

速饱和电流互感器取能功率分析及其设计方法

史凯萌, 宗 鸣

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:速饱和电流互感器取能是解决智能断路器在电网短路失压状态下供电的主要方法。本文分析与研究了速饱和电流互感器的工作特性和饱和机理,建立了电流互感器取能的等效电路模型。提出了电流互感器铁心饱和度的概念,深入研究了电流互感器输出功率与铁心饱和度的关系。通过仿真研究,验证了理论推导的正确性。在此基础上提出了速饱和电流互感器的设计步骤,包括铁心工作饱和度选择、铁心有效导磁截面积以及二次绕组匝数的设计方法。搭建了速饱和电流互感器取能电路,通过实验验证了设计方法的可行性。

关键词:速饱和电流互感器; 电流互感器取能; 铁心饱和度; 智能断路器

DOI: 10.12067/ATEEE1911015 **文章编号:** 1003-3076(2020)06-0074-07 **中图分类号:** TM452

1 引言

随着国家智能电网的不断建设,电网的保护逐渐朝着智能化方向发展^[1,2]。智能断路器作为智能低压配电微系统的重要组成部分,对它的研究可谓是至关重要。其中,对智能断路器中控制器供电部分的研究是研究的重难点之一。不同于普通用电负载,为保证电网输配电与继电保护的可靠性,智能断路器应在电网电压大范围波动的情况下依然能够稳定工作。其中的难点之一就是如何解决在电网短路失压状态下对智能控制器的供电问题。

在供电模块中增加以蓄电池为核心的辅助电源是较为容易的解决方案,但由于电池自身寿命限制,大范围使用后会产生高昂的人工维护费用。超级电容的使用寿命虽高于蓄电池,但其能量密度依然较低,如今在设备小型化的发展趋势下仍不适用。目前,广泛采用的方法是通过电流互感器(Current Transformer, CT)在线取能^[3,4]。

对于取能用电流互感器,国内外研究较多的是应用于高压输电线为在线监测设备供电^[5-8],对智能断路器供电的取能 CT 研究较少。由于高压输电线上的特殊环境,研究重点多集中于如何在输电线电流大范围变化(几十到上千安培)的情况下,避免

CT 铁心饱和并降低最小启动电流^[9,10]。为此通常采用的方式有增加辅助绕组^[11]、改进取能电路^[12]以及优化电源控制方法^[13,14]等。铁心的体积通常设计得较为庞大,导致体积重量和成本的提高。

速饱和电流互感器仅在一次侧电流过零点的一段时间内输出电能,同样在满足负载所需功率前提下,其体积和重量较传统的取能 CT 大为缩减^[15]。在某些对供电模块体积有限制的应用场合,如智能低压配电微系统,采用速饱和电流互感器作为核心取能元件,成为了目前较好的解决方案。从现有资料看,有关速饱和电流互感器取能的深入研究较少。

本文所研究的速饱和电流互感器应用于智能低压配电网发生短路故障情况下,在电网未失压时,智能断路器由常规电网电压供电。根据多级断路器保护特性配合,上级断路器短路短延时开断,速饱和电流互感器应在这一段时间内提供稳定的电能输出。

2 速饱和电流互感器工作特性分析

2.1 速饱和电流互感器的特点

速饱和电流互感器的结构与传统电流互感器相同,如图 1 所示。但前者工作时铁心会在线性状态与饱和状态之间交替变换,并仅在一次侧电流过零点附近的线性状态内输出能量。

收稿日期: 2019-11-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(51777129)
作者简介: 史凯萌(1995-),男,辽宁籍,硕士研究生,研究方向为智能电器及其控制;
宗 鸣(1957-),男,辽宁籍,教授,博士,研究方向为智能电器与智能控制。

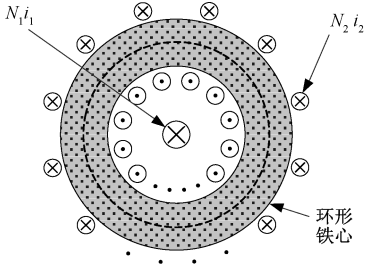


图1 速饱和电流互感器结构图

Fig.1 Fast-saturation current transformer structure diagram

速饱和电流互感器的励磁阻抗 Z_m 会随着铁心饱和程度不同而改变,等效电路如图2所示^[16]。当铁心处于线性状态时,励磁支路 ab 可认为开路,此时的速饱和电流互感器相当于理想电流源,负载上电压 U_2 由负载阻抗 Z_L 和二次侧电流大小决定。当铁心处于饱和状态时,磁导率近似为真空磁导率,使 $Z_m \ll Z_L$,图2中的励磁支路 ab 则会将负载短路,一次侧电流几乎全部转化为励磁电流 i_0 。所以,在铁心饱和期间,负载上的电压为零,互感器不输出功率。

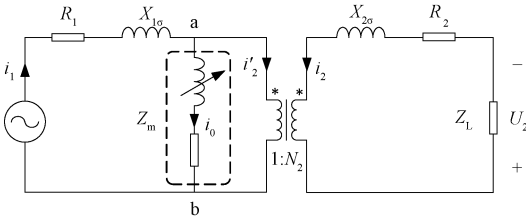


图2 速饱和电流互感器等效电路图

Fig.2 Fast-saturation current transformer equivalent circuit diagram

在忽略铁心损耗的情况下,励磁电流不做功,但用于建立铁心磁通的励磁电流越小,就会有更多的一次侧电流转化为二次侧电流,那么负载所获得的功率就会越大,励磁电流表达式为:

$$I_0 = \left| \frac{E_2}{N_2 Z_m} \right| \approx \left| \frac{E_2 l}{2\pi f N_2 N_1^2 \mu S} \right| \quad (1)$$

由式(1)可知,在相同激励源及负载的情况下,铁心材料的磁导率 μ 越大,互感器的输出功率就越大。但在实际的取能互感器设计中,对于未开气隙的环形铁心,当采用高磁导率的材料时,可忽略励磁电流对二次侧输出功率的影响^[17]。

2.2 速饱和电流互感器输出功率分析

为了便于分析速饱和电流互感器的输出功率,二次侧负载均采用纯阻性负载,电阻值为 R 。铁心处于线性状态时的速饱和电流互感器相当于理想电

流源,那么输出功率 P_{us} 可表示为:

$$P_{us} \approx \frac{I_1^2 R}{N_2^2} \quad (2)$$

使输出功率增加的因素都会使铁心更加趋向于饱和状态,可得出结论,当铁心仅处于线性状态时,临界饱和点即是最大功率输出点,此时输出功率 P_{usm} 为:

$$\begin{aligned} P_{usm} &= U_2 I_2 = \sqrt{2} \pi f N_2 B_s S \frac{I_1}{N_2} \\ &= \sqrt{2} \pi I_1 f B_s S \end{aligned} \quad (3)$$

当速饱和电流互感器正常工作时,铁心会在线性状态与饱和状态之间交替变换,但只有处于线性状态时才会有功率输出。一个典型的输出电压波形如图3所示。计算速饱和电流互感器的功率输出最重要的是要先求解出每个工作周期中铁心处于线性状态的时间 t_{us} 。

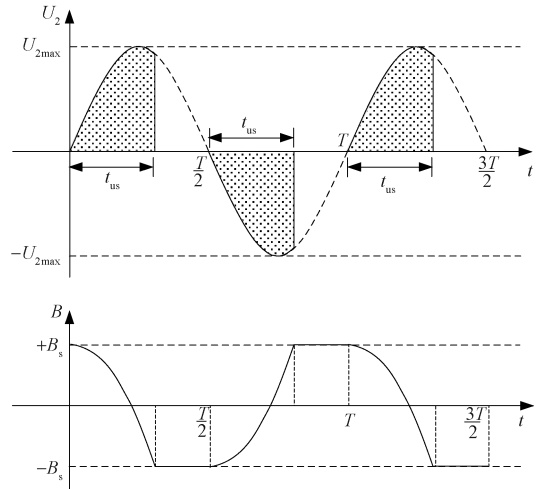


图3 输出电压与铁心磁密波形示意图

Fig.3 Schematic diagram of output voltage and core magnetic density waveform

速饱和电流互感器每个输出脉冲的波形均相同,所以只需对半个周期的波形进行研究。从图3中可以看出,每半个周期铁心中的磁通密度 B 都会从正向最大值变为反向最大值或相反,因此可对二次侧感应电势进行积分:

$$\int_0^T e_2 dt = \int_0^{t_{us}} e_2 dt = - \int_{+B_s}^{-B_s} N_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = 2N_2 B_s S \quad (4)$$

在忽略励磁电流对二次侧输出的影响时,互感器的时域输出电压 u_2 可表示为:

$$u_2 = i_1 R / N_2 \quad (5)$$

假设一次侧电流 $i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t)$, 将式(5)替

代式(4)中的 e_2 ,便可求得铁心的线性状态时间 t_{us} :

$$t_{us} = \text{Re} \left[\frac{1}{\omega} \arccos \left(1 - \frac{\sqrt{2} \omega N_2^2 B_s S}{I_1 R} \right) \right] \quad (6)$$

式中, t_{us} 在铁心未饱和时为定值 $T/2$,所以取右侧分式的实部。由此,可根据一个周期中铁心处于饱和状态的时间占比,定义互感器正常工作时的铁心饱和度 η :

$$\eta = \frac{T - 2t_{us}}{T} \times 100\% \quad (7)$$

速饱和电流互感器的平均输出功率 P_s 为:

$$P_s = \frac{2}{T} \int_0^{t_{us}} i_2^2 R dt \quad (8)$$

式中

$$i_2 = \frac{\sqrt{2} I_1}{N_2} \sin(\omega t + \pi) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8):

$$P_s = \frac{I_1^2 R}{N_2^2} \left[1 - \eta + \frac{\sin(2\pi\eta)}{2\pi} \right] \quad (10)$$

2.3 理论计算与仿真分析

为验证上述理论分析的正确性,采用 MATLAB/Simulink 进行仿真分析。为与后续实例保持一致,选择速饱和电流互感器的模型参数见表 1。

表 1 速饱和和电流互感器模型参数

Tab.1 Fast-saturation current transformer model parameters

参数	数值	参数	数值
铁心内径/mm	40	最大磁密/mT	1128
铁心外径/mm	64	叠片系数	0.786
铁心高度/mm	27	二次绕组/匝	250
磁导率/(H/m)	1.2×10^5	铁心设计裕量(%)	3

当负载电阻为 16.2Ω 时,通过式(6)理论计算得到铁心线性状态时间 t_{us} 随一次侧电流 I_1 的变化情况如图 4 所示。

从图 4 看到,曲线上存在一个拐点,在拐点左侧 t_{us} 恒等于 $T/2$,即互感器铁心未饱和,所以此拐点为互感器铁心的临界饱和点。当一次侧电流超过临界饱和点对应的电流值时,铁心饱和度将会开始提高。并随着一次侧电流的增长,铁心饱和度的增长速率逐渐降低。根据表 1 中的模型参数搭建速饱和和电流互感器仿真模型,如图 5 所示。

分别在真实磁化曲线和理想磁化曲线(磁导率无穷大)下进行仿真,考察励磁电流对二次侧输出电流的影响,仿真过程中只改变一次侧电流 I_1 的大小,结果如表 2 所示。虽然励磁电流对输出电流的

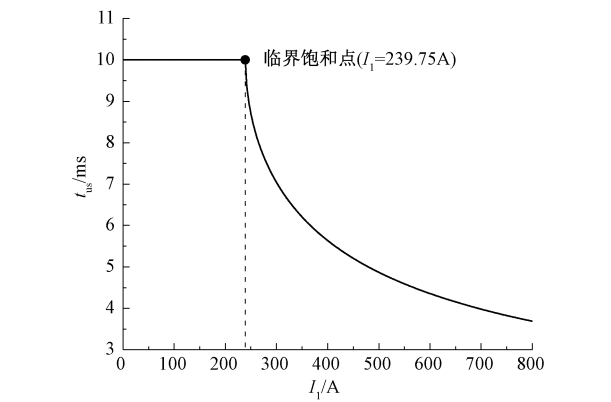


图 4 不同一次侧电流下的铁心线性状态时间 t_{us}

Fig.4 Core unsaturation state time t_{us} under different I_1

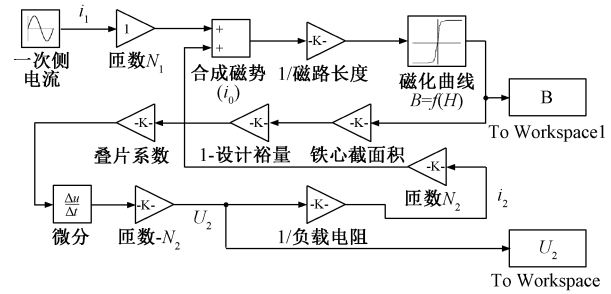


图 5 速饱和和电流互感器仿真模型

Fig.5 Fast-saturation current transformer simulation model

影响会随着一次侧电流的增加而变大,但在一次侧电流为 600A 时其影响仅占 0.21% ,可忽略不计。

表 2 二次侧电流仿真数据

Tab.2 Secondary current simulation data

一次侧电流 I_1/A	互感器二次侧输出电流 I_2/A	
	真实磁化曲线	理想磁化曲线
100	0.399	0.400
200	0.799	0.800
300	1.109	1.111
400	1.262	1.264
500	1.372	1.375
600	1.463	1.466

如图 6(a)所示,在一次侧电流为 500A 时,互感器输出功率的理论计算值为 30.71W ,仿真结果为 30.41W ,可认为理论与仿真结果一致。此时互感器输出电压波形的仿真结果见图 6(b),铁心处于线性状态的时间约为 4.96ms ,而理论计算值为 4.87ms ,通过式(6)、式(7)计算得此时铁心饱和度为 51.3% ,与仿真结果相一致。同时仿真表明,当一次侧电流为 240A 时,铁心临界饱和,与图 4 理论计算结果相一致。至此可验证上述理论的正确性。

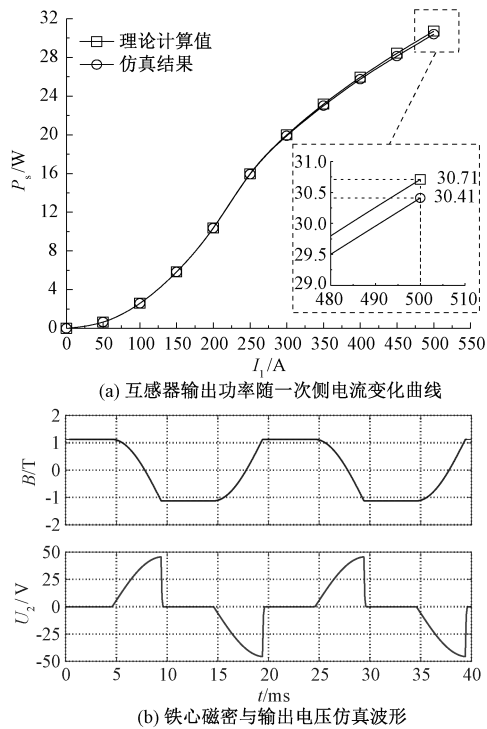


图 6 速饱和电流互感器仿真结果

Fig.6 Fast-saturation current transformer simulation results

当一次侧电流恒为 300A 时,互感器输出功率随负载电阻 R 的变化关系如图 7 所示。随着负载电阻增加,互感器铁心开始出现饱和,且饱和度逐渐提高。在负载电阻 0~50Ω 的变化区间内,互感器的输出功率存在最大值点,此时负载电阻为 16.9Ω,而铁心的临界饱和状态发生于负载电阻为 12.9Ω 时。

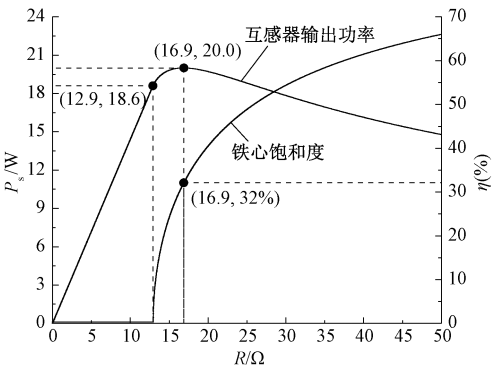


图 7 输出功率与铁心饱和度随负载阻值变化曲线

Fig.7 Output power and core saturation as function of load resistance

3 速饱和电流互感器设计方法

如何在输出功率达到负载要求的情况下,使铁心的体积最小是设计的首要目的。在工程设计中已

知的条件是输电线电流 I_1 和负载额定功率 P_L 。速饱和电流互感器在电网电压不足时通过电流取能方式对智能断路器供电,此时的输电线电流是所处电网的重度过载电流或短路电流。

速饱和电流互感器的设计存在两个重要约束条件,互感器输出电压有效值 U_2 和互感器输出功率平均值 P_s ,两者需满足的条件如下:

$$\begin{cases} P_L < P_s = f_1(S) \\ U_{min} < U_2 = f_2(N_2) < U_{max} \end{cases} \quad (11)$$

式中, U_{min} 和 U_{max} 分别为后端 DC/DC 变换器的最低启动电压和最大限制输入电压。在设计时既要使互感器输出功率满足负载需求,也要让输出电压在后端电路的允许范围之内。

3.1 铁心饱和度和选择

速饱和电流互感器工作时的输出功率与铁心饱和度和有关,且在某一饱和度下存在输出功率最大值,在此饱和度工作可使所需铁心有效导磁截面积最小。通过计算与仿真验证,在铁心饱和度约为 32% 时的互感器输出功率最大。由图 7 可知,铁心饱和度在最大功率输出点附近处变化率较大,导致在互感器设计过程中很难保证铁心饱和度恰好为 32%,为了最大限度减小铁心体积,铁心饱和度可取为 $(32 \pm 5)\%$ 。

3.2 铁心几何尺寸设计

铁心的几何尺寸包括有效导磁截面积 S 与等效磁路长度 l 。根据式(6),互感器二次绕组匝数的平方 N_2^2 与负载等效电阻 Z_L 的比值关系为:

$$\frac{N_2^2}{Z_L} = \frac{I_1 [1 + \cos(\pi\eta)]}{\sqrt{2}\omega B_s S} \quad (12)$$

由式(12)可知,在铁心饱和度不变的前提下, N_2^2 与 Z_L 之比为定值。将式(12)代入到式(10)便可得到在某一铁心饱和度下速饱和电流互感器输出功率与铁心截面积之间的关系为:

$$P_s = \frac{I_1 \omega B_s S}{\sqrt{2}\pi} \left[\frac{2\pi(1 - \eta) + \sin(2\pi\eta)}{1 + \cos(\pi\eta)} \right] \quad (13)$$

式(13)中不含有负载 Z_L ,表明在某一饱和度下互感器的输出功率仅与一次侧电流 I_1 、铁心最大磁密 B_s 和铁心截面积 S 有关。但负载电阻 Z_L 与二次绕组匝数 N_2 的比值则会影响铁心的饱和度。当已知负载额定功率时,通过式(13)便可知所需的铁心截面积。

当铁心处于线性状态时,磁路长度 l 与励磁电流 i_0 呈近似正比关系变化,根据安培环路定理,该

变化对铁心中的磁场强度影响甚微。由式(13)可知,在忽略励磁电流*i*₀的前提下,速饱和电流互感器输出功率表达式不含有磁路长度*l*,所以铁心的磁路长度可根据实际的安装环境进行择优设计。

3.3 二次绕组匝数设计

速饱和和电流互感器的二次绕组匝数值不影响输出功率,但会影响其输出电压的大小。设计目的是使互感器与负载实现阻抗匹配,从而使互感器的输出电压值在其后端 DC/DC 变换器的允许范围内。根据式(10),互感器输出电压有效值为:

$$U_2 = \sqrt{P_s Z_L}$$
$$= \frac{I_1 Z_L}{N_2} \sqrt{1 - \eta + \frac{\sin(2\pi\eta)}{2\pi}} \tag{14}$$

二次绕组匝数*N*₂的改变会使互感器输出电压*U*₂发生改变,但同时因 DC/DC 变换器为恒功率输出,故负载等效输入阻抗*Z*_L实为变量。根据式(12),*Z*_L与*N*₂比值的改变又会导致铁心饱和度*η*的变化。所以,若想得到互感器输出电压与二次绕组匝数间的精确定量关系十分困难。对式(12)做定性分析,二次绕组匝数增加使互感器输出电压升高,而 DC/DC 变换器输出功率恒定,从而导致输入阻抗*Z*_L增加,那么铁心饱和度如何改变将取决于*N*₂和*Z*_L的增加速率。经实验发现,二次绕组匝数的小范围增减(1~10 匝)对铁心饱和度的影响可忽略不计,在设计二次绕组匝数*N*₂时,*Z*_L与*N*₂之比可认为是定值。因此,将式(12)代入到式(14)可得到互感器输出电压与二次绕组匝数之间的近似关系:

$$U_2 \approx \frac{\omega N_2 B_s S \sqrt{2\pi(1 - \eta) + \sin(2\pi\eta)}}{\sqrt{\pi} \cdot 1 + \cos(\pi\eta)} \tag{15}$$

根据后端 DC/DC 变换器的允许输入电压范围便可确定互感器二次绕组匝数的取值范围。速饱和和电流互感器在真实工作环境下其一次侧电流值可能会大于设计值,所以在选取二次绕组的匝数值时应临近其取值范围内的最小值。

4 设计实例

假设以额定电流 32A 的智能小型断路器为被供电对象。根据此断路器反时限保护特性曲线,短路电流通常约为 10 倍的额定电流。那么以 300A 短路电流大小作为互感器的一次侧电流值,并假设互感器需提供最大功率为 20W。

速饱和和电流互感器的铁心材料采用牌号为 1K107 的非晶态纳米晶合金材料,材料参数如表 1

中所示。根据式(13),互感器铁心有效导磁截面积需为 248mm²。考虑到理论推导过程中忽略了铁心损耗以及线路损耗等因素的影响,选取铁心有效导磁截面积为 255mm²,尺寸如表 1 所示。

智能断路器采用直流 12V 供电方式。若 DC/DC 变换器为降压斩波电路,为保证其正常工作,输入电压需大于 1.5 倍的输出电压。那么速饱和和电流互感器的输出电压*U*₂应大于 18V。根据式(15),互感器二次绕组匝数应大于 245.1 匝,本设计中采用 250 匝。

实验现场如图 8(a)所示,通过调节调压器模拟 300A 的短路电流大小。根据设计输出参数,将负载调至 16.2Ω 后接于速饱和和电流互感器二次绕组。互感器输出电压波形如图 8(b)所示,电压有效值为 18.2V,负载获得功率 20.4W。理论分析与实验结果的对比见表 3。互感器输出电压实际值与理论计算值相差不大,由此可证明该设计方法的可行性。

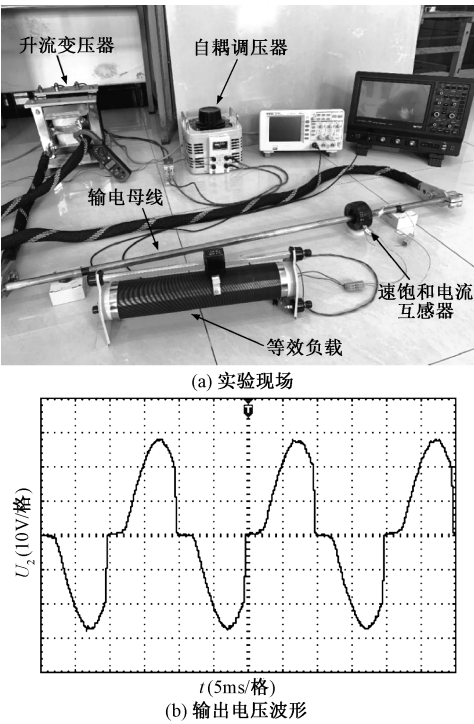


图 8 速饱和和电流互感器取能实验
Fig.8 Fast-saturation current transformer energy harvesting experiment

实验中互感器的实际输出电压值略低于理论计算值,其原因是在设计铁心截面积和二次绕组匝数时留有了一定裕量。根据式(12)和互感器模型参数,理论上当互感器内阻与负载等效电阻之和为 17.3Ω 时可输出最大功率,而所用负载等效电阻为

16.2Ω。由式(14)可知,互感器输出电压有效值 U_2 与负载等效电阻 Z_L 呈正相关,所以互感器输出电压的实际测量值略低于理论值。

表3 理论与实验结果统计

参数	数值
U_2 理论计算值/V	18.36
U_2 仿真结果/V	17.96
U_2 实验测量结果/V	18.2
互感器理论最大输出功率/W	20.57
互感器实际输出功率/W	20.4
设计铁心饱和度(%)	32
铁心实际饱和度(%)	约28

图9为短路发生时刻的瞬态实验波形(电网主回路为纯阻性负载)。其中图9(a)为电网电压0相位时刻发生短路,起始时刻瞬态短路电流值(CH2)为0;图9(b)为电网电压在90°相位时发生短路,此时刻短路电流(CH2)为瞬态最大值。

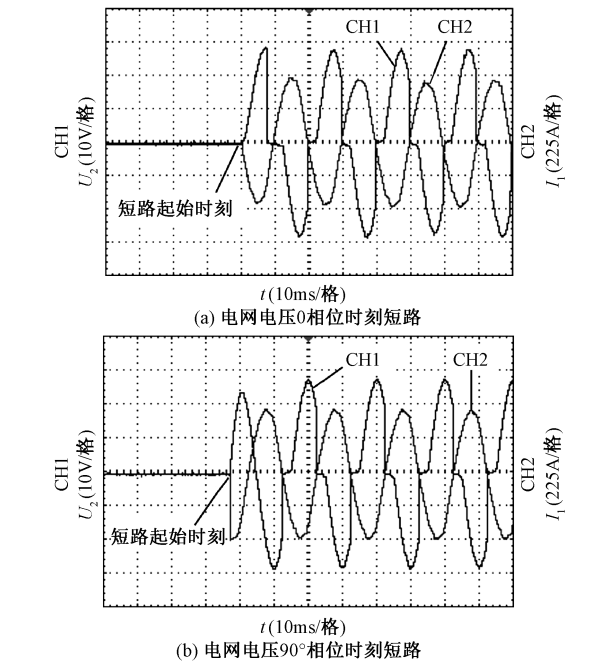


图9 互感器取能瞬态实验

实验结果表明在短路发生的初始10ms中,速饱和电流互感器输出电压有效值稍低于稳态输出值,但在一个短路电流周期结束时,互感器已经达到了稳态输出。在短路发生的初始半个周期内,智能断路器可由常规电压供电部分的储能电容进行供电。由此证明速饱和电流互感器可用于电网短路故障下取能。

本设计实例是以“最坏”工作情况作为假设,即激励源最小、输出功率最大的情况。当短路电流值大于300A或负载所需功率低于20W时,铁心的饱和度会有所加深,但互感器依然可以提供足够的功率输出。

5 结论

本文在深入分析速饱和电流互感器工作特性的基础上,提出了铁心饱和度的概念。深入研究了铁心饱和度对输出功率的影响,提出了基于饱和度的速饱和电流互感器设计方法,该方法可使输出功率与电压满足要求的前提下,使铁心体积与重量最小。最后通过设计实例验证了该方法的可行性。

文中的分析过程及设计方法仅适用于铁心没有气隙的速饱和电流互感器,因为在理论分析阶段忽略了铁心励磁电流对二次侧输出的影响。若铁心存在气隙会大幅降低铁心的励磁阻抗,从而提高励磁电流,致其不可忽略。

参考文献 (References):

[1] 薄志谦,张保会,董新洲,等 (Bo Zhiqian, Zhang Bao-hui, Dong Xinzhou, et al.). 保护智能化的发展与智能继电器网络 (Intelligent relay network for the development of protection) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2013, 41 (2): 1-12.

[2] 杨丽君,曹玉洁,梁景志,等 (Yang Lijun, Cao Yujie, Liang Jingzhi, et al.). 基于博弈思想的需求响应视角下的主动配电网故障恢复 (Active distribution network fault restoration based on game theory in demand response perspective) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (7): 51-60.

[3] 刘铮,樊绍胜,胡劼睿 (Liu Zheng, Fan Shaosheng, Hu Jierui). 基于阻抗匹配的输电线路在线取能方法研究 (Research on on-line energy acquisition method for transmission lines based on impedance matching) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE). DOI: 10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 181866.

[4] Amaro J P, Cortesão R, Landeck J, et al. Harvested power wireless sensor network solution for disaggregated current estimation in large buildings [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64 (7): 1847-1857.

[5] Wang W, Huang X, Tan L, et al. Optimization design of an inductive energy harvesting device for wireless power supply system overhead high-voltage power lines [J]. Energies, 2016, 9 (4): 242.

- [6] 王旭红, 胡劫睿, 刘星, 等 (Wang Xuhong, Hu Jierui, Liu Xing, et al.). 基于并联谐振的双磁路在线取电方法研究 (Research on online power acquiring method of dual magnetic circuit based on parallel resonance) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (12): 63-70.
- [7] 龚贤夫, 周浩, 戴攀, 等 (Gong Xianfu, Zhou Hao, Dai Pan, et al.). 一种输电线路大功率取能电源的设计 (A design of high-power supply installed on transmission lines) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2012, 40 (3): 124-128.
- [8] Cheang J, Cheng W, Gavrilov D, et al. High efficiency powering system for wireless sensor for ac monitoring in smart grid applications [A]. 2014 11th International Conference & Expo on Emerging Technologies for a Smarter World (CEWIT) [C]. 2014. 1-5.
- [9] 康荣波, 杨明发 (Kang Rongbo, Yang Mingfa). 高压设备在线监测装置复合式电源设计 (Design of combined power supply for on-line monitoring of high-voltage equipment) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (1): 67-73.
- [10] 王黎明, 张中浩, 周军, 等 (Wang Liming, Zhang Zhonghao, Zhou Jun, et al.). 宽范围TA取能电源 (Wide range online TA drawout power) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2019, 45 (3): 899-906.
- [11] Van Rensburg J, Nicolae D. A novel CT-based AC power source [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78 (9): 1520-1527.
- [12] 赵强松, 叶永强, 徐国峰, 等 (Zhao Qiangsong, Ye Yongqiang, Xu Guofeng, et al.). 一种适用于小电流母线的电子式电流互感器供电电源 (Power supply of electronic current transformer for power bus with low current) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (19): 121-125.
- [13] 刘亚东, 盛戈崑, 王又佳, 等 (Liu Yadong, Sheng Gehao, Wang Youjia, et al.). 基于功率控制法的电流互感器取电电源设计 (Current transformer draw-out power supply design based on power-controlled method) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2010, 34 (3): 70-74.
- [14] 娄杰, 陈常涛 (Lou Jie, Chen Changtao). 基于启动电流的电流互感器取能电源优化分析及实验验证 (Optimal analysis and experimental verification of current transformer power supply based on starting current) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2018, 44 (6): 1774-1781.
- [15] 郑庆杰, 陈为 (Zheng Qingjie, Cheng Wei). 可饱和电流互感器取能能力的优化设计 (Optimum design of acquired energy ability on saturable current transformer) [A]. 2014年第六届中国功率变换器磁元件联合学术年会论文集 (Proceedings of the Sixth China Power Converter Magnetic Component Joint Academic Conference 2014) [C]. 2014.
- [16] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前 (Gu Chenglin, Chen Qiaofu, Xiong Yongqian). 电机学 (Electric Machinery) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社 (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press), 2010.
- [17] Moon J, Leeb S B. Analysis model for magnetic energy harvesters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (8): 4302-4311.

Power analysis and design method of fast-saturation current transformer

SHI Kai-meng, ZONG Ming

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Fast-saturation current transformer energy extraction is the main method to solve the power supply problem of intelligent circuit breaker under the condition of short circuit and voltage loss in power grid. This paper analyzes and studies the working characteristics and saturation mechanism of fast-saturation current transformer, and establishes the equivalent circuit model of current transformer energy extraction. The concept of current transformer iron core saturation is proposed, and the relationship between current transformer output power and iron core saturation is deeply studied. Through simulation research, the correctness of theoretical deduction is verified. On this basis, the design steps of the fast-saturation current transformer are put forward, including the selection of iron core working saturation, the effective magnetic conduction cross-sectional area of the iron core and the design method of secondary winding turns. The energy extraction circuit of fast-saturation current transformer is built, and the feasibility of the design method is verified by experiments.

Key words: fast-saturation current transformer; current transformer energy harvesting; core saturation; intelligent circuit breaker