

微电网故障暂态分析及抑制方法研究

吕婷婷, 段玉兵, 龚宇雷, 王辉, 李庆民

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 建立了含电感型故障限流器的微电网等效分析模型, 通过仿真算例分析了微电网的故障暂态现象, 并验证了应用故障限流器抑制微电网故障暂态的方法。针对不同运行模式下发生不同类型、不同地点的故障情况, 详细分析了含故障限流器的微电网系统的电压、电流、频率以及功率的故障暂态恢复特性。研究表明, 安装了电感型故障限流器的微电网系统在发生故障时无论处于何种工况, 都能很快地恢复到稳定运行状态, 为发展微电网的故障暂态抑制策略提供了一种实际可行的有效方法。

关键词: 微电网; 电感型故障限流器; 故障暂态分析; PQ控制; V/f控制

Analysis of micro-grid based fault transient and its suppression

Lü Ting-ting, DUAN Yu-bing, GONG Yu-lei, WANG Hui, LI Qing-min

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: An equivalent analysis model for micro-grid with inductive FCLs is presented based on Matlab-simulink. The fault transient characteristics of the micro-grid are analyzed, and the new scheme of using FCL to suppress the transient process is thereby verified. With regard to different fault types and different fault locations under various operation modes, the transient recovery behavior of the micro-grid system with inductive FCLs, such as variation of voltage, current, frequency, active and reactive power, is investigated in detail. The research results show that the micro-grid with inductive FCLs can achieve a new steady state much faster than that without FCLs at any operating conditions. The research proposes an effective methodology to suppress the fault transient process for micro-grids.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50807033) and Natural Science Foundation of Shandong Province (No. Y2007F57 and No. ZR2009FQ025).

Key words: micro-grid; inductive fault current limiter; fault transient analysis; PQ control; V/f control

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0102-06

0 引言

发展微电网技术可协调大电网与分布式电源的矛盾, 正逐渐成为当前的研究热点^[1-5]。微电网是指由微型电源(或分布式电源, 即 DG)、负荷、储能装置及控制单元共同组成的配电子系统, 其中大部分微电源和储能装置通过逆变器接入微电网。微电网既可并网运行, 又可根据实际中出现的故障、计划检修等情况而独立运行。

无论是并网运行还是独立运行, 都需要对各个微电源的逆变器进行合理控制, 从而保证微电网在不同运行模式下电压和频率的稳定^[6-8]。

基金项目: 国家自然科学基金(50807033); 山东省自然科学基金(Y2007F57和ZR2009FQ025)

正常情况下, 微电网与主网(配电网)并联运行; 当微电网内部或者外部发生故障时, 继电保护装置将故障部分切除, 微电网的其余部分可以独立运行或者与主网继续并联运行。从故障发生时刻至微电网剩余部分与主网重新进入正常运行, 因继电保护装置动作需要一定时间, 在故障期间, 系统的电压、频率以及功率等都会出现暂态过程, 从而会对整个系统的稳定产生不利影响。

故障限流器(Fault Current Limiter, FCL)串入电力线路后对电网运行无影响或影响很小。在电网正常运行时, 它表现为零阻抗或极小阻抗; 在电网出现短路故障时, 则迅速变成高阻抗。按照系统发生短路时串入的限流阻抗类型, 可将故障限流器大致分为电感型和电阻型两大类, 而电感型FCL有望在电网中较早获得实用^[9]。文献^[10]分析表明, 电感

型 FCL 不仅能限制短路电流, 还能有效改善系统的暂态稳定性。

对于微电网内部发生故障时的暂态过程, 需采用有效方法进行抑制, 以减小故障对整个微电网的影响。本文提出在微电网中加入电感型 FCL 以抑制故障暂态的方法, 基于含电感型 FCL 的微电网等效分析模型, 研究了不同运行模式下出现不同类型、不同地点的故障时, 微电网的暂态恢复特性。

1 微电网建模

基于 Matlab 软件的 Simulink 环境, 建立了含电感型故障限流器的微电网等效分析模型, 如图 1 所示。

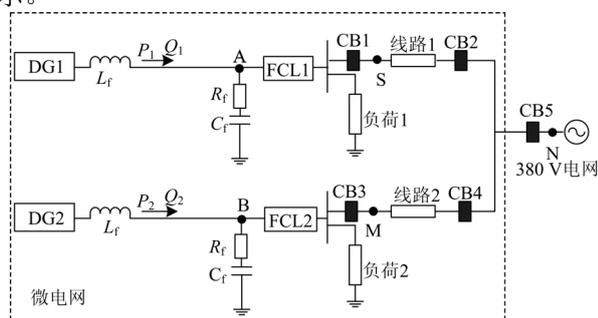


图 1 微电网等效模型

Fig.1 Equivalent model of a typical micro-grid

1.1 微电网基本结构

图 1 中的微电网含有两个微电源。设每个微电源均由分布式电源和储能装置联合组成, 储能装置接在直流侧, 它们可以共同维持直流电压的基本恒定, 因此, 可将两个微电源均假设为直流电压源, 经逆变器逆变为三相交流电, 然后经 LC 滤波器滤除高次谐波后, 把电能输送给负荷^[11]。微电源等效为直流电压源参数: $V_{DG1}=V_{DG2}=800\text{ V}$; 滤波器参数: $L_f=0.6\text{ mH}$, $C_f=1\ 500\ \mu\text{F}$, $R_f=0.01\ \Omega$; 线路参数: $R_{line1}=R_{line2}=0.128\ 2\ \Omega$, $X_{line1}=X_{line2}=0.020\ 2\ \Omega$ 。

1.2 微电网控制

微电网中的微电源通过逆变器接入系统, 因此无论是并网运行还是独立运行, 都需要对微网内的各个逆变器进行有效控制, 以维持电压和频率在允许变化的范围之内, 满足负荷对电能质量的要求。

微电源逆变器的控制方式主要有两种: PQ 控制和 V/f 控制。在 V/f 控制方式下, 微电源的控制模块首先采集电源输出电压和逆变器的输出电流, 计算出微电源输出的有功功率和无功功率, 然后利用 P-f、Q-V 下垂特性得到参考电压值^[11-12], 最后通过电压电流的双环控制, 产生逆变器所需的控制信号, 其控制原理如图 2 所示。V/f 控制方式可以实

现工况改变时微电源之间变化功率的共享, 能够保证电压和频率的稳定性。在 PQ 控制方式下^[13], 微电源向系统注入预定数值的有功和无功功率, 选择合适的坐标变换参考轴, 可对有功功率和无功功率分别进行控制, 其控制原理如图 3 所示。逆变器的 PQ 控制方式适合于微电网与大电网并网运行时的工况, 当微电网脱离大电网独立运行时, 使用这种控制方式的微电源不能为微电网提供电压和频率的有效支撑。

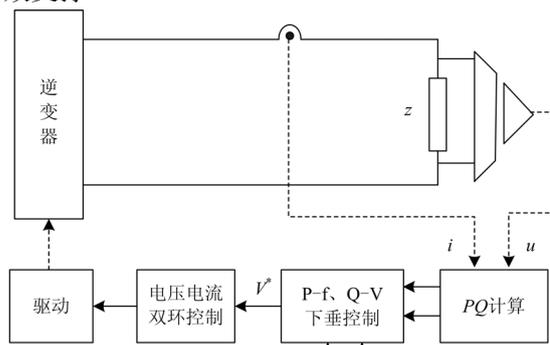


图 2 微电源逆变器的 V/f 控制原理

Fig.2 Schematic diagram of V/f control method for micro-source inverter

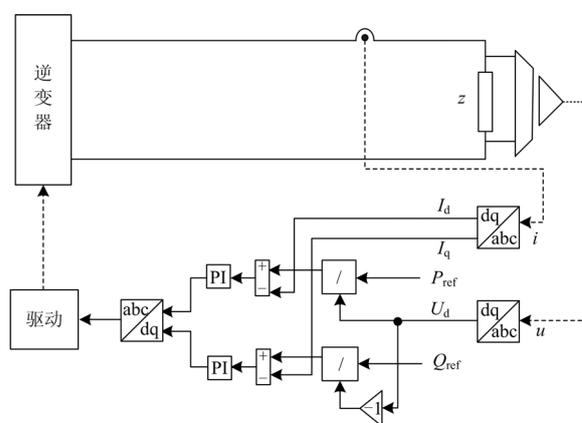


图 3 微电源逆变器的 PQ 控制原理

Fig.3 Schematic diagram of PQ control method for micro-source inverter

1.3 电感型故障限流器的暂态模型

为抑制微电网发生故障时的暂态过程, 可在微电网中微电源的母线出口加装电感型 FCL, 如图 1 所示。忽略 FCL 中各元件本身的电磁暂态过程, 电感型 FCL 的暂态等效电路如图 4 所示。系统正常运行以及故障后 FCL 动作之前, 开关 S 一直处于闭合状态, 系统电流通过短路开关; 故障发生后 FCL 动作, 开关 S 断开, 限流电感 X_l 投入系统进行限流^[10]。

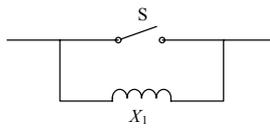


图 4 故障限流器的暂态模型

Fig.4 Transient model of an inductive FCL

2 微电网正常运行

模型 1: DG1、DG2 的逆变器均采用 V/f 控制方式, 负荷参数: $R_{ld1}=R_{ld2}=5 \Omega$, $X_{ld1}=X_{ld2}=0.628 \Omega$ 。微电网并网运行, 仿真结果如图 5 所示。

并网情况下, 断路器 5 (CB5) 闭合, 微电网与主网并联运行, 系统在 $t=0.3 \text{ s}$ 后达到稳定状态。微电源通过 V/f 控制器的调节, 使 DG1、DG2 输出相电压的峰值为 311 V, 频率的波动在 $50 \text{ Hz} \pm 0.02\%$ 以内, 能够满足负荷的应用要求。

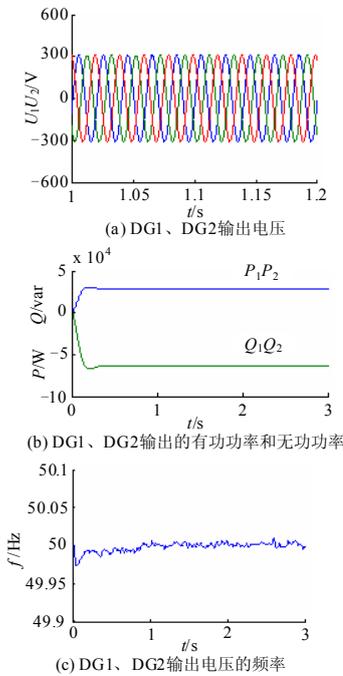


图 5 模型 1 的仿真结果

Fig.5 Simulation results of Model 1

模型 2: DG1 的逆变器采用 V/f 控制方式, DG2 的逆变器采用 PQ 控制方式, $P_{ref2}=14.752 \text{ kW}$, $Q_{ref2}=-66.931 \text{ kvar}$; 负荷参数: $R_{ld1}=5 \Omega$, $R_{ld2}=10 \Omega$; $X_{ld1}=X_{ld2}=0.628 \Omega$ 。微电网在 $t=3 \text{ s}$ 之前与主网并联运行, 在 $t=3 \text{ s}$ 时因计划检修而与主网断开独立运行, 仿真结果如图 6 所示。

由图 6 (a) 可知, 在 $t=3 \text{ s}$ 时 DG1 的输出功率发生变化, 有功功率 P_1 减少 (变化幅度较小), 无功功率 Q_1 减少。这是由于微电网在独立运行前处于

并网状态时, 仍向主网输送一定数量的有功功率和无功功率; 与主网断开后, 由于 DG1 采用 V/f 控制方式, 根据 P-f、Q-V 下垂特性, DG1 输出的电压幅值增大, 其频率也增大, 但是变化幅度都在允许的范围之内, 如图 6 (c)、6 (d) 所示。DG2 采用 PQ 方式进行控制, 所以在运行方式改变时其输出的有功和无功恒定不变。

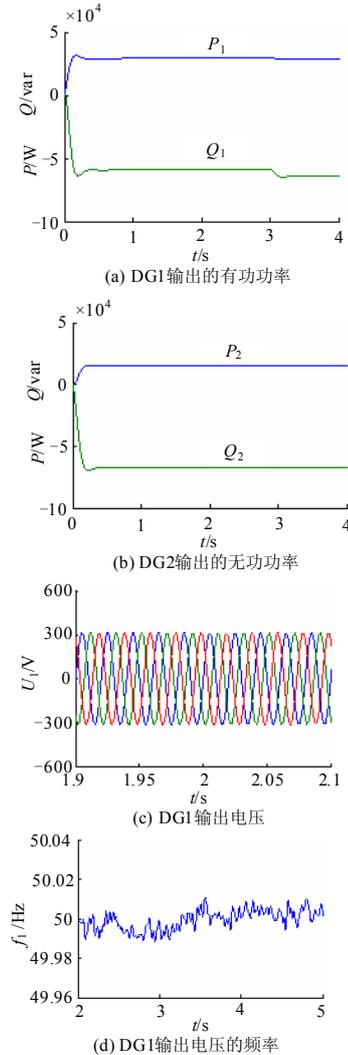


图 6 模型 2 的仿真结果

Fig.6 Simulation results of Model 2

3 微电网故障状态仿真分析

本节针对微电网的故障情况进行仿真, 详细研究在不同运行模式下出现不同类型、不同地点的故障时, 微电网的暂态恢复过程。

3.1 并网运行情况下发生故障

3.1.1 内部故障

采用模型 1 对并网运行情况下发生内部故障时

的暂态进行仿真分析。

假设图 1 中线路 2 的始端 M 点在 $t=1.5$ s 发生三相短路故障, $t=1.56$ s 时 CB3、CB4 动作将故障线路切除; 故障切除后, DG1 与主网继续并联运行, 而 DG2 与负荷 2 独立运行。针对在微电源出口处不加 FCL 与加 FCL (FCL 在 $t=1.501$ s 时投入系统限制短路电流) 两种情况, 仿真结果如图 7 和图 8 所示。

比较图 7 (c) 和图 8 (c) 可知, 当微电网内部发生三相接地短路故障时, 微电源出口处的电感型 FCL 快速动作投入限流, 使得故障点处的短路电流由 6 000 A 减小为 1 000 A, 而且故障电流衰减的速度也明显加快, 到故障完全切除时, B 相的短路电流已经衰减到 100 A; 在图 8 (c) 中, 故障后 FCL 投入系统时开关的迅速动作, 导致短路电流的波形中出现一定的冲击, 但这并不影响 FCL 的限流作用。此外, 比较有无 FCL 的短路故障电压波形可知, FCL 也可有效降低微电网的电压跌落。在微电源出口处安装 FCL 时, 尽管 DG2 的输出电压在故障期间出现了某些瞬态变化, 但当故障切除后, 电压便会立即恢复; 而不安装 FCL 时, B 点电压在故障时将出现较大的跌落, 且在故障切除后出现过电压, 一直持续到 $t=1.8$ s 才可恢复正常。

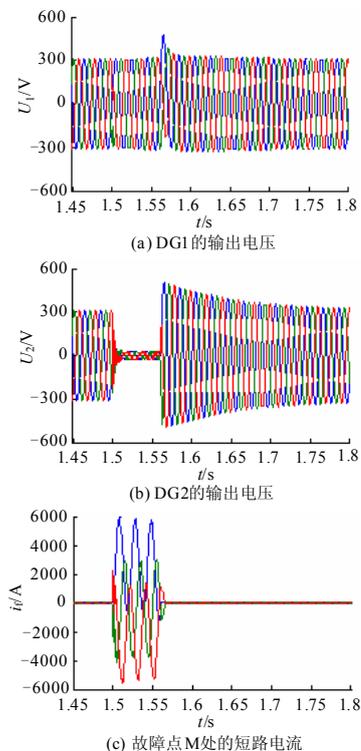


图 7 M 点发生三相接地短路故障的仿真结果 (无 FCL)
Fig.7 Simulation results of three-phase grounding fault at point M (without FCL)

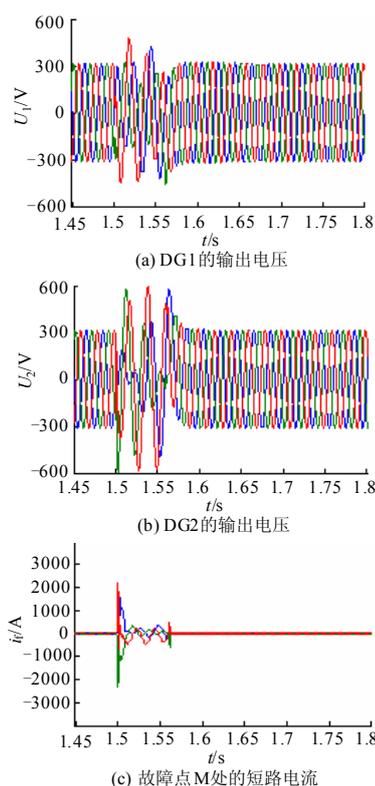


图 8 M 点发生三相接地短路故障的仿真结果 (有 FCL, 限流电抗 $L=0.01$ H)
Fig.8 Simulation results of three-phase grounding fault at point M (with FCL, $L=0.01$ H)

3.1.2 外部故障

采用模型 2 对并网情况下发生外部故障时的暂态过程进行仿真分析。

假设图 1 中的 N 点在 $t=2$ s 时发生三相接地短路故障, $t=2.06$ s 时 CB5 动作将微电网与主网隔离, 微电网独立运行。针对在微电源出口处不加 FCL (变量用下标 a 表示) 以及加 FCL (变量用下标 b 表示, FCL 在 $t=2.001$ s 时投入系统限流) 两种情况, 仿真结果如图 9 和图 10 所示。

从图 9 (a) 可以看出, 当系统中不装 FCL 时, 因 DG2 采用 PQ 控制方式, 并不能提供微电网参考频率的支撑, 在独立运行时无法保证输出工频电压。在 N 点发生短路故障后, 而继电保护装置未动作之前, DG2 所在的支路通过接地点构成了独立运行的系统, 从而导致了 DG2 输出短路电流的频率大于 50 Hz, 而此时 DG1 输出的故障电流仍为 50 Hz, 所以在短路故障点处, 两者叠加后的电流出现了非正弦振荡现象, 倘不能及时切除故障, 很可能导致独立运行后的微电网发生不稳定现象。当系统中安装了 FCL 后, 短路电流的振荡明显减小, 但由于

FCL 不是立即投入系统进行限流，仍会存在轻微的振荡现象，而振荡频率的大小与系统发生短路时的工况、PQ 控制方式中的功率给定值等多种因素相关。因此，安装 FCL 不仅可抑制短路电流，而且还一定程度上抑制了暂态振荡，提高了系统稳定性。

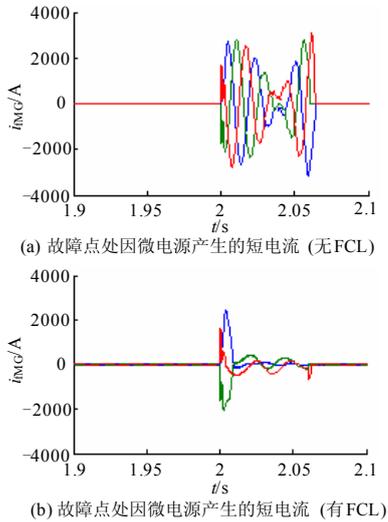


图 9 N 点发生三相接地短路故障时的短路电流

Fig.9 Fault current when three-phase grounding fault occurs at point N

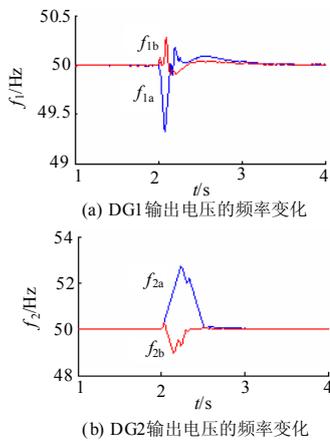


图 10 N 点三相接地短路时的微电源输出电压的频率变化
Fig.10 Frequency change of micro-source when three-phase grounding fault occurs at point N

图 10 (a) 和图 10 (b) 表明，相对无 FCL 的系统，安装 FCL 的系统频率能更快地恢复到稳定状态。因 DG2 采用 PQ 控制方式，发生故障后其输出电压的频率波动比 DG1 输出电压的频率波动更大一些。此外，安装 FCL 后， f_{1b} 和 f_{2b} 的波动都明显减小，而且恢复到稳态的时间也大大缩短。

3.2 独立运行情况下发生故障

采用模型 2 对独立运行情况下发生故障时的暂态过程进行仿真分析。

假设模型 2 在 $t=3\text{ s}$ 时独立运行， $t=3.5\text{ s}$ 时图 1 中的 S 点发生短路故障， $t=3.56\text{ s}$ 时 CB1、CB2 动作，将故障线路 1 切除，DG1 仍然可以给负荷 1 继续供电，但是由于故障线路切除之后，DG2 不能独立带负荷 2 运行，因此只能切除该微电源。

针对 S 点处发生不同短路故障的情况，并保持故障切除时间以及限流电抗的值不变 ($L=0.01\text{ H}$)，进行故障暂态仿真研究，DG1 的频率、功率的暂态变化过程如图 11~13 所示 (1 表示无 FCL，2 表示有 FCL)。

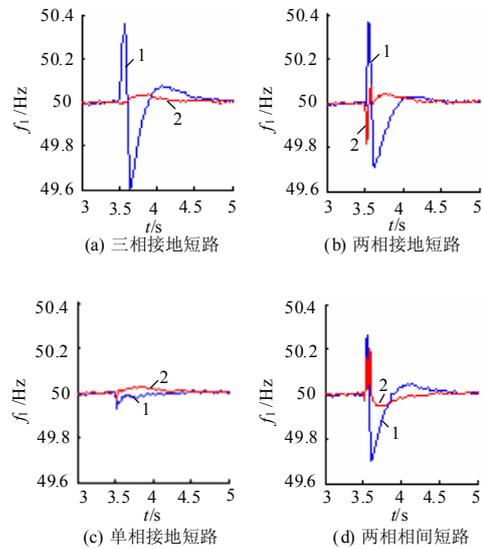
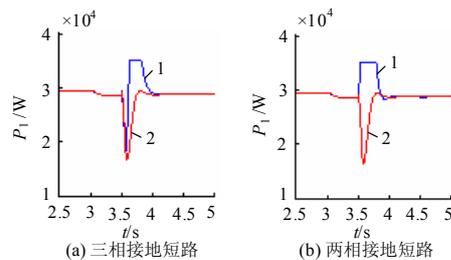


图 11 DG1 输出电压的频率

Fig.11 Frequency of DG1 output voltage

由图 11 (a) 中的 1 实线可知，发生三相接地短路故障时，DG1 的电压频率波动最严重，对负荷造成的不利影响最大；而在系统中安装 FCL 后，FCL 对频率暂态起到了很好的抑制作用，几乎没有波动，可直接恢复到稳态。图 12 和图 13 表明，DG1 输出的有功功率和无功功率在发生故障时，也会经历一个暂态过程，由图 13 可知，安装 FCL 对无功功率暂态过程的抑制最为明显。



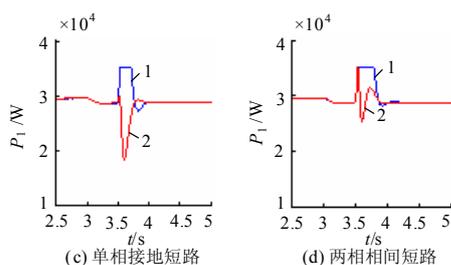


图 12 DG1 输出的有功功率

Fig.12 Active power of DG1 output

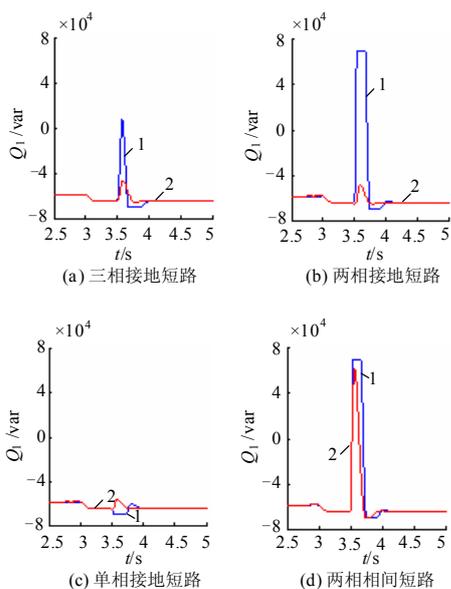
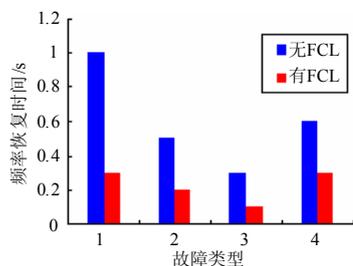


图 13 DG1 输出的无功功率

Fig.13 Reactive power of DG1 output

对图 11 的仿真结果进行分析, 得到 S 点发生不同短路故障时, DG1 输出电压的频率恢复时间与故障类型的柱形图, 如图 14 所示。其中横轴 1、2、3、4 分别表示三相接地短路、两相接地短路、单相接地短路、两相相间短路。该柱形图清晰地说明了 FCL 对频率暂态的抑制作用。

图 14 f_1 的恢复时间与故障类型的柱形关系图Fig.14 Column chart between restoration time of f_1 and fault types

因此, 在微电网中安装 FCL 后, 不仅可显著减

小故障时的短路电流, 降低故障点的电压跌落, 同时还对故障时的频率暂态和功率暂态过程起了很好的抑制作用。

4 结论

本文研究表明, 无论微电网处于并网运行状态还是独立运行状态时发生故障, 在微电源的出口处安装 FCL, 对其故障暂态都能起到很好的抑制作用。

分析结果还表明, 当采用 V/f 控制方式的微电网在并网情况下发生外部故障时, 因 V/f 控制方式能够为微电源提供参考电压和参考频率, 故在故障暂态恢复过程中电压和电流都不会出现振荡现象; 而当微电网中有微电源采用 PQ 控制方式时, 倘发生短路故障, 则可能会出现一定的振荡现象, 而安装电感型 FCL 可对此振荡现象起到了很好的抑制作用, 保证系统的稳定性。

参考文献

- [1] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 100-107.
LU Zong-xiang, WANG Cai-xia, MIN Yong, et al. Overview on micro grid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (19): 100-107.
- [2] Nagaraju Pogaku, Milan Prodanovic, Green T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2007, 22 (2): 613-625.
- [3] 盛鹏, 孔力, 齐智平, 等. 新型电网-微电网 (Microgrid) 研究综述[J]. 继电器, 2007, 35 (12): 75-81.
SHENG Kun, KONG Li, QI Zhi-ping, et al. A survey on research of microgrid-a new power system[J]. Relay, 2007, 35 (12): 75-81.
- [4] 丁银, 丁明, 毕锐, 等. 微电网系统 CIM / XML 模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (9): 37-42.
DING Yin, DING Ming, BI Rui, et al. Research on CIM/XML model of microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (9): 37-42.
- [5] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (20): 79-83.
WANG Xin-gang, AI Qian, XU Wei-hua, et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (20): 79-83.
- [6] Pecaslopes J A, Moreira C L, Madureira A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (2): 916-924.

(下转第 130 页 continued on page 130)

- (4) : 463-467.
ZHAO Na, ZHANG Fu-sheng, WEI Ping, et al. Reactive power optimization based on improved poly-particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40 (4) : 463-467.
- [7] 范宏, 韦化. 改进遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17 (1) : 6-9.
FAN Hong, WEI Hua. Application of improved genetic algorithm in reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2005, 17 (1) : 6-9.
- [8] 潘珂, 韩学山, 孟祥星. 无功优化内点法中非线性方程组求解规律研究[J]. 电网技术, 2006, 30 (19) : 59-65.
PAN Ke, HAN Xue-shan, MENG Xiang-xing. Solution principles study of nonlinear correction equations in primal-dual interior point method for reactive power optimization [J]. Power System Technology, 2006, 30 (19) : 59-65.
- [9] Zhang Wen, Liu Yu-tian. Multi-objective reactive power and voltage control based on fuzzy optimization strategy and fuzzy adaptive particle swarm[J]. Electric Power and Energy Systems, 2008, 30: 525-532.
- [10] Rahideh Akbar, Gitizadeh M, Rahideh Abbas. Fuzzy logic in real time voltage/reactive power control in FARS regional electric network[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76: 996-1002.
- [11] 林添顺. 基于GPRS的新型配电网自动化通信系统设计及实用性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (19) : 44-47.
LIN Tian-shun. A new kind of communication system based on GPRS for power distribution and analysis of its practicability[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (19) : 44-77.
- [12] 郑琰, 焦坡, 张晶莹. 基于无线专网的配变实时监测管理系统[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (16) : 96-98.
ZHENG Yan, JIAO Po, ZHANG Jing-ying. Real-time monitoring management system of the distribution transformer based on wireless private network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (16) : 96-98.

收稿日期: 2010-01-28; 修回日期: 2010-05-03

作者简介:

周云成 (1979-), 男, 博士研究生, 助教, 从事电力系统信息化研究; E-mail: zhouyc2002@163.com

朴在林 (1955-), 男, 本科, 教授, 从事电力系统及其自动化科研;

付立思 (1964-), 男, 博士, 教授, 从事职能控制系统与检测技术研究。

(上接第 107 页 continued from page 107)

- [7] Katiraei F, Iravani M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (4) : 1821-1831.
- [8] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (7) : 98-103.
WANG Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (7) : 98-103.
- [9] Li Q M, Liu H S, Zou L, et al. Impact research of inductive FCL on the rate of rise of recovery voltage with circuit breakers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23 (4) : 1978-1985.
- [10] 赵彩虹, 田立军, 邹贵斌, 等. FCL对电力系统暂态稳定性影响的机理分析与仿真[J]. 电力自动化设备, 2001, 21 (2) : 14-17.
ZHAO Cai-hong, TIAN Li-jun, ZOU Gui-bin, et al. Mechanism analysis and simulation of FCL's influence on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 21 (2) : 14-17.
- [11] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微电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 Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the microsource in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (2) : 100-107.
- [12] Piagi P, Lasseter R H. Autonomous control of microgrids[C]. //Proceedings of Power Engineering Society General Meeting. Montreal(Canada): 2006: 18-22.
- [13] 鲁鸿毅, 何奔腾. 超级电容器在微型电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (2) : 87-91.
LU Hong-yi, HE Ben-teng. Application of the super-capacitor in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (2) : 87-91.

收稿日期: 2010-01-29

作者简介:

吕婷婷 (1985-), 女, 硕士生, 主要从事微电网控制方面的研究工作; E-mail: holyhappyrain@yahoo.com.cn

段玉兵 (1980-), 男, 博士生, 主要从事微电网潮流计算、故障分析等方面的研究工作;

龚宇雷 (1973-), 男, 博士生, 主要从事微电网、光伏发电技术方面的研究工作。