



低压电器短路试验功率因数的三极值点测量法

李洪亮, 窦慧

(山东省产品质量检验研究院, 山东 济南 250102)

摘要: 针对低压电器短路耐受强度试验中, 短时大电流试验条件下测量功率因数一直没有简便而准确方法的问题, 该文通过理论分析短路电流波形特性, 得出试验回路时间常数与短路电流波形前3个半波电流极值点之间的时间差具有唯一对应关系, 从而提出一种全新的功率因数测量方法——三极值点法, 该方法不依赖于电压测量值或电流测量值大小, 不需要特定的试验设备或测量设备, 只需要测量短路电流波形前3个半波极值点之间的时间差和周期分量的频率, 带入非线性方程中, 通过求解非线性方程即可准确计算出功率因数。结合理论分析和仿真验证, 表明三极值点法可简单准确地测量短路试验中的功率因数。

关键词: 功率因数; 低压电器; 短路试验; 三极值点法

中图分类号: TB921

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)08-0026-06

Three extreme point measuring method for low voltage electrical short circuit test

LI Hongliang, DOU Hui

(Shandong Product Quality Inspection Research Institute, Ji'nan 250102, China)

Abstract: In the short-circuit withstand test of low voltage electrical apparatus, there has not been a simple, exact method to measure power factor under the condition of short time large current test. By theoretically analyzing the characteristic of short circuit current waveform, this paper concludes that time constant of test loop correlates well with the time difference between the first three half-wave current extreme points in the short circuit current waveform, and then presents a new power factor measurement method called three extreme point method. This method neither depends on measurement value of voltage or current measurement value nor depends on a specific test equipment or measuring equipment. It only needs to measure either the time difference among the first three half-wave current extreme points or the frequency of the periodic component. Then, in a non-linear equation, the power factor can be accurately calculated by solving the nonlinear equation. Through theoretical analysis and simulation verification, it is proved that this method is easy and effective to measure the power factor in a short circuit test.

Keywords: power factor; low voltage electrical; short circuit test; three extreme point method

收稿日期: 2018-04-02; 收到修改稿日期: 2018-05-11

基金项目: 2017年度山东省质量技术监督局科技计划项目(2017KY06Z06)

作者简介: 李洪亮(1979-), 男, 山东济南市人, 工程师, 硕士, 主要从事低压电器检测、质检信息化等方面的研究。

0 引言

在进行低压电器的短路耐受强度试验^[1]时,功率因数是试验必须满足的一个参数,必须调整到规定值的允许偏差范围内^[2],而短路试验功率因数测量的主要困难在于短路电流较大,且持续时间较短情况下的功率因数的准确测量,当前,国家标准 GB 13539.1-2015《低压熔断器 第1部分:基本要求》^[3]中也提到“没有哪种方法能精确地测量短路功率因数”,对应的最新国际标准 IEC/EN 60269-1:2014^[4-5]中也未提出新的测量方法。

IEEE Std C37.26-2014^[6]给出了3种测量方法:比例法、直流衰减法和相位关系法。结合 GB 14048.1-2012《低压开关设备和控制设备 第1部分 总则》^[7]和 GB 13539.1-2015^[3]标准,目前推荐常用的测量功率因数有以下几种测量方法:直流分量法、冲击系数法、相角差法、低压调值法和直读法。这几种方法各有优点,但是或者需要较高性能的试验仪器设备,或者需要高精度专门的测量仪器,使用条件均受到较多限制,并且通常还需要依赖于电压值或电流值的测量精度,所需测量量较多,因而引入误差量较多,给功率因数的准确测量带来较大困难。基于此,本文提出了一种全新的功率因数测量方法——三极值点法,通过原理分析和仿真计算验证,三极值点法的测量结果达到了预期要求,可为低压电器标准制修订及试验人员进行功率因数测量提供参考。

1 常用功率因数测量方法的比较

根据测量原理分类,目前常用的功率因数测量方法主要有5种^[2,8-12],直读法、相角差法(相位关系法、指示发电机法)、低压调值法、冲击系数法、直流分量法(直流衰减法、包络拟合法^[13])等。

1.1 直读法

直读法需要直接将测量仪表(如功率因数表、电压表、电流表)接入试验回路中^[14],对回路功率因数进行直接测量,但其测量电流一般在10 A以下,难以运用到大电流试验中^[15]。

1.2 相角差法

相角差法是在低压侧同时测量空载电压波形和负载电流波形^[11],其空载电压和负载电流的相位差即功率因数角,求余弦值即可求得功率因数。由于该方法未计入前级电网阻抗,所测得的功率因数不是全电路功率因数,存在先天性引入误差。测量原理是在短路电流示波图上同时测量电压、电流波

形,低压侧需配置一高性能断路器或选相开关作为合闸开关,而大电流短路试验条件下^[16],短路电流一般会达到几十千安甚至几百千安,对合闸开关要求极高,当前断路器或选相开关性能还不满足这种极高短路电流强度要求^[17]。因此相角差法无法应用到大电流试验中。同原理的指示发电机法则需要有一指示发电机与试验发电机同轴运行,受设备及试验条件限制,实用性不高。

1.3 低压调值法

低压调值法是在变压器高压侧施加一低电压进行低压调值测量,然后在低压侧用直读法或相角差法测量功率因数。但该方法测量的功率因数未考虑前级电网阻抗^[18],如想准确测量,必须将前级电网的阻抗制作成实物串进调值电路中^[19]。由于实际试验时电压电流较大,阻抗变化也较大^[20],该方法也难以模拟实际回路的阻抗,测量误差较大,且在高压侧调值操作流程复杂,效率较低。

1.4 冲击系数法

冲击系数法需要在回路中配备选相合闸开关,用选相开关选取电压过零瞬间合闸,以产生第一个半波最大峰值电流 i_m 和周期分量(即稳态分量)峰值 I_m ,计算第一半波峰值系数 $k = i_m/I_m$,然后根据 k 与功率因数的单位关系查表得出回路功率因数^[16,21]。理论上该方法较为准确,但是受到选相开关限制^[22],设备投入较大,且大电流试验下,对选相开关要求更高,一般很难应用到频繁的大电流短路强度试验中。另一方面选相开关的选相精度以及峰值电流测量精度将直接影响功率因数的测量精度^[12]。而在功率因数大于0.35时,准确度较低,不再适用。

1.5 直流分量法

直流分量法是基于电路闭合初始过程中由于回路中电感的存在,电流呈现不对称性,预期电流由周期分量和直流分量两部分构成的原理^[23]。通过测量直流分量上任意两点的电流值和这两点之间的时间差,根据公式可求得回路时间常数和功率因数。此外还有其他学者提出的直流衰减法^[2,9]、零值电流时间法^[18,23]、峰值电流时间法^[18,24]、面积峰值比法^[18]以及包络拟合法^[13,25]都是直流分量法的补充和引申。但在实际试验中很难将直流分量从试验电流中准确测量分离出来,并且由于电压值、电流值测量误差的引入,给准确测量带来较大困难,此类方法测量误差也较大,而且也要求电压值、电流值的测

量具有极高的精度,对测量设备精度具有较高的要求。

2 功率因数的三极值点测量方法

通过分析低压电器短路试验的原理^[1,26]和短路电流波形特性,发现短路电流前3个半波电流的极值点之间的时间差 Δt_1 、 Δt_2 和周期分量的频率 f 与试验回路时间常数 T 满足下列关系:

$$\sin(2\pi f \Delta t_2 - 2\pi f \Delta t_1) = \sin(2\pi f \Delta t_2) \cdot e^{-\frac{\Delta t_1}{T}} - \sin(2\pi f \Delta t_1) \cdot e^{-\frac{\Delta t_2}{T}} \quad (1)$$

因此,只需要在短路电流波形上测量 Δt_1 、 Δt_2 和 f ,通过求解该非线性方程中时间常数 T 值,带入试验回路时间常数 T 与功率因数 $\cos \phi$ 对应关系式:

$$\cos \phi = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f T)^2}} \quad (2)$$

即可准确求解出回路功率因数。

2.1 低压电器短路试验原理

典型的低压电器短路耐受强度试验原理图,如图1所示。

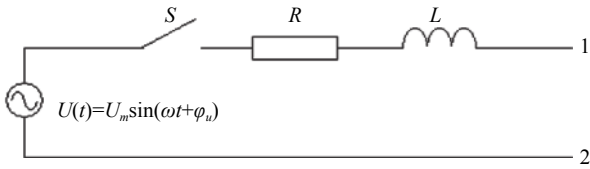


图1 低压电器短路耐受强度试验原理图

该线路由1端、 L 、 R 、 S 、 $U(t)$ 和2端串接而成,其中: $U(t) = U_m \sin(\omega t + \phi_u)$, S 为合闸开关, R 为回路中电阻,也表示其阻值大小为 R , L 为回路中电感,也表示其电感值大小为 L , $U(t)$ 为试验电压源,也表示 t 时刻其电压大小为 $U(t)$, U_m 为电压源峰值大小, $\omega = 2\pi f$, f 为电压源频率, ω 为电流周期分量角频率, ϕ_u 为合闸开关 S 合闸时电压角, $T = L/R$ 为试验回路时间常数。

预期电流试验时1、2端短接,短路试验时1、2端接试品,低压电器短路试验时,需要测量的功率因数就是当1、2端短接时,回路中预期短路电流的功率因数。

假设预期电流试验时,线路中 t 时刻电流大小为 $i(t)$,则试验线路的微分方程为

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = U_m \sin(\omega t + \phi_u) \quad (3)$$

其解为:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi_u - \phi) - I_m \sin(\phi_u - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad (4)$$

其中: I_m 为试验时回路电流峰值大小, $\phi = \arctan(\omega L/R) = \arctan(2\pi f L/R)$ 为试验回路功率因数角。

2.2 时间常数 T 与三极值点时间差 Δt_1 、 Δt_2 和频率 f 的关系

从式(2)看,试验回路中 R 、 L 是常数,故 ϕ 也是常数,因此 $i(t)$ 是 ϕ_u 、 t 的二元函数,试验时合闸开关 S 在 ϕ_u 角度合闸,因此合闸后 ϕ_u 也是常数,故预期短路电流试验时 $i(t)$ 仅仅是试验时间 t 的一元函数。当1、2端短接,开关 S 合闸后,预期短路电流示波图如图2所示。其中: t_1 、 t_2 、 t_3 分别为预期短路电流示波图前3个半波极值点的时间。

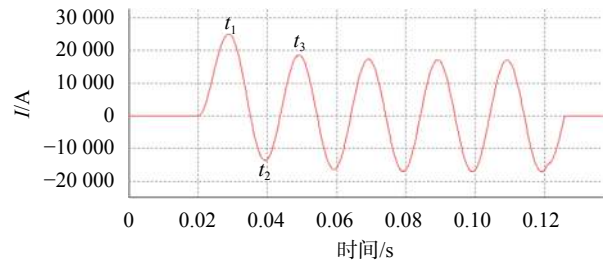


图2 预期短路电流示波图

从图预期示波图上看, $i(t)$ 在 t_1 、 t_2 、 t_3 3点均取得极值,则有:

$$\begin{cases} i'(t_1) = 0 \\ i'(t_2) = 0 \\ i'(t_3) = 0 \end{cases}$$

从而有:

$$\begin{cases} \omega I_m \cos(\omega t_1 + \phi_u - \phi) + I_m \frac{R}{L} \sin(\phi_u - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t_1} = 0 \\ \omega I_m \cos(\omega t_2 + \phi_u - \phi) + I_m \frac{R}{L} \sin(\phi_u - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t_2} = 0 \\ \omega I_m \cos(\omega t_3 + \phi_u - \phi) + I_m \frac{R}{L} \sin(\phi_u - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t_3} = 0 \end{cases}$$

即:

$$\cos(\omega t_1 + \phi_u - \phi) = -\frac{R}{\omega L} \sin(\phi_u - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t_1} \quad (5)$$

$$\cos(\omega t_2 + \phi_u - \phi) = -\frac{R}{\omega L} \sin(\phi_u - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t_2} \quad (6)$$

$$\cos(\omega t_3 + \phi_u - \phi) = -\frac{R}{\omega L} \sin(\phi_u - \phi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t_3} \quad (7)$$

设 $\Delta t_1 = t_2 - t_1$ 、 $\Delta t_2 = t_3 - t_1$ 、 $\theta = \phi_u - \phi$,带入式(3)、式(4)、式(5),则有:

$$\cos(\omega t_1 + \theta) = -\frac{R}{\omega L} \sin \theta \cdot e^{-\frac{R}{L}t_1} \quad (8)$$

$$\cos(\omega t_1 + \theta + \omega \Delta t_1) = -\frac{R}{\omega L} \sin \theta \cdot e^{-\frac{R}{L}t_2} \quad (9)$$

$$\cos(\omega t_1 + \theta + \omega \Delta t_2) = -\frac{R}{\omega L} \sin \theta \cdot e^{-\frac{R}{L}t_3} \quad (10)$$

公式(7)、(8)左侧展开,则有:

$$\cos(\omega t_1 + \theta) = -\frac{R}{\omega L} \sin \theta \cdot e^{-\frac{R}{L} t_1} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \cos(\omega t_1 + \theta) \cdot \cos(\omega \Delta t_1) - \sin(\omega t_1 + \theta) \cdot \sin(\omega \Delta t_1) = \\ -\frac{R}{\omega L} \sin \theta \cdot e^{-\frac{R}{L} t_2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \cos(\omega t_1 + \theta) \cdot \cos(\omega \Delta t_2) - \sin(\omega t_1 + \theta) \cdot \sin(\omega \Delta t_2) = \\ -\frac{R}{\omega L} \sin \theta \cdot e^{-\frac{R}{L} t_3} \end{aligned} \quad (13)$$

由式(10)/式(9)、式(11)/式(9)可得:

$$\frac{\cos(\omega t_1 + \theta) \cdot \cos(\omega \Delta t_1) - \sin(\omega t_1 + \theta) \cdot \sin(\omega \Delta t_1)}{\cos(\omega t_1 + \theta)} = e^{-\frac{R}{L} \Delta t_1} \quad (14)$$

$$\frac{\cos(\omega t_1 + \theta) \cdot \cos(\omega \Delta t_2) - \sin(\omega t_1 + \theta) \cdot \sin(\omega \Delta t_2)}{\cos(\omega t_1 + \theta)} = e^{-\frac{R}{L} \Delta t_2} \quad (15)$$

通过化简可得:

$$\cos(\omega \Delta t_1) - \tan(\omega t_1 + \theta) \cdot \sin(\omega \Delta t_1) = e^{-\frac{R}{L} \Delta t_1} \quad (16)$$

$$\cos(\omega \Delta t_2) - \tan(\omega t_1 + \theta) \cdot \sin(\omega \Delta t_2) = e^{-\frac{R}{L} \Delta t_2} \quad (17)$$

由式(14)、式(15)化简约掉 $\tan(\omega t_1 + \theta)$,并带入 $\omega = 2\pi f$ 、 $T = L/R$,可得:

$$\sin(2\pi f \Delta t_2 - 2\pi f \Delta t_1) = \sin(2\pi f \Delta t_2) \cdot e^{-\frac{\Delta t_1}{T}} - \sin(2\pi f \Delta t_1) \cdot e^{-\frac{\Delta t_2}{T}} \quad (18)$$

2.3 短路电流示波图上 Δt_1 、 Δt_2 和 f 的测量

通过观察图2所示示波图,在该预期电流示波图上,可非常容易的准确测量得到前3个半波峰值点之间的时间差 Δt_1 、 Δt_2 ,在短路试验时,直流分量为暂态分量,一般经过5个周波即可衰减至可忽略大小,而预期短路电流试验一般持续10个周波以上,所以通过测量短路电流波形7个周波以后的频率即为周期分量频率 f ,并且通过适当的平滑处理短路电流示波图,还可进一步提高这3个测量值的测量精度,从而一定程度上降低对电流测量设备精度的要求。

2.4 用Matlab进行非线性方程求解来计算功率因数

将测量得到的 Δt_1 、 Δt_2 和 f 带入式(16),使用Matlab进行非线性方程求解,即可求得试验回路时间常数 T ,然后根据试验回路时间常数 T 与功率因数 $\cos \phi$ 的对应关系式,即可简单、准确地测量并计算得到试验回路的功率因数。

该方法优势是测量过程中,与电压值、电流值大小无关,仅仅与前3个半波电流的极值点之间的

时间差 Δt_1 、 Δt_2 和周期分量的频率 f 有关,还可通过对电流波形进行平滑处理,进一步提高测量值的准确性。相比其他方法,不但测量方法简单,而且不需要特定的试验设备或测量设备,所需测量量也最少,因此引入的不确定度因子也最少,测量误差能尽可能得到规避,因而测量精度也较高。

3 仿真计算

3.1 仿真原理

由于在实际短路试验时,难以确定真实的回路阻抗,因而也难以确定真实的功率因数,很难进行真实准确的对比,因此使用PSIM仿真程序来验证测量方法的准确性,并分别对比三极值点法、相角差法和冲击系数法各自的测量误差,PSIM仿真线路图如图3所示。

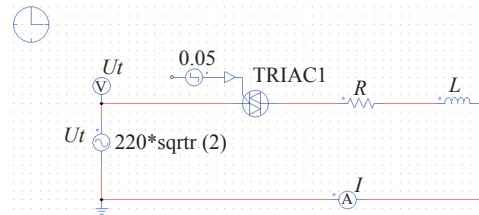


图3 PSIM仿真线路图

其中 U_t 为试验电压源,设 $U_t = 220\sqrt{2}\sin(100\pi t)$,电压频率 $f = 50$ Hz。

为了在每次仿真中同时实现三极值点法、相角差法和冲击系数法求解功率因数,以实现相同条件下的误差对比,这里TRIAC1为选相合闸开关,并设置合闸时电压角为 0° ,并忽略前级电网阻抗(因此本实例中相角差法求得的功率因数误差比实际中要小)。基于安全及节约能源考虑,实际短路试验中预期波试验通电时间一般在0.2~0.3 s间,因此仿真中设置通电时间为0.3s,仿真步长 1×10^{-6} s。并以大电流短路耐受强度试验中较为常用到的5个典型的 $\cos \phi$ 值为参考分别进行5次仿真实验。在仿真中,首先输入电压值 U_t 、电阻值 R 、电感值 L 和合闸角 0° ,由时间常数 $T = L/R$ 可得到理论 $\cos \phi$ 值,然后由PSIM仿真出短路电压、电流波形,并在电压、电流波形上分别使用三极值点法、相角差法、冲击系数法测量求解功率因数,通过 $\cos \phi$ 的理论值和3种方法仿真测量值的比较来验证三极值点法的有效性,并进行3种方法的误差对比。仿真电压、电流波形如图4所示。

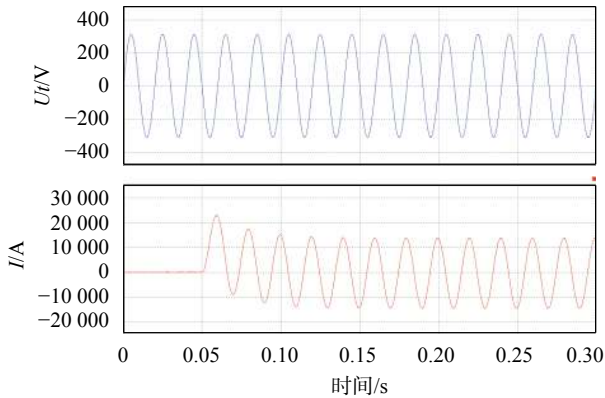


图4 预期电压、电流波形仿真图

3.2 实例测算

3.2.1 三极值点法

在仿真得到的短路电流波形上分别测量 Δt_1 、 Δt_2 、 f ，带入非线性方程(16)后，用 Matlab 可求解得

出 T ，最后计算出仿真测量 $\cos\phi$ 值，实验结果如表1所示。

3.2.2 相角差法

在仿真得到的短路电压波形上，取合闸时刻前一个电压波峰为空载电压测量点 T_u ，取负载电流最后一个波峰为负载电流测量点 T_i ，由相角差原理即可计算出仿真测量 $\cos\phi$ 值，实验结果如表2所示(由于本例中忽略了前级电网阻抗，因此实际误差还要偏大些)。

3.2.3 冲击系数法

在仿真得到的短路电流波形上测量第一个半波最大峰值电流 i_m 和周期分量(即稳态分量)峰值 I_m ，计算第一半波峰值系数 $k = i_m/I_m$ ，然后根据 k 与 $\cos\phi$ 的单位关系查表得出回路 $\cos\phi$ ^[18-19]，实验结果如表3所示。

表1 典型功率因数条件下三极值点法仿真结果

序号	$\cos\phi$ 理论值	f 理论值/Hz	$R/m\Omega$	L/mH	$\Delta t_1/ms$	$\Delta t_2/ms$	f 测量值/Hz	$\cos\phi$ 测量值	$\cos\phi$ 误差
1	0.150	50	3.3	0.069 23	0.010 496	0.020 192	50	0.150 92	0.000 92
2	0.200	50	4.4	0.068 60	0.010 542	0.020 262	50	0.200 39	0.000 39
3	0.250	50	5.5	0.067 80	0.010 556	0.020 316	50	0.250 55	0.000 55
4	0.300	50	6.6	0.066 80	0.010 552	0.020 354	50	0.300 20	0.000 20
5	0.500	50	11	0.060 65	0.010 432	0.020 366	50	0.499 40	-0.000 60

表2 典型功率因数条件下相角差法仿真结果

序号	$\cos\phi$ 理论值	f/Hz	$R/m\Omega$	L/mH	$T_i - T_u/ms$	$\cos\phi$ 测量值	$\cos\phi$ 误差
1	0.150	50	3.3	0.069 23	234.520	0.150 23	0.000 23
2	0.200	50	4.4	0.068 60	234.358	0.200 33	0.000 33
3	0.250	50	5.5	0.067 80	234.194	0.250 52	0.000 52
4	0.300	50	6.6	0.066 80	234.028	0.300 64	0.000 64
5	0.500	50	11	0.060 65	233.332	0.500 36	0.000 36

表3 典型功率因数条件下冲击系数法仿真结果

序号	$\cos\phi$ 理论值	K 理论值	$R/m\Omega$	L/mH	i_m/kA	I_m/kA	K 测量值	$\cos\phi$ 查表值	$\cos\phi$ 误差
1	0.150	1.633	3.3	0.069 23	23.076	14.142	1.632	0.150	<0.01
2	0.200	1.544	4.4	0.068 60	21.822	14.143	1.543	0.200	<0.01
3	0.250	1.467	5.5	0.067 80	20.728	14.141	1.466	0.250	<0.01
4	0.300	1.399	6.6	0.066 80	19.771	14.141	1.398	0.300	<0.01
5	0.500	1.198	11	0.060 65	16.927	14.138	1.197	0.500	<0.01

3.3 结果分析

通过在相同短路试验条件下,分别用三极值点法、相角差法、冲击系数法来进行功率因数的测量,参考CB测试要求的最新CTL决议IECEE OD-5014^[27],电压在频率 $f = 50$ Hz时,要求功率因数测量范围的仪器精确度为 ± 0.05 ,对比3种方法的 $\cos\phi$ 仿真测量结果,由误差栏可知,3种方法均可以达到测量结果的精度要求。

实际测量时,由于相角差法没有计入前级电网阻抗,冲击系数法则需要依赖选相开关和两个峰值电流的测量精度,这些因素将直接影响功率因数的测量精度,而三极值点法不再依赖于电压测量值、电流测量值大小,减小了误差来源,且不需要选相开关、高性能断路器等专门的试验设备或高精度测量设备,测量方法简单、准确可靠。

4 结束语

本文总结了国内国外目前在低压电器短路耐受强度试验时功率因数的常用测量方法,分析每种方法的测量原理和优缺点,在此基础上提出了一种全新的功率因数测量方法——三极值点法,三极值点法测量方法简单,不需要特定的试验设备、测量设备,所需测量量也最少,且不再依赖于测量过程中电压、电流测量值大小,特别在上百千安及以上极高短路电流下将更具有硬件设备投资少、测量方法简单、准确可靠等优势。通过仿真计算表明,测量误差较小,测量精度较高,对于低压电器标准制修订及试验人员功率因数测量具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 低压成套开关设备和控制设备: GB 7251.1-2013[S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
- [2] 吴毅, 陈坚, 吴明晴, 等. 改进的低压电器短路试验电路功率因数测量方法[J]. 低压电器, 2013(18): 8-11.
- [3] 低压熔断器: GB 13539.1-2015[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015.
- [4] Low-Voltage fuses-Part1: General requirements: IEC 60269-1: 2014[S]. IEC, 2014.
- [5] Low-Voltage fuses-Part1: General requirements: EN 60269-1: 2014[S]. EN, 2014.
- [6] IEEE Guide for methods of Power-Factor Measurement for Low-Voltage (1000V AC or lower) Inductive Test Circuits: IEEE Std C37.26-2014[S]. IEEE, 2014.
- [7] 低压开关设备和控制设备: GB 14048.1-2012[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
- [8] 高士阳. 低压电器交流通断能力试验回路功率因数测量问题的探讨[J]. 低压电器技术情报, 1981(4): 14-20.
- [9] 杨祥, 蒋凡. 低压大电流短路试验系统功率因数测量方法探讨[J]. 电器与能效管理技术, 2014(17): 26-31.
- [10] 姜丽莹, 张羽. 短路试验功率因数的测量方法探讨[J]. 电气开关, 2014(3): 8-9, 13.
- [11] 姜学娟. 低压电器试验短路功率因数的测量[J]. 科技信息, 2013(4): 473.
- [12] 陆俭国, 杨乐玉. 试验电路功率因数测量方法的分析[J]. 河北工学院学报, 1980(4): 27-43.
- [13] 庞琳, 陈建兵, 王爱国. 包络拟合法在求取功率因数中的应用[J]. 低压电器, 2007(23): 53-55.
- [14] 张伟, 梁志成, 李文举. 低压电器大电流短路试验装置问题探讨[J]. 计量与测试技术, 2010(9): 60-61, 63.
- [15] 刘怡. 短路试验参数对断路器试验的影响[J]. 低压电器, 2009(9): 12-15.
- [16] 姚珍芝. 用冲击系数法测低压感性试验电路的功率因数[J]. 低压电器技术情报, 1980(5): 16-22.
- [17] 黄小雷. 低压电器短路通断试验系统建设中的技术问题[J]. 江苏电器, 2005(4): 41-43.
- [18] 吴毅. 基于电子开关的新型短路试验装置的输出特性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [19] 陆俭国. 低压电器的试验与检测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [20] 鄢来君, 刘晓军, 莫桂华. 短路试验数据采集与处理系统[J]. 低压电器, 2000(3): 40-42.
- [21] High-current test techniques-definitions and requirements for test currents and measuring systems: IEC 62475-2010[S]. IEC, 2010.
- [22] 赵承荣. 交流试验回路的电感和功率因数测量[J]. 低压电器, 2001(2): 57.
- [23] 董宿儒. 一种测量试验回路 $\cos\phi$ 值的方法——零值电流时间法[J]. 机床电器, 1994(3): 13-15.
- [24] 董宿儒. 一种新的测量试验回路 $\cos\phi$ 值的方法——峰值电流时间法[J]. 上海电器技术, 1991(4): 13-16.
- [25] 鄢来君, 刘晓军. 曲线拟合法测动热稳定试验回路的功率因数[J]. 高电压技术, 1999(3): 70-71, 74.
- [26] 申秀珠. IEC出版物282—3第一版1976年高压熔断器——第三部分: 试验限流熔断器、喷逐式及类似熔断器用短路功率因数的测定[J]. 电力电容器与无功补偿, 1981(3): 53-54.
- [27] IEC System of Conformity Assessment Schemes for Electro-technical Equipment and Components (IECEE System) Committee of Testing Laboratories (CTL) Instrument Accuracy Limits: IECEE OD-5014[S]. 2016.

(编辑:刘杨)