

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190405

# 自适应下垂系数的低压微电网功率控制策略

王二永, 王帅

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454150)

**摘要:** 在分布式电源(DG)并列运行的低压微电网系统中, 反下垂控制是实现负荷合理分配的有效方式。但各DG的等效输出阻抗和线路阻抗差异较大时, 传统反下垂控制的功率分配精度将受到明显的影响, 降低了系统的稳定性。针对这一问题, 提出一种适用于低压微电网系统的自适应下垂系数功率分配控制策略。其下垂系数的值随额定负载功率与实际负载功率的差值的变换而自适应调整, 提高了对公共负荷合理分配的精确性。最后, 在仿真平台上验证了所提策略的正确性和有效性。

**关键词:** 低压微电网; 分布式电源; 反下垂控制; 自适应; 下垂系数

## Power control strategy of low voltage microgrid based on adaptive droop coefficient

WANG Eryong, WANG Shuai

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan University of Technology, Jiaozuo 454150, China)

**Abstract:** In low-voltage microgrid system in which multiple DGs are operated in parallel, reverse drooping control is an effective way to realize reasonable load distribution. However, when the equivalent output impedance and the line impedance of the DG are different, the power allocation accuracy of the traditional reverse droop control will be obviously affected and the stability of the system will be reduced. In order to solve this problem, an adaptive droop coefficient power allocation control strategy for low voltage micro-grid system is proposed. The value of droop coefficient is adjusted adaptively with the transformation of the difference between rated load power and actual load power, which improves the accuracy of reasonable distribution of public load. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed strategy are verified on simulation platform.

This work is supported by the Key Scientific Research Projects in Henan Colleges and Universities (No. 17A510002) and PhD Foundation of Henan Polytechnic University (No. B2016-18).

**Key words:** low-voltage micro-grid; multiple DGs; inverse droop control; adaptive; droop coefficient

## 0 引言

在能源危机日益加剧和温室效应恶化的双重压力下, 国内外科研工作者将更多目光投向了利用各种新能源的分布式发电相关领域<sup>[1-2]</sup>。由分布式电源(DG)、负载及控制器等几部分组成的微电网系统是当前电力系统对新能源的主要应用手段<sup>[3]</sup>。目前对微电网系统中各DG的控制方式主要是采用传统下垂控制策略, 根据其相对应的功率下垂系数来实现对公共负荷功率的分配。

由于传统下垂控制适用于对线路阻抗比主要呈

感性的中高压微电网系统, 而对馈线阻抗比主要呈阻性的低压微电网系统则采用传统反下垂控制更为合适。同时, 也具有传统下垂控制的优点, 如: 可以在低压微电网系统的两种工作模式间的无缝切换、减小微电网的冲击电流、实现微电源的即插即用等<sup>[4]</sup>。当低压微网系统处于孤岛运行模式时, 公共负荷的存在以及线路阻抗差异会导致系统根据传统反下垂控制策略对公共负荷的功率分配不均匀, 影响系统的稳定性能。所以, 提高低压微网系统对负荷有功功率的分配性能, 是微网系统稳定运行的关键, 也是本文解决的问题<sup>[5-6]</sup>。

为减小或消除采用传统反下垂控制对低压微电网系统中各DG进行控制时造成的功率分配偏差的不利影响, 国内外研究人员提出了多种控制策

略, 文献[7-8]针对微电网系统中各 DG 输出线路阻抗差异影响功率分配的问题, 提出输出线路阻抗越大, 为了减小微网系统的环流和保证系统的稳定运行, 则相对应的 DG 对公共负荷所承担的功率越少。文献[9-10]提出了通过改变控制系统的参数以满足传统下垂控制在 DG 输出阻抗呈感性的应用环境, 然而其参数的设计不具有普遍性。文献[11-14]提出, 在低压微电网系统的传统反下垂控制器中引入虚拟阻抗或虚拟电抗达到较好的功率分配性能和抑制环流的目标; 但虚拟阻抗或电抗的引入会使母线产生较大的电压降, 从而降低输出电压的精确度。文献[15-18]提出, 引入自适应虚拟阻抗或自适应虚拟电阻改进传统反下垂控制策略, 达到较好的功率均分和环流抑制效果, 但也会产生较小的电压降, 进而影响系统的电能质量。文献[19]在传统反下垂控制策略的基础上通过引入功率与下垂系数的一次函数项和功率与时间的微分项, 提高了微网系统的稳定运行性能和动态响应能力。文献[20-22]分别提出了一种基于自适应下垂系数的改进传统反下垂控制策略, 达到功率精确合理分配的目的, 但是电压和频率较容易超出其限幅范围。

由于低压微电网系统中输出线路阻抗差异的存在, 使得低压微网系统中各 DG 的输出功率难以根据传统反下垂系数对公共负荷进行合理分配。对此, 本文提出了一种自适应下垂系数的改进型反下垂控制策略, 实现了各 DG 可以根据其相应的功率下垂系数对公共负荷合理分配。在低压微网系统中各 DG 输出线路阻抗差异存在的前提下, 该控制策略不仅提高了系统中各 DG 对公共负荷的功率分配精度, 而且也改善了系统的电能质量。最后, 在仿真平台上对本文所提控制策略进行了验证。

## 1 传统反下垂控制分析

### 1.1 传统反下垂控制策略

为了便于分析, 含有两台分布式电源并联运行的低压微电网系统等效为如图 1 所示的结构简图。图 1 中,  $V_i \angle \delta_i$ 、 $Z_i \angle \theta_i$  分别为第  $i$  台 DG 输出端电压、输出阻抗和线路阻抗之和,  $U \angle 0^\circ$  为公共母线电压。

则各 DG 输出的有功功率和无功功率分别为

$$P_i = U/Z_i^2 [Z_i \cos \theta_i (V_i \cos \delta_i - U) + Z_i \sin \theta_i V_i \sin \delta_i] \quad (1)$$

$$Q_i = U/Z_i^2 [Z_i \cos \theta_i (V_i \cos \delta_i - U) - Z_i \sin \theta_i V_i \sin \delta_i] \quad (2)$$

在低压微电网系统中, 线路阻抗主要呈阻性, 且相角差很小, 可以看作  $\sin \delta_i \approx 0$ 。因此, 可将式(1)、式(2)分别简化为

$$P_i = U(V_i - U)/R_i \quad (3)$$

$$Q_i = -UV_i \delta_i / R_i \quad (4)$$

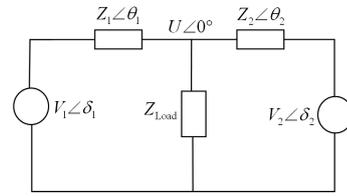


图 1 2 台分布式电源并联等效结构简图

Fig. 1 2 DGs parallel equivalent structure diagram

由式(3)、式(4)和  $\omega_i = d\delta_i / dt$  可知, 传统反下垂控制在低压微电网系统中的表达式为

$$V_i = V_N - m_i P_i \quad (5)$$

$$\omega_i = \omega_N + n_i Q_i \quad (6)$$

式中:  $V_i$ 、 $\omega_i$  分别为带负荷时各 DG 输出的电压幅值和角速度;  $V_N$ 、 $\omega_N$  分别为空载时各 DG 输出的电压幅值和角速度;  $m_i$ 、 $n_i$  分别为各 DG 的有功功率下垂系数和无功功率下垂系数;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为各 DG 输出的有功功率和无功功率。

### 1.2 功率分配分析

传统反下垂特性曲线原理如图 2 所示, 其中:  $V_2$  和  $V_1$  分别为低压微电网系统处于稳定运行范围内电压幅值的上下极限值;  $\omega_2$  和  $\omega_1$  分别为低压微电网系统处于稳定运行范围内电压角速度的上下极限值。

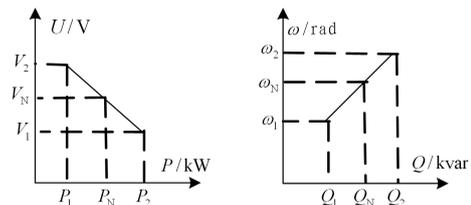


图 2 传统反下垂特性曲线

Fig. 2 Traditional inverse droop curve

因为  $\omega_i = 2\pi f_i$  且频率是全局变量, 所以低压微电网系统中各 DG 输出无功功率可以根据下垂系数对公共负荷进行合理分配。在此本文不对此进行讨论。

而对于有功功率, 因为各 DG 的输出电压是局部变量, 所以低压微电网系统中各 DG 输出有功功率难以根据有功功率下垂系数实现对公共负荷的合理分配。含有多 DG 并联运行的低压微电网系统处于孤岛运行时, 各 DG 输出的有功功率不仅包括公共负荷的有功功率而且也包括线路阻抗中的有功功率。但在实际工况中, 由于系统中各 DG 的输出线路阻抗差异的存在, 导致其输出的有功功率必不相等, 形成系统环流, 影响系统的稳定运行。为了实现系统中各 DG 输出功率对公共负荷的合理分配, 必须对传统反下垂控制策略中的  $P-V$  下垂关系式进行改进。

## 2 自适应调节下垂系数策略

### 2.1 改进策略的提出

因传统反下垂控制的有功功率下垂系数是一常数, 当 DG 输出的有功功率大幅增大或减小时, 根据式(5)可知, 其输出电压幅值会发生显著变化, 超出微网系统稳定运行的允许值, 影响系统的稳定性。为了维持低压微电网系统的稳定运行, 往往要以牺牲电压幅值的精度为代价。对此, 本文提出了一种自适应有功功率下垂系数的改进型传统反下垂控制策略。将传统反下垂控制的有功功率下垂系数定义为关于实际输出有功功率与参考输出有功功率差值的奇次函数  $m_i^*$ 。因奇次函数本身的固有属性, 即使负荷急剧连续变化, 其自适应有功功率下垂系数的变化也不会产生太大的变化, 达到提高低压微电网系统稳定性的目的。本文所提自适应下垂系数控制框图如图 3 所示。由图 3 可知, 本文所提改进策略中自适应下垂系数的值随额定负荷与实际负荷功率差值的变化而自适应调整, 使电压变化范围保持在低压微电网系统稳定运行的允许范围内。

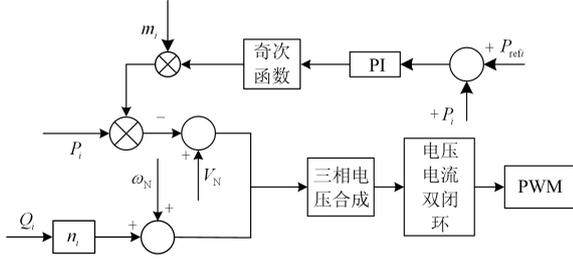


图 3 下垂系数控制框图

Fig. 3 Droop coefficient control block diagram

本文所提策略就是根据实际输出与额定功率差值的变化自动调节其相对应的有功功率下垂系数, 根据图 3 可得到改进后的下垂控制方程为

$$V_i = V_N - m_i^* P_i \quad (7)$$

$$\omega_i = \omega_N + n_i Q_i \quad (8)$$

式中:  $k \in R$  且  $0 \leq (2k+1) \leq 1$ ,  $m_i^* = m_i [1 + a^{(2k+1)}]$ ,  $a = (k_p + k_i/s)(P_i - P_{ref})$ ;  $k_p$  和  $k_i$  为比例积分控制器的比例系数和积分系数;  $P_{ref}$  是由中央控制器采集各逆变器实际输出有功功率后计算得到的, 因此中央控制器与各逆变器需建立通信连接系统。本文的通信连接系统参考文献[23], 在此不做详细叙述。

### 2.2 改进策略的分析

本文从有功功率下垂系数的角度出发, 实现各逆变器输出的有功功率达到合理分配的目的。假设该低压微电网系统中含有两台容量相同的分布式电源且各自的等效输出线路阻抗相同时, 各 DG 输出有功功率必然相等, 其各自的  $P-V$  曲线均如图 4

中曲线 1 所示。从曲线 1 可知, 两分布式电源采用了相同的有功功率下垂系数。但在实际工作环境下, 由于各 DG 的输出线路阻抗差异, 使得各 DG 的输出线路电压降  $\Delta E_1 \neq \Delta E_2$ , 从而使得其输出的有功功率  $P_1 \neq P_2$ 。为了维持微网系统的稳定运行, 则要求系统中各 DG 的输出电压幅值  $E_{ref}$  相等。因此, 需对其相对应的有功功率下垂系数进行改进, 达到抑制系统环流和提高微网系统稳定性能的目的。当采用本文所提控制策略改变其各自的有功功率分配系数, 其各自的  $P-V$  曲线分别为如图 4 中曲线 2 和曲线 3 所示。

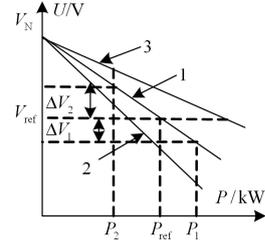


图 4  $P-V$  曲线图

Fig. 4  $P-V$  curve graph

当线路阻抗  $Z_1 < Z_2$  时, 则微网系统中各逆变器实际输出有功功率  $P_1 > P_2$ 。由图 4 中曲线 2 可知, 当有功功率  $P_1 - P_{ref} > 0$  时, 相对应在下垂系数  $m_1 < m$ , 保证各逆变器的输出电压幅值  $E_1 = E_2 = E_{ref}$ 。而曲线 3 则与曲线 2 相反。

## 3 仿真实验

### 3.1 仿真参数

为了验证本文所提控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 仿真平台上采用直流侧稳压源模拟含有 2 台容量相同的分布式电源在低压微电网系统环境下进行仿真实验。系统参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

参数	数值	
线路阻抗 $Z_1 / \Omega$	0.1284+j0.02	
线路阻抗 $Z_2 / \Omega$	0.1926+j0.03	
公共负荷 Load/ $\Omega$	3+j1.884	
PI 控制器参数	比例系数	5
	积分系数	80
下垂控制器参数	$k$	1/3
	$m$	0.000 3
	$n$	0.000 1

### 3.2 均分负荷

分布式电源通过交流母线共同为公共负载提供电能, 仿真时间设置为 3 s。在 0~1.5 s 内系统在传

统下垂控制策略中运行, 在 1.5~3 s 内系统在本文所提控制策略中运行。

图 5 为在传统反下垂控制策略和本文所提改进控制策略前后各 DG 输出的有功功率下垂系数对比图。图 5 中的  $m_i (i=1,2)$  是微网系统中第  $i$  台分布式电源的有功功率下垂系数值。由图 5 可以看出, 1.5 s 前系统中各 DG 采用有功功率下垂系数为一常数。1.5 s 前后进行了两种控制策略的切换, 使得低压微电网系统中各 DG 的有功功率下垂系数产生了一定的波动。但在较短的时间内达到了适用于微网系统中各逆变器有功功率的下垂系数值, 验证了本文在改进策略分析中的结论。

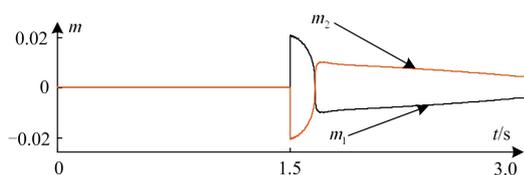


图 5 改进前后逆变器输出有功功率下垂系数对比图

Fig. 5 Comparison of active power droop coefficient output of inverter before and after improvement

图 6 为传统反下垂控制策略和本文所提改进控制策略前后各 DG 输出的有功功率对比图。图 5 中的  $P_i (i=1,2)$  是微网系统中第  $i$  台分布式电源输出的有功功率值。由图 6 可以看出, 1.5 s 前由于低压微电网系统中各 DG 采用传统固定下垂系数以及其等效输出阻抗差异的影响, 导致系统中各 DG 输出有功功率根据传统反下垂控制难以进行精确合理分配和系统稳定性能的下降。在 1.5 s 前后进行了两种控制策略的切换, 使得低压微电网系统中各 DG 输出的有功功率产生了一定的波动。但微网系统在较短的时间内达到稳定运行状态并且系统中各 DG 输出的有功功率的分配精度得到了明显的提高。

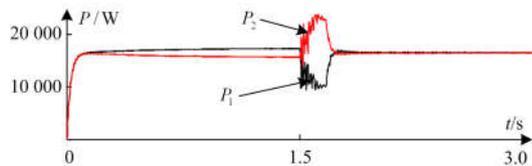


图 6 改进前后逆变器输出有功功率对比图

Fig. 6 Comparison diagram of active power output of inverter before and after improvement

图 7 为传统反下垂控制策略和本文所提改进控制策略前后各 DG 输出的无功功率对比图。图 5 中的  $Q_i (i=1,2)$  是微网系统中第  $i$  台分布式电源输出的无功功率值。由图 7 可以看出, 1.5 s 以前低压微电网系统采用了传统反下垂控制策略, 由于频率为一全局变量, 使得微电网系统中各 DG 输出的无功

功率能够根据无功功率下垂系数进行合理分配。在 1.5 s 后进行了两种控制策略的切换使得低压微电网系统中各 DG 的输出无功功率产生了一定的波动。但微网系统在较短的时间内达到稳定运行状态并且对系统中各 DG 输出的无功功率的分配精度产生了较小的影响。

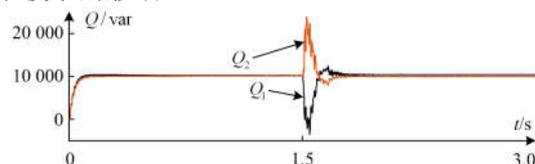


图 7 改进前后逆变器输出无功功率对比图

Fig. 7 Comparison diagram of reactive power output of inverter before and after improvement

## 4 结论与展望

针对含有线路阻抗不同的低压微电网系统, 本文提出了一种适用于低压微电网系统的自适应下垂系数的改进型反下垂控制策略。该策略弥补了因线路阻抗的差异而使得传统反下垂控制在低压微电网系统产生有功功率不合理分配的不足之处, 同时提高了微网系统的电能质量。仿真验证分析了本文所提的控制策略是基于系统三相对称的情况下实现的, 当系统处于不对称工况下, 还需要进一步探索。因此该策略具有一定的缺陷性, 且这将是进一步的研究任务。

## 参考文献

- [1] 曾鸣, 田廓, 李娜, 等. 分布式发电经济效益分析及其评估模型[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 129-133.  
ZENG Ming, TIAN Kuo, LI Na, et al. Economic benefit analysis and evaluation model for distributed generation[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 129-133.
- [2] 谷永刚, 王琨, 张波. 分布式发电技术及其应用现状[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(6): 38-43.  
GU Yonggang, WANG Kun, ZHANG Bo. Distributed power generation technologies and their current applications[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(6): 38-43.
- [3] 范其丽, 郑晓茜, 王璞, 等. 基于混合储能动态调节的独立混合微电网分布式协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 105-114.  
FAN Qili, ZHENG Xiaoxi, WANG Pu, et al. Decentralized control for autonomous hybrid microgrid with hybrid storage system dynamical regulating[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 105-114.
- [4] 任全礼, 郑连清. 低压微电网孤岛模式控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
REN Quanli, ZHENG Lianqing. Study on island mode control strategy for low-voltage microgrid[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [5] 方磊, 牛玉刚, 王思明, 等. 基于日前调度与实时控制

- 的微电网储能容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 102-110.
- FANG Lei, NIU Yugang, WANG Siming, et al. Energy storage capacity allocation of microgrid based on day-ahead scheduling and real-time control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 102-110.
- [6] ROCABERT J. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [7] VANDOOM T L, KOONING J D, MEERSMAN B, et al. Automatic power sharing modification of P/V droop controllers in low-voltage resistive micro-grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2318-2325.
- [8] YAO W, CHEN M, MATAS J, et al. Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 576-588.
- [9] 李红萍, 杨洪耕, 张浩. 基于下垂控制的微电网新型控制策略[J]. 可再生能源, 2015, 33(8): 1148-1153.
- LI Hongping, YANG Honggeng, ZHANG Hao. A new control strategy of microgrid based on droop control[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(8): 1148-1153.
- [10] HE Jinwei. Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(6): 2525-2538.
- [11] 林焱, 蔡振才, 吴丹越, 等. 微电网孤岛模式下基于虚拟阻抗负荷分配控制策略[J]. 电测与仪表, 2016, 53(9): 67-73.
- LIN Yan, GAI Zhencai, WU Danyue, et al. A control strategy of load distribution based on virtual impedance in an islanded mode micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(9): 67-73.
- [12] HE Jinwei. An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5272-5282.
- [13] ZHU Yixin. A virtual impedance optimization method for reactive power sharing in networked microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 2890-2904.
- [14] 马添翼, 金新民, 梁建钢. 孤岛模式微电网变流器的复合式虚拟阻抗控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 304-312.
- MA Tianyi, JIN Xinmin, LIANG Jiangang. Multiple virtual impedance control method of micro-grid converter under island mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 304-312.
- [15] 麦倩屏, 陈鸣. 用于多微源低压微电网的虚拟阻抗反下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 92-102.
- MAI Qianping, CHEN Ming. Virtual impedance inverted droop control for multi-microsource low-voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 92-102.
- [16] ZHANG Huaguang. Distributed adaptive virtual impedance control for accurate reactive power sharing based on consensus control in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1749-1761.
- [17] 康英伟, 汪笃红, 张经纬, 等. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网多阻性逆变器下垂控制策略[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(10): 40-45.
- KANG Yingwei, WANG Duhong, ZHANG Jingwei, et al. Droop control strategy of low-voltage micro-grid multi-resistive inverter based on adaptive virtual resistance[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(10): 40-45.
- [18] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 基于动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 1-6.
- YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen. Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 1-6.
- [19] 姚骏, 杜红彪, 周特, 等. 微电网逆变器并联运行的改进下垂控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 932-938.
- YAO Jun, DU Hongbiao, ZHOU Te, et al. Improved droop control strategy for inverters parallel operation in microgrid[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 932-938.
- [20] 杨海柱, 岳刚伟, 康乐, 等. 基于动态下垂系数的微电网下垂控制策略[J]. 测控技术, 2018, 37(7): 127-131.
- YANG Haizhu, YUE Gangwei, KANG Le, et al. Sag space control strategy for micro-grid based on dynamic droop coefficient[J]. TT & C Technology, 2018, 37(7): 127-131.
- [21] 孙孝峰, 杨雅麟, 赵巍, 等. 微电网逆变器自适应下垂控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2386-2391.
- SUN Xiaofeng, YANG Yalin, ZHAO Wei, et al. Adaptive droop control strategy for microgrid inverter[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2386-2391.
- [22] 郭通, 李燕青, 仝年, 等. 基于自调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 77-83.
- GUO Tong, LI Yanqing, TONG Nian, et al. Control strategy of microgrid based on self-adjusting droop coefficient[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 77-83.
- [23] HE Jinwei. An enhanced microgrid load demand sharing strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3984-3995.

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-09-06

作者简介:

王二永(1991—), 男, 硕士研究生, 从事低压微电网自适应下垂控制策略研究; E-mail: 1615562014@qq.com

王帅(1974—), 男, 博士研究生, 副教授, 从事电网技术、无线通信技术研究。E-mail: wangs2680@163.com

(编辑 魏小丽)