

DOI: 10.7667/PSPC161775

## 基于混合整数线性规划的家庭微电网能量优化研究

朱洁<sup>1</sup>, 陈娅兰<sup>2,3</sup>, 张淼<sup>1</sup>, 赵贺<sup>1</sup>, 万庆祝<sup>3</sup>, 孙健<sup>1</sup>, 王鑫<sup>4</sup>

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075; 2. 国网江西省电力公司检修分公司, 江西 南昌 330046;  
3. 北方工业大学, 北京 100144; 4. 国网山西省电力公司检修分公司, 山西 太原 030006)

**摘要:** 灵活互动的智能电网鼓励用户侧与电网的积极互动, 在互动中促进用户与电网企业的互利共赢。实时电价可作为电网企业发布系统调节需求的一种方式。同时, 光伏系统、储能系统与电动汽车为家庭积极响应电网调节提供了可能。在实时电价的环境下, 在含有光伏系统、储能系统和电动汽车的家庭微电网中, 以蓄电池和电动汽车作为家庭中参与能量优化的主要对象, 首先建立了蓄电池的充放电模型和电动汽车的充电模型; 其次建立了以家庭微电网系统总运行费用最小为目标的能量优化模型, 并采用了混合整数线性规划法对模型进行了求解。最后仿真验证, 该模型能够有效地减少系统运行费用。

**关键词:** 家庭微电网; 蓄电池; 电动汽车; 实时电价; 能量优化

### Household micro grid energy optimal research based on MILP

ZHU Jie<sup>1</sup>, CHEN Yalan<sup>2,3</sup>, ZHANG Miao<sup>1</sup>, ZHAO He<sup>1</sup>, WAN Qingzhu<sup>3</sup>, SUN Jian<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>4</sup>

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China; 2. Maintenance Branch, State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330046, China; 3. North China University of Technology, Beijing 100144, China;  
4. Maintenance Branch, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Flexible and interactive smart grid encourages users and grid have a positive interaction. The user and the grid can get mutual benefit and win-win results in smart grid. The real-time electricity price can be a way of the grid releasing requirements. At the same time, PV system, energy storage system and electric vehicle provide possibility for the house positive response to the grid. Based on the real-time electricity price environment, in a micro grid including PV system, energy storage system and electric vehicle, this paper takes the storage system and the electric vehicle as the main loads of the house participate in the energy optimization. First, it establishes the battery charge/discharge model and the electric vehicle charging model. Second, it establishes the micro grid system energy optimization model with minimum the total cost as the goal. Then the mixed integer linear programming method is used to solve the model. Finally the simulations verify that the model can effectively reduce the system operation cost.

This work is supported by the Education Committee of Beijing Basic Research Program of China (No. XN097) and Foundation of Collaborative Innovation Center of Key Power Energy-Saving Technologies in Beijing (No. PXM2016\_014212\_000016).

**Key words:** household micro grid; storage battery; electric vehicle; real-time electricity price; energy optimization

## 0 引言

电力为人们的生活提供了很多便利, 伴随着科学技术的不断进步和社会需求的不断演变, 电力系统的发展也面临着巨大的挑战。电力调节困难的火

电和核电日益大型化。同时, 风电、光伏等间歇性能源在全球的装机量迅速增加, 也逐渐进入千家万户。电动汽车的大规模普及, 社会耗电量激增。以上多方面的原因造成电力系统的调节空间被前所未有的压缩。这对电力系统的调节与控制技术提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。

伴随着高级量测体系、通信技术的发展, 用户侧参与电力系统的调节成为可能。家庭中的可再生能源发电设备、储能设备、电动汽车以及其他负荷

**基金项目:** 北京市教委专项基金资助项目(XN097); 北京市电力节能关键技术协同创新(2011)基金项目(PXM2016-014212-000016)

可以根据电网企业制定的实时电价作为引导, 合理规划用电时间。从而达到家庭节约用电费用, 电网稳定安全的双赢目标。

文献[2]基于“藏电于民”的储能理念, 展望了家庭储能与电动汽车的发展前景。文献[3]针对含有混合储能和柴油发电机的微电网提出了一种混储/柴协调控制的专家系统, 有效提高了蓄电池的使用效率和微电网的运行经济性。文献[4]将电动汽车在固定电价下的无序充电模式与峰谷分时电价下的有序充电进行了对比。证明了峰谷分时电价的引入对负荷合理转移的积极作用。文献[5]建立了以用户满意度最大为目标的电动汽车充放电策略, 并验证了对城市配电网的平抑负荷波动具有积极作用。

本文在实时电价的环境下, 对包含光伏发电系统、储能系统和电动汽车的家庭, 设计了家庭的系统结构, 建立了蓄电池的充放电模型和电动汽车的充电模型。对蓄电池在各时段的充放电量和电动汽车的充电时间展开了研究, 通过建立的混合整数线性规划模型对二者的用电进行了优化, 节省了用户的用电费用。

## 1 家庭微电网系统结构

随着光伏系统的发展, 小型光伏系统逐渐在用户侧得到普及。伴随着储能系统的加入, 使得在家庭微电网系统中, 用户不但能自发自用, 而且在光伏发电量较多时还可以将电卖给电网, 家庭的用电方式更加灵活、经济。

家庭中的微电网系统主要由光伏系统、储能系统和负荷组成, 系统中光伏发电量由独立的单向电表计量, 与电网间的电量交易则由双向计量电表计量, 家庭中的负荷可通过智能插座由家庭能量管理终端实现监控。家庭微电网的拓扑结构, 按光伏系统和储能系统接入方式的不同可分为直流耦合型和交流耦合型<sup>[6]</sup>, 如图 1、图 2 所示。

其中交流耦合型拓扑结构中光伏和蓄电池分别经过普通 DC/AC 逆变和双向储能逆变器并入到交流母线中, 再从交流母线接线连接负荷和配电网; 直流耦合拓扑结构中光伏经过 DC/DC 升压接入到

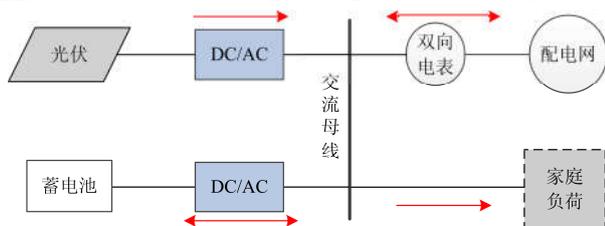


图 1 交流耦合拓扑结构

Fig. 1 AC coupling topology

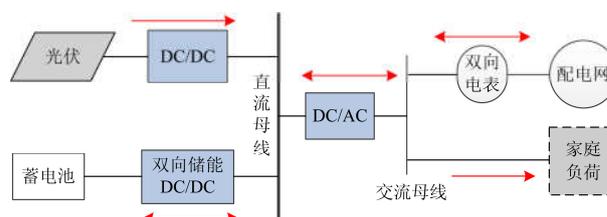


图 2 直流耦合拓扑结构

Fig. 2 DC coupling topology

直流母线, 蓄电池则经双向 DC/DC 变流器接入直流母线, 直流母线还需经过逆变才能向负载供电同时实现与配电网的连接。

直观地看, 两种拓扑结构中都能实现蓄电池能量的双向控制和提高光伏自身消纳、灵活供电等功能, 但是直流耦合结构在国内外应用较为成熟, 并且具有简单、高效等特点<sup>[7]</sup>, 所以本文中采用直流耦合的方式进行连接。

## 2 家庭微电网模型

一般认为家庭中的光伏系统发电量与每天的气温与太阳辐照强度等有关。根据气象信息与历史数据可以对光伏发电量进行预测。光伏发电的预测算法有很多, 根据国内太阳辐射站点稀少且预报能力较低的情况, 文献[8]提出了一种以气温和湿度作为输入的反传播神经网络的光伏发电量短期预报模型, 具有较高的预测精度。

家庭中用户的用电行为具有较强的规律性, 与用户的用电习惯、季节因素和天气因素等有关。有针对负荷短期预测的相关研究。文献[9]根据自适应神经网络算法建立了负荷的短期预测模型。

在本文中光伏发电量与负荷的预测不作为重点研究对象, 故直接利用预测所得的数据进行家庭的用电规划。对预测算法不再赘述。家庭的用电优化中, 将一天平均分为 24 个时间段。光伏预测值为一天 24 个时段的发电量。负荷预测值为除电动汽车、蓄电池以外的所有负荷的用电量的一天 24 个时段。

### 2.1 蓄电池模型

蓄电池在系统中的作用很大, 与光伏发电系统的配合使用, 具有平衡发电功率与负荷需求、响应系统的动态变化, 实现光伏系统平滑接入电网的优点<sup>[10]</sup>。在实时电价的环境下, 蓄电池还具有削峰填谷的优势。但是由于储能技术的成本较高, 如何在满足系统对储能系统要求的同时实现储能投资成本的降低是一个优化问题<sup>[11]</sup>。

在对蓄电池优化过程中, 首先建立了蓄电池的充放电模型。蓄电池在某一时刻的电量与上一时刻

的电量、充放电功率大小和自然损耗有关, 建立的蓄电池充放电模型如下所述<sup>[12-13]</sup>。

充电时为

$$E_b(h+1) = (1-\tau)E_b(h) + P_{b, \text{ch}}(h)\eta_{\text{ch}}\Delta h \quad (1)$$

放电时为

$$E_b(h+1) = (1-\tau)E_b(h) - \frac{P_{b, \text{dis}}(h)}{\eta_{\text{dis}}}\Delta h \quad (2)$$

式中:  $E_b(h)$ 为蓄电池在第  $h$  时段的电量(kWh);  $\tau$ 为蓄电池的自放电率;  $P_{b, \text{ch}}(h)$ 和  $P_{b, \text{dis}}(h)$ 分别为蓄电池的充电功率和放电功率(kW);  $\eta_{\text{ch}}$ 和  $\eta_{\text{dis}}$ 分别为蓄电池的充放电效率。

考虑到过充和过放都会对蓄电池的寿命造成很大的危害, 所以应对蓄电池的荷电状态和充放电功率有一定的约束。

蓄电池的荷电状态约束为

$$E_{b, \text{min}} \leq E_b(h) \leq E_{b, \text{max}} \quad (3)$$

蓄电池的充放电功率约束

$$0 \leq P_{b, \text{dis}}, P_{b, \text{ch}} \leq P_{b, \text{max}} \quad (4)$$

式中:  $E_{b, \text{max}}$ 表示蓄电池充电时的最大容量(kWh);  $E_{b, \text{min}}$ 表示蓄电池放电时的最小容量(kWh);  $P_{b, \text{max}}$ 表示蓄电池充放电功率的最大值(kW)。

## 2.2 电动汽车模型

电动汽车指驱动力来源于车载蓄电池, 以电能驱动前进的车辆。电动汽车有很多优点, 比如噪声小, 对环境影响小等。而且电动汽车具有储能特性, 在充电时间上非常灵活。对电网的调节具有积极作用。家庭中对电动汽车的需求一般在规定时刻前充满即可。故建立的电动汽车充电模型为

$$P_{\text{ev}}(h) = \alpha_{\text{ev}}(h)P_{\text{n, ev}} \quad (5)$$

充电时段约束为

$$\begin{cases} \alpha_{\text{ev}}(h) \in \{0, 1\} & h \in T_{\text{ev}} \\ \alpha_{\text{ev}}(h) = 0 & \text{其他时段} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{ev}}(h)$ 为在第  $h$  时段电动汽车的充电功率(kW);  $\alpha_{\text{ev}}(h)$ 为在第  $h$  时段时的充电状态, 其值为 1 的时候表示充电, 其值为 0 时表示充电断开;  $P_{\text{n, ev}}$ 表示电动汽车的额定充电功率(kW);  $T_{\text{ev}}$ 为电动汽车充电的时段。

## 3 能量优化模型

家庭微电网的能量优化在各项预测数据以及实时电价的基础上, 对蓄电池在各个时段的充放电量 and 电动汽车的充电时间进行优化。优化目标为降低家庭微电网系统总的运行费用。运行费用主要包括

国家对光伏发电的全电量补贴、家庭从电网买电产生的买电费用、家庭向电网卖电产生的卖电费用以及蓄电池充放电过程中的折旧损耗。目标函数为

$$\min C_{\text{sys}} = \sum_{h=1}^{24} \left[ eb(h)P_{\text{gb}}(h) - epv(h) \cdot P_{\text{pv}}(h) - es(h) \cdot P_{\text{gs}}(h) + \beta_b(P_{b, \text{ch}}(h) + P_{b, \text{dis}}(h)) \right] \quad (7)$$

式中:  $epv$ 为光伏全电量补贴电价;  $es$ 为上网电价;  $P_{\text{gb}}(h)$ 和  $P_{\text{gs}}(h)$ 分别表示在第  $h$  时段系统从电网购电的功率和系统向电网售电的功率;  $\beta_b$ 是蓄电池充放电的折旧系数<sup>[14]</sup>。

系统应满足的约束条件如下所述。

1) 家庭微电网系统的功率平衡

$$P_{\text{gb}}(h) - P_{\text{gs}}(h) + P_{\text{pv}}(h) + P_{b, \text{dis}}(h) - P_{b, \text{ch}}(h) = P_1(h) \quad (8)$$

$$P_1(h) = P_r(h) + P_{\text{ev}}(h) \quad (9)$$

式中:  $P_{\text{pv}}(h)$ 为第  $h$  时段的光伏发电量的预测值;  $P_1(h)$ 为第  $h$  时段的负荷量;  $P_r(h)$ 为第  $h$  时段的预测负荷值。

2) 蓄电池的荷电状态及充放电功率限制如式

(3)一式(4)。

3) 电动汽车的受控时段及满电约束

$$\sum_{EV, \text{start}}^{EV, \text{end}} \alpha_{\text{ev}}(h) = N_{\text{ev}} \quad (10)$$

式中:  $EV, \text{start}$ 和  $EV, \text{end}$ 分别为电动汽车可充电时段的起始时间和终止时间;  $N_{\text{ev}}$ 表示从最低电量到充满电所需的小时数。

4) 电力传输功率限制

$$0 \leq P_{\text{gb}}(h) \leq P_{\text{gb, max}} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{\text{gs}}(h) \leq P_{\text{gs, max}} \quad (12)$$

式中,  $P_{\text{gb, max}}$ 和  $P_{\text{gs, max}}$ 分别表示家庭微电网与电网连接的线路上所允许两个方向上的功率流动限额。

此模型中包括充电、放电、购电、售电等变量, 还包括电动汽车的充电状态。既有线性连续变量又有线性整数变量, 故采用混合整数线性规划法(Mixed Integer Linear Programming, MILP)<sup>[15]</sup>求解。MILP的经典求解方法中有割平面法和分支定界法。割平面法通过构造一系列平面来切割掉不含有任何整数可行解的部分, 最终获得一个具有整数坐标的顶点的可行域, 而该顶点恰好是原整数规划的最优解。分支定界法通过搜索解空间树中的结点, 抛弃不可能产生可行解或最优解的结点, 不断搜索当前活结点的子节点, 直到找到问题的最优解或活结点表为空。本文通过在 Matlab 中应用 lpsolve 程序对所建立的混合整数线性规划模型进行了求解。

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

本算例中家庭光伏系统的额定容量为 5 kW。电动汽车采用低压交流充电  $P_{n, ev}$  为 3.3 kW,  $N_{ev}=6$  h,  $T_{ev}$  为 18:00~7:00(次日)。蓄电池采用了容量 10 kWh 和 5 kWh 两种规格, 以验证蓄电池容量对家庭光伏系统运行费用的影响。关于蓄电池的其他参数为:  $P_{b, max}=3$  kW,  $\eta_{ch}=\eta_{dis}=0.95$ ,  $\beta_b=0.15$ ,  $E_{b, min}=3$  kWh。采用的实时电价如表 1 所示。买电电价结合国外需求响应经验与我国情况进行了设定, 卖电电价参考我国燃煤机组与水电机组平均上网电价进行了设定, 光伏补贴电价按照国家政策中的光伏补贴电价。

表 1 实时电价

Table 1 Real-time electricity price			
时段	谷	平	峰
时刻	23:00~07:00	11:00~19:00	07:00~11:00 19:00~23:00
买电电价/(元/kWh)	0.3	0.5	0.9
卖电电价/(元/kWh)	0.34	0.34	0.34
补贴电价/(元/kWh)	0.42	0.42	0.42

光伏预测值及室外温度的值如图 3 所示。负荷预测值如图 4 所示。

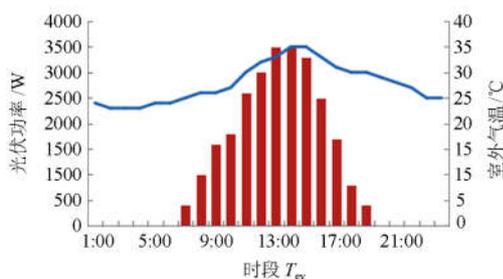


图 3 光伏预测值及室外温度

Fig. 3 PV prediction and outdoor temperature

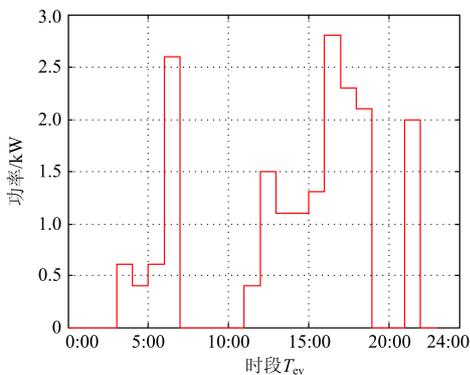


图 4 负荷预测值

Fig. 4 Load prediction

### 4.2 结果分析

在 Matlab 软件中应用 lpsolve 程序对混合整数线性规划法模型进行了求解。

#### 4.2.1 蓄电池容量为 10 kWh

所求得的蓄电池充放电计划如图 5 所示。功率为正时, 表明蓄电池在放电; 功率为负时, 表明蓄电池在充电。可见优化结果中蓄电池在电价低谷时段进行了充电, 在电价高峰时段进行了放电。有利于减少家庭的用电费用。由于考虑了蓄电池的充放电对电池寿命的损耗, 优化结果中减少了蓄电池的充放电次数。避免了频繁充放电对蓄电池寿命的影响。

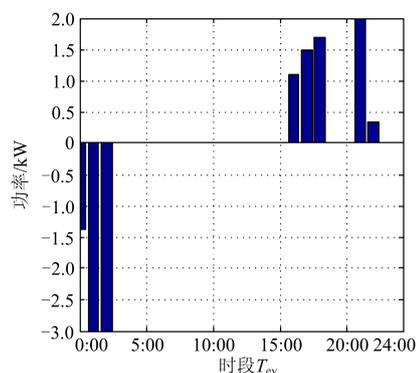


图 5 蓄电池充放电电量

Fig. 5 Storage battery charging and discharging

图 6 为优化后电动汽车的充电时间, 电动汽车的充电时间被安排到了电价低谷的时段。有利于减少家庭的用电费用。

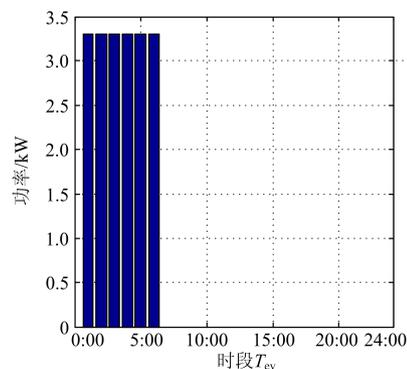


图 6 电动汽车充电时间

Fig. 6 EV charging time

图 7 为优化后家庭与电网间的能量流动。功率为正, 代表家庭从电网买电; 功率为负, 代表家庭向电网卖电。从图中可以看出, 由于家庭具有光伏系统, 在中午光伏发电量较多的时段, 自发自用之余, 家庭向电网卖出了大量电能。为家庭增加了收益。通过对蓄电池与电动汽车的能量优化, 家庭用电高峰由一般电网中的用电晚高峰移动到了电网中

的用电低谷时段。对电网的实时电价做出了响应，缓和了电能供需矛盾，有利于降低电网的峰谷差。

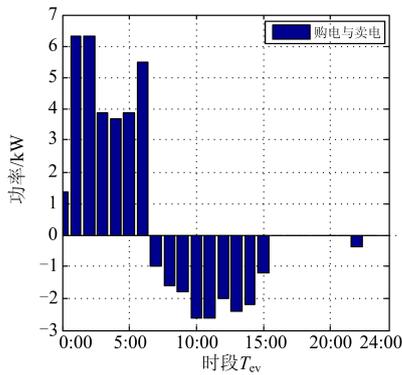


图 7 家庭与电网间的能量流动

Fig. 7 Energy flows between the house and grid

#### 4.2.2 蓄电池容量为 5 kWh

所求得蓄电池充放电计划如图 8 所示。蓄电池依然在电价低谷时段进行了充电，在电价高峰时段进行了放电。考虑对蓄电池寿命的影响，减少了蓄电池的充放电次数。由于容量的缩减，对能量的储存能力有所影响。从图 9 中可以看出，由于储能容量有限，家庭不得不在电价高峰时段增加了从电网的买电量。

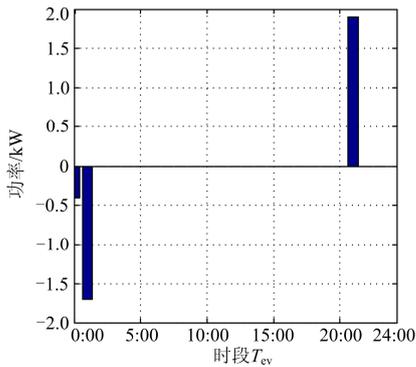


图 8 蓄电池充放电电量

Fig. 8 Storage battery charging and discharging

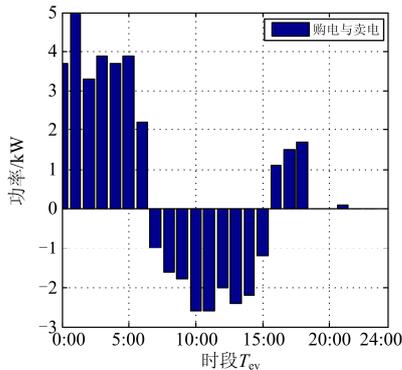


图 9 家庭与电网间的能量流动

Fig. 9 Energy flows between the house and grid

家庭用能经过优化后，从电网买电花费、向电网卖电收益及国家的光伏补贴，总体花费对比如表 2 所示。花费为负时，表明此时为用户收益；花费为正时，表明此时为用户支出。

表 2 总费用对比

Table 2 Comparison of cost

模式	不进行规划	进行规划	
		蓄电池容量 10 kWh	蓄电池容量 5 kWh
费用/元	2.73	-7.71	-6.93

如果对家庭用电不进行规划，电动汽车会在晚间的高峰电价时段充电，蓄电池会在白天的非谷电价时段充电，则用户需要花费 2.73 元。而对家庭进行规划后，蓄电池容量为 10 kWh 时，用户收益 7.71 元，规划前后相差 10.44 元；蓄电池容量为 5 kWh 时，用户收益 6.93 元，规划前后相差 9.66 元。不论采用何种容量的蓄电池，规划后对家庭的用电费用缩减都是非常明显的。

蓄电池两种容量进行对比，二者相差 0.78 元。蓄电池容量的增加对家庭节能具有一定的积极作用。可根据蓄电池不同容量的成本与节能贡献选择家庭光伏系统中合适的蓄电池容量。

## 5 结论

本文从家庭微电网能量优化出发，提出一种能够实现蓄电池和电动汽车协同调度的优化模型。在减少蓄电池充放电损耗及考虑充放电约束的基础上，以降低家庭微电网系统运行总费用为目标，采用了混合整数线性规划的方法求解家庭的最优用电计划。此计划减少了家庭的用能费用，实现了电网的削峰填谷，并可为家庭微电网中蓄电池容量的选取提供依据。由于只考虑了具有储能特性的蓄电池和电动汽车的能量优化，对家庭用电习惯改变较小，有利于在用户侧家庭中推广。随着智能家电的应用，日后可以引进更多的智能负荷参与到家庭的能量管理中。

## 参考文献

- [1] 马化腾. 互联网+: 国家战略行动路线图[M]. 北京: 中信出版社, 2015.
- [2] 叶卫国. 试论家庭分布式储能的发展前景[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(4): 410-415.
- [3] YE Weiguo. Prospect of family base distributed energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(4): 410-415.
- [3] 成思琪, 刘俊勇, 向月, 等. 微网中混储/柴协调运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 42-50.

- CHENG Siqi, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Research on optimal coordinated operation for microgrid with hybrid energy storage and diesel generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 42-50.
- [4] 王璟, 王利利, 郭勇, 等. 计及电动汽车的微电网经济调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 111-117.  
WANG Jing, WANG Lili, GUO Yong, et al. Microgrid economic dispatch method considering electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 111-117.
- [5] 黄贵鸿, 雷霞, 芦杨, 等. 考虑用户满意度的电动汽车用户侧最优智能充放电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 40-47.  
HUANG Guihong, LEI Xia, LU Yang, et al. Optimus smart charge-discharge tactics in electric vehicle user profile considering user's satisfaction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 40-47.
- [6] 王守相, 孙智卿, 刘喆. 面向智能用电的家庭能量协同调度策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 108-113.  
WANG Shouxiang, SUN Zhiqing, LIU Zhe. Co-scheduling strategy of home energy for smart power utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 108-113.
- [7] WANG Y, LIN X, PEDRAM M. Adaptive control for energy storage systems in households with photovoltaic modules[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 992-1001.
- [8] 代倩, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于天气类型聚类识别的光伏系统短期无辐照度发电预测模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 28-35.  
DAI Qian, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Short-term PV generation system forecasting model without irradiation based on weather type clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 28-35.
- [9] 祝燕萍. 考虑光伏发电的短期负荷预测[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [10] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 9pp. DOI 10.1186/s41601-016-0021-1
- [11] 王波. 储能系统的优化建模与控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [12] 陈昌松. 光伏微网的发电预测与能量管理技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [13] CHEN S X, GOOI H B, WANG M Q. Sizing of energy storage for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 142-151.
- [14] 刘建涛, 曹雷, 马杰, 等. 基于储能系统的用户光伏并网发电系统经济性分析[J]. 太阳能学报, 2012, 33(11): 1887-1892.  
LIU Jiantao, CAO Lei, MA Jie, et al. Economic analysis of user's grid-connected PV system based on energy storage system[J]. ACAT Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(11): 1887-1892.
- [15] HU C, LUO S, LI Z, et al. Energy coordinative optimization of wind-storage-load microgrids based on short-term prediction[J]. Energies, 2015, 8(2): 1505-1528.
- 
- 收稿日期: 2016-10-25; 修回日期: 2017-01-10  
作者简介:  
朱洁(1972—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能电网; E-mail: zhujiej11@sina.com  
陈娅兰(1991—), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向为户用光伏微电网。E-mail: chenyalan@163.com  
(编辑 姜新丽)