

Parameter Calculation of Zero-sequence Current Transformer

Zhao Lianqing¹, Sun Na²

School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing, 102206

1. zhaolianqing@163.com, 2. friendsunna@yahoo.com.cn

Abstract: Leakage protection device is one of the main forms to prevent electric shock. The performance of protective devices are not only decided by the structure design, quality craftsmanship and materials, but also by the correct application of basic theory and experimental research. Based on the electromagnetic theory and the experiments, this paper analyzes zero-sequence current transformer and presents a design method and the calculation formulas considering the non-linear characteristics of ferromagnetic materials and the working point of core.

Keywords: zero-sequence current transformer; leakage protection device; parameter calculation

零序电流互感器的参数计算

赵莲清¹, 孙娜²

华北电力大学电气与电子工程学院, 北京, 中国, 102206

1. zhaolianqing@163.com, 2. friendsunna@yahoo.com.cn

【摘要】 漏电保护装置是防止触电的主要方式之一。保护装置的性能除决定于结构设计、工艺水平和材料质量外, 还决定于有关基本理论的正确应用和实验研究。本文以实验为基础, 运用电磁理论, 对零序电流互感器作了一些研究, 提出了考虑铁磁材料非线性特征和铁芯工作点的设计方法及有关计算公式。

【关键词】 零序电流互感器; 漏电保护装置; 参数计算

1 概述

漏电保护装置主要由检测元件、中间机构、执行元件、自检环节等部分组成。电流型保护装置的检测元件即零序电流互感器^[1]。零序电流互感器从线路上检测零序电流信号(主要包括触电电流信号或漏电电流信号), 经转换后传递给中间机构。零序电流互感器的特征很大程度上影响保护装置的灵敏度和结构。灵敏度是漏电保护装置的重要性能指标之一。保护装置的结构不同, 灵敏度也不同。在中间机构和执行元件相同情况下, 如能找到零序互感器的最佳参数, 则可在材料消耗一定时取得最高灵敏度, 或者在灵敏度一定时取得最低材料消耗量^[2]。

零序电流互感器属于单相互感器, 但有很多特点, 其原边由多相回路组成。原边各回路正常时是保持平衡的, 不在铁芯中产生磁感应, 副边不产生感应电势。这就是说, 如果不考虑电网正常的不平衡泄漏电流和电磁元件几何位置不对称引起的磁感应, 零序电流互

感器正常时相当于工作在未接通状态。当原边产生零序电流时, 副边输出信号^[3]。

为了人身安全的需要, 互感器应有较高的灵敏度, 即互感器原边额定信号电流和副边输出电流都很微小。因此设计互感器时应考虑励磁电流^[4]。不能像一般电流互感器那样, 认为原、副边电流与匝数保持反比关系。同时, 由于铁磁材料的非线性, 设计中必须确定合理的工作点^[5]。

2 零序电流互感器的参数计算

零序电流互感器的主要参数是铁芯尺寸和原、副边线圈匝数。严格准确计算这些参数是十分困难的。但通过近似计算可得到足够精确地实用参数, 并可显示各参数之间的关系, 为设计提供可靠的依据。

互感器的磁势应保持下列平衡关系:

$$W_1 \dot{I}_1 + W_2 \dot{I}_2 = W_1 \dot{I}_m \quad (1)$$

式中 W_1 、 W_2 ——原边、副边匝数;
 I_1 、 I_2 ——原边、副边电流;
 I_m ——原边励磁电流。

项目基金: 国际科技合作计划项目资助课题(批准号 2007DFA71250)

互感器的磁势矢量图如图 1。图中， $\dot{\phi}$ 是铁芯磁通量， $\dot{E}_2$ 是副边电势矢量， θ 是铁芯功率损耗角， ψ_2 是副边总功率因数角。 θ 和 ψ_2 分别为：

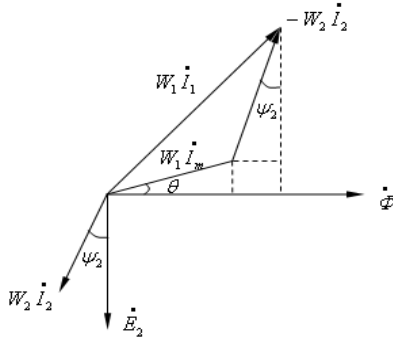


图 1 互感器磁势矢量图

$$\theta = \arctg \frac{r_m}{x_m} \quad (2)$$

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_a + x_2}{r_a + r_2} \quad (3)$$

式中 r_m 和 x_m ——互感器励磁电阻和励磁电抗；

r_a 和 x_a ——负载阻抗和电抗；

r_2 和 x_2 ——互感器副边漏阻抗的电阻和电抗。

按照图 1 中的几何关系可以得到：

$$(W_1 I_1)^2 = (W_2 I_2 \cos \psi_2 + W_1 I_m \sin \theta)^2 + (W_2 I_2 \sin \psi_2 + W_1 I_m \cos \theta)^2 \quad (4)$$

将磁路欧姆定律的表达式 $W_1 I_m = R_m \phi$ 代入上式，并考虑到 $\phi = \frac{E_2}{\omega W_2}$ 和 $E_2 = I_2 Z$ (Z 是互感器副边漏阻抗与负载阻抗之和的模值)，可以得到：

$$(W_1 I_1)^2 = (W_2 I_2 \cos \psi_2 + \frac{R_m I_2 Z}{\omega W_2} \sin \theta)^2 + (W_2 I_2 \sin \psi_2 + \frac{R_m I_2 Z}{\omega W_2} \cos \theta)^2 \quad (5)$$

式中，电流 I_2 决定于执行元件或中间机构的输入参数，不可能太小；电流 I_1 是保护装置的动作电流，取决于安全要求，不能定得太大；匝数 W_1 受互感器工艺条件的制约，也不可能太大；磁阻 R_m 决定于铁芯材料和尺寸，因此 $R_m = l/\mu S$ ，即 R_m 与铁芯截面积 S 成反比，

所以 R_m 愈大愈好；匝数 W_2 、阻抗 Z 、功率因数 $\cos \psi_2$ 都是待定参数。当 R_m 给定时，找到某一 W_2 使 I_1 最小；或者当 I_1 给定时，找到某一 W_2 使 R_m 最大。按照这一原则确定的 W_2 即为互感器副边最佳匝数。

由于 Z 、 $\cos \psi_2$ 不仅决定于负载阻抗 r_a 和 x_a ，而且决定于副边漏阻抗 r_2 和 x_2 ，即 Z 和 $\cos \psi_2$ 还与 W_2 有关，准确计算 W_2 的最佳值十分困难。为简化问题，考虑到漏阻抗比负载阻抗小得多，可以认为 $Z \approx Z_a = r_a + jx_a$ 和 $\cos \psi_2 \approx \cos \phi_2$ 。因为 Z_a 和 $\cos \phi_2$ 只决定于互感器的负载，与互感器本身的参数无关，所以可简化计算。根据测定，某硅铁片铁芯在设计条件下的漏阻抗约为 50 欧姆，其功率因数角约为 50° ，工作电压 0.414 伏，工作电流为 1 毫安，不难求得阻抗压降为 0.05 伏，只占感应电势的 11%；某种坡莫合金铁芯在设计条件下的漏阻抗约为 12 欧姆，功率因数角约为 40° ，工作电压为 0.419 伏，工作电流为 1 毫安，可求得阻抗压降为 0.012 伏，约小于感应电势的 3%。这说明上述近似处理是允许的。这样，式(5)可转换为：

$$I_1 = \frac{W_2 I_2}{W_1} \sqrt{\left(\cos \phi_2 + \frac{R_m Z_a}{\omega W_2^2} \sin \theta \right)^2 + \left(\sin \phi_2 + \frac{R_m Z_a}{\omega W_2^2} \cos \theta \right)^2} \quad (6)$$

式(6)表示电流 I_1 有极小值。取 $\frac{\partial I_1}{\partial W_2} = 0$ 时可求得相应于 I_1 取极小值时的副边最佳匝数为

$$W_{20} = \sqrt{\frac{R_m Z_a}{\omega}} \quad (7)$$

式(7)表明，最佳匝数 W_{20} 与副边电流 I_2 和负载功率因数 $\cos \psi_2$ 无关。在确定的频率下，只要给定 R_m 和 Z_a ，即可求得副边最佳匝数。

将式(7)代入式(6)， I_1 的表达式可转变为：

$$I_1 = \frac{W_2 I_2}{W_1} \sqrt{\left(\cos \phi_2 + \frac{W_{20}^2}{W_2^2} \sin \theta \right)^2 + \left(\sin \phi_2 + \frac{W_{20}^2}{W_2^2} \cos \theta \right)^2} \quad (8)$$

令 $W_2 = W_{20}$ ，可求得原边最小电流 I_{10} 的表达式

$$I_{10} = \frac{W_{20} I_2}{W_1} \sqrt{2[1 + \sin(\phi_2 + \theta)]} \quad (9)$$

应指出，式(7)表示的是给定磁阻 R_m 等参数时求得的副边最佳匝数，式(9)表示的是给定磁阻 R_m 等参数时求得的原边最小电流。磁阻 R_m 、副边最佳匝数 W_{20} 以及原边最小电流 I_{10} 都是一一对应的。因此，如果给定

的是原边电流 I_1 ，符合式(7)和式(9)的磁阻则是最佳磁阻，即最大磁阻 R_{m0} 。鉴于磁阻 R_{m0} 是待定的， I_1 是给定的，可直接由式(9)得出副边最佳匝数为：

$$W_{20} = \frac{W_1 I_1}{I_2} \frac{1}{\sqrt{2[1 + \sin(\phi_2 + \theta)]}} \quad (10)$$

最大磁阻则由式(7)直接得出为：

$$R_{m0} = \frac{\omega W_{20}^2}{Z_a}$$

(11)

式(10)和式(11)也可按 $\frac{\partial R_m}{\partial W_2} = 0$ 求得。为此，宜先将式(6)改写为：

$$R_m = \frac{\omega W_2^2}{Z_a} \left[\sqrt{\left(\frac{W_1 I_1}{W_2 I_2} \right)^2 - \cos^2(\phi_2 + \theta) - \sin(\phi_2 + \theta)} \right]$$

(12)

再经过微分运算，亦可得到式(10)和式(11)。

应当指出，在有关参数保持不变时，互感器副边最佳匝数只有一个，而且与运算方法无关。

表 1 副边最佳匝数 W_{20} 计算表

R_m							
$\frac{10^4 \times 1/H}{Z_a(\Omega)}$	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	30.0
50	18	28	40	56	89	126	219
100	25	40	56	80	126	178	309
200	36	56	80	112	178	252	438
300	44	69	98	138	219	309	535
400	50	80	112	160	252	357	618
500	56	89	126	178	282	399	691
600	62	98	138	195	309	437	757
700	67	106	149	211	334	472	818
800	72	112	160	224	357	504	876
900	76	120	169	239	378	535	927
1000	80	126	178	252	399	564	977

为了实用方便，确定最佳匝数的式(7)和式(10)均可制成表格和绘成曲线。表 1 列出的是对于不同 Z_a 和 R_m 的 W_{20} 值。例如，当 $Z_a = 500\Omega$ 、 $R_m = 3000/\text{亨}$ 时，由表 1 可查得最佳匝数 $W_{20} = 69$ 。如假定 $W_1 = 5$ ， $I_2 = 1\text{mA}$ ， $\cos \phi_2 = 0.7$ ， $\theta = 15^\circ$ ，一同代入式(9)，可求得原边最小动作电流 $I_{10} = 26.7\text{mA}$ 。

对于式(10)，比较合理的办法是令

$$K = \frac{1}{\sqrt{2[1 + \sin(\phi_2 + \theta)]}}$$

然后就不同的 $\cos \phi_2$ 值和不同的 θ 值制成 $K = h(\phi_2, \theta)$ 数值表，并绘成 $K = h(\phi_2, \theta)$ 曲线，见表 2。例如，当 $\cos \phi_2 = 0.7$ 、 $\theta = 10^\circ$ 时，由表 2 可查得 $K = 0.523$ 。设 $W_1 = 5$ 、 $I_1 = 30$ 毫安、 $I_2 = 1$ 毫安，代入式(10)即可求得最佳匝数 $W_{20} = 78$ 。再设 $Z_a = 500$ 欧，一同代入式(11)即可求得最大磁阻 $R_{m0} = 3823 \frac{1}{H}$ 。如选用磁导率 $\mu = 0.2$ 亨/米的坡莫合金制成平均直径为 40 毫米的圆环形互感器铁芯，可求得其最小截面积为：

$$S_0 = \frac{l}{\mu R_m} = \frac{\pi D}{\mu R_m} = \frac{\pi \times 0.04}{0.2 \times 3823} = 1.64 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

表 2 $K=h(\phi_2, \theta)$ 数值表

$\cos \phi_2$	θ					
	0	5°	10°	20°	30°	40°
0.1	0.501	0.500	0.500	0.504	0.511	0.523
0.2	0.503	0.501	0.500	0.501	0.507	0.516
0.3	0.506	0.503	0.501	0.500	0.503	0.510
0.4	0.511	0.507	0.504	0.500	0.501	0.505
0.5	0.518	0.512	0.508	0.502	0.500	0.502
0.6	0.527	0.520	0.514	0.505	0.501	0.500
0.7	0.540	0.531	0.523	0.512	0.504	0.500
0.8	0.559	0.548	0.537	0.522	0.510	0.503
0.9	0.590	0.575	0.562	0.540	0.523	0.511
1.0	0.707	0.678	0.653	0.610	0.577	0.552

应当指出，由于铁芯材料具有非线性特点，其导磁率随磁通密度的改变而改变，因此互感器铁芯的磁阻除决定于铁芯的几何尺寸外，还决定于其工作状态，亦即还决定于磁通的大小。根据基本关系：

$$\phi = \frac{E_2}{\omega W_2} \approx \frac{I_2 Z_a}{\omega W_2}$$

可以知道，磁通决定于副边匝数的选择。因而，磁阻也决定于副边匝数的选择。应用式(7)时必须考虑这一因素。

将 $\phi = \frac{I_2 Z_a}{\omega W_2}$ 代入式(7)，得到：

$$\frac{I_2 Z_a}{\omega \phi} = \sqrt{\frac{R_m Z_a}{\omega}}$$

考虑到 $\phi = BS$ 、 $R_m = \frac{1}{\mu S}$ 和 $B = \mu H$ ，代入上式简化

后得到：

$$BH = \frac{I_2^2 Z_a}{\omega S l}$$

(13)

显然,在负载参数和铁芯尺寸已经确定的情况下,BH值应当为一常数。式(13)是工作参数对铁芯提出的要求。符合这一要求的工作点即线圈取得最佳匝数的工作点。不同的导磁材料有不同的磁化曲线。如图2所示,BH值曲线与磁化曲线的交点即所求工作点。按此工作点确定导磁率后即可计算磁阻。再将磁阻代入式(7)即求得副边最佳匝数。这时式(7)可改写为:

$$W_{20} = \sqrt{\frac{IZ_a}{\mu S \omega}} \quad (14)$$

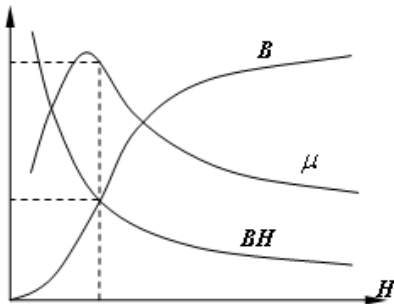


图2 铁芯工作点示意图

对于给定原边电流 I_1 欲求互感器铁芯尺寸的情况,也应考虑铁磁材料的非线性。其步骤是先按式(10)求得副边最佳匝数 W_{20} , 按式(11)求得铁芯最大磁阻 R_{m0} , 再考虑由 $HI = R_m \phi$ 导出的工作要求:

$$H = \frac{R_m I_2 Z_a}{l \omega W_2} \quad (15)$$

并由此确定必须的磁场强度 H ; 然后按照所选用铁芯材料的磁化曲线找到相应于该 H 值的 μ 值; 最后, 按

$S = \frac{l}{\mu R_m}$ 计算铁芯的最小截面积。

以上计算方法除可用来设计互感器外, 还可用来判别某种类型的保护装置在合理设计时所能达到的最高灵敏度。例如, 某纯电磁式保护装置, 即互感器副边直接向电磁式执行元件的保护装置, 如该执行元件动作电流为 1mA , 阻抗为 500Ω , 功率因数为 0.7 , 铁芯功率损耗角为 15° , 若要求 $W_1=5$ 、 $I_1=20\text{mA}$, 按上述方法可求得副边最佳匝数 $W_{20}=52$ 、铁芯最大磁阻 $R_{m0} = 1699 \frac{1}{H}$ 。如选用试验坡莫合金制作铁芯, 并设铁

芯平均长度为 110mm , 则可按式(15)求得磁场强度 H 为 0.473A/m , 按磁化曲线查得相应的磁导率 μ 为 0.202H/m , 即使改变某些条件, 使铁芯工作在最佳状态, 其截面积仍不得小于 50cm^2 , 重量不得小于 5.2kg 。这样大的铁芯, 无论是从经济上考虑, 还是从结构上、

工艺上考虑都是极不合理的。这就是说, 纯电磁式保护装置

置企图达到 20mA 的高灵敏度是不现实的。特别是采用硅钢片, 几乎是不可能的。

3 互感器短路阻抗的影响

前面曾指出, 忽略互感器副边漏阻抗不会引起太大误差。下面具体分析误差的大小及误差考虑方法。

如图

3所示, 如在前面导出的计算公式中, 以 ψ_2 代替 φ_2 , 以 E_2 代替 U_2 , 亦即以 $I_2 Z$ 代替 $I_2 Z_a$ 即可消除上述误差。为确定 ψ_2 和 E_2 (或 Z), 必须知道互感器的短路阻抗 Z_k 。 Z_k 可由实验近似确定。我们测得试验硅钢片铁芯在原副边匝数分别为 $W_1=10$ 、 $W_2=309$, 并在副边进行试验时的短路阻抗 Z_k 约为 60Ω 、 φ_k 约为 50° (线径 0.14mm 、直流电阻 3.2Ω)。

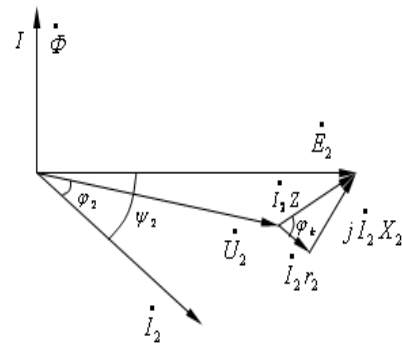


图3 互感器副边矢量图

互感器负载阻抗越大, 忽略阻抗电压引起的误差越小。例如, 对上述硅钢片铁芯, 当负载分别为 500Ω 和 200Ω 的纯电阻负载 ($\cos\varphi_2=1$) 时, 电势 E_2 分别为 $1.04 U_2$ 和 $1.10 U_2$, φ_2 角分别为 2.5° 和 6.0° , $\cos\varphi_2$ 分别为 0.999 和 0.995 。显然, 如负载阻抗超过短路阻抗的 10 倍, 则忽略副边短路阻抗所引起的误差是微不足道的。

4 结束语

由以上讨论可知, 在已知材料特性的情况下, 应根据给定条件, 正确设计互感器, 以便最高效率的利用材料, 同时保证互感器有最佳的技术性能。在设计过程中, 必须充分考虑铁磁材料非线性特性的影响。为此应先求得互感器铁芯材料的磁化曲线, 再根据给定的参数求 BH 值 (给定铁芯尺寸) 或 H 值 (给定原边动作电流), 然后确定铁芯工作点, 最后按最佳值

公式求取原边电流或铁芯几何尺寸。此外，在计算中还应考虑互感器短路阻抗可能引起的误差。

References (参考文献)

- [1] Thomas Novak, Lloyd A. Morley, Frederick C. Trutt. Sensitive ground-fault relaying [J].IEEE Trans. Ind. Appl.,1988,24(5).
- [2] Mou Longhua, High-performance Zero-sequence Current Transformer Design[J], *High Voltage Apparatus*, 1999(5), P21-P23 (Ch).
牟龙华, 高性能零序电流互感器的设计[J], 高压电器, 1999 (5), P21-P23.
- [3] Teng Songlin, Yang Xiaosheng, Leakage of Electric Shock Protection and Application[M], Beijing: Machinery Industry Press, 1994(Ch).
滕松林, 杨校生, 触电漏电保护器及其应用[M], 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [4] Wang Qijun, Optimum design of zero-sequence current transformer based on capacitive compensation[J], *Journal of Electrotechnical*,2002(11),P59-60(Ch).
王其军, 基于补偿电容的零序电流互感器的优化设计[J], 电工技术杂志, 2002 (11), P59-60.
- [5] Xu Xiaofeng, Electrical and Drag[M], Beijing: Higer Education Press(Ch).
许晓峰, 电机与拖动[M], 北京: 高等教育出版社, 2000.