

贵广直流输电工程直流线路故障重启动策略研究及优化

赵军¹, 曹森², 刘涛², 张爱玲²

(1. 中国南方电网超高压输电公司贵阳局, 广东 广州, 510620; 2. 许继电气直流输电系统部, 河南 许昌 461000)

摘要: 南方电网主网架“强直流弱交流”的特点, 使得交流系统对直流系统的依赖性很强, 因此直流系统的稳定运行对南方电网十分重要。针对南方电网的特点, 对直流系统故障率比较高的直流线路故障以及直流线路故障再启动动作策略(DCFR)进行深入研究, 同时结合南方电网贵广直流输电工程, 对直流线路故障重启动策略在贵广工程的应用进行深入研究, 并提出了优化的直流线路故障重启动策略, 并对该策略在 RTDS 仿真系统上进行仿真验证, 试验结果良好。由于南方电网的几条直流输电工程的控制策略相似, 所以该研究成果对南方电网其他直流输电工程也有借鉴和参考的价值。

关键词: 高压直流输电; 直流线路故障再启动策略; RTDS 仿真

Research and optimization on DC line fault recovery strategy used in Gui-Guang HVDC project

ZHAO Jun¹, CAO Sen², LIU Tao², ZHANG Ai-ling²

(1. Guiyang Bureau, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510620, China;

2. HVDC Department of XJ Electric Co., LTD, Xuchang 461000, China)

Abstract: The feature of strong DC system and weak AC system in the CSPG results that AC system strongly depends on the DC system, so the stability of DC system plays an important role in the whole system. According to this, the paper does a research on the DC line fault which has much higher fault rate in the DC system and how to recovery from the DC line fault, especially makes the deep research on how to apply this strategy to Gui-Guang HVDC project, and gives some useful suggestions on how to recovery from DC line fault. The result of RTDS simulation shows that this measure is effective for the whole system. The result also has reference value for the other HVDC projects in the CSPG due to the similarity of control strategy between several HVDC projects.

Key words: HVDC; DLFR; RTDS simulation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0126-07

0 引言

南方电网由广东、广西、贵州、云南四省(区)电网及南方公司直属电网组成, 并通过广东电网与港澳电网相连, 东西跨度 2 000 km。两广的能源资源仅占该地区的 8.9%, 而国民生产总值(GDP)却占四省总和的 80%。能源分布与经济发展不平衡决定了必须实施西电东送, 以实现资源的优化配置和促进东西部经济可持续发展。

直流输电功率调节迅速灵活, 输电距离不受同步运行的稳定性限制, 是较理想的远距离大功率输电方式, 其运行控制性能对电力系统的安全稳定运行影响深远。如果能够充分发挥直流系统快速调节和具有一定过载能力的特点, 则可提高交流系统的稳定性或抑制交流系统的振荡。

直流输电不仅是电网在正常情况下远距离交换

功率的有效手段, 在紧急情况下还可以为交流系统提供紧急功率支援^[1]。直流输电功率调节迅速灵活, 输电距离不受同步运行的稳定性限制, 是较理想的远距离大功率输电方式^[2]。2000年12月26日, 天广直流输电工程极 I 投运, 标志着我国第一个交直流并联运行电网正式形成。目前南方电网的 9 条西电东送大通道, 每条长度都在 1000 km 左右。此外天广、贵广直流与 6 条 500 kV 交流通道并联运行; 三广、天广、贵广直流同时馈入广东 500 kV 主网架, 换流站间电气距离较近^[3]。

南方电网主网架“强直流弱交流”的现状, 电网对直流系统的依赖性很强, 对直流系统运行的方式也有着严格的要求。

直流线路故障是直流输电系统最常见的故障之一, 极控系统设计的直流线路故障重启动策略就是针对直流线路故障而选择的一项优化控制策略, 该控

制策略对减少单极停运,保证系统稳定有着重要的作用,所以对直流线路故障重启动策略的优化以及在直流工程应用的探讨对整个南方电网的稳定运行有着重要的意义。

线路故障重启动动作策略涉及到主网架方式要求、直流系统运行特点以及直流控制保护系统的核心软件。本文以贵广 I 回直流为例,通过对直流线路故障重启动动作策略进行研究,在对直流线路故障重启动功能深入研究的基础上,提出了针对南方电网网络特点的直流线路重启动的优化实施方案,通过对控制保护软件的修改实现该优化方案,该方案既保证双极的直流线路故障重启动功能之间的相互协调,又提高直流输电系统的可靠性,同时也保证南方电网系统的稳定性。

由于贵广 I 回工程、贵广 II 回的控制保护系统均采用相同的体系结构和技术风格,因此本文的研究成果同样适用于贵广 II 回直流工程。

1 直流线路故障重启动策略

贵广工程的直流线路故障重启动策略是:在直流输电系统中,如果直流线路出现故障,直流保护系统动作,产生直流线路故障信号,直流保护系统通过硬触点将直流线路故障信号送到极控系统,极控系统快速响应,启动直流线路故障重启动逻辑。

直流线路故障重启动执行以下顺序过程:整流侧检测到直流线路故障后,控制系统将触发角调节到 120° ,此时触发脉冲保持释放状态,直流系统的能量将快速释放,经过设定的放电时间后,直流系统按设置的电压等级自动执行重启动顺序。如果系统重启以后直流线路故障消失,则系统继续运行;如果重启后直流线路故障依然存在,控制系统继续执行重启动顺序过程,当重启动次数达到运行人员设定值时,控制系统将启动闭锁顺序,直流系统停运。

逆变侧检测到直流线路故障后将信号送至整流侧并调节触发角为 120° ,此时直流电压降低,当整流侧重启动成功建立直流电流之后,按照设定的直流电压值重新调整触发角^[4-5]。

运行人员可以在操作员工作站设置直流线路故障重启动次数、每次故障重启动之间的直流线路放电时间以及每次重启动之后的电压等级。重启动次数的选择范围为 0~5,如果选择了 0 次则意味着退出直流线路故障重启动功能;直流线路放电时间可以在 100~500 ms 之间选择,5 次重启动时间必须按照由小到大顺序排列;电压等级选择全压启动或者降压启动。

2 南方电网的特点

南方电网地理气象条件复杂,雷害、污闪、台风、覆冰等问题严重威胁电网安全,雷电是影响电力系统运行的最主要的外部因素。尤其是南方电网五省区属雷电活动强烈地区,落雷密度大,容易被雷击,年度雷暴日均 80~100 日,部分地区如海南澄迈、广东清远雷电日超过 100 日。所以南方电网线路故障问题特别突出例如,2008 年 1 月 25 日因覆冰单日跳闸达 18 次,为全年平均值的二十几倍;2007 年 4 月 23 日受雷暴雨影响,17 时 40 分至 18 时 26 分,贵州青岩地区 500 kV 线路跳闸 4 次,500 kV 母线跳闸 1 次^[6]。

此外南方电网是我国第一个交直流混合运行的大电网,直流落点集中,西电东送通道长期压极限运行,电网稳定问题突出,主要表现在:

(1) 功角稳定问题

南方电网是一个交、直混合系统,当交流系统故障跳闸,可以利用直流系统的调制和过负荷能力,快速提高直流的输电功率,帮助交流系统迅速达到能量和功率的平衡。同时这个系统是强直弱交型,当直流发生双极闭锁时,如果交流系统的潮流较大,直流闭锁转移来的功率会使交流通道电压急剧下降,甚至会使系统失稳,还可能由于电压降低造成其他直流线路闭锁的连锁反应等问题。另外,交流系统故障期间,直流系统可能会发生换相失败而无法输送功率,直流功率强制转移到并联交流系统,加大了对交流系统的冲击;而且,交流故障切除后,随着交流系统特别是直流换流母线电压的波动,直流输送功率也会相应产生波动,可能加剧交流系统电压、功角的摆动,恶化系统稳定。

(2) 动态稳定问题

南方电网为长距离链式结构,东西跨度长,输送功率大,区域振荡模式阻尼较弱,先后发生过多次低频振荡。

(3) 电压稳定问题

系统的中部广西电网和受端的广东电网,动态无功支撑能力较弱,直流系统故障引起直流系统单极或双极闭锁,直流功率发生转移,对与之并联运行的交流通道冲击较大,潮流转移引起线路无功损耗大大增加,增加了中间支持系统和受端系统的无功损耗,降低了系统的动态无功备用,严重情况下,可能引发暂态电压稳定问题^[7]。通过对南方电网 2010 年运行方式的电压稳定分析,以及对贵广 II 直流双极闭锁故障临界失稳状态的动态仿真,结果表明:直流的双极闭锁故障会引起系统发生电压稳定

问题。在 2010 年方式下,云广特高压直流发生双极闭锁会导致系统失稳^[8]。

3 直流线路故障直流线路重启动策略的优化

3.1 直流线路故障重启动优化方案的提出

如果直流系统的两极同时执行直流线路故障恢复顺序,根据直流线路故障的执行顺序,两极输送的功率将同时消失,在直流线路故障去游离时间结束之后,系统将同时重启动,如果重启动成功,直流系统将快速恢复直流功率的传输,由于直流系统的响应时间比较快,按照一次重启进行计算,整个过程持续时间约 500 ms。这种双极的直流线路故障重启动过程相当于执行了一次双极闭锁和一次双极启动过程,这种直流功率的波动对于南方电网这种“强直流弱交流”系统来说,将对电网造成极大的冲击,因此南方电网调度规定,在系统小方式下运行时,直流系统只允许单极一次直流线路重启。

根据南方电网的特点,为减小双极直流线路同时启动对整个系统的影响,对贵广直流工程直流线路故障的重启动策略进行优化,优化方案如下:

(1) 极事故闭锁(含紧急停运、线路故障再启动不成功闭锁)后,应经过一定时间延时 t_1 (该延时可调整,例如 15 min) 后才允许启动另一极的直流线路故障再启动功能;

(2) 一极发生直流线路故障正在重启恢复过程中,如果另一极也发生了直流故障,则可以根据当前交流系统运行条件选择直接闭锁双极或者双极相互独立启动直流线路故障重启动功能。

(3) 一极直流线路故障重启动成功之后,必须经过一定时间延时(该延时可调整,例如 10 s),等到系统稳定运行之后,才允许启动另外一极的直流线路故障重启动功能。

3.2 优化方案的实现原理

为了保证该方案的正确实施,需要修改直流工程控制保护系统软件,根据贵广工程的情况,控制保护软件的修改原理如图 1 所示。

需要在两极之间传递对极的直流线路故障信号和对极正在执行直流线路重启动功能的信号,这些信号输出到对极的 DLFR 的启动逻辑,DLFR 的启动逻辑根据系统运行的工况和运行人员下发的相应定值决定是否启动本极的直流线路故障重启动顺序。

图中的虚线为新增加的信号,在实际工程实施过程中该信号要采用硬接线信号,从而保证控制系统快速响应。

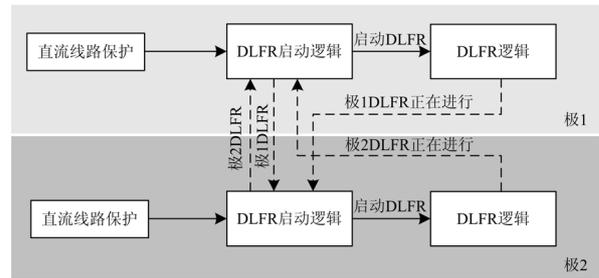


图 1 直流线路故障重启逻辑优化原理图

Fig.1 Schematic diagram of optimizing DLFR

3.3 优化方案的试验验证

为了保证实施优化方案后功能的正确性,在贵广 I 回直流输电工程的 RTDS 控制模型上,根据上述方案对控制模型进行了修改,相应的逻辑如图 2 所示,并进行了相关的试验。

方案(1)仿真试验时,设定一极紧急停运之后,另外一极 5 s 之后允许启动直流线路故障恢复顺序,极 2 故障重启次数为 2 次,重启电压均为 500 kV,然后模拟极 1 阀短路故障,极 1 紧急停运,并在 8 s 后触发极 2 的直流线路故障,故障时间 300 ms,试验录波图如图 3 所示。从试验录波图中可以看出极 2 线路故障后系统重启成功;同样的条件下极 1 紧急停运后 3 s 触发极 2 的直流线路故障,故障时间 300 ms,试验录波图如图 4 所示。从试验录波图中可以看出极 2 线路故障后没有重启动而是直接闭锁,符合系统优化设计要求。

方案(2)仿真试验时,模拟在双极线路故障菜单中选择双极继续运行,设置极 1 和极 2 故障重启次数均为 2 次,重启电压均为 500 kV,两次放电时间分别为 200 ms、300 ms,模拟双极直流线路故障,试验录波图如图 5 所示,从试验录波图中可以看出模拟双极直流线路故障后,双极均重启动成功;模拟在菜单中选择闭锁双极,同样条件下模拟双极直流线路故障,试验录波图如图 6 所示,双极均未重启直接闭锁,符合系统优化设计要求。

方案(3)仿真试验时,设置直流线路故障之后 5 s 后允许另外一极启动直流线路故障顺序过程,设置极 1 和极 2 故障重启次数均为 2 次,重启电压均为 500 kV,然后模拟极 1 直流线路故障,3 s 后极 2 直流线路故障,故障时间为 300 ms,极 1 重启两次成功,极 2 直接闭锁试验录波图如图 7 所示。同样极 1 直流线路故障后 8 s 极 2 线路故障,两极均重启成功录波图如图 8 所示,符合设计要求。

图 3~图 9 中的录波信号定义如表 1。

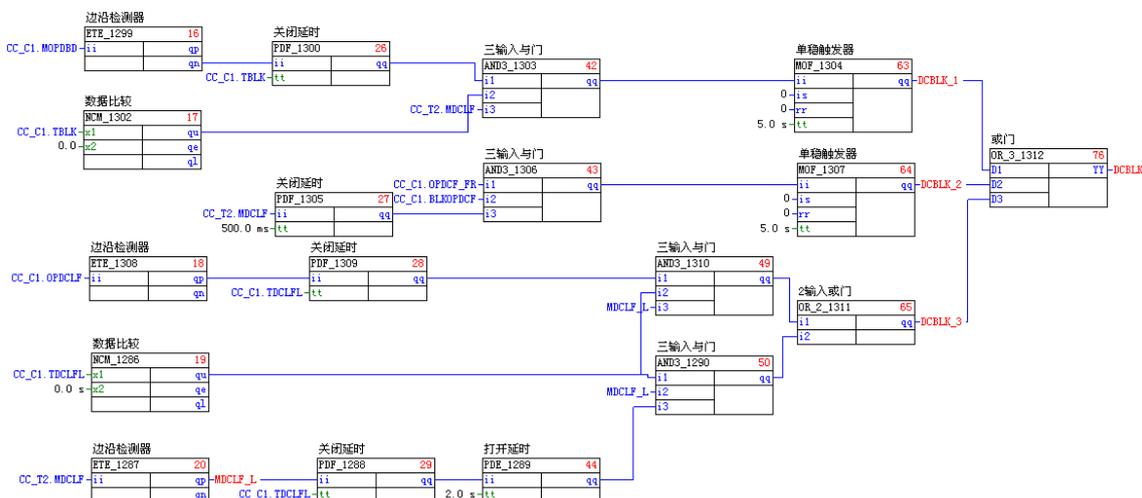


图 2 贵广工程 RTDS 模型的新增逻辑

Fig.2 Logic added in RTDS model of Guiguang HVDC transmission project

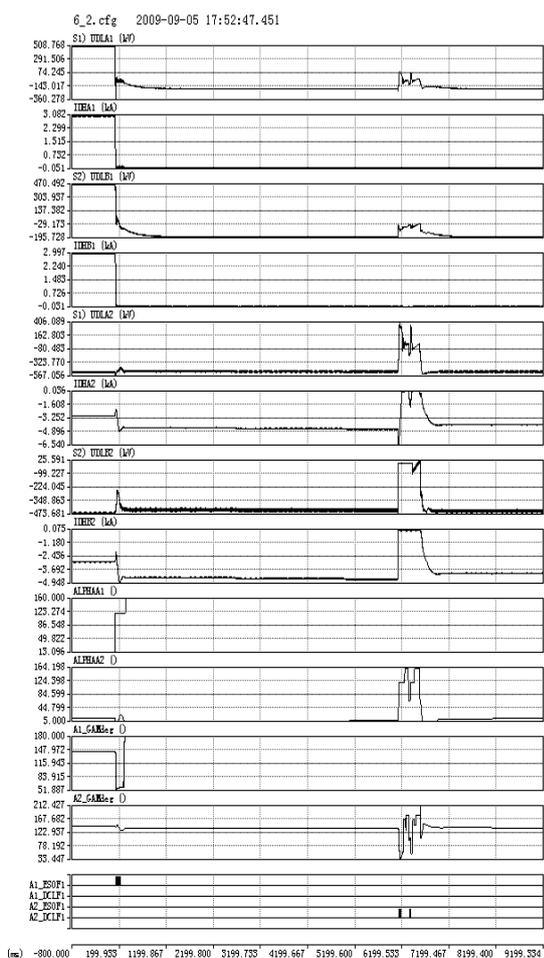


图 3 极 1 紧急停运之后 8 s 极 2 直流线路故障录波图

Fig.3 Waves of pole2 DCLF 8s after pole1 ESOF

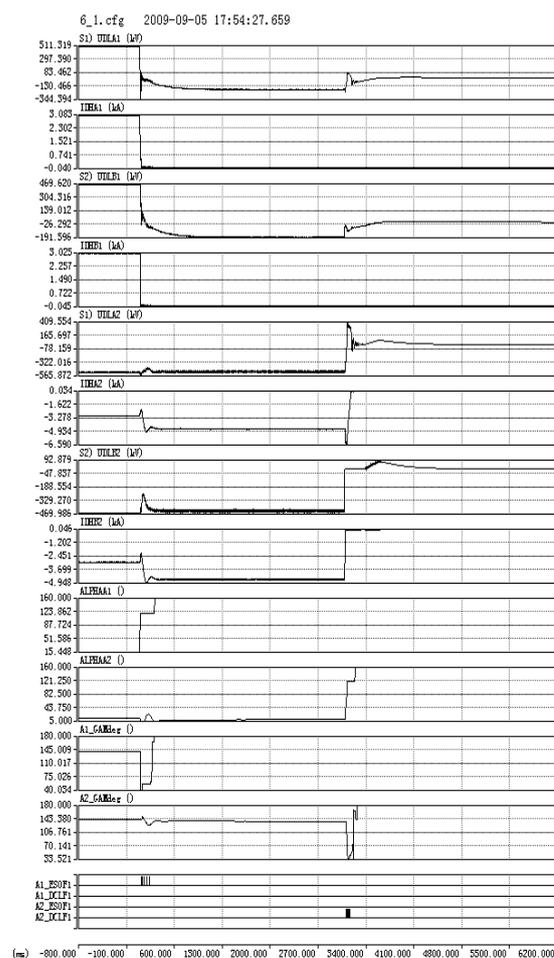


图 4 极 1 紧急停运之后 3 s 极 2 直流线路故障录波图

Fig.4 Waves of pole2 DCLF 3s after pole1 ESOF

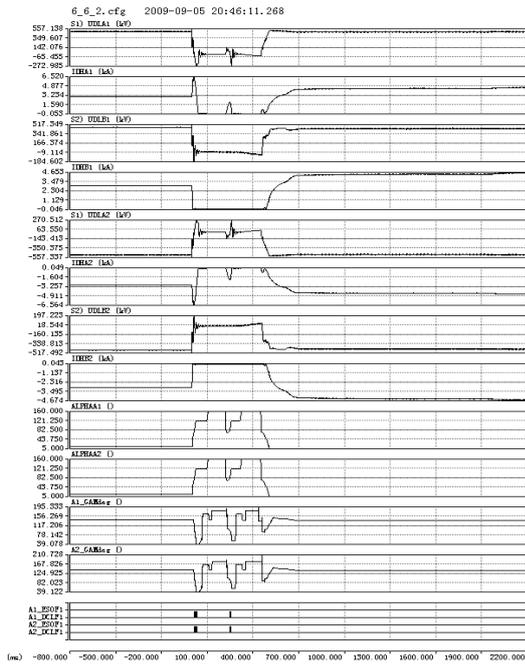


图 5 双极直流线路故障之后双极继续运行

Fig.5 Waves of bipole continue running after DCLF

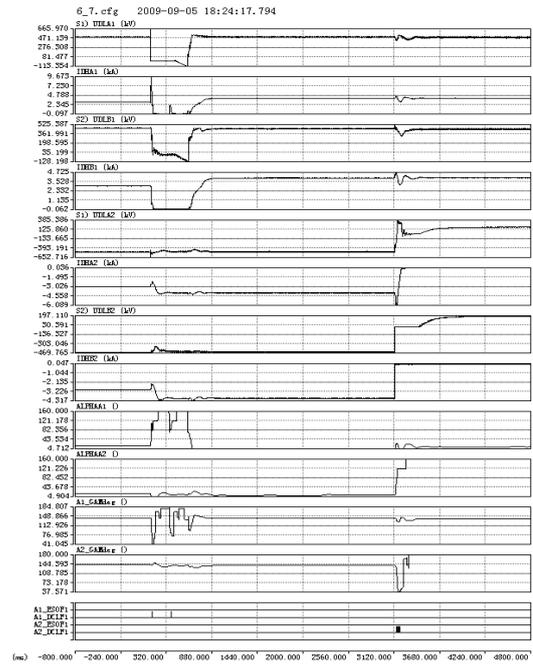


图 7 极 1 直流线路故障之后, 3 s 后极 2 直流线路故障

Fig.7 Waves of pole2 DCLF 3s after pole1 DCLF

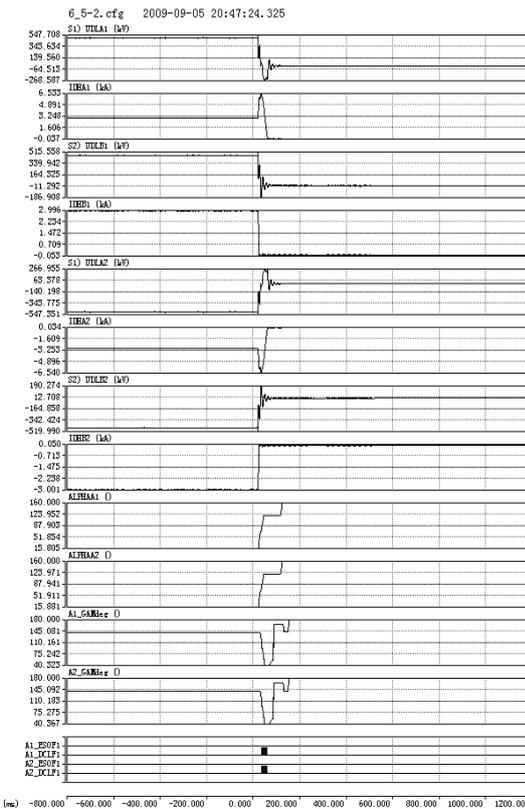


图 6 双极直流线路故障之后双极直接闭锁

Fig.6 Waves of bipole blocked after DCLF

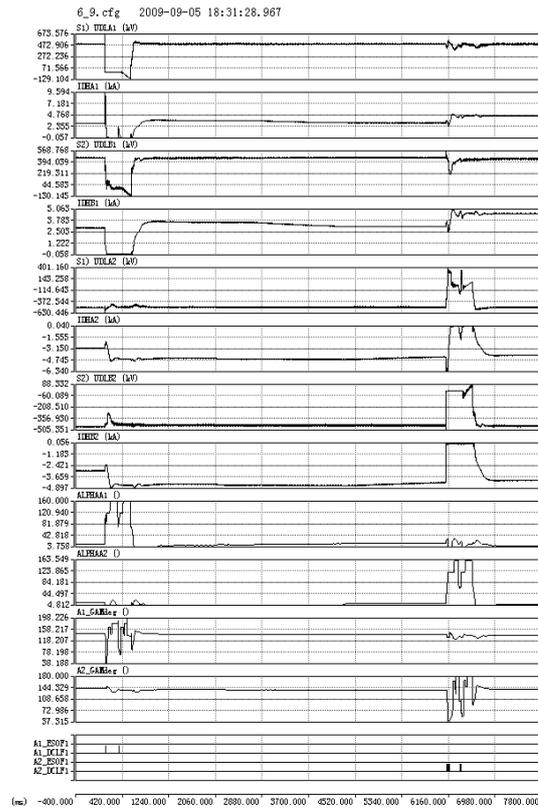


图 8 极 1 直流线路故障之后, 5 s 后极 2 直流线路故障

Fig.8 Waves of pole2 DCLF 5s after pole1 DCLF

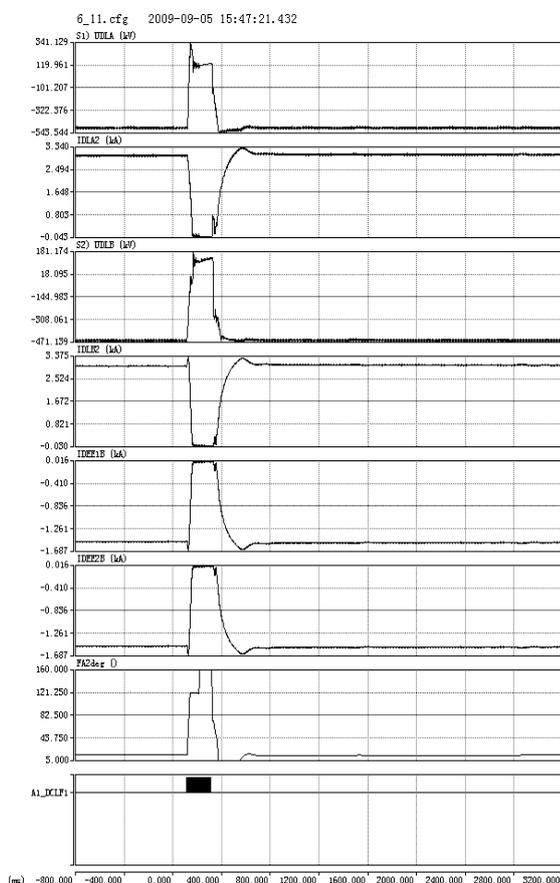


图9 极2 60EL 动作出口由闭锁改为强制移相波形图
Fig.9 Waves of FR instead of the block action of 60EL

表 1 录波信号定义

Tab.1 Definition of recording signal

录波名称	信号定义
UDLA1/UDLA2	极1/极2 整流站直流线路电压
IDHA1/IDHA2	极1/极2 高压母线电流
UDLB1/UDLB2	极1/极2 逆变站直流线路电压
IDHB1/IDHB2	极1/极2 高压母线电流
ALPHAA1/ALPHAA2	极1/极2 触发角
GAMMAB1/GAMMAB2	极1/极2 关断角
Rect/MPEN/DCLF	整流侧/阀解锁/直流线路故障

4 线路故障出口动作策略优化

贵广工程的接地极不平衡保护设计的出口策略为：第一段发出双极平衡请求命令到极控系统；第二段执行紧急停机命令，由于接地极不平衡保护属于双极保护，保护 II 段动作之后，将直接导致双极停运。

直流线路横差保护的出口策略为：如果直流线

路横差保护动作，直接执行紧急停运顺序。

由于南方电网的特点，直流线路雷击故障比较频繁，容易造成接地极保护和金属回线保护动作，造成不必要的系统停运。

为减少直流系统的强迫停运次数，提高直流系统的可用率，对这两种保护的出口策略进行优化，具体的优化方案为：保护动作之后，首先执行直流线路故障重启过程。

按照该方案修改直流保护接地极不平衡保护和直流线路横差保护的出口策略，保护出口方式由闭锁直流系统改为请求极控系统执行直流线路故障恢复过程。相关的 RTDS 试验波形如图 9 所示。极 2 单极大地回线方式、直流功率 1500 MW，模拟整流侧接地极引线金属接地故障，接地极线电流不平衡保护（60EL）动作，发出启动直流线路故障恢复过程至极控系统，极 2 重启成功。

5 结论

本文针对南方电网的特点，为防止双极直流线路故障，双极直流线路重启引起系统的稳定，对双极直流线路故障重启逻辑进行优化；同时利用直流线路故障可恢复的特点，利用直流线路故障恢复顺序功能，对贵广工程中的直流线路保护出口策略进行优化设计，减小系统停运几率，提高系统的可用率，同时搭建贵广工程 RTDS 仿真系统，对优化的直流线路故障策略和保护出口逻辑进行试验验证，保证功能可靠，并且可以直接应用于实际工程。和交流系统相比，直流系统具有调节速度快，故障恢复时间短的优点，但是在实际应用中，由于系统的特点不同，直流系统的功能配置，例如直流线路故障恢复功能，在某些应用中，有利于整个系统的稳定，例如单极直流线路故障的快速恢复，但是同时也可能成为影响系统稳定的一个重要因素，例如双极直流线路故障重启功能，所以在实际的工程应用中，要针对不同直流系统的不同特点，对控制保护功能在进行详细研究，充分发挥直流系统的优点，为直流工程服务。

参考文献

- [1] 杨卫东. 南方电网中直流系统对交流系统的紧急功率支援[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (17): 68-72.
YANG Wei-dong. Emergency DC power support to AC power system in the south China power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (17): 68-72.
- [2] 钟庆. 现代控制技术在高压直流输电系统中的应用及其发展[J]. 继电器, 2006, 34(9): 80-86.

- ZHONG Qing. Review on application and development of modern control technologies in HVDC systems[J]. Relay, 2006, 34(9): 80-86.
- [3] 王久玲. 南方电网的实践与展望[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(1): 1-4.
WANG Jiu-ling. The practice and prospect of China southern power grid[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2(1): 1-4.
- [4] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 122-136.
ZHAO Wan-jun. HVDC transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 122-136.
- [5] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 138-183.
DAI Xi-jie. Introduction of DC transmission[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990: 138-183.
- [6] 陈亦平. 南方电网连锁故障风险分析及防御措施研究[J]. 南方电网技术研究, 2010, 4(3), 8-11.
CHEN Yi-ping. The risk analysis and defensive measures research of cascading failures in China southern power grid[J]. Southern Power System Technology Research, 2010, 4(3): 8-11.
- [7] 杨雄平. 南方电网直流闭锁故障时受端系统电压稳定问题分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 40-43.
YANG Xiong-ping. Voltage stability analysis of receiving-end system in China south power grid under the DC block faults[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 40-43.
- [8] 廖民传. 交直流混合系统受端电网暂态电压稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10):1-4.
LIAO Min-chuan. Transient voltage stability of received power grid in AC/DC hybrid power system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10):1-4.

收稿日期: 2010-07-20; 修回日期: 2010-10-20

作者简介:

赵军(1980-), 男, 工程师, 从事高压直流输电管理工作;

曹森(1974-), 男, 高级工程师, 从事高压直流输电软件设计; E-mail: senc@xjgc.com

刘涛(1978-), 男, 工程师, 从事高压直流输电软件设计。

(上接第 120 页 continued from page 120)

- [8] 屠黎明, 胡敏强, 肖仕武, 等. 发电机定子绕组内部故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(17): 47-52.
TU Ling-ming, HU Min-qiang, XIAO Shi-wu, et al. Research methods of the generator with internal armature winding fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(17): 47-52.
- [9] Young-Jun Kim, Jang-Mok Kim, Byeong-Yeol Yoon, et al. Detection of shorted-turns in the rotor winding of cylindrical synchronous generators using discrete wavelet transform[C]. //Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC'06. Twenty-First Annual IEEE. 2006.
- [10] 王树勋. 高阶统计量在系统理论中的应用[J]. 自动化学报, 1994, 20(6): 710-717.
WANG Shu-xun. Application of high-order statistics in system theory[J]. Acta Automatic Sinica, 1994, 20(6): 710-717.
- [11] 石要武, 戴逸松, 宫文斌. 色噪声背景下正弦参量估计的互谱矩和SVD方法[J]. 电子科学学刊, 1995, 17(1): 13-19.
SHI Yao-wu, DAI Yi-song, GONG Wen-bin. Parameter estimation of sinusoidal embedded in colored noise via cross spectrum matrix and SVD method[J]. Journal of Electronics, 1995, 17(1): 13-19.
- [12] 石要武, 戴逸松, 宫文斌. 有色噪声背景下正弦信号频率估计的互谱Pisarenko和MUSIC[J]. 电子学报, 1996, 24(10): 46-50.
SHI Yao-wu, DAI Yi-song, GONG Wen-bin. Pisarenko and MUSIC method of cross spectrum for sinusoidal parameter estimation on color noise background[J]. Acta Electronics Sinica, 1996, 24(10): 46-50.

收稿日期: 2009-12-09; 修回日期: 2010-02-06

作者简介:

王洪希(1971-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力电子及电机控制、电机状态监测及故障诊断; E-mail: wang_hongxi71@163.com

刘铮(1971-), 男, 学士, 工程师, 从事电气自动化专业工作;

田伟(1971-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统自动化和电能质量控制。