基于BPA的交直流系统稳定性仿真研究

苏黎[1]，吴广宁[1]，蒋伟[1]，黄震[1,2]，任志超[1]，雍小清[3]

（1.西南交通大学电气学院，四川 成都 610031；2.泸州电力局，四川 泸州 646000；
3.绵阳启明星集团公司电建公司，四川 绵阳 621000）

摘要：随着我国电力系统的发展，直流输电的大力建设，交直流混合系统的稳定性问题正在逐渐凸现其研究的重要性。在交直流系统中，当交流系统或直流线路发生故障时，对整个混合系统的影响正是迫切需要加以研究的问题。为此通过BPA电力系统分析软件建立了一个交直流混合输电系统模型，在不同的交、直流故障下进行了系统的暂态稳定仿真。通过对仿真结果的分析，得出了直流输电线路不同故障对系统稳定性的严重程度。通过仿真结果表明直流闭锁时快速切机是保持系统稳定的有效方法，以及切机数值大小对系统频率的关系。

关键词：交直流混合输电；暂态稳定；直流闭锁；频率稳定；BPA

Simulation research on stability of AC/DC power system based on BPA

SU Li[1], WU Guang-ning[1], JIANG Wei[1], HUANG Zhen[1,2], REN Zhi-chao[1], YONG Xiao-qing[3]

(1.Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2.Luzhou Power Company, Luzhou 646000, China;
3.Elecric Power Construction Company of Qimingxing Group Corporation, Mianyang 621000,China)

Abstract: As the power system developed very quickly, the stability of AC/DC system becomes much more important in the research of the power system. In a AC/DC system, if the AC system has problem or DC system has problem, the influence to the power system it very important and that is what we need to know.This paper built a ac/dc power system model by BPA, doing simulations under different ac fault and dc fault. By the analysis of the simulation result, we summarize the severity of different faults of dc transmission lines. By the simulation result, we also proved that generator tripping is very useful to maintain stability of power system when the block fault in dc system happens, and we found the relationship between generator tripping and the frequency of generator.

Key words: AC/DC power system; transient stability; DC block; frequency stability; BPA

中图分类号：TM712 文献标识码：A 文章编号：1674-3415(2009)02-0032-05

0 引言

西电东送是我国电力系统发展的重要战略，预计2010~2020年可基本形成覆盖全国的统一交直流联合电网。如此大规模交直流混合电力系统，其运行的复杂性和难度在国际上是少见的。为此，需在设计、调度、控制、运行的安全性与可靠性等方面进行深入的研究。电力系统的稳定性问题就是其中一个非常重要的研究领域。交、直流相互作用会引起一系列的问题，如换相失败、电压失稳、机电振荡等，当直流系统发生故障时，往往导致功率传输中断，从而给电网带来较大的冲击，影响电网的稳定性。

目前电力系统机电暂态仿真程序主要有美国PTI公司的PSS/E，西门子公司的NETOMAC，加拿大Powertech公司的DSA POWERTOOLS等，而国内应用比较广泛的则有中国电力科学研究院的BPA和PSASP程序。本文采用的中国版BPA程序是由中国电力科学院引进、消化、吸收美国BPA程序开发而成。从1984年开始在我国推广应用以来，已在我国电力系统规划部门、调度运行部门、试验研究部门得到了广泛的应用，成为我国电力系统分析计算的重要工具之一。程序中包括详细的发电机模型和各种励磁模型，主要由潮流和暂态稳定程序构成，具有计算规模大、计算速度快、数值稳定性好、功能强等特点。

1 交直流混合系统模型

本文采用交直流混合输电系统模型进行仿真。该系统中包含6条500 kV交流母线，共有5台发电机

连接到其中的 3 条交流母线上。其中发电机 A G1 采用 E_q'' E_d'' 变化模型，考虑励磁系统和调速器作用，其机端电压为 20 kV，通过升压变压器连到 500 kV 交流母线 BUSA 上。系统中共有 3 个负荷为 2 000 MW 的节点，由一条直流输电线路以及 2 条双回交流输电线路共同输电。其负荷模型为恒定阻抗负荷与恒定功率负荷各占 50%，其频率每变化 1%引起的有功及无功变化率分别为 1.8%和-2%。系统中直流输电线路采用两端直流详细模型，其整流器和逆变器均采用定功率控制。该系统模型如图 1 所示。

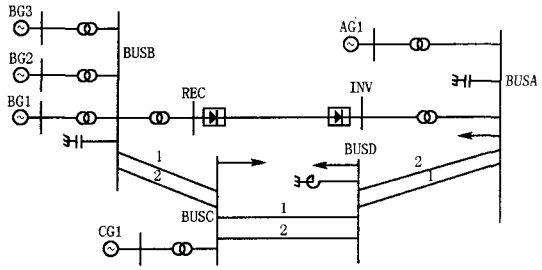

图 1　交直流混合系统仿真模型

Fig.1 Simulation model of AC/DC power system

在该模型中采用的发电机模型为六绕组模型（d、q 轴）。考虑了阻尼绕组、励磁绕组以及由于 q 轴铁芯内部构成的短路阻尼绕组。其方程为：

$$V_q = -R_a i_q + e_q'' - X_d'' i_d$$

$$V_d = -R_a i_d + e_d'' + X_q'' i_q$$

$$T_{do}'' \frac{de_q''}{dt} = [e_q' - e_q'' - (X_d' - X_d'') i_d]$$

$$T_{do}' \frac{de_q'}{dt} = [V_f - e_q' - \frac{(X_d - X_d')}{X_d' - X_d''}(e_q' - e_q'')]$$

$$T_{qo}'' \frac{de_d''}{dt} = [e_d' - e_d'' + (X_q' - X_q'') i_q]$$

$$T_{qo}' \frac{de_d'}{dt} = [-e_d' - \frac{(X_q - X_q')}{X_q' - X_q''}(e_d' - e_d'')]$$

$$T = e_d'' i_d + e_q'' i_q + (X_q'' - X_d'') i_d i_q$$

其转子运行方程为：

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = T_M - T_E$$

在模型中包含了角度的一次微分项，其电机阻尼特性很好，能够近似考虑机械风阻以及发电机近处负荷随速度变化而具有的阻尼等。

2　模型仿真计算

2.1 潮流计算

对该系统进行潮流计算，其潮流结果如图 2 所示。

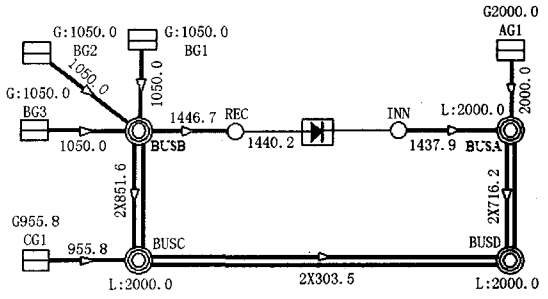

图 2　交直流混合系统潮流图

Fig.2 Power flow graphic of AC/DC power system

由潮流计算可知直流线路输送功率为 1 440.2 MW，从 BUSB 和 BUSA 输出功率的四条交流线路潮流也较重。

2.2 暂态稳定分析

在实际系统运行中，输电线路三相短路情况较为常见，对电网稳定影响也较大。而在交直流混合系统中，一旦交流线路发生三相短路故障，交直流混合系统的稳定性将如何变化就成为一个非常重要的问题。对于直流输电线路，由于其传输功率大，因此一旦发生故障，势必对整个交直流混合系统的稳定性产生重大影响，因而对于直流系统在发生故障时的系统稳定情况，已经成为交直流混合系统稳定问题仿真分析的重点。因此在稳定分析中，我们主要针对交流线路三相短路，直流线路功率反向和直流线路闭锁三种情况进行仿真分析。

对各种稳定问题采用如下判据：

(1)暂态功角稳定。系统故障后在同一系统中的任意两台机组相对角度摇摆呈同步减幅振荡。

(2)暂态电压稳定。电压低于 0.75 pu 的持续时间不大于 1 s。

(3)频率稳定。在切机、切负荷后,频率不高于 52.5 Hz 且不低于 47.5 Hz。

(4)动态稳定。系统任一元件故障，保护、开关正确动作，或系统发生小扰动时，系统阻尼比大于 0.05，即振荡 7 次后振荡幅度减至 10%。

满足以上 4 条判据则系统判为稳定。

2.2.1 交流线路三相短路故障

母线 BUSA 到 BUSD 间交流线路 1 发生三相短路故障，0.1 s 后三相短路故障消失。在这种情况下，系统功角曲线如图 3 所示，系统在功角振荡后能够保持稳定。但是三相短路故障时对直流输电的电压电流都有一定的扰动，如图 4、图 5 所示大约 2 s 后才恢复到正常水平。由此可见，短时间的交流线路三相短路对于交直流系统的稳定性影响不大，但

是其对于直流线路电流电压的影响应加以注意。

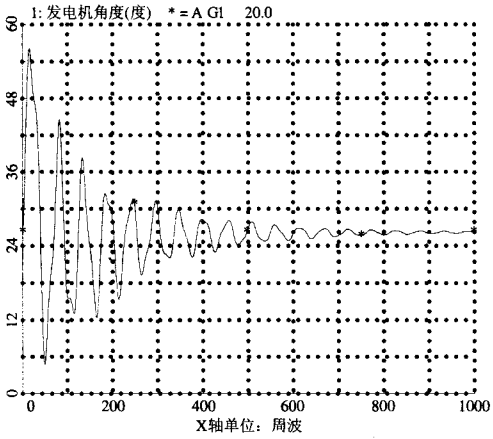

图 3　交流线路三相短路时系统功角曲线

Fig.3 System angel curve when three-phase short circuit happened in AC transmission line

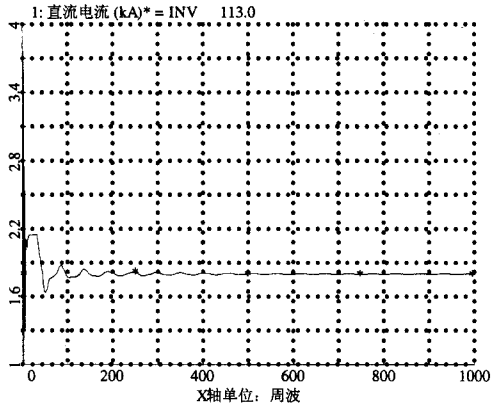

图 4　交流线路三相短路时直流电流

Fig.4 DC current when three-phase short circuit happened in AC transmission line

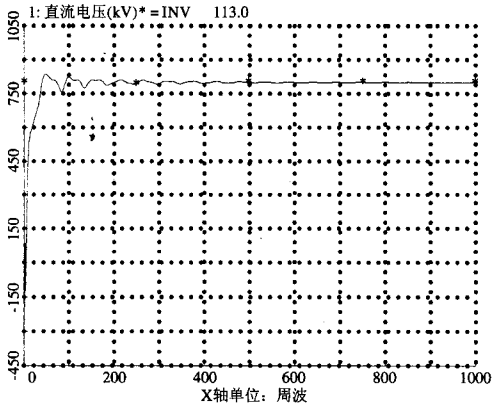

图 5　交流线路三相短路时直流电压

Fig.5 DC voltage when three-phase short circuit happened in AC transmission line

2.2.2 直流线路功率反向

设定系统发生直流线路功率反向，持续时间为 4 个周波，之后直流输电线路恢复正常运行。在这种情况下，系统功角及电压曲线如图 6 所示。若直流线路功率反向持续时间为 5 个周波，则系统功角及电压曲线如图 7 所示。由仿真结果可见，如果直流线路功率反向持续时间小于 5 个周波，则系统能够保持稳定；若持续时间大于 5 个周波，系统将失稳。因此，当有紧急情况需要直流线路功率反向或者因故障出现此问题时，交直流系统在短时间内可以保持其系统稳定。

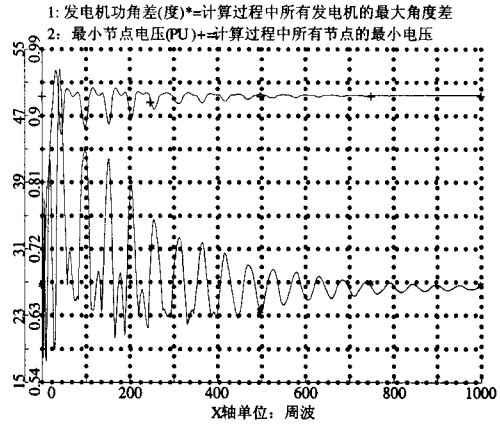

图 6　4 周波时交直流系统电压及功角曲线

Fig.6 AC/DC system voltage and angel curve after 4 cycles

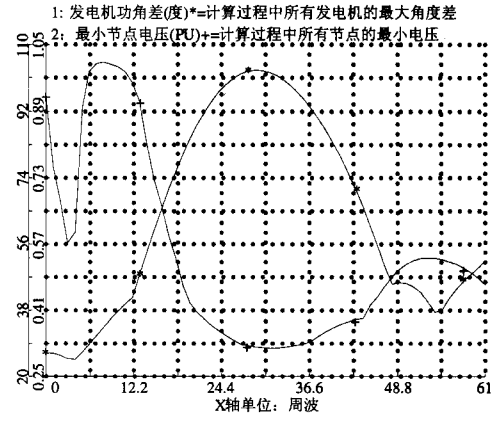

图 7　5 周波时交直流系统功角及电压曲线

Fig.7 AC/DC system voltage and angel curve after 5 cycles

2.2.3 直流线路闭锁

设定系统在 0 s 时发生直流线路闭锁故障，3 个周波后故障消失，其系统功角及电压曲线如图 8 所示，若其故障于 4 周波后消失，则系统功角及电压曲线如图 9 所示。由图可知当故障在第 4 周波前消失时，交直流混合系统能够保持其稳定性，否则，

系统将失稳。由此可见如果直流控制系统及其保护措施反应及时，系统将能够保持其稳定。

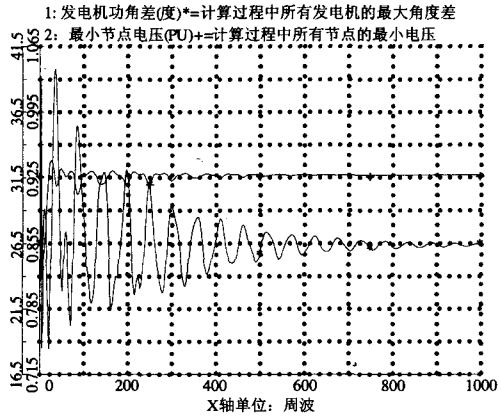

图 8　3 周波时交直流系统功角及电压曲线

Fig.8 AC/DC system voltage and angel curve after 3 cycles

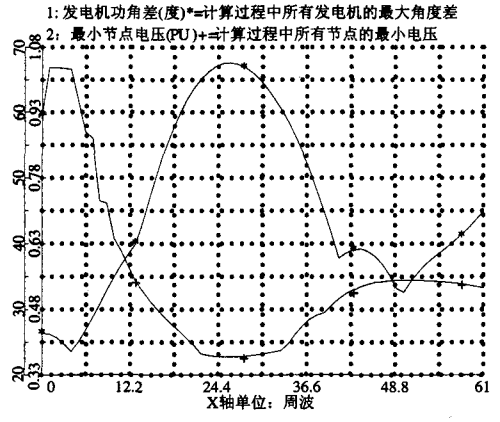

图 9　4 周波时交直流系统功角及电压曲线

Fig.9 AC/DC system voltage and angel curve after 4 cycles

当系统发生直流闭锁故障不能消除时，则需要通过切机的方式来保持系统稳定。对发电机的切机值越大，则发电机频率越低，容易导致系统频率过低而失稳；而如果切机发电量过小，则又达不到保持系统稳定的效果。对直流闭锁故障，我们在直流闭锁后 0.1 s 时对发电机 B G1 切机 330 MW，此措施下系统功角及频率稳定性如图 10 所示。由图可见，此时系统能够保持稳定。如果在直流闭锁后 0.1 s 对发电机 B G1 切机 1 030 MW，系统功角及频率稳定曲线如图 11 所示。由图可见，当切机 1 030 MW 时，系统功角及电压均能保持稳定，而频率最低为 47.506 4 Hz，达到了频率稳定要求的下限。而当切机数值为 1 040 MW 时，系统频率将低于 47.5 Hz，不能保持稳定。

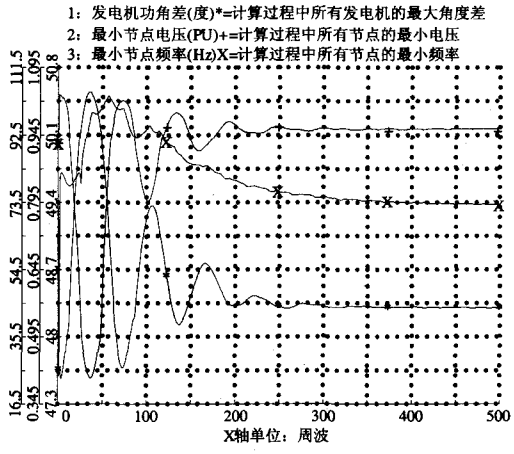

图 10　切机 330 MW 时交直流系统功角、电压及频率曲线

Fig.10 AC/DC system angel、voltage and frequency curve when tripping 330MW

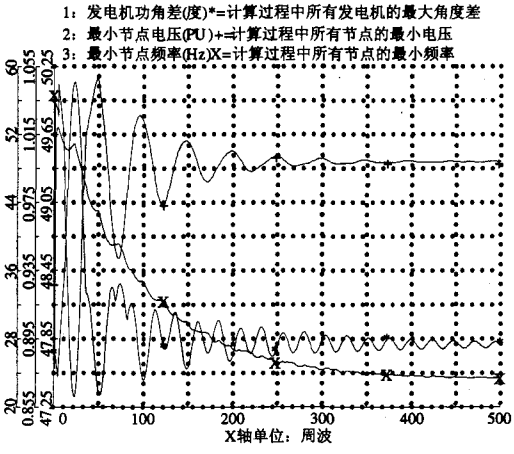

图 11　切机 1 030 MW 时交直流系统功角、电压及频率曲线

Fig 11 AC/DC system angel、voltage and frequency curve when tripping 1 030 MW

通过仿真可知，在直流线路发生闭锁的时候，通过切机能够保持系统稳定。但是切机的大小对于系统的稳定性有很大的影响。在本仿真模型中，对 B G1 切机时，如果所切发电量少于 330 MW，将不能保持系统稳定性。当切机大于 330 MW 时，所切发电量越大，系统中节点最低频率越小。当切机值超过 1 030 MW 时，系统中节点最低频率将低于 47.5 Hz，系统不能保持暂态稳定。

3　结论

通过对交直流模型的仿真研究，可以对交直流系统的故障下系统稳定情况加以分析。对交直流系统几种主要故障的分析，主要得出以下结论：

（1）对于交流线路三相短路故障，在 0.1 s 后故障消失，由于直流输电线路的控制和功率调制，

交直流系统能够保持系统稳定。

（2）直流线路发生反相故障，若故障持续时间大于 5 个周波时，交直流系统将失稳。因此，对于直流输电线路的控制系统需要加以完善，防止此故障的出现。

（3）直流闭锁持续时间小于 4 个周波，系统将可以保持稳定。对比于直流功率反向持续时间小于 5 个周波系统可以保持稳定，直流闭锁对系统的影响是直流故障中影响最大的，需要密切加以关注。对于直流闭锁故障，切机是有效的保持系统稳定的方式，但是切机的数值需要加以考虑，否则会导致频率太低，从而导致系统失稳。

参考文献

[1] 周双喜，朱凌志，郭锡玖，等.电力系统电压稳定性及其控制[M] .北京：中国电力出版社，2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. The Control and Stability of Power System[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2004.

[2] Lee D, Aik H, Andersson G. Voltage Stability Analysis of Mult-infeed HVDC System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12 (3) : 1309-1318.

[3] Aik, D.L.H, Andersson, G. Influence of Load Characteristics on the Power/voltage Stability of HVDC Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998,13(4): 1445-1452.

[4] 毛晓明，管霖，张尧，等.含有多馈入直流的交直流混合电网高压直流输电建模研究[J].中国电机工程学报.2004，24（9）：68-73.
MAO Xiao-ming, GUAN Lin, ZHANG Yao, et al. Researches on HVDC Modeling for AC/DC Hybrid Grid with Multi-infeed HVDC[J].Journal of Chinese Electrical Engineering Science,2004,24(9):68-73.

[5] 周双喜，吕佳丽，张元鹏.直流输电对电压稳定性的影响[J].清华大学学报（自然科学版），1999，39（3）：4-7.
ZHOU Shuang-xi, Lü Jia-li, ZHANG Yuan-peng. Influence of HVDC on Voltage Stability[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(3):4-7.

[6] 丁青青，王树民，郭静波.HVDC 非仿射非线性系统的定电流定电压控制[J].清华大学学报（自然科学版），2004，44（10）：1325-1328.
DING Qing-qing, WANG Shu-min, GUO Jing-bo. Non-affine, Nonlinear Controller for HVDC Systems for Constant DC Currents and DC Voltages[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(10):1325-1328.

[7] 刘道伟，谢小荣，穆钢，等.基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J].中国电机工程学报，2005，2（1）：13-17.
LIU Dao-wei, XIE Xiao-rong, MU Gang, et al. An On-line Voltage Stability Index of Power System based on Synchronized Phasor Mesurement[J]. Journal of Chinese Electrical Engineering Science, 2005, 2(1):13-17.

[8] 刘崇茹，张伯明，孙宏斌，等.多种控制方式下交直流系统潮流算法的改进[J].电力系统自动化，2005，29（21）：25-31.
LIU Chong-ru, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al. Advanced AC-DC Power Flow Algorithm Considering Various Controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 25-31.

收稿日期：2008-03-24；　修回日期：2008-04-25

作者简介：

苏　黎（1981-），男，硕士，主要从事电力系统及其自动化的研究；E-mail:tnknsony@163.com

黄　震（1970-），男，博士生，主要从事电力系统及其自动化方面的研究；

蒋　伟（1979-），男，博士生，主要从事电力系统及其自动化方面的研究。

（上接第 31 页　continued from page 31）

XU Yu-hua. The Middle and Long Term Predictive Methods for Electric Power Load[J]. Ningxia Power, 2007, (4): 6-7.

[11] 康重庆,夏青,沈瑜,等.电力系统负荷预测的综合模型[J].清华大学学报（自然科学版）.1999,39（1）:8-11.
KANG Chong-qing, XIA Qing, SHEN Yu, et al. Integrated Model of Power System Load Forecasting[J]. Tsinghua Univ（Sci&Tech）, 1999,39(1): 9-11.

收稿日期：2008-03-19；　修回日期：2008-06-23

作者简介：

苗增强（1982-），男，硕士研究生，主要从事电力市场和电网规划方向研究；E-mail:mzq2006@126.com

武宏波（1976-），女，从事继电保护和综合自动化系统研究和管理工作。