DOR: 20.1001.1.24234931.1402.10.1.11.9
DOI: 10.52547/jrenew.10.1.153

Review Article
Received: 06/20/20
Accepted: 02/06/22

Volume 10, Issue 1, Spring & Summer 2023, p. p. 153-165
Journal of Renewable and New Energy
jrenew.ir
Print ISSN 2423-4931 Online ISSN 2676-2994

An overview on optimal control of renewable resources, methods and challenges

Mehdi Davoudi[1*], Homa Zarei Zohdi[2]

1- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin, Iran
2 - Masters student Department of Electrical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
* P.O.B. 3451745346 Qazvin, Iran, Mehdi.Davoudi@bzte.ac.ir

Received: 20 June 2020 Revised: 19 January 2022 Accepted: 6 February 2022

Abstract

Due to the negative effects of fossil fuel consumption on the environment and the need to reduce emissions in the world, the use of renewable sources, which are widely available, cost-effective and long-lasting, has been increased worldwide. Most of Renewable energy sources (for example wind and solar energy) are alternating and oscillate according to the weather conditions. Therefore, the uncertainty of energy generation by them threatens the security and reliability of the electrical power grid, and the control of the renewable resources is essential in order to improve the power grid performance. Optimal control of renewable resources enables the power grid to respond to load demand adequately at any time and it increases system reliability. The purpose of this study is to review the existing methods for optimal control of these resources and discuss the challenges that exist to control these resources in the field of sustainable development. This paper reviews the latest research in this field with the aim of helping to achieve sustainable development and smart cities and is a useful source for researchers and energy strategy planners.

Keywords: Renewable energy, optimal control, wind energy, solar energy

1. Introduction

Due to the environmental and economic problems of fossil fuel consumption, efforts to provide more sustainable energy have increased, renewable energy sources are used in power plants, and electricity generation from renewable energy has grown exponentially around the world [1]. Renewable energy is a key solution to the global climate challenge and has benefits such as reduced energy costs, environmental benefits, health benefits, and macroeconomic benefits [2-4]. In general, renewable energy sources in a power system reduce dependence on fossil fuel consumption, improve voltage characteristics and increase power system reliability [5].

High penetration of renewable sources leads to challenges of frequency and voltage stability. The most important technical issue is the difficulty of achieving frequency stability of these systems. In addition, new power systems have little inertia [6]. Therefore, the use of control and optimal control techniques for these systems is essential [7].

Existing methods in the field of renewable resource control are divided into two categories: normal control and optimal control, and the results show that optimal control has a better performance to increase network efficiency than conventional resource control. Optimal control is an extension of change calculus and a mathematical optimization method for obtaining control rules. Optimal control is a set of differential equations that describes the path of control variables and optimizes the objective function [8].

Researchers have done extensive research on the control of renewable resources and their relationship to achieving sustainable development, for example in [9] the author describes the relationship between renewable energy and sustainable development with reference to practical cases. In [10], the perspective of renewable energy in developing strategies for sustainable development is discussed. In [11], reviews the role and challenges of renewable resources in the field of sustainable development. In [12], energy management and control system with a large volume of renewable energy sources is introduced. Maintaining the frequency stability of renewable sources in low inertia microgrids is a serious challenge. In reference [13], the appropriate value of the inertial constant is adjusted along with the frequency drop coefficient of the distributed energy sources and the load frequency coefficient to improve the frequency stability. In [14] the use of renewable energy in Africa (and Turkey [15]) has been studied as case studies and various energy policies have been analyzed and the challenges of optimal control of renewable resources from the perspective of Sustainable development are addressed. In [16], offers a new way to control the voltage-frequency of renewable energy sources. In the reference [17], a control method of the power system interface for injecting renewable energy sources into the grid are developed based on the least- squares recursive-

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Check for updates

multiple output algorithm and are presented taking into account the active power management considerations.

In [18], charge frequency control (LFC) is used for renewable energy in a microgrid. Recently, advanced controllers such as fuzzy logic [19], artificial neural networks [20], and model predictive control [21] have been used in renewable systems and intelligent networks. In [22], the model predictive control is used for the optimal mode of converter switching in renewable systems and microgrids. In reference [23], the limited model predictive control for wave energy converters (WECs) is used. The proposed control strategy uses a complex nonlinear wave model and optimal control in the form of switching functions generates maximum electrical energy. In [11,24,25] Express the challenges of renewable resources in the field of sustainable development, but do not address the solutions of renewable resources to address the challenges.

This paper describes the methods of optimal control and control of renewable resources and also examines the challenges of sustainable control. Sustainable development and achieving it is a new concern of developing countries, and to achieve it, it is necessary to use and control renewable resources.

2. Material and Method

To control renewable resources, several methods are referred to in the table 1.

Table 1. Renewable resource control methods

Reference	Attributes	Method
[26]	For the renewable unit, it does not allow frequency setting because it cannot control the initial motion (wind and the sun). Frequency stability improves the benefits of each source. Easy integration of renewable energy.	Interactive control
[27,28]	Optimization of power plant output to deal with renewable energy error. Check the operational plan in four seasons.	MPC (model predictive control)
[29]	Suitable for overcoming limitations such as steady state frequency and improper amount of power. The cooperative control method is able to communicate between all existing components of the network, in addition, it has an extensive central controller for analyzing the data collected from the components.	Cooperative control
[30,31]	It has fast dynamics and does not require system model information but is complex.	intelligent control
[32]	For renewable resources, it can be designed and constructed. Due to the multi-channel structure, the large system of renewable resources chains decompose into three subsystems.	Multi-channel control system in the industry chain
[33]	Dynamic planning method uses.	Slider mode controller
[34]	Is in the form of A-B-C.	Lyapunov-based control
[35]	Reducing the effect of wind and sun fluctuations in reducing load disorders, adjustment of function reinforcement frequency	Inertia-based controller ϖ
[36,37]	Energy increases the extraction of force and improves the system and is against disruption in the system.	Slider control (SMC) for wave-producing power plants
[38]	The control design for the LCL converter is much more complicated than the L-type converter because the number is more equivalent.	Control of three-phase voltage source converter (two-ring system structure or LCL filter)
[39]	It is analyzed in two time intervals of 15 minutes. Used to quickly neutralize voltage fluctuations.	Voltage regulation control in two time intervals (VCC)
[40]	It does not require a converter and has less computation time than other methods.	Use the BESS battery to compensate for the power of the wind farm / PV system
[38]	There is no need to provide math converter and less calculation time than other methods.	Using Bess Battery to Compensate Wind Farm Power / PV

3. Results and Discussion

This article examines renewable resource control strategies and outlines the advantages and disadvantages of the methods. Using simple PI / PR controllers simultaneously or continuously is the most common method. A PID controller and a fuzzy logic controller were compared, and the results show that the performance of both controllers is similar, but since the PID controller is easier to implement, it has been selected as the best option. In addition, predictive control of the model is faster in terms of load and frequency control.

With the increase in the number of microgrids and the use of renewable energy sources, the complexity and non-linearity of power systems increases and causes that conventional and inflexible controllers do not show proper performance in a wide range of work points. Artificial neural networks have been used as one of the most powerful tools in systems optimization and intelligent processes to automatically adjust and optimize the coefficients of a classical proportional-integral (PI) controller. Optimal control is a powerful control method that provides economical use of load resources. The results show that the optimal controller is better than the conventional ACE control policy. One of the optimal design methods is H∞ / H.

4. Conclusions

Renewable energy sources are an important tool to reduce reliance on conventional fuels. However, some renewable energy sources, such as wind and solar, are intermittent and their uncertainty threatens the operational security of the electricity grid. To solve this problem, optimal resource control solutions are proposed. Our aim in this paper is to review the existing methods for controlling renewable energy in the field of sustainable development because energy is a prerequisite for development and sustainable and renewable energy systems are a prerequisite for achieving sustainable development.

In addition, in this article, the advantages and disadvantages of each of the methods of optimal control of renewable resources are identified and because the output of renewable resources is not controllable, the challenges in this field are described in detail and finally the results are examined. Consequences of the transition to sustainable energy supply will make the operation of a power system traditionally and reliably difficult in the traditional way. In particular, balancing the system will be difficult, and changes in flow direction can pose challenges. Financing risks play a much bigger role for renewable energy than fossil fuel energy. In addition to higher costs for solar and wind energy, all renewable energy sources, including hydropower, have a different investment source from fossil fuel-based energy sources. They require large investments first and then lower costs. Therefore, there is a great need for budget, so to achieve sustainable development requires cost and use of optimal control methods, and the uncontrollability of renewable resources has created challenges in the field with approaches such as meteorological forecasts to The control of these resources can be improved to some extent. Researchers interested in research in this field can study the methods of optimal control of renewable resources that are done using neural networks and address the existing challenges to achieve sustainable development. Also, the integration of methods in smart grids can significantly help to transfer a sustainable energy source.

5. References

[1] F. Delfino, G. Ferro, R. Minciardi, M. Robba, M. Rossi, and M. Rossi, Identification and optimal control of an electrical storage system for microgrids with renewables, *Sustain Energy Grids Networks*, Vol. 17, p. 100183, Mar. 2019.

[2] M. A. Usova and V. I. Velkin, Possibility to use renewable energy sources for increasing the reliability of the responsible energy consumers on the enterprise, *Proceedings - 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018*, Vol. 2018-April. pp. 1–4, 2018.

[3] A. Harjanne and J. M. Korhonen, Abandoning the concept of renewable energy, *Energy Policy*, Vol. 127, pp. 330–340, Apr. 2019.

[4] S. Daneshvari, The impact of renewable energy on the green economy. Journal of Environmental Science and Technology, 2019. (in Persian)

[5] M. Mahzarnia, A. Sheikholeslami, and J. Adabi, a Voltage Stabilizer for a Microgrid System With Two Types of Distributed Generation Resources, IIUM Engineering Journal, Vol. 14, No. 2, pp. 191–205, 2013.

[6] K. Dehghanpour and S. Afsharnia, Electrical demand side contribution to frequency control in power systems: A review on technical aspects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, pp. 1267–1276, 2015.

[7] M. Dreidy, H. Mokhlis, and S. Mekhilef, Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, No. July 2016, pp. 144–155, 2017.

[8] D. I. Gota, C. Vigu, and O. Capatana, A power consumption optimization method for a hybrid renewable energy making system, *2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2010 - Proceedings*, Vol. 3. pp. 420–423, 2010.

[9] I. Dincer, Renewable energy and sustainable development: A crucial review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2000.

[10] H. Lund, Renewable energy strategies for sustainable development, *Energy*, 2007.

[11] S. Kazemifard, L. Naji, and F. A. Taromi, Review on Renewable Energy Sources Role in Sustainable Development, pp. 34–43, 2017.

[12] H. P. Khomeini and M. Ho. Javidi, Optimal management of renewable resources and controllable loads in the smart microgrid, 2014. (in Persian)

[13] M. Hajiakbari Fini and M. E. Hamedani Golshan, Determining optimal virtual inertia and frequency control

parameters to preserve the frequency stability in islanded microgrids with high penetration of renewables, *Electric Power Systems Research*, Vol. 154, pp. 13–22, Jan. 2018.

[14] I. M. Bugaje, Renewable energy for sustainable development in Africa: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2006.

[15] K. Kaygusuz and A. Kaygusuz, Renewable energy and sustainable development in Turkey, *Renewable Energy*, 2002.

[16] A. Heidari, H. Kofigar, and J. S. Zamani, Provide a new way to control the voltage / frequency of renewable energy sources, in *3 National Conference on Fuel, Energy and Environment*, 2013. (in Persian)

[17] Faramarz Faqihi, S. Soleimani, and M. R. Shahroudi, Presenting a control strategy of power system injection of renewable energy sources in order to improve both harmonic and unbalanced flow distortion, based on EMO-RLS algorithm, *Iran. Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. Year Fourt, pp. 271–280, 2016. (in Persian)

[18] Y. Xu, C. Li, Z. Wang, N. Zhang, and B. Peng, Load Frequency Control of a Novel Renewable Energy Integrated Micro-Grid Containing Pumped Hydropower Energy Storage, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 29067–29077, 2018.

[19] C. Li, Y. Mao, J. Zhou, N. Zhang, and X. An, Design of a fuzzy-PID controller for a nonlinear hydraulic turbine governing system by using a novel gravitational search algorithm based on Cauchy mutation and mass weighting, *Applied Soft Computing*, Vol. 52, pp. 290–305, 2017.

[20] S. Prakash and S. K. Sinha, Simulation based neuro-fuzzy hybrid intelligent PI control approach in four-area load frequency control of interconnected power system, *Applied Soft Computing*,Vol. 23, pp. 152–164, 2014.

[21] Y. Zheng, J. Zhou, Y. Xu, Y. Zhang, and Z. Qian, A distributed model predictive control based load frequency control scheme for multi-area interconnected power system using discrete-time Laguerre functions, *ISA Transactions*, Vol. 68, pp. 127–140, 2017.

[22] Y. Shan, J. Hu, Z. Li, and J. M. Guerrero, A Model Predictive Control for Renewable Energy Based AC Microgrids Without Any PID Regulators, *IEEE Transactions Power Electronic*, Vol. 33, No. 11, pp. 9122–9126, 2018.

[23] M. Jama, B. F. Mon, A. Wahyudie, and S. Mekhilef, Maximum Energy Capturing Approach for Heaving Wave Energy Converters Using an Estimator-Based Finite Control Set Model Predictive Control, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 67648–67659, 2021.

[24] G. Schwerhoff and M. Sy, Financing renewable energy in Africa – Key challenge of the sustainable development goals, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75, pp. 393–401, Aug. 2017.

[25] A. Quek, A. Ee, A. Ng, and T. Y. Wah, Challenges in Environmental Sustainability of renewable energy options in Singapore, *Energy Policy*, vol. 122, pp. 388–394, 2018.

[26] D. P. Chassin, S. Behboodi, Y. Shi, and N. Djilali, H2-optimal transactive control of electric power regulation from fast-acting demand response in the presence of high renewables, *Applied Energy*, Vol. 205, pp. 304–315, Nov. 2017.

[27] L. Chen, S. Shao, Q. Xiao, L. Tarisciotti, P. W. Wheeler, and T. Dragicevic, Model Predictive Control for Dual-Active-Bridge Converters Supplying Pulsed Power Loads in Naval DC Micro-Grids, *IEEE Transactions Power Electronic*, Vol. 35, No. 2, pp. 1957–1966, Feb. 2020.

[28] A. Shetaya, A. M. A. Amin, and O. H. Abdalla, Model predictive control based power system operation planning of grid connected high share renewable energy, *2017 19th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2017 - Proceedings*, Vol. 2018-Febru. pp. 1500–1504, 2018.

[29] M. Rahmani and F. Faghihi, A Novel Fuzzy Cooperative Frequency Control Method for Islanding Microgrids comprising Renewable Energy Resources, in *2019 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI)*, pp. 230–234. 2019.

[30] D. Zhan, L. Wei, Y. Zhang, and Y. Yao, A Generalized Model of Nonisolated Multiphase DC–DC Converter Based on Novel Switching Period Averaging Method, *IEEE Transactions Power Electronic*,Vol. 30, No. 9, pp. 5181–5191, Sep. 2015.

[31] H. Saberi, S. Mehraeen, and M. M. Rezvani, Intelligent Operation of Small-Scale Interconnected DC Grids via Measurement Redundancy, *IEEE Transactions Power Electronic*, Vol. 66, No. 11, pp. 9086–9096, 2019.

[32] J. Xu, B. Tang, and X. Zhang, Large-Scale System's Multi-channel Control of Renewable Resources Industry Chain Harmonious Development, in *2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems* , Vol. 3, pp. 249–252. 2010

[33] C. X. Mu, J. X. Jin, and W. Xu, Adaptive frequency regulation strategy based integral sliding mode control for smart grid with renewable energy sources, *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, ASEMD 2015 - Proceedings*. pp. 391–392, 2016.

[34] S. Dasgupta, S. N. Mohan, S. K. Sahoo, and S. K. Panda, Lyapunov function-based current controller to control active and reactive power flow from a renewable energy source to a generalized three-phase microgrid system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 2. pp. 799–813, 2013.

[35] T. Kerdphol, F. S. Rahman, Y. Mitani, M. Watanabe, and S. Kufeoglu, Robust Virtual Inertia Control of an Islanded Microgrid Considering High Penetration of Renewable Energy, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 625–636, 2018.

[36] N. Sarrafan, J. Zarei, R. Razavi-Far, M. Saif, and M.-H. Khooban, A Novel On-Board DC/DC Converter Controller Feeding Uncertain Constant Power Loads, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*,Vol. 9, No. 2, pp. 1233–1240, Apr. 2021.

[37] A. J. Garrido, I. Garrido, M. Amundarain, M. Alberdi, and M. De La Sen, Sliding-mode control of wave power generation plants, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 48, No. 6. pp. 2372–2381, 2012.

[38] S. A. Khajehoddin, M. Karimi-Ghartemani, P. K. Jain, and A. Bakhshai, A control design approach for three-phase grid-connected renewable energy resources, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*,Vol. 2, No. 4, pp. 423–432, 2011.

[39] Y. Xu, Z. Y. Dong, R. Zhang, and D. J. Hill, Multi-Timescale Coordinated Voltage/Var Control of High Renewable-Penetrated Distribution Systems, *IEEE Transactions Power System*, Vol. 32, No. 6, pp. 4398–4408, 2017.

[40] S. Teleke, M. E. Baran, S. Bhattacharya, and A. Q. Huang, Rule-Based Control of Battery Energy Storage for Dispatching Intermittent Renewable Sources, *IEEE Transactions Sustain Energy*, Vol. 1, No. 3, pp. 117–124, Oct. 2010.

سال دهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۲، ص ص ۱۵۳-۱۶۵
فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
jrenew.ir
مقاله مروری
تاریخ دریافت: ۹۹/۰۳/۳۱
تاریخ پذیرش: ۰۰/۱۱/۱۷

مروری بر کنترل بهینه منابع تجدیدپذیر، روش‌ها و چالش‌ها

مهدی داودی[1*]، هما زارعی زهدی[2]

۱- استادیار، مهندسی برق، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، قزوین، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران
*قزوین، ۳۴۵۱۷۴۵۳۴۶، Mehdi.davoudi@bzte.ac.ir

چکیده

با توجه به تأثیرهای منفی مصرف سوخت‌های فسیلی بر محیط زیست و لزوم کاهش انتشار آلاینده‌ها، استفاده از منابع تجدید پذیر که منابعی در دسترس، مقرون به صرفه و با عمر بالاست، در سراسر جهان افزایش یافته است. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی‌های بادی و خورشیدی متناوب هستند و با تغییرات شرایط آب و هوایی در نوسان اند. بنابراین عدم قطعیت تولید انرژی توسط آن‌ها امنیت و قابلیت اطمینان شبکه را تهدید می‌کند و کنترل آن ها برای بهبود عملکرد شبکه امری ضروری است. کنترل بهینه منابع تجدیدپذیر، شبکه را قادر می‌سازد تا به تقاضای بار در هر زمان بطور مناسب پاسخ داده و قابلیت اطمینان سیستم نیز بیشتر می‌شود. هدف این مطالعه، بررسی و مرور روش‌های موجود برای کنترل بهینه این منابع بوده و چالش‌هایی که برای کنترل این منابع در زمینه توسعه پایدار وجود دارد را نیز مورد بحث قرار می‌دهد. این مقاله برای محققان و برنامه ریزان استراتژی انرژی، یک منبع مفید از جدیدترین پژوهش‌های انجام شده در این حوزه بوده، که با هدف کمک به تحقق توسعه پایدار و شهرهای هوشمند، تدوین شده است.

کلیدواژگان: انرژی‌های تجدیدپذیر، کنترل بهینه، انرژی بادی، انرژی خورشیدی

An overview on optimal control of renewable resources, methods and challenges

Mehdi Davoudi[1*], Homa Zarei Zohdi[2]

1- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Qazvin, Iran
2 - Masters student Department of Electrical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
* P.O.B. 3451745346 Qazvin, Iran, Mehdi.Davoudi@polimi.it

Received: 20 June 2020 Accepted: 6 February 2022

Abstract

Due to the negative effects of fossil fuel consumption on the environment and the need to reduce emissions in the world, the use of renewable sources, which are widely available, cost-effective and long-lasting, has been increased worldwide. Most of Renewable energy sources (for example wind and solar energy) are alternating and oscillate according to the weather conditions. Therefore, the uncertainty of energy generation by them threatens the security and reliability of the electrical power grid, and the control of the renewable resources is essential in order to improve the power grid performance. Optimal control of renewable resources enables the power grid to respond to load demand adequately at any time and it increases system reliability. The purpose of this study is to review the existing methods for optimal control of these resources and discuss the challenges that exist to control these resources in the field of sustainable development. This paper reviews the latest research in this field with the aim of helping to achieve sustainable development and smart cities and is a useful source for researchers and energy strategy planners.

Keywords: Renewable Energy, Optimal Control, Wind Energy, Solar Energy

مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص ۴ کریتیو کامنز محفوظ است

۱- مقدمه

با توجه به مشکلات زیست محیطی و اقتصادی مصرف سوخت های فسیلی، تلاش برای تأمین انرژی پایدارتر افزایش یافته است و در نیروگاه‌ها از منابع تجدیدپذیر استفاده می‌شود و تولید برق از انرژی تجدیدپذیر در سراسر جهان به صورت تصاعدی رشد کرده است [۱].

انرژی‌های تجدید پذیر به عنوان راه حل کلیدی برای چالش آب و هوایی جهان هستند و مزایایی مانند کاهش هزینه‌های انرژی، مزایای زیست محیطی، مزایای بهداشتی و مزایای اقتصاد کلان را دارند [۲-۴].

به طور کلی، منابع انرژی تجدیدپذیر در یک سیستم قدرت باعث کاهش وابستگی به مصرف سوخت فسیلی، بهبود مشخصات ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان سیستم قدرت می‌شود [۵].

نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر منجر به چالش‌های پایداری فرکانس و ولتاژ می‌شود. مهمترین مسئله فنی، مشکل دستیابی این سیستم‌ها به ثبات فرکانس است. علاوه بر این، سیستم‌های قدرت جدید دارای اینرسی کمی هستند[۶]. پس استفاده از تکنیک‌های کنترل و کنترل بهینه برای این سیستم‌ها ضروری است [۷].

روش‌های موجود در زمینه کنترل منابع تجدیدپذیر به دو دسته کنترل معمولی و کنترل بهینه تقسیم می‌شود و نتایج نشان می‌دهد که کنترل بهینه نسبت به کنترل معمولی منابع، عملکرد بهتری برای بالا بردن بازده شبکه دارد. کنترل بهینه بسطی از حسابان تغییرات و یک روش بهینه سازی ریاضی برای بدست آوردن قوانین کنترلی است. یک کنترل بهینه مجموعه معادله-های دیفرانسیل است که مسیر متغیرهای کنترلی را توصیف و تابع هدف را بهینه می‌کند [۸].

استفاده از منابع تجدیدپذیر و کنترل آن‌ها ارتباط مستقیمی با رسیدن به توسعه پایدار دارد. محققان در زمینه کنترل منابع تجدیدپذیر و ارتباط آن با رسیدن به توسعه پایدار، تحقیقات وسیعی انجام داده اند، برای مثال در مرجع [۹]، نویسنده به توصیف روابط بین انرژی تجدیدپذیر و توسعه پایدار با اشاره به موارد عملی پرداخته است. در مرجع [۱۰]، چشم انداز انرژی‌های تجدیدپذیر در تهیه استراتژی هایی برای توسعه پایدار مورد بحث قرار گرفته است. مرجع [۱۱]، به مرور نقش و چالش‌های منابع تجدیدپذیر در زمینه توسعه پایدار پرداخته است. در مرجع [۱۲]، یک سیستم مدیریت و کنترل انرژی با حجم بالایی از منابع انرژی تجدید پذیر معرفی شده است.

حفظ پایداری فرکانس منابع تجدیدپذیر در ریزشبکه‌های با اینرسی کم یک چالش جدی است. در مرجع [۱۳]، مقدار مناسب ثابت اینرسی همراه با ضریب افت فرکانس منابع انرژی توزیع و ضریب فرکانس بار برای بهبود پایداری فرکانس تنظیم شده اند. در مرجع [۱۴]، کاربرد انرژی تجدیدپذیر در آفریقا (و ترکیه [۱۵]) به عنوان مطالعات موردی مورد بررسی قرار گرفته و سیاست‌های مختلف انرژی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و به بررسی چالش‌های مربوط به کنترل بهینه منابع تجدیدپذیر از منظر توسعه پایدار پرداخته می‌شود. در مرجع [۱۶]، روشی جدید برای کنترل ولتاژ-فرکانس منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه می‌دهد. در مرجع [۱۷]، یک روش کنترلی سیستم واسط تزریق توان منابع انرژی های تجدیدپذیر به شبکه بر مبنای الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی-چندخروجی توسعه یافته و با در نظر گرفتن ملاحظات مدیریت توان اکتیو ارائه شده است. در [۱۸]، از کنترل فرکانس بار (LFC[1]) برای انرژی تجدیدپذیر در یک ریزشبکه استفاده شده است.

اخیرا در سیستم های تجدیدپذیر و شبکه های هوشمند از کنترلرهای پیشرفته توسعه یافته مانند منطق فازی [۱۹]، شبکه عصبی مصنوعی[۲۰]، کنترل پیش بین مدل [۲۱]، استفاده می شود. در [۲۲]، از کنترل پیش بین مدل برای حالت بهینه سوئیچینگ مبدل در سیستم های تجدیدپذیر و ریزشبکه ها استفاده شده است. در[۲۳]، از کنترل پیش بین مدل محدود شده برای مبدل های انرژی موج (WECs[2]) استفاده شده است. استراتژی کنترل پیشنهادی از یک مدل موج غیرخطی پیچیده استفاده می‌کند وکنترل بهینه در قالب توابع سوئیچینگ باعث می‌شود حداکثر انرژی الکتریکی تولید شود .

مراجع [۱۱،۲۴،۲۵]، چالش‌های منابع تجدیدپذیر در زمینه توسعه پایدار را بیان می‌کنند ولی راه حل های کنترلی منابع تجدیدپذیر برای رفع چالش-ها در آن‌ها دیده نمی‌شود. در این مقاله روش‌های کنترل و کنترل بهینه منابع تجدیدپذیر بیان شده است و همچنین چالش‌های کنترل پایدار بررسی شده است. توسعه ی پایدار و رسیدن به آن دغدغه جدید کشورهای در حال توسعه است و برای رسیدن به آن استفاده از منابع تجدیدپذیر و کنترل آن لازم است. در این مطالعه جدید ترین متدهای کنترل بهینه بیان شده است و محققانی که علاقه مند به پژوهش در این زمینه هستند می‌توانند از نتایج آن استفاده کنند.

ساختار مقاله در ادامه به شرح ذیل است: در بخش بعدی مواد و روش‌ها بیان شده است و در بخش سه روش‌های موجود برای کنترل و کنترل بهینه منابع تجدید پذیر ارائه شده است. در بخش چهار توسعه پایدار منابع تجدیدپذیر و در بخش پنج چالش‌های موجود در زمینه کنترل پایدار بررسی شده و در بخش شش به بحث و نتایج پرداخته شده است. در نهایت در بخش هفتم نتیجه گیری کلی بیان شده است.

۲- مواد و روش‌ها

سه نوع تکنیک برای مرور ادبیات یک پژوهش وجود دارد: مرور روایی مقاله، مرور سیستماتیک، و مرور متاآنالیز. این مقاله با بهره گیری از روش مرور روایی منابع مختلف، مانند مقاله‌ها و کتاب ها و... روش‌های موجود برای کنترل بهینه منابع تجدیدپذیر را بررسی می‌کند. مرورهای سیستماتیک و متاآنالیز اهداف تحقیقاتی مختصر و خاصی دارند. با این حال یک مرور روایی، یک هدف تحقیق کلی‌تری را برای شناسایی فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر فراهم می‌کند که برای رسیدن به توسعه پایدار، چنین سیستم‌هایی ضروری است. در این راستا با بررسی پیشینه تحقیق‌های صورت گرفته در زمینه کنترل و کنترل بهینه منابع تجدیدپذیر، روش‌ها و ویژگی‌های آن‌ها بررسی شدند. سپس به جمع بندی چالش‌هایی که برای کنترل بهینه منابع تجدیدپذیر در زمینه توسعه پایدار وجود دارد، پرداخته شد. درنهایت نتایج مطالعه برای شناسایی شکاف دانش و تحقیق‌های بالقوه آینده خلاصه شده اند.

۳-کنترل منابع تجدیدپذیر

1. Load Frequency Control
2. Wave Energy Converters

برای کنترل منابع تجدیدپذیر روش‌های مختلفی وجود دارد که در بندهای زیر به آن‌ها اشاره شده است.

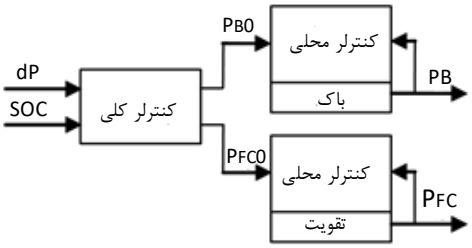
۳-۱- روش‌های کنترل منابع تجدیدپذیر

کنترل تعاملی یک الگوی چند مقیاس و چند زمانه است. تنظیم فرکانس با استفاده از سیگنال ردیابی موسوم به خطای کنترل منطقه (ACE) [۱] تنظیم می‌شود. سیگنال ACE توسط سامانه سرپرستی و گردآوری داده (اسکادا) [۲] تقریبا در هر۴ ثانیه بروز رسانی می‌شود [۲۶].

یکی از روش‌های دیگرکنترل منابع تجدیدپذیر کنترل پیش بین مدل (MPC) [۳] است که برنامه ای عملیاتی، برای حل چالش‌های بزرگ نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر، از طریق بهینه سازی خروجی نیروگاه‌های معمولی و تجدید پذیر است [۲۷]. کنترل پیش بین با استفاده از مدلی از سیستم، رفتار آینده سیستم را پیش بینی و کنترل می‌کند و با حداقل کردن یک تابع هزینه، سیگنال کنترلی بدست می‌آید [۲۸].

یک روش کنترل دیگر وجود دارد که به آن روش کنترل تعاونی گفته می‌شود. این روش کنترل، فرصتی را برای غلبه ریزشبکه‌ها بر محدودیت‌هایی مانند فرکانس حالت پایدار و مقدار نامناسب قدرت فراهم می‌کند. روش کنترل تعاونی این امکان را دارد که بین تمام مولفه های موجود شبکه ارتباط برقرار کند، علاوه بر این، دارای یک کنترلر مرکزی گسترده برای تجزیه و تحلیل داده‌های جمع آوری شده از مولفه هاست [۲۹].

روش کنترل سیستم تجدیدپذیر با پیل سوختی، ترکیبی از الکترولیزر، یک پیل سوختی، یک پشته باتری و منابع تجدید پذیر می‌تواند کنترل قدرت را در یک سیستم غیر متمرکز توزیع شده فراهم کند. سیستم کنترل پیشنهادی برای سیستم انرژی تجدید پذیر از دو سطح کنترل استفاده می‌کند که در شکل ۱ نشان داده شده است [۳۰].



شکل ۱ بلوک دیاگرام سیستم کنترل [۳۰]

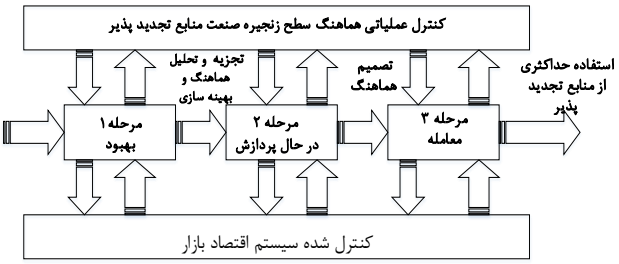
به طور کلی دو سطح کنترل شامل کنترل کننده‌های زیر است:

۱- کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) [۴]

۲- کنترل کننده منطق فازی [۳۰].

شبیه سازی‌ها نشان می‌دهد که نتایج برای هر دو کنترل کننده قابل مقایسه است. با این حال، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی، برای طراحی و پیاده سازی در میکرو کنترلر ساده تر است. سیستم کنترل به دو سطح تقسیم می‌شود: یک کنترل کننده منطقه ای که از منطق فازی برای مدیریت جریان انرژی در سیستم استفاده می‌کند و یک جفت کنترلر محلی که برای کنترل قدرت عملکرد سلول سوخت و الکترولیزر مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساختار کنترل برای کنترل کننده محلی یعنی یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی، و یک کنترلر منطق فازی مقایسه شده است و عملکرد هر دو کنترلر مشابه بوده، اما از آن جایی که کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی، برای اجرا ساده تر است، به عنوان بهترین گزینه انتخاب شده است [۳۰].

یکی از روش‌ها، کنترل چند کاناله سیستم و زنجیره صنعت است که می تواند برای منابع تجدید پذیر طراحی و ساخته شود. زنجیره صنعت که در شکل ۲ نشان داده شده است، مدل عملیاتی هماهنگ زنجیره صنعت منابع تجدید پذیر را به سه زیر سیستم تجزیه می‌کند [۳۱].



شکل ۲ ساختار کنترل چند کانالی در حال فعالیت هارمونی زنجیره صنعت منابع تجدید پذیر [۳۱]

منابع انرژی تجدید پذیر یک وسیله مهم برای کاهش اتکا به سوخت‌های معمولی است. با این حال، برخی از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و انرژی خورشیدی متناوب هستند و عدم اطمینان آن‌ها امنیت عملیاتی شبکه را تهدید می‌کند. برای حل این مشکل، این مطالعه استفاده از فواصل زمانی را برای مدل سازی توان تولیدی از منابع انرژی تجدیدپذیر و تقاضای بار انرژی ارائه می‌دهد و براین اساس یک مدل کنترل ولتاژ، یعنی مدل بهینه سازی توان راکتیو ایجاد می‌کند. یک رویکرد کلی برای امنیت ولتاژ در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل بهینه سازی توان راکتیو (PRO) [۵] است. بهینه سازی توان راکتیو برای کاهش هزینه های عملیاتی شبکه برق با بهبود کیفیت ولتاژ تحت یک سری محدودیت های عملیاتی و امنیتی اعمال می‌شود و مشکلات بهینه سازی توان راکتیو توسط هر دو الگوریتم هوش کلاسیک و هوش مصنوعی حل شده است [۳۲].

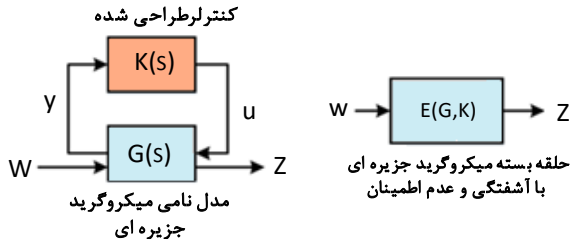
کنترل کننده حالت کشویی یکپارچه که به عنوان یک تنظیم کننده اصلی فرکانس است و از روش برنامه نویسی پویا به عنوان تنظیم کننده آنلاین برای بهبود ظرفیت تطبیقی استفاده می‌شود. در تنظیم کننده فرکانس حالت کشویی برای حل مشکلات از کنترل غیر خطی استفاده شده است [۳۳].

در مرجع [۳۴]، یک تکنیک کنترل جریان برای اینورتر سه فاز پیشنهاد شده است و یک مدل کلی از اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده جریان سه فاز در قالب a-b-c ارائه شده است و همچنین برای تسهیل کنترل اینورترها از کنترلر مبتنی برلیاپانوف [۶] به طور مستقیم در قالب a-b-c پیشنهاد شده است.

در ریزشبکه (میکروگرید [۷]) هایی که منابع انرژی تجدیدپذیر نفوذ بالایی دارد، عدم اینرسی سیستم به دلیل جایگزین منابع انرژی تجدیدپذیر با واحدهای تولید سنتی، باعث تأثیر نامطلوب بر پایداری فرکانس و در نتیجه

1. Area Control Error
2. Supervisory Control And Data Acquisition
3. Model Predictive Control
4. Proportional Integral Derivative Controller
5. Power Reactive Optimization
6. Lyapunov
7. Micro-Grid

تضعیف ریزشبکه می‌شود. برای مقابله با این چالش، روش کنترل مقاوم H∞ با در نظر گرفتن حلقه کنترل اینرسی مجازی اجرا می‌شود. اصل طراحی کنترل بر پایه H∞ است و در شکل ۳ نشان داده شده است [۳۵].

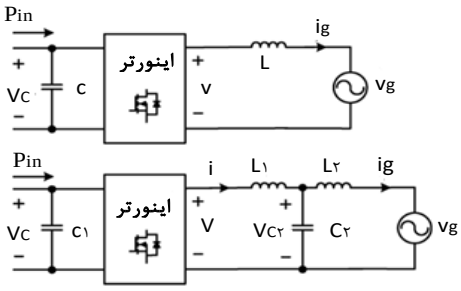


شکل ۳ ریزشبکه حلقه بسته جزیره ای با کنترل H∞[۳۵]

تکنیک قوی H∞ برای حل مسائل کنترل بی تحرک مجازی در رابطه با نفوذ زیاد در منابع طبیعی انجام شده است. کنترل کننده اینرسی (بی تحرک) مجازی مبتنی بر H∞ به منظور کاهش تاثیر نوسانات باد و خورشید، اختلال در بار و همچنین اختلال پویا طراحی شده است و نتایج نشان می‌دهد کنترل کننده اینرسی مجازی مبتنی بر H∞ می‌تواند به طور موثری فرکانس ریزشبکه را تنظیم کرده و عملکرد قوی را تنظیم کند [۳۵]. ویژگی مهم این روش در این است که نامعینی می‌تواند در ماتریس سیستم، ماتریس ورودی و ماتریس خروجی وجود داشته باشد و برای تخمین حالت‌های سیستم از رؤیت‌گر دینامیکی توسعه یافته استفاده شده است [۳۶].

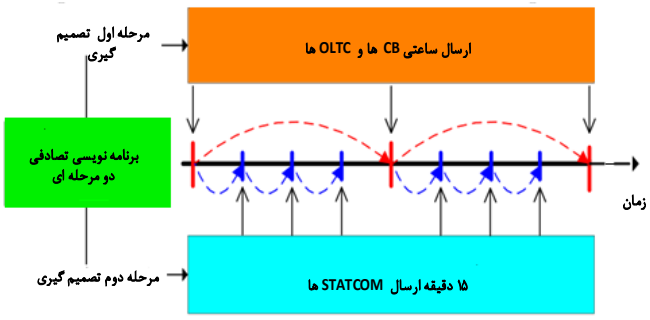
یک روش کنترل مد لغزشی (SMC[1]) جدید برای نیروگاه‌های تولید موج (OWC[2]) ارائه داده شده است و با توجه به ماهیت کنترل ساختار متغیر (VSC[3])، این کنترل تحت عدم قطعیت ناشی از خطا های پارامتری یا اختلال در سیستم مقاوم است [۳۷].

روشی برای طراحی سیستم کنترل برای مبدل منبع ولتاژ سه فاز ارائه شده است که یک منبع انرژی تجدیدپذیر را از طریق یک نوع خروجی به شبکه متصل می‌کند. نمودار بلوک یک سیستم انرژی تجدید پذیر متصل به شبکه سه فاز در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۴ نمودار بلوک مبدل با خروجی فیلتر نوع L و LCL را نشان می‌دهد [۳۸].



شکل ۴ نمودار بلوک مبدل تک خط با فیلتر نوع خروجی L (بالا) یا فیلتر نوع LCL (پایین) [۳۸]

روشی دیگر برای کنترل، تنظیم ولتاژ در دو بازه زمانی است. افزایش تعداد عملکرد اینگونه دستگاه‌ها می‌تواند به طرز چشمگیری عمر آن‌ها را کاهش دهد. در نتیجه، برای خنثی کردن سریع نوسانات ولتاژ از اینورترها استفاده می‌شود تا بتواند پشتیبانی سریع واکنش را در برابر انحراف سریع ولتاژ ارائه دهد. چارچوب کنترل ولتاژ (VVC)[4] در شکل ۵ نشان داده شده است [۳۹].



شکل ۵ چارچوب کنترل ولتاژ (کنترل VCC)[۳۹]

تلفیق سیستم ذخیره انرژی باتری (BESS)[5] با یک سیستم فتوولتائیک خورشیدی (PV[6]) یا یک مزرعه بادی می‌تواند، منابع تجدیدپذیر متناوب را به حالت کارکرد درآورد [۴۰].

پیش بینی انرژی باد هنوز در مرحله اولیه است و کنترل و تنظیم خروجی آن بسیار پیچیده‌تر از سایر منابع انرژی است. یک روش کنترل مبتنی بر سیستم ذخیره انرژی باتری (BESS) ارائه شده است تا طراحی بهینه و عملکرد هماهنگ استراتژی کنترل را برای یک ریزشبکه نشان دهد. این سیستم از ولتاژ و سیگنال جریان باتری نمونه برداری می‌کند، وضعیت باتری را ارزیابی می‌کند، میزان انرژی را کنترل می‌کند و با استفاده از ماژول جهانی ارتباطات برای موبایل پیام هایی را به اپراتور می‌فرستد [۴۱].

یک کنترلر برای انتقال توان تولید شده توسط واحد تجدیدپذیر به شبکه طراحی شده که شامل یک حلقه کنترل جریان داخلی و یک حلقه کنترل ولتاژ بیرونی است. کنترل کننده ولتاژ H_v، ولتاژ باس DC را در یک مقدار مشخص حفظ می‌کند. کنترلر H، ولتاژ مرجع را برای اینورتر مشخص می‌کند. ولتاژ مرجع به واحد مدلاسیون پهنای پالس[7] تغذیه می‌شود. هارمونیک فرکانس سوئیچینگ در جریان با فیلترLCL[8] درج شده بین اینورتر و شبکه ضعیف می‌شود، و می‌توان نتیجه گرفت که با این روش کنترل، واحدهای تولیدی تجدیدپذیر با قابلیت فیلتر فعال، ممکن است نقش مهمی در مدیریت کیفیت انرژی در سیستم‌های آینده انرژی داشته باشد [۴۲]. جدول ۱ نشان دهنده‌ی روش‌های کنترل منابع تجدیدپذیر است.

1. Sliding Mode Control
2. Oscillating Water Column
3. Variable Structure Control

4. Voltage/Var Control
5. Battery Energy Storage System
6. Photovoltaic
7. Pulse Width Modulated
8. LCL Filter

جدول ۱ روش‌های کنترل منابع تجدید پذیر

روش	ویژگی ها	منبع
کنترل تعاملی	برای واحد تجدید پذیر امکان تنظیم فرکانس را ندارد چون نمی‌تواند حرکت اولیه (باد و خورشید) را کنترل کند. ثبات فرکانس را بهبود می‌بخشد و از مزایا هر منبع استفاده می‌کند. ادغام انرژی تجدید پذیر را آسان می‌کند.	[۲۶]
MPC(کنترل پیش‌بین مدل)	خروجی نیروگاه انرژی تجدید پذیر را برای مقابله با خطا بهینه سازی می‌کند. عملکرد گذرا بهینه شده با محدودیت ها دارد اما نیازمند محاسبات بالایی است.	[۲۷،۴۳]
کنترل تعاونی	برای غلبه بر محدودیت‌هایی مانند فرکانس حالت پایدار و مقدار نامناسب توان مناسب است. روش کنترل تعاونی این امکان را دارد که بین تمام مولفه های موجود شبکه ارتباط برقرار کند، علاوه بر این، دارای یک کنترلر مرکزی گسترده برای تجزیه و تحلیل داده‌های جمع آوری شده از مولفه‌ها است	[۲۹]
کنترل هوشمند	دینامیک سریع دارد و نیاز به اطلاعات مدل سیستم نیست اما پیچیده است.	[۴۴،۴۵]
کنترل چند کاناله سیستم در زنجیره صنعت	برای منابع تجدید پذیر قابل طراحی و ساختن است. با توجه به ساختار چند کاناله سیستم بزرگ زنجیره ای صنعت منابع تجدید پذیر را به سه زیر سیستم تجزیه می‌کند.	[۳۱]
کنترل کننده حالت کشویی	از روش برنامه ریزی پویا استفاده می‌کند.	[۳۳]
کنترل مبتنی بر Lyapunov	در قالب a-b-c است.	[۳۴]
کنترل کننده اینرسی مبتنی بر H∞	باعث کاهش تاثیر نوسانات باد و خورشید، کاهش اختلالات بار، تنظیم فرکانس و تقویت عملکرد سیستم می‌شود.	[۳۵]
کنترل مد لغزشی (SMC) برای نیروگاه های موج	انرژی استخراج نیرو را افزایش می‌دهد و سیستم را بهبود می بخشد و در برابر اختلال در سیستم مقاوم بوده و دینامیک سریع دارد و دارای پیاده سازی ساده است.	[۳۷،۴۶]
کنترل مبدل منبع ولتاژ سه فاز (ساختار سیستم دو حلقه ای یا فیلتر LCL)	طراحی کنترل برای مبدل LcL بسیار پیچیده تر از مبدل نوع L است زیرا تعداد معادله بیشتری دارد.	[۳۸]
کنترل تنظیم ولتاژ در دو بازه زمانی (VCC)	در دو بازه زمانی ساعتی و ۱۵ دقیقه ای تجزیه و تحلیل می‌شود. برای خنثی کردن سریع نوسانات ولتاژ استفاده می‌شود.	[۳۹]
استفاده از باتریBESS برای جبران توان سیستم مزرعه بادی / PV	نیاز به تهیه مبدل ندارد و نسبت به سایر روش‌ها زمان محاسبه کمتری دارد.	[۴۰]

۳-۲- روش‌های کنترل بهینه منابع تجدید پذیر

کنترل بهینه یک روش کنترل قوی است که استفاده اقتصادی از منابع را فراهم می‌کند. یکی از روش‌های کنترل بهینه روش طراحی H∞/H است. این روش به آسانی قابل اجرا و دارای خروجی استاتیک است [۲۶].

ریزشبکه یک استراتژی کنترل بهینه است که در آن امکان به حداقل رساندن کل هزینه عملیاتی شبکه وجود دارد. اپراتور ریزشبکه به منظور انجام توزیع برق به مشتریان متمرکز شده است. در عین حال با فرض اینکه تمام توانی که توسط منابع انرژی تجدیدپذیر تولید شده است درون ریزشبکه تزریق می شود، انتشار آلاینده ها به حداقل می‌رسد.

کنترل در دوسطح بالا و پایین پیشنهاد می‌شود: کنترل سطح پایین غیر متمرکز است و توسط کنترل کننده های محلی ژنراتور های قابل برنامه ریزی انجام می‌شود. کنترل سطح بالا: بهینه سازی اقتصادی عملکرد ریزشبکه را انجام می‌دهد. برنامه‌های کنترل به گونه ای طراحی شده است که هر نوع ژنراتور قادر است در هر حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای (ریزشبکه مستقل) فعالیت کند [۴۷،۴۸].

نتایج نشان می‌دهد برای ارزیابی عملکرد یک کنترلر پیشنهادی برای یک ریزشبکه، که از یک سیستم انرژی باد، یک بار، یک عنصر ذخیره و سیستم

ارتباط با شبکه تشکیل شده است، از روش بهینه سازی توسط شبیه سازی های رایانه ای استفاده شده و نتایج عددی که یافتن راه حل‌های بهینه امکان پذیر را نشان می‌دهد که باعث بهبود شرایط کار ریز شبکه است، و در نتیجه کنترل محلی ژنراتورها بدست آمده است [۴۹،۵۰].

یک روش کنترل برداری برپایه شبکه عصبی برای اینورتر تک فاز با فیلتر LCL، یک کنترل بهینه است و شبکه عصبی براساس اصل برنامه نویسی پویا تطبیقی است. کنترل بردار شبکه عصبی با استفاده از روش کنترل برداری مبتنی بر PI[1] و روش کنترل مبتنی بر PR[2] برای اینورترهای تک فاز در مقایسه با روش‌های معمولی کنترل شبکه امکان حفظ نمونه برداری پایین و فرکانس سوئیچینگ پایین را فراهم می‌کند. اینورترهای متصل به شبکه، به عنوان رابط بین منابع انرژی تجدیدپذیر و شبکه در کاربردهای فتوولتائیک در مقیاس کوچک نقش مهمی دارند. در فناوری‌های موجود، فناوری‌های اصلی برای کنترل اینورتر تک فاز شامل روش کنترل برداری مبتنی بر PI و روش کنترل مبتنی بر PR است. کنترل برداری مبتنی بر PI برای کنترل اینورتر-های سه فاز متصل به شبکه به دلیل مزایای خوبی که دارد استفاده می-شود[۵۱].

کنترل کننده شبکه عصبی کنترل بهینه را براساس اصل برنامه نویسی پویا پیاده سازی می‌کند. نتایج شبیه سازی و تجربی نشان می‌دهد که تکنیک کنترل شبکه عصبی عملکرد برتری از روش‌های معمولی کنترل دارد [۵۱].

روش های کنترل و کنترل بهینه منابع تجدیدپذیر در بخش ۳ بیان شد و در بخش بعدی کنترل منابع تجدیدپذیر از منظر توسعه پایدار بررسی می-شود.

۴- کنترل منابع تجدیدپذیر از منظر توسعه پایدار

استفاده از سیستم فتوولتائیک راه حلی برای بحران سه گانه یعنی بحران اقتصادی، آب و هوا و انرژی است. MRDEG [3] (سیستم تولید انرژی توزیع شده با چند منبع تجدید پذیر) برای تولید و توزیع برق با استفاده از انرژی خورشیدی اجرا می‌شود که پتانسیل دارد گازگلخانه ای را به میزان ۱۵٪ کاهش دهد و در صنعت جهانی ۸۰۰ میلیارد هزینه انرژی سالانه صرفه جویی کند [۵۰].

محدودیت منابع سوخت فسیلی، همه را به سمت راه های جایگزین دیگر برای برآورده کردن نیازهای انرژی آینده و بهینه سازی استفاده از منابع موجود سوق داده است. منابع انرژی تجدیدپذیر متنوعی از قبیل باد، سلول فتوولتائیک، هیدرو، زیست توده، سوخت‌های زیستی و غیره و.... قصد دارند نقش مهمی در توسعه پایدار انرژی ایفا کنند [۵۲]. نظرسنجی از ۱۳۲کشورجهان نشان می‌دهد که کشورهایی تمایل بیشتری به استفاده از منابع تجدیدپذیر دارند، از نظر توسعه پایدار دارای رتبه بالایی هستند. با این وجود، راه‌های استفاده از این منابع با چالش‌های جدید بسیاری در برنامه ریزی، اجرا و مدیریت مواجه است. فرآیند انتخاب فناوری به شاخص‌های مختلف فنی و تجاری وابسته است [۵۳].

منابع تجدیدپذیر مستقل از شبکه به دلیل وابستگی به شرایط آب و هوایی عملکرد مطلوبی ندارند. اتصال ترکیبی منابع مختلف و یا دستگاه‌های ذخیره ساز، قابلیت اطمینان سیستم را بهبود می‌بخشد [۵۳]. توسعه زیر ساخت‌های سیستم‌های قدرت موجود فناوری اطلاعات و ارتباطات برای تحقق سناریوهای انرژی پایدار بسیار مهم است. اتحادیه اروپا ادغام منابع تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ را برای توسعه پایدار در نظردارد. سلول‌های فتوولتائیک و سیستم بادی باید توسط فناوری‌هایی مانند ریزشبکه و فناوری اطلاعات و ارتباطات(ICT) [4] پشتیبانی شوند [۵۳].

۵- چالش‌های کنترل پایدار منابع تجدیدپذیر

تأمین انرژی پایدار اصول حاکم بر عملکرد سیستم برق امروزی را تضعیف می کند. دلایل این امر موارد زیر است:

۱. خروجی ژنراتورهایی که از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند توربین-های بادی و پنل‌های خورشیدی استفاده می‌کنند، قابل کنترل نیستند زیرا این امر به منبع انرژی اصلی و آب و هوا بستگی دارد. بنابراین، ژنراتورها به سختی می‌توانند در حفظ تعادل سیستم نقش داشته باشند. در نتیجه الگوی تنظیم نسل برای پیروی از مصرف دیگر وجود ندارد. چگالی انرژی منابع تجدیدپذیر بسیار کمتر از سوخت‌های فسیلی و اورانیوم است. در نتیجه، سهم فزاینده منابع انرژی تجدید پذیر در تأمین انرژی، منجر به افزایش فضا مورد نیاز برای تولید این انرژی خواهد شد. به ویژه در کشورهای پرجمعیت، این امر منجر به ترکیبی از تولید انرژی با سایر فعالیت‌ها، از جمله مسکن یا مشاغل خواهد شد [۵۴].

۲. مبدل‌های نیروگاه‌های تولید برق مبتنی بر تجدیدپذیر و همچنین مبدل‌های خطوط انتقال (VSC-HVDC) [5] ولتاژ بالا را به شبکه اصلی پیوند می‌دهند. کنترل تزریق کنونی، همان طور که در حال حاضر تقریباً در تمام کنترل‌های توربین‌های بادی اجرا می‌شود، در شبکه‌های تحت سلطه در ورودی‌های مبدل مانند مزارع بادی فراساحلی مناسب نیست [۵۵].

۳. اثرات زیست محیطی در سایر مراحل چرخه عمر سیستم بسیار زیاد است. بنابراین، پایداری زیست محیطی انرژی تجدیدپذیر به جنبه‌های زیادی در کل چرخه عمر سیستم بستگی دارد [۲۵].

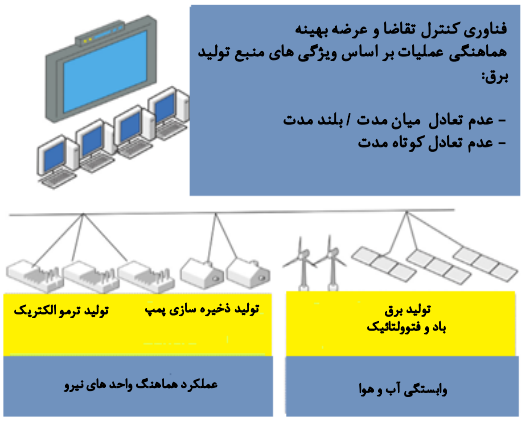
۴. شبکه توزیع باید بتواند ضمن بهبود کیفیت تامین برق و کنترل هزینه چالش‌هایی مانند مشکل‌های انرژی تجدیدپذیر و کنترل تقاضای انرژی را برطرف کند [۵۶]. پایداری سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر نیاز به چشم انداز چرخه عمر دارد و فقط به منابع انرژی و رویکرد تولید بستگی ندارد [۲۵].

۵. ریسک‌های تامین مالی برای منابع انرژی تجدیدپذیر نسبت به انرژی سوخت فسیلی بیشتر است. علاوه بر هزینه بالاتر برای انرژی خورشیدی و باد، کلیه منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله نیروگاه آبی نیاز به سرمایه گذاری بیشتری نسبت به منابع انرژی مبتنی بر سوخت فسیلی دارند. به طوری که در ابتدا به سرمایه گذاری‌های بزرگ نیاز دارند و پس از آن هزینه‌های کمتری خواهند داشت [۲۴].

اتخاذ تدابیر کنترلی مناسب به منظور حفظ تأمین مداوم برق برای مشتریان از چالش‌های مطرح شده است [۵۶]. استفاده گسترده انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های برق، مشکل‌های فنی را به ویژه برای اپراتورهای

1. Proportional Integral
2. Proportional-Resonant
3. Multi-Source Renewable Distributed Energy Generation system
4. Information and Communications Technology
5. Voltage Sourced Converter-High Voltage Direct Current

شبکه ایجاد می‌کند. در حقیقت، ادغام تولید غیر متمرکز منجر به عملکرد دو طرفه شبکه هایی می‌شود که بطور سنتی برای انتقال انرژی فقط از یک جهت طراحی شده اند. مورد دوم مربوط به مدیریت و کنترل سیستم تولید متناوب در شبکه برق است. شکل ۶ برنامه ریزی تقاضا و تأمین برای شرکت-های برق و اپراتورهای شبکه برای حفظ تعادل و ثبات سیستم را نشان می-دهد [۵۶].



شکل ۶ برنامه ریزی تقاضا و تأمین برای شرکت های برق و اپراتورهای شبکه [۵۶]

هواشناسی همچنین نقش مهمی در بهبود ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌ها دارد. بنابراین، شکاف اندک بین پیش بینی‌ها و تولید به منظور حفظ تعادل بین عرضه و تقاضا و در نتیجه حفظ تعادل سیستم رضایت بخش خواهد بود و پایداری شبکه با توانایی دستیابی به تعادل بین تولید و مصرف مرتبط است [۵۶].

۶- بحث ونتایج

این مقاله به بررسی استراتژی‌های کنترل منابع تجدیدپذیر پرداخته است و ویژگی روش‌ها بیان شده است. استفاده ازکنترل کننده‌های ساده PI/PR به صورت همزمان یا ثابت رایج ترین روش است. یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) و یک کنترلر منطق فازی مقایسه شد و نتایج نشان می‌دهد که عملکرد هر دو کنترلر مشابه است اما از آن جایی که کنترلر PID برای اجرا ساده تر است، به عنوان بهترین گزینه انتخاب شده است. همچنین کنترل پیش بین مدل در زمینه کنترل بار و فرکانس سریعتر عمل می‌کند. با افزایش تعداد ریزشبکه‌ها و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، میزان پیچیدگی و غیر خطی بودن سیستم‌های قدرت افزوده شده و سبب می‌شود که کنترل کننده‌های مرسوم و غیر منعطف، کارایی مناسبی را در بازه وسیعی از نقاط کار نشان ندهند. از این رو احتیاج به روش های کنترلی هوشمندتر و بهینه‌تر بیش از پیش احساس می‌شود. شبکه‌های عصبی به عنوان یکی از قوی ترین ابزارها در فرایندهای بهینه سازی و هوشمندسازی سیستم ها به کار گرفته شده است تا ضرایب یک کنترل کننده کلاسیک تناسبی- انتگرالی (PI) را به صورت خودکار تنظیم و بهینه نماید. کنترل بهینه یک روش کنترل قوی است که استفاده اقتصادی از منابع بار را فراهم می‌کند. از جمله روش کنترل روش طراحی بهینه H∞/H است که به آسانی قابل اجرا با اجزای کنترل بازخورد خروجی استاتیک است.

۷- نتیجه گیری

منابع انرژی تجدیدپذیر یک وسیله مهم برای کاهش اتکا به سوخت‌های معمولی است با این حال، برخی از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و انرژی خورشیدی متناوب هستند و عدم قطعیت آن‌ها امنیت عملیاتی شبکه برق را تهدید می‌کند. برای حل این مشکل، راه حل‌های کنترل بهینه منابع مطرح می‌شود. هدف ما در این مقاله بررسی روش‌های موجود برای کنترل انرژی منابع تجدید پذیر در زمینه توسعه‌ی پایدار است چرا که انرژی پیش نیاز توسعه است و سیستم های انرژی پایدار و تجدیدپذیر پیش نیاز رسیدن به توسعه پایدار است.

همچنین در این مقاله ویژگی هر یک از روش‌های کنترل بهینه منابع تجدید پذیر مشخص شده و چون خروجی منابع تجدیدپذیر قابل کنترل نیست چالش‌هایی که در این زمینه موجود است به تفضیل بیان شده است و در آخر نتایج مورد بررسی قرار گرفته شده است. ریسک‌های تأمین مالی نقش بسیار بیشتری برای انرژی تجدیدپذیر نسبت به انرژی سوخت فسیلی ایفا می‌کنند. علاوه بر هزینه بالاتر برای انرژی خورشیدی و باد، کلیه منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله نیروگاه آبی دارای منبع سرمایه گذاری متفاوت از منابع انرژی مبتنی بر سوخت فسیلی هستند. بنابراین نیاز زیادی به بودجه وجود دارد پس برای رسیدن به توسعه پایدار نیازمند هزینه و استفاده روش‌های کنترل بهینه است و قابل کنترل نبودن منابع تجدیدپذیر چالش‌هایی را در این زمینه ایجاد کرده است که با رویکردهایی مثل پیش بینی‌های هواشناسی تا حدی می‌توان کنترل این منابع را بهبود بخشید. محققانی که علاقه مند به پژوهش در این زمینه هستند می‌توانند به رفع چالش‌های موجود برای رسیدن به توسعه پایدار و بررسی روش‌های کنترل بهینه منابع تجدیدپذیرکه با استفاده ازشبکه عصبی انجام می‌شود، بپردازند. همچنین ادغام روش‌های کنترلی موجود در شبکه‌های هوشمند به طور قابل توجهی می‌تواند نسبت به انتقال یک منبع انرژی پایدار کمک کند.

۸- سپاسگزاری

بدینوسیله از حمایت دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره) – مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۹- مراجع

[1] F. Delfino, G. Ferro, R. Minciardi, M. Robba, M. Rossi, and M. Rossi, Identification and optimal control of an electrical storage system for microgrids with renewables, *Sustain. Energy Grids Networks*, Vol. 17, pp. 100183, Mar. 2019.

[2] S. Daneshvari, The impact of renewable energy on the green economy. Journal of Environmental Science and Technology, Vol. 21, No. 12, 2019. (in Persian)

[3] A. Harjanne and J. M. Korhonen, Abandoning the concept of renewable energy, *Energy Policy*, Vol. 127, pp. 330–340, Apr. 2019.

[4] M. A. Usova and V. I. Velkin, Possibility to use renewable energy sources for increasing the reliability of the responsible energy consumers on the enterprise, *Proceedings -2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives, ACED 2018*, Vol. pp. 1–4, 2018.

[5] M. Mahzarnia, A. Sheikholeslami, and J. Adabi, a Voltage Stabilizer for a Microgrid System With Two Types of Distributed Generation Resources, IIUM Engineering Journal, Vol. 14, No. 2, pp 191–205, 2013.

[6] K. Dehghanpour and S. Afsharnia, Electrical demand side contribution to frequency control in power systems: A review on technical aspects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, pp. 1267–1276, 2015.

[7] M. Dreidy, H. Mokhlis, and S. Mekhilef, Inertia response and

frequency control techniques for renewable energy sources: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 69, no. July 2016, pp. 144–155, 2017.
[8] D. I. Gota, C. Vigu, and O. Capatana, A power consumption optimization method for a hybrid renewable energy making system, *2010 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2010 - Proceedings*, Vol. 3. pp. 420–423, 2010.
[9] I. Dincer, Renewable energy and sustainable development: A crucial review, *Renew Sustain energy Rev.*, 2000.
[10] H. Lund, Renewable energy strategies for sustainable development, *Energy*, 2007.
[11] S. Kazemifard, L. Naji, and F. A. Taromi, Review on Renewable Energy Sources Role in Sustainable Development, Vol. 4, No. 1,pp. 34–43, 2017.
[12] H. P. Khomeini and M. Ho. Javidi, Optimal management of renewable resources and controllable loads in the smart microgrid, *in 29th Electrical Engineering Conference*, 2014. (in Persian)
[13] M. Hajiakbari Fini and M. E. Hamedani Golshan, Determining optimal virtual inertia and frequency control parameters to preserve the frequency stability in islanded microgrids with high penetration of renewables, *Electric Power Systems Research*, Vol. 154, pp 13–22, Jan. 2018.
[14] I. M. Bugaje, Renewable energy for sustainable development in Africa: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2006.
[15] K. Kaygusuz and A. Kaygusuz, Renewable energy and sustainable development in Turkey, *Renewable Energy*, 2002.
[16] A. Heidari, H. Kofigar, and J. S. Zamani, Provide a new way to control the voltage / frequency of renewable energy sources, in *3 National Conference on Fuel, Energy and Environment*, 2013. (in Persian)
[17] Faramarz Faqihi, S. Soleimani, and M. R. Shahroudi, Presenting a control strategy of power system injection of renewable energy sources in order to improve both harmonic and unbalanced flow distortion, based on EMO-RLS algorithm, *Iran. Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. Year Fourt, pp. 271–280, 2016. (in Persian)
[18] Y. Xu, C. Li, Z. Wang, N. Zhang, and B. Peng, Load Frequency Control of a Novel Renewable Energy Integrated Micro-Grid Containing Pumped Hydropower Energy Storage, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 29067–29077, 2018.
[19] C. Li, Y. Mao, J. Zhou, N. Zhang, and X. An, Design of a fuzzy-PID controller for a nonlinear hydraulic turbine governing system by using a novel gravitational search algorithm based on Cauchy mutation and mass weighting, *Applied Soft Computing*, Vol. 52, pp. 290–305, 2017.
[20] S. Prakash and S. K. Sinha, Simulation based neuro-fuzzy hybrid intelligent PI control approach in four-area load frequency control of interconnected power system, *Appl. Soft Comput. J*, Vol. 23, pp. 152–164, 2014.
[21] Y. Zheng, J. Zhou, Y. Xu, Y. Zhang, and Z. Qian, A distributed model predictive control based load frequency control scheme for multi-area interconnected power system using discrete-time Laguerre functions, *ISA Transactions*, Vol. 68, pp. 127–140, 2017.
[22] Y. Shan, J. Hu, Z. Li, and J. M. Guerrero, A Model Predictive Control for Renewable Energy Based AC Microgrids Without Any PID Regulators, *IEEE Transactions Power Electronic*, Vol. 33, No. 11, pp. 9122–9126, 2018.
[23] M. Jama, B. F. Mon, A. Wahyudie, and S. Mekhilef, Maximum Energy Capturing Approach for Heaving Wave Energy Converters Using an Estimator-Based Finite Control Set Model Predictive Control, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 67648–67659, 2021.
[24] G. Schwerhoff and M. Sy, Financing renewable energy in Africa – Key challenge of the sustainable development goals, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75, pp. 393–401, Aug. 2017.
[25] A. Quek, A. Ee, A. Ng, and T. Y. Wah, Challenges in Environmental Sustainability of renewable energy options in Singapore, *Energy Policy*, Vol. 122, pp. 388–394, Nov. 2018.
[26] D. P. Chassin, S. Behboodi, Y. Shi, and N. Djilali, H2-optimal transactive control of electric power regulation from fast-acting demand response in the presence of high renewables, *Applied Energy*, Vol. 205, pp. 304–315, Nov. 2017.
[27] A. Shetaya, A. M. A. Amin, and O. H. Abdalla, Model predictive control based power system operation planning of grid connected high share renewable energy, *2017 19th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2017 - Proceedings*, Vol. 2018-Febru. pp. 1500–1504, 2018.
[28] F. Amiri and M. H. Moradi, Microgrid on the ship: load Frequency- control of the microgrid, taking into account the Sea Wave energy by the optimized model predictive controller. Journal of Renewable and New Energy,Vol. 8, No. 1, pp. 78–90, 2021. (in Persian)
[29] M. Rahmani and F. Faghihi, A Novel Fuzzy Cooperative Frequency Control Method for Islanding Microgrids comprising Renewable Energy Resources, in *2019 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI)*, pp. 230–234 , 2019.
[30] K. Agbossou, A. Bilodeau, and M. L. Doumbia, Development of a control method for a renewable energy system with fuel cell, *IEEE AFRICON Conference*. 2009.
[31] J. Xu, B. Tang, and X. Zhang, Large-Scale System's Multi-channel Control of Renewable Resources Industry Chain Harmonious Development, in *2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems*, Vol. 3, pp. 249–252, 2010.
[32] C. Zhang, H. Chen, Z. Liang, W. Mo, X. Zheng, and D. Hua, Interval voltage control method for transmission systems considering interval uncertainties of renewable power generation and load demand, *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 12, No. 17. pp. 4016–4025, 2018.
[33] C. X. Mu, J. X. Jin, and W. Xu, Adaptive frequency regulation strategy based integral sliding mode control for smart grid with renewable energy sources, *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, ASEMD 2015 - Proceedings*. pp. 391–392, 2016.
[34] S. Dasgupta, S. N. Mohan, S. K. Sahoo, and S. K. Panda, Lyapunov function-based current controller to control active and reactive power flow from a renewable energy source to a generalized three-phase microgrid system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 2. pp. 799–813, 2013.
[35] T. Kerdphol, F. S. Rahman, Y. Mitani, M. Watanabe, and S. Kufeoglu, Robust Virtual Inertia Control of an Islanded Microgrid Considering High Penetration of Renewable Energy, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 625–636, 2018.
[36] S. M. S. Jalali and A. A. Kalat, Robust H∞ Controller design based on Generalized Dynamic Observer for Uncertain Singular system with Disturbance, Journal of control, Vol.15, pp. 51-66,2021. (in Persian)
[37] A. J. Garrido, I. Garrido, M. Amundarain, M. Alberdi, and M. De La Sen, Sliding-mode control of wave power generation plants, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 48, No. 6. pp. 2372–2381, 2012.
[38] S. A. Khajehoddin, M. Karimi-Ghartemani, P. K. Jain, and A. Bakhshai, A control design approach for three-phase grid-connected renewable energy resources, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 2, No. 4. pp. 423–432, 2011.
[39] Y. Xu, Z. Y. Dong, R. Zhang, and D. J. Hill, Multi-Timescale Coordinated Voltage/Var Control of High Renewable-Penetrated Distribution Systems, *IEEE Transactions Power Syst*, Vol. 32, No. 6, pp. 4398–4408, Nov. 2017.
[40] S. Teleke, M. E. Baran, S. Bhattacharya, and A. Q. Huang, Rule-Based Control of Battery Energy Storage for Dispatching Intermittent Renewable Sources, *IEEE Transactions Sustain Energy*, Vol. 1, No. 3, pp. 117–124, Oct. 2010.
[41] Y. Zeng, R. Zhang, D. Wang, Y. Mu, and H. Jia, A regional power grid operation and planning method considering renewable energy generation and load control, *Appl. Energy*, Vol. 237, pp. 304–313, Mar. 2019.
[42] K.J. P. Macken, K. Vanthournout, J. VandenKeybus, G. Deconinck, and R. J. M. Belmans, Distributed Control of Renewable Generation Units With Integrated Active Filter, *IEEE Transactions Power Electron*, Vol. 19, No. 5, pp. 1353–1360, Sep. 2004.
[43] L. Chen, S. Shao, Q. Xiao, L. Tarisciotti, P. W. Wheeler, and T. Dragicevic, Model Predictive Control for Dual-Active-Bridge Converters Supplying Pulsed Power Loads in Naval DC Micro-Grids, *IEEE Transactions Power Electron*, Vol. 35, No. 2, pp. 1957–1966, Feb. 2020.
[44] D. Zhan, L. Wei, Y. Zhang, and Y. Yao, A Generalized Model of

Nonisolated Multiphase DC–DC Converter Based on Novel Switching Period Averaging Method, *IEEE Transactions Power Electron*, Vol. 30, No. 9, pp. 5181–5191, Sep. 2015.
[45] H. Saberi, S. Mehraeen, and M. M. Rezvani, Intelligent Operation of Small-Scale Interconnected DC Grids via Measurement Redundancy, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 66, No. 11, pp. 9086–9096, 2019.
[46] N. Sarrafan, J. Zarei, R. Razavi-Far, M. Saif, and M.-H. Khooban, A Novel On-Board DC/DC Converter Controller Feeding Uncertain Constant Power Loads, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 9, No. 2, pp. 1233–1240, Apr. 2021.
[47] S. Conti and S. A. Rizzo, Optimal control to minimize operating costs and emissions of MV autonomous micro-grids with renewable energy sources, in *2009 International Conference on Clean Electrical Power*, pp. 634–639, 2009.
[48] M. Safdari, M. CHolinia, and S. Purderban Hassan, Introducing a new method in the optimal operation of microgrids, using responsive loads and energy storage sources, with high penetration of renewable sources, in *International Conference on Electricity*, 2015. (in Persian)
[49] F. Ornelas-Tellez, Optimal control for a renewable-energy-based micro-grid, in *2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, pp. 1–6, 2014
[50] C. Sharma and A. Jain, PV Based Green Computing System for ICT Sustainable Development, in *2015 Second International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering*, pp. 240–244, 2015.
[51] X. Fu and S. Li, Control of Single-Phase Grid-Connected Converters with LCL Filters Using Recurrent Neural Network and Conventional Control Methods, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 7, pp. 5354–5364, 2016.
[52] Saeed Mohammadi, *Wind energy*. Science of the day, 2014. (in Persian)
[53] S. A. Khaparde, Infrastructure for Sustainable Development using Renewable Energy Technologies in India, in *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1–6, 2007.
[54] J. G. Slootweg, E. Veldman, and J. Morren, Sensing and control challenges for Smart Grids, in *2011 International Conference on Networking, Sensing and Control*, pp. 1–7, 2011.
[55] I. Erlich, A. Korai, and F. Shewarega, Control challenges in power systems dominated by converter interfaced generation and transmission technologies, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Vol. 2018-Janua. pp. 1–5, 2018.
[56] M. Ourahou, W. Ayrir, B. EL Hassouni, and A. Haddi, Review on smart grid control and reliability in presence of renewable energies: Challenges and prospects, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 167, pp. 19–31, Jan. 2020.