

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.07.022

基于瞬态场—路耦合法的特高压自校CT误差特性分析

吴细秀¹, 张圆圆¹, 冯宇², 王欢², 盛况¹, 黄文博¹

(1. 武汉理工大学自动化学院, 武汉 430070; 2. 中国电力科学研究院, 武汉 430074)

摘要: 随着特高压工程的推进, CT现场校验成为亟需解决的难题。由于国内外对此问题研究尚属空白, 为解决该难题, 提出将实验室CT校验用的自校法应用于现场交接试验。在解决了一系列自校法工程应用问题的基础上, 重点针对CT校验误差展开研究。首先分析了具有自校功能CT的结构特征, 并在此基础上根据CT误差定义对其误差特性进行了理论分析; 讨论了影响误差的主要因素; 为计算误差大小, 建立了基于有限元法瞬态场—路耦合CT误差分析模型; 利用该模型分别对CT两种工作模式(测量用和校验用)下的误差进行计算, 并与实际测量结果比较。结果表明: 具有自校功能的CT作测量用及作自校用时的仿真误差及实际测量误差均小于0.1%, 满足特高压CT校验精度要求。

关键词: 特高压CT; 有限元法; 自校; 场—路耦合; 误差分析

Error Characteristics Analysis for UHV Self-calibration CT Using Transient Field-circuit Coupled Analysis Model

WU Xixiu¹, ZHANG Yuanyuan¹, FENG Yu², WANG Huan², SHENG Kuang¹, HUANG Wenbo¹

(1. College of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. China Electric Power Research Institution, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the construction of UHV projects, CT site calibration has become an urgent problem which prevents it further applying. However, there almost no scientific research institution and scholars carry out research on this new problem. To solve this problem, a self-calibration method is proposed for site calibration. Focusing on the most important problem of CT calibration, the calibration error is studied. According to the CT error definition and the structural features of self-calibration CT, the error characteristics and the influencing factors of the self-calibration CT are analyzed, and the transient field-circuit coupled method is proposed to calculate the error. Based on the finite element transient field circuit coupling principle, the field-circuit coupled model is established. Then the errors of two methods are calculated and analyzed. The results show that: the simulation errors and actual measurement errors of CT with two different situations are less than 0.1%. It is up to the accuracy class and it satisfies the UHV CT calibration requirements.

Key words: UHV CT; finite element; self-calibration; field-circuit coupled; error analysis

0 引言

按照计量相关规定, 用于电能计量的电流互感器(current transformer, CT)必须要进行周期性校验^[1-2]。这种周期性校验的结果既是电量结算的依据, 同时也是准确评估电网经济运行的重要依据^[3-4]。在1 000 kV

交流特高压工程中, CT额定运行电流为6 kA。依据规程规定, 若要对CT进行交接校验, 需施加1.2倍额定运行电流, 即7.2 kA的电流^[5-6]。特高压现场很难产生如此高的电流, 此外试验对电源容量要求很高, 且需对测试回路进行无功补偿, 因此在已经投运的晋东南—南阳—荆门试验示范工程、皖电东送工程

以及浙北—福州特高压等工程中,CT的误差特性测试都是在安装之前进行的,安装以及投运之后均未再进行误差试验。

随着特高压工程的推进,在运CT数量不断增加、运行时间不断变长,特高压等级CT误差现场校验问题已成为影响CT可靠运行、阻碍CT发展的主要问题,成为发展特高压CT亟需解决问题。由于该问题是随着特高压发展而出现的新问题,故目前尚未有研究机构对此展开研究。

鉴于此,在国家电网支持下,中国电力科学研究院组织专人立项对此问题开展研究,提出将自校法应用于特高压CT现场校验。由于自校法是一种实验室用校验方法,将其应用于工程实际,需解决一系列工程应用问题。因此具有自校功能的CT在投运前应进行出厂试验,包括:绕组绝缘强度试验、绕组直流电阻测量、匝数检查、铁心完整性及极性检验等常规试验,确保其在投运前满足准确度、运行变差、磁饱和裕度等JJG 313规定的计量性能要求。投运之后即可用自身自校线路进行误差检测试验,大幅降低现场试验难度和实施成本。

在上述研究基础上,文中针对特高压CT交接试验中最重要的校验误差问题,开展利用自校法进行特高压等级CT校验的误差特性及其影响因素的研究。采用瞬态场一路耦合法对具有自校功能的特高压CT两种工作模式(测量用和自校验用)的误差特性进行了计算分析,并与实际测量结果对比。结果表明:仿真与实测两种情况下的测量用比差及自校验用的比差值均小于0.1%,满足特高压0.2S级CT的校验要求。

1 CT自校原理分析

1.1 CT现场校验方法简介

电流互感器的现场校验主要有比较法、低压外推法、负荷外推等方法^[7-10]。比较法即用一台标准互感器与被测试互感器进行误差比较,是目前最成熟的方法,但随着额定电流的增大其在现场交接试验时升流难以实现的局限性也愈加明显;低压外推法即把电流互感器等效为电压互感器来检验,所需电源容量小,但不适用于非线性误差补偿的电流互感器,同时由于其空载感应电势低,准确度受到限制;负荷外推法即将电流升至10%或20%额定电流来推算误差,但进行校验时对内部标准电流互感器实际误差要求较高,对比见表1。

以上3种方法因准确度等级、升流难度等原因在特高压现场校验中均无法大规模应用。

表1 3种方法对比		
Table 1 The comparison of three calibration methods		
方法	优点	缺点
比较法	成熟,应用广	大电流时升流难
低压外推法	所需电源容量小	准确度受限
负荷外推法	抗干扰能力强	对内部标准CT要求高

1.2 CT自校原理

电流互感器的自校方法在JJG 313-2010《电流互感器检定规程》中有完整的表述^[11]。自校即当额定一次电流和额定二次电流相等时(如5/5 A或1/1 A),以一次电流为标准检定二次电流。其误差测试线路见图1。一次和二次极性端相连接,二次非极性端接负荷箱后再接校验仪T_x端。二次电流从二次极性端输入,经校验仪的K、D端至T_x端,再经二次负荷Z,回到二次绕组的非极性端。因此通过校验仪K、D端钮的是二次电流相对于一次电流的差流,即 $\Delta I = I_2 - I_1$ 。自校法不需要标准CT,因此是绝对校准。

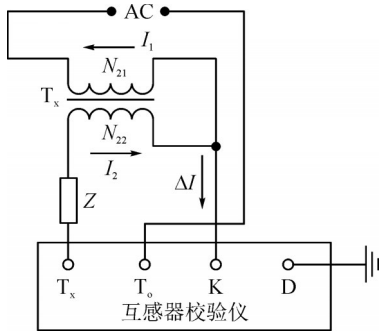


图1 误差自校线路

Fig. 1 The wiring of error self-calibration

2 特高压CT自校误差分析与计算

2.1 具有自校功能的特高压CT结构

在1 000 kV交流特高压工程中,CT主要安装在变压器、电抗器套管处以及GIS(全封闭组合电路)断路器两侧,且均为套管式CT^[12],套管式CT见图2。具有自校功能的特高压CT线圈结构见图3。二次侧由两个匝数均为6 000匝且结构完全相同的绕组构成,双根并绕在铁心上,从而实现同一台电流互感器获得相同电流比的两个二次输出,在二次侧形成1A:1A的自校结构。

具有自校功能的CT的工作原理见图4。 N_1 为一次绕组(母线), N_{21} 为第1个二次绕组, N_{22} 为第2个二次绕组。自校CT有两种工作模式:①测量用:当开关 K_1 和 K_2 同时闭合时,双二次绕组并联,自校CT接入系统处于正常工作状态;②自校用:当 K_1 和 K_2 同时打开时, N_{21} 和 N_{22} 中任意一个作为一次绕

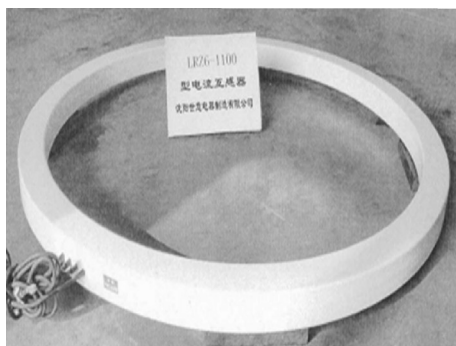


图2 特高压用套管式CT

Fig. 2 The sleeve CT of UHV

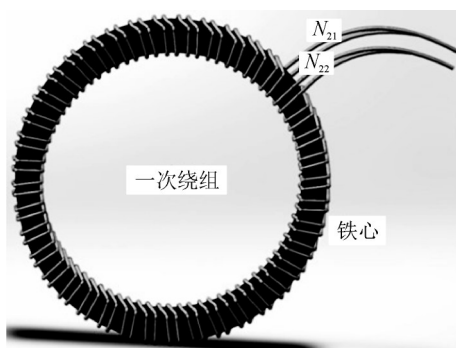


图3 具有自校功能CT绕线方式

Fig. 3 The coiling method of CT

组,另一个作为二次绕组,进行误差自校,校验原理见图1。

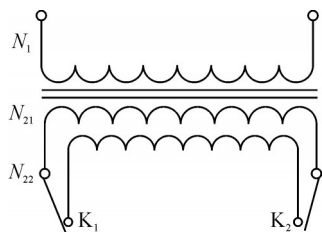


图4 自校CT工作原理图

Fig. 4 The schematic of self-calibration CT

2.2 误差分析

2.2.1 CT误差的定义

励磁电流 I_0 是造成电流互感器误差的主要原因。 I_0 除在铁心中产生磁通外,还会产生铁心损耗,包括涡流损耗和磁滞损耗。由于励磁电流的存在,实际电流与理论折算的等效电流并不相等,为此定义将额定电流比折算到一次侧的二次电流与实际一次电流在数值上的差为电流互感器的误差^[13],即

$$f_i = \frac{I_2 N_2 - I_1 N_1}{I_1 N_1} \times 100\% = \frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: I_1 为一次电流; I_2 为一次侧流过 I_1 时实际测得的二次电流; I_0 为励磁电流; N_1 为一次侧匝数; N_2 为二次侧匝数。

励磁电流 I_0 的大小与二次侧阻抗、铁心磁导率、磁路有关,并且这几个因素相互影响。因此在进行

误差要考虑这几个因素及其相互间的影响。

2.2.2 作测量用时的误差分析

此种工作模式下,具有自校功能的特高压CT接入系统运行作测量用。 N_{21} 与 N_{22} 并联共同作为二次绕组。虽然二次绕组匝数没有改变,但其二次侧阻抗特性发生了改变。此时其初始等效电路见图5。

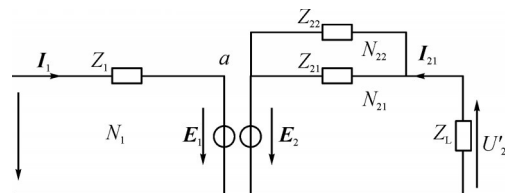


图5 模式一等效电路图

Fig. 5 The equivalent circuit of CT for the measurement work pattern

此工作模式下,具有自校功能CT的误差 f_i 的计算公式与常规CT一样。二次绕组的阻抗值 Z_2 变化为

$$Z_2 = Z_{21} // Z_{22} = 0.5 Z_{21} \quad (2)$$

式(2)中: Z_{21} 为第1个二次侧绕组的阻抗; Z_{22} 为第2个二次侧绕组的阻抗。同样,当负载 Z_L 相对于线圈阻抗值很小时,励磁安匝 $I_0 N_1$ 可以表示为

$$I_0 N_1 = \frac{I_2 (0.5 Z_{21} + Z_L) L_c}{2 \pi f \mu A_c N_2} \quad (3)$$

式(3)中: L_c 为磁路长度; μ 为铁心相对磁导率; A_c 为磁路截面积。将式(3)代入误差公式(1)可知误差为

$$f_i = \frac{I_2 (0.5 Z_{21} + Z_L) L_c}{2 \pi f \mu A_c N_2 I_1 N_1} \approx \frac{(Z_2 + Z_L) L_c}{4 \pi f \mu A_c N_2^2} \quad (4)$$

由式(4)可知:此工作模式下CT误差 f_i 比常规CT误差要小。

2.2.3 作自校用时的误差

此种工作模式下,一次绕组 N_1 断开,将第1个二次绕组 N_{21} 中通1 A电流作为自校时的一次绕组,第2个二次绕组 N_{22} 作为自校时的二次绕组。此时其等效电路见图6。

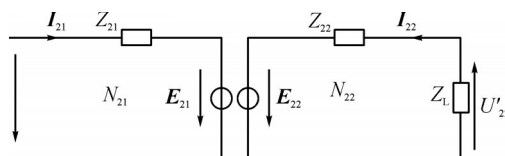


图6 模式二工作时的等效电路图

Fig. 6 The equivalent circuit of CT for the calibration work pattern

此时,误差计算公式为

$$f_i = \frac{I_{22} N_{22} - I_{21} N_{21}}{I_{21} N_{21}} \times 100\% \quad (5)$$

作自校时双二次绕组 N_{21} 与 N_{22} 均缠绕在铁心上, 紧密的绕制使得此状态下 CT 漏磁通减小, 主磁通增大, 相当于铁心的有效截面积增加。考虑磁场对励磁电流的影响, 其误差计算公式为

$$f_i = \frac{I_{22}(Z_{21} + Z_{L1})L_C}{2\pi f \mu A_c N_{22} I_{21} N_{21}} \quad (6)$$

由式(6)可知, 自校时铁心的有效截面积 A_c 增加, 相应误差 f_i 减小。

2.3 基于瞬态场一路耦合的误差计算

2.3.1 计算方法

由前文 CT 误差特性分析可知其影响因素既有表征电路特性的一次电流、二次阻抗等参数, 又有表征磁场特性的相对磁导率、磁路面积等参数。并且电路特性与磁场特性相互影响、相互耦合, 即要计算 CT 误差必须考虑 CT 电路和磁场的耦合特性, 因此需建立场一路耦合模型。

CT 误差计算有几个难题需解决: ①场一路耦合法的具体实现; ②线圈的建模等效问题, 由于二次侧为各 6 000 匝的双二次绕组, 匝数较多, 需考虑其建模等效问题; ③模型的计算处理, 因建立的是三维模型, 匝数较多, 网格剖分数量大。同时采用有限元法进行场计算, 涉及非线性磁场的动态计算。因此, 整个模型的计算比较复杂, 计算量较大。

场路耦合法的实现为电流互感器三维模型按“场”来处理, 进行有限元计算; 同时将其绕组作为元件与外加电流构成电路, 进行电路分析, 其中电流可用感应电势(磁场的函数)和外部电路参数来描述。计算同时受到电磁场变化和外部电路的拓扑约束, 将非线性磁场求解与电路计算通过交替迭代实现场一路耦合, 更符合电流互感器的实际工作原理, 从而保证仿真精度。

对于磁场模型, 采用矢量磁位 $\mathbf{A}$, 由麦克斯韦方程组推导出磁场的控制方程为^[14]

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (7)$$

式(7)中: μ 为相对磁导率; $\mathbf{J}$ 为励磁电流密度。节点 i 的矢量磁位 $\mathbf{A}_i$, 采用标量形状函数 N_i , 则

$$\text{整体 } \mathbf{A} = \sum_{n=1}^{n_s} M_n(x, y, z) \mathbf{A}_n \quad (8)$$

对式(7)应用格林定理, 可得

$$-\iiint_V \nabla M_m \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) dV = \iiint_V M_m \cdot \mathbf{J} dV \quad (9)$$

式(9)中, $\{M_m\}$ 为权函数。将节点元的权函数代入式(9), 求解可得所有节点 $\mathbf{A}$, 进而计算其他场量。

对于电路模型, 电流互感器的磁链方程为

$$\psi = L_s(t, I) I \quad (10)$$

式(10)中, ψ 为绕组磁链, 磁链与励磁电流的关系由电感矩阵 L_s 表示。绕组的感应电动势有 $E = d\psi/dt$, 则由上式可推出 CT 的电路方程为

$$E = \left(\frac{dL_s}{dI} I + L_s \right) \frac{dI}{dt} = L_b(I) \frac{dI}{dt} \quad (11)$$

式(11)中, L_b 动态电感矩阵。

具有自校功能的特高压 CT 双二次绕组匝数过多(6 000×2), 很难建立包括所有绕组的模型。为此, 以磁通密度相等作为等效原则, 即将若干匝绕组等效为一组线圈, 等效后的绕组线圈计算得到的磁通密度应与实际绕组测量的磁通密度相等即为最有效的绕组等效模型。根据此原则测量用时每 2 000 匝可等效为一组模型线圈, 因此 CT 二次绕组为两个三大组线圈。

线圈匝数的等效在一定程度上降低了计算复杂程度。对于三维场一路耦合模型而言, 网格剖分对计算复杂程度有重要影响。为此, 采用不均匀网格划分方法。由于这部分内容不是文中研究的重点, 限于篇幅论文不具体介绍模型的网格剖分、迭代收敛等复杂的计算过程。

2.3.2 计算模型

按照上述方法建立的具有自校功能的特高压 CT 误差计算场一路耦合模型见图 7。主要对比差进行计算。一次侧通入正常工作的工频电流, 二次侧由双二次绕组并联构成, 电阻各为 15.2 Ω。winding2~4 为第 1 组二次绕组 N_{21} ; winding5~7 为第 2 组二次绕组 N_{22} 。其中一、二次绕组在场计算三维模型与外电路模型命名一致, 在有限元软件中连接, 从而达到耦合。相关计算参数见表 2。为使计算结果精确, 考虑铁心材料 1J85 型坡莫合金的各向异性, 将其 $B-H$ 曲线添加到软件材料库中, 曲线见图 8。

3 计算结果分析

3.1 作测量时的误差结果

全部模型在专用服务器上(16 线程, 128G 内存, 志强 5 处理器)经过长时间运算, 最终得到不同条件下的运算结果。

双二次绕组并联 CT 作测量用时, 一次侧通入额定工作点(100% I_N , 即有效值 6 000 A)的工频电流。其铁心磁场分布见图 9。电流结果见图 10。半个周

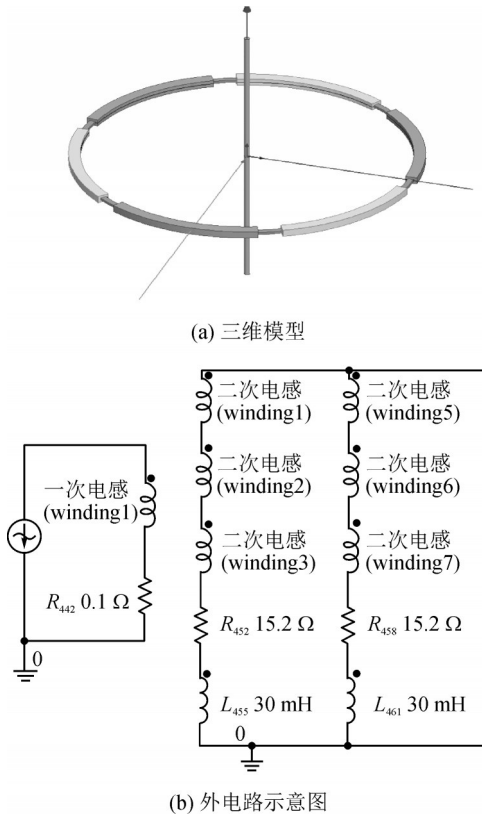


图7 具有自校功能CT场—路耦合模型

Fig. 7 The field-circuit coupled model of self-calibration CT

表2 模型参数

Table 2 The parameters of CT model

名称	材料	尺寸/mm
铁心	坡莫合金	内径120,外径180,厚度10
一次绕组	铝	直径为10
二次绕组	铜	各等效为3组线圈,每组2000匝

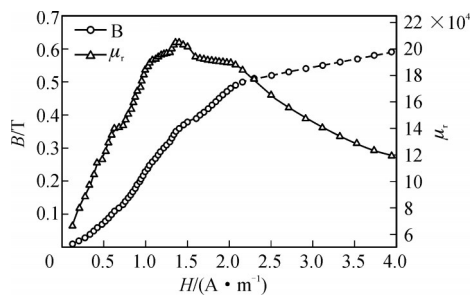


图8 坡莫合金的B-H及μ-H曲线

Fig. 8 The B-H and μ-H curve of permalloy

期内不同时刻的电流值见表3。5 ms时刻为电流峰值。由计算结果可知二次侧的电流峰值为1 413.69 mA,根据工频条件下峰值为有效值 $\sqrt{2}$ 倍的关系计算得二次侧输出电流有效值 I_2 为999.78 mA。一次电流 I_1 为6 000 A,将结果代入电流误差计算公式计算可知比差为

$$f_{i_1} = \frac{I_2 N_2 - I_1 N_1}{I_1 N_1} \times 100\% = -0.022\% \quad (12)$$

结果整理见表4。

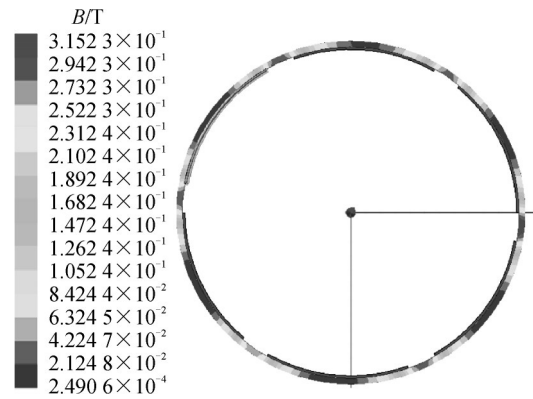
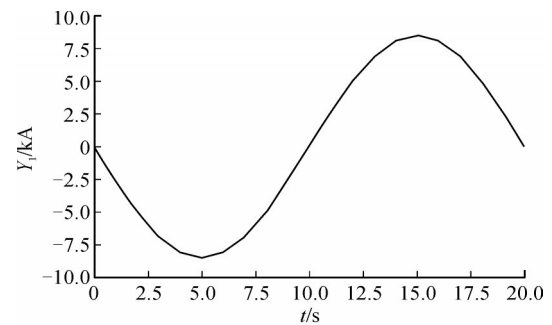
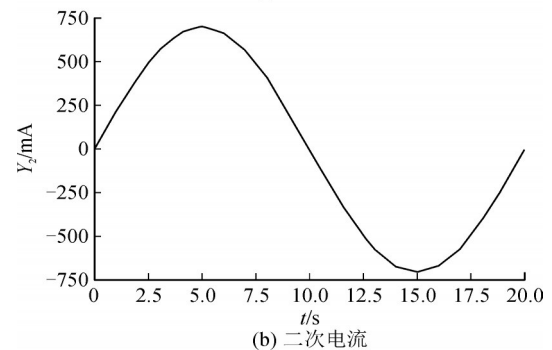


图9 作测量时铁心磁场分布云图

Fig. 9 Magnetic field distribution of CT core with measuring pattern



(a) 一次电流



(b) 二次电流

图10 作测量时一、二次电流曲线图

Fig.10 Current variation of CT with measuring pattern

表3 测量用时不同时刻仿真电流值

Table 3 Current variation of CT with measuring pattern

时间/ ms	一次电 流/kA	二次电 流/mA	时间/ ms	一次电 流/kA	二次电 流/mA
0	0.000	0.000	6	-8.069	1 344.460
1	-2.622	436.820	7	-6.864	1 143.600
2	-4.987	830.890	8	-4.987	830.780
3	-6.864	1 143.700	9	-2.622	436.620
4	-8.069	1 344.510	10	0.000	-0.295
5	-8.484	1 413.690	11	2.622	-437.200

3.2 作自校时的误差结果

此种工作状态下,绕组 N_{21} 作为一次绕组并通入有效值为1 A的正弦电流,绕组 N_{22} 即为二次绕组。因通入电流为1 A,远小于作测量用时加载的6 kA

表4 作测量时的仿真误差结果

Table 4 The error result of CT with measuring pattern

绕组	匝数	电流峰值/mA	电流有效值/mA	误差/%
一次绕组 N_1	1	8 484.00 A	6 000 000.00	-0.022
二次绕组 N_2	6 000	1 413.69 mA	999.78	

电流,为了更精确的分析误差,将双二次绕组各等效为12组,每组500匝,均匀缠绕在铁心上。模型见图11。其中深色为自校时的一次绕组 N_{21} ,在外电路中为winding2~13;浅色为二次绕组 N_{22} ,在外电路中为winding14~25。

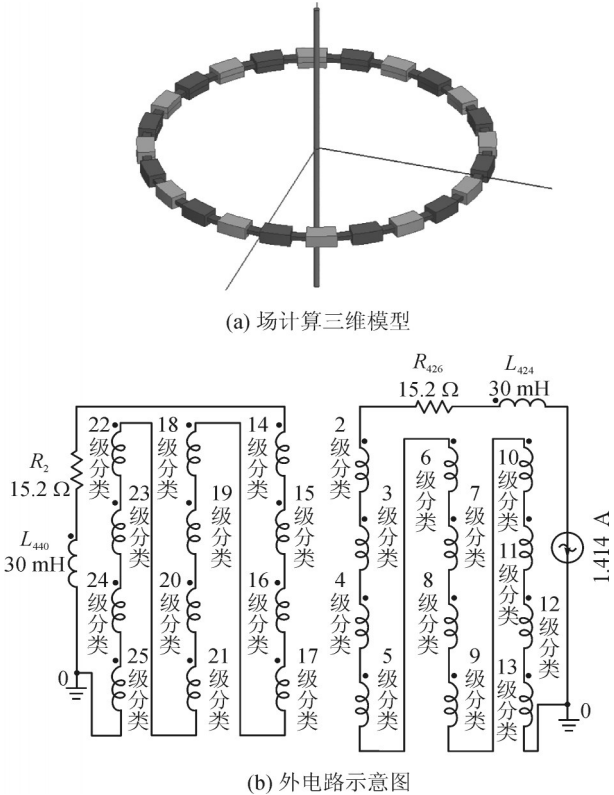


图11 作自校用时CT的等效模型

Fig. 11 The 3D model and external circuit of self-calibration CT

作自校用时,铁心磁场分布见图12。电流曲线见图13。 N_{21} 为电流曲线1, N_{22} 为电流曲线2,其电流方向相反。半个周期内不同时刻的电流值见表5。 N_{21} 的电流峰值为1 414 mA, N_{22} 的电流峰值为1 413.14 mA。代入比差的计算公式,可知,自校情况下的误差为

$$f_i = \frac{I_2 N_2 - I_1 N_1}{I_1 N_1} \times 100\% = -0.061\% \quad (13)$$

自校的仿真结果整理见表6。两种工作情况下误差的实际测量结果见表7。

由场—路耦合模型计算结果可知,不同工作模

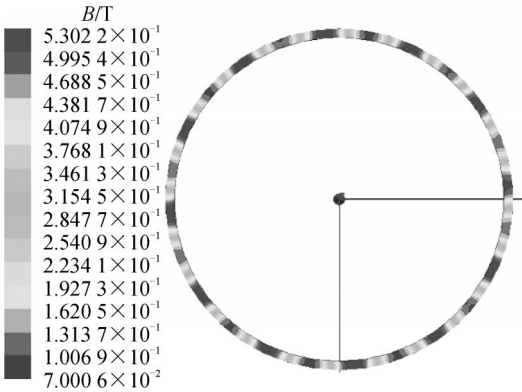


图12 作自校时铁心磁场分布云图

Fig. 12 Core magnetic field of self-calibration

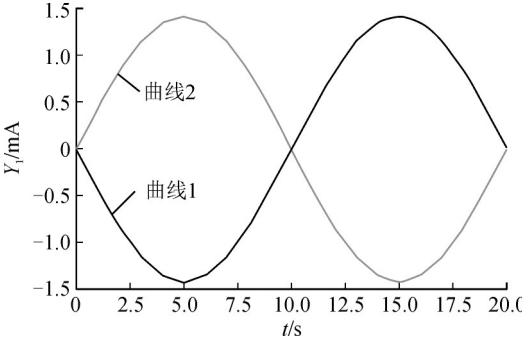


图13 作自校时的电流值

Fig. 13 The current result of CT

表5 自校时不同时刻仿真电流值

Table 5 Current variation of CT with self-calibration pattern

时间/ms	一次电流/kA	二次电流/mA	时间/ms	一次电流/kA	二次电流/mA
0	0.00	0.00	6	-1 344.79	1 343.820
1	-436.95	436.50	7	-1 143.95	1 143.080
2	-831.13	830.37	8	-831.13	830.310
3	-1 143.95	1 143.33	9	-436.95	436.340
4	-1 344.79	1 343.89	10	0.00	-0.525
5	-1 414.00	1 413.14	11	436.95	-437.300

表6 自校时的仿真结果

Table 6 The error result of self-calibration

绕组	匝数/匝	电流峰值/mA	电流有效值/mA	误差/%
一次 $N_{2(1)}$	6 000	1 414.00	1 000.00	-0.061
二次 $N_{2(2)}$	6 000	1 413.14	999.39	

式下,铁心内的磁场分布也不同。当具有自校功能的特高压CT作测量用时,其仿真误差为-0.022%,实际测量误差为-0.035%;当进行自校时,仿真误差为-0.061%,实际测量误差为-0.023%。两种工作情况的仿真误差与实际测量误差均小于0.2S级特高压等级CT要求的0.1%,样机实际测量的角差亦符合要求。

表7 两种情况实际测量的误差结果数据

Table 7 The actual results of errors

名称	误差	额定电流百分数				
		1%	5%	20%	100%	120%
测量用	$f/\%$	-0.069	-0.050	-0.043	-0.035	-0.063
	$\delta/(\text{°})$	-0.23	-0.33	-0.67	-0.35	-0.05
自校用	$f/\%$	-0.018	-0.020	-0.021	-0.023	-0.023
	$\delta/(\text{°})$	1.02	0.95	0.85	0.67	0.65

4 结论

因1 000 kV特高压CT工作电流大(6 000 A),升流器产生如此大的电流较为困难,导致在运的CT均无法进行现场校验。特高压等级CT现场校验难的问题已成为特高压工程建设中亟需解决的重要问题。为此开展了如下工作:

1)提出采用自校法进行特高压CT的现场校验,并对自校方法进行了介绍;在此基础上介绍了具有自校功能的特高压CT结构、工作原理及两种不同的工作模式。

2)根据误差定义,就作测量用和作自校用两种工作模式分别对具有自校功能特高压CT的误差特性及其影响因素进行分析,提出采用瞬态场一路耦合合法进行CT误差的计算。

3)在分析基于棱边有限元法的瞬态场一路耦合法基础上,建立了具有自校功能特高压CT的三维有限元模型,并对CT两种不同工作模式下的误差进行了计算。结果表明:两种工作方式下的仿真及实际测量误差分别为-0.022%、-0.035%和-0.061%、-0.023%,均小于相关规程要求的0.1%,满足特高压等级CT的校验要求,实际试验测量的角差亦满足要求。即从误差角度来看自校法的确可用于特高压等级CT的现场校验。

参考文献:

- [1] 陈龙瑾,孙延松,戚 斌,等. 基于异频小信号测试原理的互感器校验仪的研制[J]. 电子技术与软件工程, 2017(14):129-131.
CHEN Longjin, SUN Yansong, QI Bin, et al. Development of transformer calibrator based on the frequency difference and small signal test[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2017(14):129-131.
- [2] 卢嘉栋. 电流互感器在线校验关键技术论述[J]. 电子技术, 2016(13):142-143.
LU Jiadong. Discussion on key techniques of on line verification of current transformers[J]. Electronic Technology, 2016(13):142-143.
- [3] 赵玉富. 电流互感器的现场检验[J]. 河南电力, 2015(4):16-18.

ZHAO Yufu. Field test of current transformer[J]. Henan Electric Power, 2015(4):16-18.

- [4] STANLEY E Z, JOE M. Primary high current testing of Relays with low ratio current transformer[C]//IEEE Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference.[S.L.]: IEEE, 2004:192-197.
- [5] 杭 峰,陈 蔚. 交流特高压现场交接关键试验技术研究[J]. 电子测试, 2016(24):132-133.
HANG Feng, CHEN Wei. Key testing technology for AC UHV on-site handover[J]. Electronic Test, 2016(24):132-133.
- [6] 陈洪岗,祝达康,林 一. 交流特高压现场交接关键试验技术研究[J]. 华东电力, 2014, 42(12):2811-2814.
CHEN Honggang, ZHU Dakang, LIN Yi. Key testing technology for AC UHV on-site handover[J]. East China Electric Power, 2014, 42(12):2811-2814.
- [7] 赵屹涛,张保国. HLE1型电流互感器现场检定装置[J]. 电测与仪表, 2004, 41(4):49-51.
ZHAO Yitao, ZHANG Baoguo. HLE1 current transformer local calibration device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41(4):49-51.
- [8] BRANDOLINI A, FAIFER M, OTTOBONI R. A novel and simple method for VT and CT calibration[C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference.[S.L.]: IEEE, 2008:1879-1884.
- [9] KAHLER R L. An electronic ratio error set for current transformer calibrations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 28(2):162-164.
- [10] 张杰梁,林 勇,陈爱玲. 大电流互感器现场校验技术的应用现状与研究进展[J]. 机电技术, 2015, 41(3):129-132.
ZHANG Jieliang, LIN Yong, CHEN Ailing. Application status and research progress of field verification technology for high current transformer[J]. Electromechanical Technology, 2015, 41(3):129-132.
- [11] 测量用电流互感器检定规程:JJG 313—2010[S].2010.
Measuring current transformer verification regulation: JJG 313—2010[S].2010.
- [12] 孔祥平,高 磊,黄浩声,等. 1 000 kV保护用电流互感器励磁特性试验及数据分析[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(3):60-63.
KONG Xiangping, GAO Lei, HUANG Haosheng, et al. Excitation characteristic test and data analysis of current transformer for 1 000 kV protection[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3):60-63.
- [13] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
LING Zishu. Technical manual of high voltage transformer [M]. Beijing:China Power Press, 2005.
- [14] 郝庆凯. 基于有限元方法的变压器外部短路工况电磁场仿真[D]. 吉林:东北电力大学, 2017.
HAO Qingkai. Electromagnetic field simulation of transformer under external short-circuit condition based on finite element method[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2017:16-19.

吴细秀(1976—),女,博士,副教授,主要从事高电压绝缘技术及高电压电磁仿真方面的研究。