

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.016

一种基于无源补偿的宽量程电流互感器测量性能研究

张鼎衢¹, 宋强¹, 杨路¹, 王岩¹, 宋宏天^{2,3}, 党三磊¹,
孟庆亮¹, 王保帅²

(1. 广东电网有限责任公司计量中心, 广州 510600; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510630;
3. 广东省电网智能量测与先进计量企业重点实验室, 广州 510630)

摘要: 电网中光伏风电等新能源的接入比例不断提高, 由于新能源的间歇性和宽量程负荷变化特性, 使得并网点处呈现出电流宽范围的特性。传统的电磁式电流互感器对宽范围电流的测量将产生较大的误差。针对励磁电流是影响电流互感器传变精度的主要因素, 文中提出一种基于复合铁心的零磁通电流互感器结构。该电流互感器以复合铁心作为主铁心, 设置辅助铁心和补偿绕组对电流互感器进行无源补偿, 使主铁心工作在近似零磁通状态, 减小电流互感器的传变误差, 拓宽电流互感器的量程。通过分析该电流互感器的误差传递函数, 并利用有限元仿真软件进行仿真, 理论和仿真分析结果均验证了该零磁通电流互感器具有较高的测量精度和良好的宽量程特性, 一次电流在 $(0.1\% \sim 200\%)I_N$ 范围内满足0.2S级电流互感器的精度要求。

关键词: 电磁式电流互感器; 复合铁心; 零磁通; 宽量程

Research on the Measurement Performance of a Wide Range Current Transformer Based on Passive Compensation

ZHANG Dingqu¹, SONG Qiang¹, YANG Lu¹, WANG Yan¹, SONG Hongtian^{2,3}, DANG Sanlei¹,
MENG Qingliang¹, WANG Baoshuai²

(1. Metrology Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510630, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Measurement and Advanced Metering of Power Grid, Guangzhou 510630, China)

Abstract: The continuous increase of integration proportion of such new energy sources as photovoltaic wind power, due to the intermittency of renewable energy and the characteristics of wide-range load variations, enables the grid connection points to exhibit a wide range current characteristic. Traditional electromagnetic current transformer will cause significant errors in the measurement of wide range currents. In view of the fact that excitation current is the main factor affecting the transmission accuracy of current transformers, in this paper zero flux current transformer structure based on a composite iron core is proposed. The current transformer uses a composite iron core as the main iron core, and an auxiliary iron core and compensation winding are set for passive compensation of the current transformer, making the main iron core operate in an approximately zero magnetic flux state, reducing the transmission error of the current transformer and expanding the measuring range of the current transformer. Throughout the analysis of the error transfer function of the current transformer and the use of finite element simulation software for simulation, it is proved by both theoretical and simulation results that the zero-flux current transformer has higher metering accuracy and excellent wide range characteristics, and the primary current can meet the accuracy requirement of class 0.2S current transformer within the range of $0.1\% I_N$ to $200\% I_N$.

Key words: electromagnetic current transformer; composite iron core; zero flux; wide range

收稿日期: 2025-10-03; 修回日期: 2025-12-08

基金项目: 南方电网公司科技项目(035900KK52220007)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(035900KK52220007).

0 引言

电流互感器(current transformer, CT)是一种广泛应用于电力系统的电流比例变换设备,能够将一次大电流按比例变换成二次小电流,为计量、测量和监控等提供电流数据。因此,其准确性对电力系统具有很大影响^[1-6]。近年来,由于新型电力系统的建设和发展,新能源的接入造成一次电流具有宽范围的特征^[7-12],使得传统的电磁式电流互感器工作在线性区域,从而无法对一次电流进行准确的线性传变,严重影响电流测量的准确性^[2,13-14]。

国内外学者针对电流互感器宽量程的实现方法进行了大量的研究^[15-24]。目前,宽量程电流互感器的研究方向(结构方案)可以分为两种,即优化电流互感器结构参数和对电流互感器进行补偿^[15]。优化电流互感器的结构参数即选用磁导率更高的铁心材料、增大二次绕组导线截面积、增大铁心截面积等^[16-19]。这种方法使得电流互感器的造价大大增加,但却使电流互感器的测量精度提高有限。因此,在实际应用中一般都是对电流互感器进行补偿。

电流互感器的补偿方法可以分为无源补偿和有源补偿^[18]。无源补偿包括匝数补偿、半匝或分数匝补偿、磁分路补偿、短路匝补偿、电容器补偿等^[20-21]。无源补偿属于固定补偿,只能实现局部区域的有效补偿。因此,无源补偿方法的精度较低,通常难以适应对剧烈变化的一次侧电流的精确测量。有源补偿分为电势补偿和磁势补偿。电势补偿即在电流互感器二次回路中直接串接反向电动势,用于补偿二次回路负荷产生的电动势^[22];磁势补偿最典型的是双级电流互感器结构,又称为双铁心结构,是通过分别设置检测绕组和补偿绕组,在辅助铁心上产生磁动势,从而对主铁心磁动势进行补偿^[23-24]。有源补偿涉及较为复杂的电流互感器结构和控制算法,实现难度高。同时,由于有源补偿通常离不开外加电源和电力电子器件,制作成本高,且在复杂的电磁环境下难以可靠运行,因此,这种电流互感器目前还不宜用做现场测量。

针对上述问题,文中在无源补偿的基础上提出了一种宽量程电流互感器的结构方案。该结构使用复合铁心作为主铁心,并设置辅助铁心和补偿绕组,对电流互感器的二次电流进行补偿,使主铁心工作在近似零磁通状态下,从而减小电流互感器的传变误差,并拓宽电流互感器的量程。通过求解出电流互感器状态方程及误差传递函数,并对电流互感器的电磁关系进行有限元仿真,理论计算和仿真

结果均表明,基于复合铁心的零磁通电流互感器能够有效拓宽电流互感器的量程,并具有高的测量精度。一次电流在(0.1%~200%) I_N 范围内满足0.2S级电流互感器的精度要求。

1 电流互感器传变误差原理

传统电磁式电流互感器的等效电路图见图1。

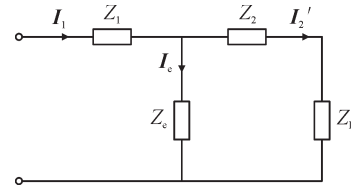


图1 传统电流互感器等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of traditional current transformers

图1中: I_1 、 I_c 分别为电流互感器的一次侧电流、励磁电流; I_2' 为折算到一次侧的二次电流; Z_1 、 Z_c 分别为电流互感器一次侧等效阻抗、励磁阻抗; Z_2 、 Z_L 分别为折算到一次侧的二次侧等效阻抗、负载阻抗。

对于理想电流互感器而言,电流与绕组匝数成反比,即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

在实际应用中,需要励磁电流为一、二次侧电流的传变提供能量。由于励磁电流的存在,电流互感器的磁势平衡方程为

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_0 N_1 \quad (2)$$

由式(2)可以看出,励磁电流 I_0 是电流互感器产生传变误差的根本原因,其误差可以表示为

$$\varepsilon = -\frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} = f + j\delta \quad (3)$$

式(3)中: f 为比差; δ 为角差。

由式(3)可知,为了减小电流互感器的传变误差,最根本的方法就是减小电流互感器的励磁电流 I_0 ,理想情况是使电流互感器工作在零磁通状态下。此时的电流互感器可以看做理想电流互感器,一次电流和二次电流具有线性倍数关系,误差为零。

2 宽量程电流互感器误差传变原理

2.1 复合铁心电流互感器

复合铁心电流互感器的原理图见图2。图2中: T_{11} 为第一铁心; T_{12} 为第二铁心,第一铁心与第二铁心相互叠合并同轴设置,形成复合铁心; i_1 、 i_2 分别为电流互感器的一次电流、二次电流; N_1 、 N_2 分别为

电流互感器的一次绕组、二次绕组, 一次绕组 N_1 、二次绕组 N_2 均绕在第一铁心、第二铁心上。

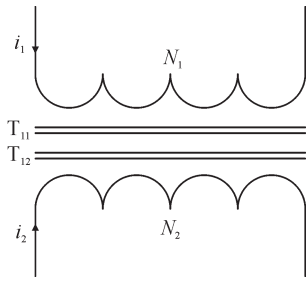


图2 复合铁心电流互感器原理图

Fig. 2 Schematic diagram of composite iron core current transformer

分别列出第一铁心、第二铁心的磁势平衡方程

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_{e1} N_1 \quad (4)$$

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_{e2} N_1 \quad (5)$$

式(4)、(5)中: I_{e1} 、 I_{e2} 分别为第一铁心、第二铁心的励磁电流。由式(4)、(5)可得, 第一铁心、第二铁心的磁特性状态完全相同, 励磁电流相等, 即

$$I_{e1} = I_{e2} \quad (6)$$

由式(4)-(6)可得复合铁心电流互感器的等效电路图见图3。图3中: I_1 、 I_e 分别为电流互感器的一次测电流、励磁电流; I_2' 为折算到一次侧的二次电流; Z_1 为电流互感器一次侧等效阻抗; Z_{e1} 、 Z_{e2} 分别为第一铁心、第二铁心的励磁阻抗; Z_2 为电流互感器二次侧折算到一次侧的等效阻抗; Z_L 为二次侧折算到一次侧的负载阻抗。

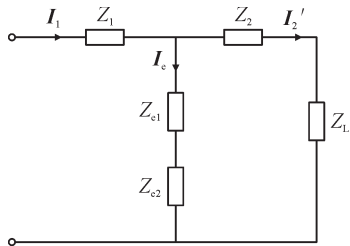


图3 复合铁心电流互感器等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of composite iron core current transformer

根据电流互感器误差的定义, 由图3可得复合铁心电流互感器的误差表达式

$$\varepsilon = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} \times 100\% = \frac{I_2' - I_1}{I_1} \times 100\% \quad (7)$$

由二次回路基尔霍夫电压定律和欧姆定律可以得到 I_2' 、 I_e 的关系

$$I_e = I_2' \cdot \frac{Z_2 + Z_L}{Z_{e1} + Z_{e2}} \quad (8)$$

由基尔霍夫电流定律可得 I_1 、 I_2' 的关系

$$I_1 = I_e + I_2' = I_2' \cdot \left(\frac{Z_2 + Z_L}{Z_{e1} + Z_{e2}} + 1 \right) \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)可得

$$\varepsilon = \frac{-1}{1 + \frac{Z_{e1} + Z_{e2}}{Z_2 + Z_L}} \times 100\% \quad (10)$$

复合铁心中, 第一铁心选用磁导率高的材料, 用于满足常规条件下的精度要求; 第二铁心选用饱和磁场强度高的材料, 并在铁心上开一气隙, 由文[25]可知, 对铁心开气隙, 可提高其饱和磁场强度 H_{max} , 因此第二铁心用于满足饱和情况下的精度要求。

当电流互感器工作在常规条件下时, 第一铁心、第二铁心均工作在线性区。由于第一铁心的磁导率更高, 因此 $|Z_{e1}| > |Z_{e2}|$, 由式(10)可得, 此时电流互感器的精度主要由第一铁心决定。当电流互感器一次侧电流过大, 致使第一铁心进入饱和状态时, 第一铁心励磁阻抗 Z_{e1} 减小至远远小于未饱和时的励磁阻抗。由于第二铁心具有较大的饱和磁场强度, 励磁阻抗 Z_{e2} 未发生变化, 此时电流互感器的误差极大程度上由 Z_{e2} 决定。当电流互感器一次侧电流过小时, 由于第一铁心具有较高的初始磁导率, 此时 $|Z_{e1}| > |Z_{e2}|$, 因此第一铁心决定此时电流互感器的精度。

综上所述, 第一铁心用于保证电流互感器在正常运行、小电流工况时的精度, 第二铁心用于保证电流互感器在大电流工况时的精度。

不同铁心材料的磁特性见表1^[26-28]。由表1可知, 超微晶具有较高的初始磁导率, 铁基非晶合金饱和磁感应强度较高, 虽不及硅钢片的饱和磁感应强度, 但磁导率比硅钢片高出近一个数量级。因此文中选用超微晶材料作为第一铁心材料, 铁基非晶合金作为第二铁心材料。

表1 电流互感器常用铁心材料磁特性参数

Table 1 Magnetic characteristic parameters of commonly used iron core materials for current transformers

参数	超微晶	铁基非晶合金	坡莫合金	硅钢片
饱和磁感应强度/T	1.25	1.65	0.75	2.00
初始磁导率/(H·m ⁻¹)	(4~8)×10 ⁴	6×10 ⁴	(5~8)×10 ⁴	(5~8)×10 ⁴
最大磁导率/(H·m ⁻¹)	60×10 ⁴	45×10 ⁴	60×10 ⁴	4×10 ⁴

2.2 基于复合铁心的零磁通电流互感器

由于复合铁心对电流互感器宽量程性能的提高效果有限, 因此文中在复合铁心电流互感器的基础上增加无源补偿, 以进一步拓宽电流互感器的量程。无源补偿属于固定补偿, 虽然不能使电流互感器的主磁通始终为零, 但是能大大减小主磁通, 从而提高测量精度, 并且不需要外接电源, 实现成本低^[21]。

文中提出的基于复合铁心的无源零磁通电流互感器原理图见图4。图4中: T_1 为前文所提复合铁

心,也称为主铁心,由第一铁心 T_{11} 、第二铁心 T_{22} 组成; T_2 为辅助铁心; N_1 、 N_2 分别为一次绕组、二次绕组; N_3 为补偿绕组。一次绕组 N_1 、二次绕组 N_2 均绕在主铁心 T_1 、辅助铁心 T_2 上,补偿绕组 N_3 仅绕在主铁心 T_1 上,并与 N_2 并联。

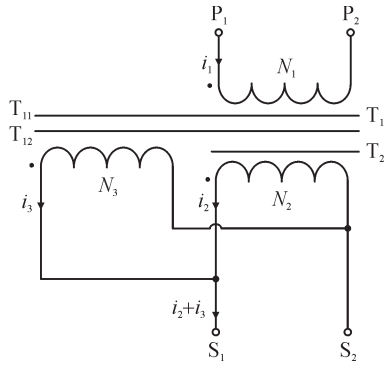


图4 基于无源补偿的复合铁心电流互感器原理图

Fig. 4 Schematic diagram of a composite iron core current transformer based on passive compensation

主铁心 T_1 、辅助铁心 T_2 的磁动势平衡方程为

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 + N_3 I_3 = N_1 I_{01} \quad (11)$$

$$N_1 I_1 + N_2 I_2 = N_1 I_{02} \quad (12)$$

式(11)、(12)中: I_{01} 、 I_{02} 分别为主铁心、辅助铁心中的励磁电流。

设电流互感器二次负荷为 $Z_L = R + j\omega L$,则根据电势平衡有

$$N_2 \frac{d\varphi_1}{dt} + N_2 \frac{d\varphi_2}{dt} = R(i_2 + i_3) + L \frac{d(i_2 + i_3)}{dt} \quad (13)$$

主铁心 T_1 、辅助铁心 T_2 的磁通变化量分别为

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{N_1 S_1}{l_1} \cdot \mu_1 \cdot \frac{di_{01}}{dt} \quad (14)$$

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{N_1 S_2}{l_2} \cdot \mu_2 \cdot \frac{di_{02}}{dt} \quad (15)$$

式(14)、(15)中: S_1 、 S_2 分别为 T_1 、 T_2 的横截面积; l_1 、 l_2 分别为 T_1 、 T_2 的平均磁路长度; μ_1 、 μ_2 分别为 T_1 、 T_2 的磁导率。

由式(11)-(15)可得,基于复合铁心的零磁通电流互感器的传递函数

$$\left(\frac{N_1 S_1 \mu_1}{l_1} s I_{01} + \frac{N_1 S_2 \mu_2}{l_2} s I_{01} - \frac{N_3 S_2 \mu_2}{l_2} s I_3 \right) \cdot \frac{N_2}{R + sL} = I_2 + I_3 \quad (16)$$

补偿绕组电流 i_3 与补偿绕组感应电压之间的关系为

$$i_3 = \frac{u_3}{|Z_L|} = \frac{N_3}{|Z_L|} \cdot \frac{d\varphi_1}{dt} \quad (17)$$

化简传递函数为

$$N_1 I_{01} \left[\frac{S_1 \mu_1}{l_1} s + \frac{S_2 \mu_2}{l_2} s - \frac{N_3 S_2 \mu_2}{l_2} s \cdot \frac{N_3 S_1 \mu_1}{l_1 (R + sL)} s \right] \cdot \frac{N_2}{R + sL} = I_2 + I_3 \quad (18)$$

令补偿绕组与二次绕组匝数相同,即 $N_3 = N_2$ 。

由传递函数画出控制框图见图5。图5中,虚线部分表示无源补偿对传递函数的影响。

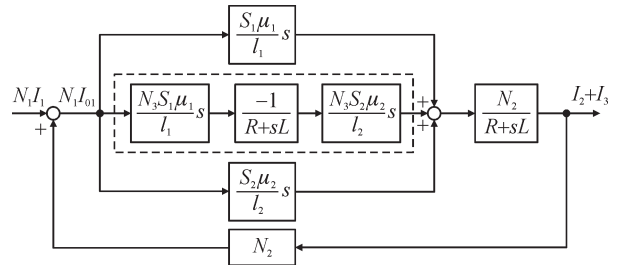


图5 基于复合铁心的零磁通电流互感器控制框图

Fig. 5 Control block diagram of zero flux current transformer based on composite iron core

主铁心 T_1 、辅助铁心 T_2 的励磁阻抗为

$$Z_{m1} = \mu_1 \frac{N_2^2 S_1}{l_1} \cdot j\omega \quad (19)$$

$$Z_{m2} = \mu_2 \frac{N_2^2 S_2}{l_2} \cdot j\omega \quad (20)$$

补偿前电流互感器的误差为

$$\varepsilon = f + j\sigma = -\frac{N_1 I_{01}}{N_1 I_1} \times 100\% = -\frac{R + j\omega L}{R + j\omega L - Z_{m1} - Z_{m2}} \times 100\% \quad (21)$$

对于基于复合铁心的零磁通电流互感器来说,其输出电流为二次绕组和补偿绕组电流的叠加。因此,电流互感器的误差为

$$\varepsilon = f + j\sigma = -\frac{N_1 I_1 + N_2 I_2 + N_3 I_3}{N_1 I_1} \times 100\% = -\frac{N_1 I_{01}}{N_1 I_1} \times 100\% \quad (22)$$

根据电流互感器的控制框图,可以得出补偿后的误差为

$$\varepsilon = f + j\sigma = -\frac{N_1 I_{01}}{N_1 I_1} \times 100\% = -\frac{R + j\omega L}{R + j\omega L - Z_{m1} - Z_{m2} + \frac{Z_{m2} Z_{m1}}{R + j\omega L}} \times 100\% \quad (23)$$

比较式(21)、(23)可以看出,经过补偿后的误差表达式在分母处多了一项 $Z_{m2} Z_{m1} / (R + j\omega L)$ 。由于电流互感器的二次侧一般是工作在近似短路状态下^[29],即电流互感器的负载阻抗 $Z_L = R + j\omega L$ 近似为零,得

$$\left| \frac{Z_{m2}Z_{m1}}{R+j\omega L} \right| \gg |R+j\omega L - Z_{m1} - Z_{m2}| \quad (24)$$

从而极大地减小电流互感器的测量误差。

3 仿真分析

文中通过搭建基于复合铁心的零磁通电流互感器仿真模型,对其电磁状态进行有限元仿真,验证该结构电流互感器在宽量程工况下的准确性。搭建的仿真模型见图6。电流互感器的参数设置和仿真结果见表2、3。

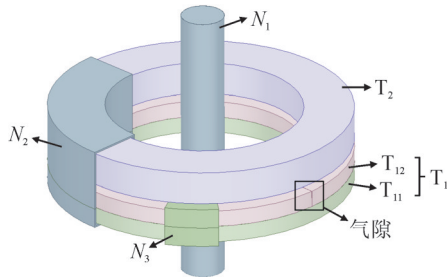


图6 基于无源补偿的复合铁心电流互感器仿真模型
Fig. 6 Simulation model of composite iron core current transformer based on passive compensation

表2 电流互感器仿真模型参数设置

Table 2 Parameter setting of current transformer simulation model

参数	数值
额定电流/A	500
N_1	1
N_2	100
N_3	100
绕组阻抗/ Ω	1
铁心内径/mm	60
铁心外径/mm	90
铁心高度/mm	20
气隙宽度/mm	0.1

表3 仿真结果

Table 3 Simulation result

$\frac{I_1}{I_N}/\%$	补偿前		补偿后	
	比差/%	角差/($^\circ$)	比差/%	角差/($^\circ$)
0.1	-1.237 8	43.092 1	0.003 6	0.168 5
0.5	-0.987 5	36.803 1	0.002 8	0.116 5
1.0	-0.867 2	31.071 3	0.002 5	0.087 9
5.0	-0.634 6	22.934 0	0.001 9	0.086 1
20.0	-0.498 0	16.539 2	0.001 2	0.084 4
100.0	-0.916 9	25.578 6	0.002 4	-0.050 0
120.0	-1.315 4	36.991 1	0.005 9	-0.323 0
200.0	-2.473 8	81.544 6	0.006 7	-0.336 6

绘制表3仿真结果见图7。图7中虚线为0.2S

电流互感器的误差标准。由图7可以看出,补偿后的零磁通电流互感器在宽量程条件下具有更好的传变特性和计量精度。当一次电流在(0.1%~200%) I_N 范围内波动时,补偿后的电流互感器的比差和角差均满足0.2S级CT的精度要求。

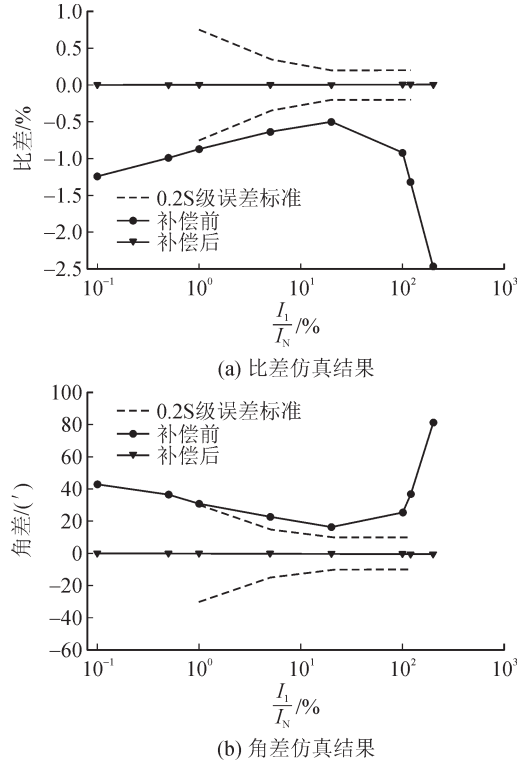


图7 宽量程条件下电流互感器补偿前后误差仿真

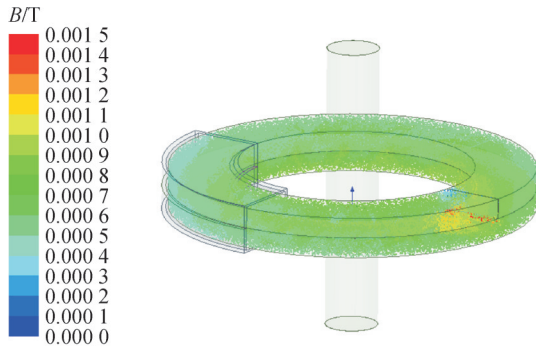
Fig. 7 Simulation of error before and after compensation of current transformer under wide range conditions

由于该结构电流互感器的本质为零磁通电流互感器,实际是基于零磁通原理的改进型电流互感器,其无源补偿目的是使主铁心中的磁通为零。因此,仅从一、二次电流的传变误差无法反映其传变机理。从电流互感器工作时穿过铁心的磁通量来说明其传变机理,磁通量、磁感应强度的关系为

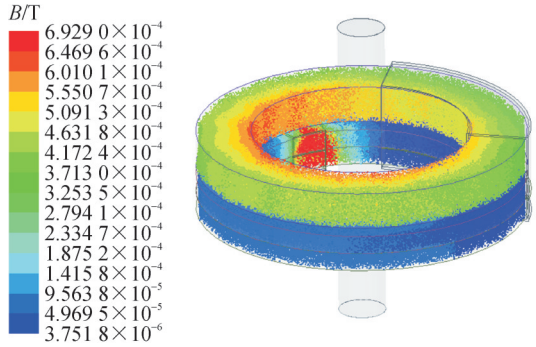
$$\Phi = BS \quad (25)$$

式(25)中: Φ 为磁通量; B 为磁感应强度; S 为与磁场方向垂直的平面面积。因此,可以通过有限元仿真电流互感器补偿前后铁心中的磁感应强度 B 来评估无源补偿的效果。

电流互感器在0.1%、100%、200% I_N 时的磁感应强度分布云图见图8-10,分别取各相应电流下磁感应强度最大时刻,即一次电流的极值时刻进行仿真。



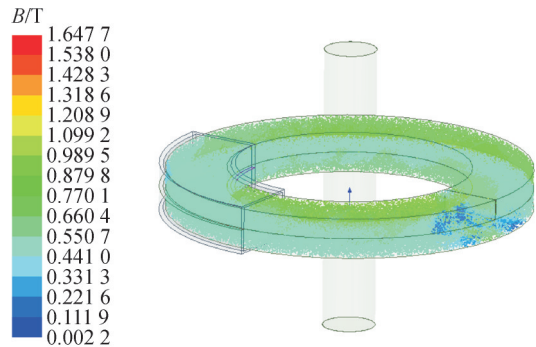
(a) 补偿前磁感应强度云图



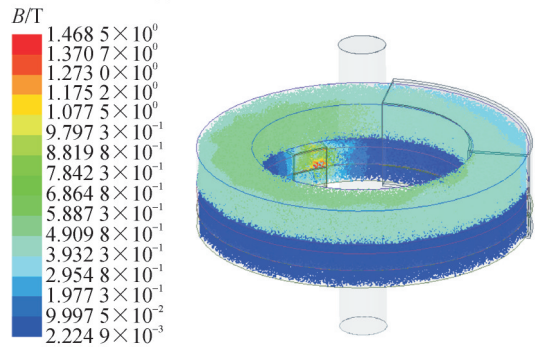
(b) 补偿后磁感应强度云图

图8 电流互感器补偿前后磁感应强度云图(0.1%IN)

Fig. 8 Cloud map of magnetic induction intensity before and after current transformer compensation(0.1%IN)



(a) 补偿前磁感应强度云图

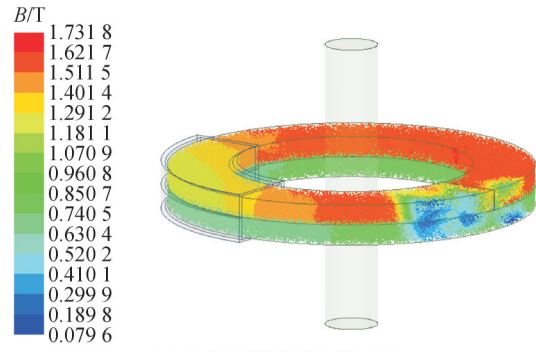


(b) 补偿后磁感应强度云图

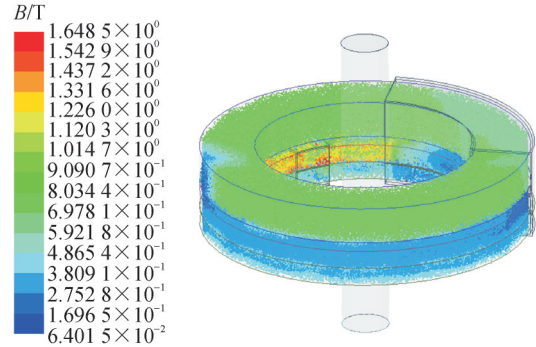
图9 电流互感器补偿前后磁感应强度云图(100%IN)

Fig. 9 Cloud map of magnetic induction intensity before and after current transformer compensation(100%IN)

从补偿前后电流互感器铁心的磁感应强度云图可以看出,与补偿前的电流互感器相比,补偿后



(a) 补偿前磁感应强度云图



(b) 补偿后磁感应强度云图

图10 电流互感器补偿前后磁感应强度云图(200%IN)

Fig. 10 Cloud map of magnetic induction intensity before and after current transformer compensation(200%IN)

电流互感器的铁心磁感应强度显著降低1~3个数量级,补偿效果较为理想。

对比补偿后电流互感器的主铁心和辅助铁心可知,在0.1%、100%、200%IN 3种工况下,辅助铁心的磁感应强度均远大于主铁心的磁感应强度,这说明辅助铁心承担了大部分的磁通,从而使主铁心近似工作在零磁通状态,提高电流互感器的传变精度,拓宽电流互感器的量程。

4 结语

文中提出的基于复合铁心的零磁通电流互感器结构,使用复合铁心作为主铁心,并设置辅助铁心和补偿绕组进行无源补偿,使主铁心工作在近似零磁通状态下,从而提高测量精度、拓宽量程。通过分析该结构电流互感器的电磁特性,求解出其状态方程及误差传递函数。理论分析及有限元仿真结果均表明文中所提出的零磁通电流互感器结构能够有效的减小电流互感器的传变误差,实现宽范围电流的准确测量,一次电流在(0.1%~200%)IN 范围内满足0.2S级电流互感器的精度要求。该结构的电流互感器为新能源接入背景下宽范围电流的精确测量提供了一种可行的解决方案。

参考文献:

- [1] 刘刚,熊小伏,廖瑞金,等. 泄漏电流对电流互感器误差特性的影响及分析[J]. 电工技术学报,2018,33(3):697-704.
LIU Gang, XIONG Xiaofu, LIAO Ruijin, et al. Effect and analysis of leakage current on error characteristics of current transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 697-704.
- [2] 胡红利,崔晨辉,员鹏宇,等. 电流互感器饱和检测以及畸变电流补偿[J]. 西北大学学报(自然科学版),2022,52(1):52-59.
HU Hongli, CUI Chenhui, YUN Pengyu, et al. Current transformer saturation detection and distortion current compensation[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2022, 52(1): 52-59.
- [3] 贺春安,祝祺,吕超群,等. 电流互感器短时热电流试验二次绕组烧毁原因及解决方案[J]. 变压器,2024,61(6):44-48.
HE Chun'an, ZHU Qi, LYU Chaoqun, et al. Cause and solution of secondary winding burnout in short-time thermal current test of current transformer [J]. Transformer, 2024, 61(6): 44-48.
- [4] 孙帆,王维庆,金铭,等. 油浸型倒立式电流互感器内绝缘缺陷特征及检测方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2025,46(2):120-126.
SUN Fan, WANG Weiqing, JIN Ming, et al. Inner insulation defect characteristic and detection method of oil immersed inverted current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 120-126.
- [5] 周鸿铃,李光茂,李国城,等. 油浸式电流互感器膨胀器异常变形的故障分析[J]. 变压器,2024,61(9):45-49.
ZHOU Hongling, LI Guangmao, LI Guocheng, et al. Fault analysis of abnormal deformation of oil-immersed current transformer expander[J]. Transformer, 2024, 61(9): 45-49.
- [6] 周浪,刘水平,杨茜,等. 防爆型油浸式电流互感器研制[J]. 电力电容器与无功补偿,2025,46(1):89-97.
ZHOU Lang, LIU Shuiping, YANG Qian, et al. Development on explosion-proof oil-immersed current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 89-97.
- [7] 陈倩,朱婵霞,奚巍民,等. 基于国际对标的风光新能源发电市场政策机制思考[J]. 电力建设,2024,45(6):120-129.
CHEN Qian, ZHU Chanxia, XI Weimin, et al. Policy mechanism thinking for new energy power generation market based on international benchmarking[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6): 120-129.
- [8] 施涛,许泽炎,雷震亚,等. 计及一致性的多点新能源发电制氢协同控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2025,46(2):26-36.
SHI Tao, XU Zeyan, LEI Zhenya, et al. Study on cooperative control strategy of multi-point new energy power generation and hydrogen production considering consistency[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 26-36.
- [9] 刘瑞平,袁亮,胡铭欣,等. 含构网型新能源发电单元的孤立电网暂态稳定性提升策略[J]. 电力科学与技术学报,2024,39(6):152-161.
LIU Ruiping, YUAN Liang, HU Mingxin, et al. A transient stability improvement strategy of isolated power grids with grid-forming-based renewable energy power generation units[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 152-161.
- [10] 张爱军,刘石川,慕腾,等. 新能源发电富集地区输电系统规划方案的综合评价[J]. 智慧电力,2025,53(2):16-24.
ZHANG Aijun, LIU Shichuan, MU Teng, et al. Comprehensive evaluation of transmission system planning schemes in renewable energy generation enrichment region[J]. Smart Power, 2025, 53(2): 16-24.
- [11] 齐郑,吉苏朋. 水电机组调相运行与新能源发电协同优化技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(3):108-119.
QI Zheng, JI Supeng. Synergistic optimization of phase modulation operation of hydropower units and power generation of new energy units[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 108-119.
- [12] 李鹏. 浅析新能源发电并网对电能计量的影响及处理措施[J]. 科技与企业,2015(15):237-237.
LI Peng. Analysis of the impact of grid connection of new energy generation on energy metering and its treatment measures[J]. Science-technology Enterprise, 2015(15): 237-237.
- [13] 李志新,王少华,徐敏锐,等. 一种新型宽量程电流互感器的设计与性能分析[J]. 电气应用,2017,36(13):36-39.
LI Zhixin, WANG Shaohua, XU Minrui, et al. Design and performance analysis of a new wide range current transformer[J]. Electrotechnical Application, 2017, 36(13): 36-39.
- [14] 樊胜胜,钟洪亮,岳舟. 基于阻抗自适应调整的输电线路取能装置稳定取能方法[J]. 中国电机工程学报,2022,42(14):5348-5359.
FAN Shaosheng, ZHONG Hongliang, YUE Zhou. A stable energy acquisition method for transmission line energy extraction device based on adaptive impedance adjustment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5348-5359.
- [15] LU Bing, CHEN Xiwen, XU Zhongda, et al. Modeling simulation and experiment of wide-range current transformer based on new nanocrystalline alloy material[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2218(1): 012065.
- [16] 谌洪江,江智军,靳绍平,等. 基于坡莫合金磁芯的电流互感器宽量程实现[J]. 实验技术与管理,2016,33(7):43-47.
SHEN Hongjiang, JIANG Zhijun, JIN Shaoping, et al. Realization of a wide range measurement of current transformer based on permalloy cores[J]. Experimental Technology and Management, 2016, 33(7): 43-47.
- [17] 江鹏,李源宗,龙兴强,等. 电流互感器误差影响因素与应用分析[J]. 仪器仪表标准化与计量,2014(1):32-34.
JIANG Peng, LI Yuanzong, LONG Xingqiang, et al. Error analysis of current transformer and its application[J]. Instrument Standardization and Metrology, 2014(1): 32-34.
- [18] 熊魁,岳长喜,李登云,等. 高磁导率比双铁芯电流互感器原理和误差性能研究[J]. 电测与仪表,2018,55(17):114-119.
XIONG Kui, YUE Changxi, LI Dengyun, et al. Research of theory and error characters of high magnetic permeability ratio two cores current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,

- 2018, 55(17): 114-119.
- [19] LU Bing, CHEN Xiwen, XU Zhongda, et al. Design and simulation analysis of wide-range current transformer with adaptively adjustable air gap length[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2219(1): 012014.
- [20] 国智博, 陈 锋, 王彦昊, 等. 基于动态无功补偿技术的磁平衡式电流互感器设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(s1): 217-224.
GUO Zhibo, CHEN Feng, WANG Yanhao, et al. Design of flux balanced current transformer based on dynamic reactive power compensation technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(s1): 217-224.
- [21] 李培艳. 基于零磁通的无源单匝穿心式小电流互感器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
LI Peiyan. The research of current sensor with single-turn-cored structure suited for tiny current based on zero-flux[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [22] HAJIPOUR E, VAKILIAN M, SANAYE-PASAND M. Current-transformer saturation prevention using a controlled voltage-source compensator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 1039-1048.
- [23] 王小君, 鲍 海, 李 伟. 基于Bang-Bang控制的宽量程电流互感器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 74-77.
WANG Xiaojun, BAO Hai, LI Wei. Wide range current transformer based on the Bang-Bang controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 74-77.
- [24] 鲍 海, 杨以涵. 宽量程电流互感器控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 67-71.
BAO Hai, YANG Yihan. Research on the control method of wide range measurement current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 67-71.
- [25] 黄世泽, 郭其一. 铁心开气隙电流互感器暂态特性仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(8): 1719-1723.
HUANG Shize, GUO Qiyi. Simulation of transient characteristics for air gapped core current transformer[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(8): 1719-1723.
- [26] 李春来, 汤晓宇, 罗坤明. 计量用电流互感器在3种铁心条件下传变特性的试验与分析[J]. 仪表技术与传感器, 2015(4): 104-106.
LI Chunlai, TANG Xiaoyu, LUO Kunming. Measurement and analysis of transfer characteristics of metering CT with three different core materials[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(4): 104-106.
- [27] 武兰民, 吴 雪, 张燕秉, 等. 高饱和磁感应强度铁基非晶合金带材性能研究[J]. 中国材料进展, 2020, 39(10): 790-794.
WU Lanmin, WU Xue, ZHANG Yanbing, et al. Study on properties of high saturation magnetic induction Fe-based amorphous alloy strips[J]. Materials China, 2020, 39(10): 790-794.
- [28] 胡景宇. 高饱和磁化强度铁基非晶纳米晶合金的研制和应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
HU Jingyu. Research and application of Fe-based amorphous and nanocrystalline alloys with high saturation magnetization[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [29] 刘超超, 赵向阳. 电流互感器二次侧回路状态检测装置研制[J]. 电测与仪表, 2018, 55(1): 121-125.
LIU Chaochao, ZHAO Xiangyang. Development of secondary circuit state detecting device for current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(1): 121-125.
- 张鼎衡(1987—), 男, 高级工程师, 研究方向为智能量测体系、宽频宽量程互感器、互感器在线监测、电能计量装置远程检验等(E-mail: 13822289520@139.com)。
- 杨 路(1991—), 男, 工程师, 研究方向为新型电力系统计量技术、计量智能运维技术、量子计量技术等(通信作者)(E-mail: yanglu910715@126.com)。

《高压电器》2026年5期广告单位

封一: 史陶比尔(杭州)精密机械电子有限公司
封二: 西安高压电器研究院股份有限公司(业务)
封三: 广东金晖隆电气股份有限公司
封四: 上海乐研电气有限公司
前彩1: 浙江聚弘凯智能电气股份有限公司
前彩2: 陕西维柯瑞电器有限责任公司
前彩3: 厦门宏发电声股份有限公司
前彩4: 西安华伟电力电子技术有限责任公司
前彩5: 陕西龙翔电器有限公司
前彩6: 陕西泰普瑞电工技术有限公司

前彩7: 扬州金源机器人自动化设备有限公司
前彩8: 温州昌泰电气有限公司
前彩9: 温州锐亚科技有限公司
前彩10: 广州创研智能科技有限公司
前彩11: 中国振华电子集团宇光电工有限公司
前彩12: 登高电气有限公司
后彩1: 甘肃电器科学研究院
后彩2: 成都双高实业有限责任公司
后彩3: 良信电器(海盐)有限公司
后彩4: 西安西电高压开关操动机构有限责任公司