

DOI: 10.7667/PSPC180040

基于变流器控制策略的微电网故障特性仿真研究

康晴¹, 罗奕^{1,2}, 卢新佳¹, 高鹏¹

(1. 桂林电子科技大学机电工程学院, 广西 桂林 541004;
2. 广西制造系统与先进制造技术重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 微电网中分布式电源(Distributed Generators, DG)变流器的控制策略不同, 可能导致不同的故障特征, 进而影响保护的配置。为此, 对 DG 变流器的下垂控制策略和虚拟同步机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制策略的特性进行比较分析。并针对一种简化的微电网等效模型, 用 Matlab/Simulink 分别对各种条件下的故障特性进行仿真研究。对仿真结果进行比较表明, DG 采取不同的控制策略时, 微电网故障时在短路电流幅值变化、暂态过电压持续时间、故障后系统保持稳定等方面均有不同特点。研究结果可为微电网的保护配置提供相应的参考。

关键词: 微电网; 控制策略; 虚拟同步机; 下垂控制; 故障特性

Simulation study on microgrid fault characteristics based on converters control strategy

KANG Qing¹, LUO Yi^{1,2}, LU Xinjia¹, GAO Peng¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. Guangxi's Key Laboratory of Manufacturing Systems and Advanced Manufacturing Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: There are various Distributed Generators (DG) converters with different control strategies in a practical microgrid, which may lead to different fault characteristics and protection configuration. Therefore, the characteristics of the droop control strategy and the Virtual Synchronous Generator (VSG) control strategy are compared. On this basis, a simplified equivalent microgrid model is analyzed with Matlab/Simulink simulation under different fault conditions. The results show that different control strategies of DG converters will cause different fault characteristics when short-circuits happen in microgrid. The differences appear in many aspects, that is, the short circuit current amplitude variation, transient overvoltage duration, and the stable level after short-circuit. The study provides corresponding references for relay protection configuration of microgrid.

This work is supported by Guangxi Science and Technology Project (No. AC16380041).

Key words: microgrid; control strategy; virtual synchronous generator; droop control; fault characteristic

0 引言

现有研究表明, 微电网是一种容纳分布式发电的最有效形式, 是智能配电网的基本组成单元^[1-2]。近年来, 以风能和太阳能为代表的可再生能源发电技术日益成熟, 装机容量不断增加, 其以分布式发电方式接入微电网, 在成本和效率方面更具优势^[3]。不同分布式电源(Distributed Generators, DG)的电力电子接口(变流器)有主从、对等控制等模式。微电网 DG 采用对等控制模式的优点是能减轻采集微电

网系统内的 DG 出力及负荷状态的实时性需求, 避免主从模式中通过能量管理系统对功率进行分配时, 过度依赖通信系统的弊端。在微电网由并网切换至孤岛状态时, DG 变流器可以采取下垂控制或虚拟同步机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制策略, 两者在外环功率控制方面有相似的特性, 具有不同的自适应性, 有助于在孤岛状态下以对等运行模式向微电网提供电压及频率支撑, 保持系统功率供需平衡。下垂控制是微电网中 DG 常见的一种控制策略, 通过加入电压电流双环控制, 避免电压、电流的波动幅度过大, 具体实现方法和考虑因素不同得到的动态特性各异^[4]。然而, 这种控制策

基金项目: 广西科技计划项目资助(桂科 AC16380041)

略也使系统缺乏有效阻尼和惯量，针对这一问题，VSG 控制策略应运而生，VSG 控制引入虚拟转动惯量，解决分布式发电系统惯性低和没有短时过载能力的缺点^[5-9]。可见，DG 之间特性的巨大差异增大了微电网运行控制的复杂性，除了一次能源的影响外，DG 的出力特性还主要取决于电力电子接口的控制策略，各种不同 DG 采用不同的电力电子接口及控制策略时，加剧了控制微电网运行时电能质量以及安全稳定性的难度，这对微电网的保护提出了新的课题。

文献[10-11]分析含 V/f 控制 DG 的微电网故障后的暂态特性以及 DG 等值模型，文献[12]研究了微电网系统的电压、电流、频率以及功率的故障暂态恢复特性，目前针对含有 VSG 的微电网的故障分析还很少。本文将重点基于 DG 的变流器控制策略，研究微电网的故障特性。介绍了 VSG 和下垂控制策略的原理和典型实现方法，针对微电网孤岛运行状态时发生短路的情况，探讨 DG 变流器采用 VSG 控制策略与下垂控制策略时的不同故障特征，并在此基础上分析两者在故障清除后恢复正常工作的能力，为进一步完善微电网保护系统提供基础。

1 控制器原理

1.1 虚拟同步机控制原理

VSG 控制是为了使变流器模拟传统同步电机的动态行为，VSG 控制结构主要分为三部分：虚拟调速器、励磁调节器、控制电压合成，如图 1 所示。

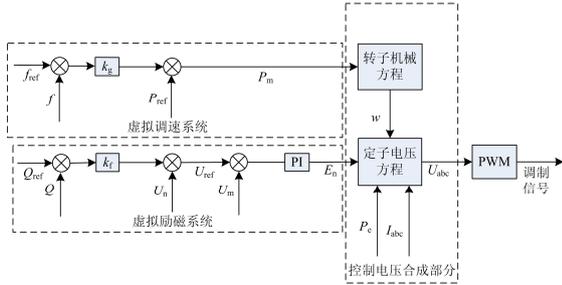


图 1 虚拟同步机控制框图

Fig. 1 Control block diagram of virtual synchronous generator

虚拟机调速系统控制模拟了同步电机对转速控制的特性，从而有效对有功功率和频率实现调控；励磁控制器实现虚拟机系统的励磁环节，主要作用是 VSG 的无功-电压调节特性，其中，PI 环节具有无差调节能力，实现对电压-无功功率静特性的无差控制，较为稳定的暂态特性能够确保电压不会剧烈振荡，同时抑制了电流的突变。虚拟机中的虚拟转动惯量模拟同步发电机的机械惯性，频率的变化具有阻尼特性，有利于系统的频率稳定^[13-14]。VSG 的

有功-频率特性和电压-无功特性为

$$P_m - P_{ref} = K_g (f_{ref} - f) \quad (1)$$

$$U - U_{ref} = K_q (Q_{ref} - Q) \quad (2)$$

式中： P_m 和 f 分别为输入 VSG 的机械功率和电网频率； P_{ref} 和 f_{ref} 分别为额定功率和额定频率； U 和 Q 分别为 VSG 端电压和无功功率输出； U_{ref} 和 Q_{ref} 分别为额定电压和额定无功功率； K_g 和 K_q 分别为比例系数。

由式(1)和式(2)可知，通过调节逆变器的频率和无功输出可以分别改变其有功功率输出和端电压，微电网中接入多个 VSG 单元时，能够自动调节各个单元的功率分配。

参照虚拟的转子运动方程建立功率变化与频率变化的关系，如式(3)所示^[15]。

$$\frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D_v (\omega - \omega_b) = J_k \frac{d(\omega - \omega_b)}{dt} \quad (3)$$

式中： J_k 为虚拟惯量； P_e 为电磁功率； D_v 为虚拟阻尼系数。

微电网在负荷切换和发生故障的情况时均可导致频率波动，转子机械运动方程中，当转子角速度 ω 变化打破输入机械功率和电磁功率平衡时，虚拟转矩出现不平衡转矩，通过调节使输入机械功率和输出有功功率重新达到平衡，转子以 ω_b 的速率运行，VSG 实现调整有功功率响应系统功率变化，对电网频率进行动态支撑。控制电压合成部分模拟 VSG 的感应电动势和端电压，如式(4)所示。

$$\dot{E}_i - \dot{U}_i = \dot{I}_i (r_n + jx_d) \quad (4)$$

式中： \dot{E}_i 和 \dot{U}_i 分别为 VSG 的感应电动势以及端电压； \dot{I}_i 为端电流； r_n 和 x_d 分别为虚拟定子电枢电阻和同步电抗。

1.2 下垂控制原理

下垂控制策略采取多环反馈控制，外环控制器采用具有下垂特性的功率控制器对功率进行控制，内环控制器采用电压电流控制，其中，电压环控制变量为负载电压，采用 PI 控制器，能够跟踪由功率下垂控制产生的参考电压，提高稳态精度^[16-17]；电流环的控制变量为电容电流，采用比例控制器，进一步提高动态响应，如图 2 所示。

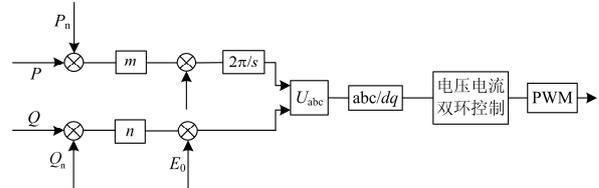


图 2 下垂控制框图

Fig. 2 Droop control block diagram

微电网在离网模式下时, DG 需要为微电网提供电压及频率支撑, 基于控制框图外环控制所实现的 P-f 和 Q-V 下垂控制, 特性如式(5)和式(6)所示^[18], 控制逆变器输出的有功功率调节电压相角, 控制无功功率调节逆变器输出的电压幅值, 结合负荷削减, 保持系统功率供需平衡。

$$P - P_n = m(f_n - f_0) \quad (5)$$

$$Q - Q_n = n(E_n - E_0) \quad (6)$$

式中: P 和 f_0 分别为变流器注入功率和电网的频率; P_n 和 f_n 分别为额定功率和频率; m 为比例系数; E_0 和 Q 分别为变流器输出端电压和无功功率; E_n 和 Q_n 分别为额定电压和额定无功功率; n 为比例系数。

内环控制器主要对注入网络的电压电流进行调节, 进而提高电能质量。其控制方程如式(7)和式(8)所示。

$$L \frac{di_{labc}}{dt} = u_{labc} - u_{gabc} \quad (7)$$

$$C \frac{du_{gabc}}{dt} = i_{Cabc} \quad (8)$$

式中: i_{labc} 和 i_{Cabc} 分别是滤波电感电流和滤波电感电流; u_{labc} 和 u_{gabc} 分别是滤波电感电压和线路负载端电压。将上述电感电压方程和电容方程进行 park 变换, 在 $dq0$ 坐标系下实现解耦, 分别对电压、电流进行控制^[19]。

2 DG 通过变流器接入微电网的方式

图 3 表示 DG 以电力电子变流器为接口接入微电网的方式, 微电网的接地形式采用 TN-S 系统。

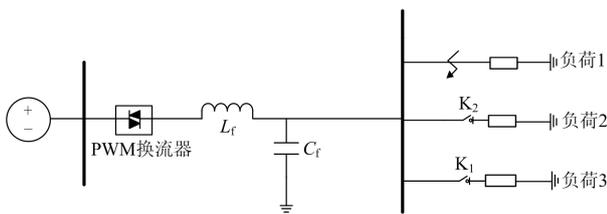


图 3 微电网等效模型

Fig. 3 Equivalent model of a typical microgrid

微电网中 DG 的变流器采用不同控制策略时, 相当于在微电网接入种类不同的发电机, 其特性必然直接影响微电网发生故障时的故障特征。针对该接入方式, 讨论不同变流器控制策略下微电网的运行及故障特性。为便于对比, 选择 DG 变流器的控制策略分别采用虚拟同步机和下垂控制策略, 设微电网在孤岛模式下运行, DG 由分布式发电装置和储能装置组成, 储能装置接在直流侧, DG 容量能够满足负荷的功率需求, 直流侧电压 U 可视为基本

保持恒定, $U=700$ V, 因此, DG 在两种控制方式下都为电压源, 负荷 1 为 6 000 W, 负荷 2 为 2 000 W, 负荷 3 为 4 000 W, K_1 开关在 0.5 s 闭合; K_2 开关在 1 s 断开, 交流母线阻抗忽略不计, 仅考虑线路阻抗。微电网正常运行时, DG 变流器输出电压、电流的幅值以及频率都符合规范。DG 经变流器输出的电压、电流及功率如式(9)和式(10)所示^[20]。

$$\dot{U} = \dot{I}(Z_{line} + Z_{load}) \quad (9)$$

$$S = P + jQ = 3\dot{U} \cdot \dot{I}_f \quad (10)$$

当发生对称故障时, DG 输出的电压、电流以及功率如式(11)和式(12)所示。

$$\dot{U} = \dot{I}_f \cdot Z_f \quad (11)$$

$$S = P + jQ = 3\dot{I}_f^2 \cdot Z_f \quad (12)$$

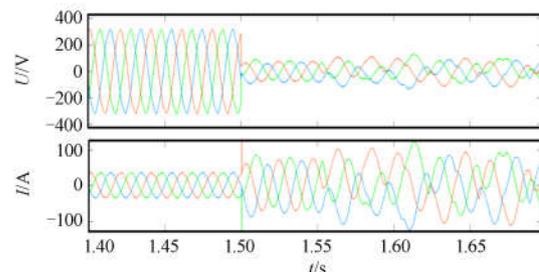
式中: \dot{I}_f 为故障电流; Z_f 为电源出口到故障点间的等效阻抗, 包括故障后的电源阻抗和线路阻抗。设 VSG 和下垂控制的等效阻抗分别为 Z_{f1} 和 Z_{f2} , 根据式(11), VSG 因为虚拟阻抗的存在, 所以其等效阻抗大于下垂控制的等效阻抗, 即 $Z_{f1} \geq Z_{f2}$, 发生短路故障时, 在短路电流受限于 2 倍额定电流的情况下, 前者电压的跌落将大于后者; 此外, 由于下垂控制策略只是模仿同步发电机的部分外部特性, 系统惯性较小, 在故障前后功率重新分配和频率调整时, 微电网的频率波动会比较明显, 同时也会出现剧烈波动的故障电流, 破坏继电保护的配合措施, 容易引起保护策略失效。

3 微电网故障特性仿真研究

主要针对变流器在采用不同控制策略时, 微电网发生各类故障的故障特征, 利用 Matlab/Simulink 进行仿真研究, 并比较两种情况下 DG 的暂态恢复能力。

3.1 VSG 控制下微电网短路的仿真分析

滤波电感 $L_f = 0.02$ H, 电容 $C_f = 10$ μ F, 虚拟转动惯量 $J = 0.05$ kg m^2 , 阻尼系数 $D_v = 20$, 额定参考功率 $P_{ref} = 35$ kW, 无功功率 $Q_{ref} = 0$ Mvar。仿真时间设定为 3 s, 设 3 个负荷在 1.5 s 前均为稳定运行状态, 负荷 1 在 1.5 s 发生各种短路时, 线路侧母线电压和短路电流如图 4 所示。



(a) 三相短路

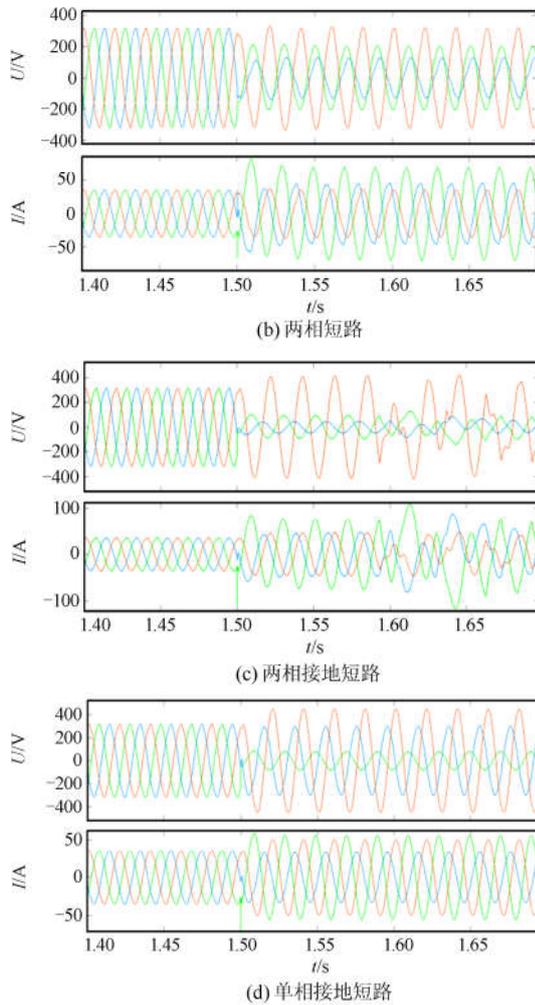


图 4 负荷 1 出线发生各种短路时 VSG 出口电压和电流
Fig. 4 VSG voltage and current under different types of short circuits in load 1 line

由图 4(a)—图 4(c)可见，DG 为 VSG 控制时，三相短路后电压发生跌落，且在短路后电压含有一定成分的谐波和非周期分量；故障电流幅值则增大，与电压变化类似，含有一定成分的谐波和周期分量，且在短路后持续时间较长，说明 VSG 的虚拟转动惯量和阻尼使 DG 的等效时间常数更大；发生两相短路或两相短路接地时，电压电流曲线出现尖锐不对称变化，这容易造成暂态过电压，该暂态过电压周期大于雷电过电压，不仅易对低压系统安全性造成危害，而且可能触发浪涌保护器较长的动作时间，导致断路器跳闸；而单相接地故障的电压跌落最小，相应的故障电流幅度也最小。

3.2 DG 基于下垂控制时的微电网短路仿真研究

DG 采用下垂控制策略时，下垂系数分别为 $m = 1 \times 10^{-5}$ ， $n = 3 \times 10^4$ ；额定参考有功功率和无功功率分别为 $P_{ref} = 35 \text{ kW}$ ， $Q = 0 \text{ Mvar}$ 。假定负荷在

1.5 s 前处于稳定运行状态，负荷 1 在 1.5 s 发生各种短路时，线路侧的母线电压和短路电流如图 5 所示。

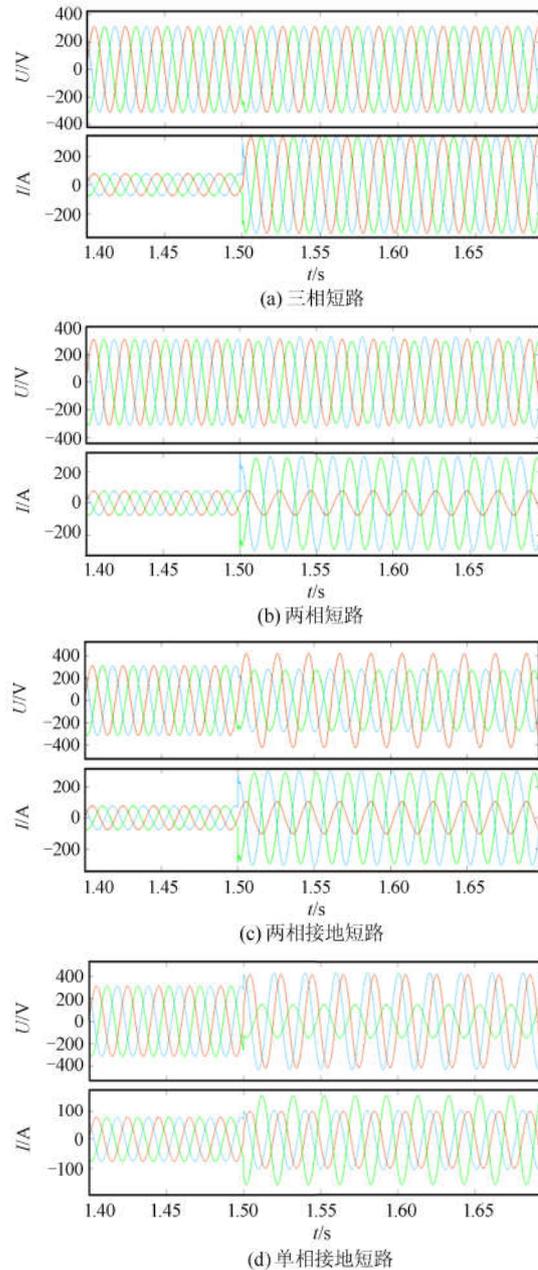


图 5 负荷 1 出线各种短路时下垂控制变流器出口电压和电流

Fig. 5 Droop control inverter output voltage and current under different types of short circuits in load 1 line

由图 5(a)—图 5(d)可见，由于直流侧设置为理想直流电压源，DG 采用下垂控制策略时，三相短路后端电压没有明显变化，短路电流曲线的幅值显著增加；两相短路时电压与三相短路差别不大，电流的变化趋势则和 VSG 控制的情况类似，区别是故障电流谐波和非周期分量不明显；在单相接地故障时，

故障电流也较小, 这与 VSG 控制类似。然而, 下垂控制动态过程缺乏惯性, 控制响应的时间常数小, 极易引起振荡, 可以推断在含多 DG 的系统中, 当多台 DG 快速地进行功率分配调整时, 极有可能引起潮流的剧烈波动, 导致微电网系统失稳和保护误动。

3.3 微电网故障清除后 DG 恢复稳态运行的仿真研究

一般三相短路的后果和危害最严重, 对微电网系统的稳定性影响最大, 因此重点探讨微电网发生三相对称故障后, 逆变型 DG 恢复稳态运行的能力。微网在孤岛运行时电网的频率是由下垂方程给定的, 因此在故障情况下, 除在故障发生的暂态点频率冲击幅度较大, 微电源的频率依旧能够维持在正常范围之内。

孤岛情况下, 故障清除后, 电压、电流、频率以及有功功率的仿真结果对比如图 6—图 8 所示。

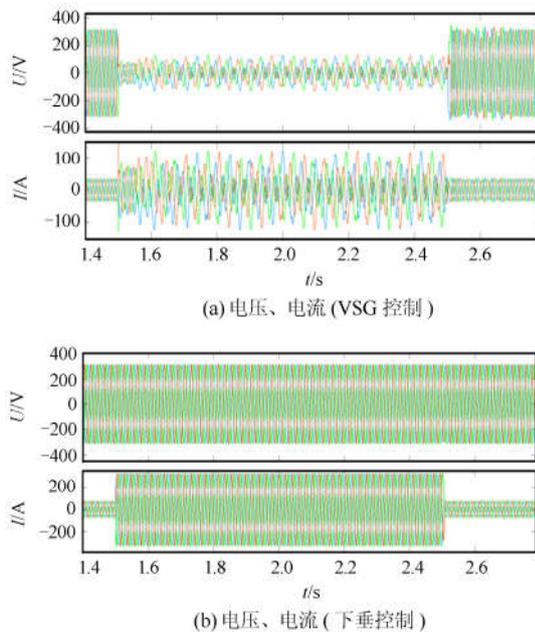
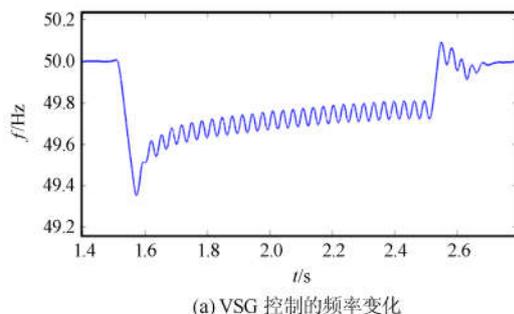
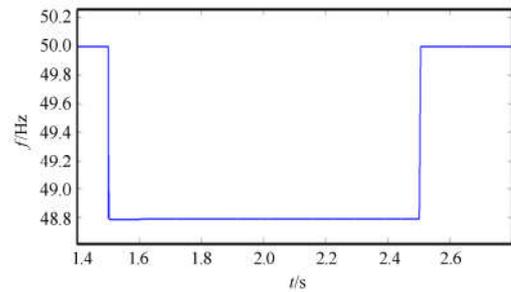


图 6 负荷 1 出线三相短路时变流器出口的电电压和电流

Fig. 6 Converter output voltage and current under three-phase short circuit in load 1 line



(a) VSG 控制的频率变化



(b) 下垂控制的频率变化

图 7 负荷切换以及三相短路时 DG 的频率变化

Fig. 7 DG frequency variation under load switching and three-phase short circuit

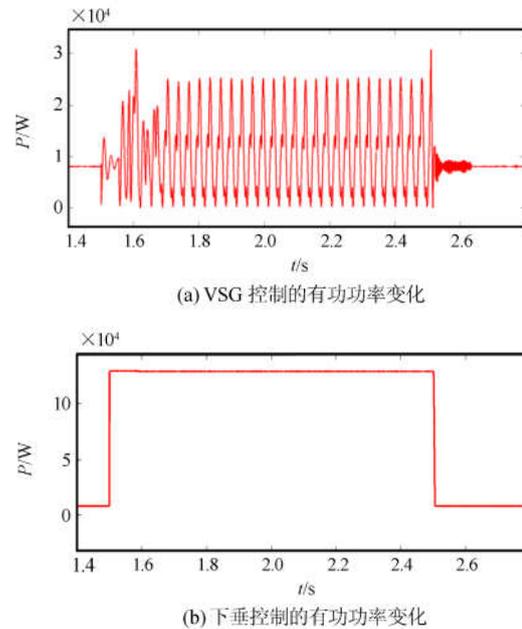


图 8 三相短路时 DG 输出的有功功率

Fig. 8 Active power output of DG under three-phase short circuit

比较图 6(a)和图 6(b)可知, 三相故障清除后, VSG 控制的 DG 电压在经过 2.5~2.7 s 的波动后恢复稳定电压, 短路电流故障期间出现一定的冲击, 并有较大成分的谐波, 但并不影响短路排除后恢复到正常电流; 下垂控制的 DG 电压在故障期间很稳定, 而短路故障电流比较大。

图 7(a)和图 7(b)表明, VSG 控制的 DG 频率在 0.2 s 内有一个较大跌落的过程, 跌落幅为 0.6 Hz, 由于惯性的作用, 故障期间频率在 0.2 Hz 范围内振荡, 故障清除后, 频率有短暂的冲击, 然后逐渐恢复到稳定; 而下垂控制的 DG 在故障发生时刻和故障清除时刻, 频率产生较突然的变化, 频率在故障期间下降明显。

比较图 8(a)和图 8(b)可知, VSG 控制的 DG 在发生故障时及故障恢复时, 均有较长时间的暂态过程, 而下垂控制的 DG 在故障发生时刻和清除时刻暂态过程不明显, 但 VSG 控制的短路功率要显著小于下垂控制的情况。

4 结论

从以上分析可见:

1) 在各种短路情况下, 当采用 VSG 控制时, 故障相对应的 DG 端电压均较正常运行时显著减小, 电流则相应增大, 这更适合采用基于电压、电流检测原理的保护; 而下垂控制由于仅模拟同步发电机的外部特性, 在采用理想直流电源的条件下, 系统发生短路时 DG 端电压近似不变, 电流则显著增大且幅度大于 VSG 控制的情况, 更适合采用基于电流检测原理的保护。

2) 从故障恢复方面看, 下垂控制的 DG 几乎无惯性, 多机并联运行时将不利于系统稳定; 而 VSG 控制的 DG 在故障及恢复时, 频率波动和功率变化相对于下垂控制的 DG 更为平缓。可见, VSG 控制能弥补常规下垂控制缺乏阻尼和惯性支撑的缺点, 在多机并联运行时, 能增强系统频率的稳定性, 有利于 DG 大规模并入微网后, 依靠 DG 自主控制维持微电网的有效运行。

参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 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.
- [3] 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 Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [4] 李燕青, 王子睿. dq0 坐标系下微电网电压电流双闭环下垂控制方法及其逆变器设计[J]. 华北电力大学学报, 2017, 44(1): 39-51.
LI Yanqing, WANG Zirui. Double closed loop droop control method and design for inverter of voltage and current in micro-grid in dq0 coordinate system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2017, 44(1): 39-51.
- [5] 邵登科, 姜建国, 张宇华. 使用电压-相角下垂控制的微电网控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 29-34.
GAO Dengke, JIANG Jianguo, ZHANG Yuhua. Design of microgrid control strategy using voltage amplitude and phase angle droop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 29-34.
- [6] 洪莎莎, 武迪, 吕宏水, 等. 基于高阶系统模型的 VSC-MTDC 下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 125-131.
HONG Shasha, WU Di, LÜ Hongshui, et al. Droop control strategy research of VSC-MTDC based on high-order system model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 125-131.
- [7] 丁明, 杨向真, 苏建微. 基于虚拟同步电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-94.
DING Ming, YANG Xiangzhen, SU Jianwei. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 89-94.
- [8] 祝钧, 李瑞生, 毋炳鑫, 等. 交直流混合微电网接口变换器虚拟同步发电机控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 28-34.
ZHU Jun, LI Ruisheng, WU Bingxin, et al. Virtual synchronous generator operation of interlinking converter between AC and DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 28-34.
- [9] 程启明, 张宇, 谭冯忍, 等. 基于 Washout 滤波器的虚拟同步电机新型控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 51-57.
CHENG Qiming, ZHANG Yu, TAN Fengren, et al. Research on new control method of virtual synchronous generator based on Washout filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 51-57.
- [10] 韩奕, 张东霞. 含逆变型分布式电源的微网故障特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 147-152.
HAN Yi, ZHANG Dongxia. Fault analysis of microgrid composed by inverter-based distributed generations[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 147-152.
- [11] 曾德辉, 潘国清, 王钢, 等. 含 V/f 控制 DG 的微电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2604-2611.
ZENG Dehui, PAN Guoqing, WANG Gang, et al. Method of fault analysis on microgrid with distributed generation based on V/f control strategy[J]. Proceedings

- of the CSEE, 2014, 34(16): 2604-2611.
- [12] 吕婷婷, 段玉兵, 龚宇雷, 等. 微电网故障暂态分析及抑制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 101-107.
LÜ Tingting, DUAN Yubing, GONG Yulei, et al. Analysis of micro-grid based fault transient and its suppression[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 101-107.
- [13] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 403-412.
SHANG Lei, HU Jiabing, YUAN Xiaoming, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 403-412.
- [14] SALVATORE D, JON A S, OLAV B F. A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in smart grids[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 122(6): 180-197.
- [15] 张玉治, 张辉, 贺大为, 等. 具有同步发电机特性的微电网逆变器控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 261-268.
ZHANG Yuzhi, ZHANG Hui, HE Dawei, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 261-268.
- [16] 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. An adaptive droop control method for inverters in microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2386-2391.
- [17] 程启明, 高杰, 程尹曼, 等. 一种适用于孤岛运行的逆变器控制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 203-209.
CHENG Qiming, GAO Jie, CHENG Yinman, et al. An inverter control method for islanding operation[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 203-209.
- [18] 唐昆明, 王俊杰, 张太勤. 基于自适应下垂控制的微电网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 68-74.
TANG Kunming, WANG Junjie, ZHANG Taiqin. Research on control strategy for microgrid based on adaptive droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 68-74.
- [19] 张红洁, 董祖晨, 何晓明, 等. 适用于不同类型滤波器的光伏逆变器控制策略研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 20-27, 82.
ZHANG Hongjie, DONG Zuchen, HE Xiaoming, et al. Study of control strategy for PV inverter considering impact of filters[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 20-27, 82.
- [20] PLET C A, BRUCOLI M, MCDONALD J D F, et al. Fault models of inverter-interfaced distributed generators: experimental verification and application to fault analysis[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, Detroit, America: 1-8.

收稿日期: 2018-01-09; 修回日期: 2018-07-17

作者简介:

康 晴(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网保护; E-mail: kq.kq@163.com

罗 奕(1972—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与可靠性; E-mail: luoyi@guet.edu.cn

卢新佳(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网保护与可靠性. E-mail: 745933936@qq.com

(编辑 周金梅)