An Optimal Power Point Tracking Algorithm in a Solar PV Generation System

Authors

Reyaz Hussan
Manita Kumari
Adil Sarwar
Atif Iqbal
Mohd Tariq
Jarosław Guziński

Keywords

Solar PV System, Maximum Power Point Tracking, Boost Converter

Abstract

The non-linearity in I-V characteristics of a PV panel requires to be operated at knee point to extract maximum power. In order to operate the panel at optimal point, maximum power point tracking (MPPT) algorithm is employed in the control structure. The main objective of MPP tracking is to keep the operation at knee point of I-V characteristics under varying condition of temperature and solar insolation. Under non uniform solar PV insolation falling on PV panels connected in series, a partial shading condition (PSC) occurs under cloud or shadow effects causes multiple power peak formation. The conventional MPPT methods fail to converge at global maximum power point (GMPP) under the PSC condition. Occurrence of these multiple peaks on characteristics of P-V makes tracking very difficult and requires integration of an efficient algorithm that differentiates between global and local maximum power point. This paper proposes a variable structure constant voltage method to overcome the problem faced by conventional MPPT methods. Moreover, quadratic boost converter has been taken for MPPT operation for increasing the effective gain of the converter. The effective operation of control algorithm has been validated in simulation results.

DOI: 10.12736/issn.2330-3022.2019402

Received: 01.10.2019
Revised: 15.12.2019
Accepted: 22.01.2020
Published online: 15.05.2020

1. Introduction

The tremendous increase in the demand for energy at global level and growing consciousness and concern among the citizens of the world about environment pollution and its ill effect has forced all the world governments in general and scientific community in particular to look for ways to meet the energy demand from Renewable Sources. Solar and wind energy are being looked upon as the potential alternative sources for the growing energy demand. With almost negligible pollution, low maintenance and one time investment, they are the most promising source for future energy generation. Solar energy could be harnessed either through solar thermal (where heat of sunlight is utilized to warm-up a suitable liquid for producing steam which runs turbine subsequently and produce electricity) or through solar PV (where sunlight is directly converted into electricity). The later has got excellent potential as distributed generation source which could be located near the load centre thereby reducing the cost and losses associated with transmission of bulk power. The viable concept of smart micro grid utilizes these solar PV systems as power generating units. With ever increasing efficiency (approximately 40% in laboratory conditions already achieved) and lowering down of cost of these solar PV panels has triggered a massive investment in this sector. But to effectively use solar PV panels for electricity generation and subsequent utilization in off-grid and grid-connected application, proper understanding of their characteristic along with performance evaluation under various influencing factors need to be thoroughly studied and examined. Fig. 1 shows the complete block diagram of a solar PV fed ac system.

The present paper pertains to the examination and possible solution for the adverse effect (known as partial shading effect) of shadowing in Solar PV panels has been taken up. The effect of variation of solar insolation and ambient temperature on solar PV panel is well known, understood and researched. The high non-linear *I-V* (current-voltage output) characteristics gets further complicated when subjected to non-uniform solar insolation during partial shading.

2. Partial shading in a solar PV generation system

Partial shading is caused because of obstruction due to an object covering a section of PV module (e.g. shade from neighbouring buildings, trees etc.) or deposition of loose debris, dirt on PV module or covering of sun behind the cloud for a few minutes (Fig. 2). Under the condition of partial shading the shaded cell gets reverse biased, acting as a load and quenching power from the illuminated cells. This may result in the formation of hotspots causing an irreversible damage to the *PV* module. Moreover to increase the dc voltage level of the PV panel they are connected in series. Partial shading occurring on one panel will aggravate problem further. To overcome this problem each module is equipped with a bypass diode. The increase in negative voltage across the module when subjected to uneven insolation activates the bypass diode. The function of this bypass diode is to bypass the module which receives different irradiance level while keeping the other modules in series receiving full insolation to operate normally [1, 2]. To cope with the partial shading condition of PV system the no. – of research on this area has been increasing day by day as it is clear from data of Fig. 3.

The phenomenon of partial shading causes considerable loss of power in a solar PV system. Under these conditions the non-linear power voltage characteristic gets complicated due to occurrence of multiple maxima with one of them corresponding to global

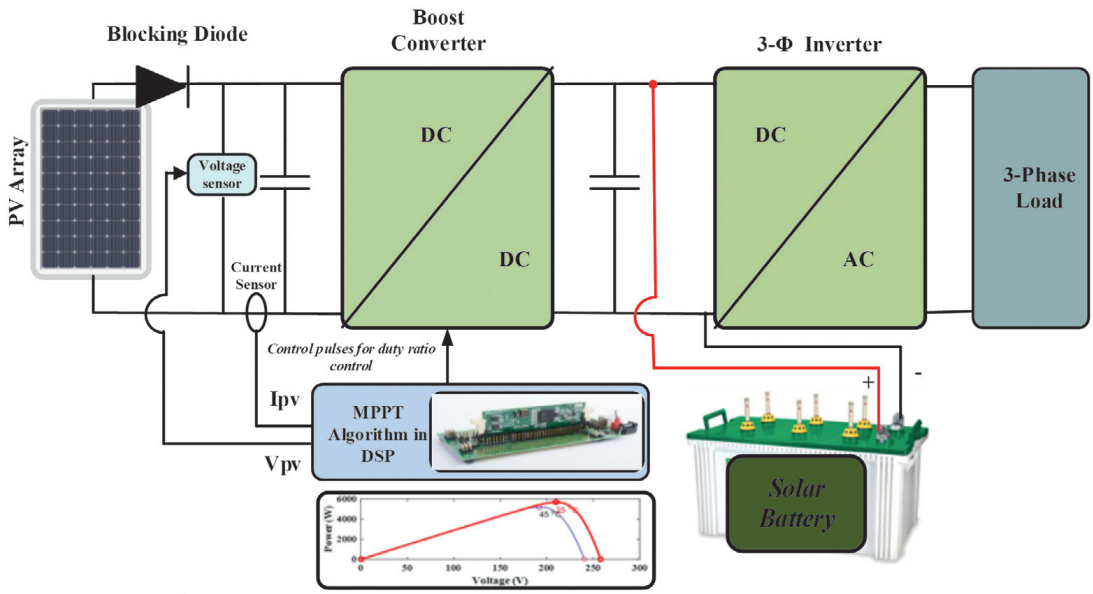


Fig. 1. Block diagram showing the components of an example solar *PV* system (Investigated under the present study)

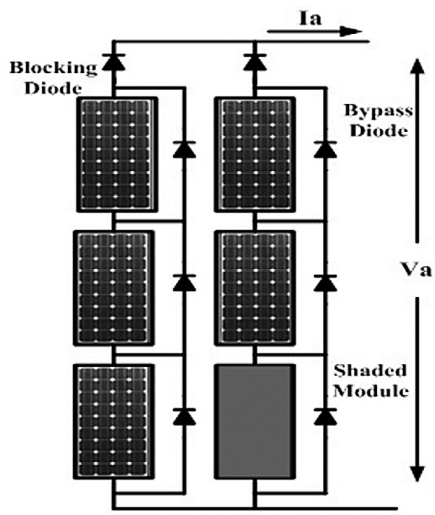


Fig. 2. Block diagram of solar PV system with partial shading condition

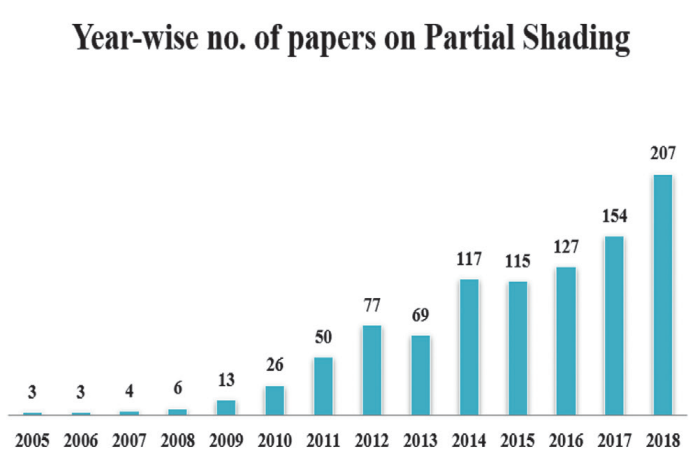


Fig. 3. Research papers in PSC area

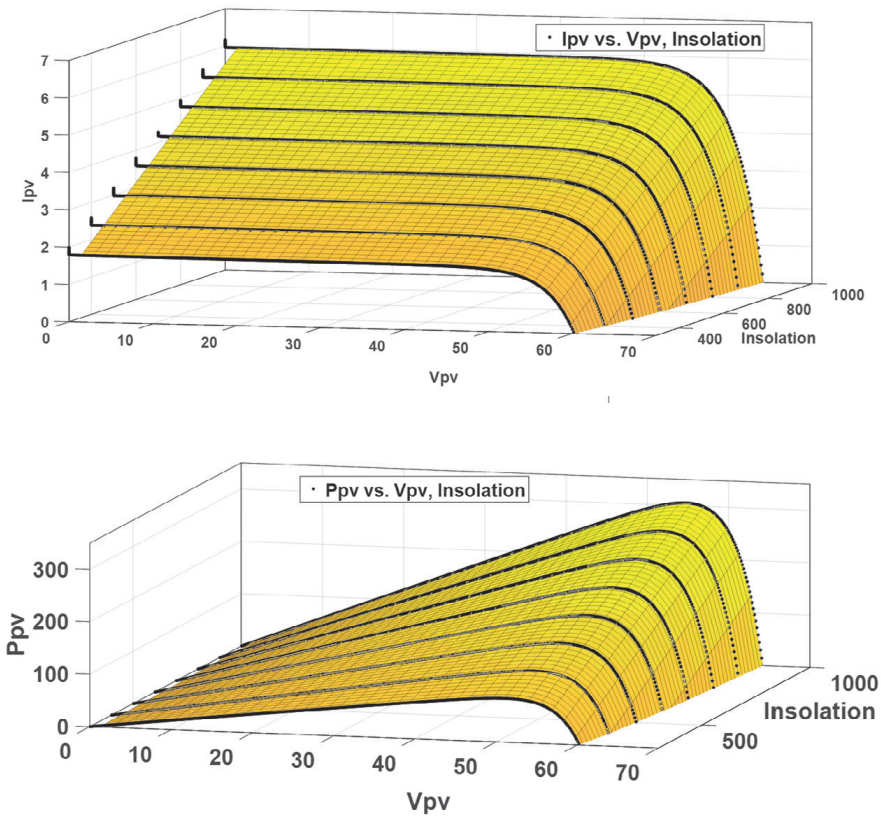


Fig. 4. Three dimensional visualization of *I-V* and *P-V* characteristics with different insolation levels

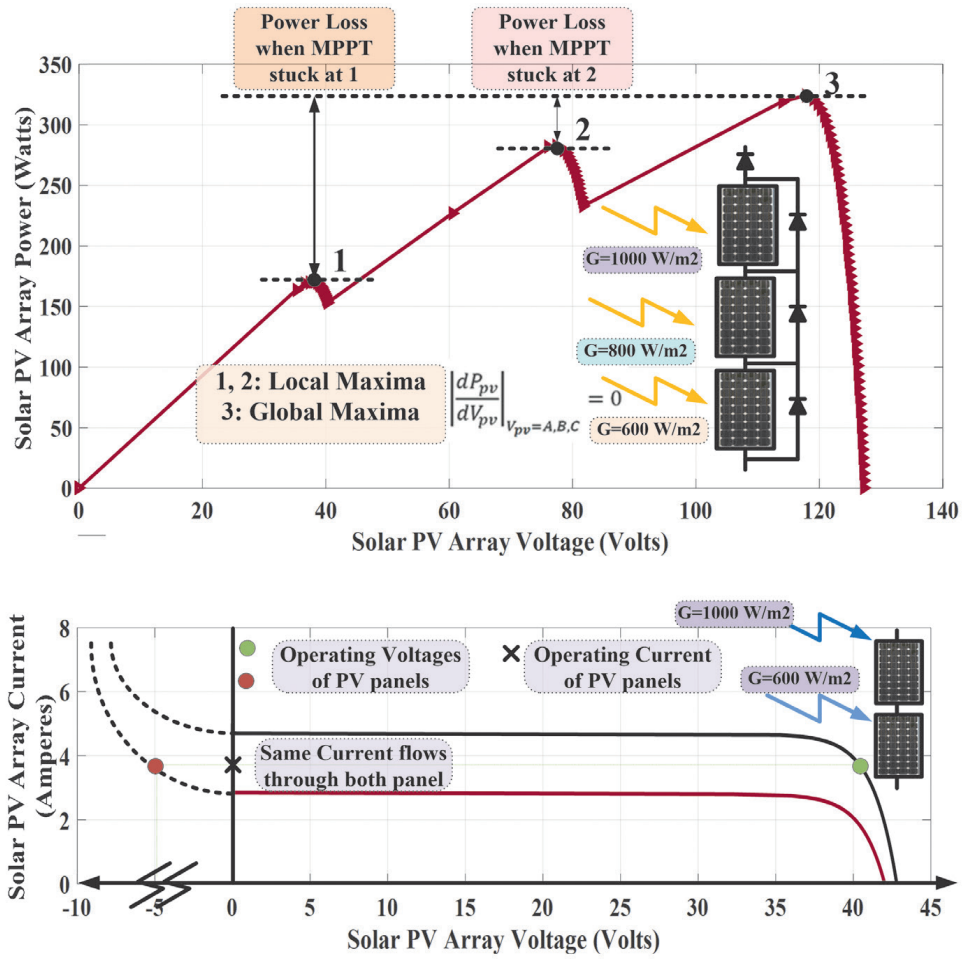


Fig. 5. *P-V* and *I-V* Characteristics of PV module under partial shaded condition with various peak Points

maxima [3]. The *I-V* and *P-V* characteristics of PV module under varying insolation condition is shown in Fig. 4, the power-voltage characteristic illustrates different points of MPP, as the position and magnitude of MPP depends on irradiation and ambient temperature. Therefore Fig. 4 gives the visualization of different current-voltage (*I-V*) and power-voltage (*P-V*) curves respectively for different solar insolation values. The conventional algorithms developed to track and maintain the operating point at global maximum point under uniform solar insolation condition fails because of the occurrence of multiple peaks in PV characteristic curve as shown in Fig. 5. These algorithms may get stuck in local maxima points of power-voltage characteristic like in points '1' or '2' instead of global maxima point '3', in such cases power losses cannot be minimized. In the *I-V* characteristics shown in Fig. 5, two panels connected in series are receiving different insolation. Same current will be flowing through the panels. The operating point on panel receiving lesser insolation will be at negative voltage. Hence the power transferred is negative pointing to a power dissipation in the panel itself. This leads to hotspot formation and degradation leading to failure of the panel. Therefore, bypass diode is added across the panel to bypass it during partial shading condition. In literature some algorithms have been proposed to overcome this problem of conventional algorithms [4–8]. Simulation studies have also been carried out by some authors to study the problem [9, 11]. Methods appearing in literature for partial shading are discussed in section III.

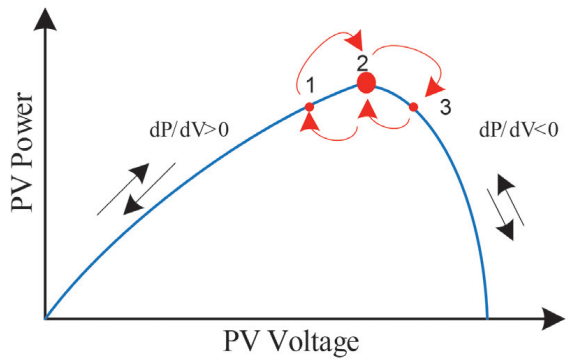


Fig. 6. P and O realization in a Solar PV array

3. Algorithms to track maximum power point in a solar pv generation (SPVG) system

The algorithms to track maximum power point in a solar PV generation system can be categorized into three types.

1) Exploiting relation between Voc and Vmpp
2) Conventional hill climbing based which include perturb and observe, incremental conductance and their combination or hybridization with type 1 algorithms
3) More recent metaheuristic or nature inspired based algorithms.

Perturb and Observe (P&O) method is very simple technique to extract the maximum power point of a solar PV system and due to its ease of implementation this algorithm is most commonly used to get the maximum power [12]. The main purpose of the maximum power point tracker is to obtain the maximum power from solar PV module and conversion to load. A dc-dc converter (boost) acts as interface between solar PV and the load, therefore by varying the value of duty cycle with MPPT controller the converter can be operated at MPP. The P and O algorithm basically works on the principle of maximum power transfer theorem i.e. when the derivative of output power w.r.t.

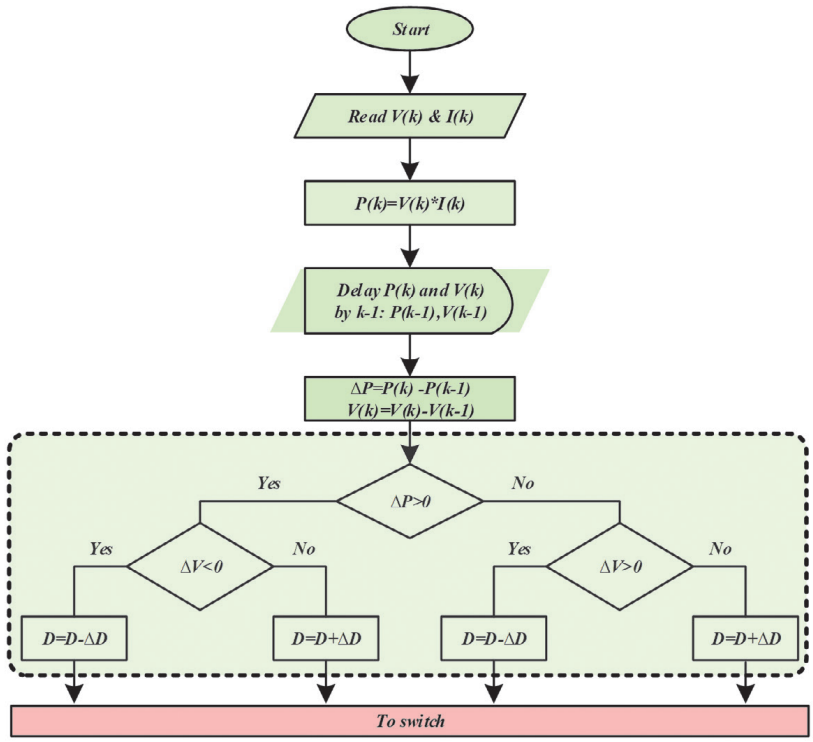


Fig. 7. Algorithm to implement P and O algorith

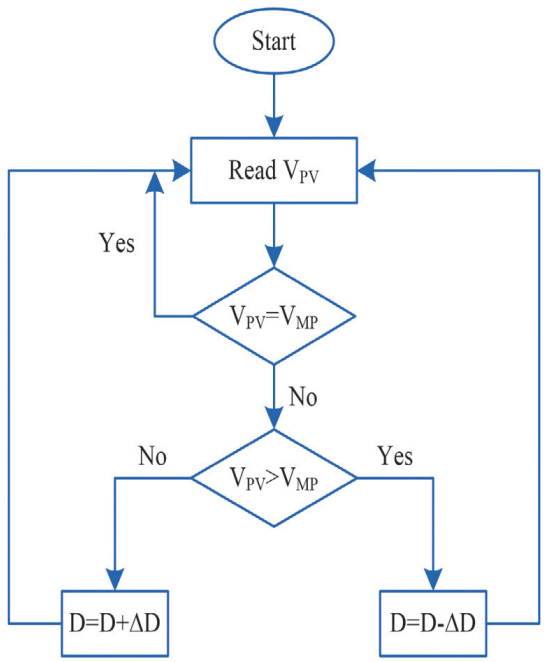


Fig. 8. Flowchart of Constant Voltage control MPPT algorithm

PV panel voltage is zero then power transferred to the load is maximum. P&O technique can be implemented in two ways either by varying voltage or by duty ratio, when perturbation is provided with duty ratio Perturb and Observe method is called hill climbing. At an operating point on the PV curve shown in Fig. 6, if the operating voltage is perturbed and $dP > 0$, then operating point will move toward the maximum power point(MPP) and if $dP < 0$, then P and O algorithm reverses the direction of perturbation. Figure 7 shows the flowchart to implement P and O algorithm.

Algorithm starts with the measurement of voltage and current from the solar PV array and instantaneous power is calculated. Power is changed by both voltage and current, the tracker is operated periodically by incrementing or decrementing the voltage with the help of duty ratio, if the given perturbation gives the increased power of PV then the subsequent perturbation is made in the same direction or vice versa, this process continues until the maximum power point is reached [13–15].

P and O method has two main limitations, firstly, when tracking reaches the vicinity of maximum power point it oscillates back and forth as a result output power get reduced, hence a reduction in efficiency is witnessed. Secondly, P and O method is liable to lose its tracking direction, may lead to the divergence of operating point from MPP locus with varying irradiance which results in reduction of energy output. A reduction in the step size can minimize the oscillation, however, this will make the algorithm slow and require more time to get the maximum power point.

Constant Voltage MPPT technique for harvesting the maximum power from solar PV gives quick response and is one of the simplest MPPT techniques as it does not require additional devices except only one sensor which is needed to measure the solar panel output voltage. In order to measure the panel voltage a PI controller is required to adjust the duty cycle of dc-dc converter to maintain the output voltage near the VMP, which is taken as reference voltage corresponding to the MPP as specified in datasheet by the manufacturer of PV module under standard test conditions or can be set to a fixed calculated value [16–19]. However, this method suffers from a drawback of low accuracy as it assumes constant environmental condition, the variation in insolation and temperature is insignificant for this method and therefore, true MPP is not always measured [19]. The flowchart for constant voltage MPPT technique is shown in Fig. 8.

In order to overcome the shortcomings of the conventional methods, there has been a large spurt in research papers appearing in the area of partial shading condition in solar PV after 2010. Researchers have devoted considerable effort to address the issue of partial shading by providing variety of solutions. The various categories in which the research work could be classified are

1. Nature inspired algorithms
   a. Particle Swarm Optimization (PSO)
   b. Differential Evolution (DE)
   c. Artificial Bee Colony
2. Numerical Solution
   a. Analytical modeling of solar PV
   b. Kalman filter based MPPT
3. Modified conventional methods
4. Other popular methods
   a. Two stage method
   b. Direct method.

The simulation and experimental results obtained by [11] by applying differential Evolution (DE) in partial shading condition to track global maxima shows fast tracking speed and efficient power conversion along with reduced practical complexity. DIRECT method [20] divide the search space into various sections and the exploration range converges to the section with high probability of global maxima. But the success of the method depends on the proper division of sections. PSO method proposed in [21–25] depends on the proper selection of three parameters namely inertia weight and acceleration coefficients within the PSO algorithm for quick and successful convergence. The method boasts of better results compared to other heuristic algorithms. A modified incremental conductance (IC) method proposed in [26]

Module specifications and model parameters	V_{OC} *(V)*	I_{SC} *(A)*	V_{mp} *(volts)*	I_{mp} *(A)*	R_S *(Ω)*	R_p *(Ω)*	I_{sat} *(A)*	I_{ph} *(A)*
PV array[1] and PV array[3]	30.602	8.510	24.3003	7.829	0.1751	755.51	1.0647e-06	8.5158
PV array[2] and PV array[4]	64.2	5.96	54.7	5.58	0.0379	993.51	1.1753e-08	5.9602

Tab. 1. Module specification and model parameters

shows higher percentage of power conversion. The tracking time compared to conventional perturb and observe and fuzzy logic based hill climbing method is less. Two stage method proposed in [27] analyse the *I-V* and *P-V* curve pattern for developing a two-stage tracking of global maxima. This method is simple and successful under rapidly changing insolation condition. In another paper [28] a new MPPT design using wolf optimization technique for partially shading condition has been used. In [29–30] proposed methods are capable of tracking GMPP under non-uniform shading condition with high degree of accuracy.

4. Proposed method

Variable structure control (VSC) utilizes discontinuous nonlinear control algorithm altering the dynamics of a nonlinear system.

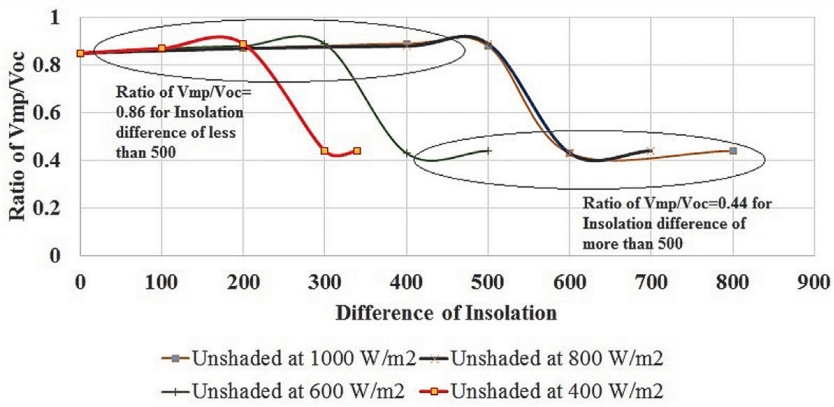


Fig. 9. Shifting of GMPP with different insolation

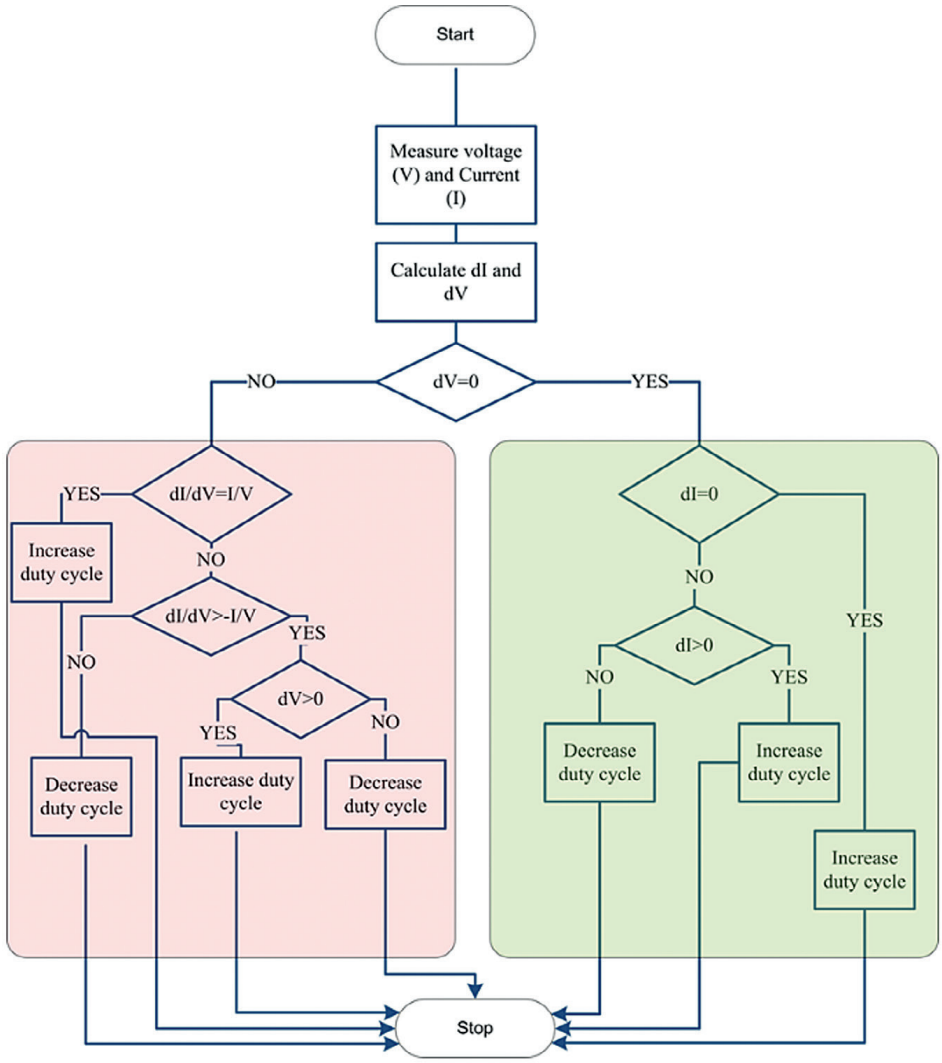


Fig. 10. Flowchart of proposed algorithm

The state-feedback control law is a discontinuous function of time which switches from one smooth condition to another. So the structure of the control law changes depending on the value of control variables. The method switches from one smooth control law to another at a very fast speed. The VSC was initially developed in early 1950s in the Soviet Union by Emelyanov and several co-researchers [31, 32]. The control algorithm proposed in the paper utilizes the variable structure of controller during operation. It is discussed here in this section. Practically, the number of shading pattern for small solar PV system seldom increases by two. So, the proposed method utilizes the results obtained by studying the variation of GMPP for two shading patterns. The variation of MPP under partial shading condition is verified practically. BP Solar BX3190 has been used for developing the control algorithm. It is seen that GMPP occurs nearly at K_{low} (0.44 for present case) times the open circuit voltage when there exist a large insolation difference (more than 500 W/m^2) between the un-shaded panel and shaded panel. While, when the shading difference between two panels reduces below 500 W/m^2 then the global maximum power point (GMPP) voltage becomes K_{high} (0.86 for present case) times open circuit voltage. Pilot panels of low rating and similar PV material is used to measure open circuit voltage. This ensures that main panel is connected during operation. This is deduced from Fig. 9. This observation is used to develop the algorithm which is shown in flowchart in Fig. 10 and implemented by adopting the scheme of Fig. 11.

5. Simulation results of the proposed algorithm

The proposed algorithm has been simulated in SIMULINK environment. Fig. 11 shows block diagram of the PV system feeding a resistive load. While the controller of duty cycle for the simulation model is shown in Fig. 12.

The Simulink model consists of the following blocks:

a. PV BLOCKS

PV array^1 and PV array^3 are main panels having module type as BP Solar SX 3190. Number of cells per module is 50. PV array^2 and PV array^4 are the pilot panels made up of same material and having similar characteristics as that of main panels. These are

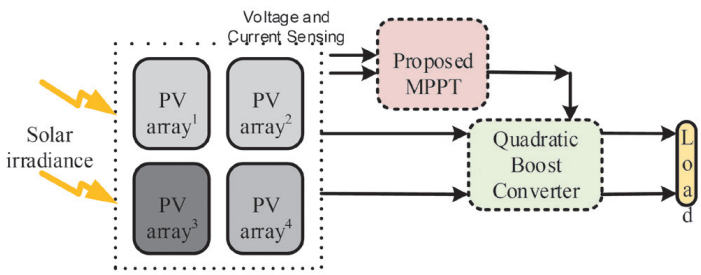


Fig. 11. Implementation of proposed scheme

used to get the open circuit voltage. Its module type is SunPower SPR-305-WHT and has 96 cells in each module. Module specifications and model parameters are given in the Tab. 1. Figure 14 shows the PV curves for the panel taken under various partial shading pattern.

The insolation values taken in Fig. 14 legends, points to two values of insolation on two panels. (400 W/m^2, 400 W/m^2) means both panel receive same insolation of 400 W/m^2 and (400 W/m^2, 300 W/m^2) means one panel is receiving 400W/m^2 insolation while second is receiving 300 W/m^2.

b. QUADRATIC BOOST CONVERTER

A quadratic boost converter steps up the input voltage (V_i), it gives out high output voltage as compared to conventional boost converter for same duty ratio . The relation between input voltage and output voltage (V_o) is given by

$$V_o = \frac{V_i}{(1-D)^2} \tag{1}$$

From this equation, it can be seen that the output voltage of the converter varies exponentially with the duty cycle (D) for a given input voltage. And as the duty cycle is less than 1, $V_o > V_i$ The increased gain of the converter makes it more suitable for applications like integrated PV system and in microgrid systems. Moreover, this converter injects less ripple current to the source. The output voltage versus duty ratio curve for a quadratic boost and boost converter has been shown in Fig. 14. But in an actual system the voltage gain is normally 4–5 times in case of boost converter which can be enhanced to 10 times using quadratic

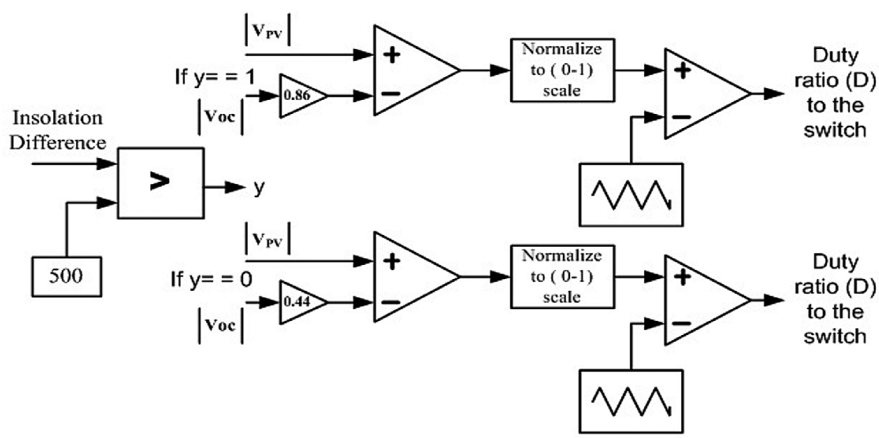


Fig. 12. Controller of Simulink model

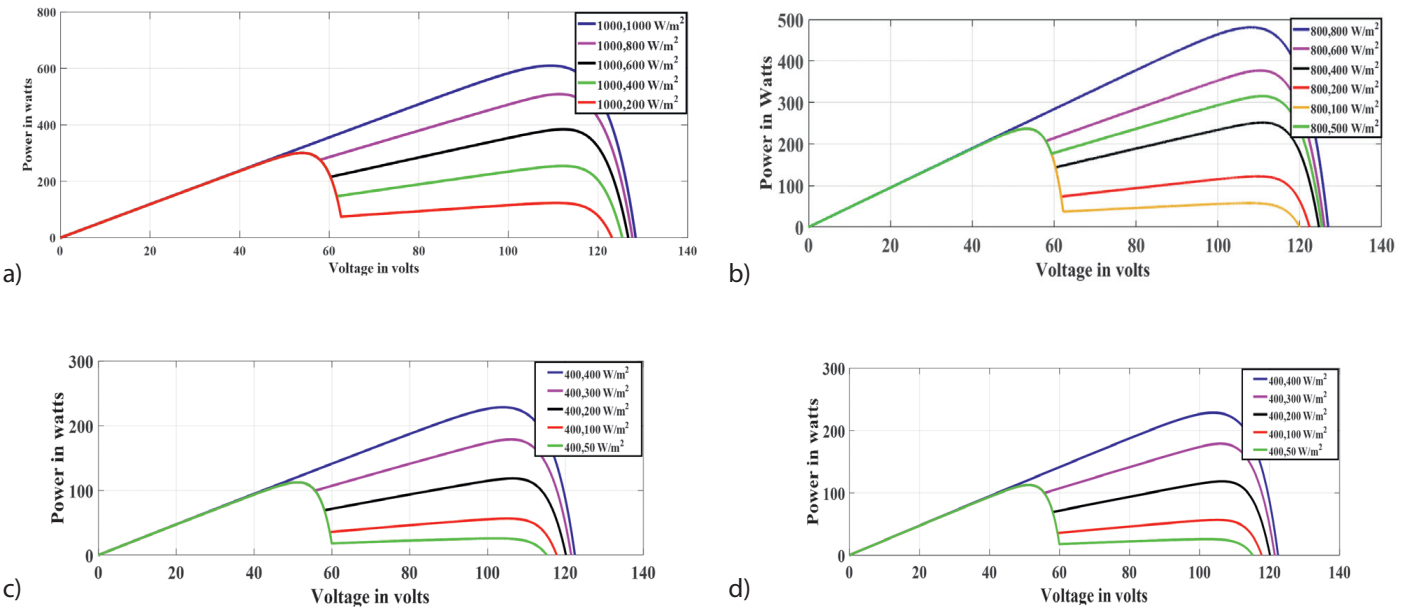


Fig. 13. (a), (b), (c) and (d) shows PV characteristic curves with one panel kept at 1000W/m², 800W/m², 600W/m² and 400W/m² respectively and the other panel kept at variable insolation levels

S.No.	Element	Value
1	Inductor used in Quadratic Boost Converter (Both)	0.001 H
2	Capacitor used in Quadratic Boost Converter	0.01 F
3	Load Resistance	10 ohm

Tab. 2. Value of capacitor, inductor and resistor in a quadratic boost converter

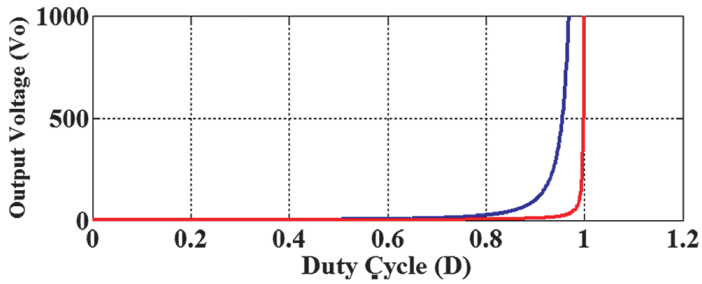


Fig. 14. Variation of output voltage with duty ratio (blue line – double converter, red line – classic converter)

boost converter making the tracking process more efficient. The blue line and red line in Fig. 14 shows the output voltage at a particular duty cycle for quadratic boost converter and boost converter respectively. For the simulation studies the value of capacitor, inductor and resistor in a quadratic boost converter have been kept as shown is Tab. 2.

c. VARIABLE STRUCTURE BASED MAXIMUM POWER POINT TRACKING

Fig. 15 shows the Simulink block implementation of the proposed control algorithm. If the difference in insolation level is less than 500 W/m² then the required V_{mp} is 0.44 times the open circuit voltage otherwise it is 0.86 times the open circuit voltage. The normalized difference of $|V_{PV}|$ and $|V_{mp}|$ is compared with a triangular wave to generate the duty ratio for the switch of the quadratic boost converter. The current, voltage and power versus time plot is shown in Fig. 16. The simulation results validate the implementation of proposed algorithm.

The variable structure algorithm proposed in this paper utilizes the property of a PV panel wherein the voltage at which the maximum power is available in a solar PV system switches between K_iV_{OC}(i = low, high), where K_{low} and K_{high} are equal to 0.44 and 0.86 respectively (For BP Solar SX3190). The constant factor of multiplication has been obtained for solar PV panel after rigorous simulation studies.

Fig. 16 shows the dynamic performance of the proposed algorithm under varying insolation condition. One of the panel is kept at 1000 W/m². The other panel which is connected in series is subjected to varying insolation condition. The insolation is varied from 200 W/m² to 600 W/m², then insolation is further increased to 1000 W/m². To check the performance in fast reducing insolation condition, the second panels insolation is reduced to 200 W/m² from 1000 W/m² in linearly decreasing step of 400 W/m² from 600 W/m². Under dynamic variation of insolation the proposed variable structure maximum power point tracking algorithm is working well with smooth and fast tracking of the maximum power point. The output of PV panel has been compared with conventional P and O algorithm and open loop PV system (without any MPPT). The power output variation is shown under different test conditions in Fig. 17. The result shows better output at higher insolation difference.

6. Conclusion

The efficiency of a solar PV system greatly depends on the atmospheric conditions. The power output from a PV station is a function of temperature and irradiance that the modules receive. The

output power is affected when there is the case of partial shading condition wherein the solar PV panels connected in series receive different insolation at the same time. A PV partial shading model for a solar PV generation system has been developed in this paper to study the effect of partial shading. The maximum power point tracking algorithm which can be called variable structure model has been proposed and tested with the developed simulation model under various simulation parameters pertaining to different environmental conditions. The results obtained for the MPPT are satisfactory. Maximum output power obtained

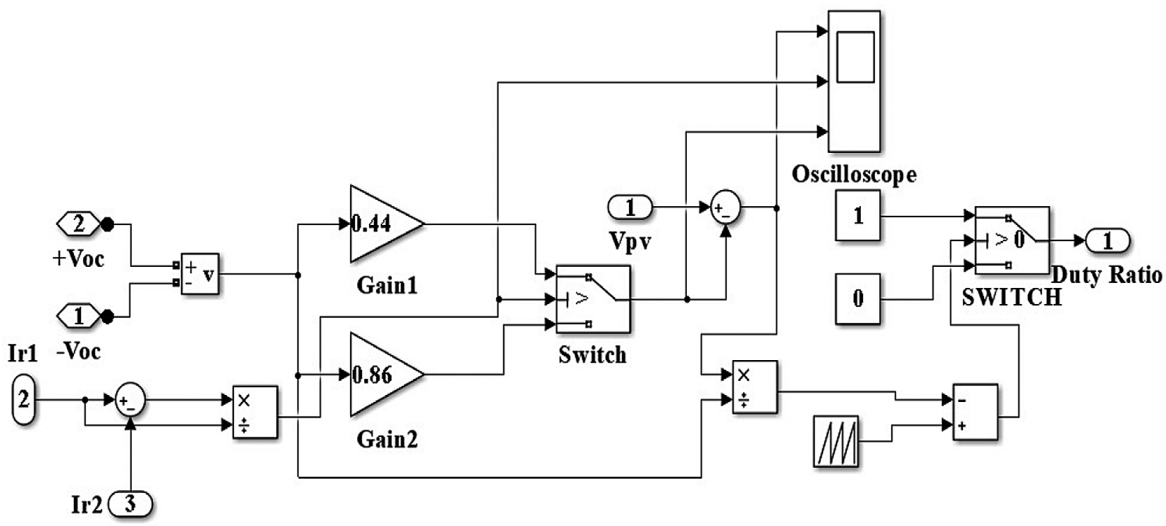


Fig. 15. Simulink model of proposed control algorithm

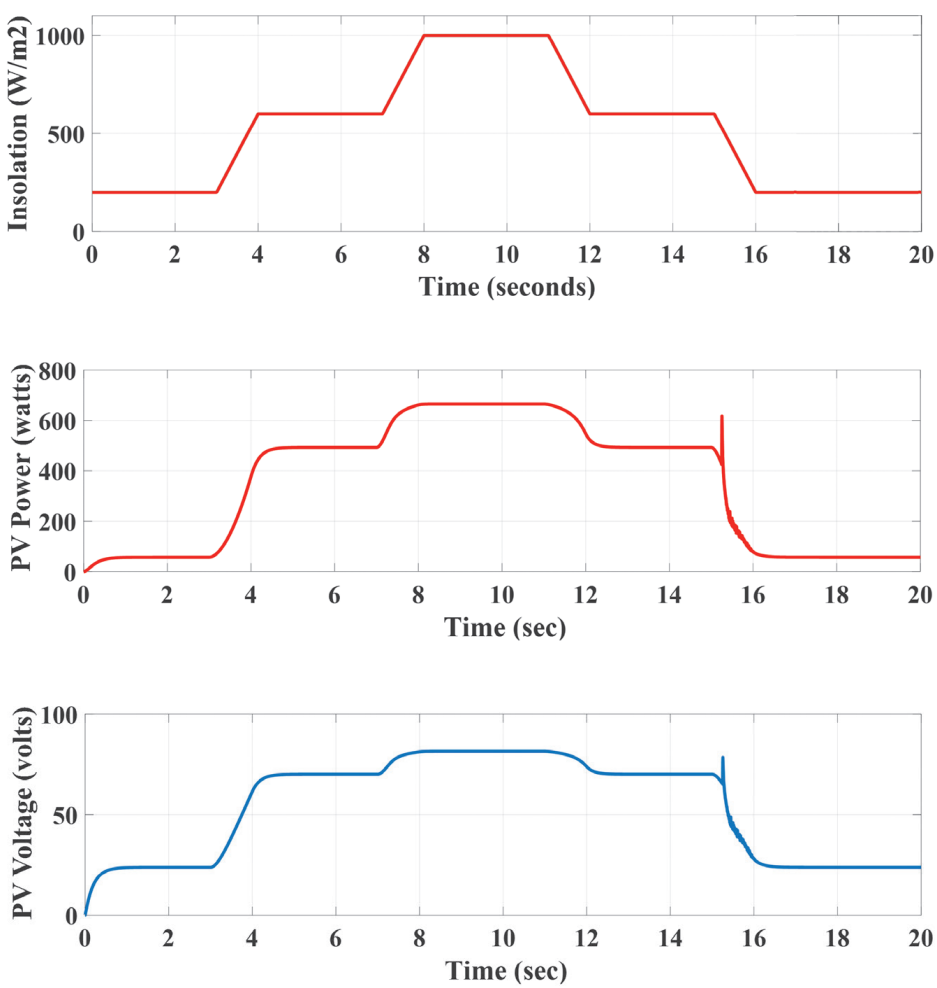


Fig. 16. Output current, voltage and power

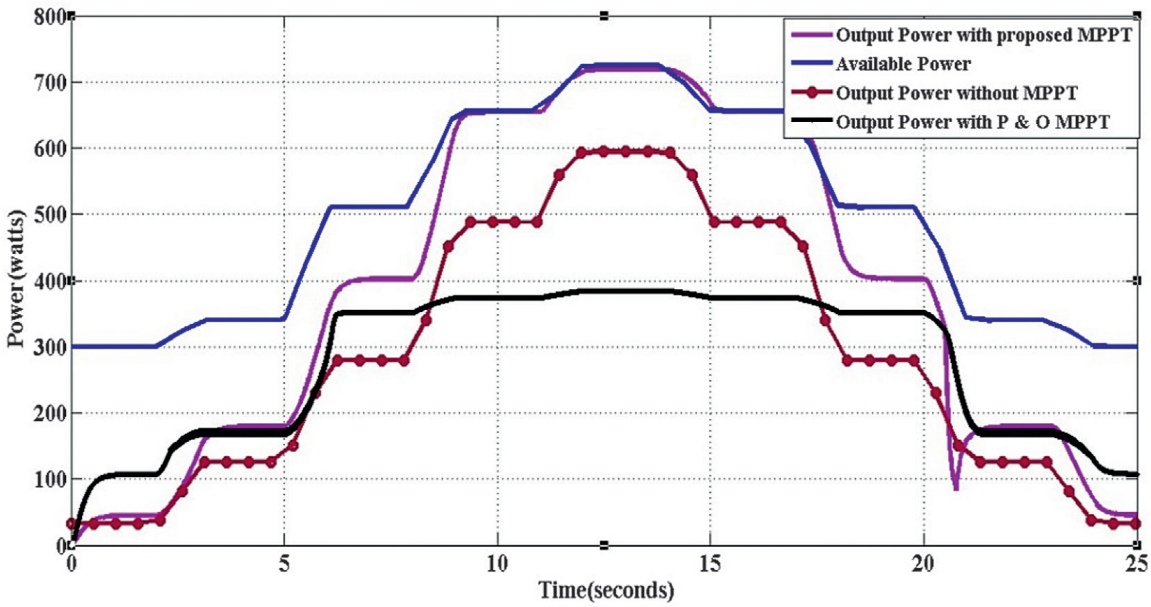


Fig. 17. Output power variation under different test conditions

using the proposed MPPT is quite close to the maximum power obtained from the PV characteristic curve of the panel used. This algorithm is valid only for two shading patterns but more than two shading patterns are rarely seen in practice.

Acknowledgement

This publication was made possible by Qatar University-Marubeni Concept to Prototype Development Research grant # [228] from the Qatar University. The statements made herein are solely the responsibility of the authors.

REFERENCES

1. Silvestre S., Boronat A., Chouder A., Study of bypass diodes configuration on PV modules, *Applied Energy*, Vol. 86(9), 2009, pp. 1632–1640, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.01.020.
2. Zheng H. et al., Shading and bypass diode impacts to energy extraction of PV arrays under different converter configurations, *Renewable Energy*, Vol. 68, 2014, pp. 58–66, doi: 10.1016/j.renene.2014.01.025.
3. Seyedmahmoudian M. et al., State of the art artificial intelligence--based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 64, 2016, pp. 435–55. doi: 10.1016/j.rser.2016.06.053.
4. Fan X., Deng F., Chen J., Voltage band analysis for maximum power point tracking of stand-alone PV systems, *Solar Energy*, Vol. 144, 2017, pp. 221–31, doi: 10.1016/j.solener.2017.01.032.
5. Gokmen N. et al., Voltage band based global MPPT controller for photovoltaic systems, *Solar Energy*, Vol. 98, 2013, pp. 322–34, doi: 10.1016/j.solener.2013.09.025.
6. Ahmed J., Salam Z., A critical evaluation on maximum power point tracking methods for partial shading in PV systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47(0), 2015, pp. 933–53. doi: 10.1016/j.rser.2015.03.080.
7. Koutroulis E., Blaabjerg F., A new technique for tracking the global maximum powerpoint of PV arrays operating under partial-shading conditions, *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 2(2), 2012, pp. 184–90, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2183578.
8. Bidram A., Davoudi A., Balog R.S., Control and circuit techniques to mitigate partial shading effects in photovoltaic arrays, *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 2(4), 2012, pp. 532–46, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2202879.
9. Tabish S., Ashraf I., Simulation of Partial Shading on Solar Photovoltaic Modules with Experimental Verification, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 38, 2015, pp. 1–21, doi: 10.1080/01430750.2015.1074614.
10. Bhattacharya T., Chakraborty A., Pal K., Computer Simulation of the Influence of Shading on Solar Photovoltaic Array, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 38, 2016, pp. 1–19, doi: 10.1080/01430750.2016.1155484.
11. Taheri H. Salam Z. , Ishaque K., A Novel Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic System Under Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions Using Differential Evolution, ISIEA 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, 2011, doi: 10.1109/ISIEA.2010.5679492.
12. Killi M., Samanta S., Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 9, 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2407854.
13. Srivastava M., Agarwal S., Sharma E., Design and Simulation of Perturb and Observe MPPT Algorithm for 72 Cell Solar PV System, *International Journal of Soft Computing and Engineering*, Vol. 4, Issue 6, 2015, ISSN: 2231-2307.
14. Patel U., Sahu D., Tirkey D., Maximum Power Point Tracking Using Perturb & Observe Algorithm and Compare with another Algorithm, *International Journal of Digital Application & Contemporary research*, Vol. 2, 2013, ISSN: 2319-4863.

15. Atallah A.M., Abdelaziz A.Y., Jumaah R.S., Implementation of Perturb and Observe MPPT of PV System with Direct Control Method Using Buck and Buckboost Converters, *Emerging Trends in Electrical, Electronics & Instrumentation Engineering: An international Journal*, Vol. 1, No. 1, 2014.
16. Srivastava M., Agarwal S., Sharma E., Design and Simulation of Perturb and Observe MPPT Algorithm for 72 Cell Solar PV System, *International Journal of Soft Computing and Engineering*, Vol.-4, Issue 6, 2015, ISSN: 2231-2307.
17. Esram T., Chapman P.L., Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, Energy Conversion, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22/2, 2007, pp. 439–449, doi: 10.1109/TEC.2006.874230.
18. Yu T., Chien T., Analysis and simulation of characteristics and maximum power point tracking for photovoltaic systems, in Power Electronics and Drive Systems, 2009. PEDS 2009, International Conference on, 2009, pp. 1339–1344, doi: 10.1109/PEDS.2009.5385670.
19. Babaa S.E., Armstrong M., Pickert V., Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems, *Journal of Power and Energy Engineering*, Vol. 2, 2014, pp. 59–72, doi: 10.4236/jpee.2014.28006.
20. Nguyen T.L., Low K-S., A global maximum power point tracking scheme employing DIRECT search algorithm for photovoltaic systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57(10), 2010, 3456–3467, doi: 10.1109/TIE.2009.2039450.
21. Yau H-T. et al., Sliding mode extremum seeking control scheme based on PSO for maximum power point tracking in photovoltaic systems, *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2, 2013. doi: 10.1155/2013/527948.
22. Ishaque K. et al., An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, No. 27(8), 2012, pp. 3627–3638. doi: 10.1109/TPEL.2012.2185713.
23. Ishaque K., Salam Z., A deterministic particle swarm optimization (PSO) maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60(8), 2012, doi: 10.1109/TIE.2012.2200223.
24. Killi M., Samanta S., Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 9, 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2407854.
25. Patel U., Sahu D., Tirkey D., Maximum Power Point Tracking Using Perturb & Observe Algorithm and Compare With another Algorithm, *International Journal of Digital Application & Contemporary research*, Vol. 2, 2013, ISSN: 2319-4863.
26. Tey K.S., Mekhilef S., Modified Incremental Conductance MPPT Algorithm to Mitigate Inaccurate Responses Under Fast-Changing Solar Irradiation Level, *Solar Energy*, Vol. 101, 2014, pp. 333–342, doi: 10.1016/j.solener.2014.01.003.
27. Kobayashi K., Takano I., Sawada Y., A Study on a Two Stage Maximum Power Point Tracking Control of a Photovoltaic System under Partially Shaded Insolation Conditions, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 153(4), 2006, doi: 10.1109/PES.2003.1271058.
28. Mohanty S., Subudhi B., Ray P.K., A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 7(1), 2016, pp. 181–188, doi: 10.1109/TSTE.2015.2482120.
29. Kot R., Stynski S., Malinowski M., Hardware methods for detecting global maximum power point in a PV power plant, 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), doi.: 10.1109/ICIT.2015.7125527.
30. Basiński, K., Ufnalski, B., Grzesiak, L.M., Hybrid MPPT Algorithm for PV Systems Under Partially Shaded Conditions Using a Stochastic Evolutionary Search and a Deterministic Hill Climbing, *Power Electronics and Drives*, Vol. 2(2), 2017, pp. 49–59, doi: https://doi.org/10.5277/ped170212.
31. Hung J.Y., Gao W.B., Hung J.C., Variable Structure Control: A Survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40/2–22, 1993, doi: 10.1109/41.184817.
32. Gao W., Hung J.C., Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A New Approach, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40(1), 1993, pp. 45–55, doi: 10.1109/41.184820.

Reyaz Hussan

Aligarh Muslim University, Aligarh, India

e-mail: mreyazamu@gmail.com

He received his B.Tech degree in electrical engineering and M.Tech degree in Instrumentation and control from Aligarh Muslim University, Aligarh, India, in 2014 and 2016. He is currently a research scholar in electrical engineering, AMU, Aligarh, India. His areas of interests include renewable energy and power converters

Manita Kumari

Aligarh Muslim University, Aligarh, India

e-mail: manitakumari202@gmail.com

She has completed her Bachelor of Engineering (Electrical) and M.Tech in High Voltage and Insulation from Aligarh Muslim University, Aligarh, India in 2016 and 2018, respectively. Currently, she is a Research Scholar at Department of Electrical Engineering at Aligarh Muslim University. Her research interests include renewable energy, PWM techniques for power converters and new topologies for switched capacitor multilevel inverter.

Adil Sarwar
Aligarh Muslim University, Aligarh, India
e-mail: adil.sarwar@zhcet.ac.in
Dr Adil Sarwar is working as Assistant Professor in the Department of Electrical Engineering, AMU, Aligarh. He has teaching and research experience of over 8 years. He is a member of IEEE, USA and life member of systems society of India. He has published more than 40 research papers in reputed journals and conferences including IEEE transactions. He has contributed as coauthor a chapter on multiphase converters in handbook of Power Electronics 4th Ed edited by M. H. Rashid. He is a co- principle investigator in an in going research project awarded by NPIU, India on hybrid converters worth INR 13.5 lakhs. His research interest include Power Converters, Solar PV system and microcontrollers.

Atif Iqbal
Qatar University
e-mail: atif.iqbal@qu.edu.qa
Atif Iqbal, Fellow IET (UK), Fellow IE (India) and Senior Member IEEE, PhD (UK)- Associate Editor IEEE Tran. On Industry Application, IEEE ACCESS, Editor-in-Chief, I'manager journal of Electrical Engineering, Associate Professor at Electrical Engineering, Qatar University and Former Full Professor at Electrical Engineering, Aligarh Muslim University (AMU), Aligarh, India. Recipient of Outstanding Faculty Merit Award AY 2014-2015 and Research excellence award at Qatar University, Doha, Qatar. He received his B.Sc. (Gold Medal) and M.Sc. Engineering (Power System & Drives) degrees in 1991 and 1996, respectively, from the Aligarh Muslim University (AMU), Aligarh, India and PhD in 2006 from Liverpool John Moores University, Liverpool, UK. He has been employed as a Lecturer in the Department of Electrical Engineering, AMU, Aligarh since 1991 where he served as Full Professor until Aug. 2016. He is recipient of Maulana Tufail Ahmad Gold Medal for standing first at B.Sc. Engg. Exams in 1991 from AMU. He has received best research papers awards at IEEE ICIT-2013, IET-SEISCON-2013, and SIGMA 2018. He has published widely in International Journals and Conferences his research findings related to Power Electronics and Renewable Energy Sources. Dr. Iqbal has authored/co-authored more than 350 research papers and one book and three chapters in two other books. He has supervised several large R&D projects. His principal area of research interest is Modeling and Simulation of Power Electronic Converters, Control of multi-phase motor drives and Renewable Energy sources.

Mohd Tariq
Aligarh Muslim University, Aligarh, India
e-mail: tariq.iitkgp@gmail.com
M.Tariq (S'10, M'18) obtained a Bachelor degree in electrical engineering from Aligarh Muslim University, Aligarh and Master degree in machine drives and power electronics from the Indian Institute of Technology (IIT-K)-Kharagpur. Presently he is pursuing his PhD from Nanyang Technological University, Singapore. Before joining his PhD, he has worked as a scientist in an autonomous institute (NIOT, Chennai) under ministry of earth sciences, govt. of India and also worked as an Assistant Professor at National Institute of Technology (NIT) – Bhopal, India. He is a recipient of the best paper award from the IEEE Industrial Applications Society's (IAS) and Industrial Electronic Society, Malaysia Section – Annual Symposium (ISCAIE-2016) held in Penang, Malaysia. His research interest includes power converters, energy storage devices and its optimal control for the electrified transportation and renewable energy application.

Jarosław Guziński
Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
e-mail: jaroslaw.guzinski@pg.edu.pl
He got Ph.D. and D.Sc. degrees from the Electrical Engineering Department at Technical University of Gdańsk. Currently he is the head of the Department of Electric Drives and Energy Conversion. In 2012 he was awarded by Polish Academy of Sciences – Division IV: Engineering Sciences for his monograph "Electric drives with induction motors and inverters output filters - selected problems". He has authored and co-authored more than 160 journal and conference papers. His interests include sensorless control of electrical machines, multiphase drives (5-phase), inverter output filters, renewable energy, and electrical vehicles. Dr. Guzinski is a Senior Member of IEEE.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 21–32. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Algorytm śledzenia optymalnego punktu mocy maksymalnej w systemach fotowoltaicznych

Autorzy
Reyaz Hussan
Manita Kumari
Adil Sarwar
Atif Iqbal
Mohd Tariq
Jarosław Guziński

Słowa kluczowe
system fotowoltaiczny, śledzenie punktu mocy maksymalnej, przekształtnik podwyższający napięcie

Streszczenie
Na skutek nieliniowości charakterystyk *I-U* panelu fotowoltaicznego jego maksymalną moc uzyskuje się, gdy pracuje on w punkcie przegięcia. Aby panel pracował w optymalnym punkcie, w strukturze sterowania należy zastosować algorytm śledzenia punktu mocy maksymalnej (ang. *maximum power point tracking* – MPPT). Głównym celem śledzenia MPP jest utrzymanie działania panelu PV w punkcie przegięcia charakterystyki *I*(*U*) (w tzw. kolanie) niezależnie od zmian temperatury i nasłonecznienia. Pod wpływem częściowego zacienienia paneli fotowoltaicznych połączonych szeregowo (ang. *partial shading conditio* – PSC), np. z powodu zachmurzenia, na charakterystyce *I*(*U*) powstaje kilka punktów przegięcia. Konwencjonalne metody MPPT nie prowadzą do zbieżności w globalnym punkcie mocy maksymalnej (ang. *global maximum power point* – GMPP) w warunkach PSC. Występowanie kilku szczytów na charakterystyce *P*(*U*) bardzo utrudnia śledzenie optymalnego punktu pracy i wymaga użycia takiego algorytmu sterowania, który rozróżnia globalne i lokalne punkty mocy maksymalnej. W celu rozwiązania tego zagadnienia zaproponowano w artykule układ regulacji o stałym napięciu i zmiennej strukturze sterowania. Aby zwiększyć wzmocnienie napięciowe układu energoelektronicznego, zastosowano podwójny przekształtnik podwyższający napięcie. Skuteczne działanie algorytmu sterowania zostało potwierdzone wynikami symulacji.

Data wpływu do redakcji: 01.10.2019
Data wpływu do redakcji po recenzjach: 15.12.2019
Data akceptacji artykułu: 22.01.2020
Data publikacji online: 15.05.2020

1. Wprowadzenie

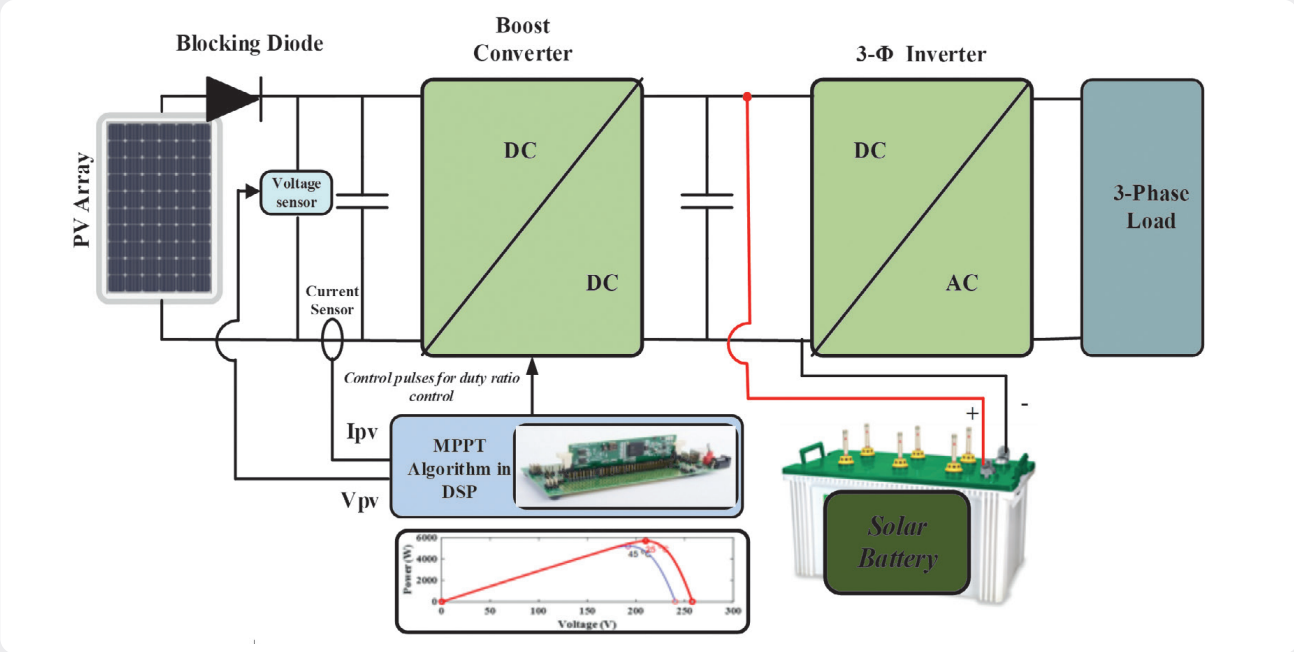
Ogromny wzrost zapotrzebowania na energię na świecie oraz rosnąca świadomość niebezpieczeństwa zanieczyszczenia środowiska sprawiają, że rządy niemal wszystkich państw dążą do powiększenia udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Stąd też ogromne zaangażowanie środowisk naukowych w tym zakresie. Energia słoneczna i wiatrowa są postrzegane jako potencjalne alternatywne źródła pokrycia rosnącego zapotrzebowania na energię. Te bardzo obiecujące źródła energii wymagają stosunkowo dużych jednorazowych kosztów inwestycyjnych, ale za to koszty utrzymania urządzeń przetwarzających te energie są niskie. Energia słoneczna może być wykorzystana w postaci energii cieplnej (gdy ciepło światła słonecznego podgrzewa odpowiednią ciecz, aby wytworzyć parę, która następnie uruchomi turbinę i wytworzy energię elektryczną) lub energii elektrycznej (gdy światło słoneczne jest bezpośrednio przekształcane w energię elektryczną). Ten drugi sposób można znakomicie wykorzystać w źródłach generacji rozproszonej, które można lokalizować w pobliżu obiektów będących dużym obciążeniem dla systemu, zmniejszając w ten sposób koszty i straty związane z przesyłaniem energii na duże odległości. Systemy fotowoltaiczne jako jednostki generacyjne wykorzystuje się w inteligentnych mikrosieciach (ang. *smart micro grid*). Wraz ze stale rosnącą sprawnością paneli fotowoltaicznych (w warunkach laboratoryjnych osiągnięto już prawie 40-proc. sprawność) i coraz niższymi kosztami wytwarzania bardzo wzrosły inwestycje w tym sektorze. Aby jednak efektywnie wykorzystywać panele fotowoltaiczne do wytwarzania energii elektrycznej i późniejszego spożytkowania jej w sieci elektrycznej i poza nią, należy dokładnie przeanalizować i zbadać ich charakterystyczne właściwości oraz ocenić ich wydajność, uwzględniając różne czynniki oddziałujące na panele. Na rys. 1 przedstawiono kompletny schemat blokowy systemu fotowoltaicznego pracującego na sieć prądu przemiennego AC.
Niniejszy artykuł dotyczy badania i możliwego rozwiązania negatywnego efektu przesłonięcia paneli fotowoltaicznych. Wpływ zmiany nasłonecznienia i temperatury otoczenia na panele fotowoltaiczne jest dobrze znany, zrozumiany i zbadany. Znaczne nieliniowości charakterystyk *I*(*U*) (prąd-napięcie na wyjściu PV) zwiększają się dodatkowo przy częściowym zacienieniu panelu.

2. Generacja energii podczas częściowego przesłonięcia panelu fotowoltaicznego

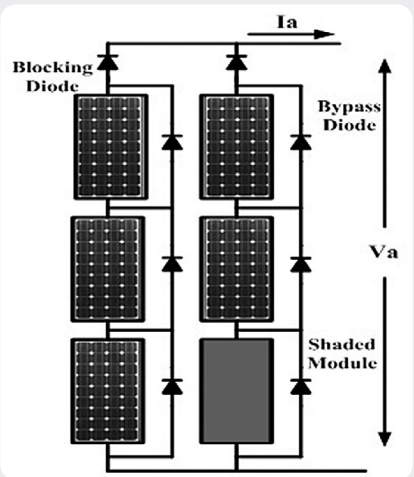
Częściowe przesłonięcie panelu fotowoltaicznego jest spowodowane zasłonięciem fragmentu modułu przez jakiś obiekt (np. cień sąsiednich budynków, drzew itp.), osadzeniem się pyłu i brudu albo krótkotrwałym zasłonięciem słońca przez chmury (rys. 2). W takich warunkach przesłonięte ogniwo panelu zostaje spolaryzowane zaporowo i działa jak obciążenie, pobierając energię z ogniw oświetlonych. Może to prowadzić do punktowego nagrzewania panelu, powodując nieodwracalne uszkodzenie modułu fotowoltaicznego. Zwykle, w celu podniesienia napięcia stałego zestawów paneli fotowoltaicznych łączy się je szeregowo. Częściowe zacienienie jednego panelu jeszcze bardziej uwydatnia problem. Aby to rozwiązać, każdy moduł jest wyposażony w diodę obejściową. Wzrost ujemnego napięcia w module poddanym nierównomiernemu nasłonecznieniu aktywuje tę diodę. Przez nią prąd omija mniej intensywnie nasłoneczniony moduł, a jednocześnie zachowane jest połączenie szeregowe innych w pełni nasłonecznionych modułów, tak aby cały system działał prawidłowo [1, 2]. Jak zaprezentowano na rys. 3, nieustannie zwiększa się liczba prac naukowych dotyczących eliminacji problemu częściowego przesłonięcia panelu fotowoltaicznego.
Zjawisko częściowego zacienienia powoduje znaczne straty mocy w układzie PV. W tych warunkach nieliniowa charakterystyka napięciowa odkształca się ze względu na występowanie wielu maksimów, z których jedno odpowiada maksimum globalnemu [3]. Charakterystyki *I*(*U*) oraz *P*(*U*) modułów PV w warunkach zmieniającego się nasłonecznienia przedstawiono na rys. 4. Charakterystyka *P*(*U*) ilustruje różne punkty mocy maksymalnej (MPP), ponieważ położenie i wielkość MPP zależy od nasłonecznienia oraz temperatury otoczenia. Dlatego na rys. 4 przedstawiono różne krzywe *I*(*U*) oraz *P*(*U*) przy

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 21–32. When referring to the article please refer to the original text.

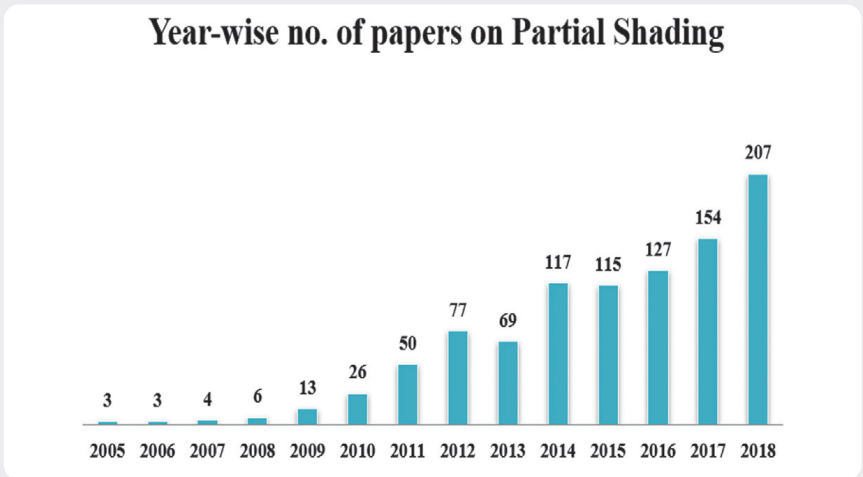
PL



Rys. 1. Schemat blokowy układu fotowoltaicznego będącego przedmiotem niniejszej pracy
[tłum. Blocking Diode – dioda blokująca, Boost Converter – przekształtnik podwyższający, PV Array – panel fotowoltaiczny PV, Voltage sensor – czujnik napięcia, Current sensor – czujnik prądu, Control pulses for duty ratio control – sygnały sterujące do zmiany współczynnika wypełnienia, MPPT Algorithm in DSP – algorytm MPPT w DSP, Power (W) – Moc [W], Voltage (V) – Napięcie [V], Solar Battery– bateria słoneczna, 3-Φ Inverter – falownik 3-fazowy, 3-Phase Load – obciążenie 3-fazowe]



Rys. 2. Schemat blokowy systemu fotowoltaicznego w warunkach częściowego zacienienia [tłum. Blocking Diode – dioda blokująca, Bypass Diode – dioda obejściowa, *Va* – *Ua*, Shaded Module – zacieniony moduł]



Rys. 3. Artykuły naukowe na temat częściowego przesłonięcia panelu PV [tłum. Year-wise no. of papers on Partial Shading – Roczna liczba artykułów naukowych dotycząca problemu częściowego zacienienia PV]

zmianach nasłonecznienia. W warunkach częściowego przesłonięcia, z powodu występowania kilku szczytów charakterystyki $P(U)$, nie sprawdzają się konwencjonalne algorytmy śledzenia i utrzymywania punktu roboczego w maksimum globalnym (rys. 5). Algorytmy te mogą zatrzymać się w lokalnych maksimach charakterystyki $P(U)$, np. w punktach 1 lub 2, zamiast globalnego maksimum 3. W takich sytuacjach nie można zminimalizować strat mocy. Charakterystyki $I(U)$ z rys. 5 odpowiadają różnym poziomom nasłonecznienia dwóch szeregowo połączonych paneli. Ten sam prąd płynie przez oba panele. W punkcie pracy przesłoniętego panelu napięcie będzie ujemne, a przekazywana moc także ujemna – dochodzi do rozpraszania mocy w samym panelu. Prowadzi to do powstawania lokalnych gorących punktów i degradacji panelu, co może spowodować jego szybką awarię. Dlatego w tym systemie dodano diodę obejściową, aby prąd mógł ominąć panel podczas jego częściowego zacienienia. Do rozwiązania problemu, z którym nie radzą sobie algorytmy konwencjonalne [4–8], w literaturze zastosowano kilka innych algorytmów. Aby zbadać to zagadnienie, niektórzy autorzy przeprowadzili badania symulacyjne [9, 11]. Pojawiające się w literaturze metody przeciwdziałania skutkom częściowego zacienienia omówiono w kolejnym rozdziale niniejszego artykułu.

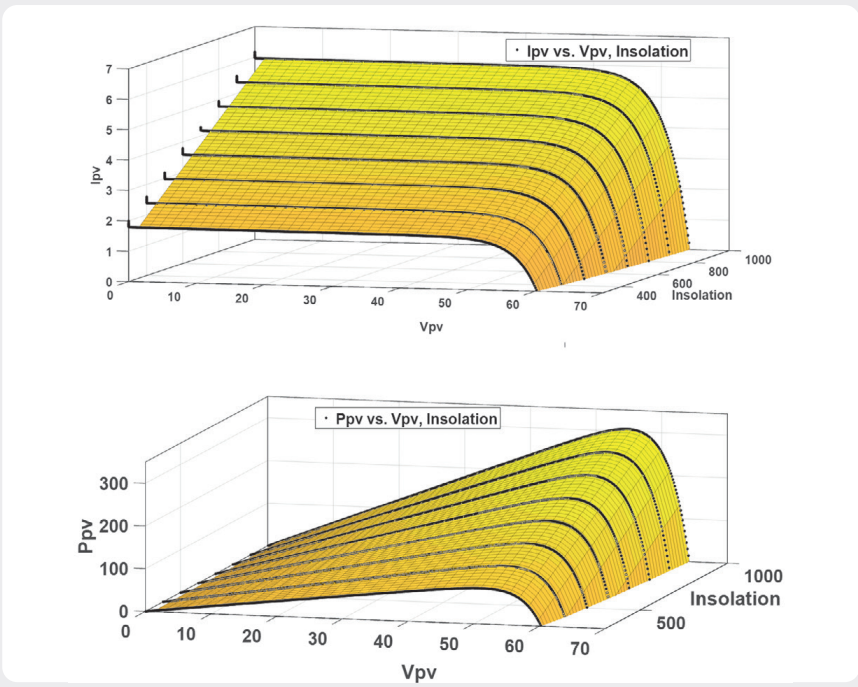
3. Algorytmy śledzenia punktu mocy maksymalnej w fotowoltaicznym systemie wytwarzania energii (SPVG)

Algorytmy śledzenia punktu mocy maksymalnej w słonecznych systemach generacji energii elektrycznej można podzielić na trzy typy:

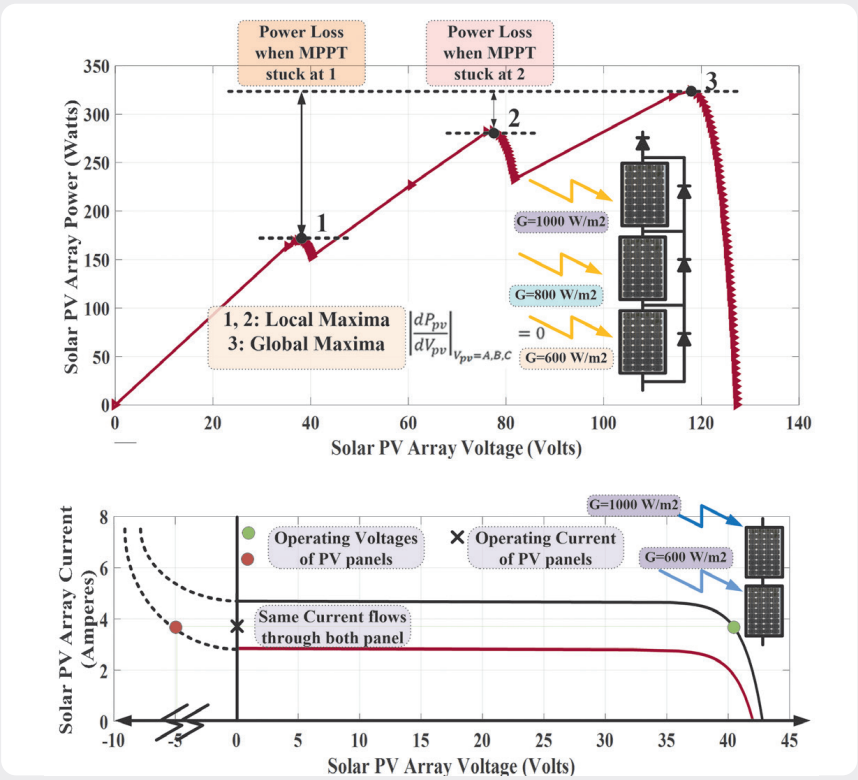
1) wykorzystanie zależności pomiędzy *U*oc i *U*mpp
2) konwencjonalne algorytmy poszukiwania maksimum, takie jak Perturb and Observe

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 21–32. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 4. Przykładowe charakterystyki *I*(*U*) i *P*(*U*) przy różnych poziomach nasłonecznienia [tłum. *I*pv vs. *V*pv, Insolation – *I*pv(*U*pv) dla zmiennego nasłonecznienia, *P*pv vs. *V*pv, Insolation – *P*pv(*U*pv) dla zmiennego nasłonecznienia, Insolation – nasłonecznienie]



Rys. 5. Charakterystyki *P*(*U*) oraz *I*(*U*) systemu PV w warunkach częściowego zacienienia i kilku maksimów mocy [tłum. Power Loss when MPPT stuck at 1 – Straty mocy, gdy MPPT zatrzyma się w punkcie pracy 1, Power Loss when MPPT stuck at 2 – Straty mocy, gdy MPPT zatrzyma się w punkcie pracy 2, Solar PV Array Power (Watts) – Moc systemu fotowoltaicznego PV [W], 1, 2: Local Maxima – 1, 2: maksimum lokalne, 3: Global Maxima – 3: maksimum globalne, Solar PV Array Voltage (Volts) – Napięcie systemu fotowoltaicznego PV [V], Operating Voltages of PV panels – napięcia robocze paneli PV, Operating Current of PV panels – prąd roboczy paneli PV, Same Current flows through both panel – Przez oba panele przepływa ten sam prąd, Solar PV Array Current (Amperes) – Prąd systemu fotowoltaicznego PV [A], Solar PV Array Voltage (Volts) – Napięcie systemu fotowoltaicznego PV (V)]

(P&O), Incremental Conductivity (IC) oraz ich kombinacje z algorytmami typu 1

3) późniejsze algorytmy metaheurystyczne lub inspirowane naturą.

Metoda P&O jest prostą techniką poszukiwania punktu mocy maksymalnej układu PV. Ze względu na łatwość implementacji algorytm ten jest najczęściej stosowany w praktyce [12]. Głównym celem śledzenia punktu mocy maksymalnej jest uzyskanie mocy maksymalnej słonecznego modułu PV i przekazanie jej do odbiornika. Przekształtnik dc-dc (podwyższający) działa jako interfejs między PV a obciążeniem, więc zmieniając wartość współczynnika wypełnienia przekształtnik może pracować w warunkach MPPT. Algorytm P&O opiera się na tym, że maksimum generowanej mocy osiąga się, gdy pochodna mocy wyjściowej po napięciu panelu PV wynosi zero. Technikę P&O można stosować na dwa sposoby, tj. zmieniając napięcie albo współczynnik wypełnienia. Gdy zmianie podlega współczynnik wypełnienia, to metodę P&O nazywa się *hill climbing*. Jeśli w punkcie roboczym na krzywej PV, uwidocznionej na rys. 6, zakłócone jest napięcie robocze oraz $dP > 0$, wtedy punkt pracy przesunie się w kierunku punktu mocy maksymalnej (MPP), a jeśli $dP < 0$, wówczas algorytm P&O odwraca kierunek zmian. Na rys. 7 przedstawiono schemat blokowy algorytmu P&O.

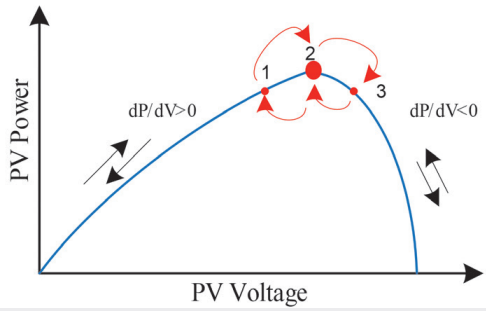
Algorytm rozpoczyna się od pomiaru napięcia i prądu systemu PV i obliczenia mocy chwilowej. Układ sterowania wymusza okresowo zwiększenie lub zmniejszenie napięcia PV (wprowadza zakłócenie pracy) przez zmianę współczynnika wypełnienia tranzystorów przekształtnika. Jeśli przy danym zakłóceniu zwiększa się moc PV, wówczas kolejne zakłócenie następuje w tym samym kierunku, a jeśli moc PV się zmniejsza, to wprowadza się zakłócenie w przeciwnym kierunku. Proces ten trwa do osiągnięcia punktu mocy maksymalnej [13–15].

Metoda P&O ma dwa główne ograniczenia. Po pierwsze – gdy śledzenie zbliża się do punktu mocy maksymalnej, występują ciągłe wahania mocy, powodując zmniejszenie wyprodukowanej energii, a tym samym zmniejszenie sprawności. Po drugie – metoda P&O jest podatna na utratę kierunku śledzenia, co może prowadzić do odchylenia punktu roboczego od położenia MPP przy różnym nasłonecznieniu, co skutkuje zmniejszeniem mocy wyjściowej. Wahania te można zminimalizować, zmniejszając zmianę napięcia, ale spowalnia to algorytm i potrzeba wtedy więcej czasu, aby osiągnąć punkt mocy maksymalnej.

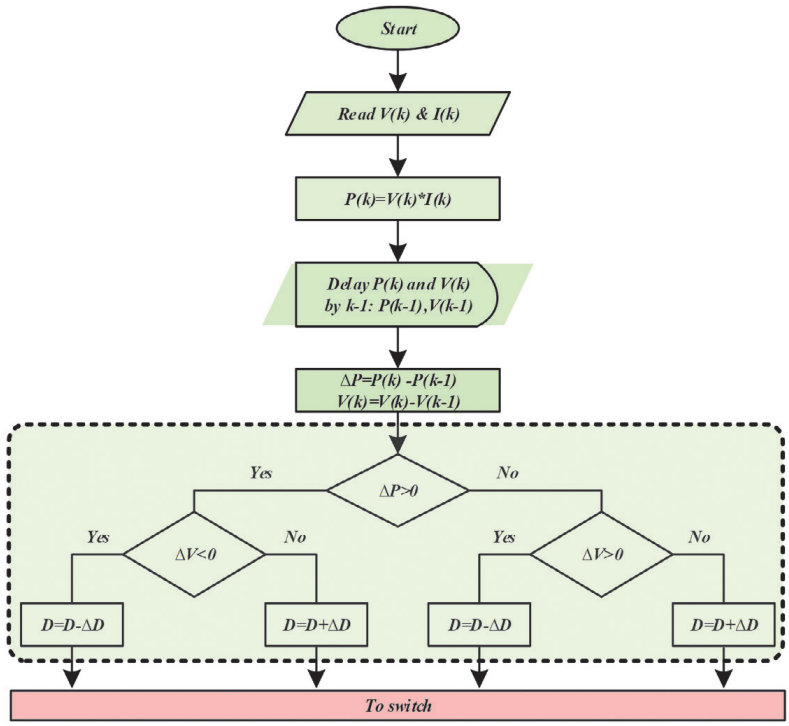
Inną prostą metodą MPPT jest metoda o stałym napięciu, która zapewnia szybką reakcję układu PV i jest jedną z najprostszych metod MPPT. Metoda ta wymaga jedynie jednego czujnika niezbędnego do pomiaru napięcia wyjściowego panelu. Regulator PI zmienia współczynnik wypełnienia impulsów tranzystorów przekształtnika dc-dc, aby utrzymać napięcie wyjściowe w pobliżu VMP, które przyjmuje się za napięcie odniesienia odpowiadające MPP. Napięcie to podawane jest w dokumentacji technicznej producenta

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 21–32. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 6. Realizacja algorytmu P&O dla systemu PV [tłum. PV Power – Moc PV, PV Voltage – Napięcie PV]



Rys. 7. Realizacja algorytmu P&O [tłum. Start – start, *Read V(k) & I(k)* – odczyt $V(k)$ oraz $I(k)$, Delay *P(k)* and *V(k)* by *k-1*: *P(k-1),V(k-1)* – opóźnienie $P(k)$ i $V(k)$ o *k*-1: $P(k\text{-}1)$, $V(k\text{-}1)$, Yes – tak, No – nie, To switch – do tranzystorów przekształtnika

modułu PV dla standardowych warunków testowych. Napięcie to można też obliczyć [16–19]. Jednakże ta metoda MPPT ma małą dokładność, ponieważ zakłada stałe warunki środowiskowe, czyli pomija zmienność nasłonecznienia i temperatury, a zatem nie zawsze znajduje rzeczywisty MPP [19]. Schemat blokowy stało-napięciowej metody MPPT zaprezentowano na rys. 8.

Z powodu niedoskonałości metod konwencjonalnych naukowcy zintensyfikowali badania naukowe nad działaniem PV przy częściowym zacienieniu. Od 2010 roku pojawiło się bardzo dużo prac naukowych na ten temat, zaprezentowano w nich różnorodne nowe rozwiązania. Wśród tych metod można wyróżnić:

- algorytmy genetyczne
- optymalizację roju cząstek (ang. *Particle Swarm Optimization* – PSO)
- algorytmy ewolucyjne (ang. *Differential Evolution* – DE)
- metodę roju cząstek (ang. *Artificial Bee Colony*)
- rozwiązanie numeryczne
- analityczne modelowanie słonecznych systemów PV
- MPPT oparte na filtrze Kalmana
- zmodyfikowane metody konwencjonalne
- metodę dwustopniową
- metodę bezpośrednią.

W symulacjach i wynikach eksperymentalnych, przedstawionych w [11], gdzie zastosowano metodę ewolucyjną (DE) w warunkach częściowego zacienienia do śledzenia maksimów globalnych, zanotowano znaczną szybkość śledzenia i skuteczność przetwarzania mocy, bez nadmiernej złożoności układu sterowania. Metoda bezpośrednia [20] dzieli przestrzeń poszukiwań na różne sekcje, a zakres badań sprowadza się do sekcji o wysokim prawdopodobieństwie maksimów globalnych. Jednak sukces tej metody zależy od prawidłowego podziału na sekcje. Metoda PSO, zaproponowana w [21–25], zależy od właściwego wyboru trzech parametrów, a mianowicie ciężaru, bezwładności i współczynników przyspieszenia w ramach algorytmu PSO dla szybkiej i udanej konwergencji. W metodzie tej uzyskano lepsze wyniki w porównaniu z innymi algorytmami heurystycznymi. Zmodyfikowana metoda przyrostów przewodności (IC), zaproponowana w [26], wykazuje wzrost generowanej energii. Czas śledzenia jest krótszy w porównaniu z konwencjonalną metodą P&O, metodą z obserwatorem oraz metodą *hill climbing* opartą na logice rozmytej. Metoda dwuetapowa, zaproponowana w [27], analizuje przebiegi krzywych $I(U)$ oraz $P(U)$ do dwuetapowego śledzenia maksimów globalnych. Metoda ta jest prosta i skuteczna w warunkach szybkich zmian nasłonecznienia. W innej pracy [28] zastosowano nowy model MPPT, wykorzystujący technikę optymalizacji Grey Wolf Optimizer (GWO) w stanie częściowego zacienienia. W pracach [29–30] zaproponowano metody umożliwiające śledzenie GMPP z dużą dokładnością, w warunkach niejednolitego zacienienia.

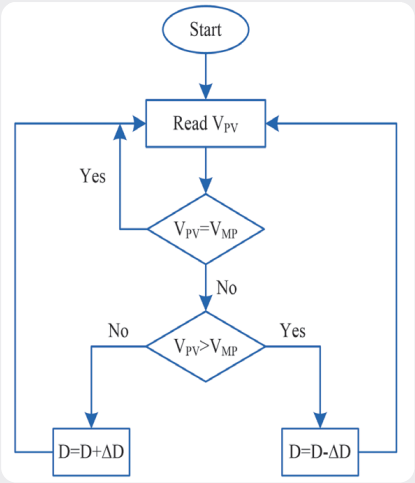
4. Proponowana metoda

Proponowany w niniejszym artykule algorytm sterowania wykorzystuje metodę sterowania o zmiennej strukturze regulatora (ang. *Variable Structure Control* – VSC). W sterowaniu VSC wykorzystuje się nieciągły, nieliniowy algorytm sterowania, który zmienia dynamikę systemu nieliniowego. Sterowanie bazujące na sprzężeniu od wektora zmiennych (*state-feddback control*) jest nieciągłą funkcją czasu, która przechodzi płynnie od jednego stanu do drugiego. Tak więc struktura sterowania zmienia się w zależności od wartości zmiennych sterujących. Przejście między kolejnymi stanami następuje z bardzo dużą dynamiką. Metoda VSC została opracowana we wczesnych latach 50. ubiegłego wieku w ZSRR przez prof. Emelianowa z zespołem [31, 32] i została przedstawiona w niniejszym rozdziale.

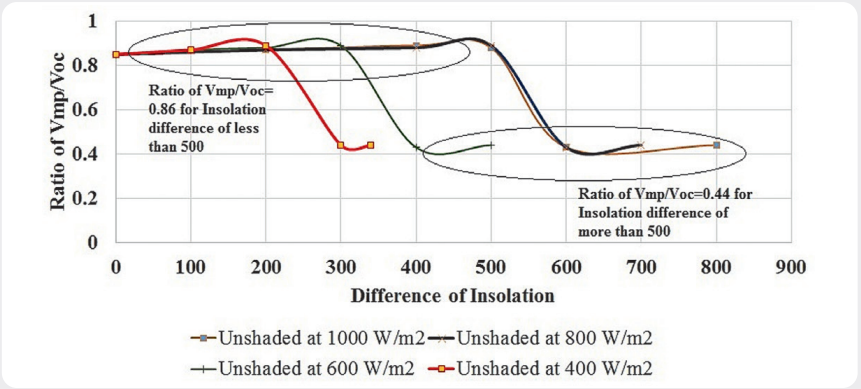
W praktyce liczba schematów zacienienia dla małych systemów PV rzadko przekracza dwa. Proponowana metoda wykorzystuje zatem wyniki uzyskane z badania zmienności GMPP w dwóch schematach zacienienia. Zmienność MPP w warunkach zacienienia częściowego jest weryfikowana praktycznie. Do opracowania algorytmu sterowania wykorzystano panel PV typu BP Solar BX3190. W tym panelu GMPP występuje blisko wartości równej $K_{low} \cdot U_{OC}$ (gdzie: K_{high} = 0,44, a U_{OC} to napięcie obwodu otwartego panelu PV) w warunkach, gdy istnieje duża różnica w nasłonecznieniu (ponad 500 W/m^2) między panelem niezacienionym a zacienionym. Gdy różnica zacienienia między dwoma panelami zmniejsza się poniżej 500 W/m^2, wówczas napięcie punktu globalnego maksimum mocy (GMPP) staje się równe $K_{high} \cdot U_{OC}$ (gdzie: K_{high} = 0,86). Do pomiaru U_{OC}

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 21–32. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 8. Schemat blokowy algorytmu sterowania MPPT przy stałym napięciu [tłum. Start – start, Read V_{PV} – odczyt V_{PV}, Yes – tak, No – nie]



Rys. 9. Przesunięcie GMPP przy różnym nasłonecznieniu [tłum. Ratio of Vmp/Voc – Stosunek *Vmp*/*Voc*, Ratio of Vmp/Voc = 0.86 for Insolation difference of less than 500 – stosunek *Vmp*/*Voc* = 0,86 przy różnicy nasłonecznienia mniejszej niż 500, Ratio of Vmp/Voc = 0.44 for Insolation difference of more than 500 – stosunek *Vmp*/*Voc* = 0,44 przy różnicy nasłonecznienia większej niż 500, Difference of Insolation – Różnica nasłonecznienia, Unshaded at 1000 W/m² – niezacieniony przy 1000 W/m², Unshaded at 600 W/m² – niezacieniony przy 600 W/m², Unshaded at 800 W/m² – niezacieniony przy 800 W/m², Unshaded at 400 W/m² – niezacieniony przy 400 W/m²]

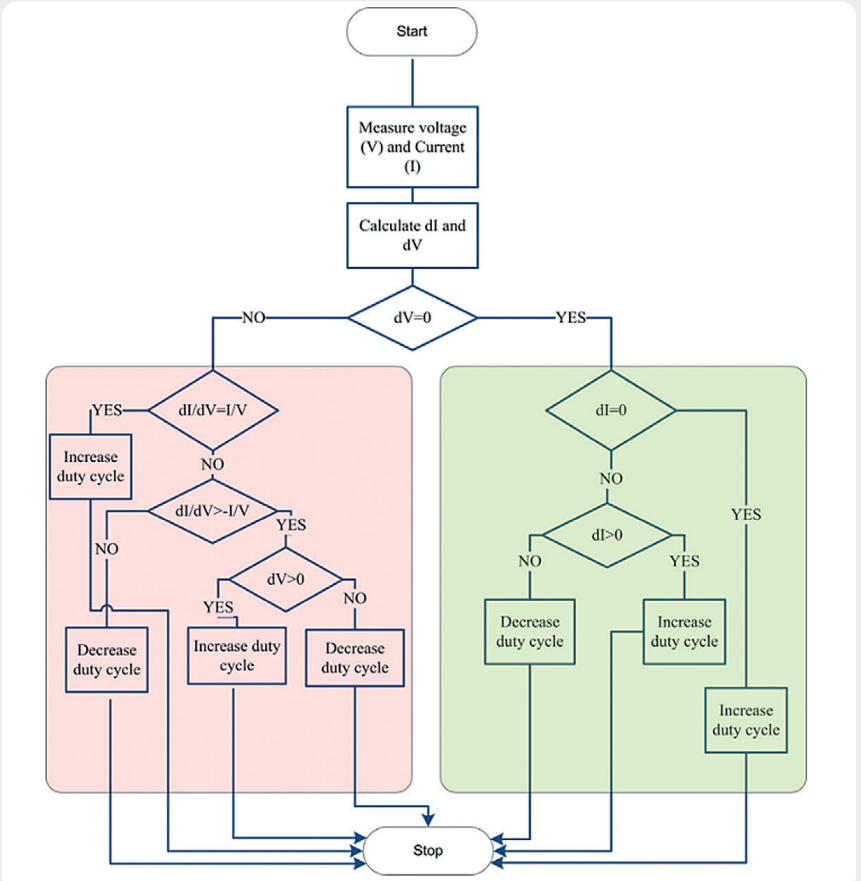
stosuje się dodatkowe (pomocnicze) panele PV o małej mocy, ale wykonane z podobnego materiału jak panele główne PV. W zaproponowanej metodzie wykorzystano analizę charakterystyk przedstawionych na rys. 9. Schemat blokowy nowego algorytmu zaprezentowano na rys. 10.

5. Badania symulacyjne

Proponowany algorytm został zasymulowany w środowisku Matlab Simulink. Na rys. 11 przedstawiono schemat blokowy systemu PV z obciążeniem rezystancyjnym, a strukturę regulatora na rys. 12.
Model Simulink składa się z następujących bloków:

a. BLOKI PV

Kolektory słoneczne PV_1 i PV_3 to główne kolektory składające się z modułów fotowoltaicznych typu BP Solar SX 3190. Liczba ogniw w module wynosi 50. Kolektor PV_2 i PV_4 są kolektorami pomocniczymi, wykonanymi z tego samego materiału i o tych samych właściwościach co kolektory główne. Kolektory pomocnicze służą jedynie do pomiaru napięcia obwodu otwartego. W kolektorach pomocniczych wykorzystano moduły typu SunPower SPR-305-WHT z 96 ogniwami na moduł. Dane techniczne modułów i parametry modelu podano w tab. 1. Na rys. 13 przedstawiono charakterystyki $P(U)$ przy różnym częściowym przesłonięciu.
W opisach na rys. 13 podano wartości nasłonecznienia obu kolektorów. Para wartości 400 W/m² i 400 W/m² oznacza, że oba panele są tak samo nasłonecznione z natężeniem 400 W/m², zaś para 400 W/m² i 300 W/m² oznacza, że nasłonecznienie jednego panelu wynosiło 400 W/m², a drugiego 300 W/m².



Rys. 10. Schemat blokowy zaproponowanego algorytmu MPPT [tłum. Start – start, Measure voltage (V) and Current (I) – pomiar napięcia (*U*) i prądu (*I*), Calculate dI and dV – obliczenie d*I* i d*V*, No – nie, Yes – tak, Increase duty cycle – Zwiększ wypełnienie impulsu, Decrease duty cycle – Zmniejsz wypełnienie impulsu, Increase duty cycle – Zwiększ wypełnienie impulsu, Decrease duty cycle – Zmniejsz wypełnienie impulsu]

b. PODWÓJNY PRZEKSZTAŁTNIK PODWYŻSZAJĄCY

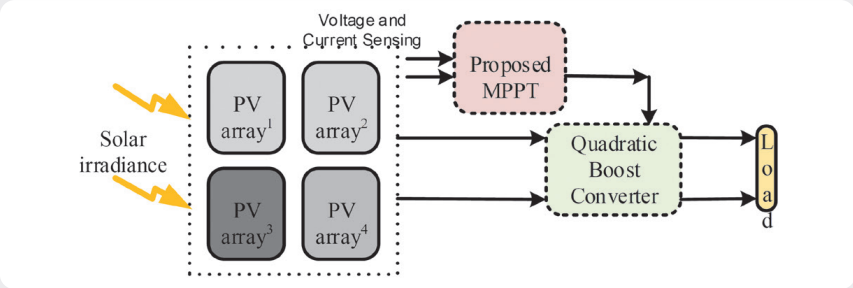
Kwadrantowy przekształtnik podwyższający zwiększa napięcie wejściowe U_i. Przekształtnik ten wytwarza wyższe napięcie wyjściowe w porównaniu z konwencjonalnym przekształtnikiem podwyższającym przy tym samym współczynniku wypełnienia impulsu D. Zależność między napięciem wejściowym i wyjściowym U_O jest określona wzorem

$$U_o = \frac{U_i}{(1-D)^2} \quad (1)$$

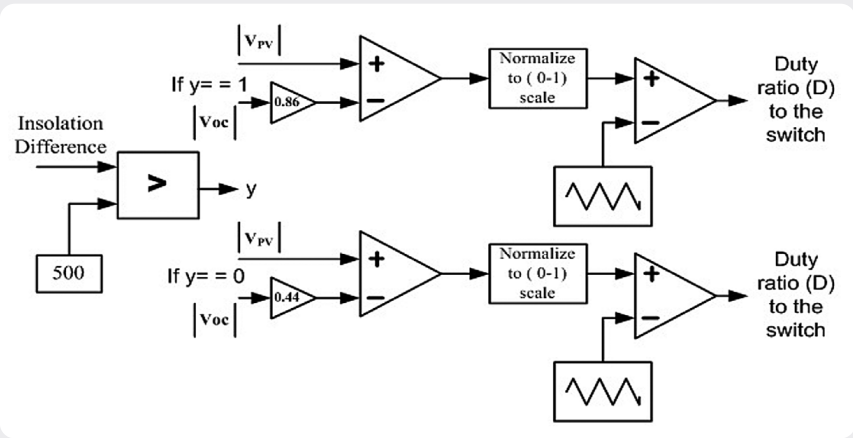
Z (1) wynika, że napięcie wyjściowe przekształtnika zmienia się wykładniczo wraz z wypełnieniem impulsu dla danego napięcia wejściowego. Ponieważ wypełnienie impulsu jest mniejsze niż 1, to $U_o > U_i$. Zwiększone wzmocnienie przekształtnika

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 21–32. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 11. Realizacja proponowanego schematu [tłum. Voltage and Current Sensing – pomiar napięcia i prądu, Solar irradiance – promieniowanie słoneczne, PV array – kolektor PV, Proposed MPPT – proponowana metoda MPPT, Quadratic Boost Converter – podwójny przekształtnik podwyższający napięcie, Load – obciążenie]



Rys. 12. Struktura regulatora zrealizowana w środowisku Matlab Simulink [tłum. Insolation Difference – różnica nasłonecznienia, Normalize to (0–1) scale – normalizacja (0–1), Duty ratio (D) to the switch – stosunek wypełnienia impulsów (D) sterujących tranzystora przekształtnika, If y = 0 – jeśli y = 0]

Dane techniczne modułów i parametry modelu	V_{OC} [V]	I_{SC} [A]	V_{mp} [V]	I_{mp} [A]	R_S [Ω]	R_p [Ω]	I_{sat} [A]	I_{ph} [A]
Kolektor PV_1 i kolektor PV_3	30,602	8,510	24,3003	7,829	0,1751	755,51	1.0647e-06	8,5158
Kolektor PV_2 i kolektor PV_4	64,2	5,96	54,7	5,58	0,0379	993,51	1.1753e-08	5,9602

Tab. 1. Dane techniczne kolektorów słonecznych głównych i pomocniczych

sprawia, że lepiej nadaje się do takich zastosowań jak zintegrowany system PV i mikrosieci. Ponadto przekształtnik ten zapewnia mniejsze tętnienia prądu wyjściowego panelu PV. Krzywe zależności napięcia wyjściowego od wypełnienia impulsu $U_i(D)$ dla podwójnego przekształtnika podwyższającego i klasycznego przekształtnika podwyższającego przedstawiono na rys. 14. W klasycznym przekształtniku podwyższającym wzmocnienie napięcia wynosi zwykle 4–5, natomiast w podwójnym przekształtniku można je zwiększyć do 10, co zapewnia działanie układu MPPT w szerszym zakresie pracy układu. Linie niebieska i czerwona na rys. 14 oznaczają napięcie wyjściowe przy określonym wypełnieniu cyklu, odpowiednio dla podwójnego i klasycznego przekształtnika podwyższającego. Wartości dławika i kondensatora przekształtnika podwójnego oraz rezystancji obciążenia, które użyto w badaniach symulacyjnych, podano w tab. 2.

c. ŚLEDZENIE PUNKTU MOCY MAKSYMALNEJ PRZY ZMIENNEJ STRUKTURZE UKŁADU

Na rys. 15 przedstawiono schemat blokowy realizacji proponowanego algorytmu sterowania w środowisku Matlab Simulink. Jeśli różnica w nasłonecznieniu jest mniejsza niż 500 W/m², wymagane U_{mp} = 0,44 napięcia U_{OC}, w przeciwnym razie U_{mp} = 0,86 napięcia U_{OC}. Znormalizowany przebieg różnicy napięć U_{PV} i U_{mp} porównuje się z falą trójkątną w celu określenia sygnału współczynnika wypełnienia impulsów podwójnego przekształtnika podwyższającego. Przykładowe przebiegi prądu, napięcia i mocy zaprezentowano na rys. 16. Wyniki symulacji potwierdzają poprawność działania zaproponowanego algorytmu MPPT.

Nr	Element	Wartość
1	Dławik	0,001 H
2	Kondensator	0,01 F
3	Rezystancja obciążenia	10 Ω

Tab. 2. Wartości kondensatora i dławika przekształtnika podwójnego oraz rezystancja obciążenia

Zaproponowany algorytm o zmiennej strukturze wykorzystuje właściwość panelu PV, w którym napięcie, udostępniające w systemie PV moc maksymalną, przełącza się pomiędzy $K_i \cdot U_{OC}$ (gdzie $K_i = K_{low} = 0{,}44$, lub $K_i = K_{high} = 0{,}86$). Stały mnożnik uzyskano dla panelu PV typu BP Solar SX3190 po przeprowadzonych badaniach symulacyjnych.

Na rys. 16 przedstawiono właściwości dynamiczne zaproponowanego algorytmu MPPT w warunkach zmieniającego się nasłonecznienia. Nasłonecznienie jednego z paneli utrzymywane jest na poziomie 1000 W/m². Drugi, połączony szeregowo panel podlega zmiennym warunkom nasłonecznienia. Nasłonecznienie zmienia się od 200 W/m² do 600 W/m², a potem zwiększa się do 1000 W/m². Aby sprawdzić działanie nowego algorytmu MPPT przy szybkim zmniejszeniu nasłonecznienia, nasłonecznienie drugiego panelu zmniejsza się z 1000 W/m² do 200 W/m² oraz z 600 W/m² od 400 W/m². Przy dynamicznej zmianie nasłonecznienia proponowany algorytm o zmiennej strukturze działa dobrze, płynnie i dynamicznie, śledząc punkt mocy maksymalnej. Działanie systemu PV z nowym algorytmem MPPT porównano z konwencjonalnym algorytmem P&O oraz systemem PV działającym w układzie otwartym (bez MPPT). Zmienność mocy wyjściowej w różnych warunkach testowych zaprezentowano na rys. 17. Wynik ten wskazuje lepszą wydajność przy wyższej różnicy w nasłonecznieniu.

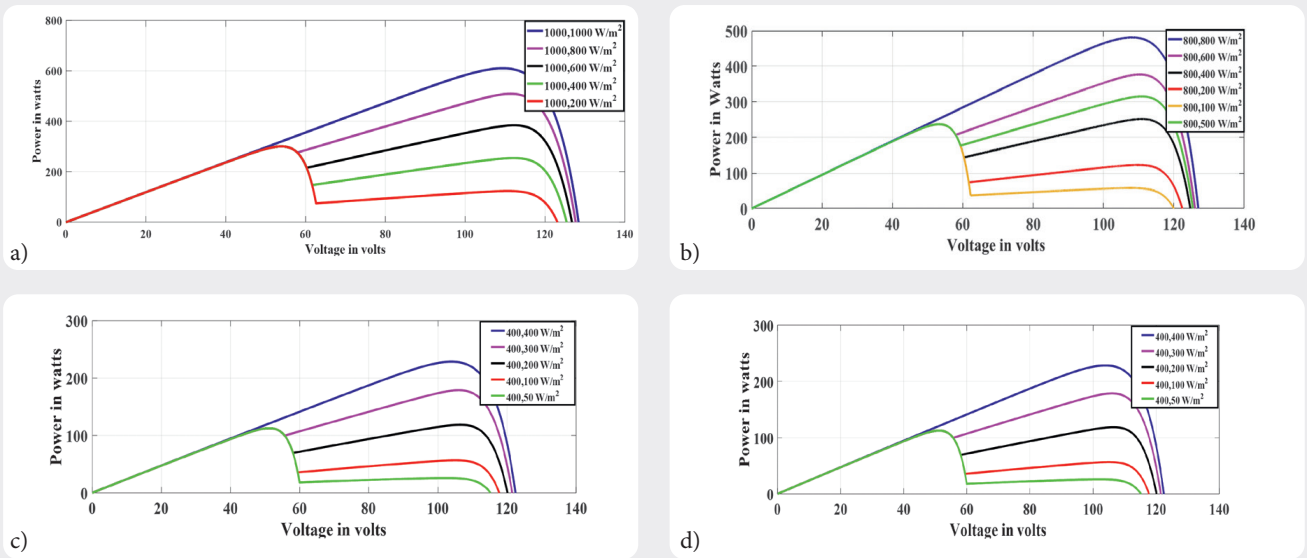
6. Wnioski

Sprawność systemu PV w dużej mierze zależy od warunków atmosferycznych. Moc wyjściowa systemu PV zależy od temperatury i naświetlenia, którym podlegają poszczególne moduły. Moc wyjściowa zmienia się, gdy występuje częściowe przesłonięcie łańcucha paneli, w którym połączone szeregowo panele PV równocześnie podlegają różnemu nasłonecznieniu.

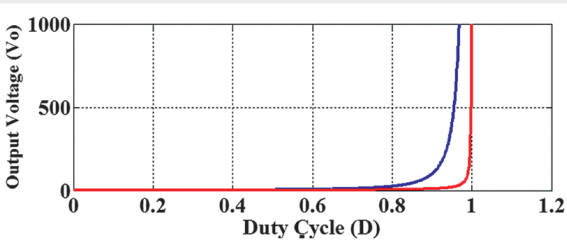
W niniejszej pracy zamodelowano zjawisko częściowego przesłonięcia panelu PV i zaproponowano nowy algorytm śledzenia punktu mocy maksymalnej, który jest układem o zmiennej strukturze sterowania. Algorytm przetestowano na opracowanym modelu symulacyjnym w Matlab Simulink przy różnych warunkach pracy układu PV. Wyniki uzyskane dla nowego MPPT spełniają oczekiwania. Maksymalna moc wyjściowa uzyskana z systemu PV, przy zastosowaniu proponowanego MPPT, jest bliska maksymalnej mocy odczytanej z charakterystyki katalogowej modelowanego panelu PV. Algorytm ten ma zastosowanie tylko do dwóch modeli zacienienia, co jest najczęściej spotykane w praktyce.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 21–32. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 13 (a), (b), (c), (d). Krzywe charakterystyki PV z jednym panelem nasłonecznionym ze stałym nasłonecznieniem (a) 1000 W/m², (b) 800 W/m², (c) 600 W/m² i (d) 400 W/m² oraz drugim panelem przesłoniętym w różnym stopniu [tłum. Power in watts – Moc [W], Voltage in volts – Napięcie [V]



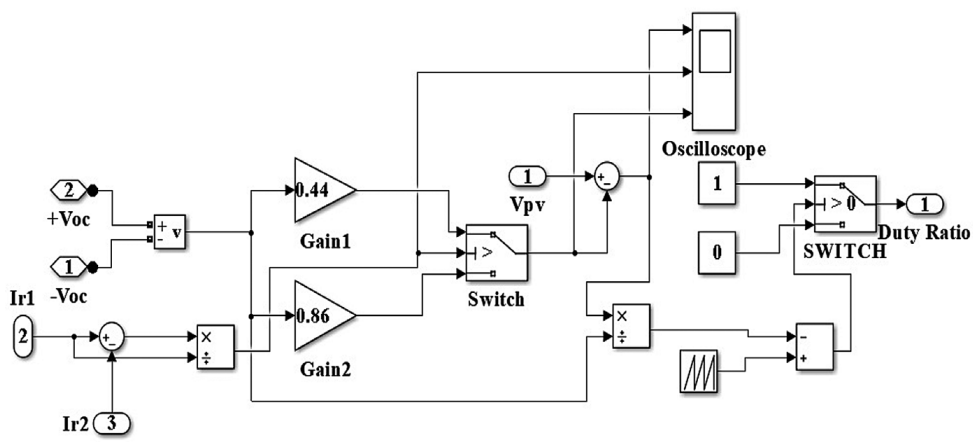
Rys. 14. Charakterystyki napięcia wyjściowego w funkcji współczynnika wypełnienia (linia niebieska – przekształtnik podwójny, linia czerwona – przekształtnik klasyczny) [tłum. Output Voltage (Vo) – napięcie wyjściowe Uo, Duty Cycle (D) – współczynnik wypełnienia impulsów D]

Podziękowania

Publikacja ta była możliwa dzięki Qatar University w Katarze i finansowana ze środków grantu Marubeni Concept to Prototype Development Research nr [228]. Odpowiedzialność za zawartość artykułu ponoszą wyłącznie autorzy.

Bibliografia

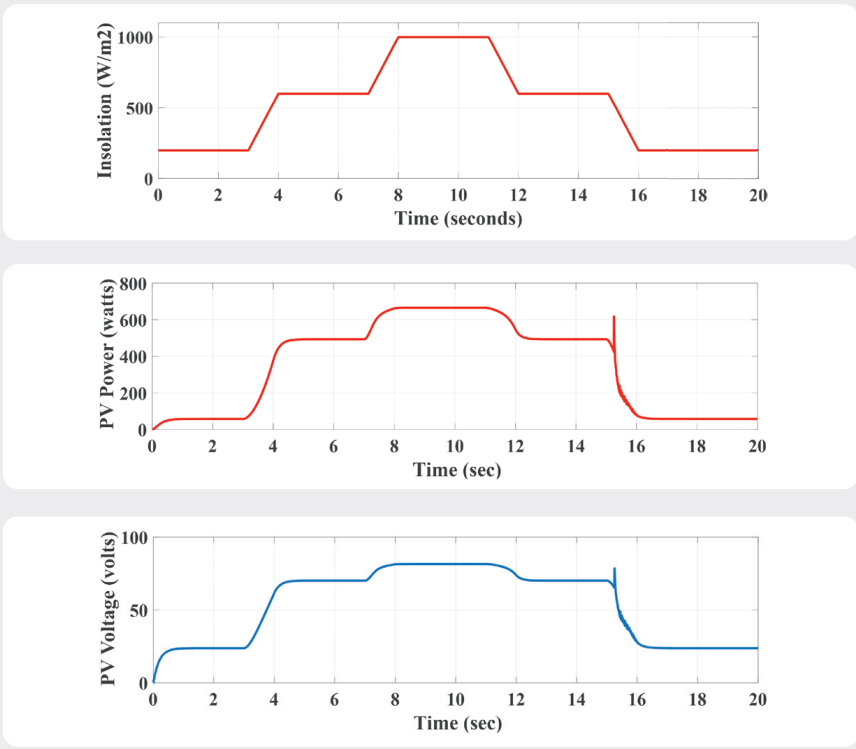
1. Silvestre S., Boronat A., Chouder A., Study of bypass diodes configuration on PV modules [Badania konfiguracji diód obejściowych w modułach PV], *Applied Energy* 2009, Vol. 86(9), s. 1632–1640, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.01.020.
2. Zheng H. i in., Shading and bypass diode impacts to energy extraction of PV arrays under different converter configurations [Oddziaływanie zacienienia i diody obejściowej na moc wyjściową kolektorów PV przy różnych konfiguracjach przekształtnika], *Renewable Energy* 2014, Vol. 68, s. 58–66, doi: 10.1016/j.renene.2014.01.025.
3. Seyedmahmoudian M. i in., State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems – A review [Najnowocześniejsze techniki MPPT oparte na sztucznej inteligencji w celu złagodzenia efektów zacienienia częściowego w systemach PV – Przegląd], *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016, Vol. 64, s. 435–455, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.053.



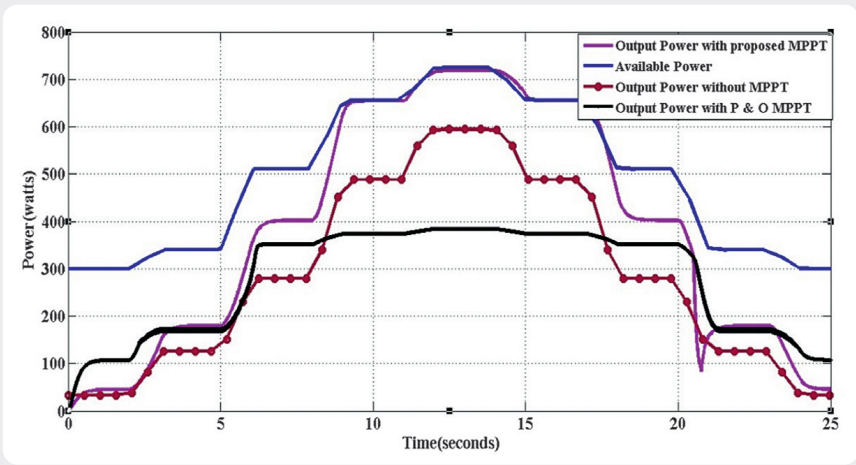
Rys. 15. Model zaproponowanego algorytmu sterowania MPPT w środowisku Matlab Simulink [tłum. +Voc – +Uoc, Gain – wzmocnienie, Switch – przełącznik sygnałów, Oscilloscope – oscyloskop, SWITCH – przełącznik sygnałów, Duty Ratio – współczynnik wypełnienia impulsów]

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 21–32. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 16. Przebiegi prądu, napięcia i mocy wyjściowej [tłum. Insolation (W/m²) – Nasłonecznienie [W/m²], PV Power (watts) – Moc PV [W], Time (sec) – Czas [s], PV Voltage (volts) – Napięcie PV (V)]



Rys. 17. Zmienność mocy wyjściowej w różnych warunkach testowych [tłum. Power (watts) – Moc [W], Output Power with proposed MPPT – moc wyjściowa z proponowanym MPPT, Available Power – moc dysponowana, Output Power without MPPT – moc wyjściowa bez MPPT, Output Power with P & O MPPT – moc wyjściowa z MPPT przy algorytmie P&O, Time (seconds) – Czas [s]]

4. Fan X., Deng F., Chen J., Voltage band analysis for maximum power point tracking of stand-alone PV systems [Analiza pasma napięcia do śledzenia punktu mocy maksymalnej autonomicznych systemów fotowoltaicznych], *Solar Energy* 2017, Vol. 144, s. 221–231, doi: 10.1016/j.solener.2017.01.032.
5. Gokmen N. i in., Voltage band based global MPPT controller for photovoltaic systems [Globalny sterownik MPPT w oparciu o pasmo napięciowe do systemów fotowoltaicznych], *Solar Energy* 2013, Vol. 98, s. 322–334, doi: 10.1016/j.solener.2013.09.025.
6. Ahmed J., Salam Z., A critical evaluation on maximum power point tracking methods for partial shading in PV systems [Krytyczna ocena metod śledzenia punktu mocy maksymalnej przy zacienieniu częściowym w systemach PV], *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015, Vol. 47, s. 933–953, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.080.
7. Koutroulis E., Blaabjerg F., A new technique for tracking the global maximum powerpoint of PV arrays operating under partial-shading conditions [Nowa technika śledzenia globalnego punktu mocy maksymalnej kolektora PV w warunkach zacienienia częściowego], *IEEE Journal of Photovoltaics* 2012, Vol. 2(2), s. 184–190, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2183578.
8. Bidram A., Davoudi A., Balog R.S., Control and circuit techniques to mitigate partial shading effects in photovoltaic arrays [Techniki sterowania i obwodów w celu złagodzenia efektów zacienienia częściowego w kolektorach fotowoltaicznych], *IEEE Journal of Photovoltaics* 2012, Vol. 2(4), s. 532–546, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2202879.
9. Tabish S., Ashraf I., Simulation of Partial Shading on Solar Photovoltaic Modules with Experimental Verification [Symulacja zacienienia częściowego słonecznych modułów fotowoltaicznych wraz z weryfikacją eksperymentalną], *International Journal of Ambient Energy* 2015, Vol. 38, s. 1–21, doi: 10.1080/01430750.2015.1074614.
10. Bhattacharya T., Chakraborty A., Pal K., Computer Simulation of the Influence of Shading on Solar Photovoltaic Array [Symulacja komputerowa wpływu zacienienia na słoneczny kolektor fotowoltaiczny], *International Journal of Ambient Energy* 2016, Vol. 38, s. 1–19, doi: 10.1080/01430750.2016.1155484.
11. Taheri H., Salam Z., Ishaque K., A Novel Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic System Under Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions Using Differential Evolution [Nowatorska metoda kontroli śledzenia punktu mocy maksymalnej w systemie fotowoltaicznym w warunkach częściowo i szybko zmieniającego się zacienienia z wykorzystaniem ewolucji różniczkowej], ISIEA 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications 2011, doi: 10.1109/ISIEA.2010.5679492.
12. Killi M., Samanta S., Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems [Zmodyfikowany algorytm MPPT Perturb and Observe dla unikania znoszenia w układach fotowoltaicznych], *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2015, Vol. 62, No. 9, doi: 10.1109/TIE.2015.2407854.
13. Srivastava M., Agarwal S., Sharma E., Design and Simulation of Perturb and Observe MPPT Algorithm for 72 Cell Solar PV System [Projektowanie i symulacja algorytmu MPPT Perturb and Observe dla słonecznego układu PV o 72 ogniwach], *International Journal of Soft Computing and Engineering* 2015, Vol. 4, Issue 6, ISSN: 2231–2307.
14. Patel U., Sahu D., Tirkey D., Maximum Power Point Tracking Using Perturb & Observe Algorithm and Compare with another Algorithm [Śledzenie punktu mocy maksymalnej za pomocą algorytmu Perturb and Observe i porównanie z innym algorytmem], *International Journal of Digital Application & Contemporary research* 2013, Vol. 2, ISSN: 2319–4863.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 21–32. When referring to the article please refer to the original text.

PL

15. Atallah A.M., Abdelaziz A.Y., Jumaah R.S., Implementation of Perturb and Observe MPPT of PV System with Direct Control Method Using Buck and Buckboost Converters [Wdrożenie MPPT Perturb and Observe w systemie PV metodą bezpośredniego sterowania z wykorzystaniem przekształtników Buck oraz Buckboost], *Emerging Trends in Electrical, Electronics & Instrumentation Engineering: An international Journal* 2014, Vol. 1, No. 1.
16. Srivastava M., Agarwal S., Sharma E., Design and Simulation of Perturb and Observe MPPT Algorithm for 72 Cell Solar PV System [Projektowanie i symulacja algorytmu MPPT Perturb and Observe dla słonecznego układu PV o 72 ogniwach], *International Journal of Soft Computing and Engineering* 2015, Vol. 4, Issue 6, ISSN: 2231–2307.
17. Esram T., Chapman P.L., Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, Energy Conversion [Porównanie technik śledzenia punktu mocy maksymalnej kolektora fotowoltaicznego, przekształcenie energii], *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2007, Vol. 22/2, s. 439–449, doi: 10.1109/TEC.2006.874230.
18. Yu T., Chien T., Analysis and simulation of characteristics and maximum power point tracking for photovoltaic systems, in Power Electronics and Drive Systems [Analiza i symulacja charakterystyk i śledzenia punktu mocy maksymalnej systemów fotowoltaicznych w energoelektronice i układach napędowych], 8th International Conference on Power Electronic and Drive Systems, PEDS 2009, s. 1339–1344, doi: 10.1109/PEDS.2009.5385670.
19. Babaa S.E., Armstrong M., Pickert V., Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems [Przegląd metod kontroli śledzenia punktu mocy maksymalnej dla systemów PV], *Journal of Power and Energy Engineering* 2014, Vol. 2, s. 59–72, doi: 10.4236/jpee.2014.28006.
20. Nguyen T.L., Low K.-S., A global maximum power point tracking scheme employing DIRECT search algorithm for photovoltaic systems [Schemat śledzenia globalnego punktu mocy maksymalnej wykorzystujący algorytm wyszukiwania DIRECT dla systemów fotowoltaicznych], *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2010, Vol. 57(10), 3456–3467, doi: 10.1109/TIE.2009.2039450.
21. Yau H.-T. i in., Sliding mode extremum seeking control scheme based on PSO for maximum power point tracking in photovoltaic systems [Oparty na PSO schemat wyszukiwania ekstremum w trybie sterowania ślizgowego do celów śledzenia punktu mocy maksymalnej w systemach fotowoltaicznych], *International Journal of Photoenergy* 2013, Vol. 2, doi: 10.1155/2013/527948.
22. Ishaque K. i in., An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation [Ulepszony MPPT oparty na optymalizacji roju cząstek (PSO) dla PV ze zmniejszoną oscylacją w stanie ustalonym], *IEEE Transactions on Power Electronics* 2012, No. 27(8), s. 3627–3638, doi: 10.1109/TPEL.2012.2185713.
23. Ishaque K., Salam Z., A deterministic particle swarm optimization (PSO) maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition [Deterministyczna optymalizacja roju cząstek (PSO) do śledzenia punktu mocy maksymalnej układu fotowoltaicznego w warunkach zacienienia częściowego], *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2012, Vol. 60(8), doi: 10.1109/TIE.2012.2200223.
24. Killi M., Samanta S., Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems [Zmodyfikowany algorytm MPPT Perturb and Observe dla unikania znoszenia w układach fotowoltaicznych], *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2015, Vol. 62, No. 9, doi: 10.1109/TIE.2015.2407854.
25. Patel U., Sahu D., Tirkey D., Maximum Power Point Tracking Using Perturb & Observe Algorithm and Compare with another Algorithm [Śledzenie punktu mocy maksymalnej za pomocą algorytmu Perturb and Observe i porównanie z innym algorytmem], *International Journal of Digital Application & Contemporary research* 2013, Vol. 2, ISSN: 2319-4863.
26. Tey K.S., Mekhilef S., Modified Incremental Conductance MPPT Algorithm to Mitigate Inaccurate Responses Under Fast-Changing Solar Irradiation Level [Zmodyfikowany algorytm MPPT przyrostów konduktancji w celu złagodzenia niedokładnych odpowiedzi w warunkach szybko zmieniającego się poziomu promieniowania słonecznego], *Solar Energy* 2014, Vol. 101, s. 333–342, doi: 10.1016/j.solener.2014.01.003.
27. Kobayashi K., Takano I., Sawada Y., A Study on a Two Stage Maximum Power Point Tracking Control of a Photovoltaic System under Partially Shaded Insolation Conditions [Badanie dwustopniowego sterowania śledzeniem punktu mocy maksymalnej układu fotowoltaicznego w warunkach częściowego zacienienia nasłonecznienia], *IEEE Transactions on Industry Applications* 2006, Vol. 153(4), doi: 10.1109/PES.2003.1271058.
28. Mohanty S., Subudhi B., Ray P.K., A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions [Nowy project MPPT z wykorzystaniem techniki optymalizacji szarego wilka dla systemu fotowoltaicznego w warunkach częściowego zacienienia], *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2016, Vol. 7(1), s. 181–188, doi: 10.1109/TSTE.2015.2482120.
29. Kot R., Stynski S., Malinowski M., Hardware methods for detecting global maximum power point in a PV power plant [Metody sprzętowe do wykrywania globalnego punktu mocy maksymalnej w elektrowni fotowoltaicznej], 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), doi.: 10.1109/ICIT.2015.7125527.
30. Basiński K., Ufnalski B., Grzesiak L.M., Hybrid MPPT Algorithm for PV Systems Under Partially Shaded Conditions Using a Stochastic Evolutionary Search and a Deterministic Hill Climbing [Hybrydowy algorytm MPPT dla systemów PV w warunkach zacienienia częściowego z wykorzystaniem stochastycznego poszukiwania ewolucyjnego i deterministycznej metody hill climbing], *Power Electronics and Drives* 2017, Vol. 2(2), s. 49–59, doi: https://doi.org/10.5277/ped170212.
31. Hung J.Y., Gao W.B., Hung J.C., Variable Structure Control: A Survey [Sterowanie o zmiennej strukturze: Przewodnik], *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 1993, Vol. 40/2–22, doi: 10.1109/41.184817.
32. Gao W., Hung J.C., Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A New Approach [Sterowanie o zmiennej strukturze układami nieliniowymi: Nowe podejście], *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 1993, Vol. 40(1), s. 45–55, doi: 10.1109/41.184820.

Reyaz Hussan
doktorant
Aligarh Muslim University, Aligarh, India
e-mail: mreyazamu@gmail.com
Licencjat w dziedzinie inżynierii elektrycznej (2014) oraz magisterium (2016) w dziedzinie aparatury kontrolno-pomiarowej uzyskał na Aligarh Muslim University w Aligarh, w Indiach. Obecnie jest pracownikiem naukowym na tej uczelni, zajmuje się elektrotechniką. Zakres jego zainteresowań to odnawialne źródła energii i przekształtniki energii.

Manita Kumari
doktorantka
Aligarh Muslim University, Aligarh, India
e-mail: manitakumari202@gmail.com
Ukończyła studia licencjackie z inżynierii elektrycznej (2016) i magisterskie (2018) w dziedzinie wysokiego napięcia i izolacji na Aligarh Muslim University w Aligarh, w Indiach. Obecnie jest pracownikiem naukowym na Wydziale Elektrycznym Aligarh Muslim University. Jej zainteresowania naukowe obejmują odnawialne źródła energii, techniki PWM dla przekształtników energii i nowe topologie dla wielopoziomowych falowników z przełączalnym kondensatorem.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 21–32. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Adil Sarwar
dr
Aligarh Muslim University, Aligarh, India
e-mail: adil.sarwar@zhcet.ac.in
Pracuje jako adiunkt na Wydziale Elektrycznym Aligarh Muslim University w Aligarh. Od ponad 8 lat zajmuje się dydaktyką i badaniami. Jest członkiem IEEE i dożywotnim członkiem Society of Systems of India. Opublikował ponad 40 prac naukowych w renomowanych czasopismach i na konferencjach, w tym IEEE Transactions. Współautor rozdziału nt. przekształtników wielofazowych w podręczniku „Power Electronics", wyd. 4., pod red. M.H. Rashida. Jest jednym z głównych badaczy w bieżącym projekcie badawczym nt. przekształtników hybrydowych, przyznanym przez Krajową Instytucję Realizacji Projektów NPIU w Indiach, o wartości 1,35 mln rupii indyjskich (INR). Jego zainteresowania naukowe obejmują przekształtniki energii, systemy fotowoltaiczne i mikrosterowniki.

Atif Iqbal
prof.
Qatar University
e-mail: atif.iqbal@qu.edu.qa
Stypendysta IEET (Wielka Brytania), stypendysta IE (Indie) i członek IEEE (Senior Member), dr (Wielka Brytania), dr hab. (Polska) – redaktor współpracownik IEEE Transactions on Industry Application, IEEE ACCESS, redaktor naczelny i menedżer *Journal of Electrical Engineering*, adiunkt Katedry Elektrotechniki Uniwersytetu w Katarze i były profesor zwyczajny Katedry Elektrotechniki Aligarh Muslim University (AMU) w Aligarh, w Indiach. Laureat nagrody za wybitne zasługi dla nauczycieli w roku akademickim 2014–2015 oraz nagrody za wybitne badania naukowe na Qatar University w Doha, w Katarze. Uzyskał licencjat (Złoty Medal) i magisterium nauk technicznych (systemy i napędy elektroenergetyczne) w latach 1991 i 1996 na Aligarh Muslim University (AMU), a doktorat w 2006 roku na Liverpool John Moores University w Liverpoolu, w Wielkiej Brytanii. Od 1991 roku pracuje jako wykładowca Katedry Elektrotechniki AMU w Aligarh, gdzie od sierpnia 2016 roku pełni funkcję profesora zwyczajnego. Jest laureatem złotego medalu Maulana Tufail Ahmad za najlepsze wyniki na inżynierskich egzaminach licencjackich na AMU w 1991 roku. Otrzymał nagrody za najlepsze prace naukowe w IEEE ICIT-2013, IET-SEISCON-2013 oraz SIGMA 2018. Wyniki swoich badań, związanych z elektroniką energetyczną i odnawialnymi źródłami energii, często publikuje w międzynarodowych czasopismach i na konferencjach. Autor lub współautor m.in. ponad 350 prac naukowych oraz jednej książki. Prowadził kilka dużych projektów badawczych. Jego głównym obszarem zainteresowań naukowych jest modelowanie i symulacja przekształtników energoelektronicznych, sterowanie wielofazowych napędów elektrycznych i odnawialnych źródeł energii.

Mohd Tariq
dr
Aligarh Muslim University, Aligarh, India
e-mail: tariq.iitkgp@gmail.com
Uzyskał tytuł licencjata w dziedzinie elektrotechniki na Aligarh Muslim University w Indiach, a także magisterium w dziedzinie napędów mechanicznych i energoelektroniki na Indian Institute of Technology (IITK) w Kharagpur. Obecnie pracuje nad doktoratem na Nanyang Technological University w Singapurze. Przed otwarciem przewodu doktorskiego pracował jako naukowiec w autonomicznym Instytucie (NIOT, Chennai) przy indyjskim Ministerstwie Nauk o Ziemi, a także jako adiunkt w National Institute of Technology (NIT, Bhopal) w Indiach. Jest laureatem nagrody za najlepszą pracę z IEEE Industrial Applications Society (IAS) i Industrial Electronic Society, Malaysia Section – na dorocznym sympozjum (ISCAIE-2016) odbywającym się w Penang w Malezji. Jego zainteresowania naukowe obejmują przekształtniki energii, magazynowanie energii i jej optymalne sterowanie w zelektryfikowanym transporcie i zastosowaniach energii odnawialnej.

Jarosław Guziński
dr hab.
Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
e-mail: jaroslaw.guzinski@pg.edu.pl
Doktorat nauk technicznych obronił na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej. Obecnie jest kierownikiem Katedry Automatyki Napędów Elektrycznych i Konwersji Energii. W 2012 roku został nagrodzony przez Polską Akademię Nauk – Wydział IV: Nauki Techniczne za monografię „Układy napędowe z silnikami indukcyjnymi i filtrami wyjściowymi falowników – zagadnienia wybrane". Autor i współautor ponad 160 artykułów w czasopismach i na konferencjach. Jego zainteresowania obejmują bezczujnikowe sterowanie maszynami elektrycznymi, napędy wielofazowe (5-fazowe), filtry wyjściowe falowników, odnawialne źródła energii i pojazdy elektryczne. Jest członkiem IEEE (Senior Member).