

Predikcia a reálna produkcia malej fotovoltaickej elektrárne

Perný Milan · Elektrotechnika

03.05.2017



V práci porovnáваме experimentálne údaje získané z kontinuálneho monitorovania solárneho systému s výkonom 500 Wp, ktorý je inštalovaný na streche Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave s výsledkami získanými simulačným softvérom PVGIS. Okrem kontinuálneho merania elektrických parametrov bolo uskutočnené aj sledovanie meteorologických a environmentálnych faktorov ako teplota, vlhkosť, tlak vzduchu, rýchlosť vetra a pod. Hlavným cieľom práce bolo sledovanie denných, týždenných a mesačných analýz a ich porovnanie s databázou slnečného žiarenia klimatologických údajov homogenizovaných pre Európu (PVGIS).

1. Úvod

Fotovoltaika je vedecká disciplína, ktorá zahŕňa výskum nových materiálov, analýzu premeny slnečného žiarenia na elektrickú energiu a zároveň komplexne rieši aj ďalšie parciálne problémy. V posudzovaní efektívnosti fotovoltaickej premeny zohráva dôležitú úlohu aj komplexné monitorovanie existujúceho fotovoltaického systému/elektrárne. Užitočné je meranie elektrických a neelektrických veličín a ich porovnanie s predpovedami a simuláciami získanými z profesionálnych softvérov a databáz. Cieľom je okrem iného aj posúdenie, či boli splnené očakávania technického návrhu [1]. Komplexné monitorovanie zahŕňa meranie slnečného žiarenia, teploty okolia a modulov, veterných podmienok, vlhkosti a tlaku priamo na mieste kde je FV inštalácia umiestnená. Monitorovanie slnečného žiarenia a následné vyhodnotenie, t.j. porovnanie s očakávaniami na základe modelov, je veľmi dôležité pre optimálne umiestnenie FV inštalácie. Jedným z dôvodov je aj rozmiestnenie existujúcich meteorologických staníc, ktoré sú často príliš vzdialené od jestvujúcej alebo predpokladanej inštalácie. Meranie „na mieste“ umožňuje lepšie pochopenie lokálnej mikroklímy [2]. Získané dáta sú tiež veľmi dôležité pre návrh ďalších podobných fotovoltaických zariadení v danej oblasti.

Zvyčajne sa fotovoltaické moduly testujú pri štandardných podmienkach STC (Standard test condition -intenzita $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, teplota $25 \text{ }^\circ\text{C}$, AM faktor 1,5 a bezvetrie). Nakoľko tieto podmienky sú v reálnych pomeroch prakticky nedosiahnuteľné je užitočné realizovať príslušné merania na overenie efektivity fotovoltaických modulov. Prevádzku fotovoltaických zariadení ovplyvňuje najmä intenzita svetelného žiarenia a tepelné pomery, ale aj iné poveternostné okolnosti.

Vo všeobecnosti je známe, že zmeny teploty [3] výrazne ovplyvňujú správanie a prevádzkové vlastnosti polovodičových prvkov a vo výsledku teda aj elektrické parametre FV modulu, ako aj ostatné komponenty fotovoltického systému (invertor, vodiče a pod.). Okrem vyššie uvedených parametrov je užitočné monitorovať aj ďalšie environmentálne parametre ako vlhkosť, tlak vzduchu a rýchlosť vetra [4-6]. Tieto parametre alebo ich kombinácie, napríklad teplota a vlhkosť, majú vplyv nielen na prevádzkové podmienky, ale významne ovplyvňujú životnosť zariadenia, najmä zapuzdrenie FV modulu [7]. V praxi je užitočné výstupné elektrické parametre (prúd, napätie, výkon) zaznamenávať v pravidelných časových intervaloch a použiť ich na výpočet dôležitých parametrov ako sú straty či účinnosť.

Okrem už spomenutých veličín sú monitorované ďalšie okolnosti ovplyvňujúce prevádzku. Je veľmi dôležité poznať úroveň znečistenia a prachu v miestnych podmienkach. Akumulovaná nečistota na povrchu modulov vedie k zníženiu množstva slnečného žiarenia, ktoré dopadne na aktívnu časť modulu. Aj keď býva prach usadený na povrchu väčšinou odstránený/umytý dažďom, ukazuje sa, že pravidelné čistenie fotovoltických modulov môže napomôcť k zvýšeniu vyrobenej elektrickej energie. Na dôvažok uvádzame, že v špecifickom prostredí môžu straty spôsobené znečistením dosiahnuť až 70 % celkových strát [8].

2. Experiment

Jednosmerná časť FV systému bola pripojená k jednofázovému meniču Gridfit 250, ktorý transformoval a dodával energiu z fotovoltického systému do siete. FV systém (obr. 1) je zložený z dvoch vetiev modulov. Obidve vetvy predstavujú monokryštalické moduly s nasledujúcimi charakteristikami:

Tab. 1 Technická špecifikácia použitých modulov

	SunTech STP	Solara SM340K
P_m	85 Wp	85 Wp
U_m	17.6 V	18 V
I_m	4.8 A	4.72 A
U_{oc}	21.9 V	21.9 V
I_{sc}	5.14 A	5.15 A
rozmery	1195x541x30 mm	1235x555x7 mm

Na meranie intenzity slnečného žiarenia bol použitý Pyranometer KIPP and ZONEN. Použitý rádiometer je navrhnutý v súlade s medzinárodnou normou ISO 9060 a v súlade s predpismi svetovej meteorologickej organizácie (WMO). Snímač vetra Thies CLIMA detekuje horizontálnu rýchlosť vetra. Na meranie relatívnej vlhkosti vzduchu bol použitý senzor relatívnej vlhkosti. Tlakomer PHOENIX Contact bol určený na meranie atmosferického tlaku. Teplota priamo na moduloch bola meraná pomocou termosnímača Pt 100, pričom teplota okolia bola meraná teplomerom, ktorý bol súčasťou zariadenia na meranie vlhkosti. Zariadenie PROlog bolo určené na meranie, spracovanie a zaznamenávanie nameraných údajov do pamäte v reálnom čase.



Obr. 1 Mini FV elektrárň na ÚEAE

3. Meranie, získavanie a spracovanie dát

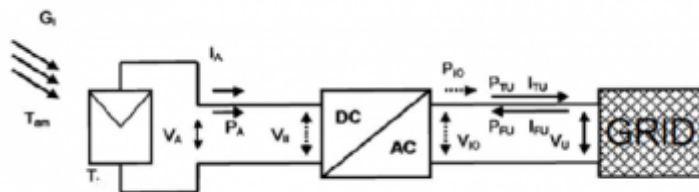
A. Merané parametre

Nasledovné elektrické a neelektrické veličiny boli merané priamo:

- Intenzita žiarenia; E [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
- Tlak; P [Hpa]
- Vlhkosť; RH
- Úbytok napätia na referenčnom rezistore; RREF
- DC prúd - modul SOLARA; SOLI [A]
- DC napätie - modul SOLARA; SOLU [V]
- DC prúd - modul SUNTECH; SUNI [A]
- DC napätie - modul SUNTECH; SUNU [V]
- Teplota modulov; T [$^{\circ}\text{C}$]
- Rýchlosť vetra; V [m/s]

Principiálna schéma systému a meracích komponentov je uvedená na obr. 2. Kde:

- G_1 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), celkové ožiarenie modulov
- V_A (V), výstupné napätie z FV modula v podmienkach maximálneho výkonu (MPP)
- I_A (I), výstupný prúd z FV modula v podmienkach maximálneho výkonu (MPP)
- I_{TU} (A), prúd smerom k sieti
- V_U (V), sieťové napätie
- I_{FU} (A), prúd zo siete
- T_{am} ($^{\circ}\text{C}$), teplota okolia
- T ($^{\circ}\text{C}$), teplota modulov
- P_A (W), výstupný výkon
- P_{TU} (W), výkon dodaný do siete
- P_{FU} (W), výkon získaný zo siete



Obr. 2 Fotovoltická inštalácia pripojená do siete

B. Dovočítané parametre

Niektoré parametre nemožno merať priamo, ale musia byť dovočítané. Ide napr. o parametre:

- $E_{A,t}$ (kWh), elektrická energia vyrobená FV inštaláciou v čase t ,
- $E_{SA,t}$ (kWh), solárna energia v rovine modulov,
- $E_{TUN,t}$ (kWh), energia dodaná do siete.

Parametre a premenné, ktoré charakterizujú efektívnosť fotovoltického systému sú uvedené v návrhu Medzinárodnej energetickej agentúry (IEA) [9].

Referenčný výťažok (Reference yield), Y_R

Referenčný výťažok sa vypočíta porovnaním ožiarenia na povrchu modulov s referenčným ožiarením podľa vzťahu:

$$Y_{R,t} = \frac{t_r \sum_t G_1}{G_{ref}} \quad (1)$$

kde $t_r \cdot \sum_t G_1$ je solárna teoretická energia dostupná v čase t , G_{ref} je referenčná ožiarenosť/intenzita.

Výťažok z pola (Array yield), Y_A

Je to pomer medzi elektrickou energiou produkovanou FV systémom v čase t a menovitým výkonom.

$$Y_{A,t} = \frac{E_{A,t}}{P} \quad (2)$$

$E_{A,t}$ je elektrická energia vyrobená FV generátorom v čase t , P je nominálny výkon FV generátora (kWp)

Konečný výnos (Final yield), Y_F

Je to pomer medzi užitočnou elektrickou energiou dodanou do siete v čase t a menovitým výkonom FV systému (výsledok je v hodinách)

$$Y_{F,t} = \frac{E_{TUN,t}}{P} \quad (3)$$

$E_{TUN,t}$ elektrická energia dodaná do siete v čase t , P nominálny výkon FV generátora

Straty v systéme (Losses in the PV system), $L_{C,t}$

Ide o rozdiel medzi referenčným výnosom a výnosom z poľa.

$$L_{C,t} = Y_{R,t} - Y_{A,t} \quad (4)$$

Straty v zvyšku systému (Losses in the rest of the system), $L_{BOS,t}$

Ide o rozdiel medzi výnosom z poľa a konečným výnosom.

$$L_{BOS,t} = Y_{A,t} - Y_{F,t} \quad (5)$$

Straty v invertore (Inverter losses), L_s

Sú to straty spôsobené konverziou DC/AC. Vychádzajú z rozdielu medzi výstupnou energiou z meniča a jednosmernou energiou, ktorú produkuje FV systém. Straty v konverzii DC/AC v dôsledku použitia meniča boli odhadnuté na 10 % pre moduly SunTech a 12 % pre moduly Solara.

Pomer výkonnosti (Performance ratio)

Pomer výkonnosti kvantifikuje celkový vplyv strát na menovitý výkon v dôsledku neefektívnosti meniča, prepojení, iných strát spôsobených konverziou DC na AC prúd, ohrevu fotovoltického modulu, neúplného ožiarenia povrchu modulu, znečistenia alebo snehu, porúch systému a porúch komponentov systému.

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (6)$$

Účinnosť

Účinnosť systému sa vypočíta ako pomer medzi elektrickou energiou vyrobenou FV inštaláciou v čase t a celkovou solárnou energiou dopadajúcou na FV modul.

$$\eta = \frac{E_{a,t}}{E_{s,t}} \quad (7)$$

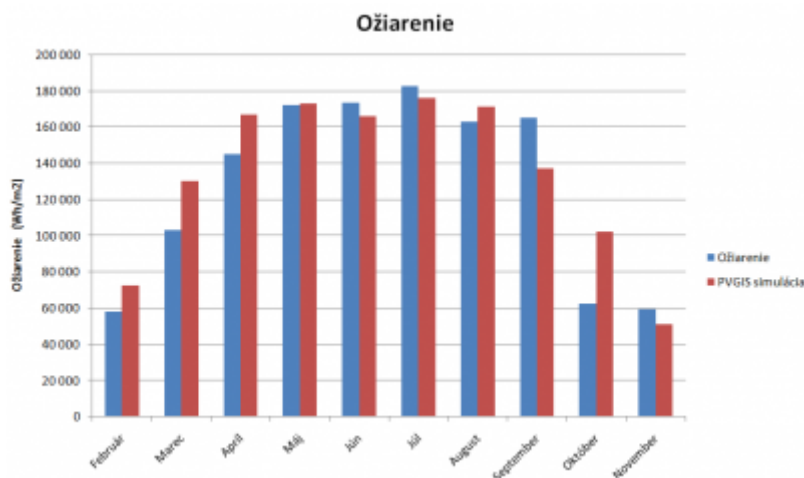
$E_{A,t}$ (kWh), elektrická energia vyrobená FV inštaláciou v čase t , $E_{SA,t}$ (kWh), solárna energia v rovine modulov v čase t

4. Výsledky a diskusia

Vlastnosti FV systému pripojeného do siete boli sledované a vyhodnotené od februára do novembra roka 2016. Niektoré získané údaje boli navyše porovnávané s údajmi dostupnými v PVGIS, ktoré predstavujú databázu slnečného žiarenia získanú z klimatologických údajov homogenizovaných pre Európu [10]. Inštalovaný FV systém a príslušné meracie systémy umožňujú záznam rôznych elektrických a neelektrických parametrov každých 5 minút algoritmom pre následný zber dát. Fotovoltické modul moduly boli situované na stabilnej strešnej konštrukcii naklonenej v optimalizovanom uhle 45 °.

A. Mesačné ožiarenie

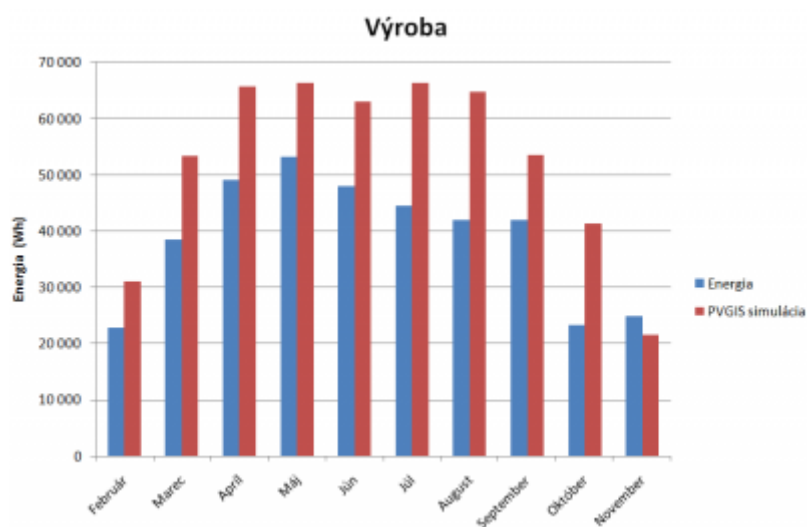
Ako je zrejmé z obr. 3, porovnanie medzi meraným ožiarením a odhadom PVGIS ukazuje vo väčšine mesiacov podobné údaje. Väčší rozdiel medzi odhadovanými a nameranými hodnotami bol v októbri.



Obr. 3 Porovnanie medzi reálne nameranou a odhadovanou intenzitou získanou pomocou PVGIS

B. Mesačná energetická produkcia

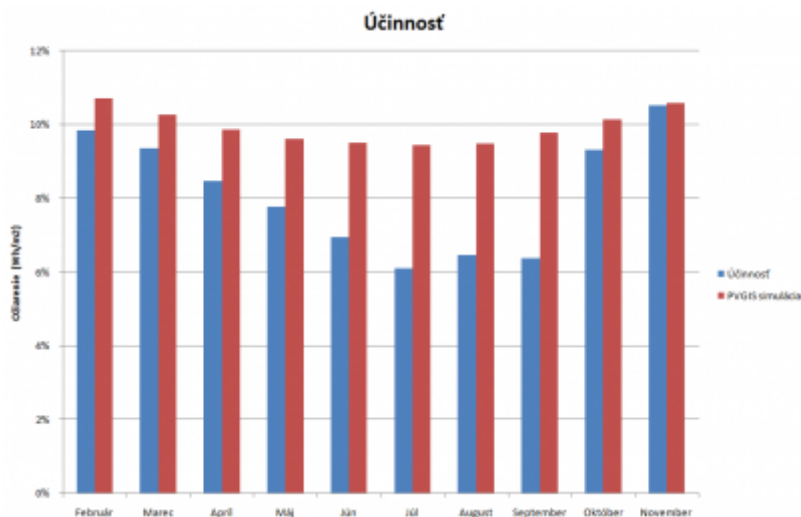
Pokiaľ ide o hodnoty energie vyrobenej inštalovaným systémom (obr. 4), predpokladaná výroba podľa odhadu PVGIS je väčšia vo všetkých mesiacoch roka okrem novembra, kedy bola vyrobená energia vyššia.



Obr. 4 Porovnanie medzi vyrobenou energiou a odhadom PVGIS

C. Mesačná účinnosť

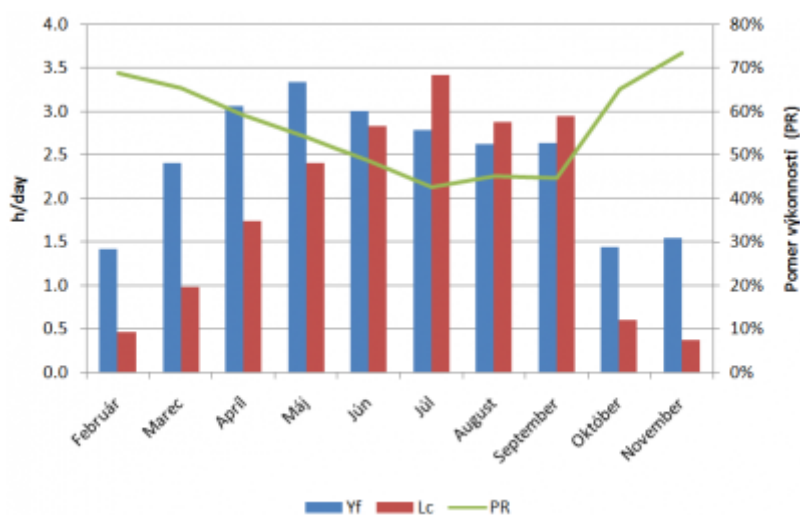
V studených mesiacoch ako sú február, marec, október alebo november bola zistená vyššia nameraná účinnosť v porovnaní s letnými mesiacmi. V letných mesiacoch bol aj rozdiel medzi meranou účinnosťou systému a modelom PVGIS najväčší.



Obr. 5 Porovnanie medzi reálnou účinnosťou a odhadom PVGIS

D. Systémová analýza

Analýza konečného výťažku (Y_F), strát vo FV systéme (L_c) a pomeru výkonnosti (PR) umožňuje zistiť, či systém funguje správne, alebo či sú v systéme určité problémy (poruchy a pod.). Konkrétne, nárast L_c indikuje existenciu abnormálnych strát. Správne nainštalovaný systém by teda mal vykazovať malé hodnoty L_c a vysoké hodnoty PR. Ako je zrejmé z obr. 6, hodnoty pomeru výkonnosti boli v letných mesiacoch nízke, zatiaľ čo hodnoty L_c a Y_F boli vyššie ako v zimných mesiacoch. Dôvodom sú vysoké teploty v týchto mesiacoch a následne zvýšenie strát. Optimálny pomer výkonnosti sa očakáva v intervale 0,6-0,8, v našom prípade boli tieto hodnoty výrazne najnižšie v mesiaci júl 0,43.



Obr. 6 Mesačné analýzy systémových parametrov

5. Záver

Namerané intenzity žiarenia a údaje získané pomocou PVGIS boli v prevažnej väčšine roka podobné. V slnečnom letnom dni letného mesiaca môže ožiarenie dosiahnuť až 900 W.m^{-2} , pričom cez deň napr. v zimnom období a nepriaznivými svetelnými podmienkami žiarenie dosahovalo intenzitu okolo 350 W.m^{-2} . Hodnoty účinnosti boli samozrejme vyššie v chladných mesiacoch ako v horúcich mesiacoch. Najvyššia hodnota bola okolo 10 % v novembri a najnižšia hodnota 6 % bola určená v júli. Malé

hodnoty účinnosti v letných mesiacoch ovplyvňovali množstvo vyrobenej energie, ktorá bola omnoho nižšia ako udával simulačný program. Získané hodnoty ukazovateľov výkonnosti očakávané v rozsahu 0,6 - 0,8 boli v našom prípade od mája do septembra nižšie (0,43 až 0,54), čo naznačuje nesprávnu činnosť FV systému (problémy v moduloch, invertoroch a pod). Straty vo fotovoltaickom systéme boli tiež vysoké, čo naznačuje, že systém má v horúcich mesiacoch zvýšené abnormálne straty. Napokon je potrebné poznamenať, že moduly, ktoré boli namontované na streche 7 rokov boli bez akéhokoľvek čistenia povrchu a zároveň ich účinnosť bola v čase obstarania modulov nižšia v porovnaní s účinnosťou modulov dostupných na trhu v súčasnosti.

Podakovanie

Tento článok vznikol vďaka podpore operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: „Podpora výskumu a transferu technológií v oblasti využitia nízkopotenciálového tepla na výrobu elektriny na STU“, kód ITMS 26220220023 spolufinancovaným zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



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



Použitá literatúra

1. A. Woyte, M. Richter, D. Moser, S. Mau, N. Reich and U. Jahn, "Monitoring of Photovoltaic Systems: Good Practices and Systematic Analysis," in Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2013, pp. 3686-3694.
2. F. Janiček, J. Gaduš, V. Šály, I. Daruľa, E. Regula, M. Smitková, J. Kubica, M. Pípa, M. Bindzár, Renewable Energy Sources 2. Prospective conversions and technologies, Renesans s.r.o., Pezinok, SR, 2012.
3. E. Radziemska, "Thermally affected parameters of the current-voltage characteristics of silicon photocell," Energy Conversion and Management, vol. 43, Issue 14, pp. 1889-1900, 2002.
4. M.j K. Panjwani, G. B. Narejo, "Effect of Humidity on the Efficiency of Solar Cell (photovoltaic)," International Journal of Engineering Research and General Science, vol. 2, Issue 4, pp. 499-503, 2014.
5. L. Harmatha, M. Mikolášek, L. Stuchlíková, A. Kósa, M. Žiška, L. Hrubčín and V. A. Skuratov, "Electrically Active Defects in Solar Cells Based on Amorphous Silicon/Crystalline Silicon Heterojunction After Irradiation by Heavy Xe Ions," Journal of Electrical Engineering, vol. 66, pp. 323-328, 2015.
6. H. K. Elminir, V. Benda and J. Toušek, "Effects of Solar Irradiation Conditions and Other Factors on the Outdoor Performance of Photovoltaic Modules," Journal of Electrical Engineering, vol. 52, 05-06, pp. 125-133, 2001.
7. R. Polanský, M. Pinkerová, M. Bartůňková and P. Prosr, "Mechanical behaviour and thermal stability of EVA encapsulant material used in photovoltaic modules," Journal of Electrical Engineering, vol. 64, pp. 361-365, 2013.
8. B. Marion, J. Adelsten, K. Boyel, H. Hayden, B. Hammon, T. Fletcher, B. Canada, D.

-
- Narang, A. Kimber, L. Michell, G. Rich, T. Townsend, A. Detride and A. Kimbler, "Performance parameters for grid-connected PV system," In: Proceeding of the 31st IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Lake Buena Vista FL, 2005, pp. 1601-1606.
9. L.M. Ayompe, A. Duffy, S.J. McCormack and M. Conlon, "Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland," *Energy Convers. Manage.* 52, pp. 816-825, 2011.
10. E. Tarigan, Djuwari and P. Lasman, "Assessment of PV power generation for household in surabaya using solarGIS-pvPlanner simulation," *Energy Procedia*, vol. 47, pp. 85-93, 2014 .
-

Spoluautormi článku sú Borja Cortés Sánchez, Michal Váry, František Janíček, Vladimír Šály, Juraj Packa, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 Bratislava, Slovakia
