

Zsolt Čonka, Róbert Štefko, Michal Kolcun, Marek Pavlík, Dušan Medved', Samuel Bucko,
Jozef Király

Využitie WAMS v elektrizačnej sústave

Možnosti využitia Wide Area Monitoring Systémov v elektrizačných sústavách každým rokom narastajú. Tento článok popisuje možnosti využitia WAMS systémov na sledovanie napät'ovej a frekvenčnej stability. Výhodou týchto systémov je real – time monitoring sústavy, či sa dosiahne zvýšenie prevádzkovej bezpečnosti sústavy. Dispečer dostáva v reálnom čase informácie o prípadnom narušení stability a môže okamžite podniknúť kroky k zamedzeniu šírenia poruchy.

Kľúčové slová: WAMS, stabilita, frekvencia, napätie

The possibilities of using Wide Area Monitoring Systems in electricity systems are increasing every year. This article describes the possibilities of using WAMS systems for monitoring voltage and frequency stability. The advantage of these systems is real-time monitoring of the system, whether an increase in the operational safety of the system is achieved. The dispatcher receives real-time information about a possible disturbance of stability and can immediately take steps to prevent the spread of the disturbance. **(Use of WAMS in electric transmission systems)**

Keywords: WAMS, stability, frequency, voltage

I. IMPLEMENTÁCIA A PRAKTICKÉ VYUŽITIA WAMS SYSTÉMOV V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

WAMS systémami je možné zvýšiť špecifikáciu systému podpory LFC presnejšími meraniami výkonu na hraničných vedeniach a výpočtu cezhraničnej výmeny. V tomto prípade, informácie z PMU slúžia na verifikáciu presnosti použitých prevádzkových meraní, prípadne ako záložný vstup do LFC – teoretický rozbor merania frekvencie a jej špecifikácia pri zmenách zaťaženia. Meranie hodnôt frekvencie pri zmenách zaťaženia a meranie výkonu na hraničných vedeniach (U, I – P, Q). WAMS merajú aktuálne hodnoty v danom čase a následne slúžia na výpočet cezhraničných výmen podľa daného algoritmu alebo pre vstup do záložných LFC [1], [2].

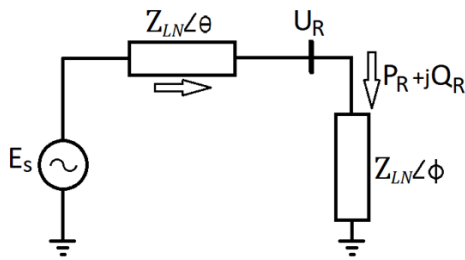
Integráciou PMU jednotiek je možné zlepšiť systémovú špecifikáciu výpočtu výkonovej reakcie ES SR na skokové zmeny frekvencie v zmysle metodiky ENTSOE. Výstupy z výpočtov sú ďalej zasielané na ENTSOE, kde slúžia ako vstup na výpočet K-faktoru synchronnej zóny RG-CE – teoretický rozbor merania frekvencie – výkonového čísla (λ) k ich špecifikáciám pri skokových zmenách. Ďalej, meranie hodnôt výkonu (P, Q) a ich reakcie pri skokových zmenách frekvencie. Pomocou výstupných hodnôt zo systémov PMU sa vypočítajú hodnoty výkonovej reakcie ES SR a následne sa vykreslia v grafickej podobe. Vypočítané hodnoty sa zasielajú do databázy ENTSOE [3], [4].

II. NAPÄŤOVÁ STABILITA A NAPÄŤOVÝ KOLAPS

Napät'ová stabilita je schopnosť sústavy udržať v každom uzle stabilnú hladinu napätia nie len počas normálnej prevádzky, ale aj po poruche. Sústava sa dostáva do napät'ovej nestability, ak porucha (prechodný dej) ako napríklad výpadok spotreby, nárast spotreby poprípade iná nepredvídaná udalosť vyvolá výrazný a nekontrolovateľný pokles napätia. Hlavný faktor ovplyvňujúci napät'ovú stabilitu je neschopnosť sústavy pokryť (generovať) požadované množstvo jalového výkonu. Hlavnou príčinou problému je väčšinou pokles napätia ktorý nastáva v prípade keď činný a jalový výkon preteká indukčnou reaktanciou (reaktancia prenosovej sústavy).

Kritériom napät'ovej stability je, že v prípade akéhokoľvek prevádzkového stavu v ľubovoľnom uzle sústavy dokážeme zvýšením dodávky jalového výkonu do uzla zvýšiť napätie. Sústava je napät'ovo nestabilná v prípade, ak dodaním jalového výkonu do ľubovoľného uzla, napätie v danom uzle klesá. Inak povedané, sústava je napät'ovo stabilná v prípade, že U-Q charakteristika je kladná v každom uzle sústavy a napät'ovo nestabilná, ak v U-Q charakteristika v ľubovoľnom uzle je záporná. Významný pokles napätia v niektorom z uzlov sústavy môže byť spätý aj s problémom rozdielom uhlov rotorov generátorov. Napríklad postupná strata synchronizmu skupiny generátorov voči inej skupine generátorov môže dosiahnuť 180°, čo vyústi do veľmi nízkeho napätia v uzloch prepájajúcich tieto skupiny generátorov [5].

Napät'ová nestabilita je v podstate lokálny problém, aj keď jeho dôsledkom môže byť až napät'ový kolaps. Napät'ový kolaps je zložitejší problém ako napät'ová nestabilita a zvyčajne je dôsledkom sledu udalostí vyvolaných práve napät'ovou nestabilitou v rôznych častiach sústavy, ktorá vedie k výraznému poklesu napätia vo väčšine sústavy. Napät'ová nestabilita môže vzniknúť rôznymi spôsobmi. Jednoducho si to môžeme ukázať na jednoduchom príklade 2 uzlovej siete (Obr. 1). Sieť pozostáva zo zdroja konštantného napätia (E_s) ktorý napája záťaž (ZLD) cez sériovú impedanciu (vedenie) (Z_{LN}) [5].



Obr. 1. Magnetizácia v závislosti od magnetickej intenzity.

Pre tento príklad platí:

$$I = \frac{E_s}{Z_{ln} + Z_{ld}}$$

kde I a E_s sú fázory a

$$Z_{ld} = Z_{ld} \angle \varphi, \quad Z_{ln} = Z_{ln} \angle \theta$$

Z vyššie uvedeného pre prúd I vyplýva:

$$I = \frac{E_s}{\sqrt{(Z_{ln} \cos \theta + Z_{LD} \cos \varphi)^2 + (Z_{ln} \sin \theta + Z_{LD} \sin \varphi)^2}} \quad (1)$$

Z tohto

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \cdot \frac{E_s}{Z_{ln}} \quad (3)$$

kde

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{ld}}{Z_{ln}}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right) \cos(\vartheta - \varphi) \quad (4)$$

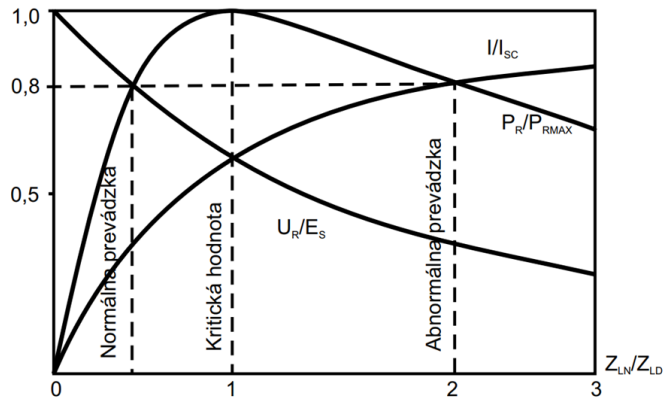
Amplitúda napätia v uzle s odberom bude

$$U_2 = Z_{LD} \cdot I \quad (5)$$

Výkon dodávaný do uzla bude

$$P = U_2 \cdot I \cdot \cos \varphi = \frac{Z_{LD}}{F} \cdot \left(\frac{E_s}{Z_{LN}}\right)^2 \cos \varphi \quad (6)$$

$$P = U_2 \cdot I \cdot \cos \varphi = Z_{LD} / F \cdot (E_s / Z_{LN})^2 \cos \varphi$$



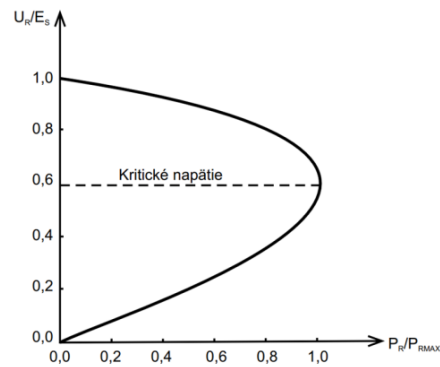
Obr. 2. Priebehy prúdu, napätia a činného výkonu

Priebehy prúdu, napätia a činného výkonu sú znázornené na nasledujúcom obrázku ako funkcie Z_{LN}/Z_{LD} pre $\tan \theta = 10$ a $\cos \varphi = 0,95$. Zvyšujúcim sa odberom a vplyvom zníženia Z_{LD} , P_2 narastá najskôr rapídne, neskôr pred dosiahnutím maxima sa nárast spomalí a po dosiahnutí maxima pomaly klesá. Toto je maximálny prenášaný výkon impedanciou pri konštantnom napätí [3].

Maximálny výkon je prenášaný v momente, keď pokles napätia na vedení je rovný amplitúde U_2 , ktorý dosiahneme ak $Z_{LN}/Z_{LD} = 1$. Keď impedancia záťaže Z_{LD} klesá, tak prúd narastá a napätie klesá. Z tohto vyplýva, že pri vysokých hodnotách impedancie záťaže Z_{LD} , miera nárastu prúdu je väčšia ako pokles napätia a výkon v odberovom uzle P_2 narastá rapídne so znižujúcou sa impedanciou odberu Z_{LD} . Keď impedancia Z_{LD} dosiahne vyššiu hodnotu ako impedancia Z_{LN} , tak pokles napätia je o niečo väčší ako pokles napätia. V prípade, že impedancia vedenia Z_{LN} má vyššiu hodnotu ako impedancia záťaže Z_{LD} , tak pokles napätia je oveľa výraznejší ako nárast prúdu a celkovo dochádza v znížení dodávky činného výkonu P_2 .

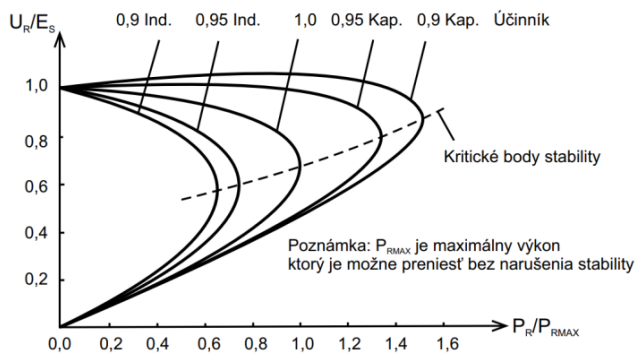
Hranicou napät'ovej stability je v bode maximálneho prenášaného činného výkonu. V prípade vyššej spotreby, by napätie výrazne klesalo a sústava by bola značne nestabilná vid' Obr. 3. V prípade konštantnej impedančnej charakteristiky zaťaženia, sústava stabilizuje výkon pri nižšom napätí. V prípade konštantnej výkonovej charakteristiky, sústava bude nestabilná vplyvom kolapsu napätia v uzle. V prípade konštantnej výkonovej charakteristiky zaťaženia (veľkosť záťaže je konštantná), bude sústava nestabilná z dôvodu napät'ového kolapsu v danou odberovom uzle [5].

Z pohľadu napät'ovej stability je dôležitý práve vzťah medzi odoberaným činným výkonom P_2 a napätím v danom uzle U_2 . Táto charakteristika je znázornená na nasledujúcom obrázku.

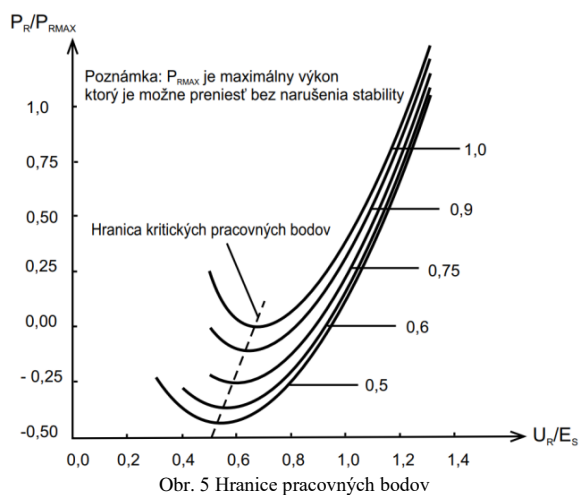


Obr. 3. Kritické napätie

Z rovníc 2.5 a 2.6 môžeme vyvodit', že účinník odoberaného výkonu má výrazný vplyv na P-U charakteristiku sústavy. Tento vplyv si môžeme pozorovať ako pokles napätia s narastajúcim prenášaným činným a jalovým výkonom. Napät'ová stabilita teda závisí hlavne na vzťahu medzi P, Q a U. Tradičn'á forma znázornovania vzťahu medzi P, Q a U je znázornená na nasledujúcich obrázkoch [5].



Obr. 4 Kritické body stability

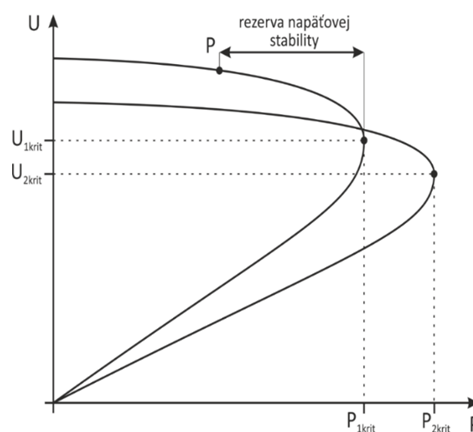


Obr. 5 Hranice pracovných bodov

Obr. 4 znázorňuje P-U charakteristiku pre rôzne hodnoty účinníka odberu. Kritické hodnoty sú znázornené čiarkovane. Prevádzkové body nad kritickými bodmi reprezentujú dostatočné prevádzkové podmienky. Avšak prevádzkovanie blízko kritických bodov je nebezpečné, pretože v prípade nepredvídanej zmeny odoberaného jalového výkonu (nárast spotreby jaloviny), môže spôsobiť posun pracovného bodu do nestabilnej oblasti. Vplyv rôznych typov odberných zariadení (rôzne charakteristiky jalového výkonu) sú znázornené na Obr. 5. Tento obrázok znázorňuje charakteristiky medzi odoberaným jalovým výkonom Q_2 napätím U_2 pri konštantnom činnom výkone P_2 . Sústava je v tomto prípade stabilná, ak derivácia dQ_2/dU_2 je kladná. Limit stabilnej prevádzky je v bode, kedy derivácia $dQ_2/dU_2 = 0$ [5].

III. NAPÄŤOVÁ NESTABILITA

Z PMU poznáme hodnoty veľkostí napätí a uhlov z fázorov – z nich vieme určiť pod/nad/prepätia, nesymetrie, kolísanie a iné. Teda určiť napät'ovú nestabilitu/stabilitu v aktuálnej prevádzke. Pre lepšie vyhodnotenie môžeme grafickým spracovaním znázorniť priebehy napätí jednotlivých fáz.



Obr. 6 Diagram P-U napät'ovej stability

Trh s elektrinou núti prevádzkovateľov sústav využívať maximálne dostupné kapacity infraštruktúry prenosových vedení v každej z prepojených elektrizačných sústavách. Vyžaduje si to podrobný pohľad na otázky bezpečnosti a stability prevádzky. Jeden z takýchto problémov súvisí so stabilitou napätia. Monitorovanie stability napätia poskytuje v reálnom čase informácie o výkonovej rezerve s ohľadom na stabilitu napätia. Výkonová rezerva je množstvo dodatočného činného výkonu, ktoré je možné preniesť na prenosovom koridore alebo vedení bez ohrozenia napät'ovej stability siete [6], [7].

IV. FREKVENČNÁ STABILITA

Frekvenčná stabilita je schopnosť elektrizačnej sústavy zotrvať v stave s konštantnou frekvenciou. Frekvencia závisí hlavne od rovnováhy medzi výrobou a spotrebou elektrickej energie. Prebytok vyrobenej elektrickej energie vyvoláva zvýšenie frekvencie a naopak. Frekvenčná nestabilita je spätá s porušením tejto rovnováhy, ktorá môže viesť až k vypínaniu generátorov a záťaží. Krátkodobá frekvenčná stabilita je spätá najmä s ostrovnou prevádzkou sústavy. Nestabilitu počas ostrovej prevádzky spôsobuje hlavne príliš veľký rozdiel medzi výrobou a spotrebou.

Rozdiel medzi výrobou a spotrebou je regulovaný hlavne pomocou regulátorov turbíny frekvenčným odľahčením. Pri náraste frekvencie sa otáčky generátora znižujú a pri poklese frekvencie sa otáčky generátora zvyšujú. Takáto zmena otáčok generátora môže viesť až k odopnutiu generátora zo siete frekvenčnou ochranou, alebo ochranou ktorá je závislá od napätia a frekvencie V/Hz [5].

Frekvenčná nestabilita – merané hodnoty frekvencie [f] z PMU kde vieme určiť kladnú+ a zápornú- odchýlku [Hz] a vyhodnocovať frekvenčnú nestabilitu. Pri aktuálnom zobrazovaní môžeme poukázať na frekvenčnú nestabilitu pričom vo vyhodnocovacom systéme môžeme nastaviť konkrétne limity na indikáciu kritických hodnôt výstražných a alarmujúcich charakterov. Rovnako veľmi podstatným ukazovateľom je aj sekundárne vypočítavaná/získavaná hodnota zmeny frekvencie za daný

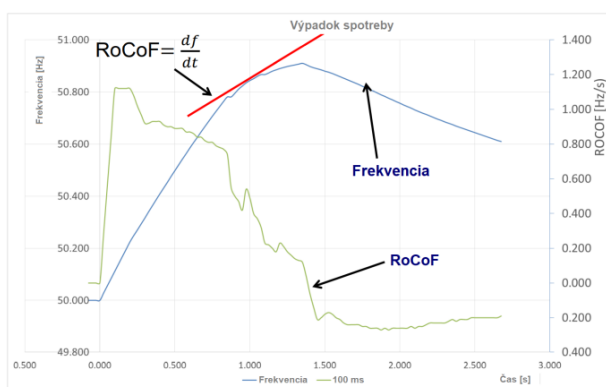
čas - RoCoF. Parameter je možné získať z každej vzorky df/dt alebo je možné určiť jednotlivé časové úseky (napr. 0,5s; 1s či 2s alebo iné) k sledovanej zmene frekvencie za čas Hz/s.

V. RÝCHLOSŤ ZMENY FREKVENCIE (ROCOF)

Rýchlosť zmeny frekvencie (ROCOF) je derivácia zmeny systémovej frekvencie podľa času (df/dt). Táto funkcia má malý význam pre sústavy, kde prevláda výroba založená hlavne na synchronných generátoroch, pretože zotrvačnosť týchto generátorov, prirodzene napomáha proti rýchlym zmenám frekvencie. Dnes sa však stretávame s problémom, kedy pri výpadku výroby, spotreby alebo rozdelenia sústavy, dochádza k výraznejším hodnotám zmeny frekvencie ROCOF. Hlavnou príčinou je prechod na nové zdroje elektriny bez zotrvačnosti.

Aby sme správne definovali hodnotu ROCOF, je nutné brať do úvahy vlastnosti celej prepojenej sústavy.

Hodnota sa určí na základe analýzy incidentu pre príslušnú sústavu. Takýto incident môže predstavovať napríklad rozdelenie sústavy na menšie ostrovy, kde dôjde k výraznému zníženiu zotrvačnosti (napr. Black-out Talianska, alebo rozdelenie kontinentálnej Európy na 3 ostrovy v novembri 2006) [5], [8], [9].



Obr. 1 ROCOF [9]

Matematická definícia ROCOF je nasledovná:

$$\text{ROCOF}_{\text{priemer}} = \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\text{ROCOF}_{\text{okamžitá}} = \frac{df}{dt} \quad (8)$$

Keďže jedným z hlavných problémov je zníženie zotrvačnosti systému, vybrané scenáre by mali odrážať situácie s nízkou zotrvačnosťou, napr. vysoký podiel výroby z obnoviteľných zdrojov (V Nemecku v auguste 2015 predstavoval podiel výroby elektriny z obnoviteľných zdrojov až 84%). Zvolená hodnota ROCOF by mala rešpektovať nie len súčasný stav sústavy, ale aj budúce možné rozšírenie sústavy o nové zdroje.

Je tiež dôležité brať do úvahy schopnosť prevádzkovania jednotlivých technológií, pri rôznych zmenách frekvencie. Napríklad veterné turbíny dokážu pracovať aj pri zmene ROCOF 4Hz/s, avšak synchronne stroje sú omnoho citlivejšie (najmä paroplynové elektrárne). Najväčším problémom vysokých hodnôt ROCOF pre tepelné elektrárne predstavuje nestabilita a zníženie životnosti jednotlivých komponentov (elektrických aj mechanických) [8], [9].

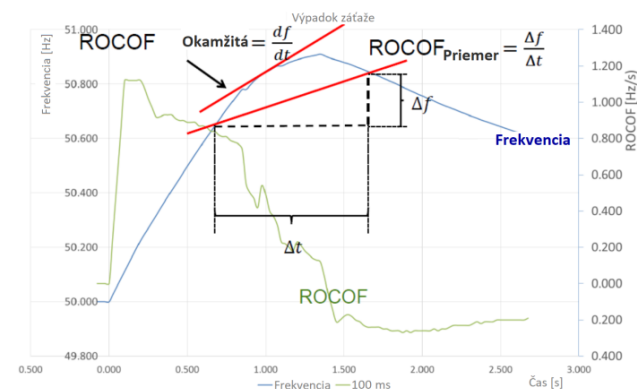
Rešpektovaním nariadení EK, musia jednotlivá výrobná zariadenia zostať pripojené pri nasledujúcich rýchlostiach zmien frekvencie:

- $\pm 2 \text{ Hz/s}$ pre $\Delta t = 0,5\text{s}$
- $\pm 1,5 \text{ Hz/s}$ pre $\Delta t = 1\text{s}$
- $\pm 1,25 \text{ Hz/s}$ pre $\Delta t = 2\text{s}$

Niektorá riadiace systémy WAMS umožňujú využitie viacerých alarmov pre jednotlivé merané parametre ROCOF:

- Okamžitá ROCOF (0,5) frekvencie (Hz/s)
- Amplitúda frekvencie (Hz)
- df/dt (Hz/s)

V prípade okamžitej ROCOF (0,5s) sa udáva ako kritická hodnota 1Hz/s pre sústavy, ktoré sú s kontinentálnou Európou prepojené HVDC spojkami. Tieto sústavy musia zostať pripojené aj po výpadku, ktorý vyvolá takúto hodnotu ROCOF (0,5s) [8], [9], [10].



Obr. 2 Priemerná a okamžitá hodnota ROCOF [9]

ZÁVER

Technológia WAMS umožňuje vyvíjať nové aplikácie, ktoré môžu byť kľúčové v riadení elektrizačných sústav. Vývoj takýchto aplikácií v Európe, ale aj v iných častiach sveta má za následok neustále zlepšovanie kvality a spoľahlivosti dodávky elektrickej energie. Prevádzkovatelia prenosových sústav (PPS) budú čoskoro využívať systém WAMS ako základný nástroj pre operatívne riadenie, plánovanie a rozhodovanie v reálnom čase. Väčšina európskych prevádzkovateľov prenosových sústav sa už roky spolieha na aplikácie WAMS pri off-line analýze udalostí. WAMS je technológia, ktorá umožňuje využitie mnohých nových funkcionalít, avšak veľká časť jej potenciálu je stále nevyužitá. Rastúca miera spotreby elektriny a neustále narastajúci podiel výroby elektriny z ťažko predikovateľných fotovoltaických a veterných elektrární ešte viac sťažuje prácu dispečerov jednotlivých prevádzkovateľov prenosových sústav. Pre zachovanie prevádzkovej bezpečnosti sústavy je potrebné zabezpečiť neustále dodržiavanie bezpečnostného kritéria n-1. Predpokladáme, že najmä vplyvom zvyšujúceho sa podielom OZE a odstavením jadrových elektrární, ktoré tvorili základ „zotrvačnosti“ sústavy, sa budú problémy ako oscilácie, preťažovanie vedení, zhoršená stabilita prenosu elektrickej energie a ďalšie len zhoršovať v celej prepojenej Európskej sústave ENTSO-E. Preto je potrebné pracovať na vybudovaní spoľahlivého on-line riadiaceho systému s funkcionalitami, ktoré výrazne napomôžu v operatívnom riadení sústav.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-19-0576 „Sebestačnosť elektroenergetiky v podmienkach liberalizovaného trhu s elektrinou“

LITERATÚRA

- [1] KALAM, A. – REHMAN, K. R. – SONI, A. – SIDDIQUI, S. A. – MUNDRA, A. 2020. Intelligent Computing Techniques for Smart Energy Systems. Singapore: Springer Nature, 2020. ISBN: 978-981-15-0213-2; DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0214-9>.
- [2] PERSHKO, E. A. – DEMIDOV, G. D. – ILLARIONOVA, S. V. – VERNER, M. E. – BELYAEV, A. N. 2022. Application of Wide-Area Measurement Data in Control Algorithms for Power System Stability Enhancement. [online] Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). [cit. 2022.05.18]. Dostupné na internete: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9755589/authors#authors>>.
- [3] ASHTON, P. M. – TAYLOR, G. 2014. Exploiting Phasor Measurement Units For Enhanced Transmission Network Operation And Control. [online] Brunel University, UK: Thesis for the degree of Doctor of Engineering. [cit. 2022.03.05]. Dostupné na internete: <<https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/9063/1/FulltextThesis.pdf>>.
- [4] AMUTHA, A. L. – UTHRA, R. A. – ROSELYN, J. P. – BRUNET, R. G. 2021. Anomaly detection in multivariate streaming PMU data using density estimation technique in wide area monitoring system. [online] Expert Systems with Applications. [cit. 2022.05.10]. Dostupné na internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417421003067>>.
- [5] MA, J. 2018. Power system: Wide-Area Stability Analysis and Control, Beijing-China: Wiley-Science Press Beijing, 2018. 23-154 p. ISBN: 9781119304876.
- [6] HÄGER, U. – REHTANZ, CH. – VOROPAI, N. 2014. Monitoring, Control and Protection of Interconnected Power Systems; Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg ,2014. ISBN: 978-3-642-53847-6; DOI: 10.1007/978-3-642-53848-3.
- [7] AHMED, M. M. – HASANL, M. K. – YUSOFF, N. S. F. 2020. Dynamic Load Modeling and Parameter Estimation of 132/275 KV Using PMU-Based Wide Area Measurement System. [online] International Conference on Innovative Computing and Communications. Advances in Intelligent Systems and Computing, 1166 p. Springer, Singapore. [cit. 2022.04.11]. Dostupné na internete: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-5148-2_97>. ISBN: 978-981-15-5147-5; DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-5148-2_97.
- [8] ENTSO-E. 2021. System Separation in the Continental Europe Synchronous Area on 8 January 2021 – update. [online]. ENTSO-E. [cit. 2021.01.16]. Dostupné na internete: <<https://www.entsoe.eu/news/2021/01/15/system-separation-in-the-continental-europe-synchronous-area-on-8-january-2021-update/>>.
- [9] LEE, G. – KIM, D.I. – KIM, S. H. – SHIN, Y.J. 2019. Multiscale PMU Data Compression via Density-Based WAMS Clustering Analysis. [online] Energies. [cit. 2022.05.06]. Dostupné na internete: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/4/617>>.
- [10] FANG, J. 2021. More-Electronics Power Systems: Power Quality and Stability; Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2021. ISBN: 978-981-15-8589-0; DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8590-6>. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12040617>.

ADRESY AUTOROV

Zsolt Čonka, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, zsolt.conka@tuke.sk

Róbert Štefko, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, robert.stefko@tuke.sk

Michal Kolcun, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, michal.kolcun@tuke.sk

Marek Pavlík, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, marek.pavlik@tuke.sk

Dušan Medved', Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, dusan.medved@tuke.sk

Samuel Bucko, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, samuel.bucko@tuke.sk

Jozef Király, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, jozef.kiraly@tuke.sk