

基于 Matlab 的交直流混合输电系统的仿真研究

钟庆, 张尧, 杨金明, 武志刚

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 利用 SimPowerSystems 工具箱建立了一个两交一直的交直流混合输电系统模型, 并对交流故障、直流故障下的系统稳定性和动态响应进行了分析, 并给出了仿真结果。通过与交流输电系统仿真结果进行了比较, 可以看出, 由于直流输电系统的调节速度快和短时过载能力强的特点, 所以交直流输电系统具有更好的稳定性和响应速度。

关键词: 稳定; 交直流混合输电; Matlab

中图分类号: TM721.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)08-0040-05

0 引言

西电东送、区域联网是我国能源发展的重要战略, 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。根据我国联网规划, 南方电网将在 2005 年形成“五交三直”的西电东送输电通道, 到 2010 年, 我国将基本形成北、中、南 6 个跨区互联电网, 预计 2010~2020 年期间, 基本形成覆盖全国的统一交直流联合电网。我国将成为世界上直流输电线路最多、直流输送容量最大的国家。由此形成的大规模交直流电力系统, 其运行的复杂性和难度在国际上是少见的。因此, 研究大规模交直流电力系统的仿真技术具有特别重要的现实意义^[1]。

关于电力系统机电暂态仿真程序, 目前国际上比较著名的有美国 PTI 公司的 PSS/E、西门子公司的 NETOMAC、ABB 公司的 SMPOW 和加拿大 Powertech 公司的 DSA POWER TOOLS 等, 以及一些大型的实时仿真软件, 如 RTDS 和 Hypersim 等, 国内应用比较普遍的程序有中国电力科学研究所的 BPA 和 PSASP 程序。文献 [2] 就 NETOMAC 在直流输电系统中的应用有详细的论述。

SimPowerSystems 是 Matlab 中专门用于电力系统动态仿真的工具箱, 它支持用户利用其内部的一些工具来建立自定义模型, 具有强大的开发功能, 并能准确地反映该系统的动态特性。具有使用灵活、

界面友好等特点, 并有丰富的帮助系统和 Demo 系统, 能够方便工程人员利用其对电力系统进行离线的分析和计算^[3]。文献 [4] 针对 6 脉动 HVDC 系统建立了 Simulink 模型, 并对直流线路对地短路时的暂态过程进行了仿真。文献 [5, 6] 对 12 脉动 HVDC 系统建立了模型, 并对交流系统单相接地故障和直流系统对地短路故障的暂态过程进行了仿真。本文利用 Simulink 中的 SimPowerSystems 工具箱和 Demo 中的 12 Pulse HVDC 模型, 建立了交直流混合输电系统的仿真模型, 对交流系统三相短路故障和直流对地短路故障情况下系统的暂态响应进行了仿真, 描述了交直流系统之间的相互作用关系, 并与纯交流输电系统进行了比较, 说明了直流输电系统能有效提高系统的稳定性, 并具有响应快速的特点, 同时该研究也为后面关于交直流输电系统的控制问题、稳定问题等研究提供了一个方便的仿真工具和模型。

1 SimPowerSystems 简介

由于电力系统是一个包含有电路和机电装置(如电动机和发电机)的复杂非线性系统, 而且工程研究人员还需要在电力系统中使用电力电子装置和控制装置以提高系统的性能, 这一切都需要有一个良好的仿真工具来帮助工程通过仿真来了解系统的状态和特性。SimPowerSystems 是 Simulink 下专门用于电力、电子电路、控制仿真的工具箱。它能帮助研究人员在 Simulink 环境下通过拖放 (Click and drag) 简单快速地建立电力系统仿真模型。通过 SimPowerSystems 不但可以快速地建立系统的电路拓扑, 同时也能对电路的控制进行详细的分析^[7]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50337010); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20020561004); 华南理工大学自然科学基金青年基金资助项目 (5050390)

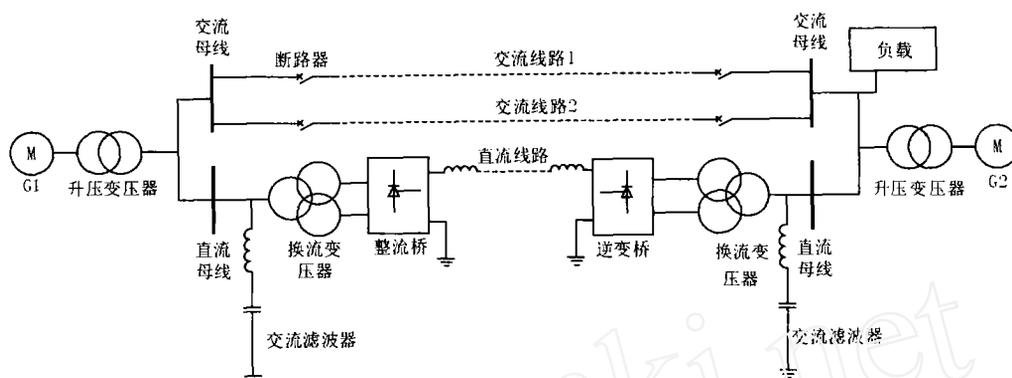


图 1 仿真的交直流混合输电系统

Fig 1 Simulation of AC/DC hybrid transmission systems

SimPowerSystem s具有丰富的模型库和 Demos,模型库中包含有多种典型的电力设备模型,如变压器、线路、发电机、负载和电力电子装置等模型,还包括各种控制模块和测量模块,能够进行电量的测量、FFT、P控制、dq变换等分析工作,只要能够熟练应用这些元件,就可以容易地进行建模。同时 Demos内还提供有三相输电系统、暂态分析、同步发电机模型、直流输电等模型,为工程人员提供建模的参考。但是由于 Matlab的计算量大,所以计算速度较慢,无法满足实时计算的要求,仅仅进行离线计算分析和仿真。为实现与其他系统的接口,Matlab提供 RTW 模块,能与下层的硬件进行连接,提高计算速度,满足实时计算的要求。如 Hypersim 软件就提供与 Matlab的接口,能够在 Simulink内建立控制模型,由 RTW 模块编译下载给 Hypersim,由其实现实时的计算和仿真。

2 AC/DC系统模型

2.1 系统模型

本文建立了一个交直流混合输电系统的模型,如图 1所示。系统包括两个区域,发电机 M1区域由两条交流输电线路和一条直流线路向发电机 M2区域输电。发电机 M1、M2包含有励磁控制和 PSS控制,机端电压为 13.8 kV,通过升压变压器变成 500 kV,向系统供电。区域间的距离为 700 km,在 M2区域包括一个 5 000 MW 的负载,由 M1和 M2供电,通过改变 M1和 M2的额定功率,可以改变区域间的传输功率。另外系统中还包含有三相断路器、三相故障和直流系统单相接地故障等,以模拟交流系统和直流系统的故障,采用 Simulink建立该系统的模型,如图 2所示。

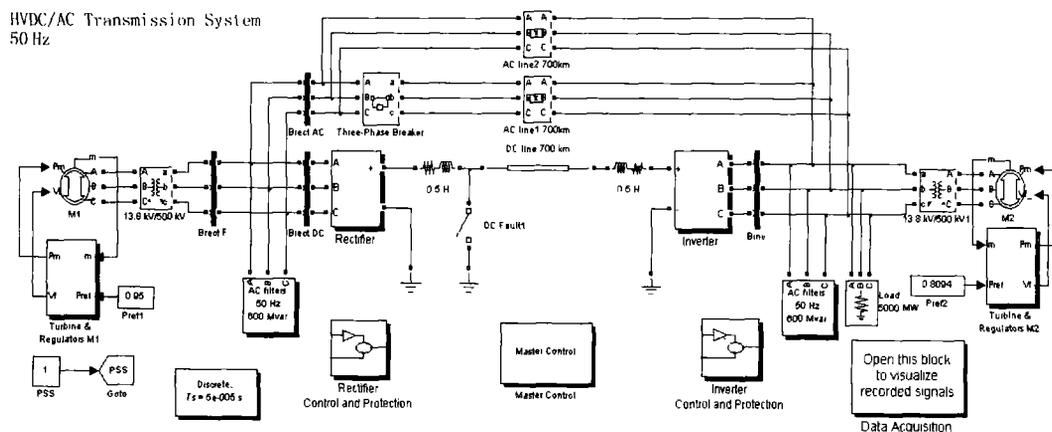


图 2 系统的 Simulink模型

Fig 2 Simulink model of AC/DC transmission systems

2.2 直流系统模型

文中直流模型是在 Demos系统中的 12pulse

HVDC的基础上进行修改而来,该系统包括整流模块、逆变模块、滤波电抗器、直流线路、交流滤波器、

整流器控制模块、逆变器控制模块和主控制模块。直流系统的额定传输容量为 1 000 MW, 两侧额定电压为 500 kV, 滤波电抗器为 0.5 H, 直流线路长为 700 km。在换流站设置的无功补偿和滤波装置包括一个 500 Mvar 的电容器和 150 Mvar 的 11 次滤波器、13 次滤波器和高通滤波器。直流系统的控制采用传统的分层控制结构, 包括主控层、极控层和阀控层, 其中极控层和阀控层包括在整流(逆变)控制模块内部。主控制器模块主要给定极控层的电流给定信号、系统启动和关断信号。整流侧控制器包括直流系统的保护模块、控制模块和触发模块, 其工作模式可以为定电流控制、最小触发角控制、定电压控制和 VDCOL 控制等。逆变侧控制模块与整流侧模块类似, 但其工作模式还包括定熄弧角控制。该直流模型详细地描述了 HVDC 系统各种工作模式和动态, 能准确描述各种状态下的直流输电系统工作情况。

3 仿真结果

仿真采用离散定步长算子, 仿真步长 $T_s = 50 \mu\text{s}$, 分别对以下几种情况进行仿真和比较。

1) M1 的额定功率为 2 000 MW, M2 的额定功率为 4 000 MW, 模拟 3.9 s 时交流线路 1 发生三相短路故障, 故障后交流线路 1 跳开, 并隔离故障, 故障切除时间为 100 ms。如果系统为三条交流线路从 M1 区域向 M2 区域送电时, 系统将会失稳, M1 和 M2 之间的功角曲线如图 3 所示。如果采用一条直流线路取代一条交流线路, 成为如图 1 所示的系统时, 并在交流故障后, 通过直流系统的短时过载能力, 在 4 s 提高直流系统输送功率为 1.2 倍的额定功率, 由于直流输电系统长距离大容量的输送功率的特点, 可以保证系统不会失稳, 其功角曲线如图 4 所示, 两机的角速度变化如图 5 所示, 直流系统在增加 1.2 倍额定传输功率后的响应情况如图 6 所示。

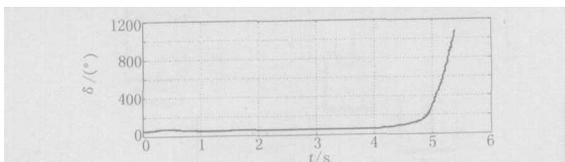


图 3 纯交流系统功角

Fig 3 Power angle of AC transmission systems

2) 改变 M1 的额定功率为 1 500 MW, M2 的额定功率为 4 500 MW, 减小系统长距离传输的功率, 故障情况和直流系统控制情况与仿真 1 相同。此时

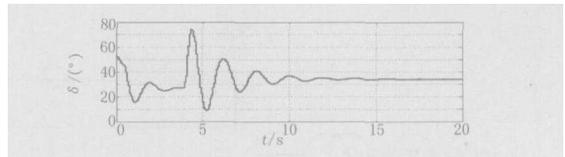


图 4 交直流混合系统的功角

Fig 4 Power angle of AC/DC transmission systems

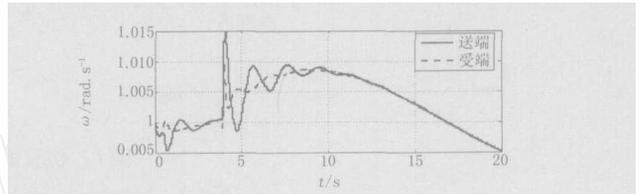


图 5 发电机的角速度

Fig 5 of the two generators

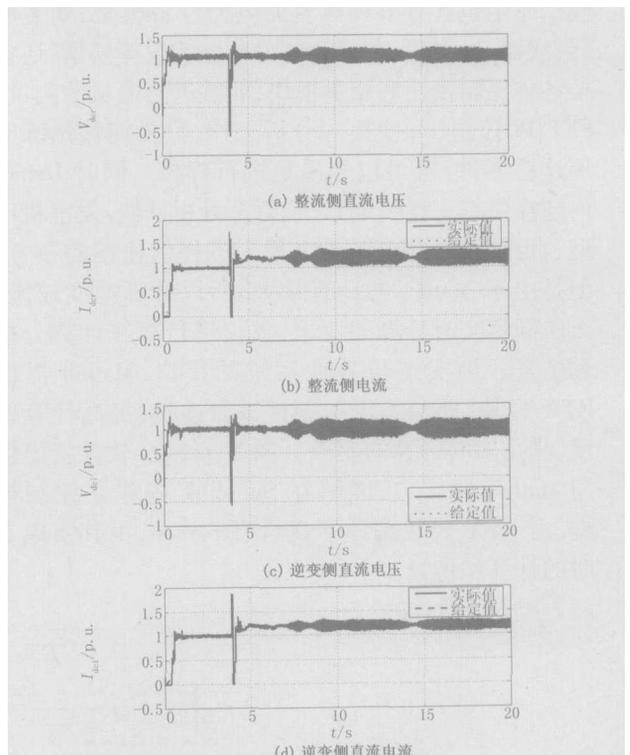


图 6 直流系统的动态响应

Fig 6 Dynamics of HVDC systems

交流系统能够保持稳定, 其功角曲线如图 7 所示。交直流输电系统的功角如图 8 所示。由仿真结果比较可以看出, 通过直流系统的快速调节能力和短时过载能力, 能快速使系统恢复到稳定工作点, 交流系统约在 12 s 处恢复稳定, 而交直流系统在 8 s 处就可恢复稳定。

3) 直流系统接地故障对整个系统的影响。设定直流系统在 3.95 s 时直流系统发生单相接地故障, 故障持续时间为 50 ms, 观察其对整个系统的

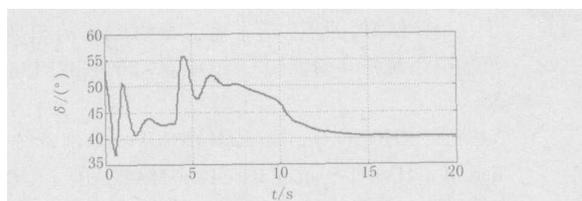


图 7 纯交流系统功角

Fig 7 Power angle of AC transmission systems

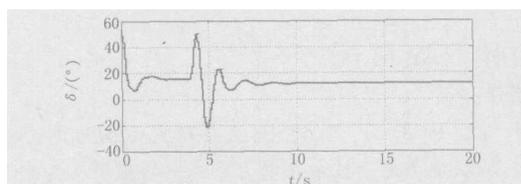


图 8 交直流混合系统的功角

Fig 8 Power angle of AC/DC transmission systems

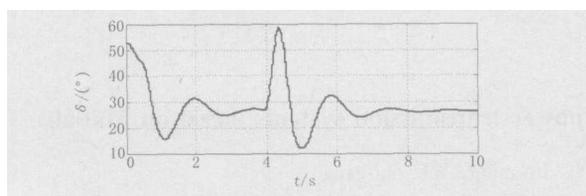


图 9 系统功角

Fig 9 Power angle

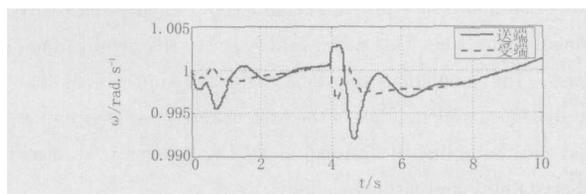


图 10 发电机的角速度

Fig 10 of the two generators

影响及直流系统保护和控制装置的动态响应。故障发生后,系统的功角如图 9 所示,两机的角速度如图 10 所示,系统维持稳定,说明通过直流系统的保护和控制单元的作用,直流系统接地故障没有对系统的稳定造成影响。故障发生后在保护和控制模块的作用下直流系统的动态响应如图 11 所示。

4 结论

SimPowerSystem 是 Matlab 中关于电力系统仿真的有力工具,可以进行电力系统的离线分析和计算,与其他仿真工具相比,具有使用方便灵活,用户界面友好,用户定制功能强等特点,尤其是其丰富的在线帮助和 Demo 系统更是有利于简单地建立电力系统仿真模型。通过其对交直流输电系统的仿真,能够进一步验证直流输电系统在电力系统中起到的作

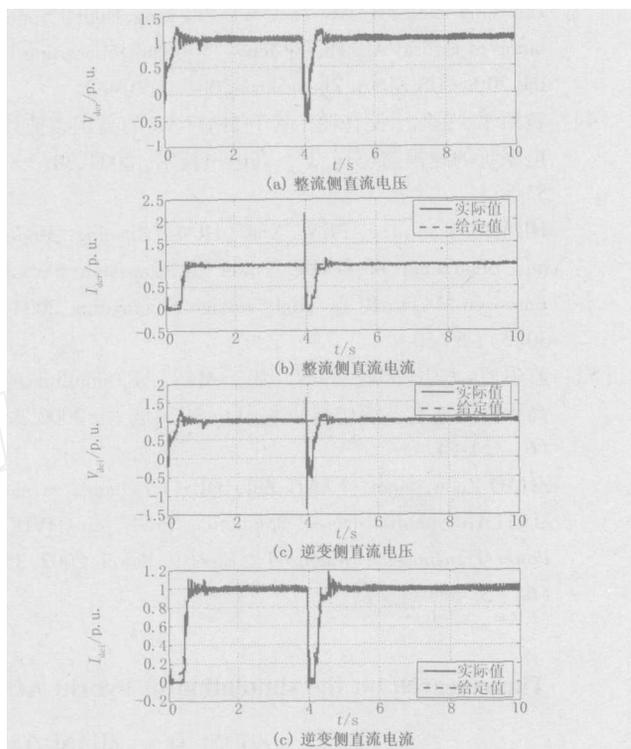


图 11 直流系统的动态响应

Fig 11 Dynamics of HVDC systems

用。直流系统具有调节快速和可短时过载的优点,所以当直流输电线路和交流混合输电线路混合使用将有利于维持系统的稳定,交流系统失稳时减小功角振荡的时间,响应快速,在系统故障后迅速恢复稳定。同时直流系统自身发生故障时,能够通过直流系统的保护和控制动作,迅速隔离故障,并在故障消失后快速恢复输电,而不会影响交流系统稳定性。

参考文献:

- [1] 徐政,蔡晔,刘国平.大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J].电力系统自动化,2002,26(15):4-8
XU Zheng, CAI Ye, LIU Guo-ping Some Problems in the Simulation of Large-scale AC/DC Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15): 4-8
- [2] 杨卫东,徐政,韩祯祥. NETOMAC 在直流输电系统仿真研究中的应用[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(4): 10-14
YANG Wei-dong, XU Zheng, HAN Zhen-xiang Application of NETOMAC on HVDC System Simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(4): 10-14
- [3] 林凌霄,张尧,武志刚. 交直流混合电力系统的数字仿真[A]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十届学术年会论文集. 郑州:2004. 460-462

- LN Ling-xue, ZHANG Yao, WU Zhi-gang Digital Simulation of Hybrid AC/DC Systems[A]. The Proceeding of the 20th CUS-EPSS. Zhengzhou: 2004. 460-462
- [4] 黄绍平, 彭晓, 浣喜明. 基于 MATLAB 的高压直流输电系统的建模与仿真 [J]. 高电压技术, 2004, 30 (3): 53-56
- HUANG Shao-ping, PENG Xiao, HUAN Xi-ming Model and Simulation of HVDC Power Transmission System Based on MATLAB [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30 (3): 53-56
- [5] 赵中原, 方志, 邱毓昌, 等. 基于 MATLAB/Simulink 的高压直流输电系统仿真研究 [J]. 中国电力, 2002, 35 (6): 51-54
- ZHAO Zhong-yuan, FANG Zhi, QIU Yu-chang, et al MATLAB/Simulink-based Simulation Study on HVDC Power Transmission System [J]. Electric Power, 2002, 35 (6): 51-54
- [6] 于飞, 钟秋海, 张望, 等. 基于 MATLAB 的超高压直流输电系统仿真研究 [J]. 继电器, 2004, 32 (13): 31-35.
- YU Fei, ZHONG Qiu-hai, ZHANG Wang, et al Simulation of a HVDC System Based on MATLAB [J]. Relay, 2004, 32 (13): 31-35.
- [7] SimPowerSystems for Use with Simulink (r) — User's Guide, Version 4 [Z]. The Mathworks, 2005.

收稿日期: 2005-09-15

作者简介:

钟庆 (1978 -), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统及其自动化、电力电子技术在电力系统中的应用及其控制技术; E-mail: epqzhong@scut.edu.cn

张尧 (1948 -), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场、电网规划。

The research on the simulation of hybrid AC/DC power transmission systems based on Matlab

ZHONG Qing, ZHANG Yao, YANG Jin-ming, WU Zhi-gang

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The researches on the simulation of HVAC/DC hybrid transmission systems are the basis of the analysis about the stability and control of the systems. SimPowerSystems in Matlab is a modern design tool that allows scientists and engineers to rapidly and easily build models that simulate power systems. It can be operated easily with friendly interface. This paper builds a AC/DC hybrid transmission systems including two AC lines and one DC line on SimPowerSystems. The simulations are done under the suppositions that there were three-phase fault in AC line and grounding fault in DC line. The dynamics and stability of the systems are presented by the result of the simulations. The speed of regulation of HVDC systems is faster and the ability of overload of HVDC systems is stronger than AC systems, so the HVAC/DC hybrid transmission systems are of higher stability and faster reaction.

This paper is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010), Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20020561004), and National Natural Science Youth Foundation of South China University of Technology (No. 5050390).

Key words: stability; AC/DC hybrid transmission systems; Matlab

(上接第 23 页 continued from page 23)

Study and design of traveling wave fault location hardware system

WU Da-li, YN Xiang-gen, ZHANG Zhe, ZHANG Xiao-bo

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to shortages of traveling wave fault location running in fact, this paper deeply analyses the needs of traveling wave fault location system. The hardware system scheme is put forward, which can satisfy the needs of traveling wave fault location such as high-speed acquisition, mass data storage and double-ended data synchronization.

Key words: traveling wave fault location; high-speed acquisition; mass data storage; global positioning system (GPS)