

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Dominykas VASAREVIČIUS

INVESTIGATION AND IMPROVEMENT OF ELECTRONIC CONTROL SYSTEM FOR SOLAR ENERGY SOURCES

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



LEIDYKLA

Vilnius TECHNIKA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2012.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Romanas MARTAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Dalius NAVAKAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Members:

Prof Dr Habil Pranas BALTRĖNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Environmental Engineering – 04T),

Prof Dr Romas BARONAS (Vilnius University, Physical Sciences, Informatics – 09P),

Prof Dr Habil Roma RINKEVIČIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Dr Habil Arūnas Vytautas TAMAŠEVIČIUS (State Scientific Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Opponents:

Prof Dr Algirdas BAŠKYS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Algimantas VALINEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 10 a. m. on 20 December 2012.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 19 November 2012.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

© Dominykas Vasarevičius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Dominykas VASAREVIČIUS

FOTOVOLTINIŲ SAULĖS ENERGIJOS ŠALTINIŲ ELEKTRONINĖS VALDYMO SISTEMOS TYRIMAS IR TOBULINIMAS

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2012

Disertacija rengta 2008–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Romanas MARTAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. dr. Dalius NAVAKAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Nariai:

prof. habil. dr. Pranas BALTRĖNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija ir kraštotvarka – 04T),

prof. dr. Romas BARONAS (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, informatika – 09P),

prof. habil. dr. Roma RINKEVIČIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

habil. dr. Arūnas Vytautas TAMAŠEVIČIUS (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Oponentai:

prof. dr. Algirdas BAŠKYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. dr. Algimantas VALINEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerija mokslo krypties tarybos posėdyje 2012 m. gruodžio 20 d. 10 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2012 m. lapkričio 19 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 2057-M mokslo literatūros knyga.

Introduction

Topicality of the problem

In order to research the solar energy prospects in Lithuania by adopting conventional statistical methods, significant investments to equipment and lot of time is required to collect information. In this work mathematical model is being developed, which allows to calculate solar power flux (SPF, later in the work called solar radiation) in any location in Lithuania at desired moment of time. Such model allows evaluation of solar power plant performance before physical installation. Model is formed in such a way, that it can be used not only for prediction of energy produced, but also to perform a direct control of solar energy sources and can be used for development of control systems.

The electricity produced from solar radiation is expensive, so it is intended to minimize losses due to dynamics of environmental conditions by development of control systems for photovoltaic solar power plants.

The developed model is used for investigation of photovoltaic (PV) solar cell maximum power point tracking (MPPT) algorithms. As a result, an efficient MPPT method is created by adopting online learning artificial neural networks (ANN). This method is based on specifications of an ANN chip, available in the market and learning algorithms provided by producers of the chip, so it can be implemented practically.

The dissertation aims to explore the opportunities of solar energy in Lithuania and explore methods of control of solar renewable energy sources, suited Lithuanian climatic conditions.

The results are relevant to the country's energy strategy, as well as the business in calculation of return of investments in solar energy.

Object of research

The object of research – management algorithms of photovoltaic solar plants and their adaptation for Lithuanian climatic conditions. Solar power flux, falling on a horizontal surface at any point in Lithuania at a selected time and laws of its dynamics, depending on the time of year and weather conditions.

Aim of the work

Create and investigate effective, intellectual approach based, maximum power point tracking algorithms for photovoltaic modules to increase the efficiency of solar power extraction under Lithuanian climatic conditions.

Tasks of the work

To achieve the aims of the work the following tasks must be solved:

1. To develop a mathematical model of solar radiation, incident upon the surface of photo electric devices, working Lithuania.

2. To investigate the maximum power point tracking algorithms using the developed solar radiation and cloud simulation models and to determine criteria for performance evaluation of MPPT algorithms.

3. To develop models and research the solar power plants, operating with the maximum power point tracking controller. Improve MPPT algorithm, suitable for Lithuanian environmental conditions.

4. Perform verification of the solar radiation and photoelectric solar plant mathematical models.

Methodology of research

System modelling and statistical analysis methods are used in the work. Hypothesis are tested by forming mathematical models and performing simulations to verify the results.

Scientific novelty of work

The following results, significant to science of electrical engineering were obtained:

1. The model of solar radiation, incident to active surface of PV module, employing atmosphere attenuation coefficients, calculated from statistical solar radiation data in Lithuania and newly derived approximated function, linking the dependence of ratio between direct and diffused solar radiation components with cloudiness of the sky was created.

2. By means of simulation it is demonstrated, that solar radiation in Lithuania alters the operation regime of PV modules in such a manner, that it is required to constantly tune their operation point according to the environmental conditions in order to reach significant efficiency.

3. Criteria and their derived analytical expressions are offered for in-field estimation of PV modules maximum power point tracking controller's performance and efficiency.

4. Online learning artificial neural networks were selected and adopted to increase maximum power point tracking efficiency under dynamic environmental conditions.

Practical value

Based on research results in this work the photoelectric solar power plants and their control algorithms can be researched.

The developed mathematical models are suitable for calculation of optimal angles of solar energy sources, implementation of solar trackers and prediction of electrical or thermal energy production in such sources.

The models are of modular structure, so they can be used for various tasks in research of thermal and electric solar plants and easily adopted for other purposes.

Based on results of research, presented the methodology of in-field performance evaluation of maximum power point tracking controller. This methodology is based on similarity criteria between solar radiation and PV module output power curves.

Proposed the MPPT algorithm, based on real time learning artificial neural networks, adopted for practical implementation in newest hardware-based artificial neural network solutions and electronic circuit diagrams for experimental model are recommended.

Results of this work are used in project, financed by industry: „Autonomous illumination system for outside territories“, contracting authority UAB „Elektros įranga“, 2012–2013 m., contract No. MAS–2012/06/29–1.

Defended propositions

1. The developed total solar radiation model is suitable for investigation and development of electronic control systems of solar energy sources with freely selectable tilt and azimuth angles.

2. The maximum power point tracking efficiency of in-field operating photoelectric solar power plant controller can be estimated using similarity criteria between solar radiation and PV module output power curves, which is directly proportional to real maximum power point tracking efficiency of the controller.

3. Application of intelligent maximum power tracking techniques, based on artificial neural networks, allow to reach 99 % of maximum power point tracking performance in Lithuania.

The scope of the scientific work

The dissertation consists of an introduction, four chapters and a summary. There are also two appendixes.

The volume of 113 pages, not including appendixes, 96 numbered formulae are used in the text, 39 figures and 6 tables. Bibliography consists of 126 literature sources.

1. The Review of Photoelectric Power Plants and Their Control Methods

In the beginning of the chapter the solar energy researches at the state level, associated programs and important legislation affecting solar energy

generation prospects in Lithuania are reviewed. Emphasizing the perspectives of development of photo electricity production, common principles of production and related problems are shown. The importance of the control system performance of photovoltaic (PV) power plant during dynamic environmental conditions is discussed and maximum power point tracking algorithms are analysed. The investigation and development of such algorithms is difficult under operating conditions, so the mathematical solar radiation model, as a tool of research is discussed. The conclusions of the first chapter of dissertation are presented and dissertation tasks are formulated.

Author has published two scientific articles, dedicated to the scope of this chapter (Vasarevičius 2010, Vasarevičius 2011).

Solar energy is the biggest known energy resource available on Earth. This type of energy is clean, renewable and available almost in any location. Because of this and with aim to reduce negative effects of fossil fuels on environment international organisations like United Nations in 1997 and European Union in 2008 signed international laws on promotion of renewable energy. Lithuania being a member of both organisations also took obligations on increasing renewable energy part in total energy balance. This caused adoption of new laws and state programs on promoting renewable energy and since 2010 increment in this field became noticeable, especially in a field of photovoltaic electrical energy generation.

At present for photovoltaic electricity generation mostly silicon is used with *pn* junction. This technology is expensive and has its efficiency limitations. Due to lack of quantum efficiency the maximum efficiency of crystalline silicon PV cell according Shocley-Queisser law is 33,7%. In general, the total efficiency of solar PV power plant can be calculated using following expression:

$$\eta_S = \eta \eta_P \eta_K, \quad (1)$$

where: η – is the efficiency of PV cells (modules) used, η_K – is due to losses in the inverter and η_P – efficiency of power assimilation, so the product $\eta_K \eta_P$ describes the performance of control system.

η is mostly dependant on quantum efficiency of PV cells and is increased using modern technological processes of semiconductor production. η_K is mostly influenced by losses in transistors and is a concern of researches in a field of power electronics. While η_P is a descriptor of electronic control system efficiency performing maximum power point tracking (MPPT), so the following work focuses on methods of increasing this coefficient.

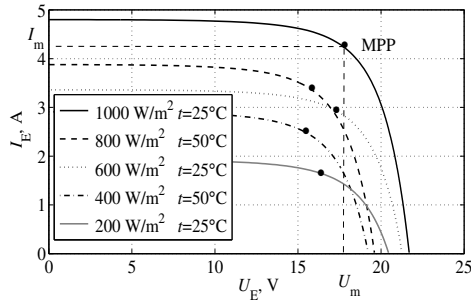


Fig. 1. Maximum power point at different solar radiation and different solar module temperatures

Because PV cell operates like a current source, with output current depending on incident solar radiation and temperature of the cell, it can output maximum power only on certain intersection point of current I_m and voltage U_m , which is obtained when loading PV cell with optimal load resistance R_{opt} at certain solar radiation and temperature and is called maximum power point (MPP) (Fig. 1).

While VI characteristics are unique for each PV module and depend on its technology of manufacturing, aging internal defects etc., the location of MPP depending on solar radiation and temperature forms complex surface, unique for each PV module.

Different hill climbing techniques are used for MPPT, the most popular of which is Perturb and Observe (P&O). It is based on alternating the load of PV module at each step and monitoring power changes caused by the previous alternation. If power decreases, load is altered in opposite direction, if power increases – in the same direction. This method is simple, but has significant disadvantages – it doesn't detect MPP, so oscillations occur around it and during rapidly changing environmental conditions it can perform erratically.

As improvement of P&O, Incremental Conductance (*IncCond*) is frequently used. At each step it checks the derivative of power dP/dU , and varies the loading of the module according the result.

In Lithuania small, rapidly moving clouds are common so causing standard algorithms to operate inefficiently. Adoption of MPPT algorithms for such operating conditions involves complex systems, utilising fuzzy logic and artificial neural networks (ANN). There are examples ANN adoption for MPPT, but most of them use pre-learned ANN which is not suitable for real applications. So the aim of this work is to develop and test MPPT algorithm

based on online learning ANN, able to operate efficiently under environmental conditions, common to Lithuania.

Testing of such algorithms under operating conditions is difficult due to several reasons: environmental conditions are stochastic, so it is impossible to compare results of operation at different time periods, also conditions, suitable for desired experiment can occur after undefined amount of time, sometimes months. So it is reasonable to build solar radiation model, imitating desired conditions at desired area for development and testing of MPPT algorithms.

The common part of such model is geometry of earth rotation around the Sun and its own axis. But the attenuation of solar radiation in atmosphere and cloudiness patterns are highly dependent on location and climate, so in case of Lithuania these factors require further investigation.

2. The Development of Solar Radiation Model in Lithuania

The development of solar radiation model for Lithuanian territory, using simplified empirical equations, which are suitable for embedded systems, controlling solar energy sources is analysed. To determine the coefficient of attenuation of solar radiation, common for Lithuania, statistical solar radiation data from Kaunas and Šilutė is used. For testing of calculated coefficients the t -statistics is used and the best matching method of calculations of coefficients is chosen. Approximating statistical data using Levenberg-Marquardt least square method analytic relationship between direct and diffused solar radiation components is derived. This allows to form a model, simulating realistic solar radiation, falling to the surface of PV module, data patterns during cloudy days.

Author has published one scientific article, dedicated to the scope of this chapter (Vasarevičius, Martavičius 2011).

The solar radiation, falling to the horizontal ground plane is mostly dependent on zenith angle θ_Z and attenuation in atmosphere and extraterrestrial solar radiation on selected day $S_S(n)$.

Extraterrestrial solar radiation $S_S(n)$ depends on a distance between Sun and Earth. Approximately on July 5 the Earth is at the furthest point from the Sun – aphelion, and the first days of January and the end of December – closest to the sun – perihelion. For this reason, in the northern hemisphere summers are cooler and winters are warmer.

Zenith angle depends from observer location A geographic coordinates, distance from the sun to equator (declination) and time of day. Zenith angle in the model is calculated using following expression:

$$\cos \theta_Z = \sin \beta = \cos(\phi_{LA}) \cos \Delta \phi_M \cos \delta + \sin \phi_{LA} \sin \delta, \quad (3)$$

here: ϕ_{LA} – is the latitude angle of location A, °, $\Delta\phi_M = \phi_{MN} - \phi_{MA}$ – is the longitude difference angle between local noon ϕ_{MN} and location A ϕ_{MA} , rad, δ – distance from the sun to equator (declination) angle, rad.

The direct radiation to the plane at location A can be calculated as follows:

$$S_E(n) = \begin{cases} S_S(n)\tau \cos \theta_Z, & 0 < \theta_Z \leq \pi/2, \\ 0, & \text{othe } \theta_Z \text{ values.} \end{cases} \quad (4)$$

The attenuation of solar radiation in atmosphere τ is dependent on different factors, such as climate, air humidity, pollution etc. A common way to calculate it is to use following analytic expression:

$$\tau = a_0 + a_1 e^{-\frac{k}{\cos \theta_Z}}, \quad (5)$$

here a_0 , a_1 , and k – are the factors characterizing the attenuation of solar radiation in the atmosphere. These factors vary from mist (visibility) in the atmosphere and the observed surface height above sea level. Standard correction coefficients for these factors are given in literature. Using local statistical solar radiation data it is shown, that with standard correction coefficients solar radiation is underestimated and distribution of modeled values is not linear compared to model average.

According to the equation (5) and local statistical solar radiation data, using Levenberg-Marquardt method correction coefficients for Lithuanian territory are calculated. In Fig. 2, the results of model, with derived correction coefficients are shown. The t -test reveals, that derived model is statistically significant with confidence of 90 %.

The model of direct solar radiation is usually sufficient for analysis of solar thermal collectors, but PV modules can gain benefit also from diffused S_D and reflected S_R solar radiation components and also their performance is highly influenced by moving clouds.

To simulate the effects of cloud layer to solar radiation, using statistical data the relationship between diffused S_D and direct S_E solar radiation components is derived:

$$\psi(x) = 1.2x^{1.08} \left(\frac{1}{e^{x/0.48} - 1} \right) - 0.1x^{8.03}, \quad (6)$$

After substituting x in expression (6) with transparency ratio of the sky – $\gamma(t_{CT})$, the diffused component S_D is calculated. Then the total solar radiation, falling on the surface of PV module is calculated as follows:

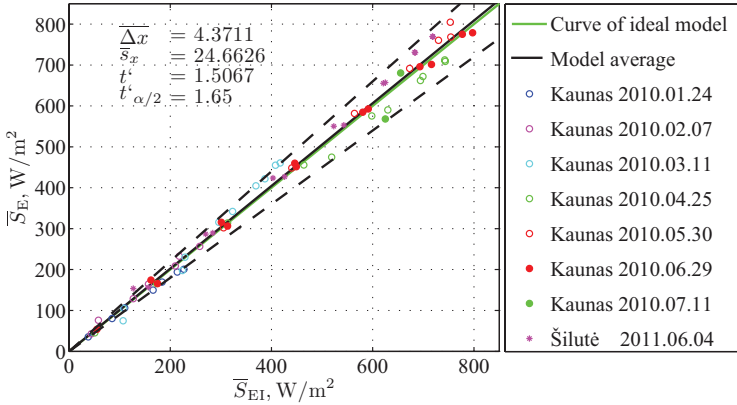


Fig. 2. The relation between measured hourly solar radiation average values $\bar{S}_{EI}$ and values $\bar{S}_E$, calculated by the model using derived correction coefficients

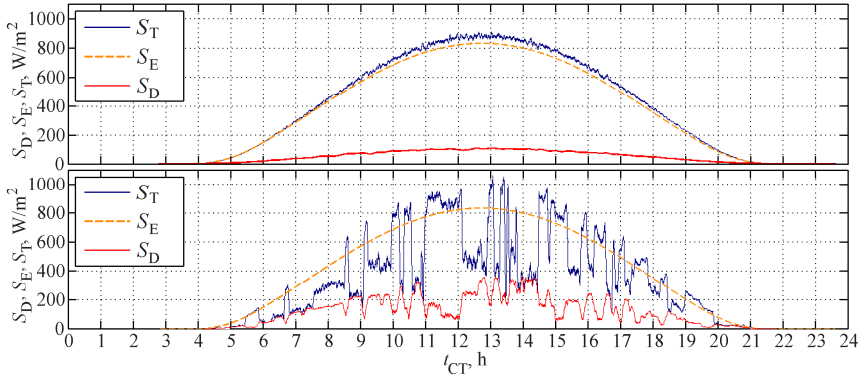


Fig. 3. Simulation of solar radiation components during a perfectly clear day (top) and a cloudy day (bottom)

$$S_T(n, t_{CT}) = \gamma(t_{CT}) S_S(n, t_{CT}) \tau \cos \theta + S_D(n, t_{CT}) + S_R(n, t_{CT}). \quad (7)$$

The presented model is implemented in *Matlab*[®]/*Simulink*[®] environment to produce real time solar radiation values on a given day of the year in any given location in Lithuania. In Fig. 3 simulation results of 3 solar radiation components during one day of June in Lithuania are presented. During a cloudy day the direct component can be totally attenuated and the diffused component increases significantly due to reflections from clouds.

Summarising it can be stated, that the developed solar radiation model can generate continuous solar radiation data patterns, comparable to those naturally occurring. The developed model is suitable for development and performance analysis of control systems for solar thermal collectors, PV panels (especially MPPT tracking algorithms) and other energy sources, utilising solar energy.

3. The Development and Investigation of the Model of Solar Power Plant With Maximum Power Point Tracking

In this chapter the structure and implementation of mathematical model of PV module is analysed and problems in determination of maximum power point tracking algorithms performance are discussed. Analytic criteria are derived for in-field estimation of maximum power point tracking performance. By simulating operation of *IncCond* algorithm under different conditions its advantages and disadvantages are analysed.

Author has published one scientific article, dedicated to the scope of this chapter (Vasarevičius, Pikutis 2012).

For analysis of MPPT algorithms a model of PV module, receiving its input from previously discussed solar radiation model is required. The model is formed by implementing a *Matlab*[®]/*Simulink*[®] block, which constantly solves output voltage of PV module U_{FEM} depending on solar radiation S_T and module temperature T_{FEM} .

The derived model allows testing not only MPPT algorithms but also different configurations of interconnections between modules and influence of partial shadows on performance of solar PV power plant (Fig. 4).

The dependence of maximum power on solar radiation and module temperature $P_m(S_T, T_{FEM})$ is a complex surface, unique to each module, so its estimation is a difficult task, requiring complex laboratory equipment. Without this data in-field estimation of MPPT performance is very difficult and leaves a lot of space for interpretation of experiments results. So two criteria are offered for estimation of MPPT performance without knowing $P_m(S_T, T_{FEM})$:

$$\varsigma = 1 - \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \left| \frac{S_T(t)}{S_T(t_{\max})} - \frac{P_{FEM}(t)}{P_{FEM}(t_{\max})} \right| dt, \quad (8)$$

$$\vartheta = k_a \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d(S_T(t) \cdot 10^{-3})}{dt} \right)^2 dt}. \quad (9)$$

The first one – ζ – is based on comparison of solar radiation and output power of the module $P_{\text{FEM}}(t)$ curves and is proportional to true efficiency of MPPT η_{dgt} . The other – $\mathcal{G}$ – describes rapidness of change of environmental conditions during the test period.

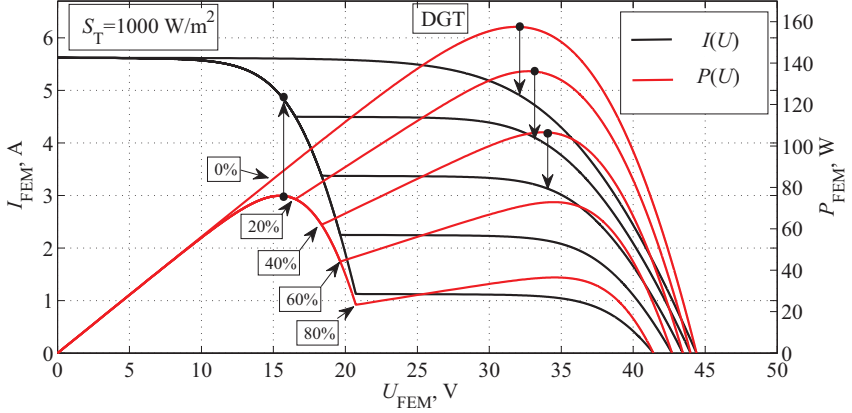


Fig. 4. V – I and power characteristics of two photovoltaic modules connected in series, when one of the modules is affected by solar radiation with intensity $S_T = 1000 \text{ W/m}^2$ and the other one is in shadow, which attenuation is expressed in percent.

To investigate the performance of *IncCond* algorithm and relevance of proposed criteria, the dependence $P_m(S_T, T_{\text{FEM}})$ was modeled and tests were performed in different conditions of operation.

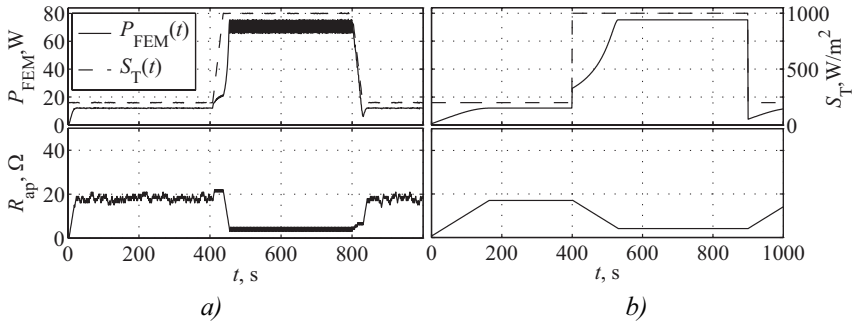


Fig. 5. Test No. 1 a) and test No. 8 b) of *IncCond* maximum power point tracking algorithm

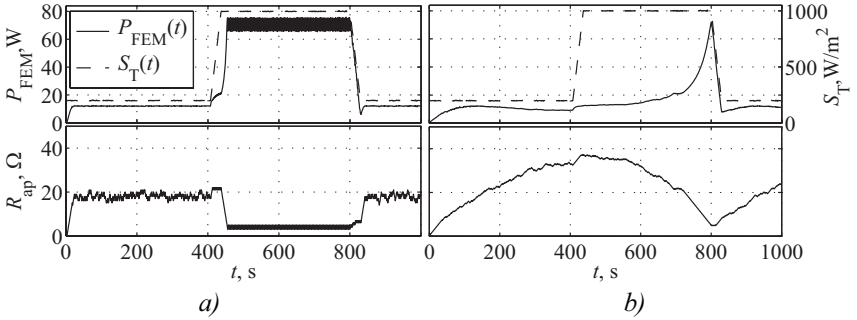


Fig. 6. Test No. 20 a) and test No. 22 b) of *IncCond* algorithm

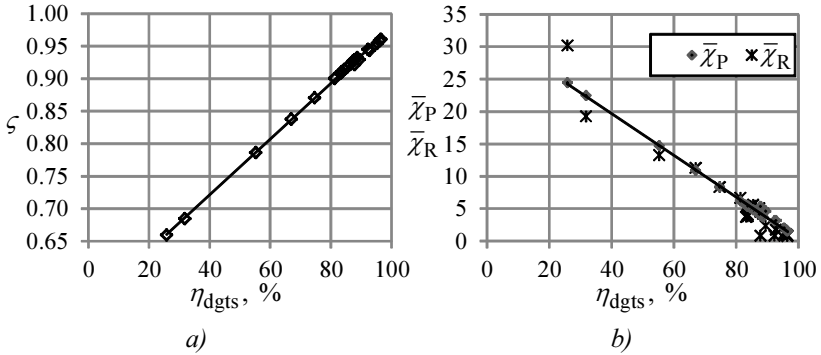


Fig. 7. Dependencies of criteria a) ζ and b) $\bar{\chi}_P$ and $\bar{\chi}_R$ on coefficient η_{dgts}

In Fig. 5 operation of *IncCond* algorithm is shown without additional noise in signal $S_T(t)$ with a) big and b) small step ΔR . It is seen that big step allows rapid reach of MPP, but gives significant oscillations around it, while with small step there are no oscillations, but MPP reach time significantly increases. In Fig. 6 the influence of noise in signal $S_T(t)$ is demonstrated. It is shown, that even small amplitude noise significantly degrades the performance of MPPT. Fig. 7 shows the relation between true MPPT efficiency η_{dgts} and proposed criteria, what confirms that these can be used for in-field performance estimation of MPPT in solar PV power plants.

4. The Improvement of the Maximum Power Point Tracking Algorithm Using Artificial Neural Networks

The goal of investigation – to develop a maximum power point tracking algorithm, based on online learning artificial neural networks, which avoids

previously described problems of standard hill climbing algorithms. Application of artificial neural networks for approximately solving nonlinear problems is discussed. After analyzing an example of similar dynamic system with radial basis function neural network, the maximum power point tracking algorithm with on line learning artificial neural networks is proposed. Investigation of developed algorithm shows, that such approach guarantees more stable and efficient operation of the system during dynamic environmental conditions.

Author has published one scientific article, dedicated to the scope of this chapter (Vasarevičius, Martavičius, Pikutis 2012).

Analyzing the results obtained in the third chapter it can be stated, that the most efficient MPPT could be obtained if dependence $P_m(S_T, T_{FEM})$ would be known. It is almost impossible to determine it for a real system. Even if it would be known, it would require significant amount of memory to store all data, covering full operating range of solar radiation S_T and temperature T_{FEM} . This can be solved by adopting ANN, which calculate approximate results from given input and has high response rate due to parallelism of calculations.

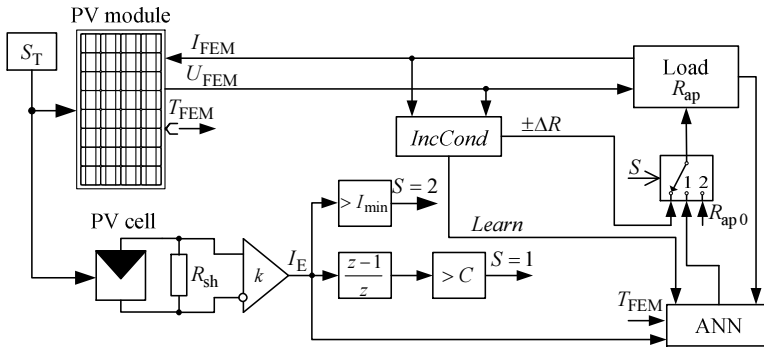


Fig. 8. Structure diagram of tracker with on-line learning ANN

Recently hardware implementations of ANN started to appear in chips like IBM ZISC036 or Cognimem CM1K. The proposed algorithm is based on source development kit, received from CM1K chip producers, so it is possible to implement it in hardware.

Due to discussed ability of *IncCond* algorithm to find MPP it is decided to use it for precise MPPT and learning of ANN. When solar radiation changes rapidly, to avoid slow rise times (Fig. 5 b)), neural network provides a guess value of optimal load. The structure diagram of MPPT tracker with on-line learning ANN is presented in Fig. 8.

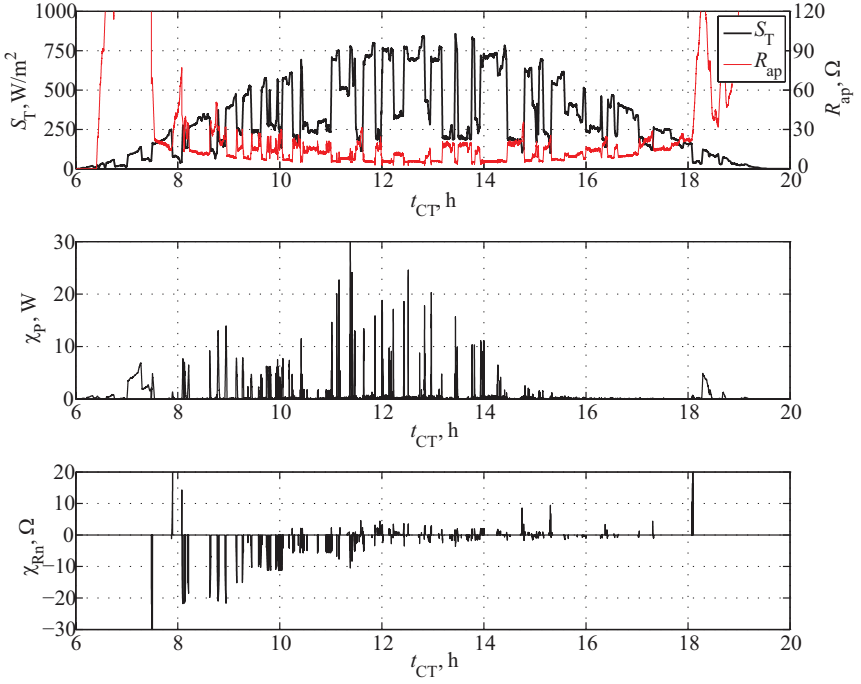


Fig. 9. Solar radiation S_T reaching the photovoltaic module, load resistance R_{ap} , the power deviation $\chi_p(t)$ and the artificial neural network guess error $\chi_{Rn}(t)$ during the cloudy day (*IncCond* with artificial neural network operation, $\Delta R = 0.3 \Omega$).

In Fig. 9 the simulation results of *IncCond* algorithm with ANN support are presented. It is seen, that at the beginning of the simulation guess errors of R_{ap} are high. During the time ANN is learning and errors are decreasing and closing to zero. High power deviation $\chi_p(t)$ is available during the first half of the day. But after noon, when SPF values start to decrease and ANN is already taught, $\chi_p(t)$ becomes very close to zero. It is shown, that trained ANN increases the responsiveness and stability of MPPT, therefore the efficiency can be as high as $\eta_{dgtS} = 99 \%$.

General Conclusions

1. The mathematical model of solar radiation, incident on a horizontal surface on selected day of the year, time of day and determined geographical

coordinates was developed. Applying t -statistics for analysis, it is shown that the model formed using the calculated correction coefficients according to statistical solar radiation data in Lithuania is statistically significant and is suitable for further applications.

2. Analytic function, relating cloudiness of the sky, direct and diffused solar radiation components was derived by approximating statistical data using Levenberg-Marquardt least squares method. Based on it the model for simulation of cloud layer is formed, which provides realistic solar radiation, incident to PV modules surface, patterns during a cloudy day. Therefore the model is suitable for development and investigation of electronic control systems of PV modules and other solar energy sources with freely chosen rotation and incline angles.

3. Simulations, performed using the developed PV module model show, that the dependence of maximum power point on solar radiation and module temperature is a complex surface, which can be determined only in special laboratory. Therefore a controller is required in electronic control system, which can determine location of maximum power point according different parameters of systems operation.

4. Analytic criteria are derived for testing MPPT algorithms. Experiments prove, that derived criterion of curve similarity ς is linearly proportional to efficiency of MPPT and is suitable for evaluation of in-field MPPT performance without knowing precise system parameters.

5. 25 simulations of *IncCond* algorithm show, due to dynamic solar radiation the performance of MPPT can fall to 83 %. The relationships between the parameters of algorithm limits *IncCond* performance to 95 %.

6. It is shown, that trained ANN allows usage of small steps ΔR , so avoiding power oscillations near MPP. Therefore the offered algorithm while neural networks are being trained reach 97 % average efficiency. Every other day average MPPT efficiency reaches 99 %.

7. Proposed structure and electronic circuit diagrams of control system of photoelectric solar plant controller model are of easily adoptable modular structure, therefore the model allows to research analyzed in this work and other photoelectric solar plant control methods and algorithms.

Recommendation

To avoid the situations, when maximum power point tracking algorithm keeps the operation point of the system in local maximum of the power characteristics, it is suggested to research the application of the artificial neural network for guessing of global maximum location in power characteristics and add additional steps to the algorithm, allowing to detect the global maximum.

List of Published Works on the Topic of the Dissertation In the reviewed scientific periodical publications

Vasarevičius D. 2010. Saulės kolektorių valdymo ir statistinių duomenų surinkimo sistema (Control and Data Acquisition System for Solar Thermal Collectors). Mokslas – Lietuvos ateitis Nr. 2(1), P. 27–31 ISSN 2029-2341

Vasarevičius D., Martavičius R. 2011. Solar Irradiance Model for Solar Electric Panels and Solar Thermal Collectors in Lithuania. Electronics and Electrical Engineering, No. 2(108), P. 3–6 ISSN 1392-1215, (Thomson Reuters Web of Science) IF=0,913.

Vasarevičius D. 2011. Atsinaujinančių šaltinių panaudojimo ir perspektyvų Lietuvoje analizė (The Analysis of the Usage and Perspectives of Renewable Energy Sources in Lithuania). Mokslas – Lietuvos ateitis Nr. 3(1), P. 73–77 ISSN 2029-2341

Vasarevičius D., Pikutis M. 2012. Matematinis saulės energijos srauto modelis didžiausios galios taško saulės elementuose sekimo algoritmams tirti (Development of Mathematical Models for Research of Maximum Power Point Tracking Algorithms). Mokslas – Lietuvos ateitis Nr. 4(1), P. 51–55 ISSN 2029-2341

Vasarevičius D., Martavičius R., Pikutis M. 2012. Application of Artificial Neural Net-works for Maximum Power Point Tracking In Photovoltaic Panels. Electronics and Electrical Engineering No. 10(126) ISSN 1392-1215, (Thomson Reuters Web of Science) IF=0,913. (Printing)

About the author

Dominykas Vasarevičius was born in Kaunas, on 24 of January 1982.

First degree in Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2004. Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2006. In 2008–2012 – PhD student of Vilnius Gediminas Technical University. At present – Assistant in Department of Electronic systems of Vilnius Gediminas Technical University.

FOTOVOLTINIŲ SAULĖS ENERGIJOS ŠALTINIŲ ELEKTRONINĖS VALDYMO SISTEMOS TYRIMAS IR TOBULINIMAS

Problemos formulavimas

2008 m. Europos Komisija Europos Sąjungos (ES) valstybėms narėms pateikė naują klimato kaitos ir energetikos sritį reguliuojančių teisės aktų paketą,

kuriame yra atsinaujinančių energijos išteklių vartojimo skatinimo direktyva. Joje numatyti privalomi reikalavimai valstybėms narėms iki 2020 m. priklausomai nuo jų finansinių pajėgumų padidinti atsinaujinančios energijos dalį galutiniuose energijos balansuose. Lietuva įpareigota pasiekti, kad energija iš atsinaujinančių šaltinių (žalioji energija) sudarytų 23 % galutinės energijos balanse.

Lyginant Lietuvos atsinaujinančios energijos naudojimo rodiklius su kitomis panašaus dydžio ES valstybėmis, galima teigti, kad Lietuva nuo kai kurių iš jų atsilieka iki 40 kartų. Ypač tai pastebima saulės energetikoje. Lietuvoje tik 2010 metais priimtas įstatymas, skatinantis saulės energijos naudojimą ūkio subjektams, tačiau tuo metu ir tai spartaus saulės energetikos augimo nepaskatino.

Kaip pagrindinę tokio lėto saulės energetikos augimo Lietuvoje priežastį galima įvardinti trūkumą tyrimų ir prieinamų duomenų apie saulės išteklius. Šiuo metu duomenys apie saulės energijos kiekį patenkantį į žemės paviršių Lietuvoje renkami dviem piranometrais, priklausančiais hidrometeorologijos tarnybai, o jų duomenys nėra viešai prieinami. Todėl priimant sprendimą investuoti į saulės jėgainę dauguma vadovaujasi susidariusiu subjektyviu įsitikinimu, kad Lietuvoje yra labai mažai saulėtų dienų.

Darbo aktualumas

Siekiant atlikti saulės energetikos galimybių Lietuvoje tyrimus taikant įprastinius statistinius metodus reikėtų didelių investicijų į įrangą ir laiko informacijai sukaupti. Šiame darbe kuriamas matematinis modelis, leidžiantis apskaičiuoti saulės spinduliuotės galios srautą (SGS, darbe dar vadinamas saulės spinduliuote) bet kuriame Lietuvos taške bet kuriuo laiku. Toks modelis leis įvertinti saulės jėgainės našumą dar prieš jos įrengimą. Modelis formuojamas taip, kad jį galima būtų taikyti ne tik prognozavimui, bet ir tiesioginiam atsinaujinančios energijos šaltinių valdymui ir valdymo sistemų tyrimui.

Iš saulės spinduliuotės gaunama elektros energija yra brangi, todėl yra siekiama maksimaliai sumažinti nuostolius dėl aplinkos sąlygų stochastiškumo tobulinant elektroninės fotovoltinių saulės jėgainių valdymo sistemas.

Sudarytas modelis naudojamas fotovoltinio saulės elemento (SE) didžiausios galios taško sekimo (DGTS) algoritmų tyrimui. To pasekoje sukuriamas efektyvus DGTS metodas, pagrįstas realiajame laike apmokomų dirbtinių neuronų tinklų (DNT) taikymu. Šis metodas yra paremtas rinkoje egzistuojančio DNT lusto specifikacijomis ir lusto gamintojų pateiktais DNT mokymo algoritmais, todėl gali būti įgyvendintas praktikoje.

Darbu siekiama ištirti saulės energijos panaudojimo Lietuvoje galimybes ir sukurti fotoelektrinių saulės jėgainių valdymo metodus, pritaikytus Lietuvos klimatinėms sąlygoms.

Taigi, darbo rezultatai yra aktualūs vykdant šalies energetinę strategiją, o taip pat ir verslui įvertinant investicijų į saulės energetiką grąžą.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – fotoelektrinių saulės jėgainių valdymo algoritmai ir jų pritaikymas Lietuvos klimatinėms sąlygoms. Saulės galios srautas, krentantis į horizontalų paviršių bet kuriame Lietuvos taške pasirinktu laiku ir jo kitimo dėsniai priklausantys nuo metų laiko ir oro sąlygų.

Darbo tikslas

Sukurti ir ištirti efektyvius, intelektualiais metodais grįstus, fotoelektrinių modulių didžiausios galios taško sekimo algoritmus, leidžiančius padidinti saulės jėgainės našumą Lietuvos klimatinėmis sąlygomis.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti siekiama išspręsti tokius uždavinius:

1. Sudaryti matematinį saulės galios srauto, krentančio į fotoelektrinių įtaisų darbinį paviršių Lietuvoje, modelį.
2. Ištirti didžiausios galios taško sekimo algoritmus taikant sudarytą Lietuvos sąlygas įvertinančią saulės spinduliuotės ir debesuotumo imitacinį modelį ir nustatyti algoritmo našumo įvertinimo kriterijus.
3. Sukurti modelius ir ištirti fotoelektrinės saulės jėgainės, veikiančios su didžiausią galią sekančiu elektroniniu valdikliu našumą, patobulinti DGTS algoritmą, tinkantį Lietuvos sąlygoms.
4. Atlikti sukurtų saulės galios srauto ir fotoelektrinės saulės jėgainės matematinių modelių patikrą.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi sistemų modeliavimo ir statistinės analizės metodai. Hipotezės tikrinamos sudarant modelius ir atliekant imitacinius skaičiavimus, vykdoma gautų rezultatų patikra.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektronikos inžinerijos mokslui reikšmingi rezultatai:

1. Sukurtas į fotoelektrinių modulių darbinį paviršių krentančio saulės spinduliuotės galios srauto Lietuvos teritorijoje matematinis modelis, įvertinantis statistiniais stebėjimo duomenimis nustatytus atmosferos silpninimo gebos koeficientus ir naujai gautą aproksimuotą priklausomybę, susiejančią dangaus debesuotumą su tiesiogine ir difuzine saulės spinduliuotės dedamosiomis.
2. Imitaciniais skaičiavimais įrodyta, kad saulės spinduliuotė Lietuvoje fotoelektrinių modulių darbo režimą keičia taip, kad norint gauti pakankamą efektyvumą reikia nuolat sparčiai suderinti jų režimą pagal aplinkos sąlygas.

3. Pasiūlyti kriterijai ir išvestos jų analitinės išraiškos skirtos fotoelektrinio modulio didžiausios galios taško sekimo valdiklio darbo efektyvumui eksploatacinėmis sąlygomis įvertinti.

4. Parinkti ir pritaikyti realiajame laike apmokomi dirbtinių neuronų tinklai didžiausios galios taško sekimo algoritmų našumui didinti, esant dinamiškoms aplinkos sąlygoms.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Remiantis šio mokslinio darbo tyrimų rezultatais gali būti projektuojamos ir tiriamos fotoelektrinės saulės jėgainės ir jų valdymo sistemos.

Sudaryti matematiniai modeliai yra tinkami saulės energijos šaltinių paviršių optimalių kampų apskaičiavimui, saulės sekimo sistemų įgyvendinimui ir elektros ar šilumos energijos kiekių, gaunamų tokiuose šaltiniuose prognozavimui.

Matematiniai modeliai yra modulinės struktūros, todėl jie gali būti taikomi įvairioms saulės šiluminių ir elektros jėgainių tyrimo užduotims bei lengvai pritaikomi kitiems tikslams.

Remiantis tyrimo rezultatais pateikta eksploatuojamos saulės jėgainės didžiausios galios taško sekimo valdiklio našumo įvertinimo metodika, pagrįsta saulės spinduliuotės ir galios fotoelektrinio modulio išėjime kreivių panašumo kriterijumi.

Darbe pasiūlytas didžiausios galios taško sekimo algoritmas, pagrįstas realiajame laike apmokomais dirbtinių neuronų tinklais ir pritaikytas įgyvendinimui naujausiais aparatiniais dirbtinių neuronų tinklų sprendimais. Pateiktos rekomenduojamos eksperimentinio maketo elektrinės principinės schemos.

Darbo rezultatai naudojami ūkio subjekto užsakomajame projekte: „Autonominės teritorijų apšvietimo sistemos sukūrimas“, užsakovas UAB „Elektros įranga“, 2012–2013 m., reg. Nr. MAS–2012/06/29–1.

Ginamieji teiginiai

1. Sudarytas pilnutinės saulės spinduliuotės modelis yra tinkamas saulės fotoelektrinių modulių ir kitų saulės energijos šaltinių su laisvai pasirenkamu pasukimo ir pavirto kampu elektroninių valdymo sistemų tyrimui ir kūrimui.

2. Eksploatacinėmis sąlygomis veikiančio saulės jėgainės valdiklio našumą galima įvertinti pasiūlytu saulės spinduliuotės ir galios fotoelektrinio modulio išėjime kreivių panašumo kriterijumi, kuris yra tiesiogiai proporcingas tikrajam didžiausios galios sekimo valdiklio naudingumo koeficientui.

3. Taikant intelektualias didžiausios galios sekimo sistemas, grįstas dirbtinių neuronų tinklų taikymu, sukurti algoritmai leidžiantys Lietuvos sąlygomis pasiekti 99 % didžiausios galios taško sekimo našumą.

Darbo apimtis

Darbo apimtis yra 113 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 96 numeruotos formulės, 39 paveikslai ir 6 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 126 literatūros šaltiniai.

Pirmajame skyriuje pateikiama literatūros analizė, nagrinėjama fotoelektros iš saulės energijos gavybos raida Lietuvoje. Išnagrinėjus fotoelektros efektą, išskiriamos pagrindinės našumo problemos ir pabrėžiama didžiausios galios taško sekimo sistemų svarba. Atliekama standartinių tokio tipo sistemų analizė ir palyginimas. Nagrinėjami matematinės saulės spinduliuotės analizės pagrindai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje aprašomas imitacinio saulės spinduliuotės galios srauto Lietuvoje modelio sudarymas remiantis ribota statistine meteorologine informacija. Atliekama sudarytų modelių patikra, sudaromas imitacinis debesų dangos modelis, skirtas didžiausios galios taško sekimo algoritmų tyrimui. Skyriaus pabaigoje formuojamos išvados.

Trečiajame skyriuje pristatomas fotovoltinės saulės jėgainės su didžiausios galios taško sekimo valdikliu imitacinis modelis, nagrinėjama didžiausios galios taško sekimo sistemų našumo įvertinimo problematika, pasiūlomi analitiniai kriterijai našumui eksploatacijos sąlygomis įvertinti. Remiantis modeliu atliekama *IncCond* algoritmo ir kriterijų patikra. Skyriaus pabaigoje formuojamos išvados.

Ketvirtajame skyriuje pasiūlomas didžiausios galios taško sekimo algoritmas taikant savaime apsimokančius dirbtinių neuronų tinklus, atliekamas jo tyrimas esant dinamiškoms oro sąlygoms ir pateikiami tyrimo rezultatai.

Bendrosios išvados

1. Sudarytas matematinis modelis saulės spinduliuotės, krentančios į horizontalų paviršių, apskaičiavimui pasirinktą metų dieną, paros laiką ir nurodytose geografinėse koordinatėse. Pritaikius *t*-statistinę analizę nustatyta, kad sudarytas modelis panaudojus korekcijos koeficientus, apskaičiuotus remiantis saulės spinduliuotės Lietuvoje matavimais, yra statistiškai reikšmingas ir yra tinkamas tolimesniam naudojimui.

2. Aproximavus statistinius duomenis Levenbergo-Markardo mažiausių kvadratų metodu, gauta analitinė funkcija susiejanti debesuotumą, tiesioginę ir difuzinę saulės spinduliuotės dedamąsias. Remiantis ja sudarytas debesuotumo modelis imituoja tikrovišką saulės spinduliuotės, debesuotą dieną krentančios į fotoelektrinio modulio paviršių kitimą, todėl jis yra tinkamas saulės fotovoltinių modulių ir kitų saulės energijos šaltinių, su laisvai pasirenkamu pasukimo ir pavertimo kampu elektroninių valdymo sistemų tyrimui ir kūrimui.

3. Atlikus imitacinius skaičiavimus su sudarytu fotovoltinio modulio matematiniu modeliu, parodyta, kad didžiausios galios taško priklausomybė

nuo saulės spinduliuotės ir temperatūros yra sudėtingas trimatis paviršius, individualus kiekvienai fotoelektrinių modulių sistemai, kuri nustatyti galima tik tam skirtoje laboratorijoje. Todėl elektroninėje valdymo sistemoje yra reikalingas valdiklis, galintis nustatyti didžiausios galios taško padėtį pagal šalutinius sistemos veikimo parametrus.

4. Analitiniu būdu išvestos didžiausio galios taško sekimo algoritmų patikros kriterijų išraiškos. Eksperimentais parodyta, kad išvestas kreivių panašumo kriterijus yra tiesiškai proporcingas didžiausios galios taško sekimo našumui, todėl šis kriterijus yra tinkamas našumo įvertinimui eksploatuojant įrenginius kai tikslios įrenginių charakteristikos yra nežinomos.

5. Atlikus 25 imitacinius *IncCond* algoritmo skaičiavimus parodyta, kad dinamiškai kintant saulės spinduliuotės signalui, didžiausios galios taško sekimo našumas gali sumažėti iki 83 %, o algoritmo parametų sąsajos riboja *IncCond* algoritmo našumą iki 95 %.

6. Įrodyta, kad apmokytas dirbtinių neuronų tinklas suteikia galimybę naudoti mažus apkrovos keitimo žingsnius, tokiu būdu išvengiant galios svyravimų. Todėl pasiūlytas algoritmas pirmąją dieną, kol neuronų tinklai yra apmokomi, pasiekia 97 % vidutinį našumą. Kiekvieną sekančią dieną vidutinis našumas siekia 99 %.

5. Pasiūlytos eksperimentinio fotoelektrinės saulės jėgainės valdymo sistemos maketo struktūrinė ir elektrinės principinės schemos yra lengvai keičiamos modulinės struktūros, todėl maketas leidžia tirti nagrinėjamus šią darbą ir kitus fotoelektrinių saulės jėgainių valdymo metodus ir algoritmus.

Rekomendacija:

Siekiant išvengti atvejų, kai didžiausios galios taško sekimo algoritmas sistemos darbo tašką palaiko lokaliai galios charakteristikos maksimume, siūloma ištirti dirbtinių neuronų tinklo taikymą nuspėjant globalaus maksimumo galios charakteristikoje padėtį ir algoritmą papildyti žingsniais, leidžiančiais jį aptikti.

Trumpos žinios apie autorių

Dominykas Vasarevičius gimė 1982 m. sausio 24 d. Kaune.

2004 m. įgijo elektronikos inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete. 2006 m. įgijo elektronikos inžinerijos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete. 2008–2012 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas ir asistentas. Šiuo metu dirba asistentu Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektroninių sistemų katedroje.

