

高压直流输电系统换相失败实时监测研究

换相失败故障是基于晶闸管电网换相技术中最常见的问题之一，随着我国直流输电线路规模的日益增加，对于导致换相失败因素的分析以及对换相过程实时监测等问题的研究是十分有必要的。首先根据高压直流输电系统中换流器工作原理分析换相失败产生的机理；在此基础上研究导致换相失败的因素及其各自的特点；然后提出对换相失败问题的实时监测方法；最后在PSCAD/EMTDC软件中建立HVDC系统分析模型对其换相实时监测系统仿真验证。通过研究可知，在影响换相失败的因素中交流电压是导致换相失败发生最主要的因素，其中交流电压幅值跌落和电压波形畸变都可能导致换相失败的发生。通过对换相过程进行实时监测，可以看到换相过程是否正常进行，以及换相失败发生的时刻，为换流器控制保护和换相失败预防提供依据。

张 军¹ 牛 犁² 吴金龙¹ 崔 勇³/1. 西安许继电力电子有限公司
2. 国网西安供电公司 3. 国网上海电力公司

0 引言

由于晶闸管为半控型电力电子器件，同时高压直流输电系统采用了电网换相技术，因此换相失败对于高压直流输电是不可避免的一个故障^[1-3]。关于换相失败的研究从高压直流输电工程诞生以来就从未间断。目前国内外关于直流输电系统换相失败的研究非常多，同时伴随着我国直流输电线路的增加，在部分地区形成了多馈入直流输电系统^[4-7]。单个换流站的换相失败可能会导致其他换流站发生继发性换相失败，从而对整个地区的电网稳定带来非常大的威胁^[8-10]。换相失败问题是非常复杂的，交直流系统

之间相互作用关系、直流系统的控制方式以及交流系统谐波不稳定因素等都可能导致换相失败的发生^[14-21]。因此很有必要对高压直流输电系统中换相失败故障进行深入的探讨与分析。

文献[11]通过多馈入直流输电系统仿真研究了交流系统引起换相失败和直流闭锁的差异。文献[12]中对换相失败的因素进行了分析，但是并没有研究交流电压跌落导致熄弧角减小的灵敏度。文献[13]对多落点高压直流输电系统中影响逆变站换相失败的三个因素：耦合导纳、交流系统强度和故障位置进行了仿真分析。文献[14]中提出了以基于最小熄弧角的多馈入交互作用因子来判断换相失败的方法。文献[15]中对用于判断换相失败的电压时间面积方法进行了改进。上述研究中，无法判断发生的是单次换相失败，还是连续多次换相失败等；同时上述文献中并没有对谐波因素引发换相失败现象的发展过程进行深入研究。因此，在上述研究中无法对换流器的保护动作与预防措施动作提供相应的依据。

本文以 ± 500 kV高压直流输电系统为研究对象，从晶闸管工作原理和逆变器运行特性出发推导和分析有可能导致换相失败发生的因素；并对每种因素对换相失败的影响进行分析；最后，通过直流电压、触发超前角、交流电压幅值和交流系统谐波含量等参数建立起换相过程的实时监测系统，以达到对换相失败问题的实时监测作用。



张 军/工程师

关键词/Keywords
高压直流输电系统 ·
换相失败 ·
熄弧角 ·
实时监测 ·

国家电网公司科技项目 (5209401350BW)。

1 换相失败发生机理

实际工程中, 高压直流输电系统中均采用了12脉波或者双12脉波换流器; 每个12脉波换流器由两个6脉波换流器串联组成, 换流器基本都是以半控器件晶闸管为元器件。

在换流过程中, 晶闸管处于周期性的开通和关断状态。根据晶闸管换流器的运行特点, 在实际工程中整流器出现换相失败的概率非常低, 因此换相失败的研究主要针对逆变器。晶闸管有源逆变电路换流过程如图1所示。图1中, U_{dc} 为逆变器直流电压, u_a 、 u_b 和 u_c 为交流系统三相电源。

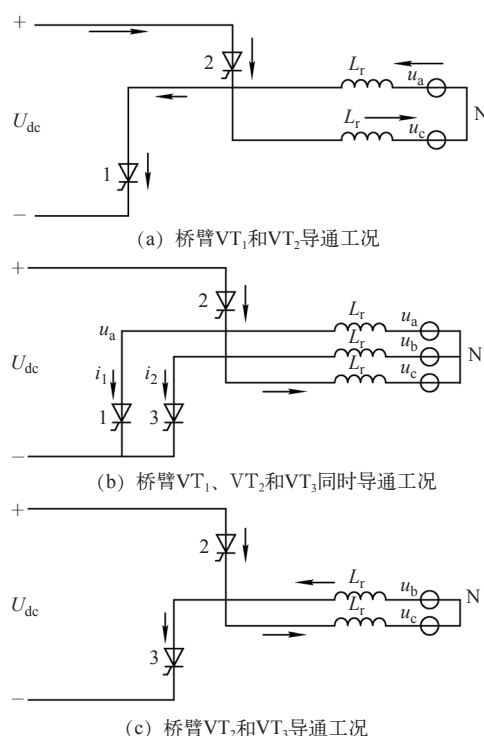


图1 晶闸管有源逆变器换流过程

由图1可知, 从换流器 (VT_1 、 VT_2) 通态—(VT_1 、 VT_2 和 VT_3) 通态—(VT_2 、 VT_3) 通态过程中, 电流从 VT_1 换到了 VT_3 上。将该过程称之为换相。

换相过程中, 桥臂上的电流如图2所示。在图2中, u_v 为逆变器交流线电压; u_{VT_1} 为一个桥臂两端的电压; i_1 、 i_3 分别为桥臂1和桥臂3的电流; β 为逆变器触发超前角, μ 为换相重叠角, γ 为逆变器的关断角 (熄弧角), 三者的关系为

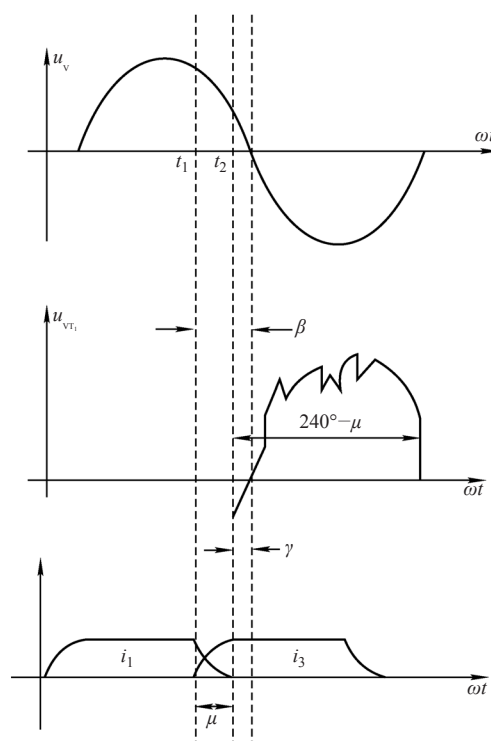


图2 换相过程桥臂上的电流

$\beta = \mu + \gamma$ 。

VT_3 触发后经过 μ 的电角度, VT_1 上的电流变为零。正常情况下, 在 VT_3 导通后, 经过一段时间 ($\mu + \gamma$) 后 VT_1 退出导通, 换流过程完成。如果 γ 小于晶闸管自身要求的关断角 γ_{min} , 晶闸管 VT_1 可能重新导通, 电流无法从 VT_1 换相到 VT_3 , 该过程的发生称为换相失败。逆变器发生连续两次以及以上次数的换相失败, 称之为连续换相失败, 反之称为一次换相失败。

2 换相失败影响因素分析

在逆变器运行过程中, 换相失败的本质原因是换相过程中系统提供的熄弧角 γ 小于换流器自身需要的熄弧角的最小值 γ_{min} 。因此对于换相过程中熄弧角的分析十分必要。

逆变器中触发超前角和熄弧角存在以下关系^[16]

$$\cos \beta = \cos \gamma - \frac{\sqrt{2} X_i I_d}{E_i} \quad (1)$$

式中, I_d 为直流电流; E_i 为逆变器交流线电压有效值; X_i 为交流系统每一相的换相电抗; β 为逆变器

触发超前角； γ 为逆变器的熄弧角。

从式（1）看出上述4个因素都有可能换相失败的发生，其中换相电抗是换流变压器固有的参数，在系统运行时为常数。因此，以下就触发超前角、直流电压和交流电压3个因素对换相失败的影响分别进行分析。

2.1 触发超前角对换相失败的影响

换相过程中电流从 I_d 降到0的过程对应的是换相重叠角，和触发超前角的逆变器的关系为

$$\gamma = \beta - \mu \quad (2)$$

式中， β 为逆变器触发超前角； γ 为逆变器的熄弧角， μ 为换相重叠角。

换相重叠角由系统的运行参数所决定的，每一次换相过程中需要的换相重叠角值是固定的。当控制器产生触发超前角减小时，熄弧角也随之线性减小。

$$\Delta\gamma = \Delta\beta \quad (3)$$

由于逆变站采用了定熄弧角控制策略，因此由于触发超前角而导致换相失败的工况极少。

2.2 直流电流对换相失败的影响

在触发超前角和交流系统电压不变的情况下，直流电流 I_d 的增加会导致换相过程中熄弧角减小。熄弧角的减小量计算公式为

$$\Delta\gamma = \gamma - \arccos\left(\cos\gamma + \frac{\sqrt{2}X_i\Delta I_d}{E_i}\right) \quad (4)$$

式中， $\Delta\gamma$ 为由于直流电流增加而导致的熄弧角减小量。

直流电流的增量越大，逆变器熄弧角就越小，当小于逆变器自身所需的最小熄弧角时，本次换相过程无法顺利进行。

系统在运行过程中，整流侧采用定电流控制策略。当直流电流有所波动的情况下，整流器通过调节触发角 α 来稳定直流电流。因此，实际工况中由于直流电流增加而引起的换相失败是可以控制和快速恢复的。

2.3 交流电压对换相失败的影响

对于式（1）中影响换相失败的几个因素中，

只有交流电压属于逆变器的外在因素，而且具有随机性和不可控性。

2.3.1 交流电压有效值对换相失败的影响

稳态运行的情况下，认为直流电流 I_d 和 X_i 为常数，控制器产生的触发超前角指令不能突变，因此换相过程中交流电压幅值和熄弧角的关系可以表示为

$$\begin{aligned} \cos\gamma &= C_1 + \frac{C_2}{E_i} \\ \gamma &= \arccos\left(C_1 + \frac{C_2}{E_i}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

根据式（5），熄弧角随着交流线电压有效值的变化率为

$$\frac{d\gamma}{dE_i} = \frac{C_2}{E_i^2 \sqrt{1 - \left(C_1 + \frac{C_2}{E_i}\right)^2}} \quad (6)$$

式中， C_1 、 C_2 为常数； E_i 为交流线电压有效值，可以看出当交流电压出现跌落时，熄弧角也会相应的减小。

当仿真系统中的额定参数为： $E_i=230$ kV， $I_d=2$ kA， $X_i=12.5$ Ω 。为了解决电压波动引起熄弧角变化的灵敏度问题，假设式（1）中 $\beta=2\pi/9$ 。

不同电流工况情况下，电压波动引起的熄弧角的变化率如图3所示。

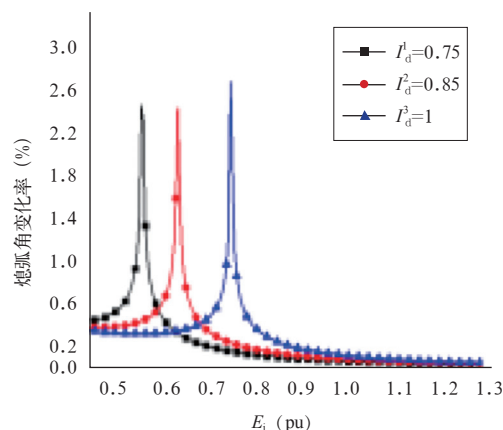


图3 逆变器熄弧角随着电压有效值的变化率

由图3可以看出，交流电压波动和熄弧角为非线性关系，电压跌落会相应地导致熄弧角的减小。标么值 I_d 为1， E_i 在0.77（pu）以下运行， γ 的灵敏度将迅速增加；标么值 I_d 为0.85， E_i 在0.66（pu）以下运行， γ 的灵敏度将迅速增加；标么值 I_d 为0.75， E_i 在0.58（pu）

以下运行, γ 的灵敏度将迅速增加。当熄弧角灵敏度比较大时, 较小的电压有效值跌落都可能导致换相失败发生。随着直流电流的下降, 熄弧角变化率曲线将整体左移。熄弧角变化灵敏点将会左移。电网电压幅值的下跌会严重影响到逆变器的换相过程。

2.3.2 电压谐波对换相失败的影响

在换相过程中, 认为 I_d 为恒定值。由图2可知, 在换相过程中, 换相过程中有以下关系^[17]。

$$2L_r I_d = \int_{t_1}^{t_2} u_v(t) dt = S \quad (7)$$

式中, S 为线电压波形和在时间 $[t_1, t_2]$ 上围成的面积。当系统的 I_d 是一定的时候, 换相过程中交流系统需要提供的电压时间面积是一定的。

如果电压波形在时间 $[t_1, t_2]$ 内的积分面积小于需要的面积 $2L_r I_d$, 换相重叠角 μ 就会变大, 从而导致关断角 γ 减小, 进而引发换相失败。因此保证换相过程正常进行的交流电压时间面积为

$$S_v = \int_{\pi-\beta}^{\pi-\gamma} u_v(\omega t) d\omega t > |S| = 2L_r |I_d| \quad (8)$$

式中, S_v 为交流系统能提供保证换相顺利进行的电压时间面积; S 为换相过程需要提供的电压时间面积。

从式(8)中可以看出, 交流电压幅值的下跌和波形畸变都可能导致换相失败发生, 幅值 E_i 对换相失败的影响如2.3.1节所述。

谐波是导致交流电压波形发生畸变的重要因素。同相位的偶次谐波或者相位差大于 180° 的奇次谐波都会导致电压时间面积减小, 电压基波和畸变波形如图4所示。

由图4可知, 部分谐波的存在会使电压波形变“窄”, 电压时间面积随之减小。因此对逆变站换相过程进行检测时, 应重点监测谐波含量。

3 换相失败实时监测

换相失败对于换流器是非常危险的, 如果发生连续的换相失败可能会导致重大电力事故^[18-20]。因此, 对于高压直流输电系统换相过程的在线监测是非常有必要的。

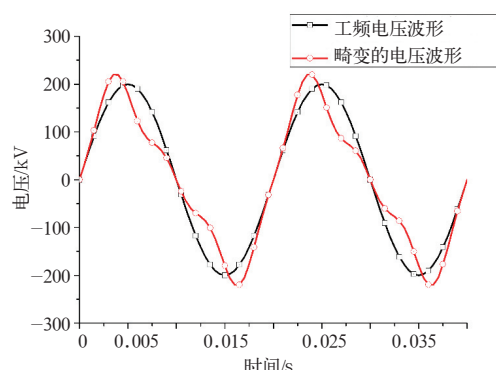


图4 谐波对交流电压时间面积的影响

3.1 基于熄弧角原理的在线监测系统

3.1.1 监测系统原理

从上述可以得知, 换相重叠角根据系统参数来决定的, 结合式(1)对熄弧角的实时监测原理如图5所示。

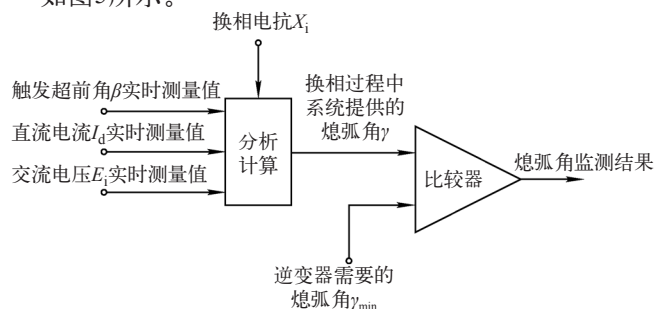


图5 熄弧角实时监测系统

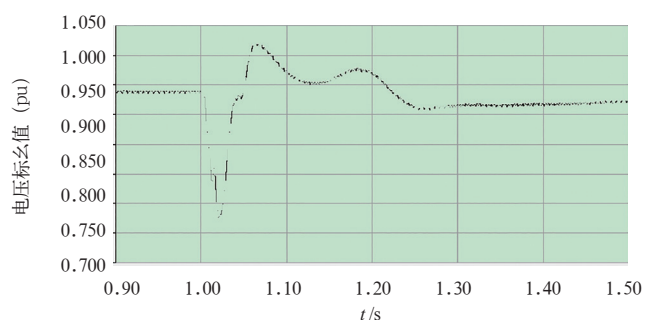
实时根据触发超前角、直流电流和交流电压计算得到每一个周期内系统提供的熄弧角 γ , 通过和逆变器需要的最小熄弧角 $\gamma_{\min}$ 进行比较判断换相是否顺利进行。换相成功结果输出“1”, 换相失败结果输出“0”, 输出结果用于换相失败监测。

3.1.2 熄弧角实时监测系统仿真验证

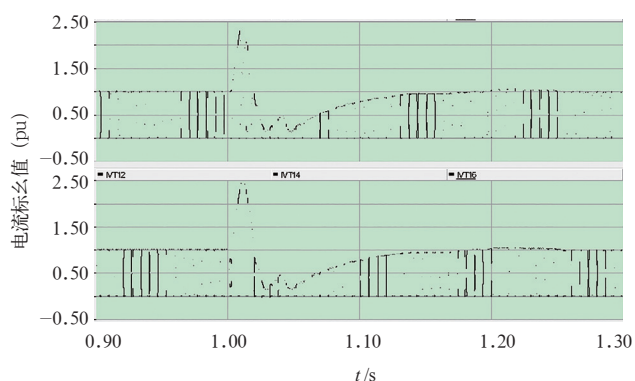
当由于故障原因, 导致交流电压出现跌落时, 交流电压有效值如图6所示。

图6a中, 在1 s时刻, 交流电压出现跌落, 有效值跌落为原来的67%; 根据式(1)可知熄弧角将下降。由图6b可知, 换相过程无法顺利进行, 发生一次换相失败。由图6c可知, 换相失败监测系统在1 s时刻输出结果为“0”, 而且只出现了一次“0”输出结果。

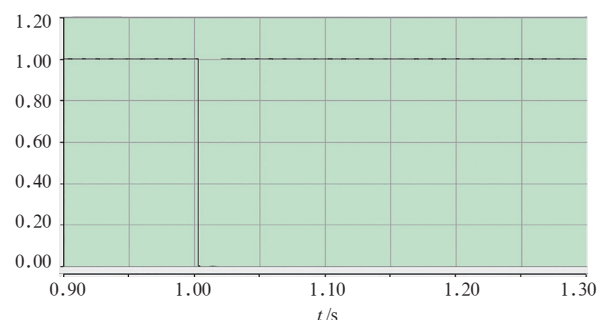
通过熄弧角的监测可以直观地判断换相过程的进行以及发生换相失败的类型(一次、多次和连续多次)等, 为换流器的控制保护策略提供依据。



(a) 交流电压有效值变化波形



(b) 换流器中桥臂电流波形



(c) 熄弧角实时监测输出结果

图6 熄弧角实时监测系统仿真结果

3.2 基于电压时间面积方法的监测系统

3.2.1 监测系统原理

交流电压出现谐波时,会导致电压时间面积减小,进而导致换相失败的发生。基于电压时间面积方法的监测系统如图7所示。

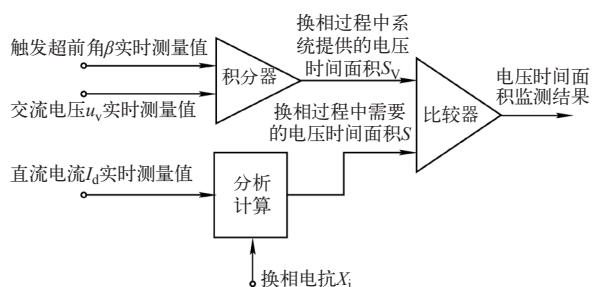
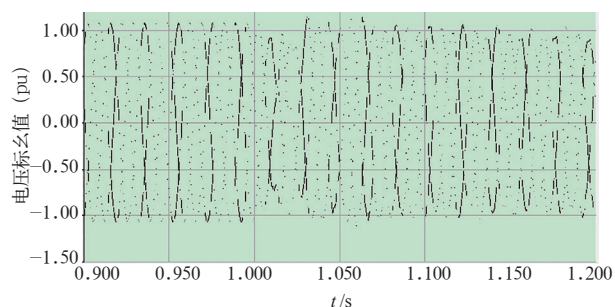


图7 电压时间面积实时监测系统

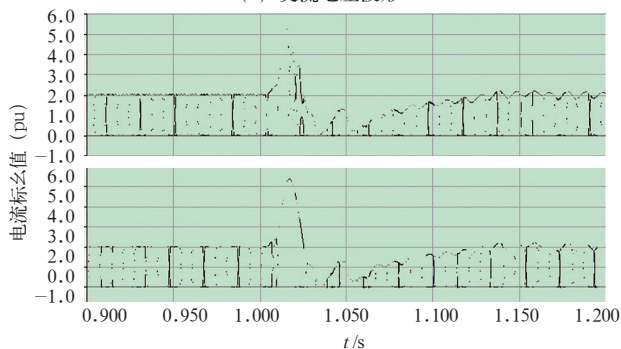
根据实时测量交流电压,可以计算出周期内提供的电压时间面积 S_v ,然后和系统需要的换相电压时间面积 S 值实时比较输出,用于观察是否由于谐波因素导致换相失败发生。

3.1.2 电压时间面积监测系统仿真验证

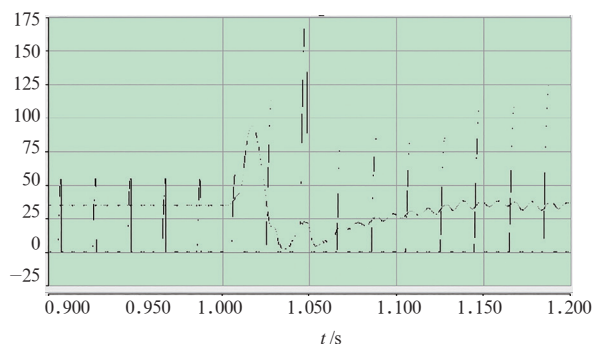
当由于谐波原因导致交流电压发生严重畸变时,交流电压波形图8所示。



(a) 交流电压波形



(b) 桥臂电流波形



(c) 电压时间面积监测结果

图8 电压时间面积实时监测系统仿真结果

在图8中,从1 s时刻到1.02 s时刻,交流电压中由于谐波的作用出现严重的波形畸变,导致换相过程无法进行,出现一次换相失败。根据式(8)可知,换相过程无法顺利进行,发生一次换相失败。实时监测系统显示在1 s时刻交流电压时间面积 S_v 小于换相过程需要的电压时间面积 S 。

通过电压时间面积的实时监测系统可以直观

地分析换相过程是否顺利进行,同时可以清楚地反映 S_v 和 S 实时的变化情况,并根据电压时间面积的变化为谐波抑制、无功补偿等用于换相失败预防的设备提供控制依据。

4 结束语

根据本文的分析,可以得出如下结论。

1) 高压直流输电系统换相失败的本质原因是系统提供的熄弧角小于换流器自身关断需要的最小熄弧角。导致换相失败的因素的作用机理都是减小了系统提供的熄弧角。

2) 交流电压对于换流器来说具有不可控和随系统运行状态不同而不断变化的特性,交流电压幅值跌落和波形畸变都容易引发换相失败。

3) 通过换相失败监测系统的观测,可以实时判断每个周期内换相过程是否顺利进行,而且通过所提出的两个监测系统可以清楚地定位换相失败发生位置。通过电压时间面积的监测,可以为后续换相失败的预防和换流器控制保护动作提供依据。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [2] 王兆安. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] 王学之, 周全, 国建宝, 等. 南方电网直流换相失败机理及判别方法[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 44-47.
- [4] 索明贵. 多直流落点系统中高压直流换相失败问题的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [5] 刘俊磊, 王钢, 李海峰, 等. HVDC 系统换相失败对交流电网继电保护影响的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 111-118.
- [6] Bauman J, Kazerani M. Commutation failure reduction in HVDC systems using adaptive fuzzy logic controller [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1995-2002.
- [7] 许韦华, 陈争光, 汤广福, 等. 换流阀设备换相失败故障的暂态分析[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1759-1763.
- [8] 陈建斌, 周保荣, 熊卿, 等. 溪洛渡直流工程换相失败特性及相关因素分析[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 48-52.
- [9] 康青. 动态无功补偿设备在高压直流输电换相失败中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [10] 余瑜, 刘开培, 陈俊, 等. 基于调制理论的高压直流输电系统混合谐振型谐波不稳定判据[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1582-1589.
- [11] 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.
- [12] 吴萍, 林伟芳, 孙华东, 等. 多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 269-274.
- [13] 程道卫, 刘天琪, 张金, 等. 多落点直流输电系统换相失败影响因素的仿真分析[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 59-64.
- [14] 邵瑶, 汤涌. 采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 108-114.
- [15] 刘济豪, 郭春义, 刘文静, 等. 基于改进换相面积的直流输电换相失败判别方法[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(1): 108-114.
- [16] 韩民晓. 高电压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [17] 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, 2013, 25(2): 98-102.
- [18] Hansen A, Havemann H. Decreasing the commutation failure frequency in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 1022-1026.
- [19] 洪潮. 直流输电系统换相失败和功率恢复特性的工程实例仿真分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1): 1-7.
- [20] 巢睿祺, 叶义新, 王杰. 多馈入直流输电系统换相失败影响因素的分析与仿真[J]. 电力科学与工程, 2013, 29(11): 11-16.

(收稿日期: 2017-04-22) **EA**