

高頻電感的損耗測量

使用功率分析儀進行電抗器(電感)的測量、分析方法

林和延

前言

在EV和HEV中，會在各種地方需要用到高頻電感。比如，從電池到變頻器的升壓DC/DC變頻器、電池充電電路中的AC/DC變頻器等等。而為了實現系統整體的高效率化，需要對各自回路中的效率做出改善。在這些電路中，造成損耗的占比最多的零件，就是電感了。所以，為了對系統整體的效率做出改善，就必須要準確的去測量電感線圈的損耗。一般來說，這些電感大多被使用在高頻開關上。所以，要直接測量到電感的損耗就比較困難。以往的開關元件大多是使用IGBT等等的元件的，開關頻率在10kHz左右。近幾年來隨著SiC和GaN元件朝著實用化的方向發展，超過100kHz的開關也變成了可能。因此，相應的測量儀器的帶寬，也需要更高頻化。在本稿中，我們會使用實測例，來說明一下高精度測量電感損耗的方法。

電感的損耗

Fig. 1中所示的是電感的等效電路。可以把他想成是電感成分 L_s 和損耗成分的電阻 R_s 組成的串聯電路。這個 L_s 和 R_s ，使用一般的LCR測試儀就能測量到了。此時，從LCR測試儀中會向被測物施加微弱的正弦波訊號來測量阻抗。另一方面，因為以下幾點的原因，用LCR測量的電感和在工作回路中的電感，其狀態是不同的。

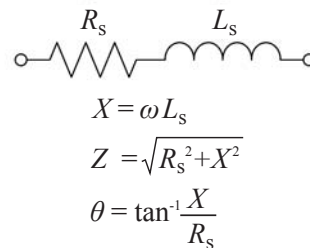


Fig. 1: 電感的等效電路

- 因開關的動作，會被施加上方波電壓。所以會流過三角波電流，因此電流和電壓都不是正弦波。
- 根據磁力鐵芯的特性，各參數都會受電位的影響。所示實際工作狀態下的 L_s 和 R_s 等，有時會和用LCR測試儀所測到的數值是不一樣的。
- 在使用DC/DC變頻器的時候，電感上被施加的電流是有直流疊加的。因磁芯飽和的特性，直流疊加時的參數有時又會不一樣了。

總之，為了高精度的去測量電感的損耗和各參數，並不是要用LCR測試儀去測量，而是要在實際工作狀態下進行測量。

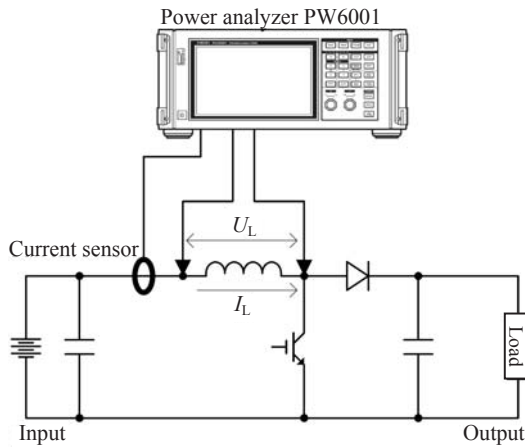


Fig. 2: 測量升壓斬波電路的電感損耗

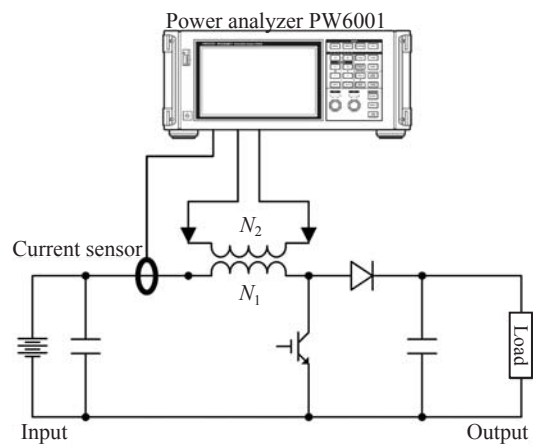


Fig. 3: 鐵損測量

電感損耗的測量方法

舉個例子，圖Fig.2中所示的是測量升壓斬波電路中的電感損耗時的測量結構圖。實測時使用的是功率分析儀PW6001和電流感測器。施加在電感上的電壓 U_L 和電流 I_L 直接使用功率分析儀去進行測量損耗。此時測量到的功率為，線圈和鐵芯各自消耗的功率的總和。也就是說，測量到的是電感整體的損耗。

測量時電流的接線，到功率分析儀為止的電壓線，線接得越短，測量就能更準確。另外，也要考慮到電感周圍有沒有金屬或磁性物體的影響。接線和周邊的金屬有時會對電感的工作造成影響，需要注意。另外，電壓線也有可能受到周圍干擾的影響，建議使用雙絞線。

如果只測量鐵芯的損耗(鐵損)的話，就像Fig. 3這樣，會把2次測線圈捲繞在鐵芯上測量感應電壓。鐵損為 $B-H$ 環的面積，所以每單位面積的鐵損 P_c 可表示為以下公式：

在這裡， T 為 $B-H$ 環一周的周期。當鐵芯的磁路長度為 l ，橫截面積為 A 的時候，1次側線圈的電流 i 和磁場 H ，2次側線圈的感應電壓 v 和磁感應強度 B 之間的關係是：

$$P_c = \frac{1}{T} \int H dB = \frac{1}{T} \int_0^T H \frac{dB}{dt} dt$$

$$H = \frac{N_1 i}{l}$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{v}{N_2 A}$$

所以每單位體積的鐵損就是：

$$P_c = \frac{1}{lA} \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i dt$$

$$= \frac{1}{lA} \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot P$$

這裡的 P 是根據1次測線圈的電流 i 和2次測線圈的感應電壓 v 測量出來的功率。另外，鐵芯的體積為 lA ，所以鐵芯整體的損耗就是 P_{CALL} ，表示為：

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

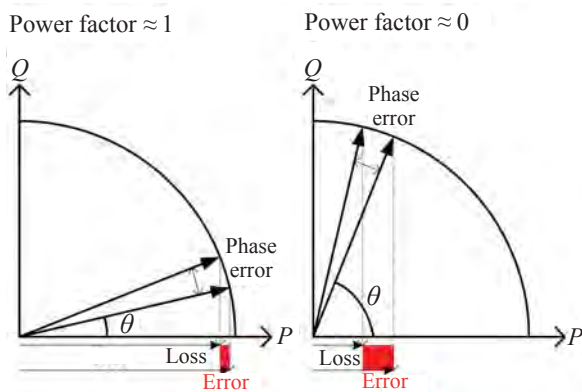


Fig. 4: 相位誤差和功率測量誤差之間的關係

如上所述，按照Fig. 3的構成，就能測量到實際工作狀態時的鐵損了。另外，功率分析儀PW6001在性能上可以做到5MS/s採樣，16bit的電壓、電流波形的CSV保存，還能向MATLAB傳輸。比起一般的波形記錄儀器，PW6001能取得更高精度的波形數據。以這些為基礎，還能進行B-H曲線的描繪等等的分析工作。

為什麼測量電感的損耗比較困難？

電感的阻抗以感抗成分為主。從功率測量上來看，功率因數是比較差的。也就是說，電壓和電流的相位差要接近 90° 了。如圖Fig.4中所示，和功率因數較好的狀態相比，電壓/電流的測量值受到相位誤差的影響要大很多。所以，在測量時就對測量儀器的相位精度要求很高。

另外，一般電感都會在數10kHz~數100kHz的開關頻率下使用。隨著SiC和GaN元件朝著實用化方向發展，開關頻率也有向高頻化發展的趨勢。這個時候，就需要用到在高頻領域相位精度也非常高的測量儀器了。另外，使用電流感測器的話也要考慮到電流感測器的相位誤差。

像Fig. 2這樣的測量回路，在電壓測量部位、電流測量部位都會被施加上一個較大的同相電壓。所以也就需要用到共模抑制比CMRR較高的測量儀器。正如前面所說的，我們測量的被測物體是在開關頻率數10kHz~數100kHz的工作狀態下的。由於這個開關頻率的關係，測量環境會受到較大的干擾影響。那麼，也就需要用到抗干擾性能較好的測量儀器了。

如上所述，在測量時對測量儀器各方面的性能要求較高，所以一值以來測量電感的損耗都較為困難。而使用功率分析儀PW6001，就能滿足以上幾點。它主要有以下的幾點特性。

- 帶有電流感測器相位補償功能。擁有高帶寬·高精度的相位特性¹⁾
- 高 CMRR (在100kHz下 80dB 以上)
- 對電流感測器進行了獨到的設計，使之擁有很高的抗干擾的性能^{2,3)}

測量電感損耗時測量儀器所需要具備的特性

Fig. 5 中的圖示，就是Fig. 2回路中在電感上施加的電壓·電流波形。電壓為方波，而電流是疊加了DC分量的三角波。像這樣的波形，要以0.1%的精度去測量其損耗的話，實際需要的帶寬在開關頻率的5倍~7倍左右⁴⁾。比如，開關頻率在100kHz的話，測量儀器所需要達到的帶寬就在500kHz~700kHz。

重點在於不只是振幅（增益），電壓電流的相位差也需要高精度的去測量。測量超過數A的高頻電流，我們需要用到電流感測器²⁾。而此時，在高頻測量中，電流感測器的相位誤差就無法忽視了，我們需要用某種方法對其進行補償。

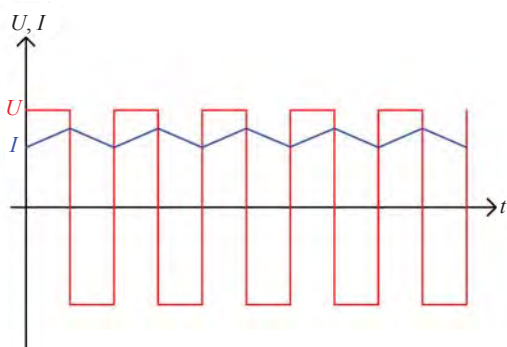


Fig. 5: 升壓斬波電路中電感的電壓・電流波形

其他公司的功率分析儀或示波器，使用的多是 Deskew(傾斜校正電路)功能。此時，需要根據電流感測器的特性，在不同的頻點下分別對延遲時間進行設定。然而，像三角波這樣的在高帶寬中也存在頻率分量的畸變波形，測量時誤差就會很大。使用功率分析儀PW6001和高精度電流感測器組合，就能使用相位補償功能，只要補償一個頻點，就能對全頻段的相位誤差進行補償，實現高帶寬、低相位誤差的高精度測量。

使用功率分析儀測量電感的例子

這裡說明一下使用功率分析儀PW6001和電流直接輸入模組PW9100測量電感的例子。測量時的電路圖如Fig.6中所示。被測物電感的規格在Table1中所示。測量時，使用了功率放大器(4055 NF Corporation)施加了正弦波訊號。使用功率分析儀測量了電壓、電流的有效值、相位差、功率等等的項目參數。PW6001可以利用基礎的測量參數，進行客戶想要的運算。我們稱它為「用戶自定義運算功能」。在測量電感損耗時，用戶自定義運算的設置如Table2中所示，可以測量到電感在工作狀態下的各個參數。

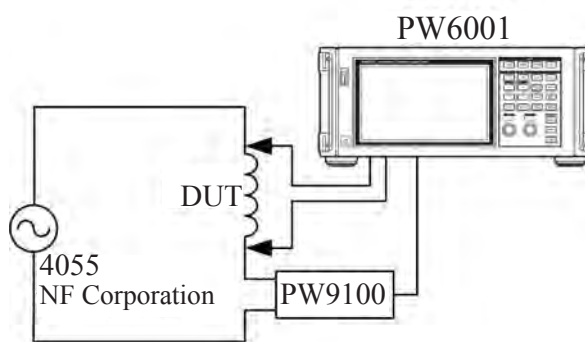


Fig. 6: 測量結構圖

Table 1: 電感的規格

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

Fig. 7 中所示的，是在10 kHz 下，改變電感上施加的電流電位時，電感 L_s 、電阻 R_s 的變化。另外，Fig. 8中是在頻率100 kHz下，固定交流電流有效值為0.5 A，改變DC偏置電流，對電感的電感 L_s ，電阻 R_s 的變化進行了測量。

Table 2: 用戶自定義運算的設定

Parameters	Formulas
Z	U_{fnd}/I_{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_{fnd}, I_{fnd}	: Voltage and current fundamental wave components.
θ_U, θ_I	: Voltage and current phase angles (fundamental wave).
f	: Frequency (fundamental wave).

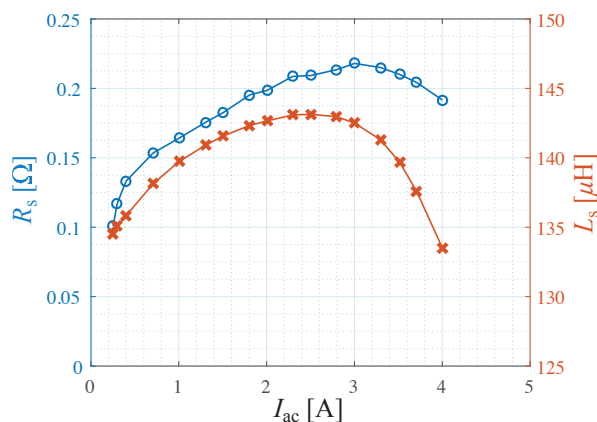


Fig. 7: 測量電位對電感、電阻的影響力
f=10kHz

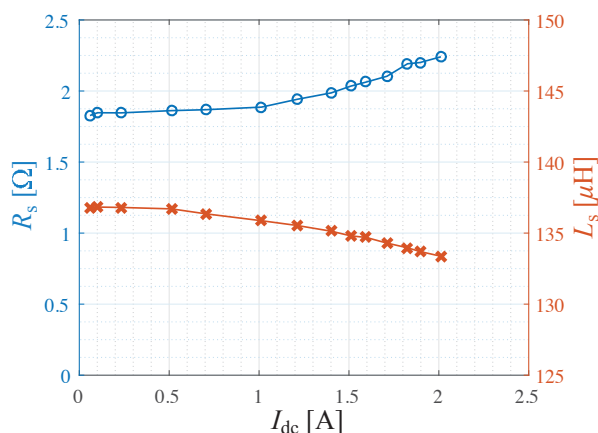


Fig. 8: 電感、電阻的DC重疊特性的測量
f=100kHz

通常情況下，使用LCR測試儀測試電流電位，只能測量到數10mA左右。即使加上DC偏置電流，也會受到LCR測試儀的DC偏置模組的可發生範圍的限制。那麼，測量出來的參數和實際工作狀態時的參數，在數值上是有差異的。此次的測量案例中，使用功率分析儀和電源組合後，就能使用和實際工作狀態下近似的電流電位來進行電感的測量了。

在此次的例子中，我們使用電源發出的是正弦波電流・電壓。前面也有闡述，實際工作狀態的電感中被施加的不是正弦波，而多為方波和三角波電流。如果是功率分析儀的話，就能直接測量到工作狀態時的電感了。另外像L_s 和 R_s 之類的參數，也能根據功率分析儀的諧波運算結果，來進行運算處理。透過這些功能，就能實現更為正確的分析了。

總結

本稿中，我們對高頻電感的損耗測量、分析方法，使用實際案例進行了交流和介紹。為了正確測量高頻電感的損耗或參數，在實際工作狀態下進行測量是至關重要的。另外，所使用的功率分析儀也需要有較高的性能。在實際例子中，我們用PW6001實際測量了電感的損耗並進行了分析。

參考文獻

- 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 : “Cur-rent Measurement Methods that Deliver High Pre-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, Wide-band, 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.