一种新型宽量程电流互感器的设计与性能分析

针对传统电磁式电流互感器中铁心饱和对大电流测量的限制问题，提出一种新型的宽量程电流互感器结构，该结构通过在铁心中设置一定长度的气隙，减小大电流时铁心中的磁通密度，使电流互感器在较大电流测量范围内均能保持较好线性特性。基于对该结构的电磁特性分析，进一步提出了气隙长度和测量误差的计算方法，并利用有限元方法对不同气隙长度电流互感器的测量性能进行仿真对比，计算结果显示新互感器结构可以有效拓宽电流互感器的测量范围。

李志新[1,2] 王少华[1,2] 徐敏锐[1,2] 陈 刚[1,2] 尧赣东[1,2]/1.国网江苏省电力公司电力科学研究院 2.国家电网公司电能计量重点实验室

李志新/工程师

关键词/Keywords
电流互感器·
铁心饱和·
宽量程测量·
气隙长度·
误差计算·

0 引言

随着工业生产和人民生活水平的大幅提高，我国的电力系统蓬勃发展，为国民经济增长提供了坚实的基础[1]。同时，用电量的持续增长对电流互感器（TA）的准确度、可靠性以及适应性提出了更高的要求[2-4]。

根据工作原理的不同，目前主要存在电子式和电磁式两类电流互感器[5]。其中电子式电流互感器虽然具有体积小、重量轻、频带响应宽、无饱和现象及抗电磁干扰等优点，但实际挂网运行时其可靠性和稳定性还不能满足长时间运行要求[6]。而国内广泛采用的电流互感器大多仍为电磁式互感器。该类互感器采用闭合的铁心磁路，基于磁场耦合，将一次大电流按匝数比转化为二次小电流，可靠性和稳定性较好[7]。由于电网不同地点、不同时间段的电流大小悬殊（从几安到几万安不等），为了便于测量、保护和控制，电流互感器往往需要根据测量的一次电流范围不同制定不同的量程，从而使得二次电流在规定范围之内。

若不考虑铁心饱和，一次电流与二次电流之比与两侧绕组匝数成反比。因此，传统的电流互感器往往在二次绕组不同位置处设置多个抽头，以便于针对不同测量对象选用不同的量程。然而在实际中，负载电流不断变化，电流互感器往往在最大量程处出现超差现象，导致测量结果不准确，影响测量准确度。研究分析可知，当一次电流较大时，互感器铁心逐渐饱和，进入非线性特性区域，不仅使得二次电流波形发生畸变，产生较大误差，严重时甚至会引起保护装置的误动作[8-10]。

为了克服铁心饱和对电流量程的限制，拓宽电流互感器的测量范围，国内外学者针对该问题进行了大量研究[11-14]。文献[11]从材料特性的角度，提出采用导磁性能更好的坡莫合金材料代替传统的硅钢片铁心，并适当增加导线和铁心截面积来减小励磁电流，拓展电流互感器的量程。文献[12]则提出了一种低成本的电力电子装置，将其串联嵌入电流互感器二次侧回路，相当于一个电压补偿器，用以补偿由于铁心饱和产生的测量误差。文献[14]提出一种双极互感器，针对铁心磁滞回线的非线性特征，利用Bang－Bang控制方法对互感器的误差曲线进行平滑改造，并对励磁电流进行补偿，提高电流互感器的准确度。上述方

国家重点研发计划项目（2016YFB0901105），江苏省自然科学基金资助项目（BK20160866）。

法均能改善电流互感器的铁心饱和问题，但改善铁心材料、增加补偿装置往往会使电流互感器的成本增加或使信号处理系统更为复杂。

针对上述问题，本文提出了一种新型的宽量程电流互感器。该结构通过在铁心中设置不同长度的活动铁心，用以调节空气隙的长度，控制大电流时铁心内的磁通密度，使电流互感器始终位于线性测量区域内。通过对该互感器的电磁特性进行理论分析和有限元验证，计算结果表明增加气隙长度可以有效拓宽电流互感器的线性测量区域。

1 结构与工作原理

传统电磁式电流互感器采用闭合铁心，以减小磁路磁阻，获得更好的导磁性能。然而，当一次电流较大时会导致铁心饱和，使二次绕组测量值产生误差。本文针对该问题，提出一种含有气隙的新型宽量程电流互感器结构，如图1所示。

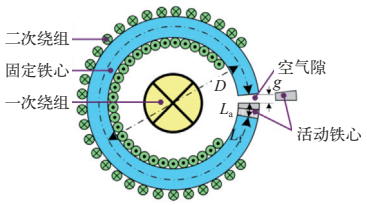

图1 一种新型宽量程电流互感器结构图

新型电流互感器的一、二次绕组与传统结构相同，不同的是其铁心由固定铁心和活动铁心两部分组成，铁心气隙长度可通过不同活动铁心单元进行调节。当一次绕组中电流变化较大时，可通过调节气隙长度保证一次电流最大时铁心磁通密度仍不超过饱和值，铁心特性始终位于线性区域内，以拓宽电流互感器的测量量程。该电流互感器一次电流量程与气隙长度的关系如下。

由图1可知，电流互感器铁心总长度为$L_t=\pi D$，若固定铁心长度为L_f，对应某一量程的活动铁心单元总长度为L_a，气隙长度为g，则有

$$L_t = L_f + L_a + g \tag{1}$$

图2为互感器铁心的磁化曲线。

若定义电流互感器铁心材料在非饱和区域允许的最大磁通密度为B_{max}，且在$0\sim B_{max}$范围之内，其相对磁导率基本保持不变，均为μ_r。若某一量程

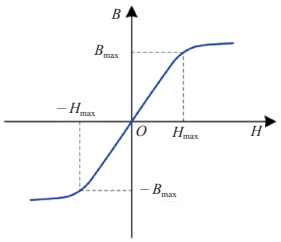

图2 电流互感器铁心磁化曲线

中，一次电流范围为$0\sim I_{1_max}$，对应二次电流范围为$0\sim I_{2_max}$。则根据磁动势守恒，有

$$N_1 I_{1_max} - N_2 I_{2_max} = \frac{B_{max}}{\mu_r \mu_0}(L_t - g) + \frac{B_{max}}{\mu_0} g \tag{2}$$

式中，N_1为一次绕组匝数；N_2为二次绕组匝数；μ_0为空气磁导率。

根据图1中电流互感器的电磁关系，当磁路不饱和时，由等效磁路法可求得

$$N_1 I_{1_max} \frac{Z_2' + Z_L'}{Z_2' + Z_L' + Z_m} = \frac{B_{max}}{\mu_r \mu_0}(L_t - g) + \frac{B_{max}}{\mu_0} g \tag{3}$$

式中，Z_2'为二次绕组内阻抗折算到一次绕组的值；Z_L'为二次侧负载阻抗折算到一次侧的值；Z_m为励磁阻抗，其表达式为

$$Z_m = \frac{\omega \mu_0 \mu_r S N_1^2}{L_t - g + \mu_r g} \tag{4}$$

经计算可得，气隙长度

$$g = \frac{N_1 I_{1_max}}{B_{max}} \cdot \frac{\mu_r \mu_0}{(\mu_r - 1)} - \frac{\omega S N_1^2}{Z_2' + Z_L'} \cdot \frac{\mu_r \mu_0}{(\mu_r - 1)} - \frac{L_t}{(\mu_r - 1)} \tag{5}$$

式中，ω为电流角频率；S为电流互感器铁心截面积。

当一次电流量程为$0\sim I_{1_max}$，气隙长度为g时，该状态下电流互感器的误差$\dot{\varepsilon}$为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{(N_1/N_2)\dot{i}_2 - \dot{i}_1}{\dot{i}_1} = -\frac{Z_2' + Z_L'}{Z_2' + Z_L' + Z_m} = \frac{\omega S N_1 B_{max}}{I_{1_max}(Z_2' - Z_L')} - 1 \tag{6}$$

式中，$\dot{i}_1$为任意时刻一次实际电流值，其对应的量程为$0\sim I_{1_max}$；$\dot{i}_2$为对应的二次测量电流值。

相比于磁路特性固定的传统电流互感器，本文提出的新型宽量程电流互感器通过活动铁心单元调节气隙长度，以保证铁心内的磁通密度始终位于线性不饱和区域内。当电流较小时，采用小气隙或无气隙铁心组合，减小磁路中的磁阻，增

大铁心磁场强度，保证二次感应电流的测量准确度；当电流较大时，采用大气隙铁心组合，增大磁路磁阻，限制铁心磁场密度，保证二次电流测量值在大量程下的线性特性，有效解决了由于铁心饱和所导致的误差增大问题。此外，由于铁心磁通密度大小得到了控制，该互感器可有效减小大电流时的铁心损耗。

2 有限元仿真与计算

为验证本文所提新型宽量程电流互感器与传统电流互感器在性能上的差别，本文对其建立有限元模型如图3所示，图中一次绕组匝数为1，二次绕组匝数为1 200。

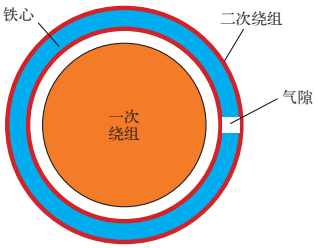

图3 宽量程电流互感器有限元模型

图3中，若气隙长度$g=0$，则表示铁心闭合，为传统电流互感器；若$g\neq0$，则代表存在一定气隙，为宽量程电流互感器。为了验证气隙长度g对铁心二次电流的影响，现设置$g=0$ mm、$g=0.5$ mm和$g=4$ mm三种情况，并在电流互感器的一次绕组中通入0～10 kA的标准正弦电流，观察二次绕组中电流的输出，如图4～图6所示。

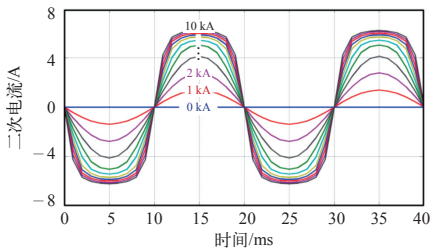

图4 $g=0$ mm时电流互感器二次电流波形

由图中可以看到，当$g=0$ mm时，当一次输入电流大于3 kA时，由于铁心饱和，二次电流便开始发生畸变，逐渐变为平顶波。而当$g=0.5$ mm时，当一次输入电流大于6 kA时，二次电流才开始畸变；而当$g=4$ mm时，在0～10 kA范围内，二次电流基本能保证较好的正弦波形。可见通过增大铁心气隙可以扩大电流互感器的线性测量区域。

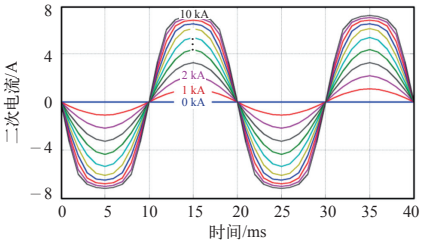

图5 $g=0.5$ mm时电流互感器二次电流波形

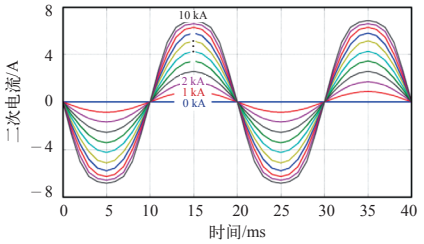

图6 $g=4$ mm时电流互感器二次电流波形

为进一步观察电流幅值情况，图7为二次电流基波幅值随一次电流幅值的变化曲线。

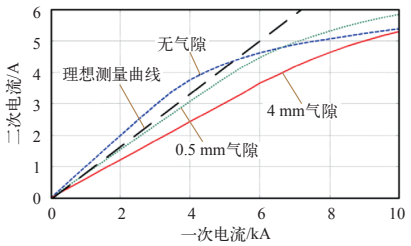

图7 二次电流基波幅值随一次电流幅值变化

由图7可以看出，当一次电流较小时，三种电流互感器曲线的线性度均较好。气隙越小，小电流时曲线斜率越大，二次电流对一次电流的变化越敏感，测量准确度越高，但大电流时电流互感器会更快进入饱和区域，导致二次电流测量值偏小。无气隙时，传统电流互感器的线性区域为0～4 kA；当气隙为0.5 mm时，新型电流互感器的线性区域为0～6 kA；而当气隙为4 mm时，新型电流互感器在0～10 kA范围内均能保持较好的线性特性。

如下表所示，进一步对一次输入电流为6 kA时的电流互感器特性进行对比分析。

由表可知，尽管增大气隙可以使电流互感器获得较宽的线性测量范围，但由式（4）和式（6）可知，气隙越大电流互感器自身的励磁阻抗Z_m就越

表　不同气隙长度的电流互感器测量特性对比

气隙长度/mm	二次电流有效值/A	铁心磁通密度幅值/T	铁心损耗/W
无	4.62	1.55	0.72
0.5	4.46	1.52	0.69
4	3.66	1.34	0.47

小，电流互感器二次侧的实际测量值与理论测量值之间的误差ε也就越大。因此对于本文提出的新型电流互感器，需要在二次电流信号处理单元中对实际测量值进行信号放大，通过提前设置不同气隙时的比例参数，使测量值与理想值相符。此外，由上表可以看到在测量相同的一次电流时，气隙越大则互感器的铁心磁通密度越小，铁心损耗越低，证明了该宽量程电流互感器在增大互感器量程的同时也能降低互感器损耗。

3　结束语

本文提出了一种新型的宽量程电流互感器结构，并针对该结构的电磁特性进行分析，建立了气隙长度与量程之间的关系，提出了气隙长度和测量误差的计算方法。通过有限元仿真验证，得到如下结论。

1）该新型的宽量程电流互感器的气隙长度越大，则二次电流与一次电流幅值之比越小，线性测量区域越宽，互感器测量范围越大。

2）气隙增大，新型电流互感器励磁阻抗越大，二次电流幅值越小，二次电流信号处理单元需要选用的比例系数也越大。

3）新型电流互感器通过调节活动铁心单元增大气隙长度，可以有效降低大电流时的铁心磁通密度幅值，大大降低了互感器的铁心损耗。

参考文献

[1] 张杰梁．电流互感器磁饱和裕度及其试验装置的探讨 [J]．电测与仪表，2014，51 (15)：124-128.

[2] 赵双双，吴桥，徐敏锐，等．电力互感器现场运行测量准确性优化提升技术研究 [J]．电测与仪表，2015，52 (增刊1)：107-110.

[3] 卢嘉栋．电流互感器在线校验关键技术论述 [J]．电子技术与软件工程，2016 (13)：142-143.

[4] Terrence Smith，Richard Hunt．Current transformer saturation effects on coordinating time interval [J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2013，49 (2)：825-831.

[5] 王彦文，白树斌，郑淳，等．电子式与电磁式电流互感器的差异及其应用 [J]．电气应用，2012，31 (11)：58-61.

[6] 金世鑫，李华，戴晓宇．电子式互感器的分类和原理综述 [J]．东北电力技术，2016，37 (3)：29-31.

[7] 韦家旗，唐菁．电磁式电流互感器运行状态评价应用研究 [J]．电测与仪表，2010，47 (1)：51-54.

[8] Stanbury M，Djekic Z．The impact of current transformer saturation on transformer differential protection [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2015，30 (3)：1278-1287.

[9] Jasmin Smajic，Giorgio Di Pino，Christoph Stemmler，et al．Numerical study of the core saturation influence on the winding losses of traction transformers [J]．IEEE Transactions on Magnetics，2015，51 (3)：1-4.

[10] 单国栋，罗怀，黄子珍．电流互感器饱和引起的保护拒动分析 [J]．电气应用，2015，34 (11)：74-77.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 鲍海，艾欣，杨以涵．一种宽量程电流互感器的实现方法 [J]．电力系统自动化，2003，27 (10)：63-66.

[14] Ehsan Hajipour，Mehdi Vakilian，Majid Sanaye-Pasand．Current transformer saturation prevention using a controlled voltage source compensator [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2016，32(2)：1039-1048.

（收稿日期：2016－11－25）EA