

基于测量电流变化率 di/dt 的大功率电感测试方法

樊小明

(深圳市知用电子有限公司, 深圳 518172)

A High-Power Inductance Measurement Method Based on Measuring Current Rate of Change di/dt

Fan XiaoMing¹

(ShenZhen ZhiYong Electronics Co., Ltd., Shenzhen 518116 China)

ABSTRACT: The traditional high-power inductance measurement method based on LCR bridges with bias current source cannot meet the measure requirements of inductance with a very large bias current in the power electronics field. Therefore, this paper proposes a measurement method based on measuring current rate of change di/dt . Based on the theoretical analysis of these two methods, this paper designs a software and hardware circuit to implement the di/dt method and develops a complete set of product. According to the results of the test on the comparison between the di/dt method and the LCR bridges with bias current source method, these two methods are consistent with each other when they are used to measure a high-power inductance.

KEY WORDS: Inductance measurement; Large bias current; The di/dt method

摘要: 传统的 LCR 电桥+偏流源的大功率电感的测试方法已经不能满足电力电子领域超大电流电感的测试,因此本文提出了一种基于测量电流变化率 di/dt 的测试方法。在针对这两种测试方法的理论分析基础上,设计了一种实现 di/dt 法的软硬件电路,并开发了一套完整的产品。对某大功率电感进行测试对比的结果表明, di/dt 法和 LCR 电桥+偏流源方法是一致的。

关键词: 电感量测量; 大偏置电流; di/dt 测试法

1 引言

目前对于电感的测试,有 LCR 电桥法、直流脉动法(3)、交流激励测试法(5)、开关式电感测量法(6)。目前常用的是数字化 LCR 电桥,其原理是在被测的电感上加一个高频电压信号,通过电桥的自动平衡原理,测量电感的各种参数,如电感量,品质因数等。由于测量的电压是一个不超过 10V 的小电压,流过电感的电流也是一个

几十毫安级的小电流,所以 LCR 电桥测到的是小信号下的电感参数。这个方法适合对小信号模拟电路上的电感元件的测量。

众所周知电感是一个非线性化的元件,电感参数和流过的电流引起的电感的磁性材料的磁化状态有很大的关系。对大功率电感,目前采用的主要是 LCR 电桥+偏流源测试方法,该方法的本质是在一个恒定的直流电流上叠加一个高频小信号去测量电感。这种传统 LCR 电桥+偏流源的测试系统,不但价格昂贵,体积庞大,操作复杂,而且最大测试电流只能在 200A 以内,已经远远跟不上电力电子新产品的发展。

随着大功率电力电子和新能源产品的高速发展,功率电感的电流定额也日益增长,目前已经有超过 1000A 电流的功率电感的需求。工程师最关心的是功率电感在大电流下的电感量衰减是否满足设计要求、功率电感是否饱和以及饱和的程度如何。大电流功率电感的测量对设计一个高可靠性低成本的电力电子和新能源产品至关重要(4)。针对这种情况,本文提出一种基于测量电流变化率 di/dt 的大功率电感测试方法。

2 di/dt 法基本原理

di/dt 法的基本原理是对电感器件施加恒定的直流脉冲电压,通过测量电感 di/dt 的变化,计算出对应电感量和其他参数(1)(3)。

基本公式如下:

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

图 1 是电感的直流磁链对电流的曲线。 I_A 是

电感工作点偏置电流, I_B 是电流达到预设的停止测试的最大电流点。工作点 A 在磁化曲线上变化, 割线电感 L_{sec} 和增量电感 L_{inc} 都将产生相应的改变。

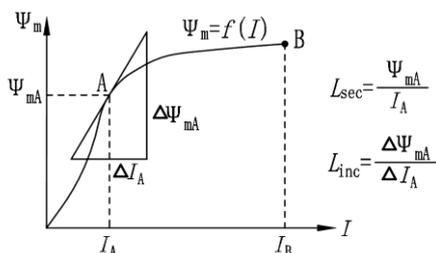


图 1 割线电感 L_{sec} 和增量电感 L_{inc}

di/dt 法是对直流磁链曲线切线计算增量电感(1)(2), 我们定义增量电感(动态电感或小信号电感) L_{inc} 如下

$$L_{inc} = \frac{\Delta \Psi_{mA}}{\Delta I_A} \quad (2)$$

LCR 电桥+偏流源测试方法是对直流磁化曲线上叠加的一个交流小磁滞回环测量增量电感, 如图 2 所示。

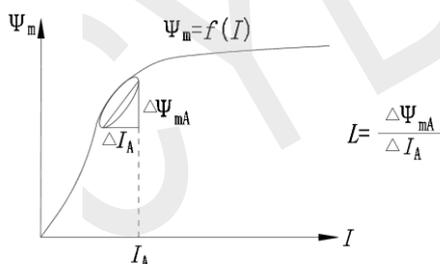


图 2 LCR 电桥+偏流源测试方法的交流磁滞回环和增量电感

LCR 电桥所得到 $\Delta \Psi_{mA}$ 和 ΔI_A 分别对应的是磁链变化的峰值和电流变化的峰值。两个顶点拉的一条直线和直流磁链曲线切线的物理意义相同, 理论上是平行的。LCR 电桥所得到的交流磁滞回环是极小的, 所以 LCR 电桥所测的增量电感值和磁链曲线切线计算的增量电感是很接近的。

电力电子领域的滤波电感的工作状态正是一个直流偏置电流上叠加一个交流磁化曲线, 增量

电感才是用户关心的物理量。

另外割线电感或大信号电感 L_{sec} 定义如下。这个物理量是 LCR 电桥无法测量的。

$$L_{sec} = \frac{\Psi_{mA}}{I_A} \quad (3)$$

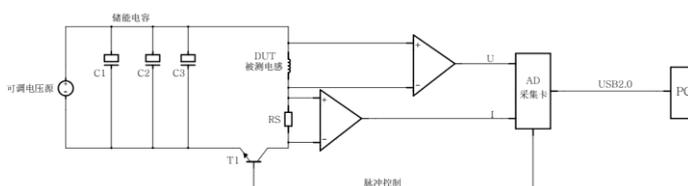


图 3 di/dt 法基本原理框图

如图 3 所示的是 di/dt 法基本原理框图。系统由一个可调的电压源对储能电容进行充电, 当充电到预设的电压后停止。控制电路发出一个导通脉冲到大功率电子开关 T1, 使得储能电容 C1、C2、C3 对被测电感施加一个脉冲电压。当超过最大电流限值 I_B 时则切断脉冲电压。

AD 采集卡对被测电感元件上的电压 U 和电流 I 进行精密的高速 AD 采样, 我们可以获得相应的电压电流数据。把这组数据进行计算, 就可以获得对应的电感参数: 增量电感、正割电感、磁链和磁共能。可以得到增量电感以及正割电感对电流的电感曲线, 既可以作为电流的函数, 也可以作为施加的电压—时间积分的函数。

这种测量方法相比于偏流源法的优点是明显的。优点如下:

①由于是单脉冲测量, 利用电容的放电可以很容易得到极大的偏置电流, 如数千安培。

②测量条件与电力电子实际应用中的电感元件的方波脉冲电压的工作条件是一致的。所以 di/dt 法测试结果更加接近于真实的电力电子的工作状态。

3 di/dt 法设计的大电流电感测试仪

IPT1000 是基于 di/dt 法设计的大电流电感

测试仪，技术指标如下：

表 1 大电流电感测试仪技术指标

| 最大测试能量 | 最大脉冲电压 | 最大脉冲电流 | 电流档位 1 | 电流档位 2 | 电流档位 3 |
|--------|--------|--------|--------|---------|-----------|
| 1100J | 400V | 1000A | 1-10A | 10-100A | 100-1000A |

为了确认 di/dt 法和 LCR+偏流源法测试电感的一致性，我们对伍尔特的大功率电感（型号 7443763521033）进行对比测试，该电感的额定电流是 75A，标称电感 3.3uH。由于该电感的感量较小，为了提高测试精度，对该电感测试的时候采用了 10V 电压。如果选择的测试电压比较高，那么放电脉冲时间就特别短，会导致噪声和误差比较大。



图 4 测试现场照片

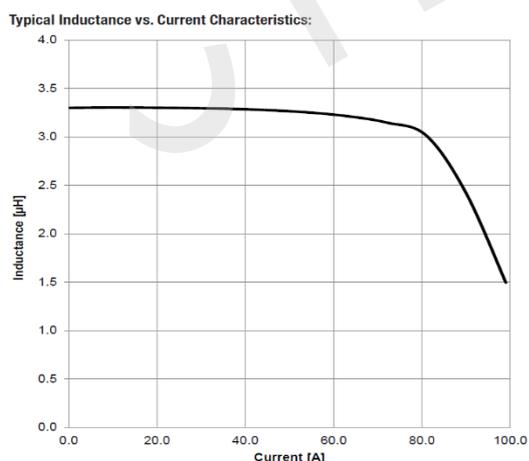


图 5 伍尔特提供的电感电流曲线

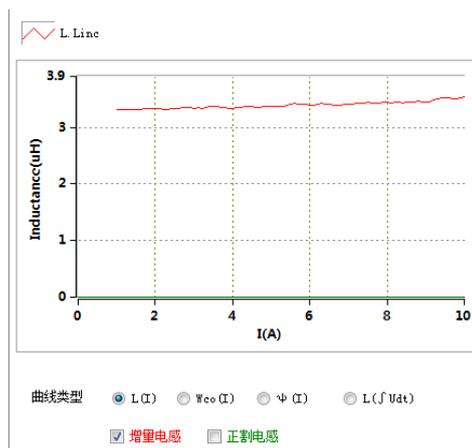


图 6 IPT1000 测量 10A 量程的电感电流曲线

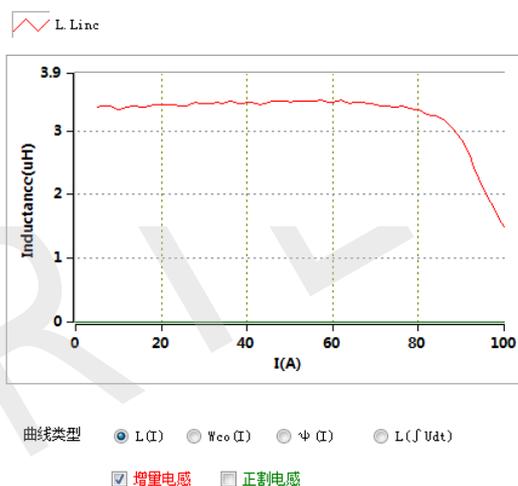


图 7 IPT1000 测量 100A 量程的电感电流曲线

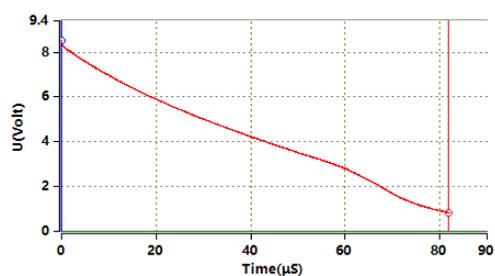


图 8 IPT1000 测量 100A 量程时的电感两端的电压曲线

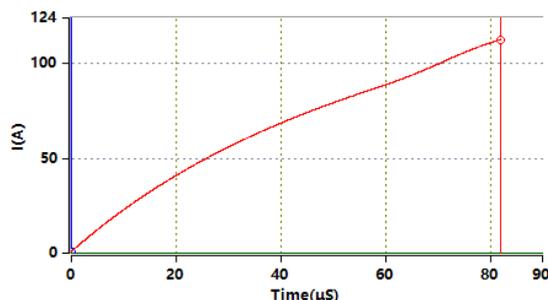


图 9 IPT1000 测量 100A 量程时的电感流过的电流曲线

下面的表 2 是 IPT1000 和 WK3255B 英国稳科 LCR+WK3265B 偏流源 (50A) 测试同一个型号 7443763521033 的电感的数据对比 (电感单位 UH)。测试结果表明两个数据很接近。最大的误差为 6%，发生在激励频率比较低的 1kHz 处。



图 10 WK3255B 英国稳科 LCR+WK3265B 偏流源

表 2 di/dt 法和 LCR+偏流源法测量比较结果

| 直流偏置 电流 | 5A | 15A | 20A | 30A | 35A | 40A | 46A |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| LCR+偏流 f=1kHz | 3.66 | 3.66 | 3.65 | 3.64 | 3.63 | 3.61 | 3.59 |
| LCR+偏流 f=10kHz | 3.44 | 3.44 | 3.44 | 3.44 | 3.44 | 3.44 | 3.42 |
| LCR+偏流 f=100kHz | 3.31 | 3.31 | 3.31 | 3.30 | 3.29 | 3.29 | 3.27 |
| IPT1000 | 3.38 | 3.50 | 3.41 | 3.43 | 3.45 | 3.45 | 3.47 |

5 结语

本文提出了一种基于测量电流变化率 di/dt 来计算电感值的方法，并研发设计出了相应的产品。在对某大功率电感进行测试对比后的结果表明， di/dt 法和 LCR 电桥+偏流源法的测试结果是一致的。

参考文献

- [1] 周洁敏, 赵修科, 陶思钰. 开关电源磁性元件理论及设计 [M]. 北京航空航天大学出版社. ISBN 978-7-5124-1314-6
- [2] 赵修科. 实用电源技术手册磁性元器件分册 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002
- [3] 傅璐璐, 赵洪. 直流脉动大电感测量 [J]. 电子技术与软件工程, 2017(17): 126-127
- [4] K. Toshiyuki, Y. Guo, K. Shiozaki, D. Xu and K. Ngo, "High current and high frequency planar inductor loss measurement and analysis," 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2013, pp. 1689-1692.
- [5] 刘小艳, 杨志坚, 王启睿. 实用数字电感测量仪设计与实现 [J]. 实验技术与管理, 2017, 34(06): 93-96.
- [6] 东忠阁. 开关式电感测量仪的研究与设计 [D]. 东北农业大学, 2014.

作者简介: 樊小明 (1969-), 男, 博士, 深圳市知用电子有限公司总经理, 主要研究方向: 精密电流电压传感器技术, 电磁兼容测试技术, 磁性元件测试技术等。
E-mail: 13602646885@139.com