

Stanislav Ilenin

## Fotovoltaické elektrárne

Fotovoltaické elektrárne (FVE) sú slnečné elektrárne, ktoré využívajú priamu premenu slnečného žiarenia na elektrickú energiu pomocou fotovoltaických (FV) článkov. Základom premeny je vnútorný fotoelektrický jav polovodičového článku. Proces premeny energie je priamy a neuvolňujú sa pri ňom žiadne škodlivé emisie, vrátane emisií skleníkových plynov. Fotovoltaické elektrárne sa pripájajú do distribučnej sústavy.

Kľúčové slová: fotovoltaika, fotovoltaické články, fotovoltaické moduly, fotovoltaické elektrárne, striedače

### I. ÚVOD

Pri fotoelektrickom jave pri dopade svetla (fotónov) na polovodičový materiál sa uvoľňujú voľné nosiče elektrického náboja, ktoré vytvárajú rozdielny potenciál. Po pripojení vonkajšieho obvodu preteká prúd, ktorý vykonáva prácu. Pri osvetlení polovodičového materiálu dochádza k absorpcii žiarenia, ktoré vedie ku generovaniu nadbytočných a nerovnovážnych nosičov náboja. Pri absorpcii fotónu sa uskutoční vnútorný prechod elektrónu medzi valenčným a vodivostným pásmom, vzniká pár elektrón - diera. Vďaka nerovnováhe koncentrácií elektrónov a dier na rozhraní P-N prechodu vzniká difúzne elektrické pole. Páry elektrón - diera sú týmto difúznym poľom separované a na elektródach diódy vzniká napätie, ktoré pretláča prúd do vonkajšej záťaže.

### II. MATERIÁLY A TECHNOLOGIE

Na výrobu fotovoltaických článkov sa používajú rôzne materiály a technológie, najrozšírenejším a najdlhšie používaným je kremík. Používajú sa jeho rôzne modifikácie. Okrem používaných polovodičových materiálov sa fotovoltaický jav skúma aj u oxidov kovov a organických materiáloch. Materiály fotovoltaických článkov [1]:

- monokryštalický kremík,
- polykryštalický kremík,
- hydrogenizovaný kremík,
- arzenid gália,
- telurid kademnatý.

U všetkých týchto používaných materiálov je podstatný problém pomer ceny a výkonu. Z uvedeného dôvodu je snaha o zvyšovanie účinnosti článkov napríklad lepším využitím slnečného spektra pomocou viacerých polovodičových vrstiev nad sebou, ktoré sú citlivé na rôzne vlnové dĺžky a znižovaním strát, ktoré a rozlišujú na elektrické a optické. Optické straty sú spôsobené tým, že časť slnečného žiarenia sa po dopade na povrch polovodiča odráža späť do priestoru. Aby sa zamedzilo týmto stratám, povrch článkov sa upravuje nanášaním rôznych antireflexných vrstiev, alebo úpravou hladkého a lesklého povrchu tak, aby sa znížila jeho odrazivosť. Elektrické straty sú tvorené prechodom vyprodukovaného prúdu cez kontakty. Je dôležité aby tieto kontakty kládli prúdu čo najmenší odpor, ale zároveň keďže sa nachádzajú v osvetľovanej časti článku, musia ho čo najmenej zatieňovať [1].

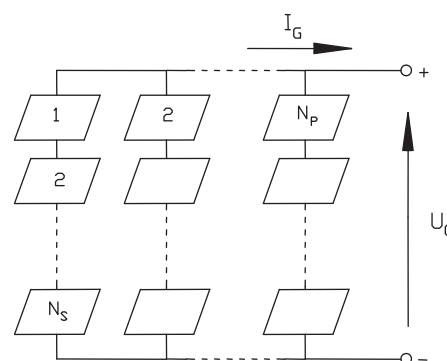
Napätie naprázdno jedného článku je len 0,35 až 0,7 V, ale prúd môže dosahovať aj niekoľko ampérov [1]. Pre praktické využitie je potrebné tieto články spájať do sériovo-paralelných kombinácií a tak vznikajú tzv. moduly alebo panely.

Fotovoltaické články sa sériovo-paralelnou kombináciou spájajú do panelov, alebo tiež nazývaných modulov. Skupina týchto modulov sa nazýva string. Fotovoltaické moduly vyrábajú jednosmerné napätie, ktoré je potrebné pomocou striedačov previesť na napätie striedavé o príslušnej amplitúde a frekvencii. Cez elektromer sa výkon vyvedie do elektrickej siete a to buď priamo, alebo pomocou transformátora.

### III. FOTOVOLTICKÉ MODULY

Fotovoltaické články sa zostavujú do fotovoltaických modulov, pretože samotné články majú malý výkon, kde spomínané napätie jedného článku je okolo 0,5 V a prúd závisí od veľkosti plochy. Spájanie článkov spôsobí to, že generované napätie a prúd sa násobí ich počtom. Pri konštrukcii FV modulu je dôležité aby [11]:

- pospájané články boli identické a pracovali pri rovnakých podmienkach, t.j. teplota, osvetlenie;
- úbytky napätia na vodivých spojeniach boli čo najmenšie.



Obr. 1 Sériovo – paralelné spájanie fotovoltaických článkov do fotovoltaického modulu [11]

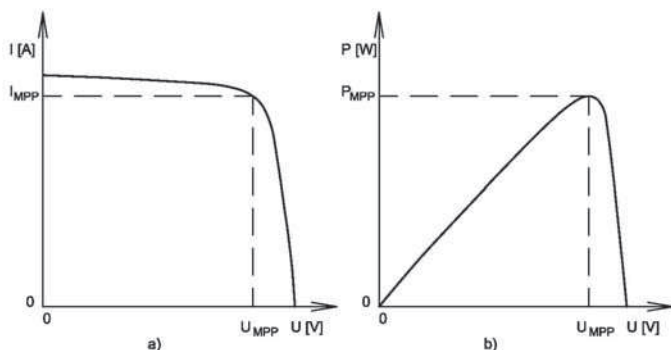
V prípade ak by fotovoltaické články boli rozdielne, s rôznymi vnútornými odporami, tak pri sériovo-paralelnom spájaní článkov do modulov by celkový výkon modulu závisel od rozloženia daných fotovoltaických článkov s rôznymi parametrami. Napríklad maximálna hodnota elektrického prúdu v sériovej vetve je obmedzená najvyšším vnútorným odporom fotovoltaického článku zapojeného v sérii. Prúdy vo vetvách nie sú rovnaké. Celkový prúd fotovoltaického modulu je daný súčtom prúdov v jednotlivých vetvách.

Fotovoltaické moduly sa delia z hľadiska materiálového zhotovenia v zásade na [12]:

- Monokryštalické moduly – ich účinnosť pre FVE je približne 14 – 18 %

- Polykrystalické články - ich účinnosť je pre FVE od 11 - 14 %
- Tenkovrstvové moduly vo viacerých variáciách výroby - ich účinnosť je od 5 do 11 %

Pre FV modul je možné zostrojiť V-A charakteristiku a výkonovú charakteristiku.

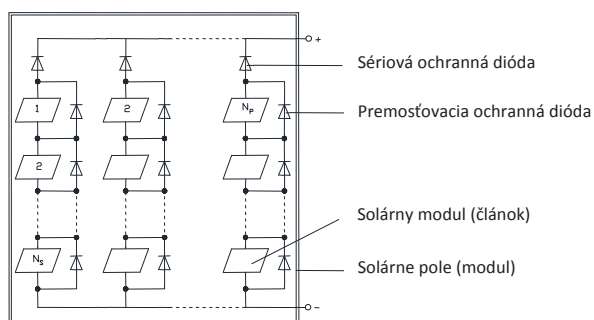


Obr. 2 a) V-A charakteristika FV modulu, b) výkonová krivka FV modulu

Z V-A charakteristiky FV modulu (Obr. 2a) vyplýva, že FV modul je zdrojom prúdu, ktorý sa úmerne mení v závislosti od intenzity dopadajúceho osvetlenia. Výkonová krivka (Obr. 2b) so zvyšovaním napätia úmerne narastá až do bodu MPP, ktorý sa nazýva bodom maximálneho výkonu. Tento bod je veľmi dôležitý, pretože vtedy FV článok dodáva pri danej intenzite osvetlenia maximálny výkon [12]. Zároveň pri tomto bode tečie FV modulom prúd maximálneho výkonového bodu. Po prekročení MPP výkon aj prúd náhle klesajú k nule. Vyhľadávanie tohto bodu pri rôznych vonkajších podmienkach zabezpečuje menič, pomocou svojho softvéru.

Ďalšou dôležitou vlastnosťou FV modulov je to, že napätie článkov sa výrazne mení v závislosti od vonkajšej teploty. Pri nízkej vonkajšej teplote je napätie podstatne vyššie ako pri teplote 25 °C, čo je menovitá hodnota teploty udávaná pre moduly výrobcom [12].

Počas prevádzky môže nastať situácia, že solárny modul je zatienený napr. budovou, stromom atď. V takom prípade sa modul začne správať ako spotrebič, prechodom prúdu sa zohrieva a môže dôjsť až k jeho zničeniu. Riešením tohto problému je použitie ochranných diód [11]:



Obr. 3 Zapojenie ochranných diód pri solárnych aplikáciách

V prípade sériového zapojenia modulov sa k nim paralelne zapoja premostovacie diódy, ktorých úlohou je v čase zatienenia viesť elektrický prúd, čím sa zmenší napätie sériového obvodu. V čase normálneho osvetlenia dióda nemá žiadnu funkciu ani žiadne negatívne vplyvy.

V prípade paralelne zapojených solárnych modulov sa z toho istého dôvodu používajú sériové diódy.

V praxi pri sériovo-paralelnom spájaní modulov sa používajú ako premostovacie tak aj sériové diódy.

Solárne články sú krehké a ich kontakty podliehajú chemickým vplyvom čoho dôsledkom je korózia, prípadne oxidácia. Solárne články sú umiestnené vo vonkajšom prostredí s minimálnou údržbou. Z tohto dôvodu solárne panely musia odolávať poveternostným vplyvom, ako je teplota, vlhkosť, prašnosť, žiarenie, po celú dobu svojej životnosti, ktorá podľa prognóz výrobcov je 20 až 30 rokov. Preto musí byť vhodne navrhnutá samotná konštrukcia panelov a výber materiálov.

#### IV. STRIEDAČE

Striedač premieňa jednosmerný prúd vyrobený FVE na prúd striedavý o danej frekvencii. Musí dodávať čo najvyšší výkon. Z hľadiska optimálnej činnosti FVE je potrebné vybrať správny striedač. Najdôležitejšie faktory výberu striedača [12]:

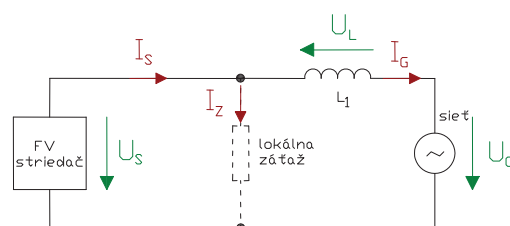
- výkon FVE,
- tvar pozemku,
- umiestnenie transformátora,
- typ FV článkov.

Z pohľadu výberu striedača pre FVE, je možné striedače rozdeliť na [12]:

- Decentralizované - používajú sa hlavne pre fotovoltaické elektrárne do výkonu 1MW. Jedná sa o väčší počet menších striedačov, ktoré sú pripájané k stringom. Počet stringov na jeden menič je menší a závisí od výkonu striedača, ako aj od jeho dovoleného napätia.
- Centralizované - sa používajú hlavne pre elektrárne s väčšími výkonmi ako 1MW. Jedná sa o centrálny striedač pre viac stringov o väčšom výkone, kde je predpoklad vyššej účinnosti. Nevýhodou je, že pri poruche striedača sa stráca celý výkon.

Fotovoltaický striedač môže obsahovať buď napäťové alebo prúdové riadenie.

Napäťové riadenie striedača



Obr. 4 Náhradná schéma FV striedača s napäťovým riadením

Výstup z FV striedača sa správa ako napäťový zdroj a v dôsledku veľkej zmeny napätia podľa času musí mať pripojenú indukčnú záťaž. Táto tlmivka oddeľujúca napätie striedača od napätia siete je pre činnosť nevyhnutná. Napätie na tlmivke  $U_L$  je riadené tak, aby bol sieťový prúd  $I_G$  požadovanej hodnoty [13].

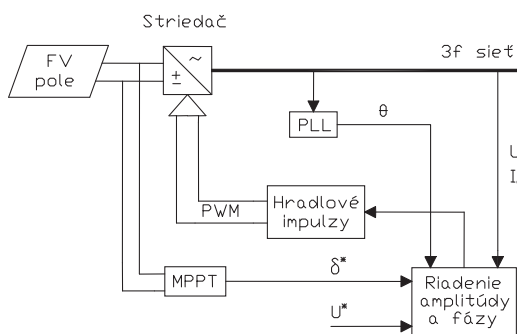
Striedač umožňuje tok činného a jalového výkonu oboma smermi, to znamená, že činný a jalový výkon je dodávaný do siete (záporne znamienko) alebo činný a jalový výkon dodáva sieť (kladné znamienko).

Zaťažový uhol  $\delta$  je uhol medzi výstupným napätím striedača a napätím siete.

Činná zložka prúdu závisí priamo úmerne od napätia striedača  $U_S$ , sínusu zaťažovacieho uhla  $\delta$  a nepriamo úmerne od reaktancií  $x_L$ . Pri konštantnej hodnote napätia  $U_S$ , činná zložka prúdu sa mení len v závislosti od zaťažovacieho uhla  $\delta$  [13]:

- Pre kladný zaťažový uhol  $\delta$ , je činná zložka prúdu záporná – činný výkon sa dodáva do siete.
- Pre záporný zaťažový uhol  $\delta$ , je činná zložka prúdu kladná – činný výkon sa zo siete odoberá.

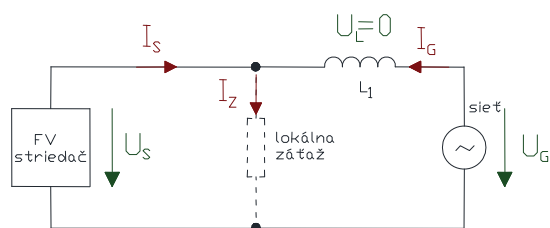
Jalová zložka sieťového prúdu závisí od veľkosti napätí  $U_S$  a  $U_G$  a mení sa s kosinusom zaťažového uhla  $\delta$  [13]. Tok výkonu je riadený len pomocou zaťažového uhla  $\delta$ , keďže napätie striedača  $U_S$  musí byť konštantné.



Obr. 5 Bloková schéma napätového riadenia striedača

Pre napätové riadenie je potrebné snímať hodnoty napätia, prúdu siete a pomocou synchronizačného bloku PLL aj referenčnú hodnotu fázy siete. Riadiacimi veličinami sú zaťažovací uhol  $\delta$ , ktorý je daný blokom zabezpečenia maximálneho výkonu FVE MPPT a referenčné napätie  $U$ . Všetky tieto veličiny smerujú do bloku riadenia amplitúdy a fázy, kde sa pomocou nich nastaví činný výkon dodávaný do siete. Veľkosť napätia na svorkách striedača sa ovláda nezávisle ďalším súborom ovládacích prvkov cez hradlové impulzy [14].

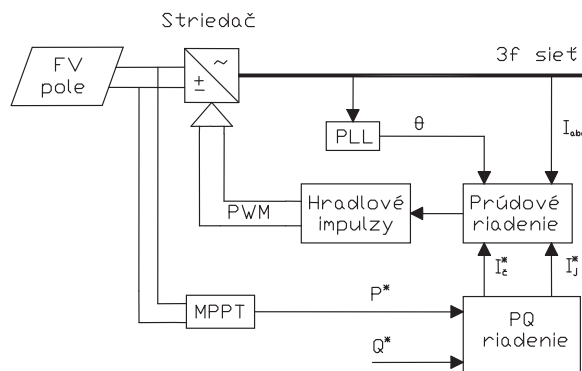
Prúdové riadenie striedača



Obr. 4 Náhradná schéma FV striedača s prúdovým riadením

Pri využití prúdového striedača tlmivka  $L_1$  nie je potrebná. Tento striedač pracuje ako zdroj prúdu, na svojom výstupe vytvára požadovanú hodnotu prúdu  $I_S$  v závislosti od referenčnej hodnoty zodpovedajúcej požadovanému výkonu [13]. Prúd striedača  $I_S$  je možné nezávisle meniť.

Rovnako ako pri napätovom riadení sa sleduje hodnota fázy siete pomocou bloku PLL a prúd siete. Riadiacimi veličinami sú činný výkon  $P$  vystupujúci z bloku MPPT, ktorý zabezpečuje maximálny možný výkon FVE a jalový výkon  $Q$ , ktorý sa mení v závislosti od kompenzácie účinníka alebo regulácie sieťového napätia.



Obr. 6 Bloková schéma prúdového riadenia striedača

Prúdové riadenie striedača umožňuje nezávislé riadenie činného a jalového výkonu, preto výstupom z riadenia je činná zložka prúdu  $I_d$  a jalová zložka prúdu  $I_q$ . Blok prúdového riadenia zabezpečí požadované hodnoty týchto zložiek prúdov. Prúdové riadenie pomocou bloku hradlových impulzov riadi striedač [14].

Tab. 1 Porovnanie napätového a prúdového riadenia FV striedača

	Napätové riadenie	Prúdové riadenie
Cieľ riadenia	striedavé napätie	striedavý prúd
Skratový prúd	vysoký	nízky
Samostatná činnosť	možná	nemožná
Kompenzácia účinníka	nevhodné	vhodné
Stabilizácia napätia	možná	nemožná
Štart z tmy	možný	nemožný

## V. TRANSFORMÁTORY, KÁBELÁŽ, ELEKTROMERY

Výkonový transformátor nn/vn môže výrazne ovplyvniť účinnosť FVE. Napríklad pri výkone FVE 1MW a účinnosti transformátora 96% sa pri výrobe elektriny stratí 4% výkonu čo predstavuje až 40 kW. Týmto je zdôvodnená snaha používať transformátory s čo najvyššou účinnosťou. Jedna sa o transformátory, ktoré majú jadra zo špeciálnych plechov (účinnosť 90%) alebo jadra z amorfných kovov (účinnosť až 99,2% [13].

Prierezy káblov sa navrhujú hlavne s ohľadom na úbytky napätí, ktoré sú 2 až 4%. Optimálne je, keď káble od striedačov k transformátoru sú rovnako dlhé, čo v praxi je náročne splniť, keďže väčšinou transformátor sa nachádza pri okraji pozemku. Pre dosiahnutie čo najmenších úbytkov napätia, káble zo striedačov nesmerujú priamo k transformátoru ale do zlučovacích skriniek, kde sa zlúčia káble z viacerých striedačov. Počet zlúčení je daný výkonom striedačov [12].

Vo všeobecnosti platí, že dodávka elektriny z každého zdroja je meraná 4 kvadrantovým elektromerom, pričom pre polopriame a nepriame meranie sa volia elektronické elektromery, doplnené

o koncentrátor dát kvôli pripojeniu do systému automatického zberu dát [5]. O umiestnení a spôsobe zapojenia meracieho zariadenia rozhoduje prevádzkovateľ distribučnej sústavy, pričom prihliada sa na požiadavku prevádzkovateľa zdroja na spôsob prevádzky [5]:

- celá výroba elektrickej energie sa dodáva do distribučnej sústavy,
- len prebytok elektrickej energie sa dodáva do distribučnej sústavy.

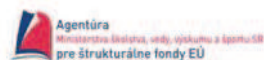
V súčasnosti sa uprednostňuje výstavba fotovoltaických elektrární na strešných konštrukciách budov.

## VI. ZÁVER

Fotovoltaika, ktorá využíva slnečné žiarenie, sa stala v celosvetovom meradle jedným z najrýchlejšie sa rozvíjajúcich smerov vzhľadom na ročný nárast inštalovaného výkonu. Výroba elektrickej energie z fotovoltaických elektrární ročne vzrastá až o 30 %. Využívanie Slnka ako zdroja energie, má veľkú výhodu oproti fosílnym palivám pretože je najekologickejším a nevyčerpatelným zdrojom.

## POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Centrum výskumu účinnosti integrácie kombinovaných systémov obnoviteľných zdrojov energií, s kódom ITMS: 26220220064, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ.

## LITERATÚRA

- [1] Kolcun, M. – CHladný, V. – Mešter, M. – Cimbala, R. – Tkáč, J. – Hvizdoš, M. – Rusnák, J.: Elektrárne. Košice: TU – FEL, 2004, 453s. ISBN 80-8073-704-5.
- [2] Kim, K.A.; Krein, P.T.: Photovoltaic converter module configurations for maximum power point operation. 2010 Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 12-13 Feb. 2010, pp. 77 - 82, Location: Urbana-Champaign, IL, ISBN: 978-1-4244-5902-5. DOI: 10.1109/PECI.2010.5437152.
- [3] Contact Layers. Steirer, K.X.; Widjonarko, N.E.; Sigdel, A.K.; Lloyd, M.T.; Ginley, D.S.; Olson, D.C.; Berry, J.J.; *Optimization of Organic Photovoltaic Devices Using Tuned Mixed Metal Oxide*, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, Issue Date: 20-25 June 2010, pp. 000102-000104, Honolulu, HI ISSN: 0160-8371, Print ISBN: 978-1-4244-5890-5, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614501
- [4] Zákon č. 309/2009 o podpore obnoviteľných zdrojov energie a vysoko účinnej kombinovanej výroby a o zmene a doplnení niektorých zákonov.
- [5] Východoslovenská distribučná, a.s.: Technické podmienky prevádzkovateľa distribučnej sústavy. November 2010. [online]. Dostupné na internete: <[http://www.vsd.sk/wps/PA\\_1\\_EMLKAB1A00E440ISIH6LI70040/content/vsd.G0000/doc/20101008-technicke-podmienky-pds.pdf](http://www.vsd.sk/wps/PA_1_EMLKAB1A00E440ISIH6LI70040/content/vsd.G0000/doc/20101008-technicke-podmienky-pds.pdf)>

- [6] Voľné prístupné na internete. [cit. 2012-1-20] <[www.sepsas.sk](http://www.sepsas.sk)>
- [7] Janiček, F. a kol.: Model trhu s elektrinou: Technické aspekty výroby, prenosu a distribúcie elektriny v Slovenskej republike. STU Bratislava, 2009, s. 114-117, ISBN 978-80-89402-11-3.
- [8] Szathmáry, P. – Kolcun, M.: Predikcia denných diagramov zaťaženia v ES s využitím umelých neurónových sietí. Edícia vedeckých spisov, FEI TU Košice, 2001, s. 25. ISBN 80-88964-80-6.
- [9] Liška, M. – Kovaľ, P. – Janiga, P. – Eleschova, Žaneta – Janiček, F.: Prevádzka NOZE v rámci bilančnej skupiny prevádzkovateľa distribučnej sústavy. In: ELEKTROENERGETIKA. Roč. 17, 2011, č. 2, s. 1-5.
- [10] Ministerstvo hospodárstva a výstavby SR: Národný akčný plán pre energiu z obnoviteľných zdrojov. 2010, 74s.
- [11] Dušička, P. – Hutňan, M. – Jeleznický, L. – Packa, Juraj – Šály, V. – Šulek, P.: Obnoviteľné zdroje energie: Biomasa – slnko – voda, Renesans, s.r.o, Pezinok, 2011, 304s. ISBN 978-80-89402-37-3.
- [12] VONSCHE: Návod na inštaláciu a údržbu meničov Fotocontrol 3F 400/12. [cit. 2012-2-12] Dostupné na internete: <[www.vonsch.sk](http://www.vonsch.sk)>
- [13] Pástor, M. – Dudřík, J.: Kaskádový fotovoltaický striedač pre distribuovaný zdroj elektrickej energie, článok, ELEKTROENERGETIKA, Vol.4, No.4, 2011, ISSN 1337-6756.
- [14] Pástor, M.: Striedač pre fotovoltaické systémy. Diplomová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2010. 133 s.
- [15] S. H. KO – S. R. LEE – H. DEHBONE – CH. NAYAR: A Comparative Study of the Voltage Controlled and Current Controlled Voltage Source Inverter for the Distributed Generation System, [online]. [cit. 2012-2-17]. Dostupné na internete: <<http://itee.uq.edu.au/~aupec/aupec05/AUPEC2005/Volume1/S073>>
- [16] Y. XUE – K. C. DIVIA – G. GRIEPEINTROG – M. LIVIU – S. SURESH – M. MANJREKAR: Towards Next Generation Photovoltaic Inverters, článok, 2011 IEEE
- [17] Liang, Zhigang; Guo, Rong; Wang, Gangyao; Huang, Alex: A new wide input range high efficiency photovoltaic inverter. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 12-16 Sept. 2010, pp. 2937 - 2943, Location: Atlanta, GA, USA, ISBN: 978-1-4244-5286-6, DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618217.
- [18] Morello, R.; Carbone, R.; De Capua, C.; Meduri, A.: Energy accounting in presence of unbalances: The case study of a Photovoltaic plant. 2010 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 3-6 May 2010, pp. 1145 - 1149, Location: Austin, TX, ISSN: 1091-5281, DOI: 10.1109/I2MTC.2010.5488135.
- [19] Koller, L.; Novak, B.; Tevan, G.: Heating Effects of Short-Circuit Current Impulses on Contacts and Conductors—Part I. IEEE Transactions on Power Delivery, Jan. 2008, Volume: 23, Issue: 1, pp. 221-227, ISSN: 0885-8977, DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905806.
- [20] Koller, L.; Novak, B.; Tevan, G.: Heating Effects of Short-Circuit Current Impulses on Contacts and Conductors—Part II. IEEE Transactions on Power Delivery, Jan. 2008, Volume: 23, Issue: 1, pp. 228-232, ISSN: 0885-8977, DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905807.
- [21] Patcharaprakiti, N.; Kirtikara, K.; Chenvidhya, D.; Monyakul, V.; Muenpinij, B.: Modeling of Single Phase Inverter of Photovoltaic System Using System Identification. 2010 Second International Conference on Computer and Network Technology (ICCNT), 23-25 April 2010, pp. 462 - 466, Location: Bangkok, ISBN: 978-0-7695-4042-9, DOI: 10.1109/ICCNT.2010.120.
- [22] Bannert, P.; Potůček, J.: Natáčecí fotovoltaický systém. [online] Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Varnsdorf. 2009. [citované 14.3.2011] Dostupné na <[http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS\\_013\\_cviceni/013\\_nataceci\\_fvs.pdf](http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS_013_cviceni/013_nataceci_fvs.pdf)>

## ADRESY AUTOROV

Stanislav Ilenin, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [stanislav.ilenin@tuke.sk](mailto:stanislav.ilenin@tuke.sk)