交流系统故障对直流输电系统的影响及改进建议

朱韬析[1]，武 诚[2]，王 超[3]

（1. 南方电网超高压输电公司广州局，广东省广州市 510405；2. 浙江大学电气学院，浙江省杭州市 310027；
3. 浙江电力调度通信中心，浙江省杭州市 310007）

摘要： 远距离、大容量、交直流混合运行电网中，交直流系统间的相互影响非常复杂。文中以南方电网交直流混联系统运行实例为基础，讨论了直流系统控制功能在交流系统故障期间的作用，分析了交流系统故障时可能误动的相关直流保护监视功能及换流变和站用变保护等，并给出了相应的改进建议。这不仅有助于提高直流输电系统的运行维护水平，确保交直流系统的安全稳定运行，还为未来直流输电系统的设计、交直流输电系统控制保护功能的合理配合等提供了有益的参考。

关键词： 交直流混联系统；交流故障；直流保护监视功能；换流变保护；站用电系统

中图分类号： TM721.1

0 引言

直流输电具有传送功率大、线路造价低、控制性能好等优点，是目前发达国家作为高电压、大容量、长距离送电和异步联网的重要手段[1]。国内外大量的研究成果表明：当输电距离较长、输送容量较大时，从经济和环境等角度考虑，直流送电是优选的输电方案[2]。中国幅员辽阔、能源分布不均、能源基地与负荷中心之间距离较长，电网发展迅速，已经形成了跨度几千公里的交直流混合互联系统、多个数千万千瓦规模的大负荷中心，而随着特高压交直流输电系统的建设，这一特点将更加突出[3]。

对于这种远距离、大容量、交直流混合运行电网，交直流系统间的相互影响非常复杂[4-6]。交流系统的故障，可能导致直流系统的停运，进而影响到交流系统故障的快速恢复，甚至对电网的安全稳定造成威胁。

本文以南方电网交直流混联系统运行实例为基础，首先讨论了直流系统控制功能在交流系统故障期间的作用，指出低压限流功能可能对系统稳定造成不良影响，接着分析了交流系统故障时可能误动的相关直流保护、监视功能以及换流变、站用变保护等，并给出了相应的改进建议。

1 与交流系统故障相关的直流系统控制功能

直流输电系统采用合适的控制方式，可以提高交流系统故障下直流系统运行的稳定性；同时，利用直流输电系统控制调节快速灵活的特点，合理设置稳定控制功能，还有助于交流系统快速从故障恢复。

1.1 直流输电系统基本控制策略在交流系统故障期间的作用

直流输电系统的控制策略至今仍然保持了经典的原则，即定电流控制、定 $a_{\min}$ 控制、定电压或定熄弧角控制[1,4-5]。以天广直流输电工程为例[7]，其整流侧选择 $\Delta=\min(I_{\mathrm{ref}}-I_{\mathrm{act}},U_{\mathrm{ref}}-U_{\mathrm{act}})$、逆变侧选择 $\Delta=\max(I_{\mathrm{ref}}-I_{\mathrm{act}},U_{\mathrm{act}}-U_{\mathrm{ref}},r_{\mathrm{ref}}-r_{\mathrm{act}})$ 作为调节量。其中：I_{act}，U_{act}，r_{act} 分别表示直流电流、直流电压及熄弧角的实际值；I_{ref}，U_{ref}，r_{ref} 分别代表直流电流、直流电压及熄弧角的设定值。

同时，为保证正常情况下逆变侧定电流控制不起作用，控制系统将 I_{ref} 减去电流裕度 I_{mar} 后再与 I_{act} 进行比较，正常情况下用于控制的电流调节量将小于电压和熄弧角控制量，这就保证了逆变侧采用定电压或定熄弧角控制方式。I_{mar} 一般设置为 0.1（标幺值，下同），一旦检测到直流电流偏低（$I_{\mathrm{act}}<0.08$）或逆变侧交流电压偏低（$U_{\mathrm{act}}<0.3$），I_{mar} 将变为 0.5，以防止直流电流控制过大，反而延缓了故障的恢复。

图 1 为天广直流输电系统逆变侧一次因交流系统故障引起的换相失败录波图。正是通过控制方式的合理切换，不仅有效控制了对直流系统的不良影响、保护了一次设备，而且可靠地保证了直流系统在交流故障清除后恢复正常运行。

1.2 低压限流功能

低压限流功能的作用包括：避免逆变器长时间换相失败，保护换流阀；在交流系统出现干扰或干扰消失后使系统保持稳定，有利于交流系统电压的恢

收稿日期：2008-08-17；修回日期：2008-09-04。

复;在交流系统故障切除后,为直流输电系统的快速恢复创造条件,在交流电压恢复期间,平稳增大直流电流来恢复直流系统[1,4-5]。

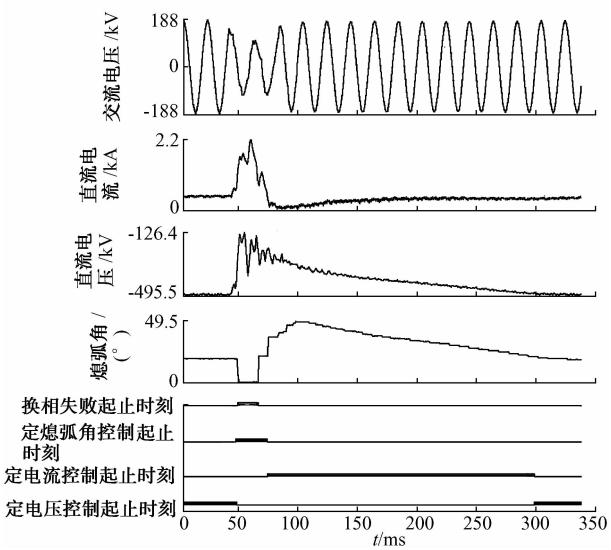

图 1　逆变侧换相失败录波图 1

Fig. 1　Transient recorded curves of commutation failure on inverter side (case 1)

2008 年 7 月 30 日,天广直流逆变侧交流系统发生严重故障,故障录波图如图 2 所示。可以看出,交流系统故障造成直流输电系统换相失败、直流电压降低后,随即启动了低压限流功能。

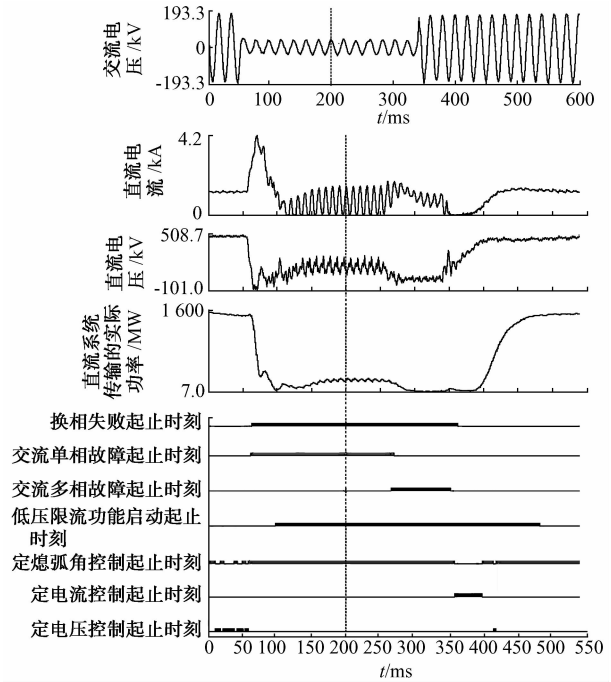

图 2　逆变侧换相失败录波图 2

Fig. 2　Transient recorded curves of commutation failure on inverter side (case 2)

根据《中国南方电网 2007 年运行方式》的计算和分析,交流系统故障,如主保护或断路器拒动,将可能引发单回或多回直流同时降功率或闭锁,导致系统稳定破坏,且无法通过安稳控制系统维持电网稳定。但对多数断路器拒动故障、失灵保护动作前,如果直流输电系统不降功率,电网便可以保持稳定。

同时,理论分析和大量的直流系统电磁瞬态(EMTDC)仿真和实时数字仿真(RTDS)研究表明,长时间交流系统不对称故障期间,只要交流系统提供的换相电压能够维持换流阀的正常换相,直流系统就能够持续稳定运行,因此,在交流系统故障期间不降低功率、也不闭锁,显然对系统稳定、特别是交流故障后系统的快速恢复非常有利[8-9]。

但是,通过上文所述的实例可以发现,如果逆变侧交流系统发生严重故障,单回或多回直流均有可能启动低压限流功能,这将导致直流输电系统传输功率降低,并无法通过安稳控制系统辨识,很可能对系统的稳定造成威胁。如何避免低压限流功能造成的直流系统传输功率降低对系统稳定、交流故障后系统快速恢复的不良影响,有待进一步深入研究。

1.3　稳定控制功能[10]

直流输电系统主要的稳定控制功能包括:

1)功率提升(power run-ups)和功率回降(power run-backs)功能:通常由安稳系统启动,当被监测的系统输入信号满足预先设定的启动条件时被激活,根据预先设定的设定值及变化率快速改变直流功率。

2)频率限制功能:根据电网频率变化调整直流功率,将电网频率控制在设定范围内。

3)双侧频率调制功能:分为功率摇摆阻尼功能(PSD)和功率摇摆稳定功能(PSS),根据两侧换流站交流母线的频差调整直流功率,将电网频率控制在设定范围内。

合理利用直流输电系统的稳定控制功能,不仅有助于解决事故后部分设备过载问题,还有助于事故的紧急控制、建立事故预防控制体系等,从而提高电网的可靠性。

2　与交流系统故障相关的保护功能

直流保护的功能配置应遵循交流系统故障期间直流保护尽量不动作的原则[11],但为了防止交流系统故障对直流系统的正常运行或直流设备的安全构成威胁,也设置了部分保护、监视功能,监测交流系统的运行状况。

以天广直流输电系统为例,交流系统故障时可能动作的相关直流保护[8]如表 1 所示。

表 1 交流系统故障时可能动作的相关直流保护
Table 1 DC protection correlated with AC system fault

保护名称	动作逻辑	动作延时/s	动作后果
100 Hz 保护	I_d(100 Hz)>0.05I_{dL}	10*	I_{dref}降至 0.3
	I_d(100 Hz)>0.05I_{dL}	3**	闭锁
交流低电压保护	U_{ac}<0.3	0.8	启动 ESOF[12]
交流过电压保护	U_{ac}>1.5	0.01	
	U_{ac}>1.3	0.4	
	2 条馈线开关均断开且 U_{ac}>1.2	0	
直流低电压保护	U_d<0.08	整流侧 0.3 逆变侧 6	
直流零电流保护	I_d<0.08	3	闭锁
触发角过大保护	60°<α<120°，I_d>0.08	1	

注：*表示原动作延时为 0.2 s；**表示原动作延时为 1 s。

表 1 中：$U_d = U_{dL} - U_{dN}$，$I_d = \max(I_{dH}, 2I_{dY}, 2I_{d\Delta})$，$U_{dL}$和$U_{dN}$分别为高压直流线路电压和中性母线电压，$I_{dH}$，$I_{dY}$，$I_{d\Delta}$分别为高压直流母线、换流变阀侧星形绕组和三角形绕组电流；U_{ac}为换流变压器网侧电压；α 为触发角；I_{dL}和 I_d(100 Hz)分别为高压直流线路电流及其 100 Hz 谐波含量幅值。

同样，以天广直流输电系统为例，交流系统故障时可能动作的换流变后备保护如表 2 所示。

表 2 交流系统故障时可能动作的换流变后备保护
Table 2 Converter transformer backup protection correlated with AC system fault

保护名称	动作逻辑	动作延时/s	动作后果
过励磁保护	U/f=2.5	1.0	启动 ESOF
相过流保护	I≥7.5 A	0	
	I≥2.5 A	0.5	
中性点零序过流保护	I_E≥0.5 A	0	
	I_E>0.20 A	1.0	

表 2 中：U 为换流变压器网侧电压；f 为系统频率；I 为换流变压器网侧电流；I_E 为换流变中性点零序电流。

直流输电极控系统设有软件故障监测功能，当主系统判断出现软件故障，将自动切换至备用系统，如果备用系统也检测到软件故障，2 套极控系统均故障，则会立即启动直流系统紧急停运(ESOF)。天广直流输电系统中，交流系统故障时可能动作的极控软件监视功能[13]如表 3 所示。

表 3 中：U_{ac}和 U_{ac}'分别为换流变压器网侧交流电压值及其正序电压值；U_{dL}为高压直流线路电压。

站用电系统是换流站内最重要的辅助设备，为双极阀冷主泵、冷却塔、换流变冷却器等非常重要的负荷提供电源，一旦站用电全部丢失，将直接造成双极闭锁。显然，如果交流系统严重故障造成站用电系统相关保护误动，同样可能造成严重后果。

表 3 交流系统故障时可能动作的极控软件监视功能
Table 3 Software monitoring function in pole control system correlated with AC system fault

保护名称	动作逻辑	动作延时/s	动作后果
同期电压监视功能	$\lvert U_{ac}'\rvert$<0.1	0.5	由主系统切换至备用系统，如备用系统也故障，则启动 ESOF
交流电压测量故障检测功能	$\lvert U_{ac}-U_{ac}'\rvert$>0.15	1.025	
不正常运行范围的监视功能	U_{dL}<0.55	3	
直流电流截止监视功能*	检测换相失败	0.2	

注：*表示当 U_{ac}<0.75 时将闭锁该功能。

3 实例及改进建议

3.1 交流系统严重故障实例及 100 Hz 保护的改进

3.1.1 运行实例

2006 年 6 月 23 日，天广直流整流侧交流系统发生严重故障，造成整流侧双极 100 Hz 保护和换流变中性点零序过流保护动作，停运双极。故障录波如图 3 所示。

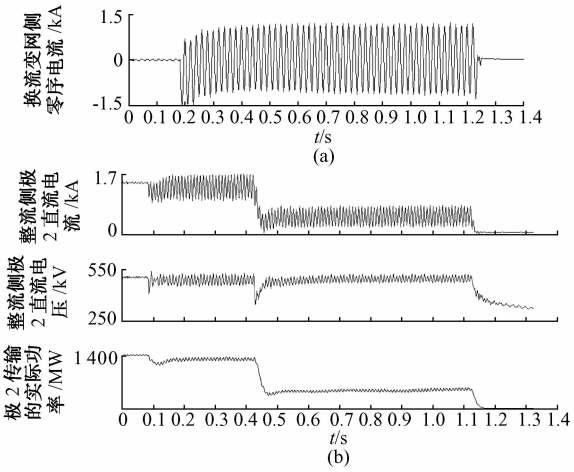

图 3 整流侧交流系统故障期间录波图
Fig. 3 Transient recorded curves of AC system fault on rectifier side

如图 3 所示，随着交流系统故障，不仅交流侧出现较大的零序电流，而且直流系统电流和电压中出现了较大幅值的二次谐波，满足 100 Hz 保护Ⅰ段延时(最初为 0.2 s)后，将直流负荷降为 0.3；但由于交流故障仍未切除，对直流系统的影响依然存在，所以满足 100 Hz 保护Ⅱ段延时(最初为 1 s)后，闭锁双极直流系统；同时，由于也满足换流变零序过流保护的动作条件和延时，所以换流变零序过流保护也动作，启动了双极 ESOF。

3.1.2 对 100 Hz 保护的改进

事故发生后，文献[9,12,14-15]对 100 Hz 保护的原理及影响进行了深入研究，同时，根据《中国南

方电网 2007 年运行方式》的计算和分析，交流系统故障如主保护或断路器拒动，将可能引发单回或多回直流同时降功率或闭锁，导致系统稳定破坏，且无法通过安稳控制系统维持电网稳定。但对多数断路器拒动故障、失灵保护动作前，如果直流输电系统不降功率，电网便可以保持稳定。因此，在断路器保护动作前，直流 100 Hz 保护Ⅰ段不宜动作。而且，由于断路器失灵发生的概率较高，因断路器失灵导致多回直流同时降功率的动作后果比较严重，考虑到开关拒动，与失灵保护动作时间的配合，故对天广和贵广Ⅰ回、Ⅱ回直流系统 100 Hz 保护进行了改进，如表 1 所示，将 100 Hz 保护Ⅰ段延时由 0.2 s 修改为 10 s(实际取消了Ⅰ段功能)，Ⅱ段延时由 1 s 修改为 3 s。

同样，从图 3 也可以看出，逆变侧交流系统故障时，直流电压和电流中也会出现较大幅值的二次谐波。不过，由于已经改进了 100 Hz 保护Ⅰ段延时，所以并没有如图 3 一样启动降功率功能。

3.1.3　存在的问题

如表 1～表 3 所示，交流系统严重故障时，除了 100 Hz 保护可能动作外，还有其他部分直流保护及监视功能、甚至换流变保护可能会误动，在交流系统故障切除之前，误停运直流系统，甚至给电网带来重大的不良影响。

如 3.1.1 节的故障案例中，即使改进了 100 Hz 保护，同样会由换流变零序过流保护动作，停运直流系统；而如 1.2 节的故障案例中，随着直流电压的降低，整流侧直流低电压保护极有可能动作。

3.1.4　改进建议

对照设备制造规范书，根据 EMTDC 仿真和 RTDS 结果及实际工程应用案例，持续几秒的交流系统故障，并不会威胁直流输电系统内换流阀、换流变压器、平波电抗器、避雷器、直流滤波器等一次设备的安全；而改进 3 次交流滤波器中的电阻器后，也完全可以避免对交流滤波器造成危害[8]。

因此，建议对表 1～表 3 内的相关保护、监视功能根据以下原则进行改进：以交流低电压保护作为监测交流系统故障的主保护，其动作延时考虑与交流系统后备保护相配合；其他相关保护作为监测交流系统故障的后备保护，动作延时应大于交流低电压保护动作延时。

至于改动最大的整流侧直流低电压保护，由于该保护的主要功能是在通信系统故障、逆变侧已停运的情况下，可靠停运整流侧，增加该保护动作的延时并不会导致一次设备受到危害，同时还避免了高阻接地故障时该保护误动的问题。

3.2　交流系统严重故障对站用电系统的影响及改进建议

3.2.1　运行实例

2008 年 7 月 30 日，天广直流逆变侧交流系统发生严重故障期间，不仅造成直流系统较长时间的换相失败，同时还导致广州换流站 2 号站用变后备过流保护动作。故障录波如图 4 所示。

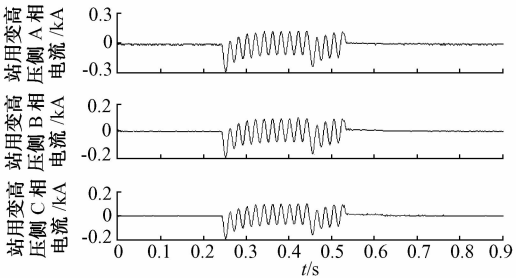

图 4　逆变侧交流系统故障期间站用变录波图
Fig. 4　Transient recorded curves of auxiliary power system during AC system fault on inverter side

由于交流系统严重故障，10 kV 备自投装置已监测到交流电压偏低、自动退出了备自投功能，所以 2 号站用变跳开后，未能自动投入 10 kV 3 号母线 103M，造成部分低压负荷交流电源丢失。后经检查发现，2 号站用变后备过流保护延时设置为0.3 s，故导致保护动作。随后将该延时重新整定后设置为 1.5 s。

3.2.2　改进建议

显然，交流系统严重故障时，也可能造成站用电系统保护，尤其是后备过流保护误动，同时，由于交流电压偏低会退出 10 kV 备自投功能，因此存在站用电丢失的风险；而站用电为阀冷主泵等重要负荷供电，换流站站用电全失将直接造成双极闭锁——国内直流输电系统曾多次发生换流站站用电全失导致双极闭锁的事故[16-18]。因此，不仅在站用电设计时就要优化进线侧电源的网架结构，确保站用电取自不同变电站的不同间隔[16]，并采用降压变压器的方式保证站用电稳定可靠[18]，而且还需要根据电网的发展及时整定站用电系统的保护定值和延时，重视与交直流系统相关保护的配合，尽量避免在交直流保护动作、切除故障前动作。另外，考虑到直流输电系统的重要性，建议在换流站内安装备用发电机，为阀冷主泵等直接影响到直流输电系统安全稳定运行的重要负荷提供备用电源，尽最大可能避免换流站站用电全失造成双极闭锁。

4　结语

目前，多馈入直流系统的形成给电网的安全稳

定运行带来了严峻的挑战,交流系统故障期间,如果又导致了多条直流系统同时双极闭锁,很可能导致电网失稳。本文以南方电网交直流混联系统运行实例为基础,探讨了交流系统故障期间直流系统控制、保护、监视功能和换流站内其他设备应注意的问题:

1)直流系统的基本控制策略可以有效控制交流系统故障对直流系统的影响,但需要进一步深入研究低压限流功能对交流系统的不良影响,并合理利用直流系统的稳定控制功能,提高电网的可靠性。

2)研究表明,以南方电网直流输电系统为例,交流系统故障对直流系统和换流站内一次设备的安全并不会构成严重威胁,因此,建议直流系统、换流变压器、站用变和交流滤波器等设备的相关保护动作的延时均应妥善设置,并与交流系统保护动作延时合理配合,保证交流系统故障切除之前,直流系统相关保护不会先动作而造成直流系统停运。

3)今后在设计直流输电系统时,应注意保证直流系统和换流站内一次设备的安全在交流系统故障可靠切除之前的时间内不会受到威胁。

4)站用电系统是直流输电系统中最重要的辅助设备之一,同样应合理设置相关保护动作定值,与交直流系统相关保护相配合,避免区外故障时误动;同时,为了确保站用电的可靠性,建议在换流站内安装备用发电机。

参 考 文 献

[1] 浙江大学发电教研组直流输电科研组.直流输电.北京:水利电力出版社,1985.

[2] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等.直流输电系统电压等级序列研究.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. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8.

[3] 李立浧.直流输电技术的发展及其在我国电网中的作用.电力设备,2004,5 (11):1-3.
LI Licheng. Development of HVDC transmission technology and its role in power network in China. Electrical Equipment, 2004, 5(11): 1-3.

[4] 徐政.交直流电力系统动态行为分析.北京:机械工业出版社,2004.

[5] 赵畹君.高压直流输电工程技术.北京:中国电力出版社,2004.

[6] 陶瑜,韩伟.高压直流输电控制保护技术及其应用.电力设备,2004,5(11):4-8.
TAO Yu, HAN Wei. HVDC control and protection technology and its application. Electrical Equipment, 2004, 5(11): 4-8.

[7] 朱韬析,王超.天广直流输电系统的基本控制策略.电网技术,2007,31(27):22-26.
ZHU Taoxi, WANG Chao. Basic control technique for HVDC transmission system from Tianshengqiao to Guangzhou. Power System Technology, 2007, 31(27): 22-26.

[8] 傅闯,饶宏,黎小林.交直流混合电网中直流 50 Hz 和 100 Hz 保护研究.电力系统自动化,2008,32(12):57-60.
FU Chuang, RAO Hong, LI Xiaolin. HVDC 50 Hz and 100 Hz protection of AC/DC hybrid transmission system. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 57-60.

[9] 傅闯,饶宏.高压直流系统应对换相失败的定关断角控制策略.南方电网技术研究,2006,2(6):17-22.
FU Chuang, RAO Hong. The strategy of gamma control over commutation failure for HVDC transmission systems. Southern Power System Technology Research, 2006, 2(6): 17-22.

[10] 王志勇,陈亦平.直流系统稳定控制功能在南方电网中的应用.南方电网技术研究,2006,2(2):17-19.
WANG Zhiyong, CHEN Yiping. The applications of stability functions of HVDC transmission system in China Southern Power Grid. Southern Power System Technology Research, 2006, 2(2): 17-19.

[11] 余江,周红阳,黄佳胤,等.影响直流 100 Hz 保护的交流系统故障范围分析.电力系统自动化,2008,32(3):48-51.
YU Jiang, ZHOU Hongyang, HUANG Jiayin, et al. Impact of fault location in AC system to 100 Hz protection of HVDC. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 48-51.

[12] 朱韬析,邝建荣,王超.天广直流输电工程 ESOF 功能简介.高电压技术,2006,32(增刊):66-68.
ZHU Taoxi, KUANG Jianrong, WANG Chao. Introduction of ESOF in Tian-Guang HVDC transmission project. High Voltage Engineering, 2006, 32(Sup): 66-68.

[13] 朱韬析,杨帆,王超.直流输电系统极控软件故障监视功能介绍.南方电网技术,2008,2(1):80-83.
ZHU Taoxi, YANG Fan, WANG Chao. Introduction to software functions of pole control system used in Tian-Guang and Gui-Guang HVDC transmission systems. Southern Power System Technology, 2008, 2(1): 80-83.

[14] 张海凤,朱韬析.整流侧交流系统故障对高压直流输电系统的影响.继电器,2007,35(15):24-27.
ZHANG Haifeng, ZHU Taoxi. Influence of rectifier AC fault on HVDC transmission system. Relay, 2007, 35(15): 24-27.

[15] 马玉龙,肖湘宁,江旭.交流系统接地故障对 HVDC 的影响分析.中国电机工程学报,2006,26(11):144-149.
MA Yulong, XIAO Xiangning, JIANG Xu. Analysis of the impact of AC single-phase earth fault on HVDC. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 144-149.

[16] 许卫刚,廖文锋,顾舒扬.直流输电工程站用电系统运行分析.高电压技术,2006,32(9):157-159.
XU Weigang, LIAO Wenfeng, GU Shuyang. Operation analysis and study on auxiliary power system of HVDC project. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 157-159.

[17] 喻新强.2003 年以来国家电网公司直流输电系统运行情况总结.电网技术,2005,29(20):41-46.
YU Xinqiang. Summary on operation of SGCC's HVDC projects since 2003. Power System Technology, 2005, 29(20): 41-46.

[18] 郭小俐,陈小军,李智勇.三峡送出直流输电系统 2005 年运行情况分析.中国电力,2005,39(5):12-17.
GUO Xiaoli, CHEN Xiaojun, LI Zhiyong. Analysis of Three Gorges output HVDC transmission system operation in 2005.

Electrical Power，2005，39(5)：12-17.

朱韬析(1980—)，通信作者，男，硕士，工程师，主要研究方向：直流输电运行维护。E-mail：taoxi_zhu@hotmail.com

武　诚(1982—)，男，博士研究生，主要研究方向：电力系统稳定。E-mail：wuc@zju.edu.cn

王　超(1981—)，男，博士，主要研究方向：电网经济运行与调度。E-mail：wangchao@zju.edu.cn

Influence of AC System Fault on HVDC System and Improvement Suggestions

ZHU Taoxi[1]，*WU Cheng*[2]，*WANG Chao*[3]

(1. China Southern Power Grid Guangzhou EHV Bureau, Guangzhou 510405, China;
2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
3. Zhejiang Electric Power Dispatch and Communication Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Interaction of AC and DC system in long-distance, high-capacity, ultra-high voltage AC/DC hybrid system is very complicated. Based on the analysis of operational examples in China Southern Power Grid, the effects of DC control system during AC system fault are discussed first. Then some functions that maybe misoperate during the AC system fault, including the DC protection and monitoring function, converter transformers protection and auxiliary transformers, are analyzed. The improvement suggestions are given, which are not only valuable for improving the operation and maintenance capability and insuring the safe and reliable operation of HVDC system, but also provide useful reference to the design of HVDC transmission projects and the cooperation of AC/DC system in China in the future.

Key words: AC/DC hybrid system; AC system fault; DC protection and monitoring function; converter transformer protection; auxiliary power system