

一种用于合成试验中预测短路电流零点的方法

李 鹏¹, 高 飞¹, 刘 朴¹, 刘 平¹, 何 健²

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 西安秦骊成套电器有限公司, 西安 710075)

摘要: 笔者针对大容量开关电器试验用Weil合成试验回路,给出了一种基于递推形式的电流零点预测方法,并且分析了这种电流零点预测方法的误差来源和误差消除的方法。为了验证该方法的准确性,笔者研制了一个应用于合成试验回路的DSP测控系统,并对过零点预测算法进行了实验验证。实验测试表明,文中所提的电流零点预测方法是准确的,相关测控系统的软硬件实现方式是可行的,具有实际应用价值。

关键词: 高压断路器; 合成试验; 预测; 电流零点

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)07-0057-06

Method for Forecasting Current Zero Point in Synthetic Short Circuit Test

LI Peng¹, GAO Fei¹, LIU Pu¹, LIU Ping¹, HE Jian²

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. Xi'an Qinli Set of Electric Equipment Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In this paper, a kind of current zero-cross point prediction method based on recursion algorithm is proposed for Weil synthetic test circuit which is used for the test on high voltage and high power switchgear. The error source and error elimination methods are analyzed. In order to verify the accuracy of the method, a measurement and control system based on DSP and used for the synthetic test circuit is developed. The actual test results show that the proposed method, as well as the developed hardware and software are feasible and valuable for application.

Key words: high-voltage circuit breaker; synthetic test; forecast; current zero

0 引言

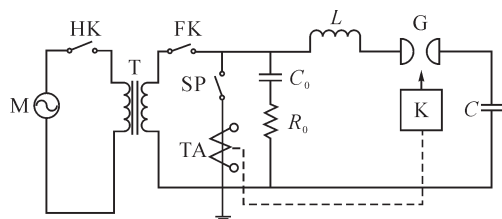
高压断路器不断地向高电压和大容量方向发展,合成试验是考核高压断路器开断能力的一种重要方法,同步控制是影响合成试验效率和成败的关键因素,其电压回路及延弧回路的准确投入,均依靠同步控制来实现的,它要求同步控制装置在开断电流零点前的一个预定时刻 τ_0 发出相应的同步脉冲信号给点火装置,而短路电流的零点预测问题又是同步控制装置的核心问题,能否准确预测电流源电流零点直接关系到合成试验的成败,所以研究合成试验中预测电流源电流零点的方法对于高压断路器合成试验意义重大^[1-5]。

为提高合成试验的成功率,国内外都在不断地研究合成试验方法,并应用先进的计算机技术、电子测量技术和信息处理技术提高和改进设备的测

量和控制水平。以计算机为核心的合成回路测控系统已经具有大量实际的运行经验,实现了从试验控制到数据采集及处理过程的自动化。然而确定延弧电路和电压回路的投入时间仍需依靠有经验的专门技术人员来完成,短路电流的数字化测量和精确的零点预测可以保证延弧电路和电压回路的投入时间更精确,所以更深入地研究短路电流的零点预测问题对提高合成试验的测控水平有重要的实际意义^[6-11]。

1 威尔合成回路及短路电流分析

威尔回路是国内外实验室普遍采用的一种合成试验回路,预测短路电流零点的方法首先要适用于这种典型回路。威尔回路的电压回路与被试断路器并联,属于电流引入电路,其原理接线图见图1。它由短路发电机M和变压器T作为电流源,用电容器与电抗器组成的振荡电路作为电压源。

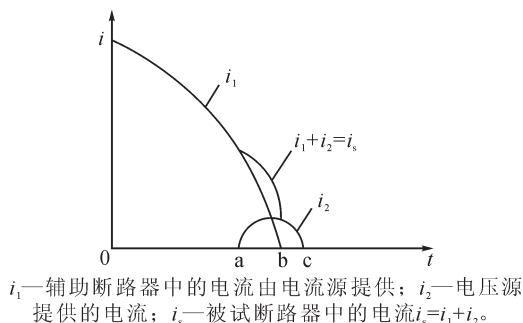


M—电流源发电机；HK—操作开关；T—变压器；D—一点火控制装置；G—可控点火球；K—同步控制装置；TA—电流互感器； C_0 —调频电容； R_0 —调频电阻； L —电压源电抗器；SP—被试断路器；FK—辅助断路器；C—电压源主电容。

图1 威尔合成回路原理图

Fig. 1 Weil synthetic circuit diagram

试验时,辅助断路器FK与被试断路器SP都处于闭合位置,接通合闸开关HK后,电流回路短路电流 i_1 通过FK和SP,通流一段时间后分开FK和SP,产生电弧,在电流过零前某一规定时刻(几百微秒)时球隙G点火,于是预先已充有相应试验电压的电容器C通过球隙G、电抗器L向SP放电,即高压电路投入工作。电压源提供的电流 i_2 也通过SP弧隙,于是SP中流过电流为 (i_1+i_2) ,电流波形见图2,因而使流过FK中的电流 i_1 比流过SP中的电流 (i_1+i_2) 要较早过零。



i_1 —辅助断路器中的电流由电流源提供； i_2 —电压源提供的电流； i_s —被试断路器中的电流 $i_s=i_1+i_2$ 。

图2 合成回路电流波形图

Fig. 2 Wave shape of current of synthetic circuit

FK中的电弧就先熄灭,使电流源与被试断路器SP和电压源脱离,免受高电压的危害。从图2中可以看出,由于电流 i_2 的引入,使流过SP的电流发生了畸变,只要在电弧电压显著变化阶段,被试断路器中的合成电流波形特性与规定的开断电流在电流零前的特性相符,试验标准认为试验是等价的。在bc段时间内(200~500 μ s),只有电流 i_2 流过SP中。在图2中c点,流过被试断路器SP中的电流过零,电弧熄灭。此后,恢复电压就加在断路器的弧隙两端。 R_0 和 C_0 是用来调节瞬态恢复电压的参数。根据合成试验标准要求,同步控制装置要在图2中a点时刻以前预测出短路电流零点b点的具体时刻,并且在a点时刻保证电压源的准确投入。最终保证 $t_{lx}=200\sim 500 \mu$ s^[3]。

2 电流模型的电流递推算法思想

2.1 电流模型及递推公式

短路电流模型^[12-13]

$$i(t)=I_m \sin(\omega t+\psi-\phi)-I_m \sin(\psi-\phi)e^{-t/\tau} \quad (1)$$

式(1)中: I_m 为短路电流周期分量的幅值; ω 为电源角频率; ψ 为短路瞬间电压相位角; ϕ 为电流滞后于电压的相位角; τ 为线路衰减时间常数^[2]。在开断过程的瞬态变化中,电弧电阻往往视电弧燃烧状态不同而变化,因此短路电流周期分量的有效值和线路衰减时间常数亦随时间而改变。

假设一个周期采样 N 个点,采样时间间隔为 $\Delta t=\frac{T}{N}=\frac{1}{f \cdot N}$

为了简化运算,取 $D=I_m \sin(\psi-\phi)$,则可以写成离散表达式:

$$i(k)=I_m \sin\left(\frac{2\pi k}{N}+\psi-\phi\right)-D \exp\left(-\frac{k}{f \cdot N \cdot \tau}\right);$$

$$\begin{cases} i(k)=I_m \sin\left(\frac{2\pi k}{N}+\psi-\phi\right)-D \exp\left(-\frac{k}{f \cdot N \cdot \tau}\right) \\ i(k+N/2)=I_m \sin\left(\frac{2\pi k}{N}+\pi+\psi-\phi\right)-D \exp\left(-\frac{k}{f \cdot N \cdot \tau}-\frac{1}{2f \cdot \tau}\right) \end{cases}$$

令: $S(k)=i(k)+i(k+N/2)$,则有

$$S(k)=i(k)+i(k+N/2)=$$

$$I_m \sin\left(\frac{2\pi k}{N}+\psi-\phi\right)-D \exp\left(-\frac{k}{f \cdot N \cdot \tau}\right)+$$

$$I_m \sin\left(\frac{2\pi k}{N}+\pi+\psi-\phi\right)-D \exp\left(-\frac{k}{f \cdot N \cdot \tau}-\frac{1}{2f \cdot \tau}\right)=$$

$$-D \exp\left(-\frac{k}{f \cdot N \cdot \tau}\right)[1+\exp\left(-\frac{1}{2f \cdot \tau}\right)].$$

显然 $S(k)$ 构成以公比为 $\exp\left(-\frac{1}{f \cdot N \cdot \tau}\right)$ 的等比数列,满足

$$S^2(k)=S(k-1) \cdot S(k+1). \quad (2)$$

$$i(k+N/2)=\frac{[i(k-1)+i(k-1+N/2)]^2}{[i(k-2)+i(k-2+N/2)]}-i(k). \quad (3)$$

式(2)、(3)中, k 为递推序列号, $k=2,3,\dots$ 。

只要测量出 $i(0), i(1), \dots, i(N/2+1)$,就可以递推出 $i(N/2+1)$ 之后离散采样时刻的短路电流瞬时值。也就是说,若采集到半个周波 $N/2$ 再加一个采样点,即可根据式(3)递推得到后续的电流值。

2.2 递推算法的软件流程

为了使算法思想能够应用到实际工程中,首先将它的软件流程编写出来。短路电流波形图见图3。

1)中断采集电流时间间隔为 $\Delta t=10 \mu$ s,即一个周期采集 $N=2000$ 个点;

2)当采集到 $j=N/2+100=1100$ 时,即 t_1 时刻,主

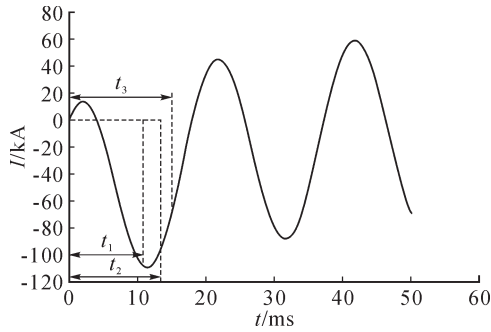


图3 短路电流波形图

Fig. 3 Short circuit current waveform

程序开始递推预测零点,经过 n 个 Δt 后预测到零点及零前 t_2 ;

3)在 t_2 之后用 2 ms 进行精确预测求触发点 t_3 ;

4)在 t_3 时刻触发(t_3 与零点的距离即为试验通过键盘设置的零前触发时间);

5)过零后重复 2)–4)步骤。

一般的算术递推法是利用三角函数的算术代数和为零进行化简递推,可以通过第 1 个半波的电流采样真实值来预测后续所有的电流预测值,电流的预测值的误差会逐步累积可以改进递推算法,利用第 1 半波的真实值推算出第 2 半波的电流预测值,再利用第 2 半波的电流真实值推算出第 3 半波的电流预测值,依次下去求得所有的值。也就是利用相邻的电流真实值推算出电流预测值。在保证有足够多的时间计算预测零点的情况下,电流的真实值离零点越近,则零点的判断误差越小。如图 4(a)所示,先通过采样一组电流真实值,然后预测出电流的零点大概在的位置,然后逐步将前期的电流预测值用实际的电流采样真实值代替,对比图 4(a)和图 4(b)中,部分电流的预测值被电流的真实值代替,采用这种算法可以提高零点预测的精度,但考虑到处理器的计算时间、延弧回路零前触发时间 τ_{0y} 和高压点火装置零前触发时间 τ_{0g} ,电流真实值替代预测值不能太靠近预测零点,延弧回路的过零前电流真实值比高压点火回路更靠近零点。因此延弧回路的判断误差比高压点火回路的零点判断误差要小,具体的时间可以根据试验系统特性调试。

该次选取第 1 次估计零点前 2 ms 作为第 2 次推算的起点。

软件系统运行的流程图见图 5。

3 计算机模拟试验误差分析

3.1 合成试验对触发时间的要求

3.1.1 对于高压回路电流过零前触发时间讨论

电压源回路的电流频率 i_2 半波时间 $t_2 = \frac{10^6}{2f_2}$ (一

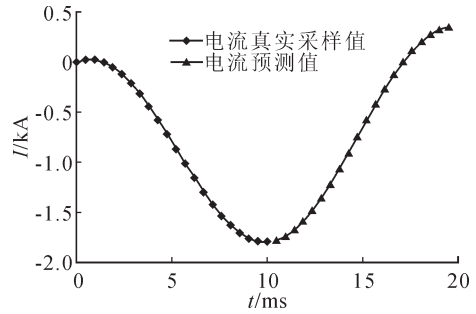
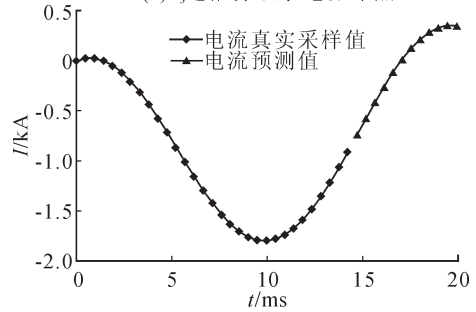
(a) i_3 递推算法求电流零点(b) i_4 递推算法求电流零点

图4 递推算法预测电流零点

Fig. 4 Recursive algorithm to predict the current zero

一般为 500~2 000 μs)。根据合成回路试验标准,确定试品单独处于电压回路的时间 τ 值,尽量使 τ 处于 200~500 μs ,设定时按 $\tau=400 \mu s$ 取值。

已知高压回路点火球隙从接到命令至球隙贯穿的放电时间 τ_g 约为 50 μs ,故同步装置零点前动作的设定时间为 $\tau_{0g}=(t_2-\tau)+t_g^{[14]}$ 。

3.1.2 对于延弧回路电流过零前触发时间讨论

已知延弧回路的动作时间 $t_y=100 \mu s$ (用双触发点火球),根据延弧回路参数, i_y 幅值和时间常数及运行经验确定 i_y 投入的时间 τ_0' ,取为 100 μs ,故同步装置零点前设定时间 $\tau_{0y}=t_y+\tau_0'=200 \mu s^{[14]}$ 。

3.2 误差来源及分析

3.2.1 数字离散采样引起的零点判断的误差 $\varepsilon_1(x_0)$

由于 DSP 采集的是数字信号,一般情况下不能直接推算到零点,而是通过零点附近的两个符号相反的值,通过作插值运算近似得到零点,这与实际的电流的真实零点有差别,由此会引入误差 $\varepsilon_1(x_0)$ 。当开断短路电流时,短路电流的一般表达式为

$$i(t)=I_m[\sin(\omega t+\psi-\phi)-\sin(\psi-\phi)e^{-t/\tau}] \quad (4)$$

通过算术递推法实现短路电流的零点预测,仿真中取 $\omega=100\pi$, $\tau=0.05$ s, $\psi-\phi=4\pi/9$, $I_m=1$, 这里一个周波采集 40 个数据点,即每隔 0.5 ms 采集一个点。

$$i(t)=\sin(100\pi \cdot t+4\pi/9)-\sin(4\pi/9)e^{-20t} \quad (5)$$

通过数据拟合得到零点误差在 $\pm 5 \mu s$ 左右,即 $\varepsilon_1(x_0)=5 \mu s$ 。

3.2.2 AD 有效位数引起的零点判断误差 $\varepsilon_2(x_0)$

零点附近采取插值方法得到零点,实际采样过程中采样值的精度受 AD 位数的影响,设 x_1 、 x_2 为零

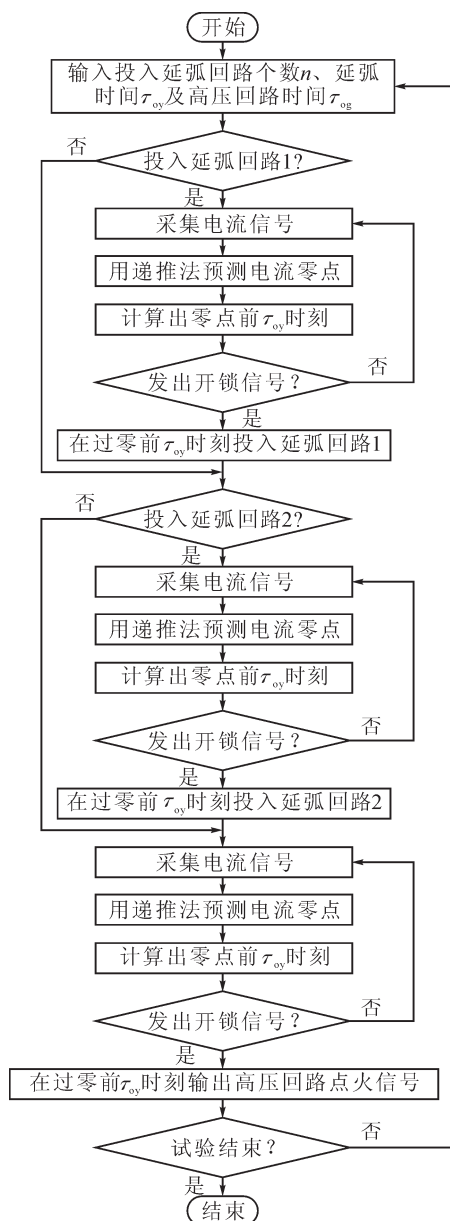


图5 系统运行流程框图

Fig. 5 The system operation flow chart

点附近的两个采样点, $f(x_1)$ 、 $f(x_2)$ 为采样点对应的采样值, x_0 为通过插值求得的零点。得到零点的表达式为

$$x_0 = x_1 + \frac{f(x_1)}{f(x_2) - f(x_1)} \cdot (x_1 - x_2). \quad (6)$$

先考虑 x_1, x_2 为精确值, Δt 为两次采样的时间间隔, $\Delta \delta$ 为 AD 的最低位引起的采样值误差值。

$$\varepsilon_2(x_0) = \Delta t \cdot \frac{\Delta \delta}{2|f(x_2) - f(x_1)|}. \quad (7)$$

将电流表达式仿真求得在 AD 位数为 12 位时, 由于 AD 有效位数引起的零点判断时间误差为 $\pm 2 \mu s$ 左右, 即 $\varepsilon_2(x_0) = 2 \mu s$ 。

3.2.3 AD 输入前端信号精度引起的零点判断误差 $\varepsilon_3(x_0)$

设 AD 输入端模拟信号的精度为 $\alpha\%$, Δt 为两

次采样的时间间隔

$$\varepsilon_3(x_0) = \Delta t \cdot \left(\frac{\alpha}{2}\right)\%。 \quad (8)$$

对于一个周期取 40 个采样点, $\Delta t = 0.5 \text{ ms}$;

若 $\alpha = 0.5\%$, 则 $\varepsilon_3(x_0) = 1.25 \mu s$;

若 $\alpha = 1\%$, 则 $\varepsilon_3(x_0) = 2.5 \mu s$;

若 $\alpha = 5\%$, 则 $\varepsilon_3(x_0) = 12.5 \mu s$ 。

通常实验室磁位计的精度为 1%, 高精度隔离运放的精度能达到 0.01% 的精度, 初步估计的 AD 前端信号采集误差为 0.5%, 则零点判断的误差为 $\pm 1.25 \mu s$, 即 $\varepsilon_3(x_0) = 1.25 \mu s$ 。

3.2.4 算术递推公式法的误差 $\varepsilon_5(x_0)$

在算术递推公式的建模时, 要求若干个采样点的三角函数的算术代数和为 0, 但如果电流源的频率发生偏移, 这个递推公式就不能得到满足, 由此会影响预测精度。为分析电流源的频率偏移对算术递推法的影响, 选取式(4)作为测试函数, 设频率的波动范围为 $(50 \pm 0.5) \text{ Hz}$, 选取频率为 49.5 Hz 和 50.5 Hz 与工频对照, 得到的偏差曲线见图 6, 其中第 1 个零点为起始点没有误差, 第 2 个零点的误差时间为 $\pm 18 \mu s$, 第 3 个零点的误差为 $\pm 160 \mu s$, 算法一般取邻近的零点, 这样误差比较小^[15-20]。

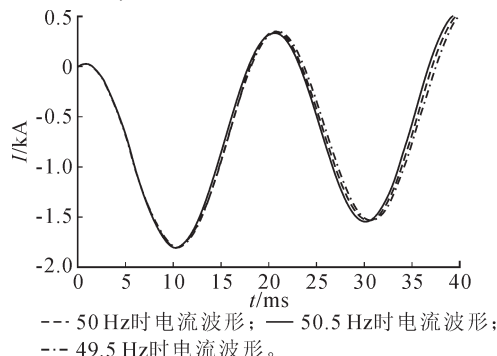


图6 频率变化对算法的影响

Fig. 6 Influence of frequency change to algorithm

4 短路电流零点计算方法的实际应用

4.1 硬件电路的设计

短路电流零点计算方法通过图 7 所示的硬件电路和 DSP 的计算程序得到实现, 并且可以应用到高压电器试验检测回路。

该系统主要包括电源电路、电流检测电路、输入控制信号调理电路、硬件看门狗电路、输出电路及液晶显示电路。由高性能 DSP 实现系统的控制, AC/220V 通过 EMI 滤波等抗干扰设计后, 输入到 AC/DC 模块得到系统所需要的电源。系统上电后, 可以通过键盘和液晶设置触发时间。罗氏线圈检测

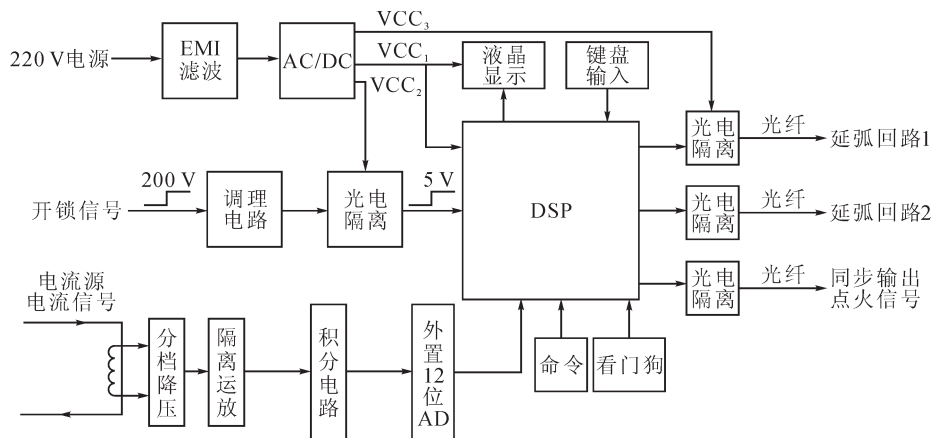


图7 硬件电路图

Fig. 7 The hardware circuit diagram

合成回路的电流信号,经过分档降压电路、信号积分调理电路送至DSP处理,通过DSP计算电流信号可得到过零时刻。

DSP添加看门狗电路增加程序可靠性,检测到输入控制信号后,通过软件编程实现系统要求的信号输出,确保球隙在恰当时刻点火,从而接通电压源回路和延弧回路等。

4.2 在合成回路中的应用效果

按照上文中的所提电流零点预测方法及其软硬件实现方式,开发了基于DSP的同步测控系统。将此同步测控系统用于高压电器试验室的合成回路中,检验其应用效果。应用该装置完成试验的典型示波图见图8,图8中 I 为流过被试断路器电流, I_h 为电压源电流, U_r 为被试断路器断口恢复电压。

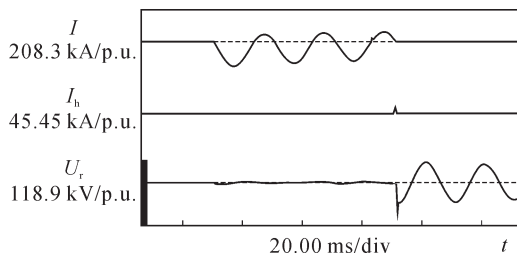


图8 试验波形图

Fig. 8 Test waveforms

设定的延弧回路零前时间 $150 \mu s$, 高压回路零前时间 $600 \mu s$, $\tau=400 \mu s$ 。实测延弧回路零前时间 $162 \mu s$, 高压回路的零前时间为 $623 \mu s$, $\tau=377 \mu s$ 。延弧回路的时间误差为 $12 \mu s$, 高压回路的时间误差为 $23 \mu s$ 。完全满足合成试验和相关标准要求。

5 结语

笔者对于合成试验中预测短路电流零点的方法进行了研究,分析了这种方法的误差来源及其影响,通过软件程序和硬件电路的设计,将这种方法

成功的应用到合成试验回路中。经过试验的验证,能够满足合成试验和相关标准要求,具备工业化运行的条件,证明这种预测短路电流零点的方法是可行的,具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] IEC 62271-101—2012 High-voltage switchgear and controlgear — Part 101: Synthetic testing[S]. 2012.
- [2] IEC 62271-100—2008. High-voltage switchgear and controlgear—Part 100: Alternating-current circuit-breakers[S]. 2008.
- [3] GB/T 4473—2008 交流高压断路器的合成试验[S]. 2008. GB/T 4473—2008 Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers[S]. 2008.
- [4] GB 1984—2003 高压交流断路器[S]. 2003. GB 1984—2003 High-voltage alternating-current circuit-breakers[S]. 2003.
- [5] SHENG B L. Design consideration of weil-dobke synthetic testing circuit for the interrupting testing of HVAC circuit breakers[C]//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. [S.l.]: IEEE, 2001: 295-299.
- [6] DAIGNEAULT G, JEAN GS T, LANDRY M. Comparing direct and synthetic tests for interruption of line-charging capacitive current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(3): 9-14.
- [7] SHENG B L, SLUIS L. Comparison of synthetic test circuits for ultra-high-voltage circuit breakers[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1996, 21(11): 227-231.
- [8] ISOZAKI M, HIKOSAKA T, HATAKEYAMA Y, et al. Advanced closing switch for three-phase short-circuit test of a very fast current limiter[J]. Electrical Engineering in Japan, 2000, 130(1): 68-75.
- [9] DUFOURNET D, MONTILLET G. Three-phase short circuit testing of high-voltage circuit breakers using synthetic

- circuits[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000, 15(1): 142-147.
- [10] JEANAND G S, WANG R F. Equip valence between direction and synthetic short-circuit interception tests on HV circuit breaker [J]. IEEE, 1983, PAS-102(7): 2216-2223.
- [11] KUFFEL J, LAWTON R. Dynamic performanee of digital recorder used for mornitoring HV tests[J]. Seminar IREQ, 1987, 12(3): 28-33.
- [12] 马少华, 车 焕. 基于算术递推法的短路电流零点预测方法的 FPGA 实现[C]//第一届电器装备及其智能化学术会议论文集, 西安: [s.n.], 2007: 407-412.
- MA Shaohua, CHE Huan. Zero point of shot-circuit current forecast based on arithmetic recursion with FPGA[C]//The First Electrical Equipment and Intelligent of Conference Proceedings Chinese Electrotechnical Society. Xi'an: [s.n.], 2007: 407-412.
- [13] 蔡志远, 陈 娜, 王尔智. 合成试验回路的电流源电流零点预测[J]. 沈阳工业大学学报, 2003, 25(1): 47-50.
- CAI Zhiyuan, CHEN Na, WANG Erzhi. Zero crossing forecast of synthesize test circuit[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2003, 25(1): 47-50.
- [14] 杨海芳, 李 炜, 吴盛刚. 合成试验的同步控制及其误差分析[J]. 高压电器, 2005, 41(4): 273-275.
- YANG Haifang, LI Hui, WU Chenggang. Synchronization control and error analysis for synthetic test[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 273-275.
- [15] 蔡志远, 戈阳阳, 马少华. 合成试验数字化同步控制方法的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 521-523.
- CAI Zhiyuan, GE Yangyang, MA Shaohua. Digitized synchronous control method for synthetic test[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 521-523.
- [16] SLUIS L, LINDEN W A. A three-phase synthetic testcircuit for metal-enclosed circuit-breakers[J]. IEEE Trans. on Power Engineering Review, 1987, PER-7(7): 5-54.
- [17] BRAUN A, HUBER H. Testing circuit-breakers by synthetic methods[J]. Brown Boveri Review, 1973, 60(4): 185-190.
- [18] 李庆余, 李玉春, 杨海芳, 等. 合成试验的延弧回路设计及延弧效能研究[J]. 华通技术, 2006, 25(2): 11-15.
- LI Qingyu, LI Yuchun, YANG Haifang, et al. Arc prolong circuit design and arc prolong efficiency study in synthetic test[J]. Huatong Technology, 2006, 25(2): 11-15.
- [19] 张可畏, 王 宁, 段雄英, 等. 用于电子式电流互感器的数字积分器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 104-107.
- ZHANG Kewei, WANG Ning, DUAN Xiongying, et al. A digital integrator for electronic current transducer[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004, 24(12): 104-107.
- [20] 高迎霞, 毕卫红, 刘 丰, 等. 基于 Rogowski 线圈的电流互感器信号处理中积分算法的研究[J]. 电测与仪表, 2006, 491(11): 1-5.
- GAO Yingxia, BI Weihong, LIU Feng, et al. The research of the integral arithmetic in signal processing for rogowski current transducer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 491(11): 1-5.
- 李 鹏(1956—), 男, 大专, 高级工程师, 主要从事高压电器检测、研究和本专业标准的制修订工作。
- 高 飞(1979—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高压电器检测及相关研究工作。
- 刘 朴(1962—), 男, 大专, 高级工程师, 主要从事高压电器检测及相关研究工作。
- 刘 平(1978—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高压电器检测及相关研究工作。