

The Simulation of HVDC Transmission System Based on MATLAB

Yuanshuo Feng

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

Received: Mar. 19th, 2013; revised: Apr. 11th, 2013; accepted: Apr. 28th, 2013

Copyright © 2013 Yuanshuo Feng. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: HVDC (High Voltage Direct Current) transmission takes an increasingly important position in the long distance and high-power transmission project, for its large power of transmission, low cost and good performance advantages of control. The research of high voltage dc transmission system has important significance. The principle of high-voltage direct current (HVDC) transmission system is introduced briefly. Then a simulation model of HVDC system using Matlab/Simulink is established. We can observe the dynamic performance of the high voltage dc transmission system accurately.

Keywords: HVDC; Matlab/Simulink; Simulation

基于 MATLAB 的高压直流输电系统的仿真

冯媛硕

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: 2013 年 3 月 19 日; 修回日期: 2013 年 4 月 11 日; 录用日期: 2013 年 4 月 28 日

摘要: 高压直流输电以其传输功率大、线路造价低、控制性能好等优点, 在远距离、大功率输电中占有越来越重要的地位, 对于高压直流输电系统的研究有重要意义。本文介绍了高压直流输电(HVDC)系统的基本原理, 利用 Matlab 中的 Simulink 对 HVDC 系统进行建模和仿真分析。由仿真结果能较准确地观测暂态过程中高压直流输电系统的动态性能。

关键词: 高压直流输电; Matlab/Simulink; 仿真

1. 引言

随着电力系统需求的增加以及电力技术的发展, 高压直流输电(High Voltage Direct Current 简称 HVDC) 因其特有的输电优势在世界上得到迅速发展, 与交流输电系统相比, 高压直流输电系统具有以下特点: 输电线路造价低, 电能损耗小。采用直流线路互联的交流系统发生故障后, 高压直流输电控制系统可通过快速改变功率输送方向避免过大的故障电流进入故障

侧, 不需要更换断路器等设备, 并且直流线路电流调节更容易, 短路电流更小, 更容易实现直流输电系统的快速控制。直流输电系统通过换流设备将位于两侧的交流系统隔离开, 因此交流系统之间不需要同步运行, 可实现电网的非同步互联^[1]。

高压直流输电在我国电力系统发展中发挥着重要的作用, 为了准确的研究高压直流输电系统运行过程, 就必须建立与实际控制系统一致的准确控制系统

仿真模型,对控制系统性能进行详细的研究以改善高压直流输电系统的运行性能并增强控制系统的可靠性。因此采用电力系统仿真软件针对实际高压直流输电控制系统建立仿真模型是高压直流输电研究的重要内容^[2]。

所以研究 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、动态特性是非常重要的。本文采用 MATLAB 对高压直流输电系统进行数值仿真。MATLAB 丰富的工具箱方便用户对目标参数进行优化及对仿真结果做出处理, Simulink 图形界面为用户提供了良好的仿真环境,可实时地显示结果。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^[3]。

2. 高压直流输电的基本原理

直流输电系统由整流站、直流线路和逆变站三部分组成。整流站和逆变站统称为换流站。换流站的主要设备是换流器,其作用是实现交流电和直流电的相互转换。换流器分为整流器和逆变器^[4]。

直流输电系统的工作过程:由交流系统 I(送电端)送出交流功率给整流站的交流母线,经换流变压器送到整流器,整流器将交流功率转换成直流功率,然后由直流线路把直流功率输送给逆变站内的逆变器,逆变器将直流功率转换成交流功率,再经换流变压器,把交流功率送入到受电端的交流系统 II,系统基本组成如图 1 所示。HVDC 是基于直流传输原理,使用了电力电子技术,为了将所传输的直流功率变换到交流电网中,并通过控制功率的交换来达到改善电力系

统性能的基本目标。HVDC 可以通过可控的交直流变换和直流传输实现超远距离电力的经济传输。

直流输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。整流站和逆变站的换流器是相同的设备,只是运行状态不同而已。换流器在整流运行状态时,它的直流电压正方向与在逆变运行状态时相反,这是靠改变触发相位来实现的。

换流站是 HVDC 输电系统的核心部分。用来完成电力变换过程的三相换流器有两种基本结构:电流源换流器(CSC)和电压源换流器(VSC)。早期高压直流输电系统常采用晶闸管换流阀作为基本开关器件。在 20 世纪 90 年代以后,新的大功率自换相器件(如 GTO 和 IGBT)出现,而且数字信号处理强大的计算处理能力,使得电压源换流技术得到很好发展。目前工程上采用的电流源换流器的基本换流单元包括 6 脉动换流单元(三相桥式换流回路)和 12 脉动换流单元(由两个交流侧电压相位差 30°的 6 脉动换流器组成)^[5]。

对于 12 脉动换流单元可采用双绕组换流变压器或三绕组换流变压器,其阀侧绕组的接线方式必须为一个星形接线,另一个为三角形接线。其中换流变压器均为有载调压变压器。在长距离、大容量高压直流输电系统中,换流变压器往往采用单相双绕组式。12 脉动换流单元在交流侧和直流侧分别产生 12 k ± 1 次和 12 k 次的特征谐波。12 脉动换流单元原理接线图如图 2 和 3 所示。

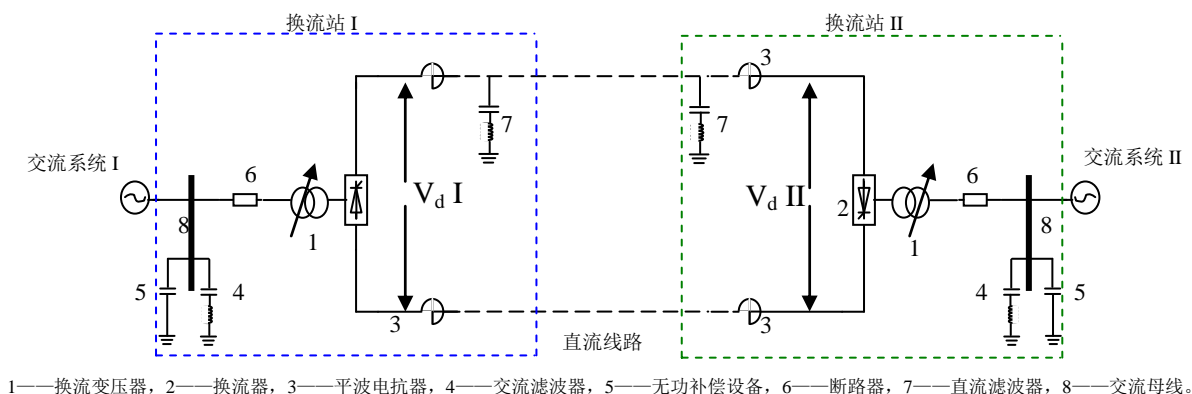


Figure 1. The principle diagram of HVDC
图 1. HVDC 原理图

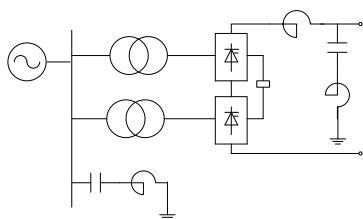


Figure 2. Double winding in converter transformer
图 2. 双绕组换流变压器

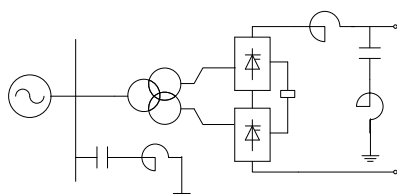


Figure 3. Three winding in converter transformer
图 3. 三绕组换流变压器

其中换流变压器是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。平波电抗器是减小直流电压、电流的波动，受扰时抑制直流电流的上升速度。滤波器是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。通常由静电电容器(包括滤波器电容)、静止无功补偿器为直流线路提供无功补偿。

逆变器是将直流电转化为交流的换流器。直流输电工程所用的逆变器，大部分为有源逆变器，它要求逆变器所接的交流系统提供换相电压和电流，即受端交流系统必须有交流电源。

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 和逆变器的触发超前角 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，逆变侧采用定关断超前角控制方式和定直流电压控制方式^[6]。

3. 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

统建立仿真模型。这里是建立基于 12 脉冲晶闸管变流器的 HVDC 系统模型，然后进行仿真分析。建立的模型如下图 3 所示。

在此模型中，500 kV、5000 MVA、60 Hz 的交流系统通过 1000 MW(500 kV, 2 kA) 的直流输电线路与 345 kV、10000 MVA、50 Hz 的交流系统相连。两个交流系统的相角均为 80° ，基频分别为为 60 Hz 和 50 Hz，并带有 3 次谐波。

整流器和逆变器都是 12 脉冲转换器，使用两个通用桥模块连接。在该模型中双击可以打开看到转换器是如何建立的，这两个转换器是通过 300 km 的线路和 0.5 H 的平波电抗器连接起来。换流变压器是由三相变压器(三绕组)模块建立的，变压器抽头的位置是固定的，由换流变压器的原边电压的一个乘法因子确定(整流器侧设为 0.90，逆变器侧设为 0.96)。两个断路器模块分别用来仿真整流器直流侧故障和逆变器交流侧故障。对于 n 阶特征谐波，与脉冲数 p 有关， $n = pk \pm 1$ (k 为任意整数)。在这个模型中 p 值为 12，从而注入交流侧为 11、13、23、25 次谐波分量；注入直流侧为 12 和 24 次谐波。

交流滤波器主要功能为滤波和无功补偿。主要作用是过滤交流系统上的奇次谐波电流，在此模型中是由两个子系统分别组成了交流滤波器。打开交流滤波器子系统模块看到，交流滤波器电路由 150 Mvar 的无功补偿设备、高 Q 值 ($Q = 100$) 的 11 次和 13 次单调谐滤波器、低 Q 值 ($Q = 3$) 的高通滤波器(用于消除 24 次谐波及以上)组成^[7]。

这个系统的控制和保护模块都是离散的，且具有相同的采样时间为 $T_s = 50 \mu s$ 。整流器和逆变器的控制保护系统是使用相同的离散高压直流输电控制模块，该模块可以在整流或者逆变模式下工作。其中的 Master Control 模块提供两个转换器的电流参考值，决定了直流功率传输的开始与结束。

4. 仿真结果分析

基于图 4 所示的模型，分别对系统稳态、直流线路故障、逆变侧接地故障等情况进行仿真，仿真分析结果如下。

4.1. 稳态仿真与阶跃响应

系统开始运行，最后都会达到稳定状态。仿真后

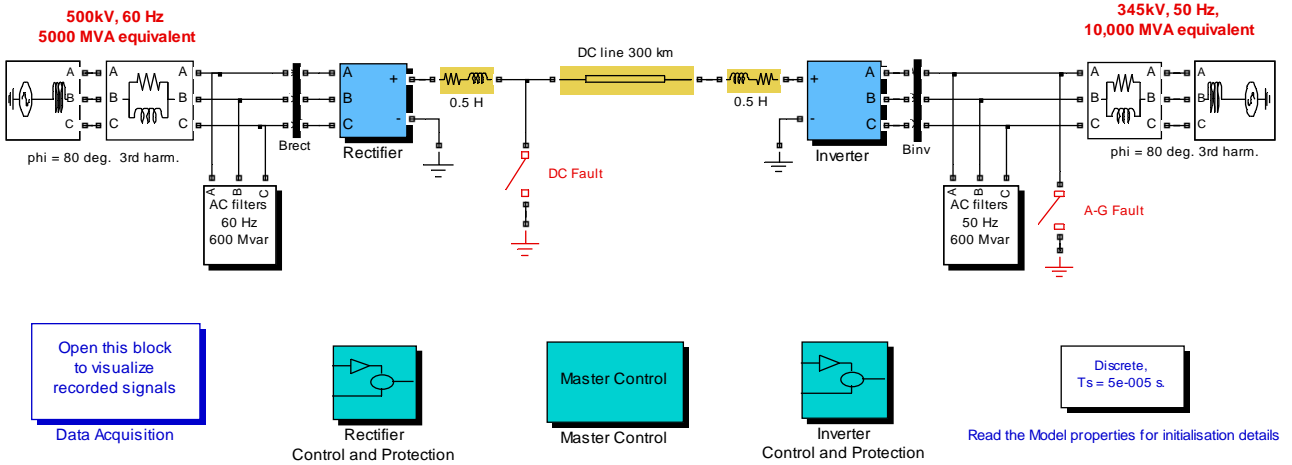


Figure 4. The simulation model diagram of HVDC
图 4. HVDC 仿真模型图

的电压和电流波形如图 5 及图 6 所示。图 5 表示稳态仿真整流侧波形，图 6 为逆变侧波形。图中的 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。

对于主控制模块(Master Control 模块)，在时间 $t = 20 \text{ ms}$ 时转换器的脉冲发生器开始工作，线路中开始出现电流并且有功率传输。在 0.3 s 时参考电流值达到最小为 0.1 pu 。并且观察到此时开始建立直流电压。在 $t = 0.4 \text{ s}$ 时参考电流以 5 pu/s 的速度由 0.1 pu 升到 1 pu (2 kA)。直流电流在大约 0.58 s 时达到稳定状态，整流器控制电流和逆变器控制电压。波形图中的轨迹 1 显示了整流器和逆变器的直流侧线路电压($1 \text{ pu} = 500 \text{ kV}$)，波形图中的轨迹 2 表示参考电流和测得的电流 I_d ($1 \text{ pu} = 2 \text{ kA}$)。在 $t = 1.4 \text{ s}$ 时施加停止脉冲，将电流降为 0.1 pu ，在 $t = 1.6 \text{ s}$ 时，在整流器侧强制使 α 变为 166° ，这时直流电流消失，在逆变侧强制使 α 变为 92° ，直流电压也降低。在 $t = 1.7 \text{ s}$ 时，两个转换器中的阶跃脉冲消失。

4.2. 直流线路故障时仿真分析

对于 HVDC 系统中的直流故障模块(DC Fault)，将乘法因子由 100 变为 1，即在 $t = 0.7 \text{ s}$ 时设置了一个故障，将仿真时间设为 1.4 s 。直流线路故障时整流侧波形如图 7 所示，逆变侧波形如图 8 所示。由波形可见，故障时直流侧电流激增到 2.2 pu ，直流侧电压降到 0 值。参考电流下降为 0.3 pu ，因此故障发生后，

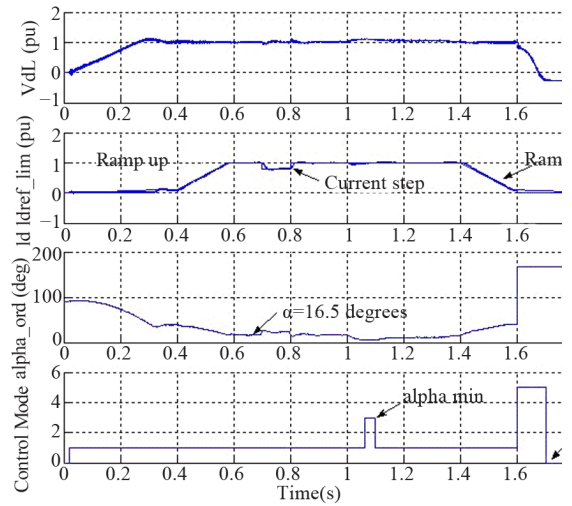


Figure 5. Steady state simulation waveform on rectifier side
图 5. 稳态仿真整流侧波形

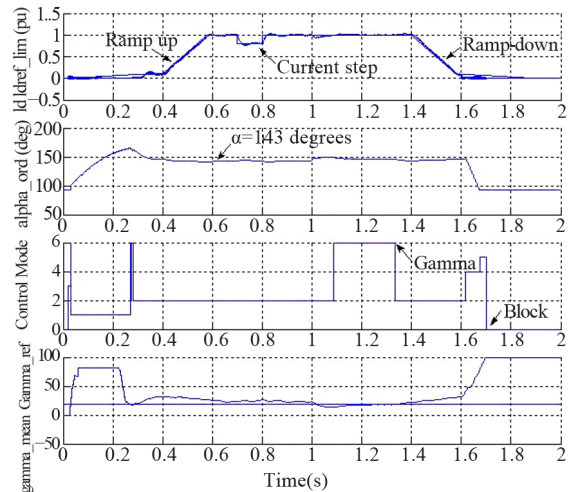


Figure 6. Steady state simulation waveform on inverter side
图 6. 稳态仿真逆变侧波形

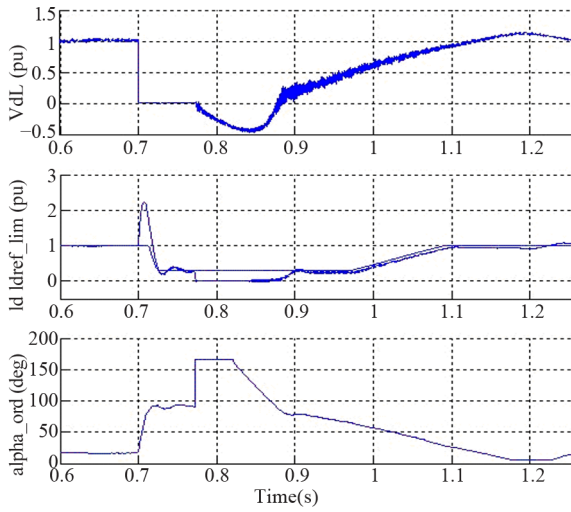


Figure 7. The waveform on rectifier side when Dc line fault
图 7. 直流线路故障时整流侧波形

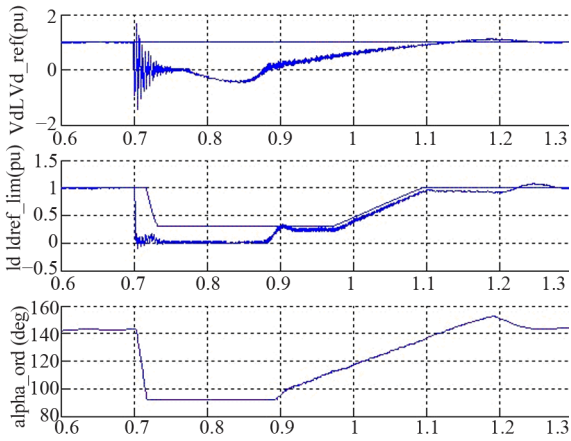


Figure 8. The waveform on inverter side when Dc line fault
图 8. 直流线路故障时逆变侧波形

直流侧仍有电流通流。在 $t = 0.77 \text{ s}$ 时，触发延迟角 α 被强制设为 166° ，这时的整流器运行在逆变器模式。此时直流侧线路电压变为负值，将线路上储存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。在 $t = 0.82 \text{ s}$ 时，消除触发延迟角 α 的强制值，额定直流电压和电流在 0.5 s 后恢复正常。

4.3. 逆变侧接地故障仿真分析

首先取消直流侧断路器导通动作，对于直流故障模块，设置乘法因子由 1 变为 100，这样就消除了直流故障。在系统中 A-G Fault 故障模块中，将开关时间的乘法系数设为 1，即在 $t = 0.7 \text{ s}$ 时，在逆变侧设置了接地故障。然后重新进行仿真，逆变侧波形如图 9 所示，整流侧波形如图 10 所示。

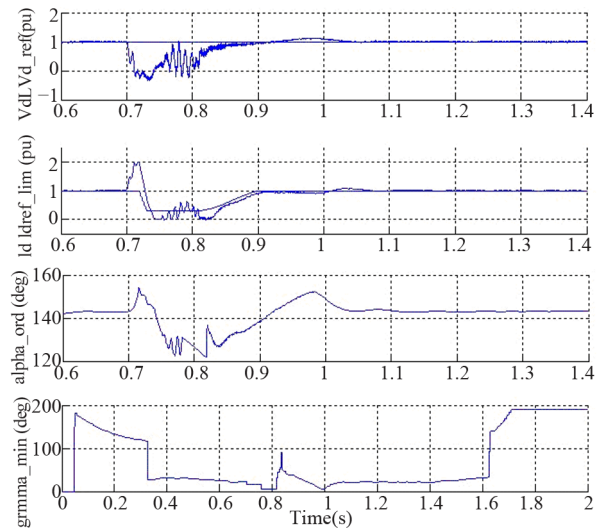


Figure 9. The waveform on inverter side when ground fault
图 9. 逆变侧接地故障波形

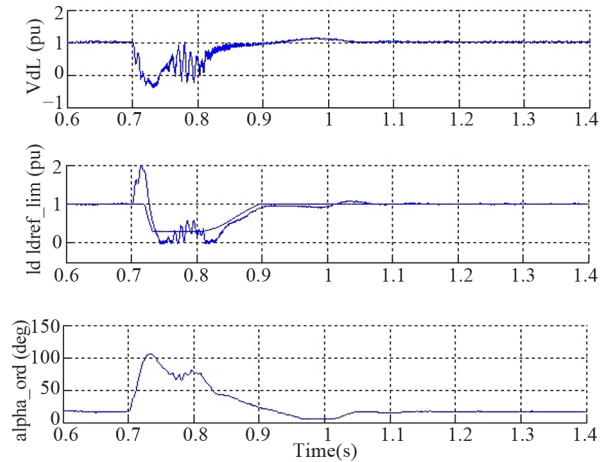


Figure 10. The waveform on rectifier side when ground fault
图 10. 整流侧接地故障波形

由波形分析，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 。在 $t = 0.8 \text{ s}$ 时故障清除，VDCOL 将参考电流调节为 0.3 pu ，故障清除后经 0.35 s 系统恢复。

逆变侧交流电压和交流电流发生一些扰动，波形图如图 11 所示。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。

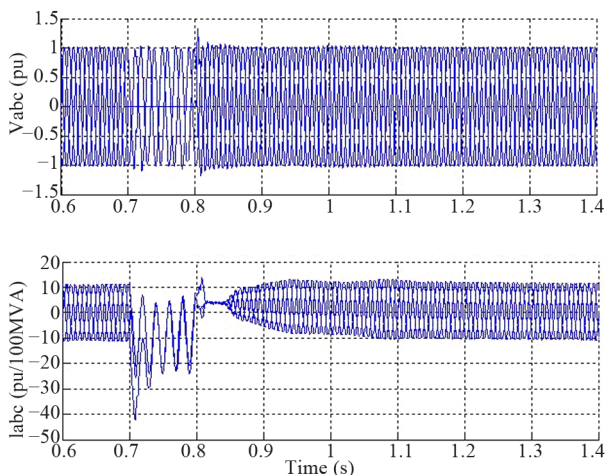


Figure 11. The communication part of the waveform on inverter side when ground fault

图 11. 逆变侧接地故障交流部分波形

5. 结论

对于高压直流输电系统的研究、设计和运行来说，高压直流输电(HVDC)系统的暂态仿真发挥着重要作用。MATLAB 中 Simulink 和 SimPower System 使得 HVDC 的建模及仿真简单易行。

直流输电的应用改变了电网互联仅限于交流输电的格局，为大容量功率的远距离输送，大区域电网、不同频率电网的非同步互联提供了有效的手段。晶闸管换流阀在直流输电工程上的应用，有效的改善了直

流输电的运行性能和可靠性。前面利用 MATLAB 的 Simulink 对高压直流输电系统建模，并进行了稳态和一些故障的仿真，得出相应的波形。可见，利用 MATLAB 软件能方便的对高压直流输电系统的稳态及暂态过程进行建模和仿真，可避免复杂的暂态计算和分析，便于直观的分析系统的性能。MATLAB 的用户界面可方便地实时显示参数波形，便于直观分析系统性能。且仿真时间短，仿真效果也比较理想。为今后实现直流输电工程换流站仿真系统工作奠定了基础。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [3] 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.
- [4] 周晓华, 宋春宁, 王保录. 高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 机电技术, 2010, 33(5): 80-82.
- [5] 杨晓萍. 高压直流输电与柔性交流输电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [6] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [7] 赵晓娜, 方玉, 李天明. 基于 Matlab/Simulink 的直流输电系统的建模与仿真[J]. 四川电力技术, 2010, 33(1): 22-24.