

Zsolt Čonka, Róbert Štefko, Marek Bobček, Marek Pavlík

Využitie technológie WAMS v riadení elektrizačných sústav

ELEKTROENERGETIKA

Táto článok sa venuje problematike možností využitia moderných meracích a riadiacich systémov WAMS v riadení elektrizačných sústav. Tieto systémy umožnia posunúť riadenie sústav na vyššiu úroveň. Hlavný pokrok, voči dnes využívaným riadiacim systémom SCADA je v časovo synchronizovanom meraní a od neho odvodených nových on-line funkcionalít. Tieto funkcionality dokážu výrazne prispieť k operatívne riadeniu sústav. Pomocou týchto systémov dokážeme zvýšiť prevádzkovú bezpečnosť, stabilitu a spoľahlivosť pri dodávke elektrickej energie. Článok popisuje teoretické základy WAMS technológií a možnosti využitia týchto systémov v operatívnom riadení elektrizačných sústav.

Kľúčové slová: príspevok; WAMS, PMU, RIADENIE SÚSTAV

This paper deals with the issue of the possibility of using modern measuring and control systems namely WAMS in the management of power systems. These systems will make it possible to take system management to the next level. The main progress compared to the SCADA control systems used today is their contribution to time-synchronized measurement and the new online functionalities derived from it. These functionalities can significantly contribute to the operational management of systems. We can thus increase operational safety, stability and reliability in the supply of electricity. The paper describes in detail the theoretical foundations of WAMS technologies as well as the possibilities of using these systems in the operational management of power systems. **(Utilization of WAMS systems in power system operation)**

Keywords: WAMS, PMU, Power system operation control

I. ÚVOD

Je známe, že základom bezpečnej a spoľahlivej dodávky elektriny je vždy rovnováha výroby a spotreby. Jedným z najväčších problémov je, že bilanciu už neovplyvňuje iba jedna elektrárň a niekoľko tisíc spotrebiteľov v jej okolí (mestské systémy s miestnou elektrárnou a relatívne malou sieťou pred prvou svetovou vojnou), ale obrovská medzinárodne prepojená elektrizačná sústava, ktorá spája mnoho krajín. Hovoríme o nepretržitej rovnováhe medzi stovkami až tisíckami elektrární a desiatkami až stovkami miliónov spotrebiteľov. Je zrejmé, že v takýchto rozsiahlych systémoch musíme pochopiť, dokázať a potvrdiť zákonitosti naučené v „malom“ systéme v oveľa väčšom, zložitejšom a distribuovanejšom systéme a vyzbrojení týmito poznatkami musíme zabezpečiť bezpečnú a spoľahlivú prevádzku systému za každých okolností. Rozsiahle národné a medzinárodné prenosové sústavy musia byť založené na systémoch, ktoré dokážu správne vypočítať množstvo, smer a typ tokov výkonov a odhaliť prípadné poruchy, pretože tieto informácie môžu pomôcť zabezpečiť nepretržitú prevádzku bezpečného a zvládnuteľného napájania elektrickou energiou. [1]

Vďaka GPS môže elektroenergetika preskúmať rozsiahle tranzitné siete s inovatívnymi riešeniami na určenie smeru toku el. energie, ako aj na vymedzenie miesta poruchy. [1] Široko plošné monitorovacie systémy (WAMS) sú čoraz dôležitejšie v európskej prenosovej sústave. Väčšina európskych prevádzkovateľov prenosových sústav sa už roky spolieha na aplikácie PMU / WAMS pri svojej off-line analýze udalostí, čo zlepšuje skúmanie a porozumenie dynamickým javom vyskytujúcich sa v prenosových sústavách. [2] Poskytuje základné podporné informácie a výstrahy riadiacim centráram. Prevádzkovatelia prenosových sústav (PPS) musia rozšíriť obmedzenia poskytované systémami IT, aby sa pripravili na príchod

nového systému, ktorý bude využívať systémy IT na efektívnejšie sledovanie zmien fyzikálnych veličín v priebehu času. Nové aplikácie inteligentnej výmeny údajov a rozsiahleho monitorovania, ochrany a kontroly musia mať pri riadení spoločného systému nevyhnutne vysokú prioritu. WAMS je technologický koncept, ktorý umožňuje mnoho aplikácií, aj keď veľká časť jeho potenciálu je stále nevyužitá. Nie je prekvapením, že v súčasnosti v ENTSO-E sú hlavné aplikácie WAMS veľmi koncentrované, s jasnými výhodami, nekritickými nástrojmi a zapadajú do existujúcej organizačnej štruktúry a prevádzkových procesov PPS. [3]

II. TEORETICKÉ ZÁKLADY TECHNOLOGIE WAMS

WAMS (Wide Area Monitoring System) sú systémy synchronného merania fázorov a uplatňujú sa predovšetkým v prenosových vedeniach. Okrem plošného monitorovania a vizualizácie stavu siete v reálnom čase či následnej off-line analýze udalostí, tieto systémy sa využívajú tiež pre operatívne riadenie siete (napríklad pre využitie plnej kapacity prenosových vedení), sledovanie stability a kývania sústav a systémyčasnej výstrahy. Uplatnenie systémov WAMS je možné nájsť aj v distribučných sieťach, napríklad pri riadení distribuovaných zdrojov energie. Synchronné meranie všeobecne znižuje chybu v následných výpočtoch a procesoch riadiacich systémov, čo vedie k skvalitneniu dispečerského riadenia sietí. [4]

III. DEFINÍCIA FÁZORA

Fázor je vektor reprezentovaný amplitúdou a uhlom otočenia. Je to spôsob reprezentácie harmonického signálu, ktorý je využívaný pre analýzu striedavej napät'ovej siete v elektrotechnike. [5]

Harmonický signál v sínusovom tvare môžeme vyjadriť nasledovne:

$$x(t) = X_m \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Túto rovnicu môžeme zapísať ako fázor nasledovne:

$$X = \frac{X_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\varphi} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} \cdot \cos(\varphi) + j \sin(\varphi) = X_1 + j \cdot X_i \quad (2)$$

kde

X_m je amplitúda signálu,

φ je uhol otočenia vzhľadom k času $t=0$

$\frac{X_m}{\sqrt{2}}$ je efektívna hodnota priebehu, kde jednotlivé

členy s indexom r a i sú reálne a imaginárne časti komplexného čísla v Gaussovej rovine. Hlavnou výhodou fázora je, že neobsahuje parameter času, ale charakterizuje periodickú funkciu ako celok. [6]

IV. MOŽNOSTI VYUŽITIA WAMS SYSTÉMOV V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE

Výhody zhromažďovania fázorových dát na hodnotenie a analýzu stavu elektrizačnej sústavy sú uznávané mnohými organizáciami. Najdôležitejšou aplikáciou WAMS systému je on-line hodnotenie stability elektrizačnej sústavy, obzvlášť pri monitorovaní nad kritickými koridormi (zahraničné vedenie, vedenie dôležitého významu a pod.). Monitorovacie systémy založené na synchrofázorových meraniach umožňujú riadiacim či dispečerským centrám lepšie porozumieť obmedzeniam/limitom a správaniu sa ich elektrizačných sústav, či pripraviť lepšie nápravné opatrenia (obnovenie po poruche a pod.) pre budúce implementácie (modernizáciu a doplnenie nových rozvodní, elektrární, vedení a iné). Na monitorovanie sú už dnes dostupné „run-time“ aplikácie založené na takýchto meraniach. Synchrofázory môžu komunikovať so SCADA/EMS systémom s cieľom zlepšiť napr. kvalitu odhadu stavu sústavy (estimáciu). Hoci vysoko sofistikované algoritmy na automatické riadenie stability ešte nie sú komerčne dostupné ako bežné výrobky, operátor má aspoň jasnú informáciu (indikáciu) o tom, ako ďaleko je systém od „zrútenia“ a že musí včas reagovať na daný problém/poruchu. [7]

Pokročilá aplikácia WAMS technológie umožní, aby bolo rozloženie zaťaženia systému priamo merateľné, čo umožní maximálny bezpečný prenos záťaže. Impedanciu vetiev, prípojnic systému, odbočiek a pod. [8]

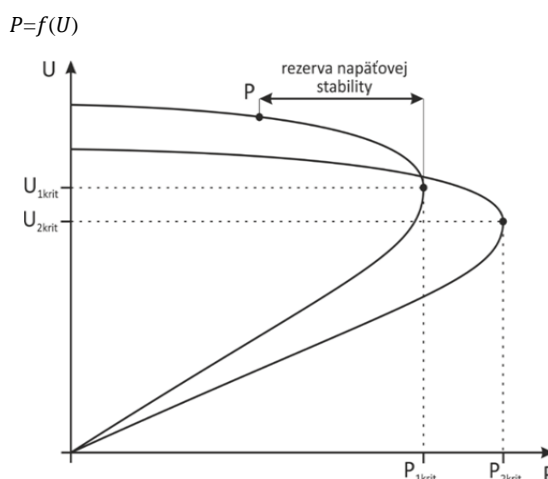
Na základe získaných skúseností z WAMS systémov sa pomaly objavujú a prichádzajú nové, moderné nastavbové systémy WAMPAC (WAM ochranný a riadiaci systém), ktoré sa vyvíjajú aplikáciou bežných WAMS systémov. WAMS s aktívnou odozvou prináša viac možností na ďalšie zlepšovanie prevádzok elektrizačných sústav. Napríklad, bude možné použiť výsledky monitorovania na spustenie alebo blokovanie lokálnych činností/pôsobení/krokov, ako napríklad: blokovanie alebo zmena polohy odbočiek, skupinová zmena nastavení relé v ochránach, vypnutie záťaže a/alebo výroby, detekcia ostrovej prevádzky a príslušné činnosti, a iné. Ďalším príkladom je integrácia WAMS systémov súběžná s prevádzkou so systémami FACTS (s výsledkami monitorovacích, resp. synchrofázorových údajov). To možno považovať ako skutočné nový koncept riadenia elektrizačných sústav a obzvlášť riadenia tokov

výkonov. Konkrétnejším príkladom je detekcia oscilácií elektrizačných sústav s využitím synchrofázorového merania a využitia FACTS systémov na príslušnú reguláciu tlmenia. Medzi ďalšie príklady aplikácií, ktoré sa objavujú, patrí použitie diferenciálnej (rozdielovej) ochrany a to riadenia fázového uhla na základe synchrofázorových meraní. [9]

Systém WAMS je schopný poskytnúť operátorom/dispečerom spracované dáta a spustiť alarmy v konvenčných systémoch, ako napríklad SCADA/EMS. V ideálnom prípade je rozhranie WAMS nezávislé na platforme a umožňuje prístup k dátam z rôznych systémov SCADA/EMS. [10] Dynamické monitorovanie poskytuje podporu všetkým operátorom a technickým inžinierom (najmä ochranárom) tým, že poskytuje rýchle a presné informácie. Pováčšine to poskytuje jeden z nasledujúcich bežných komunikačných protokolov:

- IEC60870-5-101
- IEC60870-5-104
- DNP 3.0

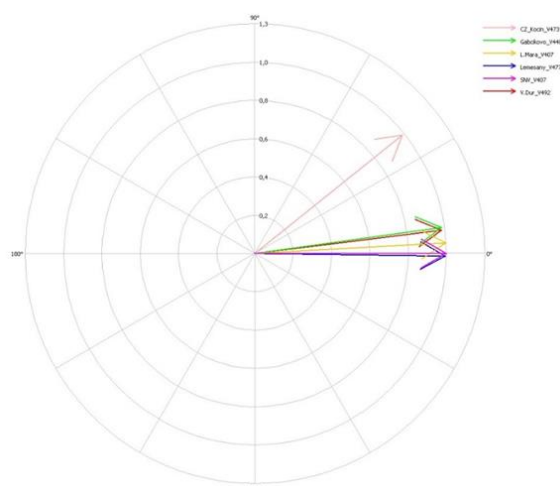
Napät'ová nestabilita – z PMU poznáme hodnoty napätí z fázorov – z nich vieme určiť pod/nad/prepätia, nesymetria... teda napät'ovú nestabilitu/stabilitu. Pre lepšie vyhodnotenie môžeme grafickým spracovaním znázorniť priebehy napätí jednotlivých fáz. [11]



Obr. č. 1 Krivka P-U [1]

Detekcia ostrovej prevádzky – cez merané fázory (na hraničných vedeniach jeden z PMU nebude preukazovať činnosť: (napr.: žiadne resp. deformované U,I fázory) – vedenia s napätím, ale bez prúdu (netečie výkon žiadnym hraničným vedením = ostrovná prevádzka). Na každom z vedení bude nulový prenos ($P, Q = 0$). Domáca výroba bude rovná domácej spotrebe. PMU na hraničných vedeniach nebudú registrovať žiaden prúd. [12]

Kontrola tlmenia oscilácií – z meraní vyhodnocovať čo najpresnejšie hodnoty P, Q a vykresliť grafické (najlepší vizuálny pohľad) znázornenie či sa abnormálny stav utlmuje alebo nie (resp. akým tempom v časovej oblasti). Možnosť merať ako na hraničných tak aj vnútroštátnych vedeniach (napr. na vývodoch elektrární – Mochovce). Meranie prebieha online v danom časovom okamihu s nastavením kontroly na tlmenie oscilácií (pri opačnom efekte sa zapne alarm). [13]



Obr. 2 Polárny graf fázorov vedení [1]

Čoraz častejšie sme svedkami, že v prepojenej elektrizačnej sústave ENTSO-E, ktorej súčasťou je aj SR dochádza k veľkým poruchám a čoraz častejšie aj k rozpadu na menšie ostrovy. Posledný takýto problém rozdelenia prepojenej elektrizačnej sústavy na dva ostrovy nastal tento rok konkrétne 8. januára 2021. Spúšťačom rozpadu sústavy bolo preťaženie spínača prípojnic v Chorvátskej rozvodni Ernestinovo. Avšak ďalším spúšťačom takéhoto rozpadu môžu byť aj oscilácie medzi jednotlivými sústavami. Oscilácie majú veľký vplyv na stabilitu prevádzky a môžu vyvolať už spomínaný rozpad prepojenej sústavy na menšie ostrovy, ktoré nemusia byť schopné samostatnej prevádzky. Dnes dispečer v mnohých prípadoch o prítomnosti oscilácií v sústave ani nemá informáciu, popri prípade má obmedzené informácie. O veľkosti oscilácií popri prípade o zdroji oscilácií nemá vôbec žiadne informácie. Práve pre riešenie tohto problému sú vhodné WAMS. [14]

Oscilácie sa delia podľa ich frekvencie nasledovne:

- < 0,7 Hz – týmito osciláciami sú postihnuté celé oblasti elektrizačnej sústavy (aj celé prepojené sústavy), frekvencia týchto oscilácií je nízka a ich tlmenie ostatnými časťami systému je nepatrné.
- 0,7 – 2 Hz – osciláciami v tomto frekvenčnom rozsahu sú postihované hlavne skupiny generátorov voči systému – sústave. Ich frekvencia je vyššia a tlmenie systémom je čiastočne, niekedy až úplne potláčané. Tieto oscilácie väčšinou neprechádzajú do susedných sústav (ak sú oscilujúce generátory blízko hraničných liniek tak sa prenesú aj k susedným PPS).
- 2 – 4 Hz – osciláciami týchto frekvencií sú postihované hlavne jednotlivé generátory, ktoré sú umiestnené blízko seba. Tieto oscilácie sú systémom plne potláčané.
- – 15 Hz – Oscilácie s takými vyššími frekvenciami už nedokážu sledovať rotor generátora a preto sa prejavujú iba ako nežiadúca zmena napätia na generátore. [15]

Z vyššie uvedeného je teda zrejmé, že medzi-oblastné oscilácie (Inter-Area Oscillations) majú frekvenčný rozsah do cca 0,7 Hz. Oscilácie v rámci jednotlivých sústav sú teda oscilácie s frekvenciou nad 0,7 Hz.

Hlavnými parametrami oscilácií sú amplitúda oscilácií A , frekvencia f a faktor útlmu (damping factor) σ . V prípade že faktor útlmu σ je záporný, tak dochádza k postupnému útlmu amplitúdy oscilácií. Ak je σ kladný tak sa amplitúda oscilácií zväčšuje.

Praktickým opatrením pre sledovanie medzi-oblastných oscilácií je kontrola hodnoty pomeru útlmu ξ ktorý je definovaný nasledovne:

$$\xi = (-\sigma / \sqrt{\sigma^2 + (2\pi f)^2}) \times 100 \% \quad (3)$$

Ak hodnota útlmu oscilácií ξ je väčšia ako 5 %, tak sústava má dostatočnú rezervu stability. Zle utlmované alebo nestabilné oscilácie ($\xi < 5$ %) predstavujú riziko, pretože môžu viesť k nežiadúcim systémovým stavom ako nestabilita, kaskádové vypínanie, alebo v konečnom dôsledku až k blackout-u. [16]

Hlavnou príčinou vzniku oscilácií v elektrizačnej sústave je nerovnováha výroby a spotreby v určitom časovom úseku, rôzne poruchy a porucha regulácie generátora. V minulosti tieto oscilácie neboli pozorovateľné, kvôli blízkosti výroby a spotreby. Avšak v prepojenej elektrizačnej sústave, kedy je výroba a spotreba od seba vzdialená stovky kilometrov, sa oscilácie stávajú stále väčším problémom. Neustále narastajúci počet obnoviteľných zdrojov s malou zotrvačnosťou bude ešte ďalej zhoršovať situáciu s osciláciami. V minulosti došlo celosvetovo k veľkým výpadkom aj kvôli osciláciám, ktoré vznikli pri rôznych poruchách a šírili sa naprieč prenosovými sústavami. Takéto prípady boli napríklad:

Spojené Kráľovstvo (1980) – frekvencia oscilácií po poruche bola 0,5 Hz

Taiwan (1984, 1990, 1991, 1992) – frekvencia oscilácií 0,78 – 1,05 Hz

Západná časť USA/ Kanada – rozpad sústavy na ostrovy (1996) frekvencia oscilácií 0,224 Hz

Škandinávia (1997) oscilácie o frekvencii 0,5 Hz

Čína – Black-out (2003), frekvencia oscilácií 0,4 Hz

USA – Black-out (2003) – frekvencia oscilácií 0,17 Hz

Taliansko (2003) – frekvencia oscilácií 0,55 Hz

Za posledné roky sa v rámci kontinentálnej Európy objavili veľké oscilácie, z ktorých našťastie len 1 spôsobila väčší rozpad sústavy. Preto je len otázka času, kedy takéto oscilácie vyvolajú väčšiu poruchu. Oscilácie zaznamenané v rámci ENTSO-E za posledných pár rokov: [17]

1.12.2016 ENTSO-E – frekvencia oscilácií 0,15 Hz (Výpadok vedenia profilu Francúzsko- Španielsko)

3.12.2017 ENTSO-E – frekvencia oscilácií 0,29 Hz (výpadok generátorov v juhovýchodnej časti Talianska)

8.01.2021 ENTSO-E – rozpad sústavy na ostrovy – frekvencia oscilácií 0,13 a 0,35 Hz

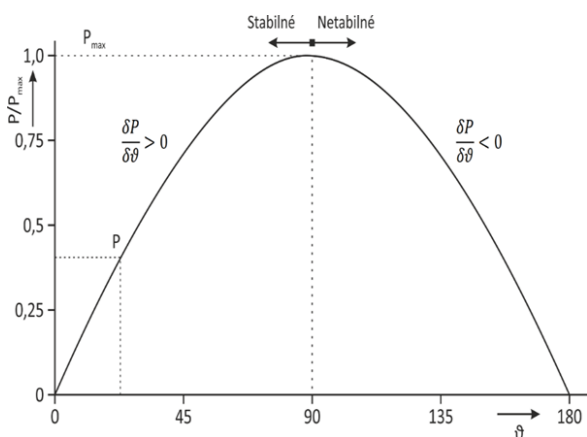
11.10.2021 – ENTSO-E frekvencia oscilácií 0,12 Hz

10.11.2021 – ENTSO-E frekvencia oscilácií 0,15 Hz

Väčšina týchto oscilácií vznikla v dôsledku porúch. Niektoré incidenty spôsobili vypínanie vedení alebo aj generátorov čo spôsobilo ďalšie kývanie výkonu v celej sústave. Vypínanie liniek spôsobilo zvýšenie „ekvivalentnej impedancie“ – menej prenosových ciest čo vedie k zníženiu stability prenosu. Slabé prepojenie následne vyvoláva nízko-frekvenčné oscilácie naprieč sústavou. Ďalšími zdrojmi týchto oscilácií sú aj elektrárne s veľkým inštalovaným výkonom s nedostatočnou výkonovou rezervou pre vyvedenie ich výkonu a vysoké tranzitné toky výkonov. Riešením týchto oscilácií bolo zníženie tranzitných tokov rôznymi prostriedkami. Ďalšími prostriedkami pre elimináciu oscilácií sú PSS regulátory a niektoré FACTS zariadenia (striedavé prenosové systémy na báze výkonovej elektroniky a iných statických regulátorov, na zlepšenie regulovateľnosti a zvýšenie výkonovej prenosovej schopnosti). V rámci ES SR sú PSS regulátory inštalované na generátoroch s

výkonom > 50 MW. Pri vzniku vnútro-sústavových oscilácií s malým útlmom, je vhodné analyzovať, ktorý generátor dané oscilácie vyvolal a skontrolovať funkčnosť, prípadne nastavenie parametrov PSS. Pre monitorovanie medzi-sústavových (Inter-area oscillation monitoring) oscilácií sa využíva niekoľko metód, ako napríklad Prony metóda, monitoring pomocou Kalmanovho filtra – využívaný v NORDEL pre filtráciu veľkých oscilácií, furierová analýza, Hilbertová transformácia a mnoho ďalších. PhasorPoint ponúka ako riešenie pre monitoring medzi-sústavových oscilácií nadstavbovú funkcionálnu Oscillatory Stability Monitoring. Základom pre využiteľnosť tejto funkcionality sú vstupné dáta naprieč prepojenou sústavou. [18], [1]

Odhad stavu sústavy – vyhodnotenie merania z PMU (umiestnenie na hraničných a významných vedeniach) pričom prevádzka v prirodzenom ustálenom stave hovorí o normálnom stave sústavy. Každá iná zmena od nominálnej resp. požadovanej hodnoty (f, P, Q, U, I) môže navádzať na abnormálny stav prevádzky sústavy. Každý parameter je online sledovaný a meranie vyhodnocované v danom časovom okamihu. [19], [1]



Obr. 3 Krivka P θ [1]

Stabilita vedení (statická stabilita) – vyhodnocovanie kapacity (ampacity) vedení (meranie zaťaženia vedení so zachovaním retenčného výkonu pri nežiadúcich dejoch). Nastavením limitných hodnôt z merania môžeme pomocou WAMS signalizovať limitné/kritické hodnoty ktoré začnú upozorňovať na nestabilitu prevádzky jednotlivých vedení.

Obnova elektrizačnej sústavy po blackout

Prvoradou úlohou je obnova vlastných spotrieb systémových elektrární pričom pre riadenie celého procesu obnovy je možné využiť merania synchronizovaných fázorov a tak zabezpečiť spoľahlivý rozbeh ES.

Pre úspešný čierny štart je potrebné odsimulovať všetky operácie počas obnovy sústavy:

- zostavenie modelov vedení, transformátorov,
- zostavenie modelov regulátorov turbín a budenia generátorov,

- zostavenie dynamických modelov záťaží.

Existujú rôzne stupne závažnosti postihnutia prenosovej sústavy:

- strata napätia v časti PS
- strata napätia v celej PS, susediace PS sú stabilné
- systémové elektrárne bežia na vlastnej spotrebe
- systémové elektrárne nebežia na vlastnej spotrebe
- strata napätia v celej PS, susediace PS sú nestabilné
- systémové elektrárne bežia na vlastnej spotrebe

- systémové elektrárne nebežia na vlastnej spotrebe
- Výhody využitia merania synchronizovaných fázorov:*
- online informácie o stave ostrova,
 - včasné odhalenie kývania generátorov pripojených do ostrova,
 - predchádzanie prechodným dejom s ohrozením stability ostrova, možnosť ich analýz počas obnovy,
 - splnenie podmienok pre fázovanie generátorov, ostrovov,
 - skrátenie času obnovy. [20], [1]

POĎAKOVANIE

Tento príspevok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-21-0312.

LITERATÚRA

- [1] Habilitačná práca, Využitie technológie WAMS v riadení elektrizačných sústav, Zsolt Čonka, 2022, TUKE
- [2] GE – Grid Solutions, e-terraphasorpoint, Uživatelská príručka.
- [3] P. Kundur: „Power System Stability and Control“, EPRI, ISBN: 0-07-035958-X
- [4] WAMS és PMU alkalmazása nagykerjedésű tranzit hálózatokon, integrálása az üzemirányítási SCADA rendszerbe, Csavanyák József Péter, Szakdolgozat 2021.
- [5] Martin Ernek, Riadenie krízových stavov ES, Autoreferát k dizertačnej práci 2013
- [6] Z. Čonka, P. Frák, V. Imrich: Elektrické ochrany v ES, 2021, Košice
- [7] Final report on the separation of the Continental Europe power system on 8 January 2021
- [8] North American SynchroPhasor Initiative: „Power System Oscillatory Behaviors: Sources, Characteristics, & Analyses“ 2017
- [9] Q. Zhang, X. Luo, S.a Maslennikov, F. Ma, D. Bertagnolli, NASPI Working Group Meeting: Oscillation source location and long term dynamic performance baselining study using ISO-NE’s synchrophasor data.
- [10] AEP Transmission Operations, AEP’s Experience with WAMS.
- [11] X. Luo, F. Zhang, E. Litvinov, M. Parashar, D. Wilson, NASPI Working Group Meeting „Success Story: Advanced Grid Monitoring Analytics at ISO-NE using PhasorPoint“
- [12] Q. Zhang, X. Luo, E. Litvinov, N. Dahal, M. Parashar, K. Hay, D. „Advanced Grid Event Analysis at ISO New England using PhasorPoint“
- [13] K.Shim, S.Ahn, S.Yun and J.Choi: „Analysis of Low Frequency Oscillation Using the Multi-Interval Parameter Estimation Method on a Rolling Blackout in the KEPCO System“ Energies, 2017, 10, 484; doi:10.3390/en10040484
- [14] Shim, K.-S.; Ahn, S.-J.; Choi, J.-H. Synchronization of Low-Frequency Oscillation in Power Systems. Energies 2017, 10, 558. https://doi.org/10.3390/en10040558
- [15] P. Komkrit, N. Mithulananthan, T. Devbratta: „Understanding Low-Frequency Oscillation in Power Systems“, International Journal of Electrical Engineering Education. (2010) 47.10.7227/IJEEE.47.3.2.
- [16] Frank Tuffner, Luke Dosiak, John Pierre, „Power System Oscillatory Behaviors: Sources, Characteristics, & Analyses“ dostupné online: <https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PN-NL-26375.pdf>
- [17] K.Shim, S.Ahn, S.Yun and J.Choi: „Analysis of Low Frequency Oscillation Using the Multi-Interval Parameter Estimation Method on a Rolling Blackout in the KEPCO System“ Energies, 2017, 10, 484; doi:10.3390/en10040484
- [18] Shim, K.-S.; Ahn, S.-J.; Choi, J.-H. Synchronization of Low-Frequency Oscillation in Power Systems. Energies 2017, 10, 558. https://doi.org/10.3390/en10040558
- [19] P. Komkrit, N. Mithulananthan, T. Devbratta: „Understanding Low-Frequency Oscillation in Power Systems“, International Journal of Electrical Engineering Education. (2010) 47.10.7227/IJEEE.47.3.2.
- [20] Dizertačná práca, Výskum zariadení pre zlepšenie dynamickej stability ES, Zsolt Čonka, 2016, TUKE

ADRESY AUTOROV

Zsolt Čonka, zsolt.conka@tuke.sk, Róbert Štefko, robert.stefko@tuke.sk
Marek Bobček, marek.bobcek@tuke.sk, Marek Pavlík, marek.pavlik@tuke.sk
Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74,
Košice, SK 04210, Slovenská Republika.