

基于 PModel 的江苏电网机电-电磁混合仿真

金梦¹, 李修金¹, 刘一丹¹, 张祥¹, 孙毅¹, 朱鑫要²

(1. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102;

2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:江苏电网直流输电发展迅猛,未来将通过直流输电受入大量功率。在电网运行过程中,交流电网故障将通过换流站母线对直流输电运行产生影响,可能造成直流输电发生换相失败等,而目前电力系统稳定分析所采用的机电暂态仿真手段可能无法准确反映该动态过程。文中分别采用机电仿真软件 BPA 和机电-电磁混合仿真软件 PModel(power system model)2 种仿真工具,对比仿真分析和研究了江苏电网交流故障对直流输电运行的影响,相关结论为电网运行分析工作提供建议和参考。

关键词:特高压直流;换相失败;机电仿真;机电-电磁混合仿真

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)03-0007-06

0 引言

我国能源资源和经济发展严重不匹配,能源资源主要分布在西南和“三北”(东北、华北和西北)地区,负荷中心则主要位于东南沿海地区;为解决电力的远距离输送问题,大容量特高压直流输电在我国电网得到了长足的发展和运用^[1-3]。江苏电网为我国东部的负荷中心,截至 2016 年,已有±500 kV 龙政超高压直流、±800 kV 锦苏特高压直流 2 条直流输电落点,直流受电功率超过 10 000 MW^[4,5]。此外,±800 kV 雁门关—淮安特高压直流和±800 kV 锡盟—泰州特高压直流也均已进入全面建设阶段,将于 2017 年建成投运,届时江苏电网直流受电功率将超过 28 000 MW^[6,7]。直流输电的稳定运行对江苏电网具有十分重要的意义。

换相失败是直流输电(HVDC)逆变侧常见的一种故障,其一般由交流电网短路故障造成^[8-12]。受仿真工具和软件限制,目前我国在大规模受端电网计算分析中,一般采用 BPA 和 PSASP 等机电暂态仿真手段来研究交流电网故障对直流输电运行的影响。但直流输电系统的机电暂态模型采用准稳态建模方法,无法实现直流输电控制系统的详细建模;且直流输电换相失败等暂态过程响应速度快,机电暂态仿真无法准确模拟暂态期间直流输电的运行响应情况^[13-15]。本文基于 PModel(power system model)机电-电磁混合仿真软件,直流输电系

统采用详细的电磁暂态仿真模型,大规模交流受端电网采用机电暂态仿真模型,对比仿真分析了江苏电网交流故障对直流输电运行的影响,并对电网运行分析工作提出了相关的建议。

1 分析电网简介

本文研究针对华东电网 2016 年运行数据开展。如图 1 所示,2016 年华东电网通过 8 回超/特高压直流与华中电网和西北电网互联,其中落点江苏电网的有±500 kV 龙政超高压直流、±800 kV 锦苏特高压直流 2 条直流输电。

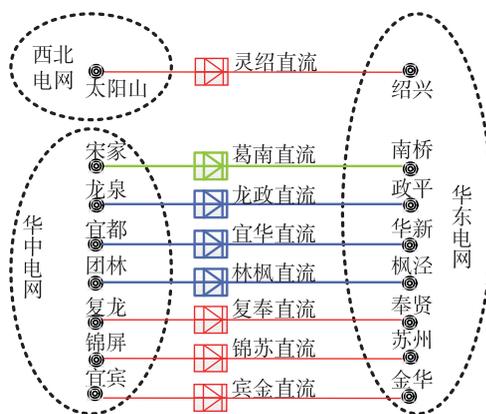


图 1 2016 年华东电网多直流馈入情况示意图

Fig.1 Diagram of multi-infeed HVDC in East China Grid in 2016

至 2016 年 7 月,江苏电网最大负荷已超过 90 000 MW,为我国重要的负荷中心;淮沪特高压交流北半环 1000 kV 淮南—南京—泰州建成投运,江苏电网交直流混联示意图如图 2 所示。龙政直流、锦苏直流受电功率超过 10 000 MW,且 2 座直流落点之间的电气距离较近,近区电网故障可能同时影

收稿日期:2016-12-31;修回日期:2017-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607092);国家电网公司科技项目(考虑宽频特性交互影响的交直流混联电网仿真技术研究)

响上述两座直流的正常运行,进而对江苏电网的运行带来重大影响。因此,准确分析和掌握电网故障对直流输电的影响,是保障江苏电网安全稳定运行的重要手段之一。



图2 2016年江苏电网交直流混联示意图

Fig.2 Diagram of AC/DC hybrid grid of Jiangsu Power Grid in 2016

本文中机电-电磁混合仿真基于 PSMModel 软件开展,落点华东的 8 回超/特高压直流均采用详细的电磁暂态模型,交流电网采用机电暂态模型。

2 换相失败及 PSMModel 原理

2.1 直流输电换相失败

直流输电通过换流站交流母线与电网互联,电网故障对直流输电的影响主要表现为电网短路等故障将会造成换流站母线电压降低或波形畸变,进而导致直流发生换相失败。对于直流输电逆变器而言,其电压波形示意如图 3 所示。图 3 中 α 为触发角, β 为触发超前角, μ 为换相角, γ 为熄弧角。

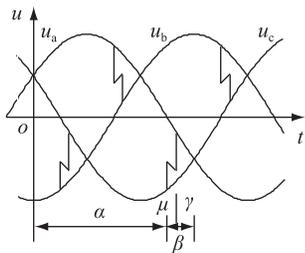


图3 HVDC 逆变器电压波形示意图

Fig.3 Diagram of the voltage in HVDC inverter station

在换相过程中,晶闸管完成电流换相后还需承受一段时间(对应于熄弧角 γ)的反向电压以恢复关断能力,若熄弧角 γ 过小不足以使晶闸管恢复关断能力,则在其承受正向电压后便立即恢复导通,造成换相失败^[16,17]。直流输电逆变器换相角 μ 的

表达式为^[17]:

$$\mu = -\gamma + \arccos\left(\cos\gamma - \frac{2\omega L_c I_d}{\sqrt{2}U_L}\right) \quad (1)$$

式(1)中: U_L 为交流系统线电压; I_d 为直流电流, L_c 为等值换相电抗; ω 为系统工频角频率。

同时,图 3 中各角度满足如下关系式:

$$\alpha + \beta = \alpha + (\mu + \gamma) = 180^\circ \quad (2)$$

将式(2)带入式(1),可得:

$$\mu = \beta - \arccos\left(\cos\beta + \frac{2\omega L_c I_d}{\sqrt{2}U_L}\right) \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知,当电网发生短路故障造成逆变器交流母线电压 U_L 下降后,将导致换相角 μ 增大,熄弧角 γ 减小;同时,直流电流 I_d 增大也会造成换相角增大。若熄弧角 γ 减小至小于晶闸管恢复关断能力所需的最小值时,便会造成直流输电系统发生换相失败。

2.2 PSMModel 软件

PSMModel 电磁暂态仿真软件是由中国电力科学研究院研制开发的电力系统电磁暂态及电力电子数字仿真软件^[18]。PSMModel 软件可以进行电力系统时域方面的电磁暂态仿真,主要用于交直流系统的混合仿真。

PSMModel 软件进行交直流系统机电-电磁混合仿真的算法原理如图 4 所示。其利用系统的潮流结果、机电参数和直流输电部分电磁参数作为输入,通过混合仿真接口来实现机电暂态仿真与电磁暂态仿真的交互,并最终输出机电暂态和电磁暂态的仿真结果。

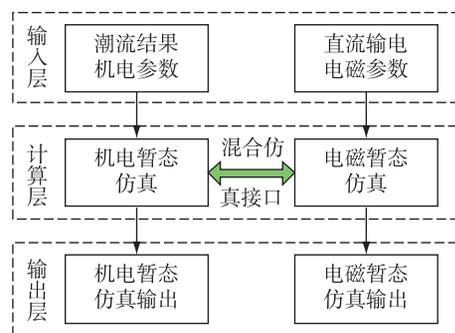


图4 PSMModel 软件算法原理图

Fig.4 Diagram of the PSMModel software algorithm

3 江苏电网交流故障对 HVDC 运行影响

锦苏直流和龙政直流近区江苏电网 500 kV 网架接线示意图如图 5 所示。下面分别采用机电仿真软件 BPA、机电-电磁混合仿真软件 PSMModel 仿真分析电网故障对上述两回直流输电的影响。仿真

故障设置为惠泉—梅里一回线路在 0.1 s 时发生三相短路故障,0.2 s 时故障线路跳闸隔离故障。

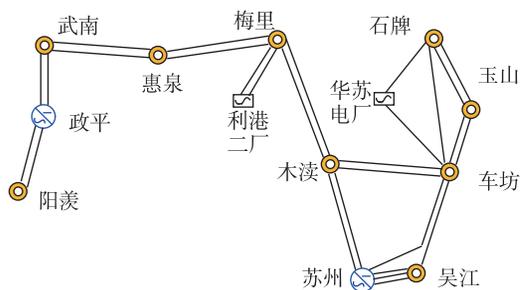
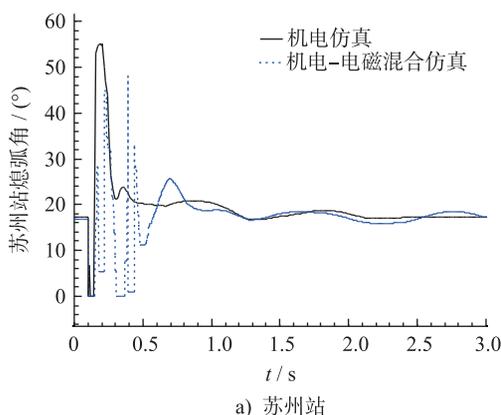


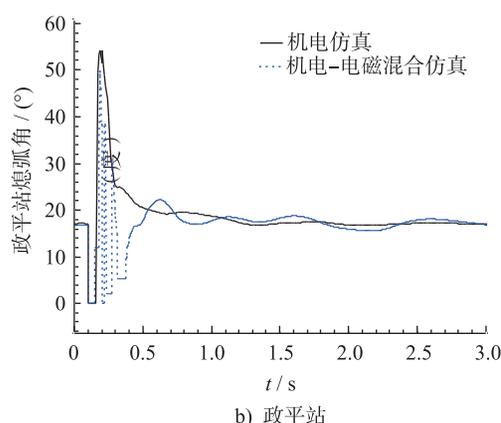
图 5 直流近区江苏电网 500 kV 网架接线示意图

Fig.5 Diagram of 500 kV grid nearby the HVDC

苏州和政平换流站熄弧角仿真波形如图 6 所示。机电-电磁混合仿真和机电仿真结果显示,故障期间 2 条直流逆变站熄弧角均下跌至 0,直流输电发生换相失败;然而,机电-电磁混合仿真结果还发现,锦苏直流在故障切除约 0.1 s 后(约 0.3 s 时)再次发生换相失败,龙政直流在故障切除约 0.01 s 后(约 0.21 s 时)再次发生换相失败;而机电仿真则无法反映锦苏直流和龙政直流在故障后发生的第 2 次换相失败问题,分析结论较为乐观。



a) 苏州站



b) 政平站

图 6 惠泉—梅里三永 N-1 故障后换流站熄弧角

Fig.6 Extinction angles of the converter station after three-phase permanent failure of Huiquan-Meili 1 line

为进一步分析锦苏直流和龙政直流发生换相失败的原因,给出锦苏直流和龙政直流的直流电流仿真波形如图 7 所示,苏州换流站和政平换流站 500 kV 交流母线电压仿真波形如图 8 所示。可见,故障发生后换流站交流电压降低而直流电流增大,从而造成直流发生换相失败;此外,图 7 的机电-电磁混合仿真结果还表明,故障恢复期间,0.3 s 时锦苏直流的直流电流迅速上升,0.21 s 时龙政直流的直流电流迅速上升,从而造成换相角增大,进而导致锦苏直流和龙政直流再次发生换相失败,而机电仿真则无法反映该直流电流突增现象。图 8 的仿真结果还表明,在故障期间和故障切除后系统恢复期间,政平站交流母线电压的机电仿真结果与机电-电磁混合仿真结果较为接近,而苏州站交流母线电压的机电仿真结果与机电-电磁混合仿真结果存在较大差异。

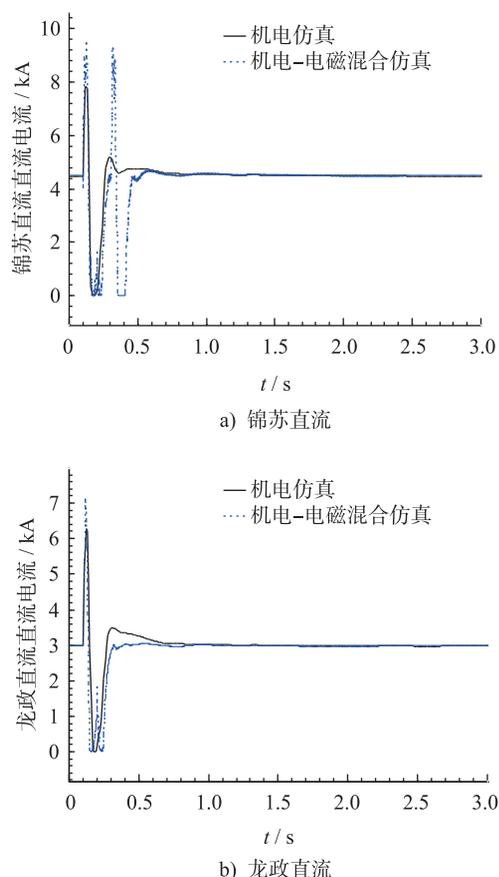


图 7 惠泉—梅里三永 N-1 故障后直流输电系统直流电流

Fig.7 DC currents of HVDCs after three-phase permanent failure of Huiquan-Meili 1 line

故障发生前后,锦苏直流和龙政直流逆变侧单极功率仿真波形如图 9 所示。可见,换相失败期间直流输电将无法向电网输送功率,从而给电网带来较大的瞬时功率冲击。

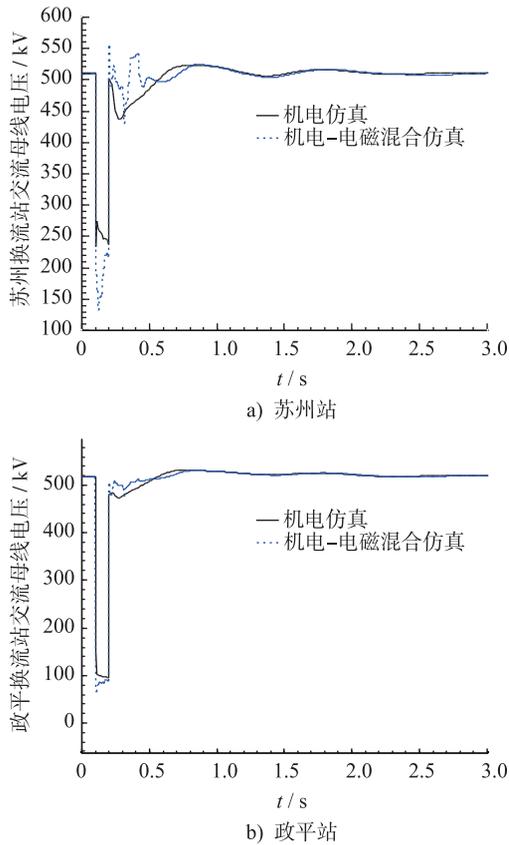


图8 惠泉—梅里三永 N-1 故障后换流站交流母线电压
Fig.8 AC voltages of the converter station after three-phase permanent failure of Huiquan-Meili 1 line

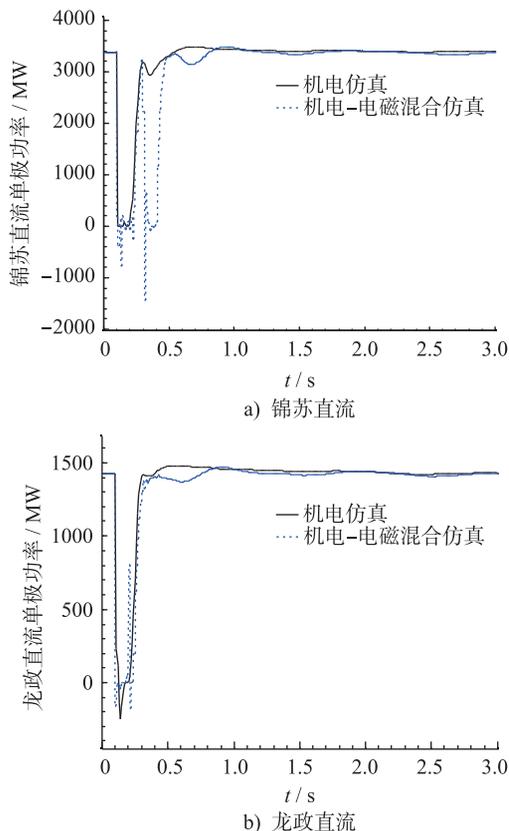


图9 惠泉—梅里三永 N-1 故障后直流单极功率
Fig.9 Unipolar powers of HVDCs after three-phase permanent failure of Huiquan-Meili 1 line

上述仿真和分析结果表明,较之于机电-电磁混合仿真,机电仿真在研究电网故障对直流输电运行的影响时,难以准确反映直流输电在故障恢复期间的暂态过程,仿真结论偏乐观。

此外,图6—9中1 s之后机电仿真和机电-电磁混合仿真曲线基本重合,即表明2种仿真手段均可有效仿真得到系统故障后的稳态运行情况。

4 结语

采用PSModel机电-电磁混合仿真工具分析了江苏电网故障对锦苏直流和龙政直流运行的影响,混合仿真研究中直流输电均采用详细的电磁暂态模型,并对比分析了机电仿真和机电-电磁混合仿真的分析结论。分析结果表明,较之于机电-电磁混合仿真,机电仿真手段难以准确反映交流电网故障期间和故障恢复期间直流输电系统的响应情况,仿真结论可能偏乐观。建议在后续的电网友分析工作中推广机电-电磁混合仿真的使用,提高电网特性分析的准确程度。

参考文献:

- [1] 刘振亚,秦晓辉,赵良,等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):1-7.
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.
- [2] 陆燕,谈健. 江苏海上风电接入系统若干问题探讨[J]. 江苏电机工程,2014,33(5):55-58.
LU Yan, TAN Jian. A discussion on the integration of offshore wind farm into Jiangsu Power Grid [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(5): 55-58.
- [3] 吴萍,徐式蕴,赵兵,等. 面向风火打捆的特高压直流输电工程弱送端强直弱交耦合特性研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):60-66.
WU Ping, XU Shiyun, ZHAO Bing, et al. Research of weak sending-end coupling characteristics for bundled wind-thermal power transmission of UHVDC project [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 60-66.
- [4] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术,2016,40(4):985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids [J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [5] 卫鹏,刘建坤,周前,等. 大规模区外来电失去背景下电网相应机制的研究[J]. 江苏电机工程,2016,35(3):13-16.
WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Study on grid response mechanism to large-scale outer power loss [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3): 13-16.

- [6] 李少华,王秀丽,张 望,等. 特高压直流分层接入交流电网方式下直流控制系统设计[J]. 中国电机工程学报,2015,35(10):2409-2416.
LI Shaohua, WANG Xiuli, ZHANG Wang, et al. Control system design for UHVDC hierarchical connection to AC grid [J]. Proceedings of CSEE, 2015, 35(10): 2409-2416.
- [7] 陈 庆,闪 鑫,罗建裕,等. 特高压直流故障下源网荷协调控制策略及应用[J]. 电力系统自动化,2017,41(5):147-152.
CHEN Qing, SHAN Xin, LUO Jianyu, et al. Source-grid-load coordinated control strategy and Its application under UHVDC Faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 147-152.
- [8] 杨 秀,陈鸿煜. 高压直流输电系统换相失败的仿真研究[J]. 高电压技术,2008,34(2):247-250.
YANG Xiu, CHEN Hongyu. Simulation study of commutation failure of HVDC transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 247-250.
- [9] 赵 彤,吕明超,娄 杰,等. 多馈入高压直流输电系统的异常换相失败研究[J]. 电网技术,2015,39(3):705-711.
ZHAO Tong, LYU Mingchao, LOU Jie, et al. Analysis on potential anomalous commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 705-711.
- [10] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 378-384.
- [11] 朱鑫要,汪惟源,汪成根. 江苏特高压交直流输电交互影响研究[J]. 江苏电机工程,2016,35(2):39-42.
ZHU Xinyao, WANG Weiyuan, WANG Chenggen. Analysis of interaction between UHVAC and UHVDC for Jiangsu Power Grid [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 39-42.
- [12] 邵 瑶,汤 涌,郭小江,等. 2015 年特高压规划电网华北和华东地区多馈入直流输电系统的换相失败分析[J]. 电网技术,2011,35(10):9-15.
SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems in North China and East China Power Grids planned for UHV power grids in 2015 [J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 9-15.
- [13] 林凌雪,张 尧,钟 庆,等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术,2006,30(17):40-46.
LIN Lingxue, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46.
- [14] 王智冬. 交流系统故障对特高压直流输电换相失败的影响[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):25-29.
WANG Dongzhi. Impact of AC system fault on UHVDC commutation failure [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 25-29.
- [15] 何朝荣,李兴源,金小明,等. 高压直流输电系统换相失败的判断标准[J]. 电网技术,2006,30(22):19-23.
HE Chaorong, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Criteria for commutation failure in HVDC transmission system [J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 19-23.
- [16] 李新年,易 俊,李柏青,等. 直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计[J]. 电网技术,2012,36(6):266-271.
LI Xinnian, YI Juan, LI Baiqing, et al. Simulation analysis and operation statistics of commutation failure in HVDC transmission system [J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 266-271.
- [17] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
ZHAO Wanjuan. HVDC engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [18] 顾卓远,汤 涌,刘文焯,等. 双馈风力发电机组的电磁暂态-机电暂态混合仿真研究[J]. 电网技术,2015,39(3):615-620.
GU Zhuoyuan, TANG Yong, LIU Wenzhuo, et al. Electromechanical transient-electromagnetic transient hybrid simulation of doubly-fed induction generator [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 615-620.

作者简介:



金 梦

金 梦(1989—),女,湖北仙桃人,助理工程师,从事电力系统规划、特高压直流输电运维检修工作;

李修金(1972—),男,江苏邳州人,高级工程师,从事电力系统继电保护、变电站二次辅助系统的检测、维护和研究等工作;

刘一丹(1971—),男,辽宁大连人,高级工程师,从事电力系统继电保护运检技术研究

工作;

张 祥(1988—),男,江苏张家港人,工程师,从事直流输电运维检修工作;

孙 毅(1988—),男,江苏泰州人,工程师,从事电力系统分析与控制分析工作;

朱鑫要(1987—),男,河南尉氏人,工程师,从事 FACTS 建模、电力系统稳定分析与控制等研究工作。

(下转第 27 页)

- 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)