

HCM3000 中预测性熄弧角控制算法的实现

李楠¹, 张亚琼², 郭虎锋¹, 陈香香¹, 吴彦维¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 河南省轻工业学校, 河南 郑州 450000)

摘要: HCM3000 是特高压直流输电控制保护平台。平台采用实测性熄弧角策略来防止换向失败, 该策略原理是检测到换相失败后增大点火角防止后续换向失败, 因此它只能避免连续换向失败, 但不能减少换向失败, 所以在 HCM3000 中需引入预测型熄弧角控制算法。该算法通过实时采样计算来预测换向失败, 在失败之前提前触发点火角避免换向失败。HCM3000 中实现该算法主要有两个制约因素, 一是采样及计算的快速性和实时性, 二是预测型算法和 HCM3000 点火系统的适配。为了满足实时性和快速性, 整个算法在 FPGA 内实现, 为了适配 HCM3000 的点火系统, 将点火时间转化为点火角度。HCM3000 引入该算法后, 通过 RTDS 仿真平台, 模拟了单相及三相交流故障、丢脉冲等典型的会产生换相失败的故障。试验表明引入该算法后, HCM3000 显著地降低了换向失败的概率。

关键词: 换向失败; 预测型熄弧角; FPGA; HCM3000; 点火脉冲

Design of predictive extinction angle control algorithm used in HCM3000

LI Nan¹, ZHANG Yaqiong², GUO Hufeng¹, CHEN Xiangxiang¹, WU Yanwei¹

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. Zhengzhou Light Industry School, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: HCM3000 is a control protection platform for UHVDC transmission. It uses a measured extinction angle algorithm for avoiding commutation failure. The theory is that adding ignition angle when detects the commutation failure for avoiding the following commutation failure, so it just can avoid continuous commutation failure, but cannot decrease the probability of commutation failure. Therefore, the HCM3000 adopts the predictive extinction angle control algorithm which can trigger ignition angle before commutation failure for avoiding commutation failure. In the HCM3000, there are two main constraints during the implementation, one is the rapidity and real-time performance of sampling and the computation, the other is the adaptation between predictive algorithm and HCM3000 ignition system. To meet the above two constraints, the whole algorithm is realized in FPGA and the ignition time is converted to ignition angle, respectively. After introducing the algorithm into HCM3000, this paper simulates typical faults which can lead to commutation failure, such as single-phase and three-phase AC fault, pulse loss through RTDS simulation platform. Test results show that HCM3000 significantly reduce the probability of commutation failure after adopting the algorithm.

Key words: commutation failure; predictive extinction angle; FPGA; HCM3000; firing pulse

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0119-06

0 引言

高压直流输电系统逆变侧换向失败会导致直流电流增大, 功率减少, 交流系统电压不稳定, 如果导致连续换向失败^[1], 还会系统闭锁, 造成较严重的系统故障^[2]。所以研究预防换向失败就变得十分重要^[3]。

HCM3000 是许继集团自主研发的特高压直流控制保护系统。在 HCM3000 控制保护平台中, 防止换向失败采用的是实测型熄弧角策略。实测型熄

弧角策略是在检测到换向失败后增大点火角来避免后续连续换向失败。

实测型熄弧角可以防止连续换向失败, 但是只能在换向失败后起作用, 对首次换向失败无效, 所以在实际工程中, 熄弧角设置较大^[4], 该置可以减少换向失败的几率^[5], 但是经济性不好。

1 预测型熄弧角控制算法简介

预测性熄弧角控制算法工作原理框图如图 1 所示。预测型熄弧角控制算法在下文中以预测型算法

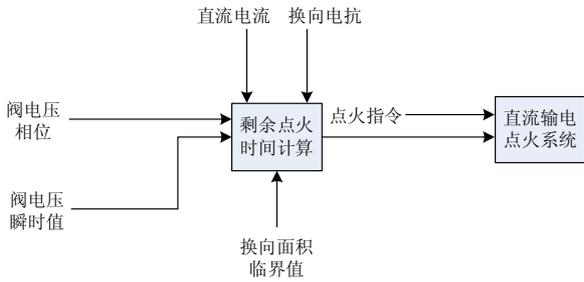


图 1 预测性熄弧角控制算法原理框图

Fig. 1 Diagram of predictive extinction angle control algorithm

简称代替。

预测型算法基本原理是，是否发生换向失败和阀的换向区域面积有直接的关系^[6]，如果阀点火时换向区域面积小于换向区域面积临界值，会发生换向失败，反之，不会换向失败。

换向区域面积指的是直流电流从一个换向阀到另一个阀的过程发生时，在同一换向群的三个阀中的两个阀会同时导通较短的时间。这段时间是叠弧时间，换向区域定义为从叠弧结束到换向电压过零点的剩余的电压-时间区域^[7]。换向区域面积如图 2 所示。计算换向区域面积的公式为

$$cma(\alpha) = \frac{u_{pk}(\alpha)}{\sin(\alpha)} (1 + \cos(\alpha)) - 2I_{idnc} dxn$$

从公式可以得到，计算换向区域面积需要阀电压瞬时值和阀电压相位，直流电流和换向电抗四个变量。直流电流通过模拟量采集获得，换向电抗为系统参数。通过转换算法^[8]，同步电压和锁相环相位可以计算出 12 个阀的电压瞬时值和相位。

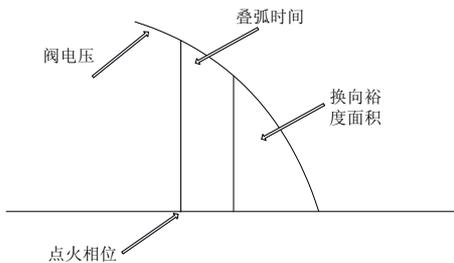


图 2 换向区域面积示意图

Fig. 2 Diagram of commutation area

预测型算法是根据计算换向区域所需变量和换向面积临界值来计算出剩余点火时间，该时间送到阀点火系统，阀点火系统比较剩余点火时间和点火时间指令，来判断是否需要提前点火来防止换向失败。

2 预测型算法在 HCM3000 中实现

预测型算法移植到 HCM3000 平台，需要进行

适配来适应硬件平台特性。适配主要是两方面问题，一是预测型算法和 HCM3000 阀点火系统的适配，二是在 HCM3000 中高速实现预测型算法。

2.1 预测型算法与 HCM3000 阀点火系统的适配

预测型算法是通过控制点火时间来防止换向失败的。但是 HCM3000 系统的点火系统只能通过控制点火角度来防止换向失败^[9]。所以预测型算法需要转换形式来适配 HCM3000 的点火系统。适配算法的工作原理如框图 3 所示。

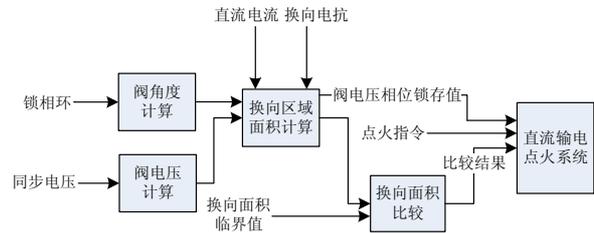


图 3 适配 HCM3000 的预测性算法工作原理框图

Fig. 3 Diagram of predictive extinction angle control algorithm adaptive to HCM3000

预测型熄弧角计算下一时刻换向面积并比较换向面积临界值，当换向面积小于换向面积临界值时，把比较结果及锁存的阀电压相位发送给阀点火系统^[10]。阀点火系统结合点火指令和比较结果决定是否增大点火角防止换向失败。

2.2 高速实现预测型算法

预测型算法防止换相失败效果很大程度上依赖预测型算法的运算周期。如果两次运算间隔时间过长会出现这次计算换向区域面积还有较大余量，但是还没有到下次计算已经换向失败了。

向 HCM3000 中移植预测型算法^[11]，能否实现高速运算主要是三个因素，一个是模拟量的采样率，另一个是阀点火系统的点火指令闭合控制周期，最后一个是点火系统的脉冲产生，脉冲产生部分是在 FPGA 完成的，它的处理精度是纳秒级的，另外两个是在处理器内完成的，运算周期都是 600 μs，对频率为 50 Hz 的阀电压而言，600 μs 约等于 11°，逆变侧稳态点火角在 140° 到 140.5° 之间变化。在特高压直流工程典型工况下^[12]，点火角和熄弧角的对应关系如表 1 所示，当点火角增加 3.5°，熄弧角减少了，所以 600 μs 运行周期无法满足预测型算法的要求。

结合表 1 和算法在 PSCAD 的仿真结果^[13]，该算法的运算周期在 20 μs 可以取得较好的控制效果，如果把处理器的计算周期提高到 20 μs，处理器会出现严重的任务超时，过大修改在工程中经过

表 1 特高压典型工况点火角和熄弧角对应表

Table 1 HVDC typical condition of firing angle and extinction angle

	140°	140.5°	141°	141.5°	142°	142.5°	143°	8°
ALF								
GMA	18.1°	17.1°	16.1°	14.85°	13.85°	12.22°	10.69°	

验证的控制算法是不可行的, 所以把预测型算法的采样和计算独立出处理器, 在 FPGA 内实现(FPGA 可以并行计算, 可以完成 20 μ s 的计算周期), 能够较好地解决这个问题, 采样使用专用 FPGA 板卡, 预处理算法逻辑也在 FPGA 实现, 该计算独立于点火指令的闭环控制算法, 当计算出可能产生换向失败, 直接通知脉冲产生逻辑, 提前脉冲以增大换向面积, 避免换向失败。

2.3 预测型算法实现方案

结合以上分析, 为了满足以上两个需求, HCM3000 平台中实现预测型算法的硬件体系结构如图 4 所示。

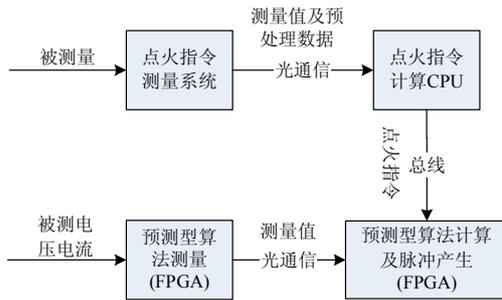


图 4 预测型算法硬件体系框图

Fig. 4 Hardware architecture of predictive extinction angle control algorithm

从图 4 可以看出预测型算法所需模拟量由专用板卡采集后预处理, 通过光通信送出, 预测型算法与脉冲产生逻辑在一片 FPGA 内实现。预测型算法通过光通信接收后计算并把结果送给脉冲产生逻辑, 而点火指令闭环控制算法及其采样是独立于预测型算法的数据通道的。

预测型算法的核心计算在 FPGA 内实现完成, FPGA 的实现原理如图 5 所示。

从 FPGA 内部逻辑图看出, FPGA 主要完成的逻辑包含模拟量采样、数据处理、换向电压计算、光通信收发、预处理计算、换向相位计算、预处理角度管理及脉冲发送。CPU 主要负责设置参数。

3 RTDS 实验仿真

为了验证预测型算法加入 HCM3000 系统对换向失败是否有改进, 把预测型算法相应的软硬件加入到溪洛渡到浙西特高压实验仿真平台, 利用 RTDS 仿真验证效果。

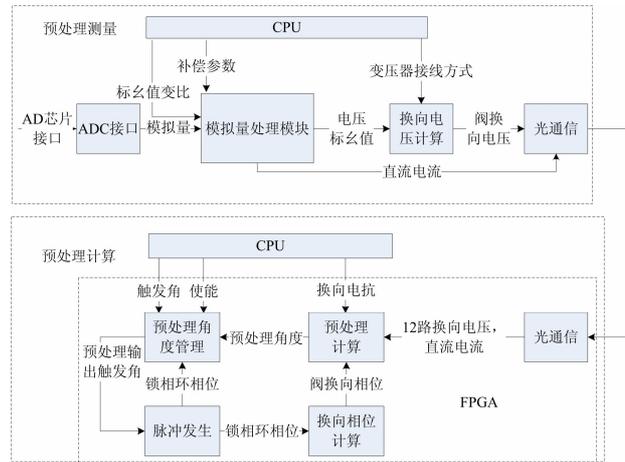


图 5 预测型算法 FPGA 逻辑框图

Fig. 5 FPGA logic of predictive extinction angle control algorithm

RTDS 实验选取的是容易导致换向失败的故障实验。以下实验预测型算法均加在极 1 低端逆变侧。

3.1 实验 1

实验 1 是极 1 高端丢脉冲, 会造成极 1 高端直流电流上升, 换向面积减少, 如果不增大熄弧角, 会导致换相失败, 极 1 低端加入预测型算法和不加入预测型算法分别做实验对比, 观察加入预测型算法是否能降低换向失败概率^[14]。

如图 6, 当高端丢脉冲后, 直流电流上升, 低端熄弧角减少, 直到 0, 换向失败。由于换向失败, 能明显看到 Y 侧和 D 侧电流缺相。图 7 为增加预测型算法后实验波形, 在丢脉冲后, 熄弧角小幅下降后开始上升, 最终没有换向失败, Y 侧和 D 侧电流没有缺相。从实验 1 可以看出, 预测型算法对高端丢脉冲故障有较好的防止换向失败的效果^[15]。

3.2 实验 2

实验 2 是极 1 低端单相高阻接地, 会造成极 1 低端单相电压畸变, 换向面积减少, 如果不增大熄弧角, 会导致换相失败。极 1 低端加入预测型算法和不加入预测型算法做实验对比, 观察加入预测型算法是否能降低换向失败概率^[16]。

如图 8, 当低端单相高阻接地后, 单相电压畸变, 低端熄弧角较少, 直到 0, 换向失败。由于换向失败, 能明显看到 Y 侧和 D 侧电流缺相。图 9 为增加预测型算法后实验波形, 低端单相高阻接地后, 熄弧角降到 10°后开始上升, 最终没有换向失败,

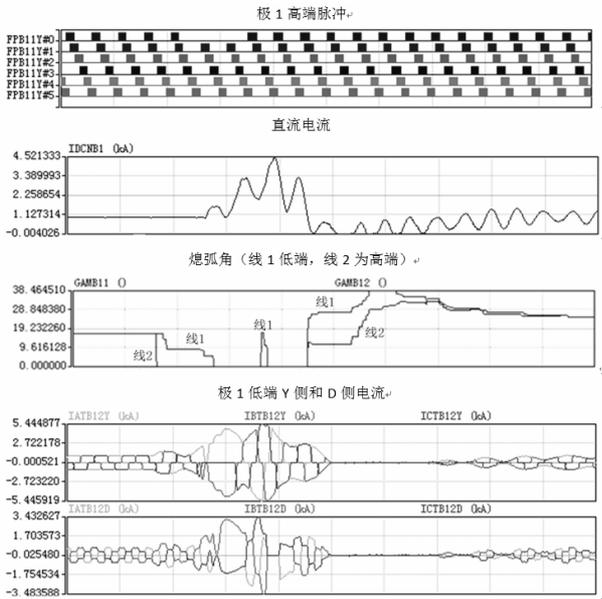


图 6 高端丢脉冲无预测型算法实验波形图

Fig. 6 Experimental waveform of high side loss pulse without predictive extinction angle control algorithm

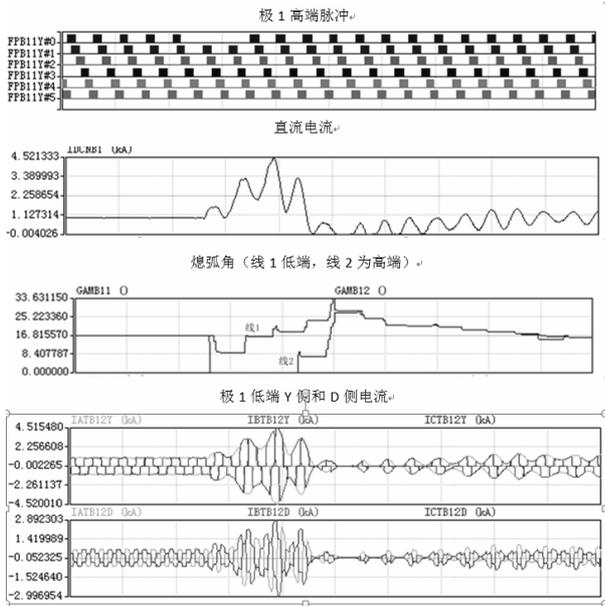


图 7 高端丢脉冲有预测型算法实验波形图

Fig. 7 Experimental waveform of high side loss pulse with predictive extinction angle control algorithm

Y 侧和 D 侧电流没有缺相。从实验 2 可以看出, 预测型算法对低端单相高阻接地故障有较好的防止换向失败的效果^[17]。

3.3 实验 3

实验 3 是极 1 高端单相接地, 会造成极 1 高低端直流电流上升, 换向面积减少, 如果不增大熄弧角, 会导致换相失败。极 1 低端加入预测型算法和

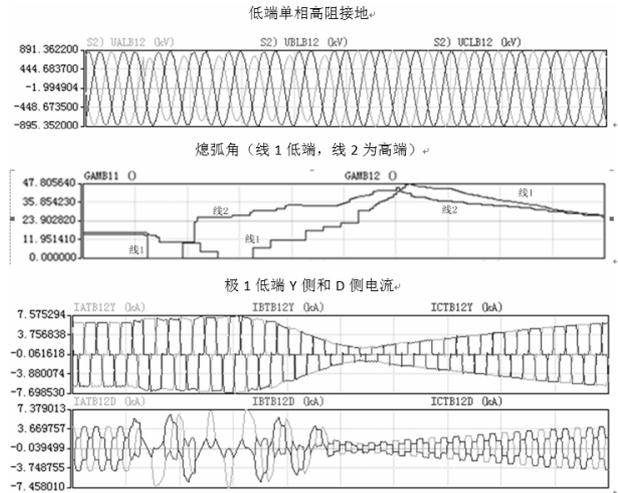


图 8 低端单相高阻接地无预测型算法实验波形图

Fig. 8 Experimental waveform of low side single phase high resistance ground without predictive extinction angle control algorithm

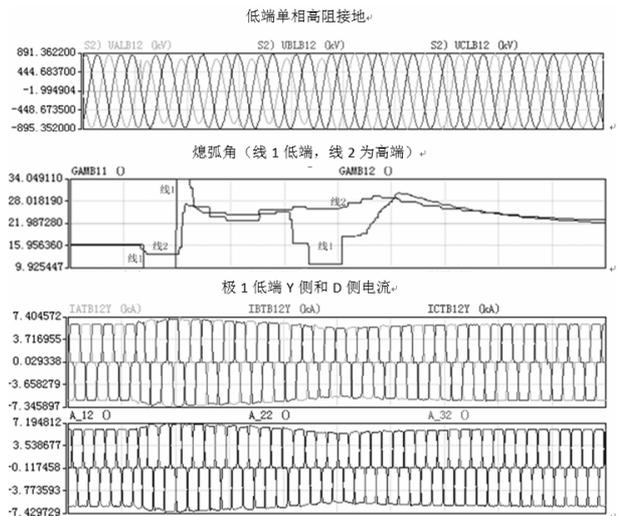


图 9 低端单相高阻接地有预测型算法实验波形图

Fig. 9 Experimental waveform of low side single phase high resistance ground with predictive extinction angle control algorithm

不加入预测型算法分别做实验对比, 观察加入预测型算法是否能降低换向失败概率。

如图 10, 当高端单相接地后, 直流电流上升, 低端熄弧角较少, 直到 0, 换向失败。由于换向失败, 能明显看到 Y 侧和 D 侧电流缺相。图 11 为增加预测型算法后波形, 可以看到, 高端单相接地后, 熄弧角小幅下降后开始上升, 最终没有换向失败, Y 侧和 D 侧电流没有缺相。从实验 3 可以看出, 预测型算法对高端单相接地故障有较好的防止换向失败的效果。

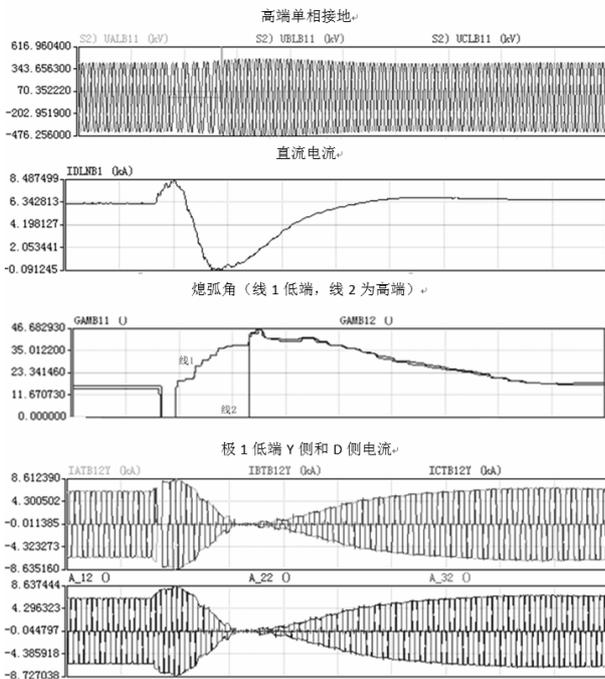


图 10 高端单相接地无预测型算法实验波形图

Fig. 10 Experimental waveform of high side single phase ground without predictive extinction angle control algorithm

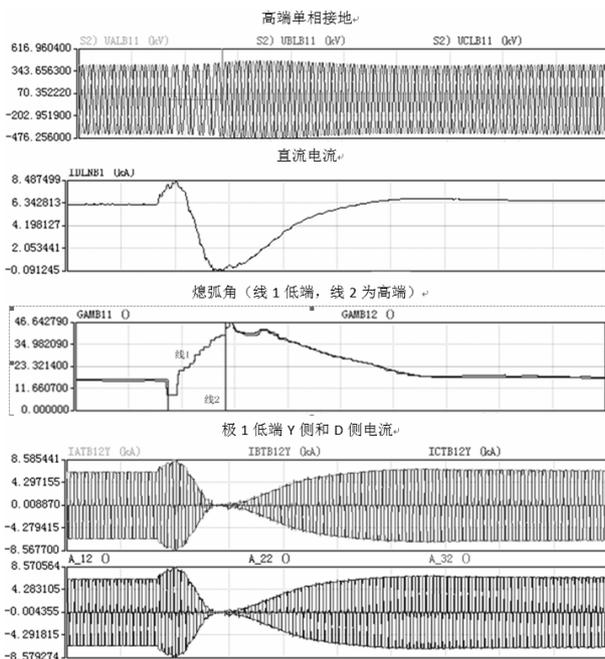


图 11 高端单相接地有预测型算法实验波形图

Fig. 11 Experimental waveform of high side single phase ground with predictive extinction angle control algorithm

4 结论

基于 HCM3000 平台实测型熄弧角控制算法的

不足, 为了更好地应对换向失败, 本文设计了预测型熄弧角控制算法在 HCM3000 系统中的实现。该算法根据预测型算法的特点和需求, 并结合 HCM3000 系统的特性, 提出了一种可行的方法, 在基本不影响 HCM3000 系统原控制算法的前提下, 无缝地加入了预测型算法, 不仅完成了适配, 并且使预测型算法实现了高速运算。通过 RTDS 实验可以看出, 在特高压直流工程容易造成换向失败的主要故障中, 加入预测型算法后, 换向失败故障明显改善, 实现了该算法移植的目标。

参考文献

- [1] 郝跃东, 倪汝冰. HVDC 换相失败影响因素分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 38-41.
HAO Yuedong, NI Rubing. Analysis on influence factors of commutation failure in HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 38-41.
- [2] 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.
- [3] 何雪峰, 高鹏, 朱文娟, 等. 关于 RTDS 直流换流器熄弧角计算方法的商榷[J]. 江苏机电工程, 2008, 27(4): 28-31.
HE Xuefeng, GAO Peng, ZHU Wenjuan, et al. Discussion on computation method of the extinction angle of the DC converter in RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2008, 27(4): 28-31.
- [4] 王海军, 黄义隆, 周全. 高压直流输电换相失败相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): 124-131.
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): 124-131.
- [5] 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-EPSCA, 2013, 25(2): 98-102.
- [6] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-131.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected of inverter based on quasi synchronous

- principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-131.
- [7] 杨敏, 孙志军, 李楠, 等. 直流输电换流阀点火脉冲的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 126-129.
YANG Min, SUN Zhijun, LI Nan, et al. Design of firing pulse used for valves control in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 126-129.
- [8] 吴晔, 殷威扬. 逆变侧熄弧角 GAMMA-KICK 控制仿真计算[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 31-32.
WU Ye, YIN Weiyang. Simulation of Gamma-Kick control for inverter extinguish angle[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 31-32.
- [9] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [10] 马俊民, 黄永瑞, 何清连. ± 800 kV 特高压直流输电系统谐波研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 33-37.
MA Junmin, HUANG Yongrui, HE Qinglian. Research on harmonics of ± 800 kV ultra high voltage direct current transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 33-37.
- [11] 陆亚萍. 特高压直流输电换相失败分析与仿真[J]. 企业科技与发展, 2010(10): 80-84.
LU Yaping. The analysis and simulation of commutation failure of UHVDC transmission[J]. Enterprise Science and Tehcnology and Development, 2010(10): 80-84.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 周纪彬, 王维庆, 袁莉. 直流输电系统在交流故障时的换相失败分析[J]. 华东电力, 2010, 38(12): 1847-1849.
ZHOU Jibin, WANG Weiqing, YUAN Li. Analysis on commutation failure of AC fault on HVDC system[J]. East China Electric Power, 2010, 38(12): 1847-1849.
- [15] 邹亮, 刘涛, 赵彤, 等. 基于阀电压或阀电流的 HVDC 换相失败故障诊断[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3453-3458.
ZOU Liang, LIU Tao, ZHAO Tong, et al. Diagnosis of commutation failure in HVDC transmission systems based on voltage or current of converter valve[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3453-3458.
- [16] 邹亮, 刘涛, 赵彤, 等. 基于阀电压或阀电流的 HVDC 换相失败故障诊断[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3453-3458.
ZOU Liang, LIU Tao, ZHAO Tong, et al. Diagnosis of commutation failure in HVDC transmission systems based on voltage or current of converter valve[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3453-3458.
- [17] 吴晔, 殷威扬. 逆变侧熄弧角 GAMMA-KICK 控制仿真计算[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 31-32.
WU Ye, YIN Weiyang. Simulation of Gamma-Kick control for inverter extinguish angle[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 31-32.

收稿日期: 2015-01-24; 修回日期: 2015-06-10

作者简介:

李楠(1979-), 男, 硕士, 工程师, 从事高压直流输电控制保护系统研发。E-mail:165601905@qq.com

(编辑 葛艳娜)