

含电动汽车的微电网规划研究

林 婷, 高 亮

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘 要:作为新型环保节能汽车, 电动车的应用规模正在迅速增长, 将电动车纳入微网也是电网发展的趋势。电动汽车电力需求灵活, 且能量具有双向流动性, 成为当前微电网平衡负荷的重要组成部分。该文建立一个含电动汽车的微电网经济调度模型, 并在算例中采用 Lingo 软件进行求解。通过改进模型调节微网中的各项能源出力, 并在优化目标中加入环境治理成本, 得出接入微电网的最优电动汽车组合, 实现降低微网能源损耗、提高资源利用率的目标。

关 键 词:电动汽车; 微电网; 电网规划; 成本优化

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.007 中图分类号: TM715 文章编号: 1673-9140(2021)04-0053-06

Planning research of micro-grid with electric vehicles

LIN Ting, GAO Liang

(Electric Power Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: As the new environmentally friendly and energy-saving vehicle, the application scale of electric vehicles is increasing rapidly. Bringing electric vehicles into micro-grid is also the development trend of the power grid. The electric vehicle, having properties of flexible power demand and bidirectional energy fluidity, has become a significant part of balancing loads in the micro-grid. In this paper, an economic dispatch model of micro-grid with electric vehicles is established, and the Lingo software is utilized to solve the optimization problem. The power supply of various kinds of energy is adjusted through the improved model. The optimal combination of electric vehicles in the micro-grid is obtained by considering the cost of environmental governance in the optimization goal, which reduces energy loss and improves the utilization of resources.

Key words: electric vehicles; micro-grid; planning research of micro-grid; cost optimization

微网作为一种将可再生能源、清洁能源、储能装置以及各类负载组成一个小型电力网络的系统模式, 在大电网中发挥着日益重要的作用。它不仅可以作为分布式电源与大电网能量交换的桥梁, 也为电网中的负荷消纳起到了良好的作用^[1]。通过微电

网接入的新能源, 如风、光、储等分布式电源可以在当地起到很好的负荷调节作用, 平滑负荷曲线, 突显出了比大电网更好的经济效益。但风能、太阳能的波动性和随机性、负荷曲线的多变性以及电源出力的复杂性使得微电网的运行调度面临较大困难, 因

此,电力系统对于微电网的优化规划提出了更多的新要求^[2]。

电动汽车(electric vehicles, EVs)作为新能源汽车,其成熟的充电技术、低廉的价格以及几乎为零的燃油费用受到市场发展的青睐。随着使用规模的扩大,这一负荷群体开始受到了电网的关注。电动汽车具有充放电可调性质,在接入电网时又具有双重角色:可作为负载充电以及作为电源向电网负荷供电。因此,研究将电动汽车纳入微电网,从而优化微网资源配置,可以提高微网经济性和稳定性,改善系统的动态性能^[3-4]。该文在当前研究基础上建立含有电动汽车的微网经济调度模型,并通过算例利用Lingo软件进行优化分析,提出最优的电动车运行组合模式,与此同时,将环境治理成本加入优化目标函数,实现能源利用率最高、成本最低的优化目的。

1 含电动汽车的微电网规划模型构建

该文的微电网模型是由风/光/储发电模型及电动汽车充放电模型组合而成。

1.1 风力发电出力模型

风力发电受限于当地的天气气候,该文利用Homer软件,通过确定目的地的经纬度,可随机生成目的地一年中每小时的风能额定输出功率。风能发电机的输出功率为

$$P_{WT}(t) = \frac{S_{WT} \cdot n_{WT}}{S_w} \cdot P_w(t) \quad (1)$$

式中 S_{WT} 为风机的装机容量; n_{WT} 为风机的台数; S_w 为当地风能的容量; $P_w(t)$ 为在 t 时刻的风能功率。

1.2 光伏发电出力模型

光伏发电的输出功率为

$$P_{PV}(t) = \frac{s_{PV} \cdot n_{PV}}{S_s} \cdot P_s(t) \quad (2)$$

式中 s_{PV} 为每个光伏电池的额定容量; n_{PV} 为光伏电池的数量; S_s 为当地太阳能的容量; $P_s(t)$ 为太阳能在 t 时刻的照射在光伏电池上的功率。

1.3 柴油发电机出力模型

柴油发电机作为分布式电源(diesel generator, DG)经常在风、光等新能源电源无法满足负荷需求

时作为备用电源,以平衡负荷产生的峰值。

$$P_{N_{\min}} \leq P_{DG} \leq P_{N_{\max}} \quad (3)$$

式中 $P_{N_{\min}}$ 、 $P_{N_{\max}}$ 分别为微型燃气轮机额定输出功率的上、下限。

1.4 蓄电池储能系统模型

蓄电池储能模型中有3个重要的参数:电池容量、荷电状态(state of charge, SOC)、额定充放电功率。为了保证储能电池的使用寿命,一般需要让储能电池的SOC值保持在30%~90%。

$$Q = \frac{B_{\text{left}}}{B_N} \quad (4)$$

式中 Q 为荷电状态值; B_{left} 为储能电池中剩余电荷容量; B_N 为储能电池的额定容量。

额定充放电功率为

$$P_{SB}(t) = 0.2B_N \quad (5)$$

蓄电池放电时 $P_{SB}(t) \geq 0$, t 时刻剩余电荷容量为

$$B_{SB}(t) = B_{SB}(t-1) - \frac{P_{SB}(t)}{\eta_D} \quad (6)$$

蓄电池充电时 $P_{SB}(t) \leq 0$, t 时刻剩余容量为

$$B_{SB}(t) = B_{SB}(t-1) - P_{SB}(t) \cdot \eta_C \quad (7)$$

其中, η_D 为蓄电池额定放电效率; η_C 为额定蓄电池充电效率。 t 的步长为1h。

1.5 电动汽车EV充放电功率模型

电动汽车的充放电功率模型与蓄电池冲放电功率模型相似,当电动汽车作为电源接入微电网,并向微电网放电时, $P_{EV}(t) \geq 0$, t 时刻电动汽车的剩余容量为

$$B_{EV}(t) = B_{EV}(t-1) - \frac{P_{EV}(t)}{\eta_{EV,D}} \quad (8)$$

当电动汽车作为负荷需要充电时, $P_{EV}(t) \leq 0$, t 时刻剩余容量为

$$B_{EV}(t) = B_{EV}(t-1) - P_{EV}(t) \cdot \eta_{EV,C} \quad (9)$$

其中, $P_{EV}(t)$ 为电动汽车额定充放电功率; $\eta_{EV,D}$ 、 $\eta_{EV,C}$ 分别为电动汽车的额定放电和充电效率^[5-6]。

2 投资成本规划目标函数

经济成本分析需要考虑整个微电网的寿命周期内系统初始设备成本 C_{Eq} 、设备置换成本 C_{Rep} 、燃料成本 C_{Fuel} 以及运行和管理费用 C_{OM} 、电动汽车与微电网的交互费用 C_{EV} , 不考虑微电网的安装调

试成本和停电成本^[7-8]。一般微电网规划寿命周期为 25 a。微电网系统总成本可表示为

$$C_{LCC} = C_{Eq} + C_{Fuel} + C_{OM} + C_{Rep} + C_{EV} \quad (10)$$

$$C_{Eq} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot P_i \quad (11)$$

$$C_{Rep} = r_n \cdot C_{re} \quad (12)$$

$$C_{OM} = l_p \cdot \sum_{i=1}^n C_{om,i} \quad (13)$$

$$C_{Fuel} = l_p \cdot C_{fuel} \cdot \sum_{t=1}^{8760} P_{DG}(t) \quad (14)$$

$$C_{fuel} = C \cdot L \quad (15)$$

$$C_{EV} = -c_D \cdot Q_D + c_C \cdot Q_C \quad (16)$$

式(10)~(16)中 n 为微电网中包含的分布式电源种类; c_i 为第 i 种电源的单位功率成本; P_i 为第 i 种电源额定功率; r_n 为置换次数, $r_n = [l_p / l_n]$, l_p 为工程寿命周期, l_n 为设备 n 的使用寿命; $C_{om,i}$ 为第 i 种分布式电源单位容量的一年所需运行管理成本; C_{fuel} 为柴油机发一度电(1 kW·h)所需要的燃料价格; $P_{DG}(t)$ 为柴油发电机产生的发电功率; C 为柴油价格; L 为柴油机发一度电所需要的柴油量; c_D 为放电电价; Q_D 为放电电量; c_C 为充电电价; Q_C 为充电电量。

$$Q_D = P_{EV_D} \cdot t_D \quad (17)$$

$$Q_C = P_{EV_C} \cdot t_C \quad (18)$$

式(17)、(18)中 P_{EV_C} 、 P_{EV_D} 分别为电动汽车的充、放电功率; t_C 、 t_D 分别为充、放电时间。当微电网与电动汽车 EV 交互时, EV 充电电价为 0.6 元/(kW·h); 当 EV 向微网供电时, 优化后的分时电价: 峰时段为 0.910 6 元/(kW·h); 平时段为 0.134 元/(kW·h)。

3 约束条件

系统首先需要满足负荷功率平衡约束。

$$P_L = P_{WT} + P_{PV} + P_{DSG} + P_{SB} + P_{EV} \quad (19)$$

其中, P_L 表示与微电网连接的负荷。

微源输出功率约束条件需要满足:

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (20)$$

式中 $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为第 i 种分布式电源的输出功率上、下限。

蓄电池充放电约束函数:

$$Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max} \quad (21)$$

式中 Q_{\min} 为蓄电池中 SOC 最小值, $Q_{\min} = 30\%$; Q_{\max} 为蓄电池中 SOC 最大值, $Q_{\max} = 90\%$ 。

4 含电动汽车的微电网规划分析

4.1 原始数据说明

该文利用 Homer 软件中的风机模型以及光伏模型随机生成目的地一年中每小时的风、光能输出功率。根据该地区可利用的太阳能资源以及风电资源的具体情况, 光伏发电容量上限达到了 100 kW, 风机发电的容量上限取 33 kW(单个风电机组的容量上限为 3 kW), 蓄电池组取最大容量上限为 100 kW, 蓄电池的容量为 100 kW, 柴油发电机的容量上限为 250 kW。该文微网的规划年限为 25 a, 仿真中设置柴油的价格为 5.5 元/L, 发一度电需要 0.32 L 柴油。分布式电源参数设置如表 1 所示。

表 1 分布式电源参数

Table 1 Parameters of distributed power

分布式电源类别	容量/kW	设备投资/元	置换费用/元	使用寿命/a	运行管理费用/(万元/a)
光伏发电	100	3 065	2 554	25	10
风机	33	6 130	5 109	25	150
柴油机	250	345	288	8	438
蓄电池	100	230	192	4	50

4.2 模型优化计算

交互式的线性和通用优化求解器 Lingo 软件是一套专门用于求解最优化问题的软件包, 可以求解非线性规划, 且执行速度快, 是求解优化模型的最优选择^[9-10]。

为了确保优化结果的准确性, 该文选取一年中负荷最大的 24 h 生成负荷曲线, 从中分析微电网各项电源的出力情况。规划时间从前日 19:00 至翌日 18:00, 负荷曲线起点 1 表示前日 19:00, 以此类推。

无电动汽车接入(方案 1)、有 10 台电动私家车接入(方案 2)的微网 24 h 负荷曲线及微源出力曲线分别如图 1、2 所示。由优化结果可知, 风力发电在该案例中优化结果为 0, 推测该地风力资源不足。在接入电动汽车之前, 柴油机与负荷曲线相一致, 表明柴油机在微网中承担着大部分平衡负荷的作用。

引入 10 台电动私家车后,电动汽车在第 14 小时(08:00)接入微电网后开始向微网放电,第 23 小时(16:00)从微电网充电。在放电时间段内,电动汽车放电功率很大程度上替代了其他微源的出力,起到了平衡微电网负荷的作用。计及约束条件对微电网的出力成本情况计算后可得,在未接入电动汽车前,微网最优投资成本为 624.3 万元,接入私家电动车后,其最优投资成本为 564.1 万元,显著减少了微源投入的成本,达到了良好的优化效果。因此,将电动汽车纳入微网的系统模式可以有效提高能源的利用率,降低微网的能源损耗。

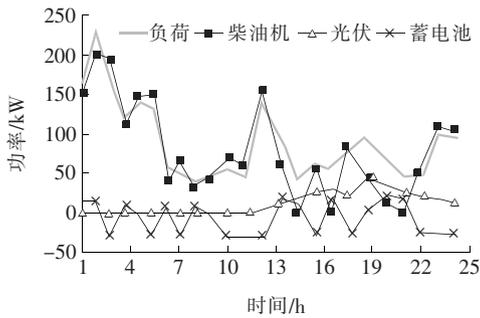


图 1 无电动汽车接入的微网 24 h 负荷及微源出力曲线(方案 1)

Figure 1 The curves of 24 h-load and micro-source output of micro-grid without EV

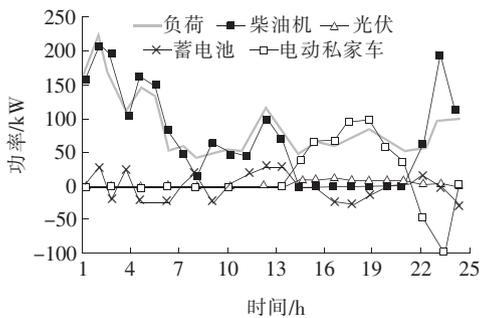


图 2 接入 10 台私家电动汽车的微网 24 h 负荷及微源出力曲线(方案 2)

Figure 2 The curves of 24 h-load and micro-source output of micro-grid with 10 private EVs

4.3 电动汽车(EVs)最优组合

该文将电动私家车和电动大巴 2 种类型的电动汽车接入微网,考虑不同类型 EVs 对微网的影响情况,从而选择最优的组合模式。由于 2 种类型电动车使用时间段不同,该文设定电动大巴与微网连接时间段为 19:00 至翌日 07:00,电动私家车与微网连接时间段为 08:00—18:00,各类电动车在接入微网的时间内进行充放电。2 种电动汽车模型参数如

表 2 所示。

分别接入 5 辆电动大巴(方案 3)、10 辆电动私家车和 5 辆电动大巴(方案 4)、电动汽车最优组合(方案 5)后的优化运算结果如图 3~5 所示。

表 2 2 种电动汽车模型的参数

Table 2 Parameters of two kinds of EVs

电动车型	电池容量/Ah	充电功率/kW	充电方式
私家车	63.3	9.6	慢充 4~6 h
大巴	324.0	45.6	快充 3 h/慢充 6 h

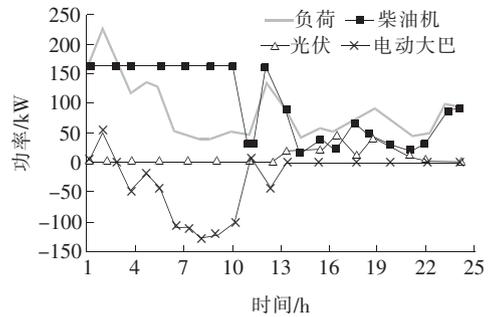


图 3 含 5 台电动大巴的微网 24 h 负荷及微源出力曲线(方案 3)

Figure 3 The curves of 24h-load and micro-source output of micro-grid with 5 electric buses

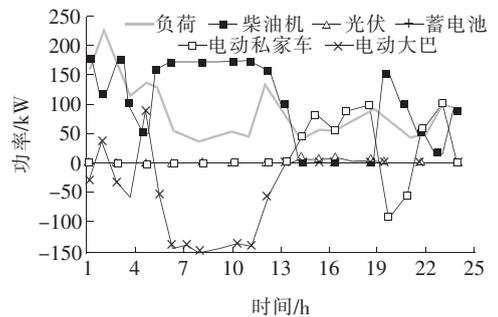


图 4 含 10 台私家车及 5 台大巴的微网 24 h 负荷及微源出力曲线(方案 4)

Figure 4 The curves of 24 h-load and micro-source output of micro-grid with 10 private EVs and 5 electric buses

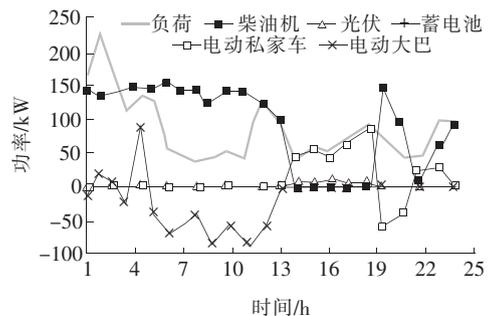


图 5 电动汽车最优组合的微网 24 h 负荷及微源出力曲线(方案 5)

Figure 5 The curves of 24 h-load and micro-source output of micro-grid with the optimal combination of EVs

由图 3 可知,单独接入微网的 5 台电动大巴仅有约 3 h 时间会对微网放电,其余时间充当负荷从微网充电,若仅有电动大巴加入微网,势必会加大微源负担,增加系统运行成本。由图 4 可知,当电动大巴与私家车一同接入微网后,柴油机的出力与只接入大巴时的出力相同,而太阳能电池出力与总的投资成本均有明显下降。这是由于电动私家车接入微网后大部分时间可担任微源向微网供电,有效补充了大巴接入后的能源损耗,使得资源得到了合理的配置和应用。通过改进模型,利用 Lingo 软件的非线性规划进行优化后得出的各微源出力曲线见图 5。

在该文假设的微网规模下,接入 8 台电动私家车和 3 台电动大巴是最优组合,此时太阳能、风电出力几乎为零,投资成本最优,各方案投资成本优化结果如表 3 所示。

表 3 电动车接入微网方案优化结果

Table 3 Optimization results of micro-grid with EVs

方案	功率/kW				最优投资成本/万元
	柴油机	太阳能电池	风机	蓄电池	
1	201	95	0	100	624.3
2	221	26	0	100	564.1
3	166	81	0	0	730.5
4	166	12	0	0	669.7
5	153	0	0	100	524.8

4.4 环境治理成本对于微电网投资的影响

1) 环境治理成本。

能够产生环境污染的微源有很多^[11-12],例如:柴油机、微型燃气轮机等。该文中的微电网只使用了柴油机,所以环境治理成本主要由柴油机产生:

$$C_{env} = \sum_n \alpha_n E_n \quad (22)$$

式中 C_{env} 为环境治理成本; n 为污染气体种类,例如: CO_2 、 SO_2 、 NO_x 等; α_n 为污染气体 n 的单位治理成本; E_n 为污染气体 n 的排放量。

柴油发电机单位治理成本如表 4 所示。

表 4 柴油机的污染物组成及治理成本

Table 4 Pollutant composition and treatment cost of diesel engine

污染物类型	治理成本/(元/kg)	污染物排放系数/(g/(kW·h))
CO_2	0.210	649.000
SO_2	14.842	0.206
NO_x	62.964	9.890

2) 计及环境治理成本的投资成本分析。

计及环境治理成本的总投资成本为

$$C = C_{LCC} + C_{env} \quad (23)$$

将治理成本加入目标函数后,用 Lingo 软件对无电动汽车不计环境治理成本(方式 1)、无电动汽车计及环境成本(方式 2)、最优电动车组合计及环境成本(方式 3)3 种方式进行优化运算,结果如表 5 所示。

表 5 环境治理成本的规划结果

Table 5 Planning results considering the cost of environmental governance

方式	功率/kW				最优投资成本/万元
	柴油机	太阳能电池	风机	蓄电池	
1	201	95	0	100	624.3
2	176	137	0	90	766.7
3	107	60	0	120	716.4

对比分析方式 1、2 可知,当不计及环境治理成本时,微网系统主要由柴油机出力,投资成本较低;计及环境治理成本后太阳能电池也将承担一部分功率,以减少柴油出力带来的环境损耗。但与此同时,由于太阳能电池成本较高,总投资成本也会相应上升。而将最优电动车组合纳入微网后,电动车可作为微源向网络提供电能,有效地减少了柴油机及太阳能电池的出力,在确保环保节能的前提下实现了投资成本最低。虽然相比于方式 1,投资成本有所上升,但站在能源的长远发展角度来看^[13],在可接受的投资成本范围内能实现最优环境治理是有重要现实意义的,这也是当前微网规划需要重视的方向,平衡投资成本与环境治理之间的矛盾,做到既节能高效又价廉环保^[14-15]。

5 结语

基于当前电动汽车入网规模持续增长的背景,该文在微电网规划中加入电动汽车模型,利用 Lingo 软件实现非线性最优规划,得出在投资成本最低情况下的电动车入网最优组合模式,实现微电网的能量高效流动性,提高能源利用率。通过分析可知,电动私家车在组合入网时可以有效平滑负荷曲线,可作为补充微源,为微网的稳定运行提供支持。同时,该文考虑了环境因素对微电网规划造成的约束,将环境治理成本引入目标函数,得出在计及环境治理成本后的最优投资成本运行方案,为当前多种类电

动车入网规划问题提供了有效的参考,具有实际应用意义。

参考文献:

- [1] 周天沛,孙伟.基于微网的电动汽车与电网互动技术[J].电力系统自动化,2018,42(3):98-104+117.
ZHOU Tianpei, SUN Wei. Electric vehicle-to-grid technology based on microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3):98-104+117.
- [2] 李虹,刘瑞叶,高挺.考虑风电消纳的电动汽车有序充电策略研究[J].电力科学与技术学报,2017,32(1):16-22.
LI Hong, LIU Ruiye, GAO Ting. Research on coordinated charging strategy of electric vehicles considering wind power accommodation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1):16-22.
- [3] 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.
- [4] 张钰,张玥,韩新阳,等.碳排放最小化条件下电动汽车有序充电策略研究[J].中国电力,2020,53(4):147-154.
ZHANG Yu, ZHANG Yue, HAN Xinyang, et al. Research on electric vehicle smart charging strategy on carbon emission minimization[J]. Electric Power, 2020, 53(4):147-154.
- [5] 周天沛,孙伟.基于充电设备利用率的电动汽车充电路径多目标优化调度[J].电力系统保护与控制,2019,47(4):115-123.
ZHOU Tianpei, SUN Wei. Multi-objective optimal scheduling of electric vehicles for charging route based on utilization rate of charging device[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4):115-123.
- [6] 杨祺铭,季陈林,刘友波,等.多条公交线路的光储充电站日内滚动优化策略[J].智慧电力,2020,48(8):44-50.
YANG Qiming, JI Chenlin, LIU Youbo, et al. Day-roll optimization strategy for photovoltaic-energy storage charging station with multiple electric bus lines[J]. Smart Power, 2020, 48(8):44-50.
- [7] 张虹,申鑫,葛得初,等.基于全局和局部最优模型的电动汽车充放电优化调度[J].电力系统保护与控制,2020,48(6):1-9.
ZHANG Hong, SHEN Xin, GE Dechu, et al. Optimal scheduling of charging and discharging of electric vehicles based on global and local optimal model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6):1-9.
- [8] 张海燕,王东,樊平,等.基于加权 Voronoi 图和 GA-PSO 的电动汽车充电站最优规划[J].电网与清洁能源,2019,35(5):77-82.
ZHANG Haiyan, WANG Dong, FAN Ping, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations based on weighted Voronoi diagram and GA-PSO[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(5):77-82.
- [9] 刘祥国.含电动汽车的微电网最优经济调度[D].济南:山东大学,2017.
- [10] 邓皓,崔双喜,孙彦萍,等.孤岛微网中风光储混合建模及仿真研究[J].高压电器,2019,55(10):141-147.
DENG Hao, CUI Shuangxi, SUN Yanping, et al. Study on modeling and simulation of the wind/PV/storage hybrid in islanding micro-grid system[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10):141-147.
- [11] 马立新,徐嘉辉,杨天笑.基于 MPSO 算法含电动汽车的微网优化调度[J].电网与清洁能源,2020,36(8):116-122.
MA Lixin, XU Jiahui, YANG Tianxiao. Optimal scheduling of microgrid with electric vehicles based on MPSO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8):116-122.
- [12] 袁小溪.含电动汽车的风光储微网容量配置与运行调度策略[D].北京:北京交通大学,2017.
- [13] 陈中,段然,黄学良,等.计及电动汽车主动充电管理的配电网与充电站协同规划[J].电测与仪表,2019,56(20):17-23.
CHEN Zhong, DUAN Ran, HUANG Xueliang, et al. Collaborative planning of distribution network and EV charging stations considering active charging management[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(20):17-23.
- [14] Else Veldman. Distribution grid impacts of smart electric vehicle charging from different perspectives[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1):333-342.
- [15] Li T H S, Lee M H, Lin C W, et al. Design of autonomous and manual driving system for 4WIS4WID vehicle[J]. IEEE Access, 2016, 4:2256-2271.