

一起换流站交流滤波器用断路器合闸失败案例分析

傅 坚¹, 王 宾², 周孝法¹, 魏向向³

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

摘要:换流站交流滤波器支路需要频繁投切满足无功平衡需求,导致了该支路断路器操作次数多,故障概率大,目前已有起断路器爆炸事故报道,但故障机理尚未明确。本文基于某换流站交流滤波器用断路器实际合闸故障案例,描述了故障过程和故障后现场检查情况,从合闸电流幅值、相对合闸时间差和分闸电流等不同角度分析了故障前断路器的运行状况并统计了其变化规律,探讨了基于单纯电气量实施断路器运行状态评价的可行性及存在的技术挑战。

关键词:高压直流输电; 交流滤波器; 换流站; 断路器合闸故障; 合闸电流幅值

DOI: 10. 12067/ATEEE1705061 **文章编号:** 1003-3076(2018)06-0073-06 **中图分类号:** TM561. 3

1 引言

换流站交流滤波器能够滤除高压直流输电系统产生的大量谐波信号,并具有无功补偿能力^[1-3]。由于系统输出功率采用日前调度计划,当实际输出功率在一定范围内变化时,交流断路器作为滤波器支路的开关设备,需要频繁地断开与闭合,以保证系统无功平衡和电能质量达标^[4,5]。交流断路器频繁动作,导致其机械或者电寿命相较于其他场合工作的断路器大大降低,现有统计数据表明,近年已有多起交流滤波器用断路器故障事故报道^[6,7]。因此,为了保证直流输电系统安全稳定的运行,有必要分析交流滤波器用断路器的典型合闸故障中相关电气量的变化,最终实现断路器运行状态的有效监测。

针对断路器的状态监测,国内外学者做了大量的研究,主要可分为三类:基于物理外特性的监测方法、基于机械特性的监测方法和基于电气量特性的监测方法^[8]。基于物理外特性的监测分析方法,文献[9,10]采集燃弧图像和电弧辐射光、热等,提取图像特征并加权光热等外在物理特征信息,实现断路器燃弧故障的监测。基于机械特性的监测方法,文献[11]当断路器分、合闸时,利用声波传感器收集摩擦和振动产生的声波信号,利用希尔伯特-黄变

换算法进行时频域分析,根据计算得到的高频分量能量频带信息熵,再采用概率神经网络的训练和分类功能辨别断路器状态。更多的文献开展了基于电气量特性的监测方法研究。文献[12]通过提取断路器振动故障特征信息(触头的平均运动速度、分合闸线圈电流有效值)等,实现了高压断路器的故障诊断。文献[13]首先利用滤波处理断路器电流信号,然后利用小波变换方法获得断路器振动信号的特征频带,提出了一种多维映射的断路器故障诊断方法。文献[14]通过采集断路器分合闸线圈电流,挖掘隐藏的不同故障类型条件下的故障特征信息,提出了一种基于融合粒子群的模糊核聚类和支撑向量机的断路器故障诊断方法。文献[15-18]通过利用傅里叶算法或小波变换算法,得到断路器电流的特征频带,通过设定阈值或借助神经网络分类算法实现断路器早期故障的准确判别。但是,上述文献均以仿真为主,缺乏实际案例数据支撑。

本文以某高压直流换流站交流滤波器用断路器实际故障为例,首先描述了合闸故障过程以及现场检修情况;然后从合闸电流幅值、相对合闸时间差和分闸电流的不同角度分析了断路器故障前运行特性,对比了断路器不同时间同一故障相的合闸特性,最后分析了断路器合闸相对时间和合闸电流幅值两

收稿日期: 2017-05-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(51477084)、国网上海市电力公司科技项目(SCSHJX00ZSJS1600747)
作者简介: 傅 坚 (1965-), 男, 江苏籍, 高工, 硕士, 主要从事高压直流输电技术的相关工作;
王 宾 (1978-), 男, 山东籍, 副教授, 博士, 主要从事电力系统继电保护方向的研究和教学工作。

种指标应用于交流断路器实现故障预警的可行性。

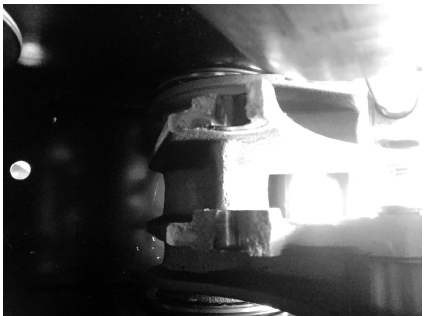
2 故障过程简述

2015 年 8 月,某换流站在进行功率变化操作过程中,交流滤波器支路的零序电流保护动作跳闸,交流滤波器未正常投入。现场检查断路器 A、B、C 三相后发现,在分闸操作过程中,由于 B 相断路器连接操动机构固定螺栓脱落,操动机构与本体连接在轴套处松脱,使得断路器 B 相在合闸命令发出后未能实现成功合闸,最终导致零序保护动作,跳开交流滤波器,具体如图 1 所示。现场查看断路器三相累计分合次数为:A 相 1577 次、B 相 1572 次、C 相 1572 次。

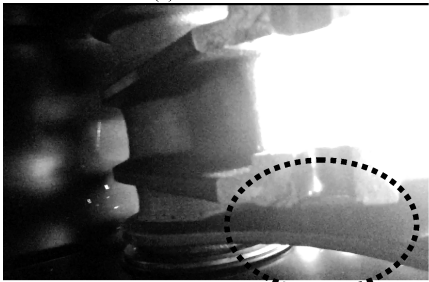


图 1 断路器故障相开关机构箱
Fig. 1 Switch box of fault phase of circuit breaker

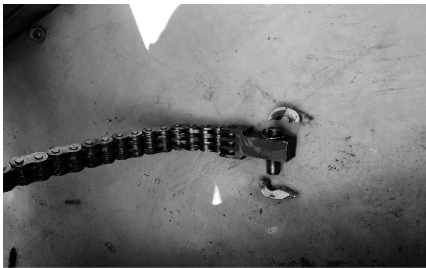
初步检查发现,断路器 B 相机构箱倾斜,机构与本体连接轴套松脱,轴套内键槽有损伤,拐臂从轴销孔处断裂,分闸链条脱落,如图 2 所示。



(a) 拐臂破损断裂



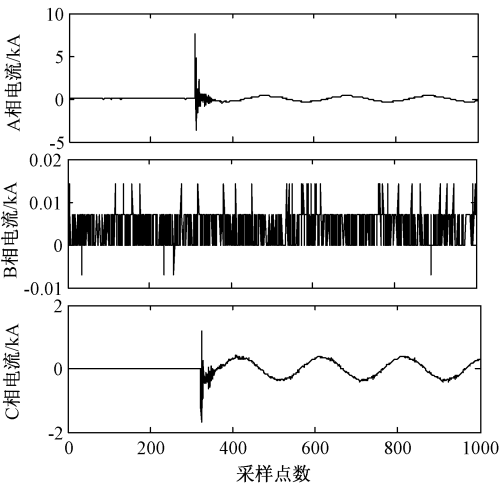
(b) 拐臂轴销孔断裂处



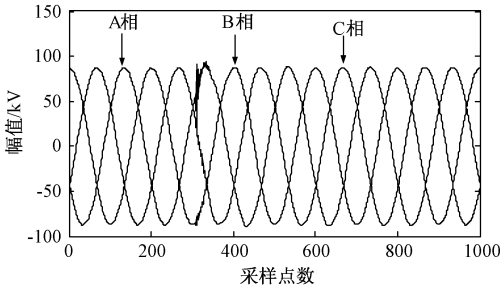
(c) 链条及脱落部分

图 2 断路器 B 相机构现场检查情况
Fig. 2 Picture of fault component in switch box of phase B of circuit breaker

合闸过程中,故障发生时刻的三相电压电流录波波形如图 3 所示。根据故障录波数据,断路器三相的合闸顺序为 A 相、C 相和 B 相,其中 A 相和 C 相均合闸成功,B 相合闸失败。由图 3(a)可知,成功合闸瞬间,A 相和 C 相的合闸电流快速增大随后快速振荡衰减,A 相合闸时刻滞后于 C 相。需要指出的是,图 3(b)中的三相电压均在同一时刻出现了波动,这是由于 A 相成功合闸后,该相对 B、C 两相的电压产生干扰,三相同同时出现了扰动。



(a) 合闸故障时刻的三相电流波形



(b) 合闸故障时刻的三相电压波形

图 3 合闸故障时刻的三相电压电流波形
Fig. 3 Fault voltages and currents in period of closing operation

3 电气量故障特性分析

为了能够在故障发生前及时预警滤波器支路可能存在的异常,判断断路器的运行状况,本文从断路器合闸电流瞬时值和合闸时间的角度统计分析了交流滤波器用断路器故障前后的变化,具体如下。

3.1 故障合闸电流瞬时值分析

实际录波数据显示,断路器在 2016 年 8 月 30 日时 B 相故障合闸未成功。统计录波数据发现,该断路器在 2016 年 8 月 22 日、23 日、24 日、26 日、27 日和 29 日均进行了正常的合闸操作。当断路器在不同时间段进行正常合闸时,统计合闸瞬间滤波器支路各相电流瞬时值,为了分析合闸电流瞬时值与合闸日期的关系,绘制曲线图,如图 4 所示。

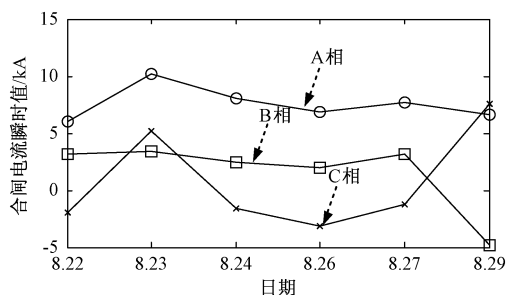


图 4 断路器三相合闸电流瞬时值分析

Fig. 4 Instantaneous analysis of CB's three phase closing currents

由图 4 可见,正常情况下,随着时间的变化,A 相的合闸电流瞬时值变化较为平稳,介于 6~10kA,合闸电流瞬时值无明显的突变,B 相合闸电流瞬时值在 8 月 29 日出现了明显的下降(其值为 -4.78kA),而 C 相合闸电流瞬时值在 8 月 23 日为 5.22kA,在 8 月 29 日为 7.6kA,即在正常合闸时,C 相合闸电流出现了明显增大。根据不同时间合闸电流的瞬时值变化情况,可知断路器 B 合闸电流最大值虽然在故障前一天出现了明显的降低,但是由于 C 相的干扰作用,难以仅利用合闸电流最大值来说明断路器所处的运行状态,即合闸电流幅值无明显的一致性变化规律。

3.2 故障合闸时间分析

从母线侧电压过零时刻开始直至合闸成功后出现电流的时刻为止,求得这期间的时间差定义为相对合闸时间差。

统计计算得到断路器三相的相对合闸时间差结果,如图 5 所示。

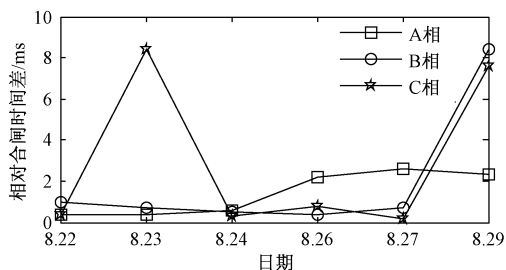


图 5 三相相对合闸时间差

Fig. 5 Difference of three phases relative closing time

由图 5 可知,相比于 8 月 27 日,在 8 月 29 日该断路器合闸时,B 相和 C 相的相对合闸时间差均出现了明显的增大(B 相 8.4ms、C 相 7.6ms)。但是对于健全相 C 相来说,其在 8 月 23 日的相对合闸时间差值与 8 月 29 日接近;对于故障相 B 相,在 8 月 29 日合闸操作之前,虽然其相对合闸时间差值较小,但是由于健全相 C 相合闸时间差出现了较大的情况,因此仅凭 8 月 29 日断路器的相对合闸时间差值难以预知断路器的运行状况。

根据图 5 可知,8 月 23 日断路器 C 相正常合闸时,合闸时间差变化异常,为了分析不同时刻的断路器运行状况,分别选取断路器 C 相在 8 月 23 日的合闸电压电流,B 相在 8 月 24 日和 8 月 29 日的合闸电压电流,将其进行归一化,结果如图 6~图 8 所示。

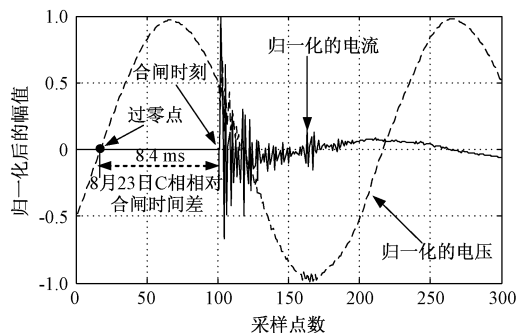


图 6 8 月 23 日 C 相断路器合闸情况分析

Fig. 6 Situation analysis of CB C phase closing on 23 August

由图 5 和图 6 可知,8 月 23 日断路器 C 相正常合闸,母线侧电压过零点时刻与合闸电流首次出现时刻相差 8.4ms,远大于 A、B 两相的合闸时间(0.7ms 和 0.4ms)。

由图 7 和图 8 可知,8 月 24 日断路器 B 相实现正常合闸,此时母线侧电压过零点 0.5ms 后合闸电流出现,然而在 8 月 29 日(故障前一天),该断路器在母线侧电压过零点 8.4ms 后开始合闸,此时合闸

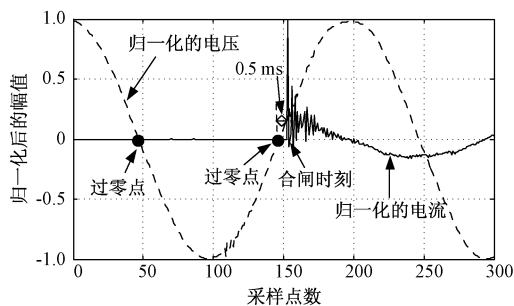


图7 8月24日B相断路器合闸情况分析

Fig.7 Situation analysis of CB B phase closing on 24 August

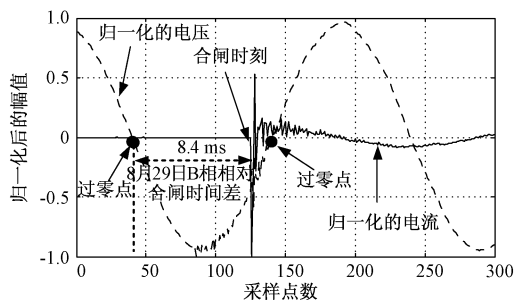


图8 8月29日B相断路器合闸情况分析

Fig.8 Situation analysis of CB B phase closing on 29 August

电压为负值,得到的合闸电流初始峰值也为负值。

结合图6~图8可得,在断路器正常运行时,断路器合闸时间差有可能很大也有可能很小,也就是说随着日期的增加,合闸时间差并没有一致的变化规律,因此,仅依靠合闸时间差来实现断路器的状态监测可行性不够。

3.3 不同时间故障相分闸情况分析

为了降低电弧带来的损害,断路器的分闸操作通常在电流过零点时刻进行,此时合闸电流值最小,对断路器损害最小。根据3.1节和3.2节的分析可知,断路器合闸时刻的电流最大幅值和相对合闸时间差这两项指标均不能可靠表征断路器的健康状况。考虑到分闸特性也能反应断路器的故障特性,本文统计分别得到断路器B相在8月22日、25日、28日和29日的分闸电流变化,结果如图9所示。

由图9可以看出,8月30日之前的断路器分闸操作都是在电流过零点附近完成的,断路器分开后,电流迅速降至0,无电弧现象发生。因此,即使增加利用断路器分闸特性,也难以判断出此断路器的健康状况。

4 基于电气量的断路器状态监测讨论

通过分析断路器合闸前后的电压和电流的变化

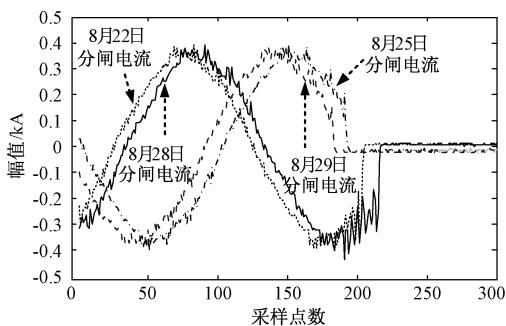


图9 断路器B相分闸波形

Fig.9 Opening waveforms of CB B phase

规律,本文探讨了基于电气量实现断路器状态监测的可能性,若想实现该目标需具备以下条件:

(1)足够的故障数据。通过分析可知,故障前一天,断路器故障相的相对合闸时间差较以往合闸相对合闸时间差要大,但是由于断路器合闸故障次数太少,缺少足够的数据量分析断路器合闸故障规律。因此,要想找出某个电气量的变化规律(如电流瞬时值变化、相对合闸时间变化等)以确定断路器的健康状况,应提前获得足够多的断路器合闸故障数据进行统计分析。尤其要关注同一断路器的非故障相的运行特征,比如本方案案例中的C相在B相合闸事故前已经出现了与故障相B相类似的故障特征,但是在B相出现合闸故障之前,C相一直运行正常,但这并不能说明C相仍然处于健康状态,因此后续需要收集更多的样本数据对比分析。

(2)准确的故障特性提取。基于本文分析,单一的依靠电压、电流和合闸时间差任一电气量均无法准确实现断路器状态监测。同时由于合闸故障会导致该滤波器支路的电压、电流等相关的电气量变化,且断路器故障是由长期运行累积到一定程度导致的必然结果,因此这些电气量的变化在合闸故障发生之前就已经存在,且越接近故障时间,电气量中故障特征越明显。因此,实现断路器的状态监测必须提取准确的故障特征。

(3)依靠大数据、人工智能方法等实现准确监测。随着社会的发展,大数据、深度学习等方法被成功应用于电力系统相关领域,基于足够的故障录波数据,利用机器语言进行深度挖掘或者深度学习,最终得到准确的断路器状态监测结果,该方法也是未来彻底解决断路器状态监测的一个可能性方案。

5 结论

本文根据一起交流滤波器用断路器典型的合闸

故障案例,分析了断路器故障发生瞬间和发生前的合闸电流幅值、合闸相对时间差以及分闸电流变化特性,尝试从电气量的角度衡量交流滤波器用断路器的运行状态。从分析结果可知,仅仅依靠故障前一段时间的电压、电流和合闸时间差的变化无法准确总结断路器运行状态的变化,要想利用电气量的变化实现断路器运行状态的有效监测,必须基于大量的断路器历史运行数据(包括正常状态和故障时刻)、准确的故障特性提取方法,甚至需要结合大数据、智能算法等技术手段来实现。

参考文献 (References):

- [1] 张长虹, 阳少军, 杨旭, 等 (Zhang Changhong, Yang Shaojun, Yang Xu, et al.). 500 kV 交流滤波器用断路器绝缘故障分析及其绝缘特性研究 (Analysis of insulation faults and research directions on insulation properties of 500 kV AC filter circuit breakers) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2016, 52 (9): 1-7.
- [2] 王宾, 魏向向, 张国辉, 等 (Wang Bin, Wei Xiangxiang, Zhang Guohui, et al.). 换流站交流滤波支路断路器燃弧故障建模分析 (Fault arc modeling and analysis in circuit breaker in HVDC converter station filter branch) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (5): 1496-1503.
- [3] 阳少军, 石延辉, 夏谷林 (Yang Shaojun, Shi Yanhui, Xia Gulin). 一起 ± 800 kV 换流站投切交流滤波器用断路器故障原因分析 (Analysis of converter stations AC filter circuit breaker fault) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2015, 36 (9): 129-134.
- [4] 聂定珍, 曹燕明 (Nie Dingzhen, Cao Yanming). HVDC 换流站投切交流滤波器用断路器特殊性能要求 (Special performance requirement of circuit breakers to switch AC filter banks of HVDC converter station) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2008, 32 (23): 86-90.
- [5] 汪娟娟, 梁泽勇, 李子林, 等 (Wang Juanjuan, Liang Zeyong, Li Zilin, et al.). 高压直流输电系统低功率运行的无功控制策略 (Reactive power control strategy for low power operation of HVDC transmission system) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2017, 41 (6): 154-158.
- [6] 申笑林, 马为民, 白光亚, 等 (Shen Xiaolin, Ma Weimin, Bai Guangya, et al.). 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 (Simulation and investigation on capacitive recovery voltage of 800 kV AC filter sub-bank circuit breaker in UHVDC converter station) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2015, 36 (9): 73-77.
- [7] 方冰, 关永刚, 申笑林 (Fang Bing, Guan Yonggang, Shen Xiaolin). 特高压换流站交流滤波器断路器恢复电压特性研究 (Study on voltage recovery characteristics of AC filter breaker in UHV converter station) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2015, 51 (8): 1-7.
- [8] 赵洋 (Zhao Yang). 高压真空断路器机械特性在线监测技术研究现状与展望 (Research status and expectation of on-line monitoring technologies of mechanical characteristics of high-voltage vacuum circuit breaker) [J]. 工矿自动化 (Industry and Mine Automation), 2016, 42 (12): 19-24.
- [9] 田小静, 冯雨, 郭英杰, 等 (Tian Xiaojing, Feng Yu, Guo Yingjie, et al.). 基于小波变换和形态学细化算法的真空电弧形态检测 (Morphological detection of vacuum switching arc based on wavelet transform and morphology edge thinning) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (11): 110-114.
- [10] 徐秦乐, 张金艺, 徐惠政, 等 (Xu Qinle, Zhang Jinyi, Xu Huizheng, et al.). 高精度故障电弧检测多传感器数据融合算法 (Multi-sensor data fusion algorithm for high accuracy arc fault detection) [J]. 上海大学学报 (自然科学版) (Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)), 2014, 20 (2): 165-173.
- [11] 李建鹏, 赵书涛, 夏燕青 (Li Jianpeng, Zhao Shutao, Xia Yanqing). 基于双谱和希尔伯特-黄变换的断路器故障诊断方法 (Fault diagnosis based on bispectrum and Hilbert-Huang transform for circuit breaker) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2013, 33 (2): 115-119.
- [12] 杨凌霄, 朱亚丽 (Yang Lingxiao, Zhu Yali). 基于概率神经网络的高压断路器故障诊断 (High voltage circuit breaker fault diagnosis of probabilistic neural network) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 43 (10): 62-67.
- [13] 董镒, 李恒真, 易林, 等 (Dong Di, Li Hengzhen, Yi Lin, et al.). 基于形态小波和支持向量机的高压断路器状态监测和故障诊断 (Condition monitoring and fault diagnosis of circuit breaker based on morphology wavelet and support vector machine) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2017, 54 (4): 92-99.
- [14] 梅飞, 梅军, 郑建勇, 等 (Mei Fei, Mei Jun, Zheng Jianyong, et al.). 粒子群优化的 KFCM 及 SVM 诊断模型在断路器故障诊断中的应用 (Application of parti-

cle swarm fused KFCM and classification model of SVM for fault diagnosis of circuit breaker) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (36): 134-141.

[15] 牟龙华, 王伊健, 蒋伟, 等 (Mu Longhua, Wang Yijian, Jiang Wei, et al.). 光伏系统直流电弧故障特征及检测方法研究 (Study on characteristics and detection method of DC arc fault for photovoltaic system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (19): 5236-5244.

[16] Liu Yu-Wei, Wu Chi-Jui, Wang Yi-Chieh. Detection of serial arc fault on low-voltage indoor power lines by using radial basis function neural network [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 83: 149-157.

[17] Koziy K, Gou B, Aslakson J. A low-cost power-quality meter with series arc fault detection capability for smart grid [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (3): 1584-1591.

[18] 孙鹏, 董荣刚, 郑志成, 等 (Sun Peng, Dong Ronggang, Zheng Zhicheng, et al.). 基于小波分析信号特征频段能量变比的故障电弧诊断技术研究 (Arc fault diagnosis technology based on the analysis of energy variation of signal's characteristic frequency band with wavelet transform) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2010, 46 (7): 46-51.

Case analysis of circuit breaker closing failure in AC filter branch in converter stations

FU Jian¹, WANG Bin², ZHOU Xiao-fa¹, WEI Xiang-xiang³

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

Abstract: The real-time reactive power balance in HVDC substation requires frequent switching of circuit breaker (CB) in AC filter branch. So it is easy to cause the failure of CB. In this paper, a true CB failure case is present, the fault report and scene inspection status are described at first, and then the pre-fault conditions of CB are analyzed from different viewpoints, including the closing currents' amplitudes, differences of relative closing time and magnitudes of CB opening currents. At last, the possibility and existing technical challenges of CB operation status evaluation based on real-time monitoring data are discussed.

Key words: HVDC; AC filter; convertor station; CB closing failure; closing currents' amplitude