

# 基于电动汽车群接入的光储充放一体化微电网系统研究

何照安, 沈迪, 刘源, 李攀, 王昊

(西安特锐德智能充电科技有限公司 陕西 西安 710000)

**摘要:** 基于电动汽车群接入的光储充放一体化微电网系统研究, 对电网的经济稳定运行和低碳的实现具有重要意义。以光储充放一体化微电网系统为研究对象, 将工业园区的变配电、光伏、储能、充放电等各子系统进行高度整合, 实现了用户侧的经济用电, 平抑电网接口峰谷差, 为就地消纳分布式清洁能源发电和充分利用配电容量提供了有效的保证。同时, 该微电网系统使得电网侧的能效大大提高, 具有与电网系统调度需求侧友好互动响应的特点。此外, 电力电子柔性调节装置的接入, 提高了系统的动态调节能力, 使该光储充放一体化微电网系统兼具调节无功和谐波抑制等电能质量调节的作用。

**关键词:** 电动汽车; 充放电; 分布式发电; 储能; 微电网

## Research on integrated photovoltaic, energy storage, electric vehicle charging and discharge microgrid system based on electric vehicle group access

HE Zhaoan, SHNE Di, LIU Yuan, LI Pan, WANG Hao

(Xi'an TGOOD Intelligent Charging Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Research on integrated photovoltaic, energy storage, charging and discharge of electric vehicles microgrid system based on electric vehicle group access is of great significance to the stable operation of the power grid and the realization of low carbon. The integrated micro-grid system of photovoltaic, energy storage and charging and discharge of electric vehicles is taken as the research object. The sub-systems of transformer and distribution, photovoltaic, energy storage, charging and discharging of electric vehicles in industrial parks are highly integrated to achieve economic power consumption on the user side, to reduce the peak-valley gap of power grid interface, and to provide an effective guarantee for local absorption of distributed clean energy generation and full utilization of distribution capacity. Moreover, the microgrid system greatly improves the energy efficiency of the grid side, and has the function of friendly interaction and response with the demand side of the grid system dispatch. In addition, the access of power electronic flexible regulator improves the dynamic regulation capability of the system, which makes the integrated micro-grid system of photovoltaic, energy storage, charging and discharging of electric vehicles have the functions of regulating reactive power and harmonic suppression.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0101900).

**Key words:** electric vehicle; charging and discharging; distributed generation; energy storage; microgrid

## 0 引言

在当今社会中, 汽车已经成为人们不可或缺的代步工具, 与传统内燃汽车相比, 电动汽车具有以下显著的优点<sup>[1-2]</sup>:

(1) 电动汽车可以解决汽车对石油资源的依赖;

(2) 电动汽车可以较好地解决汽车对城市环境污染的问题;

(3) 电动汽车可以显著提高能源利用率。

基于以上原因, 各国先后出台各种政策支持推动电动汽车的发展, 根据我国政府规划, 预计 2030 年, 全国将超过 8 000 万辆电动汽车<sup>[3]</sup>, 随着电动汽车的广泛普及, 电动汽车用户对快速充电设施的需求日益增加, 而大量充电负荷无序地接入电网, 对电网的瞬时冲击较大, 使得电网承受较大压力。另外, 随着越来越多的风电、光伏等分布式新能源不断接入电网, 如何将其发电出力的随机性与波动性的影响降至最低, 也成为了新能源大规模利用的

首要问题<sup>[4-5]</sup>。

微电网作为大电网的有益补充和延伸,不仅提供了一种分布式电源消纳机制,也提高了电网运行的可靠性,是分布式发电技术的发展趋势<sup>[6-8]</sup>。随着清洁能源和电动汽车的大规模发展,以及直流用电设备的增多,直流配电技术也得到了高度关注<sup>[9]</sup>。因此,从技术发展趋势看,利用电力电子技术将光伏、储能电池、电动汽车等各种直流电源和负载通过直流母线耦合,再通过双向变换的电力电子变换器与交流母线连接,构成交直流混合的新能源微电网系统,研究混合微电网中的运行、控制、管理等问题,对微电网技术的发展具有重大意义<sup>[10]</sup>。

以青岛特锐德工业园光储充放一体化微电网系统为例,首先,对青岛特锐德工业园内的光储充放一体化微电网项目进行简要介绍,其次,对光储充放一体化微电网系统的并网、离网运行方式控制策略进行了详细的阐述。该微电网系统采用智能化运行与管理方式,利用能源管理系统实现稳态经济运行和动态稳定控制,为分布式新能源消纳与利用、

大规模电动汽车有序充放电管理提供实现了商业化运营的基础条件,具有示范借鉴作用。

### 1 系统介绍

#### 1.1 系统组成

光储充放一体化微电网系统(详见图 1)是集高压配电、箱变和低压配电(含四象限变换、光伏、储能、电动汽车充放电、能源管理)柔性互联形成的交直流混合微电网系统,是针对园区应用的设计,可接入多种能源和负荷。运行方式以并网运行为主,通过能源管理系统和智能电力电子设备的调节控制,实现更经济的用能。10 kV 高压配电部分采用三面 SF6 充气式环网柜,分别起到进线、计量和出线作用;变压器采用一台 10 kV 干式双分裂变压器,型号为 SCB10-GF-1250/12;低压配电部分以四象限功率变换器和双向 DC-DC 变换器为核心元件,将新能源发电系统、电池储能系统和电动汽车充放电系统集成在一起,并通过能源管理系统进行监视、控制。

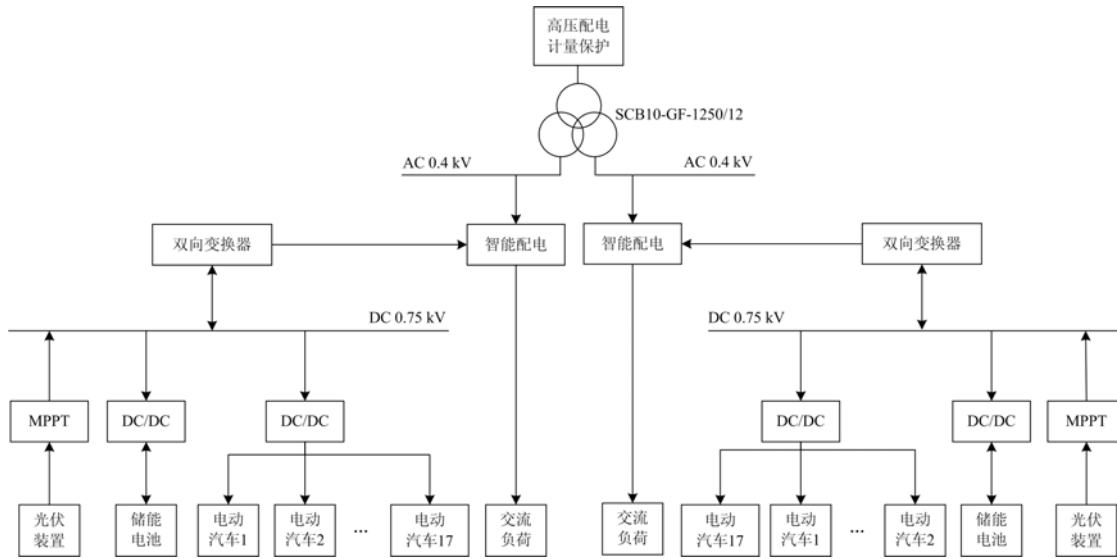


图 1 光储充放一体化微电网系统

Fig. 1 Optical storage and discharge integrated micro-grid system

#### 1.2 光伏系统简介

光伏系统提供整个微电网的直流电源,由两个 500 kW<sub>p</sub> 光伏阵列组成,每个 500 kW<sub>p</sub> 光伏阵列由 1 台 500 kW 的光伏逆变器、7 个直流汇流箱(十六汇一)、2 100 块 240 W<sub>p</sub> 的光伏组件组成。光伏阵列每 20 块串联为一组,每 15 回并联接入一台直流汇流箱,每 7 台直流汇流箱接入一台 500 kW<sub>p</sub> 光伏逆变器连接,经光伏逆变器整流后分别接入 DC765V 直流母线。

#### 1.3 储能系统

储能系统承担着为电网提供电能存储功能,电池是储能系统最重要的部分,本项目采用了 CATL 电池储能系统,共计 4 台,共 319.2 kWh,平均每台 79.8 kW,储能电池额定充放电功率 40 kW,工作电压 DC 582.4~759.2 V,标准充电时间 2 h,标准放电电流 0.5 C。

#### 1.4 电动汽车充放电系统

电动汽车是系统的主要直流负荷,每段直流母

线上均有直流终端 17 个, 其中 16 个直流 7 kW 充电桩, 为小型电动汽车充电, 一个直流 40 kW 充电桩, 为公交大巴充电, 共计 152 kW, 整个系统直流负荷为  $152 \text{ kW} \times 2 = 304 \text{ kW}$ 。

### 1.5 四象限变换器

四象变换器(图 2)是交直流变换的核心功率元件, 它结合了光伏逆变器和储能变流器的功能, 既可以将直流母线的电能馈送到交流电网, 又可以从交流电网向直流母线馈电。除了有功功率的变换外, 同时还可实现无功的变换和谐波补偿<sup>[11]</sup>。

四象变换器以单模块 50 kW 为一个基本单元。整体电路由 EMI 滤波、输入软起、维也纳整流、三电平全桥 LLC 谐振式和 DC/DC 变换等部分组成。各部分的作用分别是: EMI 滤波模块滤除高次谐波; 输入软起模块是为了减小启动时的冲击电流; 维也纳整流模块将交流电转换为直流电并维持一定电压, 还起到功率因数校正与谐波治理的作用; DC/DC 变换模块控制充电过程中的电流、电压。

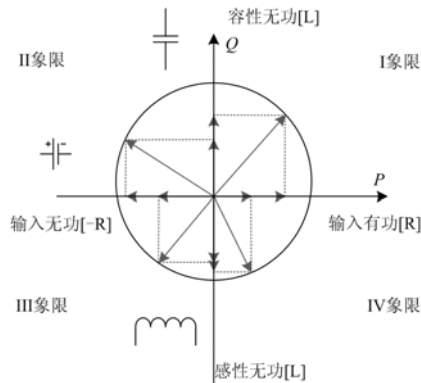


图 2 四象限变换器运行特性

Fig. 2 Operation characteristics of four-quadrant converter

### 1.6 能源管理系统

能源管理的目的是对系统内的源、荷、储和车等资源进行实时监测, 并根据系统运行工况做出统筹决策管理, 以最大程度地利用分布式发电能源, 保证电能质量最优及用户的经济效益最优, 而且可

以对配电网提供辅助性响应和协同调度服务<sup>[12]</sup>。此外, 还可以根据微网运行的工况做出判断, 与微网控制器协调工作, 对系统稳定性进行控制决策, 保障在离网运行时, 系统能够根据微网内部微电源和储能系统的发电工况, 使得发电和负载之间达到大时间尺度上的最佳匹配和平衡。

## 2 光储充放一体化微电网系统的运行模式

### 2.1 并网运营模式

在工业园区内, 电动汽车主要是电动通勤班车、员工电动汽车, 这些电动汽车具有很强的运行规律。基于以上分析, 电动汽车的充电行为和充电负荷是相对可控的。运营商就可以指定价格策略引导车主选择更经济的充电过程, 提供了“立即充电”和“经济充电”两种模式, “立即充电”表明车主有较强的充电需求, 可以接受更高的价格充电; 车主选择“经济充电”模式表明车主愿意接受系统的调度策略, 充电时间是夜间, 可以享受更优惠的充电服务费用, 整个系统的运营策略如图 3—图 6 所示。

(1) 在 09:30—18:30 时间段: 微电网系统将光伏发电最大程度供给生产负荷, 选择“立即充电”的车辆正常充电, 选择“经济充电”的车辆处于“排队”状态。如果在这个时间段, 光伏功率大于园区整体用电功率, 则可以给选择“经济充电”的车辆开始充电。如果当天光伏发电或者负荷用电的波动很大, 则系统根据波动情况, 将根据车辆排队的顺序, 重复发出开始充电、暂停、恢复充电、暂停、恢复充电等序列, 来适应光伏发电的波动。经济充电的原则是:  $P_{ev} \leq (P_V - P_L)$ , 仅当  $P_V > P_L$  时), 其中:  $P_{ev}$  为充电功率;  $P_V$  为光伏发电功率;  $P_L$  为生产用电功率。

(2) 在 18:30—21:30 时间段: 此时光伏系统已经不发, 系统调度电网和储能电池中的电量给车间负荷和选择“立即充电”车辆供电。

(3) 在 21:30—09:30 时间段: 电网给电动汽车和储能电池供电。

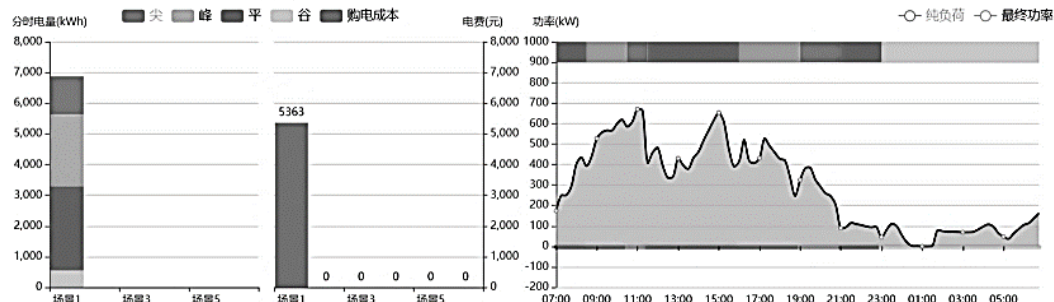


图 3 工业负荷曲线

Fig. 3 Industrial load diagram

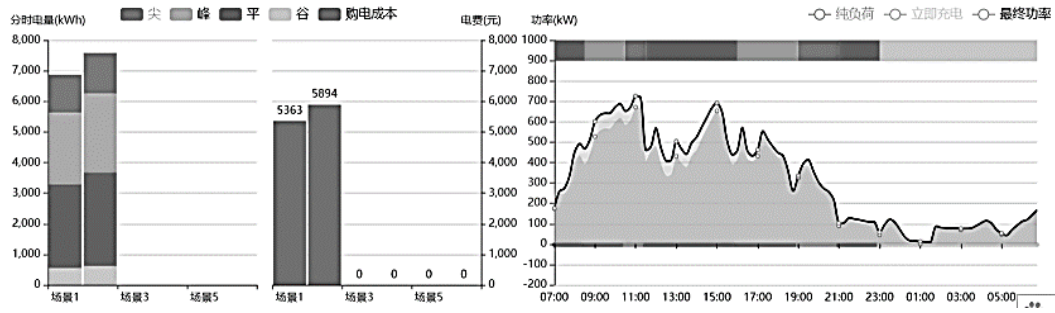


图 4 工业负荷+立即充电曲线  
Fig. 4 Industrial load + charging diagram

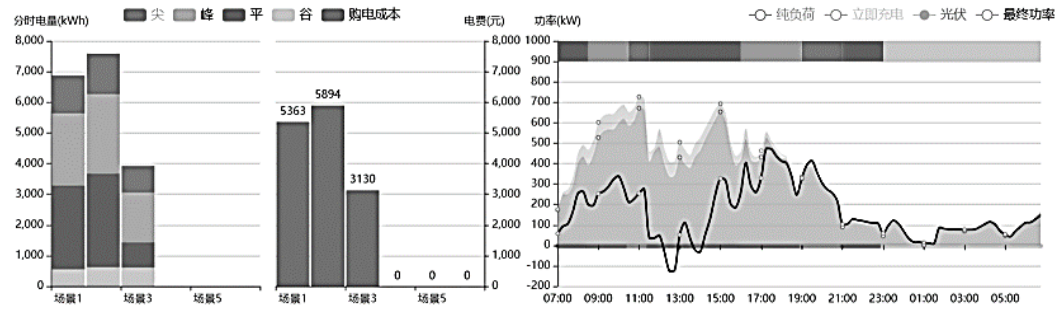


图 5 工业负荷+光伏+立即充电曲线  
Fig. 5 Industrial load + PV + charging diagram

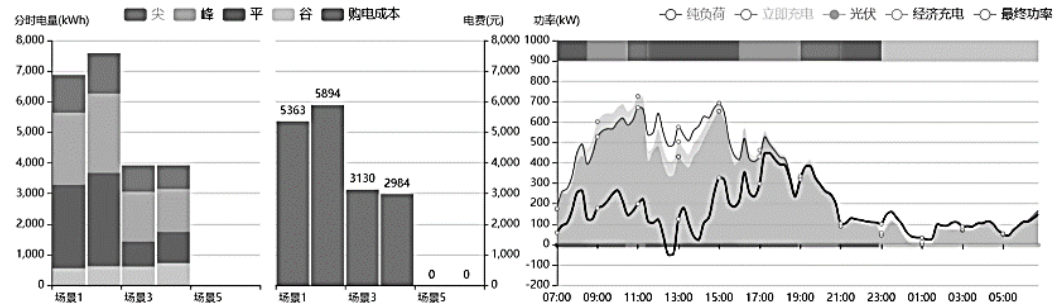


图 6 工业负荷+光伏+经济充电曲线  
Fig. 6 Industrial load + PV + order charging diagram

## 2.2 离网运行模式

在离网运行模式下，能量管理系统将对交流负荷进行分级，重要负荷与敏感负荷作为高优先级负荷保证其正常供电，低优先级负荷则被临时切除。因此，离网运行模式下的控制策略需要系统进行双级控制。将系统分为  $\mu$ EMS(微网控制器)功率瞬态控制和 EMS(能量管理系统)能量控制的双级系统控制策略如图 7 所示。将系统分为  $\mu$ EMS(微网控制器)功率瞬态控制和 EMS(能量管理系统)能量控制的双层系统控制策略。

图 7 中 M1—M7 分别为系统各处的电压和功率

测控点。一次控制层以四象限的 AC-DC 和储能电池的双向 DC-DC 为主要控制元件，通过监测关键点 M4、M5、M6 和 M7 的电压和功率，以 DC\_Bus 电压为控制目标。AC-DC 模块和 DC-DC 模块以  $\mu$ EMS 为一次集中控制中心，通过高速通信总线控制瞬态稳定直流母线的功率和交流并网点功率保持平衡，其目标是使得  $U_{dc} = U_{ed}$  ( $U_{ed}$  为直流母线额定电压，设计为 750 V， $U_{dc}$  为直流母线的运行电压)。任何一侧的功率波动，将引起  $U_{dc}$  的变化，当  $U_{dc}$  发生偏移时， $\mu$ EMS 将对 AC-DC 和 DC-DC 的电压、电流环发出调整指令，使  $U_{dc}$  趋向于  $U_{ed}$ ，

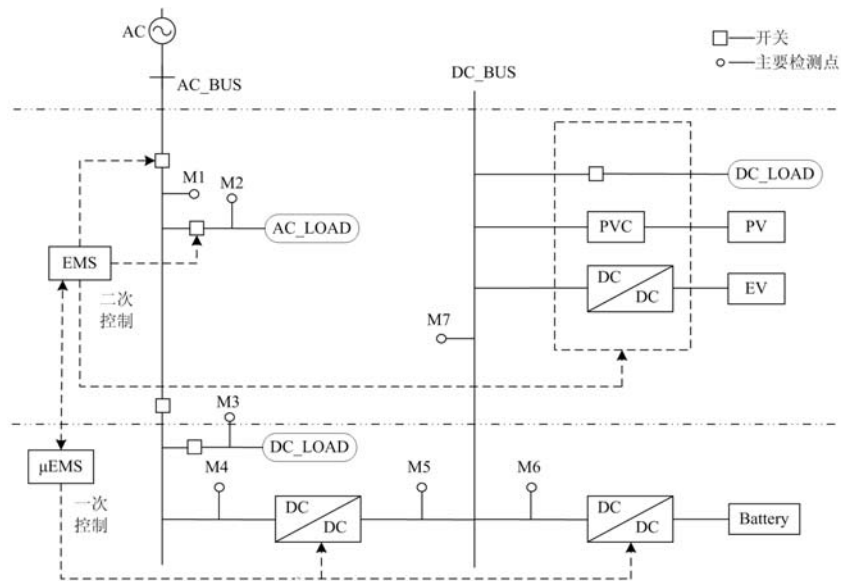


图7 系统控制策略

Fig. 7 System control strategy

这个计算过程与 AC-DC 和 DC-DC 的控制反馈环深度耦合, 具有极高的响应特性。M7 为光伏、电动汽车、直流负载的综合功率, 在二次控制系统中将其视为一种等效源或等效荷。由于光伏、直流负载和正在充电的电动汽车功率均有随机波动的特征, 但在一次控制层中, 这个波动被视为三种源/荷综合作用的结果, 在系统设计时其约束条件为保证 M6 和 M5 的动态调节能力在瞬态工况下大于 M7 的波动范围。

二次控制则是系统级 EMS 基于周期性的能量级平衡控制。其控制目标有两种: 一是基于 EMS 系统对负荷和光伏的预测, 在一定的周期内是可预测的, 且在该周期内的功率波动低于 AC-DC 和 DC-DC 的调节能力; 二是在预测数据的基础上, 当 EMS 监测到 M7 的稳态功率接近 M6 或 M5 的一次控制调节边界时, 通过干预控制 M7 内部的电动汽车充/放电功率(增大或减少充/放电功率)、直流负载功率(切除负荷)、光伏控制器的功率(限制发电最大功率), 使 M7 稳态功率重新回到一次控制的调节范围。

这种控制方法适合于并网和离网两种运行方式。当系统处在并网工作方式中,  $\mu$ EMS 一次控制的功率调节因子将主要或全部分配给 AC-DC 模块, 由 AC-DC 起主导调节作用。离网运行方式时, AC-DC 模块失去调节能力, 一次控制的调节因子将分配给 DC-DC 模块来进行调节。控制原则为一次控制以瞬态的功率调节为主, 二次调节以大周期性

的源荷发电/用电的能量平衡调节为主。因此, 这种控制方法是一种“功率瞬态与周期性能量稳态自适应平衡的控制策略”。

## 2.3 并网、离网的自动切换

### 2.3.1 并网模式到离网模式切换

微网控制单元通过检测快速开关单元的电气信息, 检测到满足并网到离网切换的状态后, 切换快速开关, 同时电力电子并网单元由并网的 PQ 控制模式, 转换为 VF 控制模式, 保证主要负荷的正常运行, 此时主要负荷的供电转入离网运行模式。在切换过程中, 微网控制单元对次要负荷进行减载, 简化了系统的控制复杂度, 实现了系统的稳定可靠运行。

### 2.3.2 离网模式到并网模式切换

微网控制单元通过检测并网点的电气信息, 检测到电网恢复供电后, 控制离网供电的电力电子单元, 实现与电网同期(同频、同相、同幅值、同频率), 当能量管理控制单元确定快速开关两侧实现了同期, 控制快速开关与电力电子单元配合切换, 实现离网运行模式到并网运行模式的切换。

## 3 结论

青岛特锐德工业园区采用光储充放一体化微电网系统之后, 系统低压配电、光伏、储能和电动汽车充放电子系统实现了深度融合, 使整个工业园区日用电量由 7 000 kWh 降低到约 4 000 kWh, 投资成本降低近 30%。整个微电网系统采用交直流双母线

系统, 直流源、荷直接在直流侧消纳吸收, 从而将系统能量转换效率提高了20%以上, 而且通过能量管理系统使电动汽车有序参与充电, 达到了削峰填谷的作用, 该项目对微电网系统的实际推广具有广泛的借鉴和参考意义<sup>[13-15]</sup>。

### 参考文献

- [1] 马杰. QY 电动汽车公司 ERP 项目实施研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.  
MA Jie. The study on the ERP implementation in QY electric vehicle company[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [2] 王龙. 电动汽车充放电对电网的影响及其优化策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
WANG Long. Research on the impacts of electric vehicles charging and discharging on the power system and its optimal strategy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [3] 许晓慧, 徐石明. 电动汽车及充电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [4] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制 2013, 41(13): 140-148.  
MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 140-148.
- [5] 宣宁平, 钟成元, 朱乾龙. 计及电动汽车充电负荷的微电网优化配置研究[J]. 供用电, 2018, 35(4): 26-31.  
XUAN Ningping, ZHONG Chengyuan, ZHU Qianlong. Optimal allocation of microgrid with integration of electric vehicles load[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(4): 26-31.
- [6] 叶晨晖, 周玲, 张木银, 等. 计及可入网电动汽车的微电网电源优化配置[J]. 电力建设, 2016, 37(12): 82-88.  
YE Chenhui, ZHOU Ling, ZHANG Muyin, et al. Optimal configuration of microgrid power supply considering plug-in electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(12): 82-88.
- [7] 李更丰, 别朝红, 谢海鹏, 等. 主动配电系统的可靠性评估研究[J]. 供用电, 2016, 33(2): 8-18.  
LI Gengfeng, BIE Chaohong, XIE Haipeng, et al. Research on reliability evaluation of active distribution system[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(2): 8-18.
- [8] 张陶. 分布式发电机组微网方式接入智能配电网研究[J]. 供用电, 2011, 28(4): 28-30.  
ZHANG Tao. Micro-grid accessing method research of distributed generator unit to smart distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2011, 28(4): 28-30.
- [9] 余岳, 粟梅, 孙尧, 等. 计及电动汽车的微电网储能单元容量优化[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1261-1268.  
YU Yue, SU Mei, SUN Yao, et al. Capacity optimization of energy storage unit in microgrid considering electric vehicle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1261-1268.
- [10] 牛曙斌, 张辉, 毛知新, 等. 需求侧光储一体化微电网的应用研究[J]. 电气工程, 2017, 5(1): 60-72.  
NIU Shubin, ZHANG Hui, MAO Zhixin, et al. Research on the application of PV-ESS integrated microgrid on demand side[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 5(1): 60-72.
- [11] 王逸超, 陈仲伟, 欧明勇, 等. 利用电动汽车移动储能的微电网经济运行优化策略[J]. 湖南电力, 2018, 38(3): 38-45.  
WANG Yichao, CHEN Zhongwei, OU Mingyong, et al. Economic operation optimization strategy of micro-grid based on mobile storage of electric vehicles[J]. Hunan Electric Power, 2018, 38(3): 38-45.
- [12] 肖湘宁, 陈征, 刘念. 可再生能源与电动汽车充放电设施在微电网中集成模式与关键问题[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 1-14.  
XIAO Xiangning, CHEN Zheng, LIU Nian. Integrated mode and key issues of renewable energy sources and electric vehicles' charging and discharging facilities in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 1-14.
- [13] 郭薇, 尹新涛, 王俊霞, 等. 基于曼哈顿距离法的充电桩远程运维系统设计[J]. 电力系统保护与控制 2018, 46(13): 134-140.  
GUO Wei, YIN Xintao, Wang Junxia, et al. Design of long-distance operation and maintenance of charging pile based on Manhattan distance method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 134-140.
- [14] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 73-84.  
JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-84.
- [15] 刘健, 魏昊焜, 张志华, 等. 未来配电网的主要形态——基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制 2018, 46(18): 11-15.  
LIU Jian, WEI Haokun, ZHANG Zhihua, et al. Future architecture of power distribution network—low-voltage direct current micro-grids based on energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 11-15.

收稿日期: 2018-10-06

作者简介:

何照安(1983—), 男, 研究生, 高级工程师, 研究方向为电动汽车充电与微电网技术; E-mail: heza@teld.cn

沈迪(1886—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电网技术; E-mail: shendi@teld.cn

刘源(1984—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电动汽车充电技术。E-mail: liuyuan@teld.cn