高压直流工程熄弧角测量异常引发换相失败故障的分析与处理

李 欢,赵晓斌,杨 煜
(南方电网科学研究院 直流输电技术国家重点实验室,广东 广州 510663)

摘要:南方电网某直流工程在调试期间发生了数次换相失败故障,对交直流都产生了较大的影响。对换相失败时的故障录波数据进行分析,推断换相失败原因为熄弧角测量系统偶发故障而引起直流控制系统误动,基于此推断在该直流工程的详细PSCAD模型中进行了模拟,对该故障进行了仿真复现,验证了故障原因分析的正确性。为解决熄弧角测量装置偶发异常的问题,提出在直流控制系统内增加防误逻辑环节屏蔽熄弧角测量异常的影响,并用PSCAD/EMTDC仿真验证了该处理方案的效果,仿真结果和实际运行表明所提解决方案对熄弧角测量异常问题是有效的,确保了高压直流系统的正常稳定运行。

关键词:高压直流输电;熄弧角测量异常;换相失败;仿真
中图分类号:TM 721.1 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.034

0 引言

高压直流输电技术因具有远距离大容量输电的能力逐渐被广泛地应用到电网中,对我国西部清洁能源的外送起到了重要作用。目前实际高压直流输电工程最常见且影响最大的故障为逆变侧的换相失败故障。我国直流输电工程的数量多、容量大且直流落点密集,强直弱交的网架下单回直流换相失败故障引起的交流扰动也会影响到其他直流的正常运行,所以对引起换相失败故障的隐患故障需要采取有效的预防措施,对此国内学者已开展了较多研究[1-5]。引起换相失败故障的原因主要是换流阀内部故障和换流阀外部故障,换流阀内部故障包括触发脉冲丢失和换流阀桥臂故障短路等,换流阀外部故障主要为交流系统电压畸变波动等,这2类故障都会对直流设备和电网造成一定的冲击。为应对换相失败故障,国内直流输电工程主要采用SIEMENS和ABB的技术路线,SIEMENS的技术路线为实测型熄弧角控制路线,ABB的技术路线为预测型熄弧角控制路线,2种路线各有优劣[5-9]。实测型熄弧角控制路线在南方电网应用较多,本文分析的换相失败故障所在的工程即采用该路线。实测型熄弧角控制路线因需要对熄弧角进行实际精确测量,所以比预测型熄弧角控制路线多1套熄弧角测量系统,则熄弧角测量环节的扰动或故障也会对直流输电工程的稳定运行产生影响。本文选取1个典型的由熄弧角实际测量系统故障引发的换相失败故障进行研究,该直流输电工程在调试期间多次出现“熄弧角为0°”故障,并引发直流功率扰动,扰动较大时甚至引发换相失败故障。本文首先详细介绍了本次故障产生的原理,然后采用精确仿真模型进行了故障复现,针对该故障提出了针对性的配套解决方案,并在仿真和实际工程中验证了解决方案的效果。本文对该故障的详细分析有利于采用SIEMENS技术路线的换流站对类似故障进行及时有效的处理,从而提升直流输电工程的安全稳定运行水平。

收稿日期:2018-02-12;**修回日期**:2018-12-13
基金项目:南方电网公司科技项目(ZBKJXM20180104)
Project supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid(ZBKJXM20180104)

1 逆变站换相失败原因分析

1.1 逆变站概况

本文所述直流输电工程逆变站的额定直流电压为±500 kV,额定直流输送容量为3 000 MW,极1和极2均由1套12脉动晶闸管整流桥实现交直流转换,直流控制系统采用实测型熄弧角控制来应对换相失败。

1.2 换相失败情况及分析

附录中的图A1、图A2分别为发生换相失败故障时换流站极2、极1的故障录波。由图可见,换相失败故障发生前,换流站两极直流电压稳定在491 kV左右,双极功率稳定在1 430 MW,直流电流稳定在1 456 A左右,且直流电压、直流电流、熄弧角、交流电压等在换相失败故障发生前均没有发生波动。

由图A1可见,换相失败故障发生前,极2实测熄弧角从20.5°突降至0°,持续约13 ms后立刻跃升至20.5°左右,经过约30 ms后再次突变为0°,控制系统由“逆变侧电压控制器有效”模式进入“熄弧角控制器有效”模式,触发角实际值迅速跌落,从约150°的初始值跌落至约131°,极2的无功消耗随之增大,交流母线电压降低。

受交流电压跌落影响,极1随之发生换相失败故障,故障录波如附录中图A2所示。故障发生约

100 ms 后,极 2 的实测熄弧角跳跃恢复至约 25°,然后控制系统逐渐切换回“逆变侧电压控制器有效”模式,直流电压、直流电流和功率都逐渐恢复至换相失败故障发生前的正常水平。由此可判断实测熄弧角突变为 0°为直流功率波动的直接原因。

1.3　熄弧角突变原因分析

1.2 节经分析得出了熄弧角突变为换相失败的直接原因,本节对熄弧角突变的原因进行进一步分析。

首先介绍直流输电工程中熄弧角的测量原理。实际工程中,熄弧角的值为 12 个桥臂实测熄弧角的最小值,根据阀的电流过零信号和电压过零信号的时间间隔 t_0 测量并计算得到每个阀的熄弧角,t_0 对应的电角度 γ 即为熄弧角,二者关系如式(1)所示。

$$\gamma = 360 t_0 f \tag{1}$$

其中,f 为交流电网电压频率。

电流过零信号可根据晶闸管关断后其两端的负电压产生,图 1 为逆变站换流阀某桥臂两端的电压波形。图中,时刻①的阀端电压开始小于 0,即时刻①为电流过零信号时刻;时刻②的阀端电压由负变正,即时刻②为电压过零信号时刻;时刻①、②之间的时间间隔即为熄弧角对应时间。

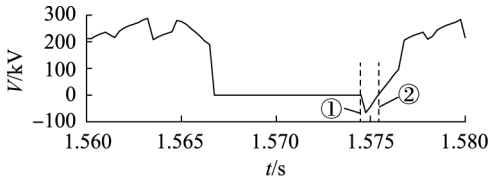

图 1　逆变站换流阀某桥臂典型电压波形

Fig.1　Typical voltage curve of some bridge arm of inverter valve

实际中负电压和正电压的建立均有一定的电压门槛值,如 −200 V 和 150 V 等。

下面根据上述测量原理,对发生换相失败故障时的相关故障录波数据进行分析计算,并推断熄弧角的实际变化情况。

附录中图 A3 为换相失败故障发生前极 2 系统 YY 换流变压器阀侧电压、电流和触发脉冲波形,由图可见故障发生前极 2 的各参数稳定,而阀臂电压由直流电压和阀侧交流电压决定,所以阀臂电压在故障发生前应该无明显波动,由阀臂电压测得的熄弧角也应该无明显变化。以极 2 系统 YY 六脉动整流器的 1、3、5 桥臂熄弧角为例进行说明。1、3、5 桥臂电压可近似看作是图 A3 中极 2 换流变压器阀侧 Y 绕组电压波形,图中蓝色、黄色和紫色粗虚线间的时间间隔分别为 1、3、5 桥臂熄弧角所对应的时间间隔,可见时间间隔没有发生变化,即桥臂熄弧角没发生明显变化[10-11]。但直流控制系统得到的实测熄弧角突然从 20.5°下降到 0°,由此可判断熄弧角测量系统出现了故障,导致其测量异常而给出错误的熄弧角,直流控制系统接收到错误的熄弧角后误认为实际熄弧角过小而瞬间拉大熄弧角,逆变侧电压随之跌落,而整流侧电压仍然暂时保持在故障发生前的 500 kV,所以直流电流将快速增大,交流电压也产生了一定的跌落。当熄弧角测量故障消失时,熄弧角瞬间从异常失真的 0°恢复到正确的实际熄弧角 25°,直流控制系统开始恢复正常。

1.4　换相失败故障的仿真复现

为了验证本文对换相失败故障原因的分析,根据上述故障发生逻辑,利用 PSCAD/EMTDC 进行故障仿真来对实际故障进行仿真复现对比,仿真结果如图 2 所示。由图 2 可见,换相失败故障发生后直流电压从 500 kV 跌落至约 200 kV,直流电流从 1.5 kA 升高至 3.5 kA 左右。由于换相失败故障发生时交流系统的实际情况与仿真模型并不完全一致,且仿真模型未考虑分布参数等因素的影响,所以仿真结果和实际数据有一定差异,但仿真得到的故障发生后直流电压、直流电流等参数变化的整体趋势与图 A1 中一致,通过仿真结果可验证换相失败故障原因为熄弧角测量系统发生异常。

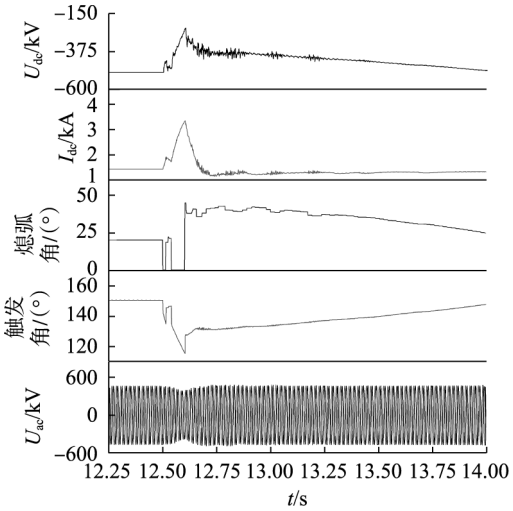

图 2　熄弧角测量异常的 PSCAD 仿真波形

Fig.2　Results of PSCAD simulation under abnormal extinction angle measurement

2　逆变站熄弧角测量异常的解决方案

2.1　熄弧角测量异常的影响分析及应对方法

为避免直流输电工程逆变站熄弧角实测装置偶发的测量异常对直流系统产生扰动,可考虑在控制系统中引入实测熄弧角防误逻辑,其主要思路如下。

晶闸管由于其自身特性,在电流过零后需要一定的时间才能恢复正向电压阻断能力,该恢复时间对应的电角度即为晶闸管保证正常换相所需要的最小熄弧角值,一般为 8°~10°[12-13]。当实际测得的熄弧角小于晶闸管的最小熄弧角如 8°时,表明晶闸管已经发生了换相失败故障。若直流系统确实发生了换相失败故障,则相关保护会立即启动以应对换相

失败故障,即实测熄弧角小于8°时熄弧角已经失去了实际物理意义,可以认为其是一个无效量。

当直流系统正常运行时,若熄弧角测量装置偶发异常,实测熄弧角将突然发生异常而跌落至8°以下(如0°),则直流控制系统会误判为熄弧角过小而进行熄弧角拉升,导致本来正常运行的直流系统发生扰动甚至换相失败故障。为避免这种异常扰动,当实测熄弧角小于8°时可以在熄弧角的输出端口增加一个防误逻辑,以屏蔽异常熄弧角输入直流控制系统中;同时为使熄弧角输出保持连续稳定,当熄弧角发生异常而小于8°后,防误逻辑将控制熄弧角保持在异常发生前的正常值。另外,当直流系统因各种原因而确实发生换相失败时,真实熄弧角会小于8°,此时为了使直流控制系统获得真实的熄弧角以进行正确响应,防误逻辑需要退出运行,实现方法为采用换相失败信号(CFP)控制防误逻辑环节的投退,当换相失败信号产生时,将熄弧角直接输出到直流控制系统中进行反馈调节。换相失败信号由保护系统给出,其产生的判据如下:

$$\begin{cases}\max(I_{dH},I_{dN})-I_{acY}>\Delta \text{ 且 } k\times\max(I_{dH},I_{dN})>I_{acY}\\ \max(I_{dH},I_{dN})-I_{acD}>\Delta \text{ 且 } k\times\max(I_{dH},I_{dN})>I_{acD}\end{cases}$$

其中,I_{dH}和I_{dN}分别为换流阀高压侧和中性线侧电流;I_{acY}和I_{acD}分别为YY换流变压器和Y△换流变压器阀侧电流;Δ和k分别为动作定值和系数。

2.2 熄弧角测量异常防误逻辑原理

基于2.1节所述内容,在该直流输电工程中引入了如图3所示的熄弧角测量异常防误逻辑。

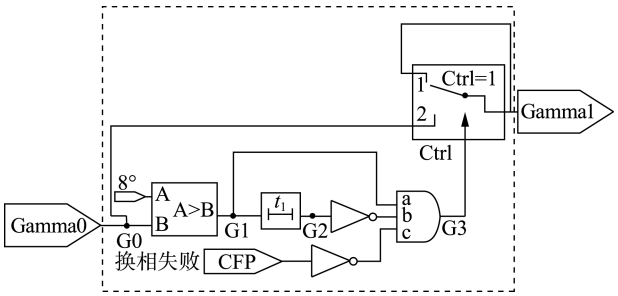

图3 熄弧角测量异常防误逻辑原理

Fig.3 Principle of prevention logic for abnormal extinction angle measurement

图3中,Gamma0为熄弧角测量系统实际测得的熄弧角,Gamma1为经防误逻辑后输出的熄弧角。虚线框内防误逻辑的工作原理如下:

a. 首先,Gamma0经过1个比较器与设定的最小熄弧角(8°)进行对比,对比结果为G1;

b. 信号G1经过一个时长为t_1的延时环节后输出为信号G2;

c. 信号G2经过1个非门后输出至三输入与门的端口b;

d. 三输入与门的端口a与G1连接;

e. 换相失败信号经1个非门后与三输入与门的端口c相连;

f. 端口a、b、c的3路信号经与门输出为信号G3;

g. G3输出至信号选择模块的选择控制端,当G3为1和0时,信号选择模块分别输出端口1和端口2的信号;

h. 信号选择模块端口1与其输出端相连;

i. 选择模块端口2与G0即Gamma0相连;

j. 信号选择模块输出即为经过防误逻辑后的最终熄弧角Gamma1。

2.3 熄弧角测量异常的防误逻辑效果

当实测熄弧角Gamma0突然异常且小于晶闸管最小熄弧角8°时,若异常熄弧角持续的时间小于一定的时间(如18 ms),则输出的实测熄弧角值Gamma1保持发生异常前的正常值不变。

图4为熄弧角异常突变为0°且持续时间为17 ms时Gamma0和Gamma1的波形。由图可见,经防误逻辑处理后Gamma1没有发生波动。

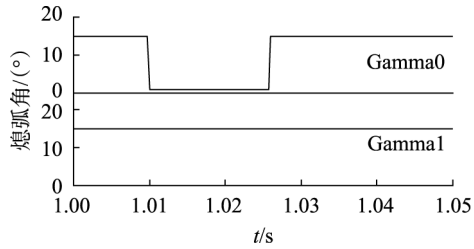

图4 Gamma0异常时间小于防误窗口18 ms时的熄弧角波形

Fig.4 Curve of extinction angles when abnormal time of Gamma0 is shorter than 18 ms

在熄弧角异常突变为0°且持续时间大于18 ms时,实测的异常熄弧角在被屏蔽18 ms后输出。图5为熄弧角异常时间为19 ms时的实际熄弧角Gamma0和经防误逻辑处理后的熄弧角值Gamma1波形。由图可见,在18 ms防误窗口期内,Gamma1保持为发生熄弧角异常前的正常值,在防误窗口结束后,实际熄弧角仍然有1 ms的异常,经过防误逻辑处理后的熄弧角Gamma1在防误窗口结束后即实时输出剩下的1 ms异常熄弧角。

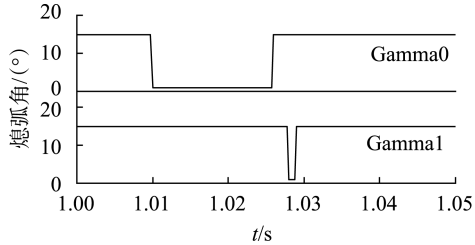

图5 Gamma0异常时间大于防误窗口18 ms时的熄弧角波形

Fig.5 Curve of extinction angles when abnormal time of Gamma0 is longer than 18 ms

当交流电网故障引发直流系统换相失败时,图 3 中的换相失败信号会将 Ctrl 信号控制为低电平 0,则与端口 2 相连的实测熄弧角 Gamma0 将直接输出给 Gamma1。

3　熄弧角测量异常故障防误逻辑的 EMTDC 仿真验证

为了验证熄弧角测量异常防误逻辑的作用,在 PSCAD/EMTDC 仿真模型中加入该防误逻辑,并对比了加入防误逻辑前后的仿真结果。

3.1　防误逻辑对熄弧角测量异常故障的影响验证

图 6 为发生熄弧角测量异常故障时直流系统主要仿真结果。由图可见,无防误逻辑时,直流电压、直流电流、熄弧角和交流电压的波形均发了较大的波动,而加入防误逻辑后,相应的波形始终保持平稳,这说明防误逻辑能有效屏蔽熄弧角偶发短暂异常对直流系统的影响。

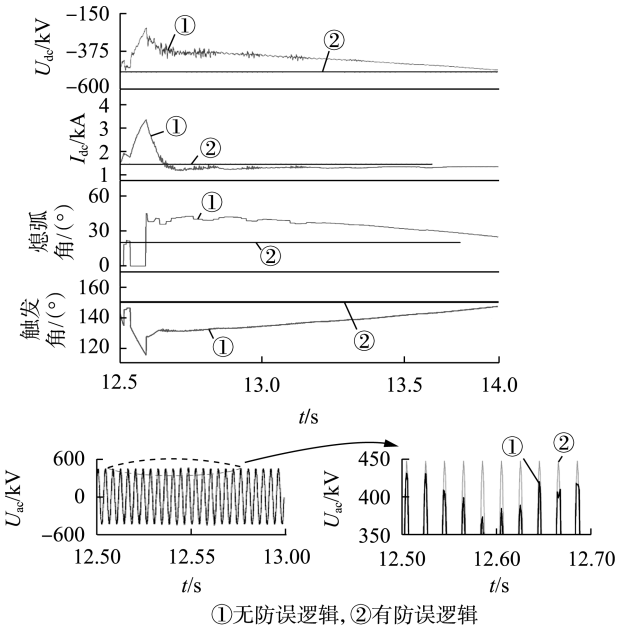

图 6　熄弧角测量异常时有无防误逻辑的仿真波形

Fig.6　Simulative results during abnormal extinction angle measurement with and without prevention logic

3.2　防误逻辑对直流系统故障响应时间的影响验证

本文以最常见且影响较大的交流单相接地故障为例进行对比分析。图 7 为发生交流单相接地故障(c 相金属接地 0.1 s)时直流系统的主要仿真结果。由图可见,有无防误逻辑时的波形基本一致,这是因为故障发生后立即产生换相失败信号,防误逻辑随即实时输出实际熄弧角,直流控制系统根据实际熄弧角进行正常控制调节,故障消失后直流系统逐渐恢复正常。这说明加入防误逻辑后直流控制系统对交流单相接地故障的响应特性不受影响。

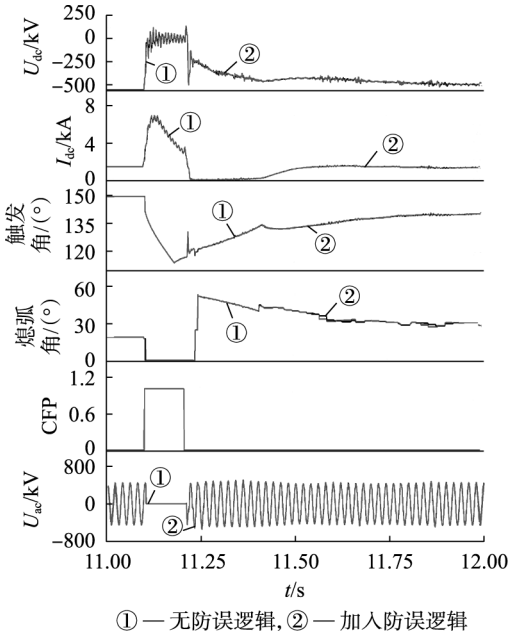

图 7　发生交流单相接地故障时有无防误逻辑的仿真波形

Fig.7　Simulative results during single-phase grounding fault

4　结语

本文首先分析了某换流站发生换相失败故障的原因,经分析和仿真验证得到换相失败的主要原因是熄弧角的测量系统出现偶发异常而导致误报熄弧角为 0°,直流控制系统随即迅速拉升熄弧角,导致交流电压跌落,直流系统受交流低电压影响而发生换相失败故障。针对该故障特点,本文提出了针对熄弧角偶发异常的防误逻辑电路,并采用 PSCAD/EMTDC 仿真验证了该防误逻辑的效果。仿真结果表明在直流控制系统中加入该防误逻辑电路后,直流系统能有效穿越熄弧角偶发异常故障,且该防误逻辑不影响直流输电工程对其他故障的响应特性。

实际运行中将该防误逻辑加入换流站直流控制系统后,该直流系统未再发生类似的换相失败故障,说明本文的解决方案有效排除了该换流站发生类似换相失败故障的隐患,确保了直流系统的正常稳定运行。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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 multiinfeed transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 141-146.

[3] 汪隆君,王钢,李海锋,等. 交流系统故障诱发多直流馈入系统

换相失败风险评估[J]. 电力系统自动化,2011,35(3):9-14.
WANG Longjun,WANG Gang,LI Haifeng,et al. Risk evaluation of commutation failure in multi-infeed HVDC systems under AC System fault conditions[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(3):9-14.

[4] 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.
SHAO Yao,TANG Yong. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(4):108-114.

[5] 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. Research survey on commutation failure in DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):140-147.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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):124-131.
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

[9] 严海健,凡朋,姚言超,等. 高压直流系统受端实测型与预测型换相失败响应特性分析[J]. 电工技术,2018(5):87-90.
YAN Haijian,FAN Peng,YAO Yanchao,et al. Analysis of commutation failure response characteristics based on actual measuring and prediction control in the inverter station of HVDC system[J]. Electric Engineering,2018(5):87-90.

[10] 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.

[11] THIO C V,DAVIES J B,KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(2):946-957.

[12] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:33-37.

[13] 何朝荣,李兴源,金小明,等. 高压直流输电系统换相失败的判断标准[J]. 电网技术,2006,30(22):19-23,58.
HE Zhaorong,LI Xingyuan,JIN Xiaoming,et al. Study on mutual admittance and commutation failure for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology,2008,28(7):51-57.

作者简介:

李 欢

李 欢(1986—),男,湖北孝感人,高级工程师,博士,主要研究方向为高压直流输电技术(**E-mail**:lihuan3@csg.cn);

赵晓斌(1986—),男,河南三门峡人,高级工程师,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电工程集成设计(**E-mail**:zhaoxb@csg.cn);

杨 煜(1972—),男,四川成都人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统控制理论和仿真研究(**E-mail**:yangyu@csg.cn)。

Analysis and treatment of commutation failure caused by abnormal extinction angle in HVDC system

LI Huan,ZHAO Xiaobin,YANG Yu

(State Key Laboratory of HVDC,Electric Power Research Institute,China Southern Power Grid,Guangzhou 510663,China)

Abstract:Several commutation failures occurred during commissioning of a HVDC project in China Southern Power Grid,which had a great impact on both AC and DC power systems. The transient fault recording data during the commutation failure is analyzed. It is concluded that the reason of the commutation failure is the malfunction of the HVDC control system caused by the accidental failure of the extinguishing angle measurement system. Based on this inference,the detailed PSCAD model of the HVDC project is established,and the fault is simulated and reproduced,which verifies the correctness of the fault cause analysis. In order to resolve the occasional abnormality of the extinction angle measuring device,an anti-error logic link is added in the control system to shield the abnormality of the extinction angle measurement. The effect of the proposed solution is verified by PSCAD/EMTDC simulation,simulative results and actual operation show that the proposed solution is effective for abnormal measurement of extinction angle and ensures safe and stable operation of HVDC system.

Key words:HVDC power transmission;abnormal measurement of extinction angle;commutation failure;simulation

附录

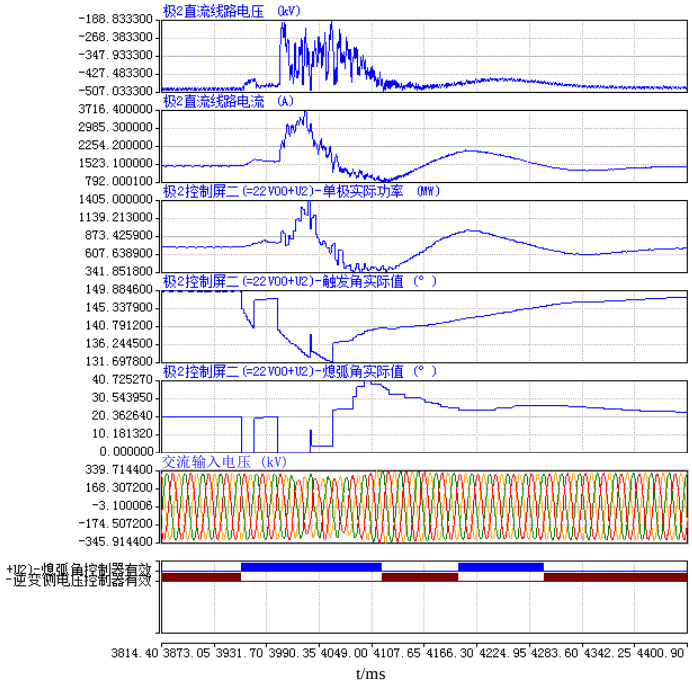

图 A1 换相失败故障发生时极 2 的故障录波

Fig.A1 Fault waveform recording of Pole 2 when commutation failure occurs

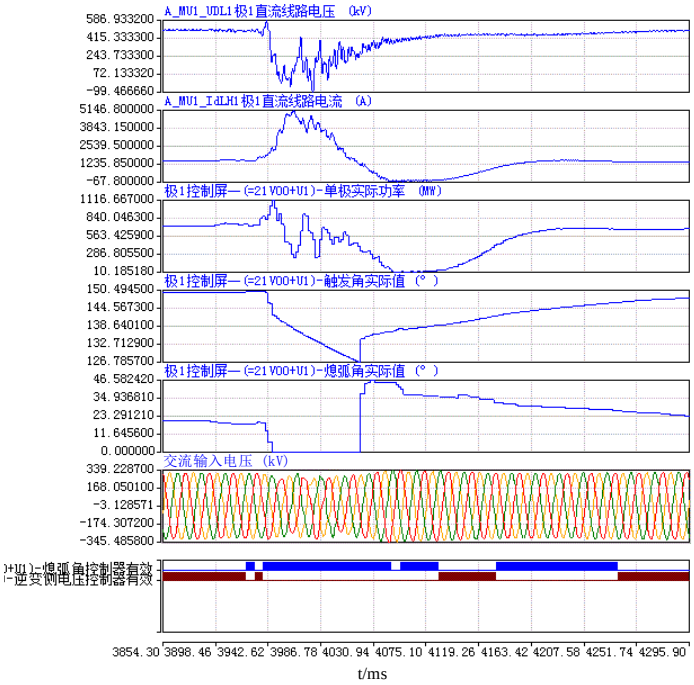

图 A2 换相失败故障发生时极 1 的故障录波

Fig.A1 Fault waveform recording of Pole 1 when commutation failure occurs

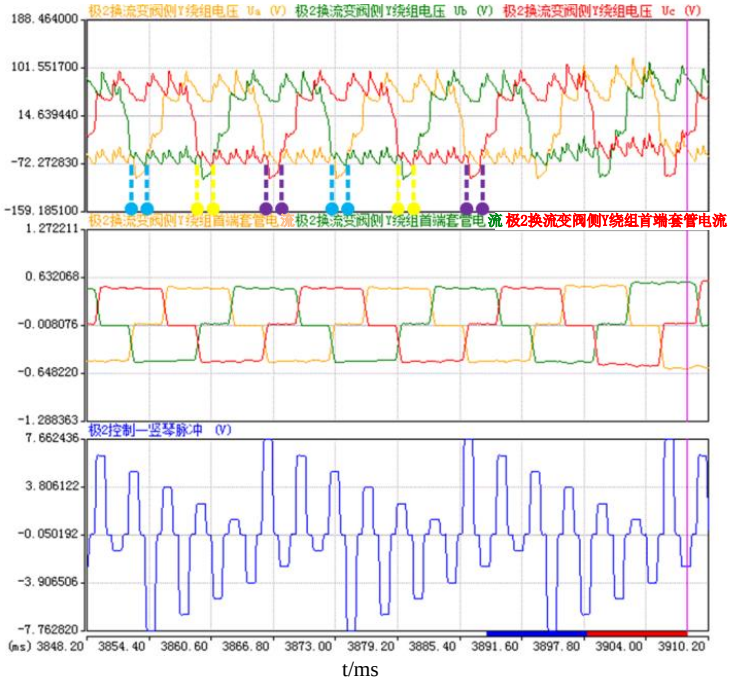

图 A3 极 2 系统 YY 换流变阀侧电流、电压录波波形

Fig.A3 Detailed fault waveforms of pole 2