

基于多种群协同进化遗传算法的智能小区 需求响应调度策略

杨 斌¹, 陈振宇¹, 阮文骏¹, 陆子刚², 黄奇峰²

(1. 国网江苏省电力有限公司, 南京 210024;
2. 国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院, 南京 210019)

Demand response dispatching strategy for intelligent community based on multi-group co-evolution genetic algorithm

YANG Bin¹, CHEN Zhenyu¹, RUAN Wenjun¹, LU Zigang², HUANG Qifeng²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

摘要:针对包含多种用能资源的智能小区中需求响应调度问题,首先建立储能、光伏和电动汽车的优化模型,目标函数设置为系统和电网的交换电量和总运行费用最小。然后利用多种群协同进化遗传算法优化结果。最后,以某智能小区为例,利用MATLAB工具对负荷模型进行仿真分析,验证所建模型的正确性和可行性,结果表明所设计的策略提高了光伏消纳率,降低了小区的运行费用。

关键词:智能小区;电动汽车;储能系统;优化调度

Abstract: For the demand response scheduling problems in an intelligent community containing multiple energy resources, the optimal model is firstly established concerning energy storage, photovoltaic and electric vehicles. The objective function is the minimum exchange quantity and total operation cost between the system and the grid. Then the multi-group collaborative purification genetic algorithm is used to obtain the optimization result. Finally, taking a smart community as an example, MATLAB tool is used to simulate the load model and verify its correctness and feasibility. It shows that the proposed strategy improves the PV consumption rate and reduces the operating cost.

Key words: intelligent community; electric vehicle; energy storage system; optimized dispatching

中图分类号:F407.61;TK018;TM73 文献标志码:A

0 引言

随着智能采集、传感、控制等支撑技术的发展,智能小区的大规模应用成为可能^[1]。随着“智能小区示范工程”的推广,至2017年已在常州武进、苏州金鸡湖地区建设了6个智能小区,主要进行居民用户互动能力、小区公共区域光储、电动汽车等建设,通过需求响应(demand response, DR)手段减少用户用电费用,削峰填谷,提高电网运行效率^[2-3]。

国内外学者针对需求响应中小区用户与配电网之间的互动做了大量的研究。文献[4]在发电调度中加入用电,构建了发用电一体化调度模型;文献[5]考虑光伏、风电等不确定性因素,构建了使电网运行成本最低的优化调度模型;文献[6]构建了

运行费用最小化的能量管理模型;文献[7]阐述了基于需求响应的电动汽车有序充电可以提高电网的运行效率,降低电网的峰谷差;文献[8]在运行费用中加入了储能的更换成本,建立了多运行成本核算下的经济优化调度模型;文献[9]在传统的分时电价调整模型中加入了多智能体模拟,以降低用户响应的不确定性。

文献[4]和文献[5]针对发电侧,文献[6]和文献[7]针对电动汽车,文献[8]针对储能,文献[9]针对用户侧等方面分别对需求响应调度进行了深入研究,但现有文献中关于综合利用多种用能资源的研究尚比较少。

基于上述分析,本文研究了智能小区的负荷优化调度问题,研究对象设置为含有储能、电动汽车等多种用能资源的居民用户,以电网的交换电量和系统的总运行费用最小为目标函数,借助多种群协同进化遗传算法进行求解,并通过算例验证模型的合理性。

收稿日期:2018-09-30;修回日期:2019-01-14

基金项目:国家电网公司科技项目(SGJS0000YXJS701014)

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid (No. SGJS0000YXJS701014)

1 智能小区用电场景

本文以拥有一定规模居民用户的智能小区为研究对象,由同一家电力公司为其提供电能。每个用户均装有智能电表,以实现电网侧和用户侧的实时互动,并且控制设备参与需求响应的调度^[10]。有一定规模的分布式电源及电动汽车分布在用户侧^[11-12]。

用户侧的负荷包括以下5种:①可用于调度的可转移负荷,例如空调;②用户日常用电必需的固定负荷,例如烟雾探测器;③满足用户外出需要的电动汽车负荷;④通过光伏发电的分布式能源,用户使用后的剩余电力可以储存在储能装置中或并入电网;⑤与分布式能源共同组成分布式供能系统的储能负荷,储能装置可以存储分布式发电系统的剩余电能,也可以存储在低电价时从电网购入的电能。

2 智能小区负荷调度模型构建

2.1 储能的寿命模型

由文献[13]知储能的循环充放电总量在整个使用过程中基本保持不变。假设其更换成本固定,则由于充放电造成的替换成本也是不变的,即

$$C_{s_bear} = \frac{C_{s_buy}}{Q_{s_all}} \quad (1)$$

式中: C_{s_buy} 为购买储能装置的成本; C_{s_bear} 为放电1 kWh 储能装置的折旧成本; C_{s_all} 为全寿命输出的储能装置的总电量。

假如在放电时储能装置能保持在较高的荷电状态,那么其损耗比较小,从而有效延长其使用寿命。反之,会对储能装置造成比较大的损耗。其寿命损耗系数和荷电状态的关系可以表达为^[14]

$$f(SOC(t)) = \begin{cases} 1.3 & 0 \leq SOC(t) \leq 0.5 \\ -1.5SOC(t) + 2.05 & 0.5 < SOC(t) \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $SOC(t)$ 为储能 t 时刻的荷电状态。

2.2 目标函数

本文的目标函数是使运行成本最小,同时配电网和小区的交换电量也尽可能小。通过降低小区和配电网的交换电量,使得小区内部的微电网尽可能自给自足,最大化利用储能系统以及可再生能源。系统的运行费用方面考虑储能的折旧成本,另外荷电状态的约束惩罚项也加入总运行成本,得到目标函数为

$$\min F = \Delta T \sum_{t=1}^T p_r(t) P_g(t) + C_{s_bear} \Delta T \cdot \sum_{t=1}^T f(SOC(t)) P_b(t) + \sigma \Delta T \sum_{t=1, SOC(t) < SOC_{min}}^T P_b(t) \quad (3)$$

$$P_b(t) = \begin{cases} |P_b(t)| & P_b(t) < 0 \\ 0 & P_b(t) \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\min G = \Delta T \sum_{t=1}^T |P_g(t)| \quad (5)$$

式中: $P_g(t)$ 为单位时间内和配电网交换的平均功率; $p_r(t)$ 为单位时间内的平均交易价格; ΔT 为单位时间间隔; T 为需要优化的时段数; $P_b(t)$ 和 $P_g(t)$ 分别为 t 时段储能系统的放电功率和充/放电功率; SOC_{min} 为荷电状态的下限; σ 为惩罚系数;式(3)从左到右分别是储能的放电罚函数和其折旧成本、以及配电网和微电网的交易成本。

2.3 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$P_b(t) + P_{EV}(t) + P_L(t) = P_{pv}(t) + P_g(t) \quad (6)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 为光伏发电功率; $P_{EV}(t)$ 为 t 时段电动汽车充电总功率; $P_L(t)$ 为 t 时段负荷侧固定负荷功率,通过短期负荷预测得到。

$$P_{EV}(t) = \sum_{n=1}^N P_{EV,n}(t) \quad (7)$$

$$P_{EV,n}(t) = \begin{cases} P_{avg_n} & t_{EV,n} \leq t < t_{EV,n} + E_{req_n} / P_{avg_n} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{avg_n} = \frac{E_{EV,n}}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

$$E_{EV,n} = \int_{t_1}^{t_2} P_{EV,n}(t) dt \quad (10)$$

式中: N 为电动汽车的总数量; $P_{EV,n}(t)$ 为第 n 辆电动汽车在 t 时段的充电功率; P_{avg_n} 为第 n 辆电动汽车在充电时段内的平均充电功率; $t_{EV,n}$ 为第 n 辆的开始充电时刻; $E_{EV,n}$ 为第 n 辆电动汽车在 $t_2 - t_1$ 时段内的充入电量,由第 n 辆电动汽车的需求量 E_{req_n} 决定。

(2) 电动汽车约束

$$\begin{cases} P_{EV,n} = 0 & t_{EV,n} \notin S_{EV} \\ P_{EV,n} = P_{EV_rat} & t_{EV,n} \in S_{EV} \end{cases} \quad (11)$$

式中: S_{EV} 为电动汽车停放的时间; P_{EV_rat} 为电池充电额定功率。

(3) 储能装置约束

$$|P_b(t)| \leq P_{b_rat} \quad (12)$$

$$E_b(t) = \begin{cases} E_b(t-1) + P_b(t) \Delta T \eta_b & P_b(t) \geq 0 \\ E_b(t-1) + \frac{P_b(t) \Delta T}{\eta_b} & P_b(t) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$E_{b_rat}(t) SOC_{min} \leq E_b(t) \leq E_{b_rat}(t) SOC_{max} \quad (14)$$

$$E_b(0) = E_b(T) \quad (15)$$

式中: P_{b_rat} 为储能装置的额定功率; $E_b(t)$ 为储能装置当前的荷电量; η_b 为储能装置的充/放电效率; $E_{b_rat}(t)$ 为储能装置的额定荷电量; SOC_{max} 为储能系统荷电状态的上限。

(4) 联络线功率约束

$$P_g(t) \leq \min\{P_{max}, P_T\} \quad (16)$$

式中: P_{max} 为联络线路的最大允许传输功率; P_T 为变压器的额定功率。

3 模型求解

本文选择多种群协同进化遗传算法求解,该算法通过种群迁移,使得全部种群能够共享优秀基因,完成各自进化。借助移民算子协同进化,最后得到最优解。人工选择算子用来保存每次进化中的最优个体,同时用来判断算法是否收敛^[15]。算法的结构示意图如图1所示。

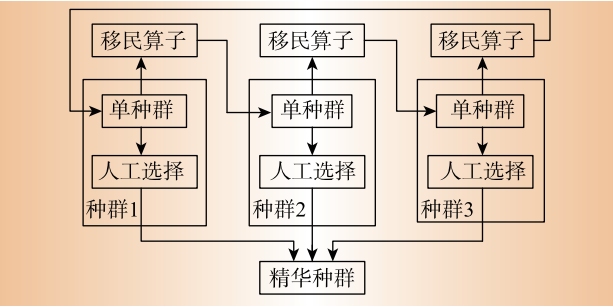


图1 多种群协同进化遗传算法结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of multi-population collaborative genetic evolution algorithm

通常处理约束的方法有:罚函数,将约束条件转换为优化目标; ε -约束,直接把不满足条件的解剔除等。本文直接去除不满足约束的解:在产生初始种群以及种群进化过程中,变异以及交叉都会产生新解,对于每一个新解进行约束检查。如果新解不满足求解条件,则重新编译或进行交叉操作,直到产生最优解。该策略的好处是具有强壮的鲁棒性。

文中所提算法的具体求解步骤如图2所示。

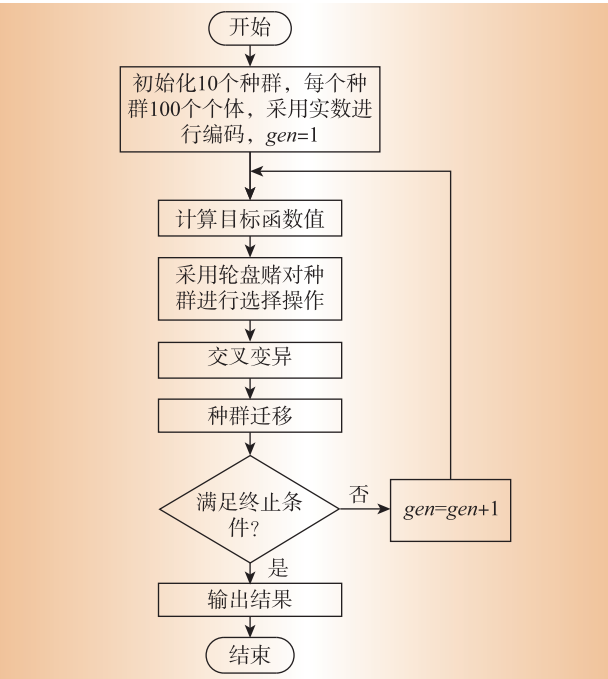


图2 目标函数计算流程图
Fig. 2 Calculation flow chart of objective function

4 算例分析

本文以某智能小区为例,对比引入储能和电动汽车前后的充放电曲线,来验证模型的有效性。

算例中取充电桩数目为10个,额定功率为10 kW;电动汽车锂电池的额定电压和额定容量分别为250 V和100 A·h。电动汽车使用场景假设为约9:00到达,在17:00左右离开,具体需求电量如图3所示。其电价采用分时电价,假设购/售电价格一致,具体价格如表1所示^[16]。

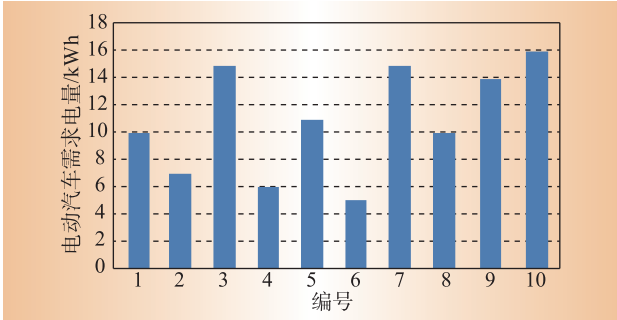


图3 电动汽车的需求电量
Fig. 3 Demand power for electric vehicles

表1 分时电价
Tab. 1 Time-of-use electricity prices

时段类型	时间段	购/售电价/(元·kWh ⁻¹)
谷时段	23:00~8:00	0.42
平时段	08:00~09:00, 12:00~17:00, 22:00~23:00	0.67
峰时段	09:00~12:00, 17:00~22:00	1.08

使用上文提到的多种群协同进化遗传算法对该算例进行研究。相关参数设置如下:种群规模为100,变异概率为0.3,交叉概率为0.7;优化周期为24 h,单位时间为1 h。种群进化过程如图4所示,小区的光伏和负荷情况如图5所示。

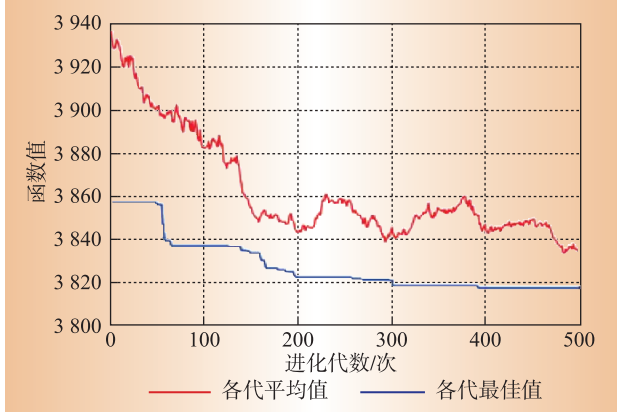


图4 种群进化过程
Fig. 4 The evolution process

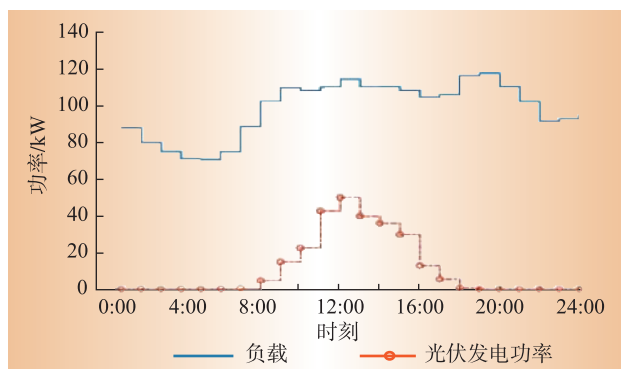


图5 智能小区有功功率和负荷情况

Fig. 5 Intelligent community active power and load situation

由图4可以看出,进化至400代时函数达到最优值。由图6可以看出,储能系统在高电价时段会减少从电网获取电能,而作为电源向外放电;在低电价时段,储能系统的充放电策略则刚好相反,优化的结果改变了原来无序的充放电。电动汽车会避免在高电价时段从电网中过多的获取电能,在峰时段之后,电动汽车提高了充电量,可以有效降低小区的运行费用。在12:00~13:00时段电动汽车的充电功率较未优化之前有所提高,原因是该时段光伏出力最大,此时充电可以提高光伏的就地消纳率。因此,可以看出引入储能和电动汽车,可以更好地利用光伏产生的电能。

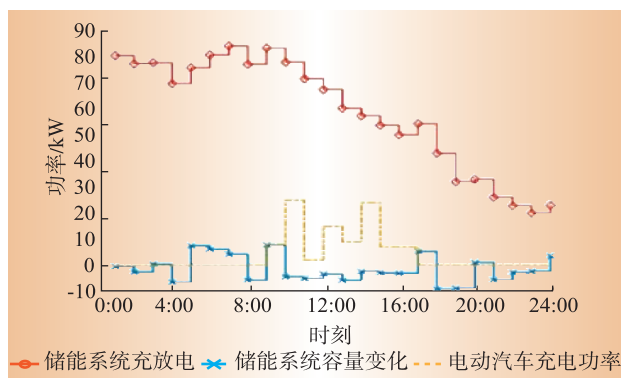


图6 优化后小区各元件有功功率

Fig. 6 Optimized active power of each component in the cell

5 结论

针对包含多种用能资源的智能小区需求响应优化调度问题,本文首先建立了包含储能、光伏和电动汽车的优化调度模型,设置目标函数为系统与电网的交换电量和总运行费用最小,然后利用多种群协同进化遗传算法获得优化结果。最后,通过算例验证模型的合理性。结果表明:① 储能系统可以在谷时段作为负荷从电网购电,在峰时段作为电源向外放电,以满足小区的负荷需求,从而降低小区

的运行费用;② 引入电动汽车可以提高光伏的消纳率,实现光伏发电的“自发自用”,降低系统运行成本;③ 同时引入储能和电动汽车可以使智能小区在谷时段多从电网获取电能,在峰时段减少从电网获取电能,从而降低运行费用。D

参考文献:

- [1] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.
CHEN Shuyong, SONG Shufang, LI Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [2] 董军,王秉晶,冯琪,等. 国外电力需求响应研究与实践[J]. 电力需求侧管理,2014,16(5):62-64.
DONG Jun, WANG Bingjing, FENG Qi, et al. Demand response research and practice at abroad[J]. Power Demand Side Management, 2014, 16(5): 62-64.
- [3] 李作锋,陈振宇. 江苏电力需求响应的探索和实践[J]. 电力需求侧管理,2018,20(1):4-8.
LI Zuofeng, CHEN Zhenyu. The exploration and practice of Jiangsu power demand response[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 4-8.
- [4] 王卿然,谢国辉,张粒子. 含风电系统的发用电一体化调度模型[J]. 电力系统自动化,2011,35(5):15-18.
WANG Qingran, XIE Guohui, ZHANG Lizi. An integrated generation-consumption dispatch model with wind power[J]. Automation of Electricity Power Systems, 2011, 35(5): 15-18.
- [5] 黄伟,黄婷,周欢,等. 基于改进微分进化算法的微电网动态经济优化调度[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):211-217.
HUANG Wei, HUANG Ting, ZHOU Huan, et al. Dynamic economic optimization scheduling of microgrid based on improved differential evolution algorithm[J]. Automation of Power Systems, 2014, 38(9): 211-217.
- [6] 苏粟,蒋小超,王玮,等. 计及电动汽车和光伏-储能的微网能量优化管理[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):164-171.
SU Su, JIANG Xiaochao, WANG Wei, et al. Optimal energy management for microgrids considering electric vehicles and photovoltaic-energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 164-171.
- [7] 葛少云,郭建伟,刘洪,等. 计及需求响应及区域风光出力的电动汽车有序充电对电网负荷曲线的影响[J]. 电网技术,2014,38(7):1 806-1 811.
GE Shaoyun, GUO Jianwei, LIU Hong, et al. Impacts of electric vehicle's ordered charging on power grid load curve considering demand side response and output of regional wind farm and photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1 806-1 811.

- [8] 王成山,洪博文,郭力.不同场景下的光蓄微电网调度策略[J].电网技术,2013,37(7):1 775-1 782.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li. Dispatch strategies of PV-battery microgrid in different scenarios[J]. Power System Technology, 2013, 37(7):1 775-1 782.
- [9] 姜勇,杨雪纯,王蓓蓓,等.计及需求响应不确定性的智能用电双向互动仿真[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(9):48-55.
JIANG Yong, YANG Xuechun, WANG Beibei, et al. Simulation of smart power consumption and bilateral interaction considering uncertainty of demand response[J]. Proceedings of the CSUEPSA, 2016, 28(9):48-55.
- [10] 孔菁,李广凯,王庆红,等.智能电网技术在电力系统规划中的应用与发展趋势[J].科技创新与应用,2018(27):42-46.
KONG Jing, LI Guangkai, WANG Qinghong, et al. Application and development trend of smart grid technology in power system planning [J]. Technology innovation and application, 2018(27):42-46.
- [11] JIAN L, XUE H, XU G, et al. Regulated charging of plug-in hybrid electric vehicles for minimizing load variance in household smart microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8):3 218-3 226.
- [12] 徐智威,胡泽春,宋永华,等.充电站内电动汽车有序充电策略[J].电力系统自动化,2012,36(11):38-43.
- XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicles in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11):38-43.
- [13] BARLEY C D, WINN C B. Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems[J]. Solar Energy, 1996, 58(4-6):165-179.
- [14] JENKINS D P, FLETCHER J, KANE D. Lifetime prediction and sizing of lead-acid batteries for microgeneration storage applications[J]. IET Renewable Power Generation, 2008, 2(3):191-200.
- [15] 陈皓勇,王锡凡,别朝红,等.协同进化遗传算法及其在电力系统中的应用前景[J].电力系统自动化,2003,27(23):94-100.
CHEN Haoyong, WANG Xifan, BIE Chaohong, et al. Cooperative co-evolutionary approaches and their potential applications in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23):94-100.
- [16] 胡晓非,罗庚玉.安徽省峰谷电价分析与展望[J].电力需求侧管理,2004,6(6):32-34.
HU Xiaofei, LUO Gengyu. Analysis and prospect on peak-valley price of Anhui province[J]. Power Demand Side Management, 2004, 6(6):32-34.

作者简介:

杨斌(1977),男,江苏苏州人,本科,高级工程师,研究方向为智能用电、港口岸电、需求响应等。

(上接第9页)

- [7] 张艳娟,苏小林,闫晓霞,等.基于电动汽车时空特性的充电负荷预测[J].电力建设,2015,36(7):75-82.
ZHANG Yanjuan, SU Xiaolin, YAN Xiaoxia, et al. A method of charging load forecast based on electric vehicle time-space characteristics[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(7):75-82.
- [8] 王耀武.电动汽车负荷预测方法适用性与应用研究[D].北京:北京交通大学,2015.
WANG Yaowu. Research on the applicability and application of electric vehicle load forecasting methods [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [9] 胡泽春,宋永华,徐智威,等.电动汽车接入电网的影响与利用[J].中国电机工程学报,2012,32(4):1-9.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4):1-9.
- [10] 罗雯清.计及风光储发电和电动汽车的配电网规划[D].上海:上海交通大学,2013.
LUO Wenqing. Distribution network planning with wind turbine, photovoltaic system, storage system and electric vehicles [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [11] 韩洪兴.含有微电网与电动汽车充电设施的配电网规划[D].北京:华北电力大学,2012.
HAN Hongxing. Distribution networks planning containing micro-grid and electric vehicle charging facilities [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [12] CELLI G. Distribution network planning in presence of fast charging stations for EV[C]//22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), Stockholm, Sweden, 2013, 1-4.
- [13] 寇凌峰.电动汽车大规模接入对电网的影响分析[D].北京:华北电力大学,2011.
KOU Lingfeng. A study on the impact of the large-scale electric vehicle on power grid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

作者简介:

吴奇珂(1992),男,安徽芜湖人,硕士研究生,主要研究方向为能源互联网、需求响应;

陈昕儒(1993),男,安徽巢湖人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车、需求侧管理。