

DOI: 10.7667/PSPC160910

华东电网多直流同时换相失败仿真分析

王少辉, 唐飞, 向农

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 随着馈入华东电网直流条数及输送容量的不断增加, 交流系统故障引起的多直流同时换相失败稳定性问题日益突出。采用 PSD-BPA 暂态稳定仿真程序, 对 2016 年华东电网丰大运行方式下的多直流同时换相失败问题进行了仿真分析。结果表明: 上海地区及上海—江苏、上海—浙江联络线附近多数 500 kV 线路发生三相短路故障均会引起八回直流全部发生换相失败。多直流同时换相失败会影响受端系统稳定运行, 但一般不会造成系统失稳, 影响程度与等效换相失败时间有关。等效换相失败时间和负荷模型会对换相失败恢复过程中的换流母线电压造成影响。

关键词: 多直流换相失败; 等效换相失败时间; 交流系统故障; 稳定性; 换流母线电压

Commutation failure simulation analysis of East China power grid multiple HVDC lines

WANG Shaohui, TANG Fei, XIANG Nong

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the increase of number and capability of DC transmission lines feeding into East China power grid, the stability problem caused by commutation failure of multiple DC systems which resulted by AC faults has been more serious. By use of PSD-BPA transient stability simulation program, commutation failure of multiple HVDC of East China power grid in summer peak load operation mode in 2016 is simulated and analyzed. Simulation results show that commutation failure of eight DC transmission lines could be caused by three-phase short-circuit fault occurred in 500 kV lines in Shanghai area and nearby tie-lines; commutation failure of multiple DC lines impacts but not destroys the stability of the receiving-end system, and the influence degree is related with the equivalent commutation failure time; and inverter bus voltage during the recovery process of commutation failure can be affected by equivalent commutation failure time and load model.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Study on Safety and Stability Control Technology for Extra High Voltage DC Successive Commutation Failure and Restart Condition".

Key words: commutation failure of multiple DC lines; equivalent commutation failure time; AC system faults; stability; commutation bus voltage

0 引言

我国地域辽阔, 能源分布很不均衡, 能源丰富的西部地区与东部负荷中心距离较远, 直流输电及相关研究由于技术上和经济上的独特优势, 在大容量远距离输电和大区电网互联等多方面起着非常重要的作用^[1-4]。截止到 2015 年, 已经有 7 回直流输电线路馈入华东电网, 包括葛南直流、龙政直流、宜华直流、林枫直流、复奉直流、锦苏直流、宾金直流, 根据电网规划^[5], 宁夏灵州—浙江绍兴±800 kV

特高压直流工程将于 2016 年第三季度建成投运, 额定输送容量 8000 MW, 届时, 华东电网馈入总容量将达到 39.8 GW。馈入直流条数的增多不仅限制了受端电网的直流接入能力^[6], 同时, 由于各回直流落点电气距离较近, 当受端交流系统发生故障时, 可能导致多回直流系统同时发生换相失败^[7]。多回直流同时换相失败对系统造成的功率冲击严重扩大了交流故障的影响范围, 加深了扰动程度, 对交直流混联系统稳定性的影响日益突出^[8-11]。

根据实际运行情况, 绝大部分换相失败均是由受端交流系统故障引起, 文献[12]利用短路比和多馈入短路比指标分析了华东电网交直流系统故障对华东受端电网暂态电压稳定性的影响, 给出了

基金项目: 国家电网公司科技项目“特高压直流连续换相失败、再启动工况下安全稳定控制技术研究”

华东电网电压薄弱区域。文献[13]介绍了一起因受端电网交流故障引发的多馈入直流同时换相失败故障案例, 并对其影响进行了仿真分析。研究表明受端系统的负荷模型也会多直流同时换相失败时系统的稳定性造成影响^[14]。

本文采用中国电力科学院开发的 PSD-BPA 暂态稳定程序, 对 2016 年华东电网丰大运行方式下交流系统故障造成的多直流同时换相失败问题进行了仿真, 分析了华东电网的强度及影响多直流同时换相失败的故障范围及相关因素, 研究了等效换相失败时间和负荷模型不同对华东电网换流母线电压稳定性的影响, 并给出了提高系统多直流同时换相失败稳定性的相关建议。

1 华东受端系统的强度

1.1 系统模型

2016 年华东电网丰大运行方式仿真模型共包含 6084 个节点, 19 308 条支路, 发电机采用计及励磁系统及调速器作用的 6 阶模型, 直流系统采用准稳态模型, 直流控制系统整流侧为定电流控制, 逆变侧为定熄弧角控制, 同时包含低压限流、换相失败预测等控制环节。负荷模型为由恒功率与恒阻抗组合的静态负荷模型, 其中上海、江苏、浙江、安徽电网负荷由 40%恒阻抗与 60%恒功率模型组成, 不考虑负荷的频率特性; 福建电网为 60%恒阻抗与 40%恒功率负荷模型组成, 考虑了负荷的频率特性。

1.2 华东电网强度

交直流系统之间的相对强弱关系决定了系统的运行特性和稳定程度。对于单馈入直流系统, 一般用交流系统换流母线处的短路容量与直流额定输送功率的比值, 即短路比来表示交直流系统的相对强度, 进而衡量系统的稳定性。在多馈入直流输电系统中, 由于多直流馈入点电气距离较近, 各回直流间相互影响^[15], 一般用多馈入短路比来表示多馈入直流输电系统的强度^[16]。华东电网各直流线路逆变站的多馈入短路比 M_{SCR} 如表 1 所示。

表 1 馈入华东电网各回直流系统逆变侧 M_{SCR}

Table 1 M_{SCR} of HVDC inverter stations in East China

power grid					
直流线路	额定功率/MW	M_{SCR}	直流线路	额定功率/MW	M_{SCR}
葛南直流	1200	4.515	复奉直流	6400	4.080
龙政直流	3000	6.654	锦苏直流	7200	3.486
宣华直流	3000	5.142	宾金直流	8000	4.108
林枫直流	3000	3.789	灵绍直流	8000	3.838

经过与传统短路比对比得知, 由于各条直流之

间的相互影响, 各回直流的多馈入短路比均比不考虑直流间相互影响的传统短路比有所减小, 直流之间的相互作用使得交直流系统的稳定性有所降低。根据多馈入交直流系统强弱的判断标准, 各条直流均为强系统。枫泾、同里、绍兴逆变站强度较其他几回直流强度略低, 政平、华新逆变站强度较高, 对多馈入直流输电系统的支撑能力较大。

2 交流系统故障对直流换相失败的影响

换流母线电压幅值降低和换相电压过零点相角偏移是导致直流系统发生换相失败的根本原因^[4]。交流系统故障所引起的换相电压变化是导致换相失败的主要原因, 它通过影响电压幅值及相角偏移和波形变化来干扰换相过程。由于多馈入直流输电系统中多个逆变站之间电气距离较近, 多回直流之间具有耦合作用, 各换流站之间的电气耦合关系是影响多回直流是否会同时或相继发生换相失败的重要因素。受端系统发生严重故障时, 将有可能导致多回直流同时发生换相失败或短时间内相继换相失败, 造成短时大额功率瞬降, 送受端功率严重不平衡, 对系统的稳定运行造成影响。换相失败过程的持续时间可用等效换相失败时间^[17]来表示。

华东电网作为跨区送电的大受端, 多回直流的集中落点, 是典型的多馈入直流系统。当华东电网内重要线路发生严重故障时, 会造成逆变侧换流母线电压突变, 引起多回直流同时发生换相失败。本文以熄弧角小于 8° 作为判断换相失败的依据。通过对华东电网特高压交流线路进行仿真, 结果表明, 所有 1000 kV 特高压联络线发生三永 $N-1$ 故障均会导致部分直流线路换相失败, 且安吉、练塘特高压线路及其近区 500 kV 线路故障会使八回直流逆变侧全部发生换相失败。通过对华东电网内所有 500 kV 线路进行仿真分析发现, 上海、江苏、浙江电网内大部分 500 kV 线路发生三永 $N-1$ 故障均有直流线路出现换相失败, 但引起同时换相失败直流线路条数较多的地区主要集中在上海及上海—江苏、上海—浙江联络线附近区域。上海地区除徐行、杨行、外二厂地区部分 500 kV 线路故障未引起金华、绍兴换流站换相失败外, 其余大部分线路发生故障均会引起八回直流同时发生换相失败。仿真发现, 政平站未发生换相失败的概率较高, 这与故障点离换流站的距离和政平站多馈入短路比较大有关。安徽、福建地区超高压线路发生三永 $N-1$ 故障仅使部分或无直流线路发生换相失败, 对逆变站的影响较小。

以沪练塘—沪亭卫 500 kV 线路 0 s 发生三永 $N-1$ 故障为例, 故障 0.1 s 时切除, 馈入华东电网八

回直流几乎同时发生换相失败。部分直流逆变侧熄弧角及直流单极功率响应如图 1(a)及图 2(a)所示。

由图 1(a)可知,故障发生后,由于换流母线电压下降,逆变器熄弧角迅速降至零并持续短暂时间,华东地区八回馈入直流全部换相失败。在直流逆变侧定熄弧角及其他相关控制作用下,熄弧角在故障切除前就迅速增大,由于逆变侧换流母线电压持续偏低,部分逆变器熄弧角在 0.1 s 左右又出现短时下降,但在故障切除后开始上升并逐渐恢复至正常值,没有发生连续换相失败故障。由图 2(a)可知,换相失败使得多数直流功率迅速降至零,平均等效换相失败时间约为 0.14 s。多回直流功率在换相失败过程中功率出现负值,这是由于在熄弧角减小时,触发角移相超过 90°,直流电压出现负值。在熄弧角逐渐恢复后,直流功率逐渐回升并恢复正常值,直流功率恢复速度与直流控制系统参数设置有关。

为验证故障切除时间对换相失败的影响,使故障在 0.2 s 切除,通过仿真可知,除政平、金华换流站未发生连续换相失败外,其余换流站均发生连续换相失败,原因在于政平、金华换流站离故障点电气距离较远且多馈入短路比较大,对换流母线电压的支撑能力较强。部分直流逆变侧熄弧角及直流单极功率响应如图 1(b)及图 2(b)所示。由于故障切除时间的延长,换流母线电压持续低于正常换相电压,导致多回直流大额功率连续多次中断,等效换相失败时间增加到约 0.29 s,对直流送受端系统造成了

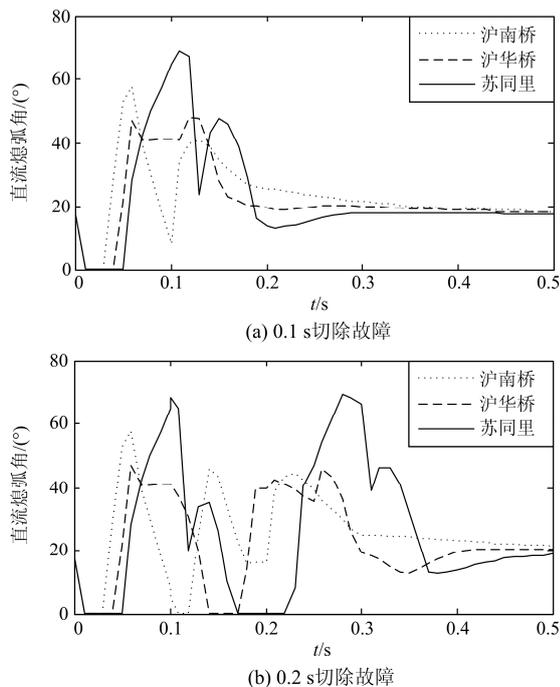


图 1 逆变器熄弧角响应曲线

Fig. 1 Extinct angle response curves of inverters

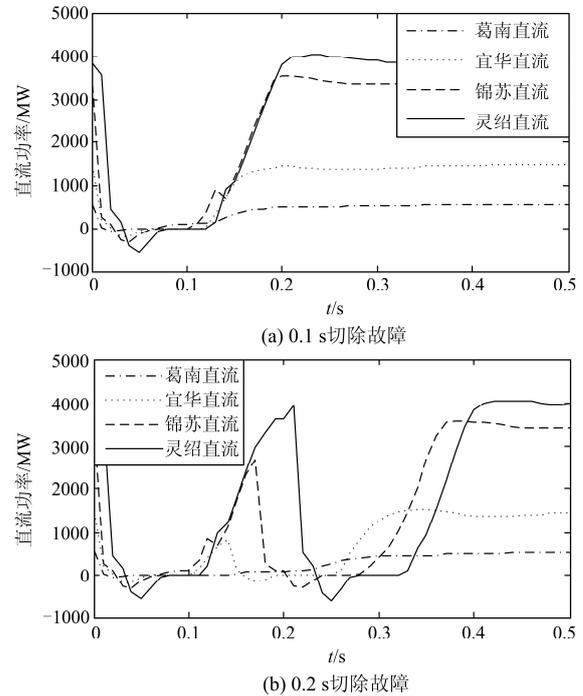


图 2 直流功率响应曲线

Fig. 2 Power response curves of DC lines

连续功率冲击。因此,受端逆变侧附近交流系统发生故障后应尽快切除,以减少多回直流同时或连续换相失败故障的发生。

3 多直流同时换相失败对受端系统的影响及因素

3.1 多直流同时换相失败对受端系统的影响

与直流闭锁故障不同,故障及时切除后,换相失败往往能在短时间内恢复,直流功率输送恢复正常,因此,换相失败对受端系统的影响可等效为短时功率冲击。但随着等效换相失败时间和换相失败线路功率总额的不断增长,对系统稳定性的影响也越来越大。

多直流同时发生换相失败会造成受端交流系统出现短时大额功率不足,对系统的功角稳定造成影响。同时交流系统故障导致直流换流母线电压降低,故障消失后,换相失败逆变站在恢复过程中要从受端系统吸收大量的无功功率,对逆变侧电压的恢复不利,因此受端系统的电压稳定性最值得关注。

以沪三林—沪远东 500 kV 线路发生三永 N-1 故障为例,故障 0.1 s 时切除,馈入华东电网内所有直流全部发生换相失败,华东电网瞬间减少送入功率 39.8 GW,故障切除后 0.1 s 内恢复输送功率。故障期间华东电网所有逆变侧换流母线电压均低于正常换相所要求电压,以奉贤站为例,换流站母线电

压低至 0.21 p.u., 故障切除后电压迅速回升。换相失败恢复过程中由于换流站吸收无功功率, 电压跌落至 0.87 p.u., 之后逐渐回升至正常值, 没有出现连续换相失败和电压崩溃现象, 其余换流母线电压同样在换相失败恢复后逐渐恢复。故障期间华东电网机组功角波动曲线如图 3 所示, 部分换流站母线电压变化如图 4 所示。

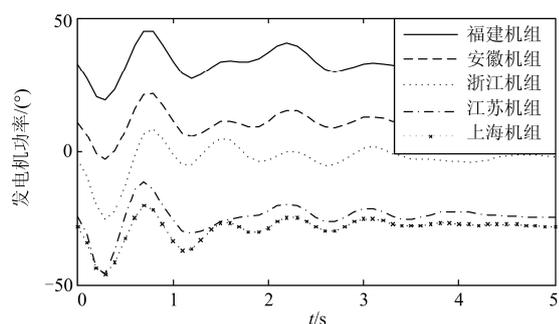


图 3 华东电网机组功角曲线

Fig. 3 Power angles of generators in East China power grid

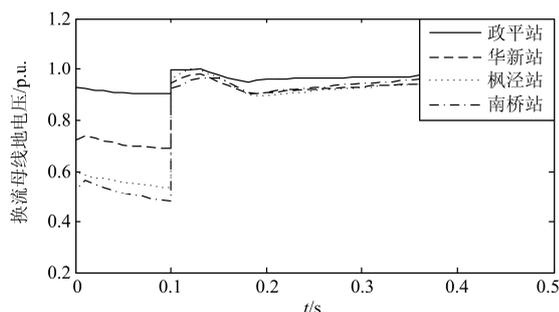


图 4 逆变器换流母线电压

Fig. 4 Commutation buses voltage in inverter station

仿真分析结果表明, 多直流同时换相失败会造成受端机组功角小幅振荡, 但各省机组几秒后功角便趋于稳定, 没有发生功角失稳。直流逆变侧换流母线电压共出现两次跌落。第一次由于受端电网短路故障造成换流母线电压出现较大跌落, 离故障点电气距离越近, 电压降幅越大; 第二次跌落在交流故障消失后由于换相失败恢复, 换流器吸收大量无功功率引起。通过在逆变侧配备 SVC 等无功补偿装置, 在换相失败恢复期间可为换流站提供无功功率, 具有维持换流母线电压的作用, 华东电网重要线路电压均在换相失败恢复后回升至正常范围。

交流故障及多直流同时换相失败产生的功率冲击引起了华东电网内省际联络线、特高压交流线路的功率振荡, 过程长达 15 s。换相失败期间华东电网功率大量缺额, 但系统在波动后均恢复正常运行, 原因在于交流系统故障切除及时, 等效换相失败时

间较短, 功率冲击对受端电网影响有限, 且各直流受端多馈入短路比都大于 3, 为强系统, 对受端的电压支撑能力较强, 因此虽受到多直流同时换相失败的大额功率冲击, 但在故障及时切除的前提下均能较快恢复, 没有出现直流闭锁故障, 也不需要切机、切负荷等操作。

3.2 等效换相失败时间对换流母线电压的影响

首次换相失败一般由交流故障导致, 往往不可避免^[18], 但可以采取适当的措施提高换相失败恢复过程中的换流母线电压, 避免连续换相失败的发生。如果故障未能及时切除, 可能造成多回直流连续换相失败, 等效换相失败时间增加, 同时逆变站吸收的无功也将增加, 加重对逆变站换流母线电压恢复过程的影响, 不利于换相失败的恢复, 重者甚至产生恶性循环, 导致电压崩溃。以沪三林—沪远东 500 kV 线路发生三永 N-1 故障为例, 故障分别于 0.1 s 和 0.2 s 时切除, 平均等效换相失败时间分别约 0.14 s 和 0.3 s。表 2 给出了在换相失败恢复过程中不同等效换相失败时间逆变站换流母线电压最低值对比。当等效换相失败时间为 0.3 s 时, 多回直流出现连续换相失败, 根据表中仿真结果, 延长故障切除时间导致等效换相失败时间增加后, 几乎所有逆变站换流母线电压在恢复过程中的最低电压均有所下降。除去故障点电气距离的影响, 总趋势为多馈入短路比越小, 降幅越大。

表 2 换相失败恢复期间逆变侧换流母线最低电压

Table 2 Minimum voltage of inverter buses during the recovery process of commutation failure

受端换流站	换流母线最低电压/p.u.	
	换相失败 0.14 s	换相失败 0.3 s
沪南桥	0.905	0.860
苏政平	0.950	0.945
沪华新	0.906	0.870
沪枫泾	0.891	0.847
沪奉贤	0.868	0.794
苏同里	0.903	0.892
浙金华	0.927	0.932
浙绍兴	0.935	0.920

3.3 负荷模型对换流母线电压的影响

由于多馈入直流系统在功率恢复的过程中需要吸收大量的无功功率, 恒阻抗负荷模型与电压的平方成正比, 故障后吸收的无功功率随电压的降低而显著减少, 降低了系统的无功缺额, 有利于抑制电压降落。而恒功率部分与电压无关, 相比在故障后将吸收更多的无功, 进一步降低换流母线电压。负荷模型组成的不同将影响换相失败恢复期间逆变侧

换流母线电压的大小,有可能导致连续换相失败的发生。表3给出了负荷模型中恒阻抗与恒功率不同比例时各逆变侧换流母线电压的最低值。

表3 换相失败恢复期间逆变侧换流母线最低电压
Table 3 Minimum voltage of inverter buses during the recovery process of commutation failure

受端换流站	换流母线最低电压/p.u.		
	60%恒功率	50%恒功率	40%恒功率
沪南桥	0.905	0.920	0.928
苏政平	0.950	0.963	0.948
沪华新	0.906	0.916	0.918
沪枫泾	0.891	0.909	0.912
沪奉贤	0.868	0.886	0.892
苏同里	0.903	0.916	0.908
浙金华	0.927	0.975	0.977
浙绍兴	0.934	0.948	0.951

由表3可以看出,除政平站和同里站换流母线最低电压在40%恒功率负荷时略有降低外,随着恒阻抗模型比例的增加,大部分换流站在换相失败恢复期间换流母线最低电压均提升,有利于换相失败的恢复。

4 结论

本文通过采用PSD-BPA暂态稳定仿真程序,对2016年华东电网丰大运行方式下多回直流同时换相失败进行了仿真分析,得出了以下结论。

1) 上海及其江苏、浙江联络线附近为多直流同时换相失败薄弱区域,多数500 kV及1000 kV线路故障会引起八回馈入直流线路全部发生换相失败,且延长故障切除时间会增大等效换相失败时间,使部分直流出现连续换相失败,给华东电网造成连续大额功率冲击。

2) 若交流故障在故障后短时间内切除,由于换相失败持续时间较短,系统可在扰动后恢复稳定运行。等效换相失败时间越大,换相失败恢复过程中换流母线电压下降幅度越大,有可能导致连续换相失败的发生。恒功率负荷的比例也会影响换相失败恢复过程中换流母线电压的恢复。

根据上述结论,提出以下建议措施。

1) 优化受端交流系统网架结构及直流落点布局,提高受端系统强度。在直流规划中可考虑采用分层接入方式来增大系统多馈入短路比及电压支撑能力。

2) 通过加快故障清除时间、合理设置无功补偿装置、优化直流控制系统参数设置等方法避免出现连续换相失败,合理安排直流功率恢复,提高系统抵抗连续换相失败冲击的能力。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电理论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 5-10.
- [2] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [3] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [5] 白建华, 闫晓卿, 程路. “十三五”电力流及电源规划方案研究[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 15-20.
BAI Jianhua, YAN Xiaoqing, CHENG Lu. Research on power flow and power source installation planning scheme during the 13th Five-Year period[J]. Electric Power, 2015, 48(1): 15-20.
- [6] 袁阳, 卫志农, 雷霄, 等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147.
YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.
- [7] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [8] 李兆伟, 贺静波, 张同尊, 等. “8.8”多回入沪直流同时换相失败故障分析及思考[C] // 2013年中国电机工程学会年会论文集, 成都, 2013: 1-7.
- [9] 王春明, 刘兵. 区域互联多回直流换相失败对送端系统的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1052-1057.
WANG Chunming, LIU Bing. Affects of commutation failure in multi-circuit HVDC transmission system interconnecting regional power grids on AC power system at sending end[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1052-1057.
- [10] 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.
- [11] 雷虹云, 于占勋, 赵强, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响 (二)直流换相失败瞬态特征分析及对交流线路保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 65-71.
LEI Hongyun, YU Zhanxun, ZHAO Qiang, et al. Study on influence of HVDC commutation failure on AC line protection, part two: analysis of fault transient response characteristics and influence of HVDC commutation failure on AC line protections[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 65-71.
- [12] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 多直流馈入华东受端电网暂态电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 50-55.
SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, et al. Transient voltage stability analysis of East China receiving-end power grid with multi-infeed HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 50-55.
- [13] 王晶, 梁志峰, 江木, 等. 多馈入直流同时换相失败案例分析及仿真计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 141-146.
WANG Jing, LIANG Zhifeng, JIANG Mu, et al. Case analysis and simulation of commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 141-146.
- [14] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81.
XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.
- [15] 龙志, 杨柳, 姚文峰. 广东电网远景直流落点优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 145-150.
LONG Zhi, YANG Liu, YAO Wenfeng. Guangdong power grid DC placement optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 145-150.
- [16] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1-8.
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8.
- [17] 屠竞哲, 张健, 王建明, 等. 大规模直流异步互联系统受端故障引发送端稳定破坏的机理分析[J]. 电网技术, 2015, 35(21): 5492-5499.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, WANG Jianming, et al. Mechanism analysis on the sending-side instability caused by the receiving-side contingencies of large-scale HVDC asynchronous interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2015, 35(21): 5492-5499.
- [18] 李新年, 陈树勇, 庞广恒, 等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 134-140.
LI Xinnian, CHEN Shuyong, PANG Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery for East China multi-infeed high-voltage direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 134-140.

收稿日期: 2016-06-20; 修回日期: 2016-09-26

作者简介:

王少辉(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: wsh@whu.edu.cn

唐飞(1982—), 男, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统暂态稳定、电力系统紧急控制、主动配电网等。E-mail: tangfei@whu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)