

DOI: 10.7667/PSPC160353

应对直流连续换相失败的紧急控制策略

苏寅生¹, 陈董秀², 鲍颜红², 姚海成¹, 黄河¹, 任先成²

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623; 2. 国网电力科学研究院/南瑞集团公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 直流输电系统连续换相失败故障可能导致送端电网暂态失稳。连续换相失败造成系统失稳的主要原因是直流输送功率连续性骤降导致发电机累积加速面积大于减速面积。提出了通过安全稳定控制装置紧急控制的应对方案。采用换相失败时间的累加量作为失稳判据和切机方案的匹配依据。如不再发生后续的换相失败, 则仅仅采用切机措施保证系统的安全稳定, 对于不能恢复的连续换相失败, 则需要闭锁相关直流后切机。通过互联交直流电网算例仿真验证了该方案的有效性。

关键词: 连续换相失败; 送端电网; 紧急控制; 切机方案

An emergency control strategy coping with continuous commutation failure in DC system

SU Yinsheng¹, CHEN Dongxiu², BAO Yanhong², YAO Haicheng¹, HUANG He¹, REN Xiancheng²

(1. Electric Power Dispatching and Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China;

2. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Continuous commutation failure of DC transmission system may cause transient instability in AC/DC interconnected power system. The main reason for transient instability is that continuous sudden-reduction of DC power under continuous commutation failure condition results in generator's cumulative acceleration area greater than deceleration area. The emergency control scheme for coping with the transient instability problem by security and stability control devices is proposed. The accumulative commutation failure time is adopted as instability criterion and matching variable of the generator tripping scheme. If continuous commutation failure whose duration is less than the blocking threshold value, the generator-tripping measures are adopted to prevent the instability, otherwise, the DC system blocking and generator-tripping measures are adopted simultaneously to ensure the stability. The effectiveness of this method is verified by the case of actual AC/DC interconnected power grid.

Key words: continuous commutation failure; sending-end power grid; emergency control; generator tripping scheme

0 引言

直流输电具有输送容量大、输送距离远、调节方便等优点。由于中国资源能源分布不均, 直流输电在国内得到了大规模应用^[1-2]。目前, 特高压、大功率、长距离多回直流互联系统在西北电网、华中电网与华东电网间逐渐形成。直流系统高密度接入交流电网, 使得交、直流系统间相互影响日益复杂, 给电网的安全稳定运行带来巨大的挑战, 如何保证

大规模交直流混联电网的安全稳定运行越来越受到科研、调度运行人员的关注^[3-5]。

大功率直流系统闭锁或换相失败等故障对送、受端交流系统均会产生较大影响, 其中直流系统的换相失败较为常见^[6-9], 多由受端交流系统故障引发。近几年, 华东电网已发生多起因交流线路故障导致的多直流同时换相失败^[10-11]。目前, 针对直流换相失败后交直流系统交互作用的研究主要集中在多馈入直流系统与送端交流系统间的相互影响^[6,12-14]。文献[6]研究了多回直流换相失败后直流送端近区交流电网电压、频率和功率波动特性。文献[14]研究了多回直流换相失败冲击下大区交流联络线功率波动的机制和峰值计算问题。

相对目前引人关注的多回直流同时换相失败问

基金项目: 南方电网公司科技项目“南方电网安全稳定综合防御系统建设与实施(二期)” ; 国家电网公司科技项目“计及受端电网约束的特高压直流外送大规模新能源发电送端电网调度运行关键技术研究与应用”

题, 直流的连续换相失败也有可能对交流系统造成极大冲击。文献[15]认为多回直流功率瞬降能导致送端系统第一摆/第二摆功角失稳, 对送端系统稳定性的影响程度接近单回直流闭锁故障。而直流连续换相失败对系统稳定性的影响可能更为严重。除了接于弱交流系统的高压直流系统由于大量无功的消耗导致发生连续的换相失败外, 空充主变、励磁涌流、单相故障重合闸等均有可能因为波形畸变等原因进而而引起直流系统连续的换相失败。目前, 针对送端交流电网直流系统闭锁故障可以通过安全稳定控制装置紧急切机保证系统的安全稳定^[16-18], 而尚未有针对直流连续换相失败的有效控制手段。直流控制系统中的换相失败保护对于交流系统故障引起的换相失败, 至少要持续 2.6 s 才会闭锁直流^[19], 此时系统极有可能已经失去稳定性, 由此给特高压交直流互联电网的安全稳定运行带来极大的安全隐患。

本文分析了直流连续换相失败引起送端电网功角失稳的原理, 确定了此类故障下的失稳判据和通过安全稳定控制装置紧急控制的应对方案, 通过实际算例验证了判据与应对方案的有效性。

1 “三华”特高压交直流混联电网

在“三华”特高压交直流混联电网中, 华北电网和华中电网通过 1 000 kV 特高压长南线互联, 华中电网通过 4 回±500 kV 超高压直流和 3 回±800 kV 特高压直流向华东电网送电。特高压长南线存在北送(华中送电华北)和南送(华北送电华中)两种运行方式, “三华”交直流互联电网结构如图 1 所示。

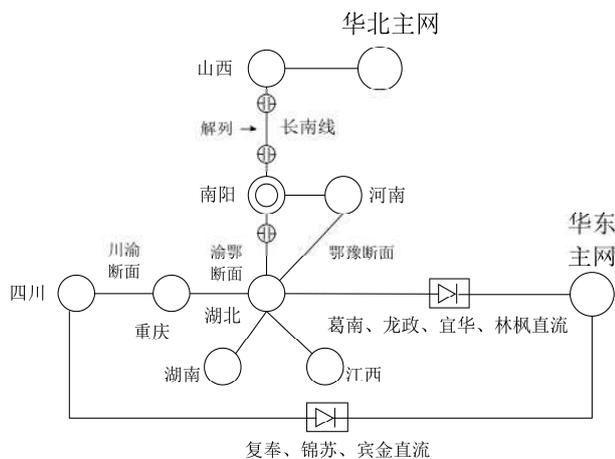


图 1 交直流互联电网结构图

Fig. 1 Structure of AC/DC hybrid interconnected system

华北—华中互联电网在特高压长南线、渝鄂断面等振荡中心装设有解列装置, 发生严重故障两侧

系统功角失稳后, 将触发解列装置动作。

华东地区 1000 kV 交流特高压和 500 kV 交流通道故障, 可能会导致馈入上海、江苏和浙江地区的部分或全部直流同时换相失败, 但这些换相失败持续时间很短, 直流功率能快速恢复, 对系统的稳定运行影响不大^[7,19]。但直流连续换相失败对系统稳定性的影响可能更为严重, 以特高压复奉直流为例, 通过仿真分析发现在某些方式下如果连续发生 4 次持续时间为 100 ms 的换相失败, 即可能造成华北和华中机组相对功角失稳, 引起特高压长南线解列。

2 送端电网失稳原理

以简单的单机无穷大系统为例进行说明, 其中负荷分别由交流和直流系统供电, 如图 2 所示。

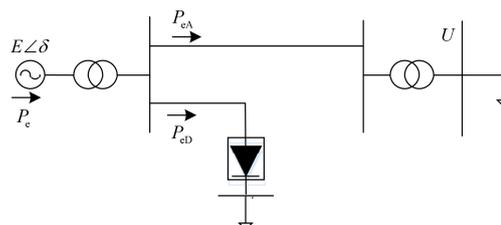


图 2 单机无穷大系统

Fig. 2 One-machine infinite-bus system

图 2 中, E 和 δ 分别为等值发电机内电势和转子角, U 为无穷大母线电压, P_e 为等值发电机有功功率, P_{eA} 和 P_{eD} 分别为交流和直流系统输送的有功功率。

直流输电系统一般情况下以恒定功率输送电能, 即

$$P_{eD} = const \quad (1)$$

而对于交流输电系统, 则近似满足

$$P_{eA} = \frac{EU}{X_{\Sigma}} \sin \delta \quad (2)$$

式中, X_{Σ} 是包括发电机等值电抗、两个变压器的等效电抗和交流线路电抗之和。

因此, 等值发电机有功功率为

$$P_e^{(1)} = P_{eA} + P_{eD} = \frac{EU}{X_{\Sigma}} \sin \delta + const \quad (3)$$

当直流系统发生换相失败时, 直流输送功率大幅减小甚至降低到零。

$$P_{eD}' = const2 (const2 \ll const) \quad (4)$$

相应的送端等值发电机外送电磁功率减小, 即

$$P_e^{(2)} = \frac{EU}{X_{\Sigma}} \sin \delta + const2 \quad (5)$$

可认为其机械功率基本不变, 则发生换相失败前后等值系统功率特性曲线如图 3 所示。

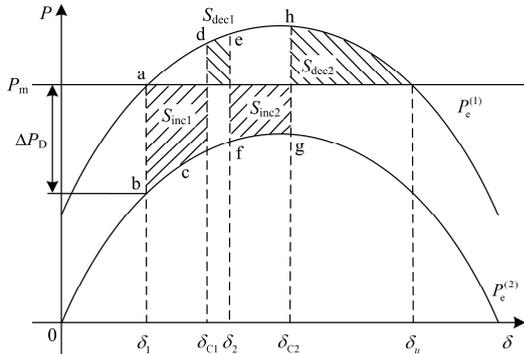


图 3 连续换相失败前后等值系统的功率特性曲线

Fig. 3 Power-angle characteristic curve of equivalent system under the normal and commutation failure condition

图 3 中, 系统稳态工作点为 a, 对应的功角为 δ_1 , 直流系统发生换相失败后, 系统运行点由 a 变到 b。之后发电机开始加速, 在 c 点时换相失败结束恢复至运行点 d。

从运行点 d 开始发电机减速, 一般情况下直流系统连续发生换相失败时, 两次换相失败之间的系统恢复时间比较短暂, 在发电机尚未进入反向加速时即会发生下一次换相失败, 此时系统运行点由 e 变到 f, 之后重复上述过程。图 3 中连续 2 次换相失败后续不再发生换相失败, δ_1 与 δ_{c1} 是第一次换相失败开始和直流功率恢复对应的功角, δ_2 与 δ_{c2} 是第二次换相失败开始和直流功率恢复对应的功角。

显然, S_{inc1} , S_{inc2} 对应连续换相失败期间的等值发电机加速面积, 而 S_{dec1} , S_{dec2} 是发电机减速面积。当减速面积大于加速面积时, 系统是功角稳定的, 否则系统失稳。亦即

$$S_{inc1} + S_{inc2} > S_{dec1} + S_{dec2} \quad (6)$$

时, 系统失稳。以此作为失稳判据。对于二次以上的换相失败可以依此类推。

当直流系统发生连续换相失败而不能恢复时, 如果已经判断出系统加速面积大于最大可能的减速面积, 则需要采取紧急控制措施保证系统稳定。首先需要闭锁发生连续换相失败的直流系统, 之后采取适当的切机措施, 增大系统减速面积, 使其大于加速面积从而使系统保持稳定。

3 直流连续换相失败的切机控制策略

安全稳定控制装置在电网受到大扰动而出现紧急状况时, 执行切机、切负荷等紧急控制措施, 使

系统保持安全稳定运行。一般基于简单可靠的控制策略表采用“离线决策, 实时匹配”的控制方式。控制策略与电网的接线方式、潮流状况和故障方式等因素有着较为复杂的关系, 策略的制定基于大量离线仿真计算结果, 按照最严重情况考虑。本节重点介绍了应对直流连续换相失败的紧急切机控制策略制定方法。

3.1 失稳判据

直流发生连续换相失败的情况相对复杂, 换相失败次数、单次换相失败持续时间、各次换相失败之间的时间间隔等都有可能不同, 而各种因素对系统的安全稳定情况均会产生影响。如果将各种因素都纳入策略表, 按照彼此之间的组合情况制定策略并进行匹配, 则策略表结构过于复杂, 不仅难以离线制定, 也增加了在线失配的风险。

由于连续换相失败情况的复杂性, 为了简化判断失稳与匹配策略表的过程, 需要提炼出主要特征量作为失稳判据与匹配决策的依据。由第 2 节知, 连续换相失败造成系统失稳的主要原因是直流输送功率连续性的骤降使发电机加速, 表现为累积加速面积过大, 而累积加速面积与换相失败的累积持续时间成正相关。故考虑简化处理各次换相失败之间的短时恢复时间, 采用换相失败时间的累加量作为失稳判据和切机方案的匹配依据, 即相同的累积换相失败时间对应相同的失稳模式和切机方案。参见图 4, 将两次换相失败之间的减速面积移后, 取时间

$$(t_{\delta_{c1}} - t_{\delta_1}) + (t_{\delta_{c2}} - t_{\delta_2}) - 2\Delta t \quad (7)$$

作为判断失稳和匹配切机措施的关键特征量, 其中 Δt 为换相失败结束到直流功率恢复的时间间隔。如此虽然带来了一定误差, 但在工程允许的范围内。

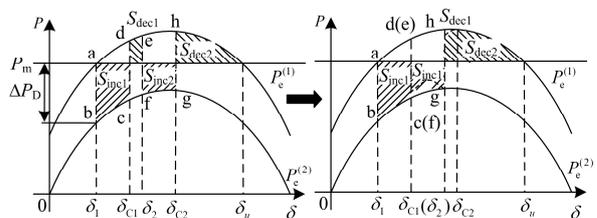


图 4 累积换相失败时间的失稳判据

Fig. 4 Instability criterion based on cumulative commutation failure time

从图 4 可以看出, 如考虑到等值发电机加速时段一般位于功率特性曲线上上升沿, 将加速面积向左侧移动, 一般会增大加速面积; 将减速面积向右侧移动, 如减速面积移至功率特性曲线上上升沿, 也会增大减速面积, 但如果移至下降沿, 则可能减小减速面积; 由于移动的加速面积远远大于减速面

积, 因此上述移动会使判据偏于保守。此外, 移动前后的差别与换相失败恢复时间相关, 而换相失败恢复时间相对短暂。综合考虑上述因素, 还可以按照保守原则将累积换相失败时间定值再适当减小, 满足工程要求。

3.2 切机策略

对于直流输送功率按照一定的功率间隔分档, 针对各档位的直流功率, 选择安全稳定裕度较低的系统运行方式, 按严重情况考虑, 换相失败时直流功率设置为 0。取典型的换相失败持续时间和两次换相失败时间间隔, 通过仿真计算获得系统失稳的连续换相失败次数, 并适当调整单次换相失败时间进而得到临界累积换相失败时间。考虑直接闭锁直流对系统冲击较大, 可将临界累积换相失败时间再延迟一段时间, 称为闭锁时间。如在临界累积换相失败时间和闭锁时间之间不再发生后续的换相失败, 则仅仅采用切机措施保证系统的安全稳定。如果换相失败仍然持续发生, 累积换相失败时间达到闭锁时间则需要闭锁相关直流后切机。分别针对上述情况计算保持系统安全稳定需要切除的机组台数和功率值, 直流连续换相失败的切机控制策略表形式见表 1。

表 1 直流连续换相失败的切机控制策略表

Table 1 Table of generator tripping strategy of continuous commutation failure in DC system

直流输送功率	系统运行	累积换相失败时间	切机控制措施	是否闭锁直流
$P_{D1} - P_{D2}$	方式 A1	$(T_{A1,\Sigma r1}, T_{A1,\Sigma r2}]$	$\Delta P_{A1,\Sigma r1}$	否
		$(T_{A1,\Sigma r2}, T_{A1,\Sigma r3}]$	$\Delta P_{A1,\Sigma r2}$	否
		$(T_{A1,\Sigma r3}, T_{A1,\Sigma rm}]$	$\Delta P_{A1,\Sigma r3}$	否
		$> T_{A1,\Sigma rm}$	$\Delta P_{A1,\Sigma rm}$	是
	方式 A2	-	-	-
	-	-	-	-
$P_{D3} - P_{D4}$	-	-	-	-
-	-	-	-	-

实际运行中, 一旦系统发生连续换相失败故障, 直流控保系统将相关的换相失败信号发送安控装置, 安控装置累积换相失败时间。如累积换相失败时间大于当前直流输送功率和运行方式对应的临界值, 则安控装置根据累积换相失败时间具体值匹配策略表中的措施执行相应的控制。监测直流连续换相失败期间如果两次换相失败的时间间隔大于预定的门槛值, 则判断连续换相失败结束并根据累积换相失败时间确定是否需要采取相应的切机措施, 之后将换相失败时间累加器清零; 对于连续换相失败

持续发生的情况, 当时间累加器的值达到闭锁时间, 由安控装置向直流控保系统发出闭锁直流信号并执行相应的切机措施。

4 仿真验证

基于交直流混联电网典型网架结构构造较为极端的运行方式, 其中, 华北送华中 5500 MW, 复奉直流系统送华东 6400 MW。在目前的安全稳定控制装置中, 复奉直流双极闭锁时通过切除四川网内瀑布沟、向家坝等水电机组维持电网稳定。在仿真计算中, 通过将直流控制中电流指令信号置 0 模拟换相失败, 考虑到换相失败后直流功率的恢复过程, 并参照实际发生连续换相失败 PMU 录波数据, 取单次换相失败持续时间为 0.17 s, 连续两次换相失败间隔时间上限为 0.2 s。

表 2 是在复奉直流换相失败累积时间相同, 而两次换相失败时间间隔不同的情况下, 为使系统稳定采取的切机措施统计表。由表中数据知, 不同直流连续换相失败时间间隔下的切机措施相同, 即相同的换相失败累积时间对应相同的失稳模式, 并对应相同的切机措施, 则采用换相失败时间的累加量作为失稳判据和切机方案的匹配依据是可行的。

表 2 复奉直流连续换相失败切机措施表

Table 2 Generator tripping strategy table for continuous commutation failure

换相失败次数	单次换相失败时间/s	两次换相失败间隔时间/s	换相失败累积时间/s	切除机组	切机量
4	0.17	0.05~0.2	0.68	川二滩 #1 机	556.5 MW

基于 3.2 节方案, 可以制定复奉直流连续换相失败的切机控制策略表如表 3。

表 3 大功率北送复奉直流满送方式下的连续换相失败控制策略表

Table 3 Generator tripping strategy table for continuous commutation failure under severe operation condition

换相失败累积时间区间/s	控制措施
(0,0.64]	无
(0.64,0.72]	切二滩 1 机
(0.72,0.76]	切二滩 2 机
(0.76,0.84]	切二滩 3 机
(0.84,0.92]	切二滩 4 机
(0.92,0.96]	切二滩 5 机
(0.96,1]	切二滩 6 机和瀑布沟 1 机
>1	闭锁直流并切二滩 6 机、瀑布沟 5 机和向家坝 1 机

在主要接线方式、大区联络断面功率和直流输送功率均与表 3 方式相同的某一运行方式下, 通过算例仿真验证策略表的正确性如表 4。

表 4 匹配决策表算例

Table 4 Example of matching decision table

换相失败 累积时间/s	匹配控制措施	实施措施后效果
0.6	无	稳定
0.9	切除川二滩#1-#4 机组 闭锁直流并切除川二滩	稳定
1.02	#1-#6、川瀑布#1-#5 和 川向家#1 机组	稳定

由表 4 知, 将换相失败累积时间作为判据并匹配控制决策表能维持电网稳定, 验证了控制策略表的正确性。

5 结论

与多回直流同时换相失败相比, 直流的连续换相失败也有可能对系统造成极大冲击, 严重情况下会导致送端电网暂态失稳, 需要采取迅速有效的控制措施避免直流换相失败给系统安全稳定带来的隐患。本文提出了通过安全稳定控制装置紧急控制应对直流连续换相失败的方案。鉴于直流系统可能发生的连续换相失败故障的复杂性, 上述策略尚需经过实际工程验证其正确性。

参考文献

[1] 刘振亚, 舒印彪, 张文亮, 等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8.
LIU Zhenya, SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8.

[2] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.
LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.

[3] 张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, LI Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7.

[4] 彭忠, 李少华, 李泰, 等. 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略[J]. 电力系统保护与控

制, 2015, 43(17): 75-80.

PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai, et al. A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 75-80.

[5] 杜旭, 韩民晓, 田春笋, 等. ±1100 kV 特高压多端馈入直流系统协调控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊): 176-183.
DU Xu, HAN Minxiao, TIAN Chunzheng, et al. Coordinated control research of ±1100 kV ultra high voltage multi-terminal direct current system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 176-183.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 陈干, 田方, 刘宁, 等. 高压直流输电工程换相失败研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 136-140.
CHEN Gan, TIAN Fang, LIU Ning, et al. Research on HVDC transmission project commutation failure[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 136-140.

[9] 申洪明, 黄少锋, 费彬, 等. 基于数学形态学的换相失败检测新方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 170-177.
SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, FEI Bin, et al. A new method to detect commutation failure based on mathematical morphology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 170-177.

[10] 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.

[11] 卫鹏, 刘建坤, 周前, 等. 一起复杂交流故障导致的锦苏直流换相失败的研究[J]. 高压电器, 2016, 52(5):

- 96-100.
WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Research on commutation failure of Jin-Su DC transmission project caused by a complex AC fault[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 96-100.
- [12] DENIS L H A, ANDERSSON G. Power stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.
- [13] 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.
- [14] 何剑, 张健, 郭强, 等. 直流换相失败冲击下的两区域交流联络线功率波动峰值计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 804-810.
HE Jian, ZHANG Jian, GUO Qiang, et al. Peak value calculation of power oscillation on AC tie-line for two-area interconnected power systems caused by HVDC commutation failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 804-810.
- [15] 屠竞哲, 张健, 吴萍, 等. 多送出直流系统送端故障引发稳定破坏机理分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 146-150.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, WU Ping, et al. Mechanism analysis on instability caused by sending-side contingencies of multiple HVDC sending systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 146-150.
- [16] 吴萍, 张健, 屠竞哲, 等. 溪洛渡-浙西特高压直流投运后系统稳定特性及协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1873-1878.
WU Ping, ZHANG Jian, TU Jingzhe, et al. Stability characteristics and coordinated control strategy of grid-integrated UHVDC transmission line from Xiluodu to Zhexi[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1873-1878.
- [17] 王建明, 孙华东, 张健, 等. 锦屏-苏南特高压直流投运后电网的稳定特性及协调控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 66-70.
WANG Jianming, SUN Huadong, ZHANG Jian, et al. Stability characteristics and coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC transmission line from Jinping to Sunan[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 66-70.
- [18] 徐式蕴, 吴萍, 赵兵, 等. 提升风火打捆哈郑特高压直流风电消纳能力的安全稳定控制措施研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 92-99.
XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Study on the security and stability control strategy enhancing the wind power consuming ability of the wind-thermal power combining Hazheng UHVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 92-99.
- [19] 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 Jun, 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.

收稿日期: 2016-03-16; 修回日期: 2016-05-11

作者简介:

苏寅生(1977-), 男, 高级工程师, 长期从事电网调度运行工作; E-mail: suys@csg.cn

陈董秀(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: 1531660740@qq.com

鲍颜红(1971-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail: baoyanhong@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)