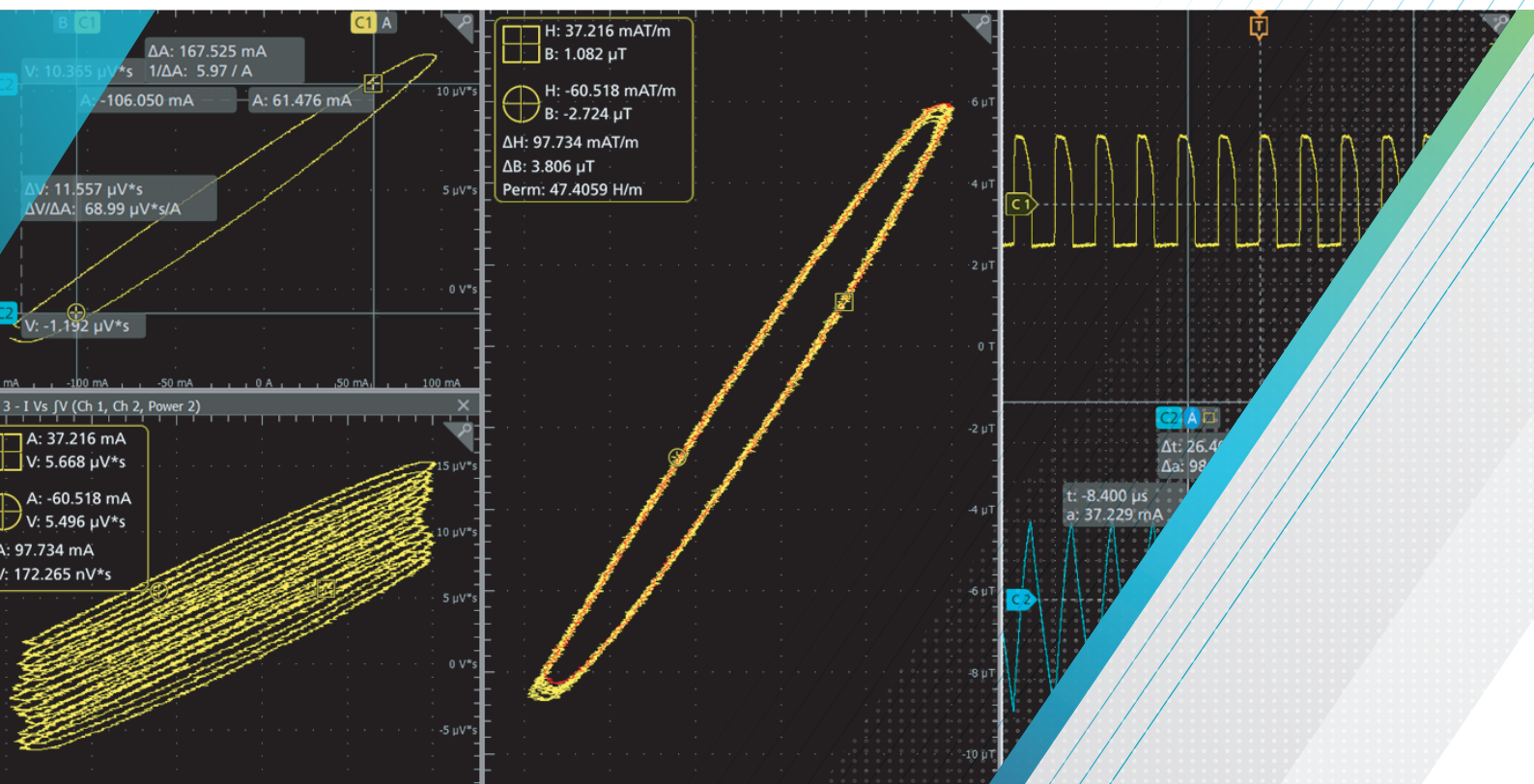


在线测量开关式电源中的电感器和变压器

应用指南



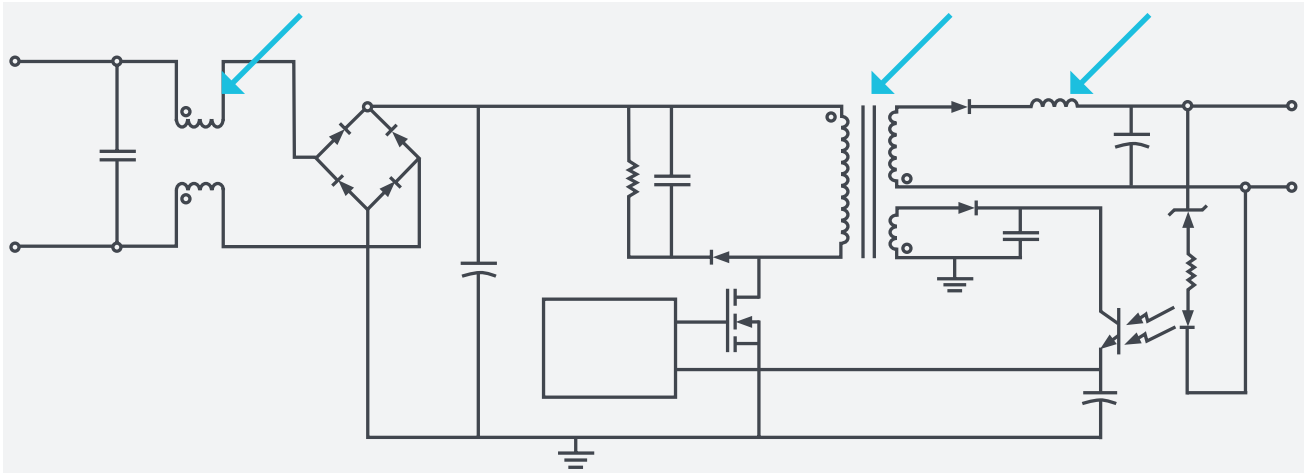


图 1. 电感器和变压器在开关式电源中发挥着关键作用，包括滤波、升压 / 降压、隔离、能量贮存和振荡。

引言

在开关式电源 (SMPS) 中，磁性器件即电感器和变压器发挥着重要作用。电感器作为能量贮存设备或滤波器使用。变压器用来转换电压，提供隔离功能。变压器还在保持 SMPS 系统振荡中发挥着重要作用。大部分 SMPS 设计工艺依赖元器件规范和仿真模型。但是，由于实际信号条件、寄生信号、温度及影响磁性器件性能的其他环境因素，电源的性能可能不会与产品技术资料 and 仿真预测的水平一模一样。因此，在工作条件下在线测量电感器和变压器可以提供重要信息。

本应用指南

- 回顾电感器和变压器基本原理，特别是其与在线测量的关系。
- 解释怎样使用示波器和相应的探头，在电源运行期间测量电感器和变压器性能
- 解释使用电感测量和 B-H 曲线了解器件性能。

尽管介绍的部分测量可以手动设置，但示波器上运行的功率分析软件可以加快设置速度，改善可重复性。本应用指南中的实例是使用 5 系列 MSO 示波器上的 5-PWR 高级功率分析软件开发的。6 系列 MSO 上的 6-PWR 运行方式一模一样。这里介绍的许多电感器和变压器测量也在 DPOPWR 高级功率分析软件中提供，但显示画面和控制功能与本应用指南会有所不同。

电感器原理概览

法拉第定律和朗斯定律告诉我们，流经电感器的电流与经过电感器的电压关系如下：

$$v = -L \frac{di}{dt}$$

公式表明，电感可以视为电流变动产生的相反电压的程度。通过积分、重新排列和去掉符号，可得：

$$L = \frac{\int v dt}{i}$$

这表明，电感可以确定为电压和电流随时间变化的函数。配置电压探头、电流探头的示波器可以完美地实现这一点，能够执行积分，绘制 X 相对于 Y 关系图。

与理论上的电感器相比，实际电感器的电感值取决于电流电平、温度和工作频率。在电源中，这些特点会随着工作条件实时变化。

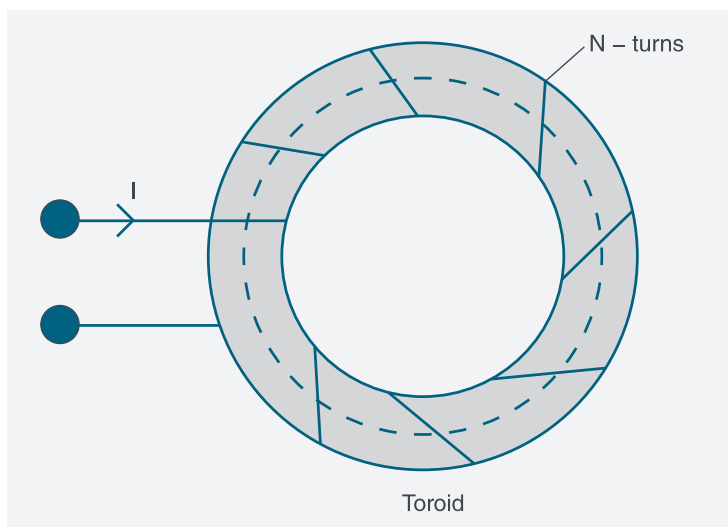


图 2. 基本电感器 - 在封闭的铁磁芯上缠一个线圈。I 安培电流流经 N 圈的线圈。线圈的电感描述了线圈中流动的电流与磁通量之间的关系。

磁芯

例如，求图 2 中螺旋线圈的电感近似值的公式如下：

$$L \approx \frac{\mu N^2 A}{2\pi r}$$

其中：

μ 是磁芯的导磁系数

N 是螺旋线圈上的圈数

r 是磁芯距中心虚线的弧度，单位为厘米

A 是磁芯的横截面面积，单位为平方厘米（假设其相对于螺旋线圈的弧度很小）

由于这个圈数要平方，所以这个因素对电感的影响最大。磁芯材料的导磁系数也发挥着重要作用。但是，电感值还与器件的物理尺寸有关。为使电感器的尺寸达到最小，电子器件中的大多数电感器采用的磁芯材料的导磁系数要远高于空气。

简而言之，磁芯材料的特点和几何形状在确定各种工作条件下电感及器件中的功率损耗至关重要。

电感测量及 I 相对于 $\int V$ 关系

电源设计人员经常使用仿真技术，确定设计中近似的电感器值。在制造电感器后，通常会使用 LCR 表检验电感。但是，大多数 LCR 表使用正弦曲线在窄频率范围上仿真器件，因此这适合确认元件值大体正确，但很难预测在线性能。

电感器上的电感特点取决于电流和电压源激励信号、波形和工作频率，这些指标在实时工作条件下可能会变化。因此，设计人员最好能测量和观察电感器在电源动态变化环境中的行为特点。泰克高级功率分析软件（如 5-PWR）自动完成这一测量。

进行测量

我们通过探测经过器件的电压来完成测量，通常会使用差分电压探头。我们通常使用电流探头，测量流经磁性器件的电流。

为确定电感，应用会对测量期间的电压求积分，再除以电流变化。它消除了任何 DC 偏置，使用平均功能计算电感值。

在变压器和耦合电感器上进行电感测量时的注意事项

在测量变压器的电感时，不要在二级线圈上加负载。在非负载条件下测量一级线圈上的电感，相当于测量单线圈电感器的电感。在测量同一磁芯上有多个线圈的耦合电感器的电感时，电感测得值会偏离实际值，这源于其他线圈上的电流影响。

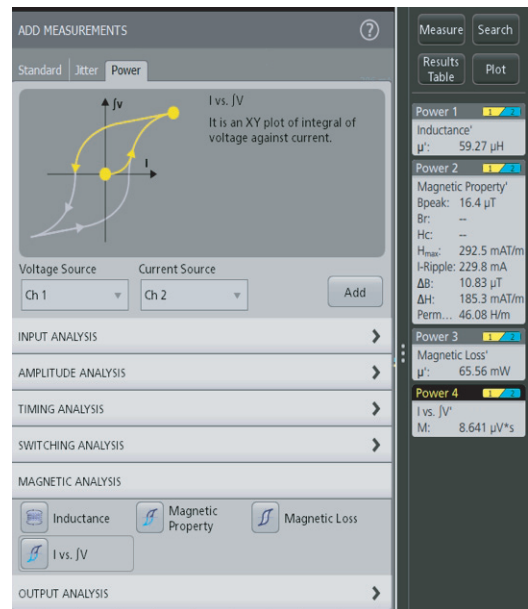


图 3. 指定电压通道和电流通道，设置电感和 i 相对于 $\int v$ 关系测量。

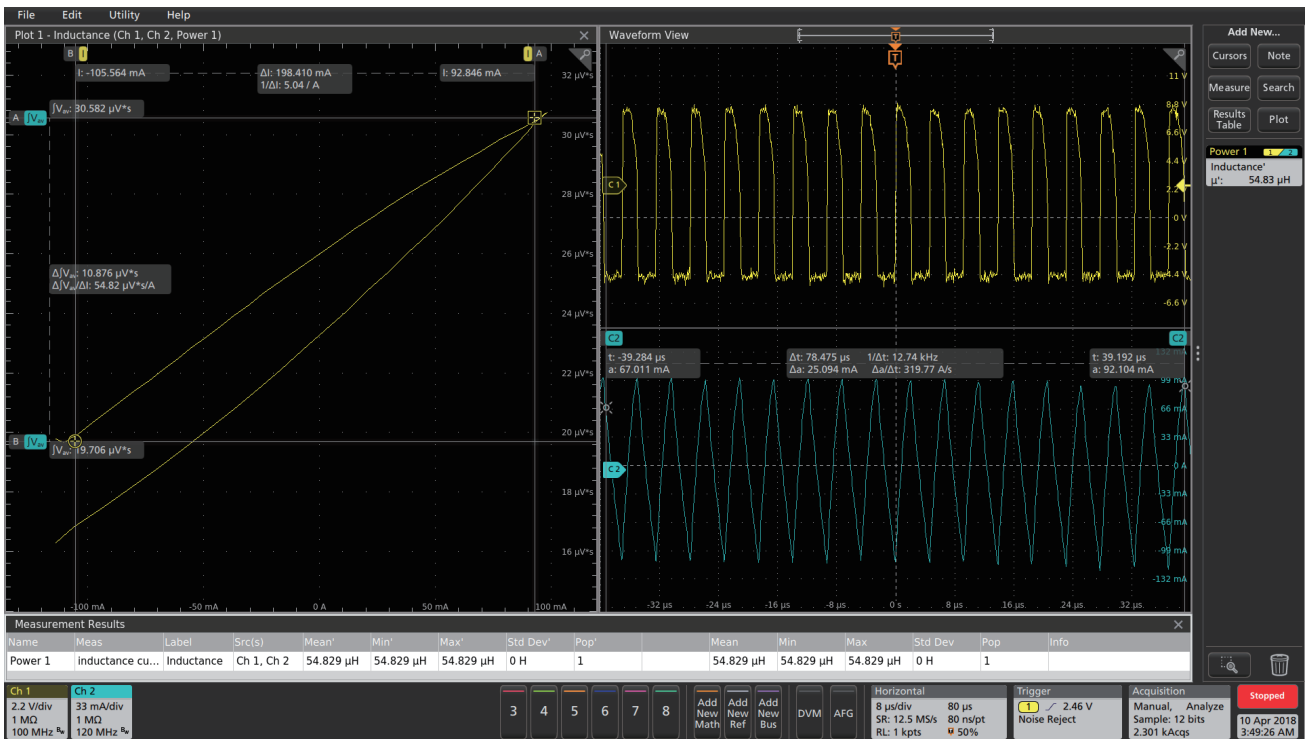


图 4. 电感测量给出了平均电感值，单位为亨利。黄色波形 (CH1) 是经过电感器的电压，蓝色波形 (CH2) 是流经电感器的电流。左图显示了电流 i 相对于 $\int v dt$ 的关系，其斜率就是电感。

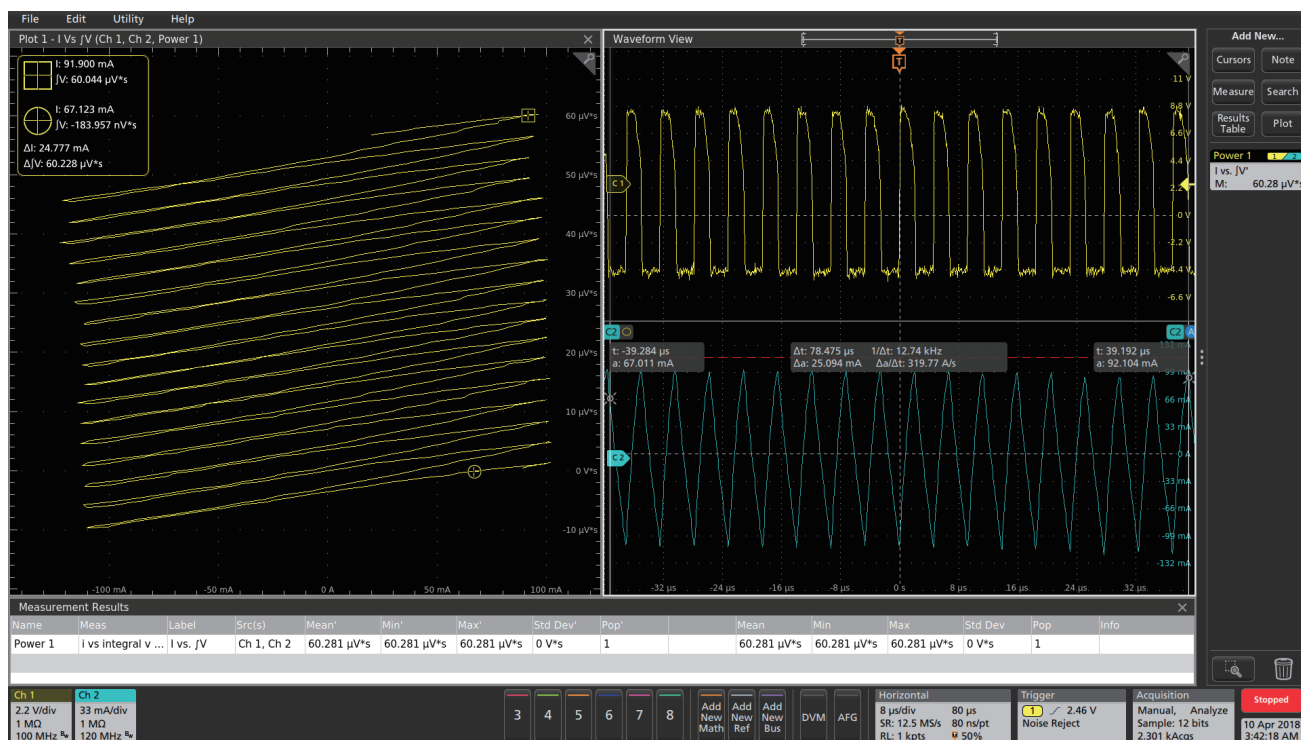


图 5. I 相对于 Jv 关系测量可以进一步了解电感器性能。设计人员可以看到在多个周期中累积的任何 DC 偏置。黄色波形 (CH1) 是经过电感器的电压，蓝色波形 (CH2) 是流经电感器的电流。

B-H 曲线测量

磁性电源器件是为预计工作电压、电流、拓扑和特定类型的功率转换器设计的。电感器和变压器的工作区有助于确定开关式电源的稳定性。但是，电源工作特点在开机、稳定状态运行、负载变化和 환경变化过程中会变化，如果想考虑设计过程中所有可能的场景，那么会异常困难。

因此，为保证电源的稳定性，必需表征磁性器件在 SMPS 中运行时的工作区域。一般来说，目标是避免饱和，在磁滞曲线的线性区域中运行。但是，很难设计一个磁性器件，确保其在所有条件下均在线性区域内运行。

为帮助查看电感器及其磁芯的性能，设计人员使用 B-H 曲线，如图 6 所示。在这条曲线上，H 是器件的磁化力，单位为 A/m。它的单位是安培 / 米，与电流成比例。

$$H = \frac{iN}{l}$$

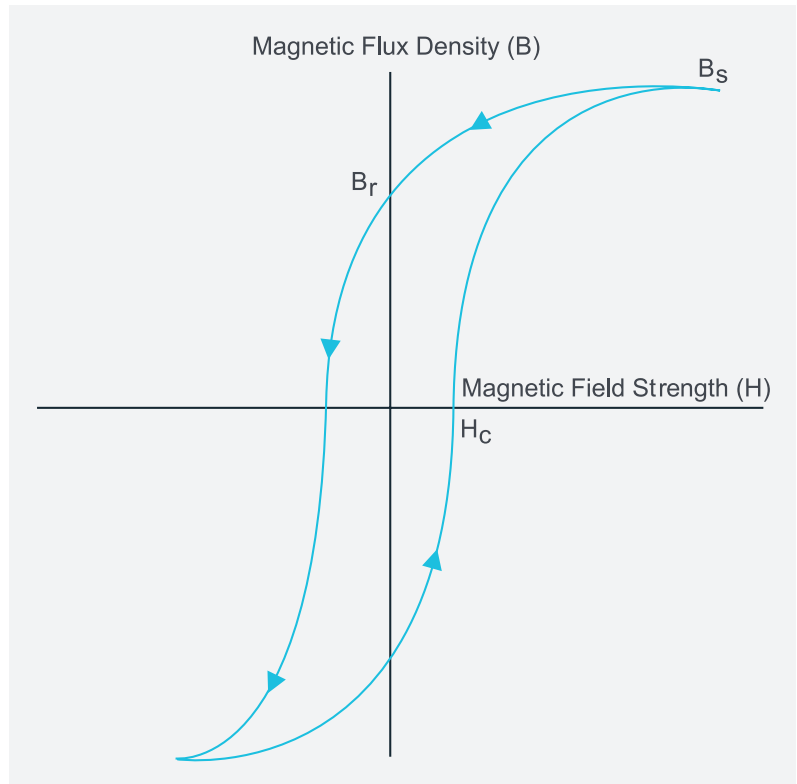


图 6. 典型的 B-H 曲线或“磁滞曲线”。磁芯材料制造商可能会作为技术指标的一部分，提供这样的磁滞曲线。

在线测量开关式电源中的电感器和变压器

得到的通量密度 B 与流经器件的电压的积分成比例。磁通量密度 B 的单位为 Tesla，是磁场强度，决定着磁场在移动电荷上施加的力。

从这个曲线中，我们可以看到：

- **导磁系数 μ ，单位为 H/m。**这是磁芯材料的特点，是磁化力 H (由电流驱动) 乘通量密度 B (积分电压) 的比率。这是 B - H 曲线的斜率。设计人员使用导磁系数高的材料，实现物理尺寸较小的电感器和变压器。
- **饱和通量密度。**额外的磁化力 H 停止产生递增通量密度 B 的点。设计人员在大多数电源应用中会避免饱和。
- **磁滞特点。**磁滞是曲线的“宽度”，指明了电源中的损耗。大多数设计力图使用磁性“软”的磁芯材料，来使磁滞特点达到最小。
 - 剩磁 B_r 。在磁化力后材料中剩余的磁通量密度会下降为零。
 - 抗磁力或矫顽力 H_c 。把通量密度 B 驱动到零所要求的 H 值。

潜在的不稳定性特点表现有：

- 测得的峰值通量密度接近磁芯产品技术资料中规定的饱和通量密度，表明器件接近饱和。
- BH 曲线在周期间变化，表明饱和。在稳定的或高效的电源中， BH 曲线会有一条对称的返回路径，并以统一的方式追踪这条路径。

可以使用示波器在线测量经过电感器线圈的电压及流经电感器线圈的电流。

有了器件中的圈数、器件的磁长度和磁芯的横截面面积，可以根据实时电压和电流测量，推导出实际 B 和 H 值。从绘制的曲线中，可以推导出饱和通量密度、剩余通量密度、导磁系数和矫顽力。

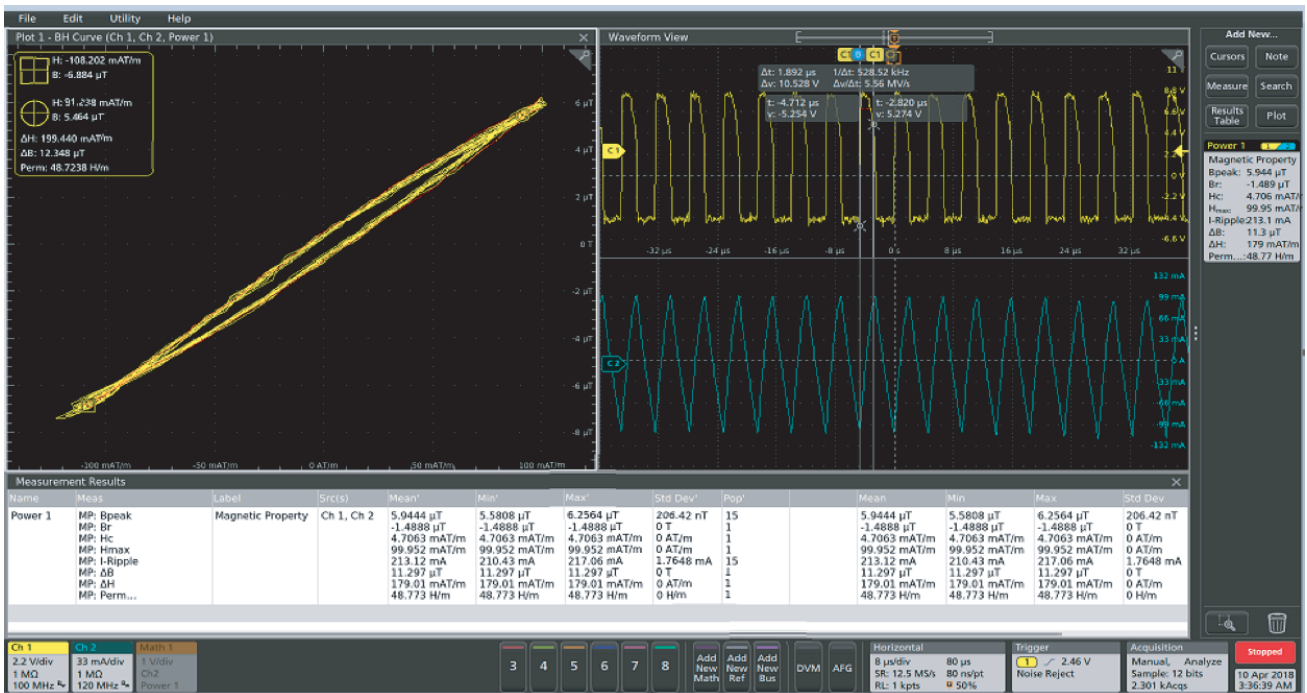


图 7.5-PWR 磁属性测量给出了设计中的磁性器件的磁滞回线，检查磁性器件是否饱和，因为会导致电源不稳定。

进行测量

为生成 B-H 图，我们测量经过磁单元的电压和流经磁单元的电流。在变压器中，需要关注经过一级线圈及二级线圈的电流。

我们在变压器的电感器或一级线圈中连接一只高压差分探头。电流探头测量流经电感器或一级线圈的电流。在需要时，电流探头还用来测量流经二级线圈的电流。

为使用功率分析软件分析 B-H 曲线，在配置面板中必须提供多种信息：

- 圈数 (N)
- 磁路径长度 (l)
- 横截面面积 (Ae)

然后功率分析软件可以使用连接电流探头的示波器通道所得到的数据，计算磁化电流。

图 11 显示了磁属性结果。

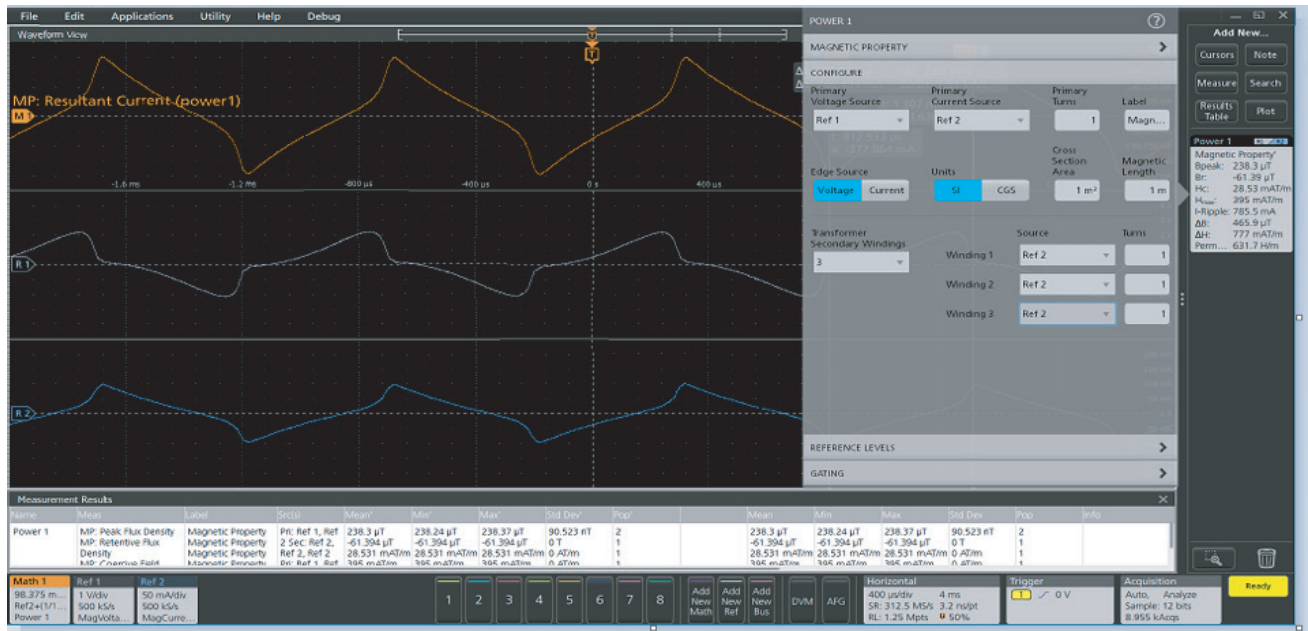


图 8. 多个二级线圈变压器上的磁测量。Ref1 (白色) 波形是经过电感器的电压，Ref 2 (蓝色) 波形是电感器电流。数学波形 (橙色) 是得到的电流波形，是在用户配置测试多个二级线圈时创建的。

测量结果

- **导磁系数**：材料的磁化度。
- **Bpeak**：磁性器件中感应的最大磁通量密度。
- **Br**：曲线上 $H = 0$ 但 B 仍为负值的点，称为器件的剩磁，是用来衡量其顽磁性的指标。剩磁越高，材料保持的磁化度越高。
- **Hc**：曲线上 $B = 0$ 且 H 是负值的点。这代表着导致 B 到达零的外部场。这个 H 值称为抗磁力。抗磁力小意味着器件可以简便去磁。
- **Hmax**：H 轴和磁滞环路横截面处的 H 最大值。
- **I-ripple**：电流的峰峰值。

变压器 B-H 曲线

为测量变压器在工作条件下的磁性特点，必须注意考虑传送到二级线圈中的电流。在测量变压器上的 B-H 曲线时，最好考虑一个理论单元，称为“磁化电感器”。我们看一下常用的多个二级线圈变压器及其等效电路。

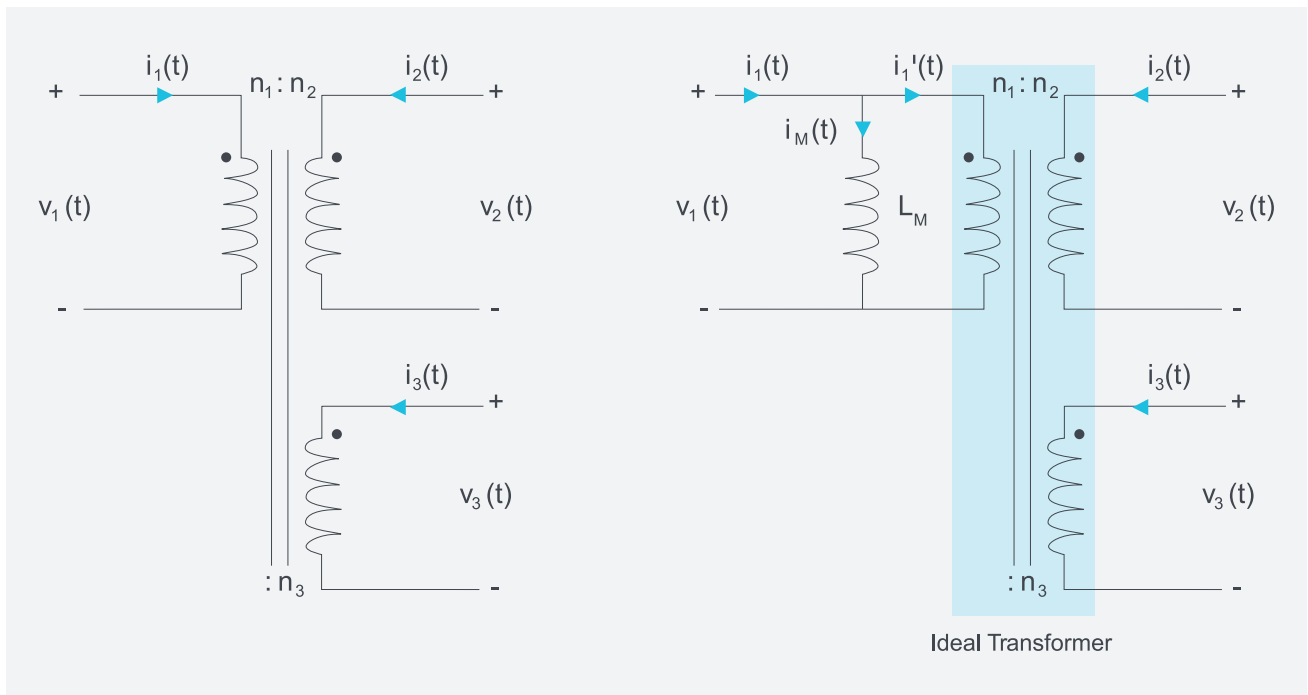


图 9. 变压器示意图 (左) 和等效电路 (右), 显示流经虚数电感器的磁化电流, L_M 与一级线圈并联。LM 建立变压器的磁性特点模型。

磁化电流是在二级线圈开路 (无负载) 时流经变压器一级线圈的电流。换句话说, 磁化电流在二级线圈中不会产生任何电流。如图 9 所示, 我们使用经过一级线圈中流经“磁化电感器”的这个磁化电流来建立变压器模型。一般来说, 这用来建立磁芯材料的磁化特点模型。

5-PWR 软件能够测量变压器二级线圈中的电流, 执行数学运算, 隔离磁化电流, 提供变压器在工作条件下的准确 B-H 曲线。

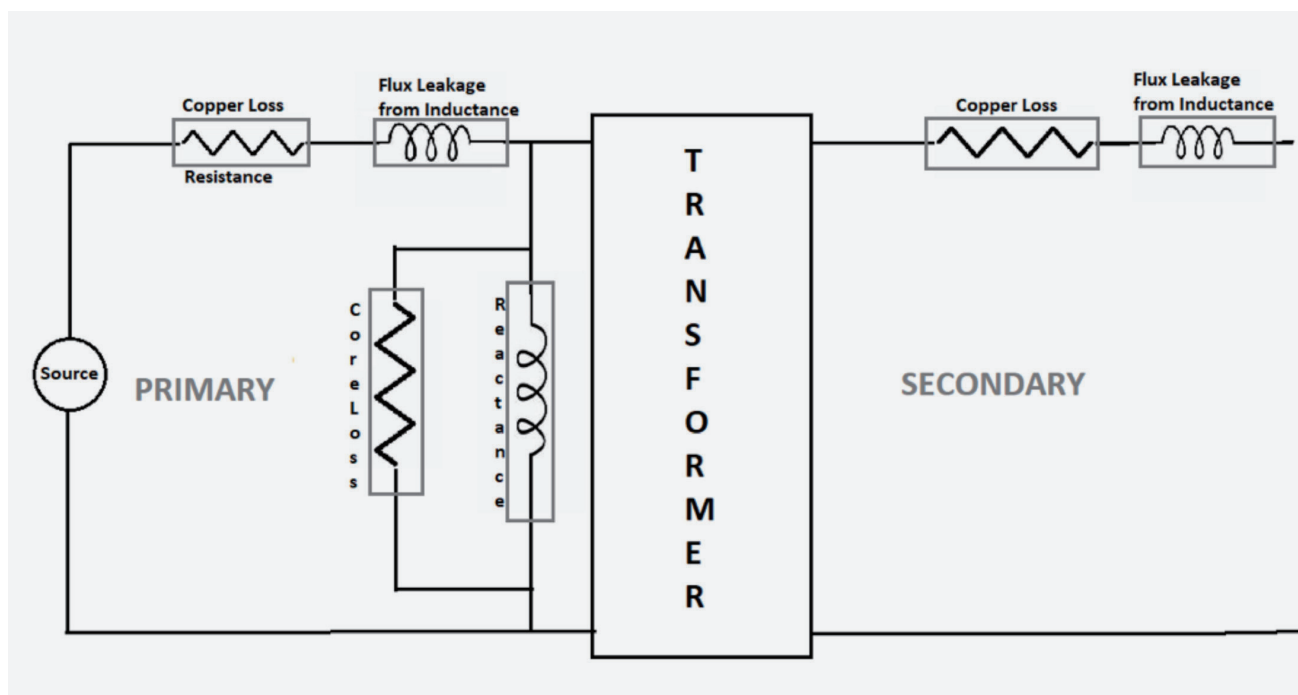


图 10. 变压器损耗可以建模为多个线性单元组合。

损耗分析

磁性器件中的损耗会明显影响电源的整体损耗。图 10 显示了决定磁性器件损耗的主要因素：

- 磁芯损耗取决于材料的磁属性，包括磁滞损耗和旋涡电流损耗。
- 由于线圈电阻导致的铜缆损耗，它也取决于连接变压器二级侧的负载。

有许多技术可以估算磁芯损耗，其中一种技术是 Steinmetz 经验式，它表明了磁芯损耗和通量密度的关系：

$$P_{Core} = kf^a B^b$$

其中 k、a 和 b 是磁芯材料的常数，一般从磁芯制造商的产品技术资料中获取。产品技术资料可能还会估算各种频率和通量密度下的损耗，但一般是对应正弦曲线激励给出的。而在功率应用中，器件通常是使用非正弦曲线激励源驱动的，在这些近似计算中会导致不确定度。

5-PWR 分析软件测量总磁损耗。它通过平均电压与电流波形的功率计算得出，公式为 $\text{average}(v(t) \cdot i(t))$ 。总磁损耗包括铜缆损耗和磁芯损耗。

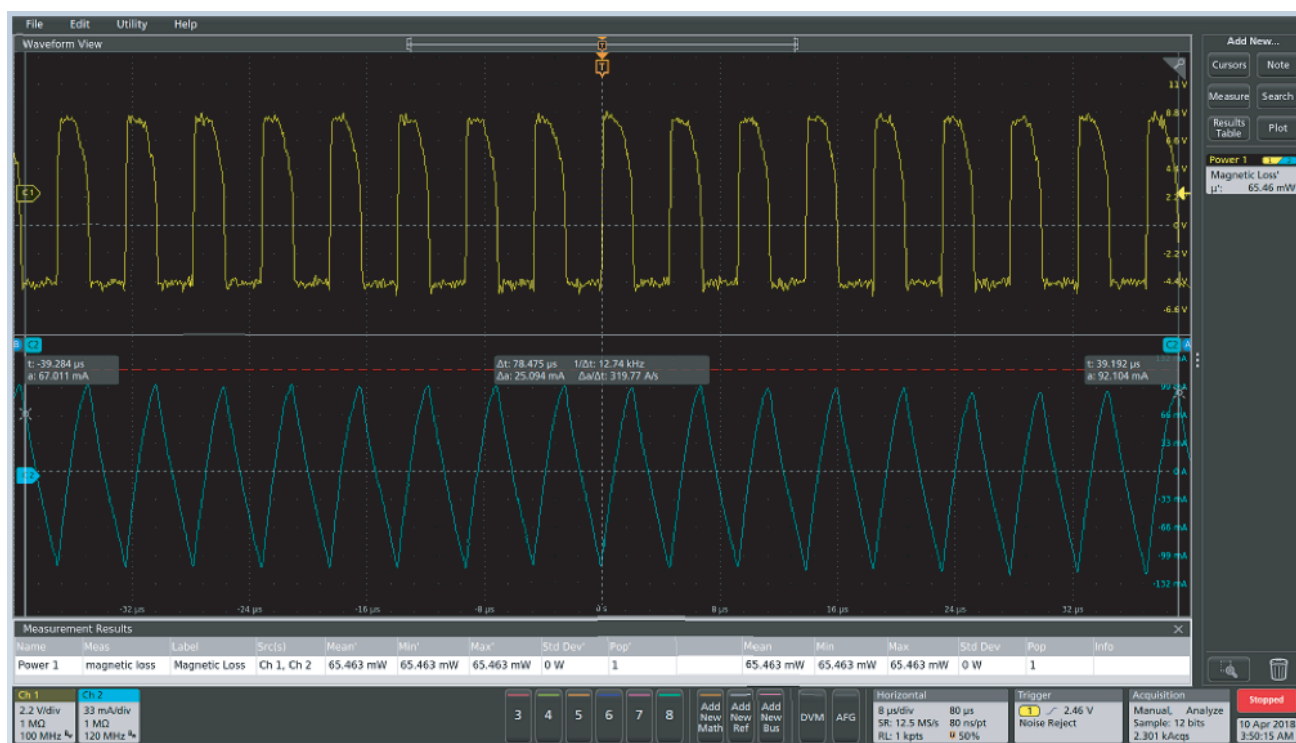


图 11. 5-PWR 磁损耗测量给出了总磁损耗，包括磁芯损耗和铜缆损耗。设计人员可以从器件制造商的产品技术资料中找到磁芯损耗，再从总磁损耗中减去磁芯损耗，得到铜缆损耗。

进行测量

5-PWR 能够计算单线圈电感器、多线圈电感器、甚至变压器中的磁损耗。在单线圈变压器中，我们连接一只差分探头，测量经过一级线圈的电压。电流探头测量流经变压器的电流。然后功率测量软件可以自动计算磁功率损耗。

图 11 是磁功率损耗结果，显示了磁性器件中的总功率损耗。

参考资料

1. “使用数字存储示波器在实时工作环境下测量电感 – 专利号 –6876936”。
2. 交流机器，M G Say。
3. 使用数字存储示波器在线测量磁性器件的饱和通量密度 B_{sat} 、矫顽力 H_c 和导磁系数。



泰克官方微信

如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！

或登录泰克公司中文网站：www.tek.com.cn

泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835

泰克科技(中国)有限公司

上海市浦东新区川桥路1227号
邮编：201206
电话：(86 21) 5031 2000
传真：(86 21) 5899 3156

泰克北京办事处

北京市海淀区花园路4号
通恒大厦3楼301室
邮编：100088
电话：(86 10) 5795 0700
传真：(86 10) 6235 1236

泰克上海办事处

上海市长宁区福泉北路518号
9座5楼
邮编：200335
电话：(86 21) 3397 0800
传真：(86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处

深圳市深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦3001-3002室
邮编：518008
电话：(86 755) 8246 0909
传真：(86 755) 8246 1539

泰克成都办事处

成都市锦江区三色路38号
博瑞创意成都B座1604
邮编：610063
电话：(86 28) 6530 4900
传真：(86 28) 8527 0053

泰克西安办事处

西安市二环南路西段88号
老三届世纪星大厦26层L座
邮编：710065
电话：(86 29) 8723 1794
传真：(86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处

武汉市洪山区珞喻路726号
华美达大酒店702室
邮编：430074
电话：(86 27) 8781 2760

泰克香港办事处

香港九龙尖沙咀弥敦道132号
美丽华大厦808-809室
电话：(852) 2585 6688
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，尽在 WWW.TEK.COM.CN

© 泰克科技公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和国外专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和泰克徽标是泰克公司的注册商标。本文提到的所有其他商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

07/18 EA 55C-61401-2

