

Vladimír Kohan, Peter Capcara, Zsolt Čonka, Michal Kolcun

## Vplyv Obnoviteľných zdrojov energie na prevádzku ES

Tento článok je zameraný na problematiku kooperácie obnoviteľných zdrojov energie s konvenčnými zdrojmi z hľadiska prenosu a stability elektrickej energie. Okrem toho sa zaoberá princípom konvertovania z jednosmerných (DC) systémov na striedavé (AC) systémy. Podstatou článku je skúmanie vplyvu obnoviteľných zdrojov energie na elektrizačnú sústavu. Za týmto účelom bolo vytvorených viacero modelov sústavy. Modely boli vytvorené v programe NEPLAN. V týchto modeloch boli simulované trojfázové skraty pre sledovanie dynamických dejov v sústave. Do siete boli pripojené fotovoltaické ako aj veterné elektrárne. Pomocou simulácie boli pozorované reakcie týchto elektrární na skrat. V oboch prípadoch (PV aj VT) sa dôraz kládol na reakciu PWM regulátora na vzniknutý skrat. Špecifické udalosti, ktoré vznikajú počas prevádzky takýchto systémov boli taktiež vyhodnotené.

Kľúčové slová: Obnoviteľné zdroje energie, Výkonová elektronika, NEPLAN, dynamická stabilita

This article focuses on the issue of cooperation of renewable energy sources with conventional sources in terms of transmission and stability. In addition, it deals with the principle of converting from direct current (DC) systems to alternating current (AC) systems. The essence of the article is to examine the impact of renewable energy sources on the electric power system. For this purpose, several models of the system were created. The models were created in the NEPLAN program. In these models, three-phase short-circuits were simulated to monitor dynamic events in the system. Both photovoltaic and wind power plants were connected to the grid. The short-circuit reactions of these power plants were observed by simulation. In both cases (PV and VT), emphasis was placed on the reaction of the PWM controller to the short circuit. Specific events that occur during the operation of such systems have also been evaluated. **(Impact of renewable energy sources on power system operation)**

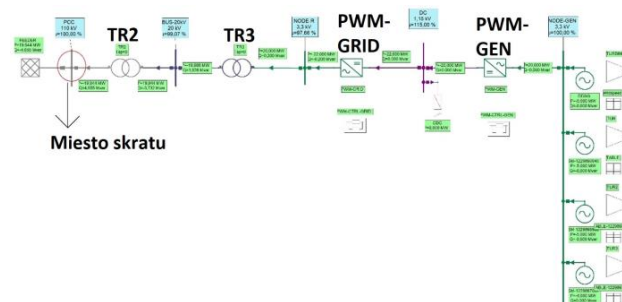
Keywords: Renewable energy sources, power electronics, NEPLAN, transient stability

### I. ÚVOD

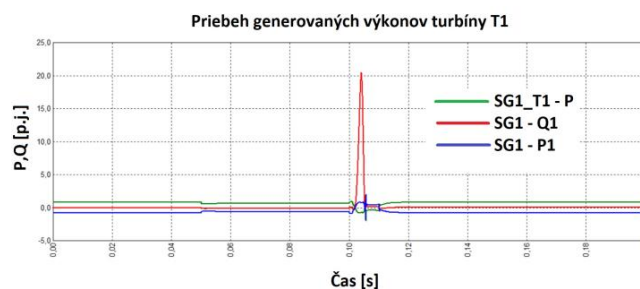
Neustálym zvyšovaním množstva obnoviteľných zdrojov energie a pripájaním ich do elektrizačných sústav sa upriamuje pozornosť na ich vplyv na prevádzku sústavy obzvlášť pri prechodných dejoch, ktoré nastávajú pri rôznych poruchách, pripájaní či odopínaní záťaží a podobne. Tento článok je venovaný štruktúre a princípom premeny energie z výrobných elektrární (DC/AC). Následne je popísaný spôsob produkcie a pomocou konvertorov následnej distribúcie elektrického výkonu. Jadro práce sa orientuje na vplyv OZE na elektrizačnú sústavu (správanie sa zdrojov OZE počas trojfázového skratu). Dané návrhy boli následne simulované a porovnávané z hľadiska vplyvu na stabilitu a prechodné deje [1], [8], [10], [17].

### II. SKÚMANIE DYNAMICKÝCH DEJOV VETERNEJ FARMY

Rovnako ako pri zapojení solárnych zdrojov elektrickej energie do siete aj pri zavedení veterného zdroja je potrebné venovať zvýšenú pozornosť dynamickým dejom a reakciám jednotlivých meničov. Vo zvolenej sieti bol nastavený trojfázový skrat (Obr. 1) v čase 0,05 s. Na nasledujúcich priebehoch bude viditeľné, že daná veterná farma bola zapojená do tvrdej siete, ktorá bola schopná z veľkej časti kompenzovať a teda nedochádzalo takmer k žiadnym výkyvom [2], [6], [13], [15].

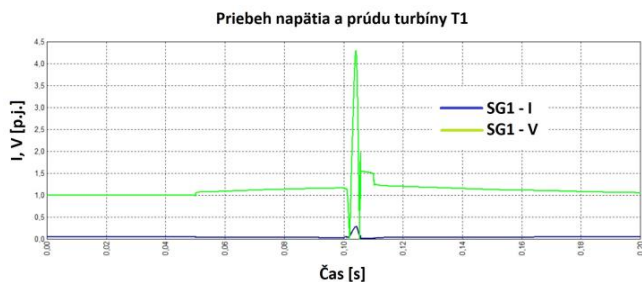


Obr. 1 Schéma zapojenia veternej farmy pripojenej k sieti



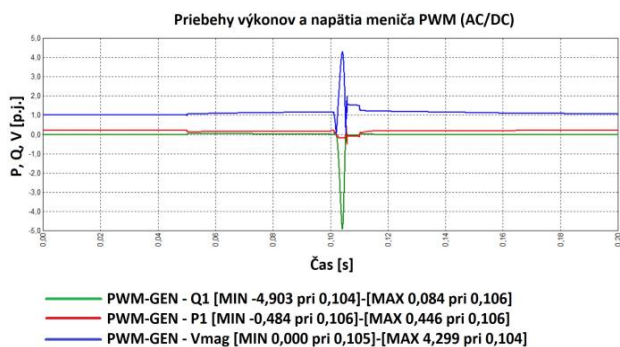
Obr. 2 Priebeh generovaných výkonov turbíny T1

Na Obr. 2 sú záznamené priebehy jednej z bloku veternej turbíny (blok – generátor a turbína). Zelený (výkon turbíny) a modrý (výkon generátora) priebeh predstavuje zrkadlové obrazy dodávaného činného výkonu. Je to spôsobené tým, že v programe NEPLAN je turbína braná ako kladný výkon a generátor ako záporný výkon.. Keďže jalový výkon je vytváraný druhým DC/AC konvertorom, tak blok VT generuje len činný výkon (resp. generuje veľmi malý jalový výkon). Avšak pri trojfázovom skrate sa na generátore objavila oscilácia/ kyv jalového výkonu do kladných hodnôt, čo značí to, že v blízkej prípojnici došlo k poklesu napätia (skrat). PWM konvertor sa toto napätie snažil vyrovnať aj s pomocou generátora VT [3].



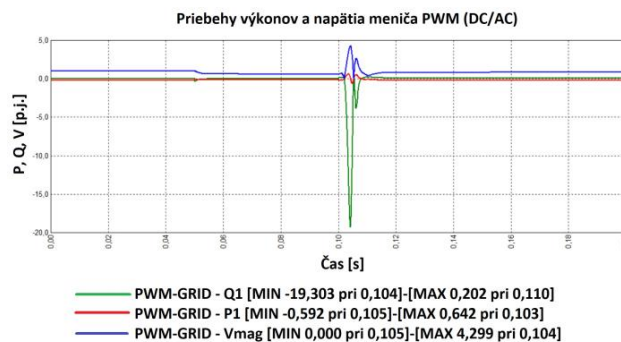
Obr. 3 Priebeh napätia a prúdu turbíny T1

Napätie generátora v momente skratu jemne vzrástlo, avšak k rozkývaniu došlo až po odstránení poruchy. Napätia a prúdy generátora sú zobrazené na Obr. 3, pričom skrat mal na prúd výrazne menší vplyv ako na napätie o čom svedčí aj priebeh jalového výkonu zobrazeného na Obr. 2. Konvertor sa s touto situáciou dostatočne rýchlo vysporiadal, avšak špičkové napätia kyvu sú približne štyrikrát väčšie, čo by mohlo spôsobiť odpálenie polovodičových prvkoch v konvertore, ktoré sú náchylné na prepätia a obzvlášť na zápornú polaritu [8].



Obr. 4 Priebehy výkonov a napätia meniča PWM (AC/DC)

Sledovaním jalového a činného výkonu na konvertore na strane generátora (AC/DC) je možné pozorovať taktiež najväčšie oscilácie pri napätí a jalovom výkone. Keďže regulátory v konvertore sú nastavené na riadenie presného toku činného výkonu (podľa vyrabanej energie z turbín), tak daný konvertor má len veľmi nízku hodnotu kyvu s rýchlym účinkom stabilizácie.

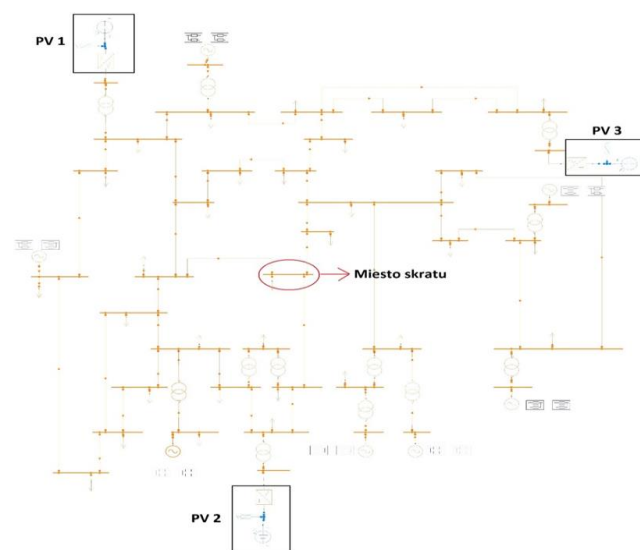


Obr. 5 Priebehy výkonov a napätia meniča PWM (DC/AC)

Na strane siete je konvertor typu DC/AC s dodatočným dodávaným jalovým výkonom o nízkej hodnote. Konvertory na báze výkonovej elektroniky sú schopné dodávať alebo odoberať rôznu veľkosť jalového výkonu (podľa typu a parametrov konvertora – CSC, VSC a iné.) V porovnaní s generátorovým konvertorom má konvertor na strane siete väčší kv jalového výkonu, čo je spôsobené tým, že tento konvertor generuje aj určitú hodnotu jalového výkonu a taktiež môže pracovať s inou reguláciou na riadenie toku výkonu (algoritmom pre spínacie prvky).

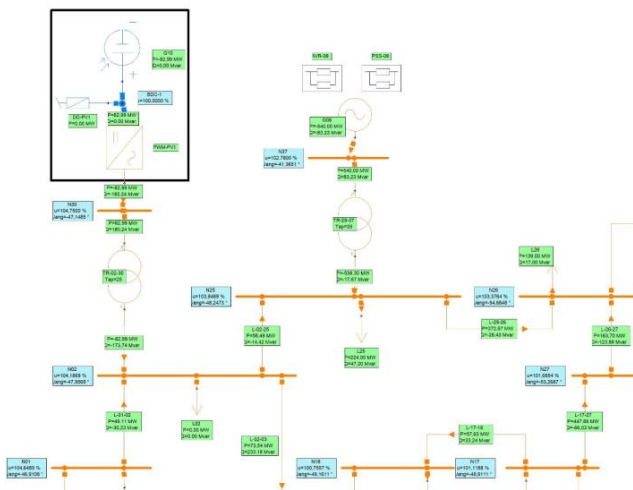
### III. DYNAMICKÝ MODEL SIETE S PRIPOJENÝMI PV FARMAMI V PROGRAME NEPLAN

Vplyvom čoraz väčšieho počtu aplikácií obnoviteľných zdrojov energie do siete sa kladie vyšší dôraz na skúmanie problematiky prechodných dejov počas porúch. Počas dodávky konštantného výkonu synchronnými generátormi sa vplyvom skratu generátor rozkmitá. V rámci dynamickej analýzy je potrebné rozobrať či je generátor schopný ustáliť sa alebo nastane jeho výpadok zo synchronizmu. Ako je to však pri „netočivých“ zdrojoch elektrickej energie akými sú napríklad obnoviteľné zdroje, ktoré distribuujú výkon pomocou meničov na báze polovodičových zariadení? Z toho dôvodu bol vytvorený jednoduchý model siete obsahujúci ako synchronne generátory tak aj generátory založené na statických DC/AC meničoch [5], [11], [16].



Obr. 6 Schéma siete s pripojenými PV farmami

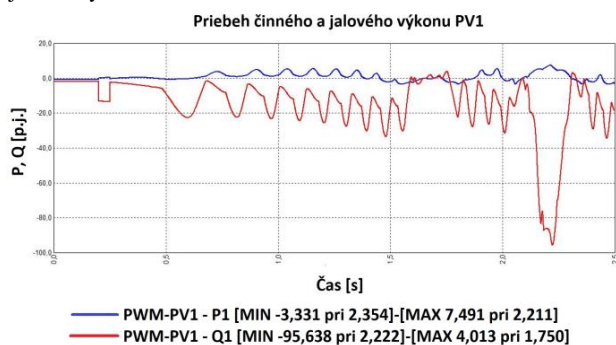
V prostredí programu NEPLAN bola zostrojená jednoduchá schéma siete o napätí 10 kV. V sieti sú pripojené synchronné generátory a tri solárne farmy, pričom vo vyznačenom uzle na Obr. 6 je nastavený trojfázový skrat s dĺžkou 0,05s. Týmto spôsobom boli pozorované reakcie konvertorov, ako sa vysporiadajú s náhlou zmenou parametrov siete a či budú schopné dostať sa do ustáleného stavu.



Obr. 7 Približná časť siete

Na Obr. 7 je znázornená časť schémy, kde sú viditeľné výkonové toky vo vedeniach. Taktiež je možné vidieť PV farmu, ktorá je zložená z komponentov knižnice programu NEPLAN. Konkrétne ide o fotovoltaický panel (kde boli zadané technické parametre  $V_{pp}$ ,  $I_{pp}$ ,  $V_{oc}$ ,  $T$  a podobne), RC filter (filtrovanie vyšších harmonických) a PWM regulátor, potrebný na striedanie jednosmerného napätia na striedavé. Tento súbor prvkov tvorí v programe NEPLAN model bloku fotovoltaickej elektrárne.

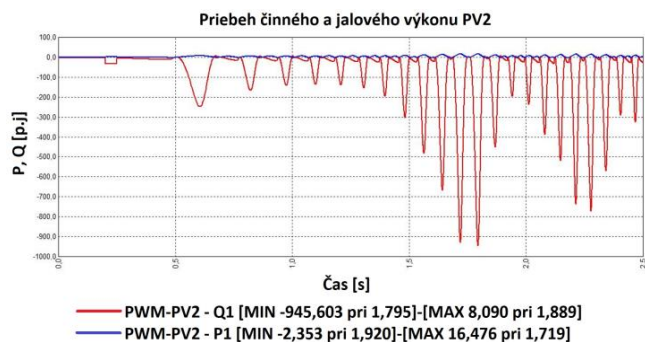
V nasledujúcich simuláciách sú znázornené priebehy činných a jalových výkonov konvertorov a ich schopnosť reakcie na trojfázový skrat vyvolaný vo zvolenom uzle. Sieť bola pred skratom v ustálenom stave, kde každá z PV fariem dodávala konštantný výkon a vplyvom nastaveného skratu boli pozorované zmeny dodávaného výkonu jednotlivými farmami.



Obr. 8 Priebeh činného a jalového výkonu PV 1

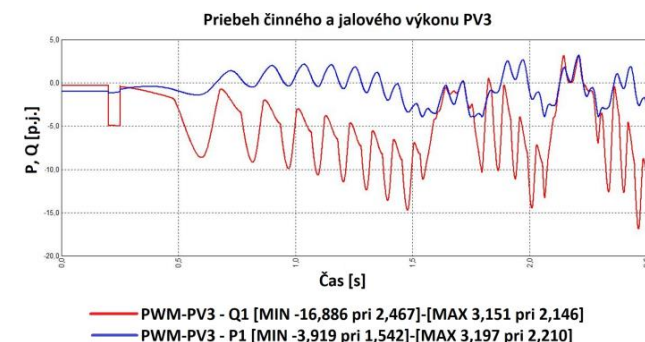
Na Obr. 8 je znázornený priebeh činného a jalového výkonu farmy PV1 v pomerných jednotkách. Pred skratom bol dodávaný činný výkon na úrovni -0,83 p.j., čo je ekvivalent dodávaných 83 MW.

Jalový výkon bol na úrovni -1,81 p.j., čo predstavuje 181 MVar. V momente skratu v čase 0,2 s je viditeľný pokles jalového výkonu. Skrat bol odstránený v čase 0,25 s. Následne je viditeľné kolísanie činného a najmä jalového výkonu, ktorý sa so zvyšujúcim sa časom nedokázal ustátiť. V takomto prípade je potrebné urýchlené odpojenie fotovoltaickej elektrárne zo siete.



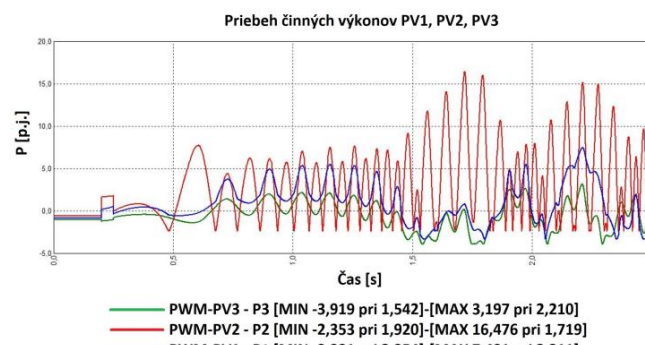
Obr. 9 Priebeh činného a jalového výkonu PV 2

Z pohľadu farmy PV 2 došlo po odstránení poruchy k ustáleniu, avšak iba v rozmedzí časov 0,25-0,5 s. Následne došlo k rozkolísaniu výkonov. Pred skratom bol dodávaný farmou PV 2 činný výkon 60 MW (-0,6 p.j.) a jalový výkon 380 MVar (-3,8 p.j.). Najväčší kmit jalového výkonu bol zaznamenaný v čase 1,795 s.



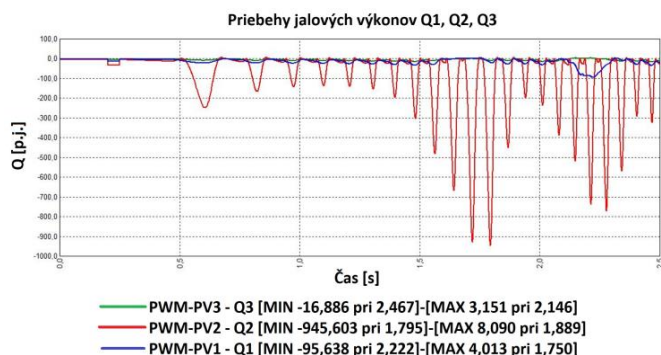
Obr. 10 Priebeh činného a jalového výkonu PV 3

Z Obr. 10 je zrejme, že podobne ako v predošlých prípadoch ani farme PV 3 sa nepodarilo po odstránení skratu ustátiť hodnoty činného a jalového výkonu. Hodnota činného výkonu bola v ustálenom stave pred skratom 100 MW (-1 p.j.). Hodnota jalového výkonu bola 29 MVar (-0,29 p.j.).



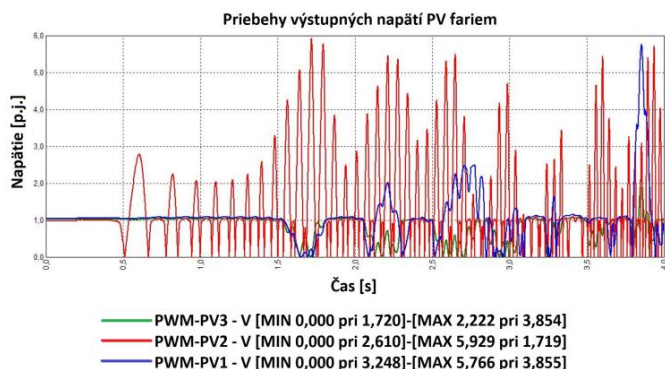
Obr. 11 Priebeh činných výkonov PV 1, PV 2, PV 3

Pri porovnaní činných výkonov všetkých troch fotovoltaických zdrojov na Obr. 11 je možné vidieť rozdielne správanie sa všetkých troch elektrární. Suverénne najvyššie kmity boli zaznamenané elektrárnou PV 3.



Obr. 12 Priebeh jalových výkonov Q1,Q2,Q3

Na Obr. 12 sú znázornené priebehy jalových výkonov všetkých troch PV fariem. S prehľadom najväčší výkyv bol zaznamenaný pri jalovom výkone PV 2. Maximálna hodnota výkyvu bola približne desaťkrát vyššia ako pri farmách PV 1 a PV 3. Takýto veľký rozdiel bol spôsobený tým, že farma PV 2 dodávala najväčší výkon do siete.



Obr. 13 Priebeh výstupných napätí PV fariem

#### IV. ZÁVER

Cieľom článku bolo poukázať na problematiku spojenú s pripájaním obnoviteľných zdrojov energie do elektrizačných sústav. Na základe toho bol v programe NEPLAN vytvorený model siete, do ktorej boli pripojené fotovoltaické elektrárne aj veterná farma. Po pripojení obnoviteľných zdrojov energie do elektrizačnej sústavy dochádza k množstvu nových okolností, ktoré je potrebné vyšetriť. V spomenutých simuláciách bol nastavený trojfázový skrat. Touto cestou boli pozorované reakcie konvertorov, akým spôsobom sa vysporiadajú s náhlou zmenou parametrov siete a či sa budú schopné opätovne dostať do ustáleného stavu. Konvertory vplyvajú omnoho menej na oscilovanie výkonu v sústave behom abnormálnych stavov, ako napríklad skratov. Regulátory obsahujúce riadiace jednotky pre polovodičové spínacie zariadenia sú schopné pozitívne vplyvať na reguláciu toku výkonu. Vďaka modernej technológii vstupuje do hry výkonová elektronika, ktorá na seba preberá čoraz dôležitejšiu úlohu v ES. Tieto zariadenia sú veľmi rýchle a majú takmer okamžitú spätnú

odozvu aj pri prechodných dejoch. Pri vysokých napätiach a prúdoch sú konvertory vypínane a veľmi rýchlo odpájané zo siete – výkonové vypínače sú taktiež špeciálne prispôbené týmto prvkom, pričom sami obsahujú (môžu obsahovať) výkonové polovodičové zariadenia [4], [7], [12], [14].

#### POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-19-0576.

#### LITERATÚRA

- [1] KOLCUN, M., DŽMURA, J., MEŠTER, M., PAVLÍK, M. Elektrárne. Technická univerzita v Košiciach, 2016. 189 s.
- [2] TRZYNADLOWSKI, A. Power Electronic Converters and Systems: Frontiers and applications. Londýn : The Institution of Engineering and Technology, 2016. 619 s. ISBN 978-1-84919-826-4
- [3] RIBICKIS, L., RANKIS, I., PEUTEMAN, J. a i. Power Electronics. Riga : RTU Press, 2015. 277 s. ISBN 978-9934-10-602-6
- [4] HOLMES, G., LIPO, T. Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. Hoboken, NJ : Wiley – IEEE Press, 2003. 744 s. ISBN 0-471-20814-0
- [5] GÖNEN, T. Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design. Boca Raton, FL : CRC Press, 2014. 1053 s. ISBN 978-1-4822-3222-6
- [6] RIBICKIS, L., ŽUKOWSKI, P. a i. Energy Saving Technologies. Riga : RTU Press, 2015. 238 s. ISBN 978-9934-10-605-7
- [7] LUND, H. Renewable Energy Systems: The Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions. Londýn : Academic Press, 2009. 296 s. ISBN 978-0-12-375028-0
- [8] PEAKE, S. Renewable Energy: Power for a sustainable future. Oxford : University Press, 2018. 639 s. ISBN 978-0-19-875975-1
- [9] BOYLE, G. Renewable Energy: Power for a sustainable future. Oxford : University Press, 2004. 443 s. ISBN 0-19-926178-4
- [10] KALTSCHMITT, M., STREICHER, W., WIESE, A. Renewable Energy: Technology, Economics and Environment. Berlín : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 535 s. ISBN 978-3-540-70947-3
- [11] ZHU, J. Optimization of Power System Operation. Hoboken, NJ : Wiley – IEEE Press, 2015. 629 s. ISBN 978-1-118-85415-0
- [12] SAUER, P., PAI, M. Power System Dynamics and Stability. New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1998. 353 s. ISBN 0-13-678830-0
- [13] TEODORESCU, R., LISERRE, M., RODRIGUEZ, P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. West Sussex, UK : John Wiley & Sons, 2011. 385 s. ISBN 978-0-470-05751-3
- [14] DOKIČ, B., BLANUŠA, B. Power Electronics: Converters and Regulators. Berlín : Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2015. 595 s. ISBN 978-3-319-38279-1
- [15] BLAABJERG, F. Control of Power Electronic Converters and Systems. Londýn : Elsevier Inc., 2018. 541 s. ISBN 978-0-12-816136-4
- [16] CAPCARA, P. Akumulácia elektrickej energie. : Bakalárska práca. Košice: TU, 2017. 52 s.
- [17] CAPCARA, P. Využitie oze v es so zameraním na dynamické vplyvy a stabilitu. : Diplomová práca. Košice: TU, 2020. 68 s.

#### ADRESY AUTOROV

Vladimír Kohan, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [vladimir.kohan@tuke.sk](mailto:vladimir.kohan@tuke.sk)

Peter Capcara, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [peter.capcara@student.tuke.sk](mailto:peter.capcara@student.tuke.sk)

Zsolt Čonka, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 042 10, Slovenská Republika, [zsolt.conka@tuke.sk](mailto:zsolt.conka@tuke.sk)

Michal Kolcun, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [michal.kolcun@tuke.sk](mailto:michal.kolcun@tuke.sk)