

基于零磁通原理的宽量程电流互感器传变特性

张鼎衢¹, 杨路¹, 肖勇^{2,3}, 宋强¹, 王保帅^{2,3}, 王岩¹, 邢立坤¹

(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, 广州 510663; 3. 广东省电网智能量测与先进计量企业重点实验室, 广州 510663)

摘要: “双碳”背景下新能源分布式电源大规模并网, 其间歇性和宽量程负荷的特点使新能源并网点处的电流信号呈现宽动态变化范围的特征。传统电流互感器在一次电流远小于额定电流时容易因为铁心励磁不足和初始磁导率低而发生误差超限, 在一次电流超过额定电流时又因为可能进入铁心饱和区而导致精度降级, 难以实现电能的准确计量。为使电流互感器同时满足高精度和宽量程, 提出了一种基于电动势补偿的无源零磁通复合铁心电流互感器, 通过二次绕组在主、辅铁心上的不等匝数绕制和补偿绕组的引入, 并根据主、辅铁心的磁场分布特征选取不同的铁心结构和材料, 使主铁心工作在近似零磁通的状态。推导该结构电流互感器的控制框图和传递函数, 并结合仿真分析和实验验证, 结果表明该结构的电流互感器在一次额定电流的0.1%~200%范围内均满足0.1级电流互感器的精度要求, 为新能源背景下电力系统中宽动态变化范围电流信号测量提供一种可行的解决方案。

关键词: 电流互感器; 宽量程; 零磁通; 电动势补偿; 复合铁心

Transfer Characteristics of Wide-Range Current Transformer Based on Zero-Flux Theorem

ZHANG Dingqu¹, YANG Lu¹, XIAO Yong^{2,3}, SONG Qiang¹, WANG Baoshuai^{2,3}, WANG Yan¹,
XING Likun¹

(1. Metrology Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Measurement and Advanced Metering of Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Under the background of "Dual Carbon", the large-scale grid connections of new energy distributed power sources are characterized by intermittency and wide range load, which results in a wide dynamic range characteristics of current signals at the new energy grid connection point. Traditional current transformers are prone to exceeding error limits when the primary current is much lower than the rated current due to insufficient excitation of the iron core and low initial magnetic permeability. When the primary current exceeds the rated current, accuracy degradation may occur due to saturation of the iron core, making it difficult to measure power energy accurately. In order to meet the requirements of high accuracy and wide range for current transformers, a passive zero-flux composite iron core current transformer based on electromotive force compensation is proposed. Through the introduction of unequal secondary windings and compensation windings on the main and auxiliary iron cores and selection of different iron core structure and materials according to the magnetic field distribution characteristics of the main and auxiliary iron cores, the main iron core works in a state of approximately zero magnetic flux. The control block diagram and transfer function of the current transformer with this structure are derived. Combined with simulation analysis and experimental verification, it is shown that the current transformer with this structure meets the accuracy requirements of 0.1 precision current transformer within the range of 0.1% to 200% of the rated primary current. An effective solution is provided for measuring current signals with a wide dynamic range in power systems under the background of new energy.

Key words: current transformer; wide range; zero-flux; electromotive force compensation; composite iron core

基金项目: 广东省科技计划资助项目(2021B1212050014); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20220280)。

Foundation item: Supported by the Science and Technology Program of Guangdong Province (2021B1212050014); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GDKJXM20220280).

0 引言

“碳达峰、碳中和”背景下,能源的生产、消费和利用呈现新的发展趋势,建设以新能源为主体的新型电力系统是推动电力清洁低碳发展的必然要求。新能源分布式电源区别于传统的水力和火力发电,具有较强间歇性和宽量程负荷等特点^[1-2],使新能源并网点处的电流信号呈现宽动态变化范围、含一定直流分量和较大谐波分量的特点,对电能计量技术提出了新的要求和挑战。

电流互感器(current transformer, CT)是电力系统测量的基本单元,用于检测电力系统中的电流信息^[3-7]。在测量的过程中,由于部分一次电流用于励磁以及铁心存在磁滞等损耗,导致CT存在一定测量误差。在一次电流远小于额定电流时由于铁心材料的初始磁导率低和励磁不足容易导致误差超限;在一次电流超过额定电流一定范围后CT的工作点可能进入磁化曲线的饱和区域,同样会使测量误差超限^[8-9]。现有CT满足设计精度的工作范围为5%~120%的一次额定电流,因此传统的电流互感器难以满足新能源并网点处等宽动态范围场景下的测量精度要求。

为拓宽CT测量范围和提高CT的测量精度,目前的主要方法是补偿励磁电流使CT铁心处于近似零磁通的工作状态。补偿方法可分为无源补偿和有源补偿两类^[10]。

无源补偿一般通过改变CT的自身结构来实现,国内外研究的无源补偿方法主要包括匝数补偿、磁分路补偿和电容补偿等^[11]。匝数补偿通过调整补偿匝数平移比差曲线实现补偿,但只对比差起补偿作用;磁分路补偿通过增加磁分路补偿CT的比差和角差来实现补偿,但受CT运行范围影响很大^[12];电容补偿通过并联电容减小励磁电流,在大的电流变化范围内易发生过补偿或欠补偿。可以看出,由于CT的结构和参数一经出厂便已固定,无源补偿的补偿效果一般只在一定范围内有效,在电流变化范围较大时不能跟踪参数变化,不能适应宽动态变化的一次电流,难以实现电流信号的宽量程准确测量。

有源补偿指通过外加激励的方式补偿或消除励磁电流的影响,相比于无源补偿能实现更加准确的测量效果,对此国内外学者进行了大量研究。国外

学者哈伯逊最早提出利用零磁通原理实现电流互感器有源补偿的新方法^[13]。随后围绕零磁通电流互感器的设计由运算放大器组成的各种补偿电路应运而生,常见有磁动势补偿和电动势补偿直到今天仍是实现高准确度电流互感器的基本补偿方法之一^[14]。文献[15]基于电动势补偿通过在二次绕组串联电动势补偿电路,使二次回路电动势几乎由补偿电路承担,达到减小CT误差和拓宽量程的目的;文献[16]采用双级结构,基于磁动势补偿的思想,通过补偿绕组上产生补偿电流改变铁心的磁通分布,使主铁心近似零磁通而由辅助铁心承担所有的二次负荷,并利用有源电子电路和PIC单片机系统实现电流互感器的误差动态补偿。有源补偿多采用多级的互感器结构和模拟电路的补偿装置,为了实现精准补偿,电路结构一般较为复杂且受环境的电磁干扰影响较大,易发生性能漂移而导致补偿效果降低^[17-20]。

本文提出一种基于电动势补偿的无源复合双铁心零磁通电流互感器技术方案,参照有源补偿的双铁心结构,通过二次绕组在主、辅铁心上的不等绕制以及增设补偿回路,在不引入外电路的前提下实现主铁心的近似零磁通工作状态。根据零磁通CT主铁心近似零磁通而辅助铁心承担几乎所有工作磁通的磁场分布特征分别选用初始磁导率较高的坡莫合金和饱和性能较好的超微晶合金分别作为主铁心和辅助铁心,并在辅助铁心上开一气隙,将CT的有效测量范围由国家标准^[21]要求的5%~120%拓宽至0.1%~200%。通过分析该种结构CT的工作原理推导控制框图和传递函数,结合有限元仿真和实验表明所提零磁通CT在一次额定电流的0.1%~200%的变化范围内均能满足0.1级的精度要求,为新能源大规模接入下并网点处等宽动态范围场景下电能的准确计量提供了一种可能方案。

1 电流互感器误差分析

CT一般由闭合铁心、一次和二次绕组组成,基于电磁感应原理将一次大电流转变为二次小电流,用于测量或保护^[22],其结构原理图如图1所示。图中, i_1 、 i_2 分别为一次、二次电流, N_1 、 N_2 分别为一次、二次绕组。

根据CT结构及电磁关系画出CT的等效电路模

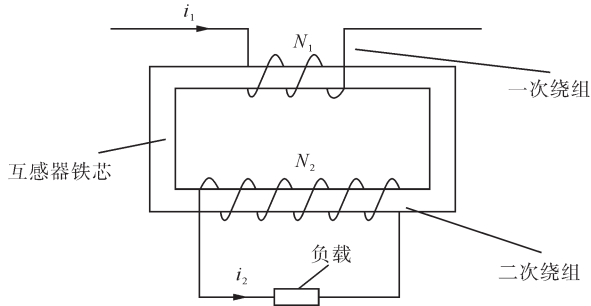


图 1 CT 结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of CT structure

型如图 2 所示。 i'_1 为折算至二次的一次电流， i_m 为励磁电流， R_m 、 L_m 分别为励磁电阻和励磁电感， R_2 、 L_2 分别为二次绕组电阻和漏电感， R_b 、 L_b 分别为负载电阻和电感。母线式电流互感器一次绕组通常匝数为 1，其阻抗可以忽略。

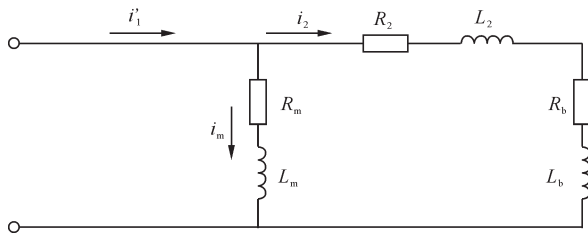


图 2 CT 等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of CT

由图 2 可知，在一次到二次能量传递过程中部分电流用于励磁，励磁电流是误差产生的根本原因^[23]。电流互感器的误差通常用比差 f 和角差 δ 描述，可表示为：

$$f = -\frac{I_2 I_m Z_2}{\mu \omega S N_1 N_2 I_1} \sin(\alpha + \varphi) \times 100\% \quad (1)$$

$$\delta = \frac{I_2 I_m Z_2}{\mu \omega S N_1 N_2 I_1} \cos(\alpha + \varphi) \times 3438 \quad (2)$$

式中： I_1 、 I_2 、 I_m 分别为一次、二次和励磁电流的有效值； ω 为角频率； μ 、 S 分别为铁心的磁导率和面积； α 为铁心材料损耗角； φ 为二次回路阻抗角； N_1 为一次绕组匝数； N_2 为二次绕组匝数。

由式(1)–(2)可知，电流互感器的误差影响因素主要有两点：一是二次阻抗和负载阻抗的大小，二是铁心材料及与制作工艺相关的参数^[24–26]。为提高电流互感器的精度可以采用增加二次绕组匝数、增大铁心截面积等方法，但同时也增大了电流互感器的体积和成本，限制了其在实际工程中的应用。

2 零磁通电流互感器传变特性分析

2.1 工作原理

本文研究的无源零磁通 CT 基于电势补偿，铁心结构为复合双铁心，一次绕组结构为穿芯式，其结构图和原理图分别如图 3–4 所示。图中，I 为主铁心，II 为开一气隙的辅助铁心； N_1 为一次绕组匝数，穿过 I、II 两个铁心， $N_1=1$ ； N_2 为二次绕组匝数，在两个铁心上同时绕制，但在铁心 II 上少绕 N_c 匝； N_3 为补偿绕组匝数，绕制在铁心 II 上； Z 为二次回路总阻抗； Z_p 为补偿绕组回路的总阻抗； i_3 为补偿绕组电流。

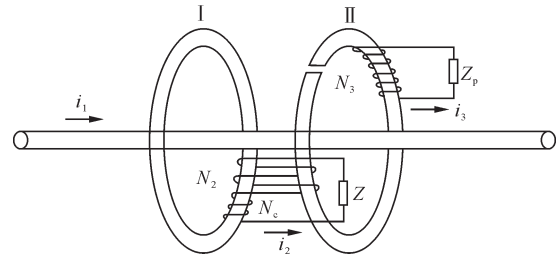


图 3 零磁通 CT 结构示意图

Fig. 3 Sketch diagram of zero-flux CT structure

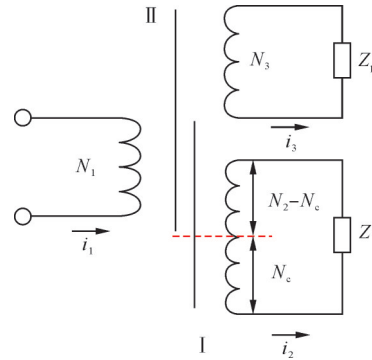


图 4 零磁通 CT 原理图

Fig. 4 Schematic diagram of zero-flux CT

根据安培环路定律，主铁心 I 的磁势平衡方程为：

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_{m1} N_1 \quad (3)$$

式中： I_1 为一次电流相量； I_2 为二次电流相量； I_{m1} 为互感器主铁心 I 的励磁电流相量。

同理，辅助铁心 II 的磁势平衡方程为：

$$I_1 N_1 + I_2 (N_2 - N_c) + I_3 N_3 = I_{m2} N_1 \quad (4)$$

式中： I_3 为补偿绕组回路的电流相量； I_{m2} 为辅助铁心 II 的励磁电流相量。

联立式(3)–(4)，忽略主铁心的励磁安匝

可得:

$$-i_2 N_c + i_3 N_3 = i_{m2} N_1 \quad (5)$$

补偿绕组的感应电动势 $\dot{E}_3$ 为:

$$\dot{E}_3 = i_3 Z_p \quad (6)$$

根据辅助铁心上的匝数比, 补偿绕组加到电流互感器二次回路的电动势 $\dot{E}_c$ 为:

$$\dot{E}_c = \frac{N_2 - N_c}{N_3} \dot{E}_3 = \frac{N_2 - N_c}{N_3} i_3 Z_p \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)可得:

$$\dot{E}_c = \frac{(N_2 - N_c) N_c}{N_3^2} i_2 Z_p + \frac{(N_2 - N_c) N_1}{N_3^2} i_{m2} Z_p \quad (8)$$

由于补偿绕组提供了额外的电势补偿, 因此电流互感器自身需要提供的感应电动势由 $\dot{E}_2'$ 减小为 $\dot{E}_2 - \dot{E}_c$ 。

$$\begin{aligned} \dot{E}_2' &= \dot{E}_2 - \dot{E}_c \\ &= i_2 \left[Z - \frac{(N_2 - N_c) N_c}{N_3^2} Z_p \right] - \frac{(N_2 - N_c) N_1}{N_3^2} i_{m2} Z_p \end{aligned} \quad (9)$$

如果忽略补偿绕组的励磁安匝, 有:

$$\dot{E}_2' \approx i_2 \left[Z - \frac{(N_2 - N_c) N_c}{N_3^2} Z_p \right] \quad (10)$$

由式(10)可知, 如果 $\dot{E}_2' = 0$, 则补偿绕组提供二次工作的全部电势, 而主铁心的感应电势为 0。此时需要满足:

$$Z = \frac{(N_2 - N_c) N_c}{N_3^2} Z_p \quad (11)$$

为满足式(11)需要选取合适的匝数和阻抗值, 特别地, 当 $N_c = N_3 = 1/2 N_2$ 时有:

$$Z_p \approx Z \quad (12)$$

根据电磁感应定律, 电流互感器的感应电动势与铁心磁通的关系为:

$$E = 4.44 f N \Phi_m \quad (13)$$

式中: E 为磁感应强度的有效值; f 为电流频率; N 为线圈匝数; Φ_m 为铁心感应的最大磁通。

由式(13)可知, 当感应电动势为 0 时铁心的磁通也为 0, 此时不用主铁心的励磁电流也能实现一次到二次的能量传递。

2.2 控制框图和传递函数

根据电磁感应定律, 二次回路的电势平衡方程为:

$$N_2 \frac{d\phi_1}{dt} + (N_2 - N_c) \frac{d\phi_2}{dt} = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (14)$$

式中: ϕ_1 为主铁心 I 中的磁通; ϕ_2 为辅助铁心 II 中的磁通; R_2 为二次回路的电阻; L_2 为二次回路的电感。

主铁心 I 和辅助铁心 II 的磁通变化可写为:

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \frac{\mu_1 N_1 S_1}{l_1} \frac{di_{m1}}{dt} \quad (15)$$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \frac{\mu_2 N_1 S_2}{l_2} \frac{di_{m2}}{dt} \quad (16)$$

式中: μ_1 为主铁心的磁导率; μ_2 为开气隙辅助铁心的等效磁导率; i_{m1} 、 i_{m2} 分别为铁心 I、II 励磁电流; S_1 、 S_2 分别为铁心 I、II 横截面积; l_1 、 l_2 分别为铁心 I、II 的平均磁路长度。

联立式(14)~(16)可得基于电势补偿的无源零磁通电流互感器的状态方程为:

$$\begin{aligned} &\frac{\mu_1 N_1 N_2 S_1}{l_1} s I_{m1}(s) + \frac{\mu_2 N_1 (N_2 - N_c) Z_p S_2}{Z_p l_2 - \mu_2 s N_3^2 S_2} s I_1(s) \\ &= \left(R_2 + s L_2 - \frac{\mu_2 (N_2 - N_c)^2 Z_p S_2}{Z_p l_2 - \mu_2 s N_3^2 S_2} \right) I_2(s) \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $I_{m1}(s)$ 、 $I_1(s)$ 、 $I_2(s)$ 分别为 i_{m1} 、 i_1 、 i_2 的 s 域形式。

由状态方程可画出控制框图如图 5 所示。

令:

$$a = \frac{\mu_1 N_2 S_1}{l_1} s \quad (18)$$

$$b = \frac{\mu_2 (N_2 - N_c) Z_p S_2}{Z_p l_2 + \mu_2 s N_3^2 S_2} s \quad (19)$$

$$\sigma = \frac{Z_p l_2 - \mu_2 s N_3^2 S_2}{\mu_2 (N_2 - N_c)^2 S_2 - (R_2 + s L_2) (Z_p l_2 - \mu_2 s N_3^2 S_2)} \quad (20)$$

将式(3)写为频域形式, 如式(21)所示。

$$I_2(s) = \frac{N_1 I_{m1}(s) - N_1 I_1(s)}{N_2} \quad (21)$$

将式(21)代入状态方程式(17), 消去 $I_2(s)$ 项并进一步化简整理可得电流互感器的误差传递函数 ε 为:

$$\varepsilon = f + j\delta = -\frac{N_1 I_{m1}}{N_1 I_1} \times 100\% = \frac{a\sigma N_2 - 1}{b\sigma N_2 + 1} \times 100\% \quad (22)$$

式中 a 、 b 、 σ 分别为与互感器的匝数、铁心磁导率、补偿阻抗、负载阻抗和频率相关的参数。可以看出, 基于电势补偿的无源零磁通电流互感器对比差和角差都有补偿效果, 选择合适的参数可以使电

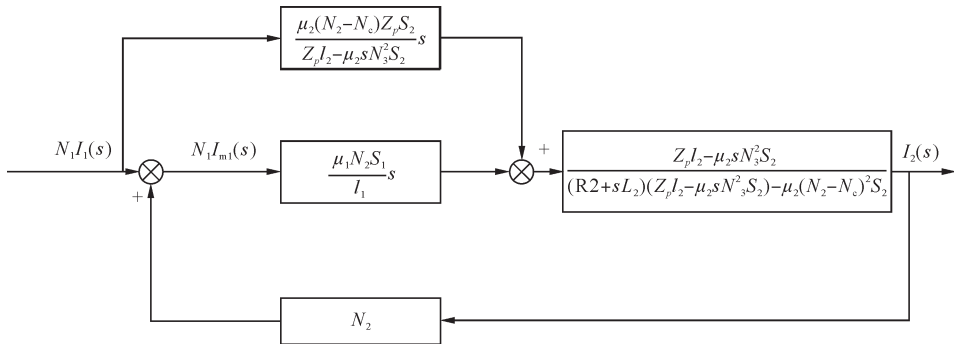


图5 零磁通 CT 控制框图

Fig. 5 Control block diagram of zero-flux CT

流互感器的误差接近 0，提高互感器的计量精度。

3 仿真分析

3.1 铁心材料选择

由第 2 节可知，通过二次绕组在两个铁心上的不等匝数绕制以及补偿回路的电势补偿，改变了主、辅铁心的磁通分布：主铁心近似零磁通，励磁电流几乎为 0；辅助铁心承担了主要的磁通以实现电磁能量一次到二次的传递。为此，要求主铁心有较高的初始磁导率，以保证在小励磁电流下的计量精度；要求辅助铁心有较高的饱和磁通密度和磁场强度，以保证工作点在线性区域内，避免进入饱和导致波形的畸变从而产生较大的误差。

常用的电流互感器铁心材料主要有硅钢、超微晶以及坡莫合金，材料的磁性能如表 1 所示^[27]。

表 1 常用电流互感器铁心材料磁特性参数

Tab. 1 Magnetic characteristic parameters of commonly used current transformer core materials

铁心材料	初始磁导率/ (kH·m ⁻¹)	最大磁导率/ (kH·m ⁻¹)	饱和磁密度/T
硅钢	1.2	40	2.00
超微晶	4~80	600	1.25
坡莫合金	5~80	600	0.75

硅钢材料虽然具有较高的饱和磁密度，但是初始磁导率和最大磁导率均较低，不适合制作高精度的电流互感器。根据参考文献[17]，在 0~0.012 T 的小磁密范围内坡莫合金的磁导率高于超微晶材料，而超微晶材料的饱和磁密度性能优于坡莫合金。因此，对应于主、辅铁心的工作状态，选用坡莫合金作为主铁心材料，而选用超微晶合金作为辅助铁心材料，以此保证电流互感器的精度。

3.2 建模和仿真结果

在 Ansys Maxwell 平台根据电流互感器结构图搭建有限元仿真模型如图 6 所示。

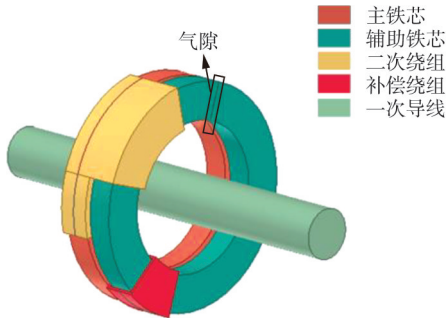


图6 零磁通 CT 的仿真模型

Fig. 6 Simulation model of zero-flux CT

电流互感器两个铁心参数一致，同轴设置，辅助铁心开一 0.1 mm 气隙；导线选用型号为 JL/G1A-500/45 的 10 kV 架空线^[28-31]，穿心而过。模型的参数如表 2 所示，二次回路功率因数为 0.8，额定容量为 5 VA。

电流互感器额定工况下的铁心磁场分布云图如图 7 所示。可以看出，主铁心的磁通密度数量级为 10⁻³，辅铁心的磁通密度数量级为 10⁻¹，两者相差 2 个数量级，说明通过二次绕组在两个铁心上的不均匀绕组以及补偿回路的补偿作用，实现了主、辅铁心磁通的重新分配：主铁心磁通接近于 0，辅助铁心承担了主要的工作磁通，以此来提高电流互感器的计量精度。

对导线施加不同的激励，仿真获取二次电流信息。电流互感器在大电流工况下的仿真波形如图 8 所示，可以看出，即使一次电流为额定值的 200%，电流互感器仍工作在铁心材料的线性区范围内，其二次波形仍能保持标准的正弦波形，保证了在电流

表 2 仿真模型参数

Tab. 2 Simulation model parameters

参数	数值
铁心内径 R_1/mm	60
铁心外径 R_2/mm	90
铁心高度 H/mm	20
导线半径 R_3/mm	30
一次额定电流 I_N/A	500
一次匝数 $N_1/\text{匝}$	1
二次匝数 $N_2/\text{匝}$	100
主辅铁心二次匝数差 $N_2'/\text{匝}$	50
补偿绕组匝数 $N_3/\text{匝}$	50
二次回路阻抗 Z/Ω	0.2
补偿回路阻抗 Z_p/Ω	0.2

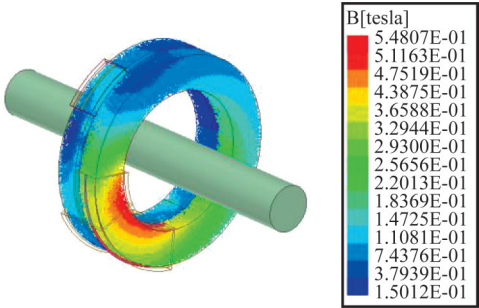


图 7 零磁通 CT 铁心磁场云图

Fig. 7 Magnetic field cloud map of the core of zero-flux CT

越限时的计量精度。

以常规单铁心电流互感器作为对比(去除辅助铁心和补偿绕组,铁心材料为坡莫合金且其余结构参数相同),分别选取在 0.1%~200% 额定电流范围内的数据点进行仿真。定义一次电流与额定电流的比值 I_1/I_N 为 K ,CT 的比差和角差结果如表 3 所示,表中 f 为比差, δ 为角差。为更直观比较两种电流互感器的比差和角差特性,绘制误差比较图如图 9 所示(比差取绝对值)。

可以看出,常规单铁心电流互感器在小电流和大电流工况下均出现误差越限的情况,此时电流互感器的精度下降,产生较大的计量误差。而本文提出的复合铁心零磁通电流互感器在 0.1%~200% 范围均能较好地补偿比差和角差,具有较高的计量精度。表 4 列出了 GB/T 20840.2—2014《互感器 第 2 部分:电流互感器的补充技术要求》^[21]中规定的 0.1 级电流互感器精度指标,本文所提方案满足比差极限 $\pm 0.1\%$ 、角差极限 $\pm 5'$,符合 0.1 级电流互感器的精度要求。

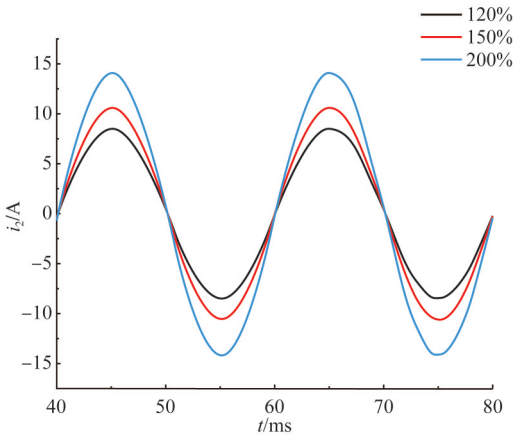


图 8 零磁通 CT 大电流工况下的二次电流波形

Fig. 8 Secondary current waveforms of zero flux CT under high current conditions

表 3 电流互感器的仿真误差

Tab. 3 Simulation errors of CT

$K/\%$	常规单铁心 CT		零磁通 CT	
	$f/\%$	$\delta/(^{\circ})$	$f/\%$	$\delta/(^{\circ})$
0.1	-0.84	28.1	-0.093	3.24
0.5	-0.76	24.3	-0.085	2.95
1	-0.69	19.4	-0.076	2.47
5	-0.53	11.7	-0.066	2.11
20	-0.25	6.87	-0.051	1.98
100	-0.16	4.32	-0.037	1.55
120	-0.17	3.48	-0.031	1.34
200	-0.26	12.7	-0.027	1.21

4 实验验证

4.1 实验装置及原理

根据前文第 2 节研究的基于电势补偿的无源零磁通电流互感器原理,参照 Ansys 仿真模型中的参数,设计的 500 A/5 A 电流互感器实物图如图 10 所示,主铁心和辅助铁心分别采用坡莫合金和超微晶材料。

实验原理图如图 11 所示,试验设备参数如下。

- 1)升流器,输出范围: 0~1 000 A。
- 2)标准互感器,量程: 0~1 000 A,准确度: 0.05%。
- 3)0.1 Ω 负载电阻。
- 4)互感器校验仪,准确度: 0.01%。

4.2 实验结果及分析

在电流互感器一次侧分别施加 0.1%~200% 的

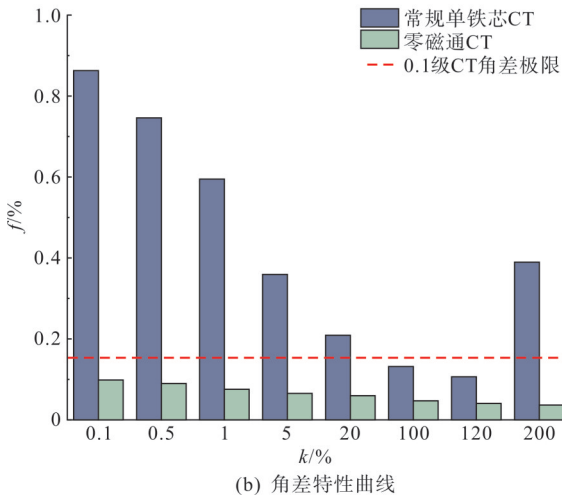
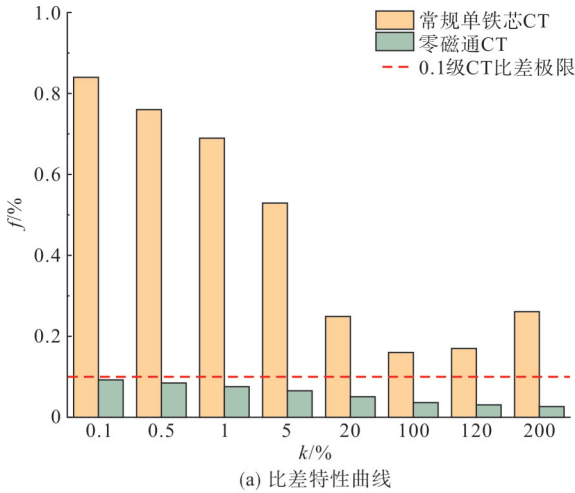


图 9 常规 CT 和零磁通 CT 的误差特性
Fig. 9 Error characteristics of conventional CT and zero-flux CT

表 4 GB 标准下 0.1 级电流互感器精度要求								
Tab. 4 Accuracy requirements of 0.1 CT under GB standard								
准确级	下列额定电流百分数下的 比差/±%				下列额定电流百分数下的 角差/±(′)			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	15	8	5	5

额定电流，测得电流互感器的比差和角差如表 5 所示，误差特性如图 12 所示(比差取绝对值)。

从表 5 可以看出本文提出的基于电势补偿的零磁通电流互感器在 0.1%~200% 的宽量程电流范围内均能很好地补偿比差和角差，与仿真结果相吻合，均能满足 0.1 级电流互感器的精度要求，提高了电能计量的准确性。

考虑 CT 在实际电力系统中的应用，由于采用

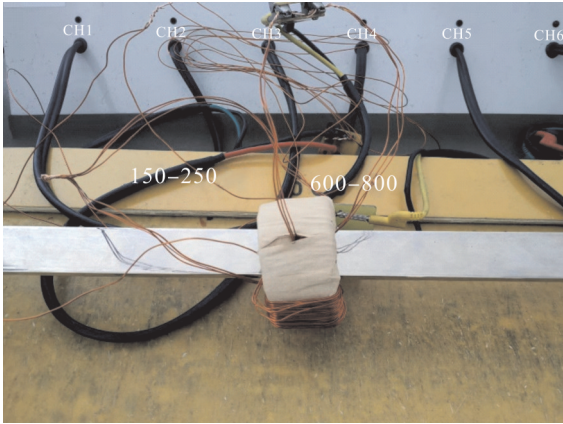


图 10 电流互感器实物图
Fig. 10 Physical diagram of CT

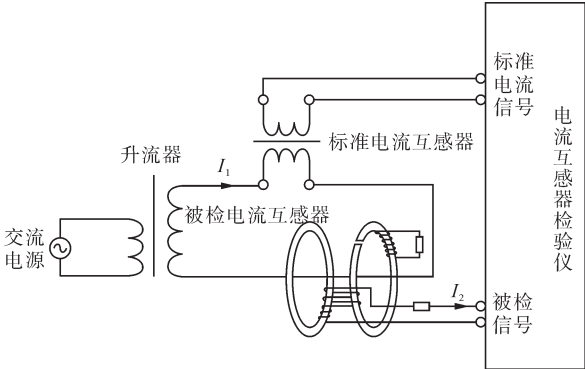


图 11 CT 误差性能测试原理图
Fig. 11 Schematic diagram of CT error performance testing

表 5 电流互感器的实验误差		
Tab. 5 Experimental errors of CT		
K/%	f/%	δ/(′)
0.1	-0.095	4.34
0.5	-0.089	3.68
1	-0.081	3.24
5	-0.074	3.88
20	-0.059	3.47
100	-0.044	2.81
120	-0.041	2.35
200	-0.037	2.21

双级结构增加了 CT 的体积，因此在一些空间受限或密集场所可能无法安装，且较大的体积会增加安装和搬运的难度，可能需要更强的支撑结构和固定设备，同时额外的辅助铁心带来更高的生产成本也对该种互感器的推广起到限制作用。对此，未来应着重从减小铁心体积和降低生产成本两个方面对电流互感器的结构进行改进。

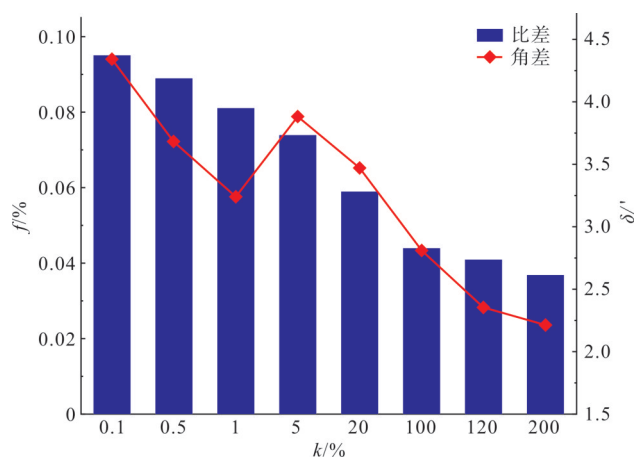


图 12 零磁通 CT 实验误差特性图

Fig. 12 Error characteristic diagrams of zero-flux CT experiment

5 结语

本文提出了一种基于电动势补偿的无源零磁通复合铁心 CT 结构, 分析了 CT 的工作原理, 推导了 CT 的传递函数和控制框图。仿真分析和实验结果表明该结构电流互感器在 0.1%~200% 的一次额定电流范围内均满足 0.1 级的精度要求, 兼具高精度和宽量程, 为新能源大规模并网背景下电力系统中宽动态变化范围的电流信号测量提供了一种可能的解决方案。

参考文献

- [1] 于海波, 林繁涛, 白静芬, 等. 新能源发电并网中电能计量问题的研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(11): 57-60.
YU Haibo, LIN Fantao, BAI Jingfen, et al. Studies on the power metering problem for grid-connected new energy [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(11): 57-60.
- [2] 张春强, 刘经昊, 易丁, 等. 分布式电源并网负载特性对电能计量的影响研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(8): 75-80.
ZHANG Chunqiang, LIU Jinghao, YI Ding, et al. Research on the effect of the distributed power grid-connected load property on electric energy metering [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(8): 75-80.
- [3] 严勤, 李世松, 叶远誉, 等. 直流偏磁下电流互感器测量特性分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 144-148.
YAN Qin, LI Shisong, YE Yuanyu, et al. Analysis of measurement characterization of current transformers with DC magnetic bias [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 144-148.
- [4] 李鹏, 黄新波, 赵隆, 等. 智能输电线路状态监测代理的研究与设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 153-161.
LI Peng, HUANG Xinbo, ZHAO Long, et al. Research and design of transmission line condition monitoring agent [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 153-161.
- [5] 金能, 梁宇, 邢家维, 等. 提升配电网线路保护可靠性的远方保护及其与就地保护优化配合方案研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(24): 5221-5233.
JIN Neng, LIANG Yu, XING Jiawei, et al. Research on remote protection and the optimized coordination scheme of local-remote protection to enhance the protection reliability of the line in distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5221-5233.
- [6] 任磊, 龚春英. 一种电力电子变换器功率 MOSFET 阈值电压在线监测方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3627-3634.
REN Lei, GONG Chunying. An on-line monitoring method for threshold voltage of the power MOSFET in power electronic converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3627-3634.
- [7] 张鹏, 王玮, 徐丙垠, 等. 基于自适应功率输出控制的电流互感器取能电源设计方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 194-200.
ZHANG Peng, WANG Wei, XU Bingyin, et al. Design method of energy-gaining power supply for current transformer based on self-adaptive power output control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 194-200.
- [8] 贺小艳. 降低电流互感器误差的措施分析[J]. 仪器仪表用户, 2019, 26(6): 23-25.
HE Xiaoyan. Analysis of measures to reduce the error of current transformer [J]. Instrumentation, 2019, 26(6): 23-25.
- [9] 刘杰, 裴杰, 田明, 等. 基于支持向量机的电流互感器非线性校正方法研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 130-138.
LIU Jie, PEI Jie, TIAN Ming, et al. Research on nonlinear correction method of current transformer based on support vector machine [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(10): 130-138.
- [10] 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.
- [11] 吴晋波, 刘志豪, 洪权, 等. 零磁通电流互感器二次信号现场模拟方法[J]. 电力电子技术, 2021, 55(2): 57-59, 88.
WU Jinbo, LIU Zhihao, HONG Quan, et al. Field simulation method for secondary signal of zero-flux current transformer [J]. Power Electronics, 2021, 55(2): 57-59, 88.
- [12] 程志远, 隋立程, 宋凯, 等. 谐振补偿式电流互感器取能方法的研究[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4896-4902.
CHENG Zhiyuan, SUI Licheng, SONG Kai, et al. Resonance compensation current transformer energy extraction [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4896-4902.
- [13] HOBSON A. The zero-flux current transformer [J]. Electrical Engineering, 1953, 72(4): 608-615.
- [14] LI Y, WANG Y, HUANG L, et al. Research and implementation of high precision full range analog acquisition system based on zero flux current transformer [C]//2023 4th International Conference on Mechatronics Technology and Intelligent Manufacturing, May 26-28, 2023, Nanjing, China. New York: IEEE, 543-547.
- [15] ALDO B, ANNALISA L. Low-cost prototype for the electroni-

- cally compensation of current transformers [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(6): 641 – 647.
- [16] 陈雷. 基于零磁通的有源小电流互感器的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- [17] 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.
- [18] 鲍海, 艾欣, 杨以涵. 双级零磁通电流互感器状态反馈控制研究 [J]. 电工技术学报, 2000, 15(2): 12 – 14.
BAO Hai, AI Xin, YANG Yihan. Research on states feedback control of two-stage zero flux current transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(2): 12 – 14.
- [19] 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.
- [20] 冯娟, 吴宏斌, 吴彬, 等. 双铁心电流互感器的传变特性仿真研究 [J]. 变压器, 2022, 59(11): 35 – 41.
FENG Juan, WU Hongbin, WU Bin, et al. Simulation analysis on transfer characteristics of two cores current transformer [J]. Transformer, 2022, 59(11): 35 – 41.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 互感器第2部分: 电流互感器的补充技术要求: GB/T 20840.2—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 9.
- [22] 谭炳源, 卢继平, 江波, 等. 直流偏磁对计量用电流互感器的性能影响分析 [J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1408 – 1413.
TAN Bingyuan, LU Jiping, JIANG Bo, et al. Analysis of influence of DC bias on instrument current transformer [J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1408 – 1413.
- [23] 毛安澜, 王欢, 王晓琪, 等. 直流偏磁对电流互感器性能影响的研究 [J]. 电测与仪表, 2013, 50(10): 69 – 72.
MAO Anlan, WANG Huan, WANG Xiaoqi, et al. Research on performance of current transformer affected by DC bias [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(10): 69 – 72.
- [24] 卢树峰, 蔡霖霖, 周赣, 等. 直流偏磁对电流互感器的作用机理研究 [J]. 电测与仪表, 2014, 51(14): 6 – 11.
LU Shufeng, CAI Jilin, ZHOU Gan, et al. Action principal of DC magnetic bias to current transformer [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(14): 6 – 11.
- [25] 赵震宇, 朱亮, 祝婧, 等. 电流直流分量对低压电流互感器计量特性影响的试验研究 [J]. 电测与仪表, 2016, 53(20): 44 – 49.
ZHAO Zhenyu, ZHU Liang, ZHU Jing, et al. Experimental study on the influence of current DC component on the metrological characteristics of low-voltage current transformer [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(20): 44 – 49.
- [26] 李春来, 汤晓宇, 黄业安, 等. 计量用TA在直流偏磁条件下传变特性的实验与分析 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 143 – 145, 149.
LI Chunlai, TANG Xiaoyu, HUANG Yean, et al. Measurement and analysis of transfer characteristic for metering CT with DC magnetic bias [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 143 – 145, 149.
- [27] 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.
- [28] 熊魁, 岳长喜, 李登云, 等. 高磁导率比双铁心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.
- [29] 胡琛, 张竹, 陈刚, 等. 直流偏磁下计量用电流互感器在线补偿技术研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2021(4): 40 – 44.
HU Chen, ZHANG Zhu, CHEN Gang, et al. Research on online compensation technology of DC magnetic bias for measuring current transformer [J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(4): 40 – 44.
- [30] 赵明敏, 杨志超, 李谦, 等. 电子式互感器采集单元的芯片级抗扰试验及防护技术 [J]. 南方电网技术, 2023, 17(3): 107 – 114.
ZHAO Mingmin, YANG Zhichao, LI Qian, et al. Chip level immunity test for electronic transformer acquisition unit and its protection technology [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(3): 107 – 114.
- [31] 王克蔚, 喻锟, 曾祥君, 等. 一种隧道磁电阻电流传感器的旁路自校准技术 [J]. 南方电网技术, 2024, 18(9): 23 – 30.
WANG Kewei, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Bypass self-calibration technique for tunnel magnetoresistance current sensor [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(9): 23 – 30.

收稿日期: 2023-03-01; 网络首发日期: 2024-02-20

作者简介:

张鼎衡(1987), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电能计量装置运行管理与技术应用, 13822289520@139.com;

杨路(1991), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电能计量新技术, yanglu910715@126.com;

王保帅(1994), 男, 通信作者, 工程师, 硕士, 研究方向为互感器技术, wangbs@csg.cn。