

The Electromagnetic Transient Characteristic of an AC/DC Interconnected System with Filter Faults

Pinliang Chen^{1*}, Bo Zhang², Fan Yang³, Hao Cui³, Chunli Li³

¹Beijing Electric Power Corporation, Beijing

²State Grid Corporation of China, Beijing

³State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing
Email: *chenplbjep@163.com

Received: Oct. 2nd, 2012; revised: Oct. 27th, 2012; accepted: Nov. 8th, 2012

Abstract: Based on the CIGRE model, Xiangjiaba-Shanghai ± 800 kV UHV DC transmission demonstration project parameters as the background, according to the harmonic component generated in high voltage DC transmission system, parameters of the filters used are calculated. Comparison is carried out between the calculated transient characteristics and the real value when the filter are normal, and the accuracy of the model is verified. Finally the electromagnetic transient of the system with different filter faults is investigated. The model and the results provide a reference for ultra HVDC transmission project, especially for the design and analysis of the AC/DC interconnection system.

Keywords: DC Transmission; Filter; Electromagnetic Transient; Fault

交直流互联系统滤波器故障状态下电磁暂态特性研究

陈品良^{1*}, 张博², 杨帆³, 崔浩³, 李春莉³

¹北京市电力公司, 北京

²国家电网公司, 北京

³重庆大学电气工程学院, 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆
Email: *chenplbjep@163.com

收稿日期: 2012年10月2日; 修回日期: 2012年10月27日; 录用日期: 2012年11月8日

摘要: 论文以 CIGRE 模型为基础, 以向家坝 - 上海 ± 800 kV 特高压直流输电示范工程为目标, 针对高压直流输电系统中产生的谐波成份, 计算出交直流互联系统交流侧与直流侧的滤波器参数。根据得出的滤波器参数建立了交直流互联系统的电磁暂态仿真模型, 仿真分析了滤波器正常状态下系统的电磁暂态特性, 通过与系统实际的电磁暂态特性比较, 验证了论文模型的正确性。在此基础上研究了滤波器故障时系统的电磁暂态特性的变化规律。论文模型以及结果为特高压直流输电工程, 特别是交直流互联系统的设计与分析提供了参考。

关键词: 直流输电; 滤波器; 电磁暂态; 故障

1. 引言

特高压直流输电网络由于其自身的优点在远距离输电、大容量输电以及不同步交流电网的连接中有着广泛的应用^[1]。随着中国建立了越来越多的特高压直流输电线路, 直流输电中的稳定性、谐波等问题也

*通讯作者。

开始引起了重视。当交直流输电网络互连时, 互联网络的电磁暂态特性与单一网络相比会变得复杂, 当其中的一部分网络故障时, 交直流系统的相互影响将变得更为复杂。因此交直流系统的电磁暂态研究有着重要的物理意义。目前, 对直流输电系统的电磁暂态研究都是采用实时电磁暂态建模。电磁暂态仿真采用数

值算法, 对系统中从数微秒到数十毫秒的电磁暂态过程进行仿真。

加拿大直流研究中心率先推出世界上第一个电网实时仿真系统 RTDS。随后加拿大魁北克水电研究所和法国电力公司都开发了以EMTP为核心的实时仿真软件。国内也开展了很多关于高压直流输电暂态过程的研究, 对高压直流输电暂态过程进行分析研究, 并取得了一定进展。

论文以 CIGRE 模型为基础, 以向家坝 - 上海±800 kV 特高压直流输电示范工程参数为背景, 计算出交直流互联系统交流侧与直流侧的滤波器参数。根据得出的滤波器参数建立了交直流互联系统的电磁暂态仿真模型, 仿真分析了滤波器正常状态下系统的电磁暂态特性, 通过与系统实际的电磁暂态特性比较, 验证了论文模型的正确性。在此基础上研究了直流侧滤波器 HP12/24 和 HP12/36 同时故障、只有 HP12/24 及只有 HP12/36 故障时系统的电磁暂态特性的变化规律。

2. 滤波器参数与模型

直流输电线路与交流线路互联时, 在交流侧与直流侧都安装滤波器, 常用的滤波器类型包括: 1) 双调谐滤波器。每台滤波器使用 R 、 L 、 C 元件的串联、并联构成具有两个调谐频率的带通或高通滤波器, 并接在交流母线上, 滤波系统中两个及两个以上特定频率的谐波电流^[2-9]。2) 三调谐滤波器。由串联谐振回路 L_1 、 C_1 和两个并联谐振回路 L_2 、 C_2 以及 L_3 、 C_3 组成。三调谐滤波器在小负荷下无功平衡方便, 可以同时滤除三个不同频率的谐波^[10,11]。图 1 所示为双调谐滤波器与三调谐滤波器的示意图。3) C 型阻尼滤波器。C 型阻尼滤波器是从三阶高通滤波器发展起来的, 其滤波特性介于二阶高通滤波器和三阶高通滤波器之间。目前这种滤波器在低次谐波滤波器中应用较为广泛^[12]。图 2 为 C 型阻尼滤波器结构示意图。

2.1. 交流侧滤波器参数计算

交直流互联系统在交流侧与直流侧都要采用滤波器, 这里以向 - 上±800 kV 特高压直流输电示范工程为例。该示范工程在复龙换流站的无功分组容量为 220 Mvar, 具体配置为四组 HP11/13 滤波器, 四组 HP24/36 滤波器, 二组 HP3 滤波器, 四组 SC 并联电

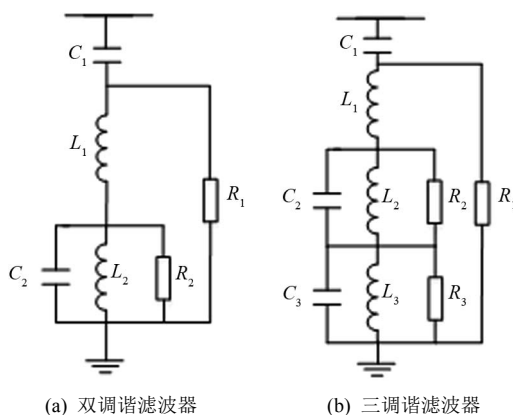


Figure 1. Schematic diagram of the filter
图 1. 滤波器结构示意图

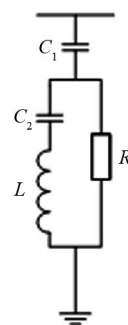


Figure 2. C-type damping filter
图 2. C 型阻尼滤波器

容器, 容量都为 220 Mvar。以此配置为基础, 根据了解的滤波器参数设置方法进行滤波器设计。

根据常用的双调谐滤波器参数计算方法来进行相关参数的计算^[13,14]。

每组滤波器无功补偿容量为 220 Mvar, 由公式 $Q = C\omega_0 U^2$, 得 $C = \frac{Q}{\omega_0 U^2}$ 。

仿真模型采用的母线电压为 525 kV, 故 $U = 525$ kV, 可以计算得到高压电容值为 $C_1 = 2.5407 \mu\text{F}$ 。

双调谐滤波器是取两个回路频率特性的相交点作为两个谐振频率点^[15,16], 即取 ω_s 和 ω_p 相等, 所以双调谐滤波器中 $\omega_s = \omega_p = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$ 可以得到在 HP11/13 中:

$$\omega_s = \omega_p = \sqrt{\omega_1 \omega_2} = \sqrt{11 \times 13 \omega_0} = 11.96 \omega_0$$

因此可由 $\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 L_2}}$ 得到 $L_1 = \frac{1}{\omega_s^2 C_1} = 27.89$ mH。

将 C_1 、 ω_1 、 ω_2 、 ω_s 、 ω_p 代入公式(1), 可得 $C_2 = 90.8300 \mu\text{F}$ 。

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 - (\omega_s^2 + \omega_p^2)}{\omega_2^2} \quad (1)$$

在根据公式 $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ 可计算出 $L_2 = 0.780 \text{ mH}$ 。

同理可以计算出 HP24/36 中的参数如下：

$$\begin{aligned} C_1 &= 2.5407 \mu\text{F} & L_1 &= 4.616 \text{ mH} \\ C_2 &= 15.2442 \mu\text{F} & L_2 &= 0.769 \text{ mH} \end{aligned}$$

向上工程在奉贤换流站设置的无功分组容量为 260 Mvar，具体配置为三组 HP11/13 滤波器，三组 HP24/36 滤波器，二组 HP3 滤波器，七组 SC 并联电容器，容量都为 260 Mvar。据此配置基础，同样根据上述计算方法进行计算，最后得出逆变侧 HP11/13 滤波器的具体参数为：

$$\begin{aligned} C_1 &= 3.1204 \mu\text{F} & C_2 &= 111.559 \mu\text{F} \\ L_1 &= 22.706 \text{ mH} & L_2 &= 0.635 \text{ mH} \end{aligned}$$

$$|Z_w| = R \sqrt{\frac{1}{(n\omega_0 C_1 R)^2} + \frac{(n^2 \omega_0^2 L C_2 - 1)(n^2 \omega_0^2 L C_2 - 1 - 2C_2/C_1)}{(n^2 \omega_0^2 L C_2 - 1)^2 + (n\omega_0 R C_2)^2}}$$

由于 C_2 不承担无功补偿，仅是为降低 R 上的基波损耗， C_1 决定该滤波器提供的无功补偿，容量基本限定，因此也就限制了 C 阻尼滤波器的 n 值不能太大。一般实际工程中， n 取 2、3、4 等谐波次数。

在实际工程中， n 、 ω 、 C_2 均已选定，根据前面的分析，高压电容 C_2 的值为 $2.5407 \mu\text{F}$ ， n 为 3，计算可得 C_2 的值为 $20.3256 \mu\text{F}$ ，电感 L 的值为 498.49 mH 。

根据同样的方法可以得到 C 型阻尼滤波器的参数为高压电容 C_2 的值为 $3.1024 \mu\text{F}$ ，电感 L 的值为 135.29 mH ， C_2 的值为 $74.889 \mu\text{F}$ 。

2.2. 直流侧滤波器参数

根据向上工程的结构，考虑干扰电流的影响，高压电容器的取值直接参考《特高压直流输电技术研究成果专辑》，取 C_1 的值为 $1 \mu\text{F}$ ，根据 2.1 中交流侧滤波器的参数计算方法，得到 HP12/24、HP12/36 各个参数，如表 1 所示。

3. 滤波器故障状态下电磁暂态研究

3.1. ±800 kV 直流输电线路电磁暂态模型

以 CIGRE HVDC Benchmark 模型为基础，根据

HP24/36 滤波器的具体参数为：

$$\begin{aligned} C_1 &= 3.1204 \mu\text{F} & L_1 &= 3.758 \text{ mH} \\ C_2 &= 18.722 \mu\text{F} & L_2 &= 0.6264 \text{ mH} \end{aligned}$$

3 次谐波本来其值小于特征谐波，但是由于交流滤波器数量多、单台容量大，可能在交流电网产生 3 次谐波放大，甚至出现并联谐振，导致设备损坏，零序保护误操作，引起谐波不稳定，因此有必要确定是否需要装设 3 次谐波滤波器。

如果交流电网的 3 次谐波较大时，当换流母线处的容量比 $S_k/Q_c < 12$ 时，表明交流滤波器与电网可能发生 3 次谐波的并联谐振，需要考虑装设 3 次谐波滤波器；反之，可以不装设。其中， S_k 、 Q_c 为换流母线处的交流电网短路容量和交流滤波器(含并联电容器)总容量，MVA。对此采用 C 型阻尼滤波器进行滤波，计算得到：

前面计算得到的滤波器参数，建立图 3 所示的向上 ±800 kV 的交直流互联系统模型。CIGRE HVDC Benchmark 系统为研究 HVDC 控制的标准测试系统。该标准测试系统为双桥 12 脉动单极大地返回式的直流输电系统。整流侧交流系统额定电压为 345 kV；额定直流电压为 500 kV，额定直流传输功率为 1000 MW；逆变侧交流系统额定电压为 230 kV，两侧都为弱交流系统。CIGRE 标准系统模型的控制系統主要包括极控制和阀控制^[17,18]。

图 3 所示的模型中，也是采用 12 脉冲换流器，每回直流输电线路的额定电压为 ±800 kV，额定传输电流为 4 kA，双极额定功率传输能力为 6400 kW，仿真平台采用 PSCAD/EMTDC，PSCAD/EMTDC 在时间域描述和求解完整的电力系统及其控制的微分方程

Table 1. Parameters for the filter on DC side
表 1. 直流侧滤波器参数

项目	HP12/24	HP12/36
$C_1/\mu\text{F}$	1	1
L_1/mH	35.181	23.454
$C_2/\mu\text{F}$	2	0.75
L_2/mH	17.591	31.272

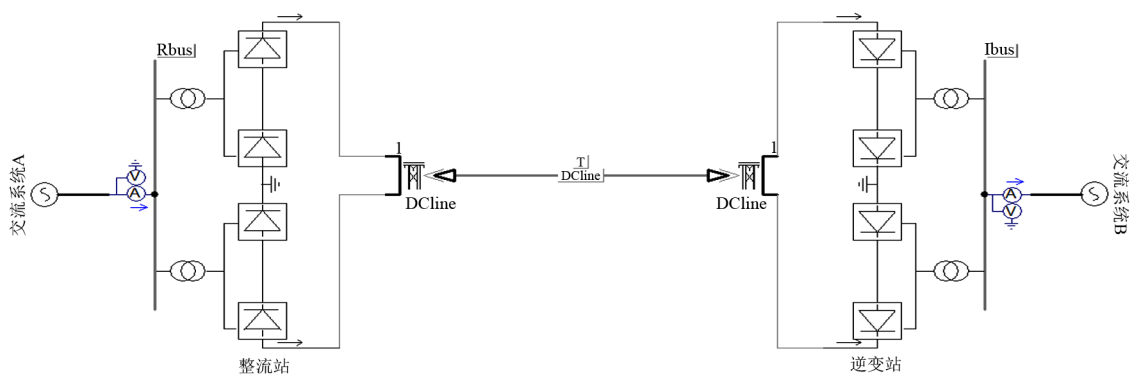


Figure 3. Model simulation diagram of the system
图 3. 系统模型仿真总图

(包括电磁和机电两个系统)在电磁暂态仿真分析中具有明显的优势。为了验证论文提出的模型的准确性，首先通过仿真分析系统在正常状态下的电磁暂态特性，并与实际值比较，验证了模型的正确性。

3.2. 滤波器正常状态下的电磁暂态特性

表 2 与表 3 为根据前面方法计算得出的滤波器参数，即图 3 的仿真模型中滤波器的参数。

Table 2. Parameters of AC filters in the rectifier station
表 2. 整流站交流侧滤波器元件参数计算值

类别	参数			
	HP11/13	HP24/26	HP3	SC
$C_1/\mu\text{F}$	2.5407	2.5407	2.5407	2.540
L_1/mH	27.89	4.616	498.49	-
$C_2/\mu\text{F}$	90.830	15.244	20.326	
L_2/mH	0.780	0.769		
R_1/Ω	550/650	1200/1800	150	-
特征频率 (H_z)	220	220	220	220
Q_{3P} at 525 kV(M var)	4	4	2	4

Table 3. Parameters of AC filters in the inverter station
表 3. 逆变站交流侧滤波器元件参数计算值

类别	参数			
	HP11/13	HP24/26	HP3	SC
$C_1/\mu\text{F}$	3.1204	3.1204	3.120	3.120
L_1/mH	22.706	3.758	135.2	-
$C_2/\mu\text{F}$	111.559	18.722	74.88	
L_2/mH	0.635	0.6264		
R_1/Ω	550/650	1200/1800	150	-
特征频率 (H_z)	260	260	260	260
Q_{3P} at 525 kV(M var)	3	3	2	7

为了验证模型参数的正确性，论文仿真向 - 上工程滤波器正常工作时的电磁暂态特性，通过与实际工程值比较，验证论文模型的正确性。图 4 和图 5 为滤波器正常状态下的电磁暂态特性，及实际工程中滤波器的电磁暂态特性。其中蓝色曲线代表正极的参数值，绿色曲线代表负极的参数值。

图 6 和图 7 为向 - 上特高压直流示范工程在滤波器正常状态下系统的电磁暂态特性波形图。

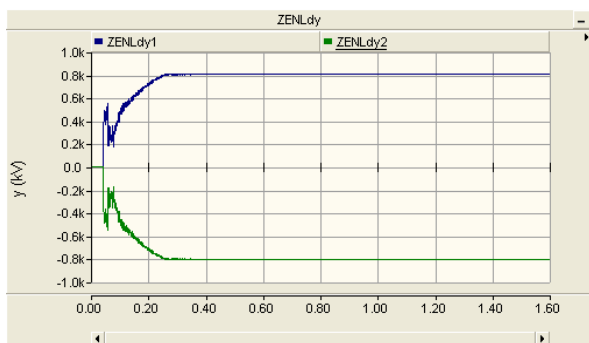
对比本文的仿真结果与实际的运行值，整流站直流线路出线处电压基本稳定在 ± 800 kV 左右，且正负极对称。由于平波电抗器的作用，导致电压波形较为平坦，滤波器的滤波作用也是相当成功的。在直流输电仿真在 0.3 s 后才处于稳定状态，这是因为控制系统中有一个一阶惯性元件，从而导致系统在开始有一个振荡变化过程。

同时我们也可以看到，逆变站的电压稳定在 ± 760 kV 左右，是由于很长的输电线路存在电阻，造成输电线路较大的压降，从而使逆变站达不到 800 kV 的电压。论文模型仿真值与实际值基本一致，从而可以验证论文模型的准确性。

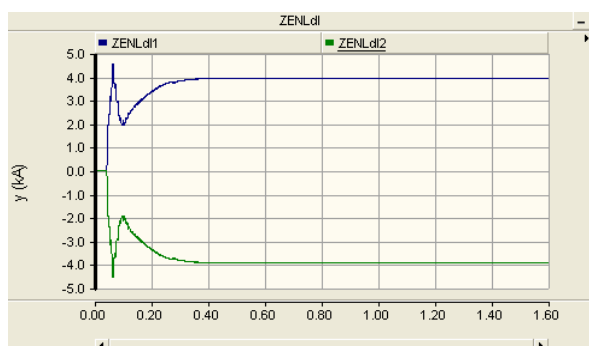
3.3. 滤波器不同故障状态下的电磁暂态特性

滤波器故障将会影响交直流互联系统的稳定性，因此本节研究滤波器故障时对系统的电磁暂态特性的影响规律。

因为四组滤波器都是对称的，只研究直流侧滤波器 HP12/24 和 HP12/36 同时故障、只有 HP12/24 及只有 HP12/36 故障。故障状态用断路器来模拟，即使用“BRK”元件，时间参数设置为在 0.5 秒时断开，



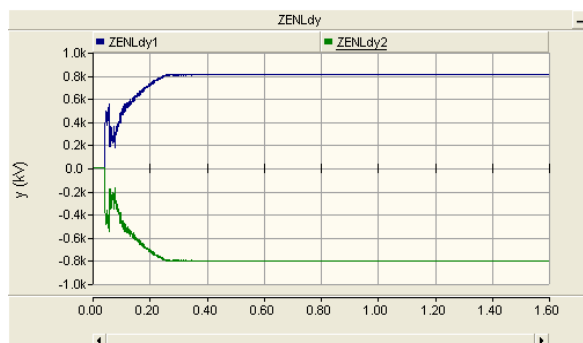
(a) 电压波形



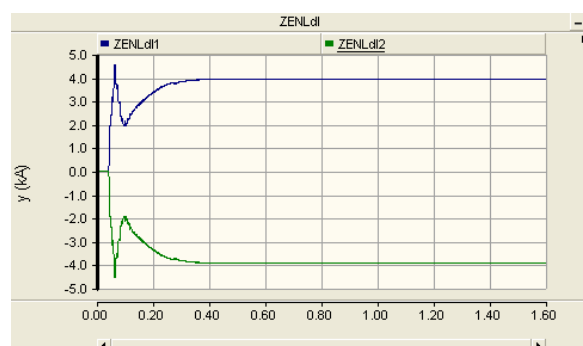
(b) 电流波形

Figure 4. Calculated voltage and current output on DC side of the rectifier station

图 4. 整流站直流输电出线处电压电流仿真值



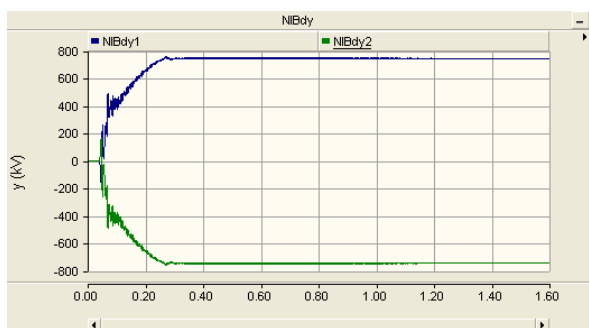
(a) 电压波形



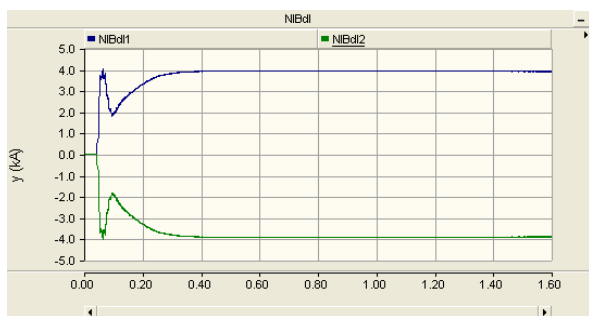
(b) 电流波形

Figure 6. Real voltage and current output on DC side of the rectifier station

图 6. 整流站直流输电出线处电压电流实际值



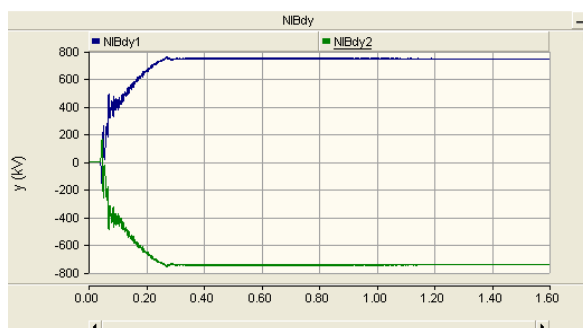
(a) 电压波形



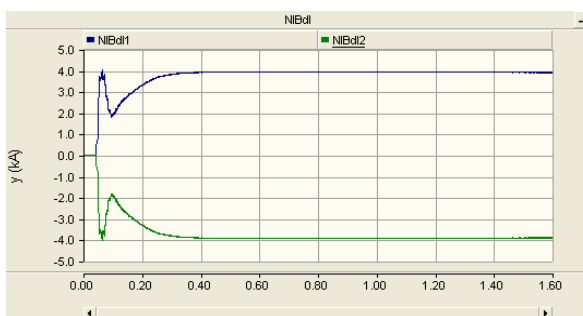
(b) 电流波形

Figure 5. Calculated voltage and current input of DC side of the inverter station

图 5. 逆变站直流输电进线处电压电流仿真值



(a) 电压波形



(b) 电流波形

Figure 7. Real voltage and current input of DC side of the inverter station

图 7. 逆变站直流输电进线处电压电流波形的实际值

故障时间为 0.05 秒。设置该断路器在闭合状态下的电阻为 0.005Ω ，断开状态下的电阻设置为 $1,000,000 \Omega$ 。

1) 直流侧滤波器 HP12/24、HP12/36 同时处于故障状态时系统的电磁暂态特性如图 8 所示。

根据图 8 所示的结果，当两滤波器同时发生故障时，整流站直流输电出线处的电压波形电压震荡幅度达到 25 kV 左右，因为整流侧直流滤波器故障，直接影响整流侧的电压，所以对整流侧电压影响较大。而整流侧直流输电出线处的电流震荡幅度达到 100 A 左右，这是因为与电压的震荡一样，整流侧直流滤波器故障，也同时直接影响整流侧的电流，使得整流侧的电流波动也很大。

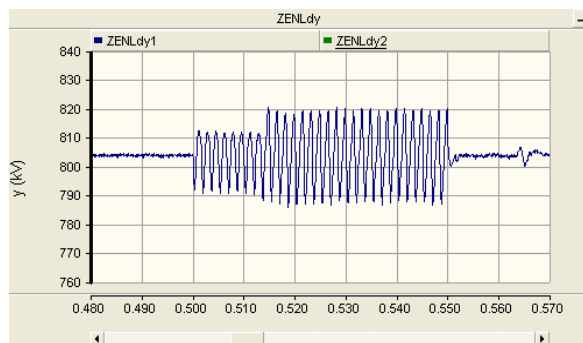
图 9 为故障状态下的逆变站直流输电出线处电流、电压波形。可以看出逆变侧电压基本没有变化，因为整流侧直流滤波器故障，直接影响的是整流侧的电压电流，而对于逆变侧的电压，因为在长达 1900 km 的输电线路路上，由于电阻等作用，造成谐波电压衰减，故整体变化不明显。而逆变侧电流振荡幅度也为 100 A 左右，这是因为由基尔霍夫电流定律可知，逆变侧的电流基本同整流侧的电流变化情况相同。

2) 直流侧滤波器 HP12/24 处于故障状态。

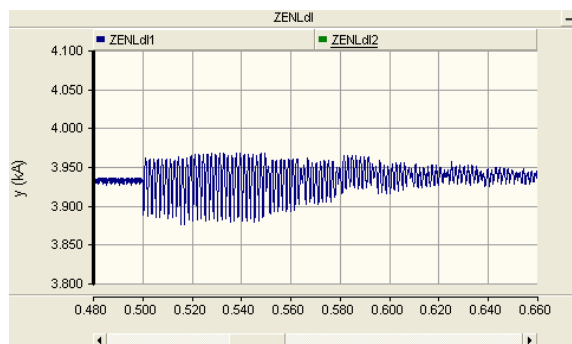
图 10 为直流侧滤波器 HP12/24 处于故障状态时整流站直流输电出线处电压、电流波形。根据图 10 所示的结果，当滤波器 HP12/24 突发故障时，整流侧电压产生振幅为 8 kV 左右的振荡，因为设计的滤波器原先振幅较小，所以对幅值影响也较大。整流侧电压电流变化情况基本同步。可以观察到电流波形也变化情况基本同电压波形相同，振幅为 20 A 左右，在对逆变侧进行仿真研究也可以看到，逆变侧电流波形的变化基本同整流侧相同，逆变侧电压基本无变化。

3) 直流侧滤波器 HP12/36 处于故障状态。

图 11 为直流侧滤波器 HP12/36 处于故障状态时整流站直流输电出线处电压与电流波形图。当 HP12/36 突发故障时产生振幅为 2 kV 左右的振荡，影响不大。与图 11 相比，相对于 HP12/24 突发故障时的振幅小多了，这是因为原先设计的滤波器，HP12/36 相对于 HP12/24 原先存在较大的谐波振幅，所以在突发故障时，波形的畸变和振幅变化比 HP12/24 小。而电流波形基本没什么影响，只是在断路器断开瞬间有个 20 A 左右的脉冲而已，几乎没影响，在逆变侧电流波形变化基本同整流侧相同，逆变侧电压基本无变化。



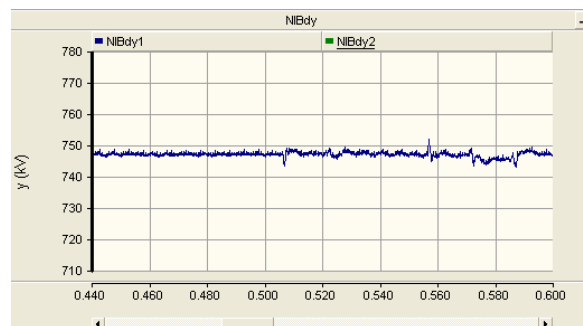
(a) 电压波形



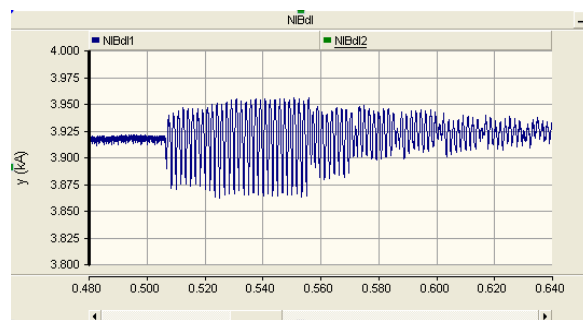
(b) 电流波形

Figure 8. Voltage and current output on DC side with faulty filters in the rectifier station

图 8. 故障状态下的整流站直流输电出线处电压、电流波形



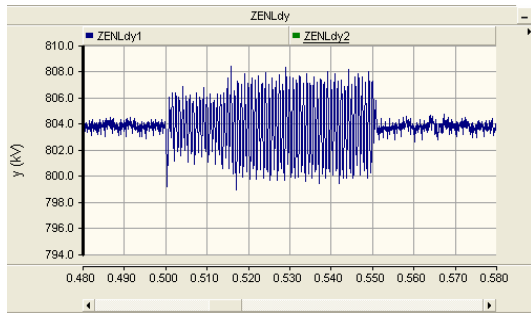
(a) 电压波形



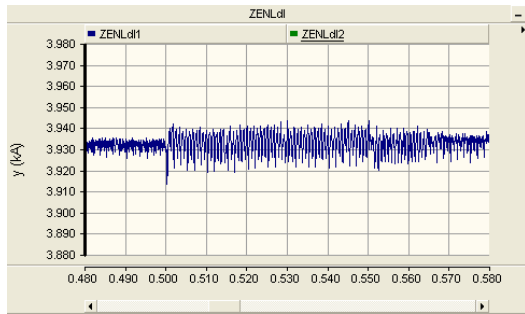
(b) 电流波形

Figure 9. Voltage and current output on DC side with faulty filters in the inverter station

图 9. 故障状态下的逆变站直流输电出线处电压、电流波形



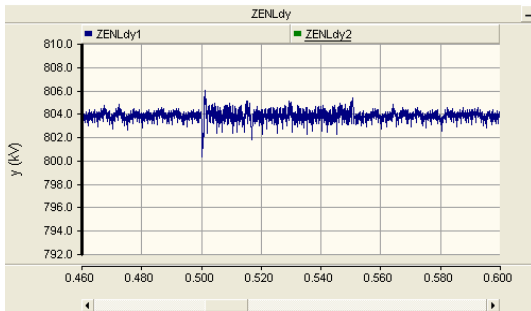
(a) 电压波形



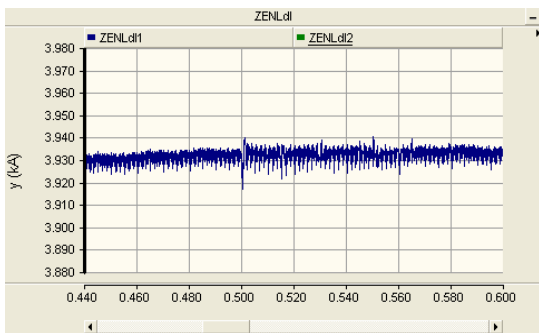
(b) 电流波形

Figure 10. Voltage and current output on DC side with faulty HP12/24 filter in the rectifier station

图 10. HP12/24 故障状态下的整流站直流输电出线处电压、电流波形



(a) 电压波形



(b) 电流波形

Figure 11. Voltage and current output on DC side with faulty HP12/36 filter in the rectifier station

图 11. HP12/36 模型故障状态下的整流站直流输电出线处电压波形

4. 结论

论文计算了直流交直流输电系统滤波器参数，根据得到的参数建立了交直流互联系统的电磁暂态模型。通过比较滤波器正常工作时系统电磁暂态的计算值与实际值，验证了模型的准确性。在此基础上研究了不同滤波器故障时系统的电磁暂态特性。结果表明当直流侧滤波器 HP12/24、HP12/36 同时故障时，系统的电压波动比较大。当只有 HP12/36 处于故障时，系统的电压波动最小，只有 2 kV 左右。

参考文献 (References)

- [1] 宋蕾. 特高压直流输电直流滤波系统综合优化设计[D]. 华北电力大学, 2007: 3-22.
- [2] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版, 2009: 229-234.
- [3] 李崇. 基于双可控电抗器的双调谐滤波器研究[D]. 南京理工大学, 2007.
- [4] 徐超. 特高压直流输电高频谐波及高频滤波器的研究[D]. 华北电力大学, 2009.
- [5] 惠慧, 王庆平, 马进. 换流站实时电磁暂态仿真中的滤波器建模[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 53-57.
- [6] 吴国沛, 任震, 唐卓尧. 高压直流输电系统双调谐滤波器特性研究[J]. 电网技术, 1999, 23(8): 32-34.
- [7] 余春燕. 两种双调谐滤波器的设计与保护[D]. 南京理工大学, 2009: 11-19.
- [8] 曾祥君, 陈博, 唐欣, 李泽文. 三调谐电力滤波器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 104-109.
- [9] 朱革兰, 魏春枝, 王钢. 三调谐直流滤波器高压电容故障分析与保护[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 78-81.
- [10] 李勇伟, 周康, 李力, 何江. ± 800 kV 直流特高压输电线路的设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1518-1520.
- [11] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 492-536, 570-587.
- [12] 宋蕾, 文俊, 闫金春, 韩民晓, 郑劲, 孙中明, 刘连光. 高压直流输电系统直流滤波器的设计[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 647-651.
- [13] 文俊, 孟伟, 殷威杨, 孙中明, 刘宝宏. ± 800 kV 特高压直流输电工程交流滤波器优化设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 912-916.
- [14] 李兴源. 高压直流输电系统制[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-8.
- [15] 翁俐民, 张广祥, 靳剑峰等. 两种新型滤波器的特性研究[J]. 电力电容器, 2000, 20(3): 4-8.
- [16] 任震, 曾艳, 戴保明. 高压直流输电系统中 C 型阻尼滤波器的优化模型及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 12(22): 123-126.
- [17] 陈潜, 张尧, 钟庆, 王海军. ± 800 kV 特高压直流输电系统运行方式的仿真研究[J]. 继电器, 2007, 35(16): 28-29.
- [18] 马为民, 聂定珍, 曹燕明. 向家坝 - 上海 ± 800 kV 特高压直流工程中的关键技术方案[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 1-3.