

±1 100 kV 直流输电工程直流滤波器方案研究

任军辉, 张万荣, 张帆, 张雷, 李璐

(西安西电电力系统有限公司, 西安 710075)

摘要: 文中分析了±1 100 kV 特高压直流输电工程换流器在直流侧产生的谐波的特点, 根据现有的工程参数计算出了换流器在直流侧产生的谐波电压, 并将计算结果与±800 kV 高压直流输电工程做了比较。文中以规划的±1 100 kV 特高压直流输电工程为例, 对换流器在直流极线和地极引线上产生的等效干扰电流进行了计算。通过对多种直流滤波器配置方案的滤波性能进行试算, 最终给出了推荐的直流滤波器配置方案, 该方案满足滤波性能限制要求并且造价较低。文中同时计算出了该配置方案下直流极线和地极引线上的最大等效干扰电流: 双极 2 728 mA, 单极 5 882 mA。文中的研究结果对最终确定实际工程直流滤波器方案具有一定的参考作用。

关键词: ±1 100 kV; 直流输电; 直流滤波器方案

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2013)03-0069-05

Study on ±1 100 kV HVDC Project DC Filter Scheme

REN Jun-hui, ZHANG Wan-rong, ZHANG Fan, ZHANG Lei, LI Lu

(Xi'an XD Power Systems Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: The characteristic of the DC side harmonics produced by the converter in ±1 100 kV HVDC project is analyzed in this article. The DC side harmonic voltage is calculated according to the available project parameters. The calculation result and ±800 kV HVDC project are compared. The equivalent disturbing currents in DC pole lines and DC electrode lines are calculated. After many times filtering performance result for different DC filter schemes are calculated, finally one DC filter solution, which satisfies the performance limits and low-cost, is proposed. The maximum equivalent disturbing currents in DC pole lines and DC electrode lines is calculated. The maximum equivalent disturbing current: bipolar mode 2 728 mA; unipolar mode 5 882 mA. The result of this study is helpful in determining the final project DC filter solution.

Key words: ±1100 kV; HVDC; DC filter

0 引言

对于直流输电工程来说, 直流滤波器(DCF)是专门为了降低流入直流极线和地极引线中的谐波电流而装设的^[1-2]。直流滤波器一般连接于极母线和极中性线之间。考虑到同一换流站两极的对称性, 两极应配置相同的直流滤波器^[1-10]。

直流滤波器配置应充分考虑各次谐波的幅值及其在等值干扰电流中所占的比重。在理论上, 12 脉动换流器仅在直流侧产生 12n 次(n=1, 2, 3...)特征

谐波电压, 因此, 对于换流器是 12 脉波的直流输电工程来说, 直流滤波器一般调谐在 12、24、36 次。实际上由于存在着各种不对称因素, 并且换流变压器对地存在杂散电容等, 换流器除了在直流侧产生特征次谐波电压之外, 还会在直流侧产生幅值较小的非特征谐波电压。其中, 由换流变压器杂散电容而产生的次数较低的非特征谐波进入直流线路的分量较小。另一方面通信线路受到谐波干扰的频域主要在 1 000 Hz 左右, 对 50 Hz 交流系统来讲, 20 次左右的谐波分量危害最严重, 要重点消除这部分谐波^[11-12]。

文中以国内规划的第 1 个 ±1 100 kV 特高压直

流输电工程为例,对特高压直流工程直流滤波器设置方案进行研究。

1 ±1 100 kV 直流工程与±500 kV 和±800 kV 直流工程换流器的比较

±500 kV 直流工程每个单极的换流桥是由一个12P 桥构成,而±800 kV 直流工程每个单极是由两个12P 桥串联构成,现在的±1 100 kV 也倾向于每极由两个12P 桥串联构成。该次研究中,±1 100 kV 换流器由两个550 kV 12P 换流器串联而成。

±1 100 kV 直流输电工程换流器结构及直流滤波器连接方式见图1,图1中直流滤波器的配置方式暂按每站每极配置两组直流滤波器制图^[5-10]。

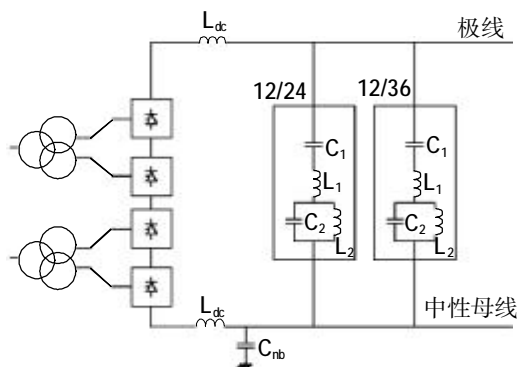


图1 ±800 kV UHVDC 工程换流器原理接线及直流滤波器连接方式

Fig. 1 ±800 kV UHVDC circuit diagram

2 等效干扰电流限制值要求

直流滤波器性能考核指标是直流极线及地极引线的等效干扰电流水平^[5-19]。降低直流极线和地极引线的等效谐波干扰电流的目的是为了减小流过直流线路的谐波电流对沿线通讯系统的干扰。该次研究中的等效干扰电流限制值按如下考虑:①平衡双极运行3 000 mA;②单极运行6 000 mA^[3-8,19]。

3 直流侧的谐波电压

3.1 计算条件

在计算直流侧的谐波电压时,所使用的系统条件见表1、2。

表1 交流系统主要参数

Tab. 1 AC system main parameters

参数	整流侧	逆变侧
交流系统额定电压/kV	535	515
最高稳态电压/kV	550	550
最低稳态电压/kV	500	500
AC 系统频率/Hz	50±0.2	50±0.1

表2 直流系统主要参数

Tab. 2 DC system main parameters

参数	数值
额定直流功率/MW	10 450
额定直流电压/kV _{dc}	1 100(550+550)
额定直流电流/A _{dc}	4 750
α/(°)	15
γ/(°)	17

3.1.1 平波电抗器及中性母线电容器参数

每站每极的直流极母线及中性母线各设有120 mH 的平波电抗器。每站每极中性母线各设有中性母线电容器,中性母线电容按15 μF 考虑。平波电抗器和直流中性母线电容器对于降低直流极线及地极引线上的等效干扰电流也起着十分重要的作用。

3.1.2 直流线路参数

直流线路全长约2 300 km。直流极导线采用8 分裂导线,每根导线截面1 000 mm²。

由于目前无法获得±1 100 kV 直流工程两侧换流站交流侧的谐波水平,因此在计算直流侧的谐波电压时两侧换流站交流侧的谐波水平按向家坝—上海±800 kV 直流工程交流侧的谐波水平取值。

3.2 计算结果

计算出的整流站直流侧谐波电压见表3。

表3 整流站直流侧谐波电压计算结果

Tab. 3 DC side harmonic voltage calculation result at rectifier station

谐波次数	谐波电压/kV	谐波次数	谐波电压/kV
1	0.07	26	1.96
2	13.31	27	0.08
3	2.17	28	0.37
4	0.43	29	0.07
5	0.06	30	1.49
6	12.28	31	0.06
7	0.06	32	0.49
8	0.75	33	0.11
9	1.94	34	1.66
10	1.69	35	0.06
11	0.06	36	12.18
12	39.99	37	0.07
13	0.07	38	1.85
14	2.30	39	0.11
15	0.33	40	0.41
16	0.31	41	0.07
17	0.07	42	0.99
18	2.60	43	0.07
19	0.07	44	0.51
20	0.51	45	0.11
21	0.11	46	1.65
22	1.66	47	0.06
23	0.06	48	9.03
24	18.60	49	0.07
25	0.07	50	1.79

计算出的逆变站直流侧谐波电压见表 4。

表 4 逆变站直流侧谐波电压计算结果
Tab. 4 DC side harmonic voltage calculation result at inverter station

谐波次数	谐波电压/kV	谐波次数	谐波电压/kV
1	0.07	26	1.72
2	11.12	27	0.07
3	2.16	28	0.36
4	0.42	29	0.07
5	0.06	30	1.52
6	12.17	31	0.06
7	0.06	32	0.47
8	0.73	33	0.11
9	1.80	34	1.43
10	1.42	35	0.06
11	0.06	36	11.64
12	39.06	37	0.07
13	0.07	38	1.63
14	2.01	39	0.11
15	0.23	40	0.40
16	0.31	41	0.07
17	0.07	42	0.97
18	2.49	43	0.07
19	0.07	44	0.48
20	0.49	45	0.11
21	0.19	46	1.42
22	1.41	47	0.06
23	0.06	48	8.47
24	18.21	49	0.07
25	0.07	50	1.59

将计算出的直流侧谐波电压与 ± 800 kV 直流工程计算结果进行比较可以看出, ± 1 100 kV 直流工程在直流侧产生的谐波电压更严重。

因此, 在等效干扰电流(I_{eq})限制值不变的情况下, 相应的 ± 1 100 kV 直流工程直流滤波器的高压电容器电容值 C_1 要相应增大。而直流滤波器的成本主要取决于直流滤波器的高压电容器, 为了降低 ± 1 100 kV 直流工程直流滤波器的造价, 在确定直流滤波器配置方案时, 使用的 C_1 电容值应尽可能的小。

4 计算方法

在计算等效干扰电流时, 12P 换流器用 4 个 3P 谐波电压源表示^[6-12], 模型见图 2。图 2 中的电容为换流变压器中性点对地寄生电容, 电感 L_{3p} 为实际换相电抗在一个换相周期内的平均值。

对于 ± 1 100 kV 直流工程来说, 每个极由两个

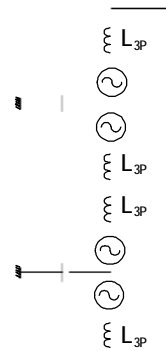


图 2 用 4 个 3P 谐波电压源表示 1 个 12P 换流桥模型
Fig. 2 A 12P converter model is combined by 4 3P harmonic voltage source

12P 换流桥串联组成, 两个 12P 换流桥可用图 3 所示模型表示。

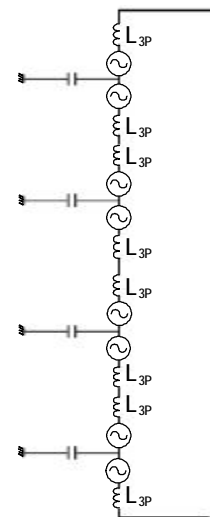


图 3 两个串联的 12P 换流桥模型
Fig. 3 Two 12P converter model in series

± 1 100 kV 直流工程每个单极中两个 12P 桥, 在正常运行情况下运行参数基本相同, 但在实际运行中, 除了直流电流 I_d 完全相同之外, 两个 12P 桥中的其他运行参数会存在微小差别, 这主要是因为实际存在着各种测量及控制误差, 上、下换流变压器分接头位置可能不一致等。在直流滤波器设计中, 暂不考虑这些测量及控制误差, 认为每个单极中两个 12P 桥的运行参数完全一致, 这样每个极上、下两个 12P 桥所产生的各次谐波电压幅值及相位也完全一致。这是一种保守的考虑。

5 直流滤波器配置方案及等效干扰电流计算结果

确定直流滤波器配置方案是一个反复的过程。具体步骤为: 先确定一组滤波器元件参数, 然后计算滤波器性能(等效干扰电流 I_{eq}), 若性能不满足要求, 需对直流滤波器元件进行优化, 直到计算出的直流

滤波器性能结果满足要求为止。在直流滤波器中,高压电容器所占费用最大,因而,在滤波性能满足要求情况下,高压电容器的电容值越小越经济。

计算 DCF 性能可分为两步:首先计算换流阀在直流侧产生的谐波电压;在此基础上,搭建直流系统模型,计算直流线路沿线的等效干扰电流。

该次研究采用无源型直流滤波器。无源型直流滤波器可设计为双调谐,也可设计为三调谐。

在该次研究过程中,尝试了好几种直流滤波器配置方案,但滤波效果均不理想,并且在计算结果中发现,39次谐波电流较大,对滤波效果有显著影响。同时,交流侧的5、7次谐波较大,造成直流侧6次谐波电压比较显著。考虑到以上因素,特设计了一种分别调谐在6次、12次和39次的三调谐直流滤波器 TT6/12/39。

具体的配置方案为:整流站和逆变站的直流滤波器采用相同配置,每站每极设置一组三调谐直流滤波器支路 TT6/12/39。

直流滤波器元件参数见表5。

表5 直流滤波器元件参数

Tab. 5 DC filter component parameters	
参数	TT6/12/39
调谐频率/Hz	300/600/1 950
$C_1/\mu\text{F}$	1.5
L_1/mH	8.771
$C_2/\mu\text{F}$	3.296
L_2/mH	55.536
$C_3/\mu\text{F}$	3.397
L_3/mH	16.125
电抗器的 q 值	>100
电容器的 $\tan\delta(50\text{ Hz})$	0.000 2

TT6/12/39 电路图见图4。

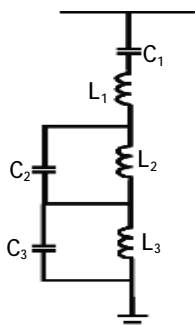


图4 TT6/12/39 电路图

Fig. 4 TT6/12/39 circuit diagram

依据以上直流滤波器方案及系统参数对±1 100 kV 直流输电工程直流极线和地极引线上的等效干扰电流进行计算,直流极线上的等效谐波干扰电流随距

离的分布见图5,距离零点为整流侧换流站。

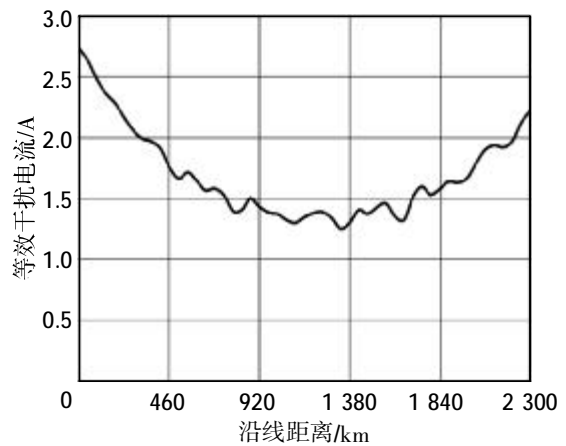


图5 双极额定运行,直流极线等效干扰电流

Fig. 5 I_{eq} in DC pole line at bipole normal operation

等效干扰电流计算结果见表6。

表6 等效干扰电流结果汇总

Tab. 6 Summary of I_{eq}

运行方式	最大等效干扰电流 I_{eq}/mA			规定的最大 I_{eq}/mA
	极线	地极引线 整流侧	地极引线 逆变侧	
双极,全压	2 728	2 166	1 246	3 000
单极大地 回线,全压	5 882	2 623	1 690	6 000
单极金属 回线,全压	4 225	-	2 173	6 000

从计算结果可以看出,每站每极配置1组 TT6/12/39 直流滤波器可以满足±1 100 kV 直流工程直流侧的滤波要求。

6 结论

1)±1 100 kV 直流工程换流器结构与±800 kV 直流工程相似,但其在直流侧产生的谐波电压更为严重。

2)通过对±1 100 kV 直流工程直流滤波器性能开展研究,每站每极配置1组 TT6/12/39 直流滤波器可以满足±1 100 kV 直流工程直流侧的滤波要求。

3)由于该次研究用到的一些计算条件并不是最终的工程参数,比如线路距离、杆塔尺寸等,这些参数与实际参数可能有一些差异,所以该次研究结果仅供参考,针对具体工程的实际参数应进行更加详细的计算。

参考文献:

[1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

- ZHAO Wan-jun. Technology of HVDC transmission project[M]. Beijing:China Electric Power Press,2004.
- [2] 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,2006.
- LIU Zhen-ya. Special of the research results of UHVDC transmission technology [M]. Beijing:China Electric Power Press,2006.
- [3] 陈东,张凌,熊万洲.特高压直流滤波器滤波标准初步研究[J]. 高电压技术,2006,32(9):125-128.
- CHEN Dong, ZHANG Ling, XIONG Wan-zhou. A preliminary study on UHVDC DC filter filtering [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9):125-128.
- [4] 刘海峰,徐政,金丽成.直流输电线路等效干扰电流限值的研究[J]. 高电压技术,2001,27(4):16-18.
- LIU Hai-feng, XU Zheng, JIN Li-cheng. A study on HVDC line equivalent disturbing current limits [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4):16-18.
- [5] 郑劲,张小武,孙中明,等.特高压直流输电工程的谐波限制标准及滤波器的设计[J]. 电网技术,2007,31(13):1-6.
- ZHENG Jin, ZHANG Xiao-wu, SUN Zhong-ming, et al. Harmonic current restriction standard and filter design for UHVDC project [J]. High Voltage Engineering, 2007,31(13):1-6.
- [6] 周长春,徐政,郑劲.三峡—广东直流线路电信干扰计算[J]. 电网技术,2003,27(1):13-17.
- ZHOU Chang-chun, XU Zheng, ZHENG Jin. Calculation of telecommunication interferences caused by Three Gorges-Guangdong HVDC link[J]. Power System Technology,2003,27(1):13-17.
- [7] JOHANSSON A V, EKSTROM A. Telephone interference criteria for HVDC transmission lines [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(2):1408-1421.
- [8] ASPLUND Q, ZHANG W Y. Active DC filters for HVDC systems [J]. ABB Review, 1995, 6(7):17-21.
- [9] 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.
- WU Guo-pei, REN Zhen, TANG Zhuo-yao. Characteristic analysis of double-tuned filter in HVDC systems [J]. Power System Technology, 1999, 23(8):32-34.
- [10] CIGRE WG 14.32. HVDC converter stations for voltage above ± 600 kV [S].
- [11] 夏道止,沈赞坝.高压直流输电系统的谐波分析及滤波 [M]. 北京:水利电力出版社,1993.
- XIA Dao-zhi, SHEN Zan-xun. HVDC system harmonic analysis and filtering [M]. Beijing:Water Power Press, 1993.
- [12] IEEE Std1124—2003. IEEE guide for the analysis and definition of DC-side harmonic performance of HVDC transmission systems[S].
- [13] IEC PAS 62001—2004. Guide to the specification and design evaluation of AC filters for HVDC systems[S].
- [14] 周沛洪,修木洪,聂定珍.同廊道架设交直流线路的相互影响[J]. 高电压技术,2003,29(9):5-7.
- ZHOU Pei-hong, XIU Mu-hong, NIE Ding-zhen. The influence between AC and DC transmission line built in same corridor [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9):5-7.
- [15] WU Dong, HARTINGS R, ASTROM U. Investigations on the outdoor insulation of ± 800 kV DC transmission system [C]//ICPST'94. Beijing:IEEE, 1994:13-19.
- [16] 王峰,徐政,薛英林.参数可调节的高压直流输电系统直流滤波器设计方案 [J]. 高电压技术,2011,37(4):1035-1040.
- WANG Feng, XU Zheng, XUE Ying-lin. DC filter design with parameters adjustable for HVDC transmission [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4):1035-1040.
- [17] 孙中明.葛南直流滤波器性能研究 [J]. 高电压技术,2004,30(11):65-66.
- SUN Zhong-ming. Ge-Nan DC filter performance study [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11):65-66.
- [18] 舒印彪,刘泽洪,高理迎,等. ± 800 kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计 [J]. 电网技术,2006,30(1):1-8.
- SHU Yin-biao, LIU Ze-hong, GAO Li-ying, et al. A preliminary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6 400 MW [J]. Power System Technology, 2006, 30(1):1-8.
- [19] 北京网联直流信息技术有限公司. 向家坝—上海 ± 800 kV 特高压直流输电工程功能规范书 [Z]. 北京:北京网联直流信息技术有限公司,2006.
- Beijing Wanglian HVDC Engineering Technology Co., Ltd.. Specification for Xiangjiaba-Shanghai UHVDC transmission project [Z]. Beijing:Beijing Wanglian HVDC Engineering Technology Co.,Ltd., 2006.

任军辉(1979—),男,工程师,主要从事高压直流输电工程交、直流滤波器设计研究,PLC滤波器设计研究等。