

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.06.013

特高压直流输电交流滤波器设计软件开发与应用

潘文霞¹,陈 剑¹,张文豪¹,柯联锦¹,吴方劼²

(1. 河海大学能源与电气学院,江苏 南京 211100; 2. 国网北京经济技术研究院,北京 100052)

摘要: 为有效抑制特高压直流输电换流站谐波对交流系统的危害,根据交流滤波器设计的基本原理,开发了一套特高压直流输电交流滤波器设计软件。该软件具有相关参数输入、修改、保存和批量生成、滤波器配置、谐波分析、滤波性能计算、稳态定值计算、结果的数据库导入和 Word 报表生成功能,并利用该软件对某特高压直流工程交流滤波器进行实例设计。结果表明,该软件具有计算灵活、结果可靠、界面友好、通用性强等特点。

关键词: 特高压直流输电;换流站;交流滤波器;谐波分析;滤波性能计算;稳态定值计算

中图分类号: TM723 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)06-0582-06

Development and application of alternating current filter design software for ultra-high-voltage direct current project

PAN Wenxia¹, CHEN Jian¹, ZHANG Wenhao¹, KE Lianjin¹, WU Fangjie²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. State Power Economic Research Institute, Beijing 100052, China)

Abstract: In order to effectively restrain the harm caused by harmonics injected by an ultra-high-voltage direct current (UHVDC) converter station to an alternating current (AC) system, according to the basic principles of the design of AC filters, a set of AC filter design software for UHVDC projects was developed. The software has various functions, including inputting, modification, saving, and batch generation of relevant parameter files; configuration of AC filters; analysis of harmonics; calculation of filter performance and steady-state rating; importing of result data into the database; and generation of word report forms. The software was used to design AC filters for a UHVDC project. The results show that the proposed software is flexible, accurate, convenient, and universal.

Key words: ultra-high-voltage direct current transmission; converter station; AC filter; harmonic analysis; filter performance calculation; steady-state rating calculation

近年来,随着我国特高压直流输电工程的不断增多,系统运行过程中产生的大量谐波引起了相关技术人员的关注^[1-2]。作为特高压直流输电中最重要的谐波源,换流站注入交流系统的谐波远远大于注入直流系统的谐波^[3]。装设滤波器是抑制谐波的一种最有效措施,对于一个典型的特高压直流输电工程,交流滤波器数量一般是直流滤波器数量的3倍以上;交流滤波器提供了换流设备的绝大部分无功消耗;相比交流电网中滤波器,特高压直流换流站交流滤波器的类型更多、电压等级更高、单组容量更大,因此设计更加复杂。交流滤波器设计的合理与否直接关系到特高压直流输电系统投资与运行性能^[4-5]。交流滤波器的设计包括滤波器配置、交流系统谐波分析、滤波性能计算和稳态定值计算,这些涉及设计人员经验水平、大量参数管理和繁琐数据计算^[6],开发一套能将上述内容融为一体、方案配置灵活、数据管理高效和计算准确快速的特高压直流输电交流滤波器设计软件,对于提高滤波器设计水平和效率具有极大的现实意义。

笔者开发了一套应用于特高压直流输电工程的交流滤波器设计软件,并将该软件应用于某±800 kV 特高压直流换流站交流滤波器设计中。实例计算表明,该软件能够可靠、方便地选择滤波器配置方案,高效完

成滤波器设计的相关计算,满足特高压直流工程设计需求。

1 交流滤波器设计的基本原理

1.1 交流滤波器配置

脉动数为 12 的换流站产生的谐波有 $12k\pm 1$ (k 为任意正整数) 次特征谐波,以 11、13、23、25 次为主;其次有各次非特征谐波,以 3、5、7 次为主^[7]。针对换流站谐波电流的主要频次,选用 3 种类型的滤波器抑制谐波:双调谐带通滤波器 (BP11/13);双调谐高通滤波器 (HP24/36);高通 C 型阻尼滤波器 (HP3)^[8-10]。为补偿换流站运行中吸收的大量无功功率,选用 SC 并联电容器加装在换流站交流侧。图 1 为 3 种类型的滤波器和并联电容器的模型设计图。

各类型滤波器 (含并联电容器) 的单组容量和组数,由换流站无功需求和组投切时的换流母线稳态运行电压允许偏差所决定^[11]。根据工程经验,设计人员对求得组数的滤波器组排列组合出若干套滤波器投切策略,并选定其中一套用于交流电网谐波分析和滤波器滤波性能计算,其他备用。

1.2 交流系统谐波分析

根据选定的滤波器投切策略,计算注入交流系统的谐波分量^[12]。图 2 为谐波分析原理图,图中 I_{nF} 为 n 次等效的注入滤波器谐波电流。从图 2 可推导出注入交流系统的谐波分量:

$$I_{nN} = \frac{Z_{nF}}{Z_{nF} + Z_{nN}} I_{nC} \tag{1}$$

$$U_{nN} = \frac{Z_{nF} Z_{nN}}{Z_{nF} + Z_{nN}} I_{nC} \tag{2}$$

式中: I_{nC} 、 I_{nN} —— n 次等效的换流器谐波电流和注入交流系统谐波电流有效值; Z_{nF} 、 Z_{nN} —— n 次等效的滤波器总阻抗和交流系统阻抗; U_{nN} —— n 次交流母线谐波相对地电压有效值。

1.3 交流滤波器滤波性能计算

为分析滤波器滤波性能,对交流母线谐波电压计算 3 个谐波指标^[12-13]:电话谐波波形因数 T_{hff} 、总谐波电压畸变率 D_{eff} 、各次谐波电压畸变率 D_n :

$$T_{hff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} \left(\frac{U_{nN}}{U_{ph}} F_n \right)^2} \times 100\% \tag{3}$$

$$D_{eff} = \sqrt{\sum_{n=2}^{50} \left(\frac{U_{nN}}{U_{ph}} \right)^2} \times 100\% \tag{4}$$

$$D_n = \frac{U_{nN}}{U_{ph}} \times 100\% \tag{5}$$

其中

$$F_n = \frac{p_n n f_0}{800}$$

式中: U_{ph} ——交流母线基波相对地电压的有效值; p_n ——听力加权系数; n ——谐波次数; f_0 ——基波频率。

根据高压直流工程规定^[11],滤波性能满足要求的谐波指标范围选取为: $T_{hff} \leq 1.0\%$; $D_{eff} \leq 1.75\%$; $D_n \leq 1.25\%$ (n 为 ≥ 3 的奇数), $D_n \leq 0.5\%$ (n 为偶数)。

若 3 个谐波指标均满足限制要求,进行稳态定值计算;反之,重新选定一套滤波器投切策略,进行交流系

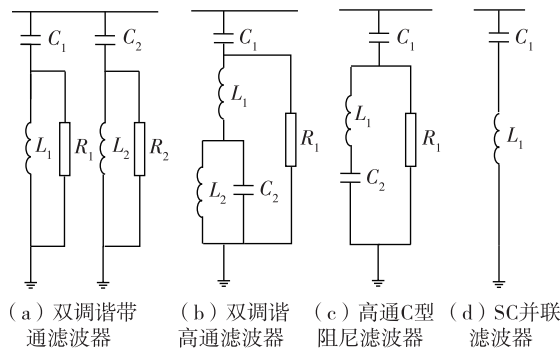


图 1 交流滤波器模型设计

Fig. 1 Design of AC filter model

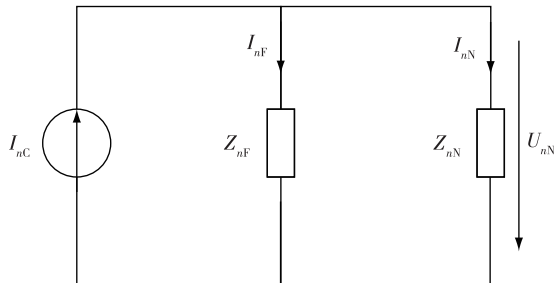


图 2 交流电网谐波分析原理

Fig. 2 Principle diagram of harmonic analysis of AC power grid

统谐波分析和滤波器滤波性能计算。

1.4 交流滤波器稳态定值计算

以 HP24/36 型滤波器为例进行稳态定值研究,计算滤波器元件上的最大电流和电压^[14]。图 3 为稳态定值计算原理图,图中 U_{nB} 为等效的交流系统背景谐波电压, I_n 为流入元件 R_1 的电流, U_n 为元件 R_1 的两端电压,其余电气量同上文。稳态定值计算的电气模型实际上由两部分组成:K2、K3 闭合,K1 打开,计算由 I_{nC} 引起的元件 R_1 上电流 I_{n1} 和电压 U_{n1} ;K2、K3 打开,K1 闭合,计算由 U_{nB} 引起的元件 R_1 上电流 I_{n2} 和电压 U_{n2} 。综合这 2 种谐波源影响下滤波器元件 R_1 上的电流 I_n 和电压 U_n :

$$I_n = \sqrt{I_{n1}^2 + I_{n2}^2 + kI_{n1}I_{n2}}$$

(6)

$$U_n = \sqrt{U_{n1}^2 + U_{n2}^2 + kU_{n1}U_{n2}}$$

(7)

参数 k 在 n 为 3、5、7 次处分别取值为 1.62、1.28、0.72,其他各次谐波处取值为 0。

根据滤波器元件的 I_n 和 U_n ,计算稳态定值研究的滤波器元件 3 个基本参数:热稳定电流 $I_{th} = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} I_n^2}$;包含谐波分量的最大相电压 $U_{max} = \sum_{n=1}^{50} U_n$;用于确定爬电比距的最大电压 $U_{creep} = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} U_n^2}$ 。

2 基于 Visual C++和 SQL Server 的交流滤波器设计软件开发

根据交流滤波器设计的基本原理和具体方法,笔者利用 Visual C++开发了交流滤波器设计的计算程序及其友好界面。计算中包括大量系统参数的输入和大量结果数据的输出,本文利用 SQL Server 开发了数据库进行管理、保存和分析。

2.1 软件的设计思路和功能

该软件能在 Windows xp/vista/7 等多种操作系统中安装、使用,具有 Windows 可视化界面^[14]。通过点击完成参数文件的输入,程序自动调用输入文件进行计算并将结果数据导入数据库,用户可根据需要生成相应 Word 报表,方便分析和打印。结合图 4 所示的软件设计框图,该软件具体实现了以下功能。

- a. 提供相关输入文件的批量生成。特高压直流输电根据其系统接线、运行接线和运行控制模式的不同而有多种运行工况,软件提供 20 种运行工况的选择,用户可根据需要进行点选,软件自动批量生成相应运行工况下的各相关参数文件。
- b. 提供滤波器组配置方案选择。用户可选用软件中已提供的某种类型滤波器或添加新型滤波器,并输入、修改和保存各元件参数值。根据工程经验,用户每次可输入一套滤波器投切策略,完成配置。考虑元件参数偏差造成的滤波器失谐,用户输入换流站最高、最低和基准温度值,点击计算并生成滤波器元件参数的正、负、零偏差值文件。
- c. 在各自独立的界面完成滤波器设计的相关程序计算。用户可自由选择滤波器所有偏差模式下的批次计算或某一偏差模式下的单次计算。2 种计算在各自独立的界面进行,通过点击,程序调用相关输入文件,自动分析交流电网各谐波分量,计算不同运行工况下的滤波性能指标和稳态定值参数。
- d. 提供系统参数和结果数据的数据库管理和开发。通过点击实现不同工程“Excel 系统参数表”的数据库导入和计算时程序对某一工程系统参数的数据库调用。滤波性能和稳态定值在各自模块计算完成后,将结果数据导入数据库。最终的输出结果可根据需要显示或保存为文件。文件以 Word 报表的形式输出,方便用户分析和打印。

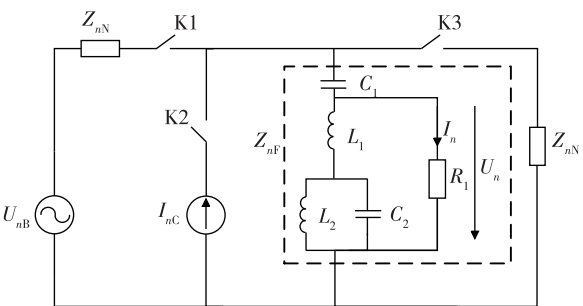


图 3 交流滤波器稳态定值计算原理

Fig. 3 Principle diagram of rating calculation of AC filters

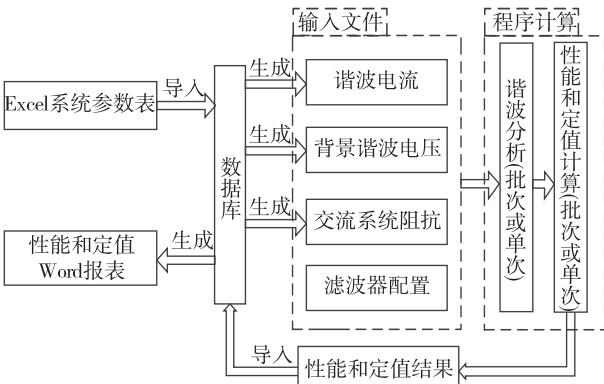


图 4 特高压直流输电交流滤波器设计软件流程

Fig. 4 Flow chart for design software of AC filters for UHVDC project

2.2 软件的计算机实现方法

本文设计的软件主界面如图 5 所示,其示出了交流滤波器设计的 4 个功能框:输入文件、数据库操作、程序计算和输出处理。通过点击各按钮可进入各子界面实现相应功能。

根据软件工程学的模块化设计方法,整个软件的开发由如下 3 大块组成。

a. 参数管理模块

滤波器设计的计算涉及众多参数,为便于参数整理和调用,软件利用 SQL Server 将“Excel 系统参数表”导入数据库。在进行相应计算时,利用数据库控件将所需参数从数据库中导出、生成。Visual C++ 程序链接 SQL Server 数据库采用 ADO 技术中的 Connection 对象实现链接。

通过主界面“输入文件”功能框中设有的 4 个参数管理按钮进入各参数读取子界面。子界面中设置静态文本框自动读取数据库中相应参数值,设置编辑框供用户输入、修改各类参数值,同时设置“保存”和“生成”按钮以驱动程序保存当前录入参数值和批量生成各参数文件。

b. 计算模块

在主界面“程序计算”功能框中,设置有“计算(批次)”和“计算(单次)”按钮,点击它们分别进行滤波器所有偏差模式下的批次计算和某一偏差模式的单次计算。程序编码中,谐波分析、滤波性能和稳态定值计算分别用不同的函数来实现,程序计算的过程就是将各参数赋值给相应变量,变量再传递给相应函数,然后主程序调用并执行函数。

不同滤波器偏差模式下的计算模块相互独立,但模块中有相同的计算代码。软件开发过程中创建了标准模块来存放这些公共代码,供程序计算时多次调用,避免重复编码。

c. 结果输出模块

程序将计算结果导入数据库,并根据用户需要生成相应 Word 报表,此事件通过点击主界面“输出处理”功能框中的“性能”或“定值”按钮来响应。程序编译过程中 Word 报表的自动生成分为 4 个步骤:(a) 向项目中添加 Word 类;(b) 在项目所在头、源文件中添加相应类的定义;(c) $N \times M$ 型 Word 报表的自动生成;(d) 单元格的合并、拆分和数据填充。

本软件最多可对 20 种运行工况进行滤波器滤波性能计算,一种运行工况对应一张滤波性能 Word 报表的输出。滤波器稳态定值计算时,一种类型的滤波器对应一张稳态定值 Word 报表的输出。

3 交流滤波器设计软件的工程实例应用

利用开发的软件,对某 ± 800 kV 直流输电工程换流站整流侧进行交流滤波器设计。

3.1 系统条件

该特高压直流输电工程是双极直流系统,每极由 2 个 12 脉动换流器串联组成。额定直流电压为 ± 800 kV,额定直流电流 5 kA,额定传输功率为 8 000 MW。每个换流器额定理想空载直流电压 231.45 kV,额定触发角 $\alpha = 15^\circ$,额定关断角 $\gamma = 17^\circ$ 。

交流系统额定运行电压为 530 kV,最高稳态电压 550 kV,最低稳态电压 500 kV。换流母线最大短路电流 63 kA,最小短路电流 16.7 kA。换流站接入交流系统额定频率为 50 Hz,稳态频率偏差为 ± 0.2 Hz。换流站空气温度基准值为 25 $^\circ\text{C}$,最大值为 40.3 $^\circ\text{C}$,最小值为-3.7 $^\circ\text{C}$ 。

3.2 滤波器配置

滤波器的选型与元件参数标称值如表 1 所示。滤波器元件参数正、负偏差范围(标么值)如表 2 所示,表中 A、B、C、D 意义同表 1。

当换流站整流侧以双极全压、功率正送方式运行,对多套滤波器投切策略进行交流系统谐波分析和滤波性能计算(批次),筛选出滤波器组最终投切策略为:ABCABCABADDDDDDDDDDD。



图 5 特高压直流输电交流滤波器设计软件主界面

Fig. 5 Main interface for design software of AC filters for HVDC project

表1 交流滤波器选型与元件参数标称值

Table 1 Types and nominal values of element parameters of AC filters

滤波器类型	参数标称值						单组容量/Mvar	分组数
	$C_1/\mu\text{F}$	L_1/mH	$C_2/\mu\text{F}$	L_2/mH	R_1/Ω	R_2/Ω		
A	1.287	66.73	1.287	47.53	10 000	8 000	230	4
B	2.654	4.02	16.471	0.76	300		230	4
C	2.689	461.55	22.973		900		230	2
D	3.154	2.00					270	10

注:A 代表 BP11/13 型滤波器,B 代表 HP24/36 型滤波器,C 代表 HP3 型滤波器,D 代表 SC 并联电容器。

表2 交流滤波器元件参数偏差

Table 2 Deviation of element parameters of AC filter

滤波器类型	参数偏差			
	C_1	L_1	C_2	L_2
A	(0.987, 1.023)	(0.997, 1.003)	(0.991, 1.023)	(0.997, 1.003)
B	(0.977, 1.033)	(0.980, 1.020)	(0.981, 1.033)	(0.980, 1.020)
C	(0.977, 1.033)	(0.980, 1.020)	(0.977, 1.033)	
D	(0.977, 1.033)	(0.980, 1.020)		

3.3 滤波器设计的滤波性能、稳态定值计算结果

滤波器滤波性能计算时,直流功率输送水平从 10%额定功率开始,以 5%额定功率为步长,逐渐增加至 110%额定功率。滤波性能计算结果 Word 报表见表 3。从表 3 中可得,各功率水平下的滤波性能指标最大值: $T_{\text{hff}}=0.98\%$ 小于 1.0% ; $D_{\text{eff}}=1.09\%$ 小于 1.75% ; $D_2=0.30\%$ 小于 0.5% , $D_3=0.68\%$ 小于 1.25% , $D_5=1.02\%$ 小于 1.25% , $D_{11}=0.93\%$ 小于 1.25% 。可见,各指标满足系统谐波限值要求,本组滤波器组投切策略方案能可靠、准确地应用于该运行方式下直流换流站交流系统谐波抑制。

表3 双极全压正送滤波性能计算结果

Table 3 Calculated filter performance under bipolar full-voltage feedforward operation mode

直流功率 输送水平/%	滤波器组投切策略				T_{hff} /%	D_{eff} /%	$D_n(n)/\%$			
	BP11/13	HP24/36	HP3	SC			n 为偶数	$n=3$	$n=5$	n 为 ≥ 7 的奇数
10	1	1	0	0	0.98	1.0	0.06(4)	0.08	0.59	0.69(35)
15	1	1	0	0	0.95	1.08	0.11(4)	0.15	1.02	0.93(11)
20	1	1	1	0	0.96	1.09	0.07(6)	0.13	0.23	0.61(7)
25	2	1	1	0	0.91	0.98	0.07(4)	0.16	0.28	0.60(7)
30	2	1	1	0	0.89	1.02	0.09(4)	0.21	0.38	0.77(11)
35	2	2	1	0	0.87	0.81	0.10(4)	0.29	0.45	0.54(23)
40	2	2	2	0	0.92	0.81	0.07(4)	0.21	0.39	0.42(11)
45	3	2	2	0	0.89	0.75	0.07(4)	0.24	0.41	0.40(11)
50	3	3	2	0	0.64	0.74	0.07(4)	0.28	0.50	0.32(11)
55	4	3	2	0	0.62	0.65	0.08(2)	0.32	0.45	0.27(11)
60	4	4	2	0	0.50	0.62	0.11(2)	0.36	0.41	0.27(11)
65	4	4	2	1	0.38	0.64	0.17(2)	0.39	0.30	0.28(11)
70	4	4	2	2	0.38	0.65	0.24(2)	0.42	0.27	0.29(11)
75	4	4	2	3	0.42	0.68	0.30(2)	0.46	0.23	0.30(11)
80	4	4	2	4	0.48	0.73	0.30(2)	0.50	0.19	0.31(11)
85	4	4	2	5	0.46	0.75	0.30(2)	0.53	0.18	0.32(11)
90	4	4	2	6	0.40	0.76	0.29(2)	0.57	0.19	0.32(11)
95	4	4	2	7	0.35	0.78	0.29(2)	0.61	0.17	0.32(11)
100	4	4	2	8	0.32	0.80	0.29(2)	0.64	0.15	0.32(11)
105	4	4	2	9	0.29	0.81	0.30(2)	0.66	0.16	0.33(11)
110	4	4	2	10	0.27	0.83	0.30(2)	0.68	0.15	0.33(11)

在滤波性能计算满足要求的基础上,对各类型滤波器元件进行稳态定值计算。限于篇幅,本文给出了 HP24/36 滤波器元件的计算结果,见表 4。实际工程中根据滤波器元件的稳态定值参数,制造出满足要求的滤波器。

4 结 论

依据交流滤波器设计的基本原理和具体方法,以 Visual

表4 HP24/36 稳态定值计算结果

Table 4 Calculated results of steady-state rating of HP24/36

参数	I_{th}/A	U_{max}/kV	$U_{\text{creep}}/\text{kV}$
C_1	466.38	432.34	325.18
L_1	465.29	37.72	14.13
C_2	849.63	15.26	6.17
L_2	809.65	15.26	6.17
R_1	25.27	36.17	12.61

C++和 SQL Server 数据库为工具,开发了一套特高压直流输电交流滤波器设计的软件。该软件可批量生成相关输入参数文件,灵活选择滤波器的配置方案,高效进行交流系统谐波分析、滤波器滤波性能和稳态定值计算,并将结果数据导入到数据库,根据需要生成 Word 报表文件。

利用开发的软件,对某 ± 800 kV 直流输电工程换流站整流侧进行交流滤波器设计,得到了满足系统谐波限值要求的滤波器配置方案 and 该配置方案下滤波器元件的稳态定值参数。实例应用表明,本软件具有设计灵活、计算快速、结果准确、操作方便、功能全面、人机界面友好等特点,可方便、可靠地应用于特高压直流工程交流滤波器设计。

参考文献:

[1] 李璟延, 杨一鸣, 吴方劫, 等. ± 800 kV 直流输电工程交流滤波器暂态定值计算[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 562-567. (LI Jingyan, YANG Yiming, WU Fangjie, et al. Calculation of AC filter transient fixed value on ± 800 kV HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 562-567. (in Chinese))

[2] 马俊民, 黄永瑞, 何青连, 等. ± 800 kV 特高压直流输电系统谐波研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 33-37. (MA Junmin, HUANG Yongrui, HE Qinglian, et al. Harmonic research of ± 800 kV UHV DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 33-37. (in Chinese))

[3] 吴方劫, 马为民, 孙中明, 等. 特高压换流站交流滤波器现场试验的分析与探讨[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 167-172. (WU Fangjie, MA Weimin, SUN Zhongming, et al. Analysis and discussion on the field testing of AC filters in UHVDC converter station[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 167-172. (in Chinese))

[4] 薛英林, 李普明, 徐政, 等. 同塔双回高压直流工程交流滤波器设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 50-54. (XUE Yinglin, LI Puming, XU Zheng, et al. Design of alternating current filter for double circuit high voltage direct current transmission project[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(17): 50-54. (in Chinese))

[5] 文俊, 孟伟, 殷威杨, 等. ± 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): 912-915. (WEN Jun, MENG Wei, YIN Weiyang, et al. Optimizing design of AC filters of ± 800 kV UHVDC transmission projects[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 912-915. (in Chinese))

[6] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 7-18.

[7] 马宏忠, 李玉芬, 何瑜. 软件实现同步采样的频域误差分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 212-215. (MA Hongzhong, LI Yufen, HE Yu. Frequency-domain error analysis of synchronous sampling realized by software[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(2), 212-215. (in Chinese))

[8] GEORGE J W. Power systems harmonics-fundamentals, analysis and filter design[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 326-335.

[9] LI Y, LUO L F, REHTANZ C, et al. Influence of inductive filtering method on harmonic transfer characteristic of HVDC transmission system[C]//IEEE. 2011 IEEE PES Trondheim Power Tech: The Power of Technology for a Sustainable Society. Piscataway: IEEE Computer Society, 2011: 19-23.

[10] 杨鹏, 凌代俭, 史旺旺. 非同步交流采样误差分析及滤波器设计[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(1): 108-110. (YANG Peng, LING Daijian, SHI Wangwang. Error analysis of non synchronous ac sampling and filter design[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2000, 28(1): 108-110. (in Chinese))

[11] DL/T 5223—2005 高压直流换流站设计技术规定[S].

[12] 北京网联直流工程技术有限公司. ± 800 kV 特高压直流输电工程成套设计技术报告: 交流滤波器性能研究报告[R]. 北京: 北京网联直流工程技术有限公司, 2012.

[13] 北京网联直流工程技术有限公司. ± 800 kV 特高压直流输电工程功能规范书[R]. 北京: 北京网联直流工程技术有限公司, 2012.

[14] 李建华, 王渊, 蒋国顺, 等. 高压直流输电系统谐波计算软件包开发与应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 96-99. (LI Jianhua, WANG Yuan, JIANG Guoshun, et al. Development and application of harmonic calculation software for HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 96-99. (in Chinese))