

Model and Simulation Analysis of HVDC Power Transmission System

Yuanshuo Feng, Jijiang Song

School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo
Email: shuoshuolove0306@163.com

Received: Oct. 4th, 2014; revised: Nov. 8th, 2014; accepted: Nov. 20th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The basic structure and principle of HVDC power transmission system are analyzed. A simulation model for 6-pulse bridge HVDC power transmission system is built in MATLAB/Simulink. The steady and transient processes of this system were simulated especially when DC line grounding fault occurs. The simulation results verify the accuracy and rationality of the HVDC model system. The dynamic performance of this HVDC model system can be observed more accurately.

Keywords

HVDC Power Transmission System, MATLAB Simulation, Transient Analysis

高压直流输电系统的建模与仿真分析

冯媛硕, 宋吉江

山东理工大学, 电气与电子工程学院, 淄博
Email: shuoshuolove0306@163.com

收稿日期: 2014年10月4日; 修回日期: 2014年11月8日; 录用日期: 2014年11月20日

摘要

分析了高压直流输电系统(HVDC)的基本结构及原理, 在MATLAB/Simulink中建立基于6脉冲桥的高压

直流输电系统的仿真模型。分别对系统的稳态和暂态过程进行仿真分析，主要对系统发生直流线路接地短路故障时进行仿真分析，仿真结果验证了HVDC模型系统的正确性及合理性，能够更加准确的观测到HVDC系统的动态性能。

关键词

高压直流输电系统, MATLAB仿真, 暂态分析

1. 引言

高压直流输电系统(HVDC)控制方式更加灵活,潮流控制快速,在电力系统中得到广泛应用。电力电子技术是高压直流输电发展的主要技术支撑,使用晶闸管换流器的系统成为研究热点,对于新型的大功率全控型半导体器件(如IGBT)的广泛应用,也对直流输电的发展有一定促进作用[1]。

高压直流输电也有一定的优势和缺点,对于高压直流输电工程,当输送容量确定以后,换流站的规模也随之确定,所以投资也就固定下来,而距离的增加仅与线路造价有关。但是对于交流输电则不同,输电距离增加后,由于稳定性以及过电压的要求,需要设置中间开关站,所以投资相应增加。直流输电的网损比交流小很多,高压直流输电的合理性和适用性在远距离、大容量输电中已得到明显的表现[2]。采用直流输电实现电力系统之间的非同步互联,可以不增加被联电网的短路容量,不需要因为短路容量的增加而要更换断路器。本文建立基于6脉冲桥的高压直流输电系统的仿真模型,进行仿真分析研究,整流电路的脉波数为6,可以改善输入电流波形,降低输入谐波电流,也为以后的高压直流输电系统的研究奠定一定基础。

对于MATLAB中的Simulink工具箱可以建立动态的模型系统进行仿真分析,更加直观方便。PSB工具箱中有大量的电力系统元件模块,也可用户自定义建立模块,对非线性和线性以及非连续的系统进行仿真。加拿大魁北克电站的运行以及实验数据已经证实利用电力系统模块(power system block, PSB)的仿真结果是可靠准确的,总之利用MATLAB/Simulink和PSB进行电力系统建模仿真研究是合理的。

2. HVDC 系统的基本结构及原理

对于单极高压直流输电系统,主要由换流站设备和输电线路组成,结构是比较简单的,此系统有多种接线方式,主要组成设备为:1)换流变压器,是由交流电压作为阀桥的电压;2)换流器设备,采用晶闸管作为控制器件,对于6脉冲换流器设备而言是由6个桥臂组成的,例如天生桥-广州的高压直流输电系统的晶闸管额定电压是8kV,由78个模块组成的;3)滤波器设备,对于交流侧滤波器一般是装设在交流侧母线上。对于单调谐的滤波器吸收奇数 $(6n \pm 1)$ 次谐波,采用高通滤波器对高次谐波进行消除。直流侧的滤波器装在直流线路的两端,使用有源滤波器进行消除,单桥电路用于吸收 $6n$ 次谐波,双桥时用于吸收 $12n$ 次谐波;4)无功补偿设备,一般是由电容器组和静止无功补偿器组成;5)直流电抗器,用于平滑输出波形,减小直流电流和电压的扰动,同时抑制直流电流的增加速度[3]。单极高压直流输电系统基本结构框图如下图1所示。

高压直流输电系统中对于电压、电流和功率的控制,是通过调节触发延迟角 α 以及逆变角 β 来实现的[4]。整流侧使用定电流控制方式,通过比较电流偏差进行调节延迟角 α ,使偏差值趋于零,实现对系统的控制。逆变器使用定熄弧角控制方式,这种方式可以提高晶闸管的可靠性,或者也可以使用定电压控制[5]。在对系统进行暂态分析时,需要计算直流输电系统的调节时间常数,整流侧定电流和逆变侧定电压控制方式下的方程式分别为:

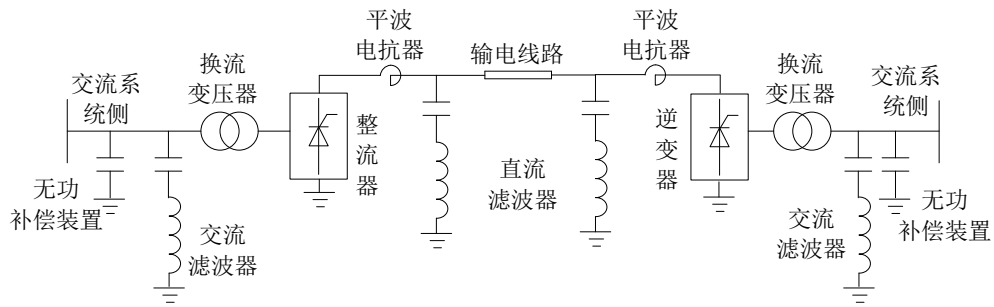


Figure 1. The structure of monopolar HVDC system
图 1. 单极高压直流输电系统结构图

$$\Delta\alpha = K_1(I_d - I_{ds}) / (1 + T_1 P)$$

$$\Delta\beta = K_2(U_{di} - U_{dis}) / (1 + T_2 P)$$

式中, I_d 、 I_{ds} 为直流电流和初始给定值, U_{di} 、 U_{dis} 为直流电压和定电压值, K_1 、 K_2 和 T_1 、 T_2 分别为定电流。定电压控制下的放大倍数和时间常数。

本文主要研究基于 6 脉冲整流器的 HVDC 系统, 6 脉冲是指以 6 个可控硅(晶闸管)组成的全桥整流, 由于有 6 个开关脉冲对 6 个可控硅分别控制, 所以叫 6 脉冲整流[6]。6 脉动整流器原理接线图如下图 2 所示, 图中 e_u 、 e_v 、 e_w 为交流系统侧的工频基波正弦相电动势, L_r 表示每一相的等值换相电抗, L_d 为平波电抗值。V1~V6 为 6 个换流阀的代号, 同样也是导通顺序号。对于理想的状态下, 三相交流系统默认是对称的, 触发脉冲是等距的, 换流阀的触发角也是相等的, 一般的 6 脉动的整流器触发脉冲之间的间距为 60° (电角度)。

3. HVDC 系统的仿真模型

在 MATLAB/Simulink 的环境下, 利用 PSB 中的模块建立高压直流输电系统的仿真模型, 此系统使用 6 脉冲晶闸管变换器, 系统的简单框图如下图 3 所示, 根据图 3 的组成部分在 MATLAB 软件中建立仿真模型系统即可。

系统参数设置为: 交流系统电源是 315 kV (短路容量为 5000 MVA、频率是 60 Hz); 换流变压器的额定容量为 600 MVA, 电压为 315/210 kV; 输电线路长为 300 km; 平波电抗器的电感值为 $L_d = 0.5$ H; 无功功率设备容量为 320 MVA。经变压器变换后的电压被输送到单桥的 6 脉冲整流器中进行整流, 后经过高压输电线路将电能送入负载。整流器部分的交流系统侧上接上一组滤波器(由电容器和 11、13 次谐波滤波器组成), 为整流侧提供 320 MVA 无功功率并能够抑制谐波的产生。在 MATLAB 中建立的仿真模型如下图 4 所示, 模型系统中忽略了整流侧的滤波器及线路阻抗, 逆变器采用反电势 242 kV 的电源等效。整流侧使用定电流控制方式来控制触发角 α , 触发脉冲是由脉冲发生器产生的。对该系统的稳态情况和整流侧直流线路发生对地短路故障时进行仿真与分析。

下图 4 所示为 HVDC 系统的仿真模型图, 图中使用 6 脉动晶闸管桥三相变换电路, 变压器和交流系统模块均使用三相器件模型[7]。输电线路采用分布参数线路模型。逆变侧的发电势使用电压源模块替代, 该模块在初始仿真时候与一个阶跃信号源配合来动态反映逆变器电压的变化。开始仿真时, 此电压源的初始状态电压为 0, $t = 0.0175$ s, 反电动势由 0 跳变到 242 kV。在进行完稳态仿真分析后, 还进行了模拟直流输电线路发生对地短路故障的情形, 在直流线路整流侧接一个断路器模块, 用来模拟短路故障, 在 $t = 0.5$ s 时断路器合闸, 此时发生对地短路故障。在 PSB 中调用示波器模块, 利用示波器模块对仿真波形进行观察, 分别对稳态时直流侧及和故障后电压电流波形进行分析, 验证此 HVDC 模型系统的

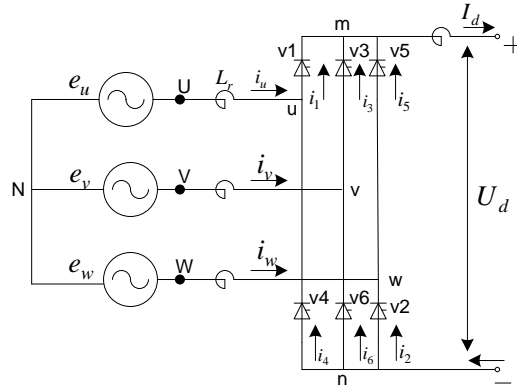


Figure 2. Elementary wiring diagram of six pulse rectifier
图 2.6 脉动整流器原理接线图

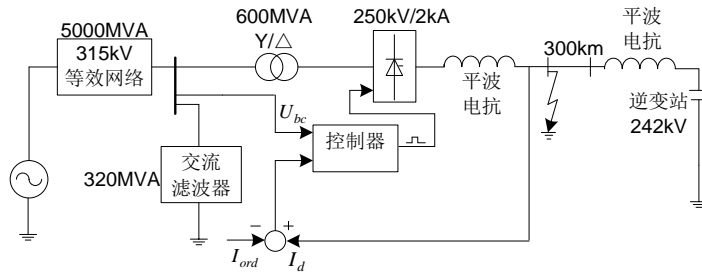


Figure 3. The block diagram of HVDC
图 3. 高压直流输电系统框图

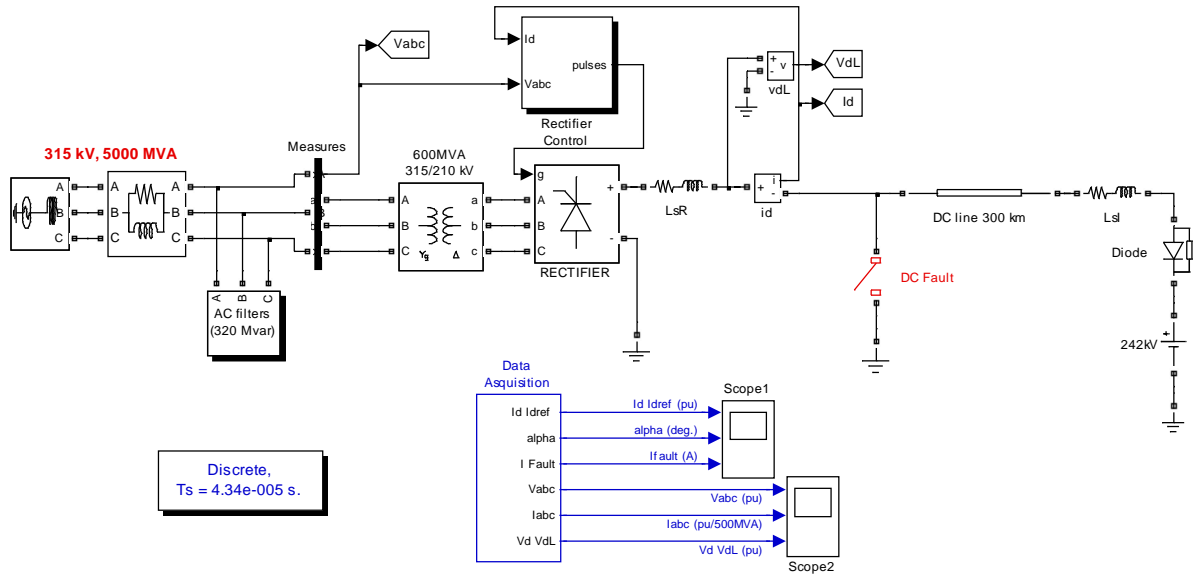


Figure 4. The simulation model of HVDC system
图 4. HVDC 系统仿真模型图

合理性。

对于 HVDC 模型系统中的交流滤波子系统模型如下图 5 所示，由电容器组、单调谐波滤波器(5、7、11 奇数次)和高通滤波器组成，所有元件均可以在 PSB 模块库中获得，滤波器在工频条件下是呈现容性阻抗，所以还可以用于无功补偿[8]。

4. HVDC 系统暂稳态过程的仿真分析

4.1. 稳态仿真分析

下面对基于 6 脉冲桥的 HVDC 系统进行暂稳态仿真与分析。首先进行稳态仿真，输出波形如下图 6 所示。考虑到变压器漏感的影响，整流侧输出电压理论值计算公式为：

$$U_{d1} = N_1 \left(1.35U_1 \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_{r1} I_d \right) = 1 \times \left(1.35 \times 210 \times \cos 19^\circ - \frac{3}{\pi} \times 9.42 \times 2 \right) = 250.1 \text{ kV} \text{ (仿真中取 } 250 \text{ kV)}$$

上式中， N_1 是整流侧每一极中 6 脉动换流器的数目，本文取 1； U_1 指整流站换流变压器空载电压有效值； X_{r1} 是整流站的换相电抗，此处换流变压器漏抗值为 $X_{r1} = \omega L_B = 2\pi \times 50 \times 0.3 = 9.42 \Omega$ 。

由仿真波形可知，仿真开始后，在 0~0.4s 对于给定的电流参考值(标么值)从 0.2 线性上升到 1，通过

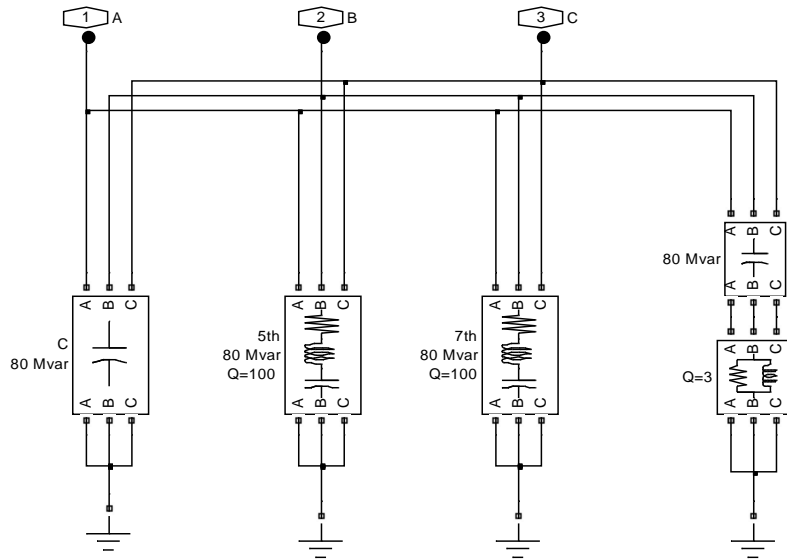


Figure 5. The simulation model of AC filter

图 5. 交流滤波器模型

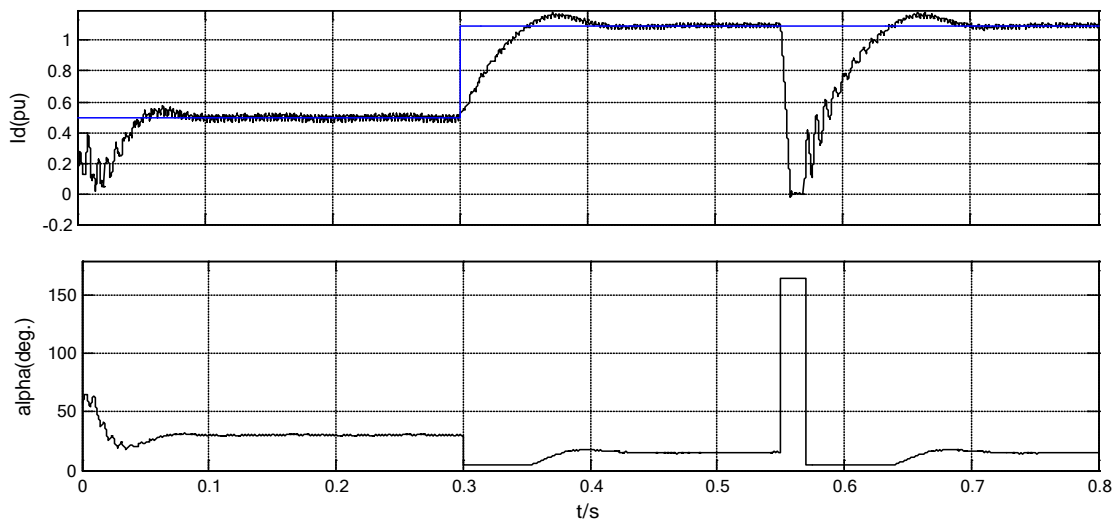


Figure 6. Waveform of the steady state DC line current and angle α

图 6. 稳态时直流线路电流及 α 角波形

电流调节器控制 α 角，输出电流随着上升，跟随性良好，启动电压比较平稳。在控制系统的调节下，触发角 α 有所增大，可见控制效果良好。

4.2. 暂态仿真分析

对 HVDC 系统的直流线路对地故障进行了仿真分析。当整流侧直流线路对地短路进而负荷(逆变侧)被短路时，故障设置发生在 0.55 s，电流实际的瞬时值是增大的，在 PI 调节器控制下，触发角增加到最大，整流侧的晶闸管会发生闭锁现象，电压降为 0，然后直流电流也下降为 0。在 0.58 s 的时候故障消除，系统恢复正常，此时电流值恢复到给定值。动态过程中，系统交流部分三相电压电流，整流侧直流线路的电压 U_d ，电流 I_d 和参考电流 I_{dref} 的输出波形图分别如下图 7~9 所示。

直流系统对地短路故障发生时，交流系统侧的电压会发生高频振荡，即对于交流系统的扰动很大。在 $t = 0.55$ s 时，控制系统关断晶闸管，使得电流降为 0，这样会引起过电压现象，但是交流系统的短路容量为 5000 MVA 比直流功率 500 MVA 大很多，所以不会产生很高的过电压。由于直流输电线路两端没有装设直流滤波器，所以直流电压和电流的波形是存在一定谐波分量的。

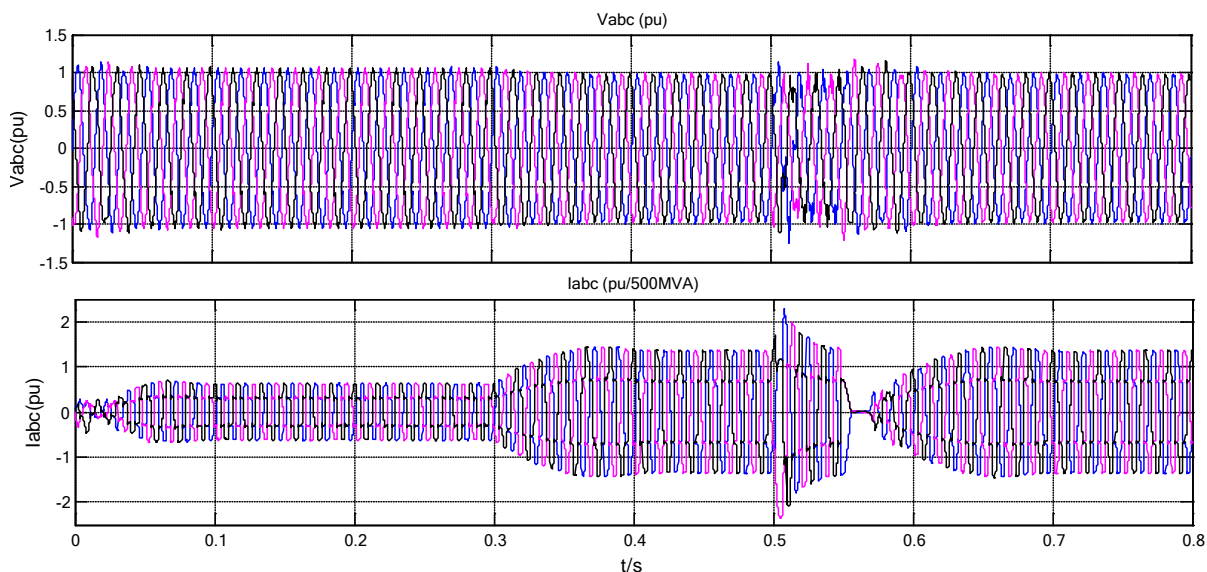


Figure 7. Three-phase AC voltage and current waveform of communication part after a failure
图 7. 故障时交流部分三相电压和电流波形

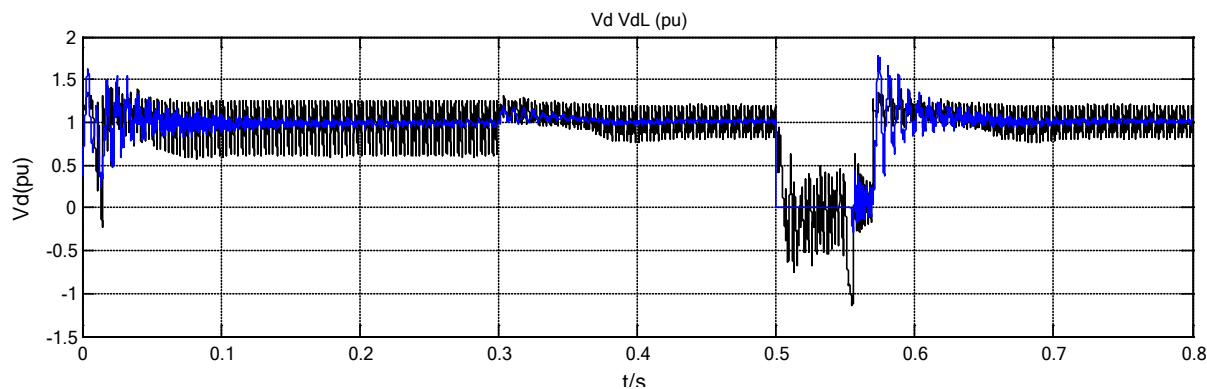


Figure 8. DC line voltage waveform after a failure
图 8. 故障时直流线路电压波形

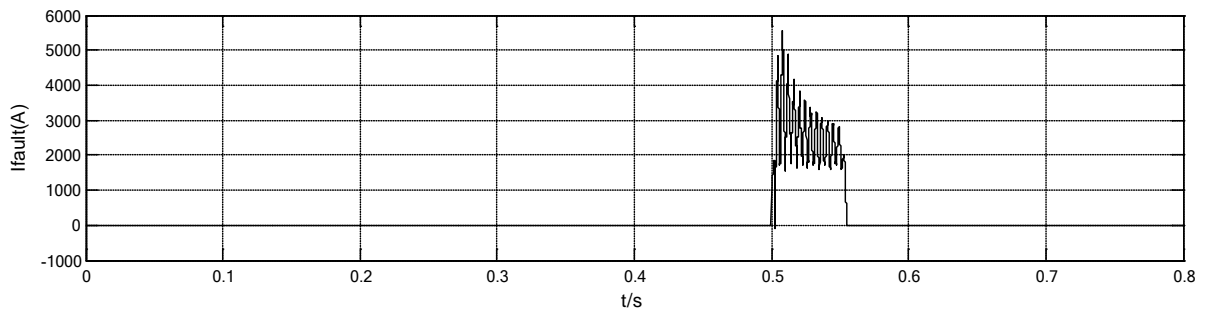


Figure 9. Current waveform on lines after a failure

图 9. 故障时线路电流波形

5. 结论

利用 MATLAB/Simulink 以及电力系统工具箱 PSB 对高压直流输电系统进行建模仿真。本文建立的模型系统能够准确合理的反映出 HVDC 系统的动态特性，并且控制系统的特性表现良好。MATLAB 软件有很好的观测平台，能够观察各参数变化，便于对系统的动态特性进行研究。且控制模块比较全面，方便调用，为今后的理论建模仿真分析打下一定基础。

本文主要对典型的基于 6 脉冲变换器的 HVDC 系统进行详细的建模仿真分析，通过对稳态波形及暂态过程的动态特性进行分析，验证了控制系统的正确性，利用 MATLAB 进行仿真所有时间短，能够达到一定精度，效果是比较理想的。

参考文献 (References)

- [1] 赵晔君 (2011) 高压直流输电工程技术. 中国电力出版社, 北京.
- [2] 韩民晓, 文俊, 徐永梅 (2013) 高压直流输电原理与运行. 机械工业出版社, 北京.
- [3] 赵晓娜, 方玉, 李天明 (2010) 基于 Matlab/Simulink 的直流输电系统的建模与仿真. *四川电力技术*, **1**, 22-24, 33.
- [4] 杜欣慧, 宫改花, 戴云航, 廉巍巍 (2007) 基于 MATLAB/Simulink 的高压直流输电系统的建模及仿真研究. *科技情报开发与经济*, **1**, 173-174.
- [5] 邵杰 (2013) 基于 MATLAB/Simulink 的高压直流输电系统的仿真研究. *电气自动化*, **4**, 65-66, 69.
- [6] 黄绍平, 彭晓, 浣喜明 (2004) 基于 MATLAB 的高压直流输电系统的建模与仿真. *高电压技术*, **3**, 53-55, 59.
- [7] 邵英, 董凌凯, 齐贵广 (2013) 高压直流输电系统的建模与仿真研究. *电源技术应用*, **2**, 46-47.
- [8] 周晓华, 宋春宁, 王保录, 宋云鹏 (2010) 高压直流输电系统的建模与仿真. *机电技术*, **5**, 80-82, 89.