

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190282

基于自适应虚拟电阻的低压微电网下垂控制策略

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: 在多逆变器并联运行的低压微电网系统中, 由于各逆变器输出线路阻抗差异的存在, 导致系统中各分布式发电单元根据传统反下垂控制策略对公共负荷的有功功率难以进行合理分配, 影响系统的稳定性。针对这一问题, 对低压微电网系统的输出功率分配性能进行了理论分析, 得出影响功率分配性能的主要因素。将自适应虚拟电阻引入电压电流双闭环控制中, 不仅抑制有功功率和无功率间的耦合作用对系统稳定性产生的影响, 而且也提高了系统的输出电能质量。其自适应虚拟电阻的阻值能实时跟踪各分布式电源实际输出有功功率与参考输出有功功率差值的变化而自适应调整, 及时有效地补偿了因线路阻抗差异产生的母线电压降。采取所提策略使各分布式电源能够对公共负荷中的有功功率进行合理分配。最后, 在仿真平台上验证了该策略的有效性和正确性。

关键词: 低压微电网; 传统反下垂控制; 线路阻抗; 功率均分; 虚拟电阻; 自适应

Low voltage microgrid droop control strategy based on adaptive virtual resistance

WANG Eryong, WANG Shuai

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

Abstract: In the low voltage microgrid system with multiple inverters running in parallel, due to the difference of output line impedance of each inverter, it is difficult for each distributed power generation unit in the system to allocate the active power of the common load according to the traditional reverse droop control strategy, which affects the stability of the system. In order to solve this problem, this paper theoretically analyzes the output power allocation performance of low voltage micro-low network system, and obtains the main factors that affect the power allocation performance. Introducing adaptive virtual resistance into voltage and current double closed loop control not only suppresses the influence of the coupling between active power and reactive power on the stability of the system, but also improves the output power quality of the system. The resistance value of the adaptive virtual resistance can track the change of the difference between the output active power and reference output active power of each distributed power generation unit in real time and adjust adaptively, which compensate the bus voltage drop caused by the line impedance difference in time and effectively. The proposed strategy can make each distributed power supply distribute the active power in the common load reasonably. Finally, the effectiveness and correctness of the strategy are verified on the simulation platform.

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

Key words: micro-grid; traditional reverse droop control; line impedance; power sharing; virtual resistance; self-adaption

0 引言

随着不可再生能源危机的出现以及温室气体效应的增强, 可再生能源如风能、太阳能以及潮汐能等各种新能源成为越来越多科研人员的焦点。目前,

电力系统对新能源的利用主要是通过微电网作为载体的分布式电源供电系统。微电网系统由分布式电源(Distributed Generator, DG)、负载及控制器等几部分组成, 向用户提供电能^[1]。近年来, 微电网的功率分配性能已引起国内外学者的关注^[2-5]。

在微电网系统中, 采用对等控制模式对系统中各DG进行控制时, 各DG对通信设备的依赖大大降低, 仅依靠系统的就地信息进行控制^[6]。在这种控

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目资助(17A510002); 河南理工大学博士基金项目资助(B2016-18)

制模式下, 微电网系统中各DG控制策略的选取十分重要, 致使Droop控制得到国内外科学家的广泛关注^[7]。

下垂控制是微网系统中多DG并联运行的常用控制方法, 不仅为系统提供电压和频率支撑, 而且可以根据各自下垂特性方程实现功率的合理分配^[8]。然而, 下垂控制也存在以下问题: (1) 由于微网系统固有特性的影响, 使得传统下垂控制策略难以充分发挥系统中各DG的供能效率, 甚至影响系统的稳定性^[9-11]; (2) 下垂控制方式的选取与微网系统电压等级有关, 低压微电网系统所采用的是传统反下垂控制。与传统下垂控制相似, 同样具有波动小、即插即用等优点^[12-14]。

针对采用传统反下垂控制造成微网系统功率分配精度下降的问题, 国内外学者提出了多种改进策略。文献[15-17]分别在传统反下垂控制策略的基础上引入虚拟阻抗来减缓因各逆变器间功率耦合给微网系统带来的不利影响, 但其没有考虑加入虚拟阻抗对母线电压的影响。文献[18-20]分别通过构造自适应虚拟电阻或自适应虚拟阻抗等方法, 弥补虚拟阻抗或虚拟电阻产生的电压降的同时抑制系统环流。然而, 上述自适应虚拟控制策略使得线路压降增大, 不能兼顾电能质量。文献[21-23]分别提出了一种自适应下垂系数来达到功率均分的目的, 但其自适应下垂系数的调节仍是有差调节, 导致其动态性能差。上述下垂改进型控制策略虽然不同程度地改善了系统的功率分配精度, 但没有实验证明系统电能质量的改善效果。

本文针对低压微电网系统中 $R \gg X$ 的特点, 以 $P-V$ 关系为基础, 提出了一种基于自适应虚拟阻抗的低压微电网功率分配策略^[24]。该方法可以在各DG输出线路阻抗未知的情况下, 改善微电网系统中各DG输出功率的分配精度。最后, 通过仿真实验验证了本文所提策略的可行性。

1 传统反下垂控制分析

1.1 传统反下垂控制策略

由于单台DG的容量有限, 所以多DG并列运行是低压微电网系统中的一种普遍运行方式。为了简化分析, 本文将对低压微电网系统中的两台DG进行分析, 其等效简化电路图如图1所示。其中 $E_i \angle \delta_i$ 、 $Z_i \angle \theta_i$ 分别为各DG输出端电压、各DG输出阻抗和线路阻抗之和。 $U \angle 0^\circ$ 为公共母线PCC点处的电压, Z_{load} 为系统的公共负荷。

由图1可知, 微网系统中各DG输出的有功功

率和无功功率分别为

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

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

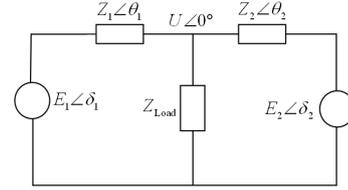


图1 2台DG并联等效模型

Fig. 1 Equivalent model of two DG parallel

在低压微电网系统中线路阻抗主要呈阻性, 感性成分可以忽略不计, 即 $Z_i \approx R_i$ 。而且相角差很小, 可以看作 $\theta_i \approx 0$ 。因此, 可将式(1)、式(2)简化为

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

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

由式(3)、式(4)可以看出, 在低压微电网系统中各逆变器输出的有功功率由其输出端电压幅值决定, 而无功功率则由其输出端电压与公共端电压的相角差值所决定。由于 $\omega = d\delta/dt$, 因此可以通过无功功率控制角速度从而控制相角差。所以, 在线路阻抗为阻性的低压微电网系统中的逆变器所采用的 $P-V$ 、 $Q-f$ 下垂控制方程为

$$E_i = E_N - m_i P_i \quad (5)$$

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

式中: E_i 、 ω_i 分别为带负荷时各DG输出的电压幅值和角速度; E_N 、 ω_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

当低压微电网系统达到稳定运行状态时, 因频率是一全局变量, 使得系统中各DG输出的无功功率受各分布式电源相对应的输出线路阻抗差异的影响可以忽略不计, 基本能实现对公共负荷中无功功率的均匀分配。

而系统中各DG输出电压幅值作为局部变量, 因各DG相对应的输出线路阻抗差异导致其输出的有功功率不能实现对公共负荷中有功功率的均匀分配。因此, 本文只研究传统反下垂控制策略中的 $P-V$ 下垂关系式。

因孤岛型微电网系统中DG输出的功率包含输电

线路消耗的功率和负荷功率两部分, 为了改善微网系统的稳定性能, 文献[25-26]提出系统中 DG 的输出线路阻抗越大, 则相对应的 DG 对公共负荷所承担的功率越少。把式(5)代入式(3), 则式(3)可化为

$$P_i = U(E_N - U)/(R_i + m_i U) \quad (7)$$

假设系统中各 DG 的额定容量和有功功率下垂系数均相同, 则逆变器输出的有功功率相对偏差为

$$\Delta P_{err} = 1 - P_i/P_j = 1 - (R_j + m_j U)/(R_i + m_i U) = [(R_i - R_j) + (m_i - m_j)U]/(R_i + m_i U) \quad (8)$$

由式(8)可知, 系统中采用传统反下垂控制策略控制的各 DG 输出的有功功率相对偏差与等效输出电阻、有功下垂系数有关。所以, 通过改变有功功率下垂系数或改变线路阻抗均可减小有功功率偏差。但是, 一方面改变有功功率下垂系数会影响系统的稳定性, 严重时导致系统崩溃; 另一方面改变线路阻抗会产生一定的输出线路电压降, 影响系统的供能效率。因此, 需要对传统反下垂控制策略进行改进。

2 自适应虚拟电阻控制策略

2.1 自适应虚拟电阻控制策略的提出

为了提高传统反下垂控制对低压微电网系统中各 DG 对公共负荷中有功功率的分配精度, 本文在文献[18]将 DG 的等效输出阻抗设计成阻性的基础上, 提出了一种基于自适应虚拟电阻的改进型传统反下垂控制策略来补偿由虚拟电阻的加入造成线路电压降的不足, 控制框图如图 2 所示。

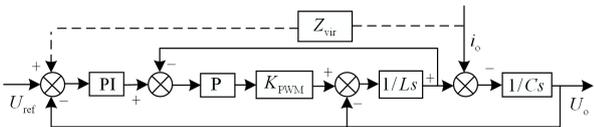


图 2 引入自适应虚拟阻抗的电压电流双环控制框图

Fig. 2 Control block diagram of voltage and current dual-loop control method of adaptive virtual resistance

图 2 中: U_{ref} 为电压环输入参考电压; K_{PWM} 为 PWM 调制环节增益; i_o 为负载电流; U_o 为双环输出信号。且电压外环回路 PI 环节的比例积分增益分别为 K_{vp} 和 K_{vi} , 电流内环回路的 P 环节增益为 K_{ip} 。由图 2 可得其戴维南等效模型为

$$\begin{aligned} U_o &= G(s)U_{ref} - (Z_o(s) + G(s)R_v)i_o = \\ &G(s)U_{ref} - (R_v + Z_o(s))i_o = \\ &G(s)U_{ref} - Z'_o(s)i_o \end{aligned} \quad (9)$$

式中:

$$\begin{aligned} G(s) &= K_{vp}K_{ip}K_{PWM}s/\Delta + K_{vi}K_{ip}K_{PWM}/\Delta ; \\ Z'_o(s) &= Ls^2/\Delta + (1 + K_{vp}R_v)K_{ip}K_{PWM}s/\Delta + \\ &K_{vi}K_{ip}K_{PWM}R_v/\Delta \end{aligned}$$

其中, $\Delta = LCs^3 + K_{ip}K_{PWM}Cs^2 + (1 + K_{vp}K_{ip}K_{PWM})s + K_{vp}K_{ip}K_{PWM}$; $G(s)$ 为逆变器参考电压增益函数, 其特性与逆变器的稳压能力有关; $Z_o(s)$ 为 DG 的等效输出阻抗。当 DG 输出电压完全跟踪参考电压(即 $G(s)=1$ 、 $Z_o(s)=0$)时, 低压微电网系统处于稳定运行状态。

2.2 自适应虚拟电阻设计

为减小引入虚拟电阻产生的系统输出电压幅值下降, 引入自适应虚拟电阻。把式(3)、式(4)联立, 可得如下关系:

$$R_i = -U^2\delta_i/(P_i\delta_i + Q_i) \quad (10)$$

由式(10)可知, 低压微电网系统中各 DG 的等效输出电阻与输出电压幅值、输出有功功率、输出无功功率以及输出电压与母线电压相角差均有关。因此, 引入虚拟电阻后, DG 的输出有功功率和输出电压幅值均会发生变化。因为, PI 控制具有控制速度快、控制精确等诸多优点, 故引入自适应虚拟电阻的表达式为

$$R_{vi} = K_p(\Delta P) + K_i(\Delta P) \quad (11)$$

式中: R_{vi} 为自适应虚拟电阻, 可以改变各逆变器的等效输出阻抗特性, 提高系统的稳定性; ΔP 为各 DG 实际输出有功功率与参考有功功率的差值; K_p 和 K_i 分别为 PI 控制器的比例系数和微分系数, 来补偿加入虚拟阻抗造成的电压降。PI 控制器的调节速度与 K_p 和 K_i 的选取有关, 选取合适的调节系数有利于系统的稳定运行, 同时也可减小因虚拟电阻的加入导致母线电压降的产生。本文对于 PI 控制器相关参数的选取以及如何确保微网系统的稳定性与文献[18]PD 控制器类似, 不对此进行详细叙述。

低压微电网系统通过不断采集各 DG 的输出有功功率值, 将其代入设计的自适应虚拟阻抗关系式中, 动态调整虚拟电阻的阻值, 改变各 DG 的线路阻抗。求得系统总的线路电压降 $\Delta U'$, 将其作为逆变器指令电压的补偿, 即

$$U_o = U_{ref} + \Delta U' \quad (12)$$

式中, $\Delta U' = G(s)R_{vi}i_o(0)$, 即为引入虚拟电阻后对输出线路电压降的补偿量。通过引入自适应虚拟电阻, 不断求取其补偿电压值, 不仅改变逆变器指令电压, 而且克服了因虚拟电阻引起母线电压降的问题, 满足了传统下垂控制在低压微电网系统中的适用性, 提高了逆变器输出有功功率的分配精度, 使得系统

供电质量得到改善。

3 仿真验证

本文仿真实验环境采用的是处于孤岛运行工作状态的低压微电网系统, 该系统由 3 台 DG 并联运行组成。在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建其仿真模型, 与 3 台 DG 连接的是本地恒功率负荷 $Load_1$ 、 $Load_2$ 以及 $Load_3$, 微网系统通过交流母线与公共负荷 $Load_1$ 、公共负荷 $Load_2$ 连接, 仿真时间设置为 2 s, 以验证本文所提策略的可行性。在 0~1 s 内, 系统中各 DG 不仅承担各自的本地恒功率负荷, 而且还共同承担公共负荷 $Load_1$; 在 1~2 s 内, 系统中的公共负荷 $Load_1$ 切换到公共负荷 $Load_2$ 。系统参数如表 1 所示。

表 1 参数设置

Table 1 Parameters setting

参数	数值	
U_{dc}/V	450	
L/H	0.005	
C/F	0.000 4	
线路阻抗 Z_1/Ω	$0.6+j0.075$	
线路阻抗 Z_2/Ω	$0.9+j0.11$	
线路阻抗 Z_3/Ω	$1.2+j0.15$	
本地负荷 $Load_1$	12 kW+j6 kvar	
本地负荷 $Load_2$	10 kW+j5 kvar	
本地负荷 $Load_3$	8 kW+j4 kvar	
公共负荷 $Load_1$	24 kW+j12 kvar	
公共负荷 $Load_2$	32 kW+j16 kvar	
PI 控制器参数	比例系数	0.000 32
	积分系数	0.016
下垂控制器参数	m	0.000 3
	n	0.000 1

图 3 为采用传统反下垂控制策略和本文所提控制策略对两台并联运行的 DG 进行控制时, 其输出的有功功率。图中的 $P_i (i=1,2)$ 是微网系统中 DG_{*i*} 输出的有功功率值。从图 3(a)中可以看出, 有功功率由于输出线路阻抗差异的影响, 导致其不能实现均匀分配。图 3(b)为采用本文所提控制策略自适应调节虚拟阻抗的值达到控制系统中各 DG 的输出线路阻抗, 实现其输出有功功率的均匀分配。由图 3(b)可以看出, 在加入自适应虚拟阻抗后, 系统中的 DG_{*i*} 能够在较短的时间内达到稳定运行状态, 有功功率的分配精度得到明显的提高, 而且在负荷突变的过程中, 系统动态响应快, 同时整个运行过程中功率的波动更小。

图 4 为采用传统反下垂控制策略和本文所提控制策略对两台并联运行的 DG 进行控制时, 其系统环流对比图。从图 4(a)中可以看出, 由于系统中各

DG 输出线路阻抗差异的影响, 导致其系统环流逐渐增大; 图 4(b)为采用本文所提控制策略自适应调节虚拟阻抗的值达到控制系统中各 DG 的输出线路阻抗, 实现抑制系统环流的目的。由图 4(b)可以看出, 在加入自适应虚拟阻抗后, 系统环流得到了明显的抑制, 而且在负荷突变的过程中, 系统动态响应快, 同时整个运行过程中环流的波动更小。

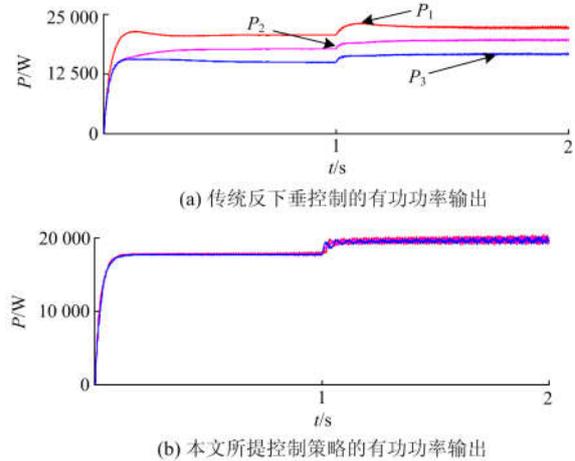


图 3 有功功率输出对比图

Fig. 3 Comparison diagram of output active power

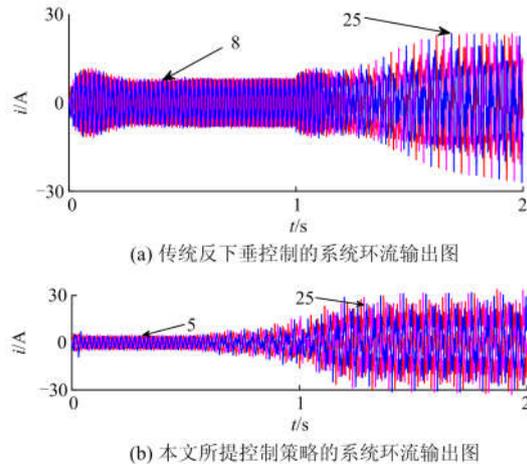


图 4 系统环流输出对比图

Fig. 4 Comparative diagram of circulation output of the system

4 结论

本文提出了一种适用于低压微电网系统中的自适应虚拟电阻的改进型传统反下垂控制策略, 在文献[20]通过设计参数使逆变器输出阻抗为阻性的前提下, 引入自适应虚拟电阻, 其虚拟电阻值随 DG 实际输出有功功率与参考输出有功功率差值的变化而变化。自适应虚拟电阻环节的设计旨在消除由虚

拟电阻环节的引入而导致的系统中各 DG 母线电压降过大的不利影响, 达到各 DG 的输出有功功率对公共负荷均匀分配的目的。仿真实验结果表明, 采用本文所提控制策略, 不仅提高了低压微网系统的功率分配精度, 而且微网系统的电能质量得到了明显的改善。

参考文献

- [1] LASSETER B. Microgrids distributed power generation[C] // 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, 1: 146-149.
- [2] 方磊, 牛玉刚, 王思明, 等. 基于日前调度与实时控制的微网储能系统容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 102-110.
FANG Lei, NIU Yugang, WANG Siming, et al. Optimal capacity determination method based on day-ahead scheduling and real-time control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 102-110.
- [3] 王春梅, 熊斌宇. 基于储能调度模式的微电网不平衡功率平抑两阶段方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(2): 22-29.
WANG Chunmei, XIONG Binyu. Two-stage method for unbalanced power smoothing in microgrid based on energy storage dispatch mode[J]. Smart Power, 2019, 47(2): 22-29.
- [4] ROCABERT J. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [5] VANDOOM T L, KOONING J D, MEERSMAN B, et al. Automatic power sharing modification of P/V droop controllers in low voltage resistive microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2318-2325.
- [6] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [7] 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 Chengshan, XIAO Chaoxia, WANG Shouxiang. Integrated control and analysis of micro-power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [8] 郭倩, 林燎源, 武宏彦, 等. 考虑自适应虚拟阻抗的微电网分布式功率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 23-29.
GUO Qian, LIN Liaoyuan, WU Hongyan, et al. Distributed power control strategy for microgrids considering adaptive virtual impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 23-29.
- [9] LI Y W, KAO C N. An accurate power control strategy for inverter based distributed generation units operating in a low voltage microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.
- [10] LOPES J A P, MOREIR C L, MADUREIARA A C. Defining control strategy for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [11] IYER S V, BELUR M N, CHANDORKAR M C. Analysis and mitigation of voltage offsets in multi-inverter microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy conversion, 2011, 26(1): 254-63.
- [12] LAAKSONEN H, KOMULAINEN R. Voltage and frequency in inverters based weak LV network microgrid[C] // 2005 International Conference on Future Power Systems, November 18-18, 2005, Amsterdam, Netherlands.
- [13] 任庭昊, 代启璨, 郝新翔, 等. 低压微电网并联逆变器控制策略研究[J]. 智慧电力, 2019, 46(7): 34-39.
REN Tinghao, DAI Qican, HAO Xinxiang, et al. Research on control strategy of low-voltage microgrid parallel inverter[J]. Smart Power, 2019, 46(7): 34-39.
- [14] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.
WANG Chengshan, XIAO Chaoxia, WANG Shouxiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro-source in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-107.
- [15] 袁敞, 丛诗学, 徐衍会. 应用于微电网的并网逆变器虚拟阻抗控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 144-154.
YUAN Chang, CONG Shixue, XU Yanhui. Overview on grid-connected inverter virtual impedance technology for microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 144-154.
- [16] 赵巧娥, 张乐乐, 武晓冬, 等. 基于并联虚拟电阻的多逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 30-39.
ZHAO Qiao'e, ZHANG Lele, WU Xiaodong, et al. Control strategy for multi-inverters based on parallel virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 30-39.
- [17] 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.
- [18] 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]. 科学与技术工程, 2017, 17(10): 40-45.
- KANG Yingwei, WANG Duhong, ZHANG Jingwei, et al. Droop control strategy for multi-resistive inverters of low voltage microgrid based on adaptive virtual impedance[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(10): 40-45.
- [19] MAHMOOD H. Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1605-1617.
- [20] 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.
- [21] 许吉强, 卢闻州, 吴雷. 低压微电网逆变器的自调节下垂系数控制策略[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 13-18.
- XU Jiqiang, LU Wenzhou, WU Lei. Self-regulation sag coefficient control strategy for low voltage microgrid inverter[J]. Motor and Control Application, 2017, 44(6): 13-18.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] LAAKSONEN H, SAARI P, KOMULAINEN R. Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid[C] // 2005 International Conference on Future Power Systems, November 18-18, 2005, Amsterdam, Netherlands.
- [25] 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.
- [26] LAAKSONEN H, SAARI P, KOMULAINEN R. Control of voltage and frequency in inverter and synchronous generator based urban LV microgrid[C] // Proceedings the Sixth IASTED International Conference on European Power and Energy Systems, 2006: 26-28.
-
- 收稿日期: 2019-03-28; 修回日期: 2019-11-17
- 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, 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)