

Model fotovoltaického článku

Beláň Anton · Elektrotechnika

09.10.2013

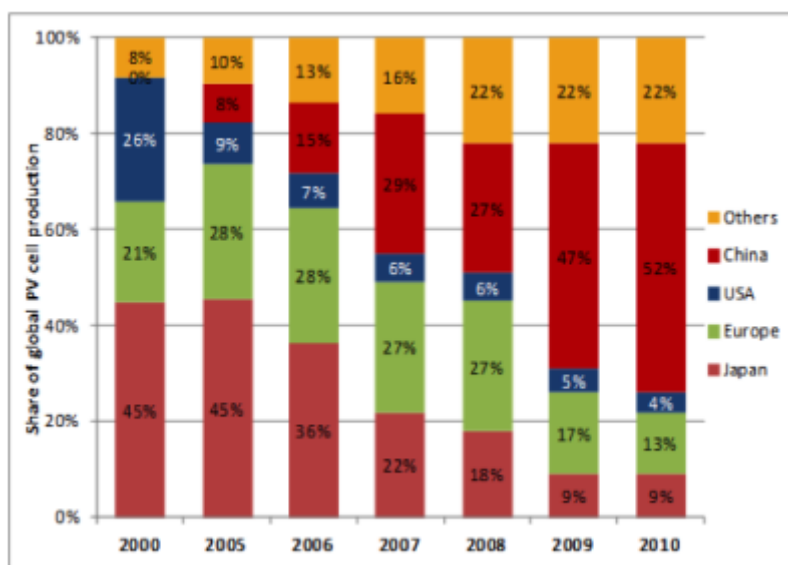


Tento príspevok sa zaoberá modelovaním fotovoltaického článku a jeho implementáciou do programu Matlab/Simulink. Vytvorený model článku umožňuje určiť správanie sa pri rôznych prevádzkových podmienkach ako napr. pracovná teplota a intenzita ožiarenia, ktoré majú vplyv na jeho výkon.

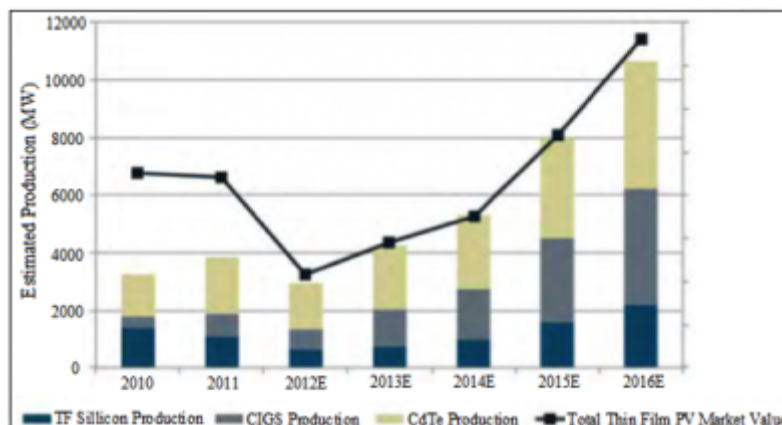
1. Úvod

Fotovoltaika (FV) je oblasť, ktorá sa zaoberá priamou premenou energie svetelného žiarenia (slnečného žiarenia vo viditeľnej oblasti) na elektrickú energiu. Na premenu sa využívajú veľkoplošné polovodičové štruktúry. Fotovoltaický jav ako prvý pozoroval Becquerel v roku 1839 na elektrochemických článkoch. Rozvoj polovodičovej techniky v päťdesiatych rokoch minulého storočia, príprava priechodu P-N a poznanie fyzikálnych procesov v priechode P-N vytvorili predpoklady aj pre výrobu slnečného článku s rozumnou účinnosťou.

Rozhodujúcim dôvodom na zintenzívnenie výskumu fotovoltaiky na pozemské využívanie bolo uvedenie si skutočnosti, že energetické zdroje ľudstva na zemi sú vyčerpateľné, pričom hrozivé odhady predpokladali, že niektoré zdroje sa môžu vyčerpať vo veľmi krátkom čase. I keď prognózy sa postupne korigovali, aj súčasné projekty nehovoria o obdobiach dlhších ako niekoľko storočí (pre uhlie). [4]



Obr. 1. Svetová produkcia fotovoltaických článkov v rokoch 2000-2010



Obr. 2. Plánovaná svetová produkcia zfotovoltických článkov na nasledujúce roky

Výhodou slnečných fotovoltických článkov je, že pracujú bezpečne, ticho, nepotrebnú žiadne palivo, neprodukuje odpad, vo väčšine inštalácií nemajú žiadne pohyblivé časti a preto nepotrebnú ani údržbu.

Tab. 1. SWOT analýza podľa „Stratégie vyššieho využitia obnoviteľných zdrojov energie v SR“ [4]

Silné stránky	Slabé stránky
<ul style="list-style-type: none"> významný a všadeprítomný technický potenciál kvalifikovaná pracovná sila v elektronickom priemysle decentralizovaná výroba v mieste spotreby minimálne prevádzkové náklady možnosti integrácie do rekonštruovaných resp. novostavaných budov (sofistikované architektonické riešenia) zníženie závislosti od dovozu fosílnych palív a uránu zníženie objemu emisií skleníkových plynov 	<ul style="list-style-type: none"> nízka hustota výkonu nízka účinnosť premeny na elektrickú energiu vysoké investičné náklady pri FV komponentoch dlhšie obdobie návratnosti investícií nízke znalosti o možnosti využívania slnečnej energie sezónna a denná variabilita klímy a fluktuácia počasiavýrazne ovplyvňujú celkový výkon rozsah verejnej elektrickej siete výrazne limituje trhový potenciál
Príležitosti	Ohrozenia
<ul style="list-style-type: none"> vznik pracovných príležitostí v high-tech priemysle a v službách prilákanie nových investícií rozvoj nových vedných odborov a informačných technológií rastúca cena fosílnych palív znižovanie cien FV komponentov potenciál na export FV systémov 	<ul style="list-style-type: none"> vyššia náročnosť na investície rast cien základnej suroviny na výrobu fotočlánkov

Prírodné podmienky v Slovenskej republike sú priaznivé na trvalé využívanie slnečného žiarenia ako zdroja energie na fotovoltickú premenu, podobne ako je to v Rakúsku, Českej republike alebo Nemecku. Rozvoj FV na Slovensku podporuje záväzná požiadavka EÚ na širšie zapájanie OZE do celkovej energetickej bilancie. Aj keď energia z fotovoltických modulov nemôže pokryť celkovú potrebu elektrickej energie, prispeje k naplneniu cieľov pokrytia výroby elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov, ktoré znamenajú zníženie závislosti od dodávok energie zo

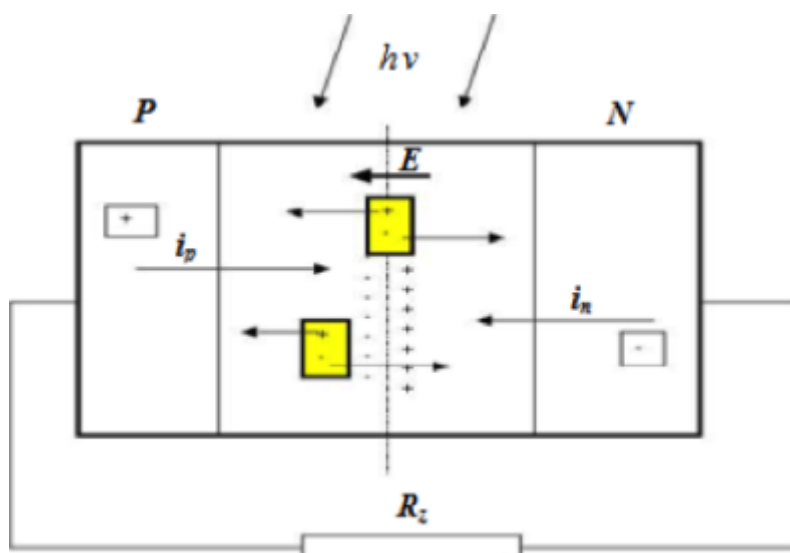
zahraničia. Navyše FV predstavuje významné výrobné odvetvie a má vplyv na zamestnanosť v regióne. [4]

2. Fotovoltický článok

Na priamu premenu svetla na elektrinu sa využívajú polovodiče. Sú to materiály s charakteristickými vlastnosťami. Z hľadiska elektrickej vodivosti pri $T = 0 \text{ K}$ sú polovodiče dokonalé izolanty. Čisté polovodiče majú nízku vodivosť aj pri zvýšenej teplote. Pri izbovej teplote ich vodivosť závisí od koncentrácie vhodných prímiesí. Vodivosť môžeme ovplyvňovať pôsobením zvýšenej teploty, svetla alebo tlaku. Na vodivosti sa podieľajú dva druhy nosičov elektrického náboja: elektróny a diery. Energetická štruktúra elektrónov kryštalických polovodičov obsahuje dovolené a zakázané pásy energií. Polovodičové materiály sú anorganické - Si, Ge, GaAs, CdTe, alebo organické - veľké množstvo najrôznejších organických prírodných alebo syntetických látok. [4]

Potenciálová bariéra a fotovoltický jav

Fotovoltický (slnečný) článok obsahuje potenciálovú bariéru. Sú to opačne orientované elektrické náboje zoradené oproti sebe na deliacej línii, ktoré vytvárajú elektrické pole (obr. 3.). Nehomogénne rozdelenie náboja na deliacej línii priechodu P-N vzniklo dôsledkom difúzie majoritných nosičov náboja (elektróny v polovodiči typu N, diery v polovodiči typu P). Na strane P po difúzii majoritných dier do strany N vzniká záporný priestorový náboj, po difúzii elektrónov z N do P vzniká kladný priestorový náboj na strane N. Elektróny a diery generované svetlom sú na bariére elektrickým poľom oddelované (separované). Toto oddelenie spôsobuje vznik potenciálového rozdielu, resp. elektrického napätia, ktoré môže vyvolať elektrický prúd cez vonkajší obvod pripojený na polovodičovú štruktúru s potenciálovou bariérou, vystavenou svetelnému žiareniu (fotovoltický jav). [4, 5]



Obr. 3. Vznik fotoelektrického napätia na P-N rozhraní fotovoltického článku

Na vytvorenie potenciálovej bariéry existuje viacero spôsobov. Jedna z možností prípravy potenciálovej bariéry je použitie rozhrania z polovodiču tvoreného dvomi vrstvami. Jedna vrstva je polovodič typu N a druhá polovodič typu P. Solárny článok nie je homogénny polovodič, ale skladá sa z časti, ktorá má elektrónovú vodivosť

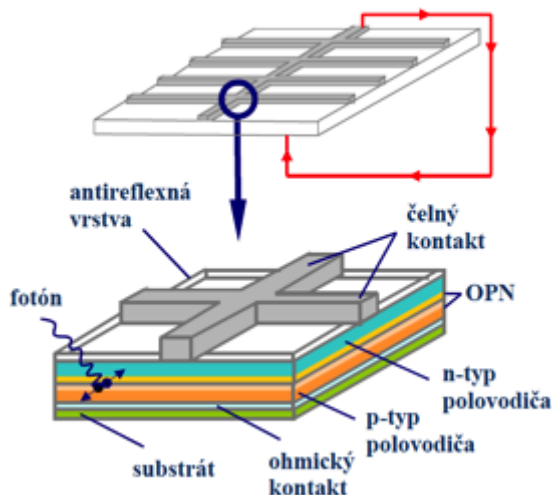
(materiál typu N, napríklad kremík s prímiesou fosforu) a z časti s dierovou vodivosťou (materiál typu P, napríklad kremík s prímiesou bóru). Na elektródach priechodu P-N sa generuje vplyvom svetla a elektrického poľa, ktoré je v oblasti priestorového náboja na rozhraní, napätie (obr. 3.).

Strana N je nabitá záporne, strana P kladne. Slniečny článok je teda polovodičová dióda s vhodnými parametrami (geometrické usporiadanie, vodivosť) pre fotovoltický jav. Existujú ešte aj iné, málo alebo menej používané spôsoby prípravy potenciálovej bariéry, ktorá je potrebná pre fotovoltický jav (napr. kontakt kov-polovodič). Na strane P po difúzii majoritných dier do strany N vzniká záporný priestorový náboj.[2, 4-6]

Vznik elektrického prúdu

Keď zapojíme stranu typu N a stranu typu P fotovoltického článku cez vonkajší elektrický obvod (elektrickú záťaž), tečie týmto obvodom elektrický prúd, podobne ako pri zapojení bežnej batérie (obr. 4). Elektróny zo strany typu N tečú do záťaže, kde vykonajú užitočnú prácu, napr. rozsvietia žiarovku. Energia svetelného žiarenia pôvodne absorbovaná v polovodičovej štruktúre (priechod P-N) sa tak premenila priamo na elektrickú energiu, ktorá vykonáva v záťaži prácu. Elektróny tečú do záťaže, kým existuje ich zdroj, t. j. kým na slnečný článok dopadá svetelné žiarenie. Množstvo elektrónov, teda veľkosť prúdu je úmerná intenzite dopadnutého žiarenia. [4-6]

Základným elementom fotovoltického zariadenia je slnečný článok. Slniečne články vyrábajú najviac elektriny pri priamom slnečnom svetle. Fungujú však i pri oblačnej oblohe (vďaka difúznemu žiareniu), i keď ich výkon je potom výrazne nižší. V zime je množstvo dopadajúceho slnečného svetla menšie ako v lete, prevláda difúzna zložka žiarenia, takže i množstvo vyrobenej elektriny je menšie.



Obr. 4. Štruktúra slnečného článku. OPN - oblasť priestorového náboja (potenciálová bariéra) vzniká na rozhraní P-N [4]

Účinnosť fotovoltických článkov

Účinnosť slnečných článkov je limitovaná termodynamickými zákonitostami. Výsledok je okrem toho daný technickými a technologickými okolnosťami ako kompromis často protichodných požiadaviek na optimálne fyzikálne vlastnosti (napr. horná zberacia elektróda má byť čo najlepšie vodivá, dobrá vodivosť si vyžaduje veľké rozmery a tým

vzniká zatienenie veľkej časti povrchu článku) alebo nákladmi na výrobu. Maximálna teoreticky možná účinnosť priamej premeny svetelného – slnečného žiarenia na elektrickú energiu prostredníctvom slnečných článkov s priechodom P-N je asi 30 %. Prakticky sa však pohybuje na monokryštalickom kremíku okolo 12 až 20 %. Najlepšie štruktúry s jedným priechodom pripravené len na laboratórne účely majú účinnosť do 25 %. Účinnosť:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_L} = \frac{FFU_{0C}I_{SC}}{P_L}$$

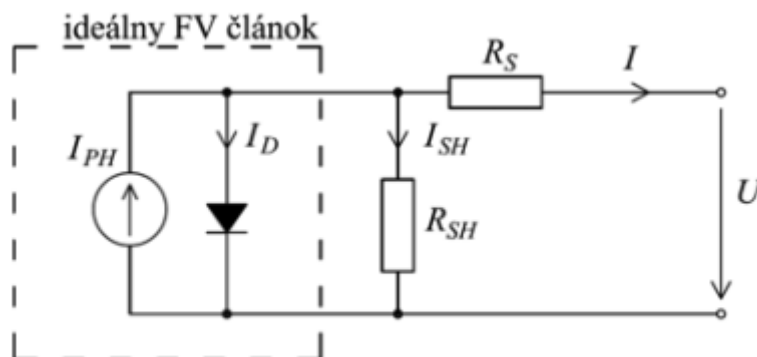
keď P_L je výkon dopadajúceho žiarenia, FF je faktor plnenia (fillfactor), ktorý charakterizuje krivosť voltampérovej charakteristiky pri osvetlení. Odoberaný výkon závisí od veľkosti záťaže, pričom veľkosť výkonu sa mení od nuly v režime nakrátko, cez maximum pri prispôsobení zdroja a záťaže, až po nulu v režime naprázdno. Voltampérová a výkonová charakteristika modulov, panelových polí a aj celej FV elektrárne má obdobný priebeh.

3. Matematický model fotovoltického článku

Priechod P-N je polovodičová dióda. Podľa polarít vonkajšieho pripojeného jednosmerného napätia tečie cez diódu prúd (priamy smer), alebo netečie (záverný smer). O veľkosti prúdu na P-N prechode hovorí U-I charakteristika daná Shockleyho rovnicou.

$$I_D = I_S \left(\exp \left[\frac{qU_D}{kT} \right] - 1 \right) \quad (1)$$

kde I_D je prúd na dióde, I_S je saturačný prúd, U_D je napätie na dióde, q ($= 1.6 \times 10^{-19}$ C) je elektrónový náboj, k ($= 1.38 \times 10^{-23}$ J/K) je Boltzmannova konštanta a T je termodynamická teplota pri ktorej daná dióda pracuje. Náhradná schéma fotovoltického článku je založená na princípe Shockleyho rovnice a je zobrazená na obr. 5. Daná schéma pozostáva z prúdového zdroja, ideálnej diódy, paralelného odporu R_{SH} vyjadrujúci rozptylový prúd a sériového odporu R_S , ktorý reprezentuje vnútorný odpor.



Obr. 5. Náhradná schéma fotovoltického článku

Voltampérová charakteristika (U-I) je daná rovnicou:

$$I = I_{PH} - I_S \left(\exp \left[\frac{q(U + IR_S)}{kTA} \right] - 1 \right) - \frac{(U - IR_S)}{R_{SH}} \quad (2)$$

kde I_{PH} je svetlom generovaný prúd alebo fotoprúd, U je výstupné napätie solárneho článku, A je faktor ideálnosti. Fotoprúd z veľkej časti závisí od intenzity žiarenia a od teploty pri ktorej solárny článok pracuje a je daný vzťahom [3]:

$$I_{PH} = \lambda(I_{SC} + K_I(T - T_r)) \quad (3)$$

kde I_{SC} je prúd nakrátko fotovoltického článku pri teplote 25°C a $\lambda = 1 \text{ kW/m}^2$, K_I je teplotný koeficient článku nakrátko, T_r je referenčná teplota článku a λ je intenzita žiarenia v kW/m^2 . Saturačný prúd fotovoltického článku sa mení v závislosti od teploty a je popísaný nasledovne [3]:

$$I_S = I_{RS} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[qE_G \frac{(1/T_r - 1/T)}{KA} \right] \quad (4)$$

kde I_{RS} je záverný saturačný prúd v závislosti od referenčnej teploty a slnečného žiarenia, E_G je energia zakázaného pásma použitého polovodiča v článku. Faktor ideálnosti A je závislý na technológii výroby použitých fotovoltických článkov [3]. Závislosť záverného saturačného prúdu od referenčnej teploty je vyjadrená pomocou vzťahu:

$$I_{RS} = \frac{I_{SC}}{\exp \left[\frac{qU_{OC}}{kAT} \right] - 1} \quad (5)$$

kde U_{OC} je napätie nakrátko fotovoltického článku pri referenčnej teplote. Ďalší presnejší model, ktorým sa dá opísať FV článok je dvojitý exponenciálny model. Tento typ je odvodený z fyzikálneho správania článku vyrobeného z polykryštalického kremíka. Tento model sa skladá zo svetlom ovplyvneného prúdového zdroja, dvoch diód, sériového a paralelného odporu. Avšak, z dôvodu implicitnej a nelineárnej podstaty tohto modelu je ťažké definovať parametre volatampérovej charakteristiky daného modelu, a preto sa zatiaľ tento model širšie neuplatňuje pri praktických simuláciách [3, 7]. Približné modely fotovoltického článku s vhodnou zložitou môžu byť ďalej odvodené zo vzťahu (2) cestou zanedbania paralelného odporu a popísané pomocou:

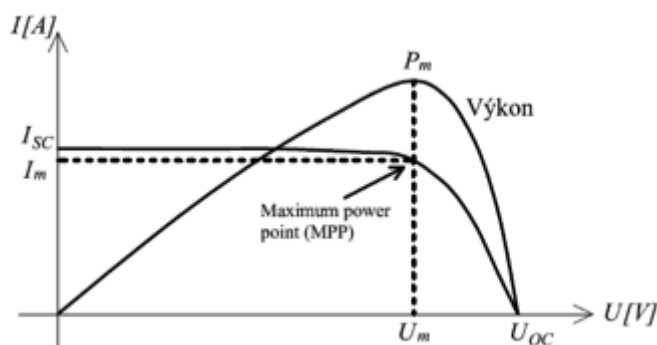
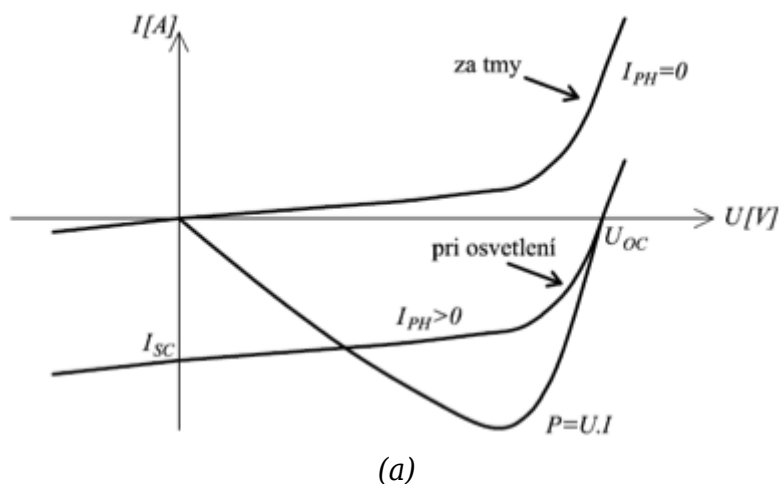
$$I = I_{PH} - I_S \left(\exp \left[\frac{q(U + IR_S)}{kTA} \right] - 1 \right) \quad (6)$$

Pre ideálny fotovoltický článok neexistujú sériové ani paralelné straty a teda nedochádza ani k úbytku napätia voči zemi, čo znamená $R_s = 0 \Omega$ a $R_{SH} = \infty \Omega$. Náhradný obvod popisujúci takýto článok môže byť ďalej zjednodušený predefinovaním vzťahu (2):

$$I = I_{PH} - I_S \left(\exp \left[\frac{qU}{kTA} \right] - 1 \right) \quad (7)$$

Fotovoltický článok je veľkoplošná polovodičová dióda, ktorá pracuje v generátorickom

režime, ak na ňu dopadá svetlo. V tomto režime pracuje dióda vo 4. kvadrante U-I roviny (obr. 6(a)). Limitné hodnoty voltampérovej charakteristikysú napätie naprázdno U_{OC} a prúd nakrátko I_{SC} . Je zaujímavé si všimnúť, že druhý výraz v rovnici (7) je vlastne rovnica diódy (1) so záporným znamienkom. To znamená, že graf rovnice (7) je vlastne otočená voltampérová charakteristika (VACH) diódy posunutá smerom nahor prostredníctvom prúdu I_{PH} . Týmto spôsobom sa charakteristika presunie do 1. kvadrantu. [4, 8]



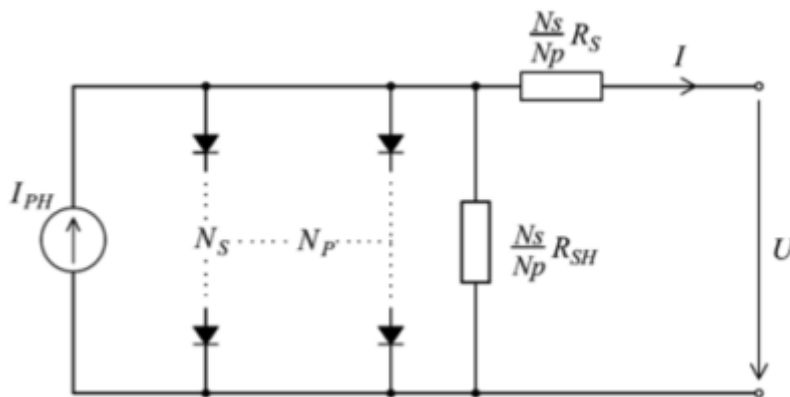
Obr.6 U-I and U-P charakteristiky fotovoltického článku: a) 4. kvadrant, b) 1. Kvadrant

Vonkajšie podmienky ako napríklad teplota solárneho článku alebo intenzita dopadajúceho svetla majú významný vplyv na tvar VACH. Taktiež jej tvar je ovplyvnený aj vnútornými vlastnosťami článku (štruktúrou článku) ako je sériový odpor R_s , od ktorého sa požaduje, aby mal čo najnižšiu hodnotu a zvodový odpor R_{SH} , ktorý má dosahovať vysokú hodnotu. Bod na VACH, pri ktorom dosahuje solárny článok maximálny výkon sa nazýva bodom maximálneho výkonu (angl. Maximum power point). Hodnoty napätia a prúdu v tomto bude sú označené na obr. 7(b) ako U_m resp. I_m . V stave naprázdno a nakrátko nie je produkovaný článkom žiadny výkon. [4, 8]

Model fotovoltického modulu (panela)

Samotný solárny článok je schopný dodávať len malý výkon (napr. pri ploche 1 dm^2 a plnom slnečnom svite je pri napätí $0,5 \text{ V}$ a prúde $2,5 \text{ A}$ výkon článku $1,25 \text{ W}$). Elektrický výkon je daný celkovou plochou článku a jeho účinnosťou. Na získanie vyššieho výkonu je preto potrebné zapojiť solárne články do väčšieho celku tzv. modulu a to sériovým a paralelným spojením. Sériovým spájaním článkov sa zvyšuje

napätie pričom prúd zostáva rovnaký, paralelným zapojeným sa zase zvyšuje prúd pričom napätie sa zachováva. Pospájaním a kombináciou modulov do tzv. polí je možné získať zdroj väčšieho výkonu. [4]



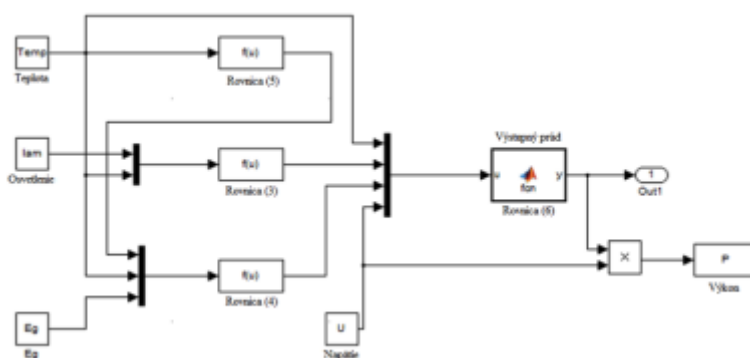
Obr.7 Náhradný obvod fotovoltického modulu

Náhradná schéma modulu pozostávajúceho z N_p paralelne zapojených a N_s sériovo zapojených článkov je na obr. 7. Výsledná rovnica pre dané zapojenie má nasledovný tvar

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_S \left(\exp \left[\frac{q \left(\frac{U}{N_s} - \frac{I R_S}{N_p} \right)}{k T A} - 1 \right] \right) - \frac{q \left(\frac{N_p U}{N_s} - I R_S \right)}{R_{SH}} \quad (8)$$

Model fotovoltického článku v programe Matlab/Simulink

Na základe rovnice (6), ktorá matematicky popisuje správanie solárneho článku bol zostavený model v programe Matlab/Simulink. Zapojenie jednotlivých blokov v prostredí Simulink je uvedené na obr. 8.



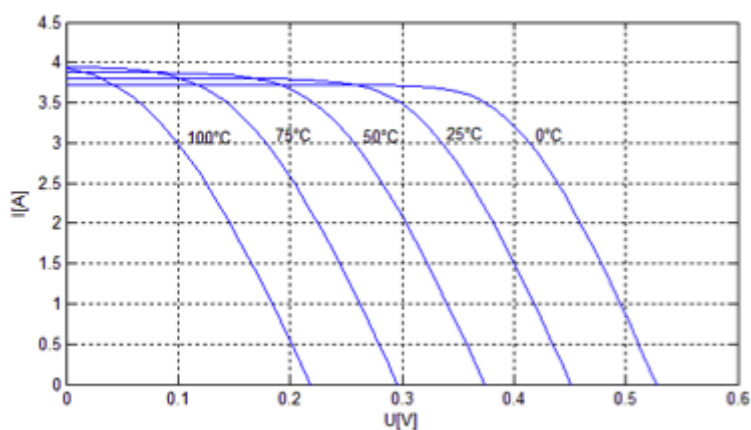
Obr.8 Model solárneho článku v Simulinku

Parametre, ktoré boli použité sú uvedené v tabuľke 2.

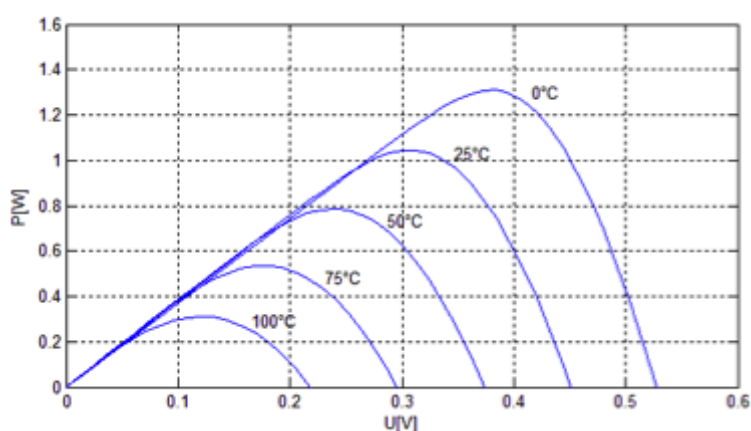
U_{oc} [V]	I_{sc} [A]	A [-]	K_I [mA/C]	T_r [K]	q [C]	k [J/K]	E_g [eV]
0.586	3.8	1.3	0.003	298.15	1.6022×10^{-19}	1.38065×10^{-23}	1.11

Na základe vytvoreného modelu sa sledoval vplyv teploty, intenzity dopadajúceho žiarenia a sériového odporu na správanie solárneho článku. Obr.9(a) ukazuje, že so zvyšovaním pracovnej teploty článku stúpa aj hodnota prúdu nakrátko I_{sc} ale hodnota

napätia naprázdno U_{oc} klesá. To ovplyvňuje výkon solárneho článku takým spôsobom, že s rastúcou pracovnou teplotou klesá výkon solárneho článku (obr. 9 (b)).



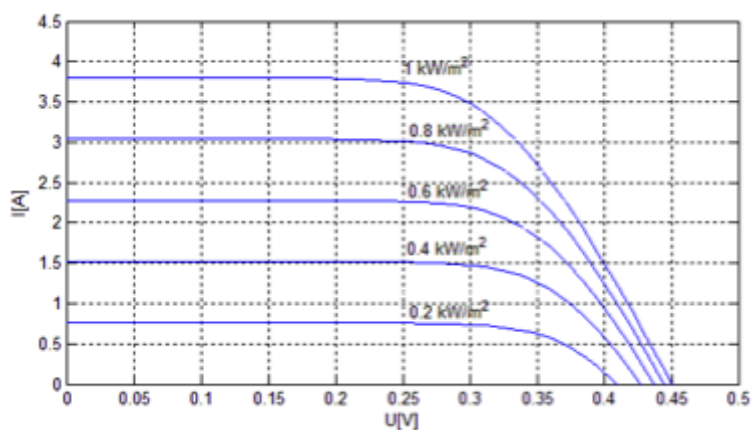
(a)



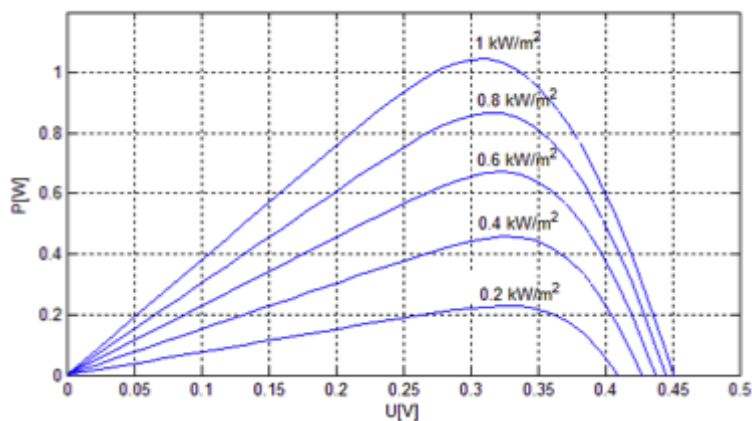
(b)

Obr. 9 a) U - I charakteristika, b) U - P charakteristika solárneho článku pri rôznej pracovnej teplote ($\lambda = 1 \text{ kW/m}^2$, $R_s = 0,025 \Omega$)

Ďalším z parametrov, pri ktorom sa sledoval vplyv na činnosť článku bola intenzita dopadajúceho žiarenia. Pri jej zvyšovaní narastala hodnota prúdu nakrátko omnoho výraznejšie v porovnaní s napätím. To malo za následok, že zvyšujúca sa intenzita žiarenia dopadajúceho na solárny článok má priaznivý vplyv na jeho výkon ako vidno z obr. 10.



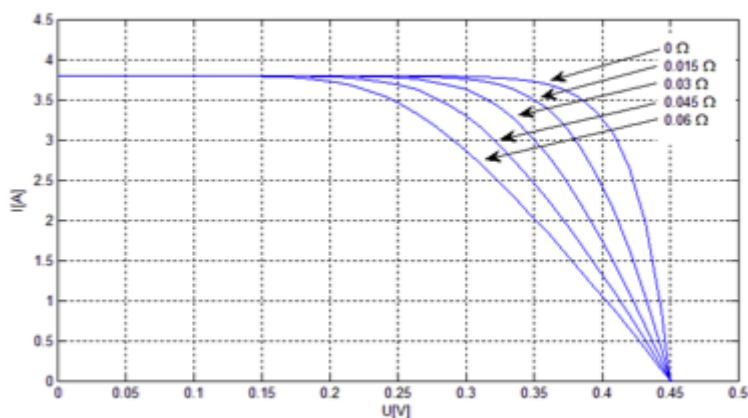
(a)



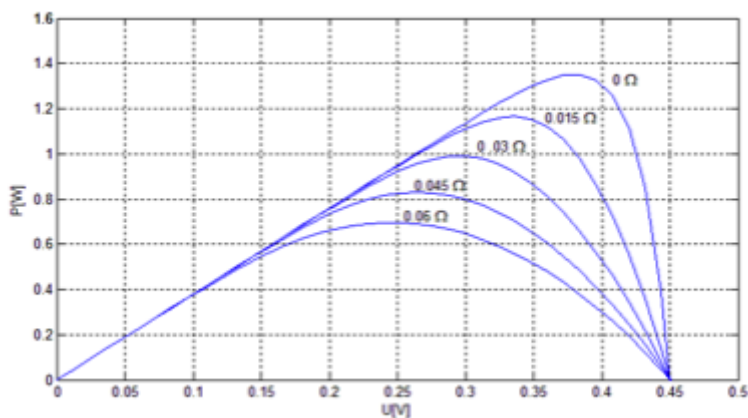
(b)

Obr.10 U-I charakteristika, b) U-P charakteristika solárneho článku pri rôznej intenzite osvetlenia λ ($T = 25^\circ\text{C}$, $R_s = 0.025 \Omega$)

Pri zmene hodnoty sériového odporu R_s nenastala žiadna zmena, čo sa týka hodnôt napätia naprázdno a prúdu nakrátko, avšak malo to dopad na tvar charakteristiky. Zvyšujúca sa hodnota sériového odporu spôsobila znižovanie výkonu dodávaného článkom. Preto je snaha, aby táto hodnota dosahovala čo najmenšie hodnoty.



(a)



(b)

Obr.11 a) U-I charakteristika, b) U-P charakteristika solárneho článku pri rôznej hodnote sériového odporu R_S ($T = 25^\circ\text{C}$, $\lambda = 1 \text{ kW/m}^2$)

Záver

Na základe výsledkov simulácií môžeme zhodnotiť, že fotovoltaické systémy je treba stavať v oblastiach kde je dostatok slnečných dní počas roka a taktiež je dôležité zamerať sa na technológiu výroby a použité materiály, aby sa čo najviac eliminovali parazitné prvky ako napr. sériový odpor, ktorý má vplyv na výkon solárneho článku. Takto vytvorený počítačový model článku je možné využiť na zostavenie fotovoltaického systému a na základe daných parametrov sledovať jeho správanie pri rôznych podmienkach.

Nátlak Európskej Únie kladie dôraz na zvyšovanie podielu obnoviteľných zdrojov na celkovej výrobe elektrickej energie, čo je jedno z troch pravidiel 20-20-20. Takto nastavený trend teda vyžaduje pripájanie obnoviteľných zdrojov energie do elektrizačnej sústavy. Zvyšovanie OZE však prináša okrem známych pozitív aj problémy pre elektrizačnú sústavu, kvôli ťažkej predikovateľnosti ich výroby. Obrovský nárast za posledné roky zaznamenala práve oblasť fotovoltaiky, čo bolo spôsobené vysokými výkupnými cenami. V súčasnosti sa stanovené výkupné ceny výrazne znížili oproti predchádzajúcim rokom, na druhej strane klesajú ceny komponentov FVE (najmä FV panelov), čo zabezpečuje akúsi rovnováhu a záujem o investíciu na výstavbu FV elektrárne.

PodĎakovanie

Tento článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Dobudovanie Národného centra pre výskum a aplikácie obnoviteľných zdrojov energie, ITMS 26240120028, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



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

Použitá literatúra

1. Shahat, A.: PV Cell Module Modelling & Ann Simulation for Smart Grid Applications. Journal of Theoretical & Applied Information Technology, Vol. 16, No. 1, 9-20.
2. National Instruments: Part I-Photovoltaic Cell Overview [online].
<http://www.ni.com/white-paper/7229/en>
3. Said, S., Massoud, A., Benammar, M., Ahmed, S.: A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystem Toolbox. Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 6, No. 12, 1965-1975.
4. Janíček, F.: Renewable Energy Sources 2 - Prospective conversions and technologies. Renesans, s.r.o, Pezinok.
5. Rustlemli, S., Dincer, F.: Modelling of Photovoltaic Panel and Examining Effects of Temperature in Matlab/Simulink. Electronics and Electrical Engineering. Vol. 109, No. 3, 35-40.
6. Salmi, T., Bouzguenda, M., Gastli, A., Masmoudi, A.: MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell. International Journal of Renewable Energy Research. Vol. 2, No. 2, 213-218.
7. Tsai, H., Tu, C., Su, Y.: Development of Feneralized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK, Proceedings of the World Congress on Engineering and

ComputerScience 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA, 846-851

8. [8] Masters, G.: Renewable and Efficient Electric Power Systems. JohnWiley&Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Spoluautormi článku sú Pavol Heretík, Matúš Kováč, Boris Cintula, Dominik Viglaš, Vladimír Volčko, Anton Cerman, Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky FEI STU, Oddelenie elektroenergetiky, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava 1
