

# Bode 100 – アプリケーションノート

## PFCコンデンサのESR測定



本アプリケーションノートは、Fraunhofer IVI の Malte Keil 氏の支援を受けて作成されました。

By Malte Keil & Tobias Schuster

© 2018 by OMICRON Lab – V2.0

Visit [www.omicron-lab.com](http://www.omicron-lab.com) for more information.

Contact [support@omicron-lab.com](mailto: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.....	4
3.1	使用機器.....	4
3.2	測定セットアップとキャリブレーション.....	4
3.2.1	測定セットアップ.....	4
3.2.2	測定セットアップのキャリブレーション.....	5
3.2.3	測定の実行.....	7
3.3	測定結果.....	9
4	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。Bode 100 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/vector-network-analysis/bode-100/>

**Note:** 本アプリケーションノート内のすべての測定は、Bode Analyzer Suite V3.20 を使用して実施しています。本書と同じ測定を行う場合は、V3.20 以降のバージョンを使用してください。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/vector-network-analysis/bode-100/>

## 1 はじめに

本アプリケーションノートでは、Bode 100 ベクトルネットワークアナライザと B-AMP 12 アンプを組み合わせ使用し、PFCコンデンサ<sup>1</sup> または DCリンクコンデンサのインピーダンスを測定する方法について説明します。試験対象(DUT)には MTFC<sup>2</sup> PFCコンデンサを使用しています。

優れた特性により、MTFC は現代の電気・電子機器で広く用いられています。MTFC は大容量であり、自己修復機能を備え、産業用途で要求される温度範囲にも耐えることができます。また、MTFC の ESR は同等の電解コンデンサより少なくとも1桁低く、インバータなど高エネルギー密度が求められる用途に適しています。さらに、MTFC は無極性であるため、産業用途での力率改善に最適です。大量生産が可能で材料の供給も安定しているため、価格も競争力があります。

一方、上記のような厳しい用途では、コンデンサの寿命に影響が及びます。多くのコンデンサは徐々に劣化し、容量が少しずつ低下して、用途固有の許容しきい値に達すると交換が必要となります。容量は測定が容易ですが、研究によれば、ESR は MTFC の経年劣化を示す指標として、容量よりも優れている可能性があるとして唆されています(Flicker ら, 2013)。稼働率や精度が重要なアプリケーションでは、ESR の把握は、機器の損傷や損失を未然に防ぐための有用な予兆となり得ます。

## 2 測定タスク

ESR の測定は非常に困難です。その理由は、ESR が非常に低く(本ケースでは数ミリオーム)多くの状況では容量成分に隠れてしまうことです。一般的に使用されるコンデンサの等価回路は 4 要素から構成されますが、MTFC では超低周波帯域を扱う場合を除き、RP(並列抵抗)を無視できます。

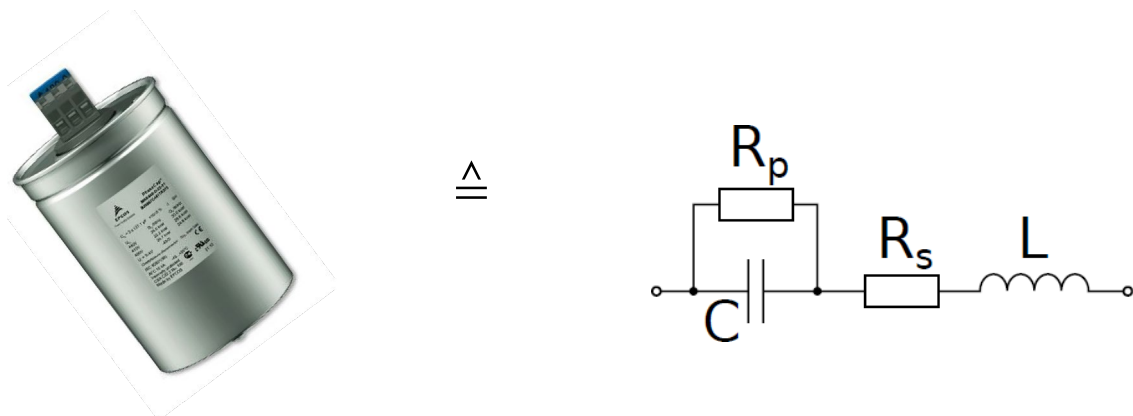


Figure 1: コンデンサの等価回路モデル

<sup>1</sup> PFC: Power Factor Correction(力率改善)

<sup>2</sup> MTFC: Metallized Thin Film Capacitor(メタライズド薄膜コンデンサ)

この等価回路では、本アプリケーションノートで扱うような、3端子間がデルタ構造を持つ複雑なユニットの周波数応答を説明するには不十分です。しかし、この回路は次の 3つの特徴的な領域(が存在することを説明するのに役立ちます。

- 低周波領域:インピーダンスは容量成分が支配
- 共振付近:インピーダンスは ESR が支配
- 高周波領域:インピーダンスはインダクタンスが支配

したがって、周波数に対するインピーダンスを高精度に測定することで、対象のコンデンサについて多くの情報を得ることができ、ESR の推定にもつながります。

## 3 測定セットアップと結果

### 3.1 使用機器

- Bode 100 ベクトルネットワークアナライザ
- B-AMP 12 アンプ
- DUT(本ケースでは MTFC)
- 自作キャリブレーションボード

### 3.2 測定セットアップとキャリブレーション

#### 3.2.1 測定セットアップ

ESR が非常に低いことが予想されるため、Shunt-Thru(シャント・スルー)測定法を採用します。最適な S/N(信号対雑音)比を得るため、B-AMP 12 により測定信号を最大 +25 dBm まで増幅します。さらに、B-AMP 12 は Shunt-Thru 測定時に発生しやすいグラウンドループ誤差の低減にも役立ちます。B-AMP 12 の出力と Bode 100 のチャンネル2は、以下の図のように DUT に接続されます。

重要な点として、DUT に隣接する BNC コネクタのうち、少なくとも一つは絶縁されている必要があります。これを行わないと、グラウンドが短絡され、4端子測定がバイパスされてしまうためです。

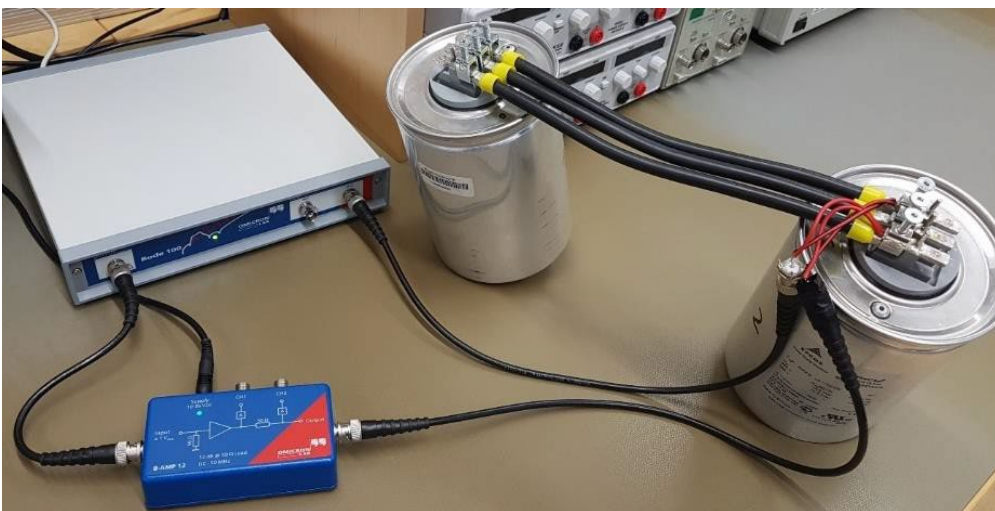


Figure 2: 測定セットアップ

Bode Analyzer Suite(BAS)を「Shunt-Thru」測定モードで起動します。

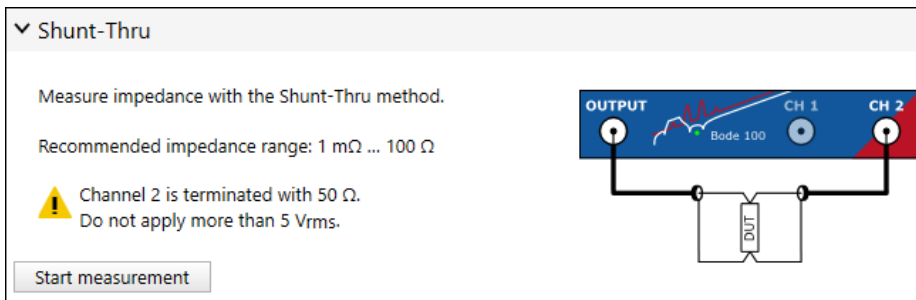


Figure 3: スタートメニュー

BAS 内では、100 Hz ~ 1 MHz の周波数スイープを設定します。また、異なる共振点で十分な分解能を確保するため、測定ポイント数を 801 点に設定します。

### 3.2.2 測定セットアップのキャリブレーション

Open / Short / Load キャリブレーションのために、以下の写真のような キャリブレーションボードを作成しました。

- Load 校正用に 10 Ω 抵抗を搭載
- Short 校正用に低インピーダンスのショートパス(4端子構造)を搭載
- このショート部の抵抗値は およそ 30 μΩ

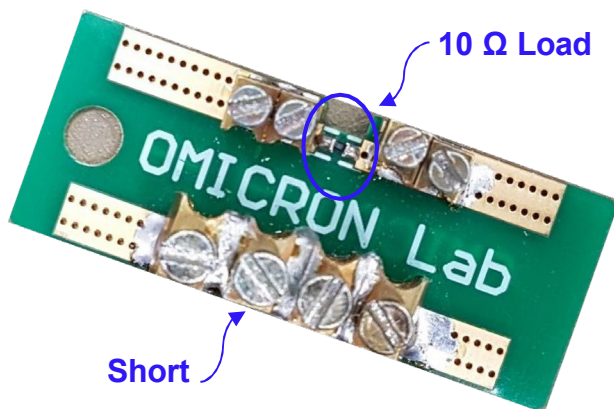


Figure 4: キャリブレーションボード

キャリブレーションの前に、設定は以下のとおりです。

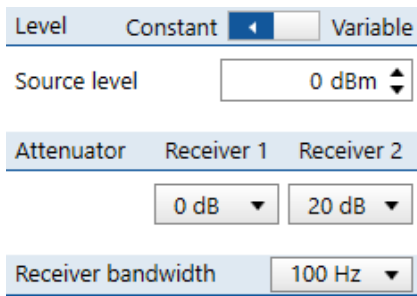


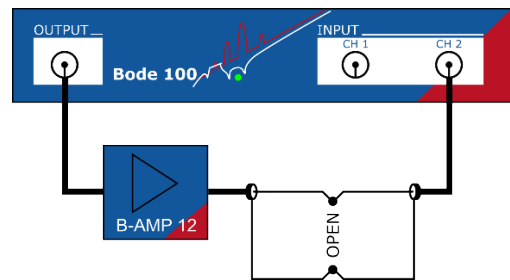
Figure 5: キャリブレーション用設定

最良の測定結果を得るため、以下の手順で ユーザーレンジ・インピーダンスキャリブレーションを実施します。

Open キャリブレーション:



Figure 6: Open キャリブレーション



Short キャリブレーション:

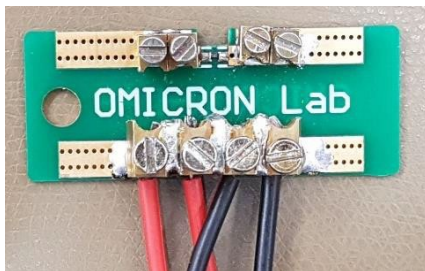
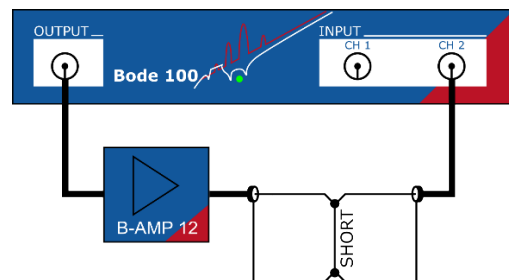


Figure 7: Short キャリブレーション



Load キャリブレーション:

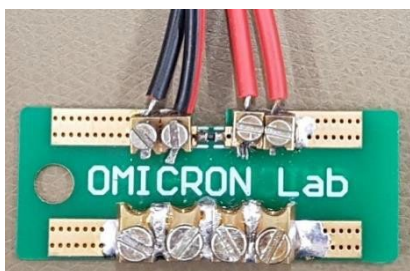
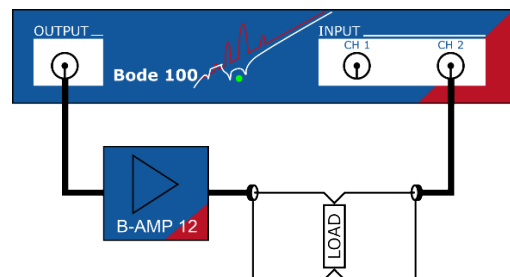


Figure 8: Load キャリブレーション



### 3.2.3 測定の実行

信号源レベルおよびアッテネータ設定:

最良の S/N(信号対雑音)比を得るため、Receiver 2 のアッテネータは 0 dBに設定します。また、低周波数(すなわち DUT が高インピーダンスを示す領域)で受信器が過負荷になるのを防ぐため、Shaped Level(シェイプドレベル)を併用します。

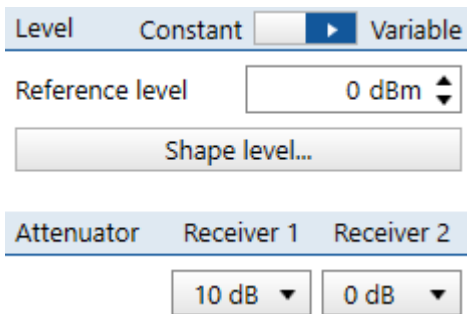


Figure 9: 出力レベルおよびアッテネータ設定

次の図に示すように、信号源レベルは、低周波域(高インピーダンス)では出力レベルを低く設定、高周波域(DUT の自己共振付近)では最大出力レベルになるよう調整されています:

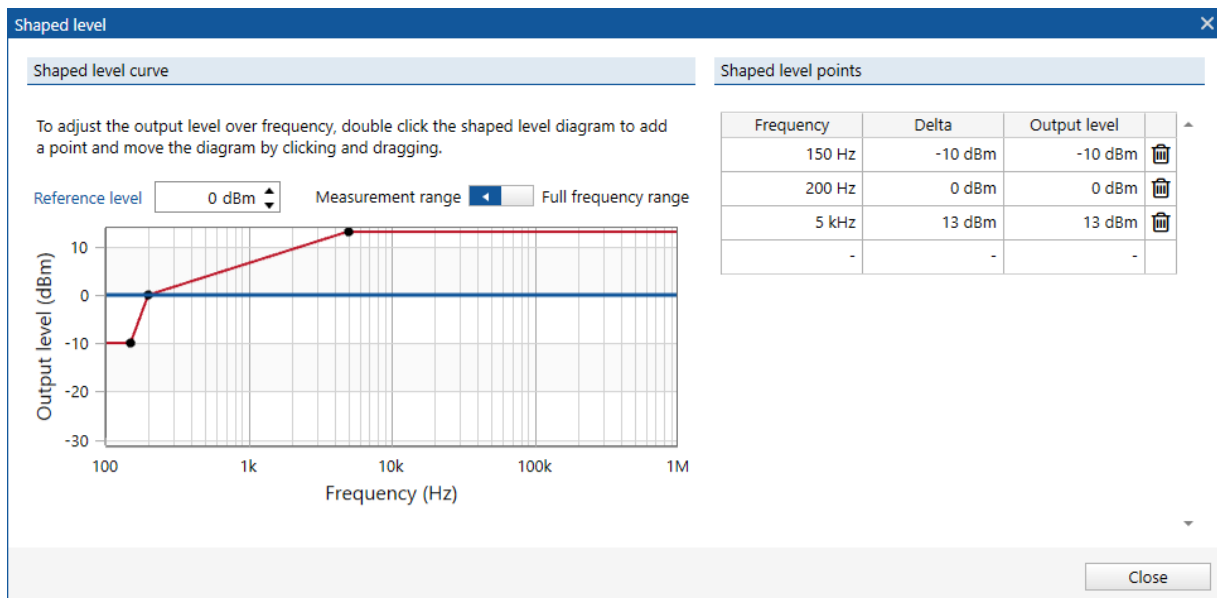


Figure 10: シェイプドレベル曲線

### 測定トレースの設定:

まず、コンデンサのインピーダンスの周波数応答を確認するため、インピーダンスの絶対値(Magnitude)と位相(Phase) を測定します。これらを測定するために、以下のようなトレース設定が必要です。

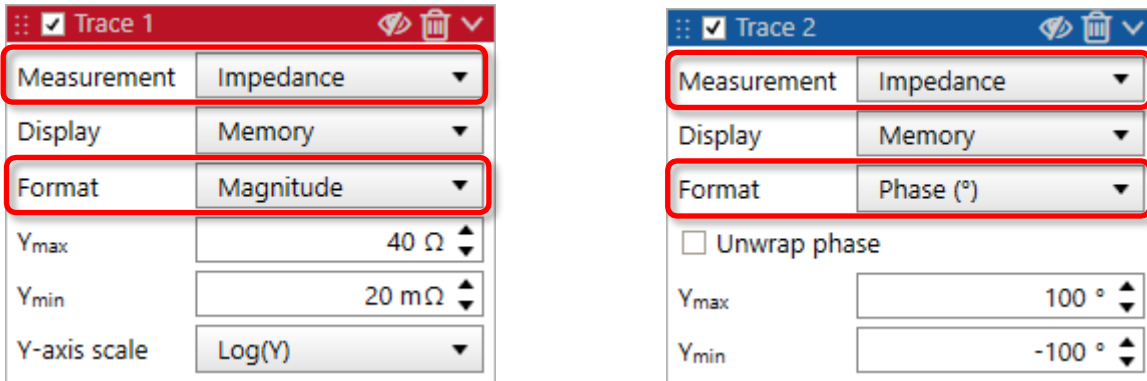


Figure 9: トレース設定

### DUT の接続:

本ケースでは、コンデンサの用途上、並列接続が要求されます。そのため、測定時にも同じ構成を使用します。今回使用する 3相 MTFC コンデンサ(C1 および C2) には、それぞれ a, b, c の3つの端子があります。

次の測定では、2つのコンデンサを以下のように接続します。:

Connector	Capacitor	to	Connector	Capacitor
a	C1	-	c	C2
b	C1	-	b	C2
c	C1	-	a	C2

Table 1: MTFC の並列接続



Figure 11: MTFC の並列接続



### 3.3 測定結果

以下のグラフは、100 Hz から 1 MHz におけるコンデンサのインピーダンス絶対値と位相を示しています。3本の曲線は、3つのコンデンサそれぞれの測定結果を示しています。なお、測定の接続ポイントはコンデンサ C2 に設けています。

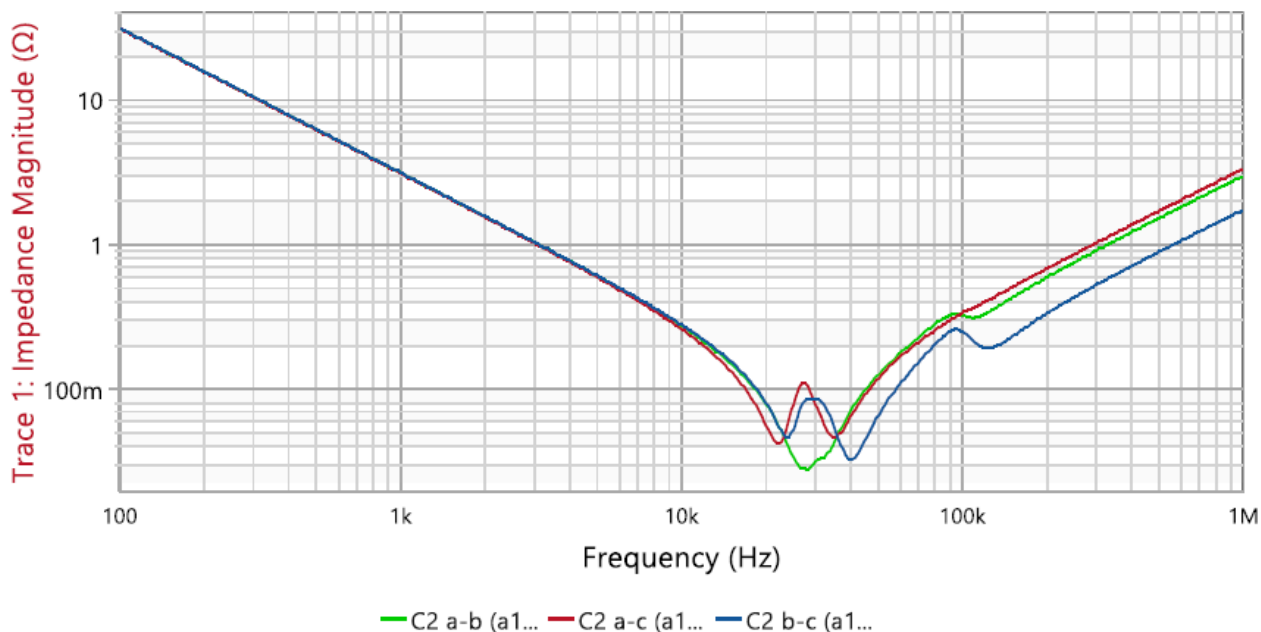


Figure 12: インピーダンス絶対値

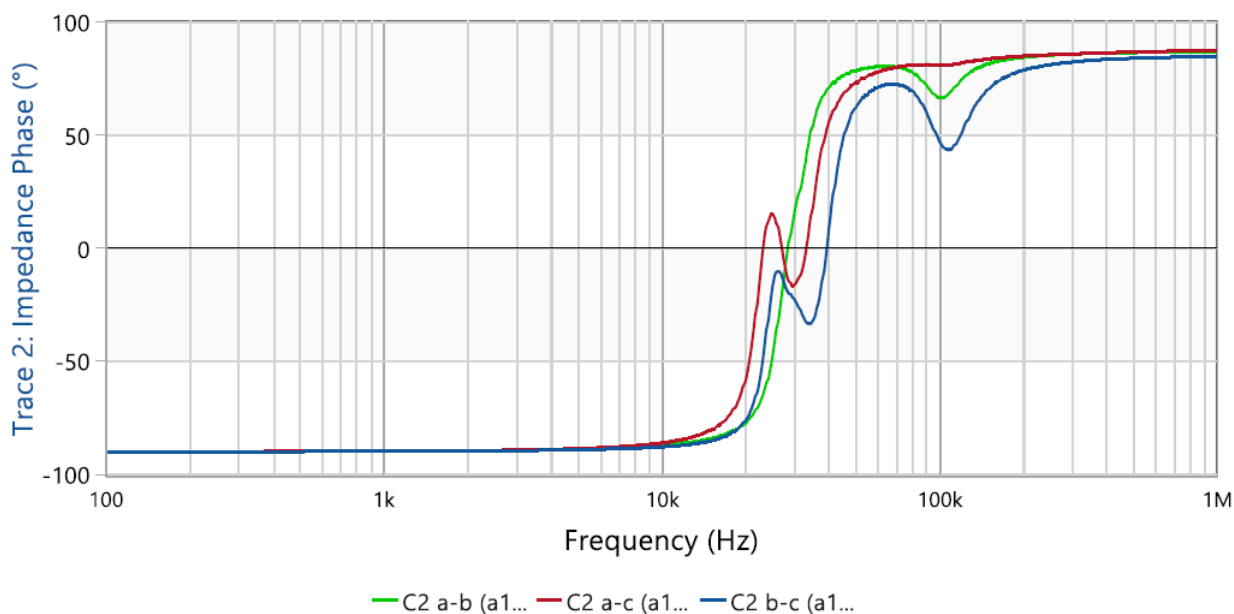


Figure 13: インピーダンスの位相

インピーダンスの絶対値を見ると、開始周波数から約 10 kHz まで、1デケードあたり  $-20$  dB の直線的な傾きを確認できます。これはほぼ純粋な容量性の振る舞いを示しており、位相曲線でも  $-90^\circ$  付近を維持していることから明らかです。

2つのコンデンサを特別な構成で接続しているため、2つの独立した共振周波数が生じます。コンデンサ C2 は測定接続点に近いいため、寄生インダクタンスが小さくなります。一方、C1 はケーブルを介して並列接続されているため、寄生インダクタンスが大きくなり、その結果 自己共振周波数は低くなります。

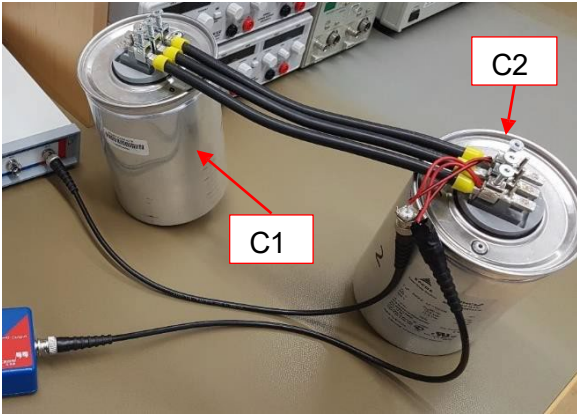


Figure 14: C1 と C2 の並列接続と配線

各共振点においては、コンデンサの容量性インピーダンスが寄生インダクタンスによって相殺されます。

その結果、ESR によって生じる抵抗成分のみが支配的となります。ESR は共振ピークを減衰させますが、本ケースでは ESR が非常に低いため、鋭い(スパイク状の)共振ピークが現れています。

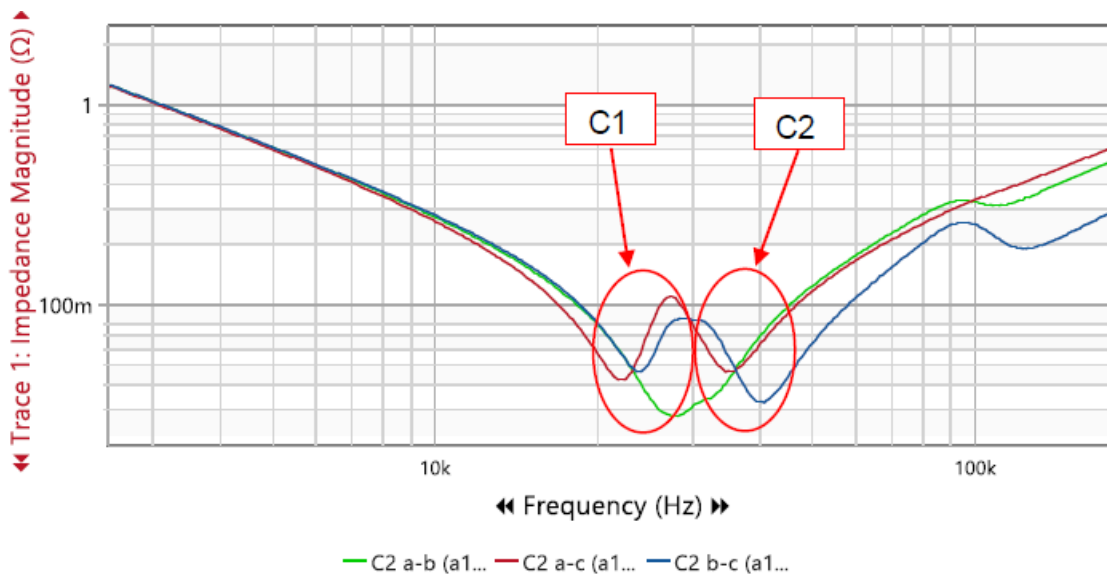


Figure 15: 2つの並列コンデンサと接続配線による二重共振

加えて、約 100 kHz 付近にも追加の共振が見られます。この周波数帯では インダクタンス成分が支配的であり、インピーダンスの絶対値は 1デケードあたり +20 dB の傾きを示し、位相も +90° 付近になります。

Bode Analyzer Suite では、シリーズ等価回路の値 (ESR など) を直接表示することができます。そのためには、表示形式 (Format) を Rs に変更します。以下の図は、そのためのトレース設定を示しています。:

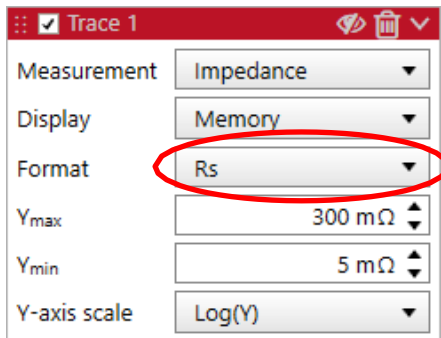


Figure 16: ESR 用トレース設定

この設定により、以下のようなカーブが得られます。

- 100 Hz ~ 10 kHz の広い帯域で、ESR は約 10 mΩ
- より高い周波数では ESR が上昇
- 自己共振周波数付近でピークが発生

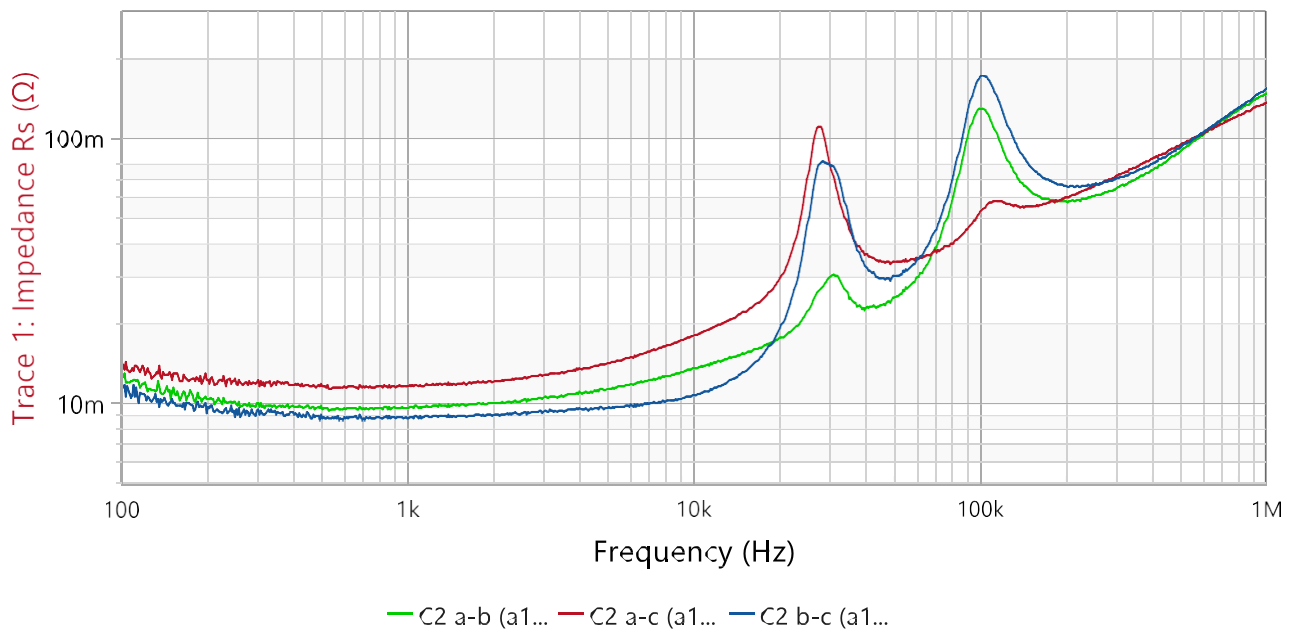


Figure 17: 周波数依存の抵抗成分 (ESR)

カーソルを有効にすることで、正確な直列抵抗 (ESR) 値を容易に読み取ることができます。

IEC60384-1:2008 に従い、定格容量が 10  $\mu$ F を超えるコンデンサは 100 Hz または 120 Hz で測定する必要があります。そのため、本測定ではカーソルをこれらの周波数に設定しています。

	Frequency	C2 a-b (a1...	C2 a-c (a1...	C2 b-c (a1...
✓ Cursor 1	100 Hz	12,878 m $\Omega$	14,707 m $\Omega$	11,268 m $\Omega$
✓ Cursor 2	120 Hz	11,882 m $\Omega$	12,921 m $\Omega$	10,667 m $\Omega$

Figure 18: カーソル表

IEC60384-1 の追加要件として、測定電圧は VR の 3% または 5 V のいずれか小さい方を超えてはならないと定められています。本ケースでは、定格電圧 400 V の 3% は 12 V となるため、許容電圧は 5 V が適用されます。B-AMP 12 アンプの最大出力は 25 dBm @ 50  $\Omega$  です。25 dBm は以下のように計算できます：

$$P = 1 \text{ mW} \cdot 10^{\frac{25 \text{ dBm}}{10}} = 316 \text{ mW}$$

50  $\Omega$  負荷における電圧は約 4 V<sub>RMS</sub> になります。一方、コンデンサのインピーダンスは 100 Hz で約 12  $\Omega$ 、さらに高周波ではこれより小さくなるため、本測定セットアップでは上限電圧 5 V を超えることはありません。

## 4 まとめ

本アプリケーションノートでは、Bode 100 と B-AMP 12 を用いて PFC コンデンサを測定する方法を示しました。完全な評価結果を得るためには、以下が推奨されます：

- 2つの MTFC 間の あらゆる並列接続のバリエーション
- C1 および C2 それぞれの端子への 全組み合わせの接続構成

これらをすべて測定することで、より正確なコンデンサ特性が把握できます。適切な基準値と経験を備えていれば、測定結果は 残存寿命の推定にも活用できます。さらに、コンデンサが置かれる環境条件を示す追加の測定結果と組み合わせることで、劣化の原因を分離・定量化することが可能です。ドイツ・ドレスデンの Fraunhofer IVI では、このようなサービスが あらゆる種類のバッテリー向けに開発されており、同研究所の応用科学分野における専門知識は、現在 コンデンサ向けの類似サービスにも拡張されています。



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](mailto:info@omicron-lab.com) • [www.omicron-lab.com](http://www.omicron-lab.com)

Smart Measurement Solutions®