



Management of Fluctuating Output Power of Renewable Energy Resources by Optimum Charge/Discharge Scheduling of Electric Vehicles in Smart Parking Lots

Sadra Seyedi¹, Mohsen Jannati^{2*}, and Seyed Mohammad Madani³

1- Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Iran.

2- Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Iran.

3- Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Iran.

* P.O.B. 86145146 Shahreza, Iran, M.Jannati@shr.ui.ac.ir

Received: 19 July 2021 Revised: 5 April 2022 Accepted: 14 October 2022

Abstract

The output power of renewable resources fluctuates because of their random nature, which can negatively affect the grid. This problem can be resolved by installing battery energy storage systems (BESS). On the other hand, with the increasing development of electric vehicles (EVs), the scheduling of their presence in the distribution networks has become very important; because, any unplanned presence of EVs in the smart parking lots (SPLs) and their simultaneous charging may affect the performance of the grid, negatively. An optimum scheduling for charge/discharge actions of EVs can resolve this problem, and reduce the need for high cost BESSs. In this paper, the problem of maximizing the operator profit is formulated as a mixed integer linear programming (MILP) problem considering the constraints on the requested charge level of the EVs and the permissible exchanged power. Then, the problem is optimally solved, in which a scheduling scheme is proposed for charge/discharge actions of the EVs in the SPLs in order to control the power fluctuations. Simulation results on the data of a typical parking lot in Tehran demonstrate that the proposed scheduling can reduce the number of required BESSs significantly, which decreases the high expenses of the BESS purchase and installation.

Keywords: Electric Vehicles, Smart Parking Lot, Renewable Energy Resources and Optimal Charge/Discharge Scheduling.

1. Introduction

In recent years, factors such as environmental issues, reduction of fossil fuel resources, and increasing the included in the RES, and are more environmental friendly [1-3].

On the other hand, development of smart grids is very necessary. Growing use of EVs provides various opportunities for future systems, including the prevention of the release of environmental pollutants and the increasing penetration of distributed generations [4,5].

The uncontrolled charging of plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) on the demand side creates a significant load peak over a short period of time and a valley in the network consumption diagram [6]. However, one of the great advantages of PHEVs is the ability to transfer power to the grid. The concept of vehicle-to-grid (V2G) was first used to express the revenue and cost involved in regulating

impact on the growth of clean energy sources and can also be an appropriate support for the RES [9]. In order to maintain the network healthy as well as reduce the energy costs, the management of EV charging actions has been extensively studied by the researchers [10].

The impact of EVs on the reactive power control and the distribution network is discussed in [11]. While the RESs and vehicles are mainly located in the distribution

energy demand have made the presence of renewable energy sources (RESs) in power systems increasingly important. Energy sources like wind energy, solar energy, fuel cell and micro turbines are

electricity market and the ancillary service market [7]. With the presence of EVs in the power exchange, intermediate commercial entities have emerged between the owners of EVs and network operators, namely EV aggregators and parking lots [7].

These new aggregators create a sophisticated energy storage system (ESS) by keeping large number of EVs next to each other to transmit energy from the grid to vehicle (G2V) and from V2G using new technologies.

Aggregators as a flexible storage resource are an interesting challenging issue in the fields of regulating electricity market and the ancillary service market [8]. The presence of aggregators alongside the RES has a significant

network, some authors have modeled these sources at the energy transfer levels [12-15]. Reference [16] demonstrates the cost-saving capability of using hybrid EVs alongside the presence of V2G technology. In [17], in order to maximize profits of the aggregator, the penetration level of EVs in the regulating electricity market is determined.



In order to reduce the peak load in [18], a new charge management strategy for optimal charging of hybrid EVs is presented. The coordination and collaboration between wind energy conversion systems and EVs has been extensively studied in the literature. For example, the authors in [19] evaluate EVs for providing ancillary services based on the network interaction with WECS in the US electricity market. In [20], a two-objective optimization model is used for economical operation and environmental performance of SPLs with respect to the average participation rate of the vehicles in the response and demand program.

Despite the existing researches on the SPL, some cases have not been considered in the studies yet. For example, in [21], in order to reduce the speed of battery aging and extend its lifetime, V2G technique is not used as much as possible. Instead, in order to smooth the output power fluctuations, it stores the excessive power with respect to the upper limit into the EV battery. In some studies, the sampling interval to update the EV charging request is too long. For example, the sampling interval is 30 and 15 minutes in [22] and [23], respectively.

It should be noted that one of the challenges facing the development of wind farms is the high amplitude of their short-term power fluctuations (in terms of several seconds to multiple minutes). Installation of the BESS at the farm side can resolve this problem. However, the high cost of the BESS installation is another challenge. Using the SPLs can reduce the expenses. Although there are a number of works on this issue, some of them have focused on long-term fluctuations [22,23]. Also, the authors in [24] have not considered the profit of the network operator.

In this paper, an optimal scheduling system is proposed for the charge/discharge actions of the EVs in the SPLs, which makes decisions about the exchanged power, and smooths the output power of a RES set. This scheduling scheme is designed so that the requested charging level of the EVs is met at the departure time, and the profit of the network operator is maximized, as well.

The rest of the paper is outlined as follows: In Section II, the formulation of the objective function with problem constraints are presented. In Section III, the input data and the proposed model are implemented in MATLAB environment and the results of the optimized charging scheduling of the vehicles are achieved. Also, the results of integrating the SPLs with the RES are compared in three different scenarios. Finally, Section IV concludes this paper.

2. Simulation Results

In this section, the impact of using SPLs to smooth the power fluctuations in WPP is discussed. To this end, three scenarios are considered. Fig. 1 shows the power amount that should be exchanged (obtained from Section II) to smooth the power fluctuations.

Scenario 1: Without the presence of SPLs

To achieve an output power with permissible fluctuations under utility constraints, two-way ESS should be used. As a result, BESS would be a choice. The only drawback of using BESSs is their high prices (especially for high-capacity BESSs). In this scenario, it is assumed that a number of BESSs are used to support the exchanged power shown in Fig. 1 without the presence of SPLs.

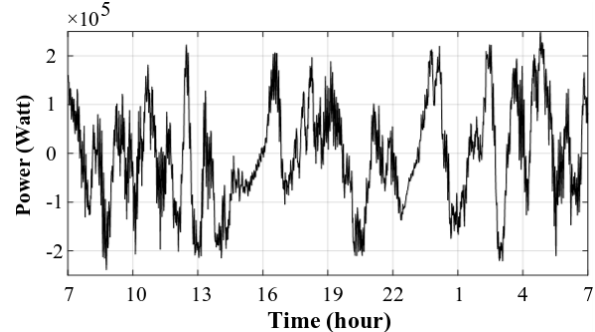


Figure 1. The instantaneous power required to smooth the WPP power fluctuations

Indeed, 18 BESSs with 4 MWh capacity are needed to meet the power exchange requirements. In order to prevent battery aging, the minimum and maximum charge levels of each BESS are assumed to be 20 and 80 percent, respectively. The average initial BESS charge level is also 50%. Fig. 2.a and 2.b show the SOC of units 1 and 6, respectively.

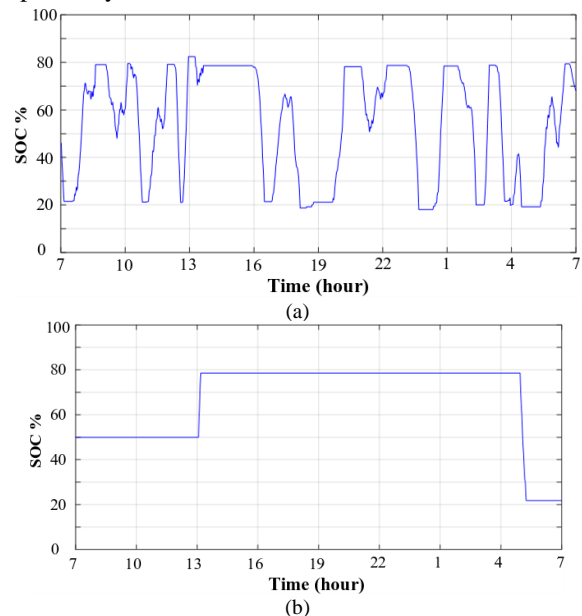


Figure 2. SOC changes in Scenario 1 for a) BESS #1 b) BESS #6

Scenario 2: In the presence of SPLs

In this scenario, SPLs are added to the power grid. Now, the network operator tries to provide the exchange power by exclusive use of the SPLs. In this case, the SPL owner can interact with the network operator by utilizing the batteries of vehicles. The network operator and SPL owners are obliged to satisfy the needs of EV owners. To compensate the required power of the WPP, Equation (1)

is used, in which the price of the EV charging is a random number between 0.15 \$ and 0.3 \$ per kWh ([20]).

$$Benefit = \sum_{j=1}^M \left(\rho_{Ch}^j P_{EV,Ch}^j - \rho_{DCh}^j P_{EV,DCh}^j \right), \quad j \in \{1, \dots, M\} \quad (1)$$

Also, the price of discharging the EV battery is three times of that of charging for a given time. The constraint on the amount of exchanged power for charge and discharge actions for each EV is 2775.83 watt per minute. Fig. 3 shows the value of power provided by the SPLs to compensate for the power demanded by the grid. In Fig. 3, the black graph illustrates the power demanded by the grid, and the gray one is the power supplied by the SPLs.

Obviously, the expected power is not provided in many minutes, especially after the time of 16:00. The reason is that, after 16:00, the departure time of the vehicles approaches. However, the SPLs are comparatively successful at providing the requested charge level of the vehicles. Fig. 4 shows the final SOC level of the EVs at the departure time.

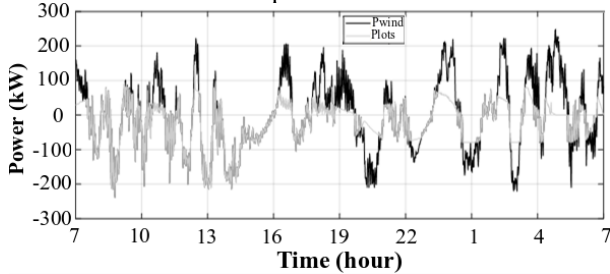


Figure 3. Providing the required WPP power by the SPLs in scenario 2

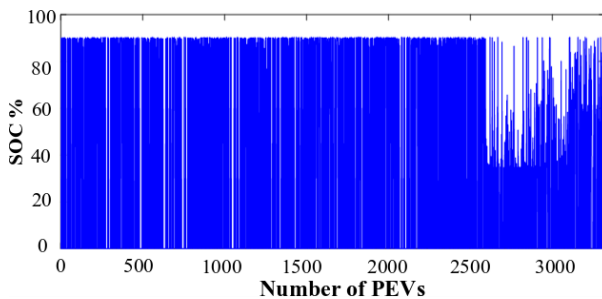


Figure 4. The final charge level of EVs in Scenario 2

Scenario 3: Integration of SPLs with BESS

In order to achieve the first goal, i.e. providing the required exchanged power, and the second one, i.e. providing the requested charge level of the vehicles, the BESS can be used as the supplement of the SPLs. Fig. 5 illustrates the amount of power supplied by the SPLs and the BESS. From Fig. 5, it can be seen that all the required power of the WPP is provided by using the SPLs along with the auxiliary BESS. Also in Fig. 6, the powers of the WPP, SPLs, and BESS are shown separately.

With using the BESS, it can be seen that the required power for the smoothing the power fluctuations is fully provided. But the presence of the BESS will have disadvantages. The first disadvantage is the increased cost

of the power system. The second disadvantage is the reduction in the average charge level of EVs at the departure time. The constraints related to the BESSs in this scenario are the same as those in the first scenario.

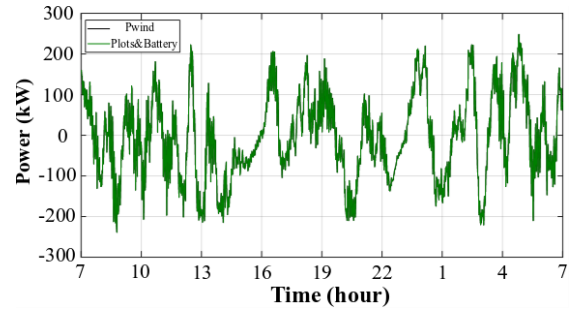


Figure 5. Providing the required WPP power through the SPLs and BESS in Scenario 3

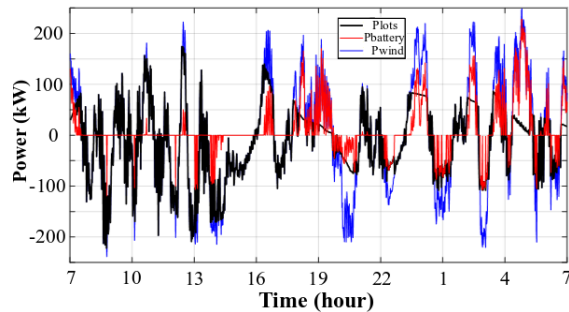
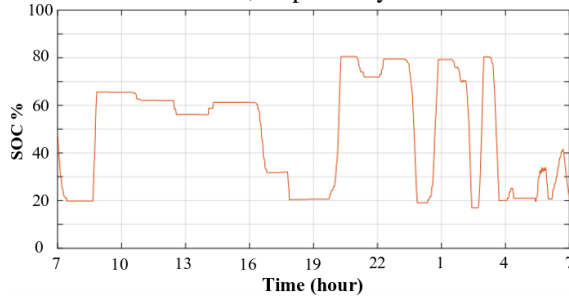
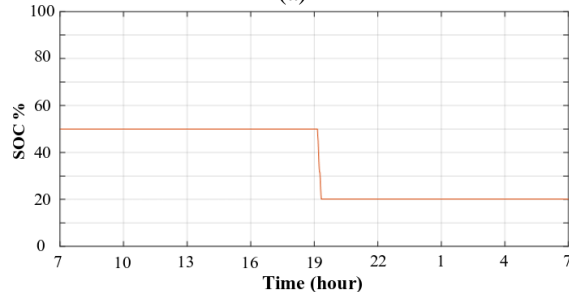


Figure 6. The exchanged power by the SPLs and BESS in Scenario 3

Regarding the constraints, the number of required BESSs to assist the SPLs fully supply the required power is 10. Figs. 7 (a) and 7 (b) show the changes of the charge level of the units 1 and 6, respectively.



(a)



(b)

Figure 7. SOC changes in a) BESS #1 b) BESS #6

The power consumed for the BESS added to the SPLs affects the final SOC of the EVs and reduces the average

SOC of the EVs to 74%. Fig. 8 shows the final SOC level of the EVs in scenario 3.

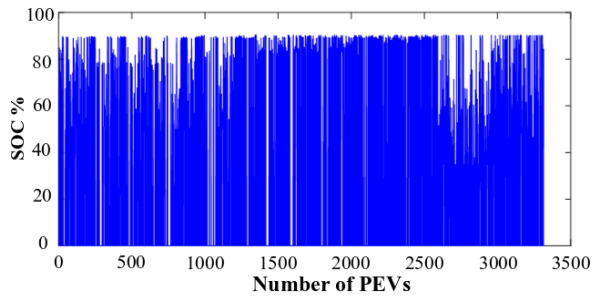


Figure 8. The final SOC level of EVs in Scenario 3

Table 1 compares the exchanged power values in 8 SPLs at randomly selected minutes. The power values listed in this table are in Watts. Also, a positive power implies that the SPL receives power from the grid, and a negative one implies that the SPL injects power into the grid. Accordingly, it is observed that at a specified time, some of the SPLs receive power from the grid to charge the batteries of the vehicles, and some other deliver the power stored in the batteries of the vehicles to the grid through the discharge actions.

This is because some EVs need to be charged for some reasons, such as approaching their departure time or having a low charge level. In addition to providing the required power of the RES, the network operator transfers the power stored in the batteries of the vehicles, whose departure time is not close, to the vehicles in other SPLs. This can also happen for the EVs in the same SPL. Such a power transmission is called V2V power transfer.

Table 1. Exchanged power values in the SPL 1, 4, 15, 18, 20, 44, 85, and 129 in random minutes

	Exchanged power values (Watt)				
SPL	Minute #17	Minute #238	Minute #616	Minute #1217	Minute #1412
SPL #1	-551.6	+872.5	+2482.5	0	+551.6
SPL #4	-4137.5	+1379.1	+11585	-2758.3	+4137.5
SPL#15	-1103.3	-6620	-1655	+2482.5	+1655
SPL#18	-6068.3	-19860	-7447.5	+7171.6	+6895.8
SPL#20	-1390.8	-7171.6	-1379.1	+3310	+1390.8
SPL#44	0	-1103.3	-556.1	+551.6	+551.6
SPL#85	-275.8	-1103.3	-1103.3	0	-551.6
SPL#129	-551.6	-1103.3	0	0	+551.6

Fig. 9 shows the charging status of EVs inside the SPL-18, at the minute 616, in which the network operator should store 62.4 kW in the vehicle batteries of the SPLs to reduce power fluctuations. At the same time, SPL-18 delivers 7.7 kW of its battery capacity to the grid. This implies that at this time, the vehicles inside this SPL are very far from their departure time.

By optimally managing the charge/discharge actions of the EVs, the network operator can demand the required power from the SPLs, while delivering the required exchanged power at the same time. According to the decisions made by the operator, the vehicles behave differently at different minutes, so that their charge level reaches to the highest possible level at the departure time,

while the required power of the grid is provided, as well. Fig. 10 show several examples of changes in the charge level of the EVs.

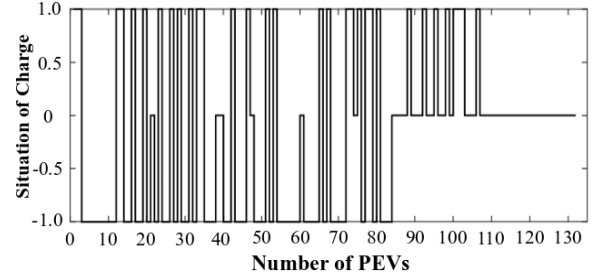
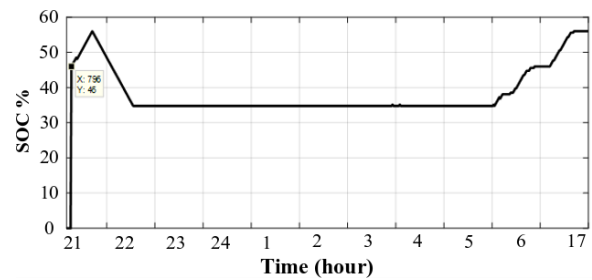
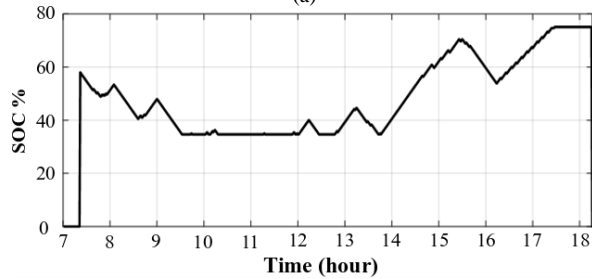


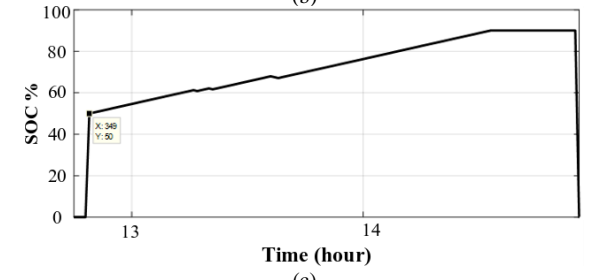
Figure 9. Charge status of EVs in SPL # 18 at minute 616 (1 indicates charge action, -1 indicates discharge action, and 0 indicates that the vehicle is not involved in charge/discharge action)



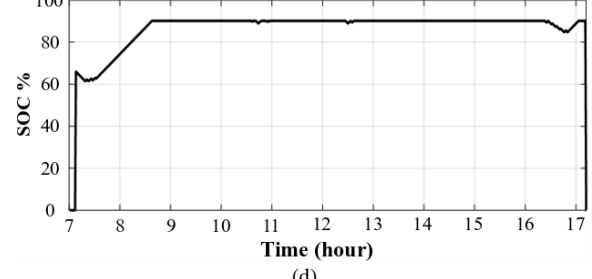
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 10. Variations of the charge levels of EVs #32, 896, 1576 and 3256, respectively

In order to better comparison, the specifications of three aforementioned scenarios are presented in Table 2. According to the Table 2, V2G technology is used in the

second and third scenarios. In the second scenario, the average charge value of the EVs is sufficient, and thus no BESS is used. However, this scenario has a lower capability to provide the required exchanged power. Also, the number of required BESS in the third scenario is less than the first scenario. Despite its higher expenses because of using the BESS, the third scenario is preferred to the second one, as it can fully provide the exchanged power. In addition, the number of required BESSs is reduced to 10 in the third scenario, compared with 18 BESSs in the first scenario. Assuming that the purchase and installation cost of each Lithium-ion BESS is 200 \$/kWh [25], the proposed approach can achieve a reduction of 6.4 million dollars in the BESS expenses, compared with the traditional approach.

Table 2. Comparison of different scenarios

	Scenario #1	Scenario #2	Scenario #3
Technology V2G	No	Yes	Yes
Number of used BESSs	18	-	10
Ability to provide exchanged power	High	Low	High
Average charge level of EVs	-	80	74
Reducing the charging cost of EVs	-	Yes	Yes

3. Conclusion

In this paper, the impact of using SPLs in the control of RES power fluctuation is investigated. Also, an optimal scheduling scheme for charge/discharge actions of the EVs in the SPLs is proposed, which seeks to reduce the number of BESSs used to supply the required power for the smoothing process, and maximize the profit of the network operator. Considering the constraints on the requested charge level of the EVs and the required exchanged power, this problem is modeled and solved as an MILP problem. In order to investigate the effect of using SPLs and BESSs in the power fluctuation smoothing process, three scenarios including scenario1: control of RES power fluctuations with BESSs, scenario2: control of RES power fluctuations with SPLs, and scenario3: control of RES power fluctuations with SPLs and BESSs are considered. Simulation results for a RES with 3316 EVs in 48 SPLs demonstrate that the proposed scheduling system for the charge/discharge actions of the EVs can reduce the required BESS capacity.

4. References

- [1] J. Linssen, P. Stenzel, and J. Flier, Techno-economic analysis of photovoltaic battery systems and the influence of different consumer load profiles, *Applied Energy*, Vol. 185, pp. 2019-2025, 2017.
- [2] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indrajaya, and V. H. Krishna, A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, pp. 1351-1371, 2016.
- [3] I.-S. Han, S.-K. Park, and C.-B. Chung, Modeling and operation optimization of a proton exchange membrane fuel cell system for maximum efficiency, *Energy Conversion and Management*, Vol. 113, pp. 52-65, 2016.
- [4] S. Zhang and R. Xiong, Adaptive energy management of a plug-in hybrid electric vehicle based on driving pattern recognition and dynamic programming, *Applied Energy*, Vol. 155, pp. 68-78, 2015.
- [5] L. Jian, Y. Zheng, X. Xiao, and C. Chan, Optimal scheduling for vehicle-to-grid operation with stochastic connection of plug-in electric vehicles to smart grid, *Applied Energy*, Vol. 146, pp. 150-161, 2015.
- [6] A. S. Masoum, S. Deilami, P. Moses, M. Masoum, and A. Abu-Siada, Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation, *IET generation, transmission & distribution*, Vol. 5, No. 8, pp. 877-888, 2011.
- [7] R. J. Bessa and M. A. Matos, Economic and technical management of an aggregation agent for electric vehicles: a literature survey, *European transactions on electrical power*, Vol. 22, No. 3, pp. 334-350, 2012.
- [8] E. Heydarian-Forushani, M. E. Golshan, and M. Shafiekhah, Flexible interaction of plug-in electric vehicle parking lots for efficient wind integration, *Applied energy*, Vol. 179, pp. 338-349, 2016.
- [9] W. Kempton and J. Tomić, Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy, *Journal of power sources*, Vol. 144, No. 1, pp. 280-294, 2005.
- [10] G. K. Venayagamoorthy, Dynamic, stochastic, computational, and scalable technologies for smart grids, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol. 6, No. 3, pp. 22-35, 2011.
- [11] J. Gallardo-Lozano, E. Romero-Cadaval, V. Miñambres-Marcos, D. Vinnikov, T. Jalakas, and H. Hõimoja, Grid reactive power compensation by using electric vehicles, in *2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, IEEE, pp. 19-24, 2014.
- [12] N. Masuch, J. Keiser, M. Lützenberger, and S. Albayrak, Wind power-aware vehicle-to-grid algorithms for sustainable EV energy management systems, in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, IEEE, pp. 1-7, 2012.
- [13] W. Hu, C. Su, Z. Chen, and B. Bak-Jensen, Optimal operation of plug-in electric vehicles in power systems with high wind power penetrations, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 4, No. 3, pp. 577-585, 2013.
- [14] D. B. Richardson, Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 19, pp. 247-254, 2013.
- [15] F. Mwasilu, J. J. Justo, E.-K. Kim, T. D. Do, and J.-W. Jung, Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 34, pp. 501-516, 2014.
- [16] R. Sioshansi and P. Denholm, The value of plug-in hybrid electric vehicles as grid resources, *The Energy Journal*, Vol. 31, No. 3, pp. 1-23, 2010.
- [17] S. Jang, S. Han, S. H. Han, and K. Sezaki, Optimal decision on contract size for V2G aggregator regarding frequency regulation, in *2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, IEEE, pp. 54-62, 2010.

- [18] A. Sheikhi, S. Bahrami, A. Ranjbar, and H. Oraee, Strategic charging method for plugged in hybrid electric vehicles in smart grids; a game theoretic approach, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 53, pp. 499-506, 2013.
- [19] H. Lund and W. Kempton, Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G, *Energy policy*, Vol. 36, No. 9, pp. 3578-3587, 2008.
- [20] J. Jannati and D. Nazarpour, Multi-objective scheduling of electric vehicles intelligent parking lot in the presence of hydrogen storage system under peak load management, *Energy*, Vol. 163, pp. 338-350, 2018.
- [21] M. Raoofat, M. Saad, S. Lefebvre, D. Asber, H. Mehrjedri, and L. Lenoir, Wind power smoothing using demand response of electric vehicles, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 99, pp. 164-174, 2018.
- [22] S. H. Shamsdin, A. Seifi, M. Rostami-Shahrbabaki, and B. Rahrovi, Plug-in Electric Vehicle Optimization and Management Charging in a Smart Parking Lot, in *2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, IEEE, pp. 1-7, 2019.
- [23] M. Latifi, A. Khalili, A. Rastegarnia, and S. Sanei, A Bayesian Real-Time Electric Vehicle Charging Strategy for Mitigating Renewable Energy Fluctuations, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 15, No. 5, pp. 2555-2568, 2018.
- [24] M. Jannati, E. Foroutan, S.M.S Mousavi, S. Grijalva, An Intelligent Energy Management System to Use Parking Lots as Energy Storage Systems in Smoothing Short-Term Power Fluctuations of Renewable Resources, *Journal of Energy Storage*, Vol. 32, 2020.
- [25] M. Rakhshani, H. Mehrjerdi, A. Iqbal, Hybrid wind-diesel-battery system planning considering multiple different wind turbine technologies installation, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 247, 2020.

برنامه‌ریزی بهینه شارژ/دشارژ خودروهای الکتریکی در پارکینگ‌های هوشمند به منظور پاسخگویی به نوسانات توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر با توان خروجی نوسانی

صدرا سیدی^۱، محسن جنتی^{۲*}، سید محمد مدنی^۳

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

* شهرضا، ۸۶۱۴۵۱۴۶، M.Jannati@shr.ui.ac.ir

چکیده

امروزه آلودگی‌های زیست محیطی و کاهش منابع تجدیدناپذیر از جمله سوخت‌های فسیلی، موجب شده است تا تولیدات پراکنده برق گسترش قابل توجهی یابد. از طرفی با گسترش روز افزون خودروهای الکتریکی، بررسی حضور خودروها بسیار با اهمیت است. زیرا حضور بدون برنامه خودروهای الکتریکی و شارژ همزمان آن‌ها تأثیرات مخربی بر پارامترهای شبکه توزیع برق خواهد داشت. لذا با مدیریت مناسب شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در پارکینگ‌های هوشمند می‌توان از خودروهای الکتریکی در راستای بهبود پارامترهای شبکه و همچنین گسترش حضور منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده نمود. از همین رو در این مقاله از پارکینگ‌های هوشمند خودروهای الکتریکی برای کاهش نوسانات توان تولیدی یک مجموعه منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود. در این راستا دو هدف اصلی این مقاله عبارت است از پاسخگویی به توان مبادله‌ای مورد نیاز برای کاهش نوسانات توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر و رسیدن سطح شارژ خودروها به سطح مناسب. این مدل پیشنهادی به صورت برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح مدل‌سازی شده و با استفاده از نرم‌افزار متلب حل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی بر روی داده‌های پارکینگ شهر نمونه تهران نشان می‌دهند که مدیریت بهینه و مناسب خودروها علاوه بر آنکه سبب می‌شود خودروها در هنگام خروج به سطح شارژ مطلوب خود برسند، سبب کاهش قابل توجهی در تعداد باتری‌های مورد نیاز و در نتیجه هزینه بالای خرید و نصب باتری‌ها می‌گردد.

کلیدواژه‌گان: خودروهای الکتریکی، پارکینگ هوشمند خودرو، منابع انرژی تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی بهینه

Management of Fluctuating Output Power of Renewable Energy Resources by Optimum Charge/Discharge Scheduling of Electric Vehicles in Smart Parking Lots

Sadra Seyedi¹, Mohsen Jannati^{2*}, and Seyed Mohammad Madani³

1- Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2- Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Isfahan, Iran

3- Department of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran * P.O.B.

86145146 Shahreza, Iran, M.Jannati@shr.ui.ac.ir

Received: 19 July 2021 Accepted: 14 October 2022

Abstract

Nowadays, due to the environmental pollution and shortage of non-renewable resources, specifically the fossil fuels, distributed power generations have been considerably developed. However, the output power of renewable resources fluctuates because of their random nature, which can negatively affect the grid. This problem can be resolved by installing battery energy storage systems (BESS). On the other hand, with the increasing development of electric vehicles (EVs), the scheduling of their presence in the distribution networks has become very important; because, any

unplanned presence of EVs in the intelligent parking lots (IPLs) and their simultaneous charging may affect the performance of the grid, negatively. An optimum scheduling for charge/discharge actions of EVs can resolve this problem, and reduce the need for high cost BESSs. In this paper, the problem of maximizing the operator profit is formulated as a mixed integer linear programming (MILP) problem considering the constraints on the requested charge level of the EVs and the permissible exchanged power. Then, the problem is optimally solved, in which a scheduling scheme is proposed for charge/discharge actions of the EVs in the SPLs in order to control the power fluctuations. Simulation results on the data of a typical parking lot in Tehran demonstrate that the proposed scheduling can reduce the number of required BESSs significantly, which decreases the high expenses of the BESS purchase and installation.

Keywords: Electric Vehicles, Smart Parking Lot, Renewable Energy Resources and Optimal Charge/Discharge Scheduling.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر عواملی همچون مسائل زیست محیطی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، و افزایش روز افزون نیاز بشر به انرژی باعث شده است تا حضور منابع انرژی تجدیدپذیر (RES^۱) در سیستم‌های قدرت بیش از پیش اهمیت یابد. از جمله این منابع می‌توان به انرژی خورشیدی، انرژی بادی، پیل سوختی و میکروتوربین اشاره نمود که با محیط زیست سازگارتر هستند [۱-۳]. در همین راستا هوشمندسازی شبکه قدرت امری کاملاً ضروری و غیر قابل انکار است. گسترش وسایل نقلیه الکتریکی (EV^۲) و PHEV^۳ علاوه بر تأثیرگذاری بر شبکه قدرت، فرصت‌های مختلفی برای سیستم‌های آینده از جمله جلوگیری از انتشار آلاینده‌های زیست محیطی و افزایش حضور منابع تولید پراکنده را فراهم می‌کند [۴، ۵].

شارژ کنترل نشده PHEV ها در سمت تقاضا باعث می‌شود یک پیک بار قابل توجه در یک دوره زمانی کوتاه و یک دره در نمودار مصرفی شبکه به وجود آید [۶]. در مقابل یکی از مزایای بسیار بالای خودروهای الکتریکی هیبریدی قابلیت انتقال توان این خودروها به شبکه است. مفهوم خودرو-به-شبکه (V2G^۴) برای نخستین بار برای بیان و معرفی درآمد و هزینه در راستای شرکت در تنظیم بازار^۵ برق و شرکت در بازار خدمات جانبی مورد استفاده قرار گرفت [۷]. با حضور خودروهای الکتریکی در انتقال توان، نهادهای تجاری واسطی بین صاحبان خودروهای الکتریکی و اپراتورهای شبکه به نام تجمیع‌کننده‌ها^۶ و پارکینگ‌های گسترده^۷ خودروهای الکتریکی بوجود آمده است [۷]. این نهادهای جدید با قرار دادن تعداد زیادی خودرو در کنار یکدیگر یک سیستم ذخیره انرژی پیچیده ایجاد می‌نمایند تا با استفاده از فناوری‌های جدید باعث انتقال انرژی از شبکه به خودرو (G2V^۸) و V2G شوند.

تجمیع‌کننده‌ها به عنوان یک منبع ذخیره قابل انعطاف در بازارهای انرژی و بازار خدمات جانبی^۹ از موضوعات چالش برانگیزی است که در سال‌های اخیر مورد علاقه محققان بوده است [۸]. حضور تجمیع‌کننده‌ها در کنار منابع تجدیدپذیر تأثیر بسزایی در رشد این منابع پاک تولید انرژی داشته و می‌تواند پشتیبانی مناسب برای منابع تجدیدپذیر نیز هست [۹]. به منظور نگهداری شبکه‌های معمول و همچنین کاهش هزینه انرژی، مدیریت

شارژ خودروهای الکتریکی به طور گسترده مورد مطالعه محققان قرار گرفته است [۱۰].

در [۱۱] تأثیر حضور خودروهای الکتریکی بر شبکه توزیع و کنترل توان راکتیو بیان شده است. در حالی که عمدتاً منابع انرژی تجدیدپذیر و خودروها در شبکه توزیع هستند، عده‌ای از نویسندگان این منابع را در سطوح انتقال انرژی نیز مدل کرده‌اند [۱۲-۱۵]. در برخی پژوهش‌ها از V2G به عنوان پایدارساز نوسانات توان تولیدی خورشیدی برای توان پیک و توان بادی برای بار پایه استفاده شده است [۹]. در [۱۶] توانایی صرفه‌جویی هزینه با استفاده از خودروهای الکتریکی هیبریدی در کنار حضور فناوری V2G نشان داده شده است. در [۱۷] برای بیشینه نمودن سود تجمیع‌کننده‌ها، سطح نفوذ خودروهای الکتریکی را در بازار تنظیم مشخص نموده است. در [۱۸] استراتژی شارژ برای ارائه خدمات جانبی در نظر گرفته شده است و همچنین از یک روش برنامه ریزی پویا برای راه‌حل بهینه اقتصادی استفاده شده است. در [۱۹] به منظور بهینه‌سازی سود بین هزینه شارژ باتری خودرو و هزینه‌های مرتبط، استراتژی شارژ مبتنی بر تئوری بازی غیر ترکیبی پیشنهاد شده است. در [۲۰] یک الگوریتم توزیع پاسخ و تقاضا مطرح شده است که در آن کاربران می‌توانند نرخ شارژ خود را مطابق با اولویت‌بندی خود کنترل نمایند. در [۲۱] یک استراتژی برنامه ریزی برای شارژ خودروها مبتنی بر اولویت پیشنهاد شده است. خودروهای الکتریکی ورودی در یک جدول صف خودروهای الکتریکی اضافه شده و با یک الگوریتم مبتنی بر تکرار معرفی می‌شوند.

در [۲۲] از توزیع احتمالی برای پیش‌بینی تقاضای شارژ خودرو استفاده شده است. یک مدل اتفاقی واقع بینانه برای توصیف پروفیل ورود خودرو در [۲۳] موجود است که بر اساس نظریه صف بندی M/M/S است [۲۴]. در [۲۵] یک استراتژی شارژ "First-Come-First-Serve" برای ایستگاه شارژ سریع پیشنهاد شده است. این مدل برای سناریو ورود متوالی وسایل نقلیه با مقدار شارژ و زمان محدود مناسب است. در [۲۶]، یک مدل برنامه‌ریزی روزانه منابع انرژی برای شبکه‌های هوشمند که شامل تعداد زیادی خودروی الکتریکی می‌باشد ارائه شده است. در این مقاله یک مدل جدید پاسخ و تقاضا با حضور خودروهای الکتریکی ارائه شده است. در این مدل صاحبان خودرو می‌توانند با تغییر برنامه سفر روزانه خود، مقدار انرژی درخواستی را کاهش داده و یا تغییر دهند. در [۲۷]، یک روش مدیریت بار در زمان واقعی برای هماهنگی شارژ چندین وسیله نقلیه الکتریکی در یک سیستم توزیع هوشمند ارائه شده است. این استراتژی کنترل زمان واقعی مبتنی بر به حداقل رساندن هزینه‌های کل تولید و اتلاف انرژی است. در [۲۸]، یک مدل پخش بار اقتصادی با توجه به عدم قطعیت EV ها و ژنراتورهای بادی ارائه شده است.

1. Renewable Energy Sources
2. Electric Vehicles
3. Plug-in Hybrid Electric Vehicle
4. Vehicle to Grid
5. Regulation market
6. Aggregators
7. Parking Lots
8. Grid to Vehicle
9. Ancillary service market

شارژ/دشارژ بهینه EV با استفاده از توزیع احتمالی رفتارهای شارژ و دشارژ EV و همچنین تابع توزیع احتمالی Rayleigh برای سرعت باد انجام شده است. استراتژی جدید مدیریت بار برای شارژ بهینه وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی برای کاهش بیک بار در [۲۹] ارائه شده است. هماهنگی و همکاری مابین سیستم تبدیل انرژی باد^۱ و خودروهای الکتریکی به صورت گسترده در مطالعات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال در [۳۰] از خودروهای الکتریکی برای ارائه خدمات جانبی بر پایه تعامل شبکه با WECS در بازار برق آمریکا مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطالعه دیگری در مورد ادغام تعداد بالایی سیستم انرژی باد در ریزشبكة با استفاده از PHEV در [۳۱] انجام شده است. در این مطالعه استراتژی پخش بار انرژی برای بر طرف نمودن تقاضاهای دینامیکی، پیشنهاد شده است. در [۳۲] هموارسازی توان تولیدی مزرعه بادی با استفاده از برنامه پاسخ و تقاضا، از افزایش نرخ تولید توان جلوگیری می‌نماید. سیگنال درخواست توان توسط کنترل فازی با توجه به پارامترهای SOC و زمان عزیمت خودرو پاسخ داده می‌شود. در [۳۳] مدل بهینه‌سازی دو هدفه برای بهره‌برداری اقتصادی و عملکرد محیطی پارکینگ هوشمند با توجه به متوسط نرخ استفاده خودروها برای شرکت در برنامه پاسخ و تقاضا مورد استفاده قرار گرفته است. در [۳۴] یک روش زمان واقعی برای برنامه‌ریزی شارژ خودروها ارائه شده است. این روش مبتنی بر کسب رضایت صاحبان خودرو و اولویت‌بندی خودروها و استفاده از چهار استراتژی مختلف شارژ با برنامه‌ریزی خطی است. در [۳۵] بهینه‌سازی دو هدفه پارکینگ هوشمند مبتنی بر سیستم فتوولتائیک با برنامه پاسخگویی بار برای بهبود عملکرد زیست محیطی و اقتصادی ارائه شده است. در این مرجع از الگوریتم تصمیم‌گیری مجموعه وزنی و فازی و پارامتر زمان در دسترسی خودروها در برنامه پاسخ‌گویی استفاده شده است. در [۳۶] با ادغام پارکینگ-ها زیر نظر یک جمع‌کننده، در کنار یک مزرعه فتوولتائیک در نظر گرفته شده است. ادغام پارکینگ‌های هوشمند در RSCAD انجام شده و نشان می‌دهد که با حضور جمع‌کننده‌ها و مزرعه فتوولتائیک در یک سیستم قدرت چند منظوره از اضافه بار بر روی ژنراتورهای تولید توان در زمان پیک کاسته و ظرفیت انتقال خطوط نیز نقض نمی‌شود. در [۳۷] به منظور دنبال نمودن و همگام‌سازی با منابع تولید توان تجدیدپذیر از مکانیسم قیمت‌گذاری و برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ استفاده گردیده است که می‌گردد. به منظور برنامه‌ریزی خواسته‌ای مطلوب خودروها از یک عملگر بهینه‌سازی تصادفی کاملاً توزیع شده با استفاده از بازی تکرار Bayesian طراحی شده است. در [۳۸] یک مدل تجاری برای بهینه‌سازی شارژ و دشارژ یک پارکینگ فرودگاهی به منظور افزایش سود صاحبان خودروها و پارکینگ انجام شده است. [۳۹] نوسانات خط ارتباطی قدرت را ابتدا توسط یک الگوریتم تجزیه بسته مویک هموارسازی می‌نماید. سپس از استراتژی کنترل فازی برای تعیین قدرت قابل ذخیره در باتری و منابع ذخیره مجازی با توجه به SOC آن‌ها استفاده می‌نماید.

علی‌الرغم پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه پارکینگ‌های هوشمند خودرو، برخی موارد همچنان در نظر گرفته نشده است. به عنوان مثال در [۳۲] به منظور کاهش سرعت تخریب باتری و افزایش عمر آن تا حد امکان از V2G استفاده نشده است. از این رو به منظور هموارسازی توان تولیدی مقدار

حد بالا را قطع نموده و در نتیجه توان مازاد را در باتری خودروها ذخیره می‌نماید. در برخی مطالعات مدت فاصله زمانی نمونه برای به روز نمودن درخواست شارژ خودروها بالا بوده است. به عنوان مثال در [۳۴] فاصله نمونه زمانی برابر با ۳۰ دقیقه و در [۳۷] برابر با ۱۵ دقیقه است. برخی مطالعات انجام شده از جمله [۳۳، ۳۵] تعداد خودروهای مورد بررسی نیز کم بوده و یا در [۳۸] تنها یک نوع پارکینگ فرودگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله، سیستم برنامه‌ریزی انرژی پارکینگ‌های هوشمند^۲ در فضای شبکه هوشمند به منظور پاسخگویی به توان مبادله‌ای برای هموار نمودن توان تولیدی یک مجموعه RES با توان خروجی نوسانی شده است. این برنامه‌ریزی با هدف برآورده نمودن مقدار توان مبادله‌ای توسط پارکینگ-ها و همچنین رسیدن خودروهای الکتریکی به سطح شارژ مطلوب در لحظه خروج انجام شده است.

پیکربندی مقاله بدین صورت است که: در بخش ۲، فرمولاسیون تابع هدف به همراه قیود مسأله در این مطالعه از طریق مدل‌سازی ریاضی ارائه می‌شود. در بخش ۳، داده‌های ورودی و مدل پیشنهادی در این مطالعه در محیط نرم‌افزاری متلب پیاده شده و نتایج کنترل بهینه شارژ خودروها بدست می‌آید. سپس نتایج حضور پارکینگ در کنار RES مورد نظر در قالب سه سناریوی متفاوت بررسی و مقایسه می‌شود. در بخش ۴ و ۵ به ترتیب نتیجه‌گیری بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها و مراجع ارائه می‌شود.

۲- فرمول‌بندی مسأله

در این مقاله سیستم پارکینگ خودروهای الکتریکی ادغام شده با یک مجموعه RES شامل یک مزرعه بادی با ظرفیت ۵۱ مگاوات و یک مزرعه خورشیدی با ظرفیت ۱۵ مگاوات مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از معایب بزرگ تولید توان RES با خروجی نوسانی، تولید توان با فرکانس نامطلوب است. به منظور هموارسازی نوسانات توان RES، می‌بایست از سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری (BESS^۳) (به تنهایی یا ترکیبی) استفاده نمود. در این حالت، به BESS با ظرفیت قابل توجه برای هموارسازی نیاز است که این مسأله سرمایه‌گذاری در این زمینه را با مشکل مواجه می‌کند. حال اگر SPLs بتواند به صورت مناسب توان تولیدی RES را به منظور هموارسازی دنبال نماید، آنگاه هزینه بالای نصب باتری‌های حجیم در مجموعه RES کاهش یافته و یا ممکن است به طور کامل از بین رود. در نتیجه از نظر اقتصادی به توسعه بیشتر تولید توان بادی و خورشیدی کمک چشمگیری خواهد نمود. در این مقاله تلاش شده است شبکه قدرت با انجام برنامه‌ریزی مناسب، SPLs را مجاب به دنبال کردن نوسانات توان تولیدی RES نماید و همچنین تلاش کند تا SPLs نیز بتوانند خودروهای خود را شارژ نموده و سطح شارژ خودروها را به سطح شارژ مطلوب صاحبان خودرو برساند تا SPLs دچار جریمه نشود. در نتیجه این مقاله دو هدف اساسی زیر را مدنظر قرار خواهد داد که عبارتند از:

- دنبال نمودن نوسانات توان تولیدی RES و هموار نمودن آن و
- بهینه‌سازی سیستم کنترل شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی و رسیدن سطح شارژ خودروها به حد مطلوب در زمان خروج.

2. Smart Parking Lot

3. Battery Energy Storage Systems

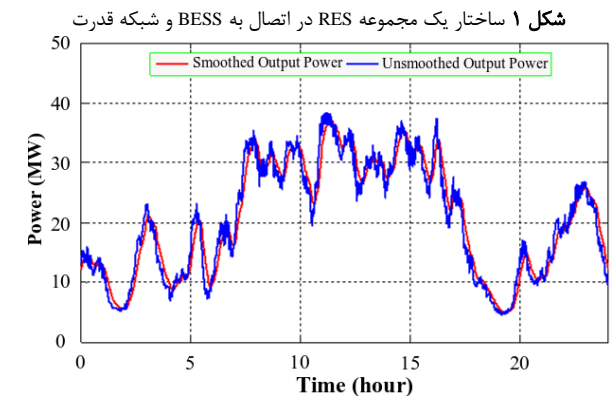
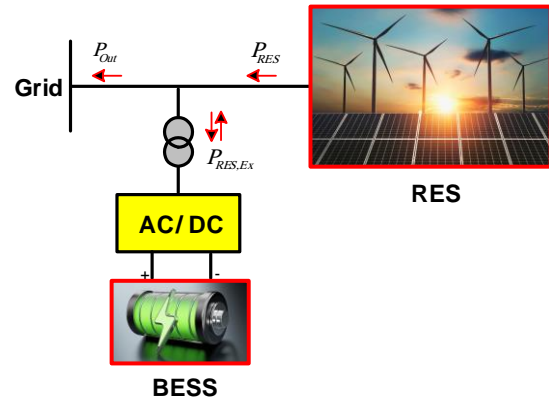
1. Wind Energy Conversion System (WECS)

۲-۱- هموارسازی توان خروجی RES

شکل ۱ ساختار RES مورد مطالعه در اتصال به BESS و شبکه قدرت را نشان می‌دهد. در شکل ۱، P_{RES} توان اکتیو خروجی RES، P_{Out} توان خروجی از مجموعه RES (توان تزریق شونده به شبکه) و $P_{RES,Ex}$ توان مبادله‌ای توسط BESS است. به منظور هموارسازی نوسان‌های توان RES، می‌بایست از یک روش کنترل هماهنگ به منظور کنترل شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز استفاده نمود. یکی از روش‌های مناسب برای ردیابی شکل موج توان خروجی RES استفاده از یک فیلتر پایین گذر مرتبه اول (FLF¹) است. این روش مقدار توان مبادله‌ای را به کمک فیلتر پایین گذر محاسبه نموده و با ادغام آن با توان خروجی RES، مقدار توان مناسب با نوسانات کم را به شبکه تزریق خواهد نمود. شکل ۲ توان خروجی مجموعه RES واقعی و مقدار توان مدنظر را برای تزریق به شبکه که توسط فیلتر پایین گذر مرتبه اول بدست آمده نشان می‌دهد. با توجه به این دو شکل موج، توان مبادله‌ای از اختلاف این دو شکل موج حاصل می‌گردد.

۲-۲- تابع هدف

در این مطالعه به جای استفاده از BESS موجود در RES، سعی می‌گردد از SPLs به منظور هموارسازی نوسانات توان استفاده شود. بدین صورت که با یک برنامه‌ریزی مناسب، شارژ و دشارژ خودروهای SPLs مدیریت شود تا بتوانند توان مبادله‌ای مورد نظر را تأمین نمایند. در صورت تأمین توان مبادله‌ای توسط SPLs، نیاز RES به باتری از بین رفته و یا به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.



شکل ۲ شکل موج توان خروجی RES به همراه توان خروجی هموار شده از RES در نتیجه BESS و بدنبال آن شبکه قدرت از نظر اقتصادی سود قابل ملاحظه‌ای خواهد نمود. از طرفی در صورتی که خودروهای الکتریکی اقدام به شارژ نمایند، از لحاظ اقتصادی برای سیستم نیز سودمند است. زیرا شبکه

هزینه‌ای را از SPLs بابت شارژ خودروهای الکتریکی به ازای هر کیلو وات توان دریافت می‌کند. از سوی دیگر هنگامی که توان مبادله‌ای مثبت است و SPLs اقدام به دشارژ باتری خودروهای پارک شده نمایند، شبکه قدرت موظف است به ازای هر کیلووات توان دریافتی مبلغی را به پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی پرداخت نماید. با توجه به موارد مطرح شده، زمانی سود از دید شبکه سیستم‌های قدرت به بالاترین نرخ خود می‌رسد که مقدار مبلغ دریافتی از SPLs حداکثر بوده و مبلغ پرداختی به آن‌ها به حداقل مقدار خود رسیده باشد. در نتیجه موارد گفته شده، تابع هدف در این مقاله عبارت است از:

$$Benefit = \sum_{j=1}^M (\rho_{Ch}^j P_{EV,Ch}^j - \rho_{DCh}^j P_{EV,DCh}^j) \quad (1)$$

$$j \in \{1, \dots, M\}$$

که در آن ρ_{Ch}^j و ρ_{DCh}^j به ترتیب قیمت توان ورودی (به منظور شارژ خودروها) و توان خروجی (توان دشارژ خودروها) بوده و $P_{EV,Ch}^j$ مقدار توان شارژ شده توسط خودروها در پارکینگ j ام و $P_{EV,DCh}^j$ نیز مقدار توان دشارژ شده توسط خودروهای درون پارکینگ j ام است. همچنین M برابر تعداد کل SPLs است. با توجه به تابع هدف فوق، شبکه تلاش می‌نماید تا سود خود را بیشینه نماید و در نتیجه بیشتر خودروها را شارژ کند. به دنبال این موضوع، خودروها توان تولیدی از RES را دنبال نموده و نتیجه دلخواه حاصل می‌گردد. در این بین برای آنکه شبکه خودخواهانه تصمیمات شارژ و دشارژ را اتخاذ نکند، قیود و محدودیت‌هایی بیان می‌گردد تا شبکه ملزم به رعایت آن‌ها بوده و SPLs و صاحبان خودروها نه تنها متضرر نشده بلکه به سود حداکثری نیز دست یابند.

۲-۳- قیود مسأله

خودروهای الکتریکی پارک شده در SPLs و همچنین خود SPLs به منظور شارژ و دشارژ و تبادل توان با شبکه باید قیود فنی خود را رعایت نمایند که در ادامه به بیان آنها پرداخته می‌شود.

۳-۱- قیود مربوط به خودروهای الکتریکی

در ابتدا قید ورود و خروج خودروها بررسی می‌گردد. اگر زمان ورود خودرو با ar_i و زمان خروج خودرو با dp_i نمایش داده شود، برای اینکه خودروهای در دسترس پارکینگ مشخص گردد از روابط (۲ الف) و (۲ ب) و متغیر باینری $av_{i,t}$ استفاده شده است:

$$if dp_i > ar_i \quad \& \quad \forall t \in \{0, T\}$$

$$av_{i,t} = \begin{cases} 1, & dp_i > t \geq ar_i \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2 \text{ الف})$$

$$if dp_i < ar_i, \quad \& \quad \forall t \in \{0, T\}$$

$$av_{i,t} = \begin{cases} 1, & t \geq ar_i \text{ or } dp_i \geq t \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2 \text{ ب})$$

روابط فوق نشان می‌دهد در صورتی که زمان ورود از خروج کوچکتر باشد، یعنی خودرو در پارکینگ است. در حالتی که زمان ورود بزرگتر از زمان خروج باشد یعنی اینکه خودرو از شب قبل در SPL قرار دارد و یا قرار است تا

1. First-order Low-pass Filter

$$SOC_{min} \leq SOC_{EV}^{i,t} \leq SOC_{max} \quad (8)$$

که در این مقاله $SOC_{min}=35$ و $SOC_{max}=90$ درصد مشخص شده است. از طرفی وقتی سطح شارژ به 50٪ رسیده باشد خودرو شارژ لازم برای طی نمودن مسافت معین در مسافرت روزانه را خواهد داشت [40]. $SOC_{EV}^{i,t}$ وضعیت سطح شارژ خودروی i ام در زمان t ام به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$SOC_{EV}^{i,t}(t) = SOC_{EV}^{i,t}(t - \Delta t) + \frac{S_{EV}}{E_{EV,max}^i} \times \left(\frac{P_{EV,Ch}^{i,t} \times \Delta t \times X_{EV}^{i,t}}{P_{EV,DCh}^{i,t} \times \Delta t \times Y_{EV}^{i,t}} \right) \quad (9)$$

$S_{EV}^{i,t}$ در رابطه (9) پارامتر بدست آمده از فرآیند بهینه‌سازی خواهد بود. این پارامتر نشان دهنده این موضوع است که بعد از بهینه‌سازی، سیستم مدیریت انرژی تعیین می‌کند کدام خودروها می‌بایست شارژ یا دشارژ شده و کدام یک در زمان t در پروسه تبادل توان شرکت نمی‌کنند. بر این اساس، $S_{EV}^{i,t}$ می‌تواند مقادیر 1، 0 و یا -1 را بگیرد که این اعداد به ترتیب بیانگر حالت شارژ، دشارژ و یا عدم شرکت در فرآیند تبادل توان است. همچنین Δt نشان‌دهنده یک دوره زمانی بوده که در این مطالعه برابر با 1 دقیقه در نظر گرفته شده است. کاملاً واضح است که ایستگاه‌های شارژ و باتری خودروها در مدت زمان Δt به مقدار مشخصی می‌توانند توان را انتقال دهند. برای هر خودرو توان قابل تبادل در یک دوره Δt از روابط (10) و (11) بدست می‌آید:

$$0 \leq |P_{EV,Ch}^{i,t}| \leq P_{EV,Ch}^{i,t} \quad (10)$$

$$0 \leq |P_{EV,DCh}^{i,t}| \leq P_{EV,DCh}^{i,t} \quad (11)$$

که به نوع باتری خودروها و شارژر ایستگاه شارژ بستگی دارد. همچنین، اینکه خودرو در لحظه خروج باید به سطح شارژ مطلوب برسد از طریق رابطه (12) قابل محاسبه است:

$$\sum_t \left(\frac{P_{EV,Ch}^{i,t} \times X_{EV}^{i,t} - P_{EV,DCh}^{i,t} \times Y_{EV}^{i,t}}{E_{EV,Rq}^i} \right) \times \Delta t \geq E_{EV,Rq}^i \quad (12)$$

$$\forall t \in \{0, \dots, T\}$$

به منظور آنکه خودروها هر چه به زمان خروجشان نزدیک‌تر شوند در اولویت شارژ قرار گیرند از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\frac{SOC_{max} - SOC_{EV}^i(q)}{(dp_i - t)} \geq \frac{100 \times P_{EV,Ch}^i}{P_{EV,max}^i} \quad (13)$$

هنگامی که زمان شبیه‌سازی به زمان خروج خودرو نزدیکتر شود و اختلاف SOC در آن لحظه با مقدار SOC_{max} زیاد باشد، نامساوی فوق برقرار می‌شود. با برقرار شدن این شرط، در بهینه‌سازی شارژ و دشارژ خودرو در اولویت شارژ قرار خواهد گرفت. همچنین می‌بایست مقدار شارژ انجام شده هر خودروی الکتریکی حداکثر تا ظرفیت باتری بوده و از آن تجاوز نکند. برای این محدودیت از قید زیر استفاده می‌شود:

$$E_{EV,Ar}^i + \sum_{k \in I} \left(\frac{P_{EV,Ch}^{i,t} \times X_{EV}^{i,t} - P_{EV,DCh}^{i,t} \times Y_{EV}^{i,t}}{E_{EV,max}^i} \right) \times \Delta t \leq E_{EV,max}^i \quad (14)$$

که در آن $E_{EV,Ar}^i$ مقدار توان خودرو در لحظه ورود بوده و این محدودیت با توجه به ظرفیت باتری و مقدار توان موجود در شبکه ایجاد می‌شود.

روز بعد در آنجا بماند. با توجه به زمان t مدت زمانی که خودرو در دسترس SPL است مشخص می‌گردد.

خودروهای قرار گرفته در SPLs علاوه بر شارژ می‌توانند این اجازه را به پارکینگ هوشمند بدهند تا از آن‌ها در برنامه انتقال توان از خودرو به شبکه (V2G) یا خودرو به خودرو (V2V) استفاده نماید. به منظور آنکه مشخص گردد آیا صاحب خودرو تمایل به همکاری در برنامه انتقال توان دارد یا خیر، متغیر باینری ξ برای خودروی الکتریکی به عنوان یکی از اطلاعات ورودی تعریف می‌شود. در مراحل شبیه‌سازی، تمایل به همکاری به صورت کاملاً تصادفی انتخاب می‌شود:

$$\xi = \begin{cases} 1, & \text{cooperation} \\ 0, & \text{non-cooperation} \end{cases} \quad (3)$$

در این مطالعه تنها خودروهایی که تمایل به همکاری دارند مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین از آنجایی که یک خودرو در یک دوره معین نمی‌تواند به صورت همزمان عمل شارژ و دشارژ را انجام دهد محدودیت زیر تعریف می‌شود:

$$X(i, t) + Y(i, t) \leq 1 \quad (4)$$

$$\forall t \in \{0, \dots, T\}$$

$$X, Y \in \{0, 1\}$$

که X و Y دو متغیر باینری بوده که وضعیت شارژ و دشارژ را نشان می‌دهند و q تعداد کل گام‌های زمانی است. در صورتی که خودرو تمایل به همکاری داشته باشد و متغیر $avi_{i,t}$ نیز نشان بدهد که خودرو در پارکینگ حضور دارد، آنگاه با بررسی پارکینگ مشخص شده خودرو به اولین پمپ خالی پارکینگ متصل شده و آماده دریافت یا تبادل توان می‌شود. از این رو برای بررسی و مشارکت خودروها در عملیات تبادل توان، بایستی پمپ‌ها بررسی شده و خالی و پر بودنشان مشخص گردد. از این روی پرچم μ به عنوان یک پارامتر باینری استفاده می‌شود:

$$\mu = \begin{cases} 1, & \text{connected} \\ 0, & \text{empty} \end{cases} \quad (5)$$

اگر انرژی خودروی الکتریکی i ام در زمان t ام برابر $E_{EV}^i(t)$ در نظر گرفته شود، سطح شارژ خودروهای الکتریکی (SOC^i) در هر زمان برابر خواهد بود با:

$$SOC_{EV}^i(t)\% = \frac{E_{EV}^i(t)}{E_{EV,max}^i} \times 100 \quad (6)$$

که $E_{EV,max}^i$ برابر انرژی قابل ذخیره بیشینه در خودروی i ام بوده و تابع مشخصات باتری خودرو است. مقدار انرژی مورد نیاز خودروی i ام برای پر شدن باتری در زمان t ام برابر است با:

$$E_{EV,Rq}^i(t) = SOC_{max} \times E_{EV,max}^i - E_{EV}^i(t) \quad (7)$$

که در آن SOC_{max} حداکثر سطح شارژ مناسب قابل ذخیره باتری خودروی الکتریکی بوده و $E_{EV}^i(t)$ انرژی خودروی i ام در زمان t ام است. به منظور عملیات شارژ و دشارژ خودروها، سطح شارژ خودروها اهمیت دارد. تنها در صورتی که سطح شارژ خودروها در محدوده تعریف شده باشد قادر خواهند بود تا در عملیات تبادل توان مشارکت نمایند. لذا:

۲-۳-۲- قیود مربوط به پارکینگ‌های هوشمند

ظرفیت کلی هر SPL در زمان t بستگی به تعداد پمپ‌های فعال آن SPL دارد. به عبارتی بیشینه توانی که یک پارکینگ می‌تواند به شبکه بدهد و یا بگیرد را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$P_{SPL,total}^j(t) = \sum_k \mu^j(k, t) \times P_{EX}^{Ch} \quad (15)$$

$$\forall k \in \{0, \dots, q\}$$

که k شماره پمپ برای پارکینگ j ام بوده و q تعداد کل پمپ‌های پارکینگ j ام است. در طول هر پله زمانی نباید مقدار شارژ خودروها از این ظرفیت کلی بالاتر برود. یعنی:

$$\sum_{i=1}^N \left(P_{EV,Ch}^{i,t} \times X_{EV}^{i,t} - P_{EV,DCh}^{i,t} \times Y_{EV}^{i,t} \right) \leq P_{SPL,total}^j \quad (16)$$

مقدار توان قابل تبادل هر پارکینگ با شبکه نیز محدودیت زیر را داراست:

$$|P_{SPL,EX}| \leq P_{max} \quad (17)$$

این محدودیت به ظرفیت ترانسفورماتور و باسی که SPL به آن متصل است بستگی دارد. به عنوان آخرین قید، مصرف توان مازاد یا جبران کمبود توان تولیدی حاصل از RES (در راستای هموار نمودن نوسانات توان) می‌بایست توسط خودروهای الکتریکی پارک شده در SPLs در هر لحظه مصرف و یا تأمین شود. بدین صورت که برآیند شارژ و دشارژ خودروها برابر با مقدار توان مورد نیاز RES گردد. این قید به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$P_{RES,EX}(t) = \sum_{j=1}^M P_{SPL}^{j,t} \quad (18)$$

۳- نتایج شبیه‌سازی

تابع هدف و قیود مسأله در این مطالعه به صورت خطی هستند. از این روی مناسب‌ترین روش برای حل این معادله استفاده از برنامه‌ریزی خطی خواهد بود. از طرفی به دلیل حضور پارامتر باینری در قیود مسئله از روش بهینه‌سازی به صورت برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح مخلوط ($MILP^1$) استفاده شده است. هدف از این برنامه‌ریزی حداقل نمودن تابع هدف خواهد بود.

۳-۱- داده‌های ورودی

شهر تهران، بیست و پنجمین شهر پرجمعیت و بزرگترین و مهم‌ترین شهر ایران است. از این رو در این پژوهش تعداد ۱۳۴ پارکینگ در نقاط مختلف شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته است. از میان ۱۳۴ پارکینگ در نظر گرفته شده در سطح شهر تعداد ۲۰ پارکینگ از نوع شبانه‌روزی هستند. از این ۲۰ پارکینگ، ۴ پارکینگ اول در مجاورت مراکز تفریحی و مراکز خرید بوده و ۴ پارکینگ بعدی مجاور مراکز مهمی مانند ترمینال‌ها هستند. تعداد پمپ‌های هر پارکینگ، از قاعده زیر پیروی می‌کنند:

• فرض می‌شود که تعداد خودروهای الکتریکی مراجعه نموده در حالت عادی برابر با ۰/۱ کل ظرفیت هر پارکینگ است.

• تعداد پمپ‌های قابل اتصال به خودرو در هر پارکینگ برابر با ۳۳ درصد ظرفیت تعداد خودروهای الکتریکی مراجعه شده در کل روز خواهد بود. برای تولید نمونه آماری ورود و خروج خودروها با توجه به مفروضات گفته شده، از تابع توزیع با اعداد تصادفی استفاده می‌شود. با توجه به اعداد تصادفی تابع توزیع گوسین معکوس^۲ تخمین بهتری برای ورودی این خودروها خواهد بود. تابع چگالی این احتمال به صورت زیر است:

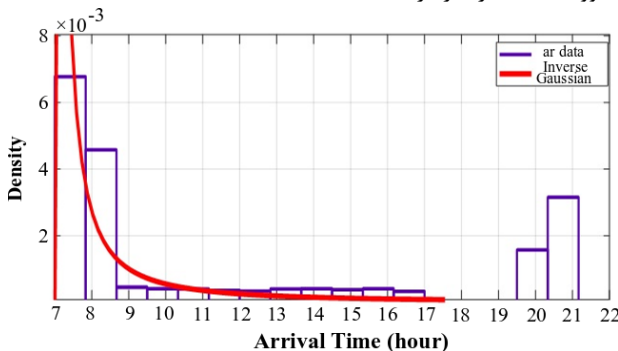
$$f(x) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi x^3}} \exp\left\{-\frac{\lambda}{2\mu^2 x}(x - \mu)^2\right\} \quad (19)$$

$$x > 0, \lambda > 0, \mu > 0$$

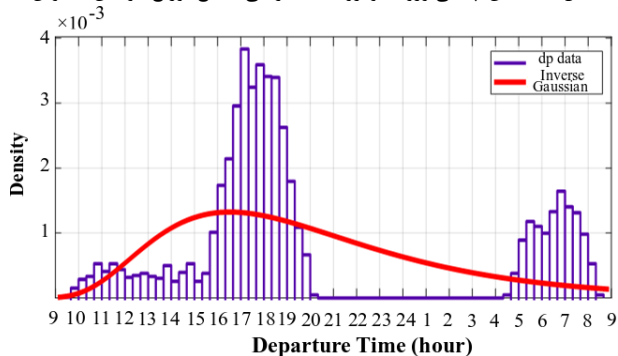
که در آن μ میانگین و λ پارامتر مقیاس است که هر چه λ به سمت بینهایت حرکت کند تابع توزیع بیشتر شبیه تابع توزیع گوسی خواهد شد.

زمان ورود خودروها در شکل ۳ با توزیع گوسین معکوس بین ساعات ۷ صبح تا ۱۰ شب نشان داده شده است. شکل ۴ نیز زمان خروج خودروها را در ۲۴ ساعت شبانه‌روز نشان می‌دهد. در این مطالعه تعداد ۳۳۱۶ عدد خودرو مورد بررسی قرار گرفته است که در ۱۳۴ پارکینگ حضور پیدا خواهند نمود. همچنین فرض شده است تعداد پمپ‌ها ۳۳ درصد تعداد خودروهای بررسی شده برابر با ۱۱۰۰ عدد باشد.

در این مطالعه باتری تمامی خودروها مشابه هم و با ظرفیت یکسان ۶۶/۲ کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است.



شکل ۳ تخمین چگالی ورود خودروهای الکتریکی با تابع توزیع گوسین معکوس



شکل ۴ تخمین چگالی خروج خودروهای الکتریکی با تابع توزیع گوسین معکوس

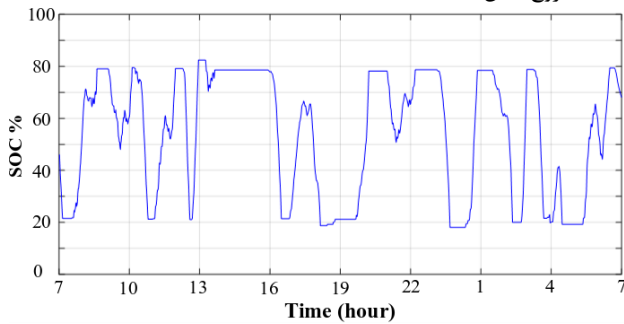
۳-۲- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به تأثیر بهره‌مندی از SPLs برای رفع نوسانات توان خروجی RES پرداخته می‌شود. به این منظور سه سناریو برای پاسخگویی به توان

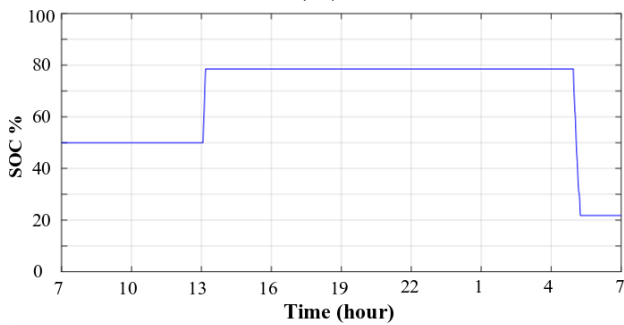
2. Inverse Gaussian

1. Mixed-Integer Linear Programming

که رسیدن خودروها به سطح شارژ مطلوب بود را نسبتاً بهتر از هدف اول انجام داده‌اند. در شکل ۸ مقدار SOC نهایی تمامی خودروهای الکتریکی در لحظه خروج نشان داده شده است.

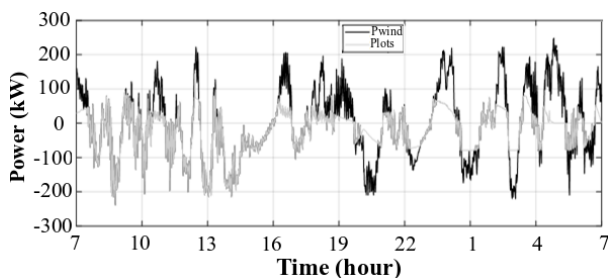


شکل ۵ مقدار توان لحظه‌ای مورد نیاز برای از بین بردن نوسان توان RES

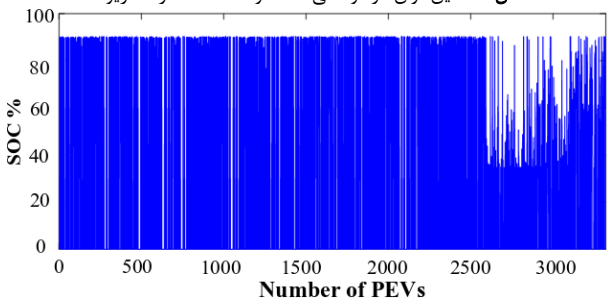


شکل ۶ تغییرات SOC باتری‌ها در سناریو اول مربوط به الف) باتری شماره ۱ (ب) باتری شماره ۶

شکل ۶ تغییرات SOC باتری‌ها در سناریو اول مربوط به الف) باتری شماره ۱ (ب) باتری شماره ۶



شکل ۷ تأمین توان درخواستی RES توسط SPLs در سناریو ۲

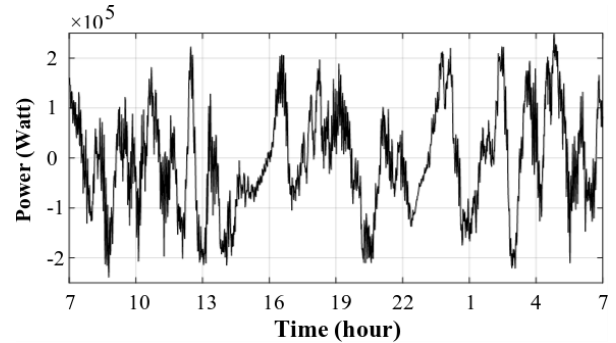


شکل ۸ مقدار سطح شارژ نهایی خودروهای الکتریکی در سناریو ۲

حال بررسی خواهد شد که حضور منبع ذخیره‌ساز در کنار پارکینگ به چه اندازه به تأمین توان موردنیاز سیستم و مدیریت انرژی شبکه کمک خواهد نمود.

۳-۲-۳- سناریوی سوم ادغام SPLs با باتری

مبادله‌ای در نظر گرفته می‌شود. شکل ۵ مقدار توان مبادله‌ای به منظور از بین رفتن نوسانات توان بدست آمده از بخش (۱-۲) را نشان می‌دهد.



شکل ۵ مقدار توان لحظه‌ای مورد نیاز برای از بین بردن نوسان توان RES

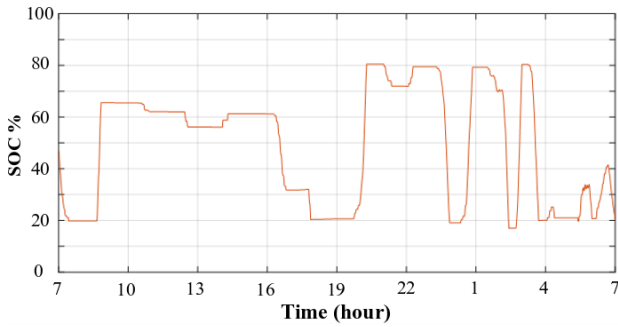
۳-۲-۱- سناریوی اول: بدون حضور SPLs

برای رسیدن به یک توان خروجی با نوسانات قابل قبول تحت قیود Utility، می‌بایست از عناصر ذخیره‌کننده انرژی با قابلیت انتقال توان دو سویه استفاده نمود. در نتیجه BESS، انتخابی کاملاً مناسب خواهد بود. تنها عیب حضور باتری‌ها قیمت بالای آن‌ها (مخصوصاً باتری‌های با حجم بالا) است. در این سناریو فرض می‌شود که از تعدادی باتری برای پاسخ به توان مبادله‌ای نشان داده شده در شکل ۵ بدون حضور SPLs استفاده می‌گردد. در این سناریو، به ۱۸ عدد باتری با ظرفیت ۴ MWh و توان حداکثری ۲ MW برای پاسخگویی به توان مبادله‌ای نیاز خواهد بود. به منظور جلوگیری از کاهش عمر باتری‌ها فرض شده است که حداقل و حداکثر سطح شارژ هر باتری ۲۰ و ۸۰ درصد باشد. مقدار میانگین سطح شارژ اولیه باتری‌ها نیز ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است. به عنوان درک مناسب از تغییرات سطح شارژ باتری‌ها، شکل ۶-الف و ۶-ب SOC مربوط به یونیت‌های ۱ و ۶ را به ترتیب نشان می‌دهد.

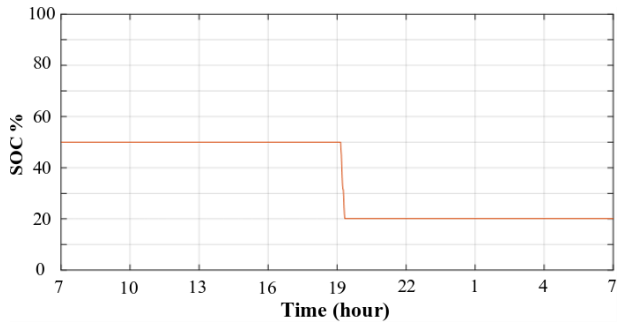
۳-۲-۲- سناریوی دوم: در حضور SPLs

در این سناریو SPLs به شبکه قدرت مورد نظر اضافه می‌شوند. حال اپراتور شبکه تلاش دارد تا توان مبادله‌ای مد نظر RES را تنها با استفاده از SPLs تأمین نماید. در این حالت صاحب SPL می‌تواند با بهره‌مندی از باتری خودروها با اپراتور شبکه تعامل نماید. در مقابل اپراتور شبکه و صاحبان SPLs نیز موظف خواهند بود تا نیاز صاحبان خودروهای الکتریکی را رفع نمایند. برای جبران توان مورد نیاز RES، از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

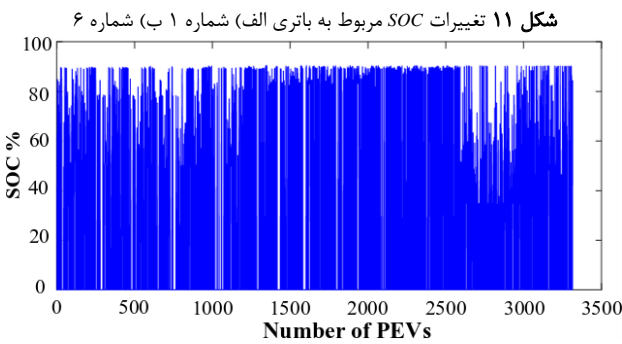
در رابطه (۱) قیمت شارژ خودرو با توجه به [۳۳] یک عدد تصادفی بین ۰/۱۵ و ۰/۳ دلار به ازای هر کیلووات ساعت است. همچنین قیمت توان دشارژ خودروها با در نظر گرفتن احتمال جریمه‌های ناشی از عدم شارژ خودروها ۳ برابر قیمت شارژ در آن لحظه در نظر گرفته شده است. محدودیت مقدار توان قابل انتقال برای شارژ و دشارژ برای هر خودرو (P_{EX}^{DCh} و P_{EX}^{Ch}) در روابط (۱۰) و (۱۱) برابر با ۲۷۵/۸۳ وات در هر دقیقه است. در شکل ۷ مقدار توان تأمین شده توسط پارکینگ‌ها برای جبران توان درخواستی از سوی شبکه بدست آمده است. در شکل ۷ نمودار مشکی رنگ توان درخواستی شبکه به منظور هموار نمودن تغییرات شدید توان تولیدی RES بوده و نمودار خاکستری رنگ نیز مقدار توانی است که توسط SPLs پاسخ داده شده است. مشخص است در تعداد زیادی از دقایق به خصوص بعد از ساعت ۱۶ توان مورد انتظار برآورده نشده است. دلیل این امر به خصوص بعد از ساعت ۱۶ به دلیل نزدیک شدن زمان خروج خودروها است. با این وجود، پارکینگ‌ها هدف دوم برنامه‌ریزی را



(الف)



(ب)

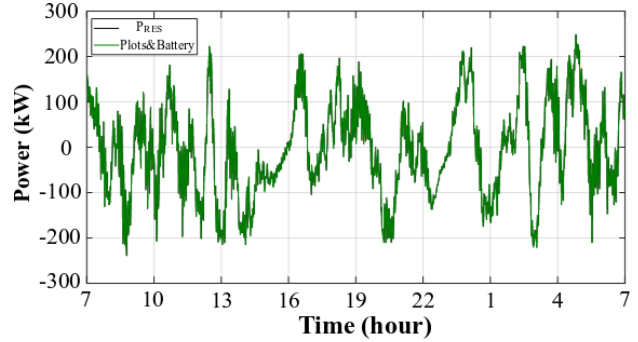


شکل ۱۲ مقدار سطح شارژ نهایی خودروهای الکتریکی در سناریو ۳

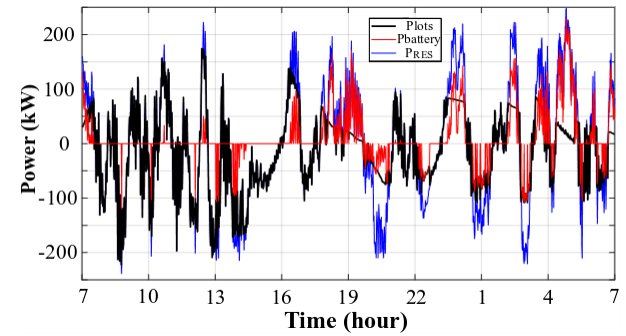
جدول ۱ مقادیر توان انتقالی پارکینگ‌های ۱، ۴، ۱۵، ۱۸، ۲۰، ۴۴، ۸۵، ۱۲۹ در چند دقیقه انتخاب شده

دقیقه	۱۷	۳۲۸	۶۱۶	۱۲۱۷	۱۴۱۲
پارکینگ ۱	-۵۵۱/۶	+۸۷۲/۵	+۲۴۸۲/۵	۰	+۵۵۱/۶
پارکینگ ۴	-۴۱۳۷/۵	+۱۳۷۹/۱	+۱۱۵۸۵	-۲۷۵۸/۳	+۴۱۳۷/۵
پارکینگ ۱۵	-۱۱۰۳/۳	-۶۶۲۰	-۱۶۵۵	+۲۴۸۲/۵	+۱۶۵۵
پارکینگ ۱۸	-۶۰۶۸/۳	-۱۹۸۶۰	-۷۴۴۷/۵	+۷۱۷۱/۶	+۶۸۹۵/۸
پارکینگ ۲۰	-۱۳۹۰/۸	-۷۱۷۱/۶	-۱۳۷۹/۱	+۳۳۱۰	+۱۳۹۰/۸
پارکینگ ۴۴	۰	-۱۱۰۳/۳	-۵۵۱/۶	+۵۵۱/۶	+۵۵۱/۶
پارکینگ ۸۵	-۲۷۵/۸	-۱۱۰۳/۳	-۱۱۰۳/۳	۰	-۵۵۱/۶
پارکینگ ۱۲۹	-۵۵۱/۶	-۱۱۰۳/۳	۰	۰	+۵۵۱/۶

در سناریوی دوم دیده شد که هدف اول اپراتور که دنبال نمودن توان مبادله‌ای بود به طور کامل برآورده نگردید. به منظور رسیدن به هدف اول سعی شد از باتری به عنوان مکمل SPLs استفاده شود. نتایج مقدار توان پاسخ داده شده توسط SPLs و باتری‌های اضافه شده، در شکل ۹ آورده شده است. با توجه به شکل ۹ می‌توان مشاهده کرد که تمامی توان‌های خواسته شده از سوی RES توسط SPLs در کنار باتری‌های کمکی موجود در مجموعه RES تأمین شده است. همچنین در شکل ۱۰ هرکدام از توان‌های RES، توان SPLs و توان باتری به تفکیک نشان داده شده است.



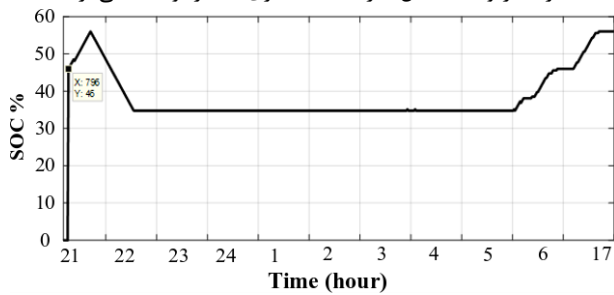
شکل ۹ تأمین توان درخواستی RES توسط SPLs و باتری در سناریو ۳



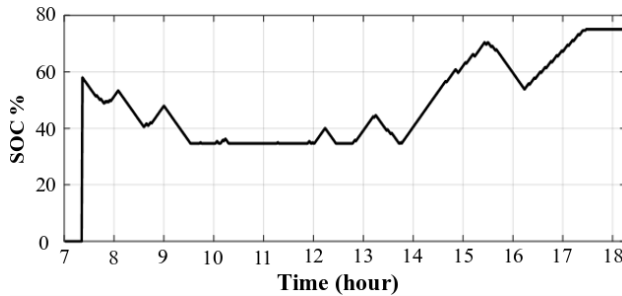
شکل ۱۰ مقایسه همزمان توان مبادله‌ای و توان جبرانی SPLs و باتری در سناریو ۳ با حضور باتری‌ها مشاهده می‌شود که توان مورد نیاز شبکه برای هموارسازی نوسانات توان کاملاً تأمین شده است. اما حضور باتری معیایی را به دنبال خواهد داشت. از اولین معایب آن می‌توان به افزایش هزینه سیستم قدرت ناشی از حضور باتری اشاره نمود. عیب دوم آن کاهش میانگین سطح شارژ خودروهای الکتریکی در لحظه خروج است. قیود مربوط به باتری‌های اضافه شده در این سناریو همانند قیود مطرح شده در سناریوی اول است. با در نظر گرفتن این قیود، تعداد باتری‌های لازم برای کمک به پارکینگ‌های هوشمند برای پاسخگویی کامل به توان مبادله‌ای ۱۰ عدد خواهد بود. شکل ۱۱-الف و ۱۱-ب تغییرات سطح شارژ یونیت‌های ۱ و ۶ را نشان می‌دهد. چنانچه هزینه خرید و نصب برای BESS از نوع لیتیم-یونی حداقل برابر $200 \text{ \$/kWh}$ باشد، مقدار کاهش هزینه BESS توسط روش پیشنهادی (سناریوی سوم) در این مطالعه نسبت به روش مرسوم برابر $6/4$ میلیون دلار خواهد بود. مصرف توان برای شارژ باتری‌های اضافه شده به SPLs بر سطح شارژ نهایی باتری خودروها تأثیر گذاشته و مقدار میانگین سطح شارژ خودروها به ۷۴ درصد کاهش می‌یابد. در شکل ۱۲ مقدار شارژ نهایی خودروها نمایش داده شده است.

برای بررسی مقادیر توان تبدیلی پارکینگ‌ها، در جدول ۱ مقدار توان ۸ SPL در چند دقیقه که به صورت تصادفی انتخاب شده، مقایسه شده است.

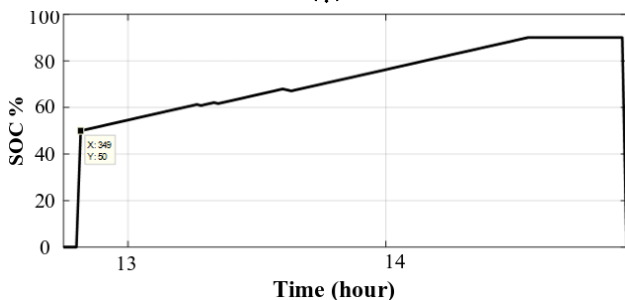
اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار می‌باشد بسیار عالی بوده است. همچنین استفاده از سناریو ۱ به دلیل نیاز به تعداد باتری بیشتر توصیه نمی‌گردد.



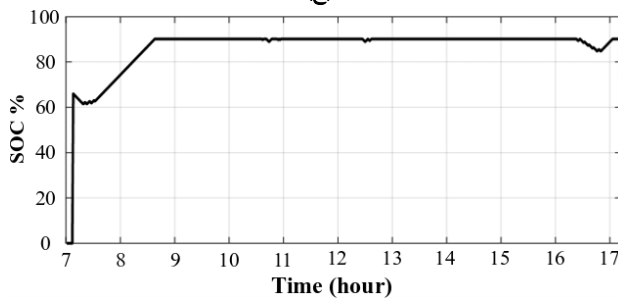
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

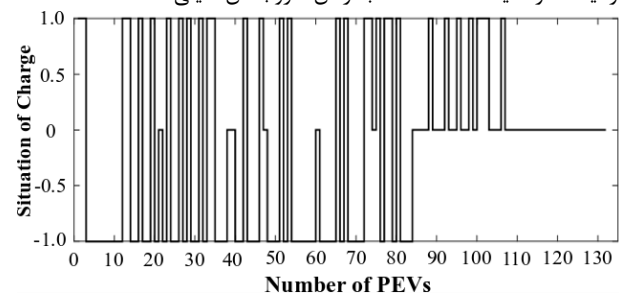
شکل ۱۴ تغییرات سطح شارژ خودروهای الکتریکی شماره ۳۲، ۸۹۶، ۱۵۷۶ و ۳۲۵۶ جدول ۲ مقایسه سناریوهای مختلف

سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	
خیر	دارد	دارد	حضور فناوری V2G
۱۸	—	۱۰	تعداد باتری استفاده شده
بالا	کم	بالا	مقدار پاسخگویی توان مبادله‌ای
—	۸۰	۷۴	میانگین سطح شارژ خودروها
—	بلی	بلی	کاهش هزینه شارژ خودروها

۴- نتیجه‌گیری

مقادیر توان ذکر شده در این جدول بر حسب وات است. همچنین توان مثبت به این معنی است که SPL از شبکه توان دریافت نموده و توان منفی به این معنی است که SPL به شبکه توان تزریق می‌کند. با مشاهده جدول ۱ استنباط می‌شود که در بعضی از زمان‌های شبیه‌سازی تعدادی از SPLs به منظور شارژ باتری خودروهای پارک شده از شبکه توان دریافت نموده و در همان زمان تعدادی از SPLs توان موجود در باتری خودروهایشان را از طریق دشارژ به شبکه انتقال داده‌اند. این رخداد بدان دلیل است که بعضی از خودروها به دلایلی از جمله نزدیک شدن به زمان خروجشان و یا پایین بودن سطح شارژشان می‌بایست شارژ شوند. در نتیجه اپراتور شبکه که وظیفه مدیریت این امر را داراست در واقع علاوه بر تأمین توان مورد نیاز مجموعه RES، در هر دقیقه توان را از خودروهایی که زمان خروجشان فرا نرسیده است دریافت نموده و به خودروهای سایر SPLs که باید شارژ شوند منتقل می‌کند. همچنین این اتفاق برای خودروهای درون هر SPL نیز رخ خواهد داد. بدین صورت که در یک SPL ممکن است از باتری یک خودرو برای شارژ خودروی دیگر استفاده شود که بیانگر فرآیند انتقال توان خودرو به خودرو است. (V2V)

شکل ۱۳ نشان دهنده وضعیت شارژ خودروهای درون پارکینگ ۱۸ در دقیقه ۶۱۶ است. در لحظه ۶۱۶، اپراتور شبکه باید توان ۶۲/۴ kW را به منظور کاهش نوسانات توان در باتری SPLs ذخیره نماید. در صورتی که پارکینگ ۱۸ در این دقیقه ۷/۴۷۷ kW از ظرفیت باتری خودروهایشان را نیز در اختیار شبکه قرار می‌دهد. این بدان معنی است که خودروهای درون این پارکینگ در دقیقه ۶۱۶ هستند به زمان خروجشان خیلی مانده است.



شکل ۱۳ وضعیت شارژ خودروهای درون پارکینگ شماره ۱۸ در دقیقه ۶۱۶ (۱ نشان دهنده شارژ، -۱ نشان دهنده دشارژ و صفر نشان دهنده عدم شرکت خودرو است) اپراتور شبکه با مدیریت بهینه شارژ و دشارژ خودروها توانسته است در لحظات مختلف، توان‌های مورد نیاز را از SPL تقاضا نموده و سعی در پاسخگویی به توان مبادله‌ای داشته باشد. رفتار خودروها و قرار گرفتن در حالت شارژ و دشارژ نیز در این بین تابع دستورات اپراتور است. در دقائق مختلف خودروها رفتارهای مختلفی انجام داده و در پایان تلاش شده است که سطح شارژ در لحظه خروج به بالاترین حد، در صورت عدم آسیب به پاسخگویی توان مورد نیاز برسد. در شکل‌های ۱۴-الف و ۱۴-ب چند نمونه تغییرات سطح شارژ خودروها (SOC) نشان داده شده است.

به منظور مقایسه بهتر سه سناریوی اشاره شده در بخش قبل در جدول ۲ آورده شده است. این جدول پارامترهای مهم در هر سناریو را در خود جای داده تا مزایا و معایب هر سناریو در کنار یکدیگر مشخص گردد. با توجه به نتایج به دست آمده بر روی داده‌های پارکینگ شهر تهران می‌توان نتیجه گرفت اگر چه استفاده از سناریو سوم به تعداد ۱۰ عدد باتری بیشتر از سناریو دوم نیاز دارد، اما در این وضعیت میزان پاسخگویی توان مبادله‌ای که از

- [12] N. Masuch, J. Keiser, M. Lützenberger, and S. Albayrak, Wind power-aware vehicle-to-grid algorithms for sustainable EV energy management systems, in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, 2012: IEEE, pp. 1-7 .
- [13] W. Hu, C. Su, Z. Chen, and B. Bak-Jensen, Optimal operation of plug-in electric vehicles in power systems with high wind power penetrations, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 4, No. 3, pp. 577-585, 2013.
- [14] D. B. Richardson, Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 19, pp. 247-254, 2013.
- [15] F. Mwasilu, J. J. Justo, E.-K. Kim, T. D. Do, and J.-W. Jung, Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 34, pp. 501-516, 2014.
- [16] R. Sioshansi and P. Denholm, The value of plug-in hybrid electric vehicles as grid resources, *The Energy Journal*, pp. 1-23, 2010.
- [17] S. Jang, S. Han, S. H. Han, and K. Sezaki, Optimal decision on contract size for V2G aggregator regarding frequency regulation, in *2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 2010: IEEE, pp. 54-62 .
- [18] N. Rotering and M. Ilic, Optimal charge control of plug-in hybrid electric vehicles in deregulated electricity markets, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 3, pp. 1021-1029, 2010.
- [19] W. Tushar, W. Saad, H. V. Poor, and D. B. Smith, Economics of electric vehicle charging: A game theoretic approach, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 1767-1778, 2012.
- [20] L. Gan, U. Topcu, and S. H. Low, Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 2, pp. 940-951, 2012.
- [21] A. S. Masoum, S. Deilami, M. A. Masoum, A. Abu-Siada, and S. Islam, Online coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grid with distributed wind power generation systems, in *2014 IEEE PES General Meeting/ Conference & Exposition*, 2014: IEEE, pp. 1-5 .
- [22] A. Y. Saber and G. K. Venayagamoorthy, Resource scheduling under uncertainty in a smart grid with renewables and plug-in vehicles, *IEEE systems journal*, Vol. 6, No. 1, pp. 103-109, 2011.
- [23] G. Li and X.-P. Zhang, Modeling of plug-in hybrid electric vehicle charging demand in probabilistic power flow calculations, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 1, pp. 492-499, 2012.
- [24] S. M. Ross, Introduction to Probability Models (10/E), ed: Academic Press, 2009.
- [25] S. Bae and A. Kwassinski, Spatial and temporal model of electric vehicle charging demand, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 3, No. 1, pp. 394-403, 2011.
- [26] J. Soares, H. Morais, T. Sousa, Z. Vale, and P. Faria, Day-ahead resource scheduling including demand response for electric vehicles, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 1, pp. 596-605, 2013.
- [27] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, and M. A. Masoum, Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 2, No. 3, pp. 456-467, 2011.
- [28] J. Zhao, F. Wen, Z. Y. Dong, Y. Xue, and K. P. Wong, Optimal dispatch of electric vehicles and wind power using enhanced particle swarm optimization, *IEEE Transactions on industrial informatics*, Vol. 8, No. 4, pp. 889-899, 2012.
- [29] A. Sheikhi, S. Bahrami, A. Ranjbar, and H. Oraee, Strategic charging method for plugged in hybrid electric vehicles in smart grids; a game theoretic approach, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 53, pp. 499-506, 2013.
- [30] H. Lund and W. Kempton, Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G, *Energy policy*, Vol. 36, No. 9, pp. 3578-3587, 2008.
- [31] T. Wu, Q. Yang, Z. Bao, and W. Yan, Coordinated energy dispatching in microgrid with wind power generation and plug-in electric vehicles, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 4, No. 3, pp. 1453-1463, 2013.
- [32] M. Raoofat, M. Saad, S. Lefebvre, D. Asber, H. Mehrjedri, and L. Lenoir, Wind power smoothing using demand response of electric
- در این مقاله به نقش حضور پارکینگ‌های هوشمند خودروهای الکتریکی (SPLs) در کنار یک مجموعه منابع انرژی تجدیدپذیر با توان خروجی نوسانی در زمینه هموارسازی نوسانات توان پرداخته شده است. در حقیقت در این پژوهش با پیشنهاد یک روش کنترل بهینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در شهر نمونه تهران، سعی شده از دیدگاه اپراتور شبکه تعداد باتری‌های مورد نیاز برای پاسخگویی به توان مورد نیاز برای هموارسازی کاهش یابد. این مسئله به صورت برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح مدل‌سازی شده و حل گردیده است. به منظور تأثیر بهره‌مندی از SPLs برای رفع نوسانات توان خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر سه سناریو شامل بدون حضور SPLs، در حضور SPLs و ادغام با باتری برای پاسخگویی به توان مبادله‌ای در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که علاوه بر دستیابی به سطح مطلوب شارژ خودروهای الکتریکی در لحظه خروج از پارکینگ، مدیریت مناسب SPLs در کنار منابع انرژی تجدیدپذیر باعث کاهش چشمگیر هزینه سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر با توان خروجی نوسانی از طریق کم کردن تعداد باتری‌های مورد نیاز برای پاسخگویی به توان مبادله‌ای می‌شود.

۵- مراجع

- [1] J. Linssen, P. Stenzel, and J. Fleer, Techno-economic analysis of photovoltaic battery systems and the influence of different consumer load profiles, *Applied Energy*, Vol. 185, pp. 2019-2025, 2017.
- [2] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indrajaya, and V. H. Krishna, A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, pp. 1351-1371, 2016.
- [3] I.-S. Han, S.-K. Park, and C.-B. Chung, Modeling and operation optimization of a proton exchange membrane fuel cell system for maximum efficiency, *Energy Conversion and Management*, Vol. 113, pp. 52-65, 2016.
- [4] S. Zhang and R. Xiong, Adaptive energy management of a plug-in hybrid electric vehicle based on driving pattern recognition and dynamic programming, *Applied Energy*, Vol. 155, pp. 68-78, 2015.
- [5] L. Jian, Y. Zheng, X. Xiao, and C. Chan, Optimal scheduling for vehicle-to-grid operation with stochastic connection of plug-in electric vehicles to smart grid, *Applied Energy*, Vol. 146, pp. 150-161, 2015.
- [6] A. S. Masoum, S. Deilami, P. Moses, M. Masoum, and A. Abu-Siada, Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation, *IET generation, transmission & distribution*, Vol. 5, No. 8, pp. 877-888, 2011.
- [7] R. J. Bessa and M. A. Matos, Economic and technical management of an aggregation agent for electric vehicles: a literature survey, *European transactions on electrical power*, Vol. 22, No. 3, pp. 334-350, 2012.
- [8] E. Heydarian-Forushani, M. E. Golshan, and M. Shafie-khah, Flexible interaction of plug-in electric vehicle parking lots for efficient wind integration, *Applied energy*, Vol. 179, pp. 338-349, 2016.
- [9] W. Kempton and J. Tomić, Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy, *Journal of power sources*, Vol. 144, No. 1, pp. 280-294, 2005.
- [10] G. K. Venayagamoorthy, Dynamic, stochastic, computational, and scalable technologies for smart grids, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, Vol. 6, No. 3, pp. 22-35, 2011.
- [11] J. Gallardo-Lozano, E. Romero-Cadaval, V. Miñambres-Marcos, D. Vinnikov, T. Jalakas, and H. Hõimoja, Grid reactive power compensation by using electric vehicles, in *2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, 2014: IEEE, pp. 19-24 .

- vehicles, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 99, pp. 164-174, 2018.
- [33] J. Jannati and D. Nazarpour, Multi-objective scheduling of electric vehicles intelligent parking lot in the presence of hydrogen storage system under peak load management, *Energy*, Vol. 163, pp. 338-350, 2018.
- [34] S. H. Shamsdin, A. Seifi, M. Rostami-Shahrbabaki, and B. Rahrovi, Plug-in Electric Vehicle Optimization and Management Charging in a Smart Parking Lot, in *2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, 2019: IEEE, pp. 1-7 .
- [35] J. Jannati and D. Nazarpour, Optimal performance of electric vehicles parking lot considering environmental issue, *Journal of cleaner production*, Vol. 206, pp. 1073-1088, 2019.
- [36] A. Arzani and G. K. Venayagamoorthy, Integration of SmartParks in a Power System with Utility-Scale PV Plant, in *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2018: IEEE, pp. 1-9 .
- [37] M. Latifi, A. Khalili, A. Rastegarnia, and S. Sanei, A Bayesian Real-Time Electric Vehicle Charging Strategy for Mitigating Renewable Energy Fluctuations, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 15, No. 5, pp. 2555-2568, 2018.
- [38] M. Maigha and M. Crow, A Transactive Operating Model for Smart Airport Parking Lots, *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, Vol. 5, No. 4, pp. 157-166, 2018.
- [39] Y. Sun, X. Tang, X. Sun, D. Jia, and G. Zhang, Microgrid tie-line power fluctuation mitigation with virtual energy storage, *The Journal of Engineering*, Vol. 2019, No. 16, pp. 1001-1004, 2019.
- [40] Z. Zhaoyun *et al.*, Application of micro-grid control system in smart park, *The Journal of Engineering*, Vol. 2019, No. 16, pp. 3116-3119, 2019.