

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky



***Inteligentné riadenie výroby a spotreby elektriny  
z obnoviteľných energetických zdrojov 2011***

***Sekcia pri konferencii: 6. Medzinárodné vedecké sympóziu, ELEKTROENERGETIKA 2011,  
Stará Lesná, Vysoké Tatry***

**22. septembra 2011, Stará Lesná, Slovenská Republika**

**Editor:  
Prof. Ing. Michal Kolcun, PhD.**



PODPORUJEME VÝSKUMNÉ AKTIVITY NA SLOVENSKU  
PROJEKT JE SPOLUFINANCOVANÝ ZO ZDROJOV EÚ



© 2011, Technická univerzita v Košiciach  
ISBN 978-80-553-0736-7

**Inteligentné riadenie výroby a spotreby elektriny z obnoviteľných energetických zdrojov 2011**

Copyright © Košice 2011, Technická univerzita v Košiciach, Slovenská Republika.

ISBN 978-80-553-0736-7.

Všetky práva vyhradené. Vyrobené na Slovensku.

Náklad: 100 ks

Táto publikácia môže byť ďalej reprodukována pre výučbové a nekomerčné účely. Za obsah jednotlivých príspevkov zodpovedajú autori.

Citácia na túto publikáciu:

Inteligentné riadenie výroby a spotreby elektriny z obnoviteľných energetických zdrojov 2011. September 22, 2011. Stará Lesná, Slovenská Republika. Technická univerzita v Košiciach, 2011, ISBN 978-80-553-0736-7.

## **Inteligentné riadenie výroby a spotreby elektriny z obnoviteľných energetických zdrojov 2011 – Základné informácie**

### **Redakčná rada**

#### **Predseda:**

- prof. Ing. Michal Kolcun, PhD., Technická univerzita v Košiciach

#### **Členovia:**

- prof. Ing. Karol Marton, DrSc., TU v Košiciach
- prof. Ing. Roman Cimbala, PhD., TU v Košiciach
- prof. Ing. Irida Kolcunová, PhD., TU v Košiciach
- doc. Ing. Ľubomír Beňa, PhD., TU v Košiciach
- doc. Ing. Alexander Mészáros, PhD., TU v Košiciach
- Ing. Jozef Balogh, PhD., TU v Košiciach
- Dr. Ing. Bystrík Dolník, TU v Košiciach
- Ing. Jaroslav Džmura, PhD., TU v Košiciach
- Ing. Daniel Hlubeň, PhD., TU v Košiciach
- Ing. Marek Hvizdoš, PhD., TU v Košiciach
- Ing. Stanislav Ilenin, PhD., TU v Košiciach
- Ing. Juraj Kurimský, PhD., TU v Košiciach
- Ing. Dušan Medved', PhD., TU v Košiciach
- Ing. Jaroslav Petráš, PhD., TU v Košiciach
- Ing. Ján Tkáč, CSc.

#### **Technická podpora:**

- Dagmar Kramolišová, TU v Košiciach
- Ing. Dušan Medved', PhD., TU v Košiciach

## Obsah

<b>Ľubomír Beňa, Daniel Hlubeň</b> Energetická náročnosť predradníkov žiarivkových svetelných zdrojov	1
<b>Ľubomír Beňa, Daniel Hlubeň</b> Meranie svetelnotechnických a elektrických parametrov lineárnej žiarivky pri použití rôznych typov predradníkov	4
<b>Roman Cimbala</b> Design of Test Place for Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain	8
<b>Stanislav Ilenin</b> Fotovoltaické materiály	12
<b>Michal Kolcun</b> Photovoltaic Modules	16
<b>Dušan Medved'</b> Maximum Power Point Tracking System	21
<b>Alexander Mészáros</b> Možnosti trvalo udržateľnej elektroenergetiky	25
<b>Alexander Mészáros</b> Možnosti akumulácie elektrickej energie z OZE	29
<b>Ján Tkáč, Marek Hvizdoš</b> Meranie parametrov solárnych absorbérov	33
<b>Ján Tkáč, Marek Hvizdoš</b> Meranie parametrov slnečného žiarenia	36
<b>Dušan Medved', Michal Kolcun, Rastislav Stolárik, Štefan Vaško</b> Importance of Batteries for Photovoltaic Systems	40
<b>Dušan Medved', Michal Kolcun, Rastislav Stolárik, Štefan Vaško</b> Utilising of Batteries for Photovoltaic Systems	45

# Energetická náročnosť predradníkov žiarivkových svetelných zdrojov

Lubomír Beňa

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky  
a informatiky Technickej univerzity v Košiciach  
Košice, Slovenská republika  
lubomir.bena@tuke.sk

Daniel Hlubeň

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky  
a informatiky Technickej univerzity v Košiciach  
Košice, Slovenská republika  
daniel.hluben@tuke.sk

**Abstrakt**—Žiarivkové osvetlenie sa v súčasnosti používa prakticky v celej výrobnej a komunálnej sfére a vo veľkej miere aj v domácnostiach. Znížiť systémový príkon žiarivkového osvetlenia na minimum a v konečnom dôsledku dosiahnuť úspory elektrickej energie je cieľom smernice EÚ č. 2000/55/EC o požiadavkách na energetickú účinnosť predradníkov pre žiarivky.

**Keľúčové slová**—žiarivka; predradník; energetická trieda

**Abstract**—Fluorescent lighting is now used practically in all manufacturing and municipal sector, and largely also in the home. Reducing of system power consumption of fluorescent lighting to a minimum and ultimately to achieve energy savings is the aim of EU Directive no. 2000/55/EC on energy efficiency requirements for ballasts for fluorescent lighting. (Energy demand of ballasts for fluorescent lamps)

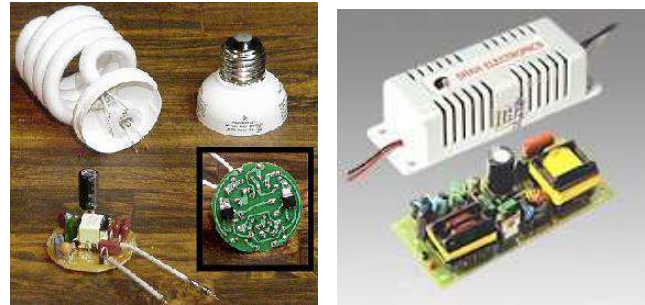
**Keywords**—fluorescent lamp; ballast; energy class

## I. DEFINÍCIA A ROZDELENIE PREDRADNÍKOV

Predradníkom sa na účely posudzovania energetickej účinnosti rozumie zariadenie zaradené medzi napájaciu sústavu a jeden, resp. viac výbojkových zdrojov, ktoré indukčnosťou, kapacitou alebo ich kombináciou okrem iného zabezpečuje obmedzenie prúdu výbojového zdroja na požadovanú hodnotu. Predradník sa môže skladať z jednej alebo viacerých oddelených častí, môže obsahovať aj prostriedky na transformáciu napätia a príslušenstvo, ktoré pomáha získať zapalovacie napätie a predhrievací prúd, znižujú stroboskopický efekt, upravujú účinnosť alebo potláčajú rádiové rušenie.

Druhy predradníkov podľa ich umiestnenia rozlišujeme nasledovne:

- samostatný predradník - predradník, ktorý sa môže namontovať oddelene od svietidla bez prídavného krytu. Môže sa skladať zo vstavaného predradníka vo vhodnom kryte, ktorý zabezpečuje potrebnú ochranu podľa príslušného označenia.
- vstavaný predradník - predradník určený iba k zabudovaniu do svietidla, krytu apod.
- integrovany predradník - predradník, ktorý tvorí nedeliteľnú časť svetelného zdroja [1].



Obrázok 1 Elektronické predradníky. a) Integrovaný predradník v kompaktné žiarivke [5], b) samostatný predradník s otvoreným krytom [6]

Výhody elektronického predradníka:

- okamžitý štart bez blikania,
- stabilný výboj,
- úplné potlačenie stroboskopického javu (30 - 40 kHz),
- zvýšenie merného výkonu (rádovo o 10 %),
- časté spínanie neskracuje životnosť svetelného zdroja,
- menšie rozmery, menšia hmotnosť,
- možnosť stmievania (špeciálny predradník),
- menšie energetické straty, malá vlastná spotreba.

Elektronické predradníky tiež predhrievajú vlákna elektród, čím umožňujú ľahšiu emisiu nosičov nábojov. Takáto prevádzka je šetrnejšia a predlžuje životnosť žiarivky. Dnes sú pre nové typy žiariviek T5 (s priemerom trubice 16 mm) k dispozícii inteligentné elektronické predradníky, ktoré dokážu automaticky rozpoznať typ pripojenej žiarivky a nastaviť pre ňu optimálne parametre.

## II. KLASIFIKÁCIA PREDRADNÍKOV PRE ŽIARIVKOVÉ SVETELNÉ ZDROJE

Pre výpočet najväčšieho príkonu obvodu predradníka svetelného zdroja pre konkrétny typ predradníka musí byť predradník najskôr zatriedený podľa Tab. 1. [2], [3].

TABLE I. KATEGÓRIE PREDRADNÍKOV PRE ŽIARIVKOVÉ SVETELNÉ ZDROJE [2]

Kategória predradníka	Svetelný zdroj, pre ktorý je predradník určený
1	lineárna žiarivka, kruhová žiarivka
2	kompaktná žiarivka 2-trubicová
3	kompaktná žiarivka 4-trubicová, plochá
4	kompaktná žiarivka 4-trubicová
5	kompaktná žiarivka 6-trubicová
6	kompaktná žiarivka DD

Prehľad druhov žiariviek je na Obr. 2. [1].



Obrázok 2 Zásadné druhy žiariviek, a) lineárna žiarivka T8 (kategória 1), b) lineárna žiarivka T5, c) kompaktná žiarivka dvojtrubicová (kategória 2), d) kompaktná žiarivka štvortrubicová (kategória 4), e) kompaktná žiarivka šesťtrubicová (kategória 5), f) kompaktná žiarivka kruhová, g) kompaktná žiarivka DD (kategória 6) [1]

Okrem klasifikačnej schémy sa určuje kategória predradníka na základe druhu svetelného zdroja (žiarivky) a k vyjadreniu stupňa energetickej účinnosti predradníka sa používa aj označenie (resp. kategorizácia) predradníkov na základe indexu energetickej účinnosti EEI (angl. Energy Efficiency Index). Systém klasifikácie predradníkov na základe indexu energetickej účinnosti má 7 tried uvedených v Tab. 2. [8]

TABLE II. PŘÍKLAD INDEXU ENERGETICKEJ ÚČINNOSTI PREDRADNÍKOV PRE 36 W LINEÁRNE ŽIARIVKY [8]

EEI	Popis	Príkonnosť obvodu predradníka svetelného zdroja (W)
A1	Stmievateľný elektronický predradník (pri 100 % - 25 %)	≤ 19
A2	Nízkostratový elektronický predradník	≤ 36
A3	Elektronický predradník	≤ 38
B1	Nízkostratový klasický predradník s veľmi nízkymi stratami	≤ 41
B2	Nízkostratový klasický predradník	≤ 43
C	Klasický predradník so stredne vysokými stratami	≤ 45
D	Klasický predradník s veľmi vysokými stratami	> 45

Na Obr. 3 je uvedený príklad označenia indexu energetickej triedy EEI na predradníkoch. Na rozdiel od značky zhody CE, označenie energetickej triedy EEI nie je povinné, avšak prakticky všetci významnejší výrobcovia predradníkov tento systém uznávajú a predradníky označujú.



Obrázok 3 Základné druhy predradníkov pre žiarivky s označením indexu energetickej triedy EEI, a) klasický predradník (EEI: B až D) [7], b) elektronický predradník (EEI: A1 až A3) [4]

Nízkostratové klasické predradníky energetickej triedy B1 a B2 majú v porovnaní s klasickými predradníkmi tried C a D hrubšie medené vodiče (vodiče s väčším prierezom) a železné jadro s menším rozptylom. Toto konštrukčné zdokonalenie umožnilo znížiť vnútorné straty, a tak zvýšiť účinnosť predradníka.

Elektronické predradníky energetickej triedy A1, A2 a A3 predstavujú značný potenciál úspor energie, príkon obvodu predradníka svetelného zdroja pri 50 Hz môže byť dokonca menší ako menovitý príkon svetelného zdroja. To sa dosahuje vďaka vyššej účinnosti žiariviek pri vysokej frekvencii (> 20 kHz), príkon žiariviek klesne približne o 10 % a súčasne sa znížia aj straty v predradníku.

Stmievateľné elektronické predradníky sa klasifikujú do triedy EEI = A1 v prípade, že spĺňajú tieto podmienky:

- pri 100 % svetelného toku predradník splní aspoň požiadavky na energetickej triedu A3,
- pri 25 % svetelného toku sa celkový príkon rovná alebo je menší ako 50 % príkonu pri plnom svetelnom toku 100 %,
- predradník musí byť schopný znížiť svetelný tok na úroveň 10 % alebo menej maximálneho svetelného toku.

Index energetickej triedy EEI sa vzťahuje len na elektrický príkon obvodu predradníka a svetelného zdroja (meraný pri 25 °C), nevzťahuje sa na celé svietidlo, ktoré môže byť vybavené aj ďalšími elektrickými súčiastkami. EEI taktiež nie je možné zamieňať s účinnosťou svietidla, pri ktorej sa zohľadňujú aj optické vlastnosti (krivky svetivosti, jasy, clonenie) v závislosti od cieľa použitia.

Je potrebné upozorniť na skutočnosť, že klasické predradníky sú obvykle určené samostatne pre každý svetelný zdroj. Vynimkou sú len žiarivky s príkonom 18 W, ktoré sa v dvojici dajú prevádzkovať s jedným predradníkom pre žiarivku 36 W. Na rozdiel od uvedeného, podobné technické obmedzenia sa na elektronické predradníky nevzťahujú, čo vyplýva z ich princípu a konštrukcie. Existujú predradníky pre jeden, dva a viac svetelných zdrojov, pričom tieto predradníky majú pre každý svetelný zdroj samostatné svorky.

### III. ZÁVER

Článok pojednáva o vlastnostiach predradníkov žiarivkových svetelných zdrojov a ich kategorizácii do jednotlivých energetických tried. Výberom vhodného predradníka je možné dosiahnuť jednak zabezpečenie optimálnych pracovných parametrov svetelných zdrojov, ako aj zníženie spotreby elektrickej energie pri ich prevádzke.

### POĎAKOVANIE

Táto publikácia vznikla 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 / Project je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ.

### LITERATÚRA

- [1] Sokanský, K., Novák, T., Gašparovský, D., Šnobl, J., Diviš, D.: Úspory energie v osvetľovaní při hodnocení energetické náročnosti budov. VŠB TU Ostrava 2009.
- [2] Smernica Európskeho Parlamentu a Rady 2000/55/ES z 18. septembra 2000 o požiadavkách na energetickú účinnosť predradníkov pre žiarivkové osvetlenie. Dostupné na internete: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=DD:12:02:32000L0055:SK:PDF>
- [3] Energy efficiency: energy efficiency requirements for ballasts for fluorescent lighting. Dostupné na internete: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/energy/energy\\_efficiency/127032\\_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/127032_en.htm)
- [4] Elektronický predradník triedy A2. Dostupné na internete: [http://www.elbea.sk/pictures/prilohy/1358\\_BL-EVG.pdf](http://www.elbea.sk/pictures/prilohy/1358_BL-EVG.pdf)
- [5] Dimmable Energy Saving Lightbulbs. Dostupné na internete: <http://www.reuk.co.uk/Dimmable-Energy-Saving-Lightbulbs.htm>
- [6] Electronic Ballast. Dostupné na internete: [http://www.maharashtrdirectory.com/catalogue/Electronic\\_Ballast.htm](http://www.maharashtrdirectory.com/catalogue/Electronic_Ballast.htm)
- [7] B2 T8 ballast. Dostupné na internete: [http://www.ecplaza.net/product/197555\\_1646365/b2\\_t8\\_ballast.html](http://www.ecplaza.net/product/197555_1646365/b2_t8_ballast.html)
- [8] Guide for the application of Directive 2000/55/EC on energy efficiency requirements for ballasts for fluorescent lighting [http://www.celma.org/archives/temp/CELMA\\_Ballast\\_Guide.pdf](http://www.celma.org/archives/temp/CELMA_Ballast_Guide.pdf)







- okamžitý zdanlivý výkon  $S$  [VA],
- okamžitý jalový výkon  $Q$  [Var],
- power factor,
- $\cos \varphi$ ,
- charakter záťaže.

Priebeh merania bol nasledovný. Každé zo zapojení trubice boli vždy samostatne pripojené na meracie okruhy analyzátoru kvality elektrickej energie. Na prístroji bolo nastavené meranie jednofázového uzemneného obvodu. Na primárnej strane predradníkov boli pripevnené prúdové a napäťové okruhy a kontakty meracieho prístroja. Samotný predradník bol potom uvedený do prevádzky na sieťovom napätí 230V 50Hz. Pri elektromagnetickom obvode s tlmivkou BTA 118 bol zopnutý obvod a po ustálení (cca 5 min.) boli odmerané spomínané parametre. Rovnako sa postupovalo aj pri elektronickom predradníku BE 136-2. Tieto zariadenia majú len dva režimy prevádzky – zapnutý (100 %) / vypnutý (0 %). Naproti tomu predradník HF-R TD 118 je digitálny DALI plynulo regulovateľný predradník. V spolupráci s ovládaním cez pripojený počítač bol tento predradník uvedený do prevádzky na plnú 100 % intenzitu. Postupne sa potom intenzita znižovala stále o 10 % nižšie až po hodnotu 10 %. Následne sa zmenšil krok znižovania na 2 % a týmto krokom sa pri meraní intenzita postupne znižovala až do stavu 0 %. Namerané a vypočítané výsledky sú uvedené v Tab.1 a porovnané s **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**

TABLE I. NAMERANÉ A PREPOČÍTANÉ HODNOTY PRE POROVNANIE PREVÁDZKY 18W TRUBICE S RÔZNYMI PREDRADNÍKMI

Meračné prístroje: 434 FLUKE (v.č.060900002) POWER QUALITY ANALYZER EXTECH EasyViewTM 33 (v.č.060901984) LIGHT METER	Regulačný stupeň	HFR stmievaťelný predradník typu "A1"																			
		0%	100%	0%	100%	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	8%	6%	4%	2%	1%	0%
intenzita svetla	E [lx]	0.0	1315.0	0.0	1527.0	1223.0	1191.0	1059.0	911.0	771.0	644.5	504.0	386.7	263.3	126.0	92.2	63.1	35.4	20.3	12.4	0.0
prepočítaný relatívny svetelný tok	$\Phi_{rel}$ [%]	0%	108%	0%	125%	100%	97%	87%	74%	63%	53%	41%	32%	22%	16%	8%	5%	3%	2%	1%	0%
nameraný napätie	U [V]	223.6	223.6	223.8	223.8	223.4	223.8	223.5	223.8	223.6	223.7	223.5	223.4	222.2	221.8	222.0	223.2	223.5	223.7	223.4	223.8
nameraný príkon	P [W]	0.0	28.4	0.0	16.9	14.9	14.6	12.9	11.2	9.7	8.5	7.3	6.1	4.9	3.5	3.2	3.2	3.1	3.0	3.2	0.4
prepočítaný relatívny príkon	$P_{rel}$ [%]	0%	191%	0%	113%	100%	98%	87%	75%	65%	57%	49%	41%	33%	24%	22%	21%	21%	20%	22%	3%
nameraný výkon	S [VA]	0.0	73.2	0.0	20.1	16.8	16.6	15.0	13.3	11.9	10.8	9.7	8.6	7.4	6.3	6.0	6.0	6.0	6.1	3.0	3.0
nameraný jalový výkon	Q [Var]	0.0	67.6	0.0	10.9	8.1	8.1	7.7	7.2	6.6	6.7	6.4	6.0	5.6	5.2	5.0	5.1	5.1	5.2	5.2	3.0
vypočítaný náklad	I [A]	0.00	0.33	0.00	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01
charakter záťaže	(R,L,C)	L	L	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
power factor	PF		0.39		0.81	0.87	0.87	0.85	0.82	0.80	0.77	0.73									
účinník	$\cos \varphi$		0.39		0.84	0.88	0.88	0.86	0.84	0.81	0.79	0.75	0.71	0.66	0.56	0.54	0.52	0.51	0.51	0.53	0.14

Prepočítaný relatívny príkon

$$P_{rel} = \frac{P_i}{P_{HF-R}} \cdot 100 \text{ [%; W, W]}$$

$P_i$  - nameraný príkon

$P_{HF-R}$  - príkon pri regulačnom stupni 100 % predradníka PHILIPS – HF-R TD 118

TABLE II. EEI KLASIFIKÁCIA PREDRADNÍKOV PODĽA EU SMERNICE 2000/55/EC [2]

Typ svetelného zdroja	Popis svetelného zdroja	Príkon svetelného zdroja		triedy EEI							
		50 Hz	vysoko-frekvenčný	A1	A2	A3	B1	B2	C	D	
T 118	FD-15-E-G13-26/450	15W	13.5W	9W	16W	18W	21W	23W	25W	>25W	
	FD-18-E-G13-26/600	18W	16W	10,5W	19W	21W	24W	26W	28W	>28W	
	FD-30-E-G13-26/895	30W	24W	16,5W	31W	33W	36W	38W	40W	>40W	
	FD-36-E-G13-26/1200	36W	32W	19W	36W	38W	41W	43W	45W	>45W	
	FD-38-E-G13-26/1047	38W	32W	20W	38W	40W	43W	45W	47W	>47W	
	FD-58-E-G13-26/1500	58W	50W	29,5W	55W	59W	64W	67W	70W	>70W	
	FD-70-E-G13-26/1800	70W	60W	36W	68W	72W	77W	80W	83W	>83W	

U tlmivky BTA 118 bol nameraný príkon 28,4 W, čo o 0,4 W presahuje údaj uvedený v **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** Pravdepodobne to však bolo spôsobené rušením a kolísaním napájacej siete. V podstate môžeme konštatovať, že tlmivka vyhovuje uvedenej kategórii C. U elektronického predradníku BE 136-2 bola nameraná hodnota príkonu 16,9 W, čo je približne o 4 W menej ako je uvedené v **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**, takže vyhovuje svojej kategórii A3 dokonca by vyhovoval aj kategórii A2. Pri stmievateľnom predradníku HF-R TD 118 bol nameraný maximálny príkon 14,9 W. V **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** pre kategóriu A1 je uvedená hodnota 10,5 W, čo zodpovedá približne príkonu pri regulácii na 65 %.

Počas merania sa odčítaval aj účinník a power factor. Elektrický obvod s tlmivkou BTA 118 bez kompenzácie vykazoval výrazné jalové straty. Power factor sa pohyboval okolo hodnoty 0,39. Použitie veľkého množstva svietidiel s takýmito predradníkmi by viedlo k narušeniu kvality dodávky elektrickej energie. Preto je bezpodmienečne nutné takéto zariadenia kompenzovať. Aj keď výrobcovia uvádzajú pri elektronických predradníkoch účinník vyšší ako 0,9, namerané hodnoty sa od uvedených líšili. A síce pri predradníku BE 136-2 bol nameraný účinník 0,84 a power factor 0,81. Pri predradníku HF-R TD 118 bol nameraný účinník 0,88 a power factor 0,87. Zároveň vidno (Obr. 5), že postupným stmievaním sa hodnota účinníka a power factoru ďalej zhoršuje. Pri regulačnom stupni 30 % merací prístroj prestal vykazovať hodnoty účinníka a power factoru. Preto bola hodnota účinníka prepočítaná podľa nameraného príkonu a zdanlivého výkonu.

Ďalej sa pomocou certifikovaného luxmetra EXTECH EasyViewTM 33 Light Metra (v.č. 060901984) v jednotlivých zapojeniach merala osvetlenosť (60 cm pod stredom rozsvietenej trubice). Toto meranie prebiehalo v nočných hodinách, keď mohli byť vylúčené iné svetelné zdroje, ktoré by skresľovali výsledok merania. Odmerala sa samostatne osvetlenosť pri prevádzke trubice s tlmivkou BTA 118, potom s elektronickým predradníkom BE 136-2 a nakoniec s regulovateľným predradníkom HF-R TD 118. Podobne ako pri meraní príkonu aj pri tomto meraní sa postupne znižovala intenzita zo 100 % až na konečných 0 %. Z nameraných hodnôt sa potom prepočítal relatívny svetelný tok  $\Phi_{rel}$  [%].

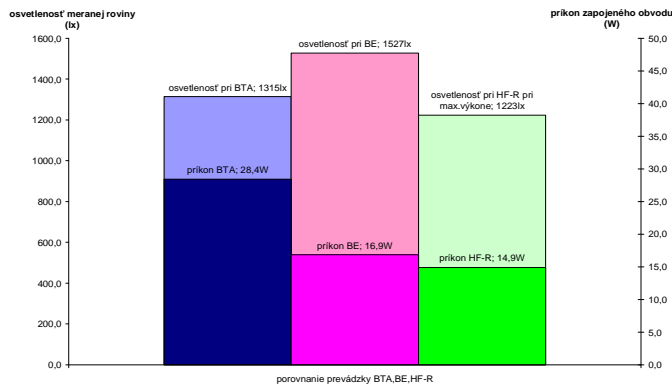
Prepočítaný relatívny svetelný tok

$$\phi_{rel} = \frac{E_i}{E_{HF-R}} \cdot 100 \text{ [%; lx, lx]}$$

$E_i$  - nameraná intenzita osvetlenia

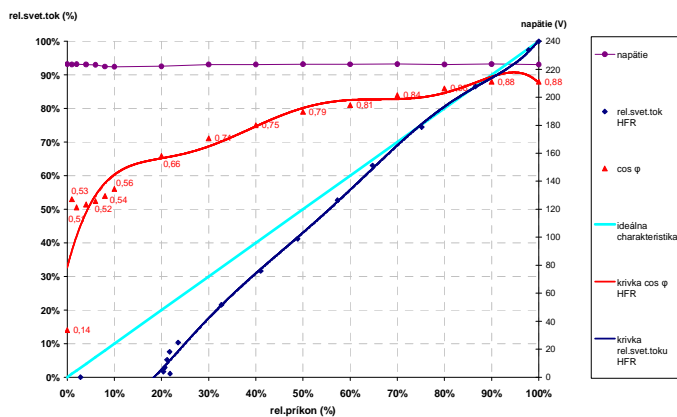
$E_{HF-R}$  - intenzita osvetlenia pri regulačnom stupni 100 % predradníka PHILIPS – HF-R TD 118

Namerané a prepočítané hodnoty sú uvedené v tab. 1 a na obr. 4 a obr. 5.



OBRÁZOK 4 POROVNANIE PRÍKONU A OSVETLENOSTI PRI PREVÁDZKE 18W TRUBICE V RÔZNYCH ZAPOJENIACH

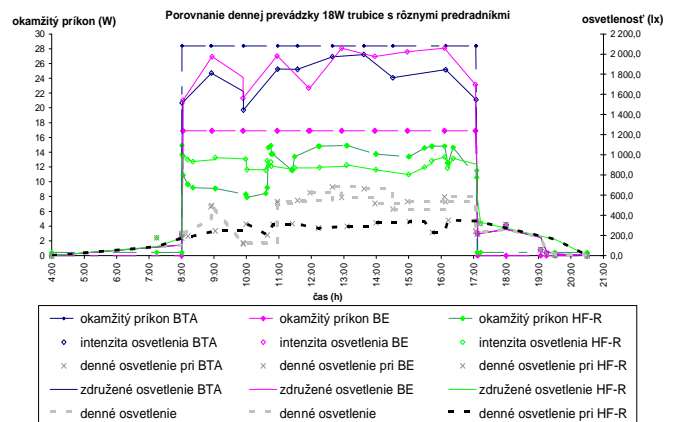
Na základe uvedeného môžeme konštatovať, že napriek najvyššej spotrebe (28,4 W) u tlmivky BTA 118 táto nezabezpečuje najvyššiu osvetlenosť (1315 lx). Tiež je zrejmé, že najlepší pomer svetelný výkon a príkon dosiahlo zapojenie s elektronickým predradníkom BE 136-2, kde síce pri vyššej spotrebe (16,9 W) bola nameraná najvyššia osvetlenosť porovnávanej roviny (1527 lx). Digitálny regulovateľný predradník HF-R TD 118 mal síce najnižšiu spotrebu energie (14,9 W), ale aj najnižšiu hladinu osvetlenosti (1223 lx).



OBR. 5 ZÁVISLOSŤ SVETELNÉHO TOKU A ÚČINNÍKU OD PRÍKONU V ZÁVISLOSTI NA REGULÁCII PREDRADNÍKA HF-R TD 118 A NAPÁJACIEHO NAPÄTIA.

Rovnako môžeme konštatovať, že pri stmievaní sa na začiatku charakteristika závislosti svetelného výkonu k príkonu javí ako ideálna, čím viac sa znižuje regulačný stupeň tým viac sa však uvedená charakteristika vzdaluje od ideálnej

charakteristiky v neprospech efektívnosti zariadenia. Z uvedeného vyplýva, že najvyššia efektívnosť sa dosiahne pri správnom dimenzovaní osvetľovacej sústavy, kde bude prevádzka regulovaná prevažne v rozsahu 65 % až 100 %. V prípade regulácie prevádzky v inom rozsahu bude účinnosť regulácie klesať.



OBRÁZOK 6 POROVNANIE DENNEJ PREVÁDZKY 18W TRUBICE S RÔZNYMI PREDRADNÍKMI V ZÁVISLOSTI OD DENNEHO OSVETLENIA

Na záver sa porovnávala osvetlenosť pracovnej roviny (60 cm pod stredom rozsvietennej trubice) počas jedného dňa samostatne pri jednotlivých zapojeniach. Pri meraní zapojenia s tlmivkou BTA 118 a elektronickým predradníkom BE 136-2 sa merala osvetlenosť v priebehu dňa v priemere v hodinových intervaloch. Bola odmeraná hodnota združeného osvetlenia, následne na chvíľu bol svetelný zdroj vypnutý a zmerala sa hodnota denného osvetlenia v rovnakom bode. Ak by hodnota denného osvetlenia na sledovanej rovine presiahla hodnotu 750 lx, zariadenie by sa vyplo, kým sa zase denná osvetlenosť neznižuje pod uvedenú hodnotu. V tom čase by bol simulovaný stav, že je dostatok denného osvetlenia na pracovnej rovine a nie je potrebné umelé osvetlenie. Podobne sa postupovalo aj pri meraní zapojenia s predradníkom HF-R TD 118. Tu sa však využil princíp stmievania na konštantnú hodnotu osvetlenia použitím multisenzoru. Pomocou softwarového vybavenia Digidim Toolbox bola nastavená konštantná hladina na úroveň prevádzky trubice s maximálnou intenzitou bez vplyvu iného svetelného zdroja. Následne potom počas druhého dňa bola kontrolovaná úroveň osvetlenosti na pracovnej rovine (spomínaných 60 cm pod stredom rozsvietennej trubice). Pomocou PC a softwarového vybavenia bola tiež sledovaná úroveň stmievania trubice v percentách. Pri zmene svetelného a samozrejme aj energetického výkonu svietidla bola odmeraná osvetlenosť združeného osvetlenia a podobne ako v predchádzajúcich dvoch prípadoch s krátkym prerušením prevádzky aj hodnota denného osvetlenia. Po prerušení prevádzky a odmeraní dennej osvetlenosti sa trubica zapla späť na poslednú úroveň pred vypnutím. Namerané výsledky sú zapísané v tab. 1 a graficky na Obrázok 6. V tomto konkrétnom prípade bola dosiahnutá úspora cca 41 % pri použití elektronického predradníka BE 136-2 a úspora až 54 % pri použití predradníka HF-R TD 118 stmievaným v závislosti od denného svetla [1].

### III. ZÁVER

V článku je na základe meraní uvedené porovnanie elektrických a svetelnotechnických parametrov žiarivkového osvetlenia pri požití rôznych typov predradníkov.



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

### POĎAKOVANIE

Táto publikácia vznikla 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.

### LITERATÚRA

- [1] Árvay, P.: Regulácia osvetlenia vnútorných priestorov. Diplomová práca. Košice: FEI TU v Košiciach, 2010
- [2] Energy efficiency: energy efficiency requirements for ballasts for fluorescent lighting. Dostupné na internete: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/energy/energy\\_efficiency/127032\\_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/127032_en.htm)

# Design of Test Place for Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain

Roman Cimbala

Katedra elektroenergetiky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky TU v Košiciach  
Košice, Slovenská republika  
[Roman.Cimbala@tuke.sk](mailto:Roman.Cimbala@tuke.sk)

**Abstract**—The article deals with design of test place for high voltage electrical insulation systems of rotating machines using dielectric spectroscopy in time domain with isothermal relaxation current analysis (IRC Analysis) and in frequency domain by measuring of complex impedance with LCR meter.

**Keywords** – insulation system; high voltage rotating machine; dielectric spectroscopy; time domain; frequency domain; isothermal relaxation current analysis; polarization spectrum;

## I. INTRODUCTION

Present state of knowledge does not offer us one complex method that could determine the state of insulation systems itself. That is why the set of methods has to be applied. As equipment is different the set of methods has to be different too. Also, one kind of equipment can be made with several different kind of insulation system. Then it is necessary to utilize selected computing evaluation [1]. The knowledge of current condition and a possible lifetime calculation of expensive equipment (transformers, generators etc.) is important to make sure an operation furthermore especially by older equipment and higher strain of the electrical power networks.

Ageing directly exercises an influence on electro-physical structure of material. Structure has influence on breakdown voltage and life – time. There is no direct way in the case of real objects, how to calculate electrical strength of life - time from stress parameters. But useful diagnostic method can describe electro – physical structure and observing changes of relevant diagnostic parameters can describe ageing also. In this occasion the condition orientated maintenance of insulation of equipment in electrical power supply includes a lot of possible diagnostic methods and technique to detect of typical failures, defects and dangerous ageing effects.

Composite materials based on epoxy resin are wide used as insulating material for electric drivers. After time they lose their insulation facilities and that is most frequently cause of engine failure. For detection of changes in isolation in these composites we utilize DRS (Dielectric Relaxation spectroscopy) dielectric relaxation spectroscopy and FTIR

(Fourier Transformed Infrared Spectroscopy) infrared spectroscopy.

Principle of dielectric relaxation spectroscopy rests in measured responses of permanent and induced dipoles towards attached external electric field. Final polarization expresses frequency dependence of permittivity and conductivity or impedance spectrum. They are characterized by amplitudes and time behavior of density oscillation charges of given samples. These oscillation rise by changes of permanent dipole moment of particular molecules or by rotation of dipolar parts of flexible molecules as it is in case of polymers.

## II. DIELECTRIC SPECTROSCOPY

Dielectric spectroscopy can observe dielectric spectrum from wide range of polarization processed presented in material structure. It has wide range, as can be seen in Fig. 1.

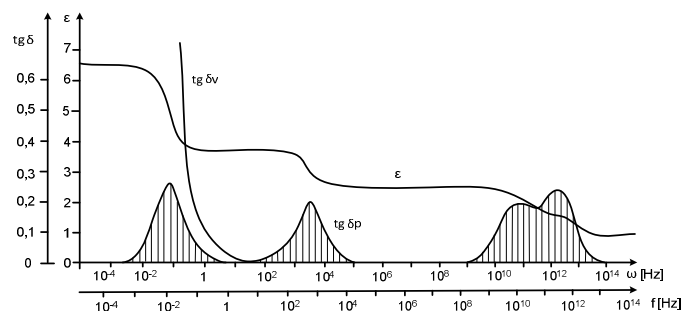


Figure 1. Dissipation factor and complex permittivity spectrum

According to Debye theory, polarization processes can be divided to several independent processes as there are shown in Fig. 2

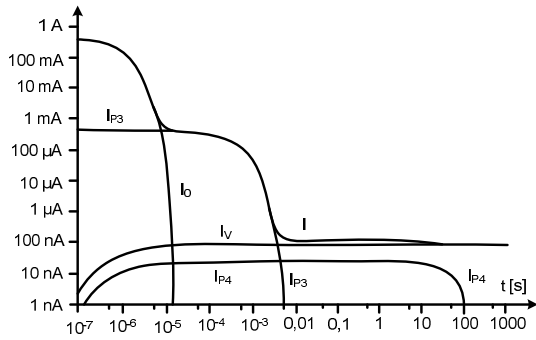


Figure 2. Elementary processes as element of total charging current

According to this presumption the next dielectric Maxwell-Wagner equivalent model can be established and described in analytic form by equation (1).

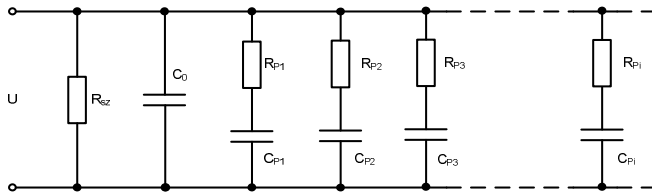


Figure 3. Maxwell – Wagner equivalent dielectric model

$$i(t) = I_v + I_c(t) + I_a(t) \quad (1)$$

Current from geometric capacity  $I_c(t)$  has time constant about  $10^{-12}$  s and it is possible to neglect it. Then equivalent model can be described as

$$i(t) = \frac{U}{R_{iz}} + \sum_{j=1}^n I_j \cdot e^{-\frac{t}{\tau_j}} \quad (2)$$

where

$$\tau_j = R_{pj} \cdot C_{pj} \quad (3)$$

is time constant of elementary polarization process according to Debye theory.

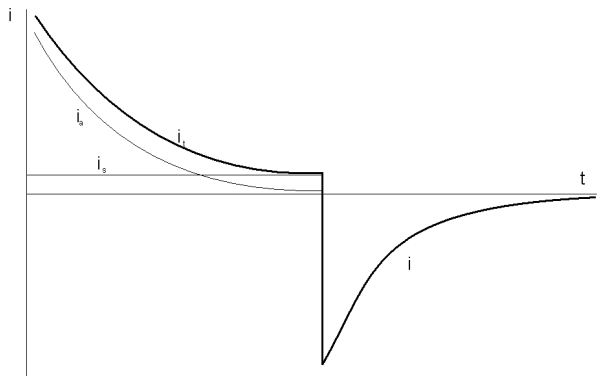


Figure 4. Filtered current curve response [2]

Analyzing of charging current in Fig 4 we can calculate both elements from equation (2) – amplitude of elementary current and its time constant. Isothermal relaxation current analysis is based on it.

Ideal dielectric is a material that contains electric charges bounded by electrostatic energy. In the case of ideal dielectrics, there are also free charge carriers.

Dielectric polarization is generated by electric field and causes the movement of free charge carriers.

If dielectric material is inserted in electric field of intensity  $E(t)$  it becomes polarized. Electric polarization  $P(t)$  in dielectric materials can be divided into the fast and slow polarization [2].

Slow polarization processes are measured by charging and discharging current. Current  $i(t)$ , which flows through the dielectrics can be after connection of electric field of intensity  $E(t)$  expressed as:

$$i(t) = C_0 \left[ \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} u(t) + \epsilon_\infty \frac{du(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau)u(\tau)d\tau \right] \quad (4)$$

where:

$C_0$  – geometric capacity of the measured object

Then polarization current  $i_{pol}(t)$  can be expressed as:

$$i_{pol}(t) = C_0 U_C \left[ \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + f(t) \right] \quad (5)$$

Polarizing current (respect equation 2) is due to step voltage  $U_C$  composed of two parts. The first part relates to the conductivity of investigated object and the second part is related to activation of different polarization processes inside the investigated material [4, 5].

If the step voltage  $U_C$  at the time  $T$  is removed and the material is grounded, then begins to flow depolarization current  $i_{depol}(t)$ .

$$i_{depol}(t) = -C_0 U_C [f(t) - f(t+T_c)] \quad (6)$$

where:

$f(t)$  – monotonically decreasing function

The second part of the equation can be neglected for large value of  $T_c$ . Depolarization current becomes proportional to the dielectric response [6]:

$$f(t) \approx -\frac{i_{depol}}{C_0 U_C} \quad (7)$$

DC conductivity  $\sigma_0$  can be estimated by equations 5 and 6:



$$\sigma_0 \approx \frac{\epsilon_0}{C_0 U_c} [i_{pol}(t) + i_{depol}(t)] \quad (8)$$

### III. TEST PLACE DESIGN

#### A. Time domain measurement test place

Real view to air dry oven is in Fig. 5 and scheme of measuring equipment is shown in Fig.6. Electrometer Keithley 617 measures current responses on DC voltage step and according to isothermal relaxation current analysis the polarization spectrum is observed.



Figure 5. View to air dry oven with measured coil

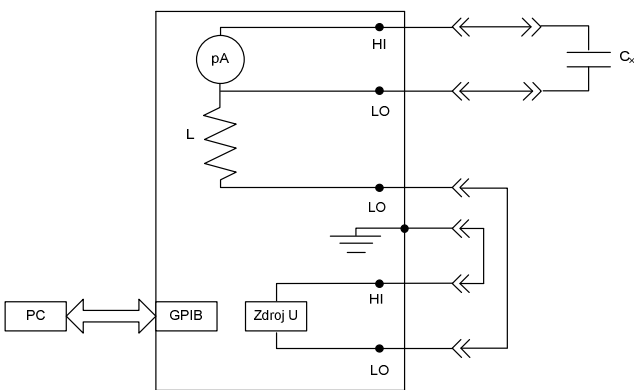


Figure 6. Scheme of measuring equipment

#### B. Frequency domain measurement test place

The samples were measured by Agilent E4980A precision bridge too. The test measuring set is shown in Fig. 7. The frequency was changed from 20Hz up to 2MHz and applied voltage was 2 V. This level of applied voltage has no influence on surface discharge in electrode system [7]. The results of measured capacity are presented in Fig. 8 and results of measured dielectric loss factor are in Fig. 9.



Figure 7. Test measuring set for frequency domain

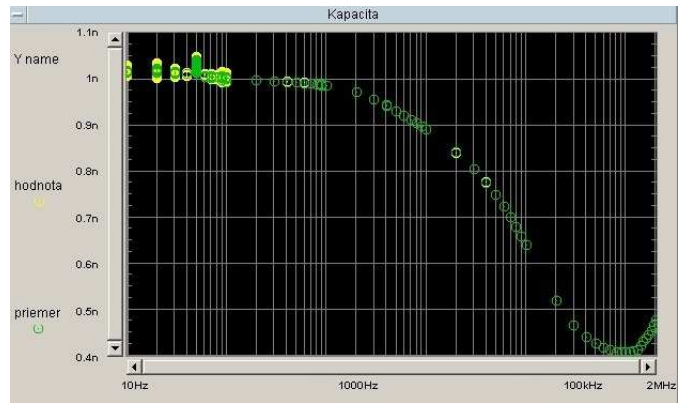


Figure 8. Capacity measurement for frequency domain

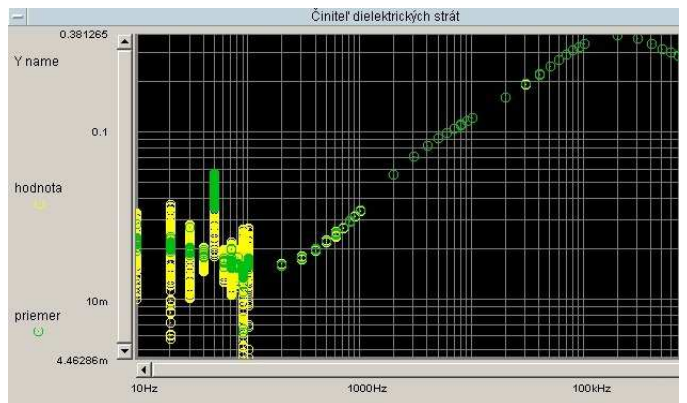


Figure 9. Dissipation factor measurement for frequency domain

IV. CONNECTION BETWEEN TIME AND FREQUENCY DOMAIN

According to equation (9) and equivalent model in Fig. 3 it is possible to calculate [8], [9] admittance  $\bar{Y}$  as

$$\bar{I}(\omega) = \bar{Y} \cdot \bar{U}(\omega) \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= \frac{1}{R_0} + j\omega \cdot \epsilon_{r0} C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{j\omega C_i}{1 + j\omega R_i C_i} \\ &= \frac{1}{R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{(\omega R_i C_i)^2}{R_i (1 + (\omega R_i C_i)^2)} + j\omega [\epsilon_{r0} C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2}] \end{aligned} \tag{10}$$

$$tg \delta = \frac{\text{Re}\{\bar{Y}\}}{\text{Im}\{\bar{Y}\}} = \frac{\frac{1}{R_0} + \sum_{i=1}^n \frac{R_i \cdot (\omega C_i)^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2}}{\omega C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\omega C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2}} \tag{11}$$

Dielectric loss factor (dissipation factor)  $tg\delta$  can be easily calculated from real and imaginary parts of complex impedance.

There are other methods for time – frequency domain transformation. One of them is Hamon’s approximation [10].

V. CONCLUSION

By comparison measuring methods it is evident, that it is necessary to observe dielectric spectrum in both sides. In low frequency range it is possible to observe it using Isothermal Relaxation Current Analysis (IRC), that determines spectrum by analyzing of current responses in time domain. To achieve data in high frequencies domain it is necessary to measure complex impedance using LCR meter.

ACKNOWLEDGMENT

We support research activities in Slovakia / Project is cofinanced from EU funds. This paper was developed within the Project "Centrum výskumu účinnosti integrácie kombinovaných systémov obnoviteľných zdrojov energií", ITMS 26220220064.

REFERENCES

- [1] V. Mentlík, J. Pihera, R. Polanský, P. Pros, P. Trnka: Diagnostika elektrických zařízení : Praha : Technická literatura BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9
- [2] R. Cimbala, "Ageing of high voltage insulation systems", science monograph, TU Košice 2007
- [3] E. Németh, T. Horvath, „Fundamental of the Stimulation of Dielectric Processes of Insulations”, 8-th ISH, Yokohama, Japan 1993
- [4] Farahani, M., Borsi, H., Gockenbach, E. Dielectric spectroscopy in Time and Frequency
- [5] Domain on Insulation System of High Voltage Rotating Machines. In 8th IEEE International
- [6] Conference on Solid Dielectrics (ICSD). Toulouse, France, 2004.
- [7] Walter S. Zaengl.: Dielectric Spectroscopy in Time Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations, IEEE, vol. 19, no. 5, september-october 2003.
- [8] T. Leibfried, "Comparability of Dielectric Analysis Results on Power Transformers", Institute of Electric Energy Systems and High-Voltage Technology, University of Karlsruhe Manfred Stach, E.ON Engineering GmbH, Gelsenkirchen, Germany, 2005
- [9] T. K. Saha, P. Purkait, F. Muller, "An Attempt to Correlate Time and Frequency Domain Polarisation Measurements for the Insulation Diagnosis of Power Transformer", School of Information technology and Electrical Engineering, University of Queensland, Australia 2005.
- [10] W., Katsumi Sakamoto, E. Souza., D. Das-Gupta, "Electroactive Properties of Flexible Piezoelectric Composites", Materials Research, Vol. 4, No. 3, pp. 201-204, 2001



We support research activities in Slovakia / Project is cofinanced from EU funds.



# Fotovoltaické materiály

Stanislav Ilenin

Katedra elektroenergetiky FEI TU v Košiciach  
Mäsiarska 74

Košice, Slovenská republika  
stanislav.ilenin@tuke.sk

**Abstrakt—Tento článok sa zaoberá vlastnosťami niektorých materiálov, ktoré sú vhodné pre výrobu fotovoltaických článkov. Poukazuje na to, aké sú možnosti ich budúceho využitia na výrobu fotovoltaických panelov.**

**KLúčové slová: monokryštalický kremík, polykryštalický kremík**

## I. ÚVOD

Najdlhšie používaný a tiež najrozšírenejší materiál na výrobu fotovoltaických článkov je kremík. Na rozdiel od iných materiálov sa netreba obávať jeho vyčerpania pretože sa nachádza takmer všade. Je to štvrtá najpoužívanejšia surovina na svete. Na výrobu solárnych panelov sa však využíva približne iba 1 % z tohto množstva. Používa sa v niekoľkých podobách.

## II. MONOKRYŠTALICKÝ KREMÍK

Bol prvý materiál ktorý sa začal využívať v praxi. Jeho účinnosť premeny sa zo začiatku pohybovala okolo 6 %. Od roku 1954 do roku 1975 sa v tomto smere nedosiahlo takmer žiadneho pokroku, pretože výskum sa orientoval predovšetkým na vesmírne použitie. Od roku 1975 až do roku 1980 sa túto hodnotu podarilo posunúť len o pár percent a hodnota 17 % bola považovaná za neprekonateľnú. Celkový pokrok v týchto rokoch brzdil tiež fakt, že sa sústredilo skôr na znižovanie cien ako na zvyšovanie účinnosti. V osemdesiatych rokoch sa stav výrazne zmenil a výsledkom bola účinnosť 35,2 % dosiahnutá v roku 1992 Pekingskou akadémiou vied. Dnes sa v bežnej výrobe dosahuje účinnosť 13-17 %. Monokryštalický kremík je však stále príliš drahým materiálom a tak sa výskumníci orientujú na výrobu materiálu s nižšou čistotou. Dosiahla by sa tým menšia energetická náročnosť výroby a teda aj výrazné zníženie ceny. Monokryštal sa používa tam, kde nie je možné aby mali panely príliš veľké rozmery, v kozmických aplikáciách alebo aj v prípadoch kedy budúceho majiteľa neodrádza značne vyššia cena.

Solárne články sa vyrábajú z kremíkoveho kmeňového reziva. Zvyčajne používanou metódou na výrobu kmeňového reziva je Czochralského metóda. Pri tomto procese je do kremíkovej zliatiny vložený zárodočný kryštál veľmi čistého kremíka. Tento kryštál sa pritom otáča a vyťahuje podľa vopred presne definovaného programu. Teplota taveniny je tiež veľmi pozorne sledovaná a riadená. Celý proces sa uskutočňuje v nádobách z veľmi čistého kremeňa v inertnej atmosfére argónu. Na zárodočnom kryštáli sa potom vylučujú ďalšie

vrstvy mimoriadne čistého kremíka, takže výsledný produkt môže mať až 400 mm v priemere a dĺžku do 2 m.

Vyrobený monokryštalický kremík s čistotou až 99 % je ešte ďalej čistený rafináciou pomocou metódy pohyblivej zóny. Tyč z nečistého kremíka prechádza žeravenou zónou niekoľkokrát v rovnakom smere. Táto procedúra „strháva“ nečistoty smerom k jednému koncu každým prechodom. V istom bode je už kremík považovaný za čistý, a nečistý koniec je odstránený.

Z kmeňového reziva sa postupne režu kremíkové doštičky kotúčovou diamantovou pílou. Píla vytvára rezy v šírke doštičky, ktoré sú hrubé 5 mm. Do ukončenia výroby kruhovej doštičky sa stratí len okolo polovice kremíku z kmeňového reziva, v prípade že sa doštička ďalej reže na tvar pravouhlý alebo šesťuholníkový sú tieto straty vyššie. Tieto tvary sú niekedy využité v solárnych článkoch pretože spoločne k sebe dokonale priliehajú, a tak využívajú všetok dostupný priestor na povrchu solárneho článku. Doštičky sú potom leštené na odstránenie znakov po rezaní. Nedávno bolo objavené, že neleštené doštičky absorbujú svetlo oveľa efektívnejšie, z toho dôvodu sa niektorí výrobcovia rozhodli doštičky neleštiť.

Vlastnosti kremíkových doštičiek sa zlepšujú dopovaním kremíka borom a fosforom. Zvyčajný spôsob pridávania prímiesí do kremíkových doštičiek s bórom a fosforom je založený na vkladani malých čiastočiek bóru počas Czochralského procesu. Doštičky sú zatavené tesne k sebe a umiestnené do pece, ktorá je rozohriata tesne pod bod tavenia kremíka (1410 °C) za prítomnosti fosforových plynov. Fosforové atómy sa preniknú do kremíka, ktorý je viac pórovitý pretože sa stáva tekutým. Teplota a čas procesu sú pozorne sledované aby sa zabezpečilo jednotné spojenie správnej hĺbky. Súčasnější spôsob pridania prímiesí do kremíku je použiť malé urýchľovacie čiastočky na strieľanie fosforových iónov do prútu. Kontrolovaním rýchlosti iónov je možné sledovať ich hĺbku prenikania. Avšak tento nový proces nebol všeobecne akceptovaný komerčnými výrobcami.

Solárne články sa navzájom prepájajú pomocou elektrických kontaktov. Elektrické kontakty spájajú jednotlivé solárne články navzájom a napokon aj s obvodom prijímajúcim elektrický prúd. Kontakty musia byť veľmi tenké hlavne vpredu, aby neblokovali slnečné svetlo dopadajúce na článok. Používajú sa kovy ako paládium/striebró, nikel alebo meď, ktoré sú vákuovo odparované.

Keď sú kontakty na mieste, umiestnia sa tenké pásiky medzi články. Najbežnejšie používané pásiky sú vyrobené z pocínovanej medi.

Pretože čistý kremík je lesklý, môže odrážať až 35% slnečného svetla. Na zmenšenie hodnoty odrazeného slnečného žiarenia sa na kremíkové doštičky používa antireflexný náter. Najbežnejšie používané sú oxid titánu a oxid kremičitý. Materiál používaný na náter je buď ohrievaný až kým sa jeho molekuly neodparia smerom ku kremíku kde kondenzujú, alebo materiál podstúpi metódu rozprašovania. V tomto procese vysoké napätie zráža molekuly materiálu a ukladá ich do kremíku na opačnej elektróde. Ďalšou metódou je prirodzená reakcia kremíka s kyslíkom alebo dusíkatými plynmi za vzniku oxidu kremičitého alebo nitridu kremičitého. Práve táto metóda je uprednostňovaná výrobcami fotovoltaických článkov.

Dokončené solárne články sú potom zapuzdrené. Sú zaliate do kremíkového kaučuku alebo polyvinyl acetátu. Zapuzdrené solárne články sú umiestnené do hliníkového rámu ktorý má mylarový alebo tedlarový zadný kryt a sklenený alebo plastový predný kryt.



Figure 1. Monokryštalický kremík - kmeňové rezivo

### III. POLYKRYŠTALICKÝ KREMÍK

Polykryštalický kremík je stále viac využívaný ako vstupný materiál vďaka svojej nižšej výrobnéj cene (odpadá proces ťaženia monokryštálu), i keď dosahovaná účinnosť je nižšia než je tomu v prípade monokryštalického kremíka. Laboratórne solárne články dosahujú účinnosť 18,5%, ale v podmienkach hromadnej výroby nepresahujú 14%. Doštičky polokryštalického kremíka sú štvorcového tvaru a sú rezané z odlievaného kremíkového ingotu. V priebehu tuhnutia taveniny dochádza k tvorbe rôznych veľkých a orientovaných kryštálov. Polykryštalická štruktúra materiálu dodáva týmto článkom charakteristický vzhľad.

Odrodou polykryštalického kremíka je multikryštalický kremík. Je podstatne lacnejší ako monokryštalický a dosahuje v praxi celkom dobrej účinnosti od 12 do 14%. Aby nevznikali straty pri prechode elektrónov rozhraním medzi kryštálmi vznikajú snahy vyrábať multikryštalický kremík s čo najväčšími kryštálmi, účinnosť tohto materiálu je taktiež možné zvýšiť chemickou úpravou vodíkom.

### IV. HYDROGIZOVANÝ AMORFÝ KREMÍK

Ide o materiál, ktorý nemá kryštalickú štruktúru ani príliš veľkú čistotu, je chemicky upravený vodíkom čo zlepšuje jeho vlastnosti. Tento druh kremíku sa využíva v tenkovrstvých solárnych článkoch, jeho výhodou je že je to lacný materiál a že sa ho v výrobe môže použiť podstatne menšie množstvo, pretože značná časť energie slnečného žiarenia sa absorbuje už vo vrstve tenšej ako 1µm. Hydrogenizovaný amorfný kremík sa tiež veľmi ľahko kombinuje s inými materiálmi ako napríklad uhlík, dusík, cín, germánium a tým sa vytvárajú zliatiny z rôznymi šírkami zakázaného pásma energií. Materiál sa zvykne nanášať na lacné podklady ako sklo, plast, oceľ. Jeho účinnosť je ale dosť nízka - v praxi okolo 4 - 8%. To ho predurčuje na použitie v zariadeniach s malou spotrebou energie ako sú kalkulačky a hodinky. Je dobré si uvedomiť že práve pri takýchto zariadeniach by však použitie drahých materiálov predražilo výrobky natoľko že by sa ich výroba vôbec nevyplatila.

### V. ARZENID GÁLIA

Arzenid gália (GaAs) obsadil druhé miesto vo využití pre výrobu fotovoltaických článkov. Výskum a vývoj tohto materiálu prebiehajú už dlhé roky, znevýhodňuje ho však vyššia cena a aj niektoré ďalšie vlastnosti medzi ktorými dominuje predovšetkým značne väčšia krehkosť. V priemere dosahuje účinnosti okolo 18%.

Arzenid gália má ale aj svoje nezanedbateľné prednosti. Za zvýšenej teploty (napr. 100 °C) vykazuje len veľmi malé zníženie účinnosti, na rozdiel od kremíka kde je pokles týchto hodnôt už pri takýchto relatívne nízkych teplotách veľmi výrazný. To znamená že jeho použitie bude veľmi výhodné pri vysokoefektívnych koncentračných článkoch. Pri takomto postupe bude potrebné oveľa menej drahého GaAs. Nie je totiž nutné inštalovať veľkoplošné solárne jednotky, ale len pomocou odrazu sústrediť viac slnečného žiarenia na menšiu plochu, pritom ani pri takto zvýšenej koncentrácii nestráca GaAs svoju účinnosť. Spomínaný kremík je pri takejto koncentrácii slnečného žiarenia celkom nevyhovujúci. Ďalšia výhoda vyplýva z väčšej hustoty GaAs, tá umožňuje výrobu oveľa tenších článkov (cca o 60%) bez zníženia ich pohltivosti. Ďalší vývoj v oblasti umožní pravdepodobne použitie tohto materiálu v kombinácii s hliníkom, takéto články sľubujú zvýšenie účinnosti nad 40.7%.

### VI. TELURID KADEMNATÝ

Telurid kademnatý (CdTe) sa pripravuje chemickou reakciou kadmia a telúru. Tieto články patria do skupiny tenkovrstvových solárnych článkov CdTe. Tento materiál je považovaný za veľmi nádejný, keďže však jeho výskum prebieha relatívne krátko, významné miesto v solárnej energetike zatiaľ neobsadil. Má veľkú šírku zakázaného pásma a taktiež veľmi dobrú schopnosť absorpcie. V zemskej kôre je však málo zastúpený a tak sa s ním dá počítať predovšetkým v spotrebnej elektronike, telekomunikačných a navigačných zariadeniach. Pri týchto je dôležitá ekonomická otázka a z tohto hľadiska je CdTe veľmi vhodným materiálom, vďaka svojim vynikajúcim absorpčným vlastnostiam je totiž možné CdTe používať vo veľmi tenkých vrstvách (1,2 až 1,5µm).

## VII. SULFID KADEMŇATÝ

Sulfid kademnatý (CdS) sa v kombinácii s Cu<sub>2</sub>S uplatnil predovšetkým v kozmických aplikáciách a to vďaka svojej nízkej hmotnosti. Účinnosti viac ako 10 % bola dosiahnutá pomerne jednoduchými a lacnými postupmi, napriek tomu sa však tento materiál nepovažuje za perspektívny, kvôli svojej nízkej stabilite. Nádejná sa však javí kombinácia s teluridom kademnatým. V USA už boli vyrobené takéto články s účinnosťou presahujúcou 10 %.

## VIII. ÚČINNOSŤ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKOV

Účinnosť premeny (potenciálne dopadajúceho) svetla na fotovoltaický článok na elektrickú energiu je najdôležitejším parametrom článku. Na celkovú účinnosť má vplyv niekoľko parametrov:

- čistota povrchu,
- odrazy na povrchu - závisia od uhla dopadu a reflektivity povrchu; uhol dopadu je možné korigovať natáčaním panelov, použitie natáčania však zvyšuje cenu, znižuje spoľahlivosť a je potrebné zvážiť, či energetický zisk vyrovná príkon natáčacej sústavy; reflektivita povrchu - kvôli veľkému rozdielu indexov lomu na rozhraní vzduch/polovodič je potrebné použiť prispôsobovaciu (antireflexnú) vrstvu (resp. sústavu vrstiev),
- úzka oblasť absorpcie - nosiče nábojov generované mimo oblasti priestorového náboja P-N prechodu nie sú separované, rekombinujú, a neprispievajú k výslednému prúdu; preto je dôležité, aby P-N prechod bol umiestnený čo najbližšie povrchu a aby bol čo najširší,
- absorpčné spektrum - u polovodičov je pomerne úzke, t. j. časť dopadajúcich fotónov prejde polovodičom a časť je absorbovaná avšak na generáciu elektrón - dierového páru sa využije len časť ich energie, zvyšok sa mení na teplo, ďalšia časť sa mení len na teplo; pre zvýšenie účinnosti sa používa sústava vrstiev rôznych kompozitných polovodičov (s rôznou šírkou zakázaného pásma a teda) s viacerými P-N prechodmi nad sebou,
- rekombinácia fotogenerovaných nosičov; pre zníženie je potrebné použiť čisté monokryštalické polovodiče,
- sériový odpor polovodiča a kontaktov, ktorý spôsobuje ohmické straty; odpor polovodiča - fotogenerované nosiče prechádzajú P a N vrstvou polovodiča ku kontaktom na povrchu, preto je dôležitá vysoká vodivosť najmä substrátu; odpor kontaktov - priehľadné horné kontakty (okrem vyššej ceny) majú významný sériový odpor (a aj nezanedbateľnú reflektivitu), preto sa aj napriek strate časti povrchu používajú nepriehľadné hrebeňovité kontakty.

K celkovej účinnosti celej fotovoltaickej sústavy prístupujú ešte straty v prepojoch medzi článkami, účinnosť výkonovej

elektroniky (meniča) prípadne účinnosť ukladania a znovuzískania energie v akumulátoroch.

Keďže osvetľovaná časť článku plní aj funkciu kontaktu a odvádzajúci prúd, je dôležité aby kládla čo najmenší odpor a teda aby odvádzala získanú energiu s čo najmenšími stratami. Polovodičová vrstva sa opatruje kovovou mriežkou alebo vodivou priehľadnou elektródou ktoré od nej preberú vyrobený elektrický náboj a odnesú ho preč. Keďže celý tento proces sa odohráva vo svete veľmi malých rozmerov, výroba takýchto článkov vyžaduje veľkú presnosť a precíznosť.

Účinnosť fotovoltaických článkov v závislosti na type substrátu:

- 4 - 8 % pri použití amorfného kremíku
- 10 - 18,5 % pri použití polykryštalického kremíku
- 13 - 17 % pri použití monokryštalického kremíku pre bežné nasadenie
- 34 % pri kvalitných monokryštalických článkoch pre kozmické účely

V roku 2006 Národné laboratórium pre obnoviteľnú energiu predstavila články využívajúce trojnásobné prechody s efektívnosťou až 40,7%

## IX. PLÁNOVANIE FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU

Typický FV systém tvorí rad vzájomne prepojených prvkov. Jeho jadrom sú FV panely generujúce jednosmerný elektrický prúd. Sériovo - paralelne spájané panely upevnené na podpornej konštrukcii tvoria FV pole. Prúd sa z panelov privádza do DC/AC striedačov, ktoré ho premieňajú na striedavý. Tento prúd sa cez rozvádzač systému rozvádza do elektrickej siete budovy. Súčasťou systému môžu byť aj akumulátory.

Pri plánovaní FV systému treba uviesť do súladu zamýšľané riešenie s miestnymi špecifickými podmienkami. K základným vstupným informáciami na návrh systému patrí:

- znalosť miestnych podmienok – množstvo dostupného slnečného žiarenia, odstupová vzdialenosť a výška susedných budov a ďalších potenciálnych zdrojov tienenia, sila vetra a množstvo snehových zrážok (dimenzovanie podpornej konštrukcie a kotevných prvkov),
- zamýšľaná forma inštalácie FV panelov – umiestnenie na budove (sklon a orientácia), geometria inštalácie, voľba podpornej konštrukcie a spôsobu kotvenia,
- charakteristiky jednotlivých prvkov systému – počet a typ FV panelov, elektrické spájanie, nominálne výkonové parametre FV panelov a striedačov, životnosť,
- spôsob využitia produkovanej energie – priama spotreba, skladovanie pomocou akumulátorov, predaj do elektrickej siete alebo kombinácia týchto spôsobov.

Najdôležitejším vstupným údajom na predpoveď produkcie elektrickej energie je množstvo dostupného slnečného žiarenia.

Optimálna poloha na umiestnenie FV panelov v podmienkach SR/ČR – po započítaní optických strát a negatívneho vplyvu teploty – je pri sklone 36° s južnou orientáciou. Pri sklone 20 až 50° a orientácii JJV až JJZ je však celoročný pokles energetickej produkcie oproti optimu menší ako 5%. Nominálna konverzná účinnosť v komerčne vyrábaných FV paneloch na báze kryštálického kremíka sa pohybuje v rozpätí 12 až 17%. Pre realistický odhad ročnej produkcie elektrickej energie však treba nominálnu účinnosť korigovať o prevádzkové straty FV systému, spravidla súčiniteľom 0,8.

#### ZÁVER

Výber vhodných materiálov a technológií má rozhodujúci vplyv na cenu. Články, u ktorých nie je cena prvoradá, sa pripravujú z čistých, často exotických, kompozitných polovodičov v mnohých náročných technologických krokoch. Fotovoltaické články pre energetiku naopak využívajú tie najjednoduchšie technológie a využívajú takmer výhradne kremík. Keďže čistý monokryštalický kremík používaný v polovodičovej technológii je pomerne drahý, pre fotovoltaické články sa často pristupuje k využitiu lacnejšími technológiami pripravovaného polykryštalického či dokonca amorfného kremíka aj napriek zníženej účinnosti a spoľahlivosti.

#### 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] Graditi, G.; Colonnese, D.; Femia, N.: *Efficiency and reliability comparison of DC-DC converters for single phase grid connected photovoltaic inverters*. 2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 14-16 June 2010, pp. 140 - 147, Location: Pisa, ISBN: 978-1-4244-4986-6, DOI: 10.1109/SPEEDAM.2010.5542235.
- [2] Masoum, M.A.S.; Mousavi Badejani, S.M.; Kalantar, M.: *Optimal placement of hybrid PV-wind systems using genetic algorithm*. 2010 Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 19-21 Jan. 2010, pp. 1 - 5, Location: Gaithersburg, MD, ISBN: 978-1-4244-6264-3, DOI: 10.1109/ISGT.2010.5434746.
- [3] Yanli Liu; Bingfeng Li; Dan Zhong: *Research on domestic PV module structure based on fault detection*. 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 7-9 July 2010, pp. 171 - 175, Location: Jinan, ISBN: 978-1-4244-6712-9, DOI: 10.1109/WCICA.2010.5553914.
- [4] Mayfield, R.: *Photovoltaic Design and Installation For Dummies*. For Dummies; 1 edition (September 7, 2010). 384 p, ISBN: 978-0-470-59893-1.
- [5] Ding, M.; Zhang, Y. Y.; Mao, M. Q.; Yang, W.; Liu, X. P.: *Operation optimization for microgrids under centralized control*. 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 16-18 June 2010, pp. 984-987, Location: Hefei, China, ISBN: 978-1-4244-5669-7, DOI: 10.1109/PEDG.2010.5545793.
- [6] Brando, G.; Dannier, A.; Del Pizzo, A.; Rizzo, R.: *A high performance control technique of power electronic transformers in medium voltage grid-connected PV plants*. 2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), 6-8 Sept. 2010, pp. 1 - 6, Location: Rome, ISBN: 978-1-4244-4174-7, DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607930.
- [7] Guo Peiyuan; Bao Man; Bi Song; Xu Guannan; Liu Xing: *Research on Management Information System of Rural Photovoltaic Plant Equipment*. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 28-31 March 2010, pp. 1 - 4, Location: Chengdu, ISBN: 978-1-4244-4812-8, DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448716.
- [8] Yu, E.T.: *Engineering of plasmonic effects in photodetectors and high-efficiency photovoltaics*. 2010 3rd International Nanoelectronics Conference (INEC), 3-8 Jan. 2010, pp. 42 - 43, Location: Hong Kong, ISBN: 978-1-4244-3543-2, DOI: 10.1109/INEC.2010.5424447.
- [9] Lad, R.; Wohlgenuth, J.; TamizhMani, G.: *Outdoor energy ratings and spectral effects of photovoltaic modules*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 2827 - 2832, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616859.
- [10] El Chaar, L.; Lamont, L.A.; Elzein, N.: *PV Technology - Industry update*. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 25-29 July 2010, pp. 1-6, Location: Minneapolis, MN, ISSN: 1944-9925, DOI: 10.1109/PES.2010.5589568.
- [11] Testa, A.; Scimone, T.; De Caro, S.: *A solar AC module with active filter capabilities*. 2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), Issue Date: 14-16 June 2010, pp. 616 - 621, Location: Pisa, ISBN: 978-1-4244-4986-6, DOI: 10.1109/SPEEDAM.2010.5542190.
- [12] Marco, T.G.; Cristina, V.; Paolo, A.; Luca, P.; Dario, G.A.; Massimo, P.: *Design considerations about a photovoltaic power system to supply a mobile robot*. 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 4-7 July 2010, pp. 1829-1834, Location: Bari, ISBN: 978-1-4244-6390-9, DOI: 10.1109/ISIE.2010.5637724.
- [13] Coddington, Michael H.; Kroposki, Benjamin D.; Basso, Thomas S.: *Evaluating future standards and codes with a focus on high penetration photovoltaic (HPPV) system deployment*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 544 - 549, Location: Honolulu, HI, USA, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616833.
- [14] Shimazaki, K.; Kobayashi, Y.; Takahashi, M.; Imaizumi, M.; Takamoto, T.; Ito, T.; Nozaki, Y.: *Progress in development of ultra-lightweight solar panel using space solar sheet*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 725 - 730, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5617083.
- [15] Schwarz, Harald; Shaoqing Ying: *Urban photovoltaic potential*. 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 16-19 May 2010, pp. 26-28, Location: Prague, Czech Republic, ISBN: 978-1-4244-5370-2, DOI: 10.1109/EEEIC.2010.5490007.

# Photovoltaic Modules

Michal Kolcun

Department of Electric Power Engineering FEI TU Košice  
Mäsiarska 74  
Košice, Slovak Republic  
Michal.Kolcun@tuke.sk

**Abstract**—This article deals with the introducing of basic principle of electricity generation in photovoltaic modules. There are presented various types of modules and their benefits.

**Keywords**-photovoltaic modules; PN junction

## I. INTRODUCTION

Electricity does pretty powerful work, for example the electric vehicles move you from one point to another point; computers give you access to an enormous amount of information; and electric heaters do a miracle job of keeping you comfortable in the winter.

Electricity generated from photovoltaic (PV) modules can do a lot for people, but it cannot do everything. Certain electrical loads (such as water heaters, electric stoves, and anything else that uses electricity to create heat) are not good matches for solar electric systems, especially battery-based systems. Fortunately, the good folks engineering and manufacturing the devices used in PV systems have made them capable of integrating seamlessly into existing electrical systems. Grid-direct systems operate automatically, and battery-based systems are getting smarter all the time.

Because the PV module is the heart of any PV system, it is necessary to know their construction and manufacturing. Knowing how PV modules are affected by the intensity of sunlight and varying temperatures helps you further understand the requirements of installing PV systems.

## II. CREATING SOLAR ELECTRICITY SYSTEM

The basic building block for all PV modules is the *solar cell*, a roughly  $15 \times 15$  cm object that starts its life as sand (actually silicon) and is then wired within a PV module to produce the voltage and current desired by the manufacturer. Solar cells are manufactured in such a way that when they are placed in sunlight, the photons in the light excite the electrons in the cells. When the module is connected to an electrical circuit, useful work, such as turning a fan or powering a refrigerator, can be done.

### A. Doping solar cells to create semiconductors

When a solar cell is completely manufactured, it becomes a *semiconductor*, a material that acts as both an electrical conductor and insulator. Solar cells become conductive when exposed to light, which makes them able to pass current.

However, silicon – the primary ingredient of solar cells – is naturally a much better insulator than a conductor. *Insulators* inhibit the flow of electrical current, which is not a desired feature for solar cells. In order to enable the flow of electrons (and therefore become semiconductors), the cells are doped during manufacturing. Typically two elements, boron and phosphorous, are used in the doping process.

Unlike in sports, doping is an acceptable and highly encouraged activity in the manufacturing of solar cells. Because the silicon will not readily produce an electrical current in its natural state, the addition of the dopants allows the current to flow. Typically, boron is introduced to the silicon during the first stages of cell manufacturing, and phosphorous is introduced to the silicon by diffusing a vapor directly onto the manufactured cell.

The addition of these dopants adds electrons and electron holes to each side of a solar cell. The phosphorous atoms have extra electrons within them, and the boron has extra electron holes, waiting to be filled with the electrons. The phosphorous-doped side becomes known as the *N type*, or the negative side of the cell (the side facing the sun), and the boron-doped side becomes the *P type*, or positive side (the side facing away from the sun).

### B. Creating a one-way electron path with a PN junction

When sunlight hits the phosphorous-doped (N type) side of a solar cell, the electrons in the cell become excited. They are so anxious to get moving that they will gladly go to the boron-doped (P type) side of the cell if given the proper path.

That path involves a junction between the positive and negative side of the cell. This *positive-negative junction* (or *PN junction*) acts as a diode, allowing the electrons to pass from the positive (bottom) side to the negative (front) side of the cell but not in the reverse direction. This means the electrons flow from the negative side of the cell through the circuit and to the positive side of the cell. As more electrons move from the negative side to the positive side, the electrons on the positive side are pushed up through the PN junction to the negative side of the cell, and the process continues as long as sunlight is present. The PN junction ensures that the electrons move through the circuit. Figure 1. shows an example of a solar cell and a PN junction.

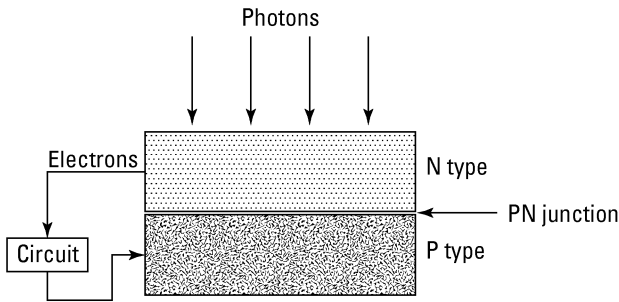


Figure 1. A solar cell with a PN junction

### III. CONNECTING CELL CONSTRUCTION TO THE PHOTOVOLTAIC EFFECT

The phrase photovoltaic effect describes solar cells' ability to produce voltage and current when exposed to sunlight. Here is a step-by-step breakdown of how a cell's construction allows that to happen (check out Figure 2. to see how electrons move through the PN junction):

1. Energy from the sunlight's photons excites the electrons located on the solar cell's N type, giving them the potential (voltage) to move.
2. When the solar cells are connected to a load, the excited electrons start moving (current flow) from the N type to the P type, performing useful work along the way.
3. The electrons go to the cell's P type and combine with the electron holes.
4. As sunlight continues to strike the cell and more electrons are sent through the circuit, the electrons are forced from the P type back to the N type through the PN junction to continue the process.

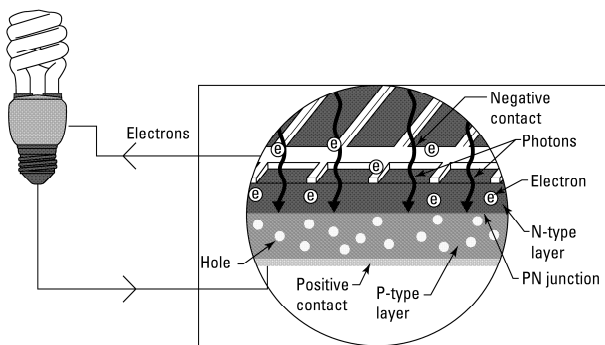


Figure 2. The movement of electrons through the PN junction.

### IV. REVIEWING COMMON TYPES OF PV MODULES

The PV market is expanding rapidly, and manufacturers are constantly introducing new and emerging technologies. The end result of all these technologies is the same: You place the module in the sun, and it produces power. But each of the commercially available products has its own pros and cons to consider when selecting a product for a particular job.

### V. CHECKING OUT CRYSTALLINE MODULES

Crystalline PV modules, which are made by grouping a number of individual solar cells together, are currently the most common module type for residential and commercial applications. One of the main reasons why crystalline modules are used so frequently is that they are more efficient than other PV technologies. Typical crystalline modules are rated at 120 to 150 watts per square meter ( $W/m^2$ ). Some of the higher-efficiency modules are rated in excess of  $200 W/m^2$ , which allows a consumer to generate a greater amount of energy in a limited space, like on her roof.

Manufacturers do not tend to report the number of watts per square meter (or power density) for their modules, but you can find out this information pretty easily. Just take the module's rated power output, "Maximum power point" section, and divide it by the module's square footage.

The watts-per-square-meter value can be more telling than any efficiency value reported because a common goal of PV systems is to place as much power as possible in a given area.

Two main types of crystalline modules exist – those containing monocrystalline cells and those containing multicrystalline cells (see Figure 3. ). Both types of modules start from the same raw material, but the manufacturing processes differ: The monocrystalline modules have a uniform molecular structure and are more efficient, whereas the multicrystalline modules have many structures, resulting in a less efficient module.

#### A. The monocrystalline kind

Monocrystalline modules begin as a molten vat of purified silicon that has been doped with boron to create electron holes.

A starter seed, a crystal about 10 cm long and 5 cm in diameter, is introduced to the silicon-boron mixture that becomes the structure for the solar cells. During the manufacturing process, the silicon aligns itself with the starter seed and takes the exact same crystal structure of the seed.

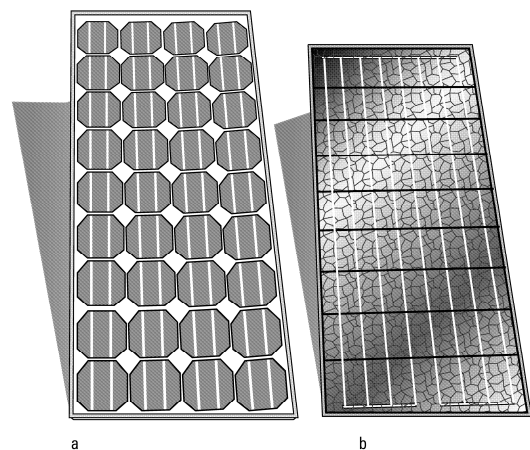


Figure 3. A monocrystalline cell module (a) and a multicrystalline cell module (b).

The starter seed is then drawn out of the mixture, and a crystal grows around it, forming the beginning of the ingot, a

15- to 20-cm-diameter crystal. The ingot continues to be pulled from the molten vat until it reaches the desired length – about 1,8 m. This ingot comes out as a cylinder, thereby giving monocrystalline cells a circular shape (at least initially).

The ingot is then sliced into very thin wafers that are exposed to the diffusion process to introduce the other dopant (phosphorous). At this point, the solar cells are complete, and an electrical grid can be placed atop them to effectively allow the electrons to flow.

Monocrystalline modules are typically more efficient than their multicrystalline counterparts on the cell level because the molecular structure of the ingot is uniform from top to bottom (refer to Figure 3. ). This characteristic allows the photons to move the greatest number of electrons when in sunlight because the cells are all lined up and facing the exact same direction. In a multicrystalline cell, the crystals have various shapes and point in different directions, slightly reducing the efficiency.

Monocrystalline cells are circular when they start out their lives, but because PV modules are rectangular in shape, the cells need to be squared off in order to fit into the module. Because making the circular cells into perfect rectangles would result in a high amount of waste, the manufacturers cut corners off the cells and square the edges to create octagons. The resulting octagonal cells are then capable of being packed into a module frame more densely than if they would remain circles, thereby reducing the amount of dead space in the module. As you can see in Figure 3. a, the octagons allow the cells to be placed closely together but not right next to each other, creating the dead space within the monocrystalline modules.

Most manufacturers use a white back sheet so you can immediately spot monocrystalline modules due to the small amount of white space at the corners of all the cells.

#### B. *The multicrystalline kind*

Multicrystalline cells are manufactured differently than monocrystalline ones – the ingots are essentially brick shaped or cubes rather than cylinders.

The manufacturing process begins with a vat of molten silicon-boron mixture, but instead of pulling a crystal out of this mixture, the mixture is formed in a cubic crucible, which results in the silicon cooling and forming multiple crystals. After the silicon has cooled and the ingot is sliced into thin wafers, the dopant (phosphorous) and electrical grid are added to the modules.

The efficiency of multicrystalline modules is reduced due to the many crystal structures in the cubes. When the photons strike the cells, they have a more difficult time knocking the electrons free thanks to the many different surfaces present. On the plus side, the cells can be made into squares or rectangles very easily, a fact that allows the multicrystalline modules to have their cells packed one next to the other with very little space between them (refer to Figure 3. b). The end result is that multicrystalline modules have power ratings per unit area that are similar to that of their monocrystalline counterparts even though they're less efficient on the cell level.

## VI. LOOKING AT THIN FILM MODULES

The phrase thin film module is a catchall for a number of different PV technologies. Thin film technologies vary in their raw materials and exact manufacturing processes. However, at the most basic level, all thin film technologies deposit a material that can produce the photovoltaic effect onto a backing material (called a substrate). This substrate can be a sheet of glass, PVC roofing material, or even a foil sheet. The name thin film implies only that the material on the substrate is extremely thin, ranging from just nanometers to a few micrometers thick. As a point of reference, a human hair is approximately 100 micrometers thick, and crystalline solar cells are approximately 250 micrometers thick – the equivalent of two and a half human hairs.

One interesting up-and-coming module type is the hetero-junction module, which uses both crystalline and thin film technologies.

#### A. *Amorphous silicon*

Amorphous silicon (aSi) is an extremely prevalent type of thin film module. It is based on a silicon technology that involves depositing silane gas on a substrate. One of the advantages of aSi is its ability to be incorporated on nonrigid substrates (such as a flexible vinyl sheet or PVC roofing materials), which allows aSi PV modules to become part of the roofing material. Using aSi has become a popular method for large commercial flat roofs, despite the fact that aSi has a reduced power-per-unit-area value (approximately 50 percent to 60 percent less than crystalline modules). But by incorporating it into the roofing material and installing it on very large roof areas, aSi can become an attractive option, both in terms of aesthetics and overall cost.

An aSi module can be manufactured in a variety of forms to help accommodate the specific application. For example, they can be made to stick right on a metal roof or become part of the roofing material used on commercial roofs. Even though aSi modules are not as power dense as the crystalline kind, they are able to use sunlight when it is at lower light levels, like in the early morning and late afternoon, which means aSi modules have an increased energy output compared to crystalline modules.

#### B. *Cadmium telluride*

Cadmium telluride (CdTe) modules are another currently available type of thin film technology. To construct CdTe modules, a very thin layer (micrometers thick) of CdTe is deposited on the substrate.

One method is to deposit the CdTe directly onto a glass substrate. To protect the cells, a second glass layer is adhered to the first. This glass-on-glass process means the PV module can be used in place of conventional windows, allowing some light to penetrate the building while still producing electricity.

One advantage of CdTe modules is that the costs of the raw materials used are relatively low, a fact that allows the technology to be price competitive. Yet one of those raw materials, tellurium, is a rare earth element. If CdTe technology



takes off, the availability of tellurium may become problematic.

### C. Copper indium gallium diselenide

Another type of thin film module, copper indium gallium diselenide (CIGS), uses four different raw materials. The substrates used can be either flexible (like those used for aSi modules) or rigid (like glass). CIGS technology has been used in the past and has recently regained popularity because it can be manufactured with nanometers (0,000000001 meters) of material compared to some of the other thin films that require micrometers of material (0,000001 meters). This extreme difference allows CIGS modules to use far less raw material, helping reduce manufacturing costs.

CIGS technology has been incorporated into a relatively new manufacturing process for commercial rooftop installations: The cells have been manufactured into cylinders and placed in tubes rather than the traditional rectangular modules. The advantage of this tubular format is that the cells can be perpendicular to the sun a greater number of hours per day, thereby increasing the energy production.

### D. Hetero-junction modules

There are manufacturers that use crystalline technology in conjunction with amorphous silicon (aSi) thin films. The result is a hetero-junction module that provides a greater power output simply by taking advantage of the strengths of the individual technologies. The aSi surrounds the crystalline cell in ultrathin layers and helps increase the power output.

Hetero-junction modules, which are typically used in high-visibility applications such as patio covers or solar awnings, where aesthetics are a primary concern, use reflected light around the module to help boost the power output.

### ACKNOWLEDGMENT

This publication is the result of the Project implementation: Research centre for efficient integration of the renewable energy sources, ITMS: 26220220064 supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF.



**Európska únia**  
Európsky fond regionálneho rozvoja



We support research activities in Slovakia / Project is cofinanced from EU funds.

### REFERENCES

[1] Mayfield, R.: *Photovoltaic Design and Installation For Dummies*. For Dummies; 1 edition (September 7, 2010). 384 p, ISBN: 978-0-470-59893-1.

[2] Grietus Mulder, Fjo De Ridder, Daan Six: *Electricity storage for grid-connected household dwellings with PV panels*. Elsevier: Solar Energy. Volume 84, Issue 7, July 2010, Pages 1284-1293, ISSN: 0038-092X.

[3] Fabio L. Albuquerque, et. al.: *Photovoltaic solar system connected to the electric power grid operating as active power generator and reactive power compensator*. Elsevier: Solar Energy. Volume 84, Issue 7, July 2010, Pages 1310-1317, ISSN: 0038-092X.

[4] Xiangyu Meng, Fusheng Yang, Zewei Bao, Jianqiang Deng, Nyallang N. Serge, Zaoxiao Zhang: *Theoretical study of a novel solar trigeneration system based on metal hydrides*. Elsevier: Applied Energy. Volume 87, Issue 6, June 2010, Pages 2050-2061, ISSN: 0306-2619.

[5] Etienne Audierne, Jorge Elizondo, Leonardo Bergami, Humberto Ibarra, Oliver Probst: *Analysis of the furling behavior of small wind turbines*. Elsevier: Applied Energy. Volume 87, Issue 7, July 2010, Pages 2278-2292, ISSN: 0306-2619.

[6] B. Kundu: *Analytic method for thermal performance and optimization of an absorber plate fin having variable thermal conductivity and overall loss coefficient*. Elsevier: Applied Energy. Volume 87, Issue 7, July 2010, Pages 2243-2255, ISSN: 0306-2619.

[7] Athanasios Tolis, Aggelos Doukelis, Ilias Tatsiopoulou: *Stochastic interest rates in the analysis of energy investments: Implications on economic performance and sustainability*. Elsevier: Applied Energy. Volume 87, Issue 8, August 2010, Pages 2479-2490, ISSN: 0306-2619.

[8] M.F. Cao, G.H. Huang, Q.G. Lin: *Integer programming with random-boundary intervals for planning municipal power systems*. Elsevier: Applied Energy. Volume 87, Issue 8, August 2010, Pages 2506-2516, ISSN: 0306-2619.

[9] Sheng-Tung Chen, Hsiao-I Kuo, Chi-Chung Chen: *Modeling the relationship between the oil price and global food prices*. Elsevier: Applied Energy. Volume 87, Issue 8, August 2010, Pages 2517-2525, ISSN: 0306-2619.

[10] Anindita Roy, Shireesh B. Kedare, Santanu Bandyopadhyay: *Optimum sizing of wind-battery systems incorporating resource uncertainty*. Elsevier: Applied Energy. Volume 87, Issue 8, August 2010, Pages 2712-2727, ISSN: 0306-2619.

[11] Guobing Zhou, Yongping Yang, Xin Wang, Jinming Cheng: *Thermal characteristics of shape-stabilized phase change material wallboard with periodical outside temperature waves*. Elsevier: Applied Energy. Volume 87, Issue 8, August 2010, Pages 2666-2672, ISSN: 0306-2619.

[12] Young-Gi Lee, Jongdae Kim, Sanghyo Kim, Kwang Man Kim: *3 V-class film-type lithium primary battery with highly improved energy density*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 195, Issue 11, 1 June 2010, Pages 3720-3729, ISSN: 0378-7753.

[13] David B. Robinson: *Optimization of power and energy densities in supercapacitors*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 195, Issue 11, 1 June 2010, Pages 3748-3756, ISSN: 0378-7753.

[14] Vilayanur V. Viswanathan, Daiwon Choi, Donghai Wang, Wu Xu, Silas Towne, Ralph E. Williford, Ji-Guang Zhang, Jun Liu, Zhenguo Yang: *Effect of entropy change of lithium intercalation in cathodes and anodes on Li-ion battery thermal management*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 195, Issue 11, 1 June 2010, Pages 3720-3729, ISSN: 0378-7753.

[15] Sheng S. Zhang, Donald Foster, Jeffrey Read: *A high energy density lithium/sulfur-oxygen hybrid battery*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 195, Issue 11, 1 June 2010, Pages 3684-3688, ISSN: 0378-7753.

[16] I.S. Hussaini, C.Y. Wang: *Dynamic water management of polymer electrolyte membrane fuel cells using intermittent RH control*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 195, Issue 12, 15 June 2010, Pages 3822-3829, ISSN: 0378-7753.

[17] Shu-Han Yang, Charn-Ying Chen, Wen-June Wang: *An impedance study for the anode micro-porous layer in an operating direct methanol fuel cell*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 195, Issue 11, 1 June 2010, Pages 3536-3545, ISSN: 0378-7753.

[18] Piyush Bubna, Doug Brunner, John J. Gangloff Jr., Suresh G. Advani, Ajay K. Prasad: *Analysis, operation and maintenance of a fuel cell/battery series-hybrid bus for urban transit applications*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 195, Issue 12, 15 June 2010, Pages 3939-3949, ISSN: 0378-7753.

- [19] Hideaki Bunazawa, Yohtarō Yamazaki: *Ultrasonic synthesis and evaluation of non-platinum catalysts for alkaline direct methanol fuel cells*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 190, Issue 2, 15 May 2009, Pages 210-215, ISSN: 0378-7753.
- [20] E.I.Wright, S. Rahimifard, A.J. Clegg: *Impacts of environmental product legislation on solid oxide fuel cells*. (Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 190, Issue 2, 15 May 2009, Pages 362-371, ISSN: 0378-7753).
- [21] Diego Feroldi, Maria Serra, Jordi Riera: *Energy Management Strategies based on efficiency map for Fuel Cell Hybrid Vehicles*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 190, Issue 2, 15 May 2009, Pages 387-401, ISSN: 0378-7753.
- [22] Liang Hao, Ping Cheng: *Lattice Boltzmann simulations of water transport in gas diffusion layer of a polymer electrolyte membrane fuel cell*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 195, Issue 12, 15 June 2010, Pages 3870-3881, ISSN: 0378-7753.
- [23] Sergei F. Burlatsky, Vadim V. Atrazhev, Mallika Gummalla, Dave A. Condit, Fuqiang Liu: *The impact of thermal conductivity and diffusion rates on water vapor transport through gas diffusion layers*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 190, Issue 2, 15 May 2009, Pages 485-492, ISSN: 0378-7753.
- [24] H.F. Xiang, H.W. Lin, B. Yin, C.P. Zhang, X.W. Ge, C.H. Chen: *Effect of activation at elevated temperature on Li-ion batteries with flame-retarded electrolytes*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 195, Issue 1, 1 January 2010, Pages 335-340, ISSN: 0378-7753.
- [25] T. Jin, K. Lu: *Thermal stability of a new solid oxide fuel/electrolyzer cell seal glass*. Elsevier: Journal of Power Sources. Volume 195, Issue 1, 1 January 2010, Pages 195-203, ISSN: 0378-7753.
- [26] Skumanich, A.; Ryabova, E.; Malik, I. J.; Reddy, S.; Sabnani, L.: *PV technology roadmap: Market and manufacturing considerations*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 2883 - 2888, Location: Honolulu, HI, USA, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614453.
- [27] Zhou Xuesong; Song Daichun; Ma Youjie; Cheng Deshu: *Grid-Connected Control and Simulation of Single-Phase Two-Level Photovoltaic Power Generation System Based on Repetitive Control*. 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 13-14 March 2010, Volume: 2, pp. 366 - 369, Location: Changsha City, DOI: 10.1109/ICMTMA.2010.307.
- [28] Perkins, J.D.; Gennett, T.; Leisch, J.E.; Sundaramoorthy, R.; Repins, I.L.; van Hest, M.F.A.M.; Ginley, D.S.: *Amorphous transparent conductors for PV applications*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 989 - 991, Location: Honolulu, HI, USA, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614580.
- [29] Adkins, D.A.: *Novel method and system for monitoring CPV cell and module temperature*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 1660 - 1665, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616045.
- [30] Shengyong Liu; Xing Zhang; Haibin Guo; Jun Xie: *Multiport DC/DC Converter for Stand-alone Photovoltaic Lighting System with Battery Storage*. 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), 25-27 June 2010, pp. 3894 - 3897, Location: Wuhan, ISBN: 978-1-4244-6880-5. DOI: 10.1109/ICECE.2010.950.
- [31] Wei-Tzer Huang; Wen-Chih Yang: *System steady-state analysis of a low-voltage microgrid with various distributed energy resources*. 2010 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS), 28-30 June 2010, pp. 237 - 242, Location: Singapore, ISBN: 978-1-4244-6499-9, DOI: 10.1109/ICCIS.2010.5518550.
- [32] Yuncong Jiang; Qahouq, J.A.A.; Batarseh, I.: *Improved solar PV cell Matlab simulation model and comparison*. Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), May 30 2010-June 2 2010, pp. 2770 - 2773, Location: Paris, ISBN: 978-1-4244-5308-5, DOI: 10.1109/ISCAS.2010.5537014.
- [33] Falcones, S.; Ayyanar, R.: *Simple control design for a three-port DC-DC converter based PV system with energy storage*. 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 21-25 Feb. 2010, pp. 2149 - 2153, Location: Palm Springs, CA, ISSN: 1048-2334, DOI: 10.1109/APEC.2010.5433534.
- [34] Chengqing Yuan; Conglin Dong; Liangliang Zhao; Xiping Yan: *Marine environmental damage effects of solar cell panel*. 2010. PHM '10. Prognostics and Health Management Conference, 12-14 Jan. 2010, pp. 1 - 5, Location: Macao, ISBN: 978-1-4244-4756-5, DOI: 10.1109/PHM.2010.5413495.
- [35] Sai, H.; Kondo, M.: *Impact of front and rear-side texturing on light trapping in thin-film silicon solar cells*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 295 - 300, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, ISBN: 978-1-4244-5890-5, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5615886.
- [36] Sastry, A.P.; Chaudhary, V.A.; Solanki, C.S.: *Novel front metal contact patterning scheme for C-SI solar cells*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 3491 - 3493, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614733.
- [37] Yuan Bo; Yang Xu; Li Donghao: *Application of power compensating concept for high efficiency maximum power point tracking in grid-connected photovoltaic system*. 2010 International Power Electronics Conference (IPEC), 21-24 June 2010, pp. 938 - 941, Location: Sapporo, ISBN: 978-1-4244-5394-8, DOI: 10.1109/IPEC.2010.5543652.
- [38] Seshan, C.: *Cell efficiency dependence on solar incidence angle*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 2102 - 2105, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616340.

# Maximum Power Point Tracking System

Dušan Medveď

Department of Electric Power Engineering FEI TU Košice  
 Mäsiarska 74  
 Košice, Slovak Republic  
 Dusan.Medved@tuke.sk

**Abstract**—This article deals with the system of enhancing the efficiency of photovoltaic output power – maximum power point tracking system.

**Keywords**-photovoltaic system; MPPT

## I. INTRODUCTION

The technology that allows a photovoltaic (PV) array to deliver the maximum amount of energy to a battery bank is known as maximum power point tracking (MPPT). MPPT charge controllers gained popularity in the early 2000s when manufacturers released highly reliable and accurate versions that allowed users to maximize the charging ability of their PV array and, in some cases, reduce the required PV array size for battery charging compared to some of the older technology.

## II. HOW THE MPPT WORKS

An MPPT charge controller uses the three charging stages to allow a PV array to operate at its maximum power point (abbreviated MPP) regardless of the voltage of the battery bank connected to the controller. Other charge controller technologies, such as pulse-width modulation, cannot fully use a PV array's MPP.

The MPP is defined as the point on the curve where the current multiplied by the voltage yields the highest power value. In other words, it is the product of the maximum power voltage,  $U_{mp}$ , and the maximum power current, or  $I_{mp}$ . For a typical 12 V nominal panel, the voltage associated with the MPP is somewhere around 17 V. PV manufacturers realized early on that this was the voltage value required to effectively charge a 12 V nominal battery bank in nearly all worldwide geographic locations. Note: Keep in mind that module voltage decreases when the module temperature rises, so the extra voltage is necessary to push the electrons into the battery bank when the module's temperature is elevated.

The maximum power voltage of 17 V does not always equate directly to the required voltage needed to charge a battery bank, though. Depending on the technology and the charge set-point, the voltage necessary for charging a 12 V nominal battery bank can range anywhere from 13 V to 15 V. Therefore, a PV module can produce more voltage than a battery bank can fully use.

MPPT controllers take the power from a PV array at the MPP, regardless of the required battery voltage, and deliver

that same amount of power (minus efficiency losses) to the battery bank because they are able to reduce the voltage from the array to the battery's required level. And because power is the product of voltage and current, if the voltage is decreased, the current is increased in order to keep the same power level. MPPT controllers boost current into the battery bank in relation to the current received from the array.

This concept is illustrated in Figure 1. , which depicts the power curve for a typical 12 V nominal PV module. The peak of the curve represents the maximum power value, which is the level that the PV module can produce.

The graph also shows the location of a typical battery charge set-point. If you move straight over to the right from that point, you'll see the power level associated at the battery-charging voltage. The difference in the MPP and the power level associated with the battery-charging voltage represents the increased power output due to the use of the MPPT technology. The PV array's power levels move throughout the day depending on the environmental conditions, and MPPT controllers adjust right along with them.

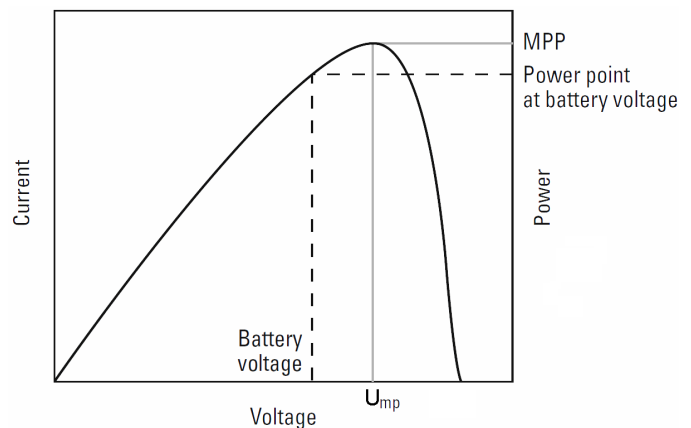


Figure 1. The power gained through the use of MPPT controllers.

## III. THE PROS AND CONS OF MPPT CONTROLLERS

MPPT controllers have become the most popular charge controllers for larger battery-based PV systems (both stand-alone and utility-interactive) thanks to their ability to fully use the power produced by a PV array. Another good thing MPPTs have going for them is their ability to take a PV array wired for a higher voltage and still charge a low-voltage battery bank.

For example, with the help of an MPPT controller, you can take a PV array that is wired in a series configuration up to 150 V DC and still charge a battery bank all the way down at 12 V nominal. Having a higher-voltage array allows your client to locate the PV array farther from the battery bank and not have to take out a second mortgage for the length of wire connecting the two. Finally, MPPT manufacturers are constantly adding features and increasing efficiencies. These improvements help you, the designer and installer, by increasing the flexibility in your design.

A major drawback to MPPT controllers is the cost. This technology comes at a price (about € 600 for a standard unit as of early 2010). Justifying the extra expense for very small systems that do not fully realize all the benefits can be difficult, which is why MPPT controllers are often used only in larger arrays.

#### IV. PULSE-WIDTH MODULATION TECHNOLOGY

Although not as sleek and sophisticated as MPPT, pulse-width modulation (PWM) charge controllers are very effective in charging battery banks and will likely be a popular technology used in PV systems for years to come. In the sections that follow, there will be described the workings of PWM technology and note the pros and cons of using it.

#### V. HOW PWM WORKS

Just like MPPT controllers, PWM controllers regulate battery charging via multiple set-points. However, unlike MPPT controllers, PWM controllers can only use the voltage from the array that equals the voltage required by the batteries. (For example, if the battery bank needs 14 V to charge and the array can supply 17 V, the controller can only accept the 14 V.) This characteristic inherently reduces the overall power available from the PV array because the battery-charging voltage rarely matches the array's maximum power voltage. Because the battery bank dictates the voltage, the amount of current sent into the battery from the array is also limited (so the current value from the array that is associated with the battery-charging voltage is different from the maximum power point current).

As the battery bank gets full, the PWM controller regulates the charge into it by pulsing the charge (turning the power on and off) from the array into the bank many times each second. Because the pulsing of the power happens so fast, the batteries "see" the current flow from the array as a slowly declining line, (as shown in the graph). This pulsing of the current, where the controller starts and stops the current flow for various amounts of time, allows the battery to accept the charge and become fully recharged.

I like to think of the way a PWM controller works as standing with your hand on a water faucet and rapidly turning the water on and off as your glass begin to fill up. By stopping the flow for brief periods, the glass can accept all the water coming into it without losing any of it.

#### VI. THE PROS AND CONS OF PWM CONTROLLERS

PWM controllers may not be as technologically advanced as MPPT controllers, but they are a proven technology that works well in many applications because they can be used with all battery technologies – even with small PV systems that have just a few PV modules charging a few batteries. Also, they are a lower-cost option compared to MPPT controllers, and they come in sizes to match very small PV applications (of course, they can also support multiple-kilowatt installations). They can even serve as effective load controllers for wind and microhydroelectric systems.

What is the main drawback of PWM controllers: Because they are not as efficient as MPPT controllers in transferring the power generated by a PV array into a battery bank, you may need more PV modules in an array to get the same charge as you would get with the help of an MPPT controller – a fact that ultimately costs your client more money.

#### VII. SPECIFYING A CHARGE CONTROLLER

When it comes time to specify the charge controller in a client's system, you need to look at the system as a whole and how the charge controller will fit into it.

Make sure you always consider the voltage and current values during the charge controller selection process. MPPT and PWM controllers come in a variety of sizes. Each size of controller is rated according to its maximum and minimum voltage levels, but the current level a controller can handle is actually the more critical specification. Every charge controller is limited in the amount of current it can process due to its type (MPPT or PWM) and size (small or large). Consequently, you need to evaluate the amount of current the PV array will produce to specify the correct charge controller for your client.

If the controller needs only to handle the battery charging and maybe control a single load, a basic PWM charge controller should suffice. However, if the application requires advanced metering and the ability to run auxiliary loads, a more advanced MPPT controller is generally your best bet; although you may also need to suggest multiple MPPT controllers to efficiently address the client's needs.

#### ACKNOWLEDGMENT

This publication is the result of the Project implementation: Research centre for efficient integration of the renewable energy sources, ITMS: 26220220064 supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF.



We support research activities in Slovakia / Project is cofinanced from EU funds.

## REFERENCES

- [1] Mayfield, R.: *Photovoltaic Design and Installation For Dummies*. For Dummies; 1 edition (September 7, 2010). 384 p, ISBN: 978-0-470-59893-1.
- [2] Guo Peiyuan; Bao Man; Bi Song; Xu Guannan; Liu Xing: *Research on Management Information System of Rural Photovoltaic Plant Equipment*. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 28-31 March 2010, pp. 1 - 4, Location: Chengdu, ISBN: 978-1-4244-4812-8, DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448716.
- [3] Lad, R.; Wohlgemuth, J.; TamizhMani, G.: *Outdoor energy ratings and spectral effects of photovoltaic modules*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 2827 - 2832, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616859.
- [4] Testa, A.; Scimone, T.; De Caro, S.: *A solar AC module with active filter capabilities*. 2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), Issue Date: 14-16 June 2010, pp. 616 - 621, Location: Pisa, ISBN: 978-1-4244-4986-6, DOI: 10.1109/SPEEDAM.2010.5542190.
- [5] Desmet, J.; Debruyne, C.; Vanalme, J.; Vandeveldel, L.: *Power injection by distributed generation and the influence of harmonic load conditions*. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 25-29 July 2010, On page(s): 1 - 6, Location: Minneapolis, MN, ISSN: 1944-9925, DOI: 10.1109/PES.2010.5590123.
- [6] Yanli Liu; Bingfeng Li; Dan Zhong: *Research on domestic PV module structure based on fault detection*. 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 7-9 July 2010, pp. 171 - 175, Location: Jinan, ISBN: 978-1-4244-6712-9, DOI: 10.1109/WCICA.2010.5553914.
- [7] Sasaki, T.; Kadota, N.; Gotoh, M.; Shimizu, K.; Takahashi, T.; Sawada, T.; Fukuda, S.; Yoshimi, M.; Yamamoto, K.; Nomura, T.; Nakajima, A.: *Fabrication technology for thin film silicon hybrid solar cells and modules*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 1134 - 1140, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614736.
- [8] Bowtell, L.; Ahfok, A.: *Direct current offset controller for transformerless single-phase photovoltaic grid-connected inverters*. IET Renewable Power Generation, September 2010, Volume: 4, Issue: 5, pp. 428 - 437, ISSN: 1752-1416, DOI: 10.1049/iet-rpg.2009.0043.
- [9] Piegari, L.; Tricoli, P.: *A control algorithm of power converters in smart-grids for providing uninterruptible ancillary services*. 2010 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Issue Date: 26-29 Sept. 2010, pp. 1 - 7, Location: Bergamo, ISBN: 978-1-4244-7244-4, DOI: 10.1109/ICHQP.2010.5625448.
- [10] Shimazaki, K.; Kobayashi, Y.; Takahashi, M.; Imaizumi, M.; Takamoto, T.; Ito, T.; Nozaki, Y.: *Progress in development of ultra-lightweight solar panel using space solar sheet*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 725 - 730, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5617083.
- [11] Graditi, G.; Colonnese, D.; Femia, N.: *Efficiency and reliability comparison of DC-DC converters for single phase grid connected photovoltaic inverters*. 2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 14-16 June 2010, pp. 140 - 147, Location: Pisa, ISBN: 978-1-4244-4986-6, DOI: 10.1109/SPEEDAM.2010.5542235.
- [12] Nagarajan, A.; Shireen, W.: *Grid connected residential photovoltaic energy systems with Plug-In Hybrid electric Vehicles(PHEV) as energy storage*. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 25-29 July 2010, pp. 1 - 5, Location: Minneapolis, MN, ISSN: 1944-9925, DOI: 10.1109/PES.2010.5589387.
- [13] Falcones, S.; Ayyanar, R.: *Simple control design for a three-port DC-DC converter based PV system with energy storage*. 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 21-25 Feb. 2010, pp. 2149 - 2153, Location: Palm Springs, CA, ISSN: 1048-2334, DOI: 10.1109/APEC.2010.5433534.
- [14] Qingshan Xu; Weiran Zhao; Haihong Bian; Yukita, K.; Ichianagi, K.: *Operation Optimization for Performance Improvement of PV/converter Systems*. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 28-31 March 2010, pp. 1 - 4, Location: Chengdu, ISBN: 978-1-4244-4812-8, DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5449469.
- [15] Masoum, M.A.S.; Mousavi Badejani, S.M.; Kalantar, M.: *Optimal placement of hybrid PV-wind systems using genetic algorithm*. 2010 Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 19-21 Jan. 2010, pp. 1 - 5, Location: Gaithersburg, MD, ISBN: 978-1-4244-6264-3, DOI: 10.1109/ISGT.2010.5434746.
- [16] Ze Cheng; Hongzhi Yang; Ying Sun: *FPGA-based PV systems fuzzy MPPT control algorithm*. 2010 Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 10-12 Aug. 2010, Volume: 3, pp. 1244 - 1248, Location: Yantai, Shandong, ISBN: 978-1-4244-5931-5, DOI: 10.1109/FSKD.2010.5569127.
- [17] Todeschini, G.; McNeill, J.; Emanuel, A.; Policarpo, J.: *Partial use of wind energy conversion systems and photovoltaic generators as active filters: An engineering economic analysis*. 2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 27-29 Sept. 2010, pp. 415 - 419, Location: Waltham, MA, USA, ISBN: 978-1-4244-6076-2, DOI: 10.1109/CITRES.2010.5619766.
- [18] Coddington, Michael H.; Kroposki, Benjamin D.; Basso, Thomas S.: *Evaluating future standards and codes with a focus on high penetration photovoltaic (HPPV) system deployment*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 544 - 549, Location: Honolulu, HI, USA, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616833.
- [19] Brando, G.; Dannier, A.; Del Pizzo, A.; Rizzo, R.: *A high performance control technique of power electronic transformers in medium voltage grid-connected PV plants*. 2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), 6-8 Sept. 2010, pp. 1 - 6, Location: Rome, ISBN: 978-1-4244-4174-7, DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607930.
- [20] Bo, Dong; Li, Yongdong; Zheng, Zedong: *Energy management of hybrid DC and AC bus linked microgrid*. 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 16-18 June 2010, pp. 713 - 716, Location: Hefei, China, ISBN: 978-1-4244-5669-7, DOI: 10.1109/PEDG.2010.5545818.
- [21] Yu, E.T.: *Engineering of plasmonic effects in photodetectors and high-efficiency photovoltaics*. 2010 3rd International Nanoelectronics Conference (INEC), 3-8 Jan. 2010, pp. 42 - 43, Location: Hong Kong, ISBN: 978-1-4244-3543-2, DOI: 10.1109/INEC.2010.5424447.
- [22] El Chaar, L.; Lamont, L.A.; Elzein, N.: *PV Technology - Industry update*. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 25-29 July 2010, pp. 1-6, Location: Minneapolis, MN, ISSN: 1944-9925, DOI: 10.1109/PES.2010.5589568.
- [23] Hsieh, T.W.; Peichen Yu: *Design optimization of series-parallel triple-junction solar cells*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 2924-2927, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5615974.
- [24] Arenas, O.; Collin, L.-M.; Chow, S.; Wheeldon, J.F.; Valdivia, C.E.; Hinzler, K.; Frechette, L.; Aimez, V.; Are, R.: *Comparative thermal analysis of solar cells mounted on ceramic and metallic carriers and their optimization for CPV applications*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 2998-3002, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614131.
- [25] Schwarz, Harald; Shaoqing Ying: *Urban photovoltaic potential*. 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 16-19 May 2010, pp. 26-28, Location: Prague, Czech Republic, ISBN: 978-1-4244-5370-2, DOI: 10.1109/EEEIC.2010.5490007.
- [26] Al-Diab, A.; Sourkounis, C.: *Multi-tracking single-fed PV inverter*. MELECON 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 26-28 April 2010, pp. 1117-1122, Location: Valletta, ISBN: 978-1-4244-5793-9, DOI: 10.1109/MELCON.2010.5476360.
- [27] Haibing Hu; Harb, S.; Kutkut, N.; Batarseh, I.; Shen, Z.J.: *Power decoupling techniques for micro-inverters in PV systems-a review*. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 12-16 Sept. 2010, pp. 3235-3240, Location: Atlanta, GA, ISBN: 978-1-4244-5286-6, DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618285.
- [28] Prajapati, V.; John, J.; Poortmans, J.; Mertens, R.: *Advanced approach for surface decoupling in crystalline silicon solar cells*. 2010 35th IEEE



- Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 902-905, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614156.
- [29] Xianlai Hu; Liqiang Yuan; Jian Chen; Zhengming Zhao: *Design and implementation of the high efficiency photovoltaic system with solid state lighting*. 2010 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 10-13 Oct. 2010, pp. 578-582, Location: Incheon, ISBN: 978-1-4244-7720-3.
- [30] Marco, T.G.; Cristina, V.; Paolo, A.; Luca, P.; Dario, G.A.; Massimo, P.: *Design considerations about a photovoltaic power system to supply a mobile robot*. 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 4-7 July 2010, pp. 1829-1834, Location: Bari, ISBN: 978-1-4244-6390-9, DOI: 10.1109/ISIE.2010.5637724.
- [31] Ding, M.; Zhang, Y. Y.; Mao, M. Q.; Yang, W.; Liu, X. P.: *Operation optimization for microgrids under centralized control*. 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 16-18 June 2010, pp. 984-987, Location: Hefei, China, ISBN: 978-1-4244-5669-7, DOI: 10.1109/PEDG.2010.5545793.
- [32] Moura, S.J.; Chang, Y.A.: *Asymptotic convergence through Lyapunov-based switching in extremum seeking with application to photovoltaic systems*. 2010 American Control Conference (ACC), June 30 2010-July 2 2010, pp. 3542-3548, Location: Baltimore, MD, ISSN: 0743-1619.

# Možnosti trvalo udržateľnej elektroenergetiky

Alexander Mészáros

Katedra elektroenergetiky

Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Košice, Slovenská republika

[Alexander.Meszaros@tuke.sk](mailto:Alexander.Meszaros@tuke.sk)

**Abstrakt**—Príspevok analyzuje hlavné ciele Európskej únie v energetike do r. 2020, konfrontuje tieto s princípmi a indikátormi trvalej udržateľnosti a poukazuje na možné zníženie ekologickej stopy na obyvateľa krajiny EÚ.

**Príučové slová**—trvalo udržateľný rozvoj; energetická bezpečnosť; obnoviteľné zdroje energie; ekologickej stopa; zachytávanie oxidu uhličitého

## I. ÚVOD

Pokrok a zvyšovanie životného štandardu sú spojené so stále narastajúcou spotrebou a výrobou elektrickej energie. Súčasná ekonomika sa čoraz viac orientuje na využívanie moderných technológií, ktoré sa vyznačujú zvyšovaním efektivity výroby a minimalizáciou spotreby energie.

Elektroenergetika sa tomuto procesu zmien tiež nevyhla. Nastávajúce zmeny v elektroenergetike sa preto zameriavajú hlavne na:

- zníženie energetickej náročnosti a zvýšenie efektívnosti, čo vedie k úsporám energie;
- náhradu tradičných zdrojov, t. j. na zvýšenie podielu využívania obnoviteľných zdrojov energie (OZE) a postupné znižovanie podielu neobnoviteľných zdrojov energie;
- modernizáciu technológií, čo následne vedie k zníženiu environmentálneho zaťaženia prostredia.

Energetická politika EÚ kladie dôraz na zefektívnenie výroby, prenosu, distribúcie elektriny a tepla, ale aj na zdanenie, ktoré má zabezpečiť efektívnejšie využívanie elektrickej energie.

## II. HLAVNÉ CIELE EÚ V ENERGETIKE DO 2020

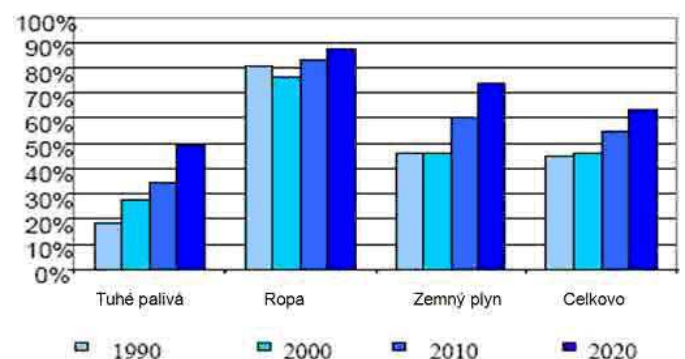
Významným nástrojom energetickej politiky EÚ je proces liberalizácie a otváranie trhu s energiami, ktorý začal v roku 1999. Riešenie energetickej bezpečnosti sa hľadá najmä v liberalizácii trhov s energiou, v diverzifikácii a v efektívnom využívaní zdrojov, v postupoch, ktoré znásobia konkurenciu na trhoch s energetickými zdrojmi a prispievajú k bezpečnosti dodávok a trvalej udržateľnosti.

Ide o také opatrenia na území jednotlivých krajín, ktoré majú zabezpečiť stabilné dodávky energie pri prijateľných a stabilizovaných cenách. Keďže energia je jedným z faktorov, ktoré určujú vstupy do výroby a tým aj výrobné náklady rôznych výrobkov, rastúce ceny za energiu znásobujú tlaky na

výrobcov a zároveň znižujú ich zisk. V záujme ekonomického rozvoja je potrebné zabezpečiť energetické zdroje na liberalizovanom trhu pri akceptovateľných cenách.

Na druhej strane sú také záujmové skupiny, ktoré spájajú energetickú bezpečnosť a stabilné ceny s dominantným postavením silných energetických spoločností na trhu jednotlivých štátov. Bokom pritom zostáva vplyv ich dominantného postavenia na výrobu, distribúciu a tým aj na zvyšovanie cien. Dlhodobé zmluvy na obdobie 10 až 15 rokov, ktoré podpisujú energetické spoločnosti s odberateľmi, majú garantovať dodávky energie na úrovni výrobcov aj distribučných sietí, pričom neraz práve prostredníctvom týchto zmlúv sa stráca transparentnosť a ohraničuje sa konkurencia na trhoch s energiou. Proti liberalizácii trhu a nárastu konkurencie pôsobí tiež duálna palivová stratégia energetických spoločností, ktorá je zameraná na fúziu elektrárenských a plynárenských spoločností.

Energetická bezpečnosť sa vo všeobecnosti vníma ako spoľahlivá dodávka energie, zabezpečenie prístupu k energetickým zdrojom a palivám v požadovanom množstve a kvalite za primerané ceny. Odhaduje sa, že ak by neboli prijaté žiadne opatrenia, energetická závislosť EÚ na tretích krajinách by narástla z takmer 50% v roku 2000 na približne 70% v roku 2030. Do EÚ bude dovážaných 66% spotrebovávaného uhlia, 90% spotreby ropy. Z Ruska bude pravdepodobne pochádzať až 60% dovážaného plynu, pričom celková závislosť EÚ na jeho dovoze dosiahne 80%. Na Obr. 1 je znázornená závislosť EÚ podľa druhov energie do roku 2020.



Obr. 1. Energetická závislosť EÚ podľa druhov energie do roku 2020.

Pod vplyvom rastúceho dopytu po energiu Európska komisia v marci 2006 vydala „Zelenú knihu o bezpečnej, konkurencieschopnej a trvalo udržateľnej energetike pre

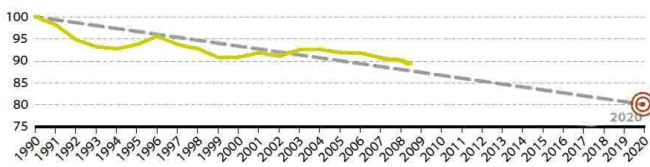


Európu“, ktorá položila základ pre diskusiu o budúcnosti európskej energetiky a sú v nej načrtnuté súčasné a budúce výzvy a možné riešenia. Boli určené tri hlavné ciele:

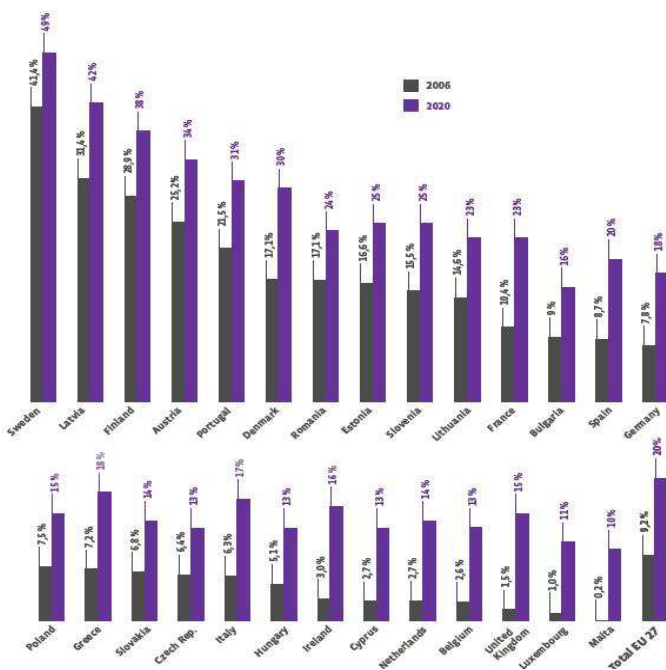
- zvýšenie bezpečnosti dodávok,
- zabezpečenie konkurencieschopnosti európskych ekonomík a dostupnosti cenovo prístupnej energie,
- podpora trvalej environmentálnej udržateľnosti a boj proti zmene klímy.

Európska rada, na základe vyššie uvedených cieľov zdôraznila potrebu vypracovať energetickú politiku pre Európu, ktorej cieľom je účinná politika Spoločenstva, jednotnosť medzi členskými štátmi, súlad medzi činnosťami v rôznych oblastiach politik a vyvážené plnenie troch cieľov. Na základe návrhov vychádzajúcich z energetickej politiky pre EÚ bol v oblasti klímy a energetiky schválený tzv. balíček 20/20/20 do roku 2020:

- znížiť emisie skleníkových plynov o 20 %, v porovnaní s rokom 1990 (Obr. 2),
- dosiahnuť 20 % podiel energie z obnoviteľných zdrojov na spotrebe EÚ a dosiahnuť 10 % podiel biopalív v doprave (Obr. 3),
- znížiť spotrebu energie o 20 %.

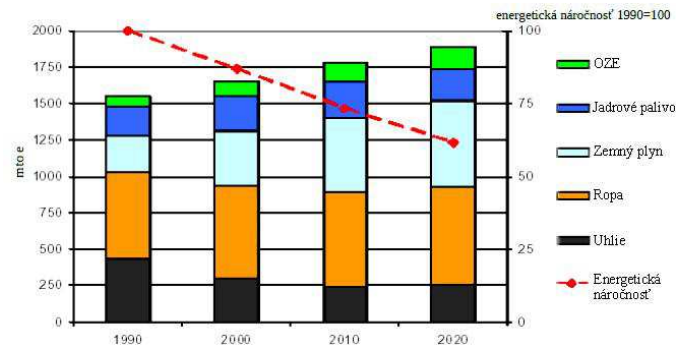


Obr. 2. Emisie skleníkových plynov v EÚ-27 (Index základného roka 1990=100).



Obr. 3. Národné ciele pre podiel energie z OZE na hrubej energetickej spotrebe do r. 2020.

S dnešným stavom vyspelých technológií je možné dosiahnuť úspory vo výške 20% spotreby energie v členských štátoch EÚ. Celková spotreba v súčasnosti dosahuje okolo 1750 Mtoe. Odhady ukazujú, že ak budú terajšie trendy pokračovať, hrubá spotreba energie by mohla vzrásť do roku 2020 o 10%, čo by znamenalo spotrebu 1900Mtoe. Rast spotreby elektriny by tiež dosiahol 1,5 % za rok. Cieľom je však dostať sa na úroveň spotreby v roku 1990, t.j.1520 Mtoe. Celkovú spotrebu energie podľa palív a energetickej náročnosti v EÚ znázorňuje Obr.4.



Obr. 4. Celková spotreba energie podľa palív a energetickej náročnosti..

### III. PRINCÍPY A INDIKÁTORY TRVALEJ UDRŽATELNOSTI

Dnes sa často stretávame s frekventovaným pojmom „udržateľný rozvoj“, ktorý sa stal základnou filozofiou a rozvojovou stratégiou všetkých krajín a integračných zoskupení vo svete.

Pojem trvalo udržateľný rozvoj (TUR) sa síce začal používať už začiatkom 70. rokov minulého storočia, avšak zásadná podpora udržateľného rozvoja v celosvetovom meradle bola deklarovaná až na konferencii OSN o životnom prostredí a rozvoji v roku 1992 v Riu de Janeiro, ktorá si vyslúžila prívlastok Summit Zeme. Na tejto konferencii boli prijaté 4 zásadné dokumenty: Rio-deklarácia, Dohovor o biologickej diverzite, Rámcový dohovor o klimatických zmenách a AGENDA 21. Podpora TUR bola znovu potvrdená a deklarovaná aj v prijatých záverečných dokumentoch na Svetovom summite o trvalo udržateľnom rozvoji (WSSD) v Johannesburgu 2002.

Udržateľný rozvoj sa opiera o niekoľko základných spoločných princípov:

- Princíp predbežnej opatrnosti - vychádza zo zásady, že environmentálnym škodám by sa malo zabrániť, pokiaľ je to možné. Je to argument v prospech udržateľných (bezodpadových technológií);
- Princíp prevencie - je založený na nahradzovaní „koncových technológií“, ktoré riešia zachytávanie odpadových vôd výstavbou čistiarní odpadových vôd, a nakladanie s odpadmi budovaním skládok, spaľovní alebo hľadáním nových metód likvidácie odpadov. Princíp prevencie sa zakladá na riešení odpadu priamo pri vzniku zdroja a odpad sa mení na sekundárnu surovinu, ktorá sa vráti do výroby, spracuje na iný

produkt alebo sa predá ako sekundárna surovina na spracovanie novému spracovateľovi;

- Princíp 3P (Polluter Pays Principle) – znečisťovateľ platí - znamená, že kto znečisťuje životné prostredie, by mal znášať všetky náklady spojené so škodami na prírodnom prostredí a zdraví človeka. Popri legislatívnych nástrojoch a zvýšení environmentálnej zodpovednosti by sa malo pristúpiť k zavedeniu tzv. environmentálnych daní. Znečisťovatelia by sa tak podieľali na všetkých externých nákladoch, ktoré znáša spoločnosť;
- Princíp integrácie - je pevne zakotvený v rámci EÚ v Amsterdamskej zmluve, ktorú možno pokladať za prvý historický krok v oblasti ochrany životného prostredia v zjednotenej Európe. Problémom zostáva, že „zelená legislatíva“ je často v rozpore s ekonomickou politikou podnikateľskej sféry;
- Princíp subsidiarity - vychádza z reálnej situácie, keď v riadiacom systéme vyššia úroveň (v hierarchii riadenia EÚ, národná vláda, región, mesto, obec), má lepšie potenciálne možnosti pozitívne ovplyvňovať stupeň znečistenia životného prostredia. Ide o efektívnu deľbu právomoci i zodpovednosti;
- Princíp partnerstva - zdôrazňuje úlohu partnerov pre trvalo udržateľný rozvoj. Vždy by sa mal viesť dialóg so zainteresovanými partnermi, aktívne hľadať východiská pre zlepšenie kvality životného prostredia, stimulovať dobrovoľne dohody a zvýšenú spoluprácu verejného sektora.

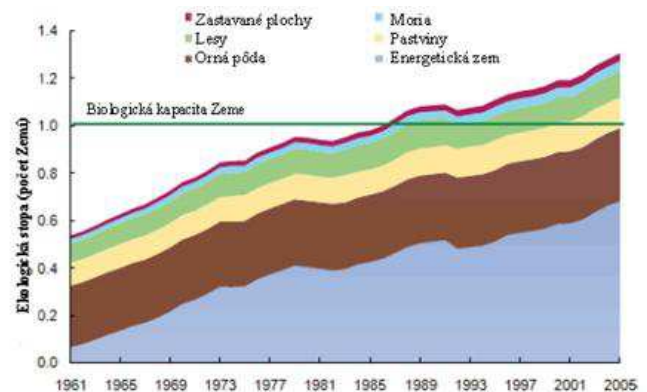
Komisia pre TUR OSN schválila na svojom zasadnutí dňa 18. apríla 1996 v New Yorku ukazovatele (indikátory) TUR. Na vyhodnocovanie smerovania k TUR bol zostavený taký súbor ukazovateľov, spravidla merateľných parametrov, ktoré by dávali kvalifikovanú informáciu o tom, či stav a vývoj sledovaného fenoménu zodpovedajú princípom a kritériám TUR, alebo nie. Pre SR bolo z celého súboru 132 ukazovateľov relevantných 125 ukazovateľov TUR, indikátory sú zoskupené do 4 oblastí - sociálnej, ekonomickej, environmentálnej a inštitucionálnej. Medzi najznámejšie indikátory patrí hrubý domáci produkt – HDP, hodnota všetkých konečných výrobkov a služieb v danej krajine za určené obdobie, spravidla za rok. HDP ako ukazovateľ sa však často kritizuje (a to nielen environmentalistami), že nevyjadruje skutočné „bohatstvo“ spoločnosti vrátane účinkov na životné prostredie, „kvalitu života“ a pod., pretože nezahrňuje:

- negatívne účinky na populáciu (napr. zdravotné výdavky, ktoré sú zapríčinené ochoreniami vyvolanými znečisteným ovzduším) a na prírodné ekosystémy pri výrobe tovarov a v službách,
- poškodzovanie a degradáciu prírodných zdrojov („kapitálu“ Zeme), na ktorých v konečnom dôsledku sú závislé ekonomiky všetkých krajín,
- či podhodnocuje niektoré pozitívne účinky na spoločnosť (napr. používanie energeticky úsporných spotrebičov vedie k zníženiu spotreby energie, čo je však zachytené ako zníženie HDP),

- nič nehovorí o „ekonomickej“ spravodlivosti – čiže o tom, ako sú zdroje, príjmy či negatívne dôsledky ekonomickeho vývoja rozdelené medzi populáciu danej krajiny.

Uvedené nevýhody HDP navrhujú rôzni autori odstrániť zavedením iných ukazovateľov, napr.: index ľudského rozvoja (Human Development Index), čistý ekonomický blahobyt (Net Economic Welfare), ukazovateľ skutočného pokroku (Genuine Progress Indicator), index udržateľného blahobytu (Index of Sustainable Economic Welfare), ekologická stopa (Ecological Footprint), a pod.

Ekologická stopa vyjadruje, že pri danom stupni technického a technologického rozvoja koľko pôdy a vody potrebuje ľudská spoločnosť, určitá krajina alebo človek na svoju existenciu, vrátane plochy na uloženie vyprodukovaného odpadu.



Obr. 5. Ekologická stopa ľudstva podľa základných kategórií.

Pre analýzu ekologickej stopy bola prírodná plocha Zeme rozdelená do 6 základných kategórií:

- energetická zem – zem, resp. plocha lesa schopného absorbovať CO<sub>2</sub> uvoľnený najmä pri spaľovaní fosílnych palív,
- orná pôda (asi 0,25 ha na osobu),
- pastviny (0,6 ha na osobu),
- lesy – na dodávku drevných produktov (0,6 ha na osobu),
- zastavané plochy (0,03 ha na osobu),
- moria – z rozlohy morí síce pripadá na jedného človeka až 6 ha, ale len približne 0,6 ha z nich poskytuje 95% ekologickej produktivity mora.

Po spočítaní všetkých položiek vychádza, že Zem má asi 2,1 ha na osobu, pričom priemerná ekologická stopa jedného obyvateľa Zeme je až 2,7 ha.

#### IV. ZACHYTÁVANIE OXIDU UHLIČITÉHO

Z Obr. 5 je zrejmé, že až polovicu ekologickej stopy zaberá plocha potrebná na absorpciu CO<sub>2</sub> uvoľneného najmä pri spaľovaní fosílnych palív. Všeobecne platí, že vyššia životná

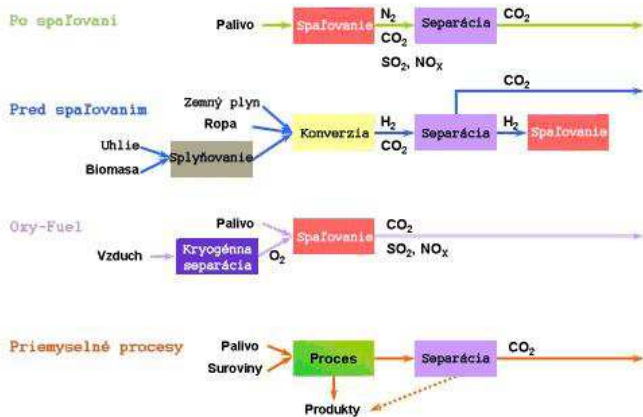
úroveň je spojená s vyššou ekologickou stopou, tento vzťah však nie je nemenný: efektívnejšie krajiny dosahujú vysokú životnú úroveň (merané podľa HDI – indexu ľudského rozvoja) s relatívne nízkou ekologickou stopou (merané podľa ekologickej stopy na osobu).

V januári 2008 EK predstavila klimaticko-energetický balíček, ktorý predstavuje základný nástroj na zníženie emisií skleníkových plynov, zníženie spotreby fosílnych palív a podporu inovatívnych, nízko-uhlíkových technológií, a na zvýšenie podielu obnoviteľných zdrojov v energetickom mixe Európskej únie. Súčasťou tohto balíčka je revidovaná Smernica o obchodovaní emisiami a Smernica o zachytávaní a skladovaní oxidu uhličitého v geologických formáciách.

Najzásadnejšou zmenou v porovnaní s doterajšou smernicou o obchodovaní emisiami je posilnenie aukčného systému v obchodovaní s povoleniami na emisie. EK navrhuje, aby energetický sektor mal 100% aukčný režim od roku 2013.

Cieľom smernice o CCS (Carbon Capture and Storage- zachytávanie a skladovanie CO<sub>2</sub>) je podporiť využívanie tejto novej technológie, keďže v najbližšej budúcnosti sa EÚ nezaobíde bez uhlia ako jedného z hlavných zdrojov energie. Idea je vytvoriť taký legislatívny rámec, ktorý podporí investície do CCS, aby sa emitentom v oblasti výroby energie oplátilo podporovať túto technológiu namiesto nákupu povolení na emisie.

Princípy najperspektívnejších metód zachytávania oxidu uhličitého sú znázornené na Obr. 6.



Obr. 6. Metódy zachytávania oxidu uhličitého.

Preprava veľkých objemov CO<sub>2</sub> zhromaždených technológiou CCS je možné v hustom (na 100 bar) alebo kvapalnom stave, potrubím alebo lodnou dopravou. Železničná a cestná infraštruktúra by nepostačovala na prepravu tak veľkých objemov a bola by nevyhovujúca aj kvôli ďalšiemu environmentálnemu zaťaženiu.

Po vyseparovaní môže byť CO<sub>2</sub> buď uskladnený, alebo opätovne využitý. Trh pre opätovné využitie je zatiaľ niekoľkonásobne menší, ako produkcia a preto treba drvivú väčšinu zachyteného CO<sub>2</sub> uložiť do geologických formácií pod zemským povrchom alebo vo veľkých hĺbkach v oceáne.

## V. ZÁVER

Ľudstvo si postupne uvedomuje, že doterajší neregulovaný hospodársky rast, založený na využívaní neobnoviteľných zdrojov energie, je dlhodobo neudržateľný a je v rozpore s trvalo udržateľným rozvojom. Na dosiahnutie trvalej udržateľnosti je v dlhodobej perspektíve nevyhnutný postupný prechod od súčasného systému k udržateľnému systému, využívajúceho najmä obnoviteľné zdroje energie.

## 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] Birkner, P.: Reliability aspects of electrical networks operated in liberalized markets. str. 523-527. Proc. Elektroenergetika 2007. ISBN 978-80-553-0400-7.
- [2] Birkner, P.: Distribution grids of the future – the technological challenges we are going to face. str. 14-19. Proc. Elektroenergetika 2009. ISBN 978-80-553-0401-4.
- [3] Dyckman, L. J. - Jones, J. R.: Renewable energy: Wind Power's Contribution to Electric Power Generation and Impact on Farms and Rural Communities. Gao, Sept. 2004.
- [4] Fialka, M., Tůma, J.: Renewable energy sources-perspectives of electricity and heat production 189-192. Proc. Elektroenergetika 2007.
- [5] Heřman, A., Mühlbacher, J.: New issues of the large scale distributed power generation. str. 81-84. Proc. Elektroenergetika 2007.
- [6] Hradělek, Z.: Reliability of power systems in connection with renewable sources of energy. str. 62-64. Proc. Elektroenergetika 2007.
- [7] Kol.: Small Wind Electric Systems. March 2005.
- [8] Kubín, M.: Energetika: Perspektivy-strategie-inovace. JME, 2002.
- [9] Martínek, Z.- Královcová, V.: Nowadays situation in operational reliability of complex network in the EU. str. 35-38. Proc. Environmental Impacts of Power Industr 2008. ISBN 978-80-7043-681-3.
- [10] Pfluger, A.: Market Stimulation of Renewable Electricity in the EU. Brussels. ISBN 92-9079-588-3.
- [11] Shahidehpour, M. - Yamin, H. - Li, Z.: Market Operations in Electric Power Systems. John Wiley&Sons, Inc., New York, 2002. ISBN 0-471-44337-9.
- [12] Šimunek, P. et al.: Energy research – the base condition of sustainable development in power engineering. str. 86-95 Proc. Elektroenergetika 2005. ISBN 978-80-553-0399-4.



# Možnosti akumulácie elektrickej energie z OZE

Alexander Mészáros

Katedra elektroenergetiky

Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Košice, Slovenská republika

[Alexander.Meszaros@tuke.sk](mailto:Alexander.Meszaros@tuke.sk)

**Abstrakt—Príspevok poukazuje na význam akumulácie elektrickej energie vyrobenej z obnoviteľných zdrojov energie a analyzuje jej možnosti pri použití chemických i nechemických technológií.**

**Kľúčové slová—obnoviteľné zdroje; akumulácia elektrickej energie; chemické technológie; nechemické technológie**

## I. ÚVOD

Téma akumulácie elektrickej energie sa v poslednom čase stáva predmetom diskusií na rôznych vedeckých a environmentálnych fórach. Hlavnou príčinou týchto debát je zvyšujúca sa celosvetová spotreba energií a z nej vyplývajúce znižovanie zásob fosílnych palív. Výskumy v oblasti hľadania nových zdrojov lacnej energie pre uspokojenie potrieb ľudstva, ako náhrady za doteraz používané fosílné palivá, zatiaľ nedosiahli uspokojivé výsledky. Minimálne v najbližších 20 rokoch preto budú fosílné palivá a jadrová energia naďalej hlavným energetickým zdrojom.

Jedným zo spôsobov, ako zmenšiť podiel tradičných (neobnoviteľných) zdrojov na celkovej výrobe a spotrebe energie je využívanie obnoviteľných zdrojov energie (OZE). Spoľahlivý a cenovo dostupný spôsob akumulácie elektrickej energie je základným predpokladom pre využitie OZE v odľahlých lokalitách, s cieľom integrácie do elektrizačnej sústavy a rozvojom budúceho decentralizovaného systému dodávok elektrickej energie. Akumulácia energie má kľúčovú úlohu v úsilí spojiť budúcnosť udržateľných dodávok energie s takým štandardom kvality poskytovaných technických služieb a produktov, ktorý sa vyžaduje a v súčasnosti je aj bežný pri využívaní klasických, vyčerpatelných zdrojov energie. Solárne a veterné zdroje energie budú pravdepodobne vyžadovať v budúcnosti akumuláciu na dni a týždne.

Prioritnou úlohou výskumu v oblasti elektroenergetiky sa v súčasnosti stáva hľadanie čo najefektívnejších a najprogresívnejších metód akumulácie elektrickej energie.

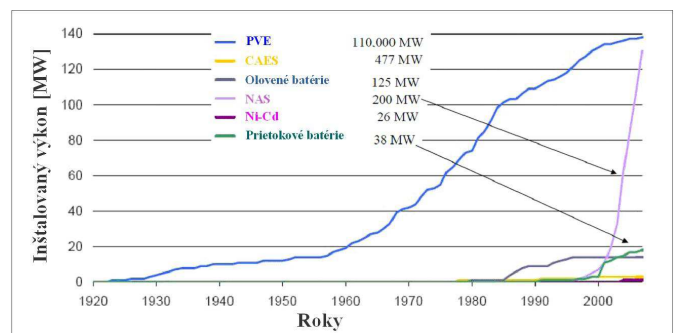
## II. ŠPECIFICKÉ VLASTNOSTI ELEKTRICKEJ ENERGIE A VÝZNAM JEJ AKUMULÁCIE

Energetické systémy sa od väčšiny typických výrobných systémov líšia niektorými spoločnými zvláštnosťami, ktoré sa u jednotlivých typov energetických systémov prejavujú rôznou mierou, najmenej v prípade sústav zásobovania ropou a najmarkantnejšie práve v prípade elektrizačných sústav (ES). Medzi tieto patria hlavne: - neskladovateľnosť elektrickej energie, čiže výroba musí prebiehať súčasne so spotrebou.

Súčasnosť výrobných, dopravných a spotrebných procesov vedie k tomu, že nemožno vyrábať a dopravovať elektrickú energiu, ak nie je súčasne aj spotrebovaná. Z toho vyplýva, že zníženie výroby v elektrárnach sústavy voči spotrebe u odberateľov by viedlo k obmedzeniu dodávky a neuspokojeniu potreby. Preto ES musí mať príslušné výkonové zálohy, aby v prípade plánovaných výpadkov (opravy a údržba) a neplánovaných výpadkov (poruchy), či neplánovaného vzrastu spotreby nemusela obmedzovať dodávku elektriny spotrebiteľom. Tieto zálohy treba považovať za nutné a využité, aj keď väčšinu času nebudú v prevádzke. Dočasné zníženie spotreby odberateľmi vyvoláva pre tento čas znížené využitie výrobných a dopravných zariadení ES, a tým aj zvýšenie merných nákladov na dodávku.

- rýchlosť prechodných javov v ES, čo vyžaduje jej vybavenosť odpovedajúcou technikou na riadenie a ovládanie zariadení, a tiež ochranné zariadenia na lokalizáciu, obmedzenie, alebo likvidáciu poruchy.

- zasahuje do všetkých oblastí života spoločnosti, preto sa vyžaduje súlad rozvoja ES s hospodárskym rozvojom krajiny. Každá porucha, alebo nedostatok v prevádzke ES i každé zanedbanie rozvoja ES, sú okamžité a markantne citel'ne.



Obr. 1. Vývoj inštalovaného výkonu najdôležitejších akumulačných technológií.

Hoci elektrickú energiu nemožno priamo uložiť, môže byť uložená v iných formách a v prípade potreby premenená späť na elektrickú energiu. Cena elektriny v čase dopytu v špičke je väčšia, ako náklady na skladovanie elektriny vyrobenej v noci. Skladovanie zlepšuje spoľahlivosť dodávky elektriny, zvyšuje efektívnosť existujúcich elektrární a prenosových zariadení a znižuje investičné náklady do týchto zariadení. Akumulácia elektrickej energie rieši v svojej podstate ekonomické hľadisko. Bez akumulácie by musela byť elektroenergetika schopná

dodať a udržať maximálnu záťaž vždy, v akomkoľvek okamihu.

Tým, že naakumulovaná energia reaguje na trh v čase jej potreby, prináša so sebou nasledovné výhody:

- znižuje potrebu ďalších investícií do prenosovej sústavy,
- stáva sa prednostným dodávateľom podporných služieb,
- poskytuje lepšiu integráciu obnoviteľných zdrojov do systému,
- podporuje efektívnejšie využívanie existujúcej ES,
- zvyšuje spoľahlivosť dodávky elektrickej energie,
- zvyšuje efektívnosť existujúcich elektrární a prenosových zariadení,
- znižuje investície potrebné na nové zariadenia.

Technológie akumulácie elektrickej energie možno rozdeliť do dvoch skupín:

- elektrochemické technológie,
- neelektrochemické technológie.

Graf na Obr.1. znázorňuje podiel najvýznamnejších technológií na akumuláciu elektrickej energie od roku 1920 až po rok 2007 s výhľadom pre budúcnosť v celosvetovom meradle. Z grafu je zrejmé, že najväčší nárast inštalovaného výkonu po roku 2000 zaznamenali sodíkové a prietokové batérie. Možno očakávať, že tieto nové akumulčné technológie budú mať neustále sa zvyšujúci podiel na trhu.

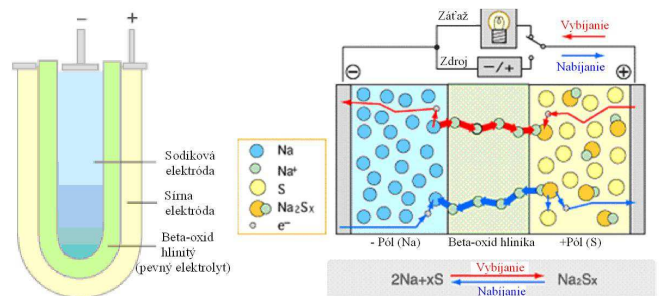
### III. AKUMULÁCIA ELEKTRICKEJ ENERGIE POMOCOU CHEMICKÝCH TECHNOLOGIÍ

Najbežnejšími príkladmi elektrochemických technológií skladovania elektrickej energie sú:

- olovené akumulátory,
- sodíkovno-sírové akumulátory (NaS),
- prietokové batérie - vanádové redoxné (VRB),
- prietokové batérie - zinkovo-brómové (ZnBr),
- niklovo-kadmiové akumulátory (NiCd),
- niklovo-metalhydridové akumulátory (NiMH),
- lítiové iónové akumulátory (Li-ion),
- vodíkové články.

Olovené akumulátory patria medzi cenovo najmenej náročné, sú najstaršou a najvyspelejšou technológiou akumulácie elektrickej energie. Medzi ich výhody patrí: viac ako storočná osvedčená technológia, ktorá je v súčasnosti najpoužívanejšou formou elektrochemickej akumulácie, sú pomerne lacné (600-1600 USD/kW). Nevýhody: nízke hodnoty mernej energie (kWh/kg) a merného výkonu (kW/kg), krátka životnosť (100-1000 cyklov), vysoké prevádzkové náklady, environmentálne riziká (obsahujú nebezpečné olovo a kyselinu sírovú), značné samovybíjanie (narastá s klesajúcou teplotou).

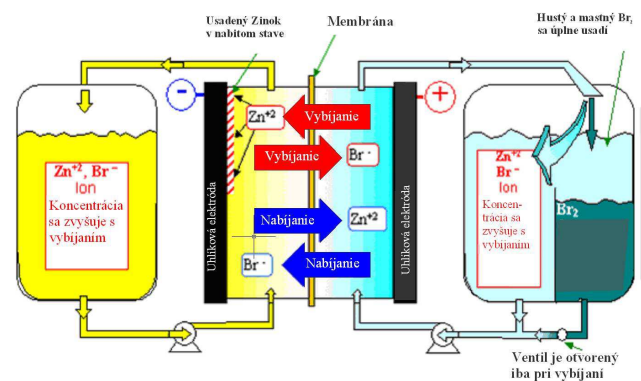
Princíp činnosti sodíkovno-sírových akumulátorov (NaS) je zrejмый z Obr. 2. Medzi ich výhody patrí: vysoká energetická a výkonová hustota, relatívne vysoká účinnosť a dlhá životnosť; medzi nevýhody: pomerne vysoké výrobné náklady (ešte stále malý objem výroby), vysoká pracovná teplota (300 °C), obsahuje toxické komponenty.



Obr. 2. Princíp činnosti sodíkovno-sírových akumulátorov.

Prietokové batérie predstavujú systém, v ktorom sa elektrická energia akumuluje v roztoku dvoch separovaných elektrolytov uložených v nádržiach mimo článku (Obr.3.). Tento spôsob prekonal obmedzenia štandardných elektrochemických akumulátorov, v ktorých elektrochemická reakcia vytvorí pevné zlúčeniny, ktoré sú uložené iba na elektródach. Práve to bolo limitujúcim faktorom štandardných batérií pri zväčšovaní objemu ich kapacity.

Princíp akumulácie spočíva v inverznej elektrochemickej reakcii medzi dvomi elektrolytmi, ktoré sú od seba oddelené polymérovou membránou. Boli vyvinuté štyri hlavné typy elektrolytov, ako zlúčenina zinku a brómu (ZnBr), vodíka a brómu (HBr), vanádu a brómu (VRB) a polysulfidu brómu (PSB). Najväčší rozvoj zaznamenali VRB batérie, kde ako základ elektrolytu slúži slabý roztok kyseliny sírovej. Testy potvrdili, že VRB batéria vydrží až 10 000 nabíjaní bez zníženia účinnosti.



Obr. 3. Princíp činnosti prietokovej batérie ZnBr.

Výhody VRB batérií možno zhrnúť nasledovne: veľkosť akumulovanej energie závisí od množstva elektrolytu, výkon článku závisí od jeho veľkosti, vysoká energetická a výkonová hustota, ľahká rozširiteľnosť; nevýhody: sú ešte len v rannej fáze vývoja, vysoké investičné náklady, obmedzené možnosti pre svoju veľkosť. ZnBr prietokové batérie majú podobné

výhody i nevýhody ako VRB batérie, navyše obsahujú korozívne a toxické materiály, vyžadujúce špeciálne zaobchádzanie z hľadiska bezpečnosti.

NiCd akumulátory predstavujú tiež staršiu technológiu, sú pomerne robustné, ale majú vyššiu hustotu energie a vyššiu životnosť ako olovené. Sú však drahšie a obsahujú toxické kadmium. NiMH akumulátory majú podobné vlastnosti ako NiCd, ale predstavujú novšiu technológiu, ich výhodou je tiež ľahká rozširiteľnosť a nižšia toxicita.

Aktívnym materiálom zápornej elektródy Li-ion akumulátorov je oxid, obsahujúci tranzitný kov. Anóda je tvorená uhlíkovo-grafitovou vrstvou. Elektrolýt je tvorený soľami lítia rozpustenými v organických uhlíčanoch. Separátor je tvorený veľmi tenkou vrstvou, obsahujúcou polymér, znemožňujúci prechod iónov. Napätie jedného článku dosahuje až 3,6 – 3,7 V. Ich výhodou je vysoká energetická a výkonová hustota i vyššia účinnosť, nevýhodou hlavne vysoké náklady kvôli obmedzenej dostupnosti kobaltu a tiež skutočnosť, že vyžadujú náročné riadenie nabíjania.

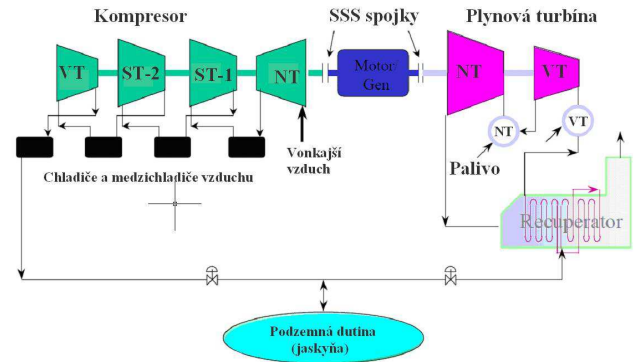
Akumulácia vodíka bola navrhnutá ako odpoveď na potrebu nových skladovacích kapacít energie. Vodík sa vyrába elektrolýzou vody, metóda je jednoduchá a odskúšaná. Energia vodíka môže byť využitá buď pomocou palivových článkov rekombináciou vodíka a kyslíka, alebo vodík môže byť používaný ako palivo v parnej kotli, či v spaľovacom motore. Hlavným problémom vodíka je jeho skladovanie. Pri jeho uskladnení do vysokotlakovej nádoby je potrebné veľké množstvo energie na jeho kompresiu a veľký objem zásobníka. Tieto fakty významne znižujú efektívnosť procesu akumulácie a preto vodík je ekonomicky výhodný iba pre veľké množstvá akumulácie. Chladením vodíka na veľmi nízke teploty sa dá znížiť objem skladovania, čo robí proces ešte viac neekonomickým. Boli vyvinuté uhlíkové nanotrúbice ako nové médium pre skladovanie vodíka, ide o mikroskopické rúrky z uhlíka veľkosti 2 nm, určené pre ukladanie vodíka do mikroskopických pórov na povrchu a vo vnútri štruktúry rúrky. Výskum tejto perspektívnej technológie je zameraný na zníženie nákladov na výrobu uhlíkových nanotrúbic pre komerčné využitie. Výhody technológie spočívajú vo vysokej energetickej hustote a spoľahlivosti, v ľahkej rozširiteľnosti, ako aj v tom, že neprodukuje žiadne škodlivé látky. Nevýhodami sú: nízka efektívnosť akumulácie, potreba objemných nádrží na skladovanie, či nutnú kompresiu, vysoké priestorové nároky na výrobu vodíka a vysoké náklady výroby (viac ako 400 \$/kW).

#### IV. AKUMULÁCIA ELEKTRICKEJ ENERGIE POMOCOU NECHEMICKÝCH TECHNOLOGIÍ

Najbežnejšími príkladmi elektrochemických technológií skladovania elektrickej energie sú:

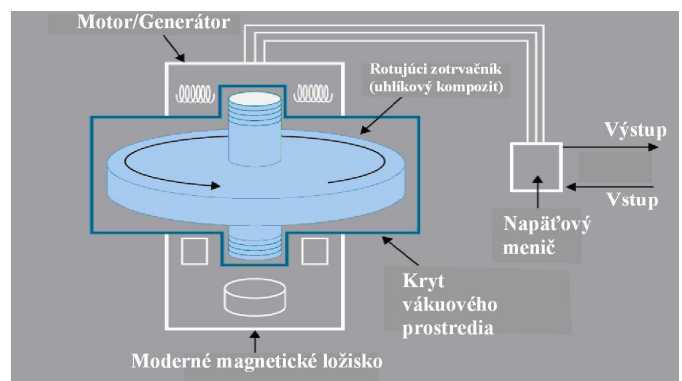
- prečerpávacie vodné elektrárne (PVE),
- podzemné zásobníky stlačeného vzduchu (CAES),
- zotrvačníky,
- superkapacitor,
- supravodivé magnetické akumulátory (SMES).

PVE patria medzi najrozšírenejšie a najznámejšie aplikácie akumulácie elektrickej energie aj v SR. Sú významnými zdrojmi špičkového a regulačného výkonu. Môžu byť budované s denným alebo s týždenným cyklom prečerpávania. Pre veľký akumulčný objem predstavujú aj významný zdroj dispečerskej zálohy. Účinnosť moderných PVE sa pohybuje okolo 85 %, medzi ich výhody patrí, že ide o osvedčenú technológiu, s vysokou kapacitou akumulácie až 1000 MW, s prakticky neobmedzenou dĺžkou skladovania energie a bez produkcie odpadu či toxických materiálov. Ich značnou nevýhodou sú geografické obmedzenia, záber veľkého územia, dlhý čas výstavby i vysoké investičné náklady.



Obr. 4. Schéma akumulácie elektriny pomocou CAES.

Aj výstavba CAES (Obr.4.) je úzko spätá s vhodnými geologickými podmienkami. Princíp uskladnenia elektrickej energie je v kompresii vzduchu do veľkokapacitných zásobníkov, ktoré sú tvorené zakonzervovanou baňou alebo prírodnou jaskyňou. V čase prebytku elektrickej energie kompresor vtlačá vzduch do zásobníkov, v čase požiadavky o dodanie špičkového výkonu stlačený vzduch expanduje v plynovej turbíne, kde sa energia expandovaného vzduchu spolu s prídavným plynom využíva na pohon generátora. Výhody: vysoká účinnosť, stabilný dodávaný výkon v každom počasí, nižšie emisie pri kombinovanom spaľovaní plynu, patrí medzi najlacnejšie možnosti akumulácie elektrickej energie, pomerne krátky čas výstavby (do 3 rokov), veľký výkon (do 300 MW), rýchly prechod z akumulátorovej do generátorovej prevádzky. Nevýhody: geografické obmedzenia, potreba paliva – zemného plynu a výstavba iba pre väčšie výkony.

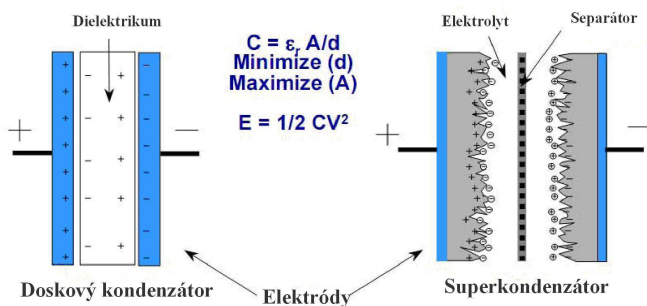


Obr. 5. Využitie zotrvačníka na akumuláciu elektrickej energie.



Elektrická energia v zotrvačníkoch je akumulovaná vo forme kinetickej energie rotujúceho telesa okolo vlastnej osi (Obr.5.). Prebytočná elektrická energia siete je dodávaná do motorgenerátora (MG) v motorovom režime, ktorý roztáča zotrvačník a zvyšuje jeho kinetickú energiu. Ak je potreba dodávať špičkovú energiu späť do siete, MG začne pracovať v generátorovom režime. Kinetická energia akumulovaná v rotujúcom zotrvačníku sa pretransformuje na elektrickú, ktorá sa dodáva do siete. Výhody: vysoká účinnosť až 90%, sú ideálne pre aplikácie, ktoré potrebujú časté a hĺbkové vybíjanie, krátky čas nabíjania a vybíjania, netoxické zloženie, veľký krátkodobý výkon, dlhá životnosť. Nevýhody: nízka hustota energie, veľké straty v pohotovostnom režime, vysoké počiatkové náklady, zvýšené nebezpečenstvo mechanických porúch.

Superkapacitor (Obr.6.) predstavuje elektrolytický kondenzátor vyrobený špeciálnou technológiou, ktorá umožňuje dosiahnuť obrovskej kapacity niekoľko stoviek až tisícok Faradov. Energia v superkapacitoroch je uložená v elektrostatickom poli rovnako, ako v klasických kondenzátoroch. Pri privedení vonkajšieho napätia dochádza k presunu kladných iónov v elektrolyte, smerom k zápornej elektróde a k presunu záporných iónov ku kladnej elektróde. Základom týchto kondenzátorov je aktívna vrstva uhlíka, nanosená na povrchu hliníkových elektród. Plocha pórovitého povrchu dosahuje hodnoty 2000 m<sup>2</sup> na jeden gram prášku uhlíka. Elektrolyty kondenzátora sú oddelené separátorom, vyrobeným z polypropylénovej fólie a sú obklopené elektrolytom, ktorý je tekutý alebo vo forme gélu. Prášok je buď uhlíkový aerogel alebo uhlíkový polymér. Materiálom budúcnosti budú uhlíkové trubice, ktoré podstatne zvýšia povrch elektród. Značnou nevýhodou týchto kondenzátorov je možnosť prerazu, preto sú tieto kondenzátory určené na napätie, ktoré sa pohybuje v rozmedzí 2,3 – 2,7 V. Výhody: veľký krátkodobý výkon, dlhá životnosť a rýchle nabíjanie; nevýhody: nízka hustota energie, vysoká investičná náročnosť a nelineárna vybíjacia charakteristika.



Obr. 6. Porovnanie štruktúry bežného kondenzátora so superkapacitorom.

V prípade SMES je elektrická energia akumulovaná v magnetickom obvode cievky. Cievka je vytvorená zo supravodivého materiálu. Prúdu, ktorý preteká cievkou nie je kladený žiadny ohmický odpor, preto energia je akumulovaná so vysokou účinnosťou. Prvé supravodivé materiály dosahovali jav supravodivosti pri veľmi nízkych teplotách radovo 4 K, čo je teplota kvapalného hélia. Náklady na výrobu skvapalneného

hélia spôsobovali, že využitie supravodičov nenašlo širšie uplatnenie v praxi. Prelom v tejto oblasti nastal po objavení vysokoteplotných supravodičov, ktorých kritická teplota sa pohybuje okolo 90 K, čo je vyššia teplota ako je teplota tekutého dusíka (77 K). Výhody: široké možnosti aplikácie, vysoká energetická a výkonová hustota, ľahká rozšíriteľnosť; nevýhody: ešte sú v rannej fáze vývoja, pomerne drahé, obmedzené možnosti kvôli ich veľkosti.

## V. ZÁVER

Výber vhodnej technológie na akumuláciu elektrickej energie závisí od splnenia viacerých kritérií. Mnohé z technológií sú odskúšané a preverené časom, iné technológie sú vo fáze pilotných a demonštračných projektov. Niektoré z nich sa javia ako perspektívne a v najbližšom čase sa predpokladá ich široké použitie v praxi. Ako príklad sa môžu uviesť prietokové a NaS batérie. Akumulácia do zotrvačníkov, superkapacitorov a SMES sa považujú za perspektívne metódy v aplikáciách pre zlepšenie kvality siete. Li-ion batérie sú v širokej miere používané v prenosných aplikáciách a ich použitie na akumulovanie väčšieho množstva energie má značný potenciál. Vodík ako zdroj naakumulovanej elektrickej energie predstavuje jednu z obrovských výziev, ktorá by mohla byť v budúcnosti najrozšírenejšou akumulácnou technológiou.

## 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] Denholm, P. et al: The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation. NREL/TP-6A2-47187, January 2010.
- [2] Dickerman, L. et al.: Challenges of Electricity Storage Technologies. APS Physics, May 2007.
- [3] Isser, S.: Electricity storage white paper. Austin, January 2010.
- [4] Kaplan, S. M.: Electric Power Storage. CRS, 2009.
- [5] Kubín, M.: Energetika: Perspektivy-strategie-inovace. JME, 2002.
- [6] Peters, R. - O'Malley, L.: Storing Renewable Power. Pembina Institute, June 2008. ISBN 1-897390-15-7.
- [7] Polívka, J.-Vostracký Z.: Akumulace energie je strategickým úkolem pro výzkum. str. 184-190. Proc. Elektroenergetika 2009.



# Meranie parametrov solárnych absorbérov

Ján Tkáč, Marek Hvizdoš  
 Katedra elektroenergetiky  
 Technická univerzita v Košiciach, FEI  
 Košice, Slovensko  
 jan.tkac@tuke.sk, marek.hvizdos@tuke.sk

**Abstrakt** — Tento príspevok je zameraný na využívanie obnoviteľných zdrojov energie s orientáciou na fototerмальnu premenu slnečnej energie. Obsahuje popis konštrukcie solárnych absorbérov a ich tepelno-energetických technických parametrov. Za týmto účelom boli realizované merania ohrievacích a ochladzovacích kriviek. Výsledky poukázali na vysokú efektívnosť ich použitia pri ohreve vody v bazénoch, prípadne iných teplonosných médií do teploty 30 °C.

**Kľúčové slová** – slnečná energia, plastový absorbér, absorptivita

**Abstract** — This contribution is focused on the utilisation of renewable energy sources with an orientation on photothermal conversion of solar energy. It contains a description of the design of solar absorbers and their technical specifications. Measurements of heating and cooling curves were carried out. The results showed high efficiency of their use for water heating in swimming pools up to 30 °C. (Measurement of solar absorbers parameters)

**Keywords** – solar energy, plastic absorber, absorptivity

## I. SLNEČNÉ ŽIARENIE A JEHO PREMENY

Slnko dodáva Zemi svoju energiu vo forme žiarenia. Presné meranie toku slnečného žiarenia uskutočňujú družice nad atmosférou. Na 1 m<sup>2</sup> postavený kolmo na dopadajúce slnečné lúče pripadá energia 1,36 kJ za sekundu, čiže výkon 1,36 kW. Túto hodnotu nazývame solárna konštanta a slúži pre výpočty množstva dopadajúcej slnečnej energie na zemský povrch. Solárna konštanta nie je stabilná a mení sa v rozmedzí hodnôt 1,34 kW až 1,4 kW, dôvodom je meniaci sa vzdialenosť Zeme od Slnka, pretože Zem obieha po elipse. Energia dopadajúcich fotónov sa pri ich pohltení mení na energiu kinetickú, t.j. na teplo. Zem prijíma celkovo 150 000 TW priameho slnečného žiarenia, čím vytvára priaznivé podmienky pre život. Zahrievanie zemského povrchu nie je všade rovnaké, no priemerná teplota je približne 15 °C [1], [2].

Pri prechode žiarenia zemskou atmosférou dochádza aj k oslabeniu žiarenia vplyvom odrazu, rozptylu či absorpcie molekulami plynu, či čistočkami prachu, v dôsledku čoho rozlišujeme tri druhy slnečného žiarenia:

- **priame žiarenie**, ktoré na svojej ceste od Slnka nezmenilo svoj smer,
- **difúzne žiarenie**, ktoré dopadá na povrch zeme pod iným uhlom ako žiarenie priame,
- **odrazené žiarenie** od okolitého terénu a objektov (súčasť difúzneho žiarenia).

Pomer jednotlivých zložiek sa neustále mení v závislosti od meteorologických podmienok a polohy miesta na Zemi. Súčet týchto zložiek označujeme ako **globálne žiarenie**, ktoré dosahuje v našich podmienkach za jasného počasia v letnom období hodnotu max. 1 000 W/m<sup>2</sup>.

Slnečné žiarenie sa po dopade na zemský povrch premení na iné formy energie:

- **tepelnú energiu** – ohrievanie zemského povrchu – voda, pôda, vzduch,
- **mechanickú energiu** – vzdušné prúdy,
- **chemickú energiu** – fotosyntéza – viazanie energie prostredníctvom fotosyntézy v rastlinách a iných organizmoch.

Možnosti využitia slnečnej energie sú znázornené na Obr. 1.



Obr. 1 Spôsoby využívania slnečnej energie

Najjednoduchšou premenou slnečnej energie je premena na teplo (fototerмальna premena), ktoré sa realizuje pomocou aktívnych alebo pasívnych systémov. Základným zariadením slúžiacim na fototerмальnu premenu slnečnej energie sú slnečné kolektory. Podľa konštrukcie ich delíme na nekoncentrujúce (rovinné, trubicové) a koncentrujúce (s bodovým alebo čiarovým ohniskom). Zvláštnu skupinu zariadení slúžiacich na fototerмальnu premenu tvoria solárne absorbéry.

## II. SOLÁRNE ABSORBÉRY

Solárny absorbér je najjednoduchším zariadením, ktorý slúži na premenu slnečného žiarenia na teplo. Konštrukciu solárneho absorbéru tvorí samonosný, najčastejšie plastový absorbér bez tepelnej izolácie, priehľadného krytu a nosného rámu. Predstavuje voľný absorbér umiestnený v priestore

smerom k dopadajúcemu slnečnému žiareniu. Absorbéry sú najčastejšie vyrábané z chemicky odolného vysokotlakého HD-polyetylénu, polykarbonátu, skla alebo niekoľkých vrstiev textilu a plastu. Možné konštrukčné riešenia plastových absorbérov sú na Obr. 2.



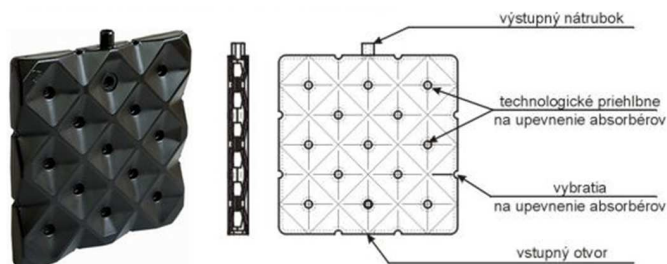
Obr. 2 Druhy plastových absorbérov

### III. MERANIE PREVÁDZKOVÝCH VLASTNOSTÍ SOLÁRNYCH ABSORBÉROV

Meranie tepelných vlastností solárnych absorbérov bolo realizované na plastových absorbéroch typu KM Solar Plast, ktorých základné technické parametre sú uvedené v Tab. 1. a ktorých základná stavebná jednotka je na Obr. 3 [3].

TABUĽKA I ZÁKLADNÉ TECHNICKÉ PARAMETRE A VLASTNOSTI ABSORBÉRA KM SOLAR PLAST

Vonkajšie rozmery	1 ks - 295 mm x 295 mm x 30 mm
Hrúbka setny	2,5 mm
Počet absorbérov na m <sup>2</sup>	12 ks
Hmotnosť	1 ks - 0,7kg 1m <sup>2</sup> (12ks absorbérov) = 8,4 kg/m <sup>2</sup>
Materiál	HDPE polyetylén vysokej hustoty s prídavkom UV stabilizátora
Teplotná odolnosť materiálu	-30 až 126°C
Rozsah pracovných teplôt	-5 až 70°C
Odolnosť absorbéra naplneného vodou voči mrazu	-30 °C bez prerušenia
Vnútorý objem	1ks - 1,8 1m <sup>2</sup> (12k absorbérov) = 21,6/m <sup>2</sup>
Prietokové množstvo	100 až 450 l/m <sup>2</sup> za hodinu
Skúšobný tlak	0,5 Mpa
Maximálny prevádzkový tlak	0,16 MPa
Koeficient slnečnej absorpcie	0,93
Koeficient tepelnej emisivity	0,97
Zberný uhol(pre pokles zisku na 50%)	155°
Energetický zisk	945 Wh/m <sup>2</sup>
Teplota stagnácie	39°C
Životnosť	min. 15 rokov



Obr. 3 Základný stavebný element plastového absorbéra

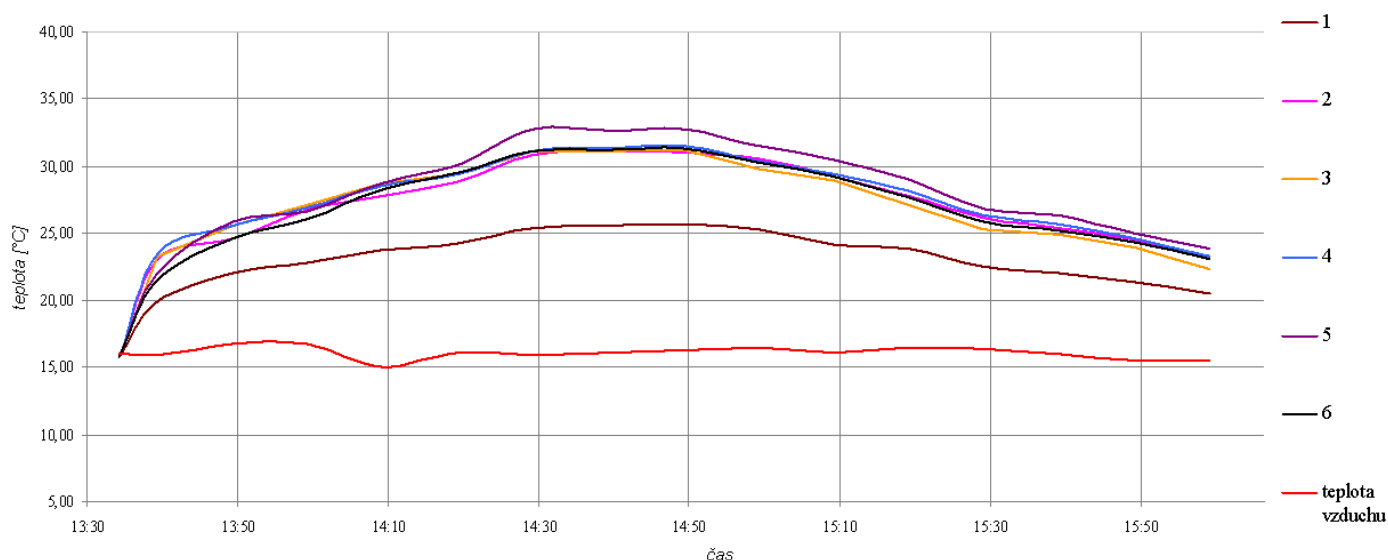
Vytváranie väčších absorpčných plôch sa realizuje vzájomným horizontálnym a vertikálnym prepojením viacerých základných dielcov (Obr. 4).



Obr. 4 Spájanie plastových absorbérov

Na meranie boli použité plastové absorbéry s rôznym obsahom pigmentu, pričom hraničné absorbéry boli bez pigmentu (1) a s maximálnym obsahom pigmentu (6). Ako teplotné médium bola použitá voda o objeme 1,6 l v každom meranom absorbéri.

Meranie bolo realizované v mesiaci apríl za jasného počasia pri teplote vzduchu 15 až 17 °C a pri rýchlosti vetra 1 až 5 m/s. Vstupná teplota vody bola 15,8 °C. Meranie sa začalo v čase 13:35 a teplota bola zaznamenávaná v 5 – minútových intervaloch pomocou digitálneho teplomeru. Pred každým meraním bolo teplotné médium v absorbéroch premiešané. Meranie prebiehalo v dvoch etapách. Najprv bol realizovaný ohrev až do dosiahnutia teploty stagnácie a potom od času 14:50 boli merané absorbéry umiestnené mimo priameho dopadu slnečného žiarenia a sledovala sa ochladzovacia charakteristika. Výsledky merania sú uvedené na Obr. 5.



Obr. 5 Grafické znázornenie výsledkov merania

#### IV. ZÁVER

Z nameraných výsledkov vyplýva, že plastový solárny absorbér typu KM Solar Plast veľmi dobre realizuje fototermálnu premenu pri ohreve teplotnosných médií od 15 do 25 °C, kedy dochádza k veľmi rýchlemu nárastu teploty teplotnosného média z 15 na 25 °C behom 15 minút. Potom krivka ohrevu u všetkých absorbérov narastá výrazne pomalšie a ohrev z 25 na 30 °C trvá 30 minút. Teplota stagnácie dosiahla 32,7 °C po približne 1-hodinovom ohreve. Pri meraní ochladzovacej krivky sa zistilo, že po 60-minútovom ochladzovaní poklesla teplota teplotnosného média o cca 7 °C.

Z uvedených závislostí vyplýva, že použitá čierna absorpčná vrstva veľmi dobre a účinne premieňa slnečnú energiu na teplo do 25 °C, avšak vyžarovanie tepla z absorbéra je pomerne malé, čo svedčí v danom teplotnom rozsahu o malej emisivite. Rozptyl nameraných výsledkov je u väčšiny meraných vzoriek pomerne malý, čo svedčí o malom vplyve pridávaného absorpčného pigmentu.

Z nameraných výsledkov vyplýva, že plastové solárne absorbéry sú vzhľadom na svoju konštrukciu a dosahované parametre vhodné na ohrev teplotnosných médií do cca 30 °C. Dosahované teploty sú vhodné hlavne na ohrev vody v bazénoch, hlavne mimo letnú sezónu, čím predlžujú možnosť ich používania.

Vzhľadom na tieto skutočnosti, ako aj na možnosť ich inštalácie v podobe chodníka prechodovej zóny, oplotenia atď., ako aj na nízke investičné náklady, jednoduchú montáž a údržbu, sú tieto zariadenia najvýhodnejšie pre ohrev vody v bazénoch. Ich výstupné parametre sú dokonca výhodnejšie ako u slnečných kolektorov, ktoré by boli použité na ten istý účel. Veľmi výhodná by bola aj ich spolupráca s tepelným čerpadlom [4] a nízkoteplotnými vykurovacími systémami [5].

#### 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] R. Cihelka, "Solárna tepelná technika," Veda Praha, 1994.
- [2] Š. Marko et al., "Energetické zdroje a premeny," Alfa Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00084-7.
- [3] KM-SYSTÉM, "Slnečné kolektory – KM SOLAR PLAST," Dostupné na internete: <[http://www.km-system.cz/sk/obchod/slnečne\\_kolektory/km\\_solar\\_plast.html](http://www.km-system.cz/sk/obchod/slnečne_kolektory/km_solar_plast.html)>, 30. jún 2011.
- [4] J. Koščo, Š. Kuzevič, P. Tauš, M. Špes, "Inštalácia 1 MW tepelného čerpadla v objekte UVL Košice," Alternatívne zdroje energie ALER 2009, ŽU Liptovský Mikuláš, 2009, s. 33-39, ISBN 978-80-554-0099-0.
- [5] N. Jasminská et al., "Nízkoteplotné vykurovanie v kombinácii so solárnymi zariadeniami," Vedecký seminár doktorandov 2009, Herľany, TU Košice, 2009, p. 1-5, ISBN 978-80-553-0310-9.



# Meranie parametrov slnečného žiarenia

Ján Tkáč, Marek Hvizdoš  
Katedra elektroenergetiky  
Technická univerzita v Košiciach, FEI  
Košice, Slovensko  
jan.tkac@tuke.sk, marek.hvizdos@tuke.sk

**Abstrakt** — Tento príspevok je orientovaný do oblasti obnoviteľných zdrojov energie so zvláštnym zameraním na využitie solárnej energie a jej meranie. Pri jej využívaní sa vychádza z meraní intenzity slnečného žiarenia pomocou pyranometrov a ďalších špecializovaných prístrojov. Pre kalibráciu viacerých pyranometrov a dostatočne presné meranie jednotlivých zložiek slnečného žiarenia bol skonštruovaný viacnábový kalibračný a merací prístroj, ktorý sa pri praktických meraniach plne osvedčil.

**Kľúčové slová** – slnečné žiarenie, pyranometer, intenzita slnečného žiarenia, kalibrácia

**Abstract** — This contribution is oriented to renewable energy sources with special focus on solar energy utilisation and its measurement. Pyranometers and other specialized equipments are used for solar radiation measurements. Multi-channel calibration and measurement device was designed. This device was proved by practical measurements. (Measurement of solar radiation)

**Keywords** – solar radiation, pyranometer, solar radiation intensity, calibration

## I. PRÍSTROJE NA MERANIE SLNEČNÉHO ŽIARENIA

Slnečné žiarenie je elektromagnetické žiarenie s vlnovými dĺžkami v rozsahu 0,28 až 3,0  $\mu\text{m}$ . Slnečné spektrum zahŕňa malý podiel ultrafialového žiarenia (0,28 – 0,38  $\mu\text{m}$ ), ktoré je pre ľudské oko neviditeľné a predstavuje asi 2 % solárneho spektra. Viditeľné svetlo má vlnové dĺžky od 0,38 do 0,78  $\mu\text{m}$  a predstavuje asi 49 % slnečného spektra. Zvyšok tvorí infračervené žiarenie (0,78 – 3,0  $\mu\text{m}$ ).

Slnečné žiarenie pozostáva z troch zložiek: z priameho, difúzneho a odrazeného žiarenia. Priame žiarenie prichádza na povrch bez prekážok a iných bariér. Difúzne žiarenie vzniká rozptylom priameho slnečného žiarenia v atmosfére. Odrazené žiarenie je výsledkom odrazu slnečného žiarenia od budov, prípadne iných nadzemných stavieb.

Na množstvo dopadajúceho žiarenia majú vplyv najmä tieto faktory:

- zemepisná poloha,
- miestna klíma, prípadne nečistoty v ovzduší,
- ročné obdobie,
- sklon povrchu k dopadajúcemu žiareniu.

Z hľadiska meraní jednotlivých veličín spojených so slnečným svitom rozlišujeme tri skupiny meraní:

- meranie dĺžky slnečného svitu (hod.),

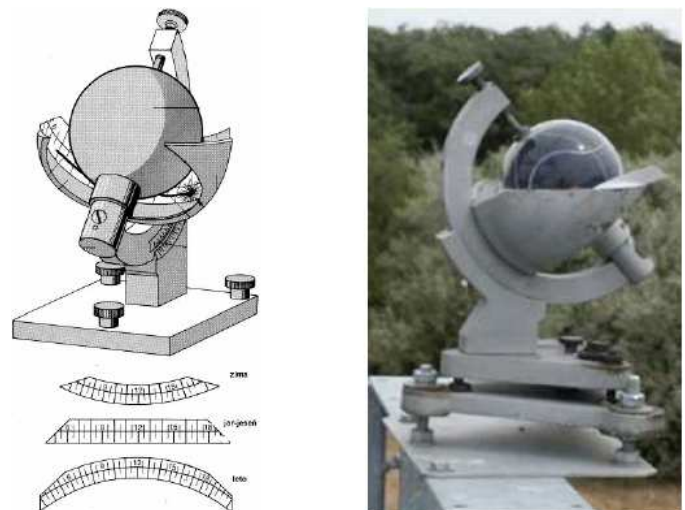
- meranie intenzity slnečného žiarenia – aktinometrické meranie ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ),
- meranie spektrálnej intenzity slnečného žiarenia – fotometrické meranie ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mmol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Pre každý druh merania boli skonštruované špeciálne precízne prístroje. Na počiatku sa vychádzalo z jednoduchých princípov, ktoré sa však postupne, vzhľadom na vyžadovanú presnosť meraní za rôznych meteorologických podmienok, stávali zložitejšími a materiálno náročnejšími.

## II. MERANIE DĹŽKY SLNEČNÉHO SVITU

Na meranie dĺžky slnečného svitu bolo ešte v roku 1853 J. F. Campbellom vyvinuté zariadenie s názvom **heliograf**. Tento bol neskôr zdokonalený G. G. Stokesom. Tento prístroj bol základným prístrojom používaným na meranie slnečného žiarenia.

**Heliograf** (Obr. 1) pozostáva zo sklenenej gule s priemerom 96 mm, cez ktorú prechádzajú slnečné lúče, ktoré sa sústreďujú do vonkajšieho ohniska, v ktorom sa dosahuje teplota odpovedajúca intenzite slnečného žiarenia. Poloha ohniska sa vzhľadom na neustálu zmenu relatívnej polohy Zeme a Slnka a v dôsledku rotácie Zeme mení.



Obr. 1 Heliograf s tromi pásikmi rozličnej dĺžky

Prístroj je konštruovaný tak, že do priestoru pohybujúceho sa ohniska sa vkladá teplocitlivá indikačná stupnica s časovou osou. Používajú sa tri druhy záznamových pásov s rôznou dĺžkou, ktoré sú umiestnené v troch rôznych polohách na

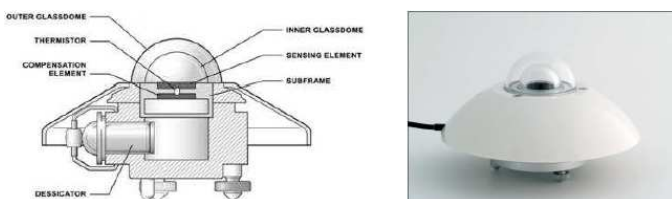
kruhovom prstenci podľa výšky Slnka nad horizontom, ktorá je vždy daná ročnou dobou v čase merania. Citlivosť tejto pásky je  $120 \text{ W/m}^2$ . Ak teda intenzita slnečného žiarenia dosiahne túto hodnotu, začne sa na indikačnej stupnici vypaľovať stopa. V prípade poklesu intenzity pod túto hodnotu stopa zaniká. Podľa dĺžky vypálenej stopy potom vieme určiť dĺžku slnečného svitu v daný deň.

### III. MERANIE INTENZITY SLNEČNÉHO ŽIARENIA

Intenzita slnečného žiarenia je ekvivalentná množstvu tepla, ktoré vzniká, ak žiarenie je pohltené telesom s dokonalou absorpciou. Intenzita slnečného žiarenia je udávaná vo  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  a jej meranie sa realizuje nasledovnými spôsobmi:

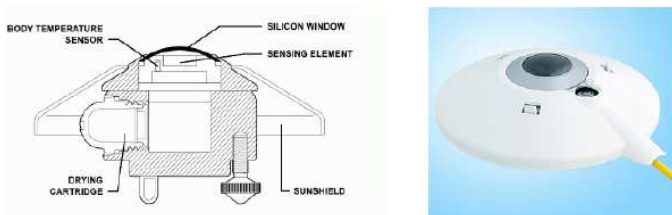
- meraním teploty čierneho telesa s maximálnou absorptivitou, ktoré je ohrievané slnečným žiarením,
- meraním napätia termoelektrického článku,
- meraním prúdu fotoelektrického článku.

**Pyranometer** (Obr. 2) slúži na meranie slnečného žiarenia s krátkou vlnovou dĺžkou a funguje na princípe termoelektrického javu. Aktívnu časť pyranometra tvoria čierne a biele plochy šachovnicového usporiadania, na ktorých vplyvom dopadajúceho slnečného žiarenia vzniká teplotný rozdiel. Tento rozdiel je pretransformovaný prostredníctvom termočlánku na elektrické napätie, ktoré je výstupnou veličinou z pyranometra. Zmena tohto napätia je priamo úmerná zmene intenzity slnečného žiarenia. Spektrum snímania slnečného žiarenia je zabezpečené optickými vlastnosťami sklenej kupoly, ktorá zabezpečuje dopad žiarenia len s krátkou vlnovou dĺžkou ( $\lambda < 3,5 \mu\text{m}$ ). Pomocou pyranometra sa dá merať veľkosť priameho, difúzneho a globálneho slnečného žiarenia.



Obr. 2 Pyranometer

**Pyrgeometer** na rozdiel od pyranometra slúži na meranie slnečného žiarenia s dlhou vlnovou dĺžkou. Ide o infračervené žiarenie s vlnovou dĺžkou 4,5 až  $100 \mu\text{m}$ . Jeho konštrukcia sa skladá z termočlánku, z kremíkovej kupoly, z teplotného snímača a zo slnečnej clony. Termočlánok zabezpečuje prevod infračerveného žiarenia na elektrický signál. Kremiková kupola slúži ako filter pre žiarenie s krátkou vlnovou dĺžkou. Slnečná clona zabraňuje ohrievaniu prístroja od priameho slnečného žiarenia. Pyrgeometer sa využíva najmä v meteorologickom výskume na pozorovanie zmeny klimatických podmienok.



Obr. 3 Pyrgeometer

**Pyrradiometer** zabezpečuje meranie slnečného žiarenia krátkej i dlhej vlnovej dĺžky ( $0,3 - 100 \mu\text{m}$ ), preto ho môžeme považovať za kombináciu pyranometra a pyrgeometra. Túto funkciu zabezpečí tým, že používa dva snímače, ktoré merajú nezávisle. Tento prístroj je vybavený špeciálnou lupolenovou kupolou, ktorá umožňuje merať slnečné žiarenie v širokom spektrálnom intervale.



Obr. 4 Pyrradiometer

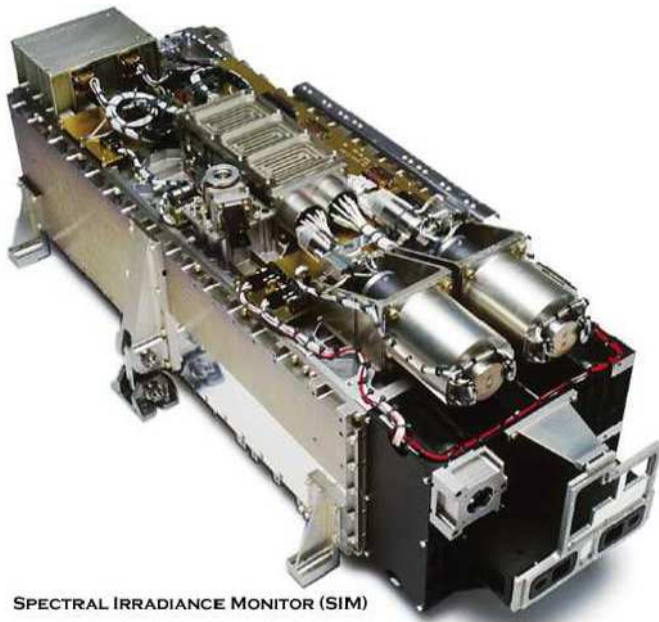
### IV. MERANIE SPEKTRÁLNEJ INTENZITY SLNEČNÉHO ŽIARENIA

Na meranie užšieho úseku spektra slnečného žiarenia sa nepoužívajú vyššie popísané prístroje s termočlánkom, ale špeciálne vyrobené polovodičové fotosnímače. Takéto prístroje sú konštruované tak, aby ich spektrálna citlivosť odpovedala prakticky využívanému spektru slnečného žiarenia. Typický príklad takéhoto snímača je **LI-190SA** (Obr. 5), ktorý slúži na meranie intenzity slnečného žiarenia v rozsahu  $400 - 700 \text{ nm}$ , ktorý je vhodný pre použitie v poľnohospodárstve a fotovoltaických solárnych systémoch.



Obr. 5 Vyhotovenie fotodiódy LI-190SA

Výsledkom najnovších výskumov je zariadenie **SIM** (Obr. 6) vyvinuté v NASA pre potreby kozmického výskumu. Slúži na dlhodobé meranie a mapovanie solárneho spektra. Obsahuje tri snímače, z ktorých každý zabezpečuje meranie v určitej časti solárneho spektra. Jednou zo zložiek kompletného systému je XPS, ktorý monitoruje slnečné žiarenie vlnových dĺžok v rozsahu  $\lambda = 0 - 30 \text{ nm}$ . Druhú časť tvorí SOLSTICE, ktorý monitoruje oblasť ultrafialových žiarení ( $\lambda = 200 - 300 \text{ nm}$ ) a tretím zariadením je SIM, ktoré sleduje viditeľné spektrum svetla a blízke infračervené žiarenie ( $\lambda = 300 - 2400 \text{ nm}$ ). Pomocou tohto zariadenia je možné analyzovať vplyv zmeny intenzity slnečného žiarenia na globálnu klímu. Poskytuje aj informáciu o rozložení energie slnečného žiarenia v jednotlivých častiach spektra.



Obr. 6 Zariadenie SIM na monitorovanie solárneho spektra

Na sledovanie dlhodobých zmien intenzity slnečného žiarenia dopadajúceho na Zem bolo vyvinuté zariadenie **TIM**. Pomocou tohto prístroja sa monitoruje závislosť klimatických zmien od slnečnej aktivity. Umožňuje aj sledovanie dlhodobých solárnych cyklov.

#### V. MERANIE INTENZITY SLNEČNÉHO ŽIARENIA POMOCOU PYRANOMETROV

Najčastejšie používaným prístrojom v solárnej technike je pyranometer využívajúci na meranie intenzity slnečného žiarenia termoelektrický jav. Napriek tomu, že vo svete tieto zariadenia vyrába viacero firiem, vzhľadom na rozptýl nameraných výsledkov, boli pre celosvetovú meteorologickú sieť určené pyranometre Kipp & Zonen. Avšak aj tieto pyranometre je pre dosiahnutie presných výsledkov potrebné pravidelne kalibrovať.

V Laboratóriu netradičných zdrojov energie (LNZE) sú pri meraniach intenzity slnečného žiarenia používané tri pyranometre rozdielnej konštrukcie od rôznych výrobcov (Obr. 7). Vzhľadom na rozdielne výstupné hodnoty je potrebné zabezpečiť ich zhodné výstupné napätia pri rovnakej intenzite slnečného žiarenia.



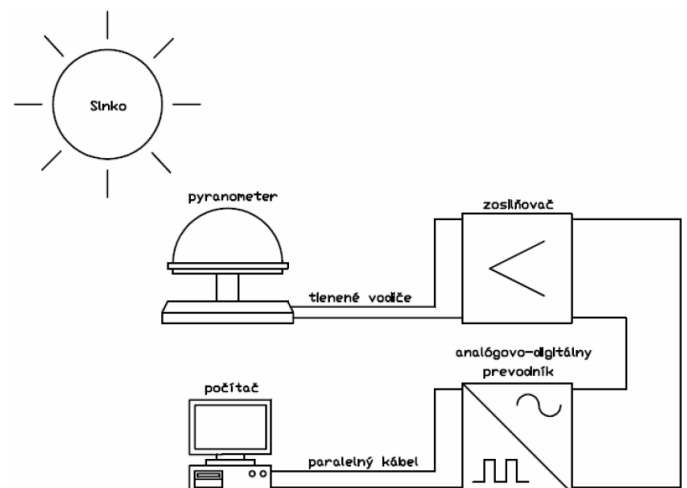
Obr. 7 Pyranometre používané v LNZE

Ako normál slúži pyranometer č. 1, ktorý bol kalibrováný podľa prístroja z medzinárodnej meteorologickej siete. Tento prístroj je konštruovaný tak, že umožňuje plynulú horizontálnu aj vertikálnu zmenu polohy snímača. Druhý snímač je konštrukčne identický, avšak bez polohovacích mechanizmov. Tretí pyranometer je od firmy Kipp & Zonen.

S uvedenými prístrojmi bolo vykonané porovnávacie meranie za jasného slnečného dňa s nasledovným výsledkom:

- prístroj č. 2 v porovnaní s č. 1 ukazoval v priemere o 1,1 % vyššie hodnoty.
- pyranometer č. 3, v porovnaní s č. 1, dodával o 7,5 % nižšie výstupné napätie.

Vzhľadom na to, že pri meraniach na solárnych zariadeniach je potrebné vychádzať z hodnoty priamej, difúznej a odrazenej zložky slnečného žiarenia, bude potrebné realizovať úpravu výstupných napätí z pyranometrov tak, aby ich údaje boli priamo porovnateľné pomocou výpočtovej techniky s programovým vybavením LabVIEW. Výstupné napätia z pyranometrov je teda potrebné digitalizovať, aby ich bolo možné softvérovo aj hardvérovo upravovať. Na tento účel bolo navrhnuté zariadenie, ktorého bloková schéma je na Obr. 8.

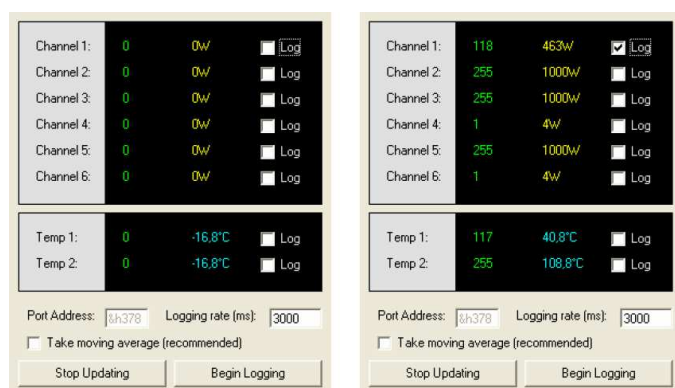


Obr. 8 Bloková schéma meracieho zariadenia pre jeden pyranometer



Podľa uvedenej blokovej schémy je napätie pyranometrov zosilnené tak, aby na výstupe zosilňovačov dosahovalo 1000 mV pri ožiarení slnečným žiarením s intenzitou 1000 W/m<sup>2</sup>.

Signál z prevodníka ide ďalej do počítača na spracovanie. Prepojenie medzi meracím zariadením a počítačom sa rieši pomocou paralelného portu. Merané intenzity slnečného žiarenia sú zobrazené cez používateľské rozhranie, ktoré bolo vytvorené v programovacom jazyku Visual Basic pre prvé experimentálne merania. Zobrazenie nameraných hodnôt intenzity slnečného žiarenia v jednotlivých meracích kanáloch je na Obr. 9.



Obr. 9 Používateľské rozhranie v zastavenom stave

## VI. ZÁVER

Na základe získaných výsledkov je možné konštatovať, že zvolený postup je správny a umožňuje značné zjednodušenie merania intenzity slnečného žiarenia bez potreby prepočtov. Meracie zariadenie umožňuje skalibrovať ľubovoľný pyranometer pokiaľ nemá porušenú linearitu. V ďalšom období, pre zabezpečenie možnosti názorného porovnania nameraných výsledkov priamo počas merania, je potrebné realizovať spoluprácu s programovým vybavením LabVIEW, ako aj ďalšími meracími prístrojmi.

## 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] R. Cihelka, "Solárna tepelná technika," Veda Praha, 1994.
- [2] Š. Marko et al., "Energetické zdroje a premeny," Alfa Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00084-7.
- [3] Enviroportal.sk [online]. 2010 [cit. 2011-04-29]. Energetická náročnosť hospodárstva SR. Dostupné na internete: <[http://enviroportal.sk/indikatory/detail.php?kategoria=121&id\\_indikator=455](http://enviroportal.sk/indikatory/detail.php?kategoria=121&id_indikator=455)>.
- [4] Ekonomika.sme [online]. 2010 [cit. 2011-04-29]. Energetická náročnosť je štvrtá najvyššia v EÚ. Dostupné na internete: <<http://ekonomika.sme.sk/c/5412822/energeticka-narocnost-je-stvrta-najvyssia-veu.html>>.
- [5] Getreallist.com [online]. 21.11.2009 [cit. 2011-04-29]. Can Renewables Replace Fossil Fuels?. Dostupné na internete: <<http://www.getreallist.com/can-renewablesreplace-fossil-fuels.html>>.
- [6] Gm-volt.com [online]. 2009 [cit. 2011-04-29]. China energy mix. Dostupné na internete: <<http://gm-volt.com/forum/showthread.php?3920-Nopenhagen-blame-China>>.
- [7] Oilcrisis.com [online]. 2007 [cit. 2011-04-29]. U.S. electricity generation fule mix. Dostupné na internete: <<http://www.oilcrisis.com/coal/>>.
- [8] Energie-portal.sk [online]. 2011 [cit. 2011-04-29]. Výroba elektriny v SR. Dostupné na internete: <<http://www.energie-portal.sk/Dokument/vyroba-elektriny-vsr-100227.aspx>>.
- [9] Greenrhinoenergy.com [online]. 2010 [cit. 2011-04-29]. Economics of Renewable Energy Plants. na internete: <<http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/context/economics.php>>.
- [10] Osel.cz [online]. 2010 [cit. 2011-04-29]. Jaderné reaktory IV. Generace využívající roztavené soli Jaderné reaktory využívající roztavené fluoridové soli jsou . Dostupné na internete: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=5094>>.
- [11] M. Kolcun et al., "Elektrárne," Technická univerzita v Košiciach 2006.



# Importance of Batteries for Photovoltaic Systems

Dušan Medved', Michal Kolcun

Department of Electric Power Engineering FEI TU Košice  
Mäsiarska 74  
Košice, Slovak Republic  
Dusan.Medved@tuke.sk, Michal.Kolcun@tuke.sk

Rastislav Stolárik, Štefan Vaško

VÁDIUM s.r.o.  
Plzenská 2  
Prešov, Slovak Republic  
stolarik@vadium.sk, vasko@vadium.sk

**Abstract**—This article deals with the necessity of using the batteries for photovoltaic systems.

**Keywords**-photovoltaic system; battery

## I. INTRODUCTION

To many people a battery is a very useful but rather mysterious device. It delivers electric power for a multitude of purposes, but is silent, has no moving parts and gives no visual evidence of its operation. The main advantages of batteries are:

- i) They provide a portable source of electric power. This power is available in considerable quantity for use on moving equipment or where no power lines are accessible. They are unaffected by cords or cables.
- ii) They are capable of delivering very large quantities of power for short periods and being recharged at low rates over extended times. Thus heavy surges on power are available when required, without heavy demands on a power system or equipment.
- iii) They provide the most reliable known source of emergency power, instantaneously when normal power fails. They can thus enable light or power to continue when the need is greatest.
- iv) They provide a source of pure direct current for laboratory and other specific purposes, either as a separate and independent supply or by acting as filter in a normal supply system.

These and other distinctive attributes of a battery make it the optimum selection for an almost infinite number of applications.

In many types of stand-alone photovoltaic (PV) systems for continuous power supply, batteries are required to even out irregularities in the solar irradiation. Today, nickel-cadmium (NiCd) and lead-acid (PbA) batteries are commonly used in PV systems. Some emerging battery technologies may also be suitable for storage of renewable energy, such as different types of redox flow batteries and high-temperature sodium-sulfur batteries. Identification of the important parameters in PV applications can be used to direct research and product improvements, and comparison of different battery technologies can be used to guide battery choice for specific user conditions.

## II. BATTERIES FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

The energy produced during the day, which was not consumed by loads, is saved in batteries. Saved energy can be used at night or during days with bad weather conditions. Batteries in photovoltaic systems are often charged/discharged, therefore they must meet stronger requirements. Most often used classic lead-acid (PbA) batteries are produced especially for PV systems, where deep discharge is required. Other battery types, such as nickel-cadmium (NiCd) or nickel metal hydride (NiMH), are rarely used, except in portable devices. Hermetical batteries often consist of an electrolyte in gel form. Such batteries do not require maintenance. Typical solar system batteries' lifetimes span from three to five years, depending heavily on charging/discharging cycles, temperature and other parameters. The more often the battery is charged/discharged, the shorter the lifetime.

Lifetime depends on charge/discharge cycle rates numbers. The deeper the battery is discharged, the shorter the lifetime. The most important battery parameter is battery capacity, which is measured in ampere-hours (Ah). Battery capacity depends on discharging current; the higher the discharging current the lower the capacity, and vice versa. Batteries can be charged in many different ways, for example with constant current, with constant voltage etc., which depends on the battery type used. The charging characteristics are recommended and prescribed by different standards. The prices of solar batteries are higher than the prices of classic car batteries, but their advantages are longer lifetime and lower discharging rates. Consequently, the maintenance costs of the photovoltaic system are lower.

The battery's capacity for holding energy is rated in amp-hours: 1 amp delivered for 1 hour = 1 amp-hour.

Battery capacity is listed in amp-hours at a given voltage, e.g. 220 amp-hours at 6 volts. Manufacturers typically rate storage batteries at a 20-hour rate:

A 220-amp-hour battery will deliver 11 amps for 20 hours.

This rating is designed as a means to compare different batteries to the same standard. Batteries are electrochemical devices sensitive to climate, charge/discharge cycle history, temperature and age. The performance of a battery depends on climate, location and usage patterns. For every 1 amp-hour removed from a battery, about 1,25 amp-hours will need to be pumped back in to return the battery to the same state of

charge. This figure also varies with temperature, battery type and age.

Batteries used in PV applications are fundamentally required to operate differently from those used in normal stationary or motive power applications. Unlike other conventional uses of storage batteries, the batteries meant for PV applications are characterized by a small or fractional change in state-of-charge (SOC) level on daily charge/discharge cycles, while exhibiting a sharp decline in SOC during certain periods in the year, depending on climatic conditions and season. In addition, typical stand-alone and remote PV installations require roughness and environmental flexibility and to be capable of unattended operation, easy installation and reliability. These conditions require that the sub-system including the battery should also meet the same criteria as set for the PV module. The batteries specially developed for such applications, usually called solar or photovoltaic batteries, are therefore designed to have the following characteristics:

- a) *high cycle life;*
- b) *good reliability under cyclic discharge conditions;*
- c) *high capacity appreciation at slow rate of discharge;*
- d) *low equalizing and boost charging requirement;*
- e) *low self-discharge;*
- f) *high watt-hour efficiency and ampere-hour efficiency at different SOC levels;*
- g) *wide operating temperature range;*
- h) *highly cost effective;*
- i) *long life, robust design and low maintenance requirement;*
- j) *manufacturing under stringent quality controls.*

The energy requirement for battery production and transport is dominant for systems based on NiCd, NiMH and PbA batteries. Production and transport of batteries contribute 24–70 % to the energy requirements, and the PV array contributes 26–68 %. The contribution from other system components is less than 10 %. For a PV-battery system with a service life of 30 years, this corresponds to energy pay back times between 2,5 and 13 years. The energy payback time is 1,8–3,3 years for the PV array and 0,72–10 years for the battery. The overall battery efficiency, including direct energy losses during operation and also energy requirements for production and transport of the charger, is 0,41–0,80 for battery and inverter, respectively.

### III. SELECTION OF PV BATTERY

In most cases the choice of battery is based on lowest price. Because of this, an inadequate and improper battery is selected, which reduces the system's reliability and durability. Many approaches can be followed for the selection of a PV battery. Cycle life, performance at extreme temperature, effect of rate of discharge, self-discharge rate, battery voltage and maximum current drain capacity in ampere-hours, watt-hours per weight,

maintenance requirements, watt-hours per unit volume and cost per watt-hour are a few critical parameters which can be optimally combined to select the right battery for any particular PV installation. Conventionally, a lead-acid automotive battery has been used in most PV installations. Recently, industrial lead-acid battery types with pasted, plane or tubular plates, having grids with low or high antimony content or of pure lead or calcium alloys, are frequently used. Further, vented, gelled and recombination types make the selection even wider. In addition, according to promoters the nickel-cadmium battery has better performance characteristics over the lead-acid battery. Other alkaline battery systems also compete with lead-acid batteries for PV applications for their longer service life and completely maintenance-free operation.

#### A. Batteries Commonly Used for PV Applications

The most commonly used storage battery for PV applications is the lead-acid type. Alkaline batteries are also suitable for PV applications, however at present only nickel-cadmium has acceptable performance characteristics and lifecycle costs for these applications.<sup>4</sup> Automotive, traction, stationary and maintenance-free gelled electrolyte batteries have found their use in different PV applications. Automotive batteries (also known as SLI; Starting, Lighting and Ignition batteries) have traditionally been used for daily shallow depth-of-discharge (DOD) PV applications, e.g. street lighting, although they have only a 2–4 years life span and a poor cycling ability. A stationary battery is frequently used for applications involving telecommunications, navigational aids, emergency lights, uninterrupted power supply systems, etc. These are capable of occasional deep discharge. Rechargeable traction or motive power batteries are used in electric vehicles, which can also be powered by a photovoltaic array.

Maintenance-free batteries are increasingly required in automotive, traction or stationary applications. Gelled electrolyte or sealed maintenance-free batteries are suitable for PV applications, which require completely unattended operations.

Research and development on sealed lead-acid batteries for PV power application has recently led to the development of a tubular-type battery featuring acid immobilization using silica gel, antimony-free Pb grids and thicker plates compared to conventional ones. Batteries with lead plates strengthened by calcium or small amounts of antimony are relatively cheap and exhibit good properties for remote applications. Self-discharge accelerated by antimony is reduced by using pure lead grids. As per the experience of some PV companies, a battery with low antimony content is the best choice for PV applications.

#### B. Battery Installation, Operation and Maintenance

In order to investigate the 'Battery charge control and management in PV systems', the Commission of the European Community (CEC) initiated concerted efforts in 1987 in this direction. The objective of this work was to identify battery operating problems based on experiences with 16 PV power plants.

The main problems found in these studied plants were due to: poor operation and maintenance procedures; an inadequate

battery charging system; improper sizing of the battery; and inadequate information on the condition of the batteries. In several PV plants, batteries were found to be damaged due to deep discharge, ageing and structural failure of the cell casing. A few cases of excessive overcharging and the large number of operating cycles in five years of their operation were observed. In addition to these, cases of explosions caused by a build-up of hydrogen in the cells were also observed. The investigation revealed that in most of the studied plants, the operation and maintenance procedure was not documented and routine tests of voltage, temperature, specific gravity and periodic visual inspections were not carried out. Some of the observed problems could have been detected and avoided, if proper operation and maintenance procedures were adopted. Several other studies have also reported the significance of adequate management of battery storage in PV installations. One such study emphasizes the need to install peripheral components for the acquisition and processing of battery specific parameters in addition to adopting active measures for battery management. The battery in a PV installation is subjected to two distinct cycles, namely:

- a) a daily cycle characterized by varying profile and amplitude depending upon the PV energy supplied and electrical energy given to the load;
- b) a seasonal cycle depending on the variation in average insolation during the year.

These cycles cause several stresses and ageing mechanisms in the battery. The most commonly observed problem areas are the following:

- i) Overcharging the battery causes corrosion of positive grid plates and excessive gassing resulting in loosening of the active material. Due to this, loosened material deposits as sediment at the bottom of the cell. Overcharging may also cause temperature to rise to a permanently destructive level.
- ii) Consistent undercharging of the battery leads to a gradual running down of the cell, which is indicated by the reduced specific gravity readings and the tendency of plates to become light coloured. Excessive undercharging also causes sedimentation of white lead sulfate powder. The strain on the plates caused by the lead sulfate, which occupies more space than the original active material on the plates, results in their buckling.
- iii) Presence of non-conducting materials, which form a layer between the battery terminal and the connector, may offer an increased resistance to the passage of large currents through the load. Corroded terminals, however, may not ordinarily interfere with the charging of the battery or with the discharging at low discharge currents.
- iv) Short circuits may be caused by a breakdown of separators and excessive sedimentation, due to a phenomenon called 'treeing', in which tree-like structures of lead are formed from the negative to positive plates. Treeing may be due to the presence of certain materials in the grid, e.g. cadmium. It may also be due to 'mossing', in which the sediment brought to the surface of the electrolyte

by the gas settles on top of the plates leading to the formation of bridges over the separator tops.

v) When a battery is either operated at partial SOC for several days without equalization or it remains unused for any length of time in fully or partially discharged conditions, the deposition of large lead sulfate crystals instead of normal tiny ones on the plates takes place. The phenomenon called sulfation also occurs when there are temperature variations in the battery. These large crystals tend to increase the internal resistance of the cell, which results in low discharge and high charge voltages.

vi) When the battery reaches full charge, the rise in plate potential beyond a certain cut-off voltage leads to the decomposition of water to hydrogen and oxygen gas (water loss). The quantity of gas formed depends on the amount of excess charging current which is not absorbed by the battery.

It is recommended that a battery (conventional flooded type) meant for PV applications is installed in a separate room in order to avoid accidents due to the formation of hazardous gases. Adequate ventilation and moderate temperature must be provided in accordance with the supplier's instructions. Batteries are most commonly designed for floor placement over wooden or plastic planks. In some cases, installation is also done on steel step stands with acid-resistant paint on them. A sealed maintenance-free battery can be housed in a usual working area with normal ventilation. It can be installed on slotted iron racks, although battery suppliers recommend specific installation guidelines, including batteryroom designs based on the type and construction of the supplied battery. The standard guidelines for installation and maintenance of lead-acid batteries for PV applications and of nickel-cadmium batteries for generating stations and substations are available from the IEEE in the form of the European Standards. These standards describe in detail the safety precautions, installation procedures, installation and design criteria and maintenance requirements.

### C. Battery Protection and Regulating Circuits

Proper battery operation in a PV system requires voltage-regulating protection circuitry to prevent overcharging and excessive discharging. Permanent damage can be done to a battery if it is charged too fast and for too long. Similarly, forcing higher charging currents into a battery when it is fully charged will cause the battery to gas. Excessive discharging will cause the plates to disintegrate and should be avoided. The use of voltage-regulating circuits to maintain the battery voltage within an acceptable range or window is therefore necessary. A few elementary regulator circuits are discussed below.

#### *Shunt Regulator*

The regulator which is connected in parallel to the PV generator dissipates excess energy through a resistor and power components. There is no voltage drop in the charging unit and the power consumption by the regulator is negligible during the non-regulation period. Any failure in the regulator does not interrupt the battery charging.

### **Series Regulator with Semi-conductor**

The series regulator uses a transistor in series with the PV generator. The regulator behaves like a variable resistance, whose value is a function of the state-of-charge (SOC) of the battery. The dissipated power at the transistor terminals is low compared to PV peak power. However, during the non-regulation period, the regulator introduces a voltage drop and thereby current consumption in the circuit.

### **Series Regulator by Electromechanical Cut-off**

This regulator stops the battery charging by an electromechanical cut-off when it reaches the maximum acceptable voltage level. It is reset for charging automatically when the threshold voltage is reached. There is no power dissipated in the regulator.

### **Automatic Circuit Breaking**

This regulator is used in cases of weak sunlight, over-consumption, etc., when it becomes necessary to cut off the load to limit the depth of battery discharge. Below a certain threshold voltage level, the load is cut off and is reset automatically when the battery reaches a sufficient charge level.

### **D. Battery Simulation and Sizing**

Stand-alone PV systems with battery storage are usually designed to ensure array energy output exceeding the load demand year round. The system is also expected to maintain a continuous supply of energy during cloudy days and for night-time loads. The battery size is dependent upon the load energy requirement and weather patterns on the site, the latter necessitating increased storage and PV capacity during the heavily overcast sky and low insolation period of the year. Consequently, during peak sunshine days, the battery will remain near a fully charged state with the array generating excess energy. In order to prevent the battery from overcharging it needs to be either disconnected or dissipated.

A major concern in designing any PV power system, therefore, is to obtain optimum capacities of the PV array and the battery storage for the supply of energy at the chosen reliability. In order to match the battery behaviour properly with the array, as well as with the load, a modelling exercise is performed. This modelling exercise gives parameters characterizing the battery's state, e.g. current accepted and lost, internal electromagnetic field, voltage or terminal voltages, state of charge, internal resistance, etc. The application of the simulation technique in battery sizing results in an optimum battery capacity required to satisfy the given load with an expected reliability. Several researcher groups have developed battery models describing the relation between battery voltage, current and SOC. The discharging current is useful for designing the control system, a model for relating the capacity of the battery. The ageing model describing the lifetime of a battery is useful for an economic analysis.



Figure 1. Residential Photovoltaic Battery Backup – critical for extended outages.

### **ACKNOWLEDGMENT**

This publication is the result of the Project implementation: Výskum charakteristík fotovoltaiických komponentov pre efektívne projektovanie solárnych systémov, ITMS: 26220220080 supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF.



We support research activities in Slovakia / Project is cofinanced from EU funds.



### **REFERENCES**

- [1] G.N. Tiwari, Swapnil Dubey: *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications (RSC Energy Series)*. Royal Society of Chemistry, 2010. 424 pages. ISBN 978-1-84973-020-4.
- [2] J. C. Das.: *Power System Analysis. Short-Circuit Load Flow and Harmonics*. Marcel Dekker, Inc.: 2002, ISBN: 0-8247-0737-0.
- [3] Jos Arrillaga, Neville R. Watson: *Power system harmonics*. Second Edition. John Wiley & Sons: 2003, ISBN 0-470-85129-5.
- [4] S. Armstrong, W.G. Hurley: *A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions*. Elsevier: Applied Thermal Engineering. Volume 30, Issues 11-12, August 2010, Pages 1488-1495, ISSN: 1359-4311.
- [5] Mohsen Ben Ammar, Maher Chaabene, Ahmed Elhajjaji: *Daily energy planning of a household photovoltaic panel*. Elsevier: Applied Energy. Volume 87, Issue 7, July 2010, Pages 2340-2351, ISSN: 0306-2619.
- [6] Mohamed A. Eltawil, Zhengming Zhao: *Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems — A review*. Elsevier: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 14, Issue 1, January 2010, Pages 112-129, ISSN: 1364-0321.
- [7] Byunggyu Yu, Mikihiro Matsui, Gwonjong Yu: *A review of current anti-islanding methods for photovoltaic power system*. Elsevier: Solar Energy. Volume 84, Issue 5, May 2010, Pages 745-754, ISSN: 0038-092X.

- [8] Safak Saglam, Nazmi Ekren, Hasan Erdal: *Controlling of grid connected photovoltaic lighting system with fuzzy logic*. Elsevier: Solar Energy. Volume 84, Issue 2, February 2010, Pages 256-262, ISSN: 0038-092X.
- [9] Wagner, Don; He, Lili : *An innovative solar system with high efficiency and low cost*. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, pp. 3039 - 3042, Location: Honolulu, HI, USA, ISSN: 0160-8371. DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614212.
- [10] Chiba, Y.; Kijima, S.; Sugimoto, H.; Kawaguchi, Y.; Nagahashi, M.; Morimoto, T.; Yagioka, T.; Miyano, T.; Aramoto, T.; Tanaka, Y.; Hakuma, H.; Kuriyagawa, S.; Kushiya, K.: *Achievement of 16% milestone with 30cmx30cm-sized CIS-based thin-film submodules*. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, pp. 164 - 168, Location: Honolulu, HI, USA, ISSN: 0160-8371. DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616037.
- [11] Bragard, Michael; Soltan, Nils; De Doncker, Rik W.; Schmiegell, Armin: *Design and implementation of a 5 kW photovoltaic system with li-ion battery and additional DC-DC converter*. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, pp. 2944 - 2949, Location: Atlanta, GA, USA, ISBN: 978-1-4244-5286-6. DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618220.
- [12] Kawai, S.S.; Pawar, B.H.: *Zinc sulphide thin films having nanometre grain size for photovoltaic applications*. Micro & Nano Letters, Volume: 5, Issue: 2, April 2010, pp. 100 - 104, ISSN: 1750-0443, DOI: 10.1049/mnl.2009.0108.
- [13] Kanai, Y.; Neaton, J.B.; Grossman, J.C.: *Theory and Simulation of Nanostructured Materials for Photovoltaic Applications*. Computing in Science & Engineering, March-April 2010, Volume: 12, Issue: 2, pp. 18 - 27, ISSN: 1521-9615. DOI: 10.1109/MCSE.2010.50.
- [14] Otani, Kenji: *Energy rating of various PV module technologies in two extreme climates, tropical and cold-arid climate*. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, pp 2701 - 2704, Location: Honolulu, HI, USA, ISSN: 0160-8371. DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616907.
- [15] Ho, C. I.; Yang, C. H.; Huang, C. J.; Yeh, D. J.; Chu, Y. S.; Hsueh, C. Y.; Tu, W. C.; Ma, T. Y.; Lee, S. C.: *Photocurrent enhancements in amorphous silicon solar cells by embedded metallic nanoparticles*. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, 20-25 June 2010, pp. 1505 - 1507, Location: Honolulu, HI, USA, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5615833.
- [16] Bertness, Kris A.; Schlager, John B.; Sanford, Norman A.; Imtiaz, Atif; Wallis, Thomas M.; Weber, Joel C.; Kabos, Pavel; Mansfield, Lorelle M.: *Application of microwave scanning probes to photovoltaic materials*. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, 20-25 June 2010, pp. 1669 - 1674, Location: Honolulu, HI, USA, ISSN: 0160-8371. DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616057.
- [17] Patel, H.; Agarwal, V.: *Investigations into the performance of photovoltaics-based active filter configurations and their control schemes under uniform and non-uniform radiation conditions*. Renewable Power Generation, IET, January 2010, Volume: 4, Issue: 1, pp. 12 - 22, ISSN: 1752-1416, DOI: 10.1049/iet-rpg.2008.0081.
- [18] Sokanský, K.; Závada, P.; Novák, T.; Kolár, V.; Hrbáč, R.: *Development of measuring instruments for long-term measurement of low level illuminances and luminances*. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference. 16-19 May 2010. pp. 89 - 92, Location: Prague. ISBN: 978-1-4244-5370-2. DOI: 10.1109/EEEIC.2010.5490013.
- [19] Ribeiro, E.; Cardoso, A.; Boccaletti, C.: *Power conditioning of an energy storage system for telecommunications*. Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium. 14-16 June 2010, pp. 1123 - 1128, Location: Pisa, ISBN: 978-1-4244-4986-6, DOI: 10.1109/SPEEDAM.2010.5542127.
- [20] Ridge, A.N.; Amaratunga, G.A.J.: *Photovoltaic maximum power point tracking for mobile applications*. Electronics Letters. October 28 2010, Volume: 46, Issue: 22, pp. 1520 - 1521, ISSN: 0013-5194, DOI: 10.1049/el.2010.2479.
- [21] Hradilek, Zdenek; Moldrik, Petr; Chvalek, Roman: *Solar energy storage using hydrogen technology*. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference. 16-19 May 2010, pp. 110 - 113, Location: Prague, Czech Republic. ISBN: 978-1-4244-5370-2. DOI: 10.1109/EEEIC.2010.5489998.
- [22] Powers, Loren; Newmiller, Jeff; Townsend, Tim: *Measuring and modeling the effect of snow on photovoltaic system performance*. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, 20-25 June 2010, pp. 973 - 978. Location: Honolulu, HI, USA, ISSN: 0160-8371. DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614572.
- [23] Graham, R.L.; France, C.E.; Carter, S.A.; Alers, G.B.: *Solar cell interface stability probed by charge extraction*. Reliability Physics Symposium (IRPS), 2010 IEEE International. 2-6 May 2010. pp. 323 - 326. Location: Anaheim, CA. ISSN: 1541-7026. DOI: 10.1109/IRPS.2010.5488808.
- [24] Logenthiran, T.; Srinivasan, D.; Khambadkone, A.M.; Raj, T.S.: *Optimal sizing of an islanded microgrid using Evolutionary Strategy*. Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference. 14-17 June 2010, pp. 12 - 17. Location: Singapore. ISBN: 978-1-4244-5720-5. DOI: 10.1109/PMAPS.2010.5528840.
- [25] Rampinelli, Giuliano Arns; Teyra, Marcos Alberto de Armas; Krenzinger, Arno; Prieb, Cesar Wilhem Maseb: *Artificial Intelligence Technics Applied to Analisis of Photovoltaic Energy Systems*. IEEE (Revista IEEE America Latina) Latin America Transactions, Sept. 2010, Volume: 8, Issue: 5, pp. 512 - 518, ISSN: 1548-0992, DOI: 10.1109/TLA.2010.5623503.
- [26] Wang, Haining; Su, Jianhui; Nayar, Chem; Zhang, Peng: *Adaptive maximum power point tracker in photovoltaic grid-connected system*. 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 16-18 June 2010, pp. 374 - 377, Location: Hefei, China, ISBN: 978-1-4244-5669-7, DOI: 10.1109/PEDG.2010.5545740.
- [27] Dolan, Dale; Durago, Joseph; Crowfoot, Joe; Taufik: *Simulation of a photovoltaic emulator*. 2010 North American Power Symposium (NAPS), 26-28 Sept. 2010, pp. 1 - 7, Location: Arlington, TX, USA, ISBN: 978-1-4244-8046-3, DOI: 10.1109/NAPS.2010.5618941.
- [28] Zhang Housheng; Zhao Yanlei: *Research on a Novel Digital Photovoltaic Array Simulator*. 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 11-12 May 2010, Volume: 2, pp. 1077 - 1080, Location: Changsha, ISBN: 978-1-4244-7279-6, DOI: 10.1109/ICICTA.2010.141.
- [29] Wang Xiaolei; Yang Liang; Yan Pan: *An engineering design model of multi-cell series-parallel solar array*. 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC), 21-24 May 2010, Volume: 3, pp. V3-498 - V3-502, Location: Wuhan, ISBN: 978-1-4244-5821-9, DOI: 10.1109/ICFCC.2010.5497530.
- [30] Jaeseok Choi; Jeongje Park; Shahidepour, M.; Billinton, R.: *Assessment of CO2 reduction by renewable energy generators*. 2010 Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 19-21 Jan. 2010, pp. 1 - 5, Location: Gaithersburg, MD, ISBN: 978-1-4244-6264-3, DOI: 10.1109/ISGT.2010.5434742.
- [31] Qian Zhao; Peng Wang; Goel, L.: *Optimal PV panel tilt angle based on solar radiation prediction*. 2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 14-17 June 2010, pp. 425 - 430, Location: Singapore, ISBN: 978-1-4244-5720-5, DOI: 10.1109/PMAPS.2010.5528960.

# Utilising of Batteries for Photovoltaic Systems

Dušan Medved', Michal Kolcun

Department of Electric Power Engineering FEI TU Košice  
Mäsiarska 74  
Košice, Slovak Republic  
Dusan.Medved@tuke.sk, Michal.Kolcun@tuke.sk

Rastislav Stolárik, Štefan Vaško

VÁDIUM s.r.o.  
Plzenská 2  
Prešov, Slovak Republic  
stolarik@vadium.sk, vasko@vadium.sk

**Abstract**—This article deals with the main construction battery differences for photovoltaic systems.

**Keywords**-photovoltaic system; battery

## I. INTRODUCTION

A lead-acid storage battery is fundamentally a very simple thing. A laboratory model of a battery cell can be made by anyone in just a few minutes. Simply take two strips of metallic lead and hang them in and on opposite sides of a small glass jar and fill the jar with dilute sulfuric acid. Connect a source of direct current to these strips or plates and allow them to charge. In a short time the surface of one strip will become increasingly dark brown in colour while the other will retain its original lead colour. The brown plate has become covered with a layer of lead peroxide and is the positive plate of the cell. The unchanged plate is negative. When the DC charging source is removed, a sensitive voltmeter will indicate a voltage of approximately 2 volts between the terminals of the cells. If an electrical load is connected to the terminals, a current will flow from positive to negative and the cell will deliver power to the circuit. The thickness of this surface film, and therefore the cell's capacity, can be somewhat increased by alternate cycles of charge and discharge.

Of course, such a cell has no practical value because the available surface area of the two lead strips is not large enough to accumulate sufficient active material, these being the brown lead peroxide of the positive and metallic sponge lead of the negative. The primary problem in the development of batteries has been to increase the effective area of the plate surface to achieve greater and greater capacity for industrial use.

The most common method, however, of attaining large areas of active materials is to use very finely powdered lead oxides made up into pastes. These are in the form of a sponge with the electrolyte filling all the pores and thus coming into contact with the active material over an area many times the size of the evident surface of the pastes.

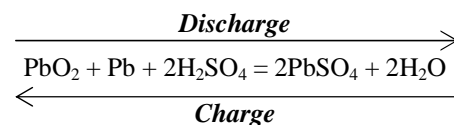
The active materials alone have no rigid mechanical form or strength and, particularly the positive, are very poor conductors of electricity. It is necessary, therefore, to mount them in some sort of lead alloy frame or grid to achieve and retain a physical shape and to conduct the current to all parts of the material. This lead grid usually takes the form of either a lattice-work into which paste is pressed, or a series of spines or core rods, each surrounded by a perforated rubber, plastic or

glass fabric tube with the active material in the annular space between. The lattice type is commonly known as a lat-plate or pasted-plate type. This construction is nearly always used for the negative plates and can be used for positives also. The spine-and-tube construction is known as a tubular plate and is used only for positives.

## II. ELECTRO-CHEMICAL ACTION

In a lead-acid type cell, two different kinds of lead are acted upon electrochemically by a solution of dilute sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ). When the battery is fully charged, the active material of the positive plate is lead peroxide (dioxide) ( $PbO_2$ ); the negative plate is sponge lead (Pb). As the cell is discharged, the electrolyte ( $H_2SO_4$ ) divides into  $H_2$  and  $SO_4$ . The  $H_2$  combines with some of the oxygen formed at the positive plate to produce water ( $H_2O$ ), which reduces the amount of the acid in the electrolyte. The  $SO_4$  combines with lead (Pb) of both plates, forming lead sulfate ( $PbSO_4$ ).

When the cell is discharged this action is reversed, and the lead sulphate ( $PbSO_4$ ) on the positive and negative plates is converted to lead peroxide ( $PbO_2$ ) and sponge lead (Pb), respectively. The strength of the electrolyte increases as the  $SO_4$  from the plates combines with hydrogen from the water to form  $H_2SO_4$ .



In a fully charged battery, all of the active material of the positive plates is lead peroxide, and that of the negative plates is pure sponge lead. All the acid is in the electrolyte and the specific gravity is at its maximum. As the battery discharges, some of the acid separates from the electrolyte, which is in the pores of the plate, forming a chemical combination with the active material, changing it to lead sulfate and producing water. As the discharge continues, additional acid is withdrawn from the electrolyte and further sulfate and water is formed.

As this process continues, it can be readily understood that the specific gravity of the electrolyte will gradually decrease because the proportion of acid is decreasing and that of water is increasing.

When the battery is placed on charge, the reverse action takes place. The acid in the sulfated active material of the



plates is driven out and back into the electrolyte. This return of the acid to the electrolyte reduces the sulfate in the plates and increases the specific gravity of the electrolyte. The specific gravity will continue to rise until all the acid is driven out of the plate and back into the electrolyte. There will then be no sulfate in the plates.

After all the acid is returned to the electrolyte, additional charging will not raise the gravity higher. All of the acid in the cells is in the electrolyte and the battery is said to be fully charged. The material of the positives is again lead peroxide, the negatives are sponge lead and the specific gravity is at a maximum.

On discharge the plates absorb acid and on charge they return the acid absorbed back to the electrolyte. As the cells approach full charge they cannot absorb all of the energy from the charging current and the excess acts to break up water from the electrolyte into its two components, hydrogen and oxygen, which are liberated from the cells as gases. This is the primary reason for the required addition of water to battery cells.

### III. PHYSICAL CONSTRUCTION

The positive and negative elements are invariably in the form of a comparatively thin plate with grid structure usually of lead-antimony alloy. The addition of antimony to the lead gives it greater physical strength and rigidity and offers greater resistance to formation or corrosion by the electrolyte action with the acid. These plates are arranged parallel to each other, alternately positives and negatives. All the positives are joined and thus connected together by an alloy strap, and likewise the negatives. This strap, through its post, leads to the external circuit.

The length, width, thickness and numbers of plates in a cell are determined by the capacity required for the desired application. It is common practice to have a negative plate at each end of the element, thus making one more negative than positive plates in the cell. Thus a 15-plate cell has 7 positive and 8 negative plates. As mentioned, this is merely common practice; there is no technical reason for it. The two outside negative plates are frequently thinner as the outer surface gets very little use. The positive and negative plates must not come into contact with each other and are prevented from doing so by a separator. Separators are usually in sheet form and are commonly made of rubber, glass or plastic. They must be microporous in structure to permit the electrolyte to permeate them. The element consisting of the positive and negative plates and separator is placed in a jar or multicell container, which holds the electrolyte, this being, as mentioned above, dilute sulfuric acid, and a cover is placed over the element and sealed to the top of the jar to exclude dirt or foreign material and reduce the evaporation of water from the electrolyte. The cover has a vent plug which has small holes for the escape of gases and which can be removed for the purpose of adding water and taking hydrometer readings. The above assembly constitutes a cell. One or more cells together for a given application constitute a battery.

#### A. Voltage

The voltage of a cell is a fundamental characteristic of the elements that constitute it. Almost any two dissimilar metals or elements in a conducting electrolyte will produce some voltage. The vast majority of such combinations, however, have no practical or commercial value. The lead-acid cell has the highest voltage (per cell) of any commercial type. It is generally referred to as having a nominal voltage of 2 volts.

Thus, a 3-cell battery is usually referred to as a 6-volt battery or as a 120-volt battery etc. The voltage on an open circuit (with no current flowing in either direction, and after sufficient time for the voltage to stabilize) is a direct function of the specific gravity and is presented very closely by the formula

$$\text{volts} = \text{specific gravity} + 0,84$$

Thus, the open circuit of a cell with a specific gravity of 1,210 will be 2,50 volts; one with a gravity of 1,280 will be 2,12 volts.

As soon as a cell starts to discharge, there is a decrease in voltage due to the effective internal resistance of the cell. This voltage drop increases with increase in discharge current, thus lowering the output voltage of the cell by that amount. Also at a continuous given rate of discharge, the voltage gradually becomes lower as the discharge progresses until, as the cell nears exhaustion, the voltage drops very rapidly to and below a value where it is no longer effective for the final voltage. It varies with the rate of discharge being lower with higher ampere rates. A representative value of 1,75 volts is, however, commonly used for a large proportion of typical battery applications. When a discharged battery is placed on charge, its voltage immediately rises, the extent of this rise increasing with the charging rate. With commonly used rates, the voltage will rise within a matter of minutes to 2,10 or 2,15 volts and then increase gradually until the charge is perhaps three-quarters complete. Near that point the voltage rises more sharply, and then levels off at a maximum when the battery is fully charged. The voltage at this point is about 2,6 volts per cell at the normally used finish-rate of charge.

#### B. Capacity

The capacity of a storage battery is its ability to deliver energy and it is usually expressed in ampere-hours, which is simply the product of the discharge in amperes over a number of hours. However, a simple figure of say 200 ampere-hours has very little significance unless it is qualified by the many factors which influence a battery's capacity and also by the customary usage of the application in which it is applied. The principal factors which influence capacity are:

**Discharge rate:** The higher the discharge rate in amperes, the fewer total ampere-hours a battery will deliver under otherwise similar conditions. This relationship will vary somewhat with different types of plate and cell construction. Figure 1. shows a nominal relationship of a typical commercial cell. During discharge, the only portion of the electrolyte which is useful is that in the pores of the plate in actual contact with the active material. As the acid in this portion becomes depleted or exhausted, the electrolyte must diffuse or circulate

in order to bring more acid to the active material where it is needed. The higher the rate of discharge, the more rapid this circulation must be to maintain normal cell voltage. As the rate increases, however, this circulation or diffusion does not increase in the same proportion, with the result that the electrolyte in the pores of plates is less dense and the cell voltage decreases more rapidly, thus limiting the total capacity.

Another result of higher current rates is the increase in voltage drop within the cell. All the cells have a certain internal ohmic resistance. The higher the current, the greater the voltage drop or the loss in this resistance within the cell, thus reducing its external or useful voltage which supplies the load. The rate most commonly used as a standard is the 8-hour rate which can be expressed, for example, either as 100 Ah at the 8-hour rate or 12,5 amperes for 8 hours. Cranking and reserve capacity and motive power (industrial truck) types are rated on a 6-hour basis. Any correct rating is quite proper to use as long as it is properly specified and understood. Manufacturers usually list several hourly ratings, nearly always including the 8-hour, for the convenience of users in making comparisons and conducting tests.

**Specific Gravity:** This likewise affects cell capacity as electrolytes of different gravities have different amounts of actual acid per unit of volume. Thus, an electrolyte of higher gravity has more actual acid in contact with the active material and available for chemical reactions than an electrolyte of lower gravity. With given total acid requirements, the need is met more readily by high gravity and with less rapid diffusion or circulation. Also the higher gravity electrolyte has a lower electrical resistance, which better maintains the terminal voltage of the cell. The degree to which specific gravity affects cell capacity will vary considerably with different types of designs but a rule of thumb frequently applied is that a difference of 25 points in gravity will change the capacity 8 – 10 %. For example, if a certain cell has a capacity of 100 ampere-hours with full charge gravity of 1,275 its capacity will be 90 – 92 ampere-hours if the full charge gravity is reduced to 1,250.

**Temperature:** Many chemical reactions are accelerated at high temperatures. Also the resistance and viscosity of the electrolyte are reduced at higher temperatures, thus reducing the voltage drop or loss within the cell and maintaining its terminal voltage at higher value. These combine to increase the battery's capacity at higher temperatures and reduce it at lower temperatures.

**Final Voltage:** This term is used to designate the minimum useful and accepted voltage at various rates of discharge, and is the value at which the maximum number of ampere-hours can be obtained before the cell voltage begins its rapid decline as the point of exhaustion is approached. It is just over the knee of the discharge curve and is lower with higher rates of discharge. The final voltage selected or listed for a particular cell depends largely on its application.

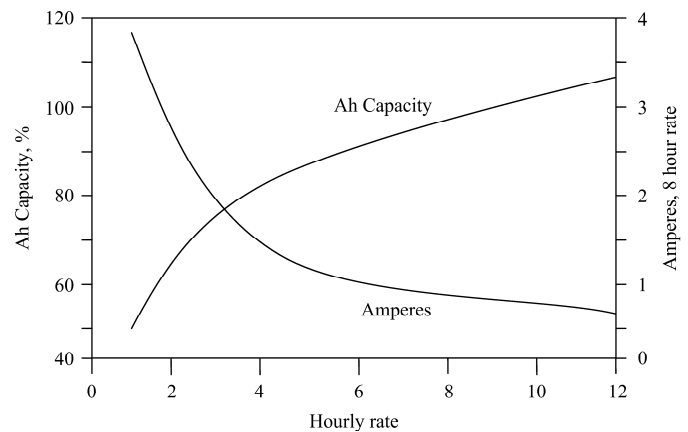


Figure 1. Capacity rate curve based on 8 hour rate.

#### ACKNOWLEDGMENT

This publication is the result of the Project implementation: Výskum charakteristík fotovoltaičských komponentov pre efektívne projektovanie solárnych systémov, ITMS: 26220220080 supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF.



We support research activities in Slovakia / Project is cofinanced from EU funds.



#### REFERENCES

- [1] G.N. Tiwari, Swapnil Dubey: *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications (RSC Energy Series)*. Royal Society of Chemistry, 2010. 424 pages. ISBN 978-1-84973-020-4.
- [2] Wu, Yu-En; Shen, Chih-Lung: *Implementation of a DC power system with PV grid-connection and active power filtering*. 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 16-18 June 2010, pp. 116 - 121, Location: Hefei, China, ISBN: 978-1-4244-5669-7, DOI: 10.1109/PEDG.2010.5545867.
- [3] Elerath, J.G.: *HCPV tracker accelerated reliability tests*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 481 - 486, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616779.
- [4] Pennisi, C.P.: *Molecular photovoltaic structures for optical activation of excitable cells: current advances and perspectives*. 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Aug. 31 2010-Sept. 4 2010, pp. 6230 - 6232, Location: Buenos Aires, ISSN: 1557-170X, DOI: 10.1109/IEMBS.2010.5627714.
- [5] Iwan, A.; Palewicz, M.; Hreniak, A.; Mazurek, B.: *Organic photovoltaic devices based on poly(azomethine)s with different structure*. 2010 Proceedings of the 33rd International Convention MIPRO, 24-28 May 2010, pp. 8 - 9, Location: Opatija, ISBN: 978-1-4244-7763-0.
- [6] van Hest, M.F.A.M.; Habas, S.E.; Underwood, J.M.; Pasquarelli, R.M.; Hersh, P.; Miedaner, A.; Curtis, C.J.; Ginley, D.S.: *Direct write metallization for photovoltaic cells and scaling thereof*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 3626 - 3628, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614429.

- [7] Xiaowei Wang; Jun Gao; Wenping Hu; Zhengang shi; Baofeng Tang: *Research of effect on distribution network with penetration of photovoltaic system*. 2010 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Aug. 31 2010-Sept. 3 2010, pp. 1 - 4, Location: Cardiff, United Kingdom, ISBN: 978-1-4244-7667-1.
- [8] Green, Martin A.; et. al.: *Hot carrier solar cells: Challenges and recent progress*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, 57 - 60, Location: Honolulu, HI, USA, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614200.
- [9] Uchida, K.; Senjyu, T.; Yona, A.; Urasaki, N.: *Effect of energy conservation by adopted PV/SC system in subtropical regions*. 2010 the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 15-17 June 2010, pp. 770 - 775, Location: Taichung, ISBN: 978-1-4244-5045-9, DOI: 10.1109/ICIEA.2010.5515061.
- [10] Coelho, Roberto F.; Concer, Filipe M.; Martins, Denizar C.: *A simplified analysis of DC-DC converters applied as maximum power point tracker in photovoltaic systems*. 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 16-18 June 2010, pp. 29 - 34, Location: Hefei, China, ISBN: 978-1-4244-5669-7, DOI: 10.1109/PEDG.2010.5545753.
- [11] Wensong Yu; Jih-Sheng Lai; Hao Qian; Hutchens, C.; Jianhui Zhang; Lisi, G.; Djabbari, A.; Smith, G.; Hegarty, T.: *High-efficiency inverter with H6-type configuration for photovoltaic non-isolated ac module applications*. 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 21-25 Feb. 2010, pp. 1056 - 1061, Location: Palm Springs, CA, ISSN: 1048-2334, DOI: 10.1109/APEC.2010.5433372.
- [12] Peloso, M.P.; Chaturvedi, P.; Wurfel, P.; Hoex, B.; Aberle, A.G.: *Observations on the spectral characteristics of defect luminescence of silicon wafer solar cells*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 2714 - 2717, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5616880.
- [13] Guerrero, J.M.; Blaabjerg, F.; Zhelev, T.; Hemmes, K.; Monmasson, E.; Jemei, S.; Comech, M.P.; Granadino, R.; Frau, J.I.: *Distributed Generation: Toward a New Energy Paradigm*. IEEE Industrial Electronics Magazine, March 2010, Volume: 4, Issue: 1, pp. 52 - 64, ISSN: 1932-4529, DOI: 10.1109/MIE.2010.935862.
- [14] Ishizuka, S.; Yoshiyama, T.; Mizukoshi, K.; Yamada, A.; Niki, S.: *Monolithically integrated CIGS submodules fabricated on flexible substrates*. 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 20-25 June 2010, pp. 12 - 15, Location: Honolulu, HI, ISSN: 0160-8371, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614095.
- [15] Menniti, D.; Pinnarelli, A.; Sorrentino, N.: *An hybrid PV-wind supply system with D-Statcom interface for a water-lift station*. 2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 14-16 June 2010, pp. 1387 - 1392, Location: Pisa, ISBN: 978-1-4244-4986-6, DOI: 10.1109/SPEEDAM.2010.5545070.



