基于EMTDC的UHVDC交流侧故障的仿真

陈文滨[1]，严 兵[2]，张 尧[1]，林凌雪[1]，房宣合[1]，郑传材[1]

（1.华南理工大学，广东 广州 510640；2.许继电气股份有限公司，河南 许昌 461000）

摘要： 采用EMTDC软件建立了详细UHVDC模型，研究了交直流系统并列运行的相互影响，并对交流系统故障进行了仿真。仿真结果表明：逆变侧交流系统故障比整流侧交流系统故障更容易引起换相失败，三相系统故障造成严重的功率损失直至极退出停运，故障期间极控系统的策略有利于交流系统故障后，直流系统迅速恢复，合理的控制模式组合有助于故障后的恢复特性。

关键词： 特高压直流输电； 极控系统策略； 双十二脉动换流器； 交流故障

Simulation of fault in UHVDC AC side based on EMTDC

CHEN Wen-bin[1], YAN Bing[2], ZHANG Yao[1],LIN Ling-xue[1], FANG Xuan-he[1], ZHENG Chuan-cai[1]
(1.South China University of Technology,Guangzhou 510640, China; 2.XJ Electric Co.,Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: This paper sets up a particular UHVDC model by using EMTDC software and researches the influence of AC/DC operating together, especially the simulation of AC fault. The results show that the AC fault at inverter is easier leading to communication fault than at rectifier. Three-phase fault will cause serious power losing even to blocking polar. The strategy of polar control is to help DC system recovery rapidly after AC fault. The proper control mode combination is useful to the recovery characteristic after AC fault.

Key words: ultra high voltage direct current; strategy of polar control; bipolar 12-pluse converter valves; AC fault

中图分类号： TM743 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2009)11-0015-04

0 引言

随着我国电力工业的迅速发展，特高压电网逐步形成。特高压直流输电（UHVDC）采用全双十二脉动技术，每极由两个十二脉动换流器串联而成，若出现一个十二脉动换流器故障，极中另外无故障的阀组可以和对站的一个阀组共同运行，单极停运的几率明显降低，因此UHVDC比常规的高压直流输电更加可靠。研究表明，UHVDC方式是远距离、大容量输电、节省输电走廊的有效而经济的途径。

国家电网将先后建设6回±800 kV UHVDC将乌东德、白鹤滩、奚落渡、向家坝的大水电电能送往华东和华中负荷中心，南方电网亦在2009年建成世界上第一条UHVDC送电广东。直流输电系统需要交流系统提供足够的换相电流，即相间短路电流，所以受端交流系统要有足够的短路容量。受端较弱的直流系统更容易发生换相失败，此时若极控系统处理不当，将导致连续的换相失败直至停运，引发功率的大范围转移，将造成系统的电压稳定破坏。因此研究UHVDC在交流侧故障下，极控系统的控制策略对故障恢复具有指导意义。

1 换流器换相失败的因素

UHVDC用的是半可控硅器件，不具有自动关断能力，晶闸管在退出导通时需要承受一定时间（400 μs，约7°电角度）的反向电压，才能恢复其P-N层阻挡能力。考虑到串联元件的误差，晶闸管恢复阻断能力的时间用最小关断角γ_{min}=10°表示，即当计算得到关断角γ<10°就认为发生换相失败。由文献[3]可知受端系统对称时，逆变器的关断角为：

$$\gamma=\arccos\left(\frac{\sqrt{2}I_dX_c}{U_L/K}+\cos\beta\right) \quad (1)$$

其中： $$\alpha+\beta=180° \quad (2)$$

$$\beta=\mu+\gamma \quad (3)$$

式中：I_d为直流电流；X_c为换相电抗；U_L为换流母线线电压有效值；β为触发越前角；K为换流变变比。当受端系统发生不对称故障时，会使换相线电压过零点前移一个角度ϕ，此时逆变器关断角为：

$$\gamma=\arccos\left(\frac{\sqrt{2}I_dX_c}{U_L/K}+\cos\beta\right)-\phi \qquad (4)$$

可见受端系统发生不对称故障时，由于换相电压过零点前移的角度会导致逆变器的关断角变得更小，从而更容易发生换相失败。由式(4)可见，逆变器换相失败的影响因素包括直流电流，触发越前角，换流母线线电压，换流变变比，换相电抗，换相电压过零点相位移角等。

2 仿真模型的建立

2.1 主电路参数

本文采用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件建立了详细 UHVDC 仿真模型系统如图 1 所示为一个极结构，每极采用两个十二脉动换流器串联，两站配置完全相同。整流侧交流母线电压 525 kV，阻抗 4.811 2∠84.29° Ω，频率 50 Hz,每极四个换流单元（每个换流单元为一个六脉动换流器），每个换流单元额定直流电压 200 kV，额定直流电流 3 125 A，触发角 15°，最小关断角 10°，逆变站参数一样；换流变 YY,YD 各两台，YD 采用 YD/5 接法，额定功率 750 MW，整流侧变比 525/169.8，分接头位置 +18~−6 档，逆变侧变比 525/163.3，分接头位置 +16~−8 档；直流线路长 1 412 km，稳态电阻 10.3 Ω；接地极线路整流站 105 km，逆变站 91 km；直流滤波器连接在极上为双通 12/24，36/48 型各一个，每极各两个，两侧参数和结构相同；交流滤波器连接在整流站、逆变站的交流母线上，整流站有 A、B、C、D 四种，逆变站有 A、B、C 三种。整流站 A 型为双通 11/24、B 型为双通 13/36、C 型（HP3）为高通滤波器，D 型（shunt C）为电容器，分为四大组，共 17 个；逆变站 A 型为双通 11/24、B 型为双通 13/36、C 型为电容器，分为四个大组，共 16 个，换流站所需要的无功全部由滤波器提供。

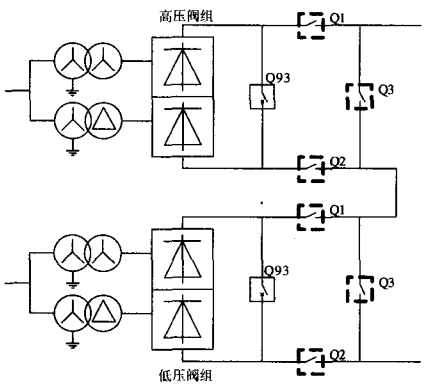


图 1 双十二脉动结构图

Fig.1 Dual 12-pulse converter groups

2.2 极控系统控制策略

整流站和逆变站配备完全相同的控制系统，但因参数设置的不同，使得在实际运行中，整流站和逆变站分别由不同的控制环节起作用。极控系统有以下四部分：

1）低压限流控制：U_d 降低时对 I_d 整定值指令进行限制，减小故障期间对交流系统的无功需求，有助于系统稳定，减小发生换相失败的概率，同时有助于系统故障后的恢复特性。

2) 定电流控制：通过调节触发角，维持实际电流 I_d 在整定值；整流站电流整定值比逆变站电流整定值大 10%，防止测量误差等原因导致直流系统不能运行或运行方式的不确定。

3）定电压控制：对实际直流电压和整定值的实施控制，其作用通过调节触发角，来维持电压在整定值。逆变侧的定电压控制一般用来控制直流系统的运行电压；而整流侧的定电压控制主要用来防止线路轻载或故障恢复等原因可能引起的过电压，其定值一般比逆变侧的定值大 5%。

4）定熄弧角控制：通过调节逆变侧的，维持熄弧角 γ 在整定值。

由式(1)、(2)、(3）可知，当逆变侧电压下降时，为保持 U_d 不变时，需要增大 $\cos\beta$，由于 $\cos\beta$ 的增大，导致 β 角减小，使得 γ 更小，更容易导致换相失败。因此，可将定电压控制与定 γ 相结合，定 γ 控制作为定电压控制的限制值，充分利用两者的优点。

3 仿真结果

3.1 整流侧单相母线电压降至 0%

系统处于稳定运行状态，传输功率为 5 000 MW。在 0.1 s 时整流侧单相母线电压降至 0%，故障持续 100 ms 后消失，仿真结果如图 2，图 3。故障持续期间，直流功率下降到 2 000 MW 附近，直流电压和直流电流均出现振荡下降，系统为支持交流电压提升输送无功功率。此时极控系统将电流参考变大，整流侧的极控系统也在定电流和定电压之间频繁切换，逆变侧的极控系统也由原来的定电压控制模式转换到定电流控制模式以遏制振荡下降的直流电流，逆变侧触发角 α 的减小，β 将增大，故障持续期间保持较大的 γ，故未出现换相失败。极控系统在故障期间的控制策略有利于交流系统故障后，直流系统迅速恢复。在故障消失后的 200 ms 内，直流输送功率就恢复到故障前的水平。

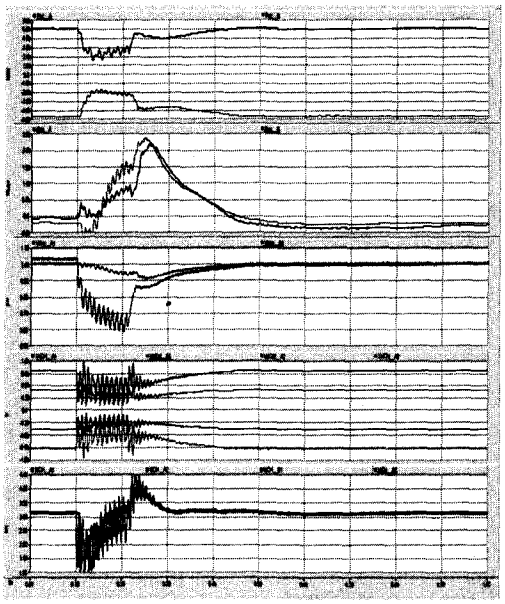


图 2 整流侧单相故障图

Fig.2 Single-phase fault wave of rectifier

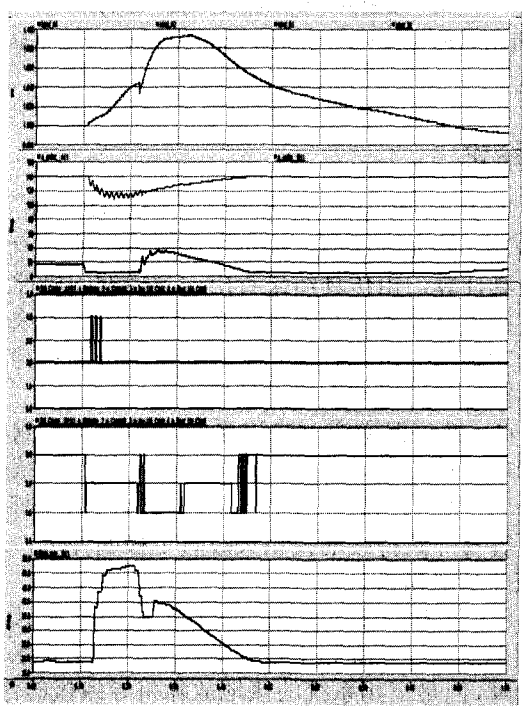


图 3 整流侧单相故障时极控响应特性

Fig.3 Response wave of pole control under single-phase fault of rectifier

3.2 逆变侧单相母线电压降至 0%

系统处于稳定运行状态，传输功率为 5 000 MW。在 0.1 s 时逆变侧单相母线电压降至 0%，故障持续 100 ms 后消失，仿真结果如图 4、图 5。故障持续期间，直流功率下降到 0 MW 附近，系统为支持交流电压而提高输送无功功率值，两极的直流电流绝对值增大，α 强迫移相，迅速跨过 90° 以抑制直流电流的增大。此时极控系统将电流参考值变小，整流侧的极控系统维持在定电流模式，逆变侧的极控系统也由原来的定电压控制模式转换到定电流和定 γ 控制模式之间切换以遏制振荡上升的直流电流，逆变侧换相重叠角 μ 增大，β 还未来得及增大，导致 γ 急剧减少直至 0°，出现连续换相失败持续 0.08 s 后 γ 保持在较大角度。极控系统在故障期间的控制策略有利于交流系统故障后，直流系统迅速恢复。在故障消失后的 300 ms 内，直流输送功率就恢复到故障前的水平。

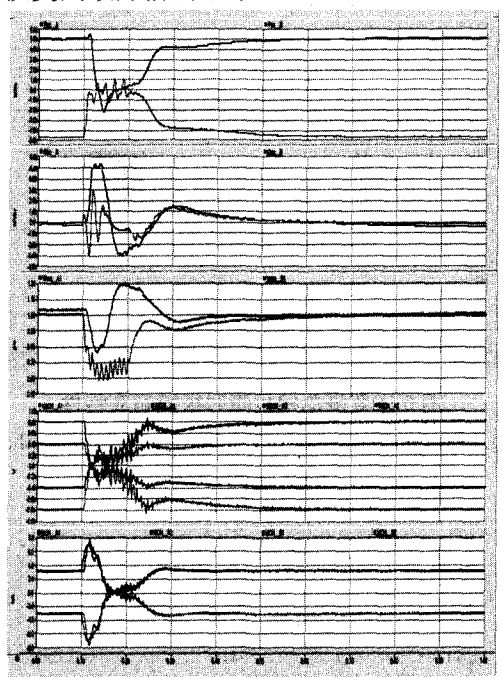


图 4 逆变侧单相故障图

Fig.4 Single-phase fault wave of inverter

3.3 逆变侧三相母线电压降至 80%

系统处于稳定运行状态，传输功率为 5 000 MW。在 0.1 s 时逆变侧三相母线电压降至 80%，故障持续 100 ms 后消失，仿真结果如图 6，图 7。故障持续期间，直流功率下降到 0 MW 附近，系统为支持交流电压而提高输送无功功率值，故整流侧电压大于 1 pu。故障期间直流电压在 0 kV 附近振荡，两极的直流电流绝对值增大，α 强迫移相，迅速跨过 90° 以抑制直流电流的增大。此时极控系统将电流参考值变小，整流侧的极控系统维持在定电流模式，逆变侧的极控系统也由原来的定电压控制模式转换到定电流和定 γ 控制模式之间切换以遏制振荡上升的直流电流，逆变侧换相重叠角 μ 增大，β 还

未来得及增大，导致γ急剧减少直至 0°，出现短暂的换相失败后，γ保持在较大角度。极控系统在故障期间的控制策略有利于交流系统故障后，直流系统迅速恢复。在故障消失后的 300 ms 内，直流输送功率就恢复到故障前的水平。

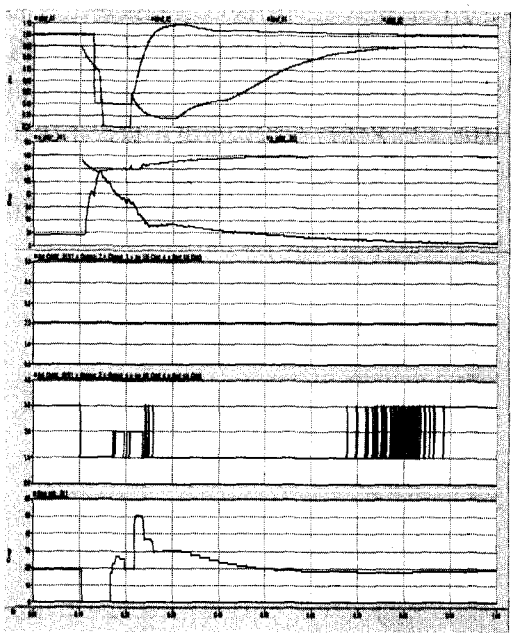


图 5 逆变侧单相故障时极控响应特性

Fig.5 Response wave of pole control under single-phase fault of inverter

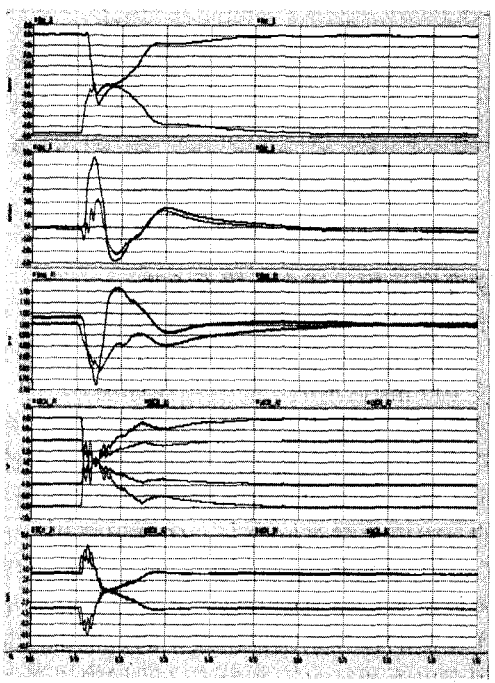


图 6 逆变侧三相故障图

Fig.6 Three-phase fault wave of inverter

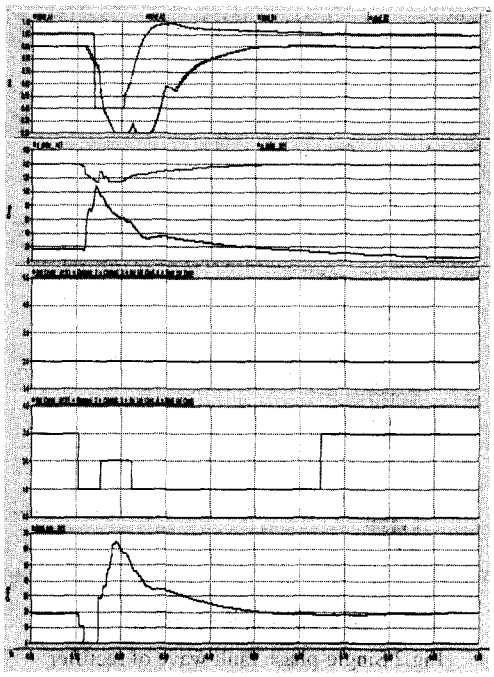


图 7 逆变侧三相故障时极控响应特性

Fig.7 Response wave of pole control under three-phase fault of inverter

4　结论

本文采用电磁暂态软件 EMTDC 建立了 UHVDC 的详细模型，并对交流侧系统的故障进行了仿真计算，由仿真结果看出，故障期间极控系统的控制策略有利于直流系统在故障后的迅速恢复，减少功率损失，具有实际工程的运用价值。并由三次仿真结果可以得到以下结论：

(1) 换流器逆变侧交流系统故障比整流侧交流系统故障更容易导致换相失败。由于极控系统的策略不同，整流侧故障时γ增大，逆变侧故障时γ减少更容易导致持续的换相失败直至极的停运，造成严重的功率损失。

(2) 逆变侧交流系统的三相故障造成极其严重的功率损失。在实际工程中最常见的是单相系统接地故障，但是三相系统的接地故障将导致极的停运，应该引起足够的重视。

(3) 极控系统在故障期间合理的控制策略有利于系统在故障后，直流功率迅速恢复到故障前的水平。特别是两站之间的定电流，定电压，定γ角控制模式的合理转换有利于故障后的恢复特性，有待于进一步探索。

（下转第 81 页　continued on page 81）

输出的装置中，例如可以用在电子式互感器驱动传统继电保护的场合等。

参考文献

[1] Jacob J M.功率电子学原理与应用[M]. 蒋晓颖，译. 北京：清华大学出版社，2005.
Jacob J M. Power Electronics Principles and Application[M]. JIANG Xiao-ying,trans. Beijing: Tsinghua University Press,2005.

[2] 欧阳帆，周有庆，彭红海.信号发生装置中两种电流放大电路的设计及比较[J]. 中国仪器仪表，2005,(8)：98-100.
OUYANG Fan,ZHOU You-qing,PENG Hong-hai.Two Types of Current Amplifying Circuit in Signal Generator and Their Comparison[J]. China Instrument,2005,(8): 98-100.

[3] 陈铸华，周有庆，吴桂清.高精度信号发生装置[J].中国仪器仪表，2007，188（7）：48-51.
CHEN Zhu-hua,ZHOU You-qing,WU Gui-qing. Design of High Accuracy Signal Generator Device[J]. China Instrument,2007,188(7):48-51.

[4] 李胜利.微机型继电保护测试仪的设计[J].继电器，2006，34（19）：68-70.
LI Sheng-li. Design of the Test Instrument for Microcomputer-based Relay Protection[J].Relay, 2006,34(19): 68-70.

收稿日期：2008-07-18；　修回日期：2008-08-14

作者简介：

李付亮（1974-），男，副教授，硕士，主要从事教学与电气信息、电力系统微机保护及水电站自动化方面的研究；E-mail: lfliang_@163.com

吴　涛（1984-），男，硕士，研究方向为电气信息、电力系统微机保护及变电站自动化；

周有庆（1944-），男，教授，博士生导师，从事电气信息、电力系统微机保护及变电站自动化方面的研究。

（上接第 18 页　continued from page 18）

参考文献

[1] 荆勇,李立涅,任震.天广交直流系统并联运行的稳定控制[J].电力系统自动化,2002,26(1):49-52.
JING Yong，LI Li-cheng，REN Zhen .Stability Control of TIAN-GUANG AC and DC Parallel Transmission System[J]. Automation of Electric Power Systems,2002，26(1):49-52.

[2] 王晶芳,王智冬,李新年,等.含特高压直流的多馈入交直流系统动态特性仿真[J].电力系统自动化,2007,31(11): 97-102.
WANG Jing-fang，WANG Zhi-dong，LI Xin-nian,et al. Simulation to Study the Dynamic Performance of Multi-infeed AC/DC Power Systems Including UHVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(11):97-102.

[3] Dhaliwal N S, Recksiedler L D, Tang D T Y. Operating Experiences of the Nelson River HVDC System[A]. In:Transmission and Distribution Conference, Proceedings, IEEE[C]. 1996 .174-180.

[4] Asplund G. Application of HVDC Light to Power System Enhancement[A]. In: Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE[C]. 2000.2498 – 2503.

[5] Kim Chan-Ki, Jang Gilsoo, Jeong-Boo K, et al. Transient Performance of Cheju- Haenam HVDC System[A].In: Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE[C]. 2001.343 – 348.

[6] LI Peng, WU Xiao-chen, ZHANG Yao,et al. Analysis of Modulation Controllers of Multi-infeed HVDC for CSG in 2008[A].In: Power Con International Conference on Power System Technology[C]. 2006: 1-7.

[7] 赵畹君.高压直流输电技术[M].北京：中国电力出版社，2007.
ZHAO Wan-jun. HVDC Transmission Engineering Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 122-136.

[8] 陈潜,张尧,钟庆,等. ±800 kV 特高压直流输电系统运行方式的仿真研究[J]. 继电器,2007,35(16):27-32.
CHEN Qian, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Simulation of ± 800 kV UHVDC System Under Different Operation Modes[J].Relay, 2007,35(16):27-32.

收稿日期：2009-04-16

作者简介：

陈文滨（1984-），男，研究生，主要研究方向电力系统运行与控制；E-mail:wenbin306296234@126.com

严　兵（1972-），男，工程师，从事高压直流保护系统软件设计；

张　尧（1948-），男，教授，博士生导师，长期从事电力系统的稳定运行与控制。