

DOI: 10.7667/PSPC171715

含串联组合型微源的微网模式平滑切换控制方法研究

刘正英, 徐昊亮, 杨昌海, 陈兆雁, 程紫运

(国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为保证含串联组合型微源的微网并网和孤岛两种运行模式的平滑切换, 研究一种以串联组合型微源和超级电容器构成的子系统作为主电源, 用飞轮电池保证不间断供电的微网协调控制方法。首先对系统结构进行简要说明。其次分析了微网模式切换时微源和复合储能的控制方法。最后以含两个串联子系统的微网为例进行 Matlab/Simulink 仿真分析。仿真结果表明, 在复合储能的控制作用下, 此微网在模式切换中能保持良好的电压和频率稳定性, 从而验证了该控制方法的有效性。

关键词: 串联组合型; 微网; 平滑切换; 协调控制; 复合储能

Research on the smooth switching control method of micro-grid with series combination of micro-source

LIU Zhengying, XU Haoliang, YANG Changhai, CHEN Zhaoyan, CHENG Ziyun

(State Grid Gansu Electric Power Company Economy and Technology Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to ensure that the series micro-networks interconnection and the islands of two kinds of operation modes can switch smoothly, a coordinated control method of using a sub-system composed of series-connected micro-source and super-capacitor as the main source and the flywheel battery for keeping uninterrupted power supply is studied. First, the structure of the system is briefly described. Secondly, the control methods of micro-source and complex energy storage in micro-grid mode switching are analyzed. Finally, Matlab/Simulink simulation analysis based on the micro-grid with two series subsystem is made. The results show that the micro-grid can be maintained at good voltage and frequency stability in mode switching because of complex energy storage control function, thus the effectiveness of control method is verified.

This work is supported by Youth Science Foundation of Gansu Province (No. 17JR5RA345).

Key words: series combination; micro-grid; smooth switching; coordinated control; complex energy storage

0 引言

近年来, 由于储能装置具有灵活充放电功能, 能有效抑制不稳定微源产生的电压波动, 在微网系统中得到了广泛应用^[1-3]。

地理位置就近的微源通过逆变器串联^[4-5]并与蓄电池结合形成一个子系统, 将多个这样的子系统结构并联到公共交流母线上形成含串联组合型微源的微网。正常情况下, 并网运行, 系统内各微源多采用恒功率输出控制; 当检测到大电网故障或电能质量不能满足要求时, 则孤岛运行, 此时失去了大电网的支撑, 其电压和频率必须通过其自身的有效

控制来实现。当多个微源参与调压调频控制时, 系统控制参数难以选定。也有学者采用储能单元调压调频控制^[6-8], 这样虽可减少多个微源参与调压调频控制的复杂性, 但难以保证微网在孤岛模式下长时间工作, 而且还会出现储能容量大、成本高的问题。另外, 对于敏感性负荷来讲, 应尽量保证不间断供电, 这就需要采取有效措施使微网能够在两种模式间平稳过渡^[9-11]。

因此, 本文研究一种含串联组合型微源的微网结构, 提出以串联组合型微源和超级电容器构成的子系统作为主电源, 用飞轮电池保证不间断供电的微网协调控制方法, 分析了储能在微网孤岛运行以及并网与孤岛切换过程中对电压和频率的改善作用, 保证了模式的平稳切换, 并通过仿真进行验证。

基金项目: 甘肃省青年科技基金项目资助 (17JR5RA345)

1 含串联组合型微源的微网系统

本文所研究的微网结构如图 1 所示。地理位置就近的光伏、风力微源附加超级电容器经直流变换环节通过逆变器串联形成一个子系统^[12-13]，为了防止该子系统出现故障而解列，并保证不间断供电，将两个相同结构的子系统并列连接在公共交流母线上。微源直流侧加入超级电容器，以消除光伏、风力等间歇性能源发电对微网的影响。同时，将飞轮电池接在交流母线上，在并网转孤岛运行时，其中的一个子系统作为主电源，采用电压和频率控制，在子系统尚未建立起稳定电压和频率参考时，由飞轮电池短时间内迅速充放电，来保证模式平稳切换。

在串联子系统中，采用载波相移 SPWM 控制技术^[14]，建立单个逆变器和 5 微源逆变器串联仿真模型，可以得到：五个单相逆变器的串联，其输出相当于将载波频率扩大了五倍，在载波比相同的情况下，通过将逆变器串联，谐波总畸变率由 72.43% 降到 12.97%，有效减少了输出电压的谐波含量，降低了对功率开关器件电压等级的要求。这在提高安全性的同时降低了系统成本，简化了整个系统的控制复杂性。

鉴于串联子系统所具有的上述一系列优点，本文考虑由多个这样的子系统结构组成如图 1 所示的微网结构。

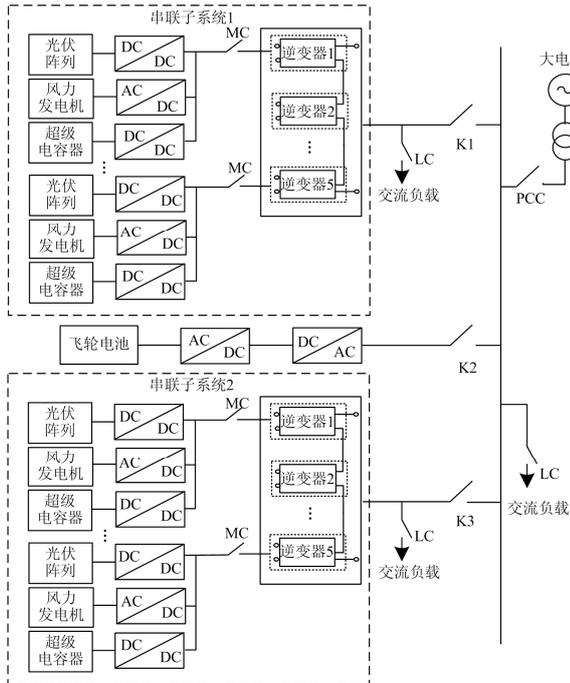


图 1 含串联组合型微源的微网结构

Fig. 1 Structure of micro-grid with series combination of micro-source

2 微网模式切换时微源控制

2.1 并网向孤岛切换时微源控制

微网由并网向孤岛切换过程中，以其中的一个串联子系统作为主电源，在转入孤岛运行后采用 V/F 控制方法来维持微网电压与频率稳定。另外一个子系统采用 P/Q 控制，对微网提供有功、无功功率支撑。具体的 V/F 和 P/Q 控制策略如图 2、图 3 所示。其中， P_{ref} 、 Q_{ref} 为有功、无功功率参考设定值， I_{dref} 、 I_{qref} 为电流参考设定值， P 、 Q 为逆变器实际输出有功、无功功率值， I_d 、 I_q 、 U_d 、 U_q 分别为逆变器输出端口电流、电压的 dq 轴分量， ω 、 θ 为角频率和相角值， f_{ref} 、 θ_{ref} 为频率和相角参考值。

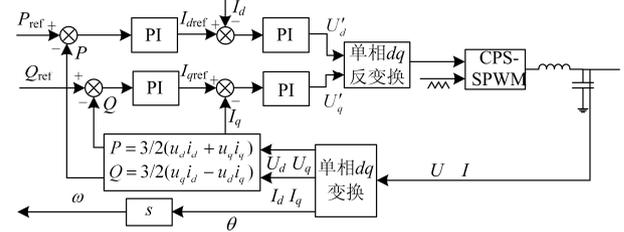


图 2 P/Q 控制框图

Fig. 2 P/Q control block diagram

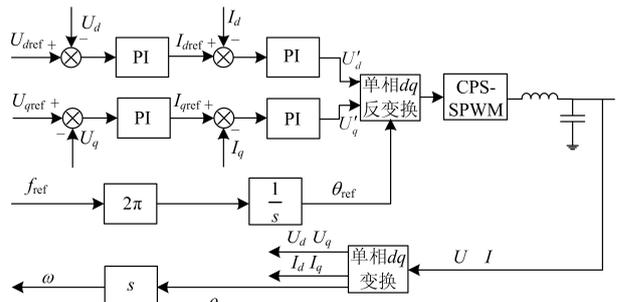


图 3 V/F 控制框图

Fig. 3 V/F control block diagram

2.2 孤岛向并网切换时微源控制

当大电网恢复供电时，应将微网调整到并网状态重新并入大电网。在此过程中，只需对作为主电源的串联子系统进行调节，由 V/F 控制转为 P/Q 控制，进行参考功率输出。为了有效抑制系统并网过程中的冲击电流，并网前必须采用预同步控制方法^[15]，将电压和相角调到与大电网基本相同。采取直接调整主电源 V/F 控制的参考电压和频率的方式来进行预同步控制，其控制框图如图 4 所示。

3 储能装置的控制

3.1 飞轮电池的控制

飞轮电池运行方式的切换通过“选择开关”来

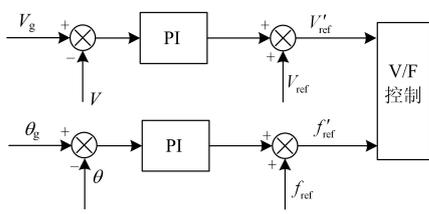


图 4 预同步控制框图

Fig. 4 Pre-synchronization control block diagram

控制, 在电网正常运行时, 开关接“1”, 此时飞轮一直充电, 直到最大转速后处于保持状态。当外电网发生故障时, 开关接“0”, 此时飞轮运行在放电模式, 直流母线电压主要靠飞轮来维持。为了实现飞轮电池的快速充放电操作, 采用基于转子磁场定向的矢量控制方法^[16-18]。其控制框图如图 5 所示。

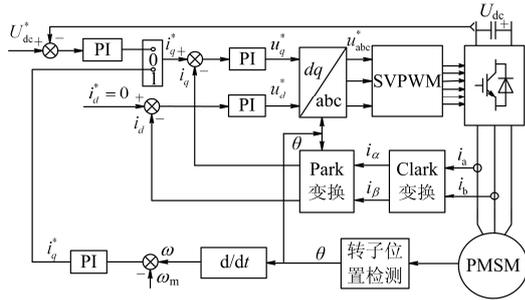


图 5 飞轮电池控制框图

Fig. 5 Flywheel battery control block diagram

3.2 超级电容器的控制

超级电容器储能系统结构如图 6 所示, 由双向 DC/DC 变换器和超级电容器组成^[19-20]。开关管 V1 和 V2 互补工作, 通过控制 V1 和 V2 的占空比即可实现对超级电容器的充放电操作。

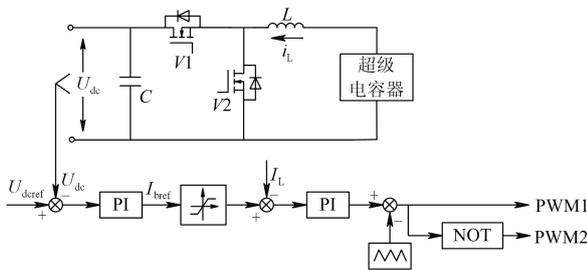


图 6 超级电容器充放电控制系统图

Fig. 6 Super-capacitor charge and discharge control diagram

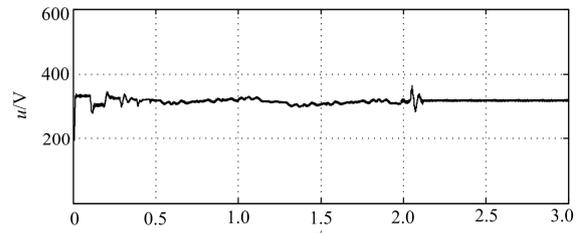
4 仿真结果分析

在 Matlab/Simulink 中搭建含串联组合型微源的微网(如图 1 所示)仿真模型。仿真参数如下: 光伏阵列额定环境温度 $T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$ 、额定光照 $S_{ref} =$

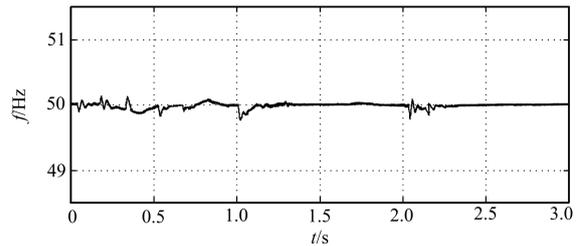
$1000\text{ W}/\text{m}^2$ 、开路电压 $U_{oc} = 67.5\text{ V}$ 、短路电流 $I_{sc} = 5.93\text{ A}$ 、最佳工作电压 $U_m = 58.2\text{ V}$ 、最佳工作电流 $I_m = 5.15\text{ A}$ 、额定功率为 300 W 。风机额定风速为 12 m/s 、额定功率为 16 kW 。超级电容器额定电压 50 V 、额定容量为 100 F 。飞轮电机选用永磁同步电机, 转动惯量 $0.8\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 最大输出功率 40 kW 。

1) 微网由孤岛向并网切换仿真分析

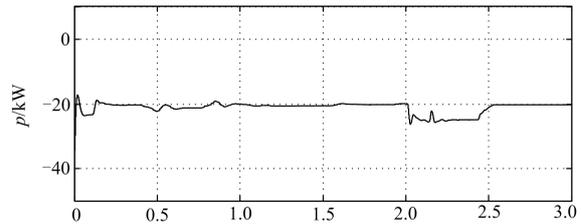
仿真结果如图 7 所示。



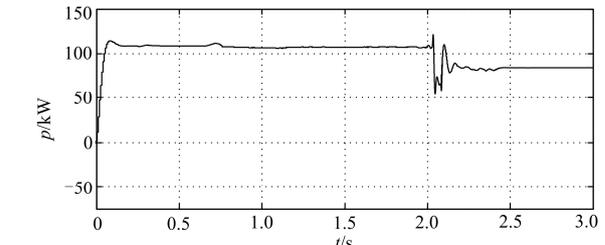
(a) 微网电压



(b) 微网频率



(c) 飞轮输出有功功率



(d) 超级电容器输出有功功率

图 7 微网孤岛转并网过程仿真分析

Fig. 7 Simulation analysis of micro-grid from islanding to networking process

微网初始运行在孤岛模式, 风力发电机、光伏按指定指令输出有功功率, 1s 前串联子系统作为主

电源, 运行在 V/F 模式, 维持微网的电压和频率, 2 s 时并网开关闭合, 微网并网运行, 此后微网的电压和频率由电网来支撑。

从图 7(a)、图 7(b)可以看到整个切换过程中微网的电压和频率都在允许范围内波动。

2) 微网由并网向孤岛切换仿真分析
仿真结果如图 8 所示。

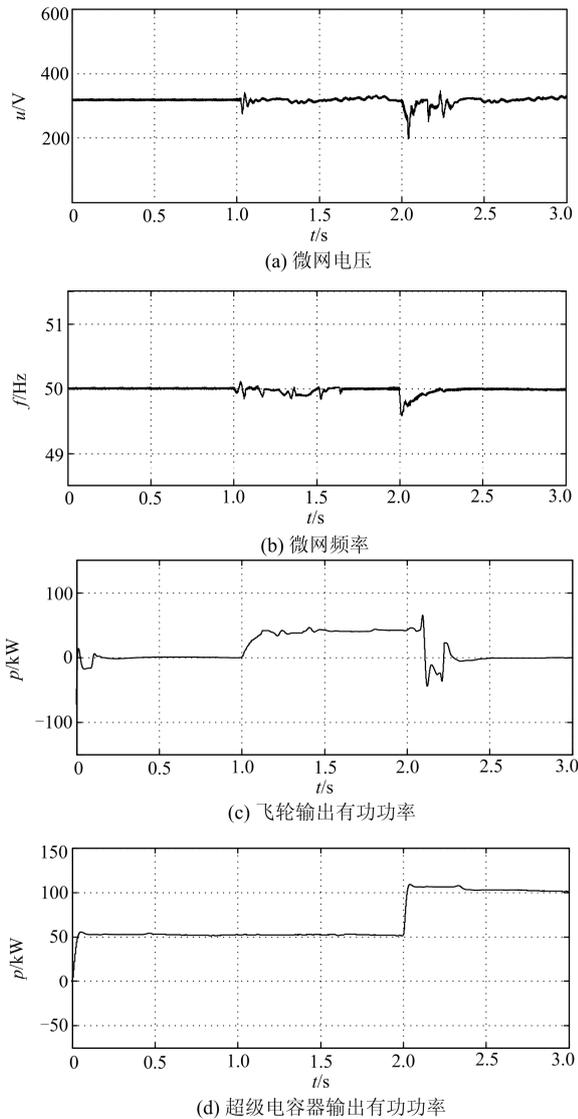


图 8 微网并网转孤岛过程仿真分析
Fig. 8 Simulation analysis of micro-grid from networking to islanding process

微网初始运行在并网模式, 风力发电机、光伏按指定指令输出有功功率, 飞轮电池工作在充电模式。假设在 1 s 前微网并网运行, 由大电网提供电压和频率支撑; 1 s 时电网电压跌落, 微网孤岛运行, 串联子系统还未建立起频率和电压支撑, 由飞轮电

池提供短期不间断供电, 2 s 后串联子系统建立起稳定电压和频率。

从图 8(a)、图 8(b)可以看到整个过程中微网的电压和频率发生波动, 但都在允许范围内。从图 8(c)可以看到 1 s 前飞轮电池运行在充电模式, 从系统吸收功率, 1~2 s 时发出功率, 作为微网短时支撑。而 2 s 后输出功率为零。从图 8(d)可以看到 2 s 后由于飞轮电池输出功率为零, 超级电容器输出功率增大, 以保证系统建立起稳定的电压。

5 结论

本文研究一种将光伏、风力微源附加储能装置通过逆变器串联组合成的微网结构, 重点分析了微源、超级电容器和飞轮电池的具体控制方式, 分析了由二者所组成的复合储能在含串联组合型微源的微网孤岛运行以及并网与孤岛模式切换中的作用。采用复合储能装置协调控制方法使微网在两种运行模式切换过程中都能够保证电压和频率在允许范围内波动, 保证了切换过程中的功率平衡, 减少了冲击和振荡。最终验证了该控制方法的有效性。

参考文献

[1] 李春华, 朱新坚. 基于混合储能的光伏微网动态建模与仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 39-46.
LI Chunhua, ZHU Xinjian. Dynamic modeling and simulation of hybrid energy storage-based photovoltaic microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 39-46.

[2] LASSEYTER R H. Microgrids[J]. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, 21(1): 305-308.

[3] 黄麒元, 刘娇娇, 王致杰. Kinetic 电池模型在微电网调度的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 97-102.
HUANG Qiyuan, LIU Jiaojiao, WANG Zhijie. Application research for Kinetic battery model in micro-grid system scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 97-102.

[4] 王兴贵, 杨维满. 一种微源逆变器串联连接型微网特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 129-135.
WANG Xinggui, YANG Weiman. Study on characteristics of a microgrid with micro source inverters connected in series[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 129-135.

[5] 王兴贵, 刘正英. 基于载波变幅移相调制方法的串联型微网功率平衡控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 38-44.

- WANG Xinggui, LIU Zhengying. The series micro-grid power balance control based on carrier amplitude variation and phase shift modulation method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 38-44.
- [6] SAVAGHEBI M, JALILIANA, VASQUEZ J C, et al. Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1390-1401.
- [7] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8. DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [8] WANG Chengshan, LI Xialin, GUO Li, et al. A seamless operation mode transition control strategy for a microgrid based on master-slave control[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(6): 1644-1654.
- [9] GHAZANFARI A, HAMZEH M, MOKHTARI H, et al. Active power management of multihybrid fuel cell/supercapacitor power conversion system in a medium voltage microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1903-1910.
- [10] 梅文龙, 施佳余, 张旭东, 等. 微电网发展研究[J]. 电源技术, 2017, 42(2): 334-336. MEI Wenlong, SHI Jiayu, ZHANG Xudong, et al. Research on microgrid development[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 42(2): 334-336.
- [11] 和军平, 晁璞璞, 陶耀东. 微电网模式平滑切换的多环主从控制策略研究[J]. 电源学报, 2016, 14(2): 128-136. HE Junping, CHAO Pupu, TAO Yaodong. Improved seamless transferring control strategy for microgrid based on master-slave configuration[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(2): 128-136.
- [12] 王兴贵, 刘正英, 高敬更. 非线性负载条件下孤岛串联型微网输出控制[J]. 电气应用, 2016, 35(21): 48-51. WANG Xinggui, LIU Zhengying, GAO Jinggeng. Output control of an islanded series micro-grid under non-linear loads[J]. Electrotechnical Application, 2016, 35(21): 48-51.
- [13] HOSSEINI S H, AHMADI M, GHASSEM ZADEH S. Reduce the output harmonics of cascade H-bridge multilevel inverter for electric vehicle applications[J]. Electrical Power System, 2011, 2(1): 752-755.
- [14] 费万民, 吕征宇, 姚文熙. 三电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 11-15. FEI Wanmin, LÜ Zhengyu, YAO Wenxi. Research on selected harmonic elimination PWM technique applicable to three-level voltage inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 11-15.
- [15] 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. BI Daqiang, ZHOU Wen, DAI Yuxing, et al. Control strategies of seamless switching for energy storage converter in hybrid AC/DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 84-89.
- [16] 王安邦, 姜卫东, 王群京, 等. 转子动能为外环控制量的永磁同步电动机双闭环矢量控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 112-120. WANG Anbang, JIANG Weidong, WANG Qunjing, et al. Dual closed loop vector control strategy for PMSM using rotor kinetic energy as the outer loop controlling parameter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 112-120.
- [17] 王磊, 张琛, 李征, 等. 双馈风电机组的虚拟同步控制及微网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 85-90. WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 85-90.
- [18] 赵晗彤, 张建成. 基于滑模控制的飞轮储能稳定光伏微网离网运行母线电压策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 36-42. ZHAO Hantong, ZHANG Jiancheng. Research on bus voltage control strategy of off-grid PV microgrid with flywheel energy storage system based on sliding mode control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 36-42.
- [19] YANG Weiman, WANG Xinggui, LI Xiaoying, et al. An active power sharing method among distributed energy sources in an islanded series micro-grid[J]. Energies, 2014, 7(1): 7878-7892.
- [20] ZHENG Dehua, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.

收稿日期: 2017-11-21; 修回日期: 2018-02-27

作者简介:

刘正英(1990—), 女, 硕士, 研究方向为电力变换及其控制、微电网、智能电网。Email: 1040291661@qq.com

(编辑 葛艳娜)