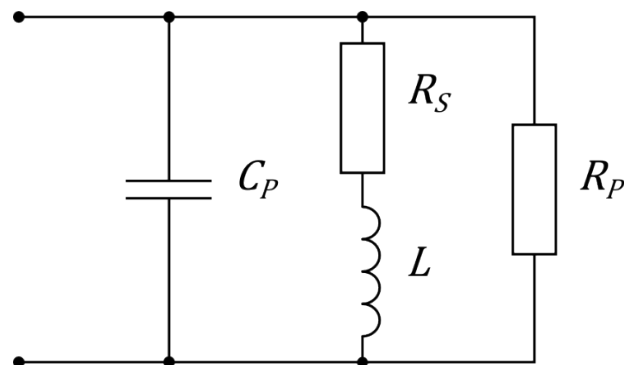


Bode 100 – アプリケーションノート

パワーインダクタのモデリング



By Martin Bitschnau

© 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	概要.....	エラー! ブックマークが定義されていません。
2	測定タスク	3
3	測定セットアップ	4
4	測定.....	5
4.1	デバイス設定	5
4.2	測定結果.....	6
4.2.1	巻線抵抗 R_s の測定.....	7
4.2.2	インダクタンス L の測定	8
4.2.3	並列容量 C_p の測定.....	9
4.2.4	並列抵抗 R_p の算出	11
5	シミュレーションと測定の比較.....	13
6	結論.....	エラー! ブックマークが定義されていません。

Note: 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詳しく説明されています。ユーザーマニュアルは以下の URL からダウンロードできます。

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

Note: 本アプリケーションノートに記載されているすべての測定は、Bode Analyzer Suite V3.0 を使用して実施されています。本書と同じ測定を行うには、V3.0 以上のバージョンをご使用ください。最新版は以下の URL からダウンロードできます。

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

1 はじめに

本アプリケーションノートでは、Bode 100 を使用して パワーインダクタの交流モデル(AC モデル)を作成する方法について説明します。作成される回路図は、DUT¹の代表的な寄生成分(パラジティブ要素)を含んでおり、算出および測定された寄生成分と、それらを用いて構築した回路モデルは、等価回路シミュレーションに利用可能です。

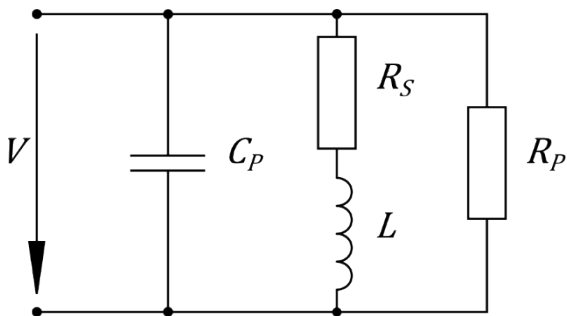
2 測定タスク

以下の写真に示す パワーインダクタの等価回路パラメータを求めることを目標とします。



Figure 1: パワーインダクタ DUT

このインダクタの周波数応答をモデリングするため、以下の等価回路を選択します。



L ...コイルの理想インダクタンス

R_S ...コイル導線の直列抵抗

C_P ...並列容量(巻線間容量)

R_P ... 並列抵抗(磁気損失を表す要素)

Figure 2: 寄生成分を含む回路モデル

¹ DUT(Device Under Test):被測定デバイス

3 測定セットアップ

インダクタのインピーダンスを測定するため、Bode 100 と B-WIC インピーダンステストフィクスチャを組み合わせて使用します。



Figure 3: 測定セットアップ

Bode Analyzer Suite を起動したら、Impedance Adapter(インピーダンスアダプタ)測定タイプを選択します。

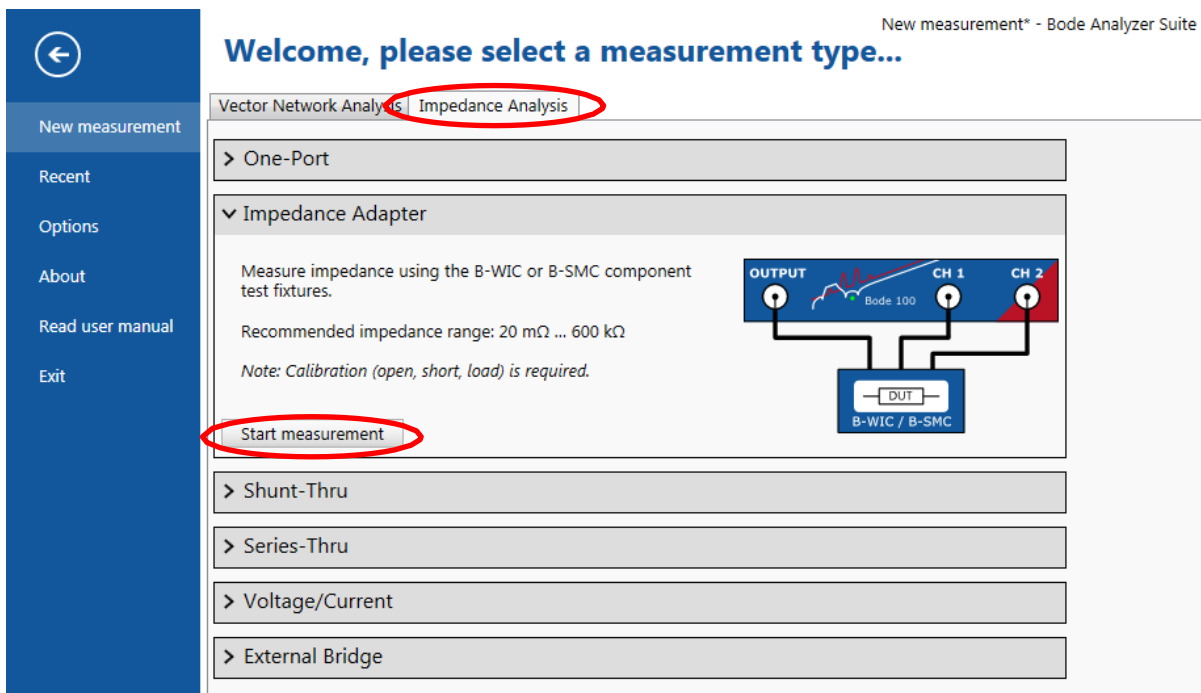


Figure 4: スタートメニュー

4 測定

4.1 デバイス設定

インダクタの直流に近い巻線抵抗値を得るため、最初の測定では 開始周波数を 1 Hz に設定します。また、共振周波数が不明であるため、測定は 50 MHz までの全帯域で実施します。

設定パラメータ:

Start Frequency:	1 Hz
Stop Frequency:	50 MHz
Sweep Mode:	Logarithmic
Number of Points:	201 or more
Level:	13 dBm
Receiver Bandwidth:	30 Hz

これらの設定を Bode Analyzer Suite に入力した後、キャリブレーション(校正)を実行します。本測定には Full-Range Calibration(フルレンジ校正) を推奨します。校正を実行するには、Full-Range Calibration アイコンをクリックします。校正手順の詳細は Bode 100 ユーザーマニュアルを参照してください。

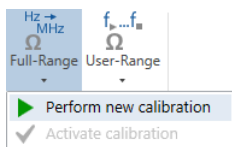


Figure 5: キャリブレーションの実行

キャリブレーション完了後、Trace 1 と Trace 2 を以下のように設定します。

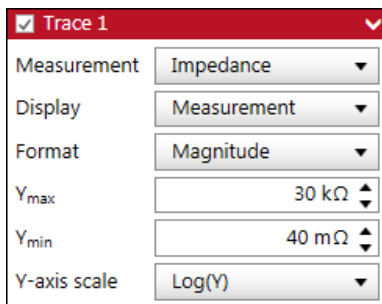


Figure 6: Trace 1 の設定

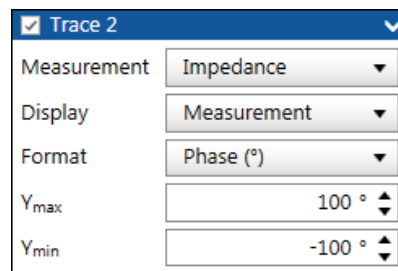


Figure 7: Trace 2 の設定

4.2 測定結果

キャリブレーションが完了したら、パワーインダクタを B-WIC に接続します。リード線はできるだけ短く保つ必要があります。リード線が長いと、そのインダクタンスや寄生成分が測定結果に影響を与えてしまうためです。上記の設定とキャリブレーションを用いてシングルスイープ測定を実行すると、以下に示すような測定結果が得られます。測定結果からは、次の領域が明確に確認できます：

- 低周波の抵抗性領域(巻線抵抗 R_s が支配的)
- 中周波の誘導性領域(インダクタンス L が支配的)
- 高周波の共振点(C_p と L により決まる自己共振周波数)。

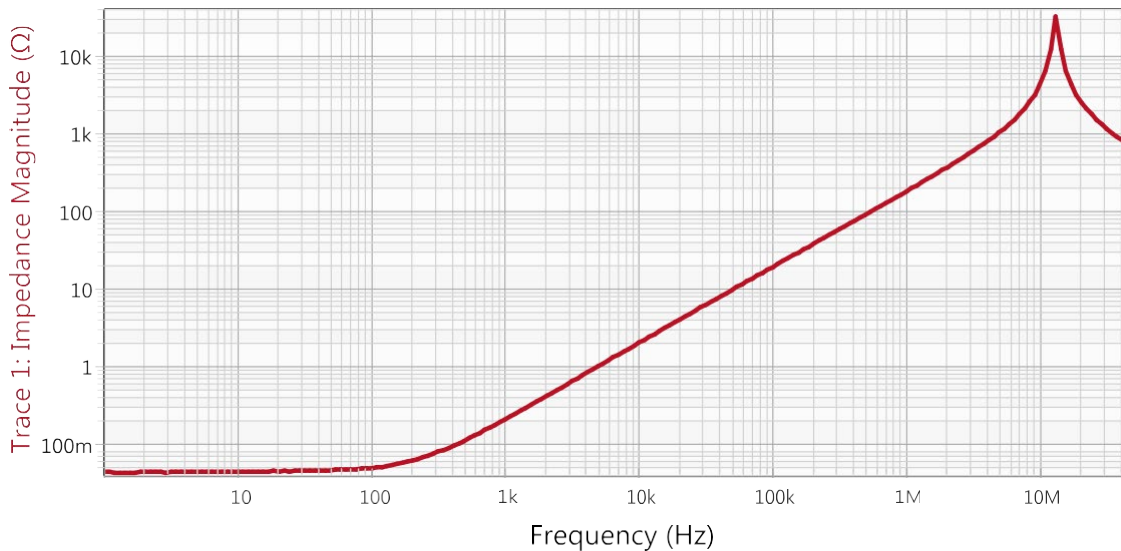


Figure 8: 測定結果 — マグニチュード

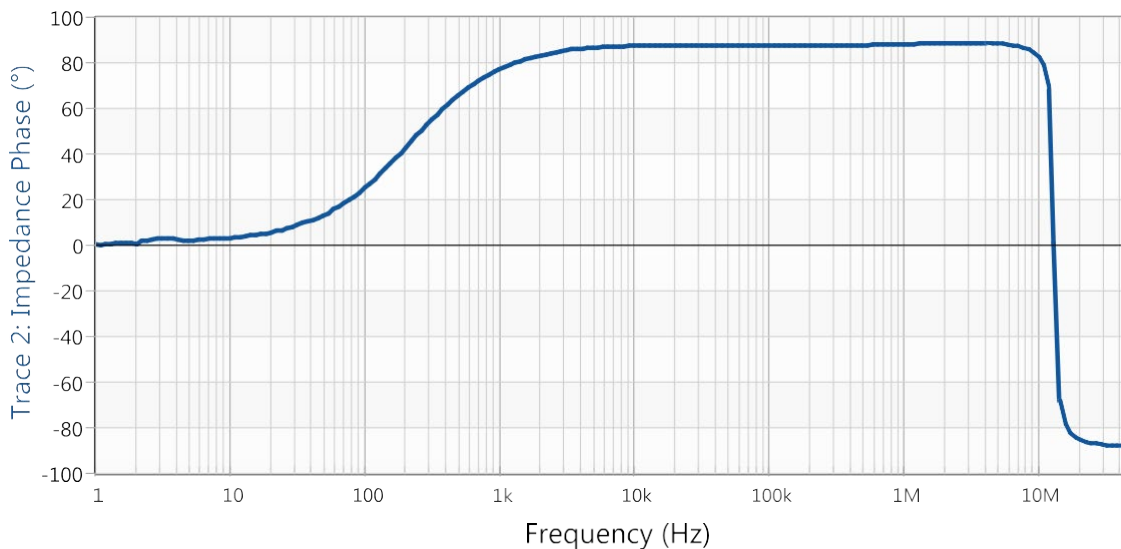


Figure 9: 測定結果 — 位相(°)

4.2.1 巻線抵抗 R_s の測定

次の測定のため、図10に示すように「Format(表示形式)」を“Rs” に設定します。

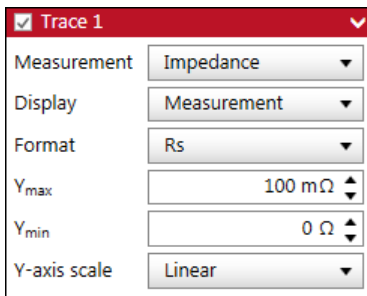


Figure 10: Trace 1 の設定

1 Hz は十分に低周波であり、インダクタンス成分や表皮効果の影響が無視できるため、1 Hz での測定値を DC 抵抗の代わりとして使用できます。検証のため、このインダクタの DC 抵抗を 4端子式の直流オームメータでも測定しましたが、その結果は Bode 100 の 1 Hz 測定結果と一致しました。1 Hz における直列抵抗を読み取るには、カーソルグリッドに 1 Hz を入力してカーソルを配置します。

注意: 視認性向上のため、y軸の範囲は 0Ω～1Ω に変更しています。

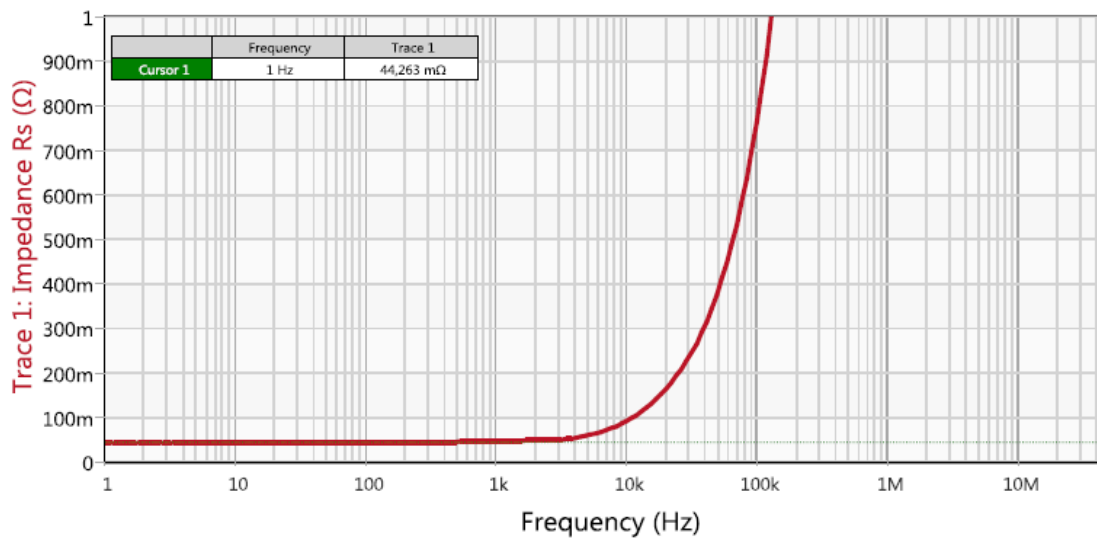


Figure 11: 測定結果 — 直列抵抗

測定された巻線抵抗:

$$R_s = 44 \text{ m}\Omega$$

4.2.2 インダクタンスLの測定

低周波では、巻線抵抗 R_s の影響が支配的となり、インダクタンスの測定精度が低下します。一方、高周波ではインダクタンス成分が支配的となり、より正確にインダクタンスを測定できます。したがって、測定には折衷ポイント（最適周波数）を選ぶ必要があります。どの周波数で測定するのが最適かはインダクタによって異なりますが、インピーダンスプロットの傾きが一定（直線的）な領域を選ぶのが一般的な目安（経験則）です。

シリーズインダクタンスを表示するため、Trace の「Format」を「Ls」に設定します。さらに、10 Hz 未満ではリアクタンスが非常に小さく測定が困難なため、開始周波数を 10 Hz に設定します。

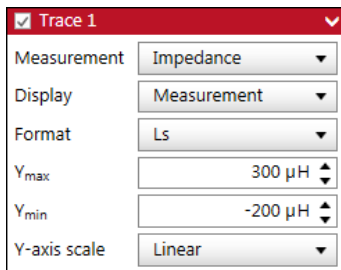


Figure 12: Trace 1 の設定

本測定では、約 300 Hz を測定周波数として選択しました。以下の図に示すように、この周波数ではインダクタンスが十分に安定しており、他の成分による干渉も見られません。

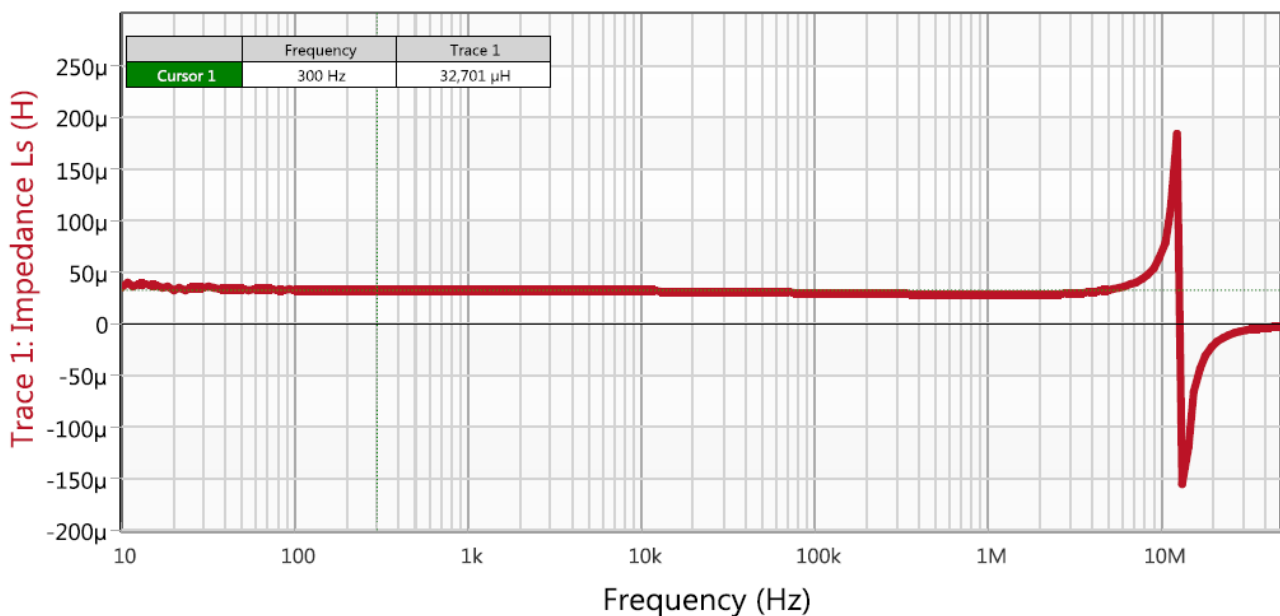


Figure 13: 測定結果 — インダクタンス

測定されたインダクタンス:

$$L = 33 \mu H$$

4.2.3 並列容量 C_p の測定

並列容量 C_p は、インダクタンス L とともに並列共振回路を形成します。この並列容量をモデルに含めることで、インダクタの一次自己共振周波数(SRF) を正しく再現できます。

共振周波数の導出

並列容量を直接測定することは難しい場合がありますが、計算により 比較的正確な値を得ることが可能です。インダクタモデルのアドミタンスは以下の式で表されます：

$$Y = \frac{1}{R_p} + \frac{R_s}{R_s^2 + \omega^2 L^2} + j\omega \cdot \left(C_p - \frac{L}{R_s^2 + \omega^2 L^2} \right) \quad (1)$$

ここで、虚数成分(インダクタンスと容量の成分)に注目すると、虚数成分がゼロになる角周波数 ω_0 が存在します。その条件 $\text{Im}\{Y\}=0$ を用いると、次式が得られます：

$$\text{for } \text{Im}\{Y\} = 0: \quad C_p = \frac{L}{R_s^2 + (2\pi f_0)^2 \cdot L^2} \quad (2)$$

一般的に、インダクタでは 巻線抵抗 R_{SR} は無視できるほど小さいため、式は次のように簡略化できます：

$$\text{for } \text{Im}\{Y\} = 0: \quad C_p = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 \cdot L} \quad (3)$$

測定

より高い分解能で共振点を特定するため、周波数範囲を共振付近に絞って再測定します。中心周波数は、先ほどの測定で確認した 共振周波数(SRF)付近に設定します。

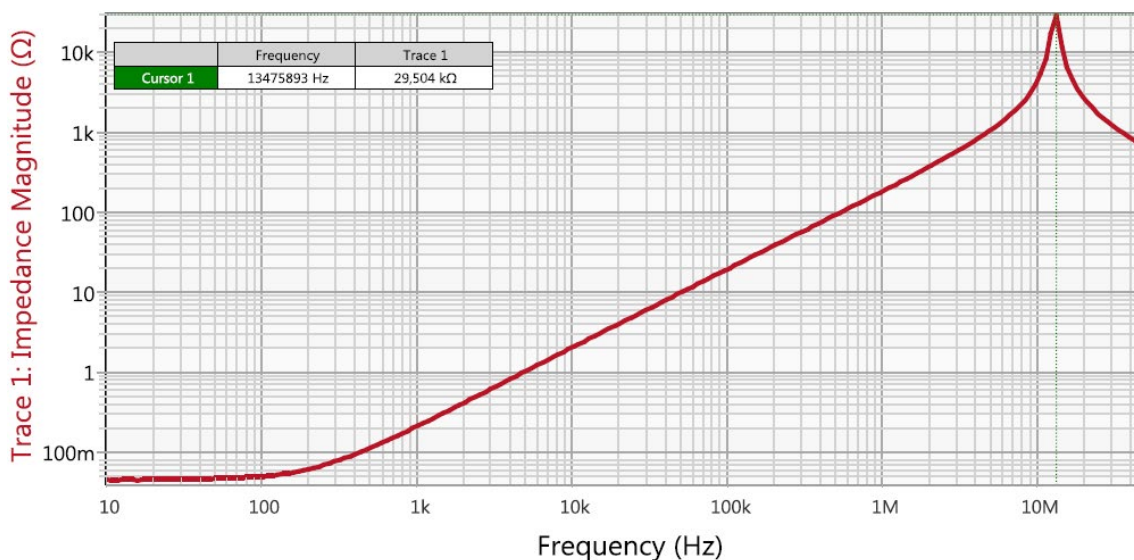


Figure 14: 周波数全域でのスイープ結果

インダクタの共振周波数は約 13.5 MHz 付近であるため、今回の再測定では 5 MHz ~ 25 MHz を測定範囲として選択します。

すでに Full-Range Calibration(フルレンジ校正) を実行している場合、周波数範囲を変更しても校正は有効のままですが、User-Range Calibration(ユーザーレンジ校正)は周波数範囲変更後に再度実行する必要があります。

共振周波数 f_0 を測定するため、「Format」を「Phase (°)」に設定します。

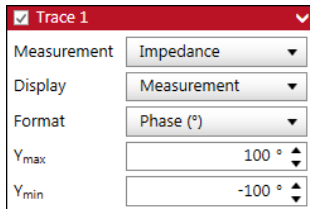


Figure 15: Trace 1 の設定

設定と校正を行った後、シングルスweepを実行すると、以下のような測定結果が得られます。

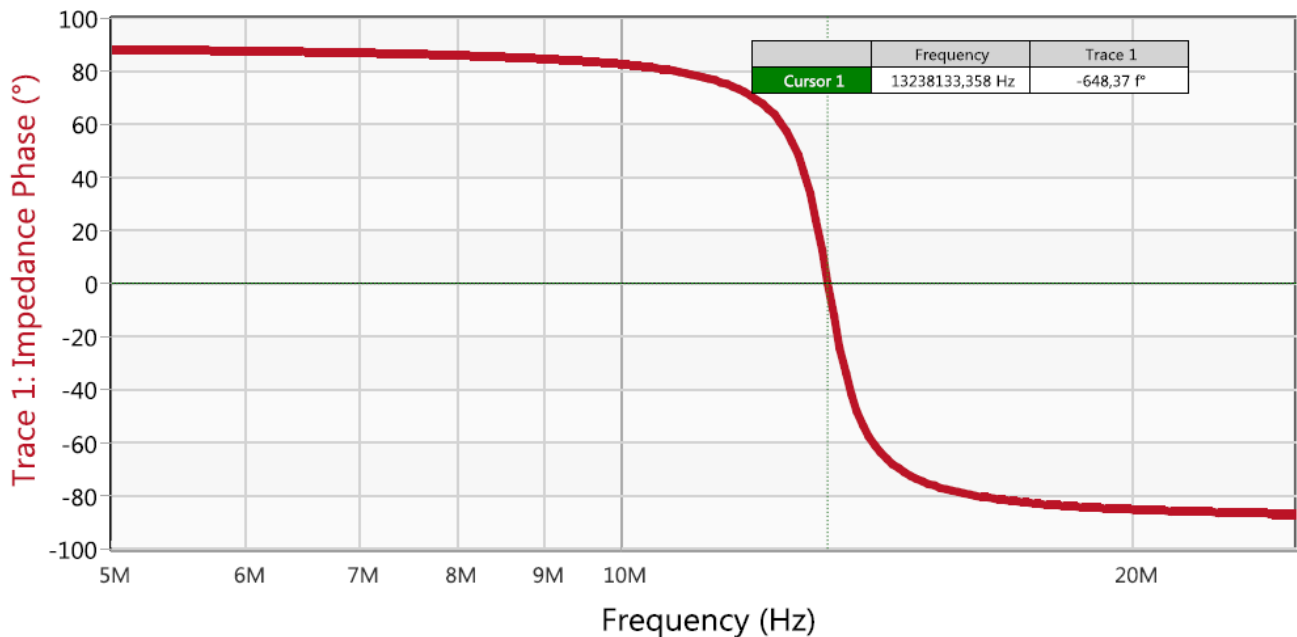


Figure 16: 測定結果 — 位相(°)

ゼロクロス周波数は、カーソル機能の“Jump to Zero”を使って簡単に取得できます。

操作手順: 図上を右クリック⇒カーソルを選択⇒“Jump to Zero”をクリック

インダクタについて測定されたゼロクロス周波数は:

$$f_0 = 13.238 \text{ MHz}$$

式(3)より値を代入すると:

$$C_P = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 \cdot L} = \frac{1}{(2\pi \cdot 13.238 \text{ MHz})^2 \cdot 33\mu\text{H}} = 4.38 \text{ pF}$$

4.2.4 並列抵抗 R_p の算出

最後に求める要素は並列抵抗 R_p です。これはインダクタの 磁気損失(コアロス) をモデル化するために使用されます。評価を簡略化するため、インダクタモデルを 並列共振回路として扱います。

並列共振回路のアドミタンス Y は次の式で表されます:

$$Y = \frac{1}{R_p} + j\left(\omega C_p - \frac{1}{\omega L}\right)$$

共振周波数では虚数項がゼロとなり、よって アドミタンスは純抵抗成分のみとなります。したがって、共振点でのインピーダンス最大値がそのまま並列抵抗 R_p に等しいということになります。

R_p を測定するために下図に示すようにFormatをMagnitudeに変更します。

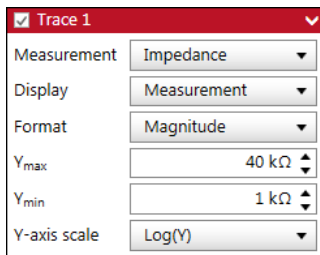
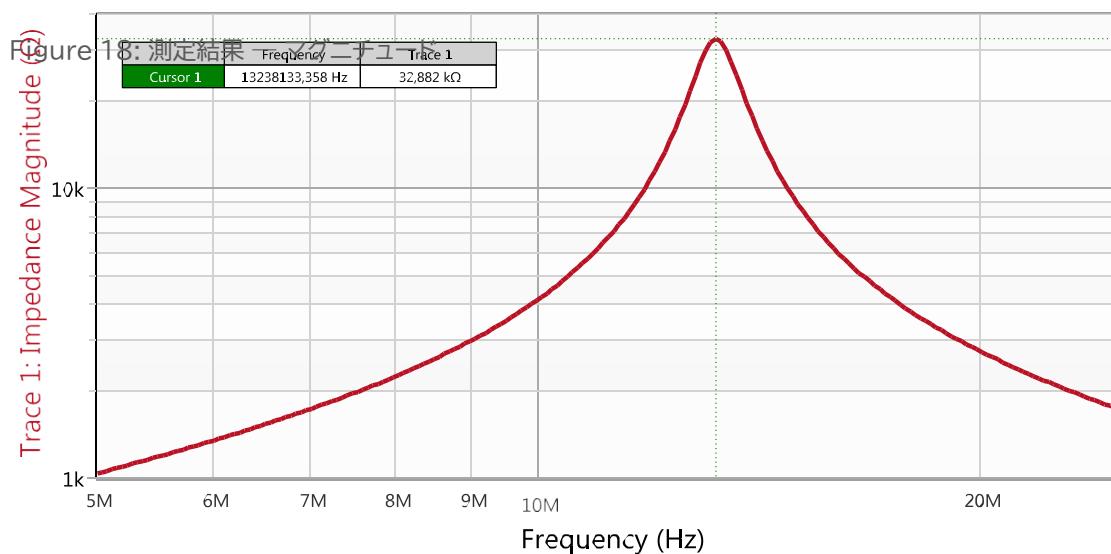


Figure 17: Trace 1 の設定

シングルスイープを実行すると、次のような測定結果が得られます:



図から読み取れる並列抵抗 R_p は以下の通りです:

$$R_p = 32.882 \text{ k}\Omega$$

5 シミュレーションと測定の比較

比較のため、本アプリケーションノートで求めたインダクタモデルをSPICE シミュレータ上に実装し、AC 小信号インピーダンスを計算しました。得られた計算結果と実測結果を同一グラフ上に重ねて示します。

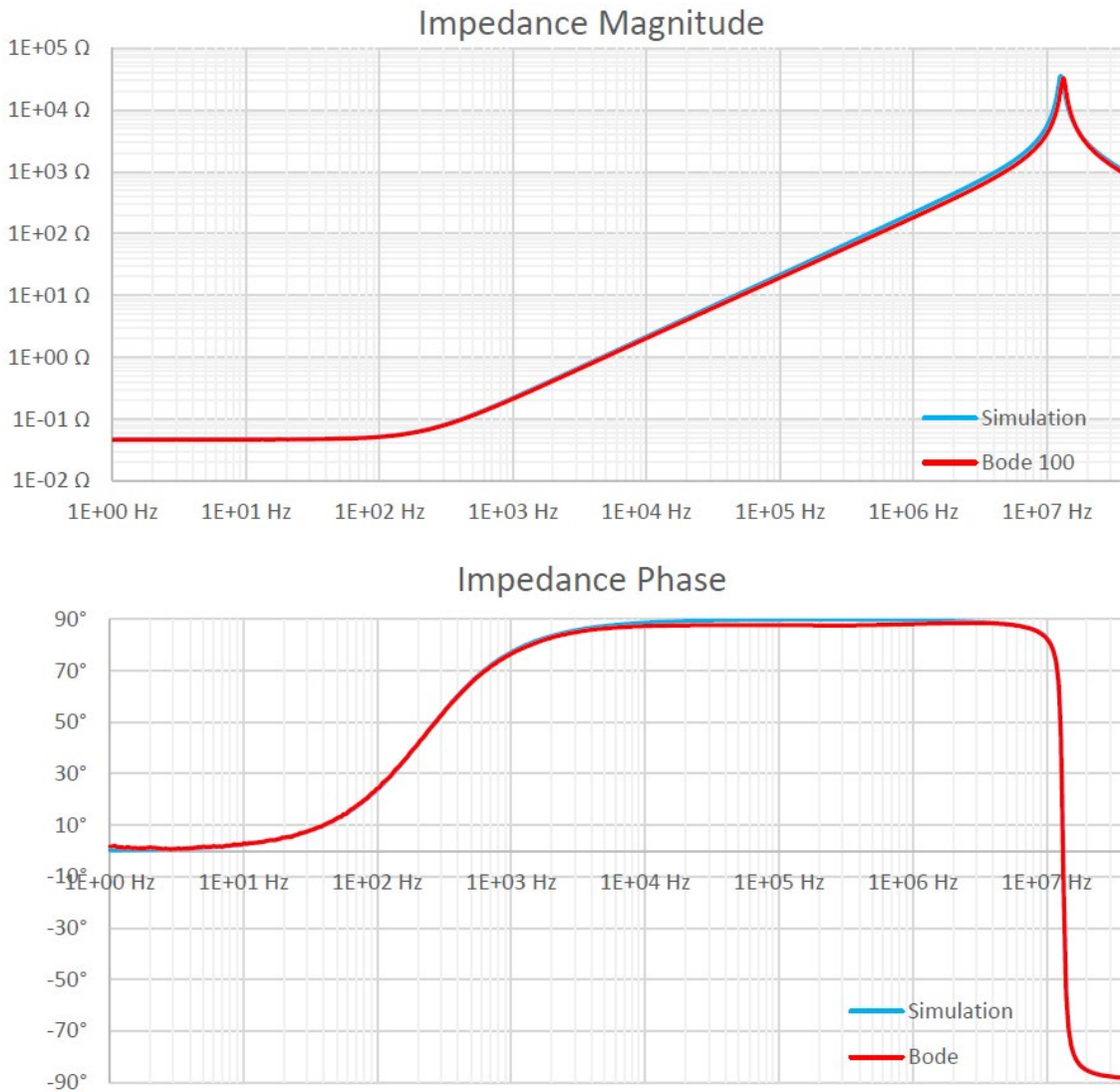


Figure 19: シミュレーション結果と測定結果の比較

図から分かるように、計算曲線と測定曲線は全周波数帯域にわたり非常によく一致しています。

6 まとめ

Bode 100 と B-WIC インピーダンスアダプタの組み合わせは、高精度インピーダンス測定に最適なソリューションです。これらを使用することで①インピーダンスを多様なフォーマットで表示できる②そのため複雑な計算を省略できる③必要な等価回路要素を周波数依存で直接確認できる④測定に適した周波数帯域を容易に判断できるといった利点があります。



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®