



Energy management in smart power grids with the presence of renewable sources, storage devices, and electric vehicles using multi-objective water cycle optimization method

Mohamad Mohamadi¹, Mohamad Tabrizian^{2*}, Hamidreza Shahmirzad³

1- Master of Electrical Engineering, Ray Power Planet Management Company, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini(Rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Master of Electrical Engineering Yadegar-e-Imam Khomeini(Rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1815163111 Tehran, Iran, mm_tabrizian@yahoo.com

Received: 2 July 2022 Revised: 27 August 2022 Accepted: 8 November 2022

Abstract

Nowadays, the use of smart home appliances has made home energy management more advanced and sophisticated, so determining the optimal timing of home appliances is necessary to define the optimization problem and choose a suitable solution to achieve the necessary benefits for residential consumers. It also helped electricity suppliers by reducing energy consumption. Unlike hybrid electric vehicle (HEV) batteries, which can only be charged with an electric motor plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) can be charged via a mains connection. To optimize the economics of PHEVs, it is necessary to determine an energy management strategy to coordinate the distribution of power between several energy sources. In this paper, after expressing the generalities and background of the subject, the modeling method and the formulation and problem-solving method for determining the optimal energy management strategy in smart power grids with the presence of connectable electric vehicles have been reviewed. The cost of electricity consumption in a microgrid including a smart home is presented and the multi-objective water cycle optimization (MOWCA) method is used to solve the resulting optimization problem. The simulation results show that the use of renewable energy sources, battery storage, and electric vehicles by the proposed method increases consumer benefit.

Keywords: Energy Management, Microgrid, Electric Vehicle, Multi-objective Optimization, Water Cycle Algorithm

1. Introduction

Given the fact that all countries of the world are seeking to meet the rapidly growing and changing energy requirements of the world, achieving sustainable transportation is a vital mission. In particular, electric vehicles (EVs) offer one of the most promising ways to increase energy security and reduce greenhouse gas emissions and pollutants. In the long run, EVs are important for countries looking to reduce pollution in the transport sector. Also, these vehicles need a lot of energy to recharge the battery to have a high capacity, which causes a peak load in the distribution network and also reduces the penetration of renewable resources in the home distribution network. DR load response programs and PHEV charge and discharge management programs can address some of these challenges. The goal of load management is to transfer PHEV portable charging for hours reduce power taken from a normal power grid and increase consumers' use

of renewable energy sources.

2. Related Work

Oil dependence, gasoline prices, and environmental pollution encourage countries to use EVs in future transportation systems. Charging a large number of EVs can lead to many negative effects on the power grid load [1]. One way to reduce the charging costs of connected electric vehicles (PEVs) is to reduce the negative effects on the grid and achieve the necessary goals by combining PEV chargers with distributed renewable generation or energy storage systems. Portable Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) can be charged via the network, they also need a lot of energy to recharge the battery to have a high capacity, this creates a peak load in the distribution network and also reduces the penetration of renewables in Becomes a home distribution network. DR load response programs and PHEV charge and discharge management programs can address some of these challenges. The

goal of load management is to transfer PHEV portable charging for hours reduce power taken from the mains and increase the use of renewable energy sources by consumers [2]. Reference [1] to study the issue of energy management in the collection includes a large number of PHEVs. In this case, a PHEV can be in gasoline or battery consumption while driving and can be charged or discharged from the network while parking at home. Based on this proposed model, the strategy of optimal energy management of gasoline batteries has been implemented to minimize energy costs and increase battery life for each user. [3] focuses on solving the problem of energy management strategy and measuring the combined storage systems of supercapacitor batteries to determine the average operating cost and proper performance of the system. A battery wear model is used to evaluate the loss of dynamic capacity of the battery and its lifespan. A dynamic programming algorithm is used to achieve optimal power distribution between the battery and the supercapacitor. In [4] an energy management strategy is proposed to prevent battery wear in hybrid electric hybrid vehicles. In the first level of the problem, a dynamic programming algorithm with variable constraints is proposed for power distribution between the energy storage system and the engine. By adding a supercapacitor in the role of an energy storage system and using an adaptive low-pass filter capacitor and battery to operate within the capacity range, a power management module is designed to redistribute power between the motor, supercapacitor, and battery. The adaptive low-pass filtering algorithm and the power management module constitute the second-level adaptive power allocation method. [5] A stochastic dynamic programming framework for optimal energy management in a smart home with PEV energy storage is proposed. The purpose of this algorithm is to minimize the power consumption of the network along with meeting the demand for home power and PEV charging needs, and three modes of operation of car to network (V2G), car to home (V2H), and network to a car (G2V) are considered.

3. Proposed Model

The structure of the smart home considered in this study includes the demand for the household load connected to the mains, PEV includes a Li-ion battery along with electronic power circuits. The PEV battery is connected to the mains and home loads by a DC / AC power converter. The electronic power converter is designed and controlled so that it can distribute two-way and one-way loads according to different operating modes and can be used as a controller to manage the load distribution between the battery, appliances, and power grid. One of the indicators of battery wear is the depth of discharge (DOD). DOD is the percentage of charge-discharge of a battery, which reduces the number of battery charge cycles or battery life in general. As the

DOD decreases, the charge mode (SOC) increases, resulting in longer battery life and less battery life, and vice versa. SOC is complementary to DOD, so Equation (1) can be used to express the relationship between SOC and DOD:

$$DOD_{\%} = 1 - SOC_{\%} \quad (1)$$

Of course, Equation (1) should be expressed on average for more than an hour. Therefore, the following indicator to show the wear of the battery of electric vehicles is considered the first objective function of the proposed energy management problem, which should be minimized:

$$OF_1 = DOD_{\%EV\&B(mean)} = 1 - \frac{(\sum_t(SOC_{\%Bat(t)} + \sum_j SOC_{\%EV(t,j)})}{T \times N_{days} \times (J+1)} \quad (2)$$

OF₁ means the first objective function in the multi-objective optimization problem. $DOD_{\%EV\&B(mean)}$ stands for the average discharge depth of electric vehicle batteries and smart home batteries in percentage. $SOC_{\%EV(t,j)}$, and $SOC_{\%Bat(t)}$ indicate the charge status of the electric car battery j at time t and the smart home battery at time t , respectively. T is the period in a day, N_{days} is the number of days considered in the simulation and J is the total number of electric vehicles desired. The number in the denominator of Equation (2) indicates the number of batteries in the smart home that is considered in this study 1. In this study, the second objective function of the multi-objective optimization problem is to minimize the consumer cost in the smart home, which is considered according to Equation (3) and also considers the possibility of selling excess power to the network.

$$OF_2 = \min f(Cost) = \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{array}{l} [(P_{Grid}(t) \times dt) \times C_{Grid}(t)] + \\ [(P_{PV}(t) \times dt) \times C_{PV}(t)] + \\ [(P_W(t) \times dt) \times C_W(t)] + \\ \left[\left(\sum_j^{N_{EV}} P_{EV}^{Disch}(t,j) \times dt \right) \times C_{EV}^{Disch}(t) \right] + \\ [(P_B^{Disch}(t) \times dt) \times C_B^{Disch}(t)] - \\ [(P_{inject}(t) \times dt) \times C_{sell}(t)] \end{array} \right\} \quad (3)$$

Figure (1) shows a block diagram of a multi-step random decision process. The specific subsystem is shown in the lower left block, which is described by the SOC_k mode. The random subsystem is described by a pair of states S_k, SOC pi. The design problem involves determining the I_k control input that minimizes power costs.

Control logic is described as a time-varying state of feedback control (output) whose output is a mapping

that depends on the current definite state SOC_k and the random state S_k , SOC_{pi} . This is formulated as a random time-limited dynamic program:

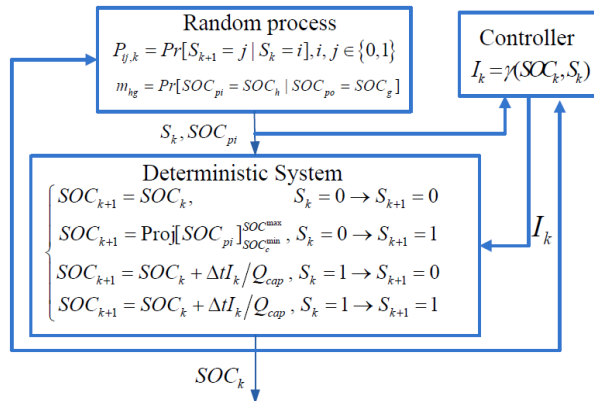


Figure 1. Block diagram of a multi-stage random decision-making process to solve the problem of smart home management with the presence of an electric vehicle

$$SOC_{k+1} = \begin{cases} SOC_k, S_k = 0 \rightarrow S_{k+1} = 0 \\ Proj[SOC_{pi}]_{SOC_{C_{min}}}^{SOC_{C_{max}}}, S_k = 0 \rightarrow S_{k+1} = 1 \\ SOC_k + \frac{\Delta t}{Q_{cap}} I_k, S_k = 1 \rightarrow S_{k+1} = 0 \\ SOC_k + \frac{\Delta t}{Q_{cap}} I_k, S_k = 1 \rightarrow S_{k+1} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

Assume that $V_k(SOC_k, S_k)$ is the minimum expected cost of going from step k to N with the current SOC level of the SOC_k battery and connection mode S_k specified. Then the principle of optimality is presented as follows:

$$V_k(SOC_k, S_k) = \min_{I_k \in D_k} \{g_k(SOC_k, S_k, I_k) + EV_{k+1}(SOC_{k+1}, S_{k+1})\} = \min_{I_k \in D_k} \{g_k(SOC_k, S_k, I_k) + \sum_{j \in \{0,1\}} P_{ij,k} V_{k+1}(SOC_{k+1}, S_{k+1} = j)\} \quad (5)$$

Where g_k is the instantaneous cost and $P_{(ij, k)}$ is the Markov chain transfer probability. Uncertainty in the three parameters of PEV connection time, PEV cut-off time, and charge required for movement has led to the use of the Markov chain in this modeling. The Markov chain model is a dynamic system that changes from one state to another on the state space, which, unlike definite dynamic systems, is a random process and each transition is described by statistics [5]. In addition, Markov's property states that future and past states are independent of the present state. Considering the PEV in the connection state ($S_k = 1$) or the disconnection state ($S_k = 0$) at time k , the Markov chain model can be expressed mathematically as follows:

$$P_{ij,k} = Pr[S_{k+1} = j | S_k = i, k], \quad i, j \in \{0,1\}^2$$

$$P_{10,k} = Pr[S_{k+1} = 0 | S_k = 1, k] = p(k)$$

$$P_{11,k} = Pr[S_{k+1} = 1 | S_k = 1, k] = 1 - p(k)$$

$$P_{01,k} = Pr[S_{k+1} = 1 | S_k = 0, k] = q(k)$$

$$P_{00,k} = Pr[S_{k+1} = 0 | S_k = 0, k] = 1 - q(k) \quad (6)$$

These dynamics are described by the diagram in Figure 2, where $p(k)$ is the probability of transmitting the cut-off state and $q(k)$ is the probability of transmitting the connection state. By considering the separate states for $S_k = 0$ and $S_k = 1$ and by substituting the SOC dynamics, Equation (6) is expanded as follows:

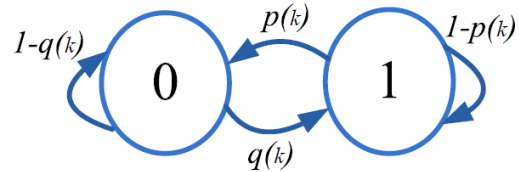


Figure 2. Transmission mode diagram for random disconnection and connection mode for electric vehicle

Here the energy management problem is modeled as a MILP problem during time interval T with time steps t . The time interval is one hour, so there will be 24-time intervals each day.

The goal of this optimization problem is to minimize the total cost of electricity consumed by the consumer during the next day.

$$\min f(Cost) = \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} & [(P_{Grid}(t) \times dt) \times C_{Grid}(t)] + \\ & [(P_{PV}(t) \times dt) \times C_{PV}(t)] + \\ & [(P_W(t) \times dt) \times C_W(t)] + \\ & \left[\left(\sum_j^{NEV} P_{EV}^{Disch}(t, j) \times dt \right) \times C_{EV}^{Disch}(t) \right] + \\ & \left[(P_B^{Disch}(t) \times dt) \times C_B^{Disch}(t) \right] - \\ & [(P_{inject}(t) \times dt) \times C_{Sell}(t)] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

In (4), $P_{grid}(t)$, $P_{PV}(t)$, and $P_W(t)$ are the values imported from the grid in period t , and the values generated from PV and the wind system. $P_{EV}^{Disch}(t, j)$, $P_B^{Disch}(t)$ are the discharge capabilities of EV_j and the battery in t . $P_{inject}(t)$ is the amount of power sold to the grid in t , and $C_{Grid}(t)$ indicates the price of the power generated by the grid in period t . $C_{PV}(t)$ and $C_W(t)$ are the production and maintenance costs of PV and wind systems in t . $C_{EV}^{Disch}(t)$ and $C_B^{Disch}(t)$ are the costs of EV maintenance and battery storage in t , and $C_{Sell}(t)$ refers to the cost of electricity sold to the grid. Constraints problem one involves the balance of power that the power grid must balance between production and consumption systems:

$$\begin{aligned}
 &P_{Grid}(t) + P_{PV}(t) + P_W(t) + \\
 &\sum_j^{N_{EV}} P_{EV}^{Disch}(t, j) + P_B^{Disch}(t) = D(t) + \\
 &\sum_j^{N_{EV}} P_{EV}^{Ch}(t, j) + P_B^{Ch}(t) + P_{inject}(t)
 \end{aligned} \tag{8}$$

Where $D(t)$ refers to the load demand at time t , $P_{EV}^{Ch}(t, j)$ and $P_B^{Ch}(t)$ are charged by EV, j , and battery storage at t , and N_{EV} is the total number of EVs. This equation is guaranteed when $t \in T_{stay}$ (T_{stay} equals the period EV stays at home); Otherwise, EV power should be excluded from the equation because this study assumes that there is no charging process when EV is away from home.

4. Simulation

In this study, three factors that affect the value of the objective function and the execution time of the simulation are considered, these factors include the residential energy consumption curve (F_1), the number of EVs (F_2), and the amount of sunlight (F_3). Can create different scenarios, the level of residential energy consumption, the number of electric vehicles, and the level of sunlight are assumed to be high, medium, and high, respectively, and with multi-objective formulation to minimize battery wear of electric vehicles. Also, minimizing consumer spending for one week is considered.

Figure (3) shows the convergence of Pareto fronts obtained by NSGA-II and MOWCA multi-objective optimization algorithms for the scenario. The set of answers of the first Pareto front in the last iteration defeats all the answers of the members of the population (all the fronts of Pareto). From this figure, it can be seen that for the base case, the cost of electricity is positive. While the set of faulty answers obtained by MOWCA and NSGA-II algorithms reduce costs and increase profits, the set of faulty answers obtained by the MOWCA algorithm sets the set of answers obtained by the NSGA-II algorithm As a result, the answers obtained by MOWCA with the same battery wear index are more profitable than the set of answers obtained by the NSGA-II method.

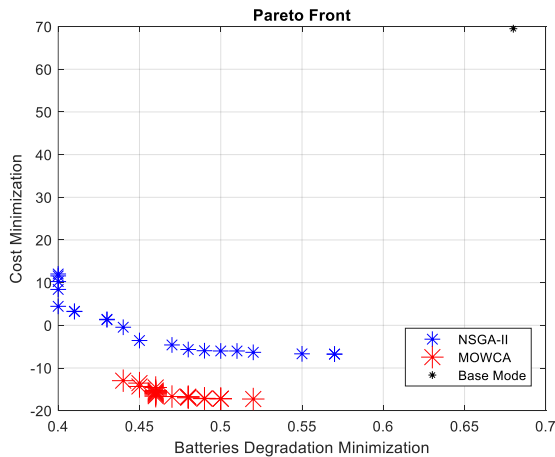


Figure 4. The first Pareto front obtained in the last iteration of the NSGA-II and MOWCA algorithms

Figure 4 shows the production and consumption capabilities of the smart home for answer number 3, NSGA-II, and answer number 2, MOWCA, the desired scenario with the multi-objective formulation. From this figure, it can be seen that energy production sources can supply the load, and surplus power can be sold to the grid. As a result, by increasing the number of decision variables of the optimization problem, both multi-objective optimization algorithms obtain feasible answers within the search space and the performance of both algorithms can be verified as the problem becomes more complex.

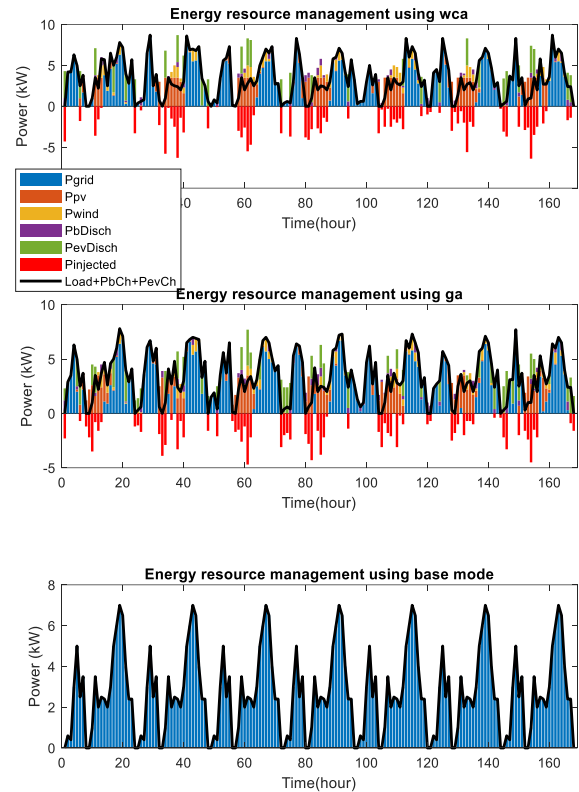


Figure 3. Intelligent microgrid energy resources management with multi-objective optimization at weekly intervals

5. Conclusion

A multi-objective formulation for managing renewable energy sources and battery storage with the presence of electric vehicles was presented to minimize the battery wear index and minimize the cost of electricity consumption of the smart home. The Multipurpose Water Cycle Optimization (MOWCA) method was proposed to solve the optimization problem, which in all cases performed better than the NSGA-II optimization method. The simulation results show that increasing the level of demand, if the sunlight is at a

low level, increases the energy taken from the grid and consequently increases the cost of electricity consumption. But with increasing sunlight and photovoltaic power, the consumer's profit increases due to the sale of excess power to the grid. Also, the addition of electric vehicles, due to the possibility of storing energy during the hours of the presence of electric vehicles in the parking lot, will increase consumer profit. The proposed multi-objective model allows the designer to find several answers, so by determining a decision index, the best answer can be found among the many options. Assuming the selection of the electricity cost minimization decision index, it was shown that the use of the proposed multi-objective formulation increases the consumer profit compared to the single-objective formulation, and finally, it was observed that the performance of algorithms Optimization can also be verified by increasing decision variables.

6. References

- [1] M. Shokri and H. Kebriaei, Mean Field Optimal Energy Management of Plug-In Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, No. 1, pp. 113-120, 2019.
- [2] M. Saadatmandi, S. Hakimi, and A. Hajizadeh, Management of Plug-in Hybrid Electrical Vehicle to Increase Renewable Energy Penetration in Smart Grid, in *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1-6, 2018
- [3] X. Lu and H. Wang, Optimal Sizing and Energy Management for Cost-Effective PEV Hybrid Energy Storage Systems, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 1-1, 2019.
- [4] Y. Bai, H. He, J. Li, S. Li, Y.-x. Wang, and Q. Yang, Battery anti-aging control for a plug-in hybrid electric vehicle with a hierarchical optimization energy management strategy, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 237, p. 117841, 2019.
- [5] X. Wu, X. Hu, X. Yin, and S. J. Moura, Stochastic Optimal Energy Management of Smart Home With PEV Energy Storage, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 3, pp. 2065-2075, 2018.

مدیریت انرژی در ریزشبکه های برق هوشمند با حضور منابع تجدیدپذیر، ذخیره سازها و خودروهای الکتریکی با استفاده از روش بهینه سازی چندهدفه چرخه آب

محمد محمدی¹، محمد تبریزیان^{2*}، حمیدرضا شاهمیرزاد³

1- کارشناس ارشد، مهندسی برق، شرکت مدیریت تولید برق ری، تهران، ایران

2- استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد یادگار امام خمینی^(ع) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

3- کارشناس ارشد مهندسی برق، واحد یادگار امام خمینی^(ع) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* mm_tabrizian@yahoo.com, 1815163111, تهران

چکیده

امروزه استفاده از لوازم خانگی هوشمند، مدیریت انرژی خانگی را پیشرفته تر و پیچیده تر نموده است، در نتیجه تعیین زمان بندی بهینه کارکرد لوازم خانگی کاملاً ضرورت می یابد تا با تعریف مسأله بهینه سازی و انتخاب یک روش حل مناسب بتوان منافع لازم را برای مصرف کنندگان مسکونی حاصل نمود و با کاهش مصرف انرژی به تأمین کنندگان انرژی الکتریکی نیز کمک شایانی نمود. برخلاف باتری خودروهای الکتریکی هیبریدی (HEV) که تنها با موتور الکتریکی شارژ می شود، خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال (PHEV) قابلیت شارژ از طریق اتصال به شبکه برق را دارند. جهت بهینه سازی اقتصادی PHEV ها، تعیین یک راهبرد مدیریت انرژی برای هماهنگی توزیع توان بین چندین منبع انرژی کاملاً ضروری است. در این مقاله، روش مدل سازی و نحوه فرمول بندی و حل مسأله تعیین راهبرد بهینه مدیریت انرژی در ریزشبکه های برق هوشمند با حضور خودروهای الکتریکی قابل اتصال بررسی گردیده است و مدل پیشنهادی جهت بهینه سازی چندهدفه با هدف کمینه سازی شاخص فرسودگی باتری ها و هزینه برق مصرف کننده در یک ریزشبکه شامل یک خانه هوشمند ارائه گردیده و از روش بهینه سازی چندهدفه چرخه آب (MOWCA) جهت حل مسأله بهینه سازی حاصله استفاده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، ذخیره ساز باتری و خودروهای الکتریکی توسط روش پیشنهادی باعث افزایش منفعت مصرف کننده می شود.

کلیدواژگان: مدیریت انرژی، ریزشبکه، خودرو الکتریکی، بهینه سازی چند هدفه، الگوریتم چرخه آب

Energy management in smart power grids with the presence of renewable sources, storage devices and electric vehicles using multi-objective water cycle optimization method

Mohamad Mohamadi¹, Mohamad Tabrizian^{2*}, Hamidreza Shahmirzad¹

1- Master of Electrical Engineering Ray Power Planet Management Company, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini(Rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Master of Electrical Engineering Yadegar-e-Imam Khomeini(Rah) Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1815163111 Tehran, Iran, mm_tabrizian@yahoo.com

Received: 2 July 2022 Accepted: 8 November 2022

Abstract

Nowadays, the use of smart home appliances has made home energy management more advanced and sophisticated, so determining the optimal timing of home appliances is necessary to define the optimization problem and choose a suitable solution to achieve the necessary benefits for residential consumers. It also helped electricity suppliers by reducing energy consumption. Unlike hybrid electric vehicle (HEV) batteries, which can only charge with an electric motor plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) can be charged via a mains connection. To optimize the economics of PHEVs, it is necessary to determine an energy management strategy to coordinate the distribution of power between

several energy sources. In this paper, after expressing the generalities and background of the subject, the modeling method and the formulation and problem-solving method for determining the optimal energy management strategy in smart power grids with the presence of connectable electric vehicles reviewed. The cost of electricity consumption in a micro grid including a smart home presented and the multi-objective water cycle optimization (MOWCA) method used to solve the resulting optimization problem. The simulation results show that the use of renewable energy sources, battery storage, and electric vehicles by then proposed method increases consumer benefit.

Keywords: Energy Management, Micro grid, Electric Vehicle, Multi-objective Optimization, Water Cycle Algorithm

1- مقدمه

یکی از راه‌های کاهش هزینه‌های شارژ خودروهای الکتریکی قابل اتصال^۳ (PEV)، کاهش اثرات منفی در شبکه و رسیدن به اهداف لازم، ترکیب کردن شارژرهای PEV با تولید پراکنده تجدیدپذیر و یا سیستم ذخیره‌سازی انرژی است. خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال^۴ (PHEV) قابلیت شارژ از طریق شبکه را دارند، همچنین این خودروها به انرژی زیادی برای شارژ مجدد باتری نیاز دارند تا ظرفیت بالایی داشته باشند، این امر سبب ایجاد پیک بار در شبکه توزیع و همچنین کاهش نفوذ منابع تجدیدپذیر در شبکه توزیع خانگی می‌شود. برنامه‌های پاسخگویی بار DR و مدیریت شارژ و دشارژ PHEV می‌تواند برخی از این چالش‌ها را برطرف نماید. هدف مدیریت بار، شارژ قابل انتقال PHEV برای ساعاتی است که توان گرفته شده از شبکه برق عادی را کاهش داده و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر توسط مصرف‌کنندگان را افزایش دهد [2]. با رایج شدن خودروهای الکتریکی ترکیبی در بازار، نقش سیستم مدیریت انرژی^۵ (EMS) در سامانه تولید و انتقال توان نیز افزایش می‌یابد. نحوه مدیریت انرژی یا راهبرد کنترلی که معمولاً در کنترل‌کننده مرکزی خودرو پیاده‌سازی می‌شود، بصورت یک الگوریتم یا قانونی برای تنظیم بهره‌برداری سامانه تولید و انتقال نیروی خودرو تعیین می‌شود. در زمینه مدیریت بهینه انرژی در شبکه‌های هوشمند به‌ویژه با ملاحظه خودروهای الکتریکی، برخی مطالعات از روش‌های بهینه‌سازی مقاوم برای انجام مدیریت بهینه انرژی در بارهای مسکونی برای روزهای متوالی استفاده نموده‌اند و در سال‌های اخیر نیز روش‌های بهینه‌سازی هوشمند بسیاری پیشنهاد شده یا توسعه یافته‌اند. سیستم مدیریت انرژی خانگی^۶ (HEMS) راه‌حلی کلیدی برای مدیریت کارآمد و اقتصادی مصرف انرژی مسکونی در شبکه‌های هوشمند آتی است. عملکرد اصلی HEMS، نظارت زمان حقیقی بر مصرف انرژی مصرف‌کنندگان با استفاده از یک کنترلر هوشمند و زمان‌بندی بهینه مصرف انرژی لوازم خانگی برای کاهش هزینه‌های برق مصرف‌کنندگان در شرایط عدم استفاده یا شرایط مورد نظر مصرف‌کنندگان است. در [2] بررسی اثرات ممکن PHEV بر روی نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه توزیع مسکونی تشریح شده است. به‌علاوه این پژوهش یک برنامه مدیریت شارژ برای افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر را توسعه داده است. محققین بسیاری چندین مدل بهینه‌سازی برای حل مسأله مدیریت انرژی خودروهای

شبکه‌های برق کنونی در سال‌های پیش‌رو تغییرات عمیقی را تجربه می‌کنند، تولید جدید، بر پایه شبکه‌های قدرت هوشمند است که با ایجاد تجهیزاتی از ارتباطات شبکه‌ای، توسط لایه‌های اطلاعاتی و ارتباطی خلاصه می‌شود [1]. نبود انرژی کافی و افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، چالش‌های مهمی برای اقتصاد و محیط زیست کشورها بوده و علاوه بر این، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش تلفات انتقال برق و افزایش امنیت شبکه در شرایط کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر موجب تحول شبکه‌های متداول به شبکه هوشمند شده است. شبکه هوشمند در جستجوی روش‌های بهتری برای استفاده گسترده از منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر است، از این رو مطالعات نحوه پیشرفت شبکه‌های برق یکی از مهمترین مسائل حوزه صنعت برق در کشورهای مختلف است [2]. شبکه هوشمند به مدرنیزه کردن شبکه برق با ادغام فناوری‌های مختلف مثل تولید پراکنده، بارهای قابل برنامه‌ریزی، سیستم‌های ارتباطی و ادوات ذخیره‌سازی اشاره دارد که بطور مؤثر برای انتقال الکتریسیته بصورت پایدار، اقتصادی و ایمن استفاده می‌شود. سناریوی شبکه هوشمند از جریان دو طرفه برق و اطلاعات بین شبکه برق و مصرف‌کنندگان به منظور ایجاد یک شبکه انتقال انرژی پراکنده بطور خودکار و گسترده، استفاده می‌کند. شبکه هوشمند سه هدف اصلی دارد که شامل بهبود قابلیت اطمینان، بهره‌وری بهینه منابع تولید پراکنده^۱ (DG) و بازدهی مناسب انرژی است [2]. با توجه به این اصل که همه کشورهای دنیا به دنبال تحقق الزامات انرژی در جهانی به سرعت در حال رشد و تغییر هستند، دستیابی به حمل و نقل پایدار مأموریتی حیاتی محسوب می‌شود. به‌طور ویژه، خودروهای الکتریکی^۲ (EV) یکی از امیدبخش‌ترین مسیرها را به سمت افزایش امنیت انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها ارائه می‌کند. در درازمدت، EVها برای کشورهایی که به دنبال کاهش آلاینده‌گی در بخش حمل و نقل هستند اهمیت زیادی دارد [3]. وابستگی نفت، قیمت بنزین و آلودگی محیط زیست، کشورها را به استفاده از EVها در سیستم‌های حمل و نقل آینده تشویق می‌کند. شارژ تعداد زیادی از EVها می‌تواند منجر به اثرات منفی زیادی بر روی بار شبکه قدرت شود [4].

3. Plug-in Electrical Vehicle
4. Plug-in Hybrid Electrical Vehicle
5. Energy Management System
6. Home Energy Management System

1. Distributed Generation
2. Electrical Vehicle

ترکیبی برای بهینه‌سازی سیستم‌های تولید و مصرف انرژی در یک خانه هوشمند با ادغام منابع تولید انرژی تجدیدپذیر مثل خورشید و باد و سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری بعنوان منابع تولید پراکنده با نفوذ خودروهای الکتریکی قابل اتصال به شبکه ارائه شده است و یک روش ابتکاری برای حل مسأله مدیریت انرژی مسکونی با یافتن راه‌حل بهینه فراگیر برای چندین روز متوالی با کاهش قابل ملاحظه در زمان اجرای سناریوها پیشنهاد شده است. در [15] یک چارچوب برنامه‌نویسی پویای تصادفی برای مدیریت بهینه انرژی در یک خانه هوشمند با ذخیره‌ساز انرژی PEV پیشنهاد شده است. هدف این الگوریتم کمینه‌سازی هزینه مصرف‌کننده شبکه برق همراه با برآورده کردن تقاضای توان خانگی و نیازهای شارژ PEV می‌باشد و سه حالت بهره‌برداری خودرو به شبکه (V2G)، خودرو به خانه (V2H) و شبکه به خودرو (G2V) در نظر گرفته شده است.

2- مدل‌سازی و روش پیشنهادی

ساختار خانه هوشمند در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل تقاضای بار خانگی متصل به شبکه برق، PEV شامل باتری Li-ion همراه با مدارات الکترونیک قدرت است. باتری PEV توسط مبدل الکترونیک قدرت DC/AC با شبکه و بارهای خانگی ارتباط دارد. مبدل الکترونیک قدرت به گونه‌ای طراحی و کنترل شده است که امکان پخش بار دوجبهته و تک‌جهته را مطابق حالت‌های مختلف بهره‌برداری دارا بوده و به‌عنوان کنترل‌کننده برای مدیریت پخش بار بین باتری، لوازم خانگی و شبکه برق استفاده شود. یکی از شاخص‌های بیانگر فرسودگی باتری، عمق تخلیه (DOD) است. در واقع DOD به درصد تخلیه شارژ یک باتری گفته می‌شود که با کاهش آن تعداد سیکل شارژ باتری یا بطور کلی طول عمر باتری افزایش می‌یابد. با کاهش DOD، حالت شارژ⁵ (SOC) افزایش می‌یابد در نتیجه طول عمر باتری بیشتر شده و فرسودگی باتری کمتر می‌شود و بالعکس. SOC مکمل DOD است پس می‌توان رابطه (1) را برای بیان ارتباط میان SOC و DOD در نظر گرفت:

$$DOD\% = 1 - SOC\% \quad (1)$$

البته رابطه (1) برای یک بازه زمانی بیش از یک ساعت باید به‌طور میانگین بیان شود. بنابر این شاخص زیر برای نشان دادن فرسودگی باتری خودروهای الکتریکی بعنوان تابع هدف اول مسأله مدیریت انرژی پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود که باید کمینه شود:

$$OF_1 = DOD\%_{EV\&B(mean)} =$$

$$1 - \frac{(\sum_t(SOC\%_{Bat}(t)) + \sum_j(SOC\%_{EV}(t,j)))}{T \times N_{days} \times (J+1)} \quad (2)$$

که OF_1 به معنای تابع هدف اول در مسأله بهینه‌سازی چندهدفه است. $DOD\%_{EV\&B(mean)}$ مخفف عمق تخلیه میانگین باتری خودروهای الکتریکی و باتری خانه هوشمند برحسب درصد است. $SOC\%_{EV}(t,j)$ و $SOC\%_{Bat}(t)$ به ترتیب نشان‌دهنده حالت شارژ باتری خودروی الکتریکی زدر زمان t و باتری خانه هوشمند در زمان t به درصد می‌باشند. T دوره زمانی در یک شبانه‌روز، N_{days} تعداد روزهای در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی و J تعداد کل خودروهای الکتریکی مورد نظر است. عدد مندرج در مخرج رابطه (2) نشان-

الکتریکی در شبکه هوشمند را توسعه داده‌اند. مرجع [4] به بررسی مسأله مدیریت مصرف انرژی در یک مجموعه شامل تعداد زیادی از PHEV ها می‌پردازد. در این مسأله یک PHEV می‌تواند در حین رانندگی در حالت‌های مصرف بنزین و یا باتری باشد و در حین پارک در منزل می‌تواند از شبکه شارژ یا به آن دشارژ شود. بر اساس این مدل پیشنهادی، راهبرد مدیریت انرژی بهینه باتری-بنزین به منظور کمینه‌سازی هزینه انرژی و افزایش طول عمر باتری برای هر کاربر پیاده شده است. در [5] بر روی حل مسأله راهبرد مدیریت انرژی و اندازه‌یابی سیستم‌های ذخیره‌سازی ترکیبی باتری-ابرخازن جهت تعیین هزینه بهره‌برداری متوسط و عملکرد مناسب سیستم تمرکز شده است. یک مدل فرسودگی باتری برای ارزیابی از بین رفتن ظرفیت دینامیکی باتری و طول عمر آن به‌کار گرفته شده است. الگوریتم برنامه‌ریزی پویا(دینامیکی) برای دستیابی به پخش بهینه توان بین باتری و ابرخازن استفاده شده است.

در [6] یک راهبرد مدیریت انرژی برای جلوگیری از فرسودگی باتری در خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال پیشنهاد شده است. در سطح اول مسئله، یک الگوریتم برنامه‌ریزی دینامیکی با قيود متغیر برای توزیع توان میان سیستم ذخیره‌سازی انرژی و موتور پیشنهاد شده است. با اضافه کردن ابرخازن در نقش سیستم ذخیره‌سازی انرژی و استفاده از خازن فیلتر پایین-گذر تطبیقی و باتری برای عمل کردن در محدوده ظرفیت، یک ماژول مدیریت توان جهت توزیع مجدد توان بین موتور، ابرخازن و باتری طراحی شده است. الگوریتم فیلترینگ پایین‌گذر تطبیقی و ماژول مدیریت توان روش تخصیص توان تطبیقی در سطح دوم را تشکیل می‌دهد. در [7] یک روش جدید مدیریت زمان حقیقی انرژی برای PHEV بر اساس مدل کنترل پیشگویانه پیشنهاد شده است که در آن SOC باتری با مدیریت انرژی بلادرنگ ارزیابی شده است. در [8] یک کنترل‌کننده مبتنی بر منطق فازی¹ (FLC) برای مدیریت انرژی بر اساس حالت آینده پیش‌بینی شده خودرو به منظور بهبود مصرف سوخت، آلاینده‌گی و عملکرد مناسب بکار گرفته شده است و سیستم مدیریت انرژی برای افزایش وضعیت سلامتی باتری سامانه تولید و انتقال نیرو اصلاح شده است. این روش که منجر به افزایش طول عمر باتری می‌شود، الگوریتم پیش‌بینی و حفاظت‌کننده² (PPA) نامیده می‌شود. در [9] یک برنامه زمانبندی منابع انرژی برای شبکه هوشمند با در نظر گرفتن کاربرد تولید پراکنده و خودروها در بازه زمانی 48 ساعته در نظر گرفته شده است. در [10]، روش تکاملی بهینه‌سازی ازدحام ذرات³ (PSO) برای حل مسأله مدیریت منابع انرژی در شبکه هوشمند برای دستیابی به راه حل زمانی با در نظر گرفتن بازه زمانی 24 ساعته، به‌کار گرفته شده است. یک نمونه سیستم مدیریت پاسخگو به زمان‌بندی خودروهای الکتریکی در سیستم توزیع هوشمند در [11] ارائه شده است. در [12] یک مسأله برنامه‌نویسی خطی آمیخته با عدد صحیح دو مرحله‌ای برای بهینه‌سازی هزینه برق مسکونی با تقاضای بار انتقال یافته برای شبیه‌سازی زمان‌بندی روز-پیش پیاده‌سازی شده است. در [13]، مدل رفتار مالکان خودروهای الکتریکی قابل اتصال برای تحلیل مسائل فنی و جایگزینی آن‌ها شامل ویژگی‌های قابلیت اطمینان شبکه توزیع بدون تمرکز بر بهینه‌سازی اقتصادی معرفی شده است. در [14] یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح

1. Fuzzy Logic Controller
2. Predictive and Protective Algorithm
3. Particle Swarm Optimization

4. Depth of Discharge
5. State of Charge

می‌کند. در نتیجه توزیع احتمالی شرطی SOC_{pi} می‌تواند طبق رابطه زیر بیان شود:

$$m_{hg} = \Pr[SOC_{pi} = SOC_h | SOC_{po} = SOC_g] \quad (10)$$

$$SOC_h, SOC_g \in S = \left\{ SOC_i = SOC_c^{Min} + i \cdot \Delta SOC \mid SOC_c^{Min} \leq SOC_i \leq SOC_c^{Max} \right\} \quad i \in \mathbb{N}, \quad (11)$$

مقدار m_{hg} احتمالی است که SOC در حال اتصال $SOC_{pi} = SOC_h$ باشد مشخص بودن SOC در حال قطع $SOC_{po} = SOC_g$ وجود دارد. زمانیکه SOC_{po} مشخص باشد ($SOC_{po} = SOC_g$) توزیع احتمالی SOC_{pi} توسط توزیع احتمالی مسافت رانندگی تصمیم‌گیری می‌شود. برای محاسبه هزینه برق برای یک PEV در یک ریزشبه خانه هوشمند، تابع هزینه لحظه‌ای برق به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$g_k(SOC_k, S_k, I_k) = c_k \cdot \Delta t \cdot P_{grid,k} = c_k \cdot \Delta t \cdot (P_{dem,k} + S_k P_{batt,k}) = c_k \cdot \Delta t \cdot (P_{dem,k} + S_k (V_{OC} SOC_k I_k + R_{int} I_k^2)) \quad (12)$$

که c_k قیمت برق متغیر با زمان بر حسب cent/kWh است. کنترل‌کننده باید SOC_k و جریان I_k را درون محدوده زیر حفظ نماید:

$$SOC_k \leq SOC_c^{Max} \quad k = 0, \dots, N \quad (13)$$

$$I_k \leq I_k^{Max} \quad k = 0, \dots, N - 1 \quad (14)$$

مقادیر تنظیمی I_k^{Min} در حالت‌های مختلف بهره‌برداری به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$I_k^{Min} \text{ حالت V2G:} \quad (1)$$

$$I_k^{Min} = I_{bat}^{Min} \quad (15)$$

$$I_k^{Min} \text{ حالت V2H:} \quad (2)$$

$$I_k^{Min} = \max \left\{ I_{bat}^{Min}, \frac{-V_{oc} + \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_{int} P_{dem,k}}}{2R_{int}} \right\} \quad (16)$$

$$I_k^{Min} \text{ حالت G2V:} \quad (3)$$

$$I_k^{Min} = 0 \quad (17)$$

شکل (1) دیاگرام بلوکی فرآیند تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای تصادفی را نشان می‌دهد. زیر سیستم معین در بلوک سمت چپ پایینی نشان داده شده است که توسط حالت SOC_k توصیف می‌گردد. زیر سیستم تصادفی با جفت حالت‌های $\{SOC_{pi}, S_k\}$ توصیف می‌شود. مسأله طراحی شامل تعیین ورودی کنترل I_k می‌باشد که هزینه برق را کمینه کند.

دهنده تعداد باتری‌ها در خانه هوشمند است که در این مطالعه 1 در نظر گرفته شده است. در این پژوهش دومین تابع هدف مسأله بهینه‌سازی چندهدفه، کمینه‌سازی هزینه مصرف‌کننده در خانه هوشمند است که مطابق رابطه (3) در نظر گرفته می‌شود و امکان فروش مازاد توان را نیز به شبکه در نظر می‌گیرد.

$$OF_2 = \min f(Cost) = \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} & [(P_{Grid}(t) \times dt) \times C_{Grid}(t)] + \\ & [(P_{PV}(t) \times dt) \times C_{PV}(t)] + \\ & [(P_W(t) \times dt) \times C_W(t)] + \\ & \left[\left(\sum_j^{N_{EV}} P_{EV}^{Disch}(t,j) \times dt \right) \times C_{EV}^{Disch}(t) \right] + \\ & \left[(P_B^{Disch}(t) \times dt) \times C_B^{Disch}(t) \right] - \\ & [(P_{inject}(t) \times dt) \times C_{Sell}(t)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

که در آن OF_2 دومین تابع هدف مسئله است. معادله (4) نیز قید تعادل توان را در این مسئله نشان می‌دهد.

$$P_{grid,k} = P_{dem,k} + S_k P_{batt,k}, \quad k = 0, \dots, N - 1 \quad (4)$$

$$S_k = \begin{cases} 0 & \text{for } t_d \leq k \leq t_a \\ 1 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (5)$$

که S_k به حالت PEV در زمان k یعنی متصل ($S_k = 1$) یا قطع شده ($S_k = 0$) اشاره دارد. مدل مدار معادل زمان گسسته باتری PEV بصورت زیر است:

$$SOC_{k+1} = SOC_k + \frac{\Delta t}{Q_{cap}} I_k, \quad k = 0, \dots, N - 1 \quad (6)$$

$$SOC_0 = SOC_{init} \quad (7)$$

در نتیجه توان باتری PEV بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{batt,k} = V_{OC} SOC_k I_k + R_{int} I_k^2 \quad (8)$$

در اینجا توان شارژ مثبت در نظر گرفته شده و مقاومت داخلی R_{int} ثابت و V_{OC} تابعی از SOC_k فرض می‌شود. مسافت سفر روزانه برای محاسبه SOC در زمان اتصال SOC_{pi} به کار رفته است. تصادفی بودن SOC در زمان اتصال، تحت تأثیر عوامل زیادی نظیر SOC در زمان قطع، مسافت رانندگی، نحوه رانندگی، انتخاب مسیر، عبور و مرور و غیره می‌باشد که در اینجا تنها اثر مسافت رانندگی مطابق رابطه (9) در نظر گرفته شده است:

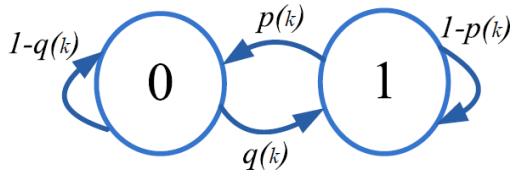
$$SOC_{pi} = \begin{cases} SOC_c^{Min} & \text{if } SOC_{po} - \frac{d}{E_{ff} \cdot Q_{eap}} \leq SOC_c^{Min} \\ SOC_{po} - \frac{d}{E_{ff} \cdot Q_{eap}} & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (9)$$

که Q_{eap} ظرفیت انرژی بر حسب کیلو وات ساعت و E_{ff} بازده کل الکتریکی رانندگی است. متغیرهای تصادفی SOC_{po} و d بترتیب SOC در زمان قطع و مسافت رانندگی روزانه را نشان می‌دهند. اگر SOC_{po} و d مشخص باشند، آنگاه SOC_{pi} می‌تواند محاسبه شود. توجه داشته باشید که SOC_{po} از پایین به SOC_c^{Min} محدود می‌شود که از تخلیه باتری جلوگیری

هستند. با در نظر گرفتن PEV در حالت اتصال ($S_k = 1$) یا حالت قطع ($S_k = 0$) در زمان k ، مدل زنجیره مارکوف از نظر ریاضی بصورت زیر قابل بیان است:

$$\begin{aligned} P_{ij,k} &= \Pr[S_{k+1} = j | S_k = i, k], \quad i, j \in \{0,1\}^2 \\ P_{10,k} &= \Pr[S_{k+1} = 0 | S_k = 1, k] = p(k) \\ P_{11,k} &= \Pr[S_{k+1} = 1 | S_k = 1, k] = 1 - p(k) \\ P_{01,k} &= \Pr[S_{k+1} = 1 | S_k = 0, k] = q(k) \\ P_{00,k} &= \Pr[S_{k+1} = 0 | S_k = 0, k] = 1 - q(k) \end{aligned} \quad (21)$$

این دینامیک‌ها با دیاگرام شکل 2 توصیف می‌شوند که احتمال انتقال حالت قطع و $q(k)$ احتمال انتقال حالت اتصال هستند. با در نظر گرفتن حالت‌های جداگانه برای $S_k = 1$ و $S_k = 0$ با جایگذاری دینامیک‌های SOC، معادله (20) بصورت زیر بسط می‌یابد:



شکل 2 دیاگرام انتقال حالت برای حالت قطع و وصل تصادفی جهت خودروی الکتریکی

$$V_k(SOC_k, S_k = 0) = \min_{I_k \in D_k} \left\{ g_k(SOC_k, S_k = 0, I_k) + (1 - q(k)) \cdot V_{k+1}(SOC_{k+1}, S_{k+1} = 0) + q(k) \cdot V_{k+1} \left(Proj[SOC_{pi}]_{SOC_c^{Min}}, S_{k+1} = 1 \right) \right\} \quad (22)$$

$$V_k(SOC_k, S_k = 1) = \min_{I_k \in D_k} \left\{ g_k(SOC_k, S_k = 1, I_k) + (p(k)) \cdot V_{k+1} \left(SOC_k + \frac{\Delta t}{Q_{cap}} I_k, S_{k+1} = 0 \right) + (1 - p(k)) \cdot V_{k+1} \left(SOC_k + \frac{\Delta t}{Q_{cap}} I_k, S_{k+1} = 1 \right) \right\} \quad (23)$$

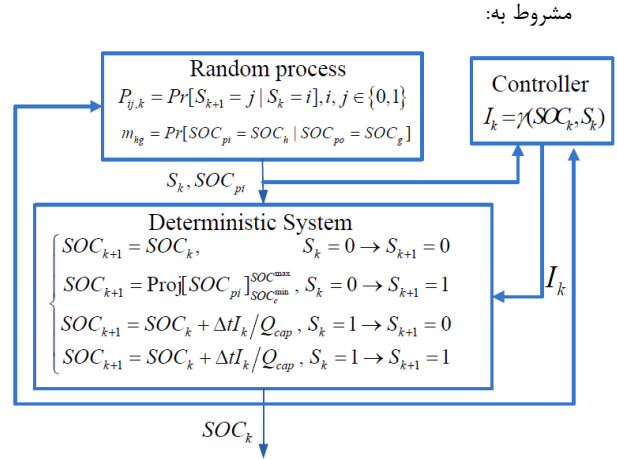
برای شرایط مرزی:

$$V_N(SOC_N, S_N) = \begin{cases} 0, & \text{for } SOC_N^{Min} \leq SOC_N \leq SOC_N^{Max} \\ \infty, & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (24)$$

در اینجا مسأله مدیریت انرژی بعنوان یک مسئله MILP در طول بازه زمانی T با گام‌های زمانی t مدل‌سازی می‌شود. بازه زمانی یک ساعته در نظر گرفته شده است، پس هر روز 24 بازه زمانی خواهد داشت. هدف این مسأله بهینه‌سازی، کمینه‌سازی هزینه کل توان الکتریکی مصرف‌کننده در طول روز بعد می‌باشد.

منطق کنترلی به صورت یک قانون کنترل بازخورد (فیدبک) حالت متغیر با زمان توصیف می‌شود که خروجی آن نگاهی است که به حالت معین کنونی SOC_k و حالت تصادفی $\{S_k, SOC_{pi}\}$ بستگی دارد. این امر در زیر به صورت یک برنامه پویا (دینامیکی) تصادفی زمان محدود فرمول‌بندی شده است:

$$\min_{I_k, SOC_k, S_k} \mathbb{E} \sum_{k=0}^{N-1} c_k \cdot \Delta t \cdot (P_{dem,k} + S_k P_{batt,k}) \quad (18)$$



شکل 1 دیاگرام بلوکی فرآیند تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای تصادفی برای حل مسأله مدیریت خانه هوشمند با حضور خودروی الکتریکی

$$SOC_{k+1} = \begin{cases} SOC_k, S_k = 0 \rightarrow S_{k+1} = 0 \\ Proj[SOC_{pi}]_{SOC_c^{Min}}, S_k = 0 \rightarrow S_{k+1} = 1 \\ SOC_k + \frac{\Delta t}{Q_{cap}} I_k, S_k = 1 \rightarrow S_{k+1} = 0 \\ SOC_k + \frac{\Delta t}{Q_{cap}} I_k, S_k = 1 \rightarrow S_{k+1} = 1 \end{cases} \quad (19)$$

فرض کنید $V_k(SOC_k, S_k)$ حداقل هزینه مورد انتظار رفتن از گام زمانی k به N با مشخص بودن سطح کنونی SOC_k باتری و حالت اتصال S_k باشد. آنگاه اصل بهینگی بصورت زیر ارائه می‌گردد:

$$V_k(SOC_k, S_k) = \min_{I_k \in D_k} \{ g_k(SOC_k, S_k, I_k) + \mathbb{E} V_{k+1}(SOC_{k+1}, S_{k+1}) \} = \min_{I_k \in D_k} \{ g_k(SOC_k, S_k, I_k) + \sum_{j \in \{0,1\}} P_{ij,k} V_{k+1}(SOC_{k+1}, S_{k+1} = j) \} \quad (20)$$

که g_k هزینه لحظه‌ای در (12) و $P_{ij,k}$ احتمالات انتقال زنجیره مارکوف در (21) است. عدم قطعیت در سه پارامتر زمان وصل PEV، زمان قطع PEV و شارژ مورد نیاز برای حرکت باعث استفاده از زنجیره مارکوف در این مدل‌سازی شده است. مدل زنجیره مارکوف، یک سیستم دینامیکی است که دستخوش تغییراتی از یک حالت به حالت دیگر بر روی فضای حالت است که بر خلاف سیستم‌های دینامیکی قطعی (معین)، فرآیندی تصادفی است و هر انتقال توسط آمار توصیف می‌شود [15]. علاوه بر این، خاصیت مارکوف بیان می‌کند که با مشخص بودن حالت کنونی، حالت‌های آینده و گذشته مستقل

$$0 \leq P_W(t) \leq P_W^{Max}(t) \quad (30)$$

که توان خروجی تولید شده توسط توربین بادی با رابطه (۳۱) بیان می‌شود [16]:

$$\begin{cases} P_W(t) = 0, & \text{if } v_f < v_{ci} \text{ and } v_f > v_{co} \\ P_W(t) = P_{rated} & \text{if } v_r \leq v_f \leq v_{co} \\ P_W(t) = P_{rated} \times \frac{v_f - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & \text{if } v_{ci} \leq v_f \leq v_r \end{cases} \quad (31)$$

در این روابط $P_W^{Max}(t)$ حداکثر توان مجاز بادی در زمان t ، P_{rated} توان نامی سیستم بادی، v_f سرعت پیش‌بینی شده برای باد، v_r سرعت نامی، v_{ci} سرعت قطع پایین، و v_{co} سرعت قطع بالای توربین بادی هستند. سایر محدودیت‌های مسئله نیز عبارتند از:

$$P_B^{Ch}(t) \leq P_B^{Cmax} \times Y(t) \quad (32)$$

محدودیت میزان تخلیه (دشارژ) مجاز:

$$P_B^{DisCh}(t) \leq P_B^{Dmax} \times Z(t) \quad (33)$$

قید ممنوعیت شارژ و دشارژ همزمان:

$$Y(t) + Z(t) \leq 1 \quad (34)$$

الکتریسیته ذخیره شده در باتری در $t > 1$:

$$Nom_B \times SOC_B(t) = Nom_B \times SOC_B(t-1) + \left(\frac{P_B^{Ch}(t) \times dt}{e_c} - (e_d \times P_B^{Disch}(t) \times dt) \right) \quad (35)$$

حالت اولیه باتری:

$$Nom_B \times SOC_B(1) = Nom_B^{int} + \left(\frac{P_B^{Ch}(1) \times dt}{e_c} - (e_d \times P_B^{Disch}(1) \times dt) \right) \quad (36)$$

حد حالت شارژ باتری:

$$SOC_B^{Min} \leq SOC_B(t) \leq 1 \quad (37)$$

قید حداکثر شارژ باتری:

$$\frac{P_B^{Ch}(t) \times dt}{e_c} + (Nom_B \times SOC_B(t-1)) \leq Nom_B \quad (38)$$

$$\min f(Cost) = \sum_{t=1}^T \left\{ \left[\begin{aligned} & [(P_{Grid}(t) \times dt) \times C_{Grid}(t)] + \\ & [(P_{PV}(t) \times dt) \times C_{PV}(t)] + \\ & [(P_W(t) \times dt) \times C_W(t)] + \\ & \left[\left(\sum_j^{N_{EV}} P_{EV}^{Disch}(t, j) \times dt \right) \times C_{EV}^{Disch}(t) \right] + \\ & \left[\left(P_B^{Disch}(t) \times dt \right) \times C_B^{Disch}(t) \right] - \\ & [(P_{inject}(t) \times dt) \times C_{Sell}(t)] \end{aligned} \right] \right\} \quad (25)$$

در (25)، $P_{Grid}(t)$ ، $P_{PV}(t)$ ، $P_W(t)$ مقدار وارد شده از شبکه در دوره t ، و مقدار تولید شده از PV و سیستم بادی است. $P_B^{Disch}(t)$ ، $P_{EV}^{Disch}(t, j)$ توان‌های دشارژ از EV j و باتری در t هستند. $P_{inject}(t)$ مقدار توان فروخته شده به شبکه در t است، $C_{Grid}(t)$ قیمت توان تولید شده توسط شبکه در دوره t را نشان می‌دهد. $C_{PV}(t)$ و $C_W(t)$ هزینه‌های تولید و تعمیر و نگهداری PV و سیستم بادی در t هستند. $C_{EV}^{Disch}(t)$ و $C_B^{Disch}(t)$ هزینه‌های تعمیر و نگهداری EV و ذخیره‌سازی باتری در t بوده و $C_{Sell}(t)$ به هزینه الکتریسیته فروخته شده به شبکه اشاره دارد. قیود (محدودیت‌های) مسئله یکی شامل تعادل توان است که شبکه قدرت باید تعادل بین سیستم‌های تولیدی و مصرفی را برقرار نماید:

$$P_{Grid}(t) + P_{PV}(t) + P_W(t) + \sum_j^{N_{EV}} P_{EV}^{Disch}(t, j) + P_B^{Disch}(t) = D(t) + \sum_j^{N_{EV}} P_{EV}^{Ch}(t, j) + P_B^{Ch}(t) + P_{inject}(t) \quad (26)$$

که $D(t)$ به تقاضای بار در زمان t اشاره دارد، $P_{EV}^{Ch}(t, j)$ و $P_B^{Ch}(t)$ توان شارژ توسط EV، Z ام و ذخیره‌سازی باتری در t بوده و N_{EV} تعداد کل EV ها می‌باشد. این معادله زمانی که $t \in T_{stay}$ باشد (T_{stay} برابر دوره‌ای است که EV در خانه بماند) تضمین می‌گردد؛ در غیر اینصورت، توان EV باید از معادله حذف شود زیرا در این مطالعه فرض شده است که هیچ فرآیند شارژی در زمانی که EV دور از خانه است، وجود نداشته باشد. محدودیت مقدار توان وارد شده از شبکه با رابطه زیر نشان داده شده است:

$$0 \leq P_{Grid}(t) \leq P_{Grid}^{Max}(t) \quad (27)$$

که $P_{Grid}^{Max}(t)$ حداکثر توان وارد شده از شبکه در زمان t است.

در سیستم فتوولتائیک قید مقدار تولید PV را داریم:

$$0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV}^{Max}(t) \quad (28)$$

محدودیت توان خروجی تولید شده از سیستم PV نیز با رابطه (۲۹) مشخص شده است [13]:

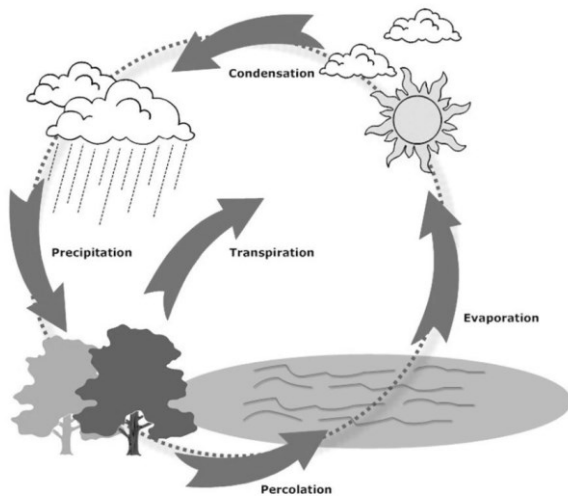
$$P_{PV}(t) \leq A \times \rho \times SI(t) \quad (29)$$

که $P_{PV}^{Max}(t)$ حداکثر توان مجاز PV در زمان t ، A مساحت سیستم PV، ρ بازده و $SI(t)$ میزان تابش نور خورشید در بازه زمانی t است. در سیستم بادی نیز محدودیت مقدار تولید توان بادی طبق رابطه زیر وجود دارد:

(WCA) استفاده شده است که در بخش بعدی (سوم) مقاله این روش تشریح می‌گردد.

3- الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب (WCA)

ایده اصلی WCA از ماهیت و مشاهدات چرخه آب و چگونگی جاری شدن رودها و رودخانه‌های سرازیر شده به سمت دریا در جهان حقیقی می‌باشد. هر زمان که آب از یک مکان به مکان دیگر سرازیر می‌شود، یک رود یا رودخانه شکل می‌گیرد. شکل 3 دیاگرام ساده برای چرخه هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. آب در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها تبخیر می‌شود در حالی‌که گیاهان در حین پدیده فتوسنتز، آب را به بیرون می‌دهند.



شکل 3 دیاگرام ساده چرخه هیدرولوژیکی (چرخه آب)

مشابه سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری، این روش نیز با یک جمعیت اولیه به نام قطرات باران شروع می‌کند. با فرض بارش باران، بهترین قطره باران بعنوان یک دریا انتخاب می‌شود. سپس تعداد مناسبی از قطرات باران بعنوان یک رودخانه انتخاب می‌شوند و مابقی قطرات باران بعنوان رود در نظر گرفته می‌شوند که به رودخانه‌ها و دریا جاری می‌شوند. بدین صورت می‌توان از رفتار چرخه آب بعنوان یک حل کننده مساله بهینه‌سازی بهره برد. الگوریتم WCA مطابق شکل 3 دارای مراحل زیر است:

- مرحله 1: انتخاب پارامترهای اولیه WCA: N_{pop} ، d_{max} ، N_{sr} ، $Maxiteration$
- مرحله 2: تولید جمعیت اولیه تصادفی و تشکیل رودهای اولیه (قطرات باران)، رودخانه‌ها و دریا
- مرحله 3: محاسبه مقدار (هزینه) هر قطره باران
- مرحله 4: تعیین شدت جریان برای رودخانه‌ها و دریا
- مرحله 5: محاسبه جریان رودها به سمت رودخانه
- مرحله 6: محاسبه جریان رودخانه‌ها به سمت دریا که پست ترین مکان می‌باشد
- مرحله 7: تعویض موقعیت‌های رودخانه با یک رود که بهترین جواب را ارائه می‌دهد

که P_B^{Cmax} و P_B^{Dmax} حداکثر توان مجاز شارژ و دشارژ باتری، $Y(t)$ وضعیت شارژ باتری در t (در حالت شارژ=1، در غیر اینصورت=0)، $Z(t)$ وضعیت دشارژ باتری (در حالت دشارژ=1، در غیر اینصورت=0)، Nom_B ظرفیت نامی باتری، $SOC_B(t)$ حالت شارژ باتری است. e_c و e_d ضرایب شارژ و دشارژ، Nom_B^{int} ظرفیت اولیه باتری و SOC_B^{Min} حداقل حالت شارژ ذخیره‌سازی باتری هستند.

برای خودرویی الکتریکی نیز محدودیت‌ها عبارتند از:

حد شارژ مجاز:

$$\begin{cases} P_{EV}^{Ch}(t, j) \leq P_{EV}^{Cmax}(j) \times W(t, j) & \forall t \in T_{stay} \\ P_{EV}^{Ch}(t, j) = 0 & \forall t \notin T_{stay} \end{cases} \quad (39)$$

حد دشارژ مجاز و تقاضا در حالت رانندگی EV:

$$\begin{cases} P_{EV}^{Disch}(t, j) \leq P_{EV}^{Dmax}(j) \times X(t, j) & \forall t \in [1, \dots, T] \\ P_{EV}^{Disch}(t, j) \times dt = D_{EVdriv}(t, j) & \forall t \notin T_{stay} \end{cases} \quad (41)$$

ممنوعیت شارژ و دشارژ همزمان:

$$W(t, j) + X(t, j) \leq 1 \quad (42)$$

میزان الکتریسیته ذخیره شده در باتری EV در $t > 1$:

$$Nom_{EV}(j) \times SOC_{EV}(t, j) = Nom_{EV}(j) \times \left(SOC_{EV}(t-1, j) + \left(\frac{P_{EV}^{Ch}(t, j) \times dt}{e_c} - (e_d \times P_{EV}^{Disch}(t, j) \times dt) \right) \right) \quad (43)$$

حالت اولیه باتری EV:

$$Nom_{EV}(j) \times SOC_{EV}(1, j) = Nom_{EV}^{int}(j) + \left(\frac{P_{EV}^{Ch}(1, j) \times dt}{e_c} - (e_d \times P_{EV}^{Disch}(1, j) \times dt) \right) \quad (44)$$

حد حالت شارژ باتری EV:

$$SOC_{EV}^{Min}(j) \leq SOC_{EV}(t, j) \leq 1 \quad (45)$$

حد بیشینه شارژ باتری EV:

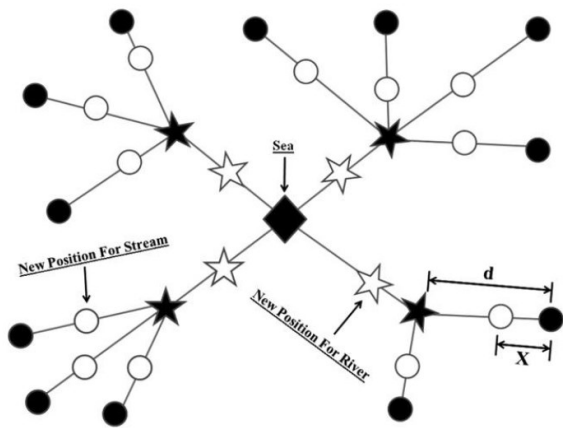
$$\frac{P_{EV}^{Ch}(t, j) \times dt}{e_c} + (Nom_{EV}(j) \times SOC_{EV}(t-1, j)) \leq Nom_{EV}(j) \quad (46)$$

که $P_{EV}^{Cmax}(j)$ و $P_{EV}^{Dmax}(j)$ حداکثر توان مجاز شارژ و دشارژ باتری EV j ام، $W(t, j)$ حالت باتری EV j ام در t (در حالت شارژ=1، در غیر اینصورت=0)، $X(t, j)$ حالت باتری EV j (در حالت دشارژ=1، در غیر اینصورت=0)، $Nom_{EV}(j)$ ظرفیت نامی باتری EV j ، $SOC_{EV}(t, j)$ حالت شارژ باتری EV j است. e_c و e_d ضرایب شارژ و دشارژ هستند. $Nom_{EV}^{int}(j)$ ظرفیت اولیه باتری EV j ، $SOC_{EV}^{Min}(j)$ حداقل حالت شارژ ذخیره‌سازی باتری EV j هستند. $D_{EVdriv}(t, j)$ نیز تقاضای الکتریسیته در حال رانندگی EV j در t است.

در بخش چهارم مقاله، روش پیشنهادی شبیه‌سازی گردیده و در آن از یک الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری جدید به نام الگوریتم چرخه آب¹

- در روش WCA رودخانه(تعداد از بهترین نقاط انتخاب شده بجز دریا) علاوه بر کمینه سازی یا جلوگیری از جستجو در نواحی نامناسب در جوابهای نزدیک به بهینه، بعنوان نقاط راهنما برای راهنمایی سایر اعضا در جمعیت به سمت موقعیت بهتر عمل می‌کنند. پس رودخانه ها نقاطی ثابت نیستند و به سمت دریا(بهترین جواب) حرکت می‌کنند. این روند(حرکت رودها به سمت رودخانه‌ها و سپس حرکت رودخانه‌ها به سمت دریا) منجر به حرکت غیرمستقیم به سمت بهترین جواب می‌شود.

- الگوریتم WCA از شرایط تبخیر و بارش استفاده می‌کند که عملکرد جهش در GA را تشبیه می‌کند. شرایط تبخیر و بارش می‌تواند مانع رسیدن به جوابهای محلی شود.



شکل 5 نمای شماتیکی WCA

4- شبیه‌سازی و نتایج عددی

در این مطالعه سه عاملی که بر روی مقدار تابع هدف و زمان اجرای شبیه‌سازی تأثیرگذار است، در نظر گرفته شده است، این عوامل شامل منحنی مصرف انرژی مسکونی (F_1)، تعداد EV ها (F_2) و میزان تابش نور خورشید (F_3) است که می‌تواند سناریوهای مختلف ایجاد کند، سطح مصرف انرژی مسکونی، تعداد خودروهای الکتریکی و سطح تابش نور خورشید به ترتیب زیاد، متوسط و زیاد فرض شده و با فرمول‌بندی چندهدفه و با هدف کمینه‌سازی فرسودگی باتری خودروهای الکتریکی و نیز کمینه‌سازی هزینه مصرف‌کننده برای بازه زمانی یک هفته در نظر گرفته می‌شود.

نمودارهای مصرف انرژی مسکونی و تابش نور خورشید و سرعت باد توربین بادی برترتیب در شکل‌های 6 تا 8 نشان داده شده است. سیستم مسکونی مورد مطالعه می‌تواند با مصرف انرژی خود (تامین بار و یا شارژ ذخیره‌ساز باتری و یا شارژ باتری EV) از شبکه قدرت اصلی و یا سیستم PV یا سیستم بادی و یا ذخیره‌سازی باتری (حالت دشارژ) و یا باتری EV (حالت دشارژ اگر موجود باشد) مواجه شود. اگر توان مازادی از همه این سیستم‌ها وجود داشته باشد، انرژی اضافی می‌تواند به شبکه فروخته شود. در این مطالعه امکان بهره برداری یا خرید یا ذخیره و یا فروش توان الکتریکی فراهم است. در منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم PV 3.5 کیلوواتی دارای مساحت کل 25 متر مربع و بازده 18.6٪ است. منحنی‌های مختلف، میزان تابش میانگین ساعتی نور خورشید را نشان می‌دهند که تابش نور کم 1.74 کیلووات بر متر مربع، تابش متوسط 4.84 کیلووات بر متر مربع، و تابش زیاد

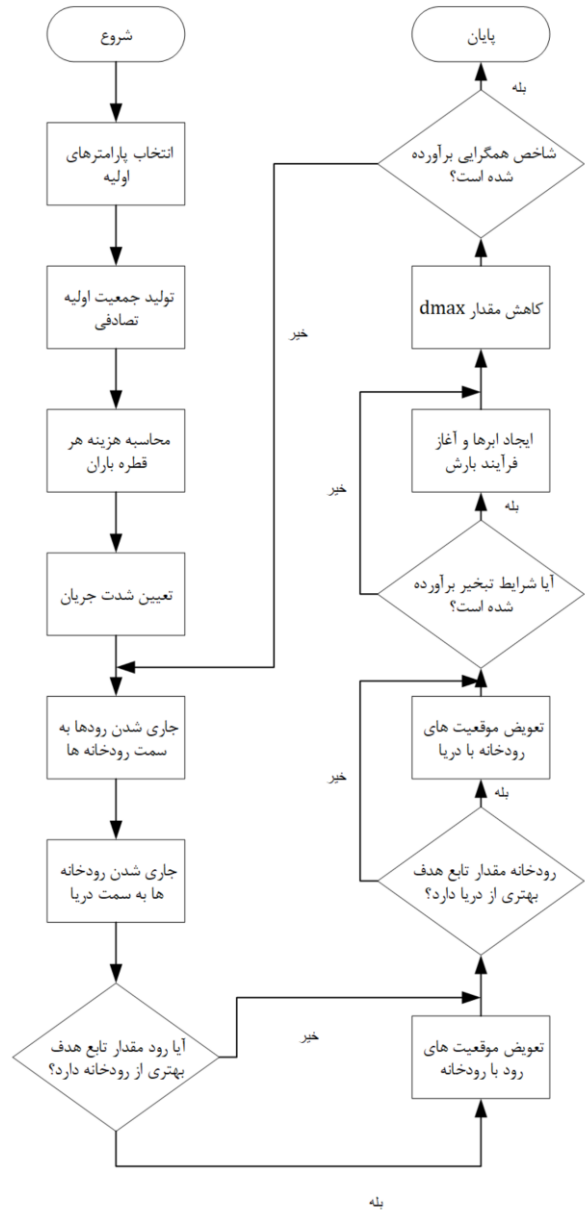
مرحله 8: مشابه مرحله 7، اگر یک رودخانه جواب بهتری از دریا پیدا کند، موقعیت رودخانه با دریا عوض می‌شود.

مرحله 9: بررسی شرایط تبخیر

مرحله 10: اگر شرایط تبخیر برآورده شود، فرآیند بارش رخ خواهد داد.

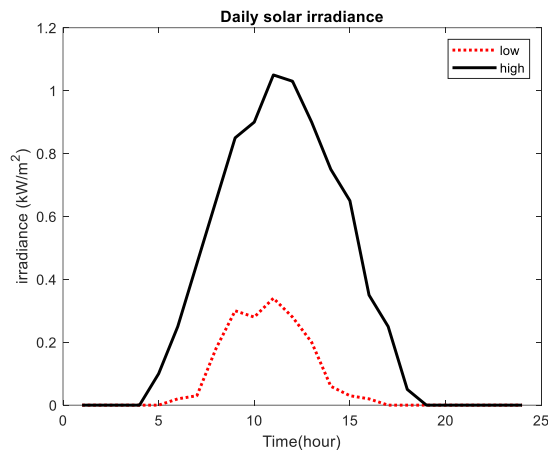
مرحله 11: کاهش مقدار d_{max} که توسط کاربر تعیین می‌شود.

مرحله 12: بررسی شاخص همگرایی: اگر شاخص توقف برآورده شود، الگوریتم متوقف می‌گردد در غیر اینصورت به مرحله 5 باز می‌گردد.

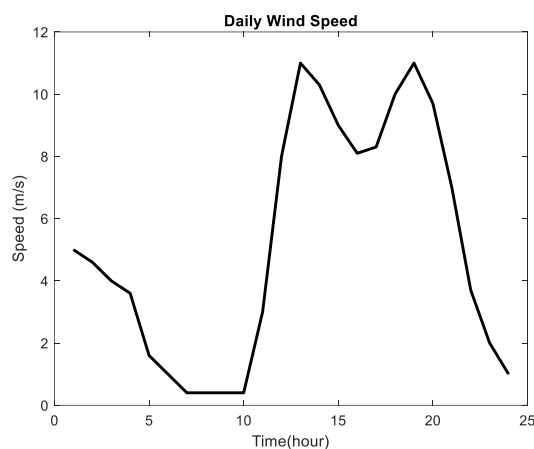


شکل 4 روندنمای WCA

نمای شماتیکی روش WCA در شکل 4 نشان داده شده است که دایره‌ها، ستاره‌ها و الماس بتربیب مربوط به رودها، رودخانه و دریا هستند. از شکل 5 شکلهای سفید(خالی) به موقعیتهای جدید به موقعیتهای جدید یافت شده توسط رودها و رودخانه‌ها اشاره دارد. بطور خلاصه می‌توان مزایای الگوریتم WCA نسبت به سایر روشهای بهینه‌سازی بصورت زیر خلاصه نمود:



شکل 7 منحنی تابش روزانه نور خورشید در سیستم فتوولتائیک

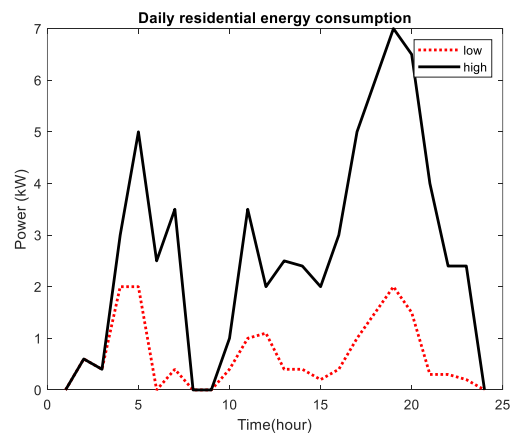


شکل 8 منحنی سرعت باد روزانه توربین بادی

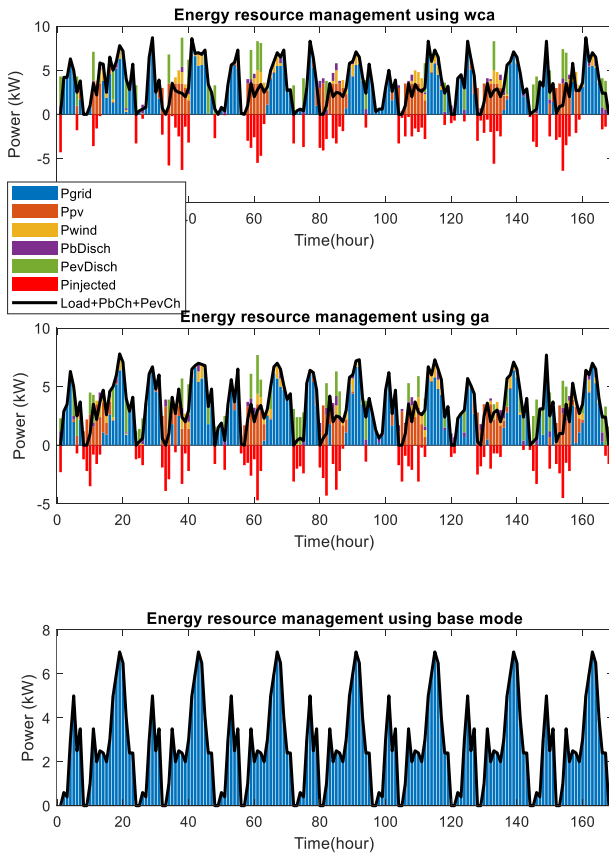
شکل 9 همگرایی جبهه‌های پارتو بدست آمده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II و MOWCA برای سناریوی مورد نظر را نشان می‌دهد. مجموعه جواب‌های جبهه پارتوی اول در تکرار آخر همه جواب‌های اعضای جمعیت (تمامی جبهه‌های پارتو) را مغلوب می‌کند. از این شکل می‌توان دریافت که برای حالت مینا هزینه برق مصرف‌کننده مثبت است. در حالی که مجموعه جواب‌های نامغلوب بدست آمده توسط الگوریتم MOWCA و NSGA-II باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش سود می‌شوند، مجموعه جواب‌های نامغلوب بدست آمده توسط الگوریتم MOWCA مجموعه جواب‌های بدست آمده توسط الگوریتم NSGA-II را مغلوب می‌کند، در نتیجه جواب‌های بدست آمده توسط MOWCA با شاخص فرسودگی باتری یکسان دارای سود بیشتری نسبت به مجموعه جواب‌های بدست آمده توسط روش NSGA-II هستند.

8.23 کیلووات بر متر مربع در نظر گرفته شده است. توربین بادی کوچک 2.4 کیلوواتی در نظر گرفته شده در سیستم، دارای توان نامی 2.1 کیلووات با سرعت نامی 14 متر بر ثانیه، سرعت قطع پایین 4 متر بر ثانیه، و سرعت قطع بالای 25 متر بر ثانیه است. سرعت باد پیش‌بینی شده دارای یک سرعت روزانه متوسط 5.1 متر بر ثانیه است. ظرفیت باتری 24 کیلووات‌ساعت برای EV با حالت اولیه 16 کیلووات‌ساعت و یک SOC حداقل 0.2 انتخاب شده است. نرخ شارژ و دشارژ باتری 3.3 کیلووات و تقاضای EV برای رانندگی 2 کیلو وات برای دوره‌های زیر است: ساعت 8، 9، 12، 15، 18، 20. برای باتری داخل خانه، یک ظرفیت باتری 10 کیلووات‌ساعت با حالت اولیه 6 کیلووات‌ساعت و SOC حداقل 0.2 انتخاب شده است. نرخ شارژ و دشارژ باتری 1 کیلووات است و بازده شارژ و دشارژ باتری 95٪ فرض شده است [14].

حداکثر توان تولیدی شبکه در دوره t ، 5 کیلو وات انتخاب شده است. $C_W(t)$ ، $C_{PV}(t)$ ، $C_B^{Disch}(t)$ و $C_{EV}^{Disch}(t)$ ، 0.01 یورو بر کیلووات‌ساعت بعنوان هزینه تعمیر و نگهداری فرض شده‌اند [14]. قیمت برق فروخته شده 0.29 یورو بر کیلووات‌ساعت است. هزینه توان تولید شده توسط شبکه مطابق [14] در نظر گرفته شده است. نتایج زیر برای مطالعات موردی مختلف بر روی رایانه‌ای با سیستم عامل 64 بیتی با نسخه نهایی ویندوز 10، پردازنده Intel Core i7-7560U 2.40 GHz و 16-GB RAM آزمایش شده است. البته جهت نشان دادن تاثیر نحوه فرمول‌بندی مسأله مدیریت انرژی، تعداد روزهای در نظر گرفته شده، تعداد خودروهای الکتریکی، تغییر سطح تابش نور خورشید و مصرف انرژی مسکونی بر روی مدیریت خانه هوشمند، طبعاً سناریوهای مختلفی قابل تعریف است.



شکل 6 منحنی مصرف انرژی مسکونی (تقاضای بار) روزانه

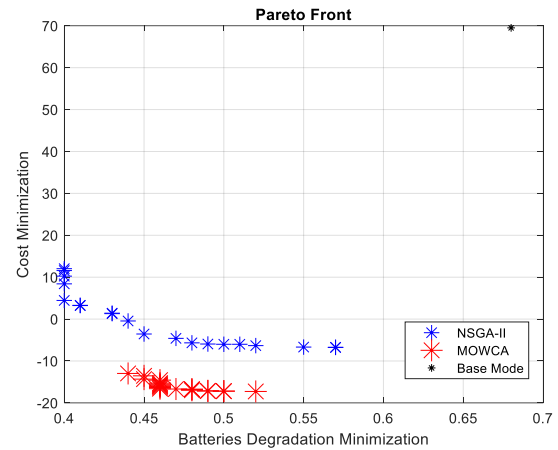


شکل 10 مدیریت منابع انرژی ریزشبه هوشمند با بهینه‌سازی چند هدفه در بازه زمانی هفتگی

5- نتیجه‌گیری

با پیچیده‌تر شدن مدیریت انرژی در بخش خانگی، برنامه‌ریزی زمان‌بندی بهینه کارکرد لوازم خانگی ضرورت می‌یابد به گونه‌ای که با تعیین یک مسأله بهینه‌سازی و انتخاب یک روش حل بهینه‌سازی مناسب می‌توان منافع زیادی را برای مصرف‌کنندگان مسکونی حاصل نمود و با کاهش مصرف انرژی به تأمین‌کنندگان انرژی الکتریکی نیز کمک شایانی نمود. این امر سبب شده است که مدل‌ها و الگوریتم‌های متعددی در زمینه مدیریت انرژی خانگی با در نظر گرفتن ملاحظات مختلف، پیشنهاد و توسعه داده شود. در دوره درازمدت خودروهای الکتریکی برای کشورهایی که به دنبال کاهش کربن در بخش حمل و نقل هستند، بسیار اهمیت دارد. یکی از راه‌های کاهش هزینه‌های شارژ خودروهای الکتریکی قابل اتصال (PEV)، کاهش اثرات منفی روی شبکه و کمک به حصول اهداف کاربرد منابع تجدیدپذیر، ترکیب کردن شارژهای PEV با تولید پراکنده تجدیدپذیر و یا سیستم ذخیره‌سازی انرژی است.

جدول 1 مجموعه جواب‌های بدست آمده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مورد استفاده



شکل 9 جبهه اول پارتو بدست آمده در آخرین تکرار از الگوریتم‌های NSGA-II و MOWCA

جدول (1) مجموعه جواب‌های بدست آمده توسط این دو الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه را ارائه می‌کند. همه جواب‌های بدست آمده توسط MOWCA باعث افزایش سود مصرف‌کننده از طریق فروش برق به شبکه می‌شود. در صورتی که شاخص تصمیم‌گیری هزینه برق مصرف‌کننده باشد، طبقاً جواب شماره 3 برای روش NSGA-II و جواب شماره 2 برای روش MOWCA می‌تواند بهترین انتخاب باشد. شکل 10 نمودار توان‌های تولیدی و مصرفی خانه هوشمند برای جواب شماره 3، NSGA-II و جواب شماره 2، MOWCA سناریوی مورد نظر با فرمول‌بندی چندهدفه را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان مشاهده نمود که منابع تولید انرژی می‌توانند بار مصرفی را تأمین نموده و مازاد توان به شبکه فروخته شود. در نتیجه با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم مسأله بهینه‌سازی، هر دو الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جواب‌های امکان‌پذیری را درون فضای جستجو حاصل نموده و عملکرد هر دو الگوریتم با پیچیده‌تر شدن مسأله قابل تأیید است.

خودروهای الکتریکی از نظر اقتصادی دارای مزایایی همچون کاهش هزینه‌های بهره‌برداری بوده، همچنین در زمانی که شبکه قدرت درخواست بار اضافی یا تغذیه توان اضافی در حالت نامتعادلی تولید-بار یا در مواقع اضطراری سیستمی داشته باشد، خودروهای الکتریکی می‌توانند بطور موقت نرخ شارژ را کاهش یا افزایش دهند. در این پژوهش، نحوه مدل‌سازی جهت بهینه‌سازی سامانه‌های تولید و مصرف انرژی با ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر، ارائه شد. همچنین روش‌های حل مسأله بهینه‌سازی برای حل مسأله مدیریت انرژی مسکونی و کمینه‌سازی هزینه برق مصرف‌کننده مورد ارزیابی قرار گرفت. یک فرمول‌بندی چندهدفه برای مدیریت منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز باتری با حضور خودروهای الکتریکی با هدف کمینه‌سازی شاخص فرسودگی باتری‌ها و کمینه‌سازی هزینه برق مصرف‌کننده خانه هوشمند ارائه گردید. روش بهینه‌سازی چندهدفه چرخه آب (MOWCA) جهت حل مسأله بهینه‌سازی پیشنهاد شد که در تمامی حالت‌ها عملکرد بهتری نسبت به روش بهینه‌سازی NSGA-II داشت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش سطح تقاضا در صورتی که تابش نور خورشید در سطح کم باشد، موجب افزایش انرژی گرفته شده از شبکه و در پی آن افزایش هزینه برق مصرف‌کننده می‌شود. اما با افزایش تابش نور خورشید و توان فتوولتائیک، سود مصرف‌کننده بعلاوه فروش توان مازاد به شبکه برق افزایش می‌یابد. همچنین اضافه شدن خودروهای الکتریکی به دلیل امکان ذخیره انرژی در ساعات حضور خودروهای الکتریکی در پارکینگ، موجب افزایش سود مصرف‌کننده می‌شود. مدل چندهدفه پیشنهادی امکان یافتن چندین جواب را به طراح می‌دهد، در نتیجه با تعیین یک شاخص تصمیم‌گیری می‌توان از میان گزینه‌های متعدد بهترین پاسخ را پیدا کرد.

6- مراجع

- [1] E. Shirazi and S. Jadid, Optimal residential appliance scheduling under dynamic pricing scheme via HEMDAS, *Energy and Buildings*, vol. 93, pp. 40-49, 2015.
- [2] M. Saadatmandi, S. Hakimi, and A. Hajizadeh, Management of Plug-in Hybrid Electrical Vehicle to Increase Renewable Energy Penetration in Smart Grid, 2018.
- [3] X. Han, H. He, J. Wu, J. Peng, and Y. Li, Energy management based on reinforcement learning with double deep Q-learning for a hybrid electric tracked vehicle, *Applied Energy*, vol. 254, p. 113708, 2019.
- [4] M. Shokri and H. Kebriaci, Mean Field Optimal Energy Management of Plug-In Hybrid Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 1, pp. 113-120, 2019.
- [5] X. Lu and H. Wang, Optimal Sizing and Energy Management for Cost-Effective PEV Hybrid Energy Storage Systems, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 1-1, 2019.
- [6] Y. Bai, H. He, J. Li, S. Li, Y.-x. Wang, and Q. Yang, Battery anti-aging control for a plug-in hybrid electric vehicle with a hierarchical optimization energy management strategy, *Journal of Cleaner Production*, vol. 237, p. 117841, 2019.
- [7] J. Guo, H. He, and J. Peng, Real-time Energy Management for Plug-in Hybrid Electric Vehicle based on Economy Driving Pro System, *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 2689-2694, 2019.
- [8] M. H. Hajimir and F. R. Salmasi, A Fuzzy Energy Management Strategy for Series Hybrid Electric Vehicle with Predictive Control and Durability Extension of the Battery, in *2006 IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles*, 2006.
- [9] T. Sousa, H. Morais, J. Soares, and Z. Vale, Day-ahead resource scheduling in smart grids considering Vehicle-to-Grid and network constraints, *Applied Energy*, vol. 96, pp. 183-193, 2012.

الگوریتم	MOWCA	NSGA-II	شماره جواب
بهینه‌سازی چندهدفه	شاخص فرسودگی باتری‌ها	هزینه برق (€)	شاخص فرسودگی باتری‌ها
هزینه برق (€)	شاخص فرسودگی باتری‌ها	هزینه برق (€)	شاخص فرسودگی باتری‌ها
1	0.44	11.58	0.4
2	0.52	12.03	0.4
3	0.45	-6.75	0.57
4	0.45	-6.75	0.57
5	0.46	-3.56	0.45
6	0.47	-0.45	0.44
7	0.5	-6.68	0.55
8	0.46	8.41	0.4
9	0.46	-4.6	0.47
10	0.48	4.45	0.4
11	0.48	-6.33	0.52
12	0.49	10.25	0.4
13	0.49	1.41	0.43
14	0.5	3.23	0.41
15	0.46	-5.67	0.48
16	0.46	1.3	0.43
17	0.46	-5.95	0.49
18	0.46	-6.01	0.5
19	0.46	3.28	0.41
20	0.48	-6.01	0.51

- [10] J. Soares, T. Sousa, H. Morais, Z. Vale, B. Canizes, and A. Silva, *Application-Specific Modified Particle Swarm Optimization for energy resource scheduling considering vehicle-to-grid*, *Applied Soft Computing*, vol. 13, no. 11, pp. 4264-4280, 2013.
- [11] A. Zakariazadeh, S. Jadid, and P. Siano, Multi-objective scheduling of electric vehicles in smart distribution system, *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 43-53, 2014.
- [12] M. H. Amini, J. Frye, M. D. Ilić, and O. Karabasoglu, Smart residential energy scheduling utilizing two stage Mixed Integer Linear Programming, *North American Power Symposium (NAPS)*, 2015.
- [13] M. H. Amini and A. Sarwat, Optimal Reliability-based Placement of Plug-In Electric Vehicles in Smart Distribution Network, *International Journal of Energy Science*, vol. 4, p. 43, 2014.
- [14] F. Y. Melhem, O. Grunder, Z. Hammoudan, and N. Moubayed, Optimization and Energy Management in Smart Home Considering Photovoltaic, Wind, and Battery Storage System With Integration of Electric Vehicles, *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 40, no. 2, pp. 128-138, 2017.
- [15] X. Wu, X. Hu, X. Yin, and S. J. Moura, Stochastic Optimal Energy Management of Smart Home With PEV Energy Storage, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2065-2075, 2018.
- [16] M. Govardhan and R. Roy, Generation scheduling in smart grid environment using global best artificial bee colony algorithm, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 260-274, 2015.