

基于 Matlab/Simulink 的直流输电系统的建模与仿真

赵晓娜¹, 方 玉², 李天明¹

(1. 电子科技大学, 四川 成都 610054; 2. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:介绍了高压直流输电 (HVDC) 系统的结构与原理。利用 Matlab 中的 Simulink 对 HVDC 系统进行建模, 分析其稳态特性, 并对几种常见故障进行了仿真, 得出相应的仿真波形, 验证了模型的有效性。

关键词:高压直流输电系统; Matlab/Simulink 仿真模型

Abstract The basic structure and principle of high-voltage direct current (HVDC) transmission system are introduced briefly. Then a simulation model of HVDC system using Matlab/Simulink is established. With this model, the performances of its steady state are analyzed and several common faults are studied. Simulation results show the validity of the model.

Key words HVDC transmission system; Matlab/Simulink simulation model

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0022-03

0 引言

与交流输电相比, 高压直流输电 (HVDC) 具有线路输送容量大、造价低、损耗小、电力系统间的非同步联网能力强等优点, 而且, 直流输电不存在交流输电的稳定问题, 有利于远距离大容量送电^[1]。

自从 20 世纪 80 年代末以来, 中国高压直流输电技术的研究和发展取得了突飞猛进的提高, 目前已投运 10 个直流输电工程, 包括舟山、葛南、天广、三常等工程。为实现“西电东送”的战略规划, 中国正在积极推进包括 ±660 kV、±800 kV、±1 000 kV 特高压 HVDC 工程的建设。近期中国规划发展的 HVDC 工程主要包括内蒙及陕甘宁地区的煤电通过高压直流或特高压直流向京津塘、山东等地输电, 四川水电向华东、华中地区特高压直流输电等。

值得一提的是, 德阳—宝鸡 ±500 kV 直流输电工程为四川电网与西北电网的联网工程, 已作为国家电网公司支援四川灾后重建的重点项目, 预计在

2009 年单极投运, 线路工程在 2009 年完工。

可以看到, 直流输电将成为中国电网的重要组成部分^[2]。在此背景下, 研究 HVDC 的结构、运行原理及控制方法, 对 HVDC 进行建模与仿真, 分析系统的稳态、动态特性等显得非常重要。下面利用 Matlab 中的 Simulink 对 HVDC 进行建模, 并在此模型基础上进行了系统的稳态、直流线路故障、逆变器交流侧 a 相接地故障及 a、b 两相接地故障仿真, 得出相应的仿真波形, 验证了 HVDC 模型的有效性。

1 HVDC 的结构与原理^[3]

HVDC 自 1954 年诞生以来, 其基本的工作原理变化不大, 如图 1 所示的简单两端 HVDC 输电系统包括两个换流站、直流输电线路及两端交流系统 I 和 II。当系统 I 向系统 II 送电时, 换流站 1 运行于整流状态, 把系统 I 送来的三相交流电变换成直流电, 经直流线路送到换流站 2。换流站 2 则运行于逆变状态, 把直流电变换为三相交流电送入系统 II。直流输

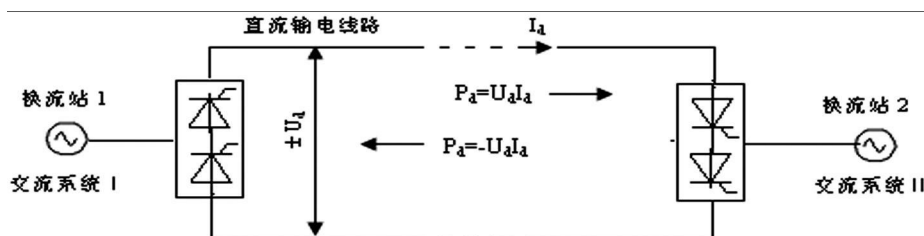


图 1 HVDC 输电的基本原理

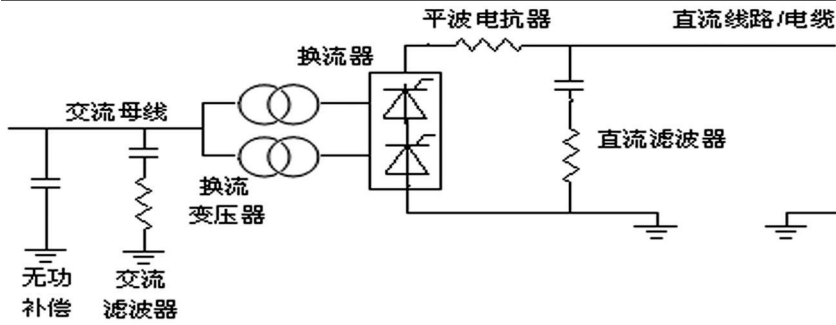


图 2 基于晶闸管换流站的基本结构

电两端的直流电压及其间的直流电流可以通过控制换流站内的换流器来进行快速调节,通常是由逆变站控制直流电压,整流站控制直流电流(或功率),从而实现可控的输送功率。直流输电线路不传输无功功率,但基于晶闸管的整流器和变换器在进行换流时,均需一定量的无功功率。

换流站是 HVDC 输电系统的核心部分,图 2 所示为一个基于晶闸管换流站的基本结构,主要包括以下几个部分。

(1)换流器:由晶闸管组成,用于整流或逆变。换流器一般采用三相桥式(有单、双桥两类)电路,每桥有 6 个桥臂(即 6 脉冲换流器),如天生桥—广州±500 kV HVDC 系统晶闸管块的额定电压为 8 kV,用 78 个块串联组成阀体。

(2)换流变压器:将送端交流系统电压变为整流桥所需要的电压,将逆变器输出的电压变为受端交流系统所需要的电压。

(3)平波电抗器:减小直流电压、电流的波动,受扰时抑制直流电流的上升速度。

(4)滤波器:交流侧滤波器一般装在换流变压器的交流侧母线上,主要作用是抑制换流器产生的注入交流系统的谐波电流,同时部分补偿换流器吸收的无功功率。直流侧滤波器一般并联接于直流极线上,主要

作用是抑制换流器产生的注入直流线路的谐波电流。

(5)无功补偿:通常由静电电容器(包括滤波电容)、静止无功补偿器供给,为直流线路提供无功补偿。

无论是整流器还是逆变器,适当地控制整流器的触发延迟角 α 和逆变器的触发越前角 β 便可以得到各种电压 电流特性。HVDC 系统中可通过调节 α 和 β 来控制线路上的电压、电流和传输的功率。一般情况下,换流站的控制方式是整流侧采用定直流电流控制方式,逆变侧采用定关断越前角控制方式和定直流电压控制方式^[4]。

2 HVDC 系统仿真模型

在 Matlab/Simulink 环境下,利用电力系统模块(power system block PSB)中的仿真模块对 HVDC 系统及控制器建立仿真模型。这里用 12 脉冲晶闸管变换器实现对 HVDC 系统的建模^[5],模型如图 3 所示。

图 3 中,500 kV、5 000 MV·A、50 Hz 的交流系统通过 1 000 MW 的直流通线与 345 kV、10 000 MV·A、50 Hz 的交流系统相连。两个交流系统相角均为 80°,基频为 50 Hz 并带有 3 次谐波。两个变换器通过 300 km 的线路和 0.5 H 的平波电抗器连接起

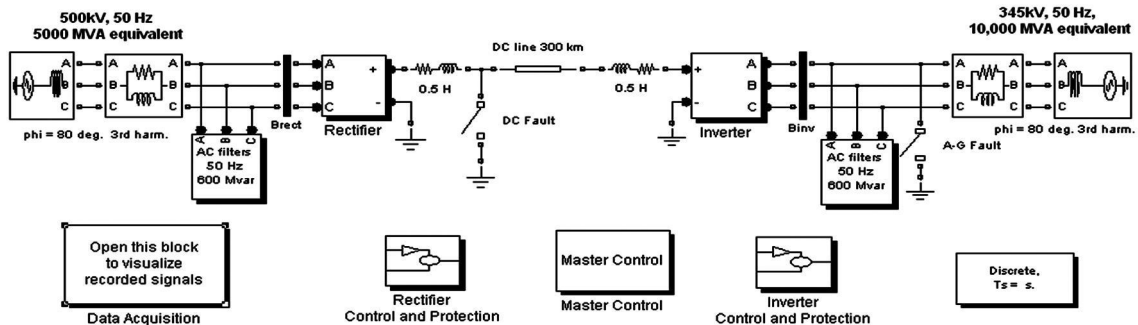


图 3 HVDC 仿真模型图

来,两个断路器模块分别用来模拟整流器直流侧故障和逆变器交流侧故障。打开图 3 中的“滤波器”子系统,如图 4 所示。交流滤波器电路由 150 Mvar 的无功补偿设备、高 Q 值 (100) 的 11 次和 13 次单调谐滤波器、低 Q 值 (3) 的高通滤波器 (24 次谐波以上) 组成。

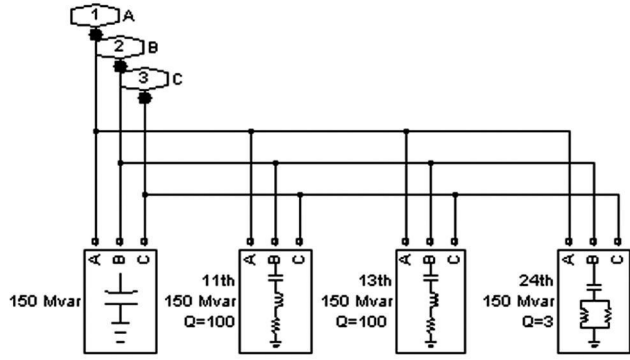


图 4 交流滤波器模型

3 仿真结果分析

基于图 3 所示的模型,分别对系统稳态、直流线路故障、逆变侧 a 相接地故障和 a、b 两相接地故障的情况进行仿真,仿真结果如下。

3.1 稳态系统波形

仿真后的电压和电流波形如图 5 所示。图中 V_{dl} 表示直流侧线路电压, I_d 和 I_{dref} 分别表示直流侧线路电流和实际参考电流,均为标么值, α 为整流器的触发延迟角。可见,系统经过一段时间后能够稳定运行。稳态后,直流电压为 1.0 pu, 直流电流为 1.0 pu。

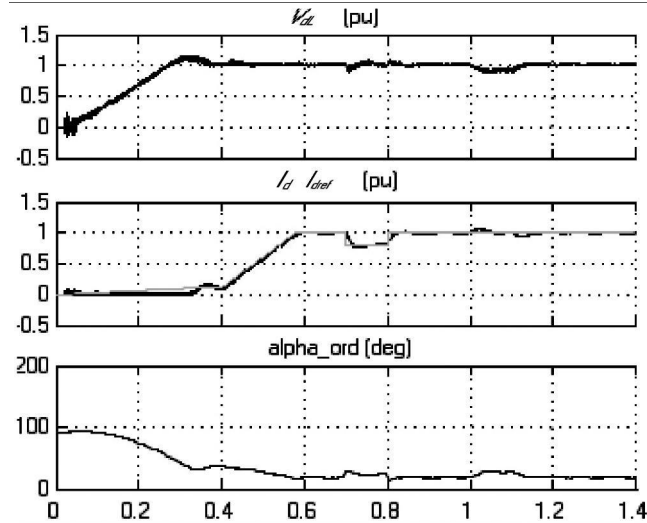


图 5 稳态仿真直流侧波形

3.2 直流线路故障

打开直流侧断路器模块,使其在 0.7 s 时导通,

0.75 s 时断开,接地时间为 0.05 s。整流侧相关波形,逆变侧交流电压和电流波形分别如图 6、7 所示。可见,故障时直流侧电流激增到 2.2 pu, 直流侧电压降到 0 值。通过 VDCOL 子系统的调制,参考电流下降到 0.3 pu, 因此故障发生后,直流侧仍有电流流通。t=0.77 s 时,触发延迟角被强制设为 166°, 整流器运行在逆变状态。直流侧线路电压变为负值,将线路上的能量反送入交流系统,导致故障电流在过零点时快速熄灭。t=0.82 s 时,解除触发延迟角的强制值,额定直流电压和电流在 0.5 s 后恢复正常。

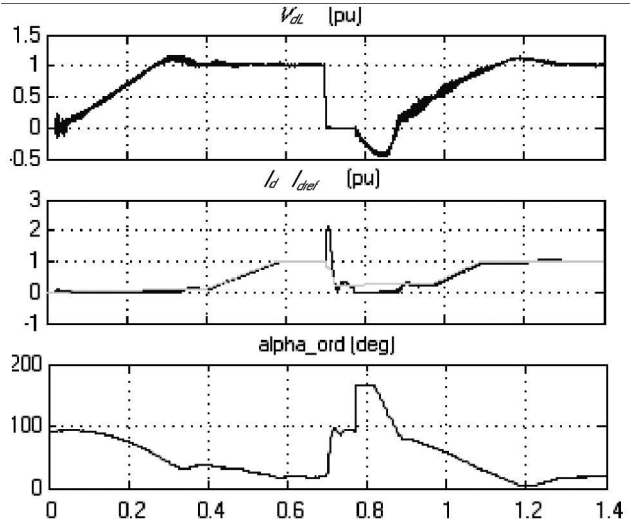


图 6 直流线路故障时整流侧波形

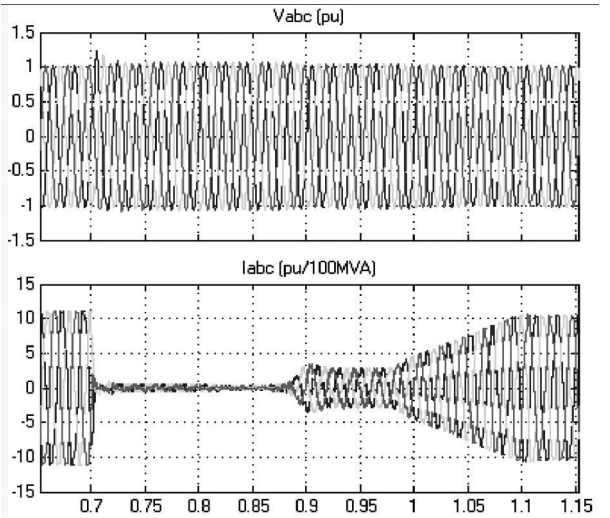


图 7 直流线路故障时交流部分波形

3.3 逆变侧 a 相接地故障

取消直流侧断路器导通动作,使逆变器断路器在 0.7 s 时导通,0.8 s 时断开,接地时间为 0.1 s。逆变侧的相关波形如图 8 所示。可见,故障导致直流电压和直流电流出现了振荡,故障开始时,逆变器两个阀

(下转第 33 页)

利电力企业管理协会, 1987.

- [2] 王财胜, 孙才新, 廖瑞金. 变压器色谱监测中的 BPNN 故障诊断法 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(5): 322-325.
- [3] 黄鞠名, 胡明华, 朱子述, 等. BP 网络在基于 DGA 变压器故障诊断中的应用 [J]. 高电压技术, 1996, 22(2): 21-23.
- [4] 史忠植. 神经网络计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1993.

- [5] 张萍萍, 姚万业, 杨明玉, 等. 基于改进 BP 算法的发电机组振动故障诊断技术 [J]. 华北电力大学, 2003, 30(6): 34-37.
- [6] Rumelhart D E, et al Learning Representation by BP Errors [J]. Nature(London), 1986(7): 149-154.
- [7] R. A. Jacobs Increased Rates of Convergence through Learning Rate Adaptation [J]. Neural Networks 1998, 1(4): 295-308.

(收稿日期: 2009-10-22)

(上接第 24 页)

进行换相时, 因预计关断的阀关断后, 在反向电压期间未能恢复阻断能力, 当加在该阀上的电压为正时, 又重新导通, 即出现了换相失败现象, 直流电流激增到 2 pu 。 $t=0.8 \text{ s}$ 时清除故障, VDCOL 将参考电流调节到 0.3 pu , 经 0.35 s 后系统恢复。

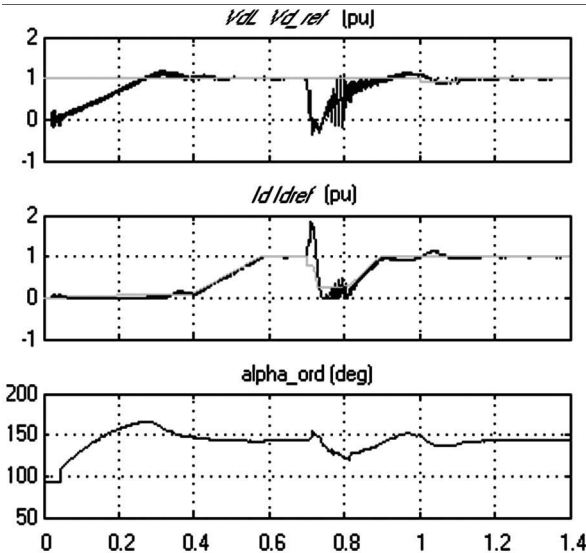


图 8 a 相接地故障波形

3.4 逆变侧 a b 两相接地故障

打开断路器模块, 使其在 0.7 s 时导通, 0.8 s 时断开, 整流侧交流电压和电流波形如图 9 所示。可见, 两相接地故障使整流侧交流电压和电流发生了一定的扰动, 交流电流的波动频率和幅度比较大。故障时, 交流电流值迅速增加, 之后逐渐下降为 0, 故障清除后经过小幅度波动恢复稳态。同样, 交流电压值在故障时有所增加, 但增加的幅度要小一些, 故障清除后也能够恢复稳态。

4 结论

直流输电已成为中国电网的重要组成部分, 所以

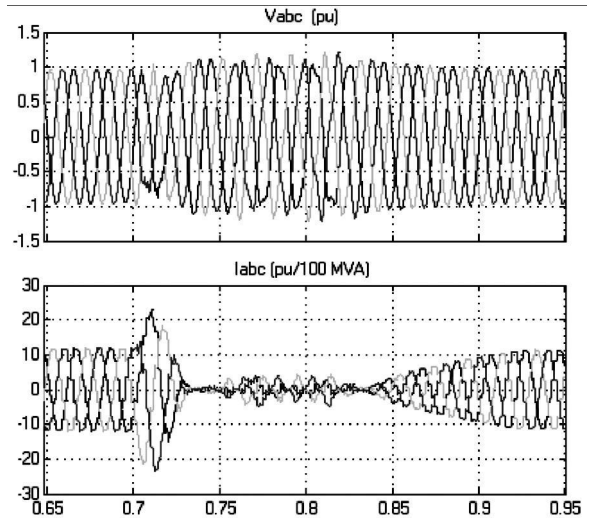


图 9 整流侧交流部分波形

HVDC 系统的暂稳态仿真对电力系统的研究、规划和运行等起着重要作用。前面利用 Matlab 的 Simulink 及 PSB 对高压直流输电系统建模, 并进行了稳态和一系列故障的仿真, 得出相应的波形。可见, 在 Matlab 环境下, 可以进行 HVDC 系统的建模与仿真等工作, 为今后实施德阳-宝鸡 $\pm 500 \text{ kV}$ 直流输电工程换流站仿真系统工作奠定了基础。

参考文献

- [1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [3] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [5] 王晶, 翁国庆, 张有兵. 电力系统的 MATLAB/SIMULINK 仿真与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.

(收稿日期: 2009-10-28)