

# 计及EV与可再生能源的家庭微电网 能源管理系统

韩峰, 曾成碧, 苗虹

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**家庭微电网中包含光伏和电动汽车等不确定性电源和负载,没有合理的能源管理策略容易导致家庭微电网失稳。在V2G系统中构造了一个同时考虑电动汽车、住宅、电池和可再生能源发电系统的模型。在电动汽车充放电的约束条件下,制定了住宅与微型燃气轮机的发电计划,提出了一种动态能源管理方法。最后通过仿真对所提家庭微电网能源管理策略进行验证,通过对比电动汽车随机充电和有序充放电情况下微电网的等效负荷以及储能运行情况,验证了约束电池的充电状态前提下的能源管理方案的合理性。

**关键词:**V2G;能源管理;住宅;微电网;削峰填谷

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.009 中图分类号:TM73 文章编号:1673-9140(2021)01-0079-08

## Study on the energy management system of an electric vehicle and renewable energy in home micro-grid

HAN Feng, ZENG Chengbi, MIAO Hong

(College of Electrical Engineering Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The home microgrid contains uncertain power sources and loads such as photovoltaics and electric vehicles. The lack of a reasonable energy management strategy can easily lead to instability of the household microgrid. In the V2G system, a model that simultaneously considers electric vehicles, houses, batteries, and renewable energy power generation systems is constructed. Under the restriction of electric vehicle charging and discharging strategy, a power production planning for the residence and for the micro-turbine is determined. Then a dynamic energy management is proposed. Finally, the proposed home microgrid energy management method is verified by simulation. By comparing the equivalent load and energy storage operation of the microgrid under the conditions of random charging, orderly charging and discharging of electric vehicles, the feasibility of proposed method is verified when the charging state of the battery is restricted.

**Key words:** V2G; energy management; residence; micro-grid; peak shaving and valley filling

为了应对当今世界的能源问题与环境污染问题,可再生能源与电动汽车(electric vehicles, EV)<sup>[1-2]</sup>行业的发展受到各国的高度重视。光伏发

电因其低污染、低噪音等优点成为重要的可再生能源之一。由于光伏发电存在间歇性和波动性、电动汽车充电存在随机性,这都将对电网的正常运行带

来负面影响<sup>[3-4]</sup>。集合 EV 与光伏电源的家庭微电网是解决问题的措施之一。在家庭微电网中将 EV 与可再生能源能进行综合管理,利用 EV 作为移动储能装置来解决间歇性问题<sup>[5-6]</sup>,可提高可再生能源的利用率,减少排放。

目前,国内外已有关于微电网能量管理的研究进展。文献[7]提出了一种智能负载的数学模型,采用最优功率流能量管理系统对孤立的微电网进行最佳发电和负荷调度;文献[8]在微电网模式下,提出将风光互补系统与 EV 相结合,并求出了最优容量配置,提高了经济性;文献[9]中提出利用云硬盘(elastic volume service, EVS)储存和供给电能,在微电网中进行能量的协调调度以此来维持电力平衡;文献[10-11]在考虑经济性和用户满意度的前提下,引导用户制定相关策略以及负荷计划,以此为前提,提出一种微电网能量管理的优化算法;文献[12-13]针对含风光混合储能风光交流微电网,提出一种微电网能量管理策略,但该策略未将 EV 考虑在内,无法实现家庭微电网用能管理;文献[14-15]中分别提出不同算法以及设计方案,对家庭中电器和可再生能源形成的微电网进行能量管理,达到优化电力费用的效果;文献[16]总结了微电网能量管理的核心算法、组成模块、管理对象和功能结构,并对当前的研究存在的难点指明方向,同时进行了国内外研究现状的对比和案例分析。当前的研究成果已从技术和经济方面验证了微电网能量管理可行性。

随着越来越多的 EV 和光伏发电设备走进家庭,由于光伏发电的波动性和电动汽车充电的随机性,这必然加重了电网的峰值负担和光伏资源的浪费,因此在考虑 EV 与光伏发电共存的家庭微电网中,如何进行能源管理进而达到削峰填谷和提高可再生能源的利用率,是亟待解决的问题。

该文首先构造了一个同时考虑具有 V2G 功能的 EV、住宅、电池和光伏发电系统的微电网模型;其次根据 EV 的充放电过程提出 EV 的充放电策略、制定动态能源管理方案;最后采用粒子群算法对所建立的模型进行寻优。并通过仿真验证了该文能源管理方案可行性,改善了用户负荷曲线,减少峰谷

差,同时提高了可再生能源的利用率。

## 1 系统的配置与功能

### 1.1 实物模型结构

该文中家庭微电网的微源包括微型燃气轮机、光伏发电系统(光伏阵列与家庭式储能电池相连)以及一台 EV 的车载电池。该模型中,能源管理中心既能与不同装置构成的负荷进行沟通,又能通过智能电表与各个微源进行沟通。能源管理中心可以通过智能电表和传感器了解各个装置的耗电量情况,从而进行统一协调管理,实现能源的最优利用。

假设该文中应配备的家庭式储能设备为  $10 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。白天储存多余的光伏电能,晚上供应家用,可增加家庭中清洁能源的消费比重,同时弥补太阳能发电高峰和电力需求之间的时间差。若电网发生故障,能够继续为家庭中重要负荷供电。

### 1.2 仿真模型结构

仿真模型的接线如图 1 所示。其中光伏发电系统与 DC-DC 转换器相连,进而利用最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)技术进行控制,提高发电储能效率。家庭式储能电池与 DC-DC 转换器相连,使用 DC-BUS 系统<sup>[17]</sup>进行控制, EV 也通过 DC-DC 转换器与 DC-BUS 系统相连。因住宅用的光伏发电系统的部分负载为交流电,逆变器需将直流电转变成  $220 \text{ V}$ 、 $50 \text{ Hz}$  交流电。图 1 采用的接线方案减少了功率转换阶段,提高了能源管理的效率。

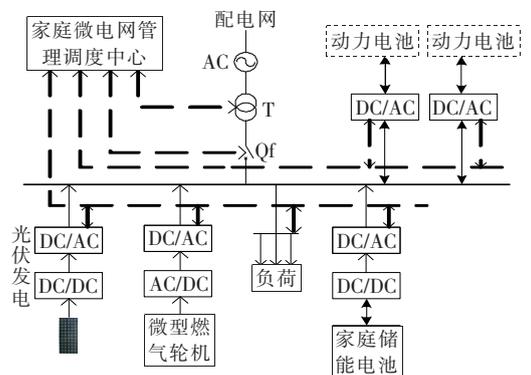


图 1 模型仿真结构

Figure 1 The configuration of the simulation model

## 2 家庭微电网能源管理优化模型

### 2.1 各组块发电计划建模

该文考虑的微电网中,主要包含 3 种微源:光伏发电、V2G 系统和微型燃气轮机。由于可再生能源具有排放少与运行成本低特性<sup>[18]</sup>,光伏发电应作为电力的主要来源,微型燃气轮机与 EV 的电池则作为备用能源。

根据该文微电网中 EV 电池与家庭日负荷预测情况如图 4 所示,制定了光伏发电系统与微型燃气轮机发电计划。由于夜间光伏发电系统无法生产电能,车主白天开车上班,故规定 EV 在晚上进行充电。

白天时, EV 处于断开状态,分为 2 种情况:

1) 若光伏发电系统与微型燃气轮机产生的能量无法满足家庭负载的需求。其中光伏板使用 MPPT 技术进行控制,使转化率达到最高,且所有产生的电能都已接入到电网。此时需要微型燃气轮机来产生更多的电能。则

$$\begin{cases} P_{hg} = P_{PV} \\ P_{Grid} = P_{Home} - P_{hg} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $P_{hg}$  为混合发电系统的电量;  $P_{PV}$  为光伏发电系统的电量;  $P_{Grid}$  为微型燃气轮机产生的电能;  $P_{home}$  为家庭负载所需电能。

2) 若光伏发电系统与微型燃气轮机产生的能量超过家庭负载的需求。此时应使可光伏发电系统优先负责电力生产,微型燃气轮机以最小功率工作。则

$$\begin{cases} P_{hg} = P_{Home} - P_{Grid_{min}} \\ P_{Grid} = P_{Grid_{min}} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $E_{Grid_{min}}$  为微型燃气轮机发出的最小电能。

夜间时,智能房屋微电网中的能量分别来源于家庭储能电池与 EV 电池。家庭储能电池需要进行放电以便于转天进行充电, EV 电池则需要充满电以便于转天的行程。以下夜间运行的 3 种情况均与 EV 有关:

当处于用电高峰期时,如果家庭储能电池与 EV 的电池中的可用电能与微型燃气轮机产生的电能大于家庭负载的所需,则微型燃气轮机应以最小功率工作且 EV 处于 V2H(vehicle to home)运行状态。则

$$\begin{cases} P_{hg} = P_{Home} - P_{Grid} - P_{BatV2G} \\ P_{Grid} = P_{Grid_{min}} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $P_{BatV2G}$  为家庭储能电池向 V2G 系统输送的电量。

当处于用电低谷时, EV 应处于 H2V(home to vehicle)运行状态,即充电状态。同时 EV 电池向家庭中的 H2V 各个负载进行供电。则

$$\begin{cases} P_{hg} = P_{Home} - P_{Grid} \\ P_{Grid} = P_{Grid_{min}} \\ P_{Home_{sum}} = P_{BatV2G} + P_{Home} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $P_{Home_{sum}}$  为家庭中的能源总和。

当家庭储能电池、EV 的电池中的可用电能和微型燃气轮机产生的电能不足以维持家庭负载所需,需要微型燃气轮机来产生更多的电能满足家庭负载需求与 EV 充电需求,这种情况下 EV 处于 H2V 运行状态。则

$$P_{Grid} = P_{BV} - P_{Home} - P_{BatV2G} \quad (5)$$

式中  $P_{BV}$  为家庭储能电池与光伏发电系统电能总和。

### 2.2 电动汽车充放电过程约束条件

V2G 系统中的 EV,其削峰填谷的效果与 EV 的电池紧密相关。电池的寿命主要取决于电池循环的次数、放电深度、充放电率等<sup>[19]</sup>。因此在家庭微电网中 EV 充电时需要考虑电池的寿命和充电时间,其中电池的最长充电时间应权衡两方面的因素:①EV 最主要的功能是作为代步工具,最好在短时间内完成充电;②需要考虑 EV 参与电力调节服务的时间。综上,该文提出了一种激励方案,鼓励车主的车辆以 2 种方式加入到 V2G 系统中,即 V2H 与 H2V。

除了以上提到的电池与车主的限制因素外,若想 EV 实现削峰填谷的功能,还需要满足以下不等式约束。

#### 2.2.1 对参与到 V2G 中 EV 的功率约束

$$\begin{cases} |P_v| \leq P_e, & P_e > 0 \\ |P_v| \leq |P_g|, & P_g < 0 \\ |P_v| \leq |P_s(t) - P_f(t)| \end{cases} \quad (6)$$

式中  $P_e$  为正数,表示从微电网输送到 EV 总的充电功率;  $P_g$  为负数,表示从 EV 输送到微电网的总的放电功率;  $P_f(t)$  表示负荷预测值;  $P_s(t)$  表示根

据车辆和负载的情况得出的实时负荷值。

从以上的约束条件可知,  $P_V$  的值应小于 EV 的最大服务容量, 同时也要考虑在 EVs 使用区域的负载功率以及对用户 EV 的使用。无论如何,  $P_V$  的值不应超过电网的供给与需求功率。

### 2.2.2 对 EV 充放电的约束

$$\begin{cases} 0 \leq R_{ch} \leq R_{cmax} \\ 0 \leq R_{dis} \leq R_{dmax} \\ -I_{cmax} \times V_{ch} \leq P \leq I_{dmax} \times V_{dis} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $R_{ch}$  为充电率;  $R_{dis}$  为放电率;  $R_{cmax}$  为可达到的最大充电率;  $R_{dmax}$  为可达到的最大放电率;  $V_{ch}$  为充电电压;  $V_{dis}$  为放电电压;  $I_{cmax}$  为最大充电率情况下的电流;  $I_{dmax}$  为最大放电率情况下的电流;  $P$  为 EV 的可用功率。

从以上的约束条件可知, 电池需限制接入的 EV 的电流和功率。最大的充放电电流不能大于  $I_{cmax}$  和  $I_{dmax}$ , 功率则取决于电池在充放电情况下的电压大小。

### 2.2.3 对 EV 容量的约束

$$\begin{cases} SOC_{amax} = SOC_{max} - SOC_{min} \\ 0 \leq SOC_c \leq SOC_{max} - SOC_r \\ 0 \leq SOC_{dis} \leq SOC_r - SOC_{min} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $SOC_r$  为实时容量;  $SOC_{max}$  为实时容量的最大值;  $SOC_{min}$  为实时容量的最小值;  $SOC_{amax}$  为最大的可用容量;  $SOC_c$  为充电容量;  $SOC_{dis}$  为放电容量。

为了减缓电池寿命的衰减, 需要限制实时容量的大小。同时减少电池充放电切换次数, 每次充放电尽可能在  $SOC_{max}$  和  $SOC_{min}$  内深度循环充放电<sup>[20]</sup>。

### 2.2.4 车主对 EV 的约束

车主设置的约束条件会影响 EV 参与到 V2G 系统进行电力供需调节的能力。车主应根据自己的出行需求设定  $SOC_{max}$ 、 $SOC_{min}$  以及 EV 参与到 V2G 系统的时间。车主设定的参数如图 2 所示:

$$SOC_{min}^* \leq SOC_r^* \leq SOC_{max}^* \quad (9)$$

式中  $SOC_{min}^*$  和  $SOC_{max}^*$  分别为车主设定的实时容量的下限和上限。

为确保电池的寿命和安全性,  $SOC_{min}^*$  不低于  $SOC_{min}$ ,  $SOC_{max}^*$  不可超过  $SOC_{max}$ 。EV 的充放电状

态由式(4)决定。当实时容量低于  $SOC_{min}^*$  时, EV 应处于充电状态(H2V 模型)。当实时容量高于  $SOC_{max}^*$  时, EV 应进入放电状态(V2H 模型)。

如果实时容量处于  $SOC_{min}^*$  与  $SOC_{max}^*$  之间, 能源管理中心则会根据家庭用电和 EV 的需求进行调节, 运行状态如图 2 所示。流程如图 3 所示。

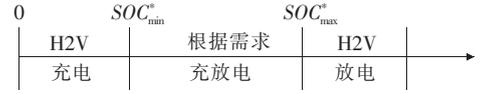


图 2 电动汽车充放电策略

Figure 2 Electric vehicles charging and discharging strategy

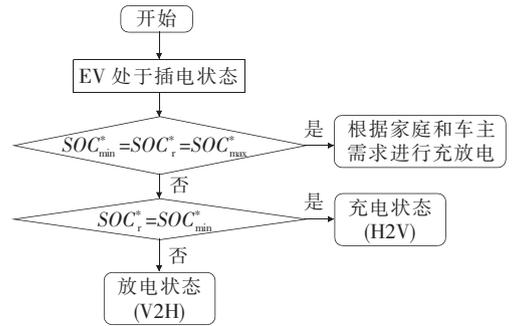


图 3 电动汽车充放电流程

Figure 3 Flow diagram of electric vehicles charging and discharging

## 2.3 目标函数

该文所提出的家庭微电网模型重点在于考虑负荷的功率差, 因此目标函数为

$$P_t = \max(P_{L,t} - P_{sum,t}) \quad (10)$$

式中  $P$  为本模型功率差的目标函数;  $P_{L,t}$  为优化前家庭正常用电情况下  $t$  时刻的功率;  $P_{sum,t}$  为该文提出的模型中各个组件在  $t$  时刻的功率和。

上述模型采用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法求解。初始各个组件的功率大小, 在式(6)~(9)的约束下, 包括 EV 的功率约束、容量约束、充放电约束。以该文提出优化策略前后的家庭微电网功率消耗差值为目标函数, 经过多次迭代得到最优解。

## 3 算例仿真

该模型家庭能源管理中心由 3 种功能集成: 负

载管理、智能电表和自身能源的管理。随着各大售电公司的出现,未来用户对电能的消费将从被动变为主动,用户可根据实时电价的高低来调节家庭负载的接入情况,从而进行更为经济的选择。而且,当电网处于高峰期时,可以通过断开家庭中的可控负载来减少家庭电量的需求<sup>[21]</sup>。智能电表可以满足能源管理中心与负载管理的需求,对户内用电设备进行控制,丰富用户用电的管理功能<sup>[22]</sup>。光伏电池与储能系统相连接,该储能系统拥有一组电池作为长期储能装置<sup>[23]</sup>以及 EV 电池(充电状态下)作为动态调节装置。

### 3.1 优化前家庭用电功率仿真

根据天气和光伏发电的历史数据库,可以推断出光伏发电功率预测曲线<sup>[24]</sup>。基于以往电力需求的数据,负荷的运转情况可以预测和估算出来。

在电力负荷预测中,很多因素不同程度地影响负荷的预测值。优化前典型家庭日负荷预测曲线如图 4 所示。

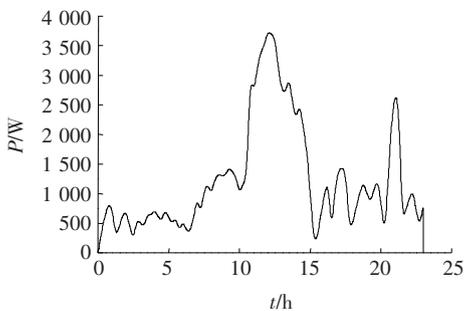


图 4 优化前家庭日消耗预测

Figure 4 A daily household consumption prediction before optimization

### 3.2 优化后家庭用电功率仿真

根据该文模型进行 24 h 的模拟仿真。假设车主早上 6:00 离家工作, EV 在 22:00 开始充电直到车主离家。在该模型中假设电池每天的充放电周期最短,放电深度保持在 10%~80%之间,以便增加电池的寿命。家庭储能装置与 EV 电池的容量分别为 8 kW·h 与 5 kW·h。

为验证以上提出的动态能源管理方案的可行性,需要将该方案应用到模型中,其仿真结果如图 5 所示。

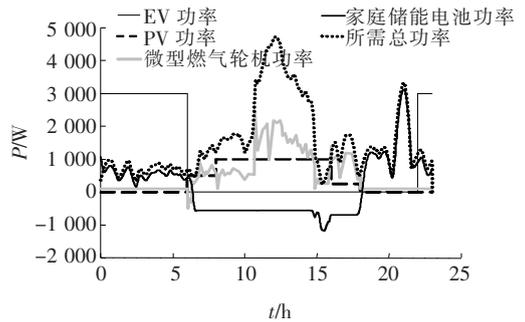


图 5 模型各组件功率变化情况

Figure 5 Power variation of each component in the model

## 4 仿真分析

### 4.1 优化前后负荷曲线变化

由图 4 可知,优化前,12:00 和 22:00 为用电高峰期,对电网消耗的最大功率分别为 3.6 kW 和 2.75 kW。由图 6 可知,在动态能源管理策略下,负载所需的电能和家庭储能电池所需的电能主要由光伏发电系统提供,家庭中耗电所需的能量差由微型燃气轮机提供,可减少电网高峰期对电网的消耗。优化后,12:00 对电网的功率消耗降为 2 kW,其中总需电能为 4.7 kW·h,光伏发电系统提供 1 kW·h 电能,微型燃气轮机提供 2.2 kW·h 电能,家庭储能电池吸收 0.5 kW·h 电能。22:00 对电网的功率消耗降为 0 kW,其中总需电能为 3.4 kW·h,微型燃气轮机提供 0.2 kW·h,家庭储能电池吸收 3.2 kW·h。

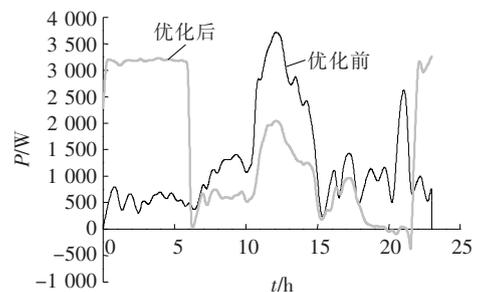


图 6 优化前后用电功率变化

Figure 6 Variation of power before and after optimization

家庭微电网使用该文提出的能源管理策略后,削峰填谷效果明显,优化前,最高峰期耗电量为 3.7 kW·h,最低谷期耗电 0.25 kW·h;优化后,最高峰期耗电 3.25 kW·h,最低谷期耗电量为 -0.28 kW·h。与此同时,提高可再生能源的利用

率,有助于减少系统负荷备用,提高电网运行的安全稳定裕度。

#### 4.2 优化前后耗电量变化

表1选取了4个典型时刻,并计算出优化前后耗电量差值,同时对负荷曲线进行积分,可得到全天总耗电量。由表1可知,优化后,高峰期可以有效降低负荷高峰时家庭微电网对电网的电力消耗,增加可再生能源的利用率。低谷期增加了家庭从外电网获取的电能。因此,该文提出的能源管理策略有助于削峰填谷,减少系统负荷备用,提高发电设备的利用率。

表1 耗电量优化结果

Table 1 Optimization results of power consumption

时刻/h	优化前/(kW·h)	优化后/(kW·h)	差值/(kW·h)
6:00	0.60	3.2	-2.20
12:00	3.70	2.0	1.60
21:00	2.75	0	2.75
24:00	0	2.3	-2.30
全天	28.50	20.8	7.70

#### 4.3 优化后EV电池容量变化

EV电池在用电低谷时进行充电,以此来平滑曲线,其电量变化曲线如图7所示。若MPPT技术进行控制下的光伏发电能大于家庭所需电能,且此时EV电池尚未充满,也可进行充电。

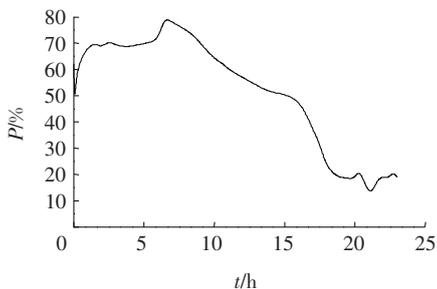


图7 电动汽车电池电量变化

Figure 7 EV battery capacity variation

#### 4.4 优化后家庭储能电池容量变化

家庭储能电池在用电高峰时进行放电,以此来削峰。白天时,微型燃气轮机对太阳能发电系统进行补偿,夜间时,家庭储能电池替代太阳能发电系统给家庭供电,其电量变化曲线如图8所示。从图中可以看出家庭储能电池在有光照时进行充电,在太阳落山后,释放电能,用于给家庭负荷及电动汽车充电。

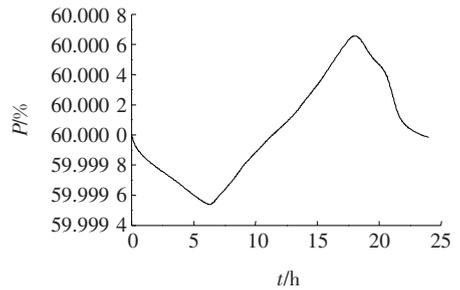


图8 家庭储能电池电量变化

Figure 8 Home battery capacity daily variation

## 5 结语

该文构建了一个同时计及在V2G系统中的EV、智能房屋、电池和光伏发电系统的模型。该模型同时考虑了电网、家庭负荷、以及车主的需求,提出了一种能源管理方法。为了实现控制策略,建立了与EV电池充电状态相关的约束。利用PSO算法计算分析了能源管理策略实施前后能量损耗变化。通过仿真结果分析,得出该文的能源管理方法可改善家庭用电曲线,减少峰谷差,提高对可再生能源的利用率。

#### 参考文献:

- [1] Ahmed Y S, Ganesh K V. Resource scheduling under uncertainty in a smart grid with renewable and plug-in vehicles[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1): 103-109.
- [2] 洪博文, MIKETA Asami, GIELEN Dolf, 等. 基于可再生能源的全球电气化路径与远景分析[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 159-166.  
HONG Bowen, MIKETA Asami, GIELEN Dolf, et al. Global renewable-based electrification pathways and its long-term scenario analysis[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 159-166.
- [3] 郭磊, 王克文, 文福拴, 等. 电动汽车充电设施规划研究综述与展望[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 56-70.  
GUO Lei, WANG Kewen, WEN Fushuan, et al. Review and prospect of charging facility planning of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Tech-

- nology, 2019, 34(3):56-70.
- [4] 尹琦琳,秦文萍,于浩,等. 计及风电波动性和电动汽车随机性的电力现货市场交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12):118-127.  
YIN Qilin, QIN Wenping, YU Hao, et al. An electric power spot market trading model taking into account wind power volatility and electric vehicle randomness [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12):118-127.
- [5] 王贵斌,赵俊华,文栓福,等. 配电系统中电动汽车与可再生能源的随机协同调度[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19):22-29.  
WANG Guibin, ZHAO Junhua, WEN Fushan, et al. Stochastic optimization dispatching of plug-in hybrid electric vehicles in coordination with renewable generation in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19):22-29.
- [6] 喻恒凝,黄力,张思东,等. 分布式光伏和电动汽车接入对配电网损和电压偏移影响的分析研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(1):28-34.  
YU Hengning, HUANG Li, ZHANG Sidong, et al. Effects of distributed photovoltaic generation and electric vehicle integrating into distribution network on line loss and voltage drift[J]. Smart power, 2020, 48(1):28-34.
- [7] Solanki B V, Raghurajan K, Bhattacharya A, et al. Including smart loads for optimal demand response in integrated energy management systems for isolated microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4):1739-1748.
- [8] 张颖达,刘念,张建华,等. 含电动汽车充电站的风光互补系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15):126-134.  
ZHANG Yingda, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Optimum sizing of stand-alone hybrid PV/wind generation system integrated with electric vehicle charging stations [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15):126-134.
- [9] Kim B G, Ren S, Van Der Schaar M, et al. Bidirectional energy trading and residential load scheduling with electric vehicles in the smart grid[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2013, 31(7):1219-1234.
- [10] 杨淑霞,朱宪国,彭生江. 非合作博弈模式下新能源微电网多主体成本策略优化模型[J]. 电测与仪表, 2021, 58(1):116-123.  
YANG Shuxia, ZHU Xianguo, PENG Shengjiang. Multi-agent cost optimization strategy model of new energy microgrid based on non-cooperative game theory [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(1):116-123.
- [11] 常小强,宋政湘,王建华. 基于蒙特卡罗算法的电动汽车充电负荷预测及系统开发[J]. 高压电器, 2020, 56(8):1-5.  
CHANG Xiaoqiang, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua. Electric vehicle charging load prediction and system development based on monte carlo algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8):1-5.
- [12] 赖伟坚,陈威洪,林泽宏,等. 能源互联网内多类设备协同运行的能量管理系统软件设计[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4):72-80.  
LAI Weijian, CHEN Weihong, LIN Zehong, et al. The software design of energy management system for the collaborative operation of multiple types of devices in the internet of energy [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4):72-80.
- [13] 金明成,于骏,汤伟,等. 复合储能微电网有效载荷调度方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(8):91-97.  
JIN Mingcheng, YU Jun, TANG Wei, et al. Research on the method of payload scheduling in compound energy storage micro grid [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8):91-97.
- [14] Javaid N, Ullah I, Akbar M, et al. An intelligent load management system with renewable energy integration for smart homes [J]. IEEE Access, 2017, 5:13587-13600.
- [15] Kazemi S F, Motamedi S A. A home energy management system using gray wolf optimizer [C]//2017 2nd Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC), Kerman, Iran: IEEE, 2017.
- [16] 吴雄,王秀丽,刘世民,等. 微电网能量管理系统探究综述[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10):7-14.

- WU Xiong, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Summary of research on microgrid energy management system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(10):7-14.
- [17] Liu Y, Tang Y J, Shi J, et al. Application of small-sized SMES in an EV charging station with DC bus and PV system [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, 25(3):103-109.
- [18] 昝美琴, 孙树娟, 苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(14):30-35.
- MAO Meiqin, SUN Shujuan, SU Jianhui. Economic analysis of a micro-grid with wind/photovoltaic/storages and electric vehicles [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(14):30-35.
- [19] Wang Z P, Wang S. Grid power peak shaving and valley filling using vehicle-to-grid systems [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(3):1822-1829.
- [20] 闻人红雁, 毛松科, 闻人红权, 等. 不同荷电态对锂离子电池循环寿命的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2011, 29(5):797-799.
- WENREN Hongyan, MAO Songke, WENREN Hongqian, et al. Effect of state-of-charge on the cycle life of lithium-ion batteries [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2011, 29(5):797-799.
- [21] Kazuki O, Kenichi T, Kousuke U, et al. Optimal operation of controllable loads in DC smart house with EV [C]//2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Nagasaki, Japan: IEEE, 2012.
- [22] 张新昌, 周逢权. 智能电网引领智能家居及新能源消费革新[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(5):59-67.
- ZHANG Xinchang, ZHOU Fengquan. Smart grid leads the journey to innovative smart home and energy consumption patterns [J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(5):59-67.
- [23] 谭兴国, 王辉, 张黎, 等. 微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(8):7-14.
- TAN Xingguo, WANG Hui, ZHANG Li, et al. Multi-objective optimization of hybrid energy storage and assessment indices in micro-grid [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(8):7-14.
- [24] 柳溪. 光伏微电网的发电和负荷预测方法及调度策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.