

电子脱扣器用电流互感器小型化方案及设计

郑庆杰, 陈 为, 张丽萍

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建福州 350108)

摘 要: 在低压输配电系统中塑壳断路器(MCCB)的电子脱扣器逐步取代传统的机械热磁式脱扣装置, 电流互感器(CT)在电子脱扣器(ETU)中发挥着取能和电流侦测的双重作用。为了适应电子脱扣器小型化和低成本的要求, 提出了一种新的电流互感器设计思路, 通过降低其饱和点来减小体积, 同时利用饱和时互感器的输出电流峰值来侦测过载电流并提供触发信号给控制系统。通过理论分析、Saber 软件仿真和测试, 验证了所提出的小型化方案及其设计的可行性。

关键词: 塑壳断路器; 电子脱扣器(ETU); 电流互感器(CT); 取能; 过流保护

中图分类号: TM55

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)01-0014-04

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.01.004

Miniaturization design on current transformer for electric trip unit

ZHENG Qing-jie, CHEN Wei, ZHANG Li-ping

College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

Abstract: The moulded case circuit breaker (MCCB) electric trip unit (ETU) is replacing thermal magnetic tripping device in low voltage power distribution, current transformer (CT) is the key component for power harvesting and current sensing in ETU. This paper proposes a new current transformer design method for miniaturization and low cost requirements. It decrease saturation point to reduce CT volume, and use the peak value of saturated CT output current for overload current sensing at the same time, and send the trip signal to control system. Based on the theoretical analysis, Saber simulation and verification, it could prove that the current transformer miniaturization design is feasible in electric trip unit.

Key words: moulded case circuit breaker (MCCB); electric trip unit (ETU); current transformer (CT); power harvesting; over current protecting

1 引言

在低压电力输配电系统中, 塑壳断路器(MCCB)作为过载和短路保护装置, 是电能传输稳定可靠的重要保障。塑壳断路器按照脱扣激励分为分励脱扣器、热磁脱扣器和电子脱扣器, 由于分励脱扣器和热磁脱扣器动作分散性大、误差也大, 在一些高端应用场合逐步被电子脱扣器替代^[1]。

近些年输电线路的安全在线监测、控制技术智能化和可视化得到了越来越多的重视和发展。相对于传统脱扣器, 新一代电子脱扣器主要借助电流互感器来侦测被测电流并同时提供能量给控制系统, 借助智能控制单元 MCU 进行精确控制, 也可以借助通信系统把侦测信号提供给远程监测系统和可视化控制系统。电流互感器是电子脱扣器的关键部件,

既要确保电子脱扣器装置在小电流轻载时的取能供电能力满足系统启动和工作要求, 又要保证在大电流过载时的副边输出电流波形无畸变, 以免影响电流侦测的精度要求, 这之间需要有一个很好的平衡, 所以它的优化设计对电子脱扣器的整体体积、成本和性能具有至关重要的作用^[2-3]。

随着断路器和电子脱扣器的小型化发展, 传统的仅考虑电流检测的电流互感器设计方法很难满足要求。本文针对电子脱扣器应用的电流互感器, 提出了一种新的设计思路, 既能保证轻载时系统供电能力, 又能保证过载电流的准确侦测。

2 电流互感器的工作原理

电流互感器主要用作交流电流的侦测, 根据磁压平衡原理, 参考图 1 等效电路原理图, 如果励磁

收稿日期: 2018-10-07 修回日期: 2019-04-30

通讯作者: 郑庆杰 E-mail: zhengqj2005@163.com

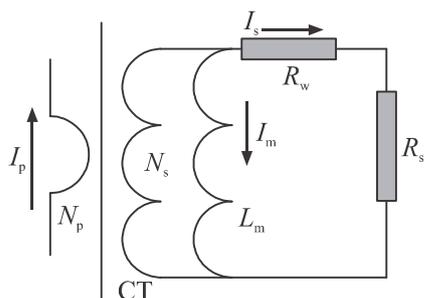


图1 电流互感器侦测电流的电路模型

电感足够大，励磁电流可以忽略，则可得

$$N_p \cdot I_p = N_s \cdot I_s \quad (1)$$

由副边电流 I_s 可以推导出原边的电流 I_p ，同时电流互感器还可以起到电气隔离的作用，方便控制系统提取信号。为了保证励磁电感足够大，即要确保互感器磁芯的磁通密度不饱和。根据电磁感应定律，饱和电流可以根据图1的模型进行计算，其中 R_w 为副边绕组的内阻， R_s 为侦测电阻阻值，得到磁芯的最大磁通密度

$$B_m = \frac{I_s(R_w + R_s)}{4.44f \cdot N_s \cdot A_e} \quad (2)$$

其中 f 是电流频率， A_e 是互感器磁芯有效截面积。如果想要增大电流互感器的耐流能力，必须增大副边匝数 N_s 和磁芯截面积 A_e ，或是减小副边绕组的内阻 R_w 和侦测电阻 R_s 。

如果电流互感器饱和，就会导致互感器副边电流波形失真，无法准确反馈原边电流，其波形如图2所示。

在电子脱扣器中，电流互感器还兼有取能的作用，具体原理如图3所示，在电路中可以有效为在 R_w 和 R_s 之间串联了一个电压源 V_o ，这样就会导致电流互感器的饱和点提前，耐电流能力进一步下降。磁芯的最大磁通密度

$$B_m = \frac{I_s(R_w + R_s) + V_o}{4.44f \cdot N_s \cdot A_e} \quad (3)$$

其中 V_o 就是负载电阻或储能电容 C_f 上的电压。实际电路工作中，如果 V_o 超过设定阈值，还需要开通一个放电回路给 C_f 放电。

3 电流互感器小型化设计与取能

要实现电流互感器的小型化设计，就必须降低其饱和电流点，这样就会面临两个问题，一是小电流取能能力问题，二是过载电流的侦测问题。电流

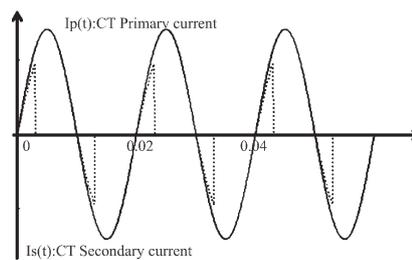


图2 电流互感器饱和后工作波形

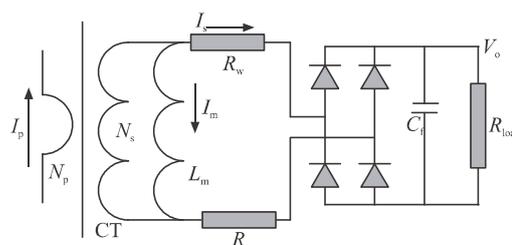


图3 电流互感器取能原理

互感器取能问题，可以通过合理优化 CT 和取能电路来提升取能能力，过载电流可以通过侦测副边饱和电流的峰值来实现。

根据图3的取能电路和(3)式可知，影响电流互感器取能能力主要因素包括：磁芯有效截面积 A_e 、副边匝数、磁芯结构(气隙)等参数。当增大磁芯截面积时，在相同激励电流情况下可降低磁芯的磁通密度，延缓饱和时间，使 CT 在每个周期可以输出更多的能量，从而提高输出电压。增加绕组匝数提高输出电压的机理同上，但是由于增大绕组匝数的同时，也会提高绕组电阻，其对磁通的降低是一个不利因素，会增大绕组的压降 V_w ，因而绕组的增加有一个最优点，并不是越大越好。而增大绕组线径的好处就是降低绕组电阻，在同等电流情况下，可以降低绕组上的电压降 V_w ，从而降低磁通密度，但是这会增加线包体积。不管是增大绕组匝数还是增大线径，都会带来窗口系数的提高，所以在很多情况下，我们需要在保证窗口系数不变的前提下平衡匝数与线径的关系^[4-5]。

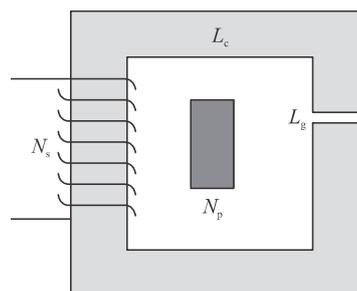


图4 互感器磁路模型

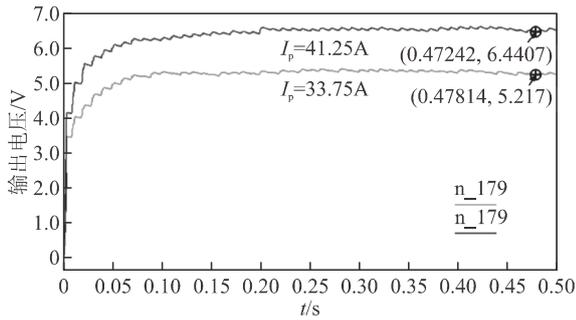


图 5 输出电压仿真结果

从图 3 电流互感器取能电路可以发现，其励磁电流 I_m 的方向与电流互感器副边感应出的电流方向相反，这也会抵消一部分电流互感器的取能能力。降低电流互感器励磁电流的主要对策就是提高 CT 的励磁电感感量 L_m 。图 4 是电流互感器磁路模型，则励磁电感 L_m 由下式给出：

$$L_m = \frac{N_s^2}{R_c + R_g} = \frac{N_s^2}{\frac{l_c}{\mu_0 \cdot \mu_c \cdot A_e} + \frac{l_g}{\mu_0 \cdot A_e}} \quad (4)$$

式中， R_c 是磁芯磁阻， R_g 是气隙磁阻， l_c 是磁路等效长度， l_g 是磁路等效长度， A_e 是磁芯等效截面积， μ_0 是空气磁导率， μ_c 是磁芯相对磁导率。由图 4 和(4)式可知，在磁性材料和磁芯截面积 A_e 固定的情况下，对其影响最大的就是等效气隙 l_g ，不同的组装工艺(叠片插装或是带材卷绕)会造成不同的等效气隙，其中带材卷绕可近似认为 $l_g=0$ ，由于空气磁导率远小于硅钢片的磁导率，所以带材卷绕磁芯的 CT 等效励磁电感 L_m 相对要大很多。

下面借助仿真和实验的方法来进一步验证。首先借助于 Saber 仿真软件按照图 3 电路图建立模型，其中电流互感器的参数如下： $A_e=45 \text{ mm}^2$ ， $N_s=320$ ， $C_f=30 \text{ }\mu\text{F}$ ， $R_{load}=13 \text{ k}\Omega$ ，磁芯采用 H50 材质。

表 1 仿真与实测电路结果和误差

原边电流/A	V_o 测试值/V	V_o 仿真值/V	仿真误差/%
41.25	6.38	6.44	0.94
33.75	5.38	5.21	-3.16

输出电压仿真结果及测试结果分别如图 5 和表 1 所示。可以看出，输出电压的仿真值与实验结果误差小于 3.5%，在可接受范围内，从而证明了仿真的有效性，那么接下来就针对几个变量进行仿真验证，每次验证时改变一个量而确保其他参数不变。

图 6 给出了输出电压随 A_e 值、磁芯机构及副边匝数变化的仿真结果。由图 6a 可以看出， A_e 由 25.2

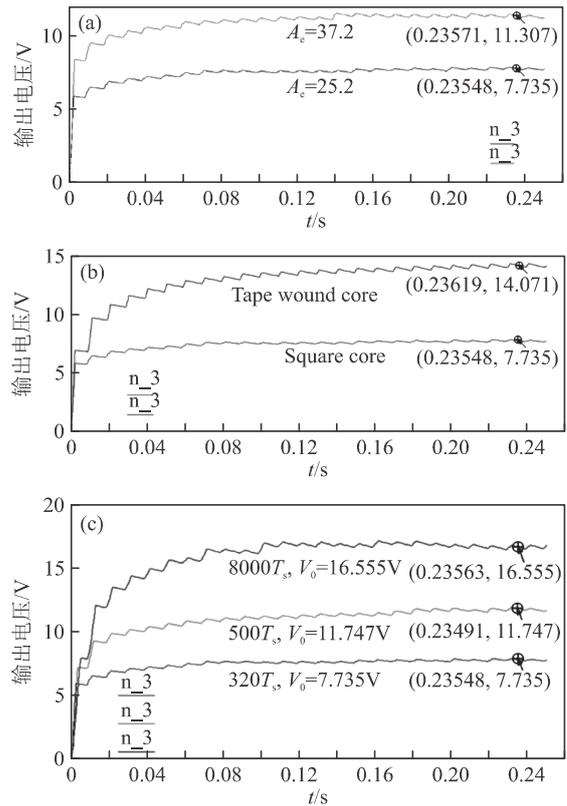


图 6 调整(a) A_e 值、(b) 磁芯机构及 (c) 副边匝数对输出电压的影响

mm^2 增大到 37.2 mm^2 ，输出电压 V_o 由 7.73 V 增大到 11.3 V ；由图 6b 可以看出，把磁芯由插片叠装式改为带材卷绕式，等效气隙下降，输出电压 V_o 由 7.73 V 增大到 14.07 V ；由图 6c 可以看出，把副边绕组匝数由 320 改为 500 和 800，输出电压 V_o 由 7.73 V 分别增大到 11.74 V 和 16.56 V 。由此可见，这三种对策对提升输出电压由图 6c 均有效果，如果同时采用此三种措施，理论上可以把输出电压 V_o 增大的更多。接下来就用实验来验证两种不同方案(表 2)电流互感器的取能效果，具体互感器实物如图 7 所示。

图 8 是对应两种方案的实际验证测试波形，可以看出，在综合运用了多种改善对策以后，在 $I_p=50$



图 7 两种方案实验用电流互感器

表 2 两种互感器方案对比

	方案一(优化前)	方案二(优化后)
磁芯结构	UI 插片	带材卷绕
磁芯截面积	2.1×12 mm	3×15 mm
绕组匝数	320	500
绕组线径	0.15 mm	0.15 mm

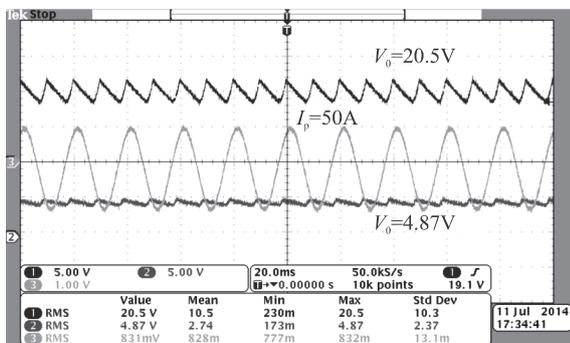


图 8 输出电压的实验结果

A 时，取能电路的输出电压从 4.87 V 提升到了 20.5 V，完全满足系统的能量需求(控制电路和脱扣驱动所需能量)。

4 电流互感器小型化设计与过载侦测

如前所述，使用小型化电流互感器的另一个问题就是过载电流(2~14 倍 I_n 的短延时保护电流和瞬时保护电流)的侦测问题。由于小型化的电流互感器在额定电流 I_n 以内就已经饱和，所以为了侦测过载电流，必须在副边饱和电流 I_s 上想办法提取一个与原边电流 I_p 有比例关系的参数。由图 3 结合变压器伏秒积原理，可以得到。

$$B_s = \frac{(V_w + V_s + V_0) \cdot T_s}{N_s \cdot A_c} \quad (5)$$

$$V_w + V_s = I_s(t)(R_w + R_s) \quad (6)$$

对于电流互感器取能电路来说， V_0 远大于 V_w 和 V_s ，所以可以忽略 V_w 和 V_s 的影响，近似认为饱和时间 T_s 是固定的，这样就可以得到

$$I_{sp} = \sqrt{2} \cdot I_{rms} \cdot \sin(\omega \cdot T_s) \quad (7)$$

由(7)式可以看出，副边电流的峰值与原边电流成比例关系，但是由于 V_w 和 V_s 也不能完全忽略，所以会有一些非线性的影响。

结合 Saber 仿真软件，设置好电流互感器的模型，导入 H50 磁芯材料的磁化曲线，具体仿真电路如图 9 所示。通过仿真可以得到副边检测电阻 R_s 上的电压如图 10 所示，可以发现，这个电压波形的峰值 I_{sp} 随着输入电流 I_p 的增大而增大，与前面的理论

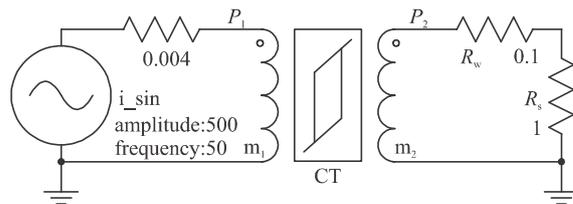


图 9 电流互感器取能仿真

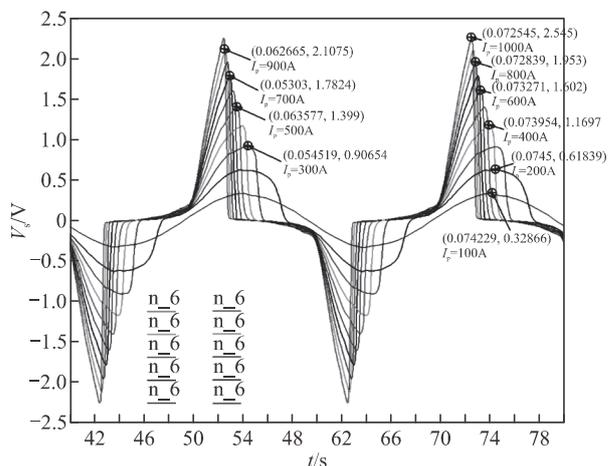


图 10 副边 R_s 输出电压仿真结果

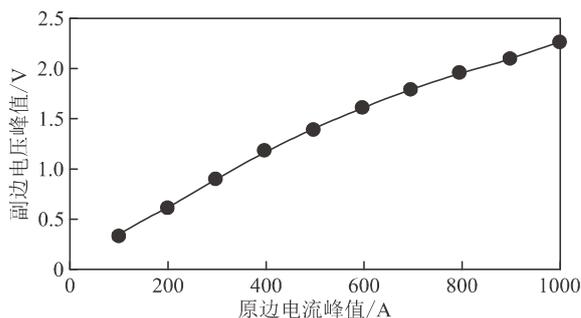


图 11 副边电压峰值与原边电流峰值的关系

分析一致。进一步整理数据得到副边电压峰值与原边电流峰值的关系如图 11 所示，可以看出，副边侦测电阻的压降峰值 V_{sp} 与原边电流峰值之间呈近似的线性关系。这就说明可以把副边的 V_{sp} 作为短路和瞬态保护的判断依据，精度基本可以满足应用要求，实际应用时也可以在软件系统对精度和整定时间进行微调 and 补偿。图 12 是实际测试与验证波形，与理论分析和仿真结果基本吻合。

为了进一步验证小型化电流互感器过载保护功能的可行性，实际搭建一个如图 13 所示的过载保护电路。其中 R_s 是副边电流采样电阻，D1、D2、R1、C1、C2 和 Q1 构成了峰值电流采样和放电回路；R2、R3、R4、R5 和运放 AMP1 构成路差分信号放大电路；R6 和 C3 构成 RC 滤波回路，输出信号与比较器

(下转 65 页)

properties at high excitation level I [S].

- [10] IEC 60401-1 Ed.1.0: 2002, Terms and nomenclature for cores made of magnetically soft ferrites - Part 1: Terms used for physical irregularities [S].
- [11] IEC 60401-2 Ed.2.0: 2009, Terms and nomenclature for cores made of magnetically soft ferrites - Part 2: Reference of dimensions [S].
- [12] IEC 60401-3 Ed.2.0: 2015, Terms and nomenclature for cores made of magnetically soft ferrites - Part 3: Guidelines

(上接 17 页)

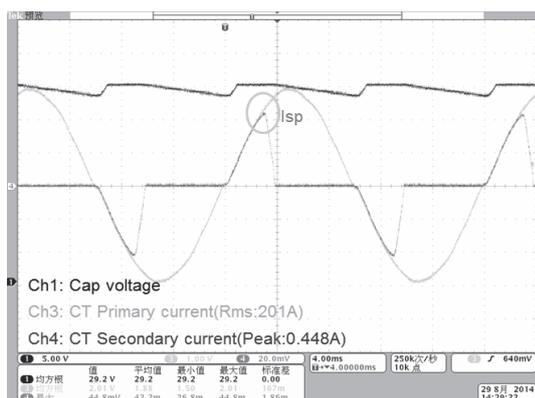


图 12 实测电流波形

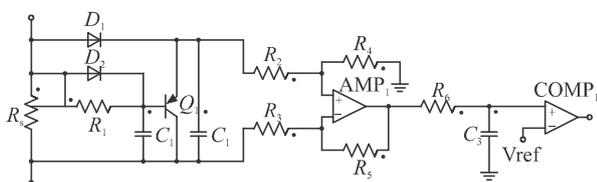


图 13 过载保护电路

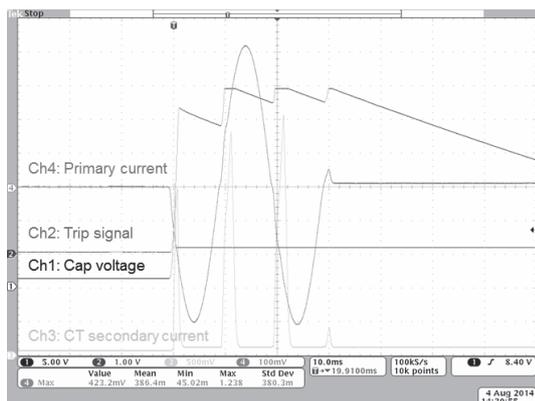


图 14 电流互感器瞬态保护波形

COMP1 的负极参考信号 V_{ref} 进行比较, 一旦超过 V_{ref} 既输出触发脱扣器的驱动信号。

实际模拟测试平台使用的是一个瞬态大电流发生器, 仅提供一个 30 ms 的电流源, 测试结果如图

on the format of data appearing in manufacturers catalogues of transformer and inductor cores [S].

作者简介: 崔莹(1968—), 女, 汉族, 工学学士, 高级工程师。SAC/TC89主任委员, IEC/TC 51、TC 68 和 TC 107 专家, 先后起草和参与编制了几十项国家和军用标准, 2013 年和 2019 年获 IEC1906 大奖。研究方向为电子元器件可靠性、电子元器件标准化、磁性材料与元件。

14 所示, Ch1 是取能系统电源电压, Ch2 是比较器输出信号并不实际触发脱扣装置, Ch3 是副边电流信号, Ch4 是原边电流信号。从图上可以看出, 在大电流时可以快速把电容 C2 充满电荷供控制系统和脱扣装置使用, 同时过载保护电路可以正常工作, 及时发出触发信号给外部脱扣装置。

5 结论

从电流互感器的设计上采取措施降低电流互感器的饱和电流点可以压缩电流互感器的体积和成本, 但是饱和电流点提前对取能有显著的影响, 通过优化设计可以有效提高电流互感器的取能能力。优化设计小型化电流互感器的几个关键参数如磁芯等效截面积、匝数和工艺机构, 从而提升了轻载取能能力, 以满足系统控制电路和脱扣器脱扣的能量需要。

提出了利用电流互感器磁芯饱和时副边电流的峰值作为电流过载保护的方案, 并进行了理论分析、仿真验证和实验, 证明了该方法的可行性。

参考文献:

- [1] 黄绍平, 李永坚. 低压断路器智能脱扣器的设计与实现[J]. 工矿自动化, 2004, (2): 42-44.
- [2] 陈会林, 宋正湘, 刘永刚. 一种新型塑壳断路器智能脱扣器的研制[J]. 低压电器, 2011, (11): 19-23.
- [3] 高辉. 塑壳断路器电子脱扣器的设计与实现[J]. 电器与能效管理技术, 2016, (11): 54-61.
- [4] 郑庆杰, 陈为. 可饱和电流互感器取能能力的优化设计[J]. 磁性元件与电源, 2015, (1): 121-124.
- [5] 郭雅红, 陈为, 郑庆杰. 断路器取能采样磁元件的分析与研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015, (3): 10-13.

作者简介: 郑庆杰(1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子功率变换、磁性元件高频磁技术及 EMI 电磁兼容技术等。