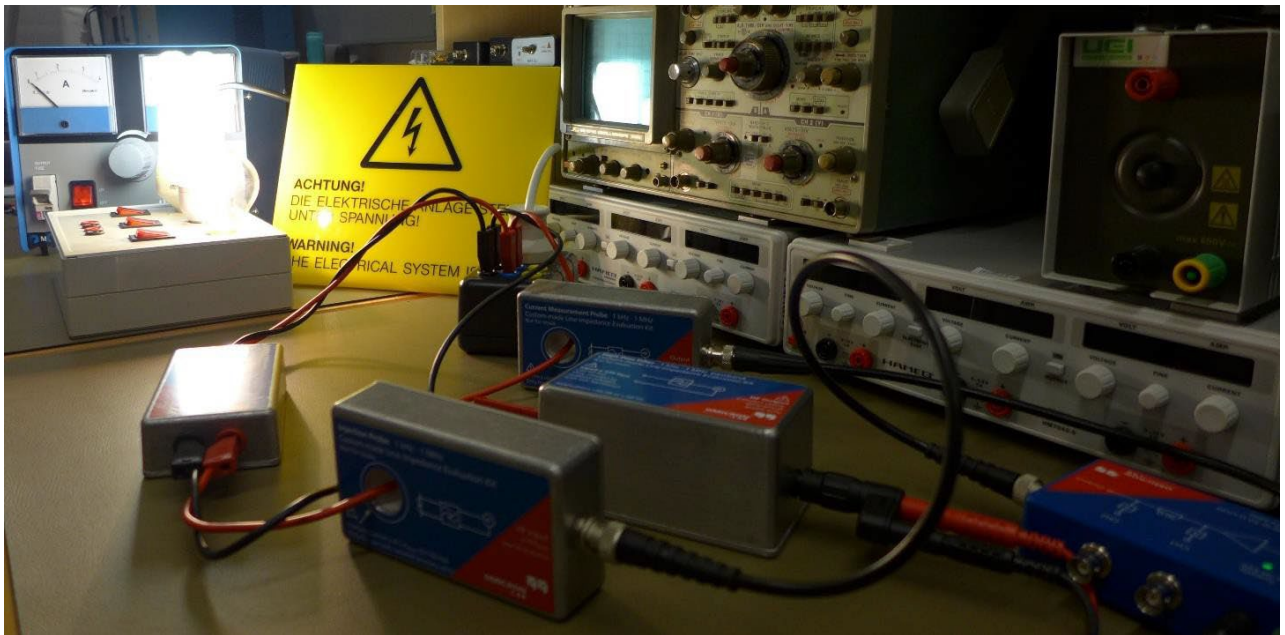


Bode 100 – アプリケーションノート

電力線インピーダンスの測定



By Florian Hämmerle & Tobias Schuster

© 2017-2025 by OMICRON Lab – V1.2

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

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

目次

1	測定タスク	3
2	使用機器.....	3
2.1	インジェクションプローブ	4
2.2	電流測定プローブ	4
2.3	ハイパス電圧フィルタ	5
2.4	インピーダンス安定化	5
3	測定セットアップ	6
4	セットアップのキャリブレーション.....	6
4.1	Open キャリブレーション	8
4.2	Short キャリブレーション	9
4.3	Load キャリブレーション	10
5	測定結果.....	11
6	まとめ.....	12

Note: Bode 100 のセットアップ、調整、キャリブレーションといった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の URL からダウンロードできます。

<https://www.omicron-lab.com/downloads/bode-analyzer-suite>

Note: 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 を使用して実施しています。本書に示された測定を行う場合は、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：

<https://www.omicron-lab.com/downloads/bode-analyzer-suite>

1 測定タスク

本書では、Bode 100 を用いて商用電源(AC メイン)で動作する機器の高周波インピーダンスを測定する方法を示します。対象となる周波数範囲は約 1 kHz ~ 1 MHz です。商用電源に接続された機器の高周波(RF)インピーダンスは、例えば電力線通信(Power Line Communication:PLC)において非常に重要です。特定の周波数でインピーダンスが非常に低い場合、電力線ケーブルを介した通信品質に大きな悪影響を及ぼす可能性があります。



WARNING

適切な安全指示を遵守しない場合、死亡または重傷を負う可能性があります。

商用電源電圧は非常に危険です。高電圧での測定を行う際は、安全が確保された測定環境と適切な保護手段を必ず使用してください。

2 使用機器

高い AC 電圧(商用電源)上で RF インピーダンスを測定する方法はいくつか存在します。ここでは、被測定機器(DUT)を駆動する 230 V・50 Hz 電源に対して、誘導結合により RF 振動信号を重畳する測定方法を紹介いたします。

測定システムは以下の機器・コンポーネントで構成されます：

1. Bode 100 ベクトルネットワークアナライザ
– DUT のインピーダンス測定に使用
2. B-AMP 12 アンプ
– RF 振動信号を増幅し、S/N 比を向上させるために使用
3. Testec TT-SI9001 アクティブ差動プローブ
– 230 V 電圧を安全に測定するために使用
4. カスタム製 RF インジェクションプローブ
– 230 V AC 信号に RF 振動信号を重畳するためのプローブ
5. カスタム製 電流測定プローブ(1 V/A) + ハイパスフィルタ
– DUT に流れ込む微小な RF 電流を測定
6. カスタム製 ハイパスフィルタ
– 230 V 電源成分を除去し、DUT での小さな RF 電圧を測定可能にする
7. カスタム製 インピーダンス安定化装置(Impedance Stabilization Device)
– RF 測定電流が適切にループを形成するようにするための装置

各デバイスの詳細については、次章で説明します。



WARNING

自作またはカスタム製の評価機器を商用電源(AC メイン)に直接接続してはいけません。高電圧サージ(過渡現象)の危険があり、大変危険です。

高電圧サージを防ぎ、商用電源からの絶縁を確保するために、適切に絶縁された電圧発生装置を使用してください。

2.1 インジェクションプローブ

50 Hz・230 V の商用電源信号に RF 摂動信号を重畳するため、一次巻線が 1 回の 結合型電流プローブ(カレントトランス)を使用します。50Hzの一次電流でコアが飽和すると非線形性が発生し、測定結果に誤差が生じるので飽和させないことが重要なポイントです。我々は 複数の二次巻線を持つ同軸コアを使用逆方向に注入される 50 Hz 成分を抑制するため、ハイパスフィルタを併用します。ハイパスフィルタは①50 Hz で低インピーダンス(コア飽和を防ぐため)②60 Hz で 50 dB 以上の減衰③コーナー周波数:約 600 Hz(1 kHz で十分に低減衰)の特性を持ちます。

次の写真は、カスタム製のインジェクションプローブです。



Figure 1: カスタム製インジェクションプローブ

このコアは 50 Hz で最大 4.5 A_{RMS} まで飽和せずに動作するよう設計されています。なお、DC 電流はコアを即座に飽和させるため禁止です。

2.2 電流測定プローブ

インピーダンス測定には、DUT の大きな 50 Hz 負荷電流に重畳して流れる微小な RF 電流を測定する必要があります。そのため、一次巻線 1 回の電流トランスにより、1Aあたり1Vを出力する電流プローブを設計しています。また、50 Hz の大きな信号を抑えるため、この電流トランスの後段にも ハイパスフィルタを設置しています。ハイパスフィルタの特性は①60 Hz 以下では ショート(バイパス)動作②コーナー周波数:約 600 Hz③通過帯域:1 kHz 以上です。これにより、50 Hz の負荷電流でコアが飽和しないようにすることが重要です。コアが飽和すると非線形性が発生し、測定結果が大きく歪みます。下の写真は、50Hz で最大 4.5 A_{RMS} に耐えるカスタム製電流測定プローブを示します。



Figure 2: カスタム製電流測定プローブ

2.3 ハイパス電圧フィルタ

DUT に流れ込む RF 電流に加えて、DUT 端子での RF 電圧も測定する必要があります。しかし、微小な RF 電圧には 230 V RMS の商用電源電圧が重畳しているため、そのままでは測定できません。このため、受動 LC ハイパスフィルタを用いて 50 Hz 成分を除去します。フィルタは高電圧に直接接続されるため、安全性の観点から Y コンデンサを使用します。フィルタは 50 Hz 信号に対して 比較的高いインピーダンスを持つ必要がありますが、インピーダンスを無限大にすることはできません。そのため本システムでは、電流プローブを DUT の入力に直接接続し、正確な電流測定を確保しつつ、電圧測定側はハイパスフィルタ → 高電圧差動プローブ(10:1)へ接続する構成を採用しています。以下の図は、電圧測定用に設計した カスタム製ハイパスフィルタを示します：



Figure 3: カスタム製ハイパス電圧フィルタ



CAUTION

適切な高電圧対応の差動プローブを使用し、Bode 100 の入力を高電圧から絶縁してください。
また、プローブの安全接地(アース)端子は必ず安全接地に確実に接続してください。

2.4 インピーダンス安定化

多くの電圧源は 1 kHz 以上の高周波では高インピーダンス源として振る舞うため、測定用 RF 電流が流れる低インピーダンス経路を別途確保する必要があります。そこで、50 Hz の電源に大容量コンデンサを並列接続し、DUT 内に流れ込む RF 電流のバイパス経路を提供します。このコンデンサにより、RF 電流は電源側で減衰・整流されず、DUT の高周波インピーダンスが正しく測定可能になります。以下の図は、そのために設計した カスタム製インピーダンス安定化装置を示します：



Figure 4: カスタム製インピーダンス安定化回路

3 測定セットアップ

以下の図は、測定セットアップの概略図です。高電圧から絶縁された信号源を使用し、高調波歪みのない純粋な正弦波を生成してください。高調波歪みがあると、その成分が容易に 1 kHz 付近まで到達し、測定結果を乱す原因となります。

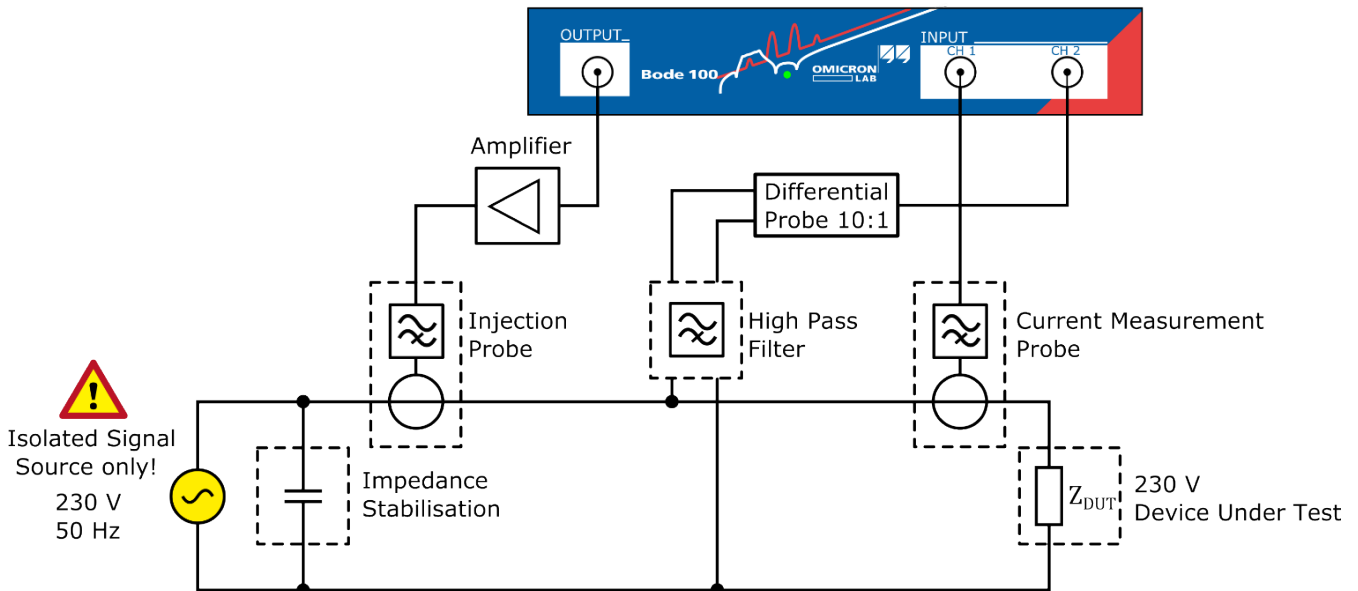


Figure 5: 測定セットアップ

測定を開始する前に、セットアップの キャリブレーション を行う必要があります。

4 セットアップのキャリブレーション

Bode Analyzer Suite で、Voltage/Current Impedance(電圧/電流インピーダンス)測定モードを選択します。:

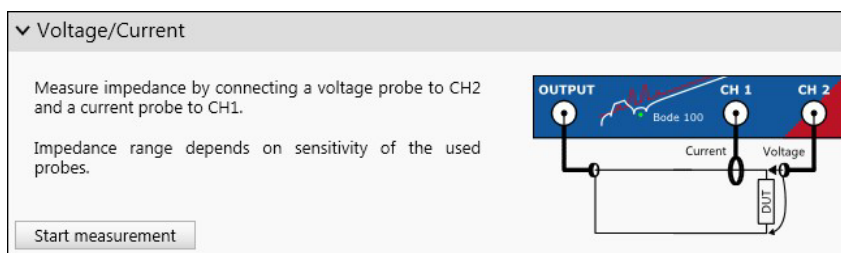


Figure 6: Voltage/Current 測定モード

次に、以下の設定を適用します:

- Start Frequency(開始周波数): 1 kHz
- Stop Frequency(停止周波数): 1 MHz
- Source Level(出力レベル): 13 dBm
- Attenuator CH1: 0 dB
- Attenuator CH2: 0 dB
- Receiver Bandwidth(受信帯域幅): 30 Hz

Hardware Setup(ハードウェア設定)で、チャンネル 2 の外部プローブ設定を 10:1 に設定します。

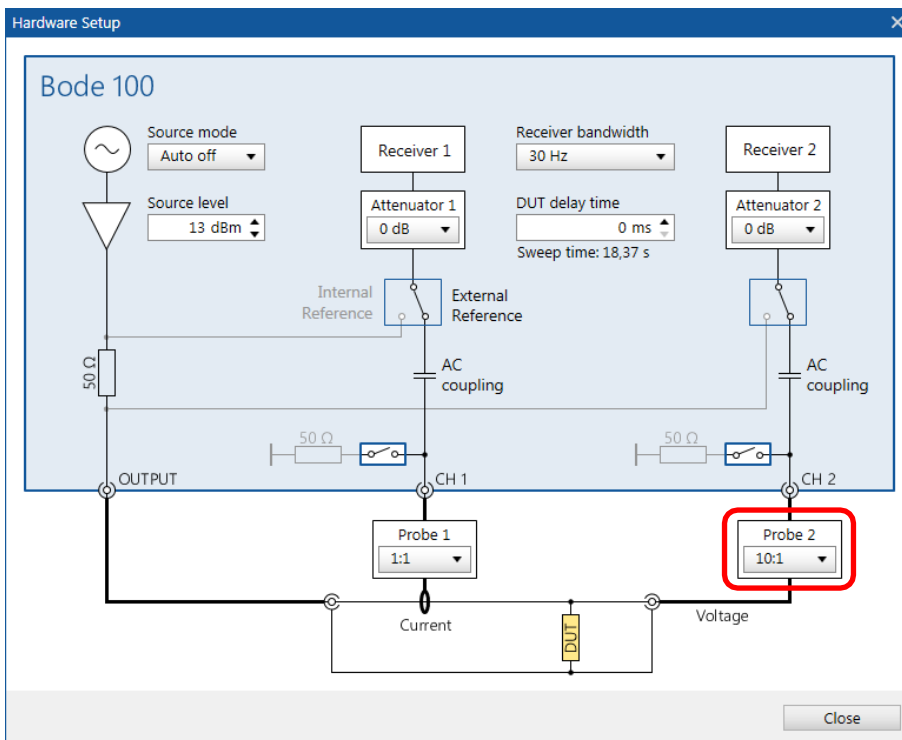


Figure 7: Bode 100 ハードウェアセットアップ



CAUTION
 キャリブレーション中は、必ず 230 V 信号源の電源をオフにしてください！

測定セットアップは必ずOpen/Short/Load キャリブレーションで校正せられていなければなりません。校正中は、下図のように、DUTはOpen/Short/Loadとの接続に置き換えられます。

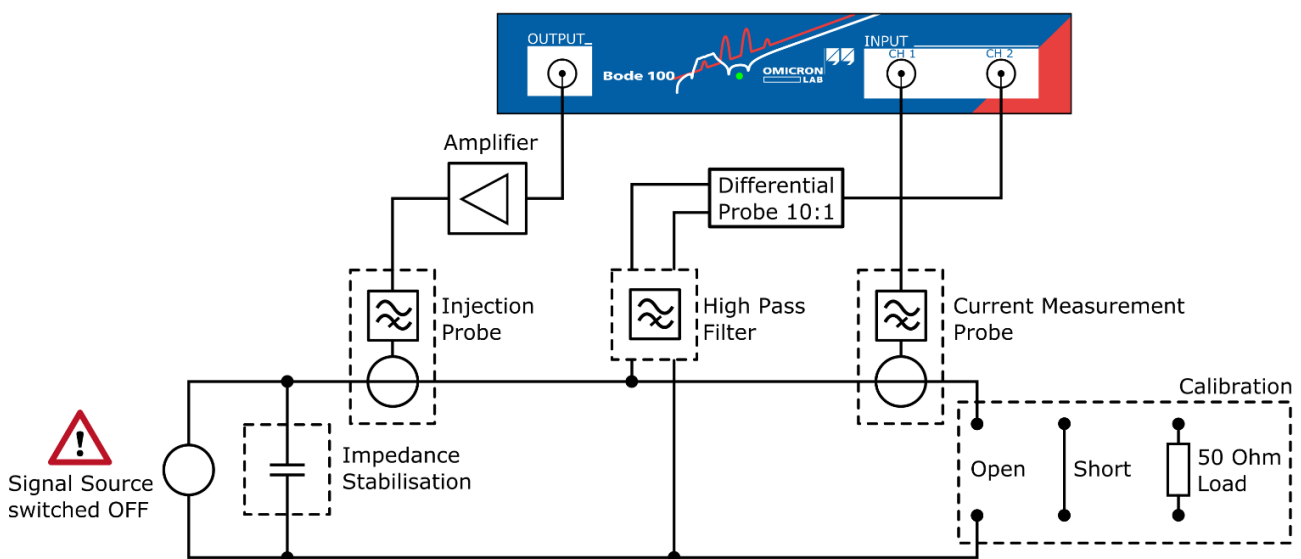


Figure 8 : 校正のセットアップ

DUTの代わりにOpen/Short/Loadの接続用に同軸ケーブルが使用されます。



Figure 9: キャリブレーション用の測定セットアップ

4.1 Open キャリブレーション

Open キャリブレーションを開始する前に、230 V 信号源の電源が OFF になっていることと、図に示すように Open 接続が正しくセットされていることを必ず確認してください:



Figure 10: Open 接続

次に、シングルスイープ $\blacktriangleright \parallel$ を1回実行し、オーバーロードが発生しないことを確認します。問題なく測定できることを確認したら、Open キャリブレーションを実行できます。本測定では User-Range キャリブレーションが最適です。このキャリブレーション方式は、電流スイープ Ω f_{min} ... f_{max} 設定で指定されている周波数そのもので校正を行うため、測定に必要な精度を確保することができます。

Open キャリブレーションを実行するには、下図の「Open Start」ボタンをクリックします。

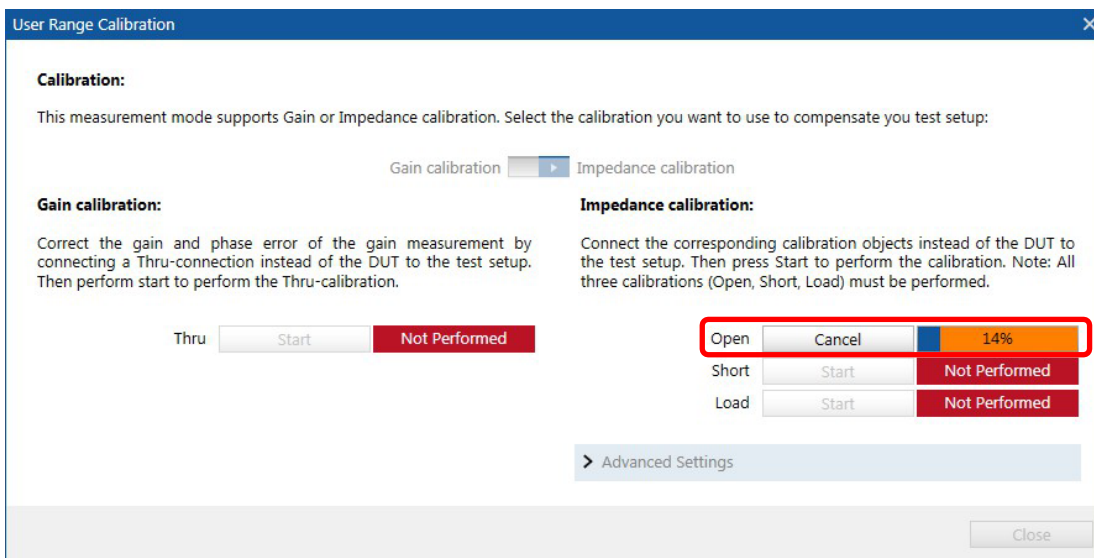


Figure 11: Open キャリブレーション

Open キャリブレーションが完了したら、ウィンドウを閉じます。

4.2 Short キャリブレーション

下図のようにShortコネクタを接続します。



Figure 12: Short 接続

Short 接続では、RF 経路のインピーダンスが非常に低くなるため、注入される電流が大きくなります。その結果、Bode 100 の Channel 1 がオーバーロードされる可能性が高くなります。そのため、Short キャリブレーション時には以下の設定を行います：

- Attenuator CH 1: 20 dB
- Source Level: 6 dBm

これらの設定で十分か確認するため、まずシングルスイープ ▶|| を 1 回実行します。

オーバーロードが発生しなければ、Short-User-Range Calibration を開始できます。



キャリブレーションが完了したら、ウィンドウを閉じ、続けて Load キャリブレーションの準備に進みます。

4.3 Load キャリブレーション


次に、下図のように Load 抵抗を接続します。



Figure 13: Load 接続

Load キャリブレーションでは、以下の設定を適用します：

- Attenuator CH 1: 0 dB
- Source Level: 13 dBm

次に、シングルスweepを1回実行し、オーバーロードが発生しないことを確認します。測定が正常に動作していれば、Load-User-Range Calibrationを実行できます：

Load キャリブレーションが完了すると、インピーダンスキャリブレーションが自動的に有効化されます。ウィンドウを閉じて測定画面に戻ると、キャリブレーションアイコンの背景が緑色となり、ユーザーレンジキャリブレーションが有効であることを示します。:



これでキャリブレーションは完了です。

結果は、50 Ω のフラットな特性として表示されるはずですが。

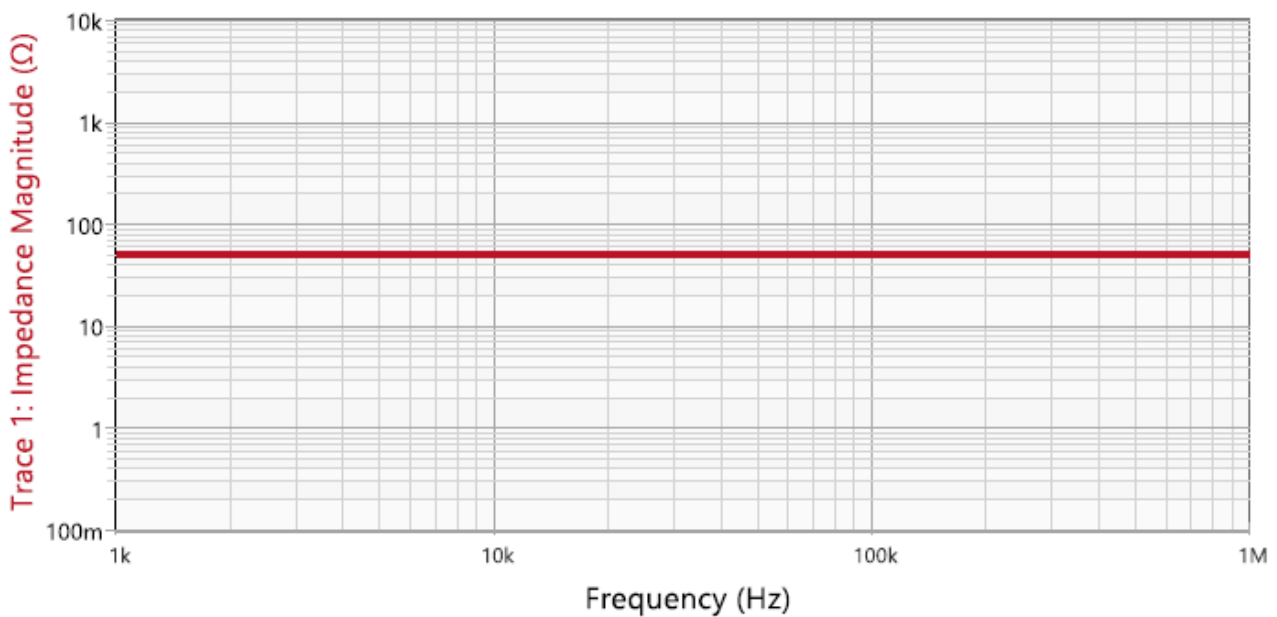


Figure 14: キャリブレーション確認測定

5 測定結果

測定セットアップを確認するため、以下の 3 種類のランプを DUT として使用しました。

1. ランプ 1: 42 W の白熱電球
2. ランプ 2: 14 W のシンプルな省エネランプ
3. 簡易 PFC(Power Factor Correction; 力率改善回路)を内蔵した 30 W の省エネランプ

以下の写真は、3 種類のランプを DUT とした測定セットアップを示しています。



Figure 15: 測定セットアップ

3 種類のランプは、それぞれ異なるインピーダンス特性を示しました。下の図は、3つの測定結果を重ねて示したものです。白熱電球の場合、インピーダンスは約 1.2 k Ω を示しています。これは、次に示す理論値と一致しています。

$$\frac{230V^2}{42W} = 1.2 k\Omega.$$

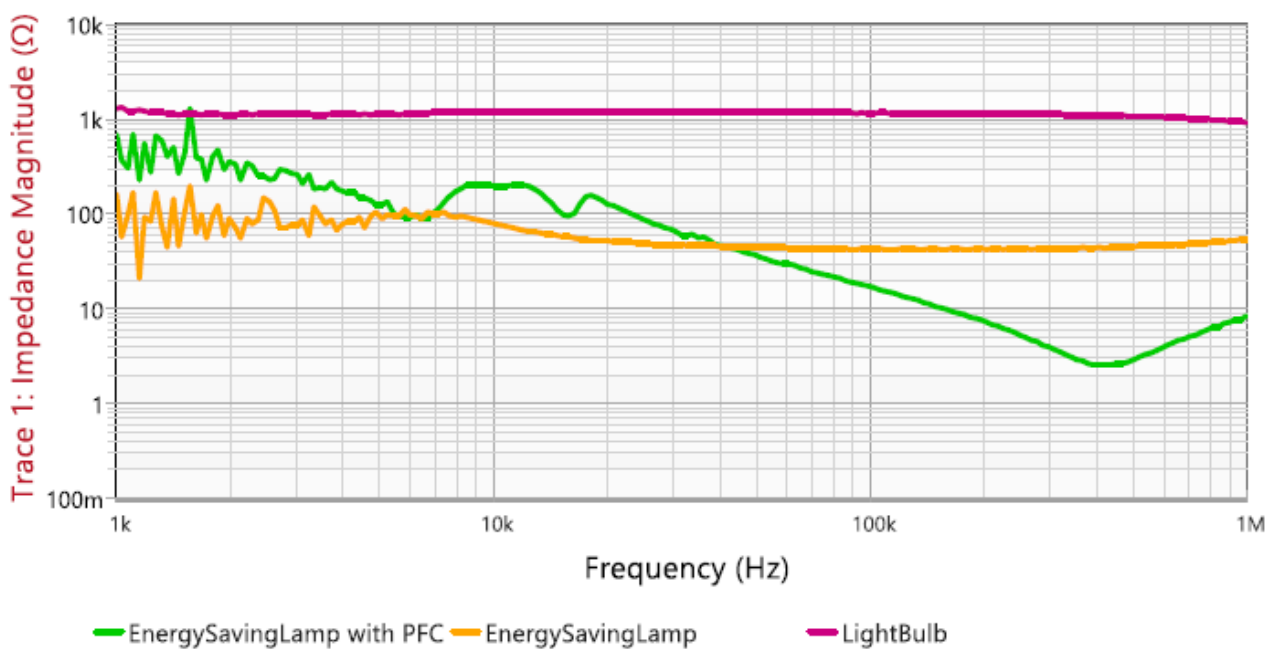


Figure 16: インピーダンス測定結果

6 まとめ

Bode 100 は、ほぼあらゆるシステムの 高周波インピーダンス(RF Impedance) を測定するために必要な機能を備えています。適切なプローブやインジェクション機器を組み合わせることで、インピーダンス測定のための強力なプラットフォームとして使用できます。本書では、230 V 機器を対象に 1 kHz ~ 1 MHz のインピーダンスを測定する方法を例として紹介しました。

本資料が、ユーザー自身の用途に合わせた 測定用・注入用の装置構築の参考となれば幸いです。



WARNING

危険電圧での測定は非常に危険です。安全に測定を行うために、必要な対策をすべて講じてください。危険な電圧レベルが存在する機器を操作できるのは、訓練を受けた有資格者のみです。



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®