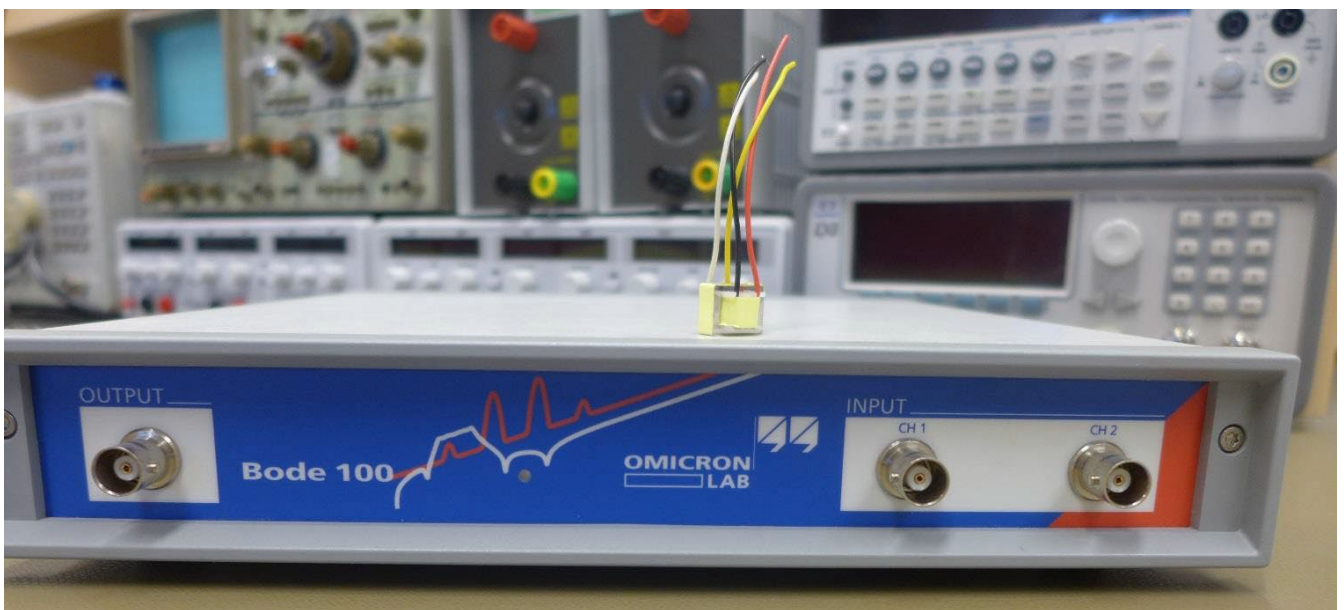


Bode 100 -アプリケーションノート

信号トランスの測定



By Stephan Synkule

© 2017 by OMICRON Lab - V2.0

Visit www.omicron-lab.com for more information.

Contact support@omicron-lab.com for technical support.

目次

1	はじめに.....	3
2	測定タスク	3
3	測定セットアップと結果	3
3.1	トランスの伝達比の測定.....	3
3.2	トランスの使用可能周波数範囲の測定.....	6
3.3	結合係数(Coupling Factor)の測定.....	7
3.4	共振周波数の測定.....	12
3.5	トランスの寄生容量	14
4	まとめ.....	14

注意: Bode 100 のセットアップ、調整、キャリブレーションなどの基本手順については、Bode 100 ユーザーマニュアルに記載されています。ユーザーマニュアルは以下からダウンロードできます:

www.omicron-lab.com/bode-100/downloads#3

注意: 本アプリケーションノートのすべての測定は、Bode Analyzer Suite V3.0 を使用して実施されています。本ドキュメントに示された測定を再現するためには、V3.0 またはそれ以降のバージョンを使用してください。最新版は以下からダウンロードできます:

www.omicron-lab.com/bode-100/downloads

1 はじめに

このアプリケーションノートでは、Bode 100 を使用して 信号トランスの各種パラメータを測定・検証する方法について説明します。トランスの巻数の不一致を検出する方法、さらに共振周波数や結合係数(coupling factor) を測定する方法について解説します。

2 測定タスク

信号トランスがデータシート記載の特性と一致しない場合があります。Bode 100 は、信号トランスの特性を検証するためのさまざまな機能を提供します。

一般的な信号トランスを解析する際に重要となるポイントは次のとおりです::

- 1 伝達比(Transmission ratio)
- 2 使用可能な周波数範囲(Usable frequency range)
- 3 結合係数(Coupling factor)
- 4 共振周波数(Resonance frequency)
- 5 共振周波数における寄生容量(Parasitic capacitance)

注意:

Bode 100 のセットアップ、調整、キャリブレーション等の基本手順は、Bode 100 のマニュアル (<http://www.omicron-lab.com/bode-100/downloads.html#3>) に記載されています。本アプリケーションノートでは、それらの詳細説明は省略します。

3 測定セットアップと結果

3.1 トランスの伝達比の測定

トランスの伝達比は、一次側電圧と二次側電圧の比($U_{\text{prim}} / U_{\text{sec}}$) として定義されます。Bode 100 の Gain/Phase モードを使用することで、この伝達比を直接測定できます。

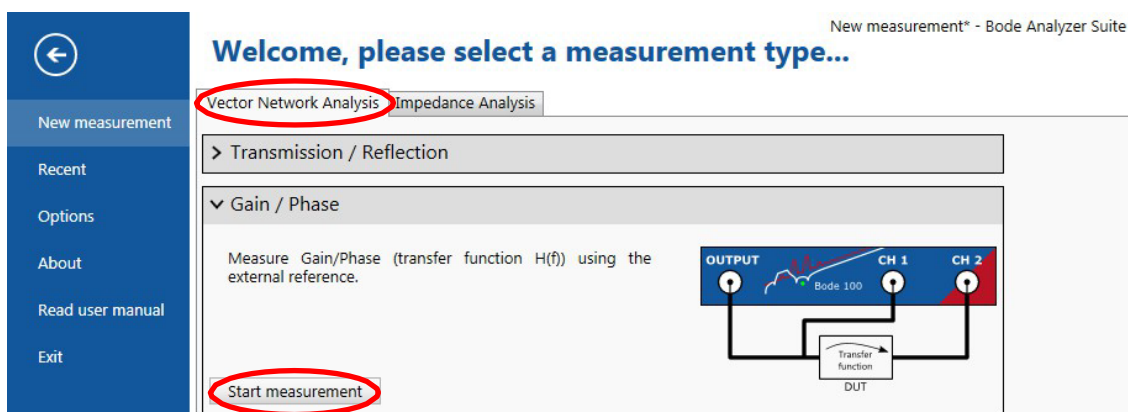


Figure 1: スタートメニュー

以下の設定を適用します:

開始周波数(Start frequency)	: トランスによる(この例では 20 Hz)
停止周波数(Stop frequency)	: トランスによる(この例では 20 kHz)
スイープモード(Sweep mode)	: Linear
ポイント数(Number of points)	: 201
ソースレベル(Source level)	: 0 dBm
CH1 & CH2 のアッテネータ	: 20 dB
レシーバ帯域幅(Receiver Bandwidth)	: 1 kHz

ケーブルの影響を除去するため、ユーザーマニュアルに従って “Full-Range” キャリブレーションを実行します。

注意:

本測定では 1:1 トランスを使用しています。異なる巻数比のトランスを使用する場合は、以下の点に注意してください。

- CH2(入力チャンネル 2)の過負荷を避けるため、必ず“降圧側(down conversion)”で使用する。つまり、巻数の多い側を CH1 に接続する
- CH1 がリファレンスチャンネルであり、CH2 は巻数の少ない側に接続する

下図は、トランスを Bode 100 にどのように接続したかを示しています。

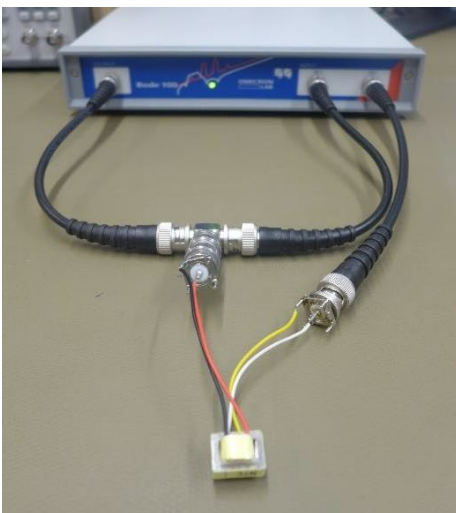


Figure 2: 測定セットアップ

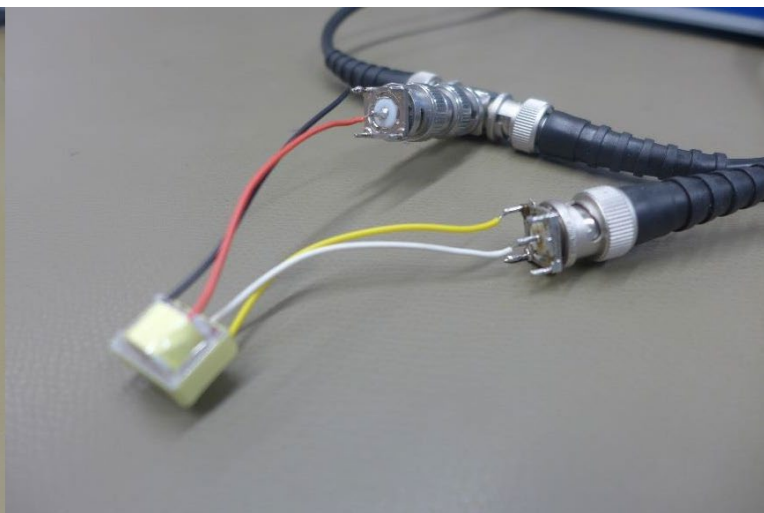


Figure 3: 測定セットアップ(拡大)

Trace 1 の Format を Magnitude に設定すると、伝達比を直接読み取ることができます。

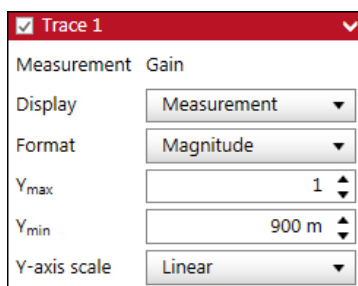


Figure 4: Trace 1 の設定

Trace 1 の設定が完了したら、周波数スイープを開始できます。その結果、下図のような周波数特性カーブが得られるはずですが。

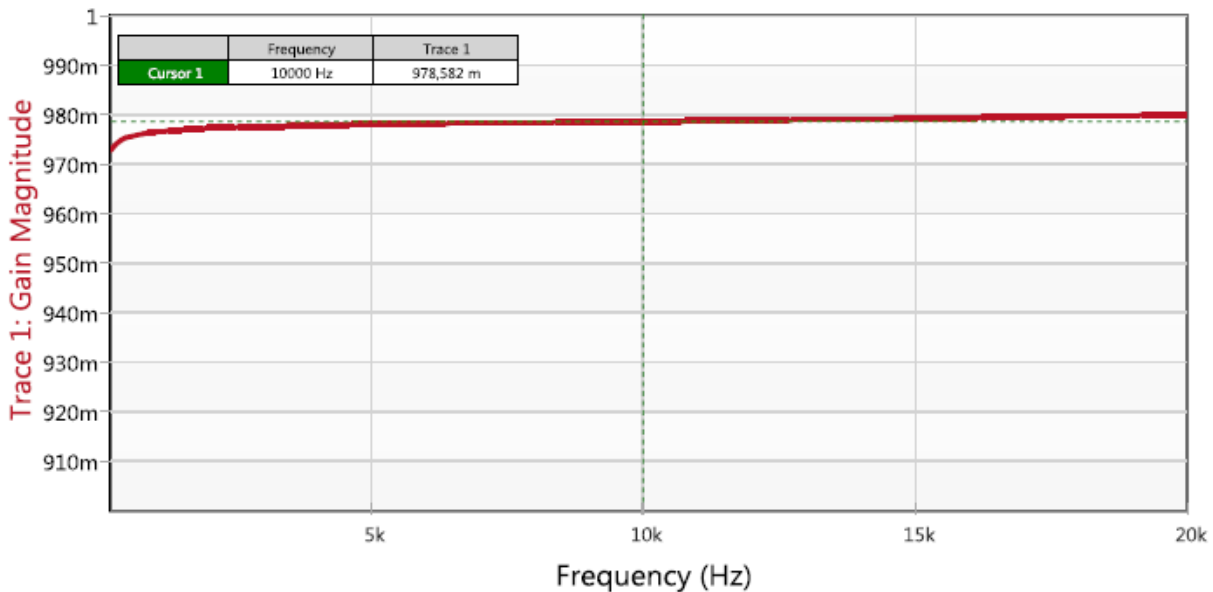


Figure 5: Magnitude(伝達比)の測定

カーソルを有効化し、データシートに示されている最適周波数に合わせて、伝達比の正確な値を読み取ることができます。

Bode 100 のゲイン測定は、次の比として定義されています：

$$\frac{U_{CH2}}{U_{CH1}}$$

今回の接続では、二次巻線を CH2、一次巻線を CH1 に接続しているため、この比はトランスの伝達比そのものを直接測定していることになります：

$$\frac{U_{prim}}{U_{sec}}$$

データシートの値と一致しているかを確認するため、伝達比を次式で計算します：

$$\frac{U_{prim}}{U_{sec}} = \frac{N_{prim}}{N_{sec}} = \frac{200}{200} = 1$$

これを測定結果(0.979)と比較すると、非常に良好であり、十分な精度で一致していると判断できます。

3.2 トランスの使用可能周波数範囲の測定

トランスの多くの機能のひとつは、ガルバニック絶縁を保ちながら、ある回路から別の回路へ信号を伝送することです。特定のトランスがどの周波数範囲で使用できるかを知るためには、そのトランスの伝達特性(トランスファ関数)を把握する必要があります。

この測定では、Gain / Phase 測定において以下の設定を適用しました：

開始周波数:	10 Hz
停止周波数:	10 MHz
スイープモード:	対数(logarithmic)
測定ポイント数:	201 点以上
信号源レベル:	0 dBm
CH1 & CH2 のアッテネータ:	20 dB
受信帯域幅(RBW):	1 kHz

Bode 100 がまだキャリブレーションされた状態が確認し、もしされていないければ新たに THRU キャリブレーションを実施してください。さらに、トランスは前の測定(3.1)で示したように接続する必要があります。

Trace 1 と Trace 2 の設定を調整してください：

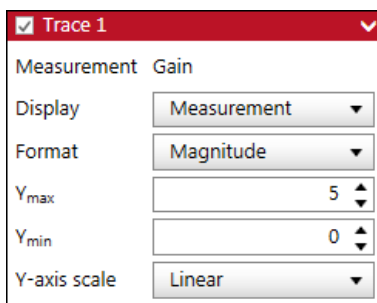


Figure 6: Trace 1 の設定

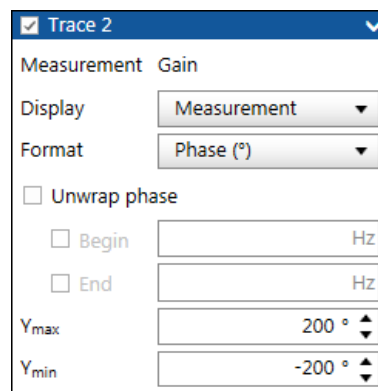


Figure 7: Trace 2 の設定

これで、周波数スイープを開始できます。

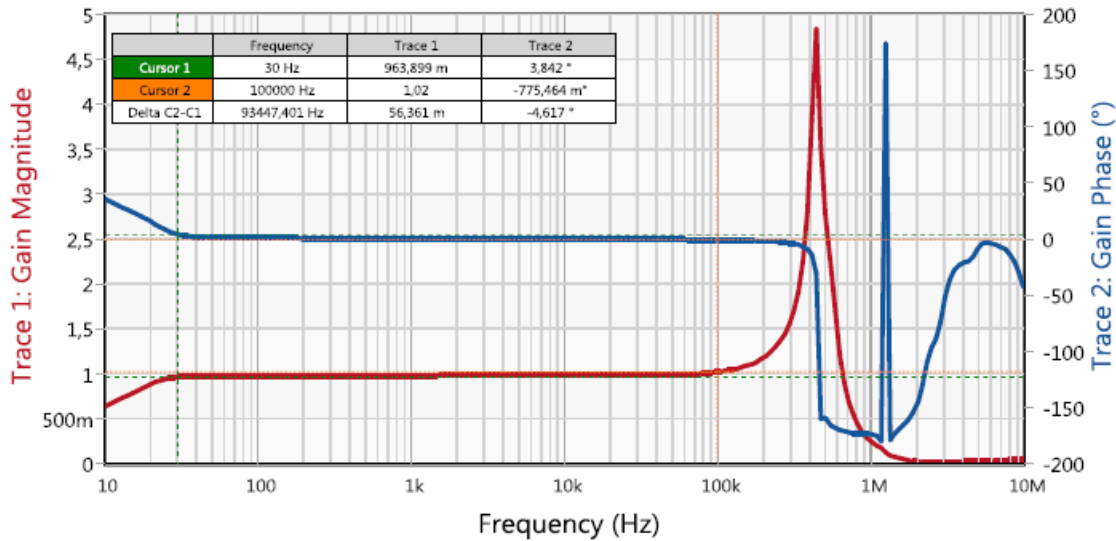


Figure 8: 測定結果- 使用可能周波数範囲

トランスは 30 Hz ~ 100 kHz の範囲で安定した振幅と位相を示しています。したがって、今回解析したトランスはまさにこの範囲(30 Hz ~ 100 kHz)で使用可能であると言えます。

3.3 結合係数(Coupling Factor)の測定

結合係数 k は、一次巻線によって誘導される磁束のうち、どれだけが二次巻線を通過するか(その逆も同様)を示す値です。したがって、これはトランスの漏れインダクタンス(leakage inductance)の大きさを表す指標となります。理想的なトランス(漏れインダクタンスなし)の場合、結合係数は 1($k = 1$)となり、現実のトランス(漏れインダクタンスあり)の場合、結合係数は常に 1 より小さい($k < 1$)値となります。

結合係数 k は次式により定義されます:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (1)$$

L_1 … 一次インダクタンス L_2 … 二次インダクタンス M … 相互インダクタンス

トランスの結合係数を計算するためには、先に示したインピーダンスを測定する必要があります。

しかし、相互インダクタンス M を直接測定することはできないため、一次側および二次側電圧に関する以下の式を出発点として使用します。

$$U_1 = j\omega \cdot (L_1 \cdot I_1 + M \cdot I_2) \quad (2)$$

$$U_2 = j\omega \cdot (M \cdot I_1 + L_2 \cdot I_2) \quad (3)$$

V_1 = 一次側電圧 I_1 = 一次側電流 V_2 = 二次側電圧 I_2 = 二次側電流

トランスの二次側端子を短絡すると、二次側電圧は 0 になります。:

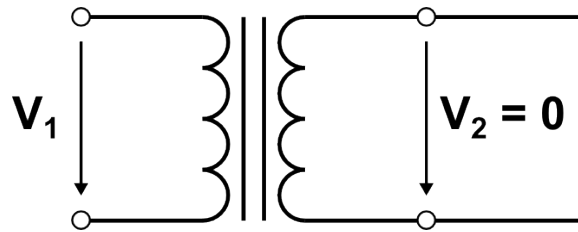


Figure 9: トランス – 二次側短絡時

この特定の動作条件では、式 (3) を次のように変形できます:

$$U_2 = j\omega \cdot (M \cdot I_1 + L_2 \cdot I_2) = 0 \quad \rightarrow \quad I_2 = -\frac{M \cdot I_1}{L_2}$$

この新しい I_2 の式を式 (2) に代入すると:

$$U_1 = j\omega \cdot \left(I_1 \cdot L_1 - I_1 \cdot \frac{M^2}{L_2} \right) \quad \rightarrow \quad U_1 = j\omega \cdot I_1 \cdot \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right)$$

ここでカッコ内を新しい変数 L_s に置き換えて式を簡略化します:

$$U_1 = j\omega \cdot I_1 \cdot L_s \quad \rightarrow \quad L_s = L_1 - \frac{M^2}{L_2} \quad \rightarrow \quad M^2 = L_2 \cdot (L_1 - L_s)$$

L_s は、「二次側を短絡した状態で一次側から測定されるインダクタンス」です。これで、式 (1) にある M を置き換えることができます:

$$k = \frac{\sqrt{L_2 \cdot (L_1 - L_s)}}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad \rightarrow \quad k = \sqrt{\frac{(L_1 - L_s)}{L_1}}$$

式を整理すると、結合係数の最終式が得られます:

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_s}{L_1}} \quad (4)$$

未知量である L_1 と L_s の 2 つのインダクタンスは、Bode 100 を使用して測定できます。これらの測定結果に基づき、結合係数 k を計算することが可能です。

Note: Bode 100 はその設計上、低インピーダンスを非常に高精度で測定できるという特徴があります。

これらのインピーダンスを測定するためには、測定タイプを One-Port に切り替える必要があります。

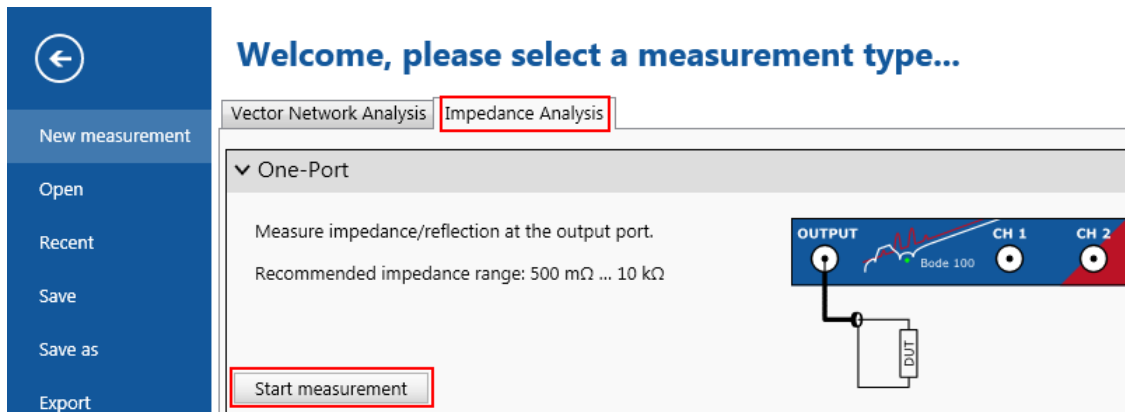


Figure 10: スタートメニュー

周波数を 1 kHz(またはトランスの規定周波数)に固定し、トランスの線形領域に入るように設定します。また、測定設定を以下のように行います:

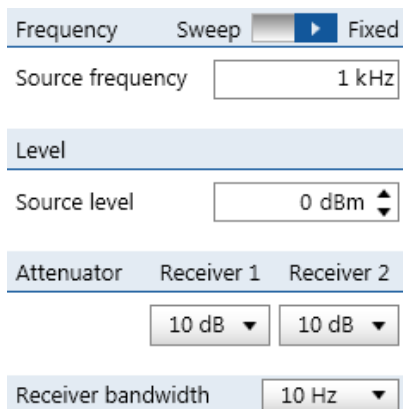


Figure 11: 測定設定

次に、Bode 100 のソース出力にケーブルを接続し、ユーザーマニュアルに記載されているように、ケーブルの影響を取り除くために OPEN、SHORT、LOAD キャリブレーションを実施します。

Bode 100 のキャリブレーションが完了したら、以下の図に示すように、DUT(一次巻線をソースに接続)を接続します。

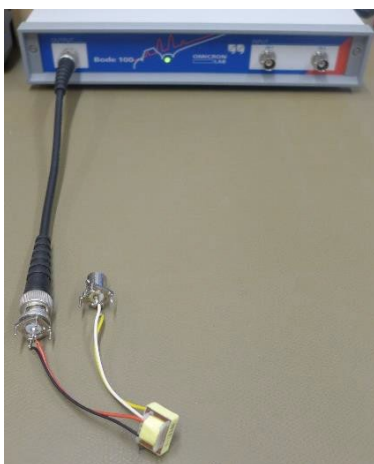
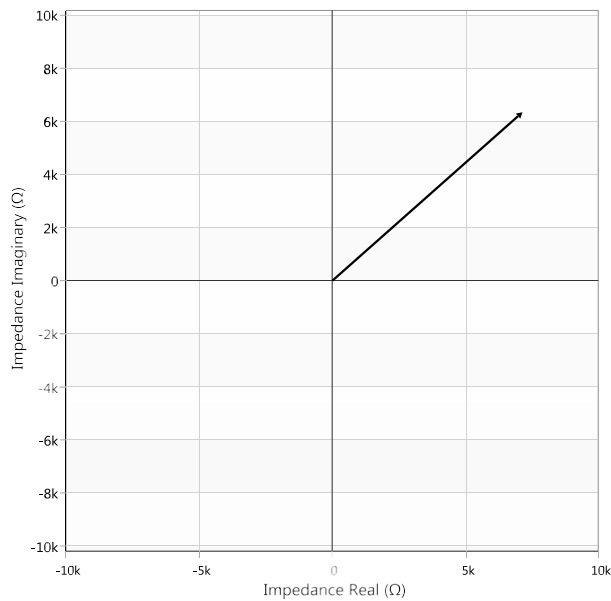
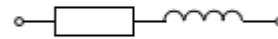


Figure 12: 測定セットアップ



Series equivalent circuit

$$R_s = 7,130 \text{ k}\Omega$$



$$L_s = 1,010 \text{ H}$$

$$Q = 889,839 \text{ m}$$

$$\tan(\delta) = 1,124$$

Figure 13: 単一周波数測定(一次側)

結果: 一次インダクタンス L_1 (=二次巻線がオープンの状態) = 1 H

L_s を測定するには、同じ測定セットアップを使用しますが、今回は以下の図に示すように二次巻線を短絡(ショート)させる必要があります。



Figure 14: 測定セットアップ – 二次巻線短絡時

同じ設定で測定を繰り返すと、次の結果になります：

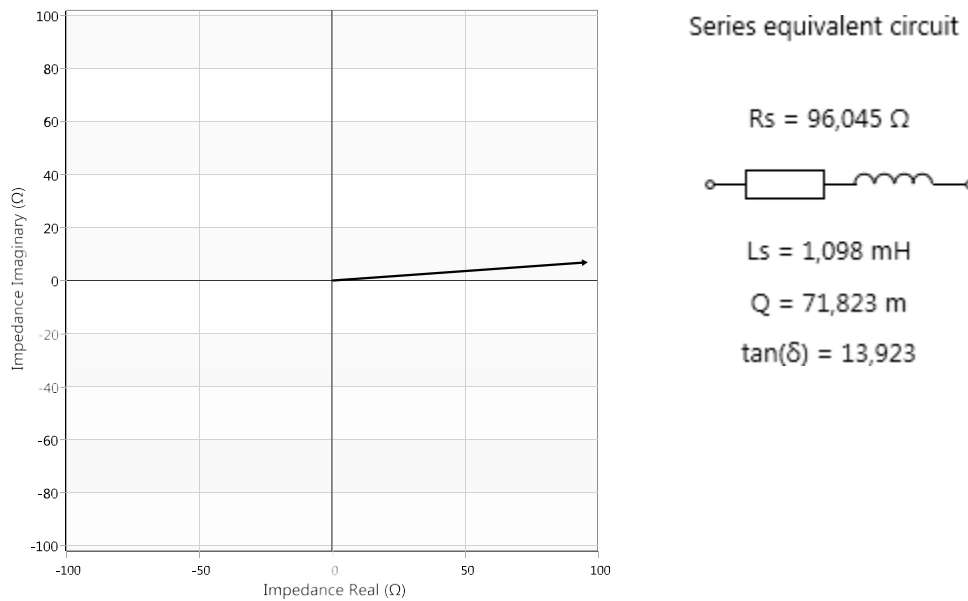


Figure 15: 単一周波数測定(一次側、二次側短絡時)

結果:短絡された二次巻線で測定したインダクタンス $L_s = 1.1 \text{ mH}$

測定した L_1 と L_s の値をもとに、トランスの結合係数 k は次のように計算できます：

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_s}{L_1}} = \sqrt{1 - \frac{1.1 \text{ mH}}{1 \text{ H}}} = 0.9994$$

一次側インダクタンスを二次側オープン時(L_1)と二次側短絡時(L_s)の2回測定することで、結合係数を計算するために必要なすべての値が得られます。

3.4 共振周波数の測定

トランスの巻線には、寄生容量も存在します。この容量は巻線のインダクタンスと組み合わせることで 並列共振を引き起こします。次のページでは、共振周波数をどのように求めるかを示します。

注意:これから行う測定は、Figure 10 に示されている One-Port 測定モード を使用します。

トランスの共振周波数を測定するために、以下の設定を適用します。

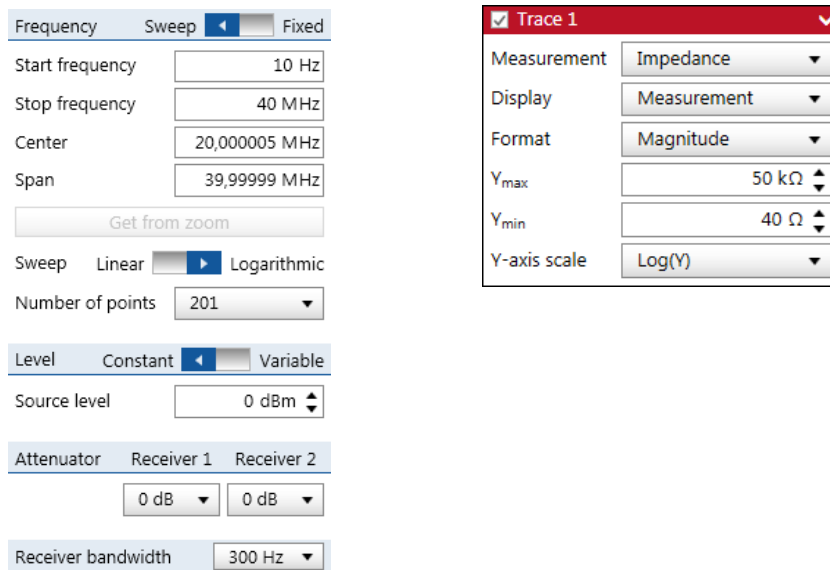


Figure 16: 測定設定 & Trace 1 の設定

Bode 100 のソース出力にケーブルを接続し、ユーザーマニュアルの説明に従って OPEN、SHORT、LOAD キャリブレーションを実行し、ケーブルの影響を取り除きます。

キャリブレーション完了後、ケーブルをトランスの一次巻線へ接続し、二次巻線は開放(オープン)のままにします。一次巻線が複数ある場合は 直列に接続 してください。下の図は、本トランスを使用したセットアップ例を示しています。

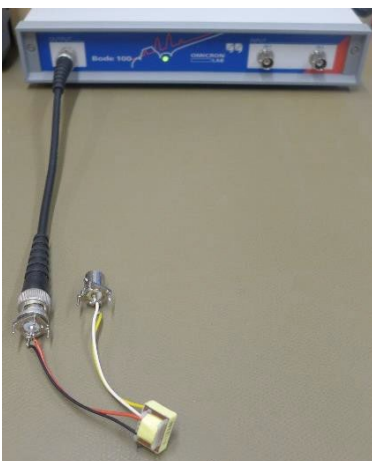


Figure 17: 共振周波数の測定セットアップ

周波数スイープを開始し、ピークインピーダンス付近の図を最適化するために Bode 100 のズーム機能を使用します。カーソル機能を使うことで、最大インピーダンスの正確な周波数を測定できます(グラフ内を右クリック → Cursor 1 → Jump to Max (Trace 1))。ズーム中に、周波数設定をズーム範囲に合わせたい場合は “Get from zoom” ボタンを押します。

もしカーブがまだ十分に滑らかでなかったり、精度が足りない場合は以下を試してください:

- レシーバーバンド幅(RBW)を下げる
- 測定ポイント数を増加させる。

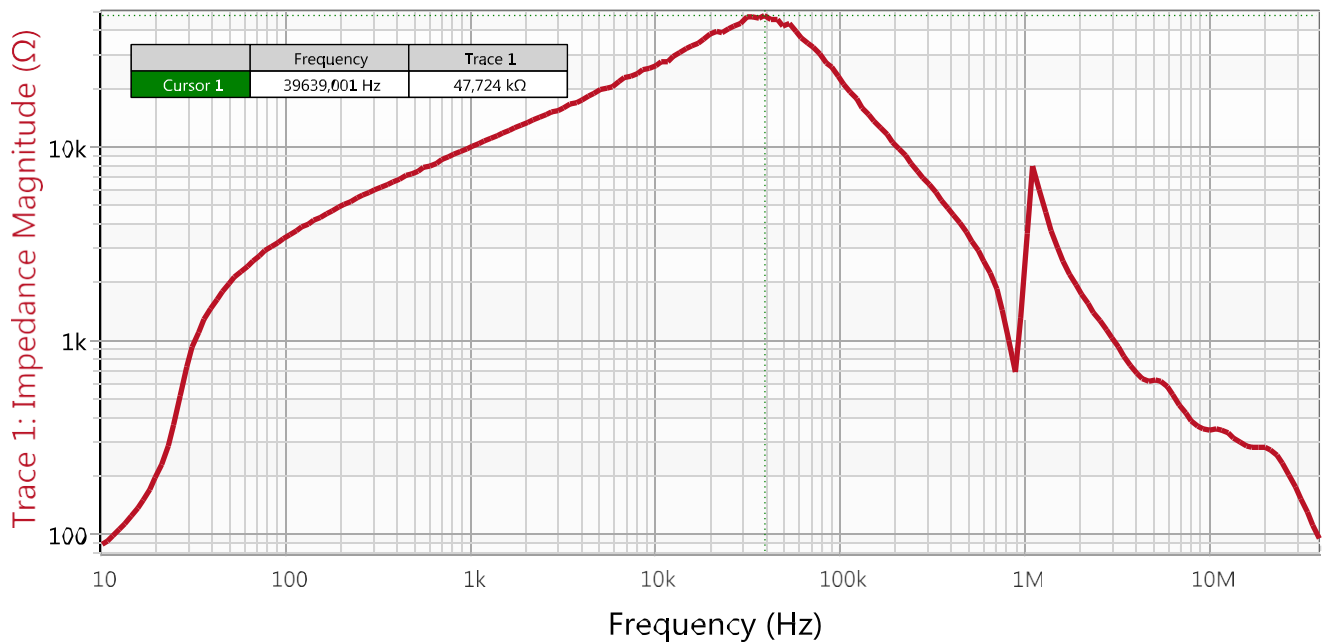


Figure 18: 測定結果

結果: グラフは約 40 kHz 近くでインピーダンスがピークになっていることを示しています。カーソル機能により、正確な共振周波数を測定できます。

本測定では 39.639 kHz が共振周波数でした。。

3.5 トランスの寄生容量

前の測定で 39.639 kHz に並列共振(パラレルレゾナンス)が見つかりました。トランスの巻線には微小な寄生容量が存在します。巻線インダクタンスと寄生容量が共に、共振周波数を決定します。

LC 共振の式:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \cdot L}}$$

注意: 共振周波数は 二次巻線オープン状態 で測定されたため、寄生容量 C を計算する際には 3.3 章で測定した一次インダクタンス L_1 を使用する必要があります。

共振式を C について解くと次のようになります:

$$C = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot f_r}\right)^2}{L} = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot 39639\text{Hz}}\right)^2}{1\text{H}} = 16.1\text{pF}$$

4 まとめ

このアプリケーションノートでは、Bode 100 を用いて信号トランスの特性を測定する方法について説明しました。

実際に以下の項目を測定できることを示しました:

トランスの巻数比(Transformer Ratio)
伝達関数(Transfer Function)
共振周波数(Resonant Frequency)

さらに、Bode 100 で測定した値に基づき結合係数と寄生容量を計算できることも示しました。



OMICRON Lab は、電子工学分野に携わる 研究者、技術者、教育関係者といった専門家向けに、スマートな計測ソリューションを提供することに特化した OMICRON electronics の事業部門です。計測作業を簡素化することで、お客様が本来の業務により多くの時間を割けるよう支援しています。

OMICRON Lab は 2006 年に設立され、現在では 40か国以上のお客様に製品とサービスを提供しています。アメリカ、ヨーロッパ、東アジアに拠点を構え、さらに国際的な販売代理店ネットワークを通じて、迅速かつ卓越したカスタマーサポートを実現しています。

OMICRON Lab の製品は、市場において最適な価格対価比(コストパフォーマンス)で提供される高品質を特長としています。高い信頼性と使いやすさにより、トラブルのない運用を可能にします。また、顧客との密接な関係と 25年以上にわたる社内での専門技術の蓄積により、現場のニーズに即した革新的な製品開発を実現しています。

製造元
OMICRON electronics GmbH

販売元
岩崎通信機株式会社

info@omicron-lab.com • www.omicron-lab.com

Smart Measurement Solutions®