Archive of SID.ir
DOI : 10.52547/jrenew.10.2.1

Research Article

Received: 09/29/21

Accepted: 02/09/22

Volume 10, Issue 2, Autumn & Winter 2023, p. p. 1-24

Journal of Renewable and New Energy

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

Modeling and Integrating of an Innovative Compressed Air Energy Storage and Pumped Hydroelectric Hybrid System with Wind Power

Majid Khazali[1*], Farhood Azarsina[2], Alireza Haj MollaAli Kani[3]

1- PhD, Department of Industry and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Assistant Professor, Department of Marine Structures, Faculty of Engineering, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3- Assistant Professor, Department of Industry and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
* majid.khazali@srbiau.ac.ir

Received: 29 September 2021 Revised: 6 December 2021 Accepted: 9 February 2022

Abstract

Increasing energy demand and establishing a balance between production and consumption are important challenges for grid operators. The hybrid system of Compressed Air Energy Storage and Pumped Hydroelectric (CAESPH) due to advantages such as no requirements for fossil fuels and scalability can prevent the loss of excess energy by storing. Another crucial factor in utilizing this system is power generation control. Due to the novelty of the CAESPH, few studies have examined its performance in conjunction with power generation systems. In this paper, the performance of this energy storage system in the integrated state with wind farm and electricity grid was analyzed and evaluated. For this purpose, the wind data of the selected station were software-modeled, then the comprehensive software modeling system was developed and its performance was analyzed with selected parameters for a cycle. Finally, the system behavior in application with the electricity grid and wind farm under different scenarios was software simulated for one week. According to the results, the Round-trip efficiency of the system is about 49% and this amount is about 7% less in the first cycle than in the next cycles.

Keywords: Energy Storage, Compressed Air, Pumped Hydroelectric, Wind Farm, Power Grid, Peak Shaving

1. Introduction

The global increase in energy demand is a substantial challenge that can be overcome by managing energy production. The most important matter is creating a balance between energy supply and demand. The use of renewable energy systems is superior to other energy production systems from economic and environmental perspectives, but energy production operators do not have control over renewable energy sources. On the other hand, a large amount of energy produced by power plants is wasted during off-peak hours, whereas it challenges the energy demand of the production sector during peak hours. The solution to these problems is to use an energy storage system. Also, energy storage is an important part of polygeneration systems and an inseparable part of smart grids and microgrids, whose use is increasing day by day due to its many advantages [1-3].

In the meantime, compressed air energy storage system has received more attention due to their higher capacity and power as well as lower capital cost compared to other energy storage systems [4,5]. The common type of this system requires large underground caverns to store compressed air, which limits its use [6]. In addition, to extract energy, a gas turbine should be used, which is usually associated with the combustion of natural gas. This is harmful from both economic and environmental perspectives [7]. Therefore, new systems based on compressed air storage were invented, which try to increase its advantages and reduce its disadvantages by modifying the structure of the system or combining it with other energy systems.

The most potential for renewable electricity generation in Iran and the world includes wind and solar energy [8,9]. In the meantime, most of the research related to the compressed air energy storage system has investigated its integration with the wind farm, which has two main reasons; Usually, the wind turbines used have a high production power and in many cases, a wind turbine can produce power equivalent to a solar farm [10]. Therefore, it is natural to feel a greater need for massive storage of this amount of energy. On the other hand, the intensity of solar radiation and its duration are more predictable than wind energy, and in some seasons of the year, the maximum solar radiation coincides with the peak hours of electricity consumption [11]. However, in most cases, the maximum time of electricity generation by wind farms is

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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

at night and during the off-peak hours of the power grid [12].

Using the compressed air energy storage system together with the wind farm can guarantee the stability of the production of the national electricity network to an optimal extent [13,14]. However, providing a power grid load curve and targeted control of power generation is still a challenge for power grid operators, to the extent that with the simultaneous use of an adiabatic compressed air energy storage system and wind farm, the power grid performance by less than 30% improves to supply the daily load curve [15]. Using a water turbine instead of an air turbine used in an adiabatic compressed air energy storage system can solve this problem. A water turbine usually has a higher efficiency comparing to an air turbine [16]. Also, controlling the production power of the water turbine is much easier than controlling the air turbine [17]. The compressed air energy storage and pumped hydroelectric hybrid system (CAESPH) works in the same way as the adiabatic compressed air energy storage system in the storage sector, but it has more advantages in the energy extraction sector using the water turbine.

In this paper, a compressed air energy storage and pumped hydroelectric hybrid system (CAESPH) is integrated with a wind energy network. In such a system, the required pressure is usually supplied by a water pump [18]. However, the energy storage system used in the present research reduces the amount of water evaporation and increases efficiency by modifying the structure of the CAESPH. This research is presented to check the compatibility of this energy storage system with different scenarios and applications. Its potential applications include using on-grid or off-grid, as well as integration with renewable electrical energy production systems, in which the performance of the energy storage system has been investigated. Applications connected to the power grid of this system can be divided into two parts: load leveling by network operators and commercial energy storage facilities. A commercial energy storage system can earn money by storing electrical energy during off-peak hours when electricity prices are lower and selling it to the grid during peak hours. Due to the scalability of this system, it is possible to use it off-grid in remote areas or any special facilities.

In addition to the mentioned cases, the integration of this energy storage system with renewable electricity generation facilities is beneficial for its owners in two ways; The greatest potential for renewable electricity production includes wind and solar energy, both of which are unstable, so the grid operators cannot make a large contribution from renewable energy, but the use of the CAESPH system by renewable electricity producers increases reliability and, as a result, their greater influence on the market. Also, integrating the energy storage system offered with renewable energy systems enables their owners to make more sales during peak hours when electricity prices are higher.

2. System Description

To investigate the different applications of the CAESPH system, this system is integrated with a wind farm and the grid, Figure 1. This way it works for three different scenarios. In the first scenario, the input energy of the system is supplied from the wind farm and the output of the energy storage system is used to supply a daily load curve, which is done by the grid operator. In the second scenario, the steady output power is provided by the wind farm operator for the grid, and in the third scenario, the required power of the grid is provided by storing energy during the off-peak hours and selling it during peak hours. Switching between these modes is shown by a three-position switch in Figure 1. The input power of the energy storage system can be changed between the grid and the wind farm by turning this switch, and the excess production power of the wind farm is also transferred to the grid by turning the switch.

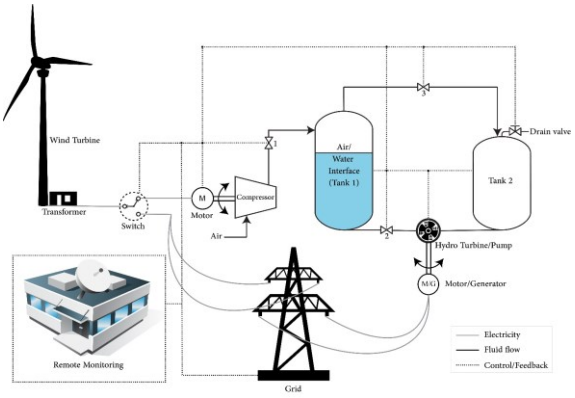


Figure 1. Schematic of the presented system connected to the wind farm and the grid

All the parameters of the system, the production power of the wind farm, and the Requirement for the grid are dynamically guided by the monitoring and control department. By opening valve 1, the compressor increases the atmospheric pressure to the target value by consuming electricity, and the required pressure increase occurs in tank 1. Then valve 1 is closed and at the required time, valve 2 and the drain valve are opened so that the water enters tank 2 by driving the hydro turbine. The hydro turbine produces electric power using a generator and transmits it to the grid, by changing the water flow rate, the generated power can be controlled. After the water in tank 1 is transferred to tank 2, the drain valve is closed and valve 3 is opened so that the pump can easily return the water to tank 1 by equalizing the air pressure between tanks. After this step, valves 2 and 3 are closed and the compressor can start compressing the air in tank 1 again.

3. Mathematical Model

In order to model the performance of the wind power plant integrated with the CAESPH system, the following assumptions are considered:

• The set of energy storage system operates in steady state
• The process of charging and discharging the system is

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

adiabatic
- System equipment works ideally
- There is a floating surface in both tanks that prevents heat transfer, evaporation of water, and dissolution of air in water
- The amount of heat loss and pressure drop in the system and set of connections is negligible
- The effect of gravity and hydrostatic pressure is negligible in comparison with the mechanical energy flow of the storage system
- Air is an ideal gas and the compressibility of water is close to zero
- After tank 1 is completely drained, there is a small amount of water at the bottom of the tank

A comprehensive dynamic model was created to determine the range of system performance and its executive characteristics. System modeling has been done using MATLAB software. Each of the components of the system were modeled separately, then it was placed next to each other and the effect of the interaction of each of the components appeared during the modeling process. The final performance of the entire system is guided by the control system, which is carried out by the command and logic defined to achieve the desired goal. The schematic view of how the complete system works is shown in Figure 2 as a flowchart.

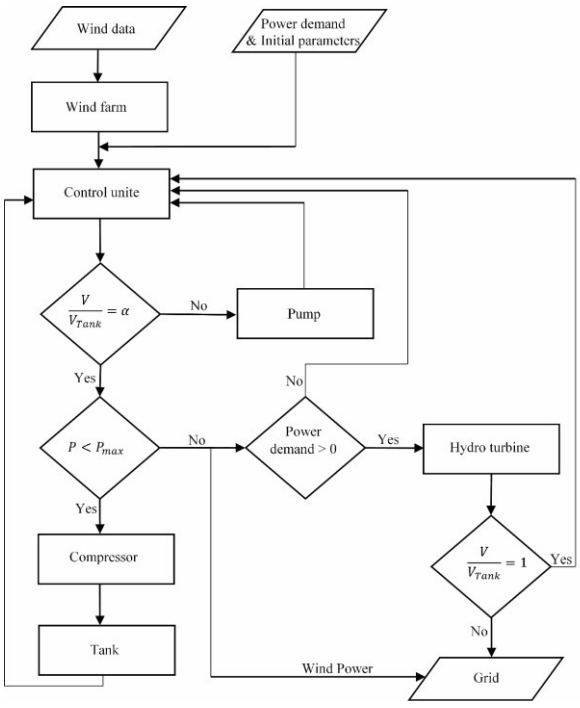


Figure 2. The flowchart of working the dynamic model comprehensively

The air volume in tank 1 has been presented by V in this figure, the tank 1 volume has been presented by V_{Tank}, the air pressure is P, the target or maximum pressure has been presented by P_{max}, and α ratio can be obtained by dividing the air volume over the tank 1 volume at the beginning of the process. Some parameters such as the α ratio, the volume of the tank, and the initial amounts of target pressure are determined; In order to make a decision and evaluate the performance, the real pressure and the water volume in the tank should be compared considering the limit values.

4. Results and Discussion

4.1. Complete system

All the components of the system were integrate as a complete system model. Now, the comprehensive model cycles through system performance with accurate conservation laws, thermodynamic principles, and mechanical principles. Some changes are occurred in the tank state by operating each element including the compressor, valves, turbine, and pump. Integrating the differential equations regarding the reservoir can be used to determine these states. Each state is monitored by logical metrics and sent control commands.

The system simulation can utilize the proposed dynamic model to operate and implement under desired outputs and various inputs. The size of the tank and pressures of the operation can be adjusted and regulated, and the influence of the mentioned parameters on the performance of the system can be investigated. One of the optimal performance criteria for this system is to notify the grid operator of the appropriate time (between the start and end of the production process). The operator can monitor the compression level in a CAESPH system to predict the time that the system requires so that the transmission line can be achieved at a certain and determined power. In addition, if a certain power level is maintained, the system operator or the grid can be notified when the system shuts down.

4.1.1. Continuous Performance

Since water in the tank will be eventually finished, the power output will not be continuous at all because of the cycle inherent and nature of a single-tank system. An uninterrupted power output from the system can be required by some applications through which a multi-tank system can be achieved. A tank is charged and consumes power while the other tank is discharged and produces power. The input and output currents that are expected for the reservoir have caused the time scales of the power production and consumption to be not equal. An irregularity can occur when no power is generated while both of the reservoirs are pumping, and this can affect the timing. In order to balance the timing of the system, a third tank, may be added. Some instances of the continuous operation of the reservoir have been mentioned in the following.

4.1.1.1. The Grid Operators

In order to make and create the compressor input profile, Khaf station wind data of the Khorasan Razavi province

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

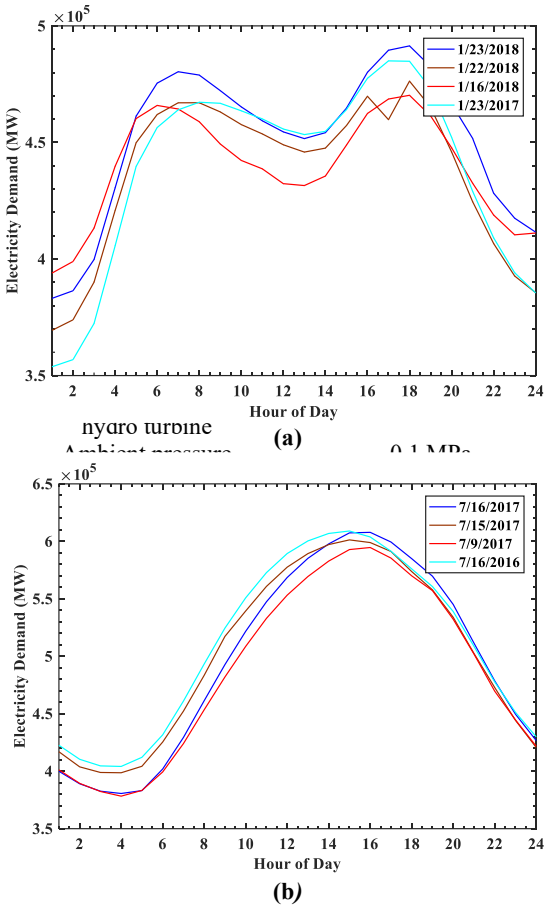


Figure 3. Daily electricity consumption curve in winter (a) and summer (b)

were used and obtained in the two simulations that have been proposed first. The performed analysis has been considered to select the tank numbers and parameter sizes. In order to provide and make predictable and dispatchable power and extract output from an alternating source, energy storage has been used for a grid operator. The simulation parameters can be seen in Table 1.

As Figure 3 shows, the load curve is almost sinusoidal in the summer season, the data in this figure are extracted from the U.S. Energy Information Administration (EIA) [19]. According to recent researches, the curve of daily electricity consumption in Iran is almost sinusoidal [20]. Of course, the load curve is largely dependent on the energy market and electricity consumption policies [21]. In this way, by having a correct forecast of the electricity consumption of the customers, the needs of the grid can be well covered. Figure 3 confirms that the load curve has two peaks in winter and one peak in summer, and the amount of load in winter is lower than in summer. The grid operators use energy storage equipment to balance the load. Therefore, the current simulation has aimed to use the CAESPH system in providing a power output and covering the diurnal trend in summer. This is a sinusoidal function that has a one-day period, and its peak is at 3 p.m.

The simulation results showed that the system has well covered the consumption demand and about 43 minutes after the start of the simulation, the energy extraction process started. The first cycle is started with atmospheric pressure and temperature for the tank. During this one-week simulation, the maximum energy input to the system in a single period was 13.82 MWh during the first charge. During the week, there was 2.998 MWh input and 14.485 MWh output of the system, which results show that the round-trip efficiency of the CAESPH system is 0.486. Also, the excess energy of the system sent from the wind farm to the grid is equal to 1949.69 MWh. The peak point of electricity consumption is equal to 3.4 and the minimum point of it is equal to 1.4 MW.

4.1.1.2.Renewable Electricity Production Operators

The output power can be formed from the wind energy resource, which is alternating and continuous and is consistent with the power grid demand. Compressed air can be stored in the form of energy by blowing wind. In this simulation, the continuous output power can be provided by the control system through the multi-reservoir batch operation. Each tank is working out of phase with the other tanks. The results of simulation studies showed that the output power that has been obtained from combining the energy storage system of a hydroelectric storage pump and compressed air has remained at a certain level constantly. In this simulation, the input energy of the system is 998.2 MWh, the output energy is 485.17 MWh, and the round-trip efficiency of the system is 48.6%.

At times when the received energy has a lower price, energy storage has more economic benefits. With the increasing penetration of renewable energies in the grid, the fluctuation of wind power is not the only concern for the wind farm and the grid. Some serious credit and financial losses can occur as a result of regular wind farm operations. For instance, considerable electricity can be generated by exposing the wind farm to strong wind. Meanwhile, the turbines may be shut down by exceeding their cut-off speed caused by a short gust, and this can be an intricate challenge for the equipment because the grid may lose power considerably. Compensating the loose and producing the power again will take around 30 minutes for the turbines. By using the CAESPH system, the problems of the power grid operator can be greatly reduced in such situations.

4.1.2. Peak Shaving Storage

The CAESPH system can also be used as a trade energy storage facility. To this aim, two scenarios are available; The first scenario is that a wind turbine can be used to produce energy. The second scenario is that energy is obtained and delivered from the grid when the electricity

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

price is low and high, respectively. This work has been done before including the energy storage systems of compressed air in Alabama and Hantorf [22]. In the second case, despite the grid being used to consume the power, this is a clean system due to the lack of requiring natural gas combustion during the process of energy retrieval. Table 2 shows the selected parameters for this simulation.

Table 2. Selected parameters in simulations of peak shaving storage facilities

Item	Value & unite
Number & volume of tank	1×1000 m^3
Tank pressure	20 MPa
R	0.287 kJ/kg·°K
α	0.25
Number & power of wind turbine	1×1.5 MW
Wind turbine type	GE 1.5 sl
Number & power of Compressor	1× 1.5 MW
Number & power of hydro turbine	1×0.5 MW
Ambient pressure	0.1 MPa
Ambient temperature	300 °K
Ambient air density	1.225 kg/m^3

During high-demand times, cheap off-peak energy is stored by trade storage facilities, and it is sold to the grid. For this simulation on July 11th, the peak time of the grid is considered from 13:30 to 17:30, which in both scenarios was able to send electricity to the grid with a constant power of 400 kW for 3 hours and 40 minutes. The residual input energy of the system is 2.99 MWh while the residual efficiency is 0.489 in both the grid and wind turbine cases. For the initial conditions of the system, the amount of energy input is 3.42 MWh and the efficiency of the system for the initial conditions (first charge) is equal to 0.428. The reason for the difference in the system efficiency for the commercial storage scenario in the residual condition with the system efficiency in the continuous performance scenario is the effect of the lower efficiency in the first charge and also the small error of the system due to repeating the cycle several times.

4.2. Results Validation

In this section, the system simulation results and the accuracy of these results have been evaluated. For this purpose, a simulation was performed with the dynamic model presented for the stable supply of 1.46 MW of electricity in one hour, and the results of this simulation can be seen in Figure 4. The values of target pressure, tank volume, and α for this simulation are 20 MPa, 1000 m^3 and 0.25, respectively.

As it is clear from Figure 4, (a) shows the changes of α and volume flow of water during discharge. Here, α refers to changes in the ratio of air volume to the volume of tank 1 at the time of emptying. (b) changes in water volume and air temperature in the tank, (c) changes in the tank pressure (d) changes in the output and remaining energy in the tank at the discharge process. The output water flow of the tank is changing from 0.073 to 0.525 m^3/s and the temperature of the tank is changing from 1363 to 2.783 °K. The residual pressure of the tank is equal to 871.2 MPa and the remaining energy in the tank is decreasing from 12502 to 7181 MJ. Also, the final output energy of the system is equal to 5283 MJ. The results of this simulation with the system energy analysis [23] differ by less than 0.8%, which is caused by the difference in the calculation accuracy, the equation solver, and the degree of equations stiffness modeled.

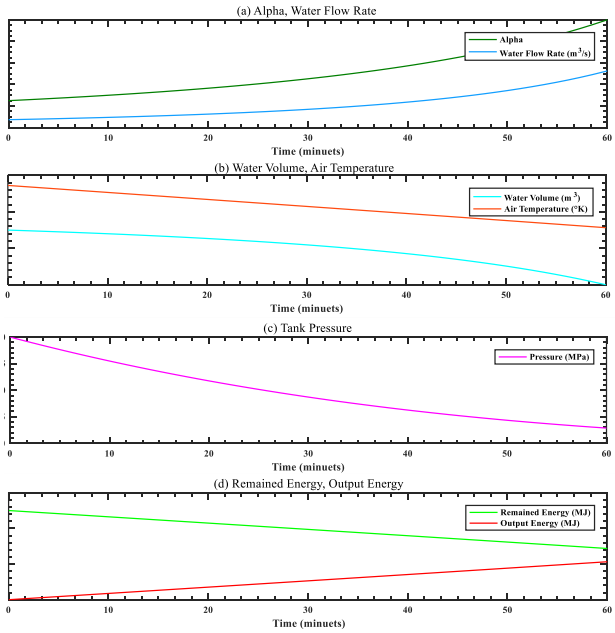


Figure 4. The simulation results of the discharge process to supply 1.46 MW of energy continuously

5. Conclusions

throughout the year, certain conditions arise that wind power plants or grid operators produce excess electrical power. In order to prevent the waste of unused electricity, using an energy storage system with predetermined rates can be a solution. The present research showed that the CAESPH system has aconvincing potential from a theoretical point of view to be used with renewable energies and specifically, wind Farms. Based on this, the CAESPH system with applications connected to the grid or off-grid and integration with the wind farm is compatible and can cover the required consumption load with a suitable approximation. The important results of the current research are as follows:

1. During the investigated one-week period, the wind power plant produces power almost continuously, which has a significant impact on the continuous operation of the CAESPH system. In the case of integrating the CAESPH system with the grid, the system can have high reliability from a continuous supply point of view of output power.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

2. Due to the high temperature of the tank and its variation range of about 500 degrees, controlling the temperature of the system will be a big challenge and its operation in a quasi-adiabatic manner requires the use of advanced heat storage equipment and suitable insulation. Also, the residual pressure of the tank, which is about 2.9 MPa, has convincing potential for producing work, which due to the configuration and selected parameters of the system, about 80% of this energy is wasted by discharging into the atmosphere.
3. The round-trip efficiency of the CAESPH system is about 49%, which is less than the expected efficiency. The initial setup time of the system is about 43 minutes, which is not very favorable, but after the first charge, the system has a significant continuous performance and the charging time is reduced. The first cycle of the system is about 7% less efficient than the subsequent cycles due to starting from atmospheric conditions, and the effect of this difference is insignificant due to the high number of cycle repetitions.
4. Since the initial ratio of the volume of air to the tank 1 volume is effective on the system efficiency significantly, optimizing this ratio is so important and required. The lower its value is, the higher the efficiency of the system would be, but to provide a certain amount of energy, the volume of the tank or its number increases, and this directly affects the cost of the system. The high volume of the tank does not necessarily mean an increase in the ability of the system for continuous operation, and the more the number of tanks is, the possibility of continuous operation increases because each tank can operate independently in a different phase of the cycle. Since the volume and number of tanks affect the system costs directly and depend on the volume of output and input energy and application type, optimizing them is required. Therefore, the performance of the system can be evaluated in different conditions so that the factors can be calculated and optimized.
5. Some factors may lead to loss of energy in the actual compressor and other equipment such as inefficiency in the water pump, turbine, and heat transfer. such as storage tanks, engine, generator, and system connections reduce the efficiency of the entire system compared to the ideal state in the present study. The efficiency in the present research assumes only the loss related to the air discharge mechanism, this represents the importance of that part of the energy which enters the atmosphere from tank 2 and eventually goes to waste. Therefore, it is important to modify the structure of the current system to reuse this energy. However, it should be noted that the round-trip efficiency of the energy storage system is not the only criterion for measuring the performance of the system. Non- dispatchable energy is not as valuable as dispatchable energy for the grid operators. Knowing when the energy storage system starts working, the exact amount of power capacity, and the duration of the system's operation makes energy more valuable.

6. References

[1] F. S. Vieira, J. A. P. Balestieri, and J. A. Matelli, Applications of compressed air energy storage in cogeneration systems, *Energy*, Vol. 214, p. 118904, 2021.

[2] M. Khazali, F. Azarsina, and A. H. Kani, Investigation of Novel Polygeneration Systems Based on Compressed Air Storage, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 6, No. 2, pp. 94–104, 2019.

[3] M. Khazali and A. Abdalisousan, An Overview of Novel Energy Storage Systems with Air Compression Method, *Iranian journal of Energy*, Vol. 23, No. 1, pp. 47–82, 2020.

[4] Z. Tong, Z. Cheng, and S. Tong, A review on the development of compressed air energy storage in China: Technical and economic challenges to commercialization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 135, No. September 2019, p. 110178, 2021.

[5] M. Khazali, F. Azarsina, and A. . Kani, Analysis and investigation of the novel energy storage system of compressed air and pumped storage hydropower, in *First National Conference on Enhanced Engineering in the Environment*, 2019.

[6] G. Venkataramani, P. Parankusam, V. Ramalingam, and J. Wang, A review on compressed air energy storage – A pathway for smart grid and polygeneration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62. 2016.

[7] W. He and J. Wang, Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy Storage: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 87, No. July 2016, pp. 77–95, 2018.

[8] T. B. Johansson, K. McCormick, L. Neij, and W. Turkenburg, The Potentials of Renewable Energy, 2008.

[9] M. Norouzi, M. Yeganeh, and T. Yusaf, Landscape framework for the exploitation of renewable energy resources and potentials in urban scale (case study: Iran), *Renewable Energy*, Vol. 163, pp. 300–319, 2021.

[10] H. S. Dhiman and D. Deb, Wake management based life enhancement of battery energy storage system for hybrid wind farms, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 130, No. August 2019, p. 109912, 2020.

[11] Y. Li, W. Gao, and Y. Ruan, Performance investigation of grid-connected residential PV-battery system focusing on enhancing self-consumption and peak shaving in Kyushu, Japan, *Renewable Energy*, Vol. 127, pp. 514–523, 2018.

[12] G. Aquila, A. R. de Queiroz, P. Rotela Junior, L. C. S. Rocha, E. de O. Pamplona, and P. P. Balestrassi, Contribution for bidding of wind-photovoltaic on grid farms based on NBI-EFA-SNR method, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 40, No.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

May, p. 100754, 2020.
[13] E. Akbari, R. A. Hooshmand, M. Gholipour, and M. Parastegari, Stochastic programming-based optimal bidding of compressed air energy storage with wind and thermal generation units in energy and reserve markets, *Energy*, Vol. 171, pp. 535–546, 2019.
[14] P. Aliasghari, M. Zamani-Gargari, and B. Mohammadi-Ivatloo, Look-ahead risk-constrained scheduling of wind power integrated system with compressed air energy storage (CAES) plant, *Energy*, Vol. 160, pp. 668–677, 2018.
[15] S. Zhang, S. Miao, Y. Li, B. Yin, and C. Li, , *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 125, No. September 2020, p. 106519, 2021.
[16] S. Hameer and J. L. van Niekerk, A review of large-scale electrical energy storage, *International Journal of Energy Research*, Vol. 39, No. 9, pp. 1179–1195, 2015.
[17] E. Yao, H. Wang, and G. Xi, A Novel Pumped Hydro Combined with Compressed Air Energy, in *Storing Energy*, T. M. Letcher, Ed. New York: Elsevier, 2016, pp. 155–166.
[18] H. Mozayeni, X. Wang, M. Negnevitsky, and G. Kefayati, Study of effect of heat transfer in an air storage vessel on performance of a pumped hydro compressed air energy storage system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 148, No. xxxx, p. 119119, 2020.
[19] Electricity Reports - U.S. Energy Information Administration (EIA), *U.S. Energy Information Administration (EIA)*. [Online]. Available: https://www.eia.gov/electricity/reports.php#/T194. [Accessed: 17-Aug-2020].
[20] M. Karimi, H. Karami, M. Gholami, H. Khatibzadehazad, and N. Moslemi, Priority index considering temperature and date proximity for selection of similar days in knowledge-based short term load forecasting method, *Energy*, Vol. 144, No. December, pp. 928–940, 2018.
[21] M. H. Asgari and H. Monsef, Market power analysis for the Iranian electricity market, *Energy Policy*, Vol. 38, No. 10, pp. 5582–5599, 2010.
[22] M. Khazali and A. kaabi Nejadian, A study on the compressed air energy storage system, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 29, No. 3, pp. 47–59, 2020.
[23] M. Khazali, F. Azarsina, and A. . Kani, Energy analysis and evaluation of an innovative hybrid compressed air and pumped hydroelectric energy storage system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 22, No. 4, pp. 225–241, 2022.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

سال دهم، شماره دوم، پاییز و زمستان 1402، ص ص 1- 24
فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
jrenew.ir
مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت: 00/07/07
تاریخ پذیرش: 00/11/20

مدل‌سازی و تجمیع سیستم نوین ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای در شبکه انرژی باد

مجید خزعلی[1*]، فرهود آذرسینا[2]، علیرضا حاج ملاعلی کنی[3]

1- دکتری تخصصی، گروه تخصصی صنعت و انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
2- استادیار، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقت، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
3- استادیار، گروه تخصصی صنعت و انرژی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
majid.khazali@srbiau.ac.ir *

چکیده

افزایش تقاضای انرژی و ایجاد توازن بین تولید و مصرف از چالش‌های مهم اپراتورهای شبکه برق است. از طرفی محدودیت‌های زیست‌محیطی و اقتصادی مانع از حل این مشکلات از روش‌های متداول مانند مصرف سوخت‌های فسیلی و احداث نیروگاه جدید متناسب با رشد مصرف انرژی می‌شود. سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای به‌علت مزایایی از قبیل عدم نیاز به سوخت فسیلی و مقیاس‌پذیری این قابلیت را دارد تا با ذخیره‌سازی انرژی مازاد تولید، مانع از هدررفت آن شود. از دیگر فاکتورهای مهم برای استفاده از این سیستم، کنترل تولید توان است. به‌دلیل نوین بودن سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای پژوهش‌های اندکی به بررسی عملکرد آن همراه با سیستم‌های تولید انرژی پرداخته‌اند. در مقاله حاضر عملکرد این سیستم ذخیره‌سازی انرژی ترکیبی در حالت تجمیع شده با نیروگاه بادی و شبکه برق مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. بدین‌منظور اطلاعات بادی ایستگاه منتخب استخراج و مدل‌سازی نرم‌افزاری شد، سپس سیستم جامع مدل‌سازی نرم‌افزاری شد و کارایی آن با پارامترهای منتخب برای یک چرخه مورد تحلیل قرار گرفت. در انتها رفتار سیستم در کاربرد با شبکه برق و نیروگاه بادی تحت سناریوهای مختلف برای مدت یک هفته شبیه‌سازی نرم‌افزاری شد. بنابر نتایج پژوهش، بازدهی رفت و برگشتی سیستم حدود 49 درصد و این مقدار در اولین چرخه حدود 7 درصد کم‌تر از چرخه‌های بعدی است. همچنین مشخص شد این سیستم پتانسیل مناسبی جهت یکپارچه‌سازی با نیروگاه بادی و شبکه برق دارد و با طراحی مناسب می‌تواند توان مصرفی مورد نیاز را به‌طور بی‌وقفه تامین کند.

کلیدواژگان: ذخیره‌سازی انرژی، هوای فشرده، هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای، نیروگاه بادی، شبکه برق، پیکسایی

Modeling and Integrating of an Innovative Compressed Air Energy Storage and Pumped Hydroelectric Hybrid System with Wind Power

Majid Khazali[1*], Farhood Azarsina[2], Alireza Haj MollaAli Kani[3]

1- PhD, Department of Industry and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Assistant Professor, Department of Marine Structures, Faculty of Engineering, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3- Assistant Professor, Department of Industry and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
* majid.khazali@srbiau.ac.ir

Received: 29 September 2021 Revised: 6 December 2021 Accepted: 9 February 2022

Abstract

Increasing energy demand and establishing a balance between production and consumption are important challenges for grid operators. Furthermore, environmental and economic constraints prevent the solution of these problems by conventional methods like the consumption of fossil fuels and the construction of new power plants in proportion to the growth of energy consumption. The hybrid system of Compressed Air Energy Storage and Pumped Hydroelectric (CAESPH) due to advantages such as no requirements for fossil fuels and scalability can prevent the loss of excess energy by storing. Another crucial factor in utilizing this system is power generation control. Due to the novelty of the CAESPH, few studies have examined its performance in conjunction with power generation systems. In this paper, the performance of this energy storage system in the integrated state with wind farm and electricity grid was analyzed and evaluated. For this purpose, the wind data of the selected station were software-modeled, then the comprehensive software modeling system was developed and its performance was analyzed with selected parameters for a cycle. Finally, the system behavior in application with the electricity grid and wind farm under different scenarios was software simulated for one week.

مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص 4 کریتیو کامنز محفوظ است

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

According to the results, the Round-trip efficiency of the system is about 49% and this amount is about 7% less in the first cycle than in the next cycles. Also found that this system has good potential for integration with wind farms and electricity grids and with proper design can provide the required power consumption without interruption.

Keywords: Energy Storage, Compressed Air, Pumped Hydroelectric, Wind Farm, Power Grid, Peak Shaving

1- مقدمه

افزایش جهانی تقاضای انرژی، چالشی بزرگ است که با مدیریت تولید انرژی می‌توان بر آن فایق آمد. مهم‌ترین موضوع ایجاد توازن بین عرضه و تقاضای انرژی است. استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر از هردو منظر اقتصادی و زیست‌محیطی دارای برتری نسبت به سایر سیستم‌های تولید انرژی است اما اپراتورهای تولید انرژی، کنترلی بر منابع انرژی تجدیدپذیر ندارند. از طرفی، میزان زیادی از انرژی تولیدی توسط نیروگاه‌ها در ساعات کم‌باری به‌هدر می‌رود حال آن‌که در ساعات اوج مصرف برق میزان تقاضای انرژی بخش تولید را به چالش می‌کشد. راه‌کار این مشکل‌ها استفاده از سیستم ذخیره‌سازی انرژی است. همچنین، ذخیره‌سازی انرژی بخش مهمی در سیستم‌های تولید چندگانه و جز جدا نشدنی شبکه‌های هوشمند و ریز شبکه‌ها است که استفاده از آن‌ها به‌علت مزایای متعدد، در حال افزایش روز افزون است [1–3].

در این بین، سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده به‌علت ظرفیت و توان بالاتر و همچنین هزینه سرمایه‌ای پایین‌تر نسبت به سایر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است [4,5]. نوع متداول این سیستم نیازمند غارهای بزرگ زیرزمینی برای ذخیره‌سازی هوای فشرده است که استفاده از آن را محدود می‌کند [6]. علاوه بر این، برای استحصال انرژی باید از توربین گاز استفاده کرد که به‌طور معمول با احتراق گاز طبیعی همراه است و این امر از هردو منظر اقتصادی و زیست‌محیطی زیان‌بار است [7]. از این رو سیستم‌های نوینی مبتنی بر ذخیره‌سازی هوای فشرده ابداع شدند که سعی دارند با اصلاح ساختار سیستم یا ترکیب آن با دیگر سیستم‌های انرژی مزایای آن را افزایش و معایب آن را کاهش دهند. یکپارچه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده با سیستم تولید گاز بایومس و یا یک سیستم بادی-دیزلی می‌تواند باعث افزایش بازدهی اگزرژی[1] مجموعه سیستم شود اما به‌دلیل پایین بودن نسبت صرفه‌جویی انرژی اولیه این سیستم‌های ترکیبی امکان احداث آن‌ها در اروپا میسر نیست [8,9]. در همین راستا، سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو ارائه شده است. این سیستم با ذخیره‌سازی حرارت در فرآیند شارژ و استفاده از آن در فرآیند تخلیه توانسته بازدهی سیستم‌های معمول را افزایش دهد [10].

تامسون و همکاران [11] با تحلیل پویای این سیستم نشان دادند بازدهی و زمان ذخیره‌سازی انرژی این سیستم نسبت به سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده متداول بالاتر است. چن و همکاران [12] با ارائه یک سیستم نوین ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو هم‌فشار و بررسی آن ثابت کردند که بازدهی چنین سیستمی می‌تواند 6 درصد از سیستم بی‌دررو متداول بالاتر باشد و همچنین مدت زمان تخلیه سیستم تا 56 درصد افزایش یابد. ژو و همکارن [13] در یک تحلیل فنی-اقتصادی سیستم پیشرفته بی‌دررو ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده را مورد بررسی قرار دادند که مشخص شد سود مالی سالیانه چنین سیستمی با ظرفیت 20 مگاوات در طول چرخه عمر خود بیش از 3 میلیون دلار و ارزش خالص کنونی آن 735 هزار دلار است که در کشور مورد بررسی (چین) توجیه اقتصادی دارد. سابلوفسکی و همکاران [14] با تحلیل انرژی و اگزرژی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو نشان دادند بازدهی سیستم بیش‌از 50 درصد است و سانگ و همکاران [15] با فشرده‌سازی شش مرحله‌ای در فرایند شارژ چنین سیستمی توانستند به بازدهی بالای 70 درصد دست یابند. همچنین ژو و همکاران [16] با استفاده از اجکتور در فرایند شارژ نرخ تخریب اگزرژی را تا 3/85 درصد کاهش دادند.

به جهت بررسی اثربخشی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، پژوهش‌های متعددی به‌منظور یکپارچه‌سازی آن با سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر انجام شده است که بخش عمده آن‌ها به تحلیل ارتباط نیروگاه بادی با این سیستم پرداخته‌اند. بیش‌ترین پتانسیل برای تولید برق تجدیدپذیر در ایران و جهان شامل انرژی باد و خورشید است [17,18]. توجه بیش‌تر به ذخیره‌سازی انرژی بادی دو دلیل عمده دارد، به‌طور معمول توربین‌های بادی مورد استفاده توان تولیدی بالایی دارند و در بسیاری موارد یک توربین بادی می‌تواند معادل یک مزرعه خورشیدی تولید توان کند [19]. بنابراین طبیعی است که نیاز بیش‌تری برای ذخیره‌سازی حجیم این میزان انرژی احساس شود. از طرفی، شدت تابش خورشید و مدت زمان آن نسبت به انرژی باد قابل پیش‌بینی‌تر است و در بعضی فصل‌های سال، بیش‌ترین تابش خورشیدی با ساعات اوج مصرف برق مصادف است [20]. حال آن‌که در اغلب موارد بیش‌ترین زمان تولید برق توسط نیروگاه‌های بادی در شب هنگام و ساعات کم‌باری شبکه برق است [21].

به‌طور معمول از نیروگاه‌های چرخه ترکیبی برای تامین بار پایه شبکه برق استفاده می‌شود اما میسون و همکاران [22] در پژوهشی به بررسی تامین بار پایه شبکه سراسری برق با استفاده از نیروگاه بادی یکپارچه شده با سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده پرداختند که نشان داد چنین سیستمی از نظر هزینه و کاهش تولید دی‌اکسیدکربن بسیار مقرون به‌صرفه است. همچنین پژوهش ژائو و همکاران [23] نشان داد یک نیروگاه بادی یکپارچه شده با سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده می‌تواند اثربخشی خوبی برای پیکسایی شبکه برق داشته باشد. شاو و همکاران [24] از یک چرخ طیار برای بهبود کنترل خروجی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده یکپارچه با توربین بادی استفاده کردند و بومن و همکاران [25] با ارزیابی چرخه حیات دو سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو و معمولی یکپارچه شده با نیروگاه بادی نشان دادند ذخیره‌سازی بی‌دررو اثرات منفی زیست‌محیطی کم‌تری دارد. بوسیو و وردا [26] با تحلیل ترمو اقتصادی سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده یکپارچه با نیروگاه بادی در دو حالت متصل و جدا از شبکه سراسری برق به این نتیجه رسیدند که به‌کارگیری آن در حالت متصل به شبکه برق مزیت اقتصادی بیش‌تری دارد.

1. Exergy

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

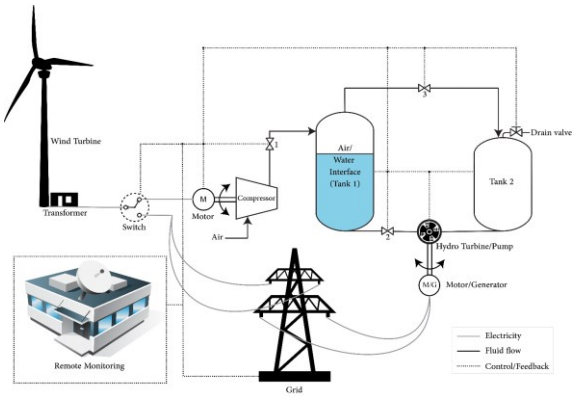
استفاده از سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده به‌همراه نیروگاه بادی می‌تواند پایداری تولید شبکه سراسری برق را تا حد مطلوبی تضمین کند [27,28]. با این وجود، تامین منحنی بار شبکه برق و کنترل هدفمند تولید توان همچنان یک چالش برای برای اپراتورهای شبکه برق است تا حدی که استفاده هم‌زمان از سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو و نیروگاه بادی فقط تا کم‌تر از 30 درصد عملکرد شبکه برق برای تامین منحنی بار مصرفی روزانه را بهبود می‌بخشد [29]. استفاده از توربین آبی به‌جای توربین هوای مورد استفاده در سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو می‌تواند این مشکل را حل کند. توربین آبی به‌طور معمول بازدهی بالاتری نسبت به توربین هوا دارد [30]. همچنین کنترل توان تولیدی توربین آبی به مراتب آسان‌تر از کنترل توربین هوا است [31]. سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای در بخش ذخیره‌سازی همانند سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده بی‌دررو عمل می‌کند اما در بخش استحصال انرژی با بهره‌گیری از توربین آبی، مزیت بیش‌تری دارد.

در مقاله حاضر، یک سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای با شبکه انرژی باد تجمیع شده است. در چنین سیستمی به‌طور معمول فشار مورد نیاز توسط پمپ آب تامین می‌شود [32]. اما سیستم ذخیره‌سازی انرژی مورد استفاده در پژوهش حاضر با اصلاح ساختار سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای، میزان تبخیر آب را کاهش داده و بازدهی را افزایش می‌دهد. این پژوهش به‌منظور بررسی سازگاری این سیستم ذخیره‌سازی انرژی با سناریوها و کاربردهای مختلف ارائه شده است. موارد مصرف بالقوه آن شامل استفاده به‌صورت متصل به شبکه سراسری برق یا مستقل از آن و همچنین یکپارچه‌سازی با سیستم‌های تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر می‌شود، که عملکرد سیستم ذخیره‌سازی انرژی در این شرایط بررسی شده است. کاربردهای متصل به شبکه برق این سیستم را می‌توان به دو بخش تسطیح بار مصرفی توسط اپراتورهای شبکه و تاسیسات ذخیره‌سازی انرژی تجاری تقسیم کرد. یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی تجاری می‌تواند با ذخیره کردن انرژی الکتریکی در ساعات کم‌باری که قیمت برق پایین‌تر است و فروش آن به شبکه برق در ساعات اوج بار، کسب درآمد کند. به‌دلیل مقیاس‌پذیری این سیستم، به‌کارگیری مستقل از شبکه برق آن در مناطق دوردست یا هرگونه تاسیسات خاص، میسر است.

علاوه بر موارد ذکر شده، یکپارچه‌سازی این سیستم ذخیره‌سازی انرژی با تاسیسات تولید برق تجدیدپذیر برای مالکین آن از دو جهت سودمند است؛ بیش‌ترین پتانسیل برای تولید برق تجدیدپذیر شامل انرژی باد و خورشید است که هردو ناپایدار هستند بنابراین اپراتورهای شبکه برق نمی‌توانند سهم زیادی برای انرژی تجدیدپذیر قائل شوند اما استفاده از این سیستم ذخیره‌سازی انرژی توسط تولیدکنندگان برق تجدیدپذیر باعث افزایش قابلیت اطمینان و در نتیجه نفوذ بیش‌تر آن‌ها بر بازار فروش می‌شود. همچنین یکپارچه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی ارائه‌شده با سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، مالکین آن‌ها را قادر می‌سازد تا فروش بیش‌تری در ساعات اوج مصرف که قیمت برق بالاتر است، داشته باشند.

2- شرح سیستم

به جهت بررسی کاربردهای متفاوت سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای، این سیستم با یک نیروگاه بادی و شبکه سراسری برق تجمیع شده است، شکل 1. بدین صورت که برای سه سناریوی متفاوت عمل می‌کند. در سناریوی اول، انرژی ورودی سیستم از نیروگاه بادی تامین شده و خروجی سیستم ذخیره‌سازی انرژی برای تامین یک منحنی بار مصرفی روزانه استفاده می‌شود که این عمل توسط اپراتور شبکه برق صورت می‌پذیرد. در سناریوی دوم، یک توان خروجی ثابت توسط اپراتور نیروگاه بادی برای شبکه برق تامین می‌شود و در سناریوی سوم با ذخیره‌سازی انرژی در ساعات کم‌باری شبکه برق و فروش آن در ساعات اوج مصرف، توان مورد نیاز شبکه برق تامین می‌گردد. تغییر بین این سه حالت توسط یک کلید سه وضعیتی در شکل 1 نشان داده شده است. توان ورودی سیستم ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند با چرخش این سوییچ بین شبکه برق و یا نیروگاه بادی تغییر کند، توان تولیدی مازاد نیروگاه بادی نیز با چرخش سوییچ به شبکه برق انتقال می‌یابد.



شکل 1 طرحواره سیستم ارائه‌شده متصل به نیروگاه بادی و شبکه برق

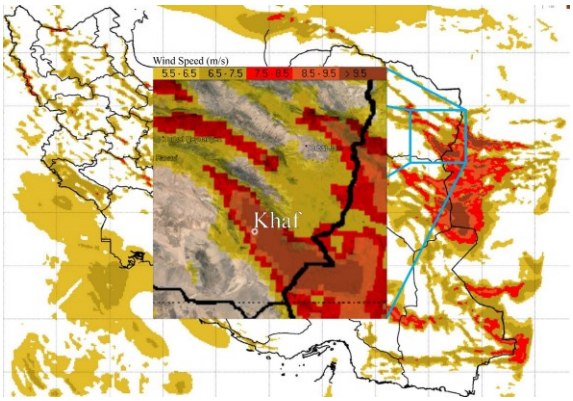
تمامی پارامترهای سیستم، توان تولیدی نیروگاه بادی و نیاز شبکه برق توسط بخش نظارت و کنترل، به‌طور پویا هدایت می‌شود. با بازشدن شیر 1، کمپرسور با مصرف برق، فشار اتمسفر را تا مقدار هدف افزایش می‌دهد و افزایش فشار مورد نیاز در مخزن 1 اتفاق می‌افتد. سپس شیر 1 بسته شده و در زمان مورد نیاز شیر 2 و شیر تخلیه باز می‌شود تا آب با راندن توربین آبی وارد مخزن 2 شود. توربین آبی با استفاده از ژنراتور توان الکتریکی تولید می‌کند و آن را به شبکه برق انتقال می‌دهد، با تغییر دبی آب می‌توان توان تولیدی را کنترل کرد. بعد از خروج تمامی آب مخزن 1 و انتقال آن به مخزن 2، شیر تخلیه بسته شده و شیر 3 باز می‌شود تا با یکسان شدن فشار هوای اندک مخزن 2 و هوای مخزن 1 پمپ آب به راحتی آب را به مخزن 1 بازگرداند. بعد از این مرحله، شیرهای 2 و 3 بسته شده و کمپرسور می‌تواند فشرده‌سازی هوا در مخزن 1 را مجدد آغاز کند.

با توجه به وابسته بودن اثربخشی چنین سیستمی به انرژی باد، انتخاب محل مناسب برای نیروگاه بادی بسیار حائز اهمیت است. محل انتخابی برای احداث نیروگاه بادی باید دارای پتانسیل بادی مناسبی در اغلب زمان‌های سال باشد تا عملکرد پیوسته سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای تضمین گردد. بدین‌منظور با استفاده از اطلس بادی تهیه شده توسط سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری برق ایران

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

(ساتبا) [33] محل مناسبی در منطقه خواف واقع در جنوب شرق استان خراسان رضوی جهت مدل‌سازی نیروگاه بادی انتخاب شد، شکل 2. البته این انتخاب بدین معنی نیست که این پژوهش یک مطالعه امکان‌سنجی است، با این وجود یک تحلیل کوتاه در این خصوص در پیوست مقاله درج شده که می‌تواند مفید واقع شود.



شکل 2 مناطق با پتانسیل بالا برای تاسیس نیروگاه بادی با سرعت باد بالاتر از 6 متر بر ثانیه در ارتفاع 80 متری از سطح زمین

3- مدل ریاضی سیستم

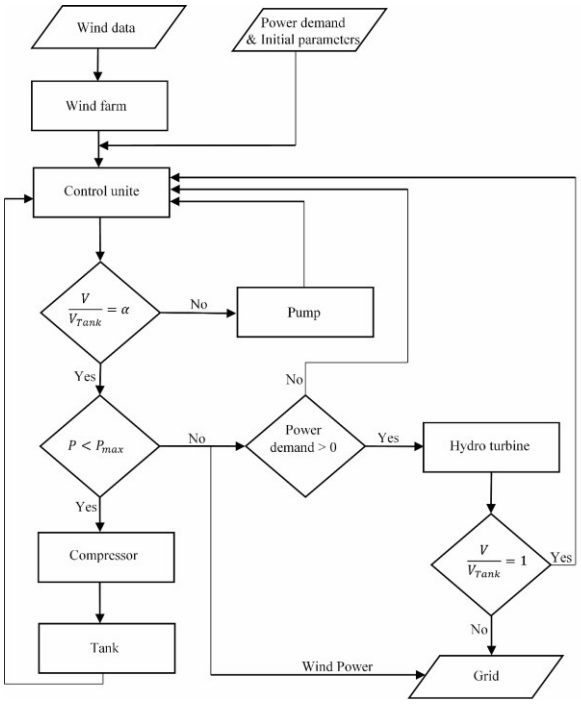
در جهت مدل‌سازی عملکرد نیروگاه بادی یکپارچه شده با سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای، مفروضات زیر درنظر گرفته شده است:

- مجموعه سیستم ذخیره‌سازی انرژی در حالت پایدار عمل می‌کند
- فرایند شارژ و تخلیه سیستم به‌صورت بی‌دررو است
- تجهیزات سیستم به‌صورت ایده‌آل عمل می‌کند
- یک سطح شناور در هر دو مخزن وجود دارد که مانع انتقال حرارت، تبخیر آب و انحلال هوا در آب است
- میزان تلفات حرارتی و افت فشار در سیستم و مجموعه اتصالات ناچیز است
- اثر جاذبه و فشار هیدرواستاتیک در قیاس با جریان انرژی مکانیکی سیستم ذخیره‌سازی قابل چشم‌پوشی است
- هوا گازی ایده‌آل و میزان تراکم‌پذیری آب نزدیک به صفر است
- بعد از تخلیه کامل مخزن 1، مقدار کمی آب در کف مخزن وجود دارد

به‌منظور تعیین گستره عملکرد سیستم و ویژگی‌های اجرایی آن، مدل دینامیکی جامع ایجاد شد. مدل‌سازی سیستم با استفاده از نرم‌افزار متلب[1] انجام شده است. هر کدام از اجزاء سیستم به‌صورت جداگانه مدل شد، سپس در کنار یکدیگر قرار گرفت و تاثیر تعامل هر کدام از اجزاء در طی فرآیند مدل‌سازی نمود پیدا کرد. عملکرد نهایی کل سیستم توسط سیستم کنترل هدایت می‌شود، که این عمل توسط فرمان و منطق تعریف شده جهت رسیدن به هدف مورد نظر صورت می‌پذیرد. نمای طرحواره نحوه عملکرد سیستم کامل به‌صورت یک روندنما در شکل 3 نشان داده شده است. در این شکل، V حجم هوا در مخزن 1، V_{Tank} حجم مخزن 1، P فشار هوا، P_{max} فشار بیشینه یا هدف و α نسبت حجم هوا به حجم مخزن 1 در ابتدای فرایند است.

1. Matlab

سیستم کنترل که عملکرد سیستم را هدایت می‌کند با استفاده از ماتریس تصمیم معیارها ساخته شده است. برای مدل کردن دقیق رفتار سیستم در بازه‌ی زمانی، کنترل کننده منطقی باید از طریق عملکردهای واقعی چرخه، سیستم را پله‌ای کند. این مشابه مدار واقعی است که می‌تواند شیرها، پمپ‌ها، سوئیچ‌ها و غیره را کنترل کند. مقادیر اولیه برای فشار هدف، حجم مخزن و α معین شده است؛ منطق نیاز به مقایسه فشار واقعی و حجم آب موجود در مخزن با این مقادیر محدودیت دارد تا برای عملکرد تصمیم اتخاذ کند.



شکل 3 روندنمای نحوه عملکرد مدل پویای سیستم ارائه‌شده به‌صورت جامع

3-1- توان بادی

برای مدل‌سازی نیروگاه بادی از داده‌های ساتبا در منطقه خواف استفاده شده است. این داده‌های ده دقیقه‌ای شامل سرعت و جهت باد است. مدل‌سازی داده‌های بادی با استفاده از نرم‌افزار دبلیوآرپلات[2] انجام شده است. به‌منظور محاسبه توان تولیدی یک توربین بادی می‌توان از رابطه زیر استفاده [34]:

$$W_{wind\ turbine} = \frac{1}{2}\rho A C_p V_w^3 \qquad (1)$$

که در آن، V_w سرعت باد، C_p ضریب توان توربین بادی، A سطح مقطعی که تیغه توربین بادی جارو می‌کند و ρ چگالی هوا است. برای محاسبه توان الکتریکی نهایی توربین یک مقدار بازدهی متشکل از بازدهی انتقال قدرت مکانیکی و بازدهی تبدیل الکتریکی توربین در رابطه 1 ضرب می‌شود. C_p تابعی از زاویه تیغه توربین بادی و نسبت سرعت نوک آن است که نسبت سرعت نوک پره خود تابعی از سرعت باد است. در این پژوهش، ضریب توان توربین بادی منتخب از شرکت سازنده آن استخراج شده است [35].

2. WRPLOT

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

3-2- کمپرسور

طراحی‌های بسیار متنوعی برای کمپرسور وجود دارد؛ از گریز از مرکز تا جابه‌جایی مثبت، که اغلب توان الکتریکی خود را از یک موتور الکتریکی دریافت می‌کنند. برای این سیستم ذخیره‌سازی انرژی، این امکان وجود دارد که توان بادی به‌عنوان یک ورودی (به‌صورت محرک مکانیکی) بررسی شود. برای این تحقیق، یک کمپرسور دریافت کننده توان الکتریکی درنظر گرفته شده است. کمپرسور در این سیستم برای اضافه کردن هوا به یک مخزن صلب و افزایش فشار در این مخزن استفاده می‌شود. علاوه بر این، از آن‌جایی که کمپرسور، ورودی خود را از یک منبع خارجی (نیروگاه بادی) دریافت می‌کند، توان ورودی به‌عنوان یک مقدار شناخته شده درنظر گرفته می‌شود. بنابراین برای تعیین دبی جرمی هوای عبوری از کمپرسور، کار ورودی و حالت‌های فشار و حجم با توجه به مخزن ذخیره‌سازی هوا داده شده است. کار ورودی (به‌ازای واحد جرم) برابر است با انتگرال حجم مخصوص روی تغییرات فشار، پس داریم [36]:

$$\frac{W}{m}=\int_{P_1}^{P_2} v\,dP, \qquad W=m\int_{P_1}^{P_2} v\,dP \tag{2}$$

که در آن W کار مصرفی، P فشار، m جرم و v حجم مخصوص هوا است. چون هدف از مدل‌سازی کمپرسور، تعیین نرخ جریان جرمی به‌وسیله فشاری که کمپرسور به مخزن داده و کار ورودی است، یک فرض در مورد فرآیند فشرده‌سازی درنظر گرفته شده است. فرض می‌شود فرآیند فشرده‌سازی، پلیتروپیک و ضریب پلیتروپیک آن برابر با نسبت گرمای ویژه (k) است. بنابراین فرآیند بی‌دررو است، پس با جایگذاری در رابطه 2 داریم [37]:

$$W=m\int_{P_1}^{P_2}\left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{1}{k}}dP \tag{4}$$

که در آن C به معنی یک مقدار ثابت است. رابطه 4 شرح می‌دهد که برای

$$Pv^k=C, \quad v=\left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{1}{k}} \tag{3}$$

فشرده‌سازی یک جرم سیال (m) از فشار P_1 به P_2 به کار نیاز است. دیفرانسیل هر دو طرف رابطه 4 نسبت به زمان:

$$\frac{dW}{dt}=\frac{d}{dt}\left[m\int_{P_1}^{P_2}\left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{1}{k}}dP\right] \tag{5}$$

$$=\frac{dm}{dt}\int_{P_1}^{P_2}\left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{1}{k}}dP+m\frac{d}{dt}\left[\int_{P_1}^{P_2}\left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{1}{k}}dP\right]$$

در این رابطه، فشار هوا (P_2) و جرم هوای مخزن (m) هر دو تابعی از زمان (t) هستند. ارزیابی انتگرال‌ها بعد از مشتق‌گیری و چینش دوباره:

$$\frac{dW}{dt}=\frac{dm}{dt}C^{\frac{1}{k}}\left[\frac{k}{k-1}\left(P_2^{\frac{k-1}{k}}-P_1^{\frac{k-1}{k}}\right)\right]+\left[C^{\frac{1}{k}}mP_2^{-\frac{1}{k}}\frac{dP_2}{dt}\right] \tag{6}$$

$$\frac{dm}{dt}=\left(\frac{dW}{dt}-C^{\frac{1}{k}}mP_2^{-\frac{1}{k}}\frac{dP_2}{dt}\right)C^{-\frac{1}{k}}\left[\frac{k}{k-1}\left(P_2^{\frac{k-1}{k}}-P_1^{\frac{k-1}{k}}\right)\right]^{-1} \tag{7}$$

رابطه 7 برای مدل‌سازی ارتباط ترمودینامیکی کمپرسور تک‌آنتروپی استفاده شده است؛ اکنون دبی جرمی عبوری از کمپرسور برای حجم هوا، فشار مخزن و توان ورودی مشخص، قابل تعیین است.

3-3- مخزن

در طول چرخه سیستم، فشار، دما و جرم (آب و هوا) در مخزن به‌طور پیوسته در حال تغییر است. حتی در زیر فشار مورد انتظار مخزن، آب به‌عنوان سیال تراکم‌ناپذیر مدل شده است. بنابراین، هرگونه تغییر تدریجی در حجم آب موجب همان میزان تغییر در حجم هوا می‌شود. در حالی که اذعان شده است که مقداری از هوا به‌صورت اجباری در آب حل می‌شود [38]، فرض شده که تاثیر این پدیده ناچیز بوده و در خارج از حوزه این پژوهش است.

در یک تحلیل حجم کنترل، با حجم کنترل بودن هوای درون مخزن، با توجه به قانون گاز ایده‌آل داریم [37]:

$$PV=mRT, \quad P=mRTV^{-1} \tag{8}$$

$$\frac{dP}{dt}=\frac{d}{dt}(mRTV^{-1})=R\left(\frac{dm}{dt}\frac{T}{V}+\frac{dT}{dt}\frac{m}{V}-\frac{dV}{dt}\frac{mT}{V^2}\right) \tag{9}$$

که در آن V حجم، m جرم، T دما و R ثابت گازها برای هوا است. نرخ تغییر فشار در مخزن، تابعی است از جرم، دما و حجم هوای درون مخزن که همه‌ی این‌ها نسبت به زمان در حال تغییر است. جرم و حجم تابع چرخه هستند یعنی با توجه به این‌که سیستم در حال شارژ است یا تخلیه، تعیین می‌شوند. درجه حرارت از فشرده‌سازی و تخلیه پلیتروپیک مفروض به‌دست می‌آید [37]:

دیفرانسیل هر دو طرف نسبت به زمان:

$$Pv^k=constant \tag{10}$$

$$P\left(\frac{V}{m}\right)^k=P\left(\frac{RT}{P}\right)^k=constant \tag{11}$$

$$\frac{d}{dt}\left[P\left(\frac{RT}{P}\right)^k=constant\right] \tag{12}$$

$$=\frac{d}{dt}[R^kP^{1-k}T^k=constant]$$

$$R^k(1-k)P^{-k}\frac{dP}{dt}T^k+R^kkP^{1-k}\frac{dT}{dt}T^{k-1}=0 \tag{13}$$

با ساده‌سازی رابطه 13 داریم:

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T}{P}\frac{dP}{dt}\left(\frac{k-1}{k}\right) \quad (14)$$

با استفاده از رابطه‌های 9 و 14 چنانچه هوا یا آب به مخزن اضافه شده و یا از آن حذف گردد متعاقب آن، تغییرات دما و فشار قابل محاسبه است.

3-4- پمپ و توربین آبی

استفاده از یک پمپ به‌عنوان توربین آبی در ظرفیت‌های متفاوت امکان‌پذیر است اما برای مقادیر هد بالا، چندان به‌صرفه و کارآمد نیست [39]. به‌طور کلی توان مصرفی پمپ عبارت است از حاصل ضرب دبی پمپ در اختلاف فشار بین دو محیط بخش بر بازدهی پمپ [40]:

$$\dot{W}_{Pump} = \frac{\dot{V}(hg\rho + \Delta P)}{\eta_{Pump}} \quad (15)$$

که در آن $\dot{W}$ توان مصرفی پمپ، $\dot{V}$ دبی حجمی آب، ΔP اختلاف فشار دو مخزن، h هد پمپ، g شتاب گرانش، ρ چگالی آب و η بازدهی پمپ است. اما بنابر چشم‌پوشی از تاثیر نیروی جاذبه به‌دلیل پتانسیل مکانیکی بالای سیستم و همچنین استفاده از مکانیزم تخلیه هوا، کار پمپ ناچیز فرض شده است. با این وجود، عملکرد صحیح مدل نیازمند تعیین حجم آبی است که پمپ به مخزن 1 انتقال می‌دهد، به همین جهت با توجه به پژوهش رینر [41] مقدار دبی ثابت 0/4 مترمکعب بر ثانیه برای پمپ فرض شده است.

بخش مهمی از عملکرد سیستم وابسته به توربین آبی است. توربین‌های آبی ضربه‌ای بهترین عملکرد را در هدهای بالا دارند، همچنین با کنترل نازل در توربین ضربه‌ای می‌توان تا حد مطلوبی توان خروجی سیستم را تنظیم کرد [42]. در سیستم مقاله حاضر نیز فشار عملیاتی سیستم بالا است و کنترل توان خروجی سیستم بسیار مهم است پس باید از توربین آبی ضربه‌ای بهره برد. توان خروجی توربین آبی متناسب با دبی حجمی آب خروجی و اختلاف فشار بین ورودی و خروجی توربین است، بدین ترتیب داریم [43]:

$$\dot{W}_{stream} = \dot{V}\Delta P \quad (16)$$

$$\dot{W}_{Turbine} = \eta_{Turbine}\dot{W}_{stream} = \eta_{Turbine}\dot{V}\Delta P \quad (17)$$

که در آن $\dot{W}$ توان خروجی برای جریان سیال و توربین آبی، $\dot{V}$ دبی حجمی آب، η بازدهی توربین و ΔP اختلاف فشار است. برای این تحلیل فرض شده است که تمام اثرات دینامیکی و هیدرودینامیکی توربین در عبارت بازدهی، درنظر گرفته شده است. صرف‌نظر از تلفات جزئی و فشار هیدرواستاتیک و با فرض این‌که توربین در فشار اتمسفر تخلیه می‌شود، دبی حجمی آب از رابطه زیر تعیین شده است:

$$\dot{V} = \frac{\dot{W}_{Turbine}}{\eta_{Turbine}(P_2 - P_{atm})} \quad (18)$$

در عبارت بالا $\dot{W}_{Turbine}$ توان مطلوب خروجی از توربین آبی است؛ می‌توان قطر نازل را تنظیم کرد و به‌دنبال آن دبی محاسبه شده و توان خروجی حاصل می‌شود.

3-5- عملکرد سیستم جامع

تمامی اجزاء سیستم به‌طور پویا با یکدیگر در تعامل هستند و عملکرد هر جزء در لحظه بر مجموعه سیستم اثر می‌گذارد. کنترل فرایندها مبتنی بر منطق برنامه‌ریزی شده و محدودیت‌های آن است. با انتخاب مقدار α مقادیر جرم و حجم هوای مخزن در ابتدای اولین چرخه به‌دست می‌آید، این امر با معین بودن حجم مخزن و چگالی هوای محیط میسر می‌گردد؛ بدین صورت که α در حجم مخزن مقدار حجم هوا و حجم هوا در چگالی مقدار جرم هوا را تعیین می‌کند:

$$V_{Air} = \alpha V_{Tank} \quad (19)$$

$$m_{Air} = \rho_{Air} V_{Air} \quad (20)$$

پس از آغاز به کار سیستم، با گرفتن انتگرال تغییرات جرم هوا نسبت به زمان می‌توان جرم هوای مخزن را در هر لحظه محاسبه نمود. برای محاسبه تغییرات حجم هوا نسبت به زمان، دبی حجمی آب تعیین کننده است؛ در مرحله تخلیه، دبی آب خروجی از توربین این مقدار را تعیین می‌کند و در مرحله آماده‌سازی به‌علت این‌که دبی پمپ ثابت مفروض شده است تغییرات حجم هوای مخزن نسبت به زمان همواره ثابت است. از طرفی، در مرحله آماده‌سازی به‌دلیل استفاده از مکانیسم تخلیه هوا تغییرات فشار نسبت به زمان برابر صفر است و مقدار فشار در این مرحله همان فشار پسماند است.

3-6- تلفات انرژی مربوط به تجهیزات مکانیکی

همان‌طور که پیش‌تر در مفروضات پژوهش بیان شد، به‌دلیل بررسی سیستم در حالت ایده‌آل و در جهت مقایسه نتایج پژوهش حاضر با تحقیقات پیشین، ساده‌سازی‌هایی صورت گرفته و اغلب تلفات انرژی ناچیز قلمداد شده که در راستای اهداف پژوهش است. تجهیزات مکانیکی سیستم شامل توربین آبی، پمپ، کمپرسور و توربین بادی است که هر کدام از آن‌ها دارای اجزاء متعدد و تلفات انرژی است. تلفات انرژی در توربین آبی شامل افت هد در لوله بر اثر اصطکاک، افت هد در نازل توربین ضربه‌ای بر اثر اصطکاک، تلفات هیدرولیکی در توربین ضربه‌ای بر اثر اصطکاک پره‌ها، تشکیل گرداب و انرژی جنبشی آب خروجی، تلفات نشتی در توربین ضربه‌ای هنگامی که آب به سطل‌ها[1] برخورد نکند و مقداری از نیرو به‌هدر رود، تلفات مکانیکی بر اثر اصطکاک یاتاقان‌ها و تلفات ژنراتور که شامل تلفات مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی است. تلفات انرژی در پمپ آبی مشابه با توربین آبی است و شامل افت هد بر اثر اصطکاک، تلفات هیدرولیکی، تلفات مکانیکی و تلفات موتور می‌شود.

به‌طور معمول تلفات انرژی در کمپرسور جابه‌جایی مثبت کم‌تر از تلفات کمپرسورهای دینامیک است. کمپرسورهای جابه‌جایی مثبت در کاربردهای فشار بالا و دبی پایین مانند سیستم پژوهش حاضر کاربرد دارند. تلفات انرژی در کمپرسور جابه‌جایی مثبت فشار بالا شامل تلفات مکانیکی ناشی از اصطکاک یاتاقان و محورها، تلفات اصطکاک هوا با قطعات کمپرسور، تلفات نشتی و تلفات موتور الکتریکی است. بیش‌ترین تلفات کمپرسور ناشی از اصطکاک است؛ سیال عامل یعنی هوا از طریق گذرگاه تیغه کمپرسور جریان می‌یابد و با سطوح صلب تماس پیدا می‌کند و به همین دلیل با مقاومت یعنی اصطکاک مواجه می‌گردد.

1. buckets

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

قالب پیش‌نویس مقالات کامل - نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

به‌دلیل گران‌روی[1]، اصطکاک بین لایه‌های سیال وجود خواهد داشت، بنابراین اصطکاک پوسته‌ای ایجاد خواهد شد. همچنین تلفات جداسازی لایه مرزی و تلفات ناشی از شوک نیز وجود خواهد داشت. به همین جهت، تلفات اصطکاکی، ترکیبی از تلفات اصطکاک پوسته‌ای و جدایی لایه مرزی است. تلفات اصطکاکی اساساً به ضریب اصطکاک، مجذور سرعت جریان سیال و طول گذر جریان سیال بستگی دارد. علاوه بر این، هنگامی که کمپرسور در شرایط خارج از طراحی کار کند، سرعت جریان هوا در هنگام عبور از پره، از زاویه آن پیروی نمی‌کند پس تلفات برخورد[2] نیز وجود خواهد داشت.

در توربین بادی، همواره فقط بخشی از انرژی باد توسط آن جذب و به انرژی مکانیکی تبدیل می‌گردد اما همین مقدار انرژی مکانیکی نیز بر اثر تلفات مکانیکی قطعات متحرک، تلفات ژنراتور و سایر تجهیزات الکتریکی کاهش می‌یابد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، این تلفات با درنظر گرفتن ضرایب بازدهی انتقال قدرت مکانیکی و بازدهی تبدیل الکتریکی توربین بادی لحاظ می‌شود. علاوه بر این، مواردی از قبیل اثر ویک[3] که به کاهش سرعت باد در پشت توربین اطلاق می‌شود و سبب کاهش بازدهی نیروگاه بادی می‌گردد، مصرف برق خود نیروگاه بادی، تاثیر تغییرات دما و موارد دیگری از این دست وجود دارد که می‌تواند بازدهی نیروگاه بادی را کاهش دهد.

4- نتایج و بحث

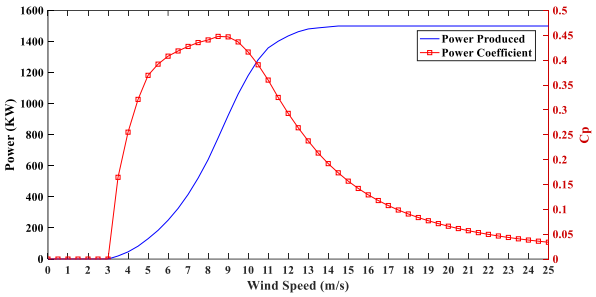
4-1- نیروگاه بادی

توربین بادی مورد استفاده در مدل‌سازی پژوهش حاضر، توربین 1/5 مگاواتی شرکت جنرال الکتریک است، مشخصات این توربین بادی در جدول 1 نشان داده شده است. همچنین مقادیر ضریب توان نسبت به سرعت باد، از تولید کننده توربین دریافت شده است. تغییرات چگالی هوا در کوتاه مدت تاثیر ناچیزی بر میزان تولید توان دارد [44]. در پژوهش حاضر داده‌های بادی برای مدت یک هفته از تاریخ هفتم تا سیزدهم جولای سال 2008 مورد استفاده قرار گرفته است، پس با توجه به کوتاه بودن زمان بررسی می‌توان مقدار چگالی هوا را ثابت فرض کرد.

جدول 1 پارامترهای توربین بادی مورد استفاده در مدل‌سازی

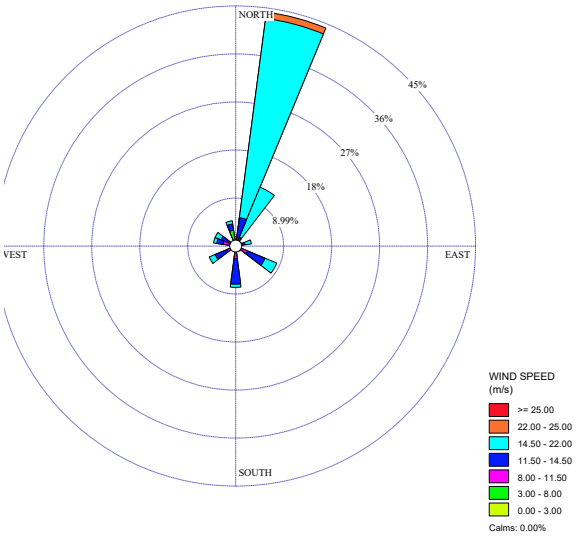
پارامتر	اندازه و واحد
نوع توربین بادی	GE 1/5 sl
توان نامی توربین	1/5 MW
مساحت منطقه جاروشده (A)	4657 m²
سرعت باد کات‌این (Cut-in)	3/5 m/s
سرعت باد نامی	12 m/s
سرعت باد کات‌اوت (Cut-out)	25 m/s
ارتفاع هاب (Hub)	80 m
چگالی متوسط هوا	1/188 kg/m³

با استفاده از این مقادیر، منحنی‌های توان و ضریب توان توربین بادی مدل شد که در شکل 4 نشان داده شده است. توربین با سرعت باد 3 متر بر ثانیه شروع به تولید توان می‌کند، در سرعت باد 12 متر بر ثانیه به توان نامی خود می‌رسد و در سرعت باد بیش‌تر از25 متر بر ثانیه توربین بادی خاموش می‌شود تا صدمه نبیند. بیش‌ترین مقدار ضریب توان 0/45 است که در حدود سرعت 8 تا 9 متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد و مقدار آن 0/14 از حد بتز[4] کمتر است.



شکل 4 منحنی توان و ضریب توان توربین بادی منتخب

در بازه زمانی مورد بررسی، تمامی بادها دارای سمت و سرعت هستند. باد غالب (44 درصد از کل بادها) از سمت شمال می‌وزد که سرعت 1/2 درصد از کل بادها در آن 22 تا 25 متر بر ثانیه و سرعت 42/8 درصد از کل بادها در آن 14/5 تا 22 متر بر ثانیه است. باد شمال شرق را می‌توان به‌عنوان نایب غالب درنظر گرفت که حدود 12 درصد از کل بادها را شامل می‌شود؛ سرعت حدود 11 درصد از کل بادها در آن بین 14/5 تا 22 متر بر ثانیه و سرعت حدود 1 درصد از کل بادها در آن بین 11/5 تا 14/5 متر بر ثانیه است. از دیگر بادها، باد جنوبی و جنوب شرقی هستند که در مجموع حدود 15 درصد از کل بادها را شامل می‌شوند، شکل 5.



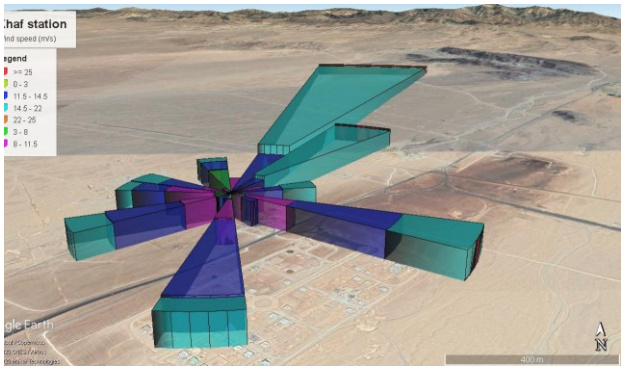
شکل 5 گلباد ایستگاه خواف در بازه زمانی هفتم تا سیزدهم جولای سال 2008

شکل 6 گلباد را در بازه زمانی مورد بررسی در تصویر هوایی ایستگاه خواف از زاویه دید جنوب نشان می‌دهد. ارتفاع پروفیل گلباد 100 متر و تصویر از فاصله 400 متری زمین است. همان‌طور که از تصویر مشخص است، باد غالب و نایب غالب از سمت ارتفاعات شمالی منطقه می‌وزند.

1. Viscosity
2. Incidence losses
3. Wake
4. Betz

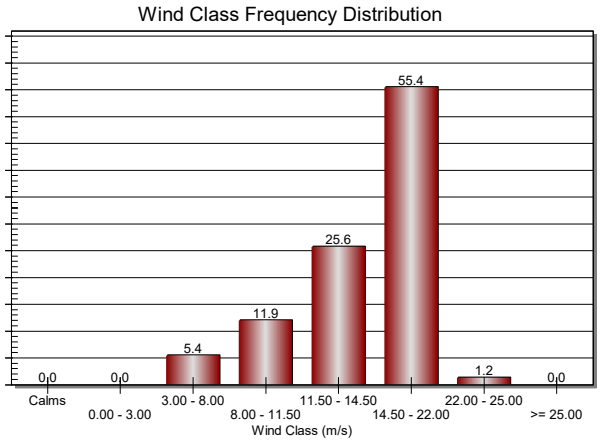
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

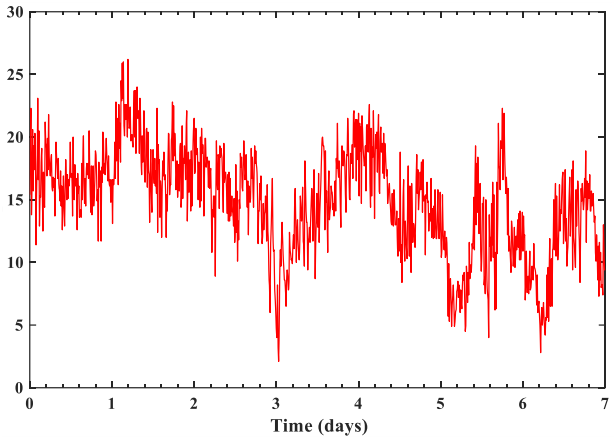


شکل 6 گلباد در تصویر هوایی ایستگاه خواف در بازه زمانی هفتم تا سیزدهم جولای 2008

با توجه به منحنی توان توربین بادی منتخب، بادهای منطقه را نسبت به سرعت آن‌ها می‌توان به هفت کلاس مختلف تقسیم کرد. سرعت متوسط باد 14/75 متر بر ثانیه است و حدود 0/5 درصد کمبود داده وجود دارد. بیش‌تر از 55 درصد بادهای منطقه، سرعتی بالاتر از سرعت نامی توربین بادی دارند و سرعت 25/6 درصد از بادها در محدوده سرعت نامی توربین بادی است، شکل 7. بدین‌ترتیب با درنظر گرفتن این‌که باد آرام، باد با سرعت بالاتر از سرعت کات‌اوت و پایین‌تر از سرعت کات‌این وجود ندارد، انتظار می‌رود توان تولیدی توربین بادی در 80 درصد از زمان یک هفته‌ای نزدیک به توان نامی آن باشد. همچنین تغییرات سرعت باد نسبت به زمان در شکل 8 قابل مشاهده است. علاوه بر این، نتایج مدل‌سازی بادی شش ماهه این منطقه که در پیوست ارائه شده، نشان دهنده پتانسیل بالای منطقه خواف برای احداث نیروگاه بادی است.



شکل 7 کلاس‌های باد در منطقه خواف در بازه زمانی هفتم تا سیزدهم جولای 2008

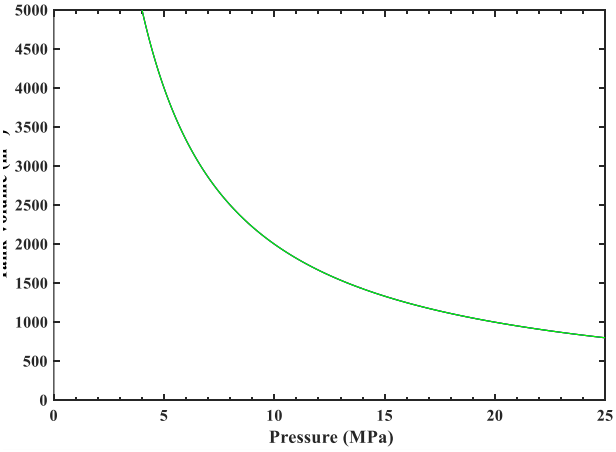


شکل 8 تغییرات سرعت باد نسبت به زمان از هفتم تا سیزدهم جولای 2008

4-2- انتخاب پارامترهای مخزن و تحلیل مدل با پارامترهای انتخابی

با استفاده از نتایج پژوهش پیشین [45]، مقدار α برابر 0/25 فرض شد تا بازدهی سیستم حدود 50 درصد و میزان انرژی ذخیره‌شده‌ی قابل استحصال برای سیستم مطلوب باشد. در این پژوهش فرض شده که خروجی مطلوب سیستم ذخیره‌سازی انرژی حدود 5400 مگاژول (1/5 مگاوات ساعت) است. همچنین حجم مخزن 1 با توجه به تحلیل انرژی سیستم [45] برابر 1000 متر مکعب درنظر گرفته شده است. بدین‌ترتیب نزدیکترین مقدار به این میزان کار خروجی، 5321 مگاژول است که در فشار عملیاتی 20 مگاپاسکال حاصل می‌شود. انرژی ورودی و ذخیره‌شده متناسب با این مقادیر به‌ترتیب برابر 10707 و 12502 مگاژول است. تغییرات حجم مخزن نسبت به فشار عملیاتی سیستم برای این مقادیر انرژی در شکل 9 قابل مشاهده است. همان‌طور که مشخص است منحنی کار ورودی، خروجی و انرژی ذخیره‌شده بر هم منطبق است که دقت تحلیل را تایید می‌کند.

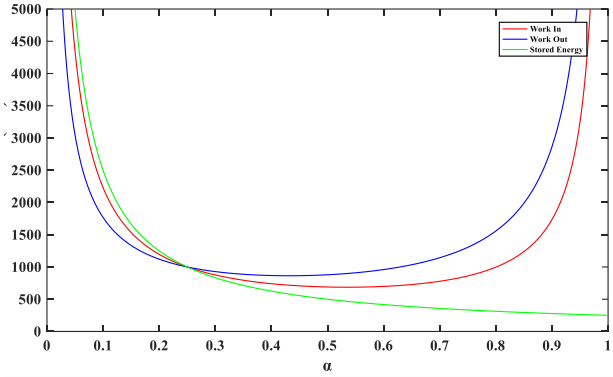
همچنین شکل 10 تغییرات حجم مخزن و شکل 11 تغییرات فشار عملیاتی سیستم را برای مقادیر مشخص انرژی (کار ورودی 10707، کار خروجی 5321 و انرژی ذخیره‌شده 12502 مگاژول) نشان می‌دهد. انطباق منحنی‌های میزان انرژی ورودی، خروجی و ذخیره‌شده در نقطه 0/25 برای α صحت نتایج تحلیل صورت‌گرفته را نشان می‌دهد.



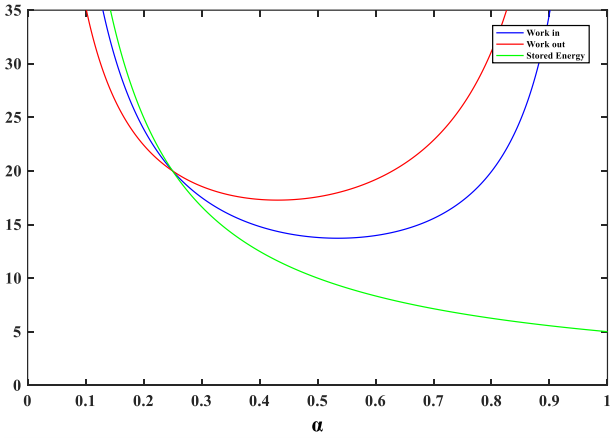
شکل 9 تغییرات حجم مخزن نسبت به فشار به‌ازای مقدار α برابر 0/25

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

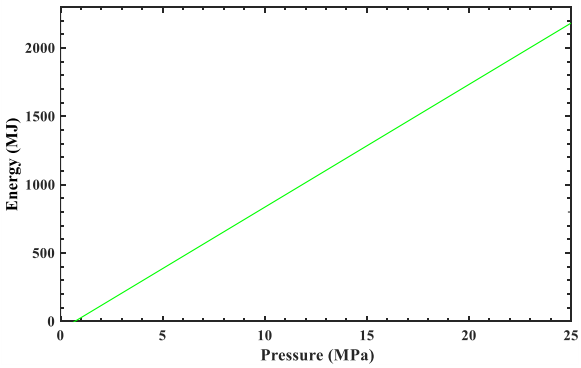


شکل 10 تغییرات حجم مخزن نسبت به α برای کار ورودی، خروجی و انرژی ذخیره‌شده مشخص در فشار 20 مگاپاسکال و حجم مخزن 1000 مترمکعب



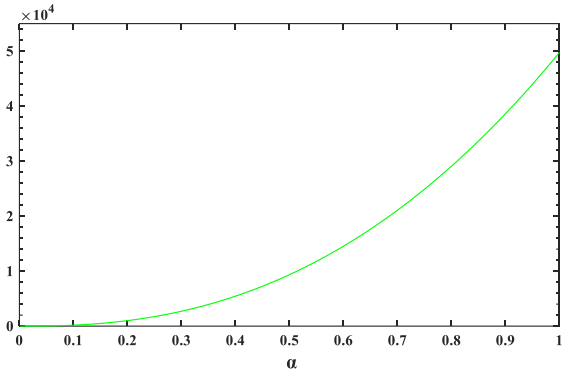
شکل 11 تغییرات فشار نسبت به α برای کار ورودی، خروجی و انرژی ذخیره‌شده مشخص در حجم مخزن 1000 متر مکعب

حال با توجه به این‌که ابعاد پارامترهای مخزن مشخص شده، میزان انرژی صرفه‌جویی‌شده به‌وسیله مکانیزم تخلیه هوا با استفاده از این مقادیر مورد بررسی قرار گرفته است، شکل 12.



شکل 12 تغییرات انرژی صرفه‌جویی‌شده به‌وسیله مکانیزم تخلیه هوا نسبت به فشار به‌ازای α برابر 0/25 و حجم مخزن 1000 مترمکعب

همان‌طور که از شکل 12 مشخص است، به‌وسیله مکانیزم تخلیه هوا در فشار عملیاتی 20 مگاپاسکال از هدررفت حدود 1500 مگاژول انرژی جلوگیری می‌شود. شکل 13 نیز این نتیجه را تایید می‌کند، مطابق این شکل با افزایش مقدار α میزان صرفه‌جویی انرژی افزایش می‌یابد اما همان‌طور که در پژوهش پیشین [45] مشخص شد با افزایش α کار خروجی و بازدهی سیستم کاهش می‌یابد.

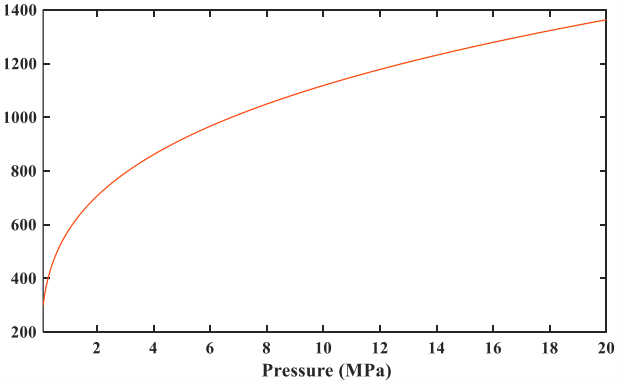


شکل 13 تغییرات انرژی صرفه‌جویی‌شده به‌وسیله مکانیزم تخلیه هوا نسبت به α در فشار 20 مگاپاسکال و حجم مخزن 1000 مترمکعب

4-3- تغییرات انرژی در مخزن

با استفاده از پارامترهای منتخب می‌توان تغییرات انرژی و دما در مخزن را برای یک چرخه تحلیل کرد. بدین‌ترتیب فرایند فشرده‌سازی هوا از شرایط محیط (دمای 300 درجه کلوین و فشار 0/1 مگاپاسکال) شروع می‌شود و در فشار 20 مگاپاسکال به 1363 درجه کلوین می‌رسد، شکل 14. در فرآیند تخلیه مخزن، دمای هوا از 1363 درجه کلوین در فشار 20 مگاپاسکال به 783/2 درجه کلوین در فشار پسماند می‌رسد که مقدار این فشار برابر 2/78 مگاپاسکال است، شکل 15. برای چرخه‌های بعدی، دمای فرآیند از همین مقدار (783/2 درجه کلوین) آغاز می‌شود.

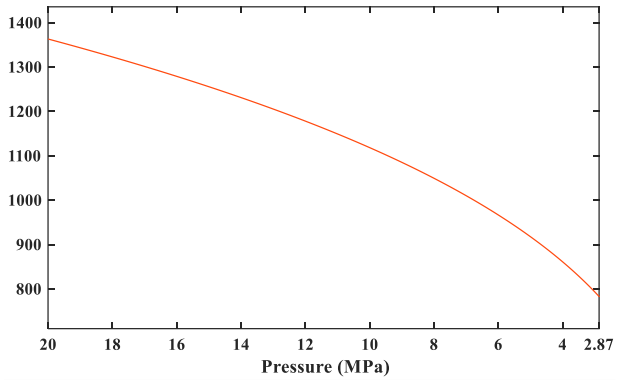
مطابق شکل 16 بعد از اولین چرخه، افزایش فشار و انرژی ذخیره‌شده به‌ترتیب از 2/87 مگاپاسکال و 1795 مگاژول شروع می‌شود. در انتهای فرایند شارژ، انرژی ذخیره‌شده به 12502 و انرژی ورودی به سیستم به 10789 مگاژول می‌رسد. از نظر تئوری افزایش فشار در فرآیند شارژ سیستم پژوهش حاضر، مشابه سیستم پژوهش ونگ و همکاران [46] است با این تفاوت که در اینجا حجم مخصوص (υ) هوا، و نه حجم آن، کاهش می‌یابد.



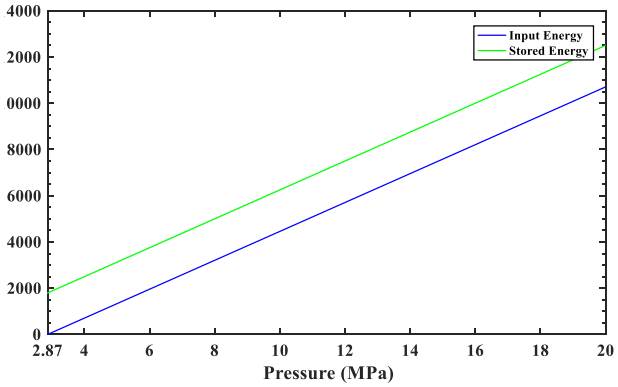
شکل 14 تغییرات دمای مخزن با فشار در فرآیند شارژ برای سیستم طراحی‌شده (20 مگاپاسکال، 1000 مترمکعب، α برابر0/25)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل 15 تغییرات دمای مخزن نسبت به فشار در فرآیند تخلیه برای سیستم طراحی‌شده (20 مگاپاسکال، 1000 مترمکعب، α برابر 0/25)

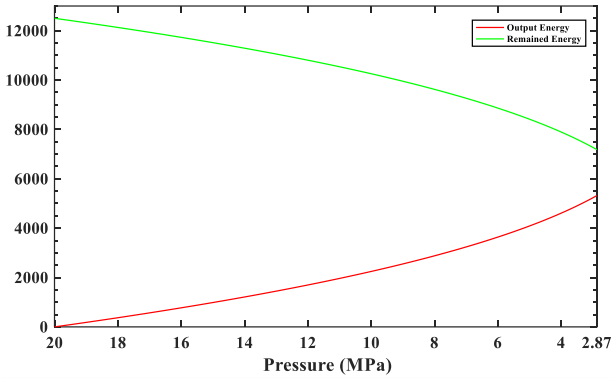


شکل 16 افزایش انرژی ورودی و ذخیره‌شده مخزن با افزایش فشار در طول فرآیند شارژ

به همین ترتیب در ابتدای فرایند تخلیه، انرژی ذخیره‌شده 12502 مگاژول است که پس از تخلیه کامل این مقدار به 7181 مگاژول می‌رسد. همچنین بیشینه انرژی خروجی سیستم در انتهای فرایند برابر است با 5283 مگاژول، شکل 17.

4-4- سیستم کامل

تمام اجزاء سیستم به‌صورت یک سیستم کامل تجمیع شد. مدل جامع اکنون از طریق عملکرد سیستم با اصول مکانیکی دقیق، اصول ترمودینامیکی و اصول پایستگی، چرخه را طی می‌کند. عملکرد هر جزء (پمپ، کمپرسور، توربین، شیرها) تغییرات بعدی را در حالت مخزن موجب می‌شود. این حالت‌ها از طریق ادغام معادلات دیفرانسیل حاکم بر مخزن تعیین شده است. هر حالت به‌وسیله معیارهای منطقی رصد شده و فرمان‌های کنترل ارسال می‌شود.



شکل 17 کاهش انرژی خروجی و باقی‌مانده در مخزن با کاهش فشار در طول فرآیند تخلیه

با استفاده از مدل دینامیکی ارائه‌شده، شبیه‌سازی سیستم می‌تواند تحت ورودی‌های مختلف و خروجی‌های مطلوب، عمل کند. اندازه مخزن و فشارهای عملیاتی می‌تواند تنظیم شود و تاثیر آن‌ها بر عملکرد، مورد بررسی قرار گیرد. یکی از معیارهای عملکرد مطلوب برای این سیستم، اعلان زمان مناسب (بین آغاز و پایان فرآیند تولید) به اپراتور شبکه برق است. با نظارت بر سطح فشرده‌سازی در سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای، اپراتور می‌تواند با دقت پیشبینی کند که چقدر طول می‌کشد تا سیستم در سطح مشخصی از توان، به خط انتقال برسد. علاوه بر این، در صورت حفظ سطح توان مشخص، اپراتور سیستم یا شبکه برق می‌تواند از زمان خاموش شدن سیستم آگاه شود.

4-4- 1- عملکرد پیوسته

به‌علت ماهیت چرخه در یک سیستم تک مخزن، توان خروجی همواره ناپیوسته خواهد بود زیرا در نهایت مخزن از آب خالی می‌شود. ممکن است برخی کاربردها یک خروجی قدرت بی‌وقفه از سیستم بخواهند که این امر می‌تواند از طریق یک سیستم چند مخزنی انجام گیرد. همان‌طور که یک مخزن شارژ می‌شود (مصرف توان) دیگری تخلیه می‌شود (تولید توان). با این حال، به‌علت جریان‌های مورد انتظار ورودی و خروجی مخزن، مقیاس‌های زمانی برای مصرف و تولید توان، لزوما همسان نیستند. هنگامی که هر دو مخزن در حال پمپاژ هستند و توان تولید نمی‌کنند، این بی‌نظمی ممکن است به زمان‌بندی منتقل شود. یک مخزن سوم یا بیش‌تر می‌تواند برای متوازن کردن مسئله زمان‌بندی به سیستم اضافه شود. نمونه‌هایی از عملکرد پیوسته چند مخزنی در ادامه آمده است.

4-4- 1-1- اپراتورهای شبکه سراسری برق

برای دو شبیه‌سازی اول، اطلاعات باد از ایستگاه خواف در جنوب شرق استان خراسان رضوی به‌منظور ایجاد پروفیل ورودی برای کمپرسور، استفاده شد. تعداد مخزن‌ها و اندازه‌های پارامترها با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده انتخاب شده است. هدف استفاده از ذخیره‌سازی انرژی برای یک اپراتور شبکه، دریافت خروجی از یک منبع متناوب و فراهم کردن یک توان قابل ارسال و قابل پیشبینی است. پارامترهای شبیه‌سازی را می‌توان در جدول 2 مشاهده کرد.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

قالب پیش‌نویس مقالات کامل - نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

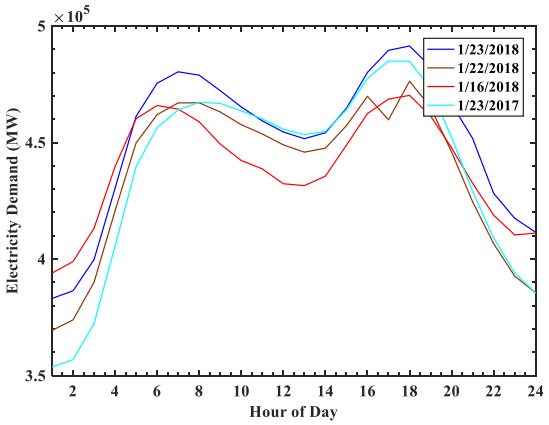
جدول 2 پارامترهای انتخاب شده در شبیه‌سازی‌های اپراتورهای شبکه برق و تولید برق تجدیدپذیر

پارامتر	اندازه و واحد
تعداد و حجم مخزن	$4\times1000\ m^3$
فشار مخزن	$20MPa$
ثابت گازها برای هوا (R)	$0/287\ kJ/kg\cdot^oK$
α	$0/25$
تعداد و توان توربین بادی	$13\times1/5\ MW$
نوع توربین بادی	$GE1/5\ sl$
تعداد و توان کمپرسور	$1\times20\ MW$
تعداد و توان توربین آبی	$1\times5\ MW$
فشار محیط	$0/1\ MPa$
دمای محیط	300^oK
چگالی هوای محیط	$1/225\ kg/m^3$

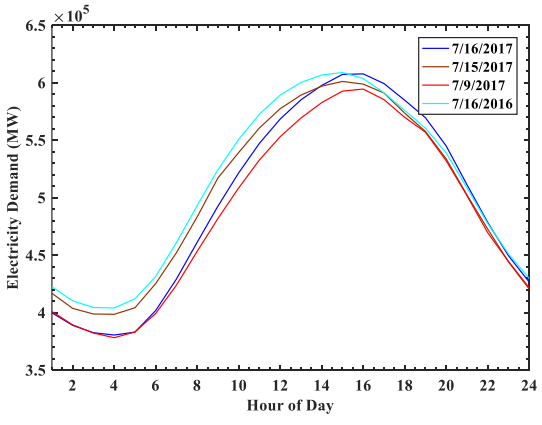
همان‌طور که شکل 18 نشان می‌دهد در فصل تابستان منحنی بار تقریباً به‌صورت سینوسی است، داده‌های این شکل از وبگاه اداره سرپرستی اطلاعات انرژی ایالات متحده [47] استخراج شده است. مطابق پژوهش‌های اخیر منحنی بار مصرفی روزانه برق در ایران هم تقریباً سینوسی است [48]. البته منحنی بار تا حد زیادی به بازار انرژی و سیاست‌های مصرفی برق وابسته است [49]. بدین‌ترتیب می‌توان با داشتن پیش‌بینی درست از مصرف برق مشترکان، نیاز شبکه برق را به خوبی پوشش داد. شکل 18 این نکته را تایید می‌کند که منحنی بار دارای دو اوج مصرف در زمستان و یک اوج مصرف در تابستان است، همچنین میزان بار مصرفی در زمستان کم‌تر از تابستان است. اپراتورهای شبکه برق برای توازن بار مصرفی از تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌کنند. بنابراین، هدف از شبیه‌سازی کنونی فراهم کردن یک توان خروجی از سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای برای پوشش این روند روزانه در تابستان است که به‌صورت تابع سینوسی با یک دوره یک روزه، که نقطه بیشینه آن در ساعت 3 بعدازظهر اتفاق می‌افتد، مدل شده است. نتایج این شبیه‌سازی در شکل 19 قابل مشاهده است.

همان‌طور که از شکل 19 مشخص است، سیستم به‌خوبی تقاضای مصرفی را پوشش داده و حدود 43 دقیقه بعد از آغاز شبیه‌سازی، فرآیند استحصال انرژی شروع شده است. اولین چرخه، از فشار و دمای اتمسفر برای مخزن شروع شده است.

در طول این شبیه‌سازی یک هفته‌ای، بیشینه انرژی ورودی به سیستم در یک دوره واحد 13/82 مگاوات ساعت و در اولین شارژ بوده است. در طول هفته، 998/2 مگاوات ساعت ورودی و 485/14 مگاوات ساعت خروجی سیستم بوده است که این نتایج نشان می‌دهد بازدهی رفت و برگشتی سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای 0/486 است. همچنین میزان انرژی مازاد سیستم که از نیروگاه بادی به شبکه برق ارسال شده برابر 1949/69 مگاوات ساعت است. نقطه اوج مصرف برق برابر 4/3 و نقطه کمینه مصرف برق برابر 1/4 مگاوات است.



الف

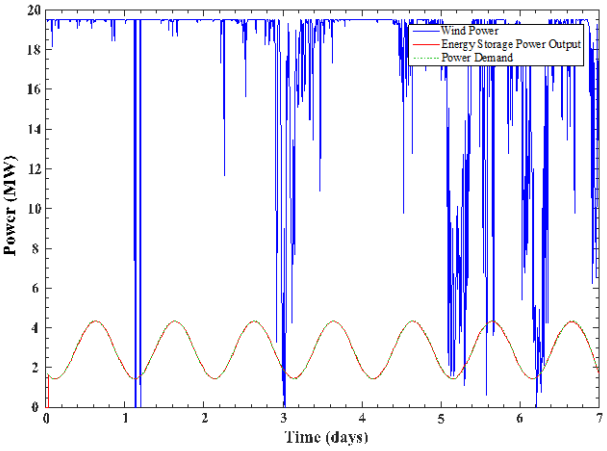


ب

شکل 18 منحنی مصرف روزانه برق در زمستان (الف) و تابستان (ب)

Archive of SID.ir

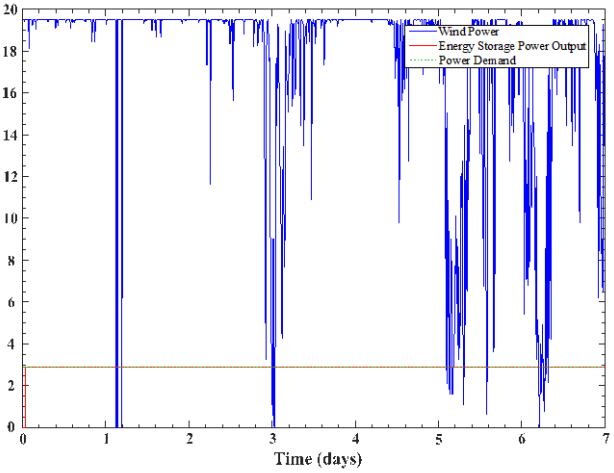
Archive of SID.ir



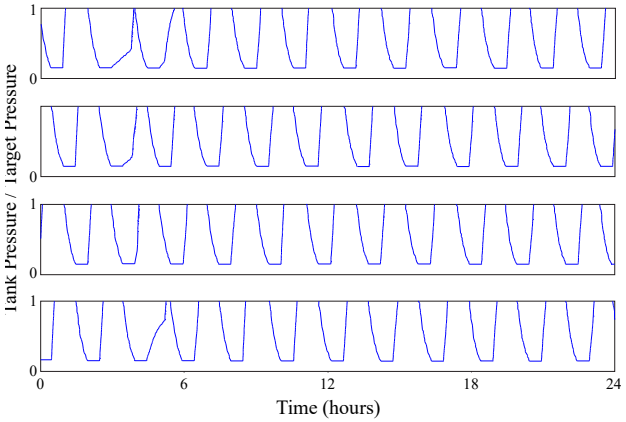
شکل 19 شبیه‌سازی یک هفته‌ای با توان ورودی انرژی بادی و توان خروجی کنترل‌شده برای پوشش منحنی بار روزانه

4-4- 1-2- اپراتورهای تولید برق تجدیدپذیر

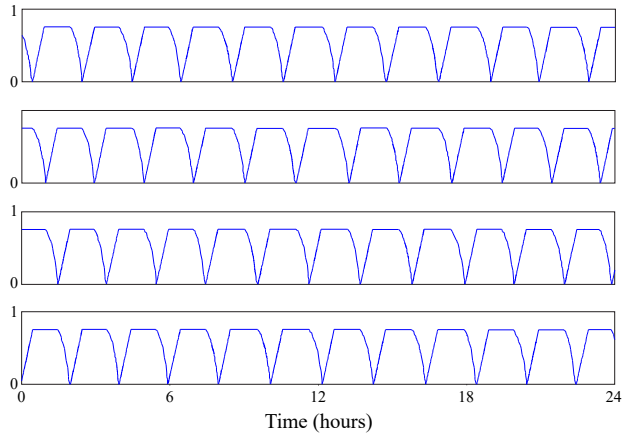
نتیجه مطلوب این کاربرد، شکل دادن توان خروجی یک منبع انرژی متناوب بادی به‌صورت پیوسته و متناسب با تقاضای شبکه برق است. هنگامی که باد می‌وزد، توان به کمپرسور داده می‌شود و انرژی شروع به ذخیره شدن به‌صورت هوای فشرده می‌کند. برای این شبیه‌سازی، سیستم کنترل فرمان می‌دهد که یک توان خروجی ثابت به‌صورت پیوسته ارائه شود. این کار از طریق عملکرد دسته‌ای مخزن چندگانه انجام شده است. هر کدام از چهار مخزن خارج از فاز دیگر مخزن‌ها در حال کار هستند. شکل 20 نشان می‌دهد که توان خروجی سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای به‌صورت پیوسته در یک سطح ثابت حفظ شده است. انرژی ورودی سیستم در این شبیه‌سازی 998/2 مگاوات ساعت، انرژی خروجی 485/17 مگاوات ساعت و بازدهی رفت و برگشتی سیستم 48/6٪ است. همچنین شکل‌های 21 و 22 نشان می‌دهند که چگونه فشار و حجم آب مخزن‌ها، در 24 ساعت از یک هفته شبیه‌سازی تغییر می‌کند.



شکل 20 شبیه‌سازی یک هفته‌ای با توان ورودی بادی و توان خروجی بی‌وقفه ثابت



شکل 21 تغییرات نسبت فشار مخزن به فشار هدف (بیشینه) برای هر یک از چهار مخزن در یک روز



شکل 22 تغییرات نسبت حجم آب به حجم مخزن برای هر یک از چهار مخزن در یک روز

زمان‌هایی که انرژی دریافتی قیمت پایین‌تری دارد ذخیره‌سازی انرژی بهره اقتصادی بیش‌تری دارد. با افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه، نوسان انرژی بادی تنها نگرانی برای نیروگاه بادی و شبکه برق نیست. بعضی رویدادها می‌تواند در طول عملکرد طبیعی یک نیروگاه بادی اتفاق بیافتد که موجب خسارات مالی و اعتباری جدی شود. برای مثال، اگر یک نیروگاه بادی در معرض بادهای شدید قرار بگیرد، توربین‌ها مقدار قابل توجهی برق تولید می‌کنند. اگر یک تند باد خیلی کوتاه، توربین‌ها را به ورای سرعت کاتاوت خود بفرستد، آن‌ها خاموش می‌شوند. این یک مشکل پیچیده برای تجهیزات است زیرا آن‌ها به سرعت مقدار قابل توجهی از توان قابل تحویل به شبکه برق را از دست می‌دهند. بازگشت دوباره توربین‌ها به شبکه و تولید دوباره توان توسط آن‌ها می‌تواند تا 30 دقیقه طول بکشد. با استفاده از سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای ارئه شده می‌توان در چنین شرایطی مشکلات اپراتور شبکه برق را به میزان زیادی کاهش داد.

4-4- 2- ذخیره‌سازی پیکسایی

کاربرد دیگر سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای استفاده به‌عنوان تاسیسات ذخیره‌سازی انرژی تجاری است. بدین‌منظور دو سناریو طراحی شده است؛ در سناریو اول، انرژی از یک توربین بادی اخذ شده و در سناریو دوم، انرژی از شبکه برق در زمانی که قیمت برق

Archive of SID.ir

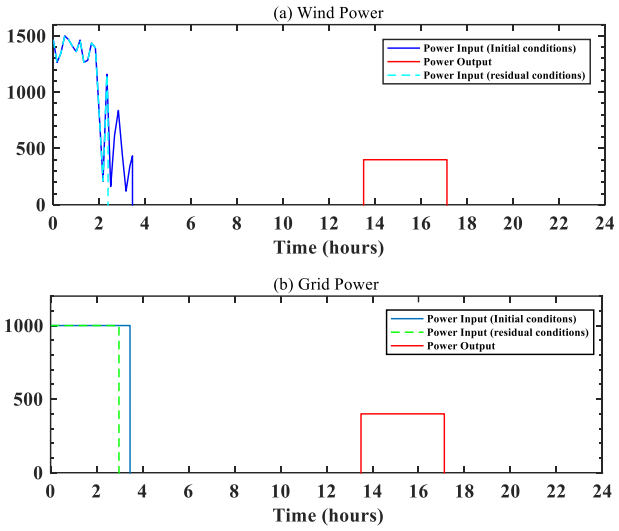
Archive of SID.ir

پایین است (ساعات کم‌باری) اخذ شده و در زمانی که قیمت برق بالا است به شبکه برق رسانده می‌شود. این نوع کاربرد پیش‌تر مورد استفاده قرار گرفته و دو سیستم معمولی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده در هانتورف آلمان و آلاباما ایالات متحده نمونه‌هایی از این نوع کاربرد هستند [50]. در حالت دوم، با وجود این‌که توان از شبکه برق مصرف می‌شود اما این سیستم ذخیره‌سازی انرژی هنوز هم به‌عنوان یک سیستم پاک شناخته می‌شود زیرا در طول فرآیند بازیابی انرژی به احتراق گاز طبیعی نیاز نیست. جدول 3 پارامترهای انتخابی برای این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول 3 پارامترهای انتخاب شده در شبیه‌سازی‌های تاسیسات ذخیره‌سازی انرژی تجاری

پارامتر	اندازه و واحد
تعداد و حجم مخزن	$1\times1000\ m^3$
فشار مخزن	$20 MPa$
ثابت گازها برای هوا (R)	$0/287\ kJ/kg\cdot°K$
α	0/25
تعداد و توان توربین بادی	$1\times1/5\ MW$
نوع توربین بادی	$GE1/5\ sl$
تعداد و توان کمپرسور	$1\times1/5\ MW$
تعداد و توان توربین آبی	$1\times0/5\ MW$
فشار محیط	$0/1\ MPa$
دمای محیط	$300°K$
چگالی هوای محیط	$1/225\ kg/m^3$

شکل 23 نتایج این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. تاسیسات ذخیره‌سازی تجاری، انرژی ارزان قیمت ساعات کم‌باری را ذخیره کرده و در زمان تقاضای بالا به شبکه برق می‌فروشد. برای این شبیه‌سازی در روز 11 جولای، زمان پیک شبکه از ساعت 13:30 لغایت 17:30 درنظر گرفته شده که در هر دو سناریو توانسته با توان ثابت 400 کیلووات به مدت 3 ساعت و 40 دقیقه برق را به شبکه سراسری ارسال کند. خط‌چین‌ها در هر دو حالت نشان‌دهنده توان ورودی به سیستم در شرایط پسماند انرژی هستند؛ میزان انرژی ورودی به سیستم برای شرایط پسماند 2/99 مگاوات ساعت و بازدهی سیستم برای شرایط پسماند در هر دو مورد استفاده (متصل به توربین بادی و شبکه) 0/489 است. برای شرایط اولیه سیستم، میزان انرژی ورودی به آن 3/42 مگاوات ساعت و بازدهی سیستم برای شرایط اولیه (اولین شارژ) برابر 0/428 است. علت اختلاف سه دهم درصدی بازدهی سیستم برای این سناریو در شرایط پسماند با بازدهی سیستم در سناریو عملکرد پیوسته، تاثیر بازدهی پایین‌تر در اولین شارژ وهمچنین خطای اندک سیستم به‌دلیل چندین‌بار تکرار چرخه است.



شکل 23 شبیه‌سازی یک‌روزه برای تاسیسات ذخیره‌سازی انرژی تجاری؛ (a) توان ورودی گرفته شده از توربین بادی (b) توان ورودی گرفته شده از شبکه سراسری برق

4-5- صحت‌سنجی نتایج

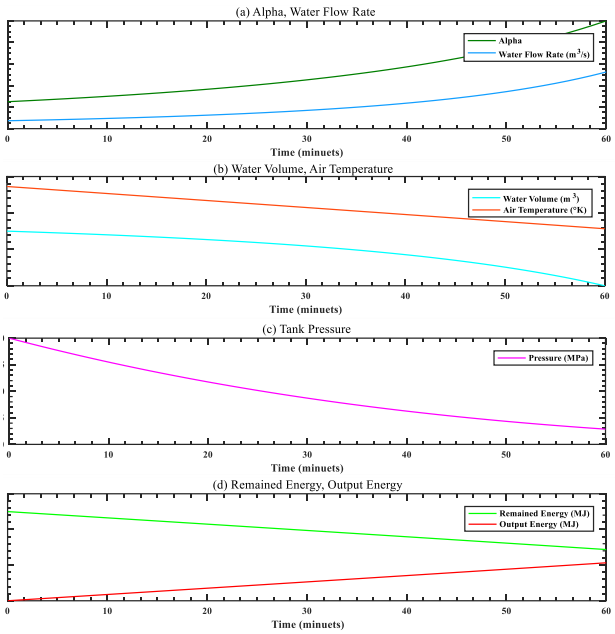
در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم و میزان دقت و صحت این نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین‌منظور یک شبیه‌سازی با مدل دینامیکی ارائه‌شده برای تامین پایدار 1/46 مگاوات برق در یک ساعت انجام شد که نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در شکل 24 قابل مشاهده است. مقادیر فشار هدف، حجم مخزن و α برای این شبیه‌سازی به‌ترتیب برابر 20 مگاپاسکال، 1000 مترمکعب و 0/25 است.

همان‌طور که از شکل 24 مشخص است (a) نشان دهنده تغییرات α و دبی حجمی آب در زمان تخلیه است. در این‌جا منظور از α، تغییرات نسبت حجم هوا به حجم مخزن 1 در زمان تخلیه است. (b) تغییرات حجم آب و دمای هوای مخزن، (c) تغییرات فشار مخزن و (d) تغییرات انرژی خروجی و باقی مانده در مخزن در فرآیند تخلیه سیستم است. دبی آب خروجی مخزن از 0/073 تا 0/525 مترمکعب بر ثانیه و دمای مخزن از 1363 تا 783/2 درجه کلوین در حال تغییر است. فشار پسماند مخزن برابر 2/871 مگاپاسکال و انرژی باقی‌مانده در مخزن از 12502 تا 7181 مگاژول در حال کاهش است. همچنین انرژی خروجی نهایی سیستم برابر 5283 مگاژول است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با تحلیل انرژی سیستم [45]، کم‌تر از 0/8 درصد اختلاف دارد که ناشی از تفاوت در دقت محاسباتی، حل‌گر معادلات و درجه سختی معادلات مدل‌سازی‌شده است.

قالب پیش‌نویس مقالات کامل - نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل 24 نتایج شبیه‌سازی فرآیند تخلیه سیستم ارائه‌شده برای تامین 1/46 مگاوات انرژی به‌صورت پیوسته

5- نتیجه‌گیری

در طول سال، شرایط خاصی پدید می‌آید که نیروگاه بادی یا اپراتورهای شبکه توان الکتریکی مازاد مصرف تولید می‌کنند. به‌منظور جلوگیری از هدررفت توان مصرف نشده، استفاده سیستم ذخیره‌سازی انرژی با نرخ‌های ازپیش تعیین شده می‌تواند راه‌گشا باشد. پژوهش حاضر نشان داد سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای از منظر تئوری پتانسیل مناسبی جهت استفاده به‌همراه انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌طور خاص، نیروگاه بادی دارد. بر این اساس، سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای با کاربردهای متصل به شبکه سراسری برق یا منفصل از آن و یکپارچه‌سازی با نیروگاه بادی سازگاری مناسبی دارد و می‌تواند بار مصرفی مورد تقاضا را با تقریب مناسبی پوشش دهد. نتایج مهم پژوهش حاضر به شرح زیر است:

1. منطقه جغرافیایی و دوره مورد بررسی ایستگاه بادی، دارای پتانسیل بسیار بالایی از نظر تولید انرژی الکتریکی است. این موضوع بدین معنی نیست که پژوهش حاضر یک مطالعه امکان‌سنجی است، با این وجود یک تحلیل کوتاه در این خصوص در پیوست مقاله درج شده که می‌تواند مفید واقع شود. در طول دوره یک هفته‌ای مورد بررسی، نیروگاه بادی تقریبا به‌طور بی‌وقفه تولید توان می‌کند که این امر بر عملکرد پیوسته سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای تاثیر به‌سزایی دارد. بدین‌ترتیب، عملکرد پیوسته سیستم در کارکرد با توان بادی قابل تعمیم نیست اما سیستم ذخیره‌سازی انرژی نوین پژوهش حاضر قابلیت عملکرد پیوسته با توان بادی را دارد. در مورد یکپارچه‌سازی سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای با شبکه سراسری برق، سیستم از منظر تامین پیوسته توان خروجی می‌تواند قابلیت اطمینان بالایی داشته باشد.
2. با توجه به دمای بالای مخزن و بازه تغییرات حدود 500 درجه‌ای آن، کنترل دمای سیستم چالش بزرگی خواهد بود و عملکرد آن به‌صورت شبه بی‌دررو نیازمند استفاده از تجهیزات پیشرفته ذخیره‌سازی حرارت و عایق‌های مناسب است. همچنین فشار پسماند مخزن که حدود 2/9 مگاپاسکال است دارای پتانسیل مناسبی جهت تولید کار است که به سبب پیکربندی و پارامترهای انتخابی سیستم حدود 80 درصد از این انرژی با تخلیه به اتمسفر هدر می‌رود.
3. بازدهی رفت و برگشتی سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای حدود 49 درصد است که این مقدار از بازدهی مورد انتظار کم‌تر است. زمان راه‌اندازی اولیه سیستم حدود 43 دقیقه است که چندان مطلوب نیست اما پس از اولین شارژ، سیستم عملکرد پیوسته مناسبی دارد و زمان شارژ کاهش می‌یابد. اولین چرخه سیستم به‌دلیل شروع به کار از شرایط اتمسفر حدود 7 درصد بازدهی کم‌تری نسبت به چرخه‌های بعدی دارد که تاثیر این اختلاف با توجه به تعداد بالای تکرار چرخه‌ها ناچیز است.
4. با توجه به اهمیت نسبت اولیه حجم هوا به حجم مخزن 1 در تعیین بازدهی سیستم، این نسبت نیاز به بهینه‌سازی دارد. هرچه مقدار آن کم‌تر باشد بازدهی سیستم بیش‌تر می‌شود اما برای تامین مقدار مشخصی از انرژی، حجم مخزن یا تعداد آن افزایش می‌یابد و این موضوع به‌طور مستقیم بر هزینه سیستم اثرگذار است. حجم بالای مخزن لزوماً به معنی افزایش قابلیت سیستم برای کارکرد پیوسته نیست و هرچه تعداد مخزن‌ها بیش‌تر باشد امکان عملکرد پیوسته افزایش می‌یابد زیرا هر مخزن می‌تواند در فازی متفاوت از چرخه به‌صورت مستقل عمل کند. تعداد مخزن‌ها و حجم آن‌ها نیز به‌علت تاثیر مستقیم بر هزینه سیستم بسته به نوع کاربرد و میزان انرژی ورودی و خروجی مورد نظر نیاز به انتخاب بهینه دارد که در پژوهش حاضر برای عملکرد پیوسته سیستم حداقل تعداد مخزن‌ها 4 عدد درنظر گرفته شده است. پس یک تحلیل اقتصادی برای عملکرد سیستم در شرایط مختلف جهت بهینه‌سازی پارامترهای سیستم نیاز است.
5. تلفات انرژی کمپرسور واقعی به‌علت ناکارآمدی مکانیکی و انتقال گرما، ناکارآمدی در توربین و پمپ آبی و همچنین تلفات انرژی در دیگر تجهیزات سیستم واقعی نظیر مخزن‌های ذخیره‌سازی، موتور، ژنراتور و اتصالات سیستم موجب کاهش بازدهی کل سیستم نسبت به حالت ایده‌آل در پژوهش حاضر می‌شود. بازدهی در پژوهش حاضر فقط تلفات مربوط به مکانیزم تخلیه هوا را مفروض می‌دارد، این امر نشان از اهمیت بخشی از انرژی است که از مخزن 2 به اتمسفر وارد شده و به‌هدر می‌رود. بنابراین اصلاح ساختار سیستم کنونی برای استفاده مجدد از این انرژی مهم است. با این حال، لازم به ذکر است که بازدهی رفت و برگشتی سیستم ذخیره‌سازی انرژی تنها معیار برای سنجش عملکرد سیستم نیست. انرژی قابل ارسال برای اپراتورهای شبکه برق با ارزش‌تر از انرژی غیر قابل ارسال است. آگاهی از زمان شروع به کار سیستم

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

قالب پیش‌نویس مقالات کامل - نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

ذخیره‌سازی انرژی، میزان دقیق ظرفیت توان و مدت زمان عملکرد سیستم، انرژی را با ارزش‌تر می‌کند.

6- فهرست علائم

علایم

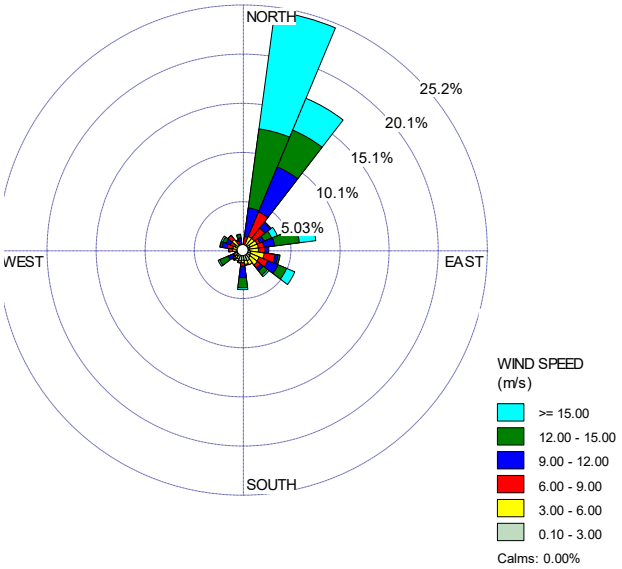
C_p	ضریب توان توربین بادی (-)
C_f	ضریب ظرفیت (-)
R	ثابت گازها $(kJ/kg\cdot°K)$
m	جرم (kg)
V	حجم (m^3)
T	دما $(°K)$
t	زمان (s)
k	ثابت پلی‌تروپیک در فرایند بی‌دررو (-)
P	فشار (Pa)
W	توان $(watt)$
h	ارتفاع (m)
g	شتاب گرانش زمین (m/s^2)
$\dot{V}$	دبی حجمی (m^3/s)

علایم یونانی

ρ	چگالی (kg/m^3)
υ	حجم مخصوص (m^3/kg)
α	نسبت حجم هوا به حجم کل (-)
η	بازدهی (-)

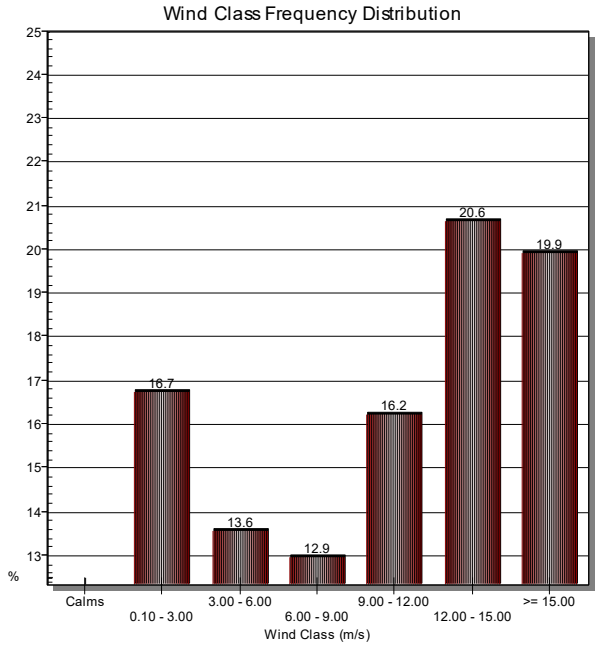
7- پیوست

در جهت بررسی پتانسیل بادی منطقه خواف برای استفاده از سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و هیدروالکتریکی تلمبه ذخیره‌ای، داده‌های بادی شش ماه متوالی این منطقه مدل‌سازی شد. به‌طور معمول داده‌های یک سال مورد استفاده قرار می‌گیرد اما به‌علت کسری داده ساتبا این امر قابل انجام نبود. با وجود آن‌که داده‌های ساتبا بیش‌از دو سال را شامل می‌شود اما داده‌کاوی نشان داد که فقط از تاریخ نهم جولای تا هفتم ژانویه سال 2008 میلادی بدون کسری داده اثرگذار است. گلباد ایستگاه بادی برای این دوره شش ماهه در شکل 25 قابل مشاهده است که از نظر سرعت و جهت باد غالب و نایب غالب مشابه شکل 5 است.



شکل 25 گلباد ایستگاه خواف در بازه زمانی نهم جولای تا هفتم ژانویه سال 2008

شکل 26 کلاس‌های بادی منطقه خواف را در دوره شش ماهه مورد بررسی نشان می‌دهد؛ 16/7 درصد از این بادها کم‌تر از سرعت باد کات‌این توربین بادی منتخب است. همچنین کمبود داده این مدل‌سازی کم‌تر از 0/1 درصد است.



شکل 26 کلاس‌های باد در منطقه خواف در بازه زمانی نهم جولای تا هفتم ژانویه سال 2008

تغییرات سرعت باد نسبت به زمان در شکل 27 و تغییرات توان تولیدی نیروگاه بادی نسبت به زمان در شکل 28 قابل مشاهده است، این مدل‌سازی با توجه به جدول 1 انجام شده است. کل انرژی تولیدی در مدت 183 روز (از 9

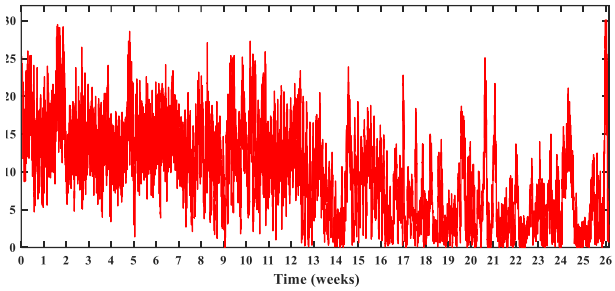
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

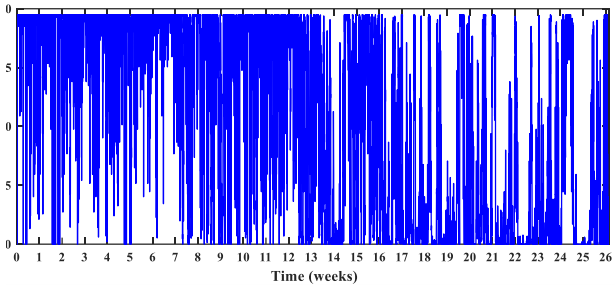
جولای 2007 تا 7 ژانویه 2008) 49712000 کیلووات ساعت است. ضریب ظرفیت نیروگاه از فاکتورهای مهم برای تعیین پتانسیل منطقه از نظر امکان‌سنجی به‌کارگیری سیستم است و عبارت است از نسبت انرژی تولیدی نیروگاه بر انرژی تولیدی آن در حالت ایده‌آل (توان نامی) در یک بازه زمانی مشخص که از رابطه زیر به‌دست می‌آید [34]:

$$C_f = \frac{49712\ \text{MWh}}{(183\ \text{days}) \times (24\frac{\text{hours}}{\text{day}}) \times (13 \times 1.5\ \text{MW})} = 0.5804 \qquad (21)$$

بدین ترتیب ضریب ظرفیت برابر 58 درصد است که این نتیجه نشان می‌دهد منطقه خواف از نظر تولید توان برای تاسیس نیروگاه بادی پتانسیل مناسبی دارد.



شکل 27 تغییرات سرعت باد نسبت به زمان از نهم جولای تا هفتم ژانویه سال 2008



شکل 28 توان تولیدی نیروگاه بادی از نهم جولای تا هفتم ژانویه سال 2008

8- مراجع

[1] F. S. Vieira, J. A. P. Balestieri, and J. A. Matelli, Applications of compressed air energy storage in cogeneration systems, *Energy*, Vol. 214, p. 118904, 2021.

[2] M. Khazali, F. Azarsina, and A. H. Kani, Investigation of Novel Polygeneration Systems Based on Compressed Air Storage, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 6, No. 2, pp. 94–104, 2019.

[3] M. Khazali and A. Abdalisousan, An Overview of Novel Energy Storage Systems with Air Compression Method, *Iranian journal of Energy*, Vol. 23, No. 1, pp. 47–82, 2020.

[4] Z. Tong, Z. Cheng, and S. Tong, A review on the development of compressed air energy storage in China: Technical and economic challenges to commercialization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 135, No. September 2019, p. 110178, 2021.

[5] M. Khazali, F. Azarsina, and A. . Kani, Analysis and investigation of the novel energy storage system of compressed air and pumped storage hydropower, in *First National Conference on Enhanced Engineering in the Environment*, 2019.

[6] G. Venkataramani, P. Parankusam, V. Ramalingam, and J. Wang, A review on compressed air energy storage – A pathway for smart grid and polygeneration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62. 2016.

[7] W. He and J. Wang, Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy Storage: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 87, No. July 2016, pp. 77–95, 2018.

[8] C. Diyoke and C. Wu, Thermodynamic analysis of hybrid adiabatic compressed air energy storage system and biomass gasification storage (A-CAES + BMGS) power system, *Fuel*, Vol. 271, No. July 2019, p. 117572, 2020.

[9] X. Xu *et al.*, Designing a standalone wind-diesel-CAES hybrid energy system by using a scenario-based bi-level programming method, *Energy Conversion and Management*, Vol. 211, p. 112759, 2020.

[10] C. Jakiel, S. Zunft, and A. Nowi, Adiabatic compressed air energy storage plants for efficient peak load power supply from wind energy: the European project AA-CAES, *International Journal of Energy Technology and Policy*, Vol. 5, No. 3, pp. 296–306, 2007.

[11] T. Thomasson, M. Tähtinen, A. Tapani, and T. Sihvonen, Dynamic analysis of adiabatic CAES with electric resistance heating, in *Energy Procedia*, 2017, Vol. 135, pp. 464–471.

[12] L. X. Chen, M. N. Xie, P. P. Zhao, F. X. Wang, P. Hu, and D. X. Wang, A novel isobaric adiabatic compressed air energy storage (IA-CAES) system on the base of volatile fluid, *Applied Energy*, Vol. 210, No. September 2017, pp. 198–210, 2018.

[13] Q. Zhou, Q. He, C. Lu, and D. Du, Techno-economic analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage system based on life cycle cost, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 265, p. 121768, 2020.

[14] J. Ren, A. Zhang, and X. Wang, Modelling and Control of Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage under Power Tracking Mode Considering Off-design Generating Conditions, *Energy*, p. 119525, 2020.

[15] A. G. Olabi, C. Onumaegbu, T. Wilberforce, M. Ramadan, M. A. Abdelkareem, and A. H. Al – Alami, Critical review of energy storage systems, *Energy*, Vol. 214, p. 118987, 2021.

[16] S. Zhou, Y. He, H. Chen, Y. Xu, and J. Deng, Performance analysis of a novel adiabatic compressed air energy system with ejectors enhanced charging process, *Energy*, Vol. 205, p. 118050, 2020.

[17] T. B. Johansson, K. McCormick, L. Neij, and W. Turkenburg, The Potentials of Renewable Energy, 2008.

[18] M. Norouzi, M. Yeganeh, and T. Yusaf, Landscape framework for the exploitation of renewable energy resources and potentials in urban scale (case study: Iran), *Renewable Energy*, Vol. 163, pp. 300–319, 2021.

[19] H. S. Dhiman and D. Deb, Wake management based life enhancement of battery energy storage system for hybrid wind farms, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 130, No. August 2019, p. 109912, 2020.

[20] Y. Li, W. Gao, and Y. Ruan, Performance investigation of grid-connected residential PV-battery system focusing on enhancing self-consumption and peak shaving in Kyushu, Japan, *Renewable Energy*, Vol. 127, pp. 514–523, 2018.

[21] G. Aquila, A. R. de Queiroz, P. Rotela Junior, L. C. S. Rocha, E. de O. Pamplona, and P. P. Balestrassi, Contribution for bidding of wind-photovoltaic on grid farms based on NBI-EFA-SNR method, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 40, No. May, p. 100754, 2020.

[22] J. E. Mason and C. L. Archer, Baseload electricity from wind via compressed air energy storage (CAES), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 2, pp. 1099–1109, 2012.

[23] P. Zhao, P. Wang, W. Xu, S. Zhang, J. Wang, and Y. Dai, The survey of the combined heat and compressed air energy storage (CH-CAES) system with dual power levels turbomachinery configuration for wind power peak shaving based spectral analysis, *Energy*, Vol.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

[45] M. Khazali, F. Azarsina, and A. . Kani, Energy analysis and evaluation of an innovative hybrid compressed air and pumped hydroelectric energy storage system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 22, No. 4, pp. 225–241, 2022.

[46] H. Wang, L. Wang, X. Wang, and E. Yao, A Novel Pumped Hydro Combined with Compressed Air Energy Storage System, *Energies*, Vol. 6, No. 3, pp. 1554–1567, 2013.

[47] Electricity Reports - U.S. Energy Information Administration (EIA), *U.S. Energy Information Administration (EIA)*. [Online]. Available: https://www.eia.gov/electricity/reports.php#/T194. [Accessed: 17-Aug-2020].

[48] M. Karimi, H. Karami, M. Gholami, H. Khatibzadehazad, and N. Moslemi, Priority index considering temperature and date proximity for selection of similar days in knowledge-based short term load forecasting method, *Energy*, Vol. 144, No. December, pp. 928–940, 2018.

[49] M. H. Asgari and H. Monsef, Market power analysis for the Iranian electricity market, *Energy Policy*, Vol. 38, No. 10, pp. 5582–5599, 2010.

[50] M. Khazali and A. kaabi Nejadian, A study on the compressed air energy storage system, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 29, No. 3, pp. 47–59, 2020.

215, p. 119167, 2021.

[24] D. Shaw, J. Y. Cai, and C. T. Liu, Efficiency analysis and controller design of a continuous variable planetary transmission for a CAES wind energy system, *Applied Energy*, Vol. 100, pp. 118–126, 2012.

[25] E. A. Bouman, M. M. Øberg, and E. G. Hertwich, Environmental impacts of balancing offshore wind power with compressed air energy storage (CAES), *Energy*, Vol. 95, pp. 91–98, 2016.

[26] F. de Bosio and V. Verda, Thermoeconomic analysis of a Compressed Air Energy Storage (CAES) system integrated with a wind power plant in the framework of the IPEX Market, *Applied Energy*, Vol. 152, pp. 173–182, 2015.

[27] E. Akbari, R. A. Hooshmand, M. Gholipour, and M. Parastegari, Stochastic programming-based optimal bidding of compressed air energy storage with wind and thermal generation units in energy and reserve markets, *Energy*, Vol. 171, pp. 535–546, 2019.

[28] P. Aliasghari, M. Zamani-Gargari, and B. Mohammadi-Ivatloo, Look-ahead risk-constrained scheduling of wind power integrated system with compressed air energy storage (CAES) plant, *Energy*, Vol. 160, pp. 668–677, 2018.

[29] S. Zhang, S. Miao, Y. Li, B. Yin, and C. Li, Regional integrated energy system dispatch strategy considering advanced adiabatic compressed air energy storage device, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 125, No. September 2020, p. 106519, 2021.

[30] S. Hameer and J. L. van Niekerk, A review of large-scale electrical energy storage, *International Journal of Energy Research*, Vol. 39, No. 9, pp. 1179–1195, 2015.

[31] E. Yao, H. Wang, and G. Xi, A Novel Pumped Hydro Combined with Compressed Air Energy, in *Storing Energy*, T. M. Letcher, Ed. New York: Elsevier, 2016, pp. 155–166.

[32] H. Mozayeni, X. Wang, M. Negnevitsky, and G. Kefayati, Study of effect of heat transfer in an air storage vessel on performance of a pumped hydro compressed air energy storage system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 148, No. xxxx, p. 119119, 2020.

[33] Potential Assessment and Evaluation of Renewable and Clean Resources, *Renewable Energy and Energy Efficiency Organization*. [Online]. Available: http://www.satba.gov.ir/fa/assessmentofrenewableandcleanresources. [Accessed: 11-Jul-2020].

[34] F. M. Vanek and L. D. Albright, *Energy Systems Engineering*, New York, US: McGraw-Hill, 2009.

[35] L. Bauer, GE General Electric GE 1.5sl, *GE General Electric*. .

[36] Y. A. Cengel and M. A. Boles, Thermodynamics; an Engineering Approach, 8th Edition, New York: McGraw-Hill Education, 2015, pp. 359–366.

[37] A. Laugier and J. Garai, Derivation of the ideal gas law, *Journal of Chemical Education*, Vol. 84, No. 11, pp. 1832–1833, 2007.

[38] E. Vagnoni, L. Andolfatto, R. Guillaume, P. Leroy, and F. Avellan, Oxygen diffusion through air–water free surfaces in a pump–turbine operating in condenser mode, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 112, pp. 183–192, 2019.

[39] M. Binama, W. T. Su, X. Bin Li, F. C. Li, X. Z. Wei, and S. An, Investigation on pump as turbine (PAT) technical aspects for micro hydropower schemes: A state-of-the-art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 79, No. February, pp. 148–179, 2017.

[40] V. L. Streeter and E. B. Wylie, *Fluid Mechanics*, Sixth., New York: McGraw-Hill, 1975.

[41] R. Rayner, REGENERATIVE TURBINE PUMPS, in *Pump Users Handbook*, Elsevier, 1995, pp. 35–37.

[42] S. Chitrakar, B. W. Solemslie, H. P. Neopane, and O. G. Dahlhaug, Review on numerical techniques applied in impulse hydro turbines, *Renewable Energy*, Vol. 159, pp. 843–859, 2020.

[43] C. C. Warnick, M. Howard, J. L.Carson, and L. H. Sheldon, *Hydropower Engineering*, New Jersey: Prentico-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1984.

[44] A. Ulazia, J. Sáenz, G. Ibarra-Berastegi, S. J. González-Rojí, and S. Carreno-Madinabeitia, Global estimations of wind energy potential considering seasonal air density changes, *Energy*, Vol. 187, 2019.

Archive of SID.ir