

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

彭忠, 李少华, 李泰, 荆雪记, 周金萍, 苏匀, 赵静, 郭宏光

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 根据逆变器的换相过程, 分析了换相失败机理。比较了两种高压直流输电系统换相失败判别方法: 最小关断角判别和最小关断面积判别; 为了提高逆变器抑制换相失败的能力, 提出了最小关断面积控制策略。以林枫直流为研究对象, 在 PSCAD/EMTDC 中建立了相应的控制保护模型, 对最小关断角控制策略和最小关断面积控制策略进行对比实验。仿真结果表明最小关断面积控制策略抑制换相失败的效果优于最小关断角控制; 交流电压跌落幅度过大, 换相失败无法避免。

关键词: 换相失败; 最小关断角; 最小关断面积; 高压直流输电; 逆变器

A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system

PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai, JING Xueji, ZHOU Jinping, SU Yun, ZHAO Jing, GUO Hongguang
(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: According to commutation process of inverter, the mechanism of commutation failure is analyzed. Two methods to distinguish commutation failure in HVDC transmission system are compared, which are minimum extinction angle distinguishing and minimum extinction area distinguishing. A minimum extinction area control strategy is presented to improve ability of suppressing commutation failure in inverter station. Taking Lingfeng DC project as research object, a control and protection model based on PSCAD/EMTDC is built, and control experiment with minimum extinction angle control strategy and extinction area control strategy is done. The simulation results show that minimum extinction area control strategy is more effective than minimum extinction angle control strategy in suppressing commutation failure, and commutation failure can not be avoided if AC voltage dropped seriously.

Key words: commutation failure; minimum extinction angle; minimum extinction area; HVDC transmission; inverter

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0075-06

0 引言

换相失败是高压直流输电系统中较常见的故障之一。换相失败的发生将导致直流电压降低、直流电流增大、输送功率减少、换流变压器直流偏磁等不良后果。若换相失败后控制不当, 会引发连续换相失败, 最终导致直流闭锁。对于多条直流汇集的区域电网而言, 交流系统故障引起一回直流换相失败可能会导致其他直流也发生换相失败, 继而引发区域电网振荡^[1-10]。

换相失败常发生在逆变器站, 引发换相失败的主要原因有: 换流母线电压下降、换相电压过零点前

移、关断角过小、直流电流过大和换流器故障(如丢失触发脉冲)等^[11-13]。

国内外许多科研机构 and 高等院校对高压直流输电换相失败机理及其抑制方法做过深入研究, 取得了一定的成果, 也存在一些缺陷。文献[10]针对换相失败预测模块中 u_0 检测在交流电压过零时故障启动慢和 $abc-\alpha\beta$ 坐标变换在三相故障时不能有效地预防换相失败的问题, 提出了一种基于 $\sin\text{-cos}$ 分量检测的改进方法。在交流系统故障时该策略会动作, 但是对于交流电压扰动而言, 该方法效果有限。文献[13-14]深入研究了影响换相失败的因素及预防措施, 但主要从一次系统参数的优化设计角度预防换相失败, 没有提出详细的控制策略。文献[15]提出了换相失败预测方法, 但对于交流扰动而言, 该方法效果有限。文献[16]提出了一种适用于逆变

器换相失败预测控制的直流电流预测整定方法,该方法需要将逆变站计算的直流电流整定值发送到整流站,但是在工程实践中,整流站与逆变站的通信延时超过 20 ms,显然该方法效果有限。

本文分析换相失败的机理,比较了两种换相失败的判别方法:最小关断角判别和最小关断面积判别。在交流电压扰动情况下,最小关断面积判别方法可以更精准判断是否发生换相失败。为了提高逆变站抑制换相失败的能力,提出了最小关断面积控制策略。当交流电压扰动时,该控制策略可以使换流器保留合适的换相裕度,预防换相失败。最后,以林枫直流工程为研究对象,在 PSCAD/EMTDC 中建立了相应的控制保护模型,对最小关断角控制策略和最小关断面积控制策略进行对比实验。仿真结果表明最小关断面积控制策略抑制换相失败的效果优于最小关断角控制;交流电压跌落幅度过大,换相失败无法避免。

1 换相失败机理

换相失败一般发生在逆变站,因此本文以逆变器为研究对象。高压直流输电逆变器采用的是三相全波桥式电路,拓扑结构如图 1 所示。

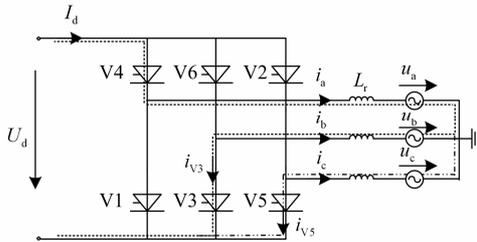


图 1 逆变器简图

Fig. 1 Sketch map of inverter

图 1 中: u_a 、 u_b 、 u_c 为换流变压器网侧三相等值电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为换流变压器阀侧三相电流; U_d 为直流电压; I_d 为直流电流; L_r 为换相电感。逆变器按照 V1~V6 的顺序依次触发导通。以 V3-V4-V5 的导通换相为例,在 V5 触发脉冲发出前, V3 流过的电流 i_{V3} 等于直流电流,当 V5 接收到触发脉冲时,由于换相电抗作用, i_{V3} 不能突降至 0, V5 流过电流 i_{V5} , 此时 V3、V4、V5 同时导通。如果此时 V5 两端的电压 $u_{cb} < 0$, V5 将不能正常导通, V3 却不能关断。

当两个桥臂之间换相结束后,刚退出导通的阀在反向电压作用的时间内如果未能恢复阻断能力,或者在反向电压期间换相过程一直未能进行完毕,这两种情况在阀电压转变正向时被换相的阀都将向原来预定退出导通的阀倒换相,称为换相失败^[17]。

1.1 换相过程

以 V3 和 V5 为研究对象解释换相过程。图 2 为 V3 和 V5 换相等值电路。忽略晶闸管导通的正向压降,由基尔霍夫电压定律得:

$$L_r \frac{dI_d}{dt} + u_a - u_b + L_r \frac{di_{V3}}{dt} = U_d \quad (1)$$

$$L_r \frac{dI_d}{dt} + u_a - u_c + L_r \frac{di_{V5}}{dt} = U_d \quad (2)$$

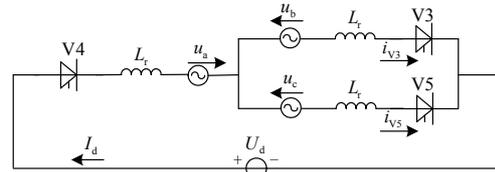


图 2 换相等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of commutation

规定 β 为越前触发角, γ 为关断角, ω 为角频率。以线电压 u_{AC} 的正向过零点为零时刻,则 V3 的关断时刻为 $(\pi - \gamma - \frac{2\pi}{3})/\omega$, V5 的开通时刻为 $(\pi - \beta - \frac{2\pi}{3})/\omega$ 。当换流变网侧线电压对称时,

$$u_{CB} = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (3)$$

由式(1)~式(3)得

$$\int_{\frac{\pi - \beta - \frac{2\pi}{3}}{\omega}}^{\frac{\pi - \gamma - \frac{2\pi}{3}}{\omega}} (\frac{di_{V5}}{dt} - \frac{di_{V3}}{dt}) dt = \frac{\sqrt{2}U}{L_r} \int_{\frac{\pi - \beta - \frac{2\pi}{3}}{\omega}}^{\frac{\pi - \gamma - \frac{2\pi}{3}}{\omega}} (\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})) dt \quad (4)$$

V3 或 V5 完全导通时,流过的电流为 I_d ,解式(4)得

$$\gamma = \arccos(\frac{\sqrt{2}I_d X_r}{U} + \cos \beta) \quad (5)$$

式(5)与有关文献中的关断角公式相同。其中 $X_r = \omega L_r$, U 为换流变压器网侧线电压有效值。关断角 γ 与直流电流 I_d 、换流变网侧线电压有效值 U 、越前触发角 β 、换相电抗 X_r 有关。当 U 减小, I_d 增大, β 增大时,关断角 γ 减小。如果关断角 γ 小于晶闸管恢复阻断能力需要的最小关断角 γ_{min} 时,就会发生换相失败^[2],这就是换相失败的最小关断角判别方法。

1.2 最小关断面积

式(4)可以转化为

$$2X_r I_d = \int_{\frac{\pi - \beta}{\omega}}^{\frac{\pi - \gamma}{\omega}} \sqrt{2}U \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (6)$$

等式(6)的右边积分等于图3中阴影面积A, 面积A称为换相电压时间面积^[18-19], 阴影面积G称为关断面积。

$$G = \int_{\pi-\gamma}^{\pi} \sqrt{2}U \sin(\omega t) d(\omega t) = \sqrt{2}U(1 - \cos \gamma) \quad (7)$$

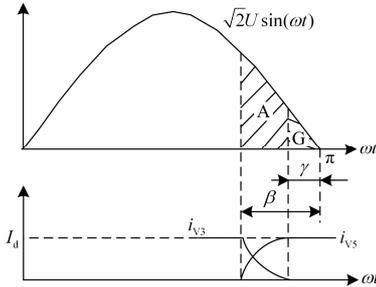


图3 最小关断面积

Fig. 3 Minimum extinction area

由式(6)知, 当直流电流恒定时, 换相电压时间面积恒定不变。如果逆变站交流电压减小, 则换相电压时间面积A向右扩展, 关断面积G减小, 关断角减小, 可能引发换相失败。如果越前触发角 β 增大, 换相电压时间面积A左移, 关断面积G增大, 关断角增大, 换相裕度增大。如果关断面积G过小, 晶闸管承受的反向电压时间过少, 载流子无法完全复合, 晶闸管将不能完全关断, 从而引发换相失败。因此, 当关断面积 $G < G_{\min}$ 时, 就会发生换相失败, 这就是换相失败的最小关断面积判别方法。

最小关断角判别方法的 γ_{\min} 综合考虑了晶闸管去离子恢复时间、串联连接的晶闸管之间存在的电压分布不平衡、器件特性的变化以及安全裕度等因素, 一般情况下关断角整定值为 $\gamma \approx 18^\circ$ ^[10]。最小关断面积判别方法中的 G_{\min} 在 γ_{\min} 的基础上考虑了交流电压的影响。根据PN结原理知, 当晶闸管受到的反向电压偏大时, 去离子恢复时间减少, 需要的关断时间缩短; 当晶闸管受到的反向电压偏小时, 去离子恢复时间增多, 需要的关断时间延长。因此最小关断面积判别方法能够在换相电压波动时更精准地判断是否发生换相失败。

2 最小关断面积控制策略

工程中, 逆变站的最小关断角控制策略的目标是控制关断角在 18° 左右。最小关断面积控制策略的目标是控制逆变器关断面积等于最小关断面积。

由式(7)得

$$G_{\min} = \sqrt{2}U_N(1 - \cos \gamma_{\min 0}) \quad (8)$$

式中: U_N 为额定换相电压有效值; $\gamma_{\min 0}$ 为额定换相电压下最小关断面积所对应的关断角。

根据最小关断面积控制策略的目标有:

$$\sqrt{2}U(1 - \cos \gamma_{\text{ref}}) = \sqrt{2}U_N(1 - \cos \gamma_{\min 0}) \quad (9)$$

$$\gamma_{\text{ref}} = \arccos\left(1 - \frac{1 - \cos \gamma_{\min 0}}{U/U_N}\right) \quad (10)$$

由式(10)知, 当交流电压为额定值时, $\gamma_{\text{ref}} = \gamma_{\min 0}$; 当交流电压减小时, $\gamma_{\text{ref}} > \gamma_{\min 0}$, 换流裕度增大; 当交流电压增大时, γ_{ref} 将减小, 但是需要稳定交流电压而吸收一定的无功功率, 关断角不能过小, 因此 γ_{ref} 需要限幅。最小关断面积控制策略流程如图4所示。

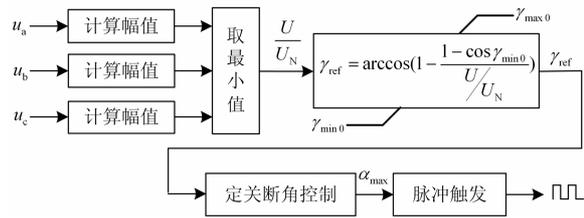


图4 最小关断面积控制策略

Fig. 4 Minimum extinction area control strategy

由图4知, 控制系统采集换流变压器网侧三相交流电压瞬时值, 计算各相幅值, 选取最小幅值。对于单相交流电压的扰动, 控制系统具有极快的响应速度。使用式(10)计算关断角参考值。为了保证交直流系统的安全运行, 需要设定关断角参考值的上下限值。预测型定关断角控制器根据关断角参考值计算所需的触发角 α_{\max} 。脉冲触发装置根据触发角产生同步脉冲触发晶闸管有序导通。

当交流电压为额定值时, 最小关断面积控制策略的关断角参考值等于最小关断角, 此时逆变器处于定关断角运行状态; 当交流电压减小时, 关断角参考值增大, 有利于抑制换相失败; 当交流电压增大时, 关断角参考值限幅于 $\gamma_{\min 0}$, 吸收一定的无功功率, 促进交流电压稳定。

图5为逆变器控制策略的配合。逆变器配置有直流电流控制器、直流电压控制器和最小关断面积控制器。直流电流控制器和直流电压控制器共用一个PI控制器, 最小关断面积控制器输出为PI控制器的上限。共用一个PI控制器可以保证控制策略切换时, 触发角不会突变, 直流系统波动小。直流电流控制器在电流控制权转移至逆变站时起作用, 直流电压控制器和最小关断面积控制器需根据工程需求确定主导权。当逆变站交流系统短路容量大, 且需提高交直流系统稳态运行的经济性时, 选取最小关断面积控制器作为主导控制器。当逆变站交流电压下降时, 最小关断面积控制器将增大关断角参考

值, 关断角增大, 逆变器需要消耗大量无功, 交流电压将进一步下降, 此时交流系统需要提供足够的无功支撑交直流系统恢复。

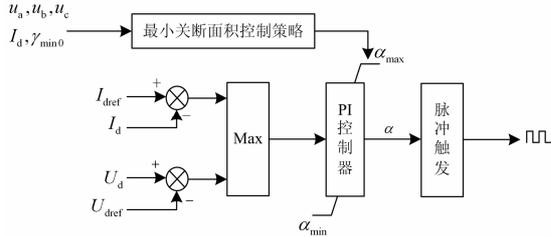


图 5 逆变器控制策略的配合

Fig. 5 Cooperation of control strategies in inverter

3 仿真验证

林枫直流工程的整流站为湖北荆门团林站, 逆变站为上海枫泾站, 是三峡送电上海的一条重要直流通道。林枫直流工程额定直流电压为 ± 500 kV, 额定直流功率为 3 000 MW。整流站交流电压为 535 kV, 最大短路电流为 63 kA; 逆变站交流电压为 510 kV, 最大短路电流为 63 kA。在 PSCAD/EMTDC 中建立与工程相近的仿真模型。

以逆变站为实验对象, 设定相同的直流系统运行初始条件, 在同一个时刻, 降低相同的电压幅度, 比较两种控制策略抑制换相失败的效果。

实验初始条件: bipolar 稳态运行。逆变站极 1 关断角为 17.152° , 极 2 关断角为 17.148° , 极 1 直流电压为 0.949 p.u., 极 2 直流电压为 0.949 p.u., 极 1 直流电流为 0.994 p.u., 极 2 直流电流为 0.994 p.u.

交流电压降落幅度设置四档: 9.5%、10%、10.5% 和 11%。

以 A 相电压正向过零点为 0° 基准, 交流电压降落时刻设置 9 个点: 30° 、 35° 、 40° 、 45° 、 50° 、 55° 、 60° 、 65° 和 70° , 电压下降平滑时间为 0.03 s。

图 6 和图 7 为逆变站交流电压在 35° 时刻开始下降 10.5% 后, 基于最小关断角控制策略和最小关断面积控制策略的极 1 响应波形。

两种控制策略抑制换相失败的效果如图 8、图 9 所示。

由图 6 知, 交流电压在 35° 时刻开始下降 10.5%, 在最小关断角控制策略下, 关断角参考值不变, 逆变站极 1 发生了换相失败。发生换相失败时, 直流电压瞬间跌落, 直流电流突升, 关断角减小至 0。在约 9.02 s 时刻, 逆变站强迫移相, 直流电流减小, 直流系统开始恢复。在约 9.25 s 时刻, 极 1 恢复了稳定运行。

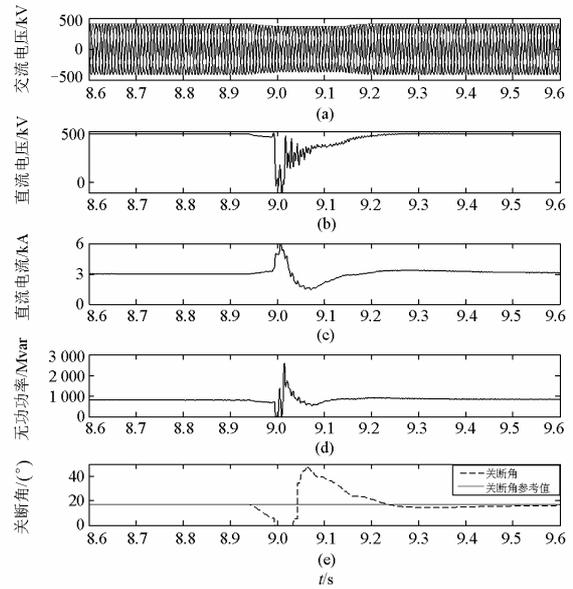


图 6 最小关断角控制策略的逆变站极 1 响应波形

Fig. 6 Response waves of pole1 for minimum extinction angle control strategy in inverter station

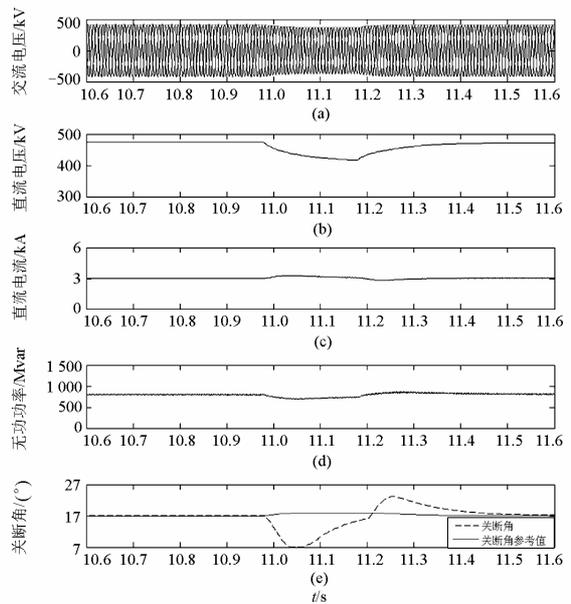


图 7 最小关断面积控制策略的逆变站极 1 响应波形

Fig. 7 Response waves of pole1 for minimum extinction area control strategy in inverter station

由图 7 知, 对于相同的故障, 最小关断面积控制策略检测到交流电压减小后增大了关断角参考值, 增加了换相裕度, 防止了换相失败。由于控制程序执行周期达数百微秒, 因此在暂态过程中, 实际关断角与关断角参考值有误差。

由图 8 和图 9, 交流电压降落幅度超过 11% 时, 最小关断角控制策略和最小关断面积控制策略都无

法抑制换相失败的发生。由式(5)知, 交流电压大幅降落, 如果关断角恒定, 则越前触发角需要大幅增加, 控制系统发出的触发角需要大幅减小。此时触发脉冲发出时刻已经超过了对应的触发角, 关断角过小, 导致了换相失败。

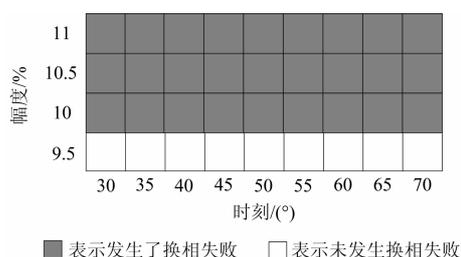


图 8 最小关断角控制策略抑制换相失败效果

Fig. 8 Results of suppressing commutation failure based on minimum extinction angle control strategy

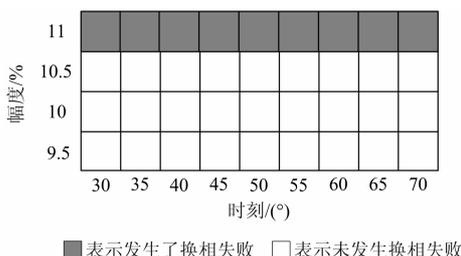


图 9 最小关断面积控制策略抑制换相失败效果

Fig. 9 Results of suppressing commutation failure based on minimum extinction area control strategy

图 8 和图 9 表明, 最小关断面积控制策略抑制换相失败的效果优于最小关断角控制策略。最小关断面积控制策略在交流电压幅值跌落时, 增大了关断角参考值, 使逆变器具有更大的换相裕度, 有利于抑制换相失败。

4 结语

通过分析换相失败的机理, 比较了两种换相失败判别方法: 最小关断角判别和最小关断面积判别。由 PN 结原理知, 在交流电压扰动情况下, 最小关断面积判别换相失败的精度高于最小关断角判别。根据此思想, 提出了最小关断面积控制策略。以林枫直流工程为研究对象, 在 PSCAD/EMTDC 中进行了对比实验, 根据仿真结果可得到如下结论:

- (1) 交流电压跌落幅度过大, 换相失败无法避免;
- (2) 最小关断面积控制策略抑制换相失败的效果优于最小关断角控制。

参考文献

[1] 朱韬析, 宁武军, 欧开健. 直流输电系统换相失败探

讨[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 116-120.

- ZHU Taoxi, NING Wujun, OU Kaijian. Discussion on commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 116-120.
- [2] 王海军, 黄义隆, 周全. 高压直流输电换相失败响应策略与预测控制技术路线分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 124-130.
- WANG Haijun, HUANG Yilong, ZHOU Quan. Analysis of commutation failure response strategies and prediction control technology in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 124-130.
- [3] 陈仕龙, 束洪春, 谢静, 等. 特高压直流输电线路故障暂态信号高频特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 84-89.
- CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jing, et al. High frequency characteristic analysis of fault transient signal at UHVDC transmission lines fault[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 84-89.
- [4] 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.
- [5] 肖俊, 李兴源. 高压直流输电系统触发滞后角与换相时间关系的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 30-34.
- XIAO Jun, LI Xingyuan. Analysis of the relationship between trigger-delayed angle and commutation time in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 30-34.
- [6] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.
- LI Xingyuan, ZHAO Rui, LIU Tianqi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 288-300.
- [7] 郭启伟, 孙兆国, 候慧军, 等. 一种研究±660 kV 银东直流动态特性的建模方法[J]. 高压电器, 2014, 50(10): 56-62.
- GUO Qiwei, SUN Zhaoguo, HOU Huijun, et al. Modeling approach for the study of ±660 kV Yindong

- HVDC dynamic characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 56-62.
- [8] 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.
- [9] 项玲, 郑建勇, 胡敏强. 多端和多馈入直流输电系统中换相失败的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 29-33.
XIANG Ling, ZHENG Jianyong, HU Minqiang. Study on commutation failure in MTDC and MIDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 29-33.
- [10] 陈树勇, 李新年, 余军, 等. 基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 1-6.
CHEN Shuyong, LI Xinnian, YU Jun, et al. A method based on the sin-cos components detection mitigates commutation failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 1-6.
- [11] 陈仕龙, 束洪春, 甄颖. 云广特高压直流输电负极运行换相失败及控制研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 128-133.
CHEN Shilong, SHU Hongchun, ZHEN Ying. Commutation failure of Yun-Guang UHVDC transmission system running in negative pole state and its control measures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 128-133.
- [12] 郑传材, 黄立滨, 管霖, 等. ± 800 kV 特高压直流换相失败的 RTDS 仿真及后续控制保护特性研究[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 14-20.
ZHENG Chuancai, HUANG Libin, GUAN Lin, et al. RTDS-based simulation of commutation failure in ± 800 kV DC power transmission and research on characteristics of subsequent control and protection[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 14-20.
- [13] 欧开健, 任震, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 5-8.
OU Kaijian, REN Zhen, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 1 commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5-8.
- [14] 任震, 欧开健, 荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(二)——避免换相失败的措施[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(6): 6-9.
REN Zhen, OU Kaijian, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 2: measures against commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 6-9.
- [15] ZHANG Lidong, DOFANS L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C] // 2002 International Conference on Power System Technology Proceedings, Kunming, China, 2002: 51-56.
- [16] 袁阳, 卫志农, 王华伟, 等. 基于直流电流预测控制的换相失败预防方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 565-570.
YUAN Yang, WEI Zhinong, WANG Huawei, et al. A DC current predictive control based method to decrease probability of commutation failure[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 565-570.
- [17] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 中国电力工业出版社, 2004: 110-120.
- [18] 王钢, 李志铿, 黄敏, 等. HVDC 输电系统换相失败的故障合闸角影响机理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 49-54.
WANG Gang, LI Zhikeng, HUANG Min, et al. Influence of initial fault voltage angle on commutation failure identification in a HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 49-54.
- [19] 李思思, 白仕雄, 丁志林, 等. 基于换相电流时间面积的换相失败判别方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 98-102.
LI Sisi, BAI Shixiong, DING Zhilin, et al. Current-time area method for the identification of commutation failure[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 98-102.

收稿日期: 2015-01-30; 修回日期: 2015-03-09

作者简介:

彭忠(1986-), 男, 硕士, 研究方向为常规直流输电和柔性直流输电控制保护; E-mail: pengzhong-2010@163.com

李少华(1982-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为常规直流、柔性直流控制保护和电力系统实时仿真;

李泰(1981-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为常规直流输电和柔性直流输电控制保护。

(编辑 葛艳娜)