

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.06.032

微电网双重下垂控制策略的研究

汪玉凤¹, 李琳¹, 王立辉², 张志强²

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;
2. 国网辽宁省电力有限公司阜新供电公司, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 当低压微电网由并网过渡到孤岛运行时会出现功率缺额的现象, 导致微电网无法保持电压和频率稳定。文中提出了双重下垂控制的策略, 即在改进耦合下垂控制同时, 又增加一层对于直流总线电压响应的下垂控制。该控制策略能够在这孤岛模式和并网模式下工作, 实现自动调节微电源的输出功率。此外, 该控制策略还解决了孤岛模式和并网模式之间的切换不平滑的问题。对提高微电网的电能质量和供电可靠性具有重要意义。以上所提出的控制策略通过 MATLAB 仿真验证其有效性。

关键词: 双重下垂控制; 微电网; 孤岛模式; 并网模式

Study on the Double-droop Control Strategy of Microgrid

WANG Yufeng¹, LI Lin¹, WANG Lihui², ZHANG Zhiqiang²

(1. Faculty of Electrical and Engineering Control, Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China;
2. Fuxin Power Supply Company of Liaoning Electric Power Co., Ltd., Liaoning Fuxin 123000, China)

Abstract: Power vacancy phenomenon appears when a low voltage micro grid transitions from the grid connected to the island mode, resulting in micro grid can not maintain voltage and frequency stability. In this paper, a power management control scheme based on double-droops control strategy is proposed for low-voltage micro grid system. The proposed control method adds a layer of droop control to the voltage response of the DC bus, while improving the coupling droop control. The control scheme can work under the island mode and the grid mode to adjust the output power of the micro power supply automatically. In addition, the droop controlled VSI systems solves the problem of the switching unsmoothed between the island mode and the grid mode, which is of the great significance to improve the power quality and power supply reliability of the micro grid. The proposed scheme above is validated by MATLAB simulation.

Key words: double-droop control; microgrid; island mode; grid-connected mode

0 引言

微电网技术是未来智能电网的主要发展方向, 微电网作为分布式电源接入主电网的有效途径, 不仅可以提高可再生能源的利用率^[1], 而且降低了电力系统对环境的污染等环境问题。微电网有两种工作模式: 并网工作模式以及孤岛工作模式^[2]。目前, 下垂控制^[3]已经成为了一种普遍的分布控制策略。以往对下垂控制的研究集中在微电网孤岛模式的应

用^[4-6]。但是, 当微电网由并网过渡到非计划孤岛运行时会出现功率缺额的现象, 导致微电网无法保持电压和频率稳定, 严重时将造成微电源退出运行, 负荷断电, 从而使整个微电网崩溃^[7-9]。因此研究微电网并网运行、计划孤岛的稳定运行以及确保微电网的在不同运行模式下平滑过渡, 对提高微电网的电能质量和供电可靠性具有重要意义^[10-12]。

文[13]提出了基于下垂的分级控制, 可以在两个独立的并网模式下工作。但是其通讯通道的使用会使微电网的模式转换不平滑; 文[14]证明了当电

收稿日期: 2018-01-14; 修回日期: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307076)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51307076).

网发生故障或需要检修时,微电网可以通过公共连接点(PCC)的断路器快速地切断与大电网的连接,平滑切换到孤岛模式。但是此方法在模式切换时会发生切换速度缓慢、与电网不能保持一致等缺点;文[15]通过传统下垂控制器中增加下垂定点调节环和预同步控制单元,并网时执行控制,独立运行时使用下垂控制实现切换。但是由于此方法模式切换过程与控制结构过于复杂。

文中提出了一种双重下垂控制方案。下垂控制2增加了一个功率偏移到下垂控制1的输出,根据直流总线的状态来修改逆变器的参考电压,并调节的微电源输出电压基于所述的直流总线电压的状态。此方法可以在并网和孤岛两个模式下工作。而且下垂控制的电压型逆变器确保了并网模式和孤岛模式的平滑切换。

1 下垂控制方案设计

下垂控制原理是通过模拟电力系统中同步发电机的频率和端电压与所输出的有功功率和无功率之间的下垂特性^[16]。下垂特性可以表示为:

$$\omega - \omega_N = -k_p(P - P_N) \quad (1)$$

$$U - U_N = -k_q(Q - Q_N) \quad (2)$$

式(1)、(2)中: U_N 为逆变器输出的额定电压; ω_N 为逆变器输出的额定角频率; k_p 、 k_q 为逆变器的垂系数; P 为逆变器实际输出的有功功率; Q 为逆变器实际输出的无功功率; P_N 分别为逆变器的额定有功功率; Q_N 为逆变器的额定无功功率。

文中下垂控制方案主要是对逆变器与微电网的功率进行控制,包括两个下垂控制见图1。

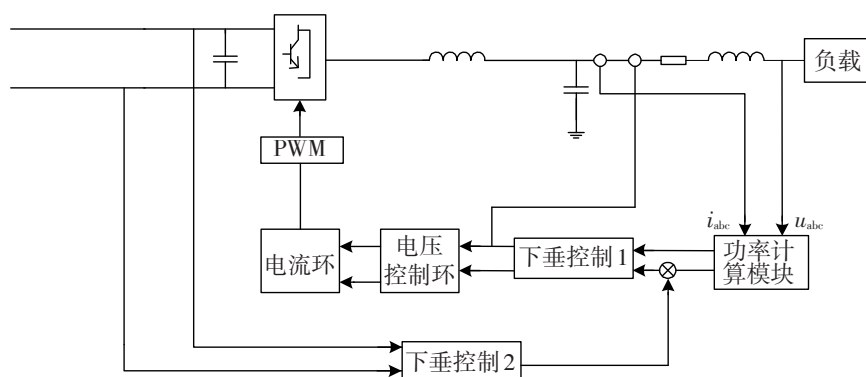


图1 双重下垂控制方案

Fig. 1 Double-droop control scheme

2 下垂控制1

下垂控制回路1采用耦合下垂控制策略。

在常用的微电网系统中,单台逆变器到交流总线的功率传输与向量图见图2。如图2所示, $Z\angle\theta = R + j\omega L$ 为逆变器输出阻抗;逆变器的输出电压为 $U_1\angle 0$;电网的交流母线电压为 $U_2\angle -\delta$, δ 是功率因数角^[17]。

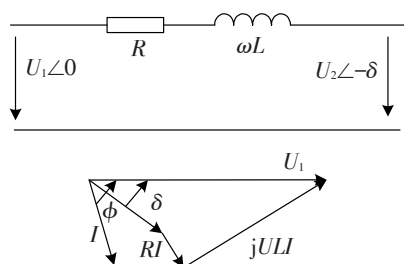


图2 单台逆变器到交流总线的功率传输和向量图

Fig. 2 Power transfer diagram and vector diagram of micro power to AC bus

由图2可知,从微电源流向交流母线的有功功

率 P 和无功功率 Q 可以由式(3)、(4)表示^[18-19]。

$$P = \left(\frac{U_1^2 - U_1 U_2 \cos \delta}{Z} \right) \cos \theta + \frac{U_1 U_2 \sin \delta \cos \delta}{Z} \quad (3)$$

$$Q = \left(\frac{U_1^2 - U_1 U_2 \cos \delta}{Z} \right) \sin \theta - \frac{U_1 U_2 \sin \delta \cos \delta}{Z} \quad (4)$$

传统下垂控制针对于高压线路,将电阻 R 忽略不计,但是微电网具有输配电系统,相比较于大电网来说,微电网电压等级较低^[20]。所以在实际应用中电阻 R 不可忽略。文中采用功率耦合下垂控制,具体方法如下:令功率角 δ 很小,则 $\sin \delta = \delta$, $\cos \delta = 1$,并假设 $P' = \frac{U_1^2 - U_1 U_2}{Z}$, $Q' = \frac{U_1 U_2 \delta}{Z}$ 。

可得

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中: $\cos \theta = \frac{R}{Z}$, $\sin \theta = \frac{X}{Z}$ 。

根据式(5)可得:

$$U_1 - U_2 = \frac{R}{U_1} \left(P + \frac{X}{R} Q \right) \quad (6)$$

$$\delta = \frac{X}{U_1 U_2} \left(P - \frac{R}{X} Q \right) \quad (7)$$

综上所述,可以得出:有功功率 P 和无功功率 Q 的耦合可以用来控制功率因数角 δ 。设 $k = \frac{R}{X}$,当 $k=0$ 时为传统下垂控制,由此可以求出下垂控制表达式为:

$$\omega - \omega_0 = -k_p(P - P_{ref}) + k k_q(Q - Q_{ref}) \quad (8)$$

$$U - U_0 = -k_p(P - P_{ref}) - \frac{k_q}{k}(Q - Q_{ref}) \quad (9)$$

式(8)、(9)中, P_{ref} 、 Q_{ref} 分别是有功功率和无功功率的参考值;由式(8)、(9)可知,通过调节 k_p 、 k_q 、 k 就可以对逆变器输出的频率和幅值进行补偿。

3 下垂控制2

下垂控制2是为了实现微电源与直流总线电压之间功率的平衡。基于直流总线电压大小定义了微电源的功率参考值 P_{ref} 。由于不同微电源输出功率特性不同,由此下垂控制2回路方法也不同^[21-22],文中采用随着直流总线电压 U_{DC} 的变化,参考功率 P_{ref} 成比例变化,即。

$$P_{ref} = P_0 - k_2(U_{DC} - U_{DC0}) \quad (10)$$

在微电网系统中,逆变器能够根据各自下垂参数按比例实现功率共享。由于逆变器必须平衡其输出有功功率与微电源输出功率,因此下垂控制回路2将功率偏移量 P' 引入到有功功率 P 中。功率偏移量 P' 可以表示为。

$$P' = -k_{dc2}(U_{DC} - U_{DC0}) \quad (11)$$

假设在微电源和逆变器之间的功率是良好平衡的,并且微电源的输出功率 P_{ms} 等于逆变器的输出功率 P ,见式(12)。

$$P_{ms} = P \quad (12)$$

根据下垂控制2的控制方法及 $P_{ms} = P_{ref}$,可以求得式(13)

$$P_{ms} + P' = P_0 - (k_2 + k_{dc2})(U_{DC} - U_{DC0}) = P_0 - \frac{1}{m}(\omega - \omega_0) \quad (13)$$

4 仿真结果

为了验证双重下垂控制方案及其设计的可行性,在MATLAB中模拟所提出的微电网系统,并加以验证。

文中以两台微电源并列运行为例,1.5 s前微电网并网运行,在1.5 s时由并网运行模式切换到孤岛运行模式。传统下垂控制模式切换见图3。如图3所示,在使用传统下垂控制的时,模式切换的过程中产生了很大的震荡。

双重下垂控制模式切换的过程见图4。与图3

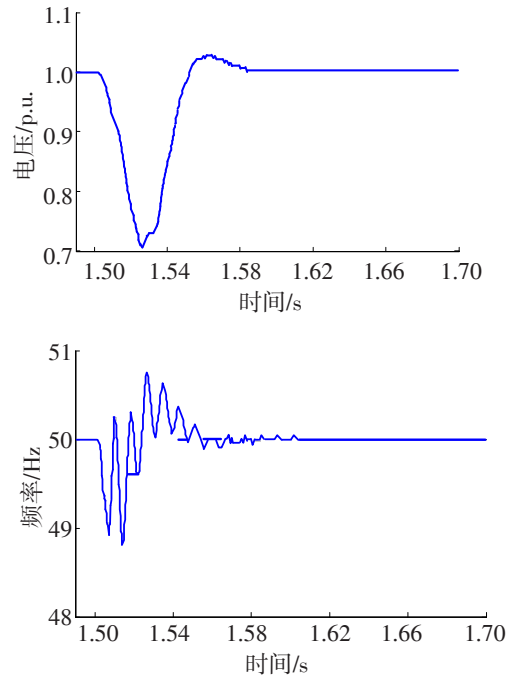


图3 传统下垂控制模式切换

Fig. 3 Traditional droop control mode switching

的切换过程相比,震荡明显减小。由此对比可以看出通过双重下垂控制非常有效的减小了微电网运行模式切换所产生的振荡,实现了微电网的平滑切换。

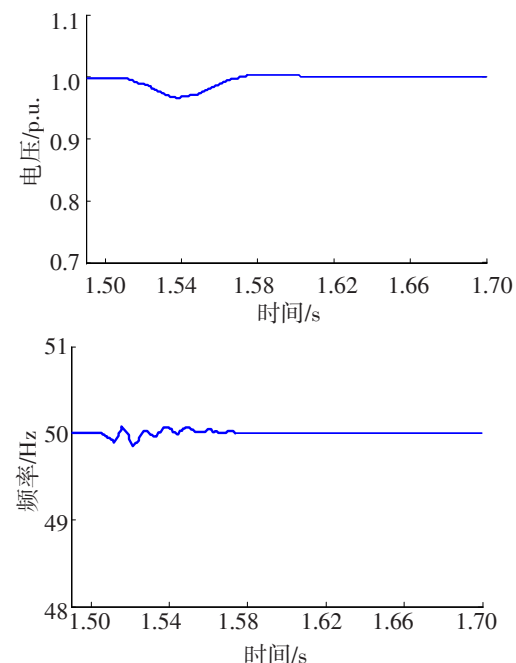


图4 双重下垂控制切换过程

Fig. 4 Switching process of double-droop control

5 结语

文中提出了一种双重下垂控制方法。在一般情况下,下垂控制2增加了一个功率偏移到下垂控制1的输出,根据直流总线的状态来修改逆变器的参考电压,并调节的微电源输出电压基于所述的直

流总线电压的状态。有了这种控制策略,微电源产生的功率可以自动调节。双重下垂控制实现了微电网的并网模式和孤岛模式的平滑切换。文中提出了双重下垂控制方案的设计方法和设计方法的有效性通过MATLAB仿真验证。

参考文献:

- [1] 王志文, 陈来军, 郑天文, 等. 采用搜索保护与差动保护的光伏微电网综合保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18):14-19.
WANG Zhiwen, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. A comprehensive protection scheme for photovoltaic micro grid using scan protection and differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18):14-19.
- [2] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19):100-106.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong. Summary of micro grid research[J]. Automation of Electric Power System, 2007, 31(19):100-106.
- [3] CHANDORKAR M C, DIVAN D M, ADAPA R. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems[J]. IEEE Trans. on Industrial Application, 1993, 29(1):136-143.
- [4] 程启明, 王映斐, 程尹曼. 分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6):147-154.
CHENG Qiming, WANG Yingfei, CHENG Yinman. Overview study on islanding detecting methods for distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6):147-154.
- [5] 周倩, 张志华, 邵文权, 等. 分布式小水电孤岛运行特性分析及对策研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(1):86-90.
ZHOU Qian, ZHANG Zhihua, SHAO Wenquan, et al. Operation feature analysis and countermeasure study on distributed micro-hydropower in island[J]. Power Capacitor & Power Compensation, 2016, 37(1):86-90.
- [6] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1):164-168.
YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Research on frequency control for microgrid in island operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(1):164-168.
- [7] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微电网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(11):6-11.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Key laboratory of smart grid of ministry of education[J]. Power System Technology, 2009, 33(11):6-11.
- [8] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微电网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7):98-103.
WANG Chenshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Integrated control and analysis of micro power system[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(7):98-103.
- [9] 姚玮, 陈敏, 牟善科, 等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6):77-80.
YAO Wei, CHEN Min, MOU Shanke, et al. Paralleling control technique of micro-grid inverters based on improved droop method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6):77-80.
- [10] LI Y W, KAO C. An accurate power control strategy for power electronics interfaced distributed generation units operating in a low voltage multibus micro-grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12):2977-2988.
- [11] 周龙华, 舒杰, 张先勇. 分布式能源微网电压质量的控制策略研究[J]. 电网技术, 2012, 6(10):17-22.
ZHOU Longhua, SHU Jie, ZHANG Xianyong. Control strategy of voltage quality in distributed energy microgrids[J]. Power System Technology, 2012, 6(10):17-22.
- [12] 赵冬梅, 张楠, 刘燕华. 基于储能的微网并网和孤岛运行模式平滑切换综合控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(2):301-306.
ZHAO Dongmei, ZHANG Nan, LIU Yanhua. Synthetical control strategy for smooth switching between grid, connected and islanded operation modes of microgrid based on energy storage system[J]. Power System Technology, 2013, 37(2):301-306.
- [13] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-A general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1):158-172.
- [14] 张纯, 陈民铀, 王振存. 微网运行模式平滑切换的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20):1-5.
ZHANG Chun, CHEN Minyou, WANG Zhencun. Research on control strategy of smooth switching of microgrid operation mode[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20):1-5.
- [15] VANDOORN T L, RENDERS B, DEGROOTE L, et al. Power balancing in islanded microgrids by using a DC-bus voltage reference[C]//International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation & Motion. [S.l.]: IEEE, 2010:884-889.
- [16] 张明锐, 杜志超, 王少波. 高压微网运行模式切换控制策略[J]. 电工技术学, 2014, 29(2):153-162.
ZHANG Mingrui, DU Zhichao, WANG Shaobo. Control strategies of high-voltage microgrid for operation modes switching[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2014, 29(2):153-162.
- [17] VANDOORN T L, RENDERS B, DEGROOTE L, et al. Active load control in islanded microgrids based on the grid voltage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1):139-151.

(下转第222页)

- and Technology, 2014, 29(3): 73-79.
- [11] HIRATA Y, MANDIC D P, SUZUKI H, et al. Wind direction modelling using multiple observation points[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2008, 366(1865): 591-607.
- [12] 王增平, 张乐丰. 考虑弃风的DFIG风电场动态等值模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 1-6.
WANG Zengping, ZHANG Lefeng. Dynamic equivalent model of wind farm with dfig considering wind power curtailment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 1-6.
- [13] 李辉, 王荷生, 赵斌, 等. 风电场不同等值模型的仿真研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(7): 1005-1013.
LI Hui, WANG Hesheng, ZHAO Bin, et al. Simulation analysis of a wind farm with different aggregated models[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(7): 1005-1013.
- [14] FERNÁNDEZ L M, GARCÍA C A, SAENZ J R, et al. Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(3): 691-704.
- [15] 徐玉琴, 张林浩, 王娜. 计及尾流效应的双馈机组风电场等值建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 70-76.
XU Yuqin, ZHANG Linhao, WANG Na. Study on equivalent model of wind farms with DFIG considering wake effects[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 70-76.
- [16] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [17] 吴峰, 孔卫亚, 周宇, 等. 考虑多风电场风速变化规律的模拟数据生成方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2038-2044.
WU Feng, KONG Weiya, ZHOU Yu, et al. A wind speed modeling method for multiple wind farms considering variation regularities[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2038-2044.
- [18] 曹娜, 于群, 王伟胜, 等. 风电场尾流效应模型研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(1): 222-229.
CAO Na, YU Qun, WANG Weisheng, et al. Research on wake effect model of wind farm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(1): 222-229.
- [19] 仲振, 王宝华. 双馈风电场次同步振荡建模与分析[J]. 可再生能源, 2015, 33(12): 1816-1824.
ZHONG Zhen, WANG Baohua. Modeling and analysis of a DFIG-based wind farm in sub-synchronous oscillation[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(12): 1816-1824.
- [20] 余洋, 米增强, 刘兴杰, 等. 基于运行数据的大型风电场建模方法研究[J]. 太阳能学报, 2011(10): 1543-1548.
YU Yang, MI Zengqiang, LIU Xingjie, et al. Modeling method of large-scale wind farm based on operating data[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(10): 1543-1548.

胡庆林(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制、风电场建模与分析等。

付盼(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制、高压电、风电场建模等(通讯作者)。

(上接第242页)

- [18] 王慧娟, 张建成, 冯骁. 直流微网中超级电容器储能系统控制方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(5): 134-139.
WANG Huijuan, ZHANG Jiancheng, FENG Xiao. Study on control method of the ultra-capacitor energy storage system in DC micro-grid[J]. Power Capacitor & Power Compensation, 2016, 37(5): 134-139.
- [19] BORREGA M, MARROYO L, GONZALEZ R, et al. Modeling and control of a master, slave PV inverter with N, paralleled inverters and three, phase three, limb inductors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2842-2855.
- [20] 艾欣, 金鹏, 孙英云. 一种改进的微电网无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 147-155.
AI Xin, JIN Peng, SUN Yingyun. An enhanced reactive sharing control strategy of micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 147-155.
- [21] 王晓寰, 张纯江. 分布式发电系统无缝切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 217-222.
WANG Xiaohuan, ZHANG Chunjiang. Study of control strategy for seamless transfer of grid-connected distributed generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 217-222.
- [22] KROPOSKI B, LASSETER R, ISE T, et al. Making microgrids work[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 40-53.
- 汪玉凤(1962—), 女, 硕士, 教授, 主要从事电网电能质量调节与控制、电力系统调度自动化、矿山自动化与信息化等方面研发。
- 李琳(1991—), 女, 硕士, 研究生, 从事微电网并网和光伏发电方面的研究。
- 王立辉(1978—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为配电运检管理。
- 张志强(1972—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为配电运检管理。