高频电感的损耗测量

使用功率分析仪进行电感（线圈）的测量，分析方法

林和延

前言

在 EV 和 HEV 中，会在各种地方需要用到高频电感。比如，从到电池到变频器的升压 DC/DC 逆变器，电池充电电路中的 AC/DC 逆变器等等。而为了实现系统整体的高效率化，需要对各自回路中的效率做出改善。在这些电路中，造成损耗的占比最多的零部件，就是电感了。所以，为了对系统整体的效率做出改善，就必须要准确的去测量电感线圈的损耗。一般来说，这些电感大多被使用在高频开关上。所以，要直接测量到电感的损耗就比较困难。以往的开关元器件大多是使用 IGBT 等等的元件的，开关频率在 10kHz 左右。近几年来随着 SiC 和 GaN 元件朝着实用化的方向发展，超过 100kHz 的开关也变成了可能。因此，相应的测量仪器的带宽，也需要更高频化。在本稿中，我们会使用实测例，来说明一下高精度测量电感损耗的方法。

电感的损耗

Fig.1 中所示的是电感的等效电路。可以把它想成是电感成分 Ls 和损耗成分的电阻 Rs 组成的串联电路。这个 Ls 和 Rs，使用一般的 LCR 测试仪就能测量到了。此时，从 LCR 测试仪中会向被测物施加微弱的正弦波信号来测量阻抗。另一方面，因为以下几点的原因，用

LCR 测量的电感，和在工作回路中的电感，其状态是不同的。

$$X = \omega L_s$$

$$Z = \sqrt{R_s^2 + X^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{X}{R_s}$$

Fig.1：电感的等效电路

・因开关的动作，会被施加上方波电压。所以会流过三角波电流，电压和电流都不是正弦波。

・根据磁力铁芯的特性，各参数都会受电平的影响。所示实际工作状态下的 Ls 和 Rs 等，有时会和用 LCR 测试仪所测到的数值是不一样的。

・在使用 DC/DC 逆变器的时候，电感上被施加的电流是有直流叠加的。因磁芯饱和的特性，直流叠加时的参数有时又会不一样了。

总之，为了高精度的去测量电感的损耗和各参数，并不是要用 LCR 测试仪去测量，而是要在实际工作状态下进行测量。

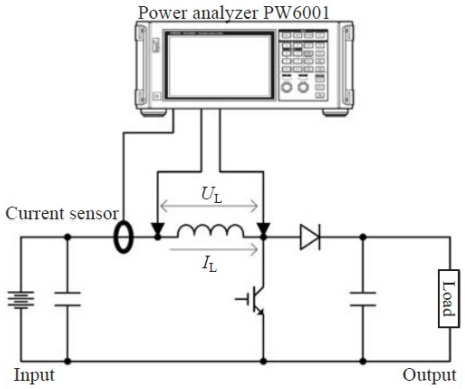

Fig.2：测量升压斩波电路的电感损耗

电感损耗的测量方法

举个例子，图 Fig.2 中所示的是测量升压斩波电路中的电感损耗时的测量结构图。实测时使用的是功率分析仪 PW6001 和电流传感器。施加在电感上的电压 UL 和电流 IL 直接使用功率分析仪去进行测量损耗。此时测量到的功率为，线圈和铁芯各自消耗的功率的总和。也就是说，测量到的是电感整体的损耗。

测量时电流的接线，到功率分析仪为止的电压线，线接的越短，测量就能越准确。另外，也要考虑到电感周围有没有金属或磁性物体的影响。接线和周边的金属有时会对电感的工作造成影响，需要注意。另外，电压线也有可能会受到周围干扰的影响，建议使用双绞线。

如果只测量铁芯的损耗（铁损）的话，就像 Fig.3 这样，会把 2 次侧线圈卷绕在铁芯上测量感应电压。铁损为 B-H 环的面积，所以每单位体积的铁损 Pc 为

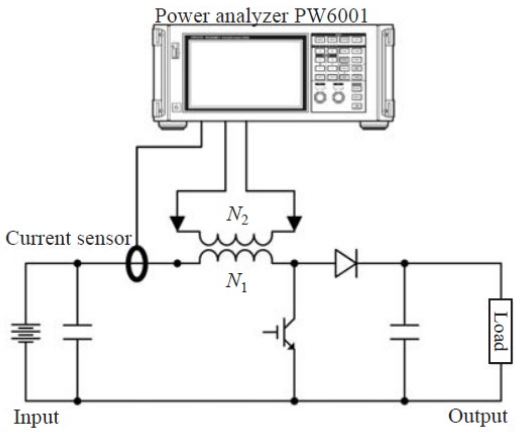

Fig.3：铁损测量

$$P_c = \frac{1}{T}\int H\mathrm{d}B = \frac{1}{T}\int_0^T H\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t$$

在这里，T 为 B-H 环 1 周的周期。当铁芯的磁路长度为 l，横截面积为 A 的时候，1 次侧线圈的电流 i 和磁场 H，2 次侧线圈的感应电压 v 和磁感应强度 B 之间的关系是，

$$H = \frac{N_1 i}{l}$$
$$\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} = \frac{v}{N_2 A}$$

所以每单位体积的铁损就是

$$P_c = \frac{1}{lA}\cdot\frac{N_1}{N_2}\cdot\frac{1}{T}\int_0^T v\cdot i\mathrm{d}t$$
$$= \frac{1}{lA}\cdot\frac{N_1}{N_2}\cdot P$$

这里的 P 是根据 1 次侧线圈的电流 i 和 2 次侧线圈的感应电压 v 测量出来的功率。另外，铁芯的体积为 lA，所以铁芯整体的损耗就是 PcALL，为

$$P_{\mathrm{cALL}} = P_c\cdot lA = \frac{N_1}{N_2}P$$

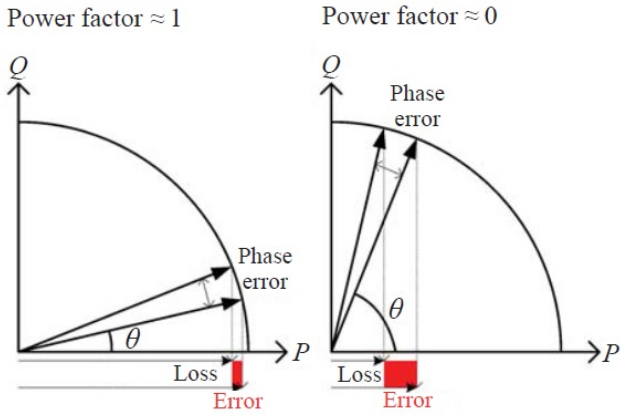

Fig.4：相位误差和功率测量误差之间的关系

如上所述，按照 Fig.3 的构架，就能测量到实际工作状态时的铁损了。另外，功率分析仪 PW6001 在性能上可以做到 5MS/s 采样，16bit 的电压，电流波形的 CSV 保存，还能向 MATLAB 传输。比起一般的波形记录仪器，PW6001 能取得更高精度的波形数据。以这些为基础，还能进行 B-H 曲线的描绘等等的分析工作。

为什么测量电感的损耗比较困难？

电感的阻抗以感抗成分为主。从功率测量上来看，功率因数是比较差的。也就是说，电压和电流的相位差要接近 90 度了。如图 Fig.4 中所示，和功率因数较好的状态相比，电压/电流的测量值受到相位误差的影响要大很多。所以，在测量时就对测量仪器的相位精度要求很高。另外，一般电感都会在数 10KHz~数 100KHz 的开关频率下使用。随着 SiC 和 GaN 元件朝着实用化方向的发展，开关频率也有向高频化发展的趋势。这个时候，就需要用到在高频领域相位精度也非常高的

测量仪器了。另外，使用电流传感器的话也要考虑到电流传感器的相位误差。

像 Fig.2 这样的测量回路，在电压测量部位，电流测量部位都会被施加上一个较大的同相电压。所以也就需要用到共模抑制比 CMRR 较高的测量仪器。正如前面所说的，我们测量的被测物体是在开关频率数 10kHz~数 100kHz 的工作状态下的。由于这个开关频率的关系，测量环境会受到较大的干扰影响。那么，也就需要用到抗干扰性能较好的测量仪器了。

如上所述，在测量时对测量仪器各方面的性能要求较高，所以一直以来测量电感的损耗都较为困难。而使用功率分析仪 PW6001，就能满足以上几点。它主要有以下的几点特性。

・带有电流传感器相位补偿功能。拥有高带宽・高精度的相位特性 1）

・高 CMRR（在 100kHz 下 80dB 以上）

・对电流传感器进行了独到的设计，使之拥有很高的抗干扰的性能 2，3）

测量电感损耗时测量仪器所需要具备的特性

Fig.5 中的图示，就是 Fig.2 回路中在电感上印加的电压・电流波形。电压为方波，而电流是叠加了 DC 分量的三角波。像这样的波形，要以 0.1%的精度去测量其损耗的话，实际需要的带宽在开关频率的 5 倍~7 倍左右 4)。比如，开关频率在 100kHz 的话，测量仪器所需要达到的带宽就在 500kHz~700kHz。

重点在于不只是振幅（增益），电压电流的相位差也需要高精度的去测量。测量超过数 A 的高频电流，我们需要用到电流传感器 2)。而此时，在高频测量中，电流传感器的相位误差就无法忽视了，我们需要用某种方法对其进行补偿。

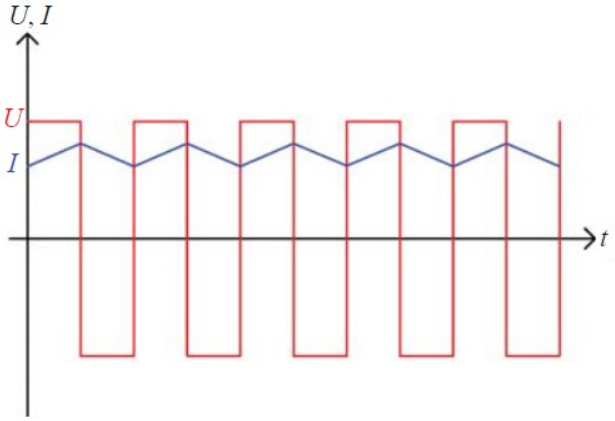

Fig.5:升压斩波电路中电感的电压・电流波形

其他公司的功率分析仪或示波器用的多是 Deskew（倾斜校正电路）功能。此时，需要根据电流传感器的特性，在不同的频点下分别对延迟时间进行设置。然而，像三角波这样的在高带宽中也存在频率分量的畸变波形，测量时误差就会很大。使用功率分析仪 PW6001 和高精度电流传感器组合，就能使用相位补偿功能，只要补偿一个频点，就能对全频段的相位误差进行补偿，实现高带宽，低相位误差的高精度测量。

使用功率分析仪测量电感的例子

这里说明一下使用功率分析仪 PW6001 和电流直接输入盒 PW9100，

测量电感的例子。测量时的电路图如 Fig.6 中所示。被测物电感的规格在 Table1 中所示。测量时，使用了功率放大器（4055 NF Corporation）施加了正弦波信号。使用功率分析仪测量了电压，电流的有效值，相位差，功率等等的项目参数。PW6001 可以利用这些基础的测量参数，进行客户想要的运算。我们称它为“用户自定义运算功能”。在测量电感损耗时，

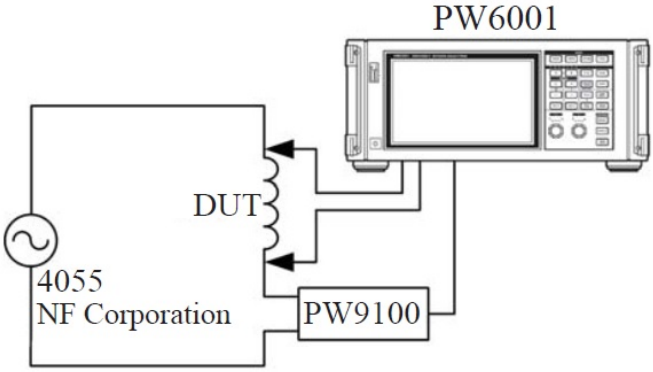

Fig.6：测量结构图

Table 1：电感的规格

Item	Specifications
Core material	Manganese zinc ferrite
Winding	5 Turns
R_{DC}	7 mΩ

用户自定义运算的设置如 Table2 中所示，可以测量到电感在工作状态下的各个参数。

Fig.7 中的所示的,是在 10kHz 下,改变电感上施加的电流电平时,电感 Ls，阻抗 Rs 的变化。另外，Fig.8 中是在频率 100kHz 下，固定

交流电流有效值为 0.5A，改变 DC 偏置电流，对电感的电感 Ls，阻抗 Rs 的变化进行了测量。通常情况下，LCR 测试仪

Table 2：用户自定义运算的设置

Parameters	Formulas
Z	$U_{\mathrm{fnd}}/I_{\mathrm{fnd}}$
X	$Z \cdot \sin(\theta_U - \theta_I)$
R_{s}	$Z \cdot \cos(\theta_U - \theta_I)$
L_{s}	$X/2\pi f$

$U_{\mathrm{fnd}}, I_{\mathrm{fnd}}$: Voltage and current fundamental wave components.

θ_U, θ_I : Voltage and current phase angles (fundamental wave).

f : Frequency (fundamental wave).

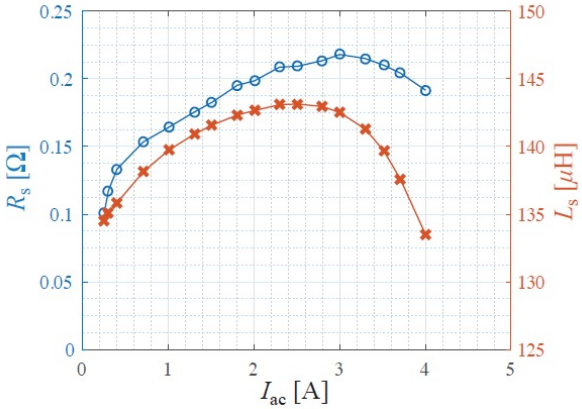

Fig.7：测量电平对电感，阻抗的影响例
f=10kHz.

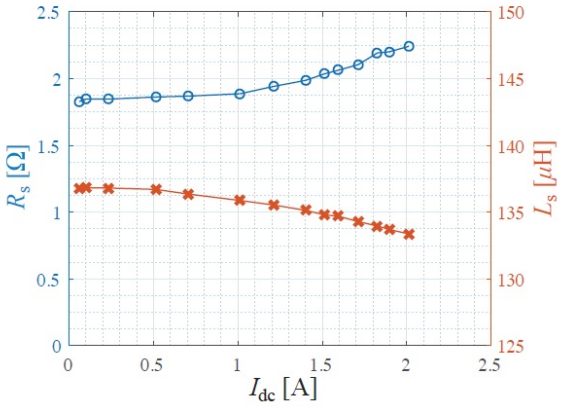

Fig.8：电感，阻抗的 DC 重叠特性的测量
F=100kHz

电流电平只能测量到数 10mA 左右。即使加上 DC 偏置电流，也会受到 LCR 测试仪的 DC 偏置单元的可发生范围的限制。那么，测量出来的参数和实际工作状态时的参数，在数值上是有差异的。此次的测量案例中，使用功率分析仪和电源组合后，就能使用和实际工作状态下近似的电流电平来进行电感的测量了。

在此次的例子中，我们使用电源发出的是正弦波电流・电压。前面也有阐述，实际工作状态的电感中被施加的不是正弦波，而多为方波和三角波电流。如果是功率分析仪的话，就能直接测量到工作状态时的电感了。另外，像 Ls 和 Rs 之类的参数，也能根据功率分析仪的谐波运算结果，来进行运算处理。通过这些功能，就能实现更为正确的分析了。

总结

本稿中，我们对高频电感的损耗测量，分析方法，使用实际案例进行了交流和介绍。为了正确测量高频电感的损耗或参数，在实际工作状态下进行测量是至关重要的。另外，所使用的功率分析仪也需要有较高的性能。在实际例子中，我们用 PW6001 实际测量了电感的损耗，并进行了分析。

参考文献

1) Yoda, H. : “Power Analyzer PW6001”, HIOKI

Technical Notes, Vol.2, No.1, 2016, pp.43-49.

2) Yoda, H., H. Kobayashi, and S. Takiguchi : “Current Measurement Methods that Deliver High Precision Power Analysis in the Field of Power Electronics”, Bodo’s Power Systems, April 2016, pp.38-42.

3) Ikeda, K., and H. Masuda : “High-Precision,Wideband, Highly Stable Current Sensing Technology”, Bodo’s Power Systems, July 2016, pp.22-28.

4) Hayashi, K. : “High-Precision Power Measurement of SiC Inverters”, Bodo’s Power Systems, September 2016, pp.42-47.