

SSTS 与 DVR 的协调控制策略

张宸宇¹, 史明明¹, 陈兵¹, 郑建勇², 缪惠宇²

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京, 210096)

摘要:为了充分发挥固态切换开关(SSTS)容量大和动态电压恢复器(DVR)响应迅速的优点,本文通过一种结合单相 dq 变换和形态学滤波器的单相电压跌落检测方法精确检测单相电压暂降,在此基础上提出一种基于电压跌落等级划分与时序配合的DVR与SSTS协调控制方法,实现了DVR和SSTS的协调动作,保障了敏感负荷的持续高质量供电。基于Matlab/Simulink的仿真模型验证了该协调控制策略的正确性和有效性。

关键词:固态切换开关;动态电压调节器;电压暂降;协调控制

中图分类号:TM464

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)03-0022-06

0 引言

由于半导体制造、IT行业、精密仪器、PLC控制的工业设备等敏感负荷的增加,电压跌落问题变得越来越突出。电压跌落会导致敏感负荷发生故障、停运、损坏等种种问题,可能给用户带来巨大的经济损失^[1-4]。在IEEE标准中,电压跌落是指电压有效值下降到标称值的10%~90%,持续时间为半个周波到1min的电压下降过程。对于敏感负荷,电压跌落的时间越长,深度越大,对设备的危害就越严重。因此,对电压跌落补偿设备的速动性提出了很高的要求,而快速准确地检测系统电压的跌落是电压跌落补偿设备快速动作的前提和关键^[5-12]。实际发生的电压跌落多为单相事件,不仅引起电压幅值跌落还发生相位跳变,因此要求检测方法能够精确检测电压的开始时刻、结束时刻、跌落深度、相移,并且能用于单相电压跌落的检测。为此本文首先提出一种结合单相 dq 变换和形态学滤波器的单相电压跌落检测方法。

固态切换开关(SSTS)和动态电压恢复器(DVR)均可用于解决系统电压跌落问题。SSTS是利用大功率电力电子器件和基于微处理器、光纤通信和数字信号处理的测控技术,来实现负载的不间断供电。SSTS控制保护系统通过检测进线和出线的三相电压和电流,检测电压跌落,从而控制快速开关和阀体,实现两路进线电源的快速切换,解决电压跌落和短时断电等问题,可减少用户损失,保

收稿日期:2017-01-12;修回日期:2017-02-28

基金项目:江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2015086);2016年国家电网公司科技项目(电能质量大数据分析关键技术研究及应用)

证用户的可靠供电。而DVR则串接在电源和敏感负荷之间,系统正常时,DVR处于旁路状态;系统发生电压跌落时,DVR以毫秒级的速度向系统中注入“缺额电压”,使负荷电压恢复到正常值,DVR被认为是目前抑制电压跌落最有效的手段之一。

虽然SSTS和DVR均可解决电压跌落问题,但二者响应速度和作用机理存在较大差异并且用于不同电压等级。若二者不进行协调控制,可能会产生负交互作用,影响电压跌落的抑制效果。本文提出一种10kV电压等级的SSTS和380V电压等级的DVR之间的协调控制策略,基于电压跌落等级划分与时序配合控制,实现DVR和SSTS的协调动作,基于Matlab/Simulink的仿真模型验证了该协调控制策略的正确性和有效性。

1 结合单相 dq 变换和形态学滤波器的单相电压跌落检测方法

由于三相 dq 变换无法直接用于单相系统,本文提出一种可以直接用于单相系统的 dq 变换,原理如图1所示。

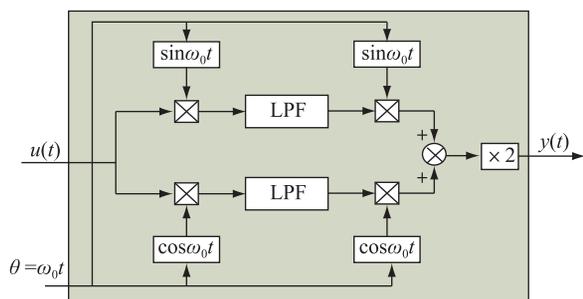


图1 单相电压跌落检测原理

Fig.1 Single-phase voltage drop detection schematic
图中: $u(t)$ 为待检测的单相电压信号; $\omega_0 t$ 为基波电

压相位;LPF为低通滤波器。将待检测的单相电压信号 $u(t)$ 与参考正弦信号 $\sin\omega_0 t$ 和余弦信号 $\cos\omega_0 t$ 相乘,可以将 $u(t)$ 中基波电压分量转化为直流量和二次谐波两部分,如下式所示:

$$u_d(t) = u(t) \sin\omega_0 t = u(t) \frac{e^{j\omega_0 t} - e^{-j\omega_0 t}}{2} \quad (1)$$

$$u_q(t) = u(t) \cos\omega_0 t = u(t) \frac{e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}}{2} \quad (2)$$

对式(1)、式(2)作傅里叶变换可以得到:

$$U_d(\omega) = \frac{1}{2j} [-U(\omega + \omega_0) + U(\omega - \omega_0)] \quad (3)$$

$$U_q(\omega) = \frac{1}{2} [U(\omega + \omega_0) + U(\omega - \omega_0)] \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知, $u(t)$ 与正弦和余弦信号相乘相当于将电压信号的频谱平移 ω_0 和 $-\omega_0$ (幅值减小 1/2), 则电压信号 $u(t)$ 中的基波分量转化为直流量和 2 次谐波分量, 其余谐波分量仍为交流量。采用低通滤波器滤除 $u_d(t)$ 和 $u_q(t)$ 中的交流量, 得到直流量 $u_d(0)$ 和 $u_q(0)$ 。则 $u(t)$ 中的基波分量为:

$$2U_d(0) \sin\omega_0 t + 2U_q(0) \cos\omega_0 t \quad (5)$$

所以有:

$$U_1 = 2\sqrt{U_d^2(0) + U_q^2(0)} \quad (6)$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \frac{U_q(0)}{U_d(0)} \quad (7)$$

式中: U_1 为电压跌落的幅值; φ_1 为相位跳变量。

该方法不需利用历史数据或微分构造三相虚拟电压, 不会产生不必要的延时或噪声信号带来的检测误差, 且方法简单, 计算量小, 易于实现数字化。该方法的实时性主要由低通滤波器的性能决定, 本节采用易于实现且延时较短的形态学滤波器。

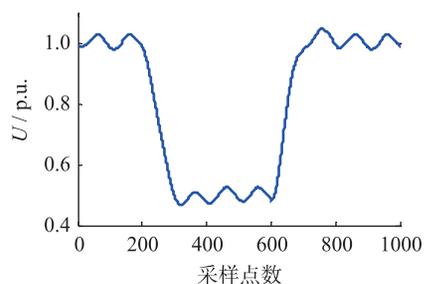
为了消除形态算子产生的统计偏倚现象且能保持原信号的集合特征^[13,14], 本文采用形态开—闭和闭—开运算的平均组合形式, 如式(8)所示:

$$F(f)(n) = \frac{1}{2} \{ [(f) \circ c(g)](n) + [(f) \circ o(g)](n) \} \quad (8)$$

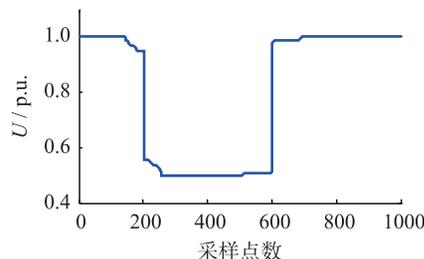
由于需要保留信号中的直流分量, 选用 $g(n)$ 为直线型结构元素, 结构元素之为 0。为了滤除 2 次及以上谐波, 在采样频率为 10 kHz 情况下, 选取结构元素长度为 60, 则 $g(n) = \{0, 0, \dots, 0\}_{n=(1,2, \dots, 60)}$ 。

采用 Matlab 将形态学滤波器与常用的巴特沃斯低通滤波器进行滤波效果对比。仿真分别采用 3 阶、截止频率 50 Hz 的巴特沃斯低通滤波器以及采样频率为 10 kHz 的形态学滤波器。仿真在采样点

为 200 处发生 50% 的电压暂降, 采样点 600 处电压暂降恢复。仿真结果如图 2 所示, 图 2(a) 是经过巴特沃斯滤波器后的电压有效值, 滤波器的动态响应时间较长。虽然可以通过降低截止频率或提高滤波器阶数改善滤波效果, 但这将使滤波器的动态响应时间延长。图 2(b) 是经过形态学滤波器的电压有效值, 从图中可以看出, 该方法可以精确检测电压跌落的发生、结束时刻和电压幅值, 动态响应快。



(a) 巴特沃斯滤波器滤波后的电压有效值



(b) 形态学滤波器滤波后的电压有效值

图 2 形态学和巴特沃斯低通滤波器滤波效果对比

Fig.2 Comparison of morphology and Butterworth low-pass filter

仿真结果表明, 本文采用的形态滤波器具有较好的滤波效果和动态性能, 可以满足单相电压跌落检测准确性和实时性的要求。

2 SSTS 和 DVR 的工作特性

典型的 SSTS 和 DVR 连接系统拓扑结构如图 3 所示。图 3 为系统的单相等效电路, 2 个 110 kV 的变电站给工业用户供电。

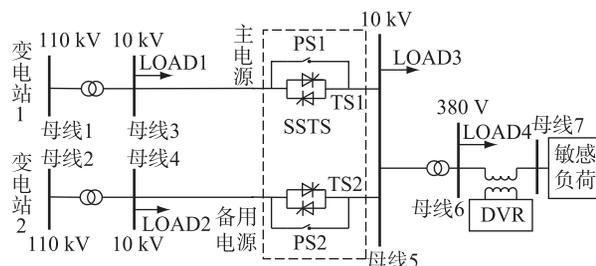


图 3 含 SSTS 和 DVR 系统拓扑

Fig.3 SSTS and DVR system topology

系统中包含 DVR 和 SSTS 2 种 DFACTS 设备。两者均可抑制电压跌落、供电短时中断, 但二者在

拓扑结构、作用原理、响应速度等方面存在较大差异,二者用于不同的电压等级。

2.1 DVR 工作特性

DVR 是一种全控型电力电子设备,通过监测公共连接点(PCC)电压变化,利用耦合变压器向系统中串联注入幅值和相位可调的三相独立的交流电压,使 PPC 在可能发生电压暂降时依然保持正常值。由 DVR 的拓扑特性可以看出 DVR 能够补偿电压跌落、电压暂升、电压谐波、三相电压不平衡^[15,16]。本文采用的 DVR 模型具有如下特点:

- (1) 应用于 380 V 电压等级;
- (2) 可以分相控制,补偿电压跌落、电压暂升、电压谐波、三相电压不平衡;
- (3) 采用前馈控制和负载电压外环、滤波电容电流内环的双闭环控制策略,具有良好的动态响应速度和补偿效果,并且稳定裕度较高,克服了开环控制系统阻尼小引起的 DVR 输出电压等幅振荡等缺点;

- (4) 响应速度小于 5 ms;
- (5) 最大补偿 40% 的电压跌落。

2.2 SSTS 工作特性

SSTS 应用在电网双路供电电源的场合,可以在监测到某路电源发生故障时,以毫秒级的速度将敏感或重要负荷切换到无故障线路上,从而使敏感或重要负荷免受电压跌落、短时中断的影响,满足敏感或重要负荷对电能质量和供电可靠性的要求。本文采用的 SSTS 模型具有如下特点:

- (1) 应用于 10 kV 电压等级;
- (2) 采用过零切换的换流方式;
- (3) 切换时间小于 20 ms。

3 SSTS 和 DVR 协调控制策略

DVR 和 SSTS 的协调控制策略如图 4 所示,其中 V_m 为系统电压测量值。首先根据敏感负荷耐受电压的能力以及 DVR 装置的补偿容量对电压跌落等级进行划分。

本文设定的电压阈值为额定电压的 85% 和 60%。系统电压介于额定电压的 85% 和 60% 之间定义为跌落等级 1;系统电压小于额定电压的 60% 定义为跌落等级 2。检测系统电压值,以确定电压跌落的等级并结合电压跌落的持续时间确定 DVR 和 SSTS 是否启动及具体的动作时序。为了增强整体的灵活性,一些 DVR 功能被集中在 SSTS 控制器上,即 SSTS 作为主控设备,DVR 作为从控设备,DVR 和 SSTS 之间具有通信功能。SSTS 的控制器进行电压

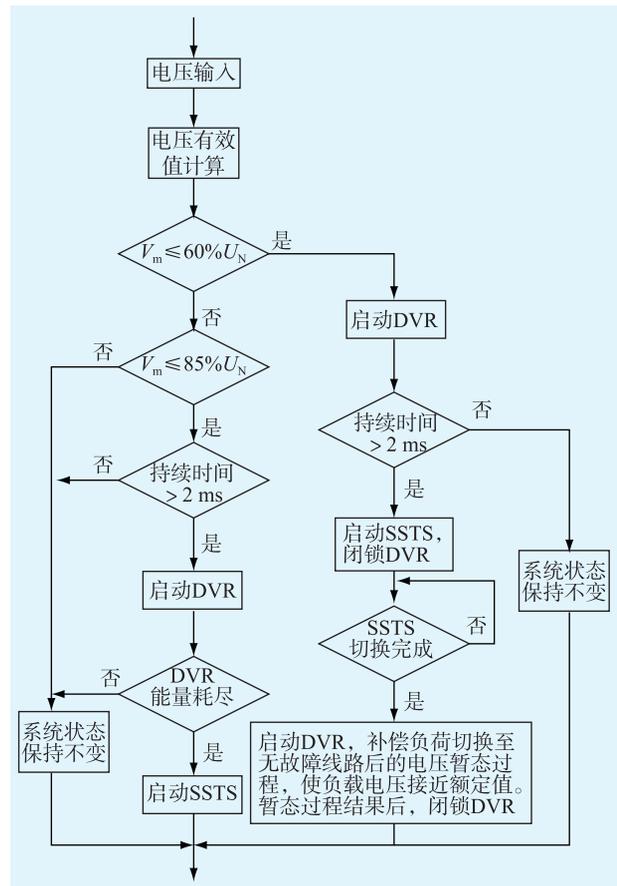


图 4 DVR 和 SSTS 协调控制策略

Fig.4 DVR and SSTS coordinated control strategy

有效值的计算,确定电压跌落的等级。协调控制原则如下:

(1) 电压测量值小于或等于电压额定值的 60% (等级 2), SSTS 向 DVR 发出信号,启动 DVR 进行电压补偿。若持续时间大于 2 ms,则启动 SSTS,闭锁 DVR。SSTS 完成切换后,SSTS 向 DVR 发出相应的动作信号,启动 DVR,补偿负载切换至无故障线路后的电压暂态过程。

(2) 电压测量值小于或等于电压额定值的 85% (等级 1), DVR 不动作。若持续时间大于 2 ms, SSTS 向 DVR 发出启动信号,启动 DVR 进行电压补偿。DVR 能量耗尽后,向 SSTS 发出启动信号,启动 SSTS。

(3) 负荷已切换至备用电源。若主电源故障消除,则启动 SSTS,将负荷切换至主电源。

4 仿真

仿真采用的 DVR 和 SSTS 模型如前所述。在各种异常工况下,对 DVR 和 SSTS 的协调控制进行仿真验证和分析。

工况一:母线 3 发生 30% 的三相电压跌落,持续时间为 0.4 s。图 5(a) 为母线 3 的 A 相电压,图 5

(b)为母线6的A相电压,图5(c)为敏感负荷侧母线7的A相电压,图5(d)为DVR注入的A相电压波形。系统发生30%电压跌落时,DVR不启动;一旦电压跌落持续时间超过2ms,DVR迅速启动,补偿电压跌落使负载电压达到额定值。为了防止A/D转换误差、电压脉冲、外界高频干扰引起的DVR误动作,电压跌落持续时间超过2ms后才启动DVR。

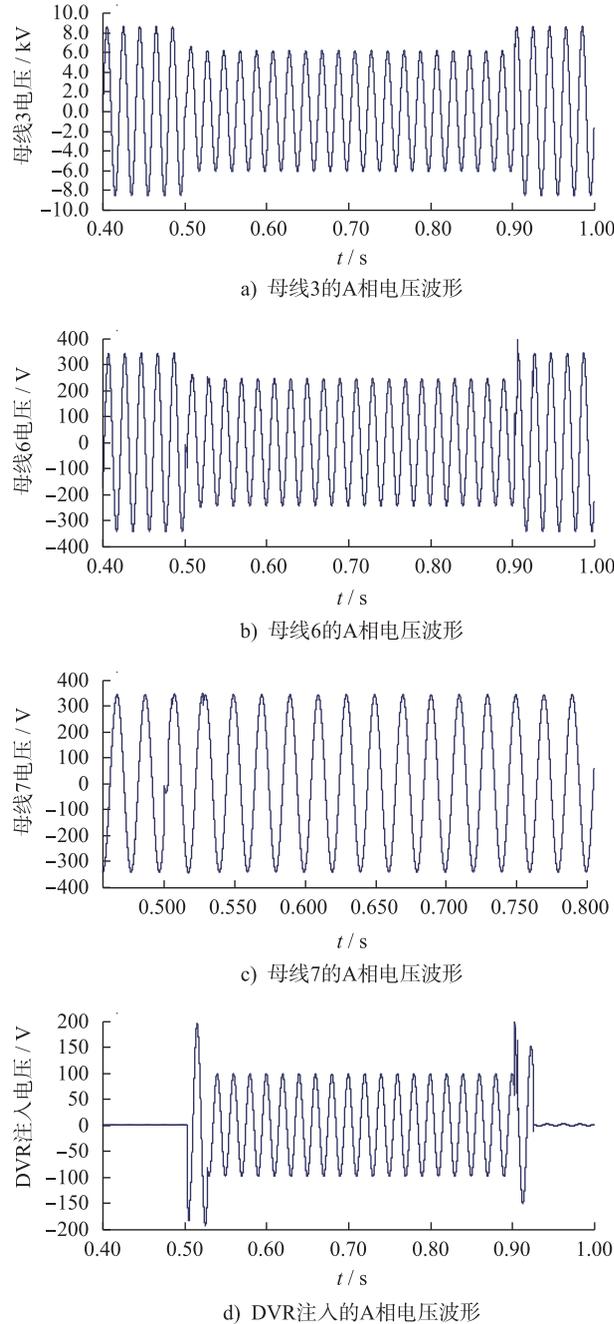


图5 工况一仿真波形

Fig.5 Case 1 simulation waveform

工况二:母线3发生40%的电压跌落,持续时间为0.2s。此时DVR与SSTS的协调控制过程分为以下几个阶段:

(1) 发生电压跌落的瞬间,如图6(a)所示,DVR投入运行,如图6(b)所示,使负载电压维持在额定值,如图6(c)所示;

(2) 母线3电压跌落持续时间超过2ms后,启动SSTS,闭锁DVR。在1个工频周期内,将敏感负荷切换到备用电源侧,使负载电压维持在额定值,如图6(c)所示;

(3) SSTS完成切换后,启动DVR,使负载电压达到额定值。主要目的是补偿负载切换至无故障线路后的电压暂态过程,如图6(b)所示;

(4) 发生电压跌落0.2s后,主电源侧恢复正常,如图6(a)所示。启动SSTS,将负荷切换至主电源。

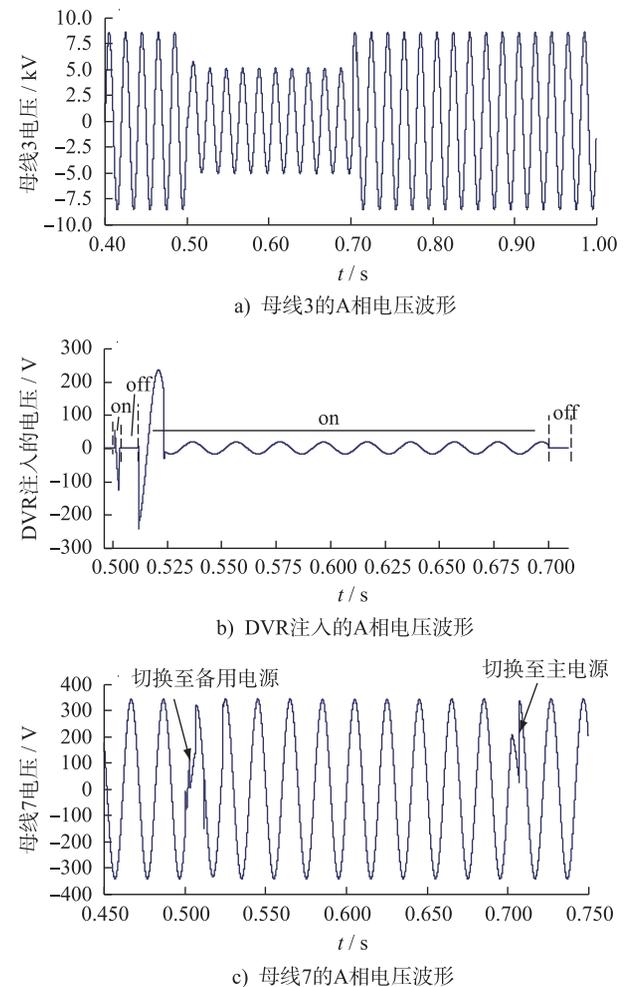


图6 工况二仿真波形

Fig.6 Case 2 simulation waveform

工况三:母线3发生30%三相电压跌落,持续时间为50个工频周期。母线3的A相电压波形如图7(a)所示,由于测量电压介于额定电压的60%和85%之间,DVR不启动。一旦电压跌落持续时间超过2ms,DVR迅速动作,补偿电压跌落使负载电压达到额定值,如图7(d)所示。当DVR能量耗尽后,

如图 7(b) 所示, DVR 通过通信装置向 SSTS 发出启动信号, 即使测量电压没达到 SSTS 的动作阈值, 仍启动 SSTS, 将敏感负荷切换到备用电源侧, 如图 7(c) 所示。

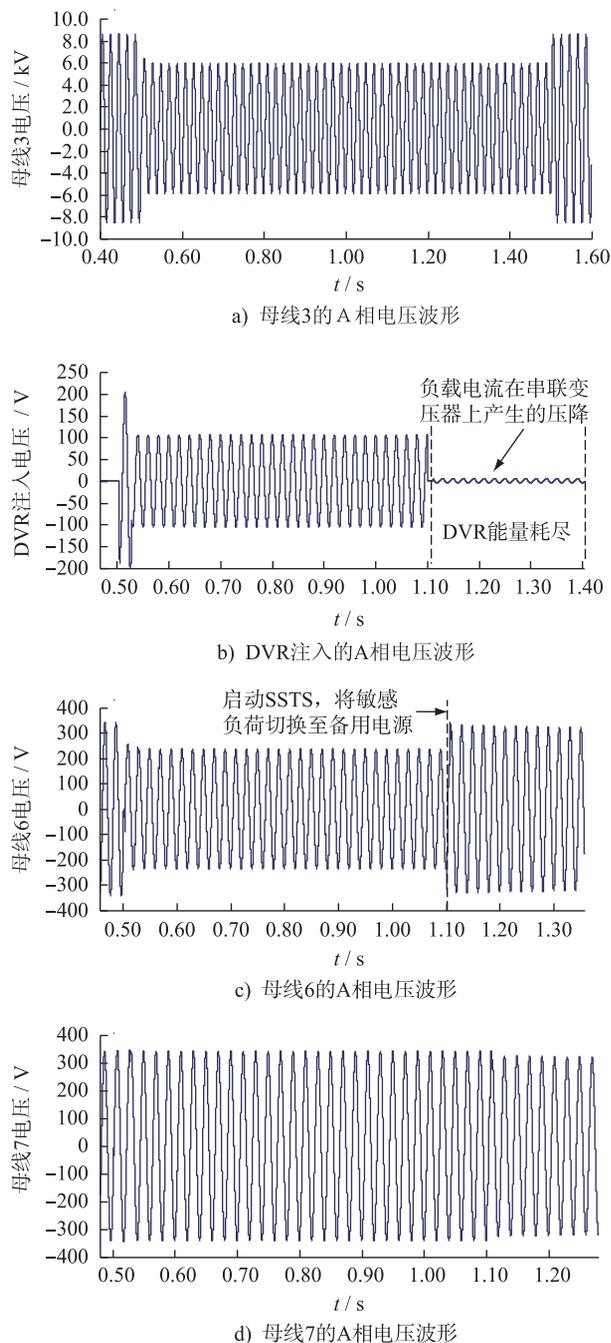


图7 工况三仿真波形

Fig.7 Case 3 simulation waveform

5 结语

本文提出一种结合单相 dq 变换和形态学滤波器的单相电压跌落检测方法, 满足单相电压跌落检测准确性和实时性的要求; 提出一种基于电压跌落等级划分与时序配合的 DVR 与 SSTS 协调控制方法, 实现了不同电压等级下 DVR 和 SSTS 的协调动

作; 基于 Matlab/Simulink 的仿真模型验证了本文提出的协调控制策略的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke, et al. Coordinated optimal design of inverter controllers in a micro-grid with multiple distributed generation units [J]. IEEE Transactions on Power System, 2013, 28(3): 2679-2687.
- [2] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
LUO An. Power grid harmonic and reactive compensation technology and equipment [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [3] 张宸宇. 微网及含微网的配电网电能质量综合控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
ZHANG Chenyu. Research on power quality comprehensive control of microgrid and distribution grid with microgrid [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [4] LI Yunwei, HE Jinwei. Distribution system harmonic compensation methods [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014, 8(4): 18-31.
- [5] HIROFUMI A. Control strategy and site selection of a shunt active power filter damping of harmonic propagation in power distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 354-363.
- [6] VIATHGAMUWA D M, LOH P C, LI Yunwei. Protection of microgrids during utility voltage sags [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1427-1436.
- [7] LI Yunwei, VILATHGAMUWA D M, LOH P C. Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6): 1707-1719.
- [8] KATIRAEI F, IRAVANI M R, LEHN P W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 248-257.
- [9] GHENMAN T, BERKOUK E M, FRANCOIS B. A novel space-vector current control base on circular hysteresis areas of a three-phase neutral-point-clamped inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2669-2678.
- [10] AURELION G, OMAR P, VICENTE F, et al. Application of a repetitive controller for a three-phase active power filter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1): 237-245.
- [11] RAMON C, ROBERT G, ENRIC F. Odd-harmonic digital repetitive control of a single-phase current active filter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(4): 1060-1068.
- [12] KATIRAEI F, IRAVANI M R, LEHN P W. Small-signal dynamic model of a micro-grid including conventional and electronically interfaced distributed resources [J]. IET Gener Transm Distrib, 2007, 1(3): 369-378.
- [13] 雷涛, 樊养余. 双算子形态学滤波器 [J]. 自动化学报, 2007, 31(1): 10-14.

- 2011, 37(4): 449-463.
- LEI Tao, FAN Yangyu. Double operator morphological filters [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(4): 449-463.
- [14] 陈平, 李庆民. 基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 60-65.
- CHEN Ping, LI Qingming. Design and analysis of mathematical morphology-based digital filters [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 60-65.
- [15] 刘伟, 孟庆刚, 商皎, 等. 一种新型级联多电平动态电压恢复器的研究[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(5): 27-31.
- LIU Wei, MENG Qinggang, SHANG Jiao, et al. Research on a new cascaded multilevel dynamic voltage restorer [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(5): 27-31.
- [16] 吴志坚, 徐星星, 王宝安. 一种新型低压电网动态电压恢复器的仿真分析[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(3): 39-42.

WU Zhijian, XU Xingxing, WANG Baoan. Simulation and analysis of a new type DVR for distribution network [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(3): 39-42.

作者简介:



张宸宇

张宸宇(1989—),男,江苏扬州人,博士,从事微网电能质量治理工作;

史明明(1986—),男,江苏南京人,高级工程师,从事电能质量工作;

陈兵(1977—),男,江苏南京人,研究员级高级工程师,从事新能源及配网技术研究工作;

郑建勇(1966—),男,江苏南京人,教授,研究方向为新能源并网、在线监测与故障诊断;

缪惠宇(1992—),男,江苏南通人,博士研究生,研究方向为主动配电网。

Coordinated Control Strategy of SSTS and DVR

ZHANG Chenyu¹, SHI Mingming¹, CHEN Bing¹, ZHENG Jianyong², MIAO Huiyu²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to give full play to the large capacity of SSTS and the rapid response of DVR, a single-phase voltage sag detection method based on single-phase dq transform and morphological filter is presented in this paper. The DVR and the SSTS coordinated control method are combined with the DVR and the SSTS to achieve the coordinated action of the DVR and the SSTS, thus ensuring the continuous high quality power supply of the sensitive load. The simulation model based on Matlab / Simulink verifies the correctness and validity of the proposed control strategy.

Key words: solid static transfer switch; dynamic voltage regulator; voltage sag; coordinated control

(编辑 刘晓燕)

(上接第11页)

Electromechanical-electromagnetic Hybrid Simulation of Jiangsu Power Grid Using PSMModel

JIN Meng¹, LI Xiujin¹, LIU Yidan¹, ZHANG Xiang¹, SUN Yi¹, ZHU Xinyao²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the rapid development of HVDC (high voltage direct current) in Jiangsu Power Grid, large amount of electric power would be integrated through HVDC in the future. It is found that fault of the AC power grid would affect the operation of HVDC through the bus voltage of the converter station, which may lead to commutation failure. However, electromechanical simulations, which are used for power system stability analysis nowadays, may not be able to accurately reflect the dynamic process. In this paper, by using BPA and PSMModel, electromechanical simulations as well as electromechanical and electromagnetic hybrid simulations are performed to study the impact of Jiangsu Power Grid fault on the operation of HVDC, and the conclusions are supposed to be helpful for power system analysis.

Key words: ultra-high voltage direct current (UHVDC); commutation failure; electromechanical simulation; electromechanical and electromagnetic hybrid simulation

(编辑 徐林菊)