

Stanislav Ilenin

## Využitie slnečnej energie pre fotovoltaiku

Fotovoltaické systémy premieňajú prostredníctvom polovodičových materiálov slnečnú energiu na energiu elektrickú. Proces premeny energie je priamy a neuvolňuje sa pri ňom žiadne škodlivé emisie, vrátane emisií skleníkových plynov.

Kľúčové slová: fotovoltaika, slnečné žiarenie, fotovoltaické články

### I. ÚVOD

Slnko ako jedna z hviezd našej galaxie predstavuje vysoko stabilný a vysoko výkonný energetický zdroj, bez ktorého by sa život na Zemi nezaobišiel. Energia Slnka má pôvod v termo - jadrovej syntéze, do ktorej vstupujú vždy dve jadrá vodíka a ktorej výsledkom je jadro hélia. Reakcia prebieha pri teplotách až 14 miliónov °C, zatiaľ čo povrchová teplota Slnka dosahuje v priemere 6000 °C. Od vzniku Slnka uplynulo približne 5 miliárd rokov. Slnko má k dispozícii dostatok jadrového paliva v podobe vodíka, aby svietilo rovnomerne ešte ďalších päť miliárd rokov. Každú sekundu sa 4 000 ton z hmoty Slnka premení na energiu a letí do vesmíru. Táto hviezda našej planetárnej sústavy má priemer 1392000 km. Množstvo dopadajúcej slnečnej energie na Zem je takmer 14000 krát väčšie ako celá energia spotrebúvaná ľudstvom v súčasnosti.

### II. SLNEČNÉ ŽIARENIE

Slnečné žiarenie je vlastne elektromagnetické a korpuskulárne žiarenie. Z tohto žiarenia približne 47 % pripadá na viditeľnú oblasť spektra s vlnovými dĺžkami od 380-400 do 750-800 nm. Približne 7 % žiarenia je pre ľudské oko neviditeľné ultrafialové žiarenie, vlnové dĺžky pod 380 nm. Zvyšná časť žiarenia približne 46 % pripadá na infračervené žiarenie s vlnovými dĺžkami nad 800 m.

Pri kolmom dopade slnečných lúčov na zemskú atmosféru, dopadne na 1m<sup>2</sup> asi 1367,13 W energie. Časť tohto priameho slnečného žiarenia je pohltaná a rozptýlená v zemskej atmosfére plynmi a aerosólmi a časť je odrazená späť do vesmíru, takže na zemský povrch sa nedostane jeho celá časť. Rozptýlené slnečné žiarenie a žiarenie odrazené od zemského povrchu sa označuje ako žiarenie difúzne. Súčet priameho a difúzneho žiarenia sa označuje ako globálne žiarenie. Výhodou slnečného žiarenia je jeho homogénnejšie rozloženie v porovnaní so svetovými zásobami konvenčných energetických palív, nevýhodou je mnohonásobne nižšia hustota slnečného žiarenia než v prípade fosílnych zdrojov. V Európe intenzita slnečného žiarenia dopadajúceho kolmo na zemský povrch kolíše od približne 400 - 600 kWh/m<sup>2</sup>/rok na severe Škandinávie a Ruskej federácie až po približne 2000 kWh/m<sup>2</sup>/rok v oblasti Stredozemného mora. Na Slovensku sa intenzita slnečného žiarenia dopadajúceho na horizontálny povrch pohybuje v rozpätí 1000 - 1205 kWh/m<sup>2</sup>/rok. Približne 800 kWh/m<sup>2</sup> je získaných v období od apríla do septembra. V letnom čase dopadne na Zem až 75 % z celoročného globálneho žiarenia. V našich končinách je v priemere približne 1500 hodín slnečného žiarenia, na horách je to vyše 1300 hodín a na juhu Slovenska až niečo cez 1800 hodín.

Na zemskom povrchu registrujeme tri základné druhy slnečného žiarenia:

- priame slnečné žiarenie, ktoré dopadá priamo na fotovoltaický článok a prešlo atmosférou Zeme bez výraznejších zmien,
- rozptýlené žiarenie čiže difúzne - spektrálne zloženie má iné ako priame svetlo rozptýl,
- žiarenie odrazené buď od zemského povrchu, alebo od iných objektov.

Všetky tieto zložky tvoria globálne slnečné žiarenie, ktorého intenzita sa u nás pohybuje medzi 0,1 - 1 kW/m<sup>2</sup>, ktoré v rôznej miere je vnímané voľným okom a je možné ho využiť pomocou fotovoltaických systémov.

Z celkového pohľadu predstavuje slnečná energia v rámci všetkých obnoviteľných zdrojov energie (OZE) na Slovensku najväčší potenciál 54038 TWh ročne. Technicky využiteľný potenciál slnečnej energie bol oficiálne stanovený Ministerstvom hospodárstva na 9450 GWh ročne, čo predstavuje po biomase druhý najväčší technický potenciál v rámci Slovenska. Technicky využiteľný potenciál, v súvislosti s výrobou elektrickej energie, bol stanovený na úrovni 1540 GWh ročne.

### III. FOTOVOLTICKÝ ČLÁNOK

Fotovoltaický jav objavil v roku 1839 Antoine-Cesár Becquerel (\*1788 - +1878). Na rozhraní dvoch polovodičových materiálov, na ktoré dopadá slnečné žiarenie, dochádza k pohlcovaniu fotónov a uvoľňovaniu elektrónov, z čoho vzniká elektrické napätie. Proces energetickej premeny je priamy, bez medzistupňov a neuvolňuje sa pri ňom žiadne emisie skleníkových plynov alebo častíc.

Fotovoltaický článok je vlastne veľkoplošná polovodičová dióda, vnútorný fotoelektrický jav, ktorá premieňa slnečnú energiu dopadajúcu vo forme žiarenia priamo na elektrickú. To znamená, že pracuje na fyzikálnom princípe toku elektrického prúdu medzi dvoma prepojenými polovodičmi s rozdielnymi elektrickými vlastnosťami, na ktoré dopadá svetelné žiarenie. Jedna vrstva kremíka (Si) sa vďaka prímеси atómov fosforu vyznačuje nadbytkom elektrónov záporných nábojov a označuje sa ako N - vrstva. Druhá vrstva kremíka je obohatená atómami bóru, čím v nej vzniká nedostatok elektrónov, označuje sa ako P - vrstva a má kladný náboj. Medzi oboma vrstvami vzniká P-N prechod, ktorý je pri dopade slnečného žiarenia aktivovaný a pripojenými vodičmi tečie medzi oboma vrstvami elektrický prúd. P-N prechod je polovodič, pretože na rozdiel od striedavých elektrických zariadení prúd tečie len jedným smerom - od záporného pólu ku kladnému. Pri dopade slnečného žiarenia, alebo iného svetelného zdroja na polovodič, má napätie medzi oboma pólmi hodnotu približne 0,5 V. Pretekajúci prúd závisí od intenzity slnečného žiarenia, čiže množstva dopadajúcich fotónov a veľkosti

článku, ktorých je v paneli umiestnených niekoľko. Napätie v nich býva zvyčajne 12 - 24 V.

Jednosmerný prúd, ktorého zdrojom je sústava fotovoltaických článkov tvoriacich modul, využíva mnoho jednoduchých elektrických zariadení, ako sú napríklad prenosné elektrospotrebiče na batérie. V najjednoduchších solárnych aplikáciách je jednosmerný prúd vyrábaný fotovoltaickými článkami využívaný elektrospotrebičmi priamo. V aplikáciách, kde je potrebný striedavý prúd, treba použiť menič, ktorý z jednosmerného vyrába striedavý prúd. Striedavý prúd je dodávaný verejnou elektrickou sieťou a využíva ho väčšina bežných elektrospotrebičov.

Nominálny výkon fotovoltaických článkov je udávaný v jednotkách Watt peak (Wp), ktorý zodpovedá vyrobenému výkonu solárneho panela pri štandardizovanom výkonnostnom teste, teda energetickej hustote žiarenia  $1\text{kW}/\text{m}^2$ , pri teplote  $25\text{ }^\circ\text{C}$  a svetelnom spektre slnečného žiarenia po prechode bezoblačnou atmosférou Zeme.

Fotovoltaické články sa vyrábajú s nominálnym výkonom  $0,1\text{ kWp}$ , jeden takýto článok ročne vyrobí  $100\text{ kWh}$  elektrickej energie a energetická návratnosť celého fotovoltaického zariadenia je okolo 3 rokov, udávajú výrobcovia. Zároveň ponúkajú 25-ročnú výkonnostnú garanciu a po 25 rokoch bude mať článok  $80\%$  výkon. Ich životnosť je dlhšia ako 30 rokov. Záručná lehota na články je päťročná.

Fotovoltaické články tvoriace fotovoltaické panely slúžia na výrobu elektriny v podobe jednosmerného prúdu. Hoci sa články navonok javia ako jednoduché zariadenia, skrývajú v sebe čisté polovodičové materiály podobné tým, ktoré sa používajú v mikroprocesoroch počítačov. Kým sa nevynašla technológia výroby superčistého kremíka, ktorý by sa uplatnil v počítačovej praxi a nahradil striebro či zlato, boli počítačové procesory drahé a pomalé, lebo surovina bola príliš drahá. A stačilo roztaviť obyčajný vyčistený piesok, ktorého je na planéte Zem neúrekom, a pritom jeho ťažba je finančne nenáročná. Dnešné fotovoltaické články sa takmer výlučne vyrábajú z kremíka (Si) extrémne čistého, zbaveného akýchkoľvek prímiesí, preto je ich výroba finančne náročná. Hoci je kremík najrozšírenejším prvkom na Zemi, jeho spracovanie do formy polovodiča je technologicky náročné.

Fotovoltaické články z amorfného kremíka (Si) dosahujú stupeň účinnosti premeny slnečnej energie v laboratórnych podmienkach  $10\%$ , v praxi len  $4 - 8\%$ . Ich nevýhodou je nedostatočná dlhodobá stabilita, ktorá je podstatne menšia ako u iných článkov.

Monokryštalické Si články sú v súčasnosti najpoužívanejšie a najdôslednejšie prepracované, v laboratórnych podmienkach možno dosiahnuť až  $20\%$  percentnú účinnosť, v praxi je to  $14 - 16\%$ . Zvýšenie účinnosti sa dosahuje povrchovým štruktúrovaním a antireflexnou vrstvou na prednej strane článku.

Polykryštalické Si články - ide o články vyrobené z liateho Si. V porovnaní s monokryštalickým Si je ich účinnosť nižšia a dosahuje hodnôt  $11 - 14,5\%$ . S dobou použitia rýchlejšie klesá aj ich účinnosť.

Fotovoltaické články z arzenidu gália (GaAs) majú vynikajúcu odolnosť voči vysokoenergetickému žiareniu a využívajú sa predovšetkým pre napájanie vesmírnych staníc a satelitov, ich účinnosť je  $34\%$ .

#### IV. FOTOVOLTICKÉ SYSTÉMY

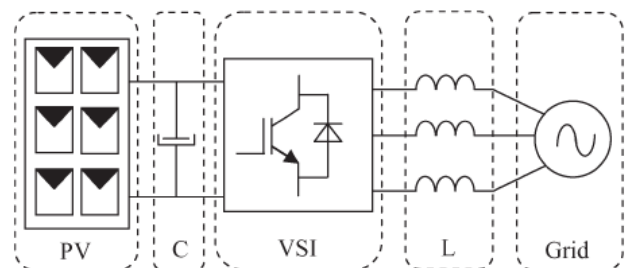
Podľa výkonu je možné fotovoltaické systémy ako zdroje energie rozdeliť na:

- autonómne systémy s výkonom do  $2\text{ kW}$  - nabíjajú akumulátory,
- hybridné systémy s výkonom do  $5\text{ kW}$  - nabíjajú akumulátory a ešte pomocné generátory,
- systémy napojené priamo na sieť s výkonom až niekoľko MW.

Autonómne pracujúce fotovoltaické systémy sú závislé len od slnečných článkov. Tieto sú pripojené na batériu cez regulátor nabíjania, ktorý prerušuje okruh keď je batéria nabitá a vypína záťaž skôr, ako by sa batéria úplne vybila. Batérie musia byť dosť veľké, aby mohli skladovať energiu vyrobenú cez deň a využívať ju v noci alebo počas nepriaznivého počasia.

Hybridné fotovoltaické systémy sú kombináciou slnečných článkov s dodatočným zdrojom elektrickej energie ako je napríklad diesellový generátor, veterný agregát alebo iný zdroj. Z hľadiska optimalizácie činnosti dvoch zdrojov, hybridné systémy si vyžadujú technicky náročnejšie regulačné zariadenia ako samostatne pracujúce systémy. Napríklad pri použití diesellového generátora sa vyžaduje, aby sa zapol pri nastavenej úrovni vybitia batérie a opäť vypol, keď je batéria dostatočne nabitá. Pri použití hybridných systémov je možné využiť menšie fotovoltaické zariadenia a batérie ako v prípade podobných samostatne pracujúcich systémov. Z tohto dôvodu náklady na hybridný systém môžu byť nižšie ako na samostatne pracujúci systém.

Fotovoltaické systémy napojené priamo na sieť pracujú ako samostatné elektrárne, a tým sa dnes venuje pozornosť. Fotovoltaické systémy pripojené do elektrickej rozvodnej siete pracujúce ako samostatné elektrárne dodávajú energiu do siete. Obsahujú súbor fotovoltaických modulov, menič napätia, zariadenie na meranie a sieťovú ochranu. Pripojenie do siete zvyčajne zabezpečujú dva elektromery, jeden meria slnečnú elektrinu dodávanú do siete a druhý elektrinu, ktorú domácnosť zo siete odoberá. Vyznačujú sa veľkou účinnosťou, pretože všetka vyrobená energia sa spotrebuje priamo na mieste, alebo sa dostáva do siete. Hlavným dôvodom inštalácie je zníženie kupovanej energie zo siete, prípadne finančný zisk z predaja prebytočnej energie. V praxi to funguje tak, že v prípade, ak solárny systém dodáva energiu do siete, merač spotreby elektriny sa točí naopak. Ak fotovoltaické články nestačia pokryť spotrebu, sieť nahrádza batériu a v prípade potreby slúži ako záložný zdroj. Najčastejšie sa používajú systémy s kapacitou  $1 - 5\text{ kWp}$  na strechách rodinných domov. Z hľadiska investora je atraktívne budovať väčšie inštalácie na strechách polyfunkčných budov a slnečných elektrární mimo zastavaného územia s výkonom  $1 - 5\text{ MWp}$ .



Obr. 1 Zapojenie fotovoltaického systému do siete

PV - fotovoltaický systém

C - kapacitný filter

VSI - menič

L - indukčný filter

GRID - striedavá sieť

Silné stránky a prínosy využívania fotovoltaických systémov:

- vysoká flexibilita, modularita a spoľahlivosť,
- všadeprítomný potenciál, mnohonásobne prevyšujúci potreby,
- veľmi nízke prevádzkové náklady,
- minimálny vplyv na životné prostredie,
- decentralizovaná výroba a dodávka elektrickej energie,
- možnosti integrácie do rekonštruovaných resp. novostavaných budov (sofistikované architektonické riešenia),
- zníženie závislosti od dovozu fosílnych palív a uránu,
- zníženie objemu emisií skleníkových plynov.

Slabé stránky využívania fotovoltaických systémov:

- sezónna a denná variabilita klímy a fluktuácia počasia výrazne ovplyvňujú celkový výkon,
- nízka celoročná využiteľnosť FV systémov (capacity factor),
- vysoké investičné náklady (vyššia cena komponentov, najmä samotných solárnych článkov),
- dlhšia doba návratnosti investície,
- rozsah verejnej elektrickej siete výrazne limituje trhový potenciál.

Veľkosť fotovoltaického systému  $P_k$  je vyjadrená wattmi špičkového zaťaženia  $W_p$  a charakterizuje nominálny energetický výkon špecifickej plochy fotovoltaických modulov ( $m^2$ ) v štandardných testovacích podmienkach, t.j. pri príkone žiarenia  $1000 \text{ W.m}^{-2}$ , definovanom solárnom referenčnom spektre a povrchovej teplote  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Na dosiahnutie výkonu  $1 \text{ W}_p$  pri takýchto podmienkach je potrebný článok o veľkosti iba  $10 \times 10 \text{ cm}$ . Fotovoltaický systém, ktorého články sú tvorené z kryštalického kremíka s výkonom  $1 \text{ kW}_p$  má celkovú plochu  $7 - 8 \text{ m}^2$ . Celková účinnosť systému ( $\eta$ ), t.j. pomer medzi reálnym a nominálnym výkonom je zvyčajne okolo  $0,75 - 0,80$ . Nižší reálny výkon systému je daný poklesom výkonu modulov vplyvom vonkajšej teploty a stratami spôsobenými variabilitou slnečného žiarenia, kabelážou, meničom napätia atď. Množstvo elektriny  $E$  ( $\text{kWh}$ ) vyrobenej fotovoltaickým systémom s nominálnym výkonom  $P_k$  ( $\text{W}_p/1000 \text{ W.m}^{-2}$ ) a celkovou účinnosťou  $\eta$  je možné odvodiť z globálneho slnečného žiarenia  $G$  ( $\text{kWh/h.m}^{-2}$ ):  $E = P_k \cdot \eta \cdot G$

## V. FOTOVOLTIKA V STREŠNEJ KONŠTRUKCII

Na plochej streche je možné fotovoltaické moduly umiestniť do takmer vodorovnej roviny v úrovni strešnej konštrukcie s minimálnym sklonom  $3^\circ$  (fotovoltaické izolačné pásy alebo film - lepené moduly fixované rámmami) či nad úrovňou strechy, keď sú panely upevnené na vlastnej konštrukcii, uchytené v nosnej konštrukcii strechy, alebo naklonené plochy modulov (na vlastnej samostatnej konštrukcii z ocele alebo betónu) vo forme pevných či otočných systémov (so servomotorom).

Na šikmej streche (pultovej, sedlovej, inej...) môžu moduly v strešnej rovine fungovať ako plnohodnotná náhrada krytiny, pričom preberajú aj základné funkcie strechy (statickú i ochrannú). Fotovoltaické panely sa môžu ukladať aj priamo na krov strechy. Pri plechovej strešnej krytine sa používajú vstavané fotovoltaické panely a pri iných druhoch sa vyberú špeciálne, tzv. fotovoltaické škridle, šindle, rohože či pásové krytiny. Umiestnenie v úrovni strešnej roviny nachádza svoje uplatnenie pri väčšine dodatočných aplikácií - moduly sa dávajú na existujúcu krytinu, pričom fotovoltaické panely majú vlastnú konštrukciu.

Pri rôznych tvaroch striech a stropov zo skla sa používajú transparentné typy fotovoltaických panelov, ktoré samotné tvoria strešnú konštrukciu najrozličnejších geometrických tvarov. Prekrývajú sa tak vnútorné priestory, ako sú átriá a dvorany, zimné záhrady, pasáže a spojovacie komunikácie či strešné svetlíky.

Fotovoltaické moduly na šikmej streche môžu vytvoriť zaujímavú kombináciu so strešnými oknami, slnečnými kolektormi, prípr. terasami, lodžiami, atď. V takomto prípade je dôležitá voľba vhodného modulu, ktorý by zjednotil všetky "do hry" vstupujúce komponenty tak, aby strešná plocha ako celok pôsobila harmonicky.

## ZÁVER

Fotovoltaika, ktorá využíva slnečné žiarenie, sa stala v celosvetovom meradle jedným z najrýchlejšie sa rozvíjajúcich smerov vzhľadom na ročný nárast inštalovaného výkonu, ktorý prevyšuje  $30 \%$ . Využívanie Slnka ako zdroja energie, má veľkú výhodu oproti fosílnym palivám preto, že je najekologickejším a nevyčerpatelným zdrojom.

## POĎAKOVANIE

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



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

## LITERATÚRA

- [1] Riad Kadri, Jean-Paul Gaubert, and Gerard Champenois: *An Improved Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Grid-Connected Inverter Based on Voltage-Oriented Control*, IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 58, No. 1, ISSN : 0278-0046, January 2011, pp: 66 - 74, DOI: 10.1109/TIE.2010.2044733
- [2] Li Zhang, Kai Sun, Yan Xing, Lanlan Feng, and Hongjuan Ge, *A Modular Grid-Connected Photovoltaic Generation System Based on DC Bus*, IEEE transactions on power electronics, vol. 26, no. 2, february 2011, ISSN : 0885-8993, pp. 523 - 531, DOI: 10.1109/TPEL.2010.2064337
- [3] Kim, K.A.; Krein, P.T.: *Photovoltaic converter module configurations for maximum power point operation*. 2010 Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 12-13 Feb. 2010, pp. 77 - 82, Location: Urbana-Champaign, IL, ISBN: 978-1-4244-5902-5. DOI: 10.1109/PECI.2010.5437152.
- [4] Contact Layers. Steirer, K.X.; Widjonarko, N.E.; Sigdel, A.K.; Lloyd, M.T.; Ginley, D.S.; Olson, D.C.; Berry, J.J.; *Optimization of Organic Photovoltaic Devices Using Tuned Mixed Metal Oxide*, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, Issue Date: 20-25 June 2010, pp: 000102-000104, Honolulu, HI ISSN: 0160-8371, Print ISBN: 978-1-4244-5890-5, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614501

## ADRESY AUTOROV

Stanislav Ilenin, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, stanislav.ilenin@tuke.sk