

DOI: 10.7667/PSPC201726

一起交流滤波器用断路器击穿事故分析

周孝法¹, 魏向向², 王宾³, 傅坚¹

(1. 国网上海市电力公司检修公司, 上海 200063; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;
3. 清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 在高压直流输电系统中, 由于交流滤波器用断路器投切频繁, 工作环境恶劣, 高压断路器开断电路后容易发生绝缘击穿故障。基于一起交流滤波器燃弧故障实例, 简述了事故过程, 分析了断路器处于正常工作阶段、击穿故障阶段、持续性燃弧熄弧阶段和完全击穿阶段等不同阶段时相应的滤波器支路电压电流特性, 计算了断路器正常工作时电流谐波含量和总谐波畸变率。最后, 通过分析各个阶段的电弧电压和电流动态变化录波波形以及现场断路器解体检查情况, 总结了燃弧故障发生的原因, 并提出相关建议, 为交流滤波器用断路器的生产和运维检修提供了依据。

关键词: 交流滤波器; 断路器; 燃弧故障; 谐波畸变率; 运维检修

An accident analysis of circuit breaker explosion in AC filter branch in substation

ZHOU Xiaofa¹, WEI Xiangxiang², WANG Bin³, FU Jian¹

(1. Maintenance Branch, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200063, China;
2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In HVDC systems, because of switching frequently and bad working conditions, AC filter circuit breaker can occur the insulation breakdown fault easily. Based on a real case of AC filter arc fault, firstly, the process of accident is described briefly, and then when the circuit breaker is in different stages such as the normal condition, the breakdown fault stage, the continuous arc burning and extinction stage and spark-over totally, the corresponding arc voltages and currents in different stages are compared and analyzed, besides, the current harmonics and the total harmonic distortion rates when circuit breaker state operates normally are calculated. At last, through analyzing the dynamic record waveform of arc voltages and currents in different stages and the strip inspection of on-site circuit breaker, the reasons of arc fault are explained, and some relevant suggestions are given, which provides references for production and operating maintenance of circuit breaker used in AC filter.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477084) and Science and Technology Project of State Grid Shanghai Electric Power Company (No. SGSHJX00ZSJS1600747).

Key words: AC filter; circuit breakers; arc fault; total harmonic distortion; operating maintenance

0 引言

高压直流输电中大量电力电子器件的使用在交流和直流侧均产生了大量的谐波^[1-3]。交流滤波器作为高压直流输电的重要组成部分, 连接在母线侧用以滤除系统中产生的各次谐波, 并提供系统所需的

无功。由于系统运行方式的改变, 交流滤波器小组需要频繁投切以控制系统的无功平衡^[4-5]。断路器是交流滤波器的重要开关设备, 其安全稳定运行对直流系统供电质量意义重大^[6-9]。交流滤波器电路为容性电路, 且系统输出功率按日调度计划制定并在一定范围内波动, 因此交流滤波器用断路器需要频繁投切于高压容性电路^[10-12], 运行环境恶劣, 容易发生断路器燃弧故障。本文以某换流站实际燃弧故障为例, 首先介绍换流站交流滤波器接线图并阐述各类型滤波器的工作原理, 并对断路器的工作电路进

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477084); 国网上海电力公司科技项目(SGSHJX00ZSJS1600747); 清华大学自主科研项目(2015THZ0)

行等效分析; 然后, 对各阶段的燃弧电流和电压的特性进行分析, 直观地说明了燃弧故障瞬间电压和电流的变化。

1 事故简述

某换流站直流功率由额定功率降至其 70% 的过程中, 某一小组滤波器自动切除后, SC 交流滤波器用断路器 C 相发生了燃弧事故, 断路器瓷套被击穿后发生爆炸, 电容器组保护零序过流保护 2 段动作, 启动大组保护中该小组失灵保护, 失灵保护动作跳开该小组其他运行中的滤波器断路器以及进线断路器。后经检查后发现, 开关 C 相负荷侧触头绝缘瓷瓶已完全破坏, 初步分析直流功率下降过程中, SC 小组滤波器正常切除, 开关分闸后, C 相电弧复燃, 导致 SC 小组滤波器零序过流 2 段启动, 延时 7 s 后跳闸, 并启动大组母线失灵保护, 因开关本体灭弧室炸裂, 母线失灵保护动作。

根据实际故障录波数据(采用频率为 1000 Hz), 各阶段电流波形的变化如图 1 所示。

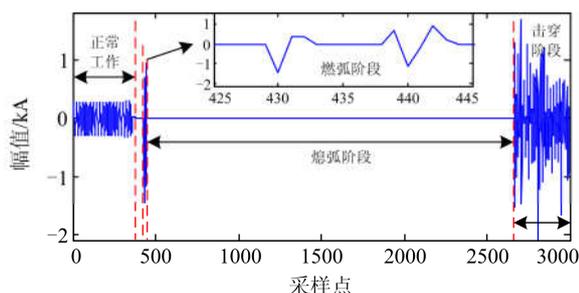


图 1 电弧电流发展过程

Fig. 1 Process of arc fault developing

从图 1 可以看出, 断路器的状态是连续变化的, 正常切除后, 发生了两次短暂燃弧故障, 电弧熄灭后, 经历一段时间, 再次发生持续性的燃弧和熄弧, 直至最后断路器被完全击穿。经过统计, 得到的故障时序图如图 2 所示。

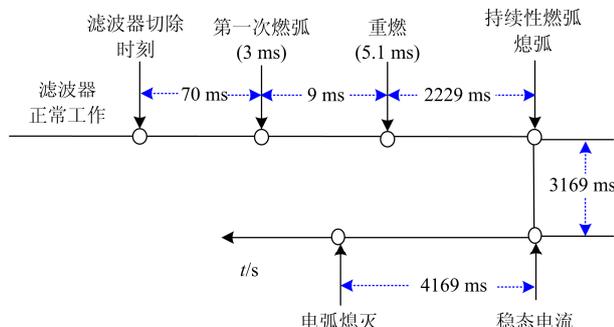


图 2 燃弧故障发展时序图

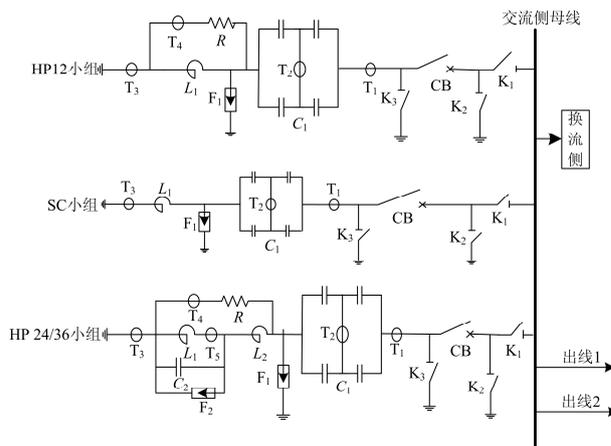
Fig. 2 Sequence process of arc fault developing

从图 2 可知: 若假设 C 相断路器在成功断开时开始计时, 则在 70 ms 时断路器第一次燃弧开始, 经过 3 ms 左右电弧熄灭; 在 79 ms 左右电弧再次复燃, 燃弧时长 5.1 ms, 到 84.1 ms 左右第二次电弧熄灭; 距离电弧重燃 2229 ms, C 相出现持续性的燃弧熄弧过程, 持续时长为 3169 ms; 距离重燃 5398 ms 时, 断路器的 C 相绝缘能力被完全破坏, 电弧电流为稳态电流; 直到 9646 ms 时, 继电保护设备将燃弧故障所在的大组滤波器切除。

2 交流滤波器接线原理示意图

现有的高压直流输电系统中, 换流站的交流滤波器一般分为 3 大组, 每组包含若干滤波器小组, 工程中普遍使用的交流滤波器主要为: 并联电容器、单调谐滤波器、双调谐滤波器和三调谐滤波器等^[13-15]。

交流滤波器被并联在母线侧用以滤除 12 脉动换流阀运行时产生的 $n=12k \pm 1$ 次特征谐波 ($k=1, 2, \dots, K, K$ 为正整数) 以及非线性负荷或三相参数不完全对称产生的 3 倍次特征谐波^[7]。为了明确换流站交流滤波器的接线图, 以某换流站第 2 大组滤波器的 3 个小组滤波器为例, 其实际接线图如图 3 所示^[16]。



注: T_i 为电流互感器 ($i=1, 2, 3, 4, 5$); C_1 和 C_2 为电容器组的等效电容值; L_1 和 L_2 为电抗器的等效电感值; K_1 、 K_2 和 K_3 为开关; CB 为交流断路器; R 为电阻值; F_1 和 F_2 为避雷器

图 3 第二大组交流滤波器接线图

Fig. 3 Wiring diagram of the second unit in AC filter

从图 3 可以看出, 大组滤波器中, 含有一组二阶高通阻尼滤波器 HP12, 主要用来消除 12 次谐波及提供无功, 一组双调谐滤波器 HP24/36, 主要用来消除 24、36 次谐波及提供无功, SC 小组是一组电容器组, 主要用来提供无功补偿。

根据图 3 中的 SC 滤波器支路, 将电源、母线和滤波器支路等效为一通路, 可得其等效电路如图 4 所示^[17]。

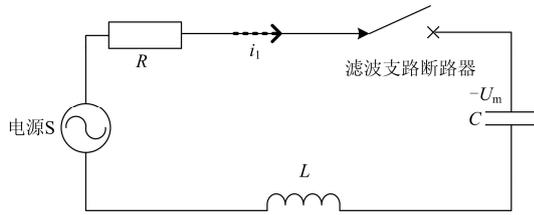


图 4 滤波器支路等值电路

Fig. 4 Equivalent circuit of AC filter branch

图 4 中, R 为该通路的等效电阻, C 为高压电容器侧电容, L 为滤波器电流等效电感。

当断路器断开后, 高压电容侧的电压为 $-U_m$, 交流母线侧的电源 S 的表达式可写为 $U_m \cos(\omega t - \varphi)$, 其中, φ 为电源初相角。断路器两端承受的电压 U_c 的表达式为

$$U_c = U_m \cos(\omega t - \varphi) + U_m \quad (1)$$

式中, $U \cos(\omega t - \varphi) + U \geq 0$ 恒成立。

根据式(1), 当断路器断开后, SC 小组支路中断路器断口两端承受的是电容电压和母线侧电压之差, 因此, 交流断路器承受的电压更大, 较普通断路器更易发生燃弧故障。为了阻止此类型燃弧事故的再次发生, 必须清楚燃弧故障过程相关电气量的变化, 因此, 基于上述理论分析, 讨论电弧电压和电弧电流的变化过程意义重大。

3 燃弧故障特性分析

3.1 交流滤波器正常工作

正常运行时, 5623 滤波器母线侧 C 相电压和流经滤波器支路的电流如图 5 和图 6 所示。

从图 5 和图 6 可以看出: 由于滤波的原因, 电弧电流的谐波含量较大, 波形畸变明显; 电弧电压呈现标准的正弦变化形式, 其谐波含量较少。取一个周期的滤波器电流做 FFT 分析, 得到的各次谐波的幅值如表 1 所示。

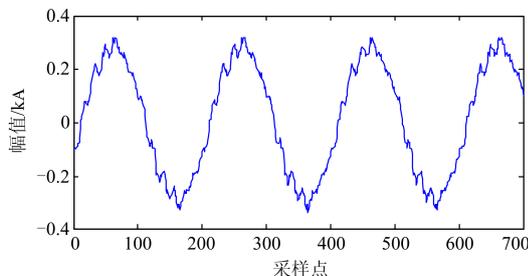


图 5 正常运行时母线侧 C 相电流

Fig. 5 Current waveform of C phase in normal operation

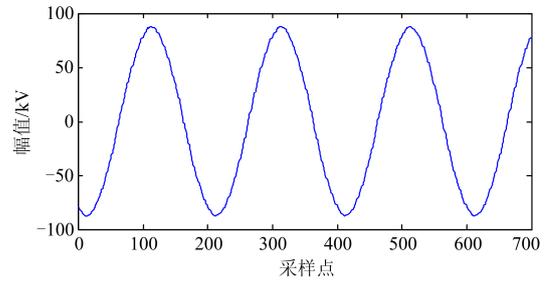


图 6 正常运行时母线侧 C 相电压

Fig. 6 Voltages waveform of C phase in normal operation

表 1 正常运行时 C 相电流 FFT 结果

Table 1 FFT analysis results of C phase current

in normal operation				
频率/Hz	50	150	250	550
幅值	0.2904	0.0041	0.012	0.0156
频率/Hz	650	1850	2350	2450
幅值	0.0211	0.0041	0.0038	0.0038

为了分析各次谐波的含量, 需要分析各次谐波的畸变情况, 其中, 单次谐波畸变 D_n 和总谐波畸变的计算公式如式(2)、式(3)^[18]。

$$D_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (2)$$

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^N D_n^2} \quad (3)$$

式中: U_1 为系统基波电压有效值; U_n 表示母线侧 n 次谐波的有效值; N 表示考虑的最高次谐波的次数。

根据式(2)和式(3), 流过交流滤波器用断路器的电流中单次谐波畸变前三位的是: 13 次(7.249%)、11 次(5.378%)和 5 次(4.136%), 总谐波畸变率 $THD=10.296\%$ 。因此, SC-5623 滤波器小组正常工作时, 除提供无功补偿外, 还能滤除 5 次、11 次、13 次等奇次谐波电流信号。

3.2 两次燃弧故障

通过故障时序图可知, 在断路器形成放电通道之前共发生了两次燃弧故障, 两次燃弧的电压和电流如图 7 和图 8 所示。

从图 7 可知, 燃弧发生在母线侧电压最大值 U_m 处, 之后经过快速的振荡衰减, 电弧熄灭, 又经过约为半个工频周期的时间后, 电弧发生复燃, 此时母线侧电压接近 $-U_m$, 最后电弧被熄灭, 母线电压恢复正弦形式。

根据式(1)和图 8 可得, 当滤波器开断时, 电弧电流为 0, 电弧电压为 $-U_m$, 当发生第一次燃弧时, 母线侧电压为 U_m , 也即此时断路器端口承受的电压

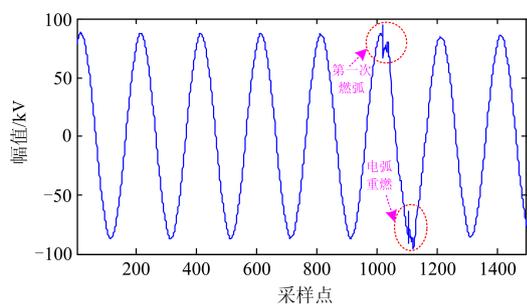


图 7 电弧故障前后的母线侧电压

Fig. 7 Bus side voltage before/after arc fault

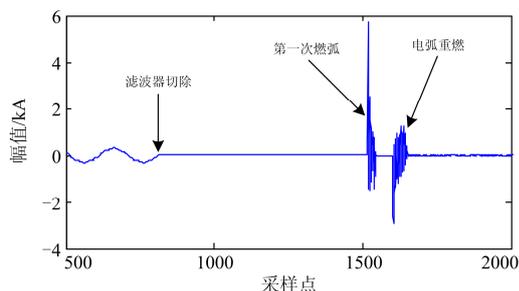


图 8 电弧故障前后的母线侧电流

Fig. 8 Bus side current before/after arc fault

$2U_m$, 此时断路器灭弧室的弧道被击穿。第一次燃弧瞬间, 电弧电流发生高频振荡衰减, 由于高频熄弧的作用, 第一次燃弧持续 3 ms 左右被熄灭。电弧被熄灭时, 高压电容器组的接近电压为 U_m , 经过 9 ms(接近半个工频周期), 电压接近 $-U_m$, 此时电压再次接近 $2U_m$ 。由于第一次燃弧介质的绝缘强度尚未完全恢复, 且此时断路器两端的电压大于介质的击穿电压, 因此断路器发生了第二次燃弧, 由于第一次燃弧为绝缘能力的破坏, 使得电弧重燃持续 5.1 ms, 较第一次燃弧时间稍长, 最后电弧在工频熄弧的作用下被熄灭。

3.3 持续性燃弧熄弧过程

当交流滤波 SC 器小组正常切除 2308 ms 后, C 相出现的持续电弧电流如图 9 所示。

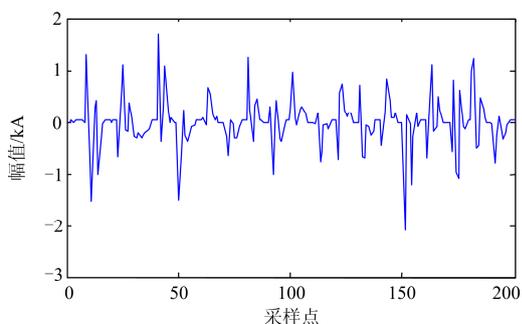


图 9 持续性燃弧和熄弧

Fig. 9 Sustained arc burning and quenching

从图 9 可得, 图中持续性燃弧电流表征了线路燃弧和熄弧的交替过程, 这与前两次燃弧和熄弧不同, 此时的断路器断口熄弧性能大大削弱, 极易被击穿形成放电通道。经过一段时间的熄弧和燃弧, 最终断路器的绝缘性能被完全破坏, 形成了稳态电弧电流, 如图 10 所示。

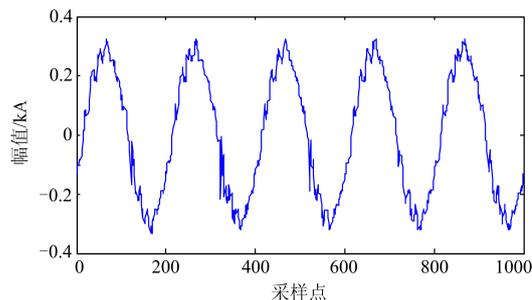


图 10 完全击穿后的电弧电流

Fig. 10 Arc current waveform after complete striking

对比图 5 中所示的正常工作电流和图 10 所示稳态击穿电流, 可知稳态击穿后的电弧电流与断路器正常工作时的电弧电流相同, 说明此时的断路器已形成通路, 完全丧失开断电路的能力。

3.4 爆炸原因分析

根据式(1)可知, 断口承受较大的电压差是断路器燃弧的直接原因, 但实际上燃弧是一个电磁场畸变的复杂的物理过程。通过总结, 本文将断路器的燃弧根本原因概括如下: 断路器断口的电磁场方向不变, 强度随时间周期性变化, 由于断路器的长期多次的分合闸动作, 灭弧室内产生了含有金属物质的摩擦物(如 Fe, Al 等, 其中 Fe 主要来自于灭弧室内活塞和拉杆的摩擦物, Al 主要来自于灭弧室内气缸的摩擦物), 随着电磁场强度不断变化, 灭弧室内的金属碎屑在高压气流、电场和磁场力的作用下, 不断的朝某一方向移动, 金属碎屑就类似于尖端毛刺, 使得灭弧室内的电场产生畸变, 当这些金属屑积累到一定程度时, 母线灭弧室套管从静主触头沿瓷壁发生贯穿性击穿。

统计结果表明, 在滤波器正常切除后的 10~100 ms(前半个工频周期至第 5 个工频周期), 交流滤波器用断路器最易发生燃弧故障, 通过对两次燃弧过程的讨论, 可知瓷套炸裂和持续性击穿的原因在于两次燃弧破坏了断路器自身的绝缘能力, 电压差的不断变化诱导断路器内磁场和电场产生了畸变。

4 结论

本文基于一一起实际断路器击穿故障, 通过对比滤波器支路各个运行状态的电压和电流数据, 可得

到如下结论:

1) 断路器燃弧故障电流呈现暂态高频振荡衰减特性, 燃弧过程持续时间很短, 且无明显的零休时刻。

2) 交流滤波器用断路器的燃弧过程不仅需要电压和电流等电气量满足一定的条件, 还需要相关的电场和磁场等多场域的畸变达到一定程度, 也即断路器的燃弧故障是一个很复杂的物理过程。

3) 为了防止以后再次发生类似事故, 在断路器生产时, 相关人员要提高断路器的生产工艺, 确保将断口内部的零部件毛刺和断路器内表面杂质等清除干净, 出厂前要严格把关装配流程和相关的测试数据; 在使用过程中, 工作人员要定时抽检断路器并评估其运行状态。

4) 后续的研究工作将集中于断路器燃弧故障的精确建模并提出相应的暂态电弧故障检测算法。

参考文献

[1] 王亚涛, 赵冠华, 吴彦维, 等. 辽宁绥中电厂改接高岭背靠背换流站华北侧无功控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 165-170.
WANG Yatao, ZHAO Guanhua, WU Yanwei, et al. Strategy of reactive power control after Liaoning Suizhong power plant is connected to the north side AC of Gaoling back to back converter station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 165-170.

[2] 聂定珍, 曹燕明. HVDC 换流站投切交流滤波器用断路器特殊性能要求[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 86-90.
NIE Dingzhen, CAO Yanming. Special performance requirement of circuit breakers to switch AC filter banks of HVDC converter station[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 86-90.

[3] 段涛, 张智勇, 李德建, 等. ± 500 kV 换流站交流滤波器组不平衡电流调整新策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 135-139, 143.
DUAN Tao, ZHANG Zhiyong, LI Dejian, et al. The new unbalanced current adjusting strategy of AC filter in ± 500 kV converter station[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 135-139, 143.

[4] 李建勋, 吴贻志, 李豹. 交流滤波器 C1 电容器保护配合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 139-144.
LI Jianxun, WU Yizhi, LI Bao. Study on the coordination strategy of the C1 capacitor protection of AC filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 139-144.

[5] 吴亚妮, 蒋卫平, 王华伟, 等. 500 kV 交流线路断路器短路电流延时过零现象研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 195-200.
WU Yani, JIANG Weiping, WANG Huawei, et al. Research on zero offset of short circuit current occurred in circuit breaker for 500 kV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 195-200.

[6] 方冰, 关永刚, 申笑林. 特高压换流站交流滤波器断路器恢复电压特性研究[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 1-7.
FANG Bing, GUAN Yonggang, SHEN Xiaolin. Study on voltage recovery characteristics of AC filter breaker in UHV converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 1-7.

[7] 王兴照, 黄锐, 邢海文, 等. 换流站交流滤波器场断路器故障分析[J]. 山东电力技术, 2016, 43(3): 61-63.
WANG Xingzhao, HUANG Rui, XING Haiwen, et al. Fault analysis of circuit breaker in the AC filter field of converter stations[J]. Shandong Electric Power, 2016, 43(3): 61-63.

[8] 裴岳, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.

[9] 申笑林, 马为民, 白光亚, 等. 特高压换流站 800 kV 交流滤波器小组断路器容性恢复电压仿真[J]. 电力建设, 2015, 36(9): 73-77.
SHEN Xiaolin, MA Weimin, BAI Guangya, et al. Simulation and investigation on capacitive recovery voltage of 800 kV AC filter sub-bank circuit breaker in UHVDC converter station[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(9): 73-77.

[10] 刘高峰, 陈勇. 宝安换流站极控 COL 故障跳闸分析及改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 151-154.
LIU Gaofeng, CHEN Yong. Analysis of trip for COL fault of pole control and the improved scheme in Baoan converter station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 151-154.

[11] 陈泽, 王永旭, 温渤婴. 交流系统与换流站交流滤波器最小串联阻抗的分析与研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 244-250.
CHEN Ze, WANG Yongxu, WEN Boying. Analysis and research of minimum series impedance between AC network

- and the AC filter in converter stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 244-250.
- [12] 姚华, 王飞, 许婷, 等. 可调谐激光吸收光谱技术应用于高温环境下 CO 的测量[J]. 热力发电, 2011, 40(11): 42-45.
YAO Hua, WANG Fei, XU Ting, et al. Measurement of using tunable laser absorption spectroscopy technology under high temperature condition[J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(11): 42-45.
- [13] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [14] 赵海英, 肖雪飞, 吴忠强. 基于发电单元完整模型的 Backstepping 控制[J]. 热力发电, 2015, 44(1): 100-105.
ZHAO Haiying, XIAO Xuefei, WU Zhongqiang. Backstepping dynamic surface control based on integral model of generating unit system[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(1): 100-105.
- [15] 毛涛, 乐健, 黄银龙, 等. 参数失谐对基于滤波器的高压直流输电系统交流侧谐波电压测量的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 147-154.
MAO Tao, LE Jian, HUANG Yinlong, et al. The influence of the parameter detuning on the AC harmonic voltage measurement based on filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 147-154.
- [16] 常勇, 沈志刚, 王鑫, 等. 特高压换流站设备检修若干关键问题[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1579-1585.
CHANG Yong, SHEN Zhigang, WANG Xin, et al. Research on several key issues of UHV converter station equipment maintenance[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1579-1585.
- [17] 王榕生. 分裂式可变调制波的 PWM 过调制技术及谐波分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 206-213.
WANG Rongsheng. A novel PWM overmodulation technique based on the splitting variable modulating waveform and harmonic influence analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 206-213.
- [18] 侯睿, 武健, 徐殿国. 并联有源滤波器 LCL 滤波器特性分析及设计方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 191-198.
HOU Rui, WU Jian, XU Dianguo. Characteristics and design methods of LCL filter in shunt active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 191-198.

收稿日期: 2017-02-24; 修回日期: 2017-05-22

作者简介:

周孝法(1973—), 男, 博士, 高工, 研究方向为高压直流输电技术;

魏向向(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统弧光建模及故障检测;

王 宾(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统故障检测及继电保护。E-mail: binw_ee@mail.tsinghua.edu.cn

(编辑 张爱琴)