácie spustili výstrahu, resp. alarm podľa očakávania.

1.1 Prínosy dizertačnej práce

Pomocou teoretického rozboru problematiky oscilačných problémov v ES a ich detekcie pomocou WAMS, analýzy fungovania modulu systému WAMS pre výpočet oscilačnej stability a analýzy výstupných dát z modulu oscilačnej stability, som porovnal a overil správnosť výsledkov oboch algoritmov modulu oscilačnej stability PDX1-3 a PDX2-20 s vybranými oscilačnými udalosťami v reálnej prevádzke a identifikoval som vlastnosti algoritmov oscilačnej stability, ktoré by mohli predstavovať problém pri ďalšom spracovaní a využití ich výsledkov.

Na základe spracovania surových dát za obdobie troch rokov a extrakcie jednotlivých oscilačných udalostí som definoval základné parametre oscilácií, ktorými je možné oscilácie vzájomne porovnávať.

Následne som navrhol metodiku pre určenie a nastavenie frekvenčných pásiem oscilácií pre modul oscilačnej stability systému a pre určenie prahových hodnôt výstrah a alarmov, čo som overil na dynamickom modeli.

Výsledky práce a samotná metodika budú v prípade úspešného testu implementované na dispečingu prevádzkovateľ a prenosovej sústavy na Slovensku.

Zoznam použitej literatúry

- Britt, M. J., Couch, G. H. Power system control centre display of voltage angle. In: IFAC Symposium 1977, Melbourne, 1977
- [2] Kolcun, M., Medved', D., Čonka, Z. Prieskum využiteľnosti WAMS pre vytváranie alarmov pre dispečerské riadenie. Košice : FEI TUKE, 2014. 134 s. Štúdia.
- [3] L. Zhang and Y. Lei, "Dissemination of the Phasor Method in Electrical Engineering in China," in IEEE Transactions on Education, vol. 57, no. 1, pp. 20-24, Feb. 2014, doi: 10.1109/TE.2013.2262686.
- [4] Monti, A., Muscas, C., Poci, F., Phasor Measurement Units and Wide Area Monitoring Systems. 1.vyd. Londýn : ELSEVIER, 2016. 298 s. ISBN 978-0-12-804569-5
- [5] B. Block and P. Mercorelli, "A new didactic approach in engineering education for conceptual understanding of Euler's Formula," 2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings, Madrid, 2014, pp. 1-7, doi: 10.1109/FIE.2014.7044491.
- [6] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements a historical overview," IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002, pp. 476-479 vol.1, doi: 10.1109/TDC.2002.1178427.
- [7] IEEE/IEC International Standard Measuring relays and protection equipment Part 118-1: Synchrophasor for power systems - Measurements," in IEC/IEEE 60255-118-1:2018, vol., no., pp.1-78, 19 Dec. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8577045.
- [8] Krištof, Vladimír: Riadenie elektrizačnej sústavy v krízových podmienkach. Dizertačná práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2012. 132 s.
- [9] P. S. Wright, P. N. Davis, K. Johnstone, G. Rietveld and A. J. Roscoe, "Field Measurement of Frequency and ROCOF in the Presence of Phase Steps," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 6, pp. 1688-1695, June 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2882907.
- P. Wall et al., "Smart frequency control for the future GB power system," 2016 IEEE
 PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Ljubljana, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGTEurope.2016.7856265.

- [11] National Grid, U.K. (2016). Enhanced Frequency Control Capability (EFCC) Project. Accessed: May 2019. [Online]. Available: https://www.nationalgrid.com/uk/investment-and-innovation/innovation/systemoperator-innovation/enhanced-frequency-control
- [12] Q. Gao and R. Preece, "Improving frequency stability in low inertia power systems using synthetic inertia from wind turbines," 2017 IEEE Manchester PowerTech, Manchester, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2017.7980836.
- [13] U. Chakrabarti, A. Chakrabarti and S. Sarkar, "Fault detection in synchrophasor system by using Phasor Measuring Unit," Michael Faraday IET International Summit 2015, Kolkata, 2015, pp. 182-186, doi: 10.1049/cp.2015.1627.
- [14] Psymetrix. PhasorPoint: SEPS Uživatelská přiručka, Olomouc, 2015. 269 s.Užívateľská príručka.
- [15] Krištof, V., Kušnír, S., Kolcun., M. Základy technológie WAMS In Electric Power Engineering 2011, Slovakia, 2011
- [16] Popelka, A.: Synchrónni fázory napětí a proudu v energetice, identifikace parametru vedení za provozu. EGU Cyklus 2006.
- [17] Popelka, A., Juřík, D.: Synchrónni fázory měření a možnosti využití. Cired 2007.
- [18] Janíček, F., Chladný, V., Beláň, A., Digitálne ochrany v elektrizačných sústavách. Mercury – Smékal, Košice, 2003.
- [19] Murty, P. S. R. Electrical Power Systems. Oxford: Elsevier Science, 2017, 840 s. ISBN: 978-0-08-101124-9.
- [20] Conejo, A. J., Baringo, L. Power System Operations. Cham, Switzerland: Springer, 2018, ISBN: 978-3-319-69406-1.
- [21] Abur, A., Expósito, A. G., Power System State Estimation, Basel : Marcel Dekker, Inc., 2004, 327 s. ISBN: 978-0-203-91367-3.
- [22] Mešter, M., Hvizdoš, M.: The Fundamentals of Wide Area Monitoring in Power System.In: Stabilita elektrizačnej sústavy. Equilibria 2006. ISBN 80-969224-9-1.
- [23] Wu, Y: Synchronized Phasor Measuremenet. Department of Electrical and Computer engineering University of Western Ontario, London, ON, Canada. N6A 5B9.
- [24] Bertsch, J., Zima, M., Surányi, A., Carnal, C., Rehtanz, C., Larsson, M.: Experiences with and perspectives of the system for Wide Area Monitoring of Power System. Cigre/IEEE – PES International Symposium. Montreal 2003.

- [25] Zima, M.: Wide Area Monitoring System: for which purposes?. 8th International Workshop on Electric Power Control Centers. Les Diablerets 2005.
- [26] Wilson, D.: Future WAMS Applications including control and protection. Psymetrix limited. Ontario 2010.
- [27] J. Guo, Y. Wang, D. Zhang, Y. Yu and X. Xie, "A data exchange method of WAMS based on IEC61970," 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, 2011, pp. 2254-2257, doi: 10.1109/APAP.2011.6180802.
- [28] Kaplan, E., Hegarty, C. Understanding GPS: Principles and Applications. 2. vyd, Londýn : ARTECH HOUSE, 2006. 723 s. ISBN 1-58053-894-0
- [29] J. Y. Cai, Zhenyu Huang, J. Hauer and K. Martin, "Current Status and Experience of WAMS Implementation in North America," 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Dalian, 2005, pp. 1-7, doi: 10.1109/TDC.2005.1546889.
- [30] IEEE Standard for Synchrophasers for Power Systems," in IEEE Std 1344-1995(R2001), vol., no., pp.i-, 1995, doi: 10.1109/IEEESTD.1995.93278.
- [31] IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems," in IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005), vol., no., pp.1-61, 28 Dec. 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6111219.
- [32] IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control," in IEEE Std C37.242-2013, vol., no., pp.1-107, 6 March 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6475134.
- [33] Chladová, M., Sádecký, B.: WAMS ČEPS možnosti využití synchrofázoru při estimaci stavu elektrizační soustavy. Seminár č.6, EGÚ Cyklus, Praha 2009.
- [34] Kaňok, M.: WAMS (Synchrofázory). Seminár č.6, EGÚ Cyklus, Praha 2009.
- [35] Pokorný, P.: Deterministický chaos a WAMS co očekávame a čeho se obávame. Seminár č.6, EGÚ Cyklus, Praha 2009.
- [36] Popelka, A., Juřík, D.: Technické prostředky WAMS. Seminár č.6, EGÚ Cyklus, Praha 2009.

- [37] A. Torres, N. Peña and F. Pérez, "Communication network for a wide-area special protection system," 2013 IEEE Grenoble Conference, Grenoble, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/PTC.2013.6652107.
- [38] R. Gore, M. Kande, "Analysis of Wide Area Monitoring System architectures," 2015
 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Seville, 2015, pp. 1269-1274, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125272.
- [39] System Protection & Dynamics Working Group. Wide Area Monitoring Current Continental Europe TSOs Applications Overview. Brusel : ENTSO-E, 2015. 11 s. Štúdia
- [40] ENTSO-E: Monitoring report 2018 Research, Development and Innovation projects.Brusel : ENTSO-E, 2019. 20 s. Správa
- [41] Grega, M., Prieložný, S., Jedinák, M. Implementation of WAMS into transmission system of slovakia. In: Electric Power Engineering 2016, Slovakia, 2016
- [42] Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a.s., Desaťročný plán rozvoja prenosovej sústavy na roky 2015 – 2024, Bratislava : SEPS v Bratislave, 2014, 39 s.
- [43] Q. F. Zhang et al., "Advanced grid event analysis at ISO New England using PhasorPoint," 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, National Harbor, MD, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2014.6938874.
- [44] Kolcun, M. et al. Analýza elektrizačnej sústavy. 1. vyd, Košice : TU FEI v Košiciach, 2005, 419 s. ISBN: 80-89057-09-8
- [45] Mondal, D., Chakrabarti, A., Sengupta, A., Power System Small Signal Stability Analysis and Control, Academic Press, 2014, 611 s. ISBN: 9780128006702
- [46] Mešter, M., Hvizdoš, M., Rusnák, J., Szathmáry, P., Vargončík, M.: Stabilita elektrizačnej sústavy. Equilibria 2006. Košice. ISBN 80–969224– 9-1
- [47] Henschel, S. Analysis of Electromagnetic and Electromechanic Power System Transients with Dynamic Phasors. Berlin : Technische Universität Berlin, 1999. 174 s. Kandidátska dizertačná práca.
- [48] P. Kundur et al., "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.

- [49] E. M. Wazeer, R. El-Azab, M. Daowd and A. M. A. Ghany, "Short-Term Frequency Stability Regulation for Power System with Large-Scale Wind Energy Penetration Using PID Controller," 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2018, pp. 1059-1063, doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635188.
- [50] Hemmingsson, M. Power System Oscillations: Detection, Estimation & Control, Lund: Lund University, 2003. 158 s. Kandidátska dizertačná práca.
- [51] Kundur, P. Power System Stability and Control. New York : McGraw-Hill, 1994.1176 s. ISBN 978-0-07-035958-1.
- [52] System Protection & Dynamics Working Group. Analysis of CE inter-area oscillations of 19 and 24 February 2011. Brusel : ENTSO-E. 2011. 8 s. Správa ENTSO-E.
- [53] System Protection & Dynamics Working Group. Analysis of CE inter-area oscillations of 1st December 2016. Brusel : ENTSO-E. 2017. 13 s. Správa ENTSO-E.
- [54] E. Grebe, J. Kabouris, S. López Barba, W. Sattinger and W. Winter, "Low frequency oscillations in the interconnected system of Continental Europe," IEEE PES General Meeting, Providence, RI, 2010, pp. 1-7, doi: 10.1109/PES.2010.5589932.
- [55] Červeň, I: Fyzika po kapitolách. 1 : Vektory. Bratislava : STU v Bratislave, 2007. 52
 s. ISBN 978-80-227-2663-4
- [56] Reváková, D., Beláň, A., Eleschová, Ž. Prenos a rozvod elektrickej energie. Bratislava
 : STU v Bratislave, 2004. 191 s. ISBN 80-227-2118-2
- [57] Reváková, D., Eleschová, Ž., Beláň, A. Prechodné javy v elektrizačných sústavách. Bratislava : STU v Bratislave, 2008. 180 s. ISBN 978-80-227-2868-3.
- [58] Janíček, F. et. al. Digitálne Ochrany v elektrizačnej sústave, Bratislava : STU v Bratislave, 2004. 360 s. ISBN 80-227-2135-2.
- [59] System Protection & Dynamics Working Group., Oscillation Event 03.12.2017.Brusel : ENTSO-E. 2018. 13 s. Správa ENTSO-E.
- [60] A. Semerow et al., "Dynamic Study Model for the interconnected power system of Continental Europe in different simulation tools," 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2015.7232578.
- [61] P. Korba, M. Larsson and C. Rehtanz, "Detection of oscillations in power systems using Kalman filtering techniques," Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control

Applications, 2003. CCA 2003., Istanbul, Turkey, 2003, pp. 183-188 vol.1, doi: 10.1109/CCA.2003.1223290.

- [62] Máslo, Karel KŘÍŽ, Jan: Impact of distributed generation on grid protection and voltage control, CIRED Workshop Integration of Renewables into the Distribution Grid, Lisbon 2012
- [63] EWIS Report, online at: <u>http://www.wind-integration.eu</u>
- [64] Cooper, S. Data Science from Scratch: The #1 Data Science Guide for Everything A Data Scientist Needs to Know: Python, Linear Algebra, Statistics, Coding, Applications, Neural Networks, and Decision Trees : Data Science, 2018, 188 s. ISBN 9781386311645.
- [65] M. Rahmatian, W. G. Dunford, A. Palizban and A. Moshref, "Transient Stability Assessment of power systems through Wide-Area Monitoring System," 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2015.7285984.

Publikácie

- Grega, M., Prielozny, S., Jedinak, M., Eleschova, Z., Occurance of oscillations in transmission system of Slovakia, Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2019, 2019, 8778024, ISBN: 978-1-7281-1333-3, ISSN: 2376-5623, Scopus, WoS
- Grega, M., Schnierer, T., The flow-based capacity calculation approach and comparison with currently used method, Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2019, 2019, pp. 347–351, ISBN: 978-80-553-3324-3, Scopus, WoS
- Prieložný, S., Jedinák, M., Gamboš, P., Grega, M., Beláň, A., The real test of black-start capacity and island operation in electricity system of Slovakia on June 20th, 2018, Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2019, 2019, pp. 383–388, ISBN: 978-80-553-3324-3, Scopus, WoS
- Grega, M., Prieložny, S., Jedinák, M., Kolcun, M., Kanálik, M., The real test of black-start capacity and island operation in east part of Slovakia, Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, 2017, pp. 114–117, ISBN: 978-80-553-3195-9, Scopus, WoS
- Grega, M., Prieložny, S., Jedinák, M., Kolcun, M., Kanálik, M., The real test of Vojany power plant self- consumption restoration after a black-out, Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, 2017, pp. 118–122, ISBN: 978-80-553-3195-9, Scopus, WoS
- Grega, M., Jedinák, M., Šmidovič, R., Synchronization Options in the Transmission System in Case of the Reconfiguration, IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(27), pp. 386–389, ISSN: 2405-8963, Scopus, WoS

- Prieložný, S., Kret, M., Grega, M., Kolcun, M., Janíček, F., Solar eclipse and its impact on interconnected European electricity network, Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2015, 2015, pp. 164–167, ISBN: 978-80-553-2187-5, Scopus, WoS
- Grega, M., Prieložný, S., Kret, M., Jedinák, M., Gamboš, P., The Slovak Power System Restoration after State of Blackout, Proceedings of the 13th International Scientific Conference on Control of Power Systems, ELEKTROENERGETIKA 2018, 2018, pp. 19-24, ISBN: 978-80-89983-00-1, WoS
- Grega, M., Prieložný, S., Kret, M., Šmidovič, R., Jedinak, M., Eleschova, Ž., Effect of a Secondary Voltage Control in a New Pilot Node 400 kV Liptovska Mara, Proceedings of the 13th International Scientific Conference on Control of Power Systems, ELEKTROENERGETIKA 2018, 2018, pp. 25-30, ISBN: 978-80-89983-00-1, WoS
- Grega, M., Jedinák, M., Šmidovič, R., Synchronization Options during Restoration of Base Case Topology in the Transmission System by using WAMS System, Proceedings of the Cigre 2016 Conference, 2016, pp. 386-389, IFAC
- Grega, M., Prieložný, S., Jedinák, M. Implementation of WAMS into transmission system of slovakia. In: Electric Power Engineering 2016, Slovakia, 2016

Publikácie k téme

- Grega, M., Prielozny, S., Jedinak, M., Eleschova, Z., Occurance of oscillations in transmission system of Slovakia, Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2019, 2019, 8778024, ISBN: 978-1-7281-1333-3, ISSN: 2376-5623, Scopus, WoS
- Grega, M., Prieložný, S., Jedinák, M. Implementation of WAMS into transmission system of slovakia. In: Electric Power Engineering 2016, Slovakia, 2016
- Grega, M., Jedinák, M., Šmidovič, R., Synchronization Options during Restoration of Base Case Topology in the Transmission System by using WAMS System, Proceedings of the Cigre 2016 Conference, 2016, pp. 386-389, IFAC
- Grega, M., Jedinák, M., Šmidovič, R., Synchronization Options in the Transmission System in Case of the Reconfiguration, IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(27), pp. 386–389, ISSN: 2405-8963, Scopus, WoS