

DOI: 10.14044/j.1674-1757. pcrpc.2024.04.002

多端直流输电工程交流滤波器设计与无功补偿研究

曹洋, 任军辉, 张万荣, 党瑞

(西安西电电力系统有限公司, 西安 710075)

摘要: 多端直流输电系统是实现多个能源、负荷中心跨区域互联的有效技术,在技术性和经济性等方面都具备较强竞争力。笔者以我国企业承建、目前正在建的某项海外多端直流输电工程为例,进行多端直流输电工程交流滤波器设计与无功补偿研究。该工程中某换流站是弱交流系统,对电压稳定性要求较高,标称频率为 60 Hz,设计交流滤波器时采用依照北美惯例的性能指标—IT 乘积。介绍了多端系统与双端系统差异,IT 乘积的计算假设回路结构,在此基础上针对换流站弱交流系统设计出满足性能要求的交流滤波器,并进行无功补偿研究。研究结果对最终确定实际工程交流滤波器方案具有一定的参考作用。

关键词: 多端直流输电工程; 交流滤波器; 性能指标; 无功补偿

Study on Design and Reactive Power Compensation of AC Filter for Multi-terminal DC Transmission Project

CAO Yang, REN Junhui, ZHANG Wanrong, DANG Rui

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

Abstract: Multi-terminal DC transmission system is an effective technology to achieve cross-regional interconnection of multiple energy and load centers, and it has strong competitiveness in both technical and economical aspects. In this paper, a overseas multi-terminal DC transmission project constructed by Chinese enterprises is taken as an example, the design and reactive power compensation of the AC filter for multi-terminal DC transmission project are studied. A converter station in this project is a weak AC system with high requirement to voltage stability. The nominal frequency of the converter station is 60 Hz. The IT product, the performance index of North American practice, is adopted in the design of the AC filter. In this paper, the difference between multi-terminal and double-terminal system as well as the hypothetical loop structure of IT product are introduced. On this basis, an AC filter meeting the performance requirements are designed and reactive power compensation is studied for the weak AC system of the the converter station. The research results in this paper have a certain reference for the final determination of the practical engineering AC filter scheme.

Keywords: multi-terminal DC transmission project; AC filter; performance index; reactive power compensation

0 引言

传统的双端直流输电系统仅能实现点对点的功率传输,无法实现多个区域电网间的互联,对线路走廊的利用率不够充分^[1-5]。同时仅有一个受端站通常无法单独消纳从送端送来的全部电量,容易导致潮流迂回^[6-7]。多端直流输电系统由 3 个及以上的换流站、连接各站的直流线路以及各站配置的

滤波、无功补偿等设备组成^[8-11]。与常规的两端直流输电系统相比,多端系统运行方式、组合样式更复杂,控制保护策略有较大差异,对控制保护系统的功能完备性和可靠性提出了更高要求。但多端系统能够满足多电源供电和多终端受电的要求,优化了送受端电网结构,更为灵活合理^[12-13]。目前世界上已投入运行的多端直流输电工程有意大利—科西嘉—撒丁岛三端工程、魁北克—新英格兰五端工

收稿日期:2023-02-13

程、日本新信浓三端工程、舟山群岛五端工程等^[14-15]。此外,北欧、中亚、北非等地区也相继有规划与研究中的多端直流输电工程涌现^[16]。

目前,我国企业承建的某多端直流输电工程中,某换流站短路容量为3 557 MVA,传输功率为1 500 MW,属于弱交流系统^[17-19]。当高压直流输电系统连于弱交流系统时,可能引发电压不稳定、谐波谐振和谐波不稳定等问题^[20-22],严重影响系统正常运行。因此,该换流站对电压稳定性要求较高,对滤波器投切要求严苛。

本文对比分析多端系统和双端系统谐波源差异,针对某换流站弱交流系统设计交流滤波器,并进行无功补偿研究,对最终确定实际工程交流滤波器方案具有一定的参考作用。

1 多端系统和双端系统谐波源比较

进行换流站交流滤波器设计,首先需要进行谐波源计算。从交流系统角度来看,换流器是一个高内阻抗电流源,产生的谐波分为特征谐波和非特征谐波。多端系统换流站换流器原理结构和滤波器、无功补偿器配置原理见图1。

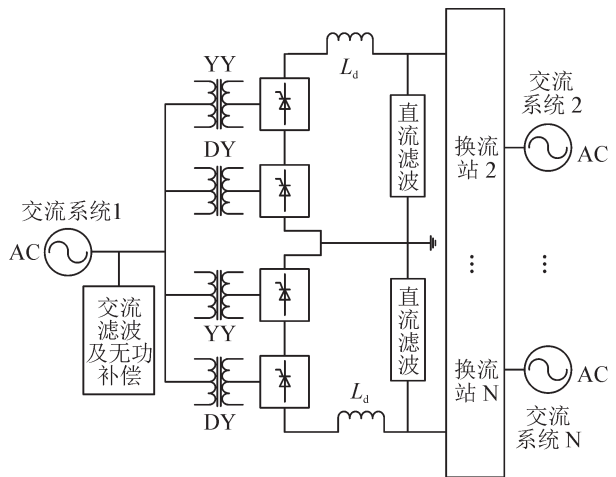


图1 多端系统结构原理图
Fig. 1 Structural principle diagram of multi-terminal system

通过对换流变压器系统侧电流波形进行富氏(Fourier)分解,可获得特征谐波电流幅值,特征谐波是主回路参数和交流电压的函数。决定特征谐波电流幅值的主要因素有交流系统电压、直流电压、直流电流、换流变压器相对感性压降和换流器触发角或熄弧角。由于存在一些非理想因素,所以换流器除了产生特征谐波之外,还会产生非特征谐波。非特征谐波产生的主要原因是换流器参数不对称、变压器电抗和换流器电源电压不平衡。对于本文研究的换流站,采用12脉波换流器,需考虑的非理想条件有换流变各相阻抗不平衡、Y-桥和Δ-桥之

间相对电感压降的偏差、不同阀之间触发角的偏差和交流系统不对称。

因此,换流站作为整流侧或逆变侧,在双极、单极、降电压等不同运行工况下所输出的谐波源,仅与该换流站本身设计有关,与送、受端数量无关。

2 交流滤波器设计

2.1 性能要求

本工程基波频率为60 Hz,不同于我国的工频频率50 Hz,因此采用依照北美惯例的指标—电话干扰系数TIF和IT乘积指标^[23]。

电话干扰系数TIF定义如下:

TIF = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (U_n W_n)^2}}{U_1} \tag{1}

式中: N 为需要考虑的最高谐波次数; U_n 为 n 次谐波电压有效值; U_1 为基波电压有效值; W_n 为 n 次谐波频率TIF加权系数,计算如下

W_n = C_n 5n \cdot f_0 \tag{2}

式中: C_n 为 C 信息加权系数; f_0 为基波频率(60 Hz)。

IT乘积定义如下:

IT = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (I_n W_n)^2} \tag{3}

式中, I_n 为 n 次谐波电流有效值。

IEC标准对于高压直流换流站交流母线上的典型TIF要求为15~50,典型IT要求为15 000~50 000^[23]。我国标准对于500 kV高压直流系统交流谐波的典型限值为:奇次谐波电压畸变典型限值为1%;偶次谐波电压畸变典型限值为0.5%;总谐波畸变率限值范围为1%~4%^[24-25]。本工程结合实际电网情况,对单次谐波电压畸变率(D_n)限制为国标的一半,总谐波电压畸变率(THD)和IT乘积限值要求严苛,设计难度大,性能限值要求概括见表1。

表1 性能限值要求
Table 1 Performance limit requirements

D_n	THD	TIF	IT
0.5%	1.5%	40.0	20 000.0

2.2 谐波电流源计算

1) 计算条件

在计算交流侧谐波电流时,所使用的交、直流系统主要参数见表2-3。

表2 交流系统主要参数
Table 2 Main parameters of AC system

交流系统 额定电压/ kV	最高系统 稳态电压/ kV	最低系统 稳态电压/ kV	标称交流 系统频率/ Hz	标称频率 偏差/ Hz
380	400	360	60	0.5/-1.2

表3 直流系统主要参数
Table 3 Main parameters of DC system

额定直流 功率 P_N /MW	额定直流 电压 U_{dN} /kV	额定直流 电流 I_{dN} /A	额定触发 角 $\alpha/(\circ)$	额定熄弧 角 $g/(\circ)$
1 500	± 500	1 500	15 (12.5~17.5)	17

2)计算结果

换流器产生的谐波电流计算结果见表4。

表4 谐波电流计算结果
Table 4 Calculation result of harmonic current

谐波次数	20% I_{dN}/A	50% I_{dN}/A	100% I_{dN}/A
1	487.49	1 250.72	2 605.33
2	0.17	0.34	0.63
3	0.73	2.91	7.93
4	0.17	0.34	0.57
5	0.36	1.64	4.25
6	0.20	0.42	0.74
7	0.35	1.66	3.93
8	0.17	0.32	0.46
9	0.70	2.51	5.65
10	0.16	0.28	0.38
11	42.87	95.51	138.94
12	0.19	0.37	0.45
13	35.78	75.01	91.54
14	0.15	0.23	0.21
15	0.66	2.11	3.35
16	0.15	0.22	0.13
17	0.32	1.07	1.99
18	0.17	0.25	0.07
19	0.32	1.07	1.63
20	0.14	0.17	0.09
21	0.58	1.37	1.90
22	0.14	0.13	0.11
23	18.00	21.65	25.22
24	0.16	0.13	0.19
25	16.05	15.93	23.39
26	0.13	0.08	0.14
27	0.52	1.02	1.78
28	0.12	0.06	0.13
29	0.26	0.50	1.11
30	0.14	0.05	0.16
31	0.27	0.52	1.04
32	0.11	0.05	0.11
33	0.43	0.70	1.40
34	0.11	0.06	0.08
35	9.22	7.92	9.96
36	0.12	0.09	0.07
37	8.26	7.63	8.85
38	0.09	0.07	0.06
39	0.37	0.68	1.12
40	0.09	0.07	0.06
41	0.19	0.38	0.73
42	0.10	0.09	0.09
43	0.20	0.44	0.72
44	0.07	0.08	0.07
45	0.29	0.60	1.07
46	0.07	0.07	0.08
47	4.52	6.12	7.60
48	0.08	0.10	0.12
49	3.97	5.78	7.28
50	0.06	0.07	0.08

2.3 性能计算方法

1) D_n 、THD、TIF 指标计算假设回路结构

进行交流滤波器性能计算时,与换流站交流母线相连的交流系统有两种处理方法。第1种方法假设交流系统完全开路,不考虑交流系统的影响。第2种方法考虑交流系统,交流系统谐波阻抗用阻抗圆或阻抗扇型平面表示,性能计算所用的线路模型见图2。

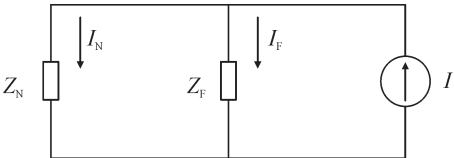


图2 性能计算回路原理图
Fig. 2 Principle diagram of performance calculation circuit

图中: I 表示换流器产生的谐波电流; Z_F 表示交流滤波器谐波阻抗; Z_N 表示交流系统谐波阻抗。交流系统阻抗 Z_N 与滤波器阻抗 Z_F 并联。对于每一次谐波,流入交流系统的谐波电流公式为

$$I_N = I \frac{Z_F}{Z_F + Z_N} \tag{4}$$

滤波器谐波阻抗 Z_F 已知,在交流系统阻抗平面内选择 Z_N ,当 Z_F 和 Z_N 的矢量相加后的幅值最小时,流入交流系统的该次谐波电流就最大,从而该次谐波单次电压畸变率就最大。

本文计算 D_n 、THD、TIF 指标时,采用第2种方法。

2)IT 乘积计算假设回路结构

IT 乘积计算时,假设回路结构与 D_n 、THD、TIF 指标计算假设回路结构相同,如图2所示,但是采用一个单相等值阻抗代替交流系统谐波阻抗 Z_N ,该阻抗可以由等值电路的故障水平得到。代替后的回路模型不显示实际系统中发生的谐振,可通过 D_n 、THD、TIF 指标计算结果判断交流系统和滤波器是否发生谐振。该假设回路结构是计算IT 乘积的一个很好的折中,反映了所研究的频率范围的平均水平,避免了过度苛刻的计算条件。

2.4 配置方案及性能计算结果

1)配置方案

确定交流滤波器配置方案是一个反复调整和优化的过程。具体步骤为:先确定滤波器元件参数,然后计算滤波器性能,若性能不满足要求,需重新调整滤波器元件参数进行优化,直至交流滤波器性能满足要求为止。计算交流滤波器性能可分为两步:首先,计算换流器在交流侧产生的谐波电流,

计算结果见表4;其次,在此基础上搭建性能计算假设回路,计算上述各性能指标。

根据谐波电流源计算结果,11、13次谐波电流最大,其次是23、25次,最后是35、37次和47、49次。由于11、13次谐波相比于其他次谐波较大,考虑针对11次和13次谐波单独滤波。其次在24次和36次谐波处配置滤波,能够同时滤除23、25次和35、37次谐波。最后配置并联电容器以滤除高次谐波。在该配置下的计算结果中发现,由于背景谐波影响,3次谐波电流较大,单次畸变率会超标,因此考虑配置3次单调谐滤波器。交流滤波器最终配置方案见表5,电路图见图3-4。

表5 交流滤波器配置 Table 5 AC filter configuration				
元件	滤波器小组类型			
	HP11/24	HP13/36	HP3	SC
电容 C_1 /mF	1.552	1.554	1.561	1.561
电抗 L_1 /mH	17.430	9.781	563.280	1.800
电容 C_2 /mF	2.420	1.370	12.491	—
电抗 L_2 /mH	11.177	11.098	—	—
电阻 R_1 /W	800.000	800.000	2 000.000	—
容量/Mvar	85.000	85.000	85.000	85.000
小组数	4	3	2	1

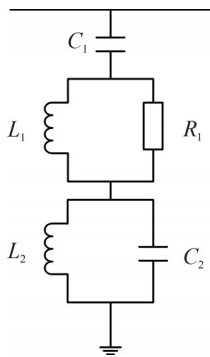


图3 HP11/24和HP13/36滤波器电路图
Fig. 3 Circuit diagrams of HP11/24 and HP13/36 filters

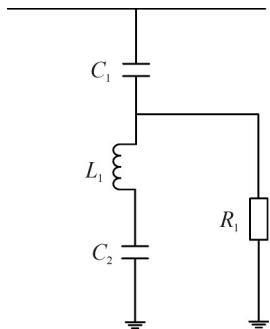


图4 HP3滤波器电路图
Fig. 4 Circuit diagram of HP3 filter

2)性能计算结果

表6为统计的交流滤波器性能计算结果最大值,均在限值范围之内。

表6 交流滤波器最大性能结果
Table 6 Maximum performance results of AC filter

性能要求	计算结果	限值
$D_3/\%$	0.43	0.50
$D_5/\%$	0.25	0.50
$D_{2h}/\%$	0.38/2	0.50
$D_{2h+1}/\%$	0.49/11	0.50
THD/%	0.79	1.50
TIF	39.97	40.00
IT	12 549.20	20 000.00

3 无功补偿研究

3.1 交流系统无功平衡

当换流站是弱交流系统时,对电压稳定性要求较高,因此在进行无功补偿研究时需要考虑电压和频率的影响。无功补偿研究应该与交流滤波器设计同时进行。

该换流站能向系统注入最大无功为100 Mvar,能够从系统吸收最大无功为150 Mvar。低功率运行时,换流器消耗的无功较少,一般情况下,满足性能要求所投入的滤波器产生的无功高于换流器和系统能够消耗的无功,因此需要安装无功补偿装置吸收多余无功功率。低功率运行时,考虑电压、频率偏差,需要无功补偿装置吸收的无功功率 Q_r 公式为

$$Q_r = Q_{fmin} \times \Delta f_{max} - \frac{Q_{ac} + Q_{dc}}{\Delta U_{max}^2} \times \Delta f_{max} \tag{5}$$

式中: Q_{ac} 为向系统注入的无功最大限值有名值; Q_{fmin} 为满足性能要求所投入的滤波器产生的无功功率有名值; Q_{dc} 为换流器消耗的无功功率有名值; ΔU_{max} 为系统电压最大偏差标么值; Δf_{max} 为系统频率最大偏差标么值。

低功率运行时,无功功率平衡情况见表7。

表7 低功率时无功功率平衡表
Table 7 Reactive power balance table at low power

工况	Q_{ac}	Q_{dc}	Q_{fmin}	Q_r
单极运行,20% P_N ($\alpha=25^\circ$)	100	26.0	2×85	58.2
双极运行,20% P_N	100	98.3	3×85	78.8
双极运行,30% P_N	100	202.1	3×85	-15.7
双极运行,50% P_N	100	365.7	5×85	8.3

由表7得出结论,换流站在双极运行、20% P_N 工况下,需要无功补偿装置吸收的无功最高,为78.8 Mvar。该换流站可配置2组±60 Mvar动态无功补偿装置,以满足系统无功平衡要求。

配置动态无功补偿装置后,系统无功交换情况见表8,在系统无功交换能力范围之内。

表8 系统无功交换能力
Table 8 Reactive power exchange capacity of system

工况	$Q_{\min}$	Q_{dc}	Q_{r}	Q_{ex}	限值
双极运行, 20% P_{N}	3×85	98.3	1×60 2×60	96.7 36.7	100
双极运行, 30% P_{N}	3×85	202.1	—	52.9	100
双极运行, 50% P_{N}	5×85	365.7	—	59.3	100
双极运行, 100% P_{N}	9×85	905.9	-1×60	-80.9	-150

3.2 交流母线电压波动

交流滤波器投切时,会引起电压波动,弱交流系统此现象更应引起重视。滤波器分组投切时,忽略换流器的影响交流母线电压波动变化百分比公式为

$$\Delta U_{\text{AC}} = \frac{Q_{\text{filter}}}{S_{\text{sc}} - \Sigma Q_{\text{filter}}} \times 100\% \tag{6}$$

式中: Q_{filter} 为投切的分组容量; S_{sc} 为交流系统短路容量; ΣQ_{filter} 为滤波器分组投切完成后换流站投入运行的无功容量。经计算,该换流站交流母线电压波动为 3%,相比于国内一般工程偏大,可通过 2 组 ±60 Mvar 动态无功补偿装置改善电压稳定性,降低滤波器小组投切导致的电压波动。

4 结语

1)三端工程与双端工程,谐波电流源计算方法一致。换流站作为整流侧或逆变侧,在双极、单极、降电压等不同运行工况下所输出的谐波源,仅与该换流站本身设计有关,与送、受端数量无关。

2)通过对目前在建的多端直流工程换流站交流滤波器滤波性能开展研究,得到可以满足该工程交流侧滤波要求的滤波器配置方案。

3)通过对换流站进行无功补偿研究,分析需要配置的无功补偿装置容量,并验证配置无功补偿装置后系统无功功率平衡,给出了无功补偿研究的一种思路。

4)由于该次研究所用到的一些计算条件并不是最终的工程参数,比如背景谐波、谐波阻抗等,这些参数与实际的参数可能有一些差距,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^[17]。

参考文献

[1] 程林,章海静,夏楠,等. 含大规模储能的多端直流输电系统协调控制策略[J]. 电网与清洁能源,2023,39(1):91-99.
CHENG Lin,ZHANG Haijing,XIA Nan,et al. A study on the coordinated control strategy of the multi-end DC transmission system with large-scale energy storage[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 91-99.

[2] 张文亮,汤涌,曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术,2010,34(9):1-6.
ZHANG Wenliang,TANG Yong,ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6.
[3] 潘志城,邓军,周海滨,等. 特高压多端混合直流输电工程柔直变压器的振动特性研究[J]. 高压电器,2022,58(1):122-129.
PAN Zhicheng,DENG Jun,ZHOU Haibin,et al. Research on vibration characteristics of flexible DC transformer in UHV multi-terminal hybrid DC transmission project[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(1):122-129.
[4] 宋益,张倬宁,尹立群,等. 高压直流输电线路故障行波传播特性研究[J]. 东北电力技术,2022,43(7):8-11.
SONG Yi,ZHANG Yining,YIN Liqun,et al. Research on fault traveling wave propagation characteristics of HVDC transmission line[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(7): 8-11.
[5] 李国庆,边竞,王鹤,等. 直流电网潮流分析与控制研究综述[J]. 高电压技术,2017,43(4):1067-1078.
LI Guoqing,BIAN Jing,WANG He,et al. Review on DC grids power flow analysis and control[J]. High Voltage Engineering,2017,43(4):1067-1078.
[6] 高凯,屈海涛,任茂鑫,等. 基于可控电压源的高压直流输电换相失败抑制技术[J]. 高压电器,2023,59(1):49-57.
GAO Kai,QU Haitao,REN Maixin,et al. Commutation failure suppression technology for HVDC transmission based on controlled voltage source [J]. High Voltage Apparatus,2023,59(1):49-57.
[7] 刘柏霖,陈卓,孙雨晴,等. 基于模糊控制的高压直流输电控制策略改进研究[J]. 电网与清洁能源,2022,38(3):16-23.
LIU Bolin,CHEN Zhuo,SUN Yuqing,et al. A study on control strategy improvement of HVDC transmission based on fuzzy control[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(3): 16-23.
[8] REEVE J. Multi-terminal HVDC power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(2):729-737.
[9] 李强,田松丰,张世洪. 特高压交流滤波器回路地震响应及易损性分析[J]. 高压电器,2022,58(8):107-116.
LI Qiang,TIAN Songfeng,ZHANG Shihong. Analysis on seismic response and vulnerability of alternating current filter circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 107-116.
[10] 刘天作,赵文诗,张泽强. 锡盟换流站交流滤波器不平衡保护误动作分析[J]. 东北电力技术,2022,43(5):49-53.
LIU Tianzuo,ZHAO Wenshi,ZHANG Zeqiang. Analysis of

- AC filter unbalanced protection misoperation in Ximeng converter station[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(5): 49-53.
- [11] 王新宇, 杨朋威, 程林, 等. 基于多目标约束的特高压直流配套火电接入系统升压变挡位选择方法及校验[J]. 变压器, 2022, 59(10): 1-6.
- WANG Xinyu, YANG Pengwei, CHEGN Lin, et al. Step up transformer tap selection method and verification of UHVDC supporting thermal power access system based on multi-objective constraints[J]. Transformer, 2022, 59(10): 1-6.
- [12] CHEN Xia, LIN Weixing, SUN Haishun, et al. LCC based MTDC for grid integration of large onshore wind farms in Northwest China[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. [S. l.]: IEEE, 2011: 1-10.
- [13] AHMED N, HAIDER A, VAN HERTEM D, et al. Prospects and challenges of future HVDC supergrids with modular multilevel converters[C]//EPE 14th European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham, UK: IEEE, 2011: 1-10.
- [14] AN Ting, TANG Guangfu, WANG Weinan. Research and application on multi-terminal and DC grids based on VSC-HVDC technology in China[J]. High Voltage, 2017, 2(1): 1-10.
- [15] SOOD V K, NAKRA H L, KHODABAKHCHIAN B, et al. Simulator study of hydro-Quebec MTDC line from James bay to New England[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(4): 1880-1886.
- [16] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
- TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [17] 刘张, 杨洪耕, 丁志林, 等. 高压直流输电系统短路比在线估计[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(3): 27-32.
- LIU Zhang, YANG Honggeng, DING Zhilin, et al. On-line estimation of short circuit ratio in HVDC transmission system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(3): 27-32.
- [18] KUNDER P. Power system stability and control[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [19] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [20] BODGER P S, IRWIN G D, WOODFORD D A. Controlling harmonic instability of HDVC links connected to weak AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4): 2039-2046.
- [21] THALLAM R S. Review of the design and performance features of HVDC systems connected to low short circuit ratio AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(4): 2065-2073.
- [22] 穆子龙, 李兴源. 交、直流输电系统相互影响引起的谐波不稳定问题[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 96-100.
- MU Zilong, LI Xingyuan. Harmonic instability caused by interactions between AC and DC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 96-100.
- [23] High-voltage direct current (HVDC) systems—Guidance to the specification and design evaluation of AC filters—Part 1: Overview: IEC TR 62001-1—2021[S]. 2021.
- [24] 高压直流系统交流滤波器: GB/T 25093—2010[S]. 2010.
- AC filters for HVDC systems: GB/T 25093—2010[S]. 2010.
- [25] 任军辉, 张万荣, 张帆, 等. ± 1100 kV 直流输电工程直流滤波器方案研究[J]. 高压电器, 2013, 49(3): 69-73.
- REN Junhui, ZHANG Wanrong, ZHANG Fan, et al. Study on ± 1100 kV HVDC project DC filter scheme[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(3): 69-73.

作者简介:

曹洋(1991—), 女, 工程师, 从事高压直流输电技术工作。E-mail: caoy@xd.cee-group.cn。

任军辉(1979—), 男, 正高级工程师, 从事高压直流输电技术及柔性直流输电技术工作。

张万荣(1964—), 男, 正高级工程师, 从事高压直流输电技术工作。

党瑞(1988—), 女, 工程师, 从事高压直流输电技术工作。