

新型电力系统下电流互感器抗直流性能和测量范围优化设计研究

翟晓卉, 孙凯, 代燕杰, 董贤光, 邢宇
(国网山东省电力公司营销服务中心(计量中心), 济南 250000)

摘要: 为应对新型电力系统在高比例新能源并网条件下电流互感器计量范围受限、直流偏磁导致误差增大的问题,开展了宽量程、抗直流偏磁电流互感器的关键技术研究。研究以电磁式电流互感器为对象,通过理论分析直流分量对铁心磁化特性及计量误差的影响机理,提出一种由硅钢片与纳米晶复合而成的多微气隙磁心结构,并基于气隙比对剩磁、饱和、磁导率和非线性的定量关系确定四个 0.02 mm 微气隙;利用 ANSYS Maxwell 对磁通分布进行仿真,验证其在 10% 直流分量扰动下的稳定性;据此研制 HL(D)-500/5 样机,并按 0.2SS/2 级准确度要求完成 0.1% ~ 200% 额定电流范围内的工频误差测试及叠加 10% 直流分量的误差测试。结果表明,所提出的复合多微气隙方案使互感器在工频条件下全量程比差 $\leq 0.061\%$ 、角差 $\leq 4.3'$,满足 0.2 SS 级;在直流扰动工况下仍保持 0.2 级准确度,显著优于传统结构。所设计实现了宽动态范围与抗直流偏磁的协同优化,为新型电力系统提供了高精度、高可靠的电流计量技术支撑。

关键词: 电流互感器; 新型电力系统; 计量; 误差; 宽量程

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.05.018

中图分类号: TM933

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)05-0175-09

Research on anti-DC performance and measurement range optimization design of current transformer in novel power system

ZHAI Xiaohui, SUN Kai, DAI Yanjie, DONG Xianguang, XING Yu

(Marketing Service Center(Metering Center), State Grid Shandong Electric Power Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: In order to cope with the novel power system in a high proportion of new energy grid-connected conditions of current transformer metering range is limited, DC bias magnetization caused by the increase in error, this paper carries out a wide-range, anti-DC bias current transformer key technology research. The research takes the electromagnetic current transformer as the object, through the theoretical analysis of the DC component on the magnetization characteristics of the iron core and the measurement error of the influence mechanism, puts forward a kind of multi-micro air-gap magnetic core structure made of silicon steel sheet and nanocrystalline composite, and based on the air-gap ratio on the remanent magnetism, saturation, permeability and non-linear quantitative relationship to determine the four 0.02 mm micro-air-gap; the flux distribution is simulated using ANSYS Maxwell to verify its stability under 10% DC component perturbation; accordingly, the HL(D)-500/5 prototype is developed, and the IF error test in the range of 0.1% ~ 200% of the rated current and the error test of superimposed 10% DC component are completed in accordance with the accuracy requirement of 0.2SS/2 level. The results show that the proposed composite multi-micro air-gap scheme enables the transformer to satisfy the 0.2SS level with the full-range ratio difference of $\leq 0.061\%$ and the angular difference of $\leq 4.3'$ under the IF condition; and still maintains the 0.2 level accuracy under the DC disturbance condition, which is significantly superior than that of the traditional structure. The proposed design achieves synergistic optimization of wide dynamic range and DC bias rejection, providing high-precision and highly reliable current measurement technology to support novel power system.

Keywords: current transformer, novel power system, metering, error, wide range

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(52063324000B)

0 引言

为促进我国“双碳”战略目标的实现,近年来国家多项政策部署中都有提到需加快构建清洁低碳安全高效的能源体系,全面推进风电、太阳能发电大规模开发,提高电网对高比例可再生能源的消纳和调控能力,构建以新能源为主体的新型电力系统^[1-5]。新能源普遍具有较强的随机性、波动性和间歇性等特点,并且大规模新能源并网会引入大量的整流器和换流器等电力电子元件,大规模电力电子元件的应用会使系统运行过程中出现直流分量,间接导致电流互感器产生直流偏磁,从而影响互感器的计量准确性^[6-13]。

光伏、风电等新能源系统通常会受到光照强度和风力大小的影响,导致其发电侧电流波动非常大,使得大规模新能源并网场景中互感器工作的电流范围越来越宽且存在谐波分量^[14-18]。统计数据表明,随着居民及工业用户台区用电量的快速发展和负荷不同时段变化的较大波动,不同用电负荷的峰谷差异可达 30 倍以上,直接导致电流互感器长时间在低于额定电流 30% 状态下或处在超负荷状态下运行^[19-25]。在 DL/T 448—2016《电能计量装置技术管理规程》和 DL/T 5137—2001《电测量及电能计量装置设计技术规程》中对电流互感器额定一次电流的规定,应保证其在正常运行中的实际负荷电流达到额定值的 60% 左右,至少应不小于 30%,没有规定谐波分量耐受度。

随着新能源发电规模的不断扩大,传统 S 级电流互感器在宽动态范围电能计量场景中已呈现出明显的量程不足问题。针对大规模新能源并网条件下电能精准计量的技术需求,我国已开展新型宽量程电流互感器的研究工作,旨在实现更宽测量范围内更高准确度的电流测量能力。国家电网有限公司企业标准 Q/GDW 10572.1—2020《计量用互感器技术规范 第 1 部分:低压电流互感器》对宽量程低压电流互感器作出了明确定义:其测量范围应覆盖额定一次电流的 0.1% ~ 200%,宽量程低压电流互感器准确度分为 0.2SS 级和 0.5SS 级,基本误差测量点为额定电流的 0.1%、0.5%、1%、5%、20%、100%、120% 和 200%。

针对新型电力系统中宽动态范围与抗直流分量下电流互感器精准计量的迫切需求,当前研究聚焦于互感器宽范围或者是抗直流偏磁等单一功能技术的革新,旨在通过优化电流互感器的设计策略

以提升其适应性。具体而言,在宽动态范围测量技术方面,现有研究主要通过优化一次绕组串并联配置的方式实现变比范围的两倍扩展,但该方案在应对新能源并网系统特有的极端电流波动工况时仍存在明显的技术局限性;在抗直流偏磁技术方面,虽然双铁心结构和磁阀式设计等方法能够在一定程度上抑制直流分量影响,但这些方案在工频条件下的计量精度仍难以满足高精度计量要求。

因此,本文针对新能源规模化并网所引入的间歇性、冲击性、非线性等宽范围含直流分量的动态特性负荷对电能计量准确性影响的问题进行了研究^[12-14]。通过理论研究、技术创新、装备研制及优化,致力于形成一套适用于新能源规模化并网环境的电力电流互感器,实现在宽范围和直流偏磁条件下均能实现误差最小化。

1 电流互感器误差及影响量分析

1.1 电流互感器结构和误差

在配电网系统中,电磁式电流互感器作为关键测量设备被广泛应用。该类互感器基于电磁感应原理工作,其基本结构与变压器类似,主要由闭合铁心和绕组系统构成。具体而言,其一次绕组采用低匝数设计,直接串联于被测线路中实现电流采样;二次绕组则采用多匝数结构,通常接入测量仪表或保护装置回路,通过电磁耦合作用将一次侧大电流按比例转换为二次侧小电流,从而实现电流的间接测量与电气隔离。其特点如下:一次绕组与被测电路串联,匝数很少,流过的电流 I_1 是被测电路的负荷电流,与二次侧电流 I_2 无关;二次绕组与测量仪表和保护装置的电流线圈串联,匝数会按变比成比例变化,二次绕组匝数为一次绕组的若干倍。测量仪表和保护装置的电流线圈阻抗很小,正常情况下,电流互感器近于短路状态运行。

电流互感器的额定一、二次电流 I_{N1} 、 I_{N2} 之比,称为电流互感器的额定互感比,用 K_i 表示。与变压器相同, K_i 近似与一、二次绕组的匝数 N_1 、 N_2 成反比,即:

$$K_i = \frac{I_{N1}}{I_{N2}} \approx \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

因为 I_{N1} 、 I_{N2} 已标准化,所以 K_i 也已标准化。

电磁式电流互感器的误差由励磁电流和铁心耗损等因素导致,其误差包含比值差 ε_i 和相位误差 δ_i 。电流误差(比值差):将二次电流按额定电流比折算到一次后,与实际一次电流不等造成了电流互

传感器的比值误差。比值误差的百分数用式(2)表示。相位误差:电流互感器一次、二次电流相量的相角差,如式(3)所示。

$$\varepsilon_i = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} \times 100\% \quad (2)$$

$$\delta_i = \phi_1 - \phi_2 \quad (3)$$

式中: K_n 为额定电流比; I_1 为实际一次电流; I_2 为二次电流测量值; ϕ_1 为一次电流相位; ϕ_2 为二次电流相位。

1.2 电流互感器误差的影响量分析

直流偏磁对电磁式电流互感器计量性能的影响机理可归纳如下:当系统存在直流分量时,铁磁材料制成的互感器铁心中将产生直流偏置磁通。该直流磁通与工频交流磁通相互叠加,导致铁心工作点发生偏移,具体表现为:1)磁化特性非线性效应:随着直流分量增大,直流磁通密度呈单调递增趋势,使铁心逐渐进入饱和和工作区;2)电流误差(比差)特性变化:在直流偏磁作用下,互感器比差呈现负向偏移特性,其绝对值随直流分量增加而单调递增;(3)相位误差(角差)特性变化:相位误差则表现为正向偏移,其绝对值随直流分量增加而单调递增。

直流偏磁是导致电流互感器铁心磁饱和的主要诱因,而铁心磁饱和会严重影响其计量精度。要实现直流偏磁条件下电流的准确传变,关键在于提升铁心的抗饱和性能。针对这一问题,工程上常采用开气隙铁心的设计方案:通过引入气隙可有效提高铁心的抗饱和能力。气隙的存在能够显著增大铁心的饱和磁通密度阈值,从而改善测量准确性。同时,该结构设计还能明显降低由磁化曲线非线性引起的测量误差。

2 适用于新型电力系统的复合型多微气隙磁心设计方案

针对新型电力系统中宽动态范围测量及直流分量影响下的精准计量需求,传统单铁心结构或单一气隙设计的电流互感器已显现出明显的技术局限性。为解决这一问题,本研究基于传统单铁心气隙结构,创新性地提出一种复合型多微气隙磁心结构的电流互感器优化设计方案。该设计可以满足工频交流下0.1%~200% I_n 的测量范围,准确度等级达到0.2SS,同时能满足含直流分量下0.2级测量准确度的要求。

2.1 气隙的确定分析

根据前面的分析可知,气隙的存在会显著改变

铁心的电磁特性。基于气隙铁心磁化模型,本节将从理论上系统分析气隙对铁心四个关键特性的影响:剩磁特性、饱和特性、磁导率和非线性。其中,气隙比作为核心设计参数,是指铁心中非磁性气隙间隙与磁路总长度的比值,其大小直接影响互感器的线性度、饱和特性和测量精度。

本节将重点来分析所提出的单复合磁心结构电流互感器的铁心气隙。铁心磁化特性曲线如图1所示,其中横坐标表示磁场强度 H ,纵坐标为磁感应强度 B 。

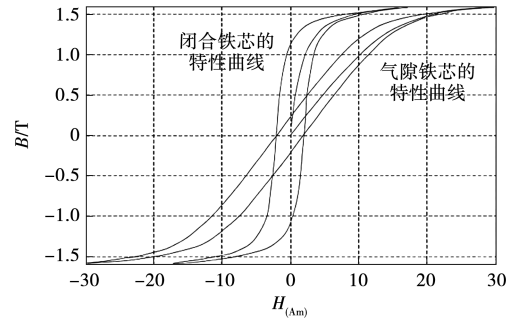


图1 铁心磁化特性曲线对比图

Fig. 1 Comparison of magnetization characteristic curves of iron core

1) 气隙对剩磁特性的影响。

如图1所示,由于气隙的存在,铁心的剩磁将显著降低,下面从极限磁滞回环对应的剩磁来理论分析气隙对剩磁特性的影响。

设闭合铁心的极限磁滞回环的上行部分为:

$$H_{cic} = f(B) \quad (4)$$

式中: H_{cic} 为闭合铁心磁场强度; B 为磁感应强度。利用微元法,在 $H=0$ 的微小领域内,函数 $H_{cic} = f(B)$ 可以认为是线性的,即在该微小领域内,函数可表示为:

$$H_{cic} = kB + n \quad (5)$$

式中: k 为铁心材料磁导率; n 为铁心的初始磁化强度。

根据前面的分析知,当气隙比为1时,气隙铁心的极限磁滞回环的上行部分为:

$$H_{agic} = f(B) + \lambda \frac{B}{\mu_0} \quad (6)$$

即:

$$H_{agic} = kB + n + \lambda \frac{B}{\mu_0} \quad (7)$$

式中: H_{agic} 为气隙铁心磁场强度; $f(B)$ 为气隙铁心的非线性磁化函数; λ 为气隙比; μ_0 为真空磁导率。

设磁场强度 $H=0$ 时的磁感应强度即为磁滞回环对应的剩磁 B_r , 所以闭合铁心和气隙铁心的剩磁关系式为:

$$B_{\text{agic}} = \frac{B_{\text{cic}}}{1 + \frac{\lambda}{m\mu_0}} \quad (8)$$

式中: B_{cic} 为闭合铁心的剩磁; B_{agic} 为气隙铁心的剩磁; m 为磁化率, 为衡量材料在磁场中被磁化程度的物理量, 磁化率描述了材料对磁场的响应能力, 是材料本身的一种属性。从上式可以看出, 闭合铁心的剩磁大于气隙铁心的剩磁, 而且气隙比越大, 气隙铁心的剩磁越小。

2) 气隙对饱和特性的影响。

从图1可知, 由于气隙的存在, 铁心的抗饱和能力增强, 下面利用磁化曲线从理论上分析气隙对饱和特性的影响。设铁心本身的饱和磁感应强度为 B_s , 则可求出闭合铁心和气隙铁心的饱和磁场强度关系式为:

$$H_{\text{agic}} = H_{\text{cic}} + \lambda \frac{B_s}{\mu_0} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 气隙铁心的饱和磁场强度大于闭合铁心的饱和磁场强度, 而且气隙比越大, 气隙铁心的饱和磁场强度越大。

3) 气隙对磁导率的影响。

由图1也可以看出, 相较于闭合铁心, 气隙铁心的磁导率会显著减小, 而磁滞回环的线性度会变好, 为了从理论上详细分析气隙对磁性能的影响, 下面利用微元法, 将磁化曲线分为很多微小的部分段, 在每个部分段可认为是线性的, 如图2所示。

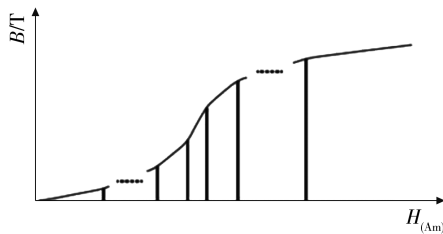


图2 基于微分法处理的铁心磁化特性曲线图

Fig. 2 Magnetization characteristic curve of iron core based on differential method

对于闭合铁心, 在非饱和区内, 设磁导率最大的部分段的磁导率为 k_{max} , 则其表达式可写为:

$$y = k_{\text{max}}x + a_1 \quad (10)$$

设磁导率最小的部分段的磁导率为 k_{min} , 则其表达式可写为:

$$y = k_{\text{min}}x + b_1 \quad (11)$$

则对于气隙比为1的气隙铁心, 磁导率最大的部分段的表达式变为:

$$y = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu_0}k_{\text{max}}}k_{\text{max}}x + a_2 \quad (12)$$

磁导率最小的部分段的表达式变为:

$$y = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu_0}k_{\text{min}}}k_{\text{min}}x + b_2 \quad (13)$$

式中: a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为对应磁导率线性段的截距。

所以, 气隙的存在会使磁导率减小, 并且气隙越大, 磁导率减小得越多。同时, 对比磁导率最大部分段和磁导率最小部分段的相对变化有:

$$1 - \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu_0}k_{\text{max}}} = \frac{\Delta k_{\text{max}}}{k_{\text{max}}} > \frac{\Delta k_{\text{min}}}{k_{\text{min}}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu_0}k_{\text{min}}} \quad (14)$$

式中: Δk_{max} 为非饱和区域内磁导率最大部分磁导率变化量; Δk_{min} 为非饱和区域内磁导率最小部分磁导率变化量即磁导率越大的部分段, 磁导率减小的越多。

4) 气隙对非线性的影响。

根据上面的分析容易得到, 在非饱和区内, 闭合铁心磁导率线性度 δ_1 为:

$$\delta_1 = \left(1 - \frac{k_{\text{min}}}{k_{\text{max}}}\right) \times 100\% \quad (15)$$

带气隙铁心磁导率线性度 δ_2 为:

$$\delta_2 = \left[1 - \frac{k_{\text{min}}(\mu_0 + \lambda k_{\text{max}})}{k_{\text{max}}(\mu_0 + \lambda k_{\text{min}})}\right] \times 100\% \quad (16)$$

比较两种情况线性度有:

$$\left[1 - \frac{k_{\text{min}}(\mu_0 + \lambda k_{\text{max}})}{k_{\text{max}}(\mu_0 + \lambda k_{\text{min}})}\right] \times 100\% < \left(1 - \frac{k_{\text{min}}}{k_{\text{max}}}\right) \times 100\% \quad (17)$$

即气隙铁心磁化曲线的线性度比闭合铁心的线性度好。对于气隙铁心, 气隙比 λ 越大, 线性度 δ 越趋向于零, 即线性度越好。

5) 气隙对误差的影响。

基于前文理论分析可知, 铁心开气隙将导致其磁特性产生显著变化, 进而影响互感器的误差特性。下面根据误差函数分析气隙对互感器误差的具体影响。

根据气隙对磁导率的影响分析可知, 当气隙比为 λ 时, 闭合铁心在某部分段的磁导率 k 会变成为

$(1/(1+(\lambda/\mu_0)k))k$,再结合闭合铁心构成的电流互感器参数,可以作出气隙对电流互感器在额定电流时其误差大小影响的曲线图,如图 3~4 所示。

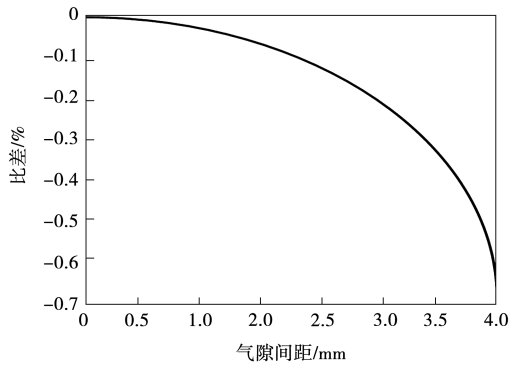


图 3 比值差随气隙变化曲线图

Fig. 3 Plot of variation of specific difference with air gap

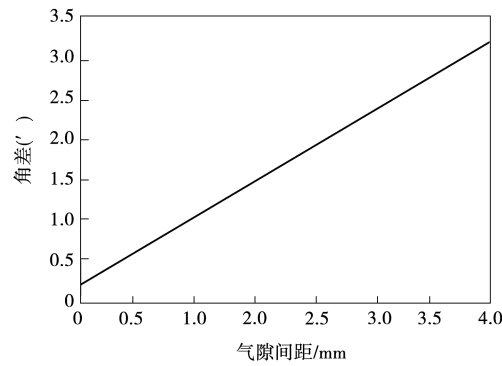


图 4 相位差随气隙变化曲线图

Fig. 4 Plot of phase difference with air gap variation

根据图 3 和图 4 所示数据分析可知,随着气隙比的增大,电流互感器的比差呈现明显的负向增大趋势,同时相位差则表现出显著的正向增大特性。这一现象表明:气隙比对电流互感器的传变特性具有重要影响。该结论为电流互感器的优化设计提供了重要的实验依据。

通过上述理论分析整体变化趋势,结合仿真进行多次对比验证,在不同直流偏磁下带气隙铁心电流互感器误差试验结果如表 1 所示。

从表 1 中试验数据可知,当直流幅值为 0 时,铁心无气隙与有气隙相比,其比差与角差变化不大;当直流幅值为 150 A 时,铁心无气隙时,其比差和角差分别为 -35.6% 和 25°。铁心加入小气隙后,其比差和角差变为 -21.5% 和 18°,较无气隙时分别降低了 39.6% 和 28%。铁心加入大气隙后,其比差和角差变为 -2.6% 和 9°,较无气隙时分别降低了

92.7% 和 64%;当直流幅值增加到 300 A 时,铁心无气隙时的比差和角差分别为 -72.2% 和 47°。铁心加入小气隙时,其比差和角差变为 -59.5% 和 38°,较无气隙时分别降低了 17.6% 和 19.1%。铁心加入大气隙时,其比差和角差分别为 -27.6% 和 26°,较无气隙时分别降低了 61.4% 和 44.7%。通过上述数据对比分析,可以得出在新型电力系统下,带气隙铁心抗直流能力更强,误差更小,输出更稳定。

表 1 不同直流偏磁下带气隙铁心电流互感器误差

Tab. 1 Errors of current transformers with air-gap cores under different DC biases

直流幅值/A	铁心	比差/%	角差/(°)
0	无气隙	-1	0.05
	小气隙	-1.1	0.08
	大气隙	-1.2	0.1
150	无气隙	-35.6	25
	小气隙	-21.5	18
	大气隙	-2.6	9
300	无气隙	-72.2	47
	小气隙	-59.5	38
	大气隙	-27.6	26

根据实际应用情况,设定电流互感器最大抗直流幅值,并以此为基础,确定所需磁化曲线中饱和拐点,基于该拐点,挑选合适的铁心材料以及气隙大小,以满足抗直流偏磁能力要求。

2.2 铁心材料选择

常见的电流互感器铁心材料有硅钢片、坡莫合金、非晶及纳米晶、软磁合金、铁基非晶合金、铁镍基、钴基非晶合金、铁基纳米晶合金等。主要性能分析比较如表 2 所示。

表 2 铁心材料性能比对

Tab. 2 Comparison of core material properties

材料	磁饱和和感应强度 B_s	矫顽力 H_c	磁导率 μ	初始磁导率 μ_i
铁粉心	1.4 T	0.002 Oe	22~100	>10 000
硅钢片	20 000 Gs	-	-	-
坡莫合金	15 000 Gs	-	14~160	-
铁硅铝粉心	1.05 T	-	26~125	-
软磁铁氧体	4 000~5 000 Gs	-	750~2 300	-
非晶及纳米晶	-	0.001 Oe	-	140 000
钴基非晶合金	0.8 T	0.001 Oe	-	14 000
铁基非晶合金	1.54 T	-	-	-
铁基纳米晶	1.2 T	0.32 A/m	-	80 000

从表 2 中铁心材料性能对比分析可知,硅钢片、纳米晶、坡莫合金及非晶合金等典型软磁材料在工频条件下具有优异的磁性能,具体表现为较高的初始磁导率和最大磁导率、较低的矫顽力和饱和磁通密度,因而能够实现工频电流的高精度传变。然而,当系统存在直流分量(尤其是正弦半波激励)时,上述材料的传变误差显著增大,难以满足测量精度要求。这一现象主要源于铁心材料的剩磁较高,导致其抗直流偏磁能力较差。

在现有材料中,硅钢片因其良好的机械加工性能,可通过引入气隙结构提升抗直流能力,使其在直流偏置条件下仍具备一定的保护特性。然而,气隙的引入会显著降低铁心在工频下的磁导率,导致传变精度下降。因此,单一铁心材料难以同时满足高精度测量与抗直流偏磁的双重要求。

基于上述分析,铁心材料的合理选型是提升抗直流电流互感器性能的关键。综合考虑材料的磁性能、抗直流特性及工频传变精度,本文采用硅钢片与非晶/纳米晶复合材料作为铁心设计方案。该复合结构既能利用硅钢片的抗直流能力,又能发挥非晶/纳米晶材料的高磁导率特性,从而在直流偏置与工频测量条件下实现更优的综合性能。

2.3 仿真验证

基于前文所述气隙比、铁心材料综合分析,本文提出了一种新型复合型多微气隙磁心设计方案,如图 5 所示,由硅钢片与非晶纳米晶复合材料,开多个微气隙,然后通过外壳封装后形成一个整体的圆形铁心。从理论上分析气隙对铁心剩磁特性、饱和特性、磁导率和非线性的影响,经过仿真与实际加工工艺,采用了四个气隙,每个气隙间距为 0.02 mm,气隙铁心的截面积平行且垂直于磁力线方向,气隙周围没有凸出的磁力线。

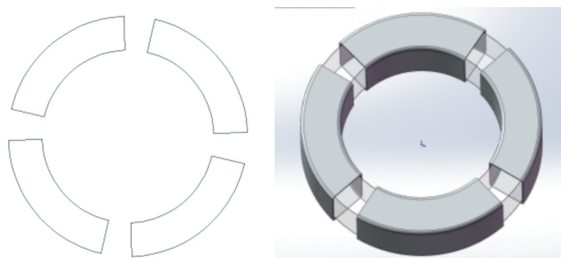
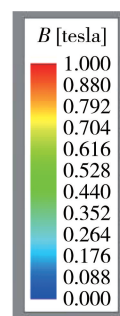


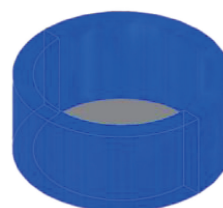
图 5 多微气隙磁心结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of multi-micro air gap iron core structure

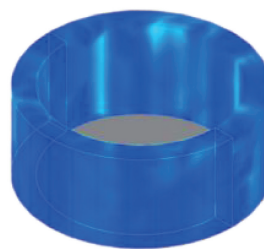
在 ANSYS Maxwell 中进行仿真模拟,仿真结果如图 6 所示,结果表明,当系统叠加 10% 直流分量时,铁心内部的磁通分布特性与宽频正弦激励条件下的磁场强度分布具有较高的一致性,且两者均维持在近似零磁通的稳定状态。这一仿真现象说明,在给定工况下,铁心材料的抗直流特性能满足测量精度的基本要求。



(a) 磁场强度柱状图



(b) 正弦交流条件下磁通分布



(c) 叠加10%直流条件下磁通分布

图 6 新型电流互感器的复合磁心
在不同工况下磁通分布

Fig. 6 Flux distribution of the composite core of the new current transformer under different operating conditions

上述结果验证了理论分析的可行性,即通过合理的铁心材料选型及结构优化,可在一定程度的直流偏置条件下维持磁通分布的稳定性,从而保证电流互感器的传变精度。该结论为抗直流电流互感器的设计与优化提供了重要的实验依据。

将铁心上均匀绕制二次绕组,一次采用穿心设计,最终的电流互感器结构如图 7 所示。

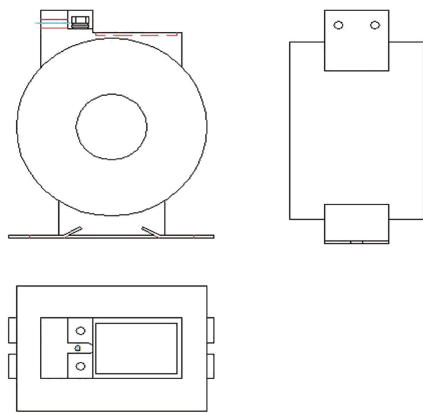


图 7 适用于新型电力系统计量用电流互感器结构图

Fig. 7 Structure of current transformer for metering of novel power system

表 3 适用于新型电力系统的计量用电流互感器数据测试表

Tab. 3 Current transformer data test sheet for metering of novel power system

量限	误差	额定电流百分比/%								二次负荷	
		0.1	0.5	1	5	20	100	120	200	V · A	cosφ
500A 5A	f/%	0.035	0.048	0.049	0.051	0.057	0.056	0.056	0.061	5	0.8
	δ/(')	3.81	4.29	4.31	4.19	3.76	3.56	3.23	2.79		
	f/%	0.049	0.075	0.076	0.078	0.078	0.081	0.081	0.082	2.5	
	δ/(')	2.18	3.12	3.15	3.11	2.90	2.52	2.45	2.30		
叠加 10% 直流分量	f/%	—	—	—	0.063	−0.022	−0.188	−0.568	—	5	1.0
	δ/(')	—	—	—	16.49	84.20	131.6	192.90	—		
	f/%	—	—	—	0.045	0.014	−0.072	−0.284	—	2.5	
	δ/(')	—	—	—	12.67	63.49	93.30	138.50	—		

上述结果验证了该互感器在复杂电力系统工况下的适用性,尤其适用于高比例新能源接入场景中存在的直流偏磁问题,为新型电力系统的精确计量提供了关键技术支撑。

4 结论

本文围绕新型电力系统中的关键量测技术展开深入研究,重点解决新能源并网环境下传统电流互感器面临的计量范围受限、测量精度不足等技术瓶颈问题。基于铁心材料磁化特性与气隙效应的理论分析,创新性地提出了复合型多微气隙磁心结构的电流互感器优化设计方案。该方案通过采用非晶/纳米晶复合铁心材料与分布式微气隙结构,实现了铁心磁导率与抗饱和特性的协同优化。实验测试结果表明,所提出的设计方案在工频交流条件下,能够在 0.1% ~ 200% 额定电流范围内稳定保持 0.2SS 级测量准确度;在叠加 10% 直流分量的复

3 试验验证

对本文上述设计的适用于新型电力系统的计量用电流互感器进行测试,该互感器型号为 HL (D)-500/5,变比为 500/5,准确度等级 0.2SS/2,额定负荷 5 V·A。测试结果如表 3 所示。

根据表 3 所示的测试数据,本文所提出的新型电力系统计量用电流互感器在工频条件下的测量准确度完全满足 0.2SS/2 级要求。具体测试结果为:

- 1) 宽量程高精度特性:在 0.1% ~ 200% 额定电流 I_n 范围内,比差与相位差均符合 0.2SS 级标准 (工频下误差 $\leq \pm 0.2\%$);
- 2) 抗直流偏磁能力:当系统叠加 10% 直流分量时,其传变误差仍能稳定在 0.2 级精度范围内,表明该设计在直流扰动条件下具备优异的计量可靠性。

杂工况下,仍可满足 0.2 级准确度要求。相较于传统电流互感器,该设计显著提升了设备的抗饱和能力和线性度特性,有效解决了新能源并网场景下的电能计量技术难题。研究成果为新型电力系统提供了高精度、高可靠性的电能计量技术支撑,对保障智能电网的稳定运行具有重要的工程应用价值。考虑到环境的多变性,长期运行稳定性等问题还需通过实际应用的长期监测与验证来确认,确保其在复杂电网环境中的可靠运行。

参考文献

[1] 梁言贺, 宫游, 刘惠颖, 等. 面向大规模综合能源系统的能量流解耦分布式计算方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(5): 31-37.

LIANG Yanhe, GONG You, LIU Huiying, et al. Large-scale integrated energy network oriented a distributed com-

- puting approach for energy flow decoupling[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(5): 31-37.
- [2] 李东东, 吴祥文, 孙梦显, 等. 基于广义瞬时能量函数法的大规模直驱风电场并入弱交流电网的短期电压稳定性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(1): 24-36.
- LI Dongdong, WU Xiangwen, SUN Mengxian, et al. Analysis of short-term voltage stability of a large-scale direct-drive wind farm integrated into a weak AC grid based on the generalized instantaneous energy function method [J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(1): 24-36.
- [3] 周倩, 樊宇姣, 张艳丽, 等. 考虑大规模可再生能源接入的电力系统多目标无功优化方法[J]. *电网与清洁能源*, 2025, 41(4): 97-103.
- ZHOU Qian, FAN Yujiao, ZHANG Yanli, et al. The multi-objective reactive power optimization of power systems considering large-scale renewable integration [J]. *Power System and Clean Energy*, 2025, 41(4): 97-103.
- [4] 李响, 武海潮, 王文雪, 等. 考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(15): 178-187.
- LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy [J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(15): 178-187.
- [5] 何方, 张琦立, 魏书荣, 等. 考虑并网灵活性的大规模海上风电场集群接入系统规划研究[J]. *智慧电力*, 2024, 52(9): 33-40.
- HE Fang, ZHANG Qili, WEI Shurong, et al. Planning of large-scale offshore wind farm cluster access system considering grid-connected flexibility [J]. *Smart Power*, 2024, 52(9): 33-40.
- [6] 刘彬, 邓小聘, 李建光, 等. 柔性直流光纤电流互感器阶跃响应特性研究[J]. *高压电器*, 2024, 60(5): 140-146.
- LIU Bin, DENG Xiaopin, LI Janguang, et al. Research on step response characteristics of flexible DC fiber-optic current transformer [J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(5): 140-146.
- [7] 郭树永, 江海, 戴甲水, 等. 基于CVT电路模型的谐波还原方法研究[J]. *高压电器*, 2025, 61(1): 129-135.
- GUO Shuyong, JIANG Hai, DAI Jiashui, et al. Research on harmonic restoration method based on CVT circuit model [J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(1): 129-135.
- [8] 周秀, 陈德志, 王贺虎, 等. 换流变压器结构件涡流损耗的计算与分析[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(7): 103-108.
- ZHOU Xiu, CHEN Dezhi, WANG Hehu, et al. Calculation and analysis of eddy current loss in structural components of converter transformers [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(7): 103-108.
- [9] 许飞宇, 燕伯峰, 刘宇鹏, 等. 空气缝隙对抗直流分量电流互感器影响研究[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(10): 203-208, 216.
- XU Feiyu, YAN Bofeng, LIU Yupeng, et al. Study on the effect of air gap on anti-dc component current transformer [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(10): 203-208, 216.
- [10] 曾秀娟, 刘彤, 谢慧勤, 等. 基于关联度延拓 Hilbert 移相的配网电流互感器在线校验方法[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(7): 161-168.
- ZENG Xiujuan, LIU Tong, XIE Huiqin, et al. Online calibration method of distribution network current transformer based on correlation degree delayed Hilbert phase shift [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(7): 161-168.
- [11] 容春艳, 胡诗尧, 李腾, 等. 高压内置型高阻抗变压器励磁涌流特性分析及工程计算[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(1): 217-224.
- RONG Chunyan, HU Shiyao, LI Teng, et al. Characterization and engineering calculation of excitation inrush current of high voltage built-in high impedance transformer [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(1): 217-224.
- [12] 刘清蝉, 李腾斌, 钟尧, 等. 低压电流互感器校准回路电流谐波提取与叠加研究[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(6): 20-23.
- LIU Qingchan, LI Tengbin, ZHONG Yao, et al. Extraction and superposition research of current harmonics in low-voltage current mutual inductor calibration loop [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(6): 20-23.
- [13] 霍鹏, 李锐鹏, 张子骁, 等. 基于脉冲同步的配电电缆局部放电在线监测及定位方法[J]. *高压电器*, 2024, 60(8): 129-138.
- HUO Peng, LI Ruipeng, ZHANG Zixiao, et al. Online monitoring and location method of partial discharge of distribution cable based on pulse synchronization [J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(8): 129-138.
- [14] 曹文君, 王华佳, 张岩, 等. 基于分区思想的配电网电压与谐波治理资源协同优化配置策略[J]. *智慧电力*, 2025, 53(3): 84-91.
- CAO Wenjun, WANG Huajia, ZHANG Yan, et al. Collaborative optimal configuration strategy for voltage and harmonic management resources in distribution networks

- based on zoning principles[J]. Smart Power, 2025, 53(3): 84-91.
- [15] 安保平. 分布式光伏接入配电网对电能计量影响的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2020.
AN Baoping. Research on the impact of distributed photovoltaic access to distribution network on power metering [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2020.
- [16] 尚博文, 徐铭铭, 张金帅, 等. 高比例分布式光伏接入背景下配电网电压调控方法研究综述[J]. 智慧电力, 2024, 52(12): 1-11.
SHANG Bowen, XU Mingming, ZHANG Jinshuai, et al. A review of voltage regulation methods for distribution networks in the context of high proportion of distributed photovoltaic integration[J]. Smart Power, 2024, 52(12): 1-11.
- [17] 王旭. 深度置信网络在光伏阵列故障诊断中的应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
WANG Xu. Research on the application of deep confidence network in photovoltaic array fault diagnosis [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [18] 马晓昆, 张传远, 梁薇, 等. 新能源接入配电并网融合最大功率控制系统[J]. 电子设计工程, 2024, 32(12): 141-144, 149.
MA Xiaokun, ZHANG Chuanyuan, LIANG Wei, et al. Maximum power control system for new energy access distribution and grid integration[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(12): 141-144, 149.
- [19] 贾志杰. 基于深度置信网络的电力系统故障诊断方法[J]. 电工技术, 2024(7): 61-63.
JIA Zhijie. A power system fault diagnosis method based on deep confidence network[J]. Electric Engineering, 2024(7): 61-63.
- [20] 李秋雨. 基于深度学习的短期电力负荷预测研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
LI Qiuyu. Research on short-term power load forecasting based on deep learning[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2024.
- [21] 郑世英, 牛清林, 刘伟, 等. 电力用户异常用电的深度神经网络检测方法[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(6): 82-87.
ZHENG Shiyong, NIU Qinglin, LIU Wei, et al. Deep neural network detection method for abnormal power usage by power consumers[J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(6): 82-87.
- [22] 姚力, 许灵洁, 李舜, 等. 基于数字比较法的宽频标准电流互感器溯源技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 97-103.
YAO Li, XU Lingjie, LI Shun, et al. Research on traceability technology of wide frequency standard current transformer based on digital comparison method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 97-103.
- [23] 肖晃庆, 朱琼海, 黄莹, 等. 用于大规模新能源架空线路送出的储能型柔性直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(8): 40-53.
XIAO Hongqing, ZHU Qionghai, HUANG Ying, et al. Flexible DC transmission system with energy storage for large-scale new energy overhead line delivery [J]. Automation of Electric Power System, 2025, 49(8): 40-53.
- [24] 劳日智, 张守志. 基于中低电压等级的电子式互感器合并单元的研究与设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2024(3): 47-53, 76.
LAO Rizhi, ZHANG Shouzhi. Research and design of electronic transformer merging unit based on low and medium voltage levels[J]. Industrial Instrumentation and Automation Device, 2024(3): 47-53, 76.
- [25] 张兴, 战祥对, 吴孟泽, 等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网混合模式控制综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(21): 1-15.
ZHANG Xing, ZHANG Xiangzhu, WU Mengze, et al. A review of mixed-mode control of grid-connected converters for high-penetration new energy generation with grid-following/grid-configuration[J]. Automation of Electric Power System, 2024, 48(21): 1-15.
-
- 收稿日期: 2025-07-09; 修回日期: 2025-12-25
- 作者简介:
- 翟晓卉(1982—),女,通信作者,高级工程师,研究方向为电能计量。Email:dkyzxh@163.com
- 孙凯(1990—),男,硕士,工程师,研究方向为电能计量。
- 代燕杰(1983—),女,硕士,正高级工程师,研究方向为电能计量。
- 董贤光(1990—),男,硕士,工程师,研究方向为电能计量。
- 邢宇(1991—),女,硕士,工程师,研究方向为电能计量。
- (编辑 王克祥)