

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181250

基于录波数据的断路器关合时间整定计算方法研究

甘战¹, 冯田¹, 张鹏¹, 文武², 杨洁民¹, 王光耀²

(1. 中国南方电网超高压输电公司曲靖局, 云南 曲靖 655000; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出了一种基于录波数据对滤波器的断路器关合整定时间进行修正的方法。该方法从录波数据中提取断路器的关合时间、距离关合时间最近的电压过0时间等反映断路器工作状态的基本数据。通过对一段时间内录波数据的统计分析, 找出断路器的关合时间偏差的系统误差和随机误差, 并以此为基础对断路器的关合整定时间进行修正。应用效果表明: 该方法简单、实用, 不需要增加额外试验和费用, 能够明显降低滤波器的合闸涌流, 非常适合于换流站工作人员及时掌握断路器的运行状况, 能够提高运维工作的效率。

关键词: 合闸涌流; 交流滤波器; 选相合闸; 整定计算; 断路器

Calculation method on circuit breaker closing time based on fault recording data

GAN Zhan¹, FENG Tian¹, ZHANG Peng¹, WEN Wu², YANG Jiemin¹, WANG Guangyao²

(1. Qujing Bureau, EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid, Qujing 655000, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper puts forward a calculation method to set the closing time of circuit breaker based on recorded wave data. The basic data reflecting the working state of the circuit breaker is extracted from the recording data, such as the closing time, the closest voltage zero time, etc. According to the statistical analysis of the recording data in a period of time, the systematic error and random error of the circuit breaker closing time deviation are found, then the closing setting time of the circuit breaker is corrected based on this result. The application result shows that this method is simple and practical. It does not need additional tests and costs, and can obviously reduce the switching inrush current of the filter. The method is very suitable for the staff of the converter station to grasp the operation status of the circuit breaker in time and improve the efficiency of operation and maintenance.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903700) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. CGYKJXM20160021).

Key words: switching inrush currents; AC filter; controlled switching; setting calculation method; circuit breaker

0 引言

换流站中, 交流滤波器和无功补偿装置起着滤除换流站产生的谐波, 并向交流系统提供无功功率的双重作用, 换流站配有大量滤波器和无功补偿装置, 其成本占整个换流站总造价的10%^[1]。

交流滤波器在工作中承受着基频及高次波的冲击, 易于发生故障, 滤波器故障占整个换流站故障的10%左右^[2], 电容器的自身的故障率达到1.2%, 大大超过了设计阶段所提出的故障率小于0.2%的目标^[3]。

滤波器或电容器组在投入时会产生合闸涌流^[4-6], 合闸涌流不仅造成滤波器损坏, 还会影响其他电力设备的安全运行, 如, 引起断路器事故^[7-8]、产生对二次回路的电磁干扰^[9]、引起换相失败^[10]、造成保护误动作^[11]等。

采用合闸电阻、阻尼电阻或避雷器是抑制投切过电压和涌流的常用方法, 这些方法虽然有效但可靠性不高或价格昂贵^[12]。选相开合技术, 也称为同步关合技术、选相分合闸、相控开关等是通过控制断路器合闸或分闸的时刻(或相位角), 达到消除或减小电气设备投切除过电压或涌流的目的, 该技术在电容器组、滤波器、变压器及线路投切中得到广泛应用^[13-17]。从理论上讲, 选相关合技术可以消除

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903700); 南方电网公司科技项目资助(CGYKJXM20160021)

滤波器或电容器的合闸过电压或涌流,但由于目前高压断路器的动力系统还是依靠机械运动完成,受生产工艺和技术条限制,断路器的合闸时间并不稳定。断路器触头在整个运动过程中受到操动机构的力、灭弧室气体产生的阻力、机械摩擦阻力等,任何力的不稳定,均是导致分、合闸不稳定的因素。国际大电网会议对 SF₆ 断路器的分合闸时间偏差及影响因素统计作过统计,以弹簧储能机构为例,温度变化±40℃引起的合闸时间偏差为±0.07 ms,控制回路电压变化±10%引起的合闸时间偏差为±0.5 ms,有效储能变化±5%引起的合闸时间偏差为±2.5 ms^[18]。文献[19]对我国变电站运行的 12 种不同电压等级不同型号的断路器分合闸时间的分散性进行了研究,研究表明:不同的断路器型号,合闸时间分布特征差异性很大,分合闸时间偏差一般在 0~0.6 ms。

采用智能选相分合闸技术可以实时检测环境温度、断路器内部压强、控制回路电压等,自适应补偿断路器的合闸时间,以提高选相分合闸控制的精度^[20-21],但由于国内断路器和控制器的生产研究不同,控制器生产厂家往往不能全面掌握断路器的性能,智能选相控制的功能难以充分发挥,虽然有些换流站(如牛寨换流站)的断路器控制器称具有自动补偿功能,但也没有投入使用。

断路器的关合时间偏差可分为系统偏差和随机偏差,系统偏差是与由某些固定的因素引起的误差,它具有重复性、单向性,可以通过修改断路器关合时间整定值进行校正;随机偏差是由时偶然因素引起的,虽然不能完全消除,但可根据其统计分布规律,并通过合理选择关合时间整定值,最大限度地减小随机误差的影响。

断路器分合闸时间的不稳定性制约着选相关合技术的效果,为提高选相分合闸控制的精度,需定期对断路器进行开合试验,并依试验数据修正断路器的关合整定时间,这种方法虽然有效,但费力费时。

目前我国 220 kV 以上的变电站或换流站已全部安装故障录波装置,有些控制器自带录波功能。录波数据详细记录了断路器分合闸过程中的电压、电流变化情况,为及时掌握断路器的运行状况提供了第一手资料^[22-23]。

本文基于牛寨换流站滤波器投入时的实际录波数据,对断路器的合闸时间偏差进行统计分析,并提出了基于录波数据的断路器关合整定时间的实用计算方法。

1 滤波器选相合闸技术概述

滤波器或电容器在母线电压过 0 时刻投入时所引起的合闸涌流最小,电压过 0 时刻关合是控制器所追求的目标。影响断路器合闸时间偏差的因素虽然很多,但可规为两大类:机械偏差,由各种因素引起的触头机械运动特性改变所产生的偏差;SF₆ 气体预击穿特性引起的偏差,断路器在合闸过程中,随着触头间距的减小,触头间 SF₆ 气体的绝缘强度随之减小,当触头间的电压大于 SF₆ 气体的绝缘强度时,触头间可发生预击穿现象。

当选择电压过 0 时刻合闸时,断路器是否发生预击穿现象取决于 SF₆ 气体的绝缘强度下降率(RDDS)与触头间电压下降率之间的关系:当气体绝缘强度下降率大于触头间电压下降率时将发生预击穿现象;反之,则不会发生预击穿现象。

选相合闸是指分合控制器监测电源电压,当接收到合闸命令时以基准电压的某一过 0 时刻为参考,根据断路器的关合时间,并经合闸延时后向断路器发出合闸命令,使断路器在特定相角(如电压峰值、或过 0 时刻)时刻完成关合的过程。滤波器一般选择在电压过 0 时刻关合,其选相合闸的控制时序如图 1 所示。

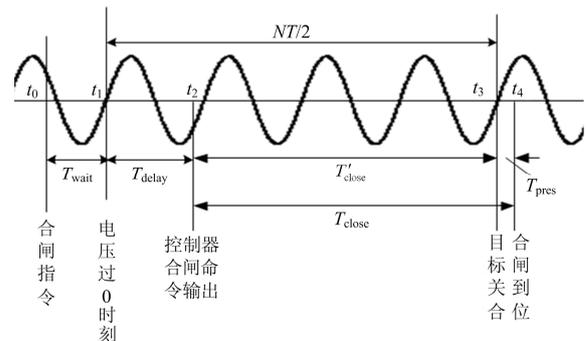


图 1 断路器选相合闸时序原理图

Fig. 1 Time sequence diagram of phase selector circuit breaker

图中,以小写字母 t 表示对应的时刻,大写字母 T 表示时间间隔。

T_{wait} 为控制器接收到合闸命令时刻 t_0 至找到第一个电压过 0 时刻 t_1 的时间; T_{delay} 为控制器发出合闸命令的延迟时间; T_{close} 为合闸时间,指断路器接收合闸命令时刻 t_2 至断路器两触头接触时刻 t_4 之间的时间; T_{pres} 为断路器预击穿时间,指断路器触头间出现电弧时刻 t_3 至触头接触时刻 t_4 之间的时间; T'_{close} 为断路器关合时间,指断路器接收合闸命令时刻 t_2 至断路器触头间电流出现时刻 t_3 之间的时间, $T'_{close} = T_{close} - T_{pres}$; $NT/2$ 为由整数个半波时间组

成的时间间隔。各时间间隔满足如下关系:

$$T_{\text{delay}} = NT/2 - T'_{\text{close}} \quad (1)$$

断路器选相合闸过程为: 控制器实时采集电源电压波形, 当接到合闸命令时, 对当前电压波形进行整形处理, 判断电源电压的质量是否满足合闸条件, 同时找到一个电压过 0 点, 以此时刻作为计算延时的起点, 并延时 T_{delay} 向断路器发出合闸指令。断路器接到合闸命令后, 在合闸弹簧及液压机构的共同作用下使断路器触头快速闭合, 从而完成整个合闸动作。

2 断路器关合时间整定计算方法

当触头间隙较小时, SF_6 气体的绝缘强度下降率 RDDS 近似为一条倾斜的直线, 经过电压 0 点与电压曲线相切的直线称为临界绝缘强度下降率 (RDDS_0)。RDDS 与气体压强、触头运动速度、断路器的结构等多种因素有关, 经过断路器的优化设计均可以满足 $\text{RDDS} > \text{RDDS}_0$ 。

由于多种因素的影响, 断路器的关合时间存在偏差是不可避免的, 关合时间的提前与滞后对合闸涌流的影响是不同的。忽略触头间电压的极性对预击穿的影响, 只考虑触头间电压的大小, 合闸时间偏差 $\pm \Delta T$ 对合闸涌流的影响可用图 2 解释。

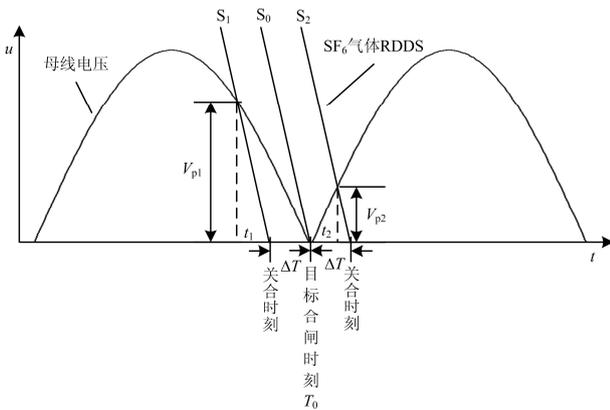


图 2 关合时间偏差对合闸涌流影响原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the influence of closing time deviation on inrush current

设断路器的目标合闸时刻 T_0 位于电压过 0 点, 当 $\text{RDDS} > \text{RDDS}_0$ 时, 若不考虑合闸时间偏差, SF_6 气体 RDDS 位于图 2 中的直线 S_0 , 合闸过程中不会发生 SF_6 气体预击穿现象, 关合点与合闸点重合, 断路器的合闸时间整定值等于某个电压过 0 时间。若合闸时间提前 ΔT , 则 RDDS 偏移至 S_1 , 合闸过程中 SF_6 气体将于 t_1 时刻击穿, 对应的击穿电压为 V_{p1} ; 反之, 若合闸时间滞后 ΔT , 则 RDDS 偏移至

S_2 , SF_6 气体将于 t_2 时刻击穿, 对应的击穿电压为 V_{p2} ; 由图 2 可以看出 $V_{p1} \gg V_{p2}$ 。

如果将目标合闸点滞后时间 dt (目标合闸时刻为 $\Delta T + dt$), 如图 3 所示, 则 V_{p1} 将减小、 V_{p2} 增大; 改变 dt 的大小, 可使 $V_{p1} = V_{p2}$, 则可降低合闸时间偏差 $\pm \Delta T$ 时的合闸涌流, 此时的关合时间 T'_{close} 即为最佳关合时间整定值。

$$T'_{\text{close}} = T_0 + dt \quad (2)$$

式中: T_0 为电压过 0 时间; dt 为关合时间偏差引起的整定值修正量。

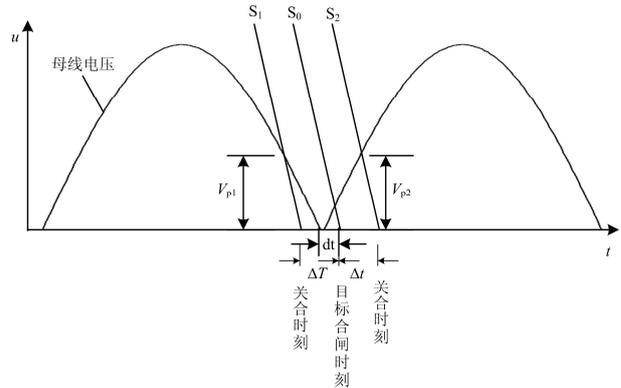


图 3 根据关合时间偏差修正整定时间原理图

Fig. 3 Schematic diagram of setting time correction according to closing time deviation

最佳关合时间整定值可通过迭代的方法求解, 500 kV 断路器一般为双断口, 每个断口承受的电压大小为

$$u_a = \frac{1}{2} U_m |\cos(\omega t)| \quad (3)$$

式中, $U_m = 525 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 428.7 \text{ kV}$ 。

设 SF_6 气体的绝缘下降率 RDDS 的斜率为 k , 断路器关合时间偏差为 $\pm \Delta T$, 电压过零时间为 T_0 , 图 3 中直线 S_1 、 S_2 的方程为

$$u_{s1} = k((T_0 + dt - \Delta T) - t) \quad T_0 - T/2 < t < T_0 \quad (4)$$

$$u_{s1} = k((T_0 + dt + \Delta T) - t) \quad T_0 < t < T_0 + T/2 \quad (5)$$

通过改变 dt 的值, 迭代求解式(3)一式(5), 直到满足 $V_{p1} = V_{p2}$, 可以最佳关合时间, 其计算流程如图 4 所示。

3 基于录波数据关合整定值计算

本节将以牛寨换流站 571 断路器的录波数据为例, 介绍基于录波数据的断路器关合时间整定值计算方法。

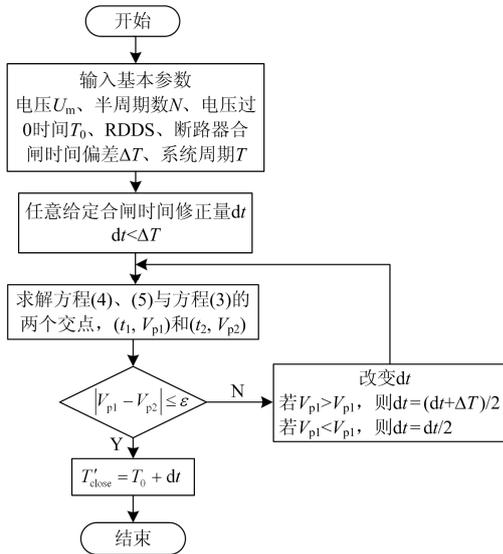


图 4 断路器合闸时间整定值计算流程图

Fig. 4 Computational flowchart of circuit breaker closing setting time

3.1 录波数据分析

录波装置可以记录断路器投切过程中母线电压、滤波器电流、控制器合闸命令输出信号以及合闸到位反馈信号等，图 5 为 571 滤波器某次合闸时 C 相录波波形图。

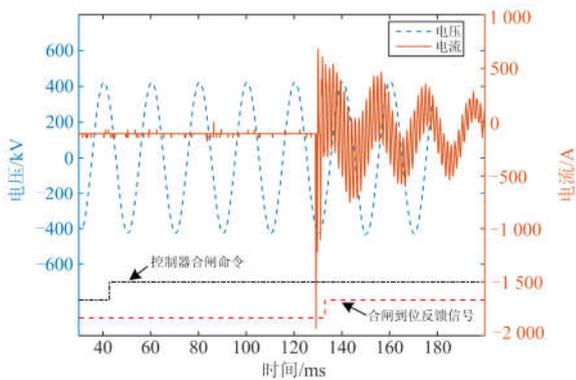


图 5 571 滤波器投入时 C 相录波波形

Fig. 5 Record wave of No.571 filter when the circuit breaker closing

571 滤波器 C 相合闸整定时间为 83.2 ms，从录波曲线(如图 5)可以看出：控制器发出合闸命令时刻 42.7 ms，加上整定值即可计算出断路器的目标合闸时刻在 125.9 ms(图 6 中“*”所示)；断路器的实际合闸点(出现电流的时刻)在 129.1 ms(图 6 中“☆”所示)；距目标合闸点最近的电压过 0 时刻位于 125.36 ms(图 6 中“。”所示)；断路器实际合闸点在 133 ms(图 6 中“△”所示)。

从图 6 可以看出：断路器的实际合闸时间较目

标合闸时间滞后大约 3.2 ms，这说明断路器触头的运行速度有所变慢，原有的合闸时间整定值已不合适，需重新整定。

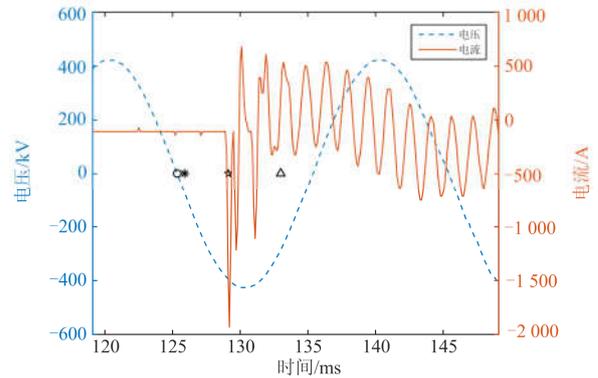


图 6 571 断路器投入时 C 相录波局部波形及关键时刻

Fig. 6 Local record waveform of No.571 filter when the circuit breaker closing and key time point

取 571 滤波器自 2017 年 1 月至 2018 年 3 月间的 12 次录波数据，从录波数据计算断路器合闸时间及合闸时刻与电压过 0 点偏差，结果列于表 1 中。

根据表 1 中的数据，可以分析断路器合闸时间的分散性，图 7、图 8 分别为电压过 0 时间和合闸时间的概率密度分布曲线。

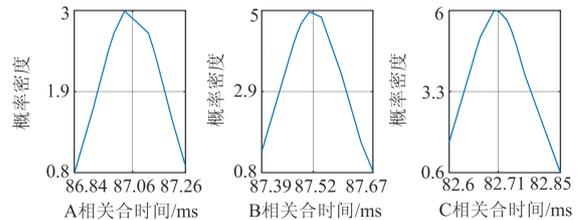


图 7 571 断路器电压过 0 时间概率分布曲线

Fig. 7 Time probability density distribution curve of the voltage across 0 from No. 571 breaker

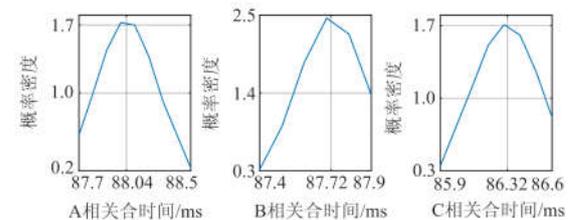


图 8 断路器合闸时间概率分布曲线

Fig. 8 Probability density distribution curve of No. 571 circuit breaker closing time

由图 7 分别估算 A、B、C 相断路器电压过 0 时间的最大然值 T_0 ；由图 8 估算实际合闸时间的最大然值 T_c 及其标准方差 σ ，估算结果例于表 2 中。

表 1 571 滤波器断路器合闸数据统计

Table 1 Statistics of No.571 filter when the circuit breaker closing

次数	录波时间	距关合点最近的电压过 0 时间 T_0 /ms			实际关合时间 T_c /ms			合闸涌流峰值/A		
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	20180331	87.03	87.49	82.85	88	87.7	86.5	1 071.36	429.84	1 824.98
2	20180330	87.12	87.67	82.73	87.8	86.4	86.1	857.09	823.86	1 860.77
3	20180329	86.99	87.47	82.74	87.7	85.8	86.1	1499.9	2 328.3	2 576.45
4	20180329	87.12	87.51	82.77	87.9	87.8	86.6	999.94	465.66	1 860.77
5	20180328	87.15	87.64	82.7	88	87.9	86.6	1 999.87	2 471.58	2 898.5
6	20180327	87.26	87.59	82.75	88.3	87.8	86.5	1 178.5	465.66	1 932.34
7	20171125	86.92	87.48	82.66	88.2	87.9	86.3	1 357.06	573.12	1 932.34
8	20171124	87.21	87.54	82.71	88.5	87.9	86.5	1 428.48	501.48	1 753.42
9	20171121	86.84	87.39	82.65	88.2	87.7	86.4	1 392.77	465.66	1 896.55
10	20171120	87.14	87.51	82.67	88.1	87.6	86.2	1 142.78	429.84	1 860.77
11	20171118	86.91	87.45	82.6	87.9	87.7	86.1	1 107.07	1 038.78	1 860.77
12	20171113	86.97	87.49	82.66	87.9	87.8	85.9	1 107.07	501.48	1789.2
平均值		87.06	87.52	82.71	88.04	87.50	86.32	1 261.82	874.61	2 003.91

表 2 571 断路器合闸时间偏差估算值

Table 2 Estimated time deviation of No. 571 circuit breaker

	A 相	B 相	C 相
电压过 0 时间 T_0 /ms	87.06	87.52	82.71
断路器实际关合时间 T_c /ms	88.04	87.72	86.32
断路器关合时间标准方差 σ	0.23	0.16	0.23

3.2 合闸整定时间修正方法

571 断路器 A、B、C 三相原合闸时间整定值分别为 87.4 ms、87.8 ms、83.2 ms, 由表 3 可以看出实际关合时间分别 88.04 ms、87.72 ms、86.32 ms; A 相关合时间较原整定值滞后 0.64 ms、B 相提前 0.08 ms、C 相滞后 3.12 ms, 这个时间偏差可以看作由系统偏差引起的, 如果不考虑随机时间偏差, 则关合时间整定值应修正为 T'_0 : 电压过 0 时间 T_0 加上时间滞后量或减去时间提前量, 即 A、B、C 三相合闸时间整定值应修正为: A 相 87.1 ms、B 相 87.4 ms、C 相 85.8 ms。

断路器关合时间的随机偏差是难以避免的, 根据图 4 给出的计算流程, 可以估算出随机关合偏差对关合时间整定值的修正量 dt 。设最大随机关合时

间偏差为 $\Delta T=3\sigma$, SF_6 气体的 RDDS 为 107.2^[22], 按照图 4 的计算流程, 计算随机时间偏差 ΔT 引起关合时间修正量 dt 分别为: A 相 0.66 ms、B 相 0.46 ms、C 相 0.66 ms。关合时间最终整定值应为

$$T'_{\text{close}} = T'_0 + dt \quad (6)$$

即 A、B、C 三相关合时间整定值应修正为: A 相 87.8 ms、B 相 87.9 ms、C 相 86.5 ms。

3.3 效果分析

修改 571 断路器关合时间整定值, 并取修改后的 3 次录波数据, 分析滤波器的合闸涌流, 分析结果列于表 3 中。

对比表 2 和表 3 中合闸涌流的平均值可以看出: 571 断路器合闸整定时间修改后, A、B、C 三相的合闸涌流分别降低 24%、54%和 38%。

按照 571 断路器的录波数据分析方法, 分别对牛寨换流站 572、583、595 断路器的关合整定时间进行修正, 结果列于表 4 中。

由表 4 数据可以看出: 通过对断路器录波数据的分析, 断路器关合整定时间进行修正后, 滤波器的合闸涌流均有不同程度的降低。

表 3 571 断路器关合时间整定值修改后录波数据分析

Table 3 Data analysis of the No. 571 circuit breaker after modification of the setting time

次数	录波时间	距关合点最近的电压过 0 时间 T_0 /ms			实际关合时间 T_c /ms			合闸涌流峰值/A		
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	20180424	87.08	87.57	85.73	88.00	87.80	87.30	1 071.4	465.7	1 467.1
2	20180423	87.08	87.61	85.79	87.90	87.80	87.20	892.8	465.7	1 324.0
3	20180422	86.99	87.43	85.69	87.80	86.60	87.00	928.5	680.6	1 216.7
平均值		87.05	87.54	85.74	87.90	87.40	87.17	964.2	537.3	1 335.9

表 4 部分断路器关合时间整定值修正前后合闸涌流对比
Table 4 Data analysis of some other circuit breakers after modification of the setting time

编号		关合时间整定值/ms			合闸涌流峰值/A		
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
571	修改前	87.4	87.8	83.2	1 268	1 164	2 159
	修改后	87.8	87.9	86.5	964	537	1 336
	减小比例/%				24	54	38
572	修改前	90.1	88.5	85.8	1 530	1 588	1 652
	修改后	85.4	82.5	87.5	1 214	1 433	1 181
	减小百分比/%				21	10	29
583	修改前	86.9	87.1	84.7	774	884	614
	修改后	89.1	82.7	86.1	679	716	608
	减小比例/%				12	19	1
595	修改前	88.1	85.7	86.5	2 583	2 340	2 332
	修改后	81.9	86.7	87.5	2 000	1 469	1 682
	减小比例/%				23	37	28

4 结论

1) 基于断路器录波数据, 对断路器的电压过 0 时间、实际关合时间以及关合时间偏差进行统计分析, 并以此为基础对断路器关合整定时间进行修正, 可有效降低滤波器的合闸涌流。

2) 基于录波数据对断路器关合整定时间进行修正的方法, 不需要增加额外试验, 数据获取方便, 简单、实用, 适合于换流站工作人员及时掌握断路器的运行状况, 对断路器的关合整定时间及时修正, 减小滤波器的合闸涌流。

3) 影响断路器关合时间稳定性的因素复杂, 本文提出的方法可以提高运维效率, 但不能代替必要的断路器试验。

参考文献

[1] 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): 135-143.
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): 135-143.

[2] 杨跃浑, 冯战武, 戴甲水. 换流站交流滤波器典型故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(3): 69-82.
YANG Yuehun, FENG Zhanwu, DAI Jiashui. Typical failure analysis of AC filter at converter station[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2014, 35(3): 69-82.

[3] 曾喜闻, 凌云. 直流换流站滤波器电容器运行情况分析及改进措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(5):

74-78.
ZENG Xiwen, LING Yun. Operation analysis and improvement measures of filter capacitor in converter substation[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2012, 33(5): 74-78.

[4] 丛宝丰, 夏成军, 席亮. HVDC 交流滤波器合闸涌流研究[J]. 高压电器, 2013, 49(4): 93-97.
CONG Baofeng, XIA Chengjun, XI Liang. Simulation of inrush current at HVDC AC filter switching on[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 93-97.

[5] 熊红德, 钟庆, 杨煜, 等. 特高压直流输电换流站 SVC 与滤波器投切协调控制仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 144-148.
XIONG Hongde, ZHONG Qing, YANG Yu, et al. Research on simulation of coordinated control between UHVDC converter station SVC and its reactive power compensation devices[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 144-148.

[6] 蒋贝贝. 高压断路器投电容器组合闸涌流的分析研究[D]. 厦门: 厦门工学院, 2016.
JIANG Beibei. The research of capacitive inrush current of high voltage circuit breaker[D]. Xiamen: Xiamen Engineering College, 2016.

[7] 周孝法, 魏向向, 王宾, 等. 一起交流滤波器用断路器击穿事故分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 43(20): 38-43.
ZHOU Xiaofa, WEI Xiangxiang, WANG Bin, et al. An accident analysis of circuit breaker explosion in AC filter branch in substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 43(20): 38-43.

[8] 朱栋, 张丽萍, 夏红英, 等. 西北某换流变电站滤波器断路器 B 相故障原因分析及处理措施[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 233-237.
ZHU Dong, ZHANG Liping, XIA Hongying, et al. Cause analysis and counter measure for the malfunction of a AC filter circuit breaker phase B phase in a northwest converter substation[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 233-237.

[9] 赵文强, 刘念, 卢宇, 等. 高压直流输电交流滤波器投切引起二次回路电压干扰分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 122-135.
ZHAO Wenqiang, LIU Nian, LU Yu, et al. Analysis of voltage disturbance influence on secondary circuits caused by AC filter switching in HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 122-135.

[10] 谢惠藩, 杨光源, 彭光强, 等. 广州换流站交流滤波器投切对天广直流换相失败的影响[J]. 南方电网技术,

- 2015, 9(9): 17-22.
- XIE Huifan, YANG Guangyuan, PENG Guangqiang, et al. Influence of AC filter switching at Guangzhou converter station on commutation failure of Tianshengqiao-Guangzhou HVDC Project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(9): 17-22.
- [11] 常勇, 陈秋安, 张平, 等. 换流站滤波器非同步投切对其差动保护的影响[J]. 中国电力, 2012, 45(3): 11-13.
- CHANG Yong, CHEN Qiu'an, ZHANG Ping, et al. Study on the HVDC AC filter synchronous switching and protection improvement[J]. Electric Power, 2012, 45(3): 11-13.
- [12] 米尔萨德·卡普塔诺维克. 高压断路器[M]. 王建华, 闫静, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [13] 颜湘莲, 李志兵, 王承玉, 等. 特高压输电工程中选相断路器开合电容器组特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1772-1778.
- YAN Xianglian, LI Zhibing, WANG Chengyu, et al. Analysis on characteristics of phase-selectable circuit breaker for switching capacitor banks in UHV Power Transmission Project[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1772-1778.
- [14] 杨庆, 张照辉, 席世友, 等. 相控断路器投切 10 kV 并联电容器的应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1739-1745.
- YANG Qing, ZHANG Zhaohui, XI Shiyu, et al. Application of 10 kV switching shunt capacitor banks with controlled vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1739-1745.
- [15] 陈川江, 方春恩, 曾俊龙, 等. 计及剩磁的空载变压器选相合闸研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 82-88.
- CHEN Chuanjiang, FANG Chun'en, ZENG Junlong, et al. Research on unloaded transformer controlled switching considering residual flux[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 82-88.
- [16] 舒胜文, 刘畅. 选相抑制 1000 kV 线路合闸过电压的仿真研究[J]. 电气技术, 2016(1): 27-32.
- SHU Shengwen, LIU Chang. Simulation research on limit of closing overvoltages by phase-controlled technology in 1000 kV transmission lines[J]. Electrical Technology, 2016(1): 27-32.
- [17] 李伟, 黄金, 方春恩, 等. 基于相控开关技术的空载变压器励磁涌流抑制研究[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 9-13.
- LI Wei, HUANG Jin, FANG Chun'en, et al. Research on elimination of no-load power transformers inrush currents based on controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 9-13.
- [18] CIGRE Task Force 13.00.1 of Study Committee 13. Controlled Switching-a State-of-the-art Survey (Part 1 /Part 2. Electra No.162/164[R]. Paris: CIGRE 1996.
- [19] 石俏, 刘有为, 肖燕, 等. 长期静置对高压断路器合闸时间特性的影响[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 181-185.
- SHI Qiao, LIU Youwei, XIAO Yan, et al. Influence of a long idle on statistic distribution of closing time of high-voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 181-185.
- [20] 周水斌, 李刚, 闫志辉, 等. 智能变电站用选相合闸装置的研究[J]. 高压电器, 2011, 47(11): 1-5.
- ZHOU Shuibin, LI Gang, YAN Zhihui, et al. Study of phase selection controller for smart substation[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 1-5.
- [21] 须雷, 李海涛, 王万亭, 等. 智能变电站中断路器选相控制技术应用研究[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 63-68.
- XU Lei, LI Haitao, WANG Wanting, et al. Application research on the technology of CB phase-controlled on smart substation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 63-68.
- [22] RAHUL, KAPOOR R, TRIPATHI M M. Detection and classification of multiple power signal patterns with Volterra series and interval type-2 fuzzy logic system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 92-101. DOI: 10.1186/s41601-017-0039-z.
- [23] BAI Feifei, LIU Yong, LIU Yilu, et al. A measurement-based approach for power system instability early warning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 17-25. DOI: 10.1186/s41601-016-0014-0.

收稿日期: 2018-10-09; 修回日期: 2018-11-22

作者简介:

甘 战(1986—), 男, 工学学士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: ganzhan@live.cn

冯 田(1973—), 男, 大专学历, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 1069362664@qq.com

张 鹏(1979—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电技术。E-mail: Andy37927@139.com

(编辑 姜新丽)