

基于断路器线圈电流波形的分合闸时间估算方法

李佐胜¹, 彭佳¹, 董凯¹, 毛文奇², 张国旗¹, 罗范¹

(1. 国网湖南省电力公司检修公司, 长沙 410004; 2. 国网湖南省电力公司, 长沙 410007)

摘要: 文中提出一种基于断路器线圈电流波形的分合闸时间估算方法, 先通过设备交接试验或首次例试时测取分合闸时间及线圈电流波形的时间特征参数, 然后在运行操作时带电检测分合闸线圈电流波形, 再提取线圈电流波形的时间特征参数, 最后利用断路器主触头动作时间与辅助开关转换时间的配合关系估算分合闸时间, 其计算精度满足工程应用要求, 可以在一定程度上代替停电例行试验。

关键词: 断路器; 线圈电流; 分闸时间; 合闸时间; 估算

Method to Estimate the Opening/Closing Time of Circuit Breaker Based on Coil Current Waveform

LI Zuosheng¹, PENG Jia¹, DONG Kai¹, MAO Wenqi², ZHANG Guoqi¹, LUO Fan¹

(1. Power Maintenance Company, State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410004, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China)

Abstract: In this paper, a method is proposed to estimate the opening time and closing time of circuit breaker based on coil current waveform. Firstly, the opening time and closing time of circuit breaker, also the time characteristic parameters of coil current waveform are measured in the hand-over test or the first routine test. Secondly, the coil current waveform is detected through the breaker operation. Thirdly the time characteristic parameters are extracted from the coil current waveform. Finally, the opening time and closing time are estimated by using the relationship between the main contact operating time and the auxiliary contact operating time. The calculation accuracy can meet the engineering requirements. It can replace the routine test of circuit breaker to some extent.

Key words: circuit breaker; coil current; opening time; closing time; estimation

0 引言

机械特性是保证断路器短路开断和关合能力的基础条件之一^[1]。通常情况下随着断路器使用寿命的增加, 分合闸时间变长, 甚至超过厂家技术要求。对于断路器自身来说, 分合闸时间的变化, 以及分合闸时间变化带来的合分时间、三相不同期变化超过限值时将电网的安全稳定运行造成很大影响。

在 LW15、LW29、LW35、LW36 型断路器的检修过程中, 均发现存在停电后首次特性试验不合格, 通过多次操作后合闸时间、分闸时间及合分时间满足

要求的情况。文[2-6]关于断路器在线监测、故障调查及诊断分析都表明, 断路器故障率仍不容忽视。断路器长期运行后首次分合闸操作最接近运行中开断故障电流时的状态, 因此通过在线或带电检测方式, 实现对断路器分合闸时间超标的检测具有重要意义。

文[7-20]采取在线监测断路器操作振动、机械行程、绝缘拉杆的受力等方式检测分合闸时间, 装置利用率极低、投入及维护成本高、可靠性不理想。断路器分合闸线圈电流曲线特征点表征了断路器操作过程中的机械状态变化, 若能挖掘特征点与断路器分合闸时间的规律, 就能通过分合闸线圈电流曲线的检测实现断路器分合闸时间的检测, 且可在倒闸

收稿日期: 2016-03-22; 修回日期: 2016-05-21

基金项目: 国网湖南省电力公司科技项目(5216A31350D6)。

Project Supported by the Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Company(5216A31350D6).

操作时带电检测,极大提升检测效率、装置利用率。

文中提出一种基于断路器线圈电流波形的分合闸时间估算方法,先在设备交接试验或首次例试时测取分合闸时间及线圈电流时间特征参数,然后通过运行操作进行分合闸线圈电流波形的带电检测并提取线圈电流时间特征参数,利用断路器主触头动作时间与辅助开关转换时间的配合关系估算分合闸时间,其计算精度满足工程应用要求,可以在一定程度上代替停电例行试验。

1 断路器分合线圈电流曲线

断路器分合闸线圈电流曲线是电磁铁运动过程的动态曲线,受辅助开关切换影响。电磁铁的动作过程可分为以下几个阶段:

1)阶段 1 即 $t_0 \sim t_1$ 时间段,分合闸线圈在 t_0 时刻通电,线圈中有电流通过,但电磁铁产生的电磁力未达到使铁心动作的动作值,铁心不动。

2)阶段 2 即 $t_1 \sim t_2$ 时间段, t_1 时刻,分合闸线圈电流所产生的电磁力能克服铁心自身重力、运动摩擦力、弹簧反力等阻力而带动铁心动作,铁心运动过程中撞击挚子, t_{12} 时刻释放分合闸保持挚子,断路器本体开始动作。

3)阶段 3 即 $t_2 \sim t_3$ 时间段, t_2 时刻,铁心运动到位并保持。

4)阶段 4 即 $t_3 \sim t_4$ 时间段, t_3 时刻,断路器辅助触头断开直流电源,铁心复位。

典型的线圈电流曲线有两种,分别见图 1(a)、(b)。

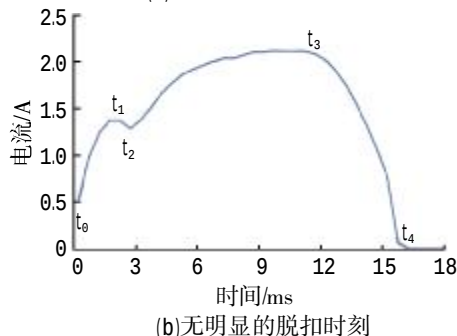
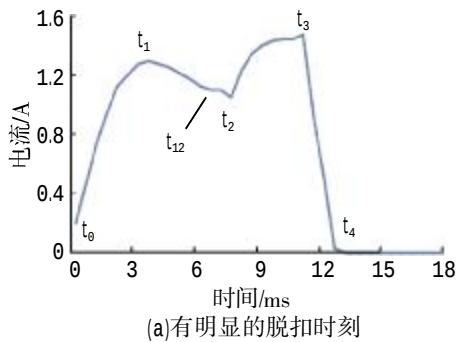


图 1 典型线圈电流波形

Fig. 1 Coil current diagrams

2 断路器分合闸时间估算方法

断路器主触头动作时间与辅助开关的转换时间具有确定的配合关系,且两者动作前时间均包含脱扣线圈动作时间、机构传动件动作时间及断路器本体动作时间,可以利用分合闸辅助开关切断直流电源的时间推断断路器的分合闸时间。

断路器分合闸时间变化主要受两方面影响:一是脱扣装置动作时间变化;二是机构输出及本体传动时间变化。在设备交接试验或首次例试时,同时进行断路器机械特性测试和分合闸线圈电流检测,记录断路器分、合闸时间 $T_{分}$ 、 $T_{合}$,分闸线圈电流特征时间 $T_{3分}$ 、 $T_{12分}$ 、 $T_{2分}$ 、 $T_{0分}$,合闸线圈电流特征时间 $T_{3合}$ 、 $T_{12合}$ 、 $T_{2合}$ 、 $T_{0合}$ 。在运行操作或下次停电检修时,进行分合闸线圈电流检测,记录断路器分闸线圈电流特征时间 $t_{3分}$ 、 $t_{12分}$ 、 $t_{2分}$,合闸线圈电流特征时间 $t_{3合}$ 、 $t_{12合}$ 、 $t_{2合}$ 。有两种方式估算分、合闸时间。

方式 1: 假设辅助开关切换和主触头间的动作时间基本不变,即可通过式(1)、(2)估算断路器的分、合闸时间。

$$t_{分} = (t_{3分} - t_{0分}) - (T_{3分} - T_{0分}) + T_{分}; \quad (1)$$

$$t_{合} = (t_{3合} - t_{0合}) - (T_{3合} - T_{0合}) + T_{合}。 \quad (2)$$

式(1)、(2)中, $t_{3分} - t_{0分}$ 、 $t_{3合} - t_{0合}$ 、 $T_{3分} - T_{0分}$ 、 $T_{3合} - T_{0合}$ 分别表示该次测量、交接或首次例试分、合闸时线圈通电至辅助开关切断电流的时间, $(t_{3分} - t_{0分}) - (T_{3分} - T_{0分})$ 、 $(t_{3合} - t_{0合}) - (T_{3合} - T_{0合})$ 两者的差值代表了分、合闸时间的变化。

方式 2: 假设分合闸脱扣装置释放后的主触头与辅助开关运动过程等效,且速度趋于均匀,此时断路器分、合闸时间估算采用式(3)和(4),无明显的脱扣时刻时 $t_{12分}$ 、 $t_{12合}$ 、 $T_{12分}$ 、 $T_{12合}$ 分别用 $t_{2分}$ 、 $t_{2合}$ 、 $T_{2分}$ 、 $T_{2合}$ 代替。

$$t_{分} = \frac{(t_{3分} - t_{12分})(T_{分} - T_{12分})}{T_{3分} - T_{12分}} + t_{12分} - t_{0分}; \quad (3)$$

$$t_{合} = \frac{(t_{3合} - t_{12合})(T_{合} - T_{12合})}{T_{3合} - T_{12合}} + t_{12合} - t_{0合}。 \quad (4)$$

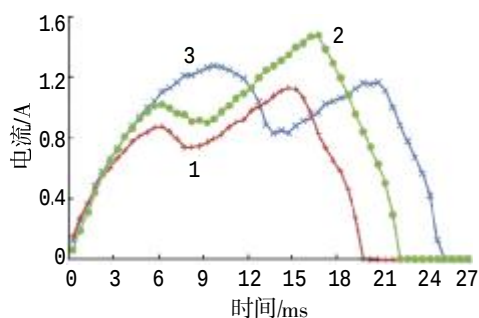
式(3)、(4)中: $t_{3分} - t_{12分}$ 、 $t_{3合} - t_{12合}$ 、 $T_{3分} - T_{12分}$ 、 $T_{3合} - T_{12合}$ 分别表示该次测量、交接或首次例试分、合闸时断路器本体开始动作至辅助开关切断电流的时间; $T_{分} - T_{12分}$ 、 $T_{合} - T_{12分}$ 分别表示交接或首次例试时断路器本体开始动作至刚合位置的时间; $\frac{(t_{3分} - t_{12分})(T_{分} - T_{12分})}{T_{3分} - T_{12分}}$ 、 $\frac{(t_{3合} - t_{12合})(T_{合} - T_{12合})}{T_{3合} - T_{12合}}$ 利用交接或首次例试分、合闸时本体开始动作至辅助开关切断电流的时间与本体开始动作至刚分或刚合位置的时间的占比关系,分

别估算该次本体开始动作至刚分或刚合位置的时间; $t_{12分}-t_{0分}$ 、 $t_{12合}-t_{0合}$ 分别表示该次测量断路器分、合闸线圈通电至机构脱扣时间,即至本体开始动作时间;断路器线圈通电至机构脱扣、本体开始动作至刚分或刚合位置的时间之和即为本次测量分、合闸时间的估算值。

3 断路器分合闸时间估算实例

3.1 分闸时间估算案例

以东升变 510 断路器(LW46-126 型断路器)为例,模拟首次交接试验,测得 A 相分闸时间为 29.4 ms、分闸线圈电流波形见图 2 中曲线 1,分闸时间满足产品(28 ± 5) ms 技术参数要求,再模拟运行一段时间后的两次停电操作,测得分闸线圈电流波形见图 2 中曲线 2、3 所示。



注:曲线 1、2、3 分别代表分闸时间正常、增大、超标。

图 2 分闸线圈电流波形图

Fig. 2 Diagram of trip coil current

交接试验时分闸电流波形对应的 $T_{3分}-T_{0分}=15$ ms、 $T_{3分}-T_{2分}=7.5$ ms、 $T_{2分}=7.5$ ms、 $T_{分}=29.4$ ms,第 1 次停电操作分闸线圈电流波形对应的 $t_{3分}-t_{0分}=16.5$ ms、 $t_{3分}-t_{2分}=8$ ms、 $t_{2分}=8.5$ ms,第 2 次停电操作时分闸线圈电流波形对应的 $t_{3分}-t_{0分}=20.5$ ms、 $t_{3分}-t_{2分}=7$ ms、 $t_{2分}=13.5$ ms。

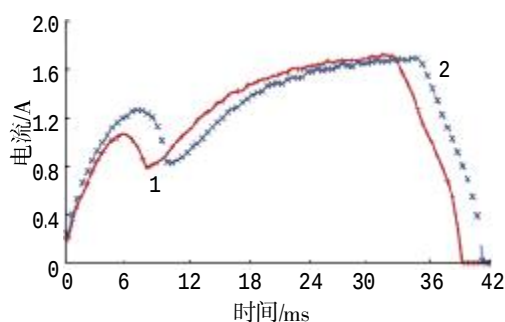
方式 1 估算第 1 次停电操作时分闸时间 $t_{分}=30.9$ ms;方式 2 估算第 1 次停电操作时分闸时间 $t_{分}=31.9$ ms。

方式 1 估算第 2 次停电操作时分闸时间 $t_{分}=34.9$ ms;方式 2 估算第 2 次停电操作时分闸时间 $t_{分}=34$ ms。

第 1、2 次停电操作时分闸时间的实际测量值分别为 31.7、40 ms。

3.2 合闸时间测试案例

以东升变 510 断路器为例,模拟首次交接试验,测得 A 相合闸时间为 92.9 ms、合闸线圈电流波形见图 3 中曲线 1,合闸时间满足产品小于等于 110 ms 技术参数要求,再模拟运行一段时间后的首次复电操作,测得合闸线圈电流波形见图 3 中曲线 2。



注:曲线 1、2 分别代表合闸时间正常、超标。

图 3 合闸线圈电流波形图

Fig. 3 Diagram of closing coil current

交接试验时合闸电流波形对应的 $T_{3合}-T_{0合}=32.5$ ms、 $T_{3合}-T_{2合}=24.5$ ms、 $T_{2合}=8$ ms、 $T_{合}=92.9$ ms,首次复电操作时合闸线圈电流波形对应的 $t_{3合}-t_{2合}=35$ ms、 $t_{3合}-t_{0合}=25$ ms、 $t_{2合}=10$ ms。

方式 1 估算首次复电操作时合闸时间 $t_{合}=95.4$ ms;

方式 2 估算首次停电操作时合闸时间 $t_{合}=96.6$ ms。

首次复电操作时合闸时间实际测量值 97.9 ms。

分析上述分、合闸时间估算结果,方式 2 比方式一能更准确的估算分、合闸时间。分闸时间脱扣装置释放后的断路器本体机械行程较小,随着分闸时间的不断增大,估算误差逐步增大;合闸时间脱扣装置释放后的断路器本体机械行程较大,随着合闸时间的不断增大,估算误差基本稳定。

诊断测试案例中的第 1 次分闸时间合格,有增大趋势,第 2 次分闸时间超标,应立即检修处理;首次复电操作时合闸时间合格,有增大趋势,均与实际测试结果一致。

4 结语

利用断路器主触头动作时间与辅助开关转换时间的配合关系,通过设备交接试验或首次例试时测取分合闸时间及线圈电流时间特征参数,再在运行操作时进行分合闸线圈电流波形的带电检测并提取线圈电流时间特征参数,即可通过文中提出的方法估算断路器分合闸时间,其计算精度满足工程应用要求,可以在一定程度上代替停电例行试验,据此可以判断其变化趋势、断路器是否运行在合格参数范围内。

参考文献:

- [1] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 第 2 版. 北京:机械工业出版社,2011:93-94.
- [2] LIN Xin. Modern high voltage electrical technology[M]. 2nd Edition. Beijing: Machinery Industry Press, 2011.
- [2] IEEE standard C37.10—1995 IEEE guide for diagnostics and failure investigation of power circuit breakers[S]. 1996.

- [3] IEEE standard C37.10.1—2000 IEEE guide for selection of monitoring for circuit breaker[S].2001.
- [4] 李建基. 高压开关设备实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 93-94.
LI Jianji. Practical technology of high voltage switchgear [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [5] 苏涛, 王兴友. 高压断路器现场维护与检修[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 143-184.
SU Tao, WANG Xingyou. On site maintenance and repair of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [6] 张欣, 陶威, 赵宇明, 等. 110 kV 以上 GIS 中断路器机械特性数据的统计和分析[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 129-133.
ZHANG Xin, TAO Wei, ZHAO Yuming, et al. Statistics and analysis of mechanical characteristics of circuit breaker data in GIS above 110 kV[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 129-133.
- [7] HESS D P, PARK S Y, TANGRI M K, et al. Noninvasive condition assessment and event timing for power circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 353-360.
- [8] HU Xiaoguang, WANG Jianze, JI Yanchao, et al. The application of the wavelet analysis of analytic signals in mechanical fault diagnosis of circuit breakers[C]//IEEE 4th Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2003: 13-17.
- [9] CHARBKAEW N, SUWANASRI T, BUNYAGUL T, et al. Vibration signal analysis for condition monitoring of puffer-type high-voltage circuit breakers using wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2012, 7(1): 13-22.
- [10] HUANG Xinbo, HE Xia. Design of an on-line monitoring system of mechanical characteristics of high voltage circuit breakers[C]//International Conference on Electronics, Communications and Control(ICECC). [s.n.]: IEEE, 2011: 3646-3649.
- [11] 王刘芳, 史有强, 王伯翰. 高压断路器动作时间的体外检测[J]. 高压电器, 1995, 31(5): 3-6.
WANG Liufang, SHI Youqiang, WANG Bohan. Outer detection of action time of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 1995, 31(5): 3-6.
- [12] 关永刚, 黄瑜珑, 钱家骊. 基于振动信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高电压技术, 2000, 26(3): 66-68.
GUANG Yonggang, HUANG Yulong, QIAN Jiali. An overview on mechanical failure diagnosis technique for high voltage circuit breaker based on vibration signal[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(3): 66-68.
- [13] 马强, 荣命哲, 贾申利. 基于振动信号小波包提取和短时能量分析的高压断路器合闸同期性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 149-154.
MA Qiang, RONG Mingzhe, JIA Shenli. Study of switching synchronization of high voltage breakers based on the wavelet packets extraction algorithm and short time analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 149-154.
- [14] 赵怀军, 马鹏, 傅卫平, 程远贵. 基于 DSP 的断路器机械特性检测装置[J]. 高压电器, 2006, 42(5): 382-384.
ZHAO Huaijun, MA Peng, FU Weiping. Detection device for mechanical characteristics of circuit breaker based on DSP[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(5): 382-384.
- [15] 吴振升, 王玮, 杨学昌, 等. 基于小波算法的 SF₆ 断路器动作时间在线监测[J]. 中国电力, 2006, 39(6): 7-9.
WU Zhensheng, WANG Wei, YANG Xuechang, et al. On line monitoring of operation time for SF₆ high-voltage circuit breakers based on wavelet algorithm[J]. Electric Power, 2006, 39(6): 7-9.
- [16] 戴怀志, 吕一航, 贾申利, 等. 断路器综合在线监测系统研制[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 104-106.
DAI Huaizhi, LYU Yihang, JIA Shenli, et al. Design of on-line monitoring system for circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 104-106.
- [17] 骆虎, 戴冬云, 殷晓刚, 等. 一种基于触头受力监测实现断路器断口判定的方法[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 116-122.
LUO Hu, DAI Dongyun, YIN Xiaogang, et al. Assessment method for break state of circuit breaker based on force monitoring of contact[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 116-122.
- [18] 黄新波, 陶晨, 刘斌. 智能断路器机械特性在线监测技术和状态评估[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 129-134.
HUANG Xinbo, TAO Chen, LIU Bin. On-line monitoring technology of mechanical properties and state evaluation method for intelligent circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 129-134.
- [19] 王成友, 闫红华, 刘灿东, 等. 液压式高压断路器机械特性在线监测故障几率研究[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 86-91.
WANG Chengyou, YAN Honghua, LIU Candong, et al. Analysis on online monitoring fault probability of mechanical characteristics for hydraulic high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 86-91.
- [20] 赵洋, 刘汉宇, 曾庆军. 高压真空断路器机械特性在线监测系统研制[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 91-95.
ZHAO Yang, LIU Hanyu, ZENG Qingjun. Study on on-line monitoring for mechanical characteristics for high voltage vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 91-95.

李佐胜(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电气设备在线检测与故障诊断、变电检修管理方面的研究工作。