

建筑集成微电网储能配置与控制方法研究进展*

李玉宏¹, 林莉^{1,2†}, 许大有², 陈维铅¹, 甘生萍¹

(1. 酒泉职业技术学院, 甘肃省太阳能发电系统工程重点实验室, 甘肃 酒泉 735000;

2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要: 与建筑集成的微电网, 能最大程度消纳分布式发电能源, 同时解决分布式发电直接接入配电网所带来的功率波动性及电能质量问题。本文基于分布式电源类型、储能类型和用户经济, 阐述建筑微电网在储能配置与控制方法的研究进展。展望建筑集成微电网的未来重点研究方向。

关键词: 建筑集成微电网; 储能系统; 优化配置; 储能系统控制

中图分类号: TK02; TM727

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2020.02.010

Study on Energy Storage Configuration and Control Method of Building Integrated Micro-Grid

LI Yu-hong¹, LIN Li^{1,2}, XU Da-you², CHEN Wei-qian¹, GAN Sheng-pin¹

(1. Gansu Key Laboratory of Solar Power Systems Engineering, Jiuquan vocational technical college, Jiuquan 735000, Gansu, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In recent years, building integrated micro-grid has attracted extensive attention as it can maximize the energy consumption of distributed generation. At the same time, it solves the power fluctuation and power quality problems caused by the direct access of distributed generation to distribution network. In this paper, the research progress of energy storage configuration and control method of building micro-grid were described based on the distributed generation type, energy storage type and user economic positioning. The key research direction of building integrated micro-grid was prospected.

Key words: building integrated micro-grid; energy storage system; optimal configuration; energy storage system control

0 引言

当前, 能源消耗急剧增加, 资源匮乏问题凸显, 使用传统化石燃料排放了大量的污染物导致生态日益恶化。城市中的电力消耗也在逐年增加, 城市环保和建筑的绿色节能得到了广泛关注。太阳能发电及风力发电等可再生新能源以分布式电源形式接入配电网, 作为用户电能补充。如常见的光伏建筑一体化系统 (building integrated with photo voltaic, BIPV) 工程, 应用最广泛。截至 2017 年底, 我国分布式光伏装机达到 2 966 万 kW, 预计至 2020 年, 国内屋顶光伏累计装机容量将接近 10 GW, 至 2040 年将超过 100 GW^[1]。大量高渗透率的分布式电源并

网运行, 使传统的配电网发展到有源配电网^[2]。由于太阳能、风能的随机性, 给传统的配电网带来功率波动、潮流分布、电能质量以及继电保护等方面的诸多不利影响。随着储能技术的产业化发展, 分布式发电系统与储能技术结合, 借助智能的控制技术和能量管理技术, 建设为智能微电网系统。微电网能灵活实现孤岛运行和并网运行方式, 降低对主电网的冲击^[3]。

在工程应用领域, 国内外已有多个微电网示范工程, 国内典型示范应用工程见表 1。储能系统对于配电网起到了调峰、调频、改善电能质量的作用。

对于微电网, 储能系统在系统能量管理和微电网系统并网过程中的无缝切换起着重要的作用。

* 收稿日期: 2019-09-06 修订日期: 2019-12-12

基金项目: 甘肃省教育厅项目 (2018A-258, 2019C-20); 2018 年酒泉市科技支撑项目 (建筑型微电网孤岛模式经济运行研究)

† 通信作者: 林莉, E-mail: linlizzz@126.com

表 1 国内典型微电网示范应用项目

Table 1 Typical micro-grid demonstration application projects in China

| 项目名称 | 微网负荷类型 | 分布式能源配置 | 储能类型 |
|--------------------|---------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 天津中新生态城 | 小区负荷：35 kW | 风电 5 kWp；光伏 35 kWp | 磷酸铁锂电池 70 kW·h |
| 北京供电局左安门 | 小区负荷：60 kW + 30 kVA | 光伏 60 kWp 燃气轮机 30 kW | 铅酸电池 120 kW·h |
| 未来科技城国电研发楼 | 园区并网系统 | 风电 1.5 MWp 光伏 2.6 MWp | 磷酸铁锂电池 1 MW·h |
| 河南财专分布式光伏 | 校园负荷：120 kW | 光伏 380 kWp | 磷酸铁锂电池 200 kW·h |
| 酒泉职业技术学院图书馆 | 单栋负荷：60 kW | 光伏：单晶硅 48 kWp + 薄膜 33 kWp | 磷酸铁锂电池 198 kW·h； 不间断电源 3 kW |
| 上海世博园智能微电网综合示范工程 | 园区、多栋 并网系统 | 光伏 7 MWp 风电 139.4 MWp | 钠硫电池 100 kW/800 kW·h 锂电池 100 kW 镍氢 100 kW 全钒液流电池 10 kW |
| 国网河北电科院“光储热”一体化微电网 | 单栋负荷：地源热泵 163 kW； 电动汽车 42 kW；照明等其他 负载 93 kW | 光伏 190 kWp | 磷酸铁锂电池 250 kW·h 超级电容 100 kW × 10 s 不间断电源 8 kW |
| 河北英利三期工业园区光储微网 | 园区、多栋、单栋 负荷：300 kW | 光伏 605 kWp 柴油发电机 100 kW | 磷酸铁锂电池 200 kW·h |

在理论研究方面，储能系统在建筑集成微电网中的应用研究主要集中在以下几个方面。首先，根据建筑特点，分析储能功能定位，考虑经济成本对储能系统配置优化，达到微电网稳定运行的同时保证最优的经济性能^[4-5]。其次，根据不同储能特点，研究建筑微电网储能系统的充放电控制策略，使微电网在并网和离网下获得合格的电能质量^[6-7]，并能延长储能寿命。三是考虑用户侧需求，对建筑型微电网储能系统的优化配置和能量管理，使得用户、电网公司、生产管理者的利益达到最优^[8]。

相对于大区域型微电网，建筑集成的微电网应用场合为建筑物，考虑安全性能，储能系统的选用类型相对较少，控制目标也有所不同。本文以建筑微电网的分布式电源类型、储能的功能类型及定位，结合建筑集成微电网用户经济定位，阐述建筑微电网储能配置与控制方法研究，展望建筑集成微电网的未来重点研究方向。

1 适用于建筑物的储能技术

目前的储能方式及应用情况看，以电能转化存储形态，可以分为机械储能、电气储能、电化学储能及热储能 4 类^[9]。其中机械储能中有压缩空气和飞轮储能；电气储能形式主要有超级电容储能；电

化学储能主要有各种电池储能，如铅酸电池、锂电池和钠硫电池等；热储能主要包含低温储能和高温储能^[10]，其原理是将微电网内分布式电源发电高峰时段生产的大量剩余电能转化为热能(冷/暖)形态长时间储存，直接满足建筑内部的制冷(暖)需求，达到降低对高额储能配置的需求。常见的有冷热电三联供(combined cooling heating and power, CCHP)以及目前热点研究的相变材料(phase change material, PCM)储能^[11]。热储能一般将电能转化为热能后直接利用，不再转化电能，是建筑型微电网储能的特殊形式。各种依托建筑物的微电网常用储能技术的特性见表 2 所示。

储能技术按照各自的特性差异，可以分为功率型和能量型。功率型的储能装置比功率高，响应时间快，适合于抑制短时间大能量波动如并/离网瞬时的能量差。能量型的储能容量大、可靠性高，便于电能的长期储存，用于抑制长时间尺度上的功率波动。目前，能量型的储能装置如铅酸电池和锂电池在建筑型微电网中应用最为广泛。但是，单一的储能难以满足微电网的需求，文献^[12]表明多种储能技术混合优化配置能综合互补能量型和功率型储能的特性。相比单一的储能配置方案更能减缓折旧，减少储能配置，降低成本，在提高微电网的经济运行和稳定性方面都有很大作用。

表 2 各种储能技术性能比较

Table 2 Performance comparison of various energy storage technologies

| 储能类型 | 额定功率 | 效率 / % | 响应时间 / ms | 持续释能时间 | 循环寿命 / 年 | 成本 / (元/kW·h) | 建筑集成 |
|------|-----------------|---------|---------------|----------|----------|---------------|------|
| 锂电池 | 1 kW ~ 10 MW | 95 | <20 | 分钟 ~ 小时级 | 5 ~ 15 | 3 000 | 适用 |
| 铅酸电池 | 1 kW ~ 60 MW | 75 | > 20 | 分钟 ~ 小时级 | 5 ~ 10 | 800 | 适用 |
| 压缩空气 | 50 ~ 100 MW | 85 | 1 800 ~ 6 000 | 分钟 ~ 小时级 | 20 ~ 40 | 20 ~ 300 | 不适用 |
| 飞轮 | 5 kW ~ 5 MW | 70 ~ 80 | 1 ~ 10 | 秒级 ~ 分钟级 | 20 | 6 000 | 不适用 |
| 超级电容 | 0 ~ 300 kW | 95 | <10 | 秒级 | 10 ~ 30 | 2 000 ~ 6 000 | 适用 |
| 钠硫电池 | 1 kW ~ 10 MW | 80 | 3 ~ 5 | 小时级 | 10 ~ 15 | 2 000 ~ 3 000 | 不适用 |
| 低温储能 | 100 kW ~ 300 MW | 50 ~ 60 | - | 分钟 ~ 小时级 | 20 ~ 40 | 20 ~ 200 | 适用 |
| 高温储能 | 0 ~ 60 MW | 50 ~ 70 | - | 分钟 ~ 月 | 5 ~ 15 | 200 ~ 400 | 适用 |

2 建筑微电网构架及功率波动特点

建筑集成微电网，通过储能系统和智能能量管理与控制来达到以下功能：首先是以最大程度消耗分布式电源，减少传统电能的使用；其次是通过储能系统的配合，使得建筑物负荷的电力功率平稳，电能质量得到提高，尤其是满足敏感负荷的需求；最后是在电网故障和停电时，高质量地离网运行，保障重要负荷的工作^[13]。

典型的建筑集成微电网构架如图 1 所示。主要包含有分布式发电源、混合储能系统、负荷构成。分布式发电源主要包含有风电机组、光伏发电系、小型的热电冷联机组等；混合储能系统包含有以电化学储能电池为主的能量型储能和功率型储能系统；负荷包含建筑的本地负荷以及可移动性的电动汽车负荷。

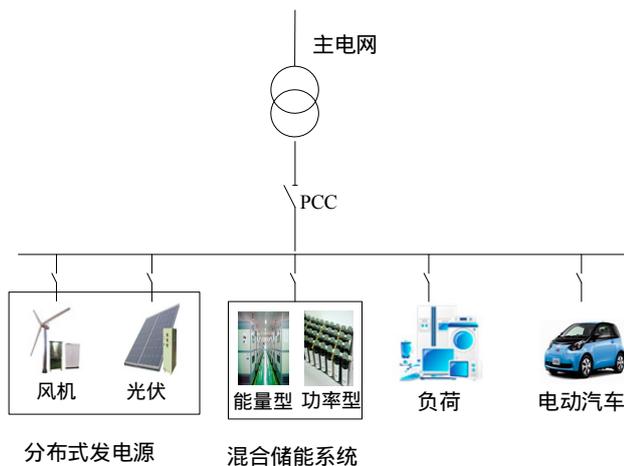


图 1 典型的建筑集成微电网构架

Fig. 1 Typical building integrated micro-grid framework

3 建筑微电网储能系统优化配置与控制

3.1 储能系统优化配置

储能系统的配置十分依赖于模型、建模方面，建筑型微电网要考虑以下几个方面：根据建筑中分布式发电源的配置容量考虑储能系统的功能定位，如以平滑分布式发电源功率波动、孤岛能量支撑、削峰填谷等功能的主次；尽量提高新能源的利用率，减少购电成本；考虑储能系统设备与建筑集成相关的安全性能；考虑储能设备的使用寿命、维护成本、废弃处理等，尽量减缓电化学类储能设备的折旧率。

储能系统优化配置主要包括三个步骤。

首先建立储能系统运行的目标函数。由于储能系统在微电网中的投入比例大，因此在储能系统的优化配置研究中，将经济性作为衡量微电网储能系统配置优化的重要评价指标。储能系统成本包括设备投入成本、设备运行维护成本、系统折旧成本等。由于储能定位和系统不同，没有统一的目标函数。文献[14]中储能系统的作用是为平抑风光出力波动，目标函数为全寿命综合成本最低。指标函数包含初始成本、置换成本、维护成本、报废成本、辅助设备成本及回收残值。文献[15]考虑储能功能定位的混合储能优化配置，指标函数包含投资成本、运行成本和报废成本，其中报废成本使用贴现率和寿命折算为等效年成本。文献[8]考虑需求侧响应下储能优化配置，目标函数为微电网综合年净利润，主要包含设备年投入成本、用户转移负荷补偿、光伏补偿和运维成本构成。

其次考虑约束条件，由于模型不一致，也没有统一的函数。约束条件主要有以下几点。

(1) 系统功率平衡约束

$$P_{DG}(t) + P_{grid}(t) + P_{ESS}(t) + P_{LD}(t) = 0 \quad (1)$$

式中： $P_{DG}(t)$ 为分布式电源出力功率； $P_{grid}(t)$ 为微电网配电网置换功率； $P_{ESS}(t)$ 为储能充放电功率； $P_{LD}(t)$ 为微电网负荷功率。

(2) 储能充放电约束

$$\begin{cases} SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \\ D_{OD} \leq D_{OD,max} \\ P_{ESS} \leq P_{ESS,max} \end{cases} \quad (2)$$

式中： SOC_{min} 和 SOC_{max} 为电池的上下限； $D_{OD,max}$ 为储能系统放电深度的最大值； $P_{ESS,max}$ 为储能系统放电系统的最大额定功率。

(3) 分布式发电源渗透率约束

$$\begin{cases} S_{DG} = Q_{DG} + Q_{DG,BSS} / Q_{LD,All} \\ S_{DG} \geq S_{DG,min} \end{cases} \quad (3)$$

其中： S_{DG} 为分布式发电源渗透率， $S_{DG,min}$ 为渗透率的最小值； Q_{DG} 为分布式发电源直接供给负载的电量， $Q_{DG,BSS}$ 为分布式发电源经由储能系统存储供给负载的电量； $Q_{LD,All}$ 为用户负荷总量。

最后，利用寻优智能算法求出最优解。求解最优解过程实质属于非线性求解过程。在现有研究中，使用最多的是粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)，基于改进的粒子群算法收敛快、精度高、鲁棒性好。其次为遗传算法 (genetic algorithm, GA)、入侵杂草算法 (invasive weed optimization, IWO)、人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABC)。

3.2 储能系统控制策略

储能系统控制的关键技术是对储能变流器设备的控制，从而达到快速平抑微电网功率波动、能量管理和离网下控制电能质量等功能。双向交直流变流器 (power conversion system, PCS) 一般采用 PQ 控制模式、下垂 (droop)/反下垂控制和 v/f 控制 (恒频/恒压控制)，分别适用于并网状态、并离网切换状态和离网状态。并网状态下，通过 PQ 控制实现快速的无功和有功功率输出，实现有功和无功的解耦。离网状态下，网侧变流器采用 v/f 控制策略，网

侧变流器可等效为一个电压源，控制输出电压的幅值和频率，交流侧采用双闭环控制，外环为电压环，内环为电流环。并离网切换的控制方面，国内外大量理论研究中，主要是关于下垂控制。文献[16]采用改进下垂控制方法来提高功率分配精度；文献[17]分析了储能 PCS 在交直流混合微电网中的作用，并提出基于储能 PCS 的并离网无缝切换控制策略。双向直流变流器中，大多数采用经典的比例-积分 (proportional integral, PI) 控制器，但是这种方法只能实现于小范围的稳定。有学者提出了时间-状态最优控制的非线性控制方法来解决这个缺陷，结果显示性能指标提升。

在平抑分布式发电功率方面，现有的储能系统控制研究中，常见方法为基于低通 (高通) 滤波原理的控制方法，其次为基于短期预测的控制方法、模糊控制方法、滑动平均滤波法、小波分解方法。

3.3 算例分析

选取西部地区某一独栋建筑为例进行分析。建筑层数为 5 层，建筑面积 5 480 m²，中庭采光顶面积为 560 m²，建筑方向朝西偏北约 24°。根据建筑特点，在屋面上 37°角安装多晶硅光伏组件 47 kWp，中庭采光顶安装非晶薄膜组件共 33.6 kWp，发电量共计 80.6 kWp。建筑内典型日的负荷情况如图 2 所示，工作日全年为 200 d，寒暑假各 40 d，其余为周末计算。

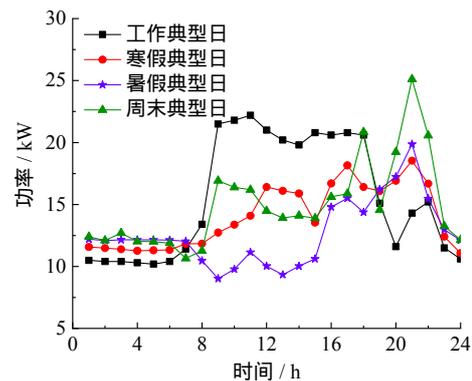


图 2 建筑内分期典型日负荷曲线
Fig. 2 Typical daily load curves of the building

建设初期，典型日内光伏功率为 68 kW，最大负荷功率为 51 kW，高峰时段为工作日 8:00-11:00 和 15:00-18:00。微网功率曲线如图 3 所示。非工作日及假期的平均负荷功率为 20 kW 左右。根据历年气象数据，全年平均雨雪天 20 天左右。

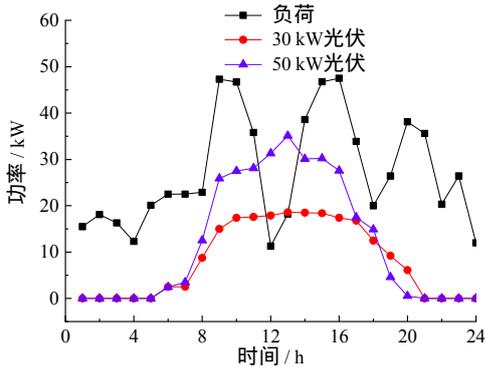


图 3 光伏、负荷功率曲线
Fig. 3 PV and load power curve

储能最大放电功率 $P_{ESS,max}$ 取 100 kW, 储能系统保护性荷电状态 SOC_{max} 为 95%, 最低保护性荷电状态 SOC_{min} 为 5%。根据文献[18]算例, 比较锂电池、铅酸电池及钠硫电池, 锂电池能获得较高投资回报, 因此本例采用磷酸铁锂电池。该建筑未实行峰谷电价, 不考虑储能系统的套利机制实现减少购电成本。

储能的经济性目标考虑目标函数为加装用户满足约束条件前提下, 年综合效益最高:

$$F = F_E - \frac{(m_a + m_b) P_{ESS}}{N} \times 365 \quad (4)$$

$$F_E = P_{ESS} \times P \times T \quad (5)$$

式中: F 为目标函数, m_a 为电池购买价格, m_b 为电池维护费用, N 为电池寿命, 参数见表 3。 F_E 为加装储能电费收益, P_{ESS} 为储能容量, P 为每单位储能收益电价, T 为年工作小时数。储能容量约束值: 工作日最大值 145 kW·h, 寒暑假最大值 270 kW·h, 周末最大值 246 kW·h。仿真结果如图 4 所示。用户的收益影响较大的为储能设备成本(价格、循环寿命), 其次是储能容量和购电成本。单位储能价格在 2 600 元以内, 收益与储能容量成正比。

表 3 储能系统参数

Table 3 Parameters of the energy storage system

| 系统参数 | 数值 |
|------------------|------------------------|
| 电池价格 m_a | 0.22 ~ 0.455 万元/(kW·h) |
| 储能电池效率 | 0.96 |
| 储能变流器价格 | 0.35 万元/kW |
| 储能电池运行维护费用 m_b | 15 元/(kW·h) |
| 储能变流器效率 | 0.96 |
| 储能循环电池寿命 N | 3 000 次 |
| 光伏上网电价 | 1.01 元/(kW·h) |
| 购电电价 | 0.66 元/(kW·h) |

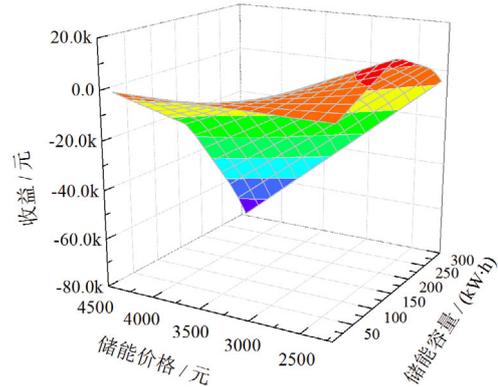


图 4 仿真结果
Fig. 4 Simulation results

如果考虑建筑的停电保电社会效益价值, 当地的每月停电 1 次左右, 停电时间 6 h, 最优储能配置容量为 193 kW·h。

4 结论与展望

本文以分布式电源类型、储能的功能类型及定位, 结合建筑集成微电网用户经济定位, 对建筑微电网储能配置与控制方法研究进行分析, 展望建筑集成微电网的未来重点研究方向。未来依托建筑的微电网的发展和应用, 储能配置与控制设计需要从以下几个方面开展工作:

- (1) 储能价格是储能配置重要参数, 多种能源互补及利用用户侧需求管理调度都可以减少储能容量配置使用, 从而获得更高收益。
- (2) 储能设备运行维护与收益相关, 延长储能设备寿命可以增加收益。如电池优化管理技术及混合储能配置。
- (3) 设计人员在储能配置时应充分考虑各种因素, 结合工程具体情况整体评估储能项目的可行性。

参考文献:

- [1] BNEF. 中国工商业屋顶光伏市场开始起飞[EB/OL]. (2017-07-03). <https://yq.aliyun.com/articles/129259>.
- [2] 肖海伟, 汪平, 黄娟. 分布式储能控制策略对有源低压配电网影响研究[J]. 机电工程技术, 2019, 48(7): 185-188, 237. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2019.07.064.
- [3] 侯军. 含多种分布式电源的微电网的运行控制与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [4] 徐岩, 何宸, 付超, 等. 多种调度模式下的光储电站经济性最优储能容量配置分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1632-1640.
- [5] 刘冠群, 袁越, 王敏, 等. 考虑经济成本的光伏电站储能容量配置[J]. 可再生能源, 2014, 32(1): 1-5. DOI:

- 10.3969/j.issn.1671-5292.2014.01.001.
- [6] 王守相, 王凯, 赵歌. 平抑有源配电网功率波动的储能配置与控制方法研究综述[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(6): 1188-1195. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0081.
- [7] 张任. 基于储能的微电网电能质量快速治理研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- [8] 王树东, 杜巍, 林莉, 等. 基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 129-137. DOI: 10.7667/PSPC162051.
- [9] 于波. 微网与储能系统容量优化规划[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [10] 吴贤章, 尚晓丽. 可再生能源发电及智能电网储能技术比较[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(3): 316-320. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2013.03.020.
- [11] 陈颖, 姜庆辉, 辛集武, 等. 相变储能材料及其应用研究进展[J]. 材料工程, 2019, 47(7): 1-10. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000876.
- [12] 范宏, 周献远. 基于智能微网的混合储能配置方法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(9): 99-103. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2017.09.017.
- [13] 朱德志, 胡春花, 王红林, 等. 智能建筑微电网的结构和控制策略分析[J]. 常州工学院学报, 2015, 28(5): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0436.2015.05.004.
- [14] 姚天亮, 郑昕, 吴兴全, 等. 平抑风光互补系统短时复合功率波动的储能容量配置研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(10): 120-127. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2016.10.021.
- [15] 施卫峰, 冯小珊, 顾洁, 等. 考虑储能功能定位的混合储能优化配置策略研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(10): 18-24, 33. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2017.10.004.
- [16] 薛太林, 刘良. 低压微网中实现有功功率均分的改进型下垂控制策略[J]. 电气自动化, 2019, 41(4): 33-36. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2019.04.011.
- [17] 毕大强, 周稳, 戴瑜兴, 等. 交直流混合微电网中储能变流器无缝切换策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 84-89. DOI: 10.7500/AEPS20150604007.
- [18] 赵乙潼, 王慧芳, 何奔腾, 等. 面向用户侧的电池储能配置与运行优化策略[J/OL]. 电力系统自动化, (2019-10-22). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20191022.1625.012.html>.

作者简介:

李玉宏(1967-), 男, 副教授, 主要从事新能源发电技术研究。

林莉(1985-), 女, 博士, 讲师, 主要从事微电网优化控制研究。