

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

郑庆杰，陈为

福州大学电气工程与自动化学院，福州

摘要：在电力输配系统的继保行业，电子化和智能化的趋势越来越明显，它们强大的监控功能对于电力输配行业来说可以带来很多的便利性和更高的可靠性。这其中大部分的电控部分的能量主要来源于自取电装置，这可以大大提高系统的可靠性。基于CT的自取电系统是最常用的取能方式，但是在一些空间有限的场合，需要一些高功率密度的设计方案。本文介绍了一种基于Saber仿真软件的取能CT优化设计方法，仿真与实验结果显示基于Saber仿真的优化设计方法可以为我们的优化设计找到正确的方向，并缩短研发时间。

关键词：取能，CT，Saber

中图分类号：TM4 文献标识码：B 文章编号：1606-7517(2015)01-4-121

0 引言

在电力输配电系统中，继电保护装置是电能传输稳定可靠运行的重要保证。输电线路一旦发生故障，将给国民经济带来巨大损失。因此输电线路的安全在线监测与控制技术得到了越来越多的重视和发展。出于可靠性角度考虑，对其供能系统也提出了很高的要求，基本上要求其在任何条件和环境下都可以为检测与保护系统提供足够的能量。取能技术的研究自然也成为了继保行业的关键技术。

目前电力继保行业主要的取能技术还是太阳能与蓄电池协同供电、激光供电、电压互感器供电、电流互感器供电和无线供电这几大类。太阳能与蓄电池协同供电虽然是在线监测设备应用较多的一种取能技术，但该方式易受天气影响（尤其是南方地区阴雨天气较多，不适用）且夜间完全依靠蓄电池供电，供电可靠性低并且缺乏长期免维护能力；激光供电的特点是高压侧与低压侧无电气连接且供电稳定性不受电网波动的影响，在电子电流互感器和有源型光学电流互感器上得到了应用，但现在仍面临提高光电转换效率，降低造价及如何避免耗时费力的定期检修和维护等一系列问题；电压互感器取能由于受制于可靠性和绝缘的限制，不太适用于在一些有缺相可能性的场合；电流互感器取能供电是利用电磁感应原理直接从其所在输电线路周围电磁场获取能量的一种自取能供电方式，一般直接在导线上套装取能线圈，将导

线能量转换到二次侧，实现隔离式供电，这也是在线监测鱼控制设备取能应用最为广泛的一种；无线电能传输技术（磁共振技术为主）是最近几年比较热门的研究方向，但是受制于传输距离、效率、成本和可靠性的影响，目前还没有得到普遍推广，主要停留在实验室阶段。

传统电流互感器取能技术相对比较成熟，应用比较广泛，但是存在体积大、成本高和易饱和的特点，在一些需要低成本、高功率密度和集成度的场合，应用具有一定的局限性。本文主要研究了可饱和电流互感器的优化设计，探讨如何使得其在小电流的场合亦可满足系统的取能要求。

1 可饱和电流互感器的工作原理

传统的电流互感器要保证互感器始终工作于非饱和状态（短路或过载情况下可能饱和），这样会使得其体积和成本过高。而可饱和电流互感器在原边电流很小时即达到饱和状态，并长期工作于饱和状态，其只在电流过零点之后的短暂停时间内工作于线性状态，并在此期间提供能量给副边的负载。这样的话可以大大降低电流互感器的体积和成本，并可以降低其绕组损耗。CT 的具体工作电流波形，请参考图 1。

2 Saber软件中的CT模型建立

在基于可饱和电流互感器的取能系统中，由于互感器

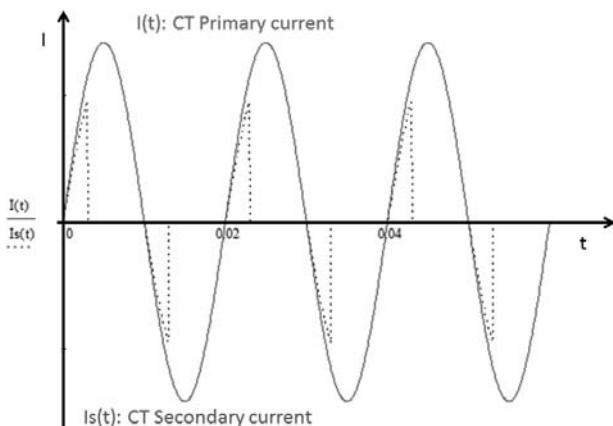


图1 可饱和电流互感器工作波形

存在饱和现象，这是典型的非线性系统，这对于数学模型的建立具有很大的挑战性。而 Saber 仿真软件中正好就有磁性元件的建模工具 (Magnetic Components Tool)，其中包括磁芯的磁化曲线、磁芯物理结构和绕组的物理结构和材质。这些功能和特征模型可以帮助我们轻松的建立 CT 模型，从而解决非线性的问题。

第一步是先设置磁化曲线，将我们使用的硅钢片基本磁化曲线取一些点 (H 和 B)，直到饱和，然后依次输入到对应的表格中，只需输入第一象限的参数就可以了，这样在右侧的图框中就会自动显示一个完整磁化周期的基本磁化曲线。磁化曲线的原始数据可从厂商提供的规格书中查询和通过一些测量得到。具体请参考图 2 所示。

第二步就是设置磁芯的物理结构，这里要特别注意的就是气隙设置，对于插片结构来说，无论如何其内部是有

一个等效小气隙的，这个等效气隙的长度主要受制于插装工艺和叠片的接缝平整程度。仿真时气隙的具体大小可以结合实验来进一步确认。其对取能能力的影响非常大，后面会有仿真数据来说明。具体参考图 3 所示。

在磁芯设置完毕后即可以开始设置绕组结构设置，在设置时要保始终保证绕组窗口面积大于绕组的总截面积，否则系统会自动消减绕组匝数。具体请参考图 4 所示。

点击 Add 或 Edit 后即可以新增或编辑绕组的结构参数，导体的材质可以通过电阻率来体现，默认的导体材质是铜。绝缘层厚度尽量与实际绕组想吻合。具体请参考图 5 所示。

3 仿真电路模型与初步验证

为了方便仿真，此处将整个取能电路系统进行了简化，

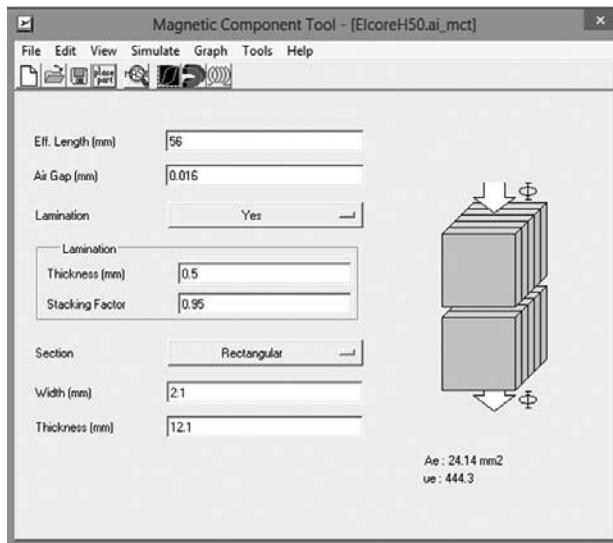


图3 磁芯物理结构构建模界面

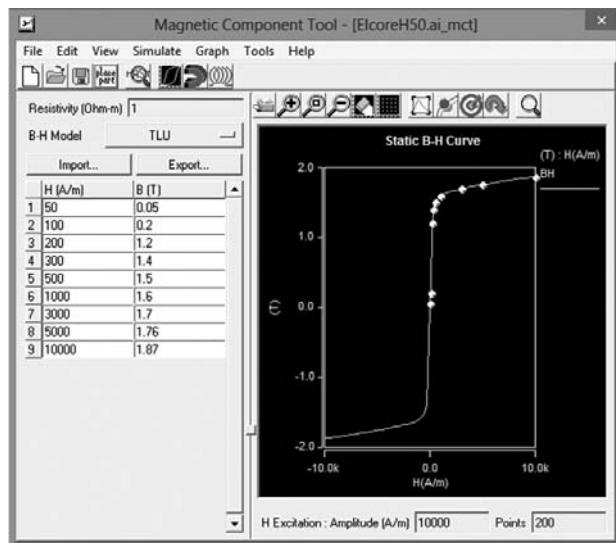


图2 磁化曲线建模界面

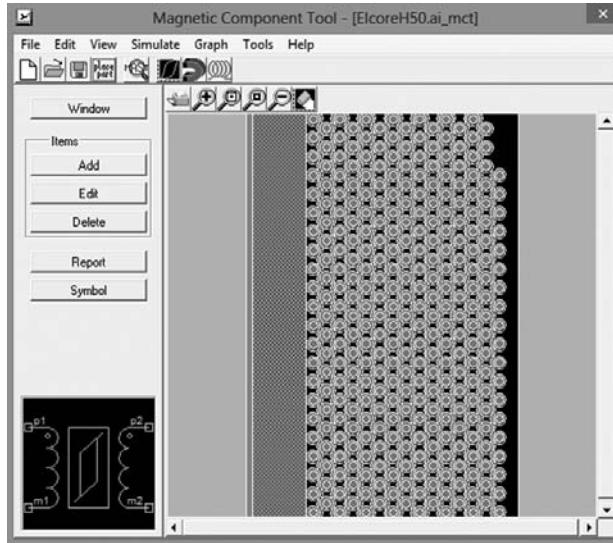


图4 绕组建模界面

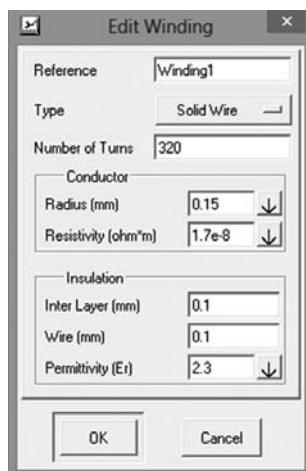


图5 绕组参数设置界面

忽略了稳压、保护等环节，在确保负载电流不变的前提下，将其简化为一个负载电阻。具体请参考图 6 所示。

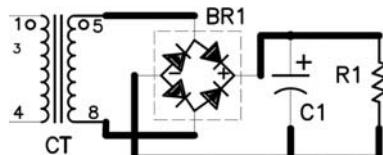


图6 简化的仿真电路

为了确保仿真模型的准确性，首先用一个已有的可饱和电流互感器来验证模型的准确性。具体请参考表 1 所示，通过对比表 1 数据可以发现输出电压的仿真与实验结果误差小于 5%，在可接受范围内，从而证明了仿真手段的可信性。

表1 已有可饱和互感器的仿真与测试数据

Primary current	Test Results	Simulation Results	Simulation Error
41.25	6.38	6.44	0.94%
33.75	5.38	5.21	-3.16%

4 CT优化措施分析与仿真

为了快速寻找到提高 CT 取能能力的优化措施，我们需要先建立 CT 取能系统的模型，然后进一步从理论角度分析可能的优化措施，最后在通过电路仿真的手段进行进一步确认，这样可以避免和缩短复杂的制样与实验过程，提高研发效率。我们首先建立了 CT 取能系统的电路模型，如图 7 所示。理论上来说，CT 可以当作电流源来看，所以在匝比不变的情况下，CT 处在非饱和阶段的时间越长，系统可以得到的能量就越多。那么如何才能延缓 CT 进入饱和的时间呢？我们就要从 CT 磁通密度的计算公式入手，

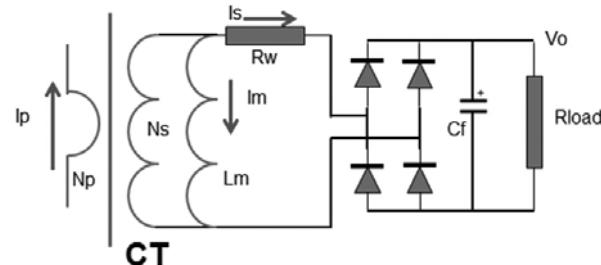


图7 CT取能系统电路模型

请参考式 (1)，其中 V_w 表示绕组压降， V_o 表示输出电压，此处忽略了整流桥的压降。

$$B = \frac{V_w + V_o}{4.44 f \cdot N \cdot A_e} \quad (1)$$

参考式 (1) 可知，对于 CT 取能能力的提升主要有以下措施：增大磁芯截面积、增加绕组匝数、增大绕组线径（降低绕组上的电压降 V_w ）。

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，从而使 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是同上，但是由于增大绕组的同时，也会提高绕组阻抗，其对磁通的降低是一个不利因素，会增大绕组的压降 V_w ，因而绕组的增加是有一个最优点的，并不是无止尽的增加。而增大绕组线径的好处就是降低绕组阻抗，在同等电流情况下，可以降低绕组上的电压降 V_w ，从而帮助降低磁通密度，但是这会增大线包体积。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。图 8 就是我们实际仿真的一个例子，通过仿真的办法我们可以找到一个匝数与线径的最优组合点（确保窗口系数不变的前提下，同时调整

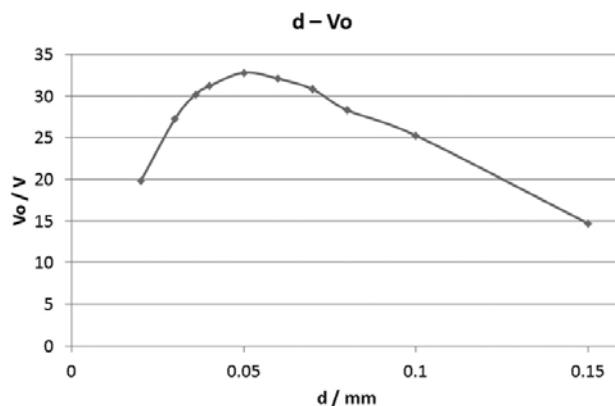


图8 线径(含匝数)与取能的关系曲线

CT 的匝数和线径)。从仿真曲线可以发现最优组合点出现在线径为 0.05mm 处,但是考虑到实际工艺要求,为了防止断线风险,实际一般要取线径为 0.1mm 左右。

除了以上措施以外,我们从 CT 取能系统电路还可以发现,其激磁电流 I_m 方向与 CT 副边感应电流相反,这也会降低 CT 取能系统地取能能力。那么如何才能降低 CT 激磁电流的影响呢?主要措施就是提高 CT 的激磁电感感量,在材料和磁芯截面积固定的情况下,对其影响最大的就是组装工艺(叠片插装或是带材卷绕)。不同的组装工艺主要影响的就是磁路模型里的气隙 L_g 大小,如图 9 所示。

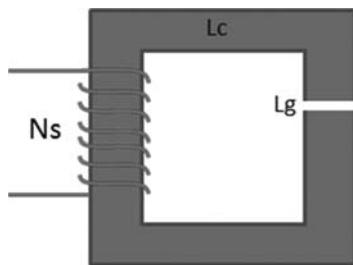


图9 CT磁路模型

由于空气的相对磁导率是 1,而磁芯的相对磁导率是 2000 到 5000,所以一个微小的气隙就会对磁路的感量造成重大影响,气隙越大感量越小,感量减小又会导致激磁电流上升,激磁电流越大取能效果也会越差。具体参考式(2)所示。同理,其对于用于侦测电流的 CT 来说,也会导致侦测精度下降。对于叠片插装工艺来说,无论如何都会存在一个小气隙,而对带材卷绕工艺来说,其理论上是没有气隙的。所以在可能的情况下尽量选用带材卷绕磁芯来做取能和电流侦测 CT 的磁芯。

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

除了这些围绕在 CT 自身的措施以外,还有一个办法就是在电路系统增加谐振电容在整流桥前面,这样在 CT 达到饱和以后,通过谐振还可以使 CT 退出饱和继续给负载供电,从而达到提高取能能力的要求。如下图 10 所示,CH1 的波形就是 CT 副边的电流波形,可以看到在饱和以后,还存在一段谐振电流,这可以帮助提升取能能力 10% 左右。

在明确了以上优化措施以后,接下来就是在仿真的过程中逐步将这些优化措施加上去,如下图 11 仿真波形所示,在依次使用了如下措施:增加匝数(320 匝到 500 匝)、增大磁芯截面积($2*12mm^2$ 到 $3*15mm^2$)、卷绕铁芯和谐振

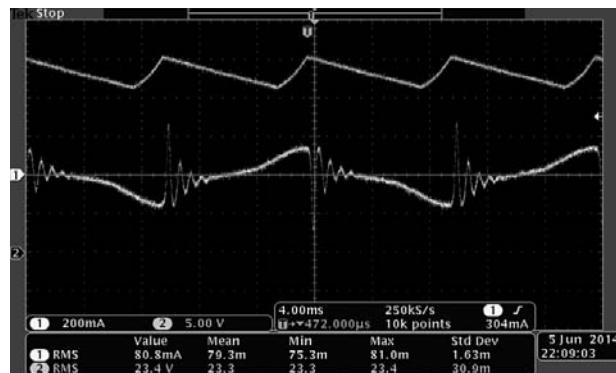


图10 增加谐振电容后的CT电流波形

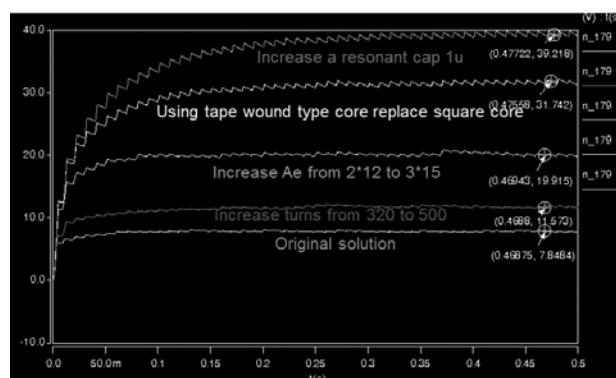


图11 依次增加优化措施的仿真波形

电容后,负载端输出电压最终从 7.848V 提升到 39.2V。仿真结果显示这些优化措施对于提升可饱和电流互感器的取能能力是非常有效果的。

5 实验与结论

为了验证优化措施与仿真结果的可靠性,我们实际打样了一个新的 CT 与原来的 CT 进行了对比测试,测试结果显示,在使用了优化措施以后,同样在 41.25A,负载端输出电压从 6.38V 提升到了 33.52V,虽然与仿真结果有一点出入,但是实验结果证明了优化措施的有效性。这说明基于 Saber 仿真的优化设计方法可以为我们的可饱和电流互感器取能优化设计找到正确的方向,并缩短研发时间,可以为其他类似的设计提供有价值的参考。

作者简介

郑庆杰,男,1979 年生,博士研究生,研究方向为磁性元件高频磁技术,EMI 电磁兼容技术,工程电磁场的仿真与应用,无线电能传输和电流传感器。目前任伊顿中国研究院项目经理,已申请国内和国际相关专利 7 项。

陈为,男,1958 年生,博士,教授,博士生导师。研究方向为电力电子功率变换技术,高频磁元件技术,电磁兼容分析与诊断,电器技术,电气检测以及工程电磁场的分析与应用。