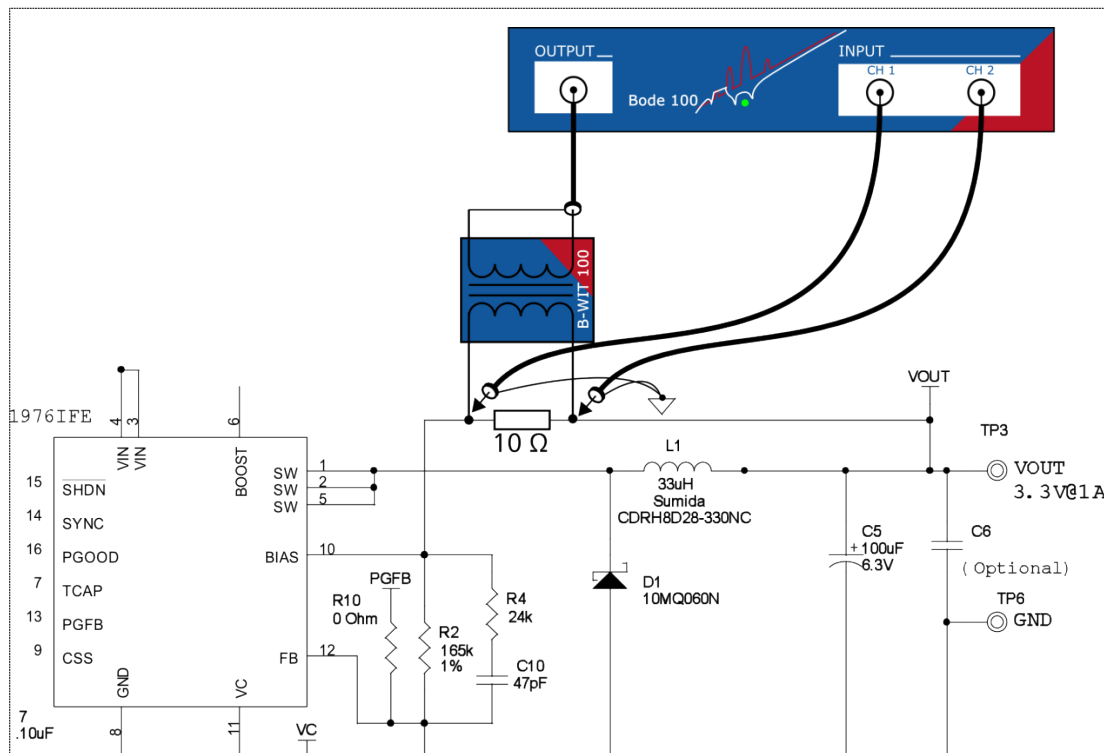


Bode 100 - アプリケーションノート

DC/DCコンバータの安定性測定



Strongly supported by



By Stephan Synkule, Lukas Heinzle & Florian Hämmerle

© 2018 by OMICRON Lab - V3.3

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	測定構成	4
2.1	被測定回路	4
2.2	インJECTIONポイントの選定	5
2.3	Bode 100 の接続	6
2.4	位相マージンとゲインマージン	8
3	デバイス設定	9
4	測定と結果について	10
4.1	キャリブレーション	10
4.2	シェイプレベル(Shaped Level)	12
4.3	注入レベル(Injection Level)	14
4.4	電源電圧の影響	15
4.5	負荷電流の影響	16
5	まとめ	17

Note: Bode100の基本的な設定、調整および校正方法についてはBode100のユーザマニュアルを参照してください。以下より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測定は、全てBode Analyzer Suite V3.12で行われています。本ドキュメントに記載されている測定はV3.12またはそれ以降のバージョンで行ってください。最新のバージョンは以下より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、降圧型 DC/DC コンバータのようなスイッチング電源における安定性、すなわち制御ループの挙動を解析する方法を紹介します。

電源の出力電圧を安定させ、入力電圧の変動や負荷変動による影響を低減するためには、補償用の制御回路が不可欠です。この制御回路の設計品質が、DC/DC コンバータ全体の安定性および動特性を決定します。

本資料では、Bode 100 ベクトルネットワークアナライザと B-WIT 100 広帯域注入トランスを用いて、制御系ループの周波数応答を測定する方法を解説します。

ループの特性評価には 電圧注入法による開ループゲインの測定を行います。この方法は、スイッチング電源などの電圧レギュレータにおける制御ループ安定性解析に広く用いられています。

本ドキュメントでは、以下の項目について詳しく説明します。

- ループゲイン測定に適した注入ポイントの選定方法
- 周波数応答からのゲインマージンおよび位相マージンの求め方
- 入力電圧および負荷電流がシステムの動特性へ与える影響
- 測定結果を改善するための Bode 100 の Shaped Level 機能の利用方法

2 測定構成

2.1 被測定回路

デモボード 481A は、LT1976 を用いた降圧型(バック)コンバータです。出力は負荷電流 1 A において 3.3 V に最適化されています。T以下の図は、デモボード481Aの回路図を示しています。デモ回路の詳細情報は、<http://www.linear.com>で確認できます。

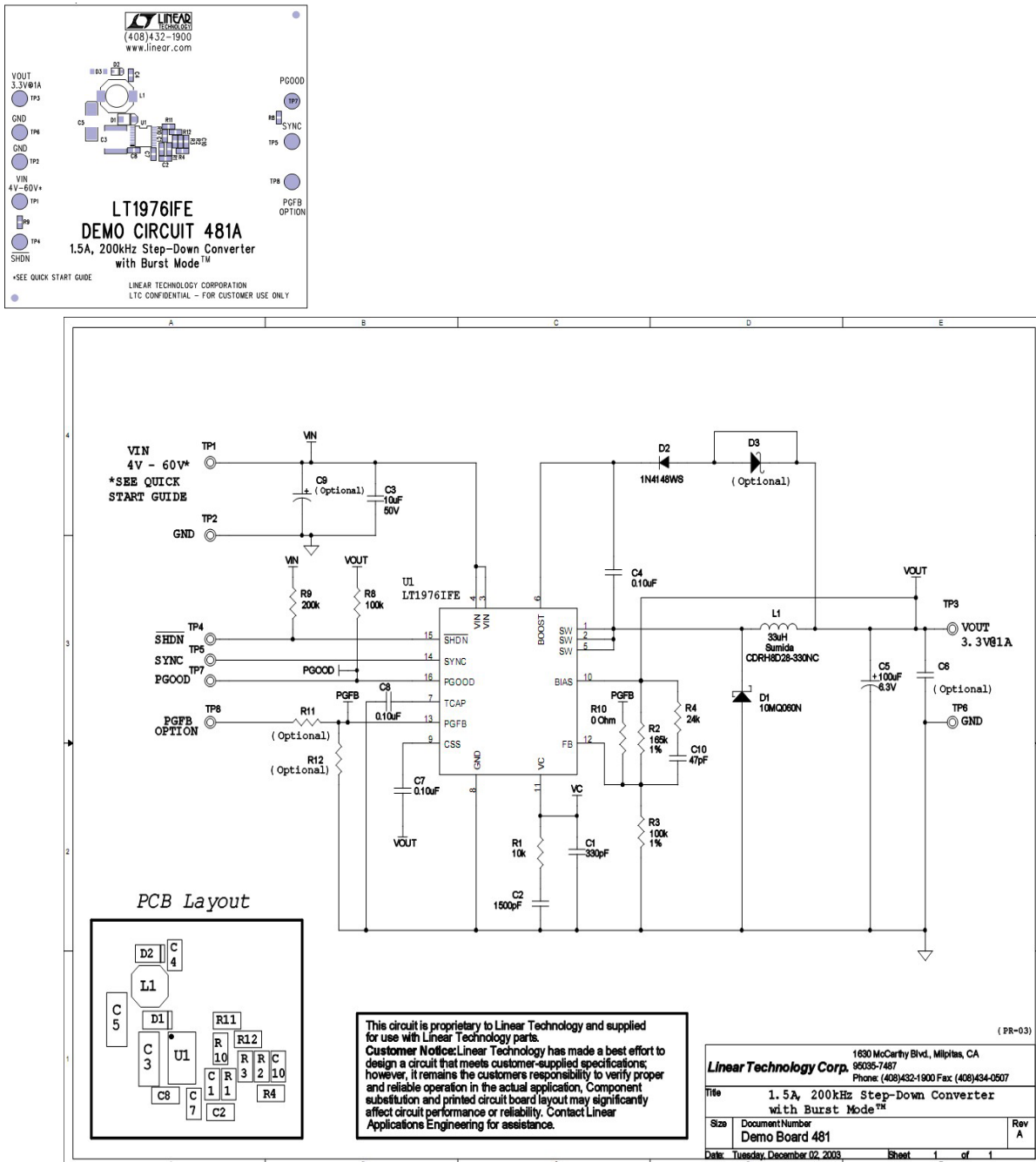


Figure 1: LT 481A デモボード回路図

2.2 インジェクションポイントの選定

電圧フィードバックループのループゲインを測定するには、適切な位置でループを開放し、その点に外乱信号を注入する必要があります。注入された外乱信号はループ全体を伝播し、ループゲインに応じて振幅が増幅または減衰し、位相が変化します。Bode 100 の出力が外乱信号を生成し、入力チャンネルでループの伝達関数を測定します。

測定されたループゲインが実際のループゲインと等しくなるようにするためには、適切なポイントを選ぶ必要があります。まず、ループが単一路に制限されているポイントを見つけ、並列信号経路が存在しないことを確認する必要があります。次に、このポイントでループ方向を見たときのインピーダンスが、逆方向を見たときのインピーダンスよりもはるかに大きいことを確認する必要があります。

以下の図は回路のフィードバックループを示しており、適切な注入ポイントを示しています。後方方向から見たインピーダンスはコンバータの出力インピーダンスに等しく、非常に低い(数mΩの範囲)です。ループ方向から見たインピーダンスは補償器と分圧器によって形成され、数kΩの範囲にあります。

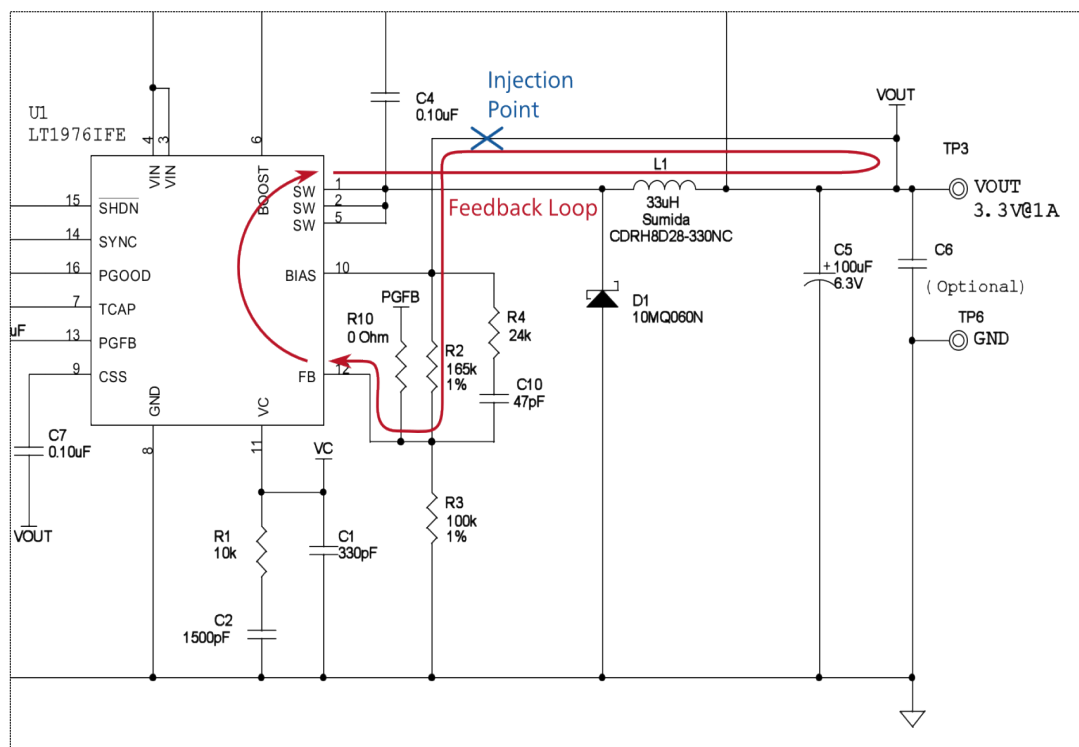


Figure 2: フィードバックループと注入ポイント

注入ポイントの選択や電圧注入法の理論についての詳細は、記事「ループゲイン測定」(知っておくと良いことセクション)でご覧いただけます。記事は以下のリンクからダウンロード可能です: <http://www.omicron-lab.com/bode-100/application-notes-know-how/articles-use-cases.html>

2.3 Bode 100 の接続

注入点を決定した後、その位置でループを開放します。測定によってシステム動作が変化しないよう、フィードバック分圧にほとんど影響を与えない 小さな注入抵抗(本例では 10 Ω) を挿入します。

外乱電圧は、B-WIT 100 注入トランスを用いて注入抵抗と並列に印加されます。このトランスは、Bode 100 の出力をフィードバックループの直流動作点から絶縁するために必要です。次の図は、Bode 100 が回路にどのように接続されているかを示しています。

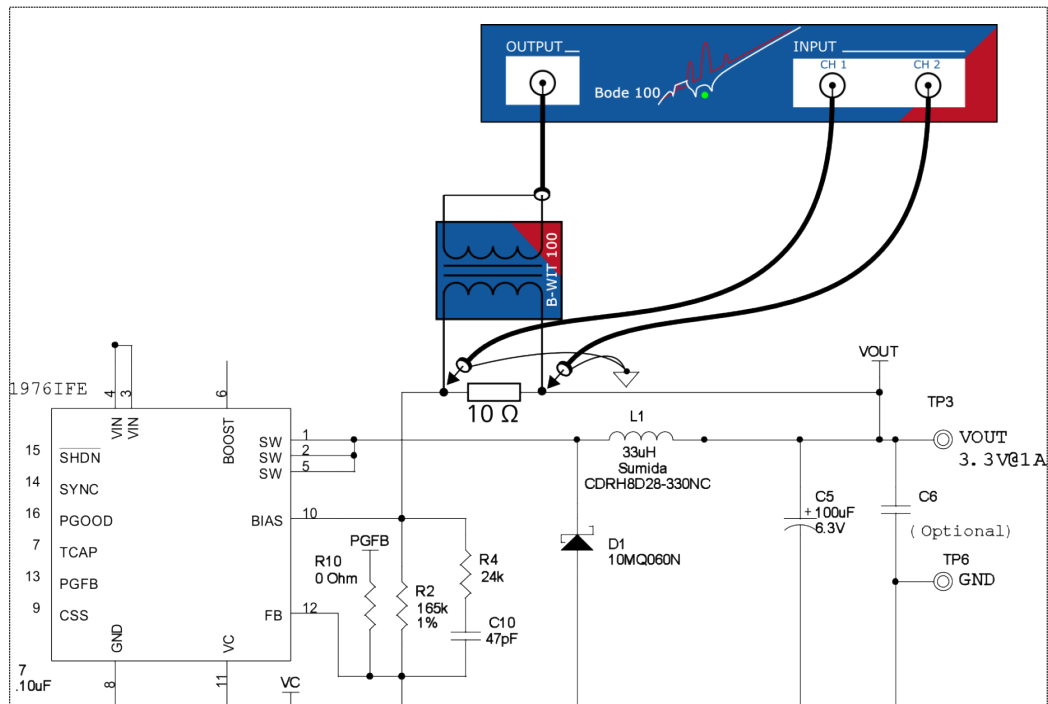


Figure 3: レギュレータのループ応答を測定するための Bode 100 の接続

外乱電圧は B-WIT 100 注入トランス を用いて注入抵抗と並列に印加されます。このトランスは、Bode 100 の出力をフィードバックループの直流動作点から絶縁するために必要です。Bode 100 の入力注入抵抗の両端に接続されます。(CH1:フィードバックへの入力信号/CH2:コンバータ出力に現れる信号)CH2 の電圧を CH1 の電圧で割ることで、フィードバック入力から電源出力までの伝達関数を得ます。この伝達関数をループゲイン $T(j\omega)$ と呼びます。

$$T(j\omega) = \frac{V_{CH2}}{V_{CH1}}$$

注意： 信号取得には OMICRON Lab 製 PML-1110(10:1)プローブの使用を推奨しますが、一般的なオシロスコープ用プローブでも測定可能です。

警告： 危険電圧が存在する場合は、作業員および機器を保護するため、差動プローブなど適切なプローブを使用してください!

良好な測定結果を得るため、注入抵抗、注入トランス、プローブは回路の近傍に配置し、リード線はできるだけ短くしてください。

また、はんだパッドへの機械的ストレスを避けることも重要です。次の図は、デモボードでの変更をどのように実現したか、およびプローブと注入トランスが回路にどのように接続されているかを示しています。

注意： 下記、セットアップに必要な追加のデバイスの特性です。

電源電圧: 5 V

不可抵抗: 1Aになるように可変抵抗を調整

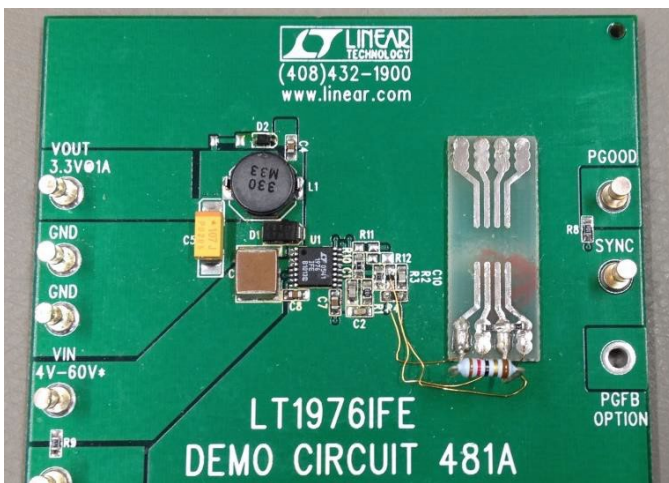


Figure 4: 測定機器接続用に準備されたデモボード

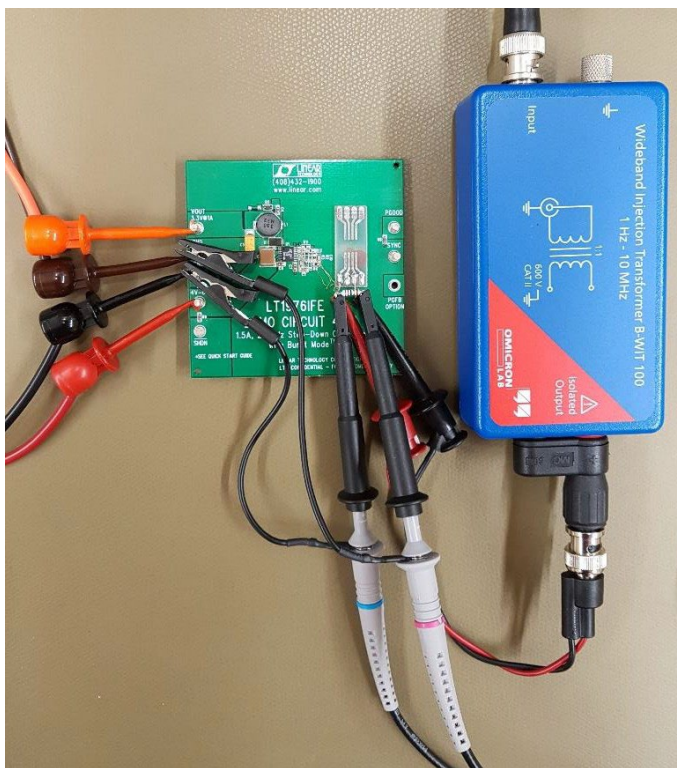


Figure 5: 回路に接続されたプローブおよび注入トランス

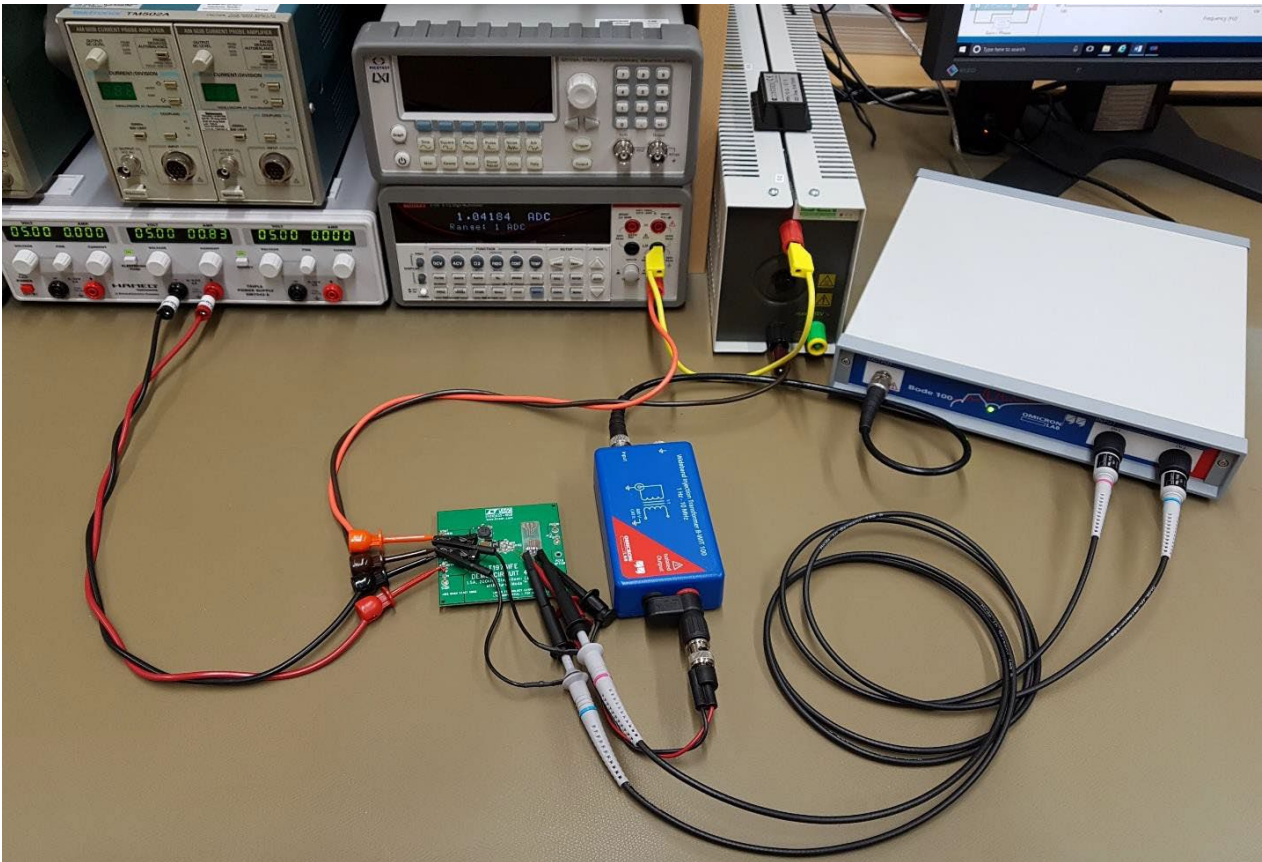


Figure 6: 電源、抵抗負荷、電流計および Bode 100 を用いた測定セットアップ

2.4 位相マージンとゲインマージン

ナイキストの安定判別法によれば、帰還系の安定性は、ゲイン交差周波数(位相マージンの評価点)と位相交差周波数(ゲインマージンの評価点)で評価されます。

注意：教科書で行うような開ループゲイン解析では、位相が -180° のときに正帰還が生じます。そのため、位相余裕は「 -180° までどれだけ余裕があるか」で定義されます。一方、この測定では閉ループ状態のまま開ループゲインを測定しています。したがって、位相余裕は 0° を基準にして測定しなければなりません。

一方、この測定では閉ループ状態のまま開ループゲインを測定している。したがって、位相余裕は 0° を基準にして測定しなければならない。

これは少し混乱しやすいが、フィードバック入力に入力した信号が、位相変化なし(0°)で出力に現れる状況を想像すると理解しやすい。ループを一周して 0° の位相で戻ってきた信号は、再びフィードバック点に入力され、直前の信号と加算される。

これは、負帰還システムにおいて正帰還が成立し、不安定になる瞬間である。

3 デバイス設定

ループの伝達関数を測定するためには、Bode 100 を正しく設定する必要があります。ループゲインの測定は、Bode Analyzer Suite の「ゲイン/位相(Gain / Phase)モード」で実行されます。:

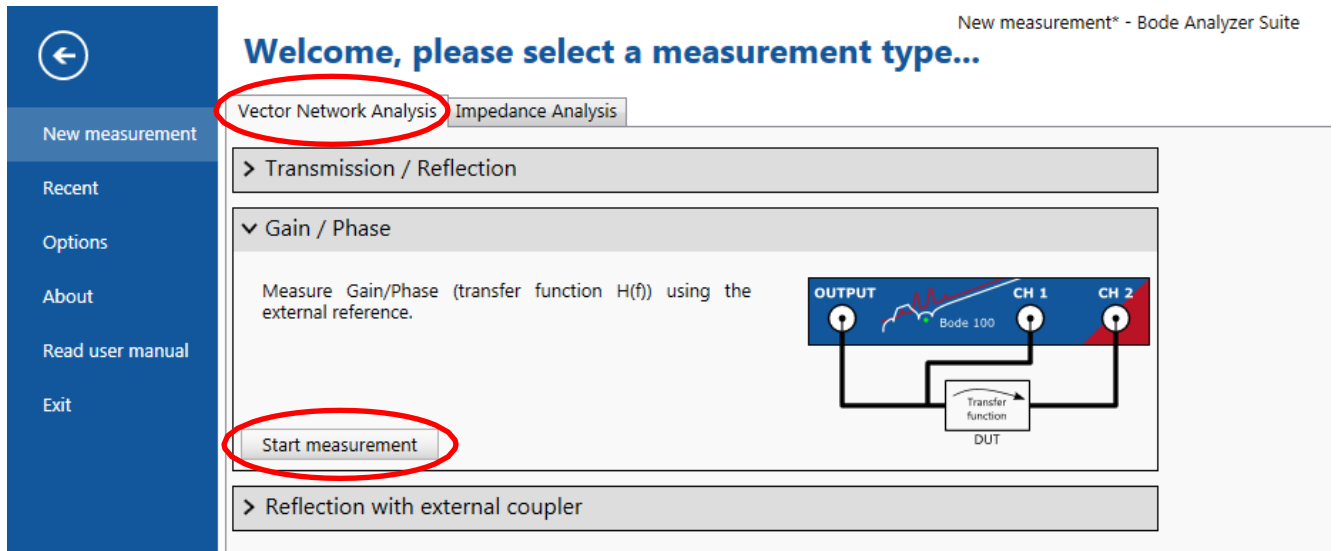


Figure 7: スタートメニュー

適用されている設定は以下のとおりです:

- 開始周波数(Start Frequency): 100 Hz
- 終了周波数(Stop Frequency): 200 kHz
- 掃引モード(Sweep Mode): 対数掃引(Logarithmic)
- ポイント数(Number of Points): 201点以上
- レベル(Level): -20 dBm
- アッテネータ(CH1 および CH2): 0 dB
- 受信帯域幅(Receiver Bandwidth): 30 Hz

トレース1およびトレース2は、ボード線図(ボードプロット)を表示するため、以下に示すように設定されている。:

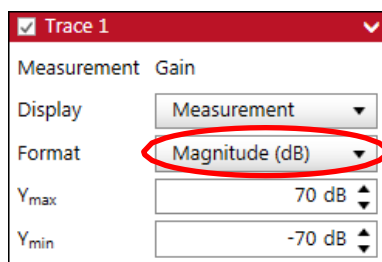


Figure 8: Settings Trace 1

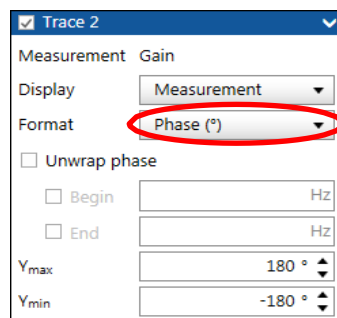


Figure 9: Settings Trace 2

4 測定と結果について

4.1 キャリブレーション

Bode 100 を回路に接続するために使用する 2本のプローブの周波数特性が異なる場合、キャリブレーションが必要になります。プローブ間の周波数特性の違いは、測定結果に 位相誤差およびゲイン誤差を引き起こします。

使用しているプローブが互いに同一特性であるかどうか確信が持てない場合は、簡単な確認を実施してください。


キャリブレーションが必要かどうかの確認方法:

キャリブレーションの要否を確認するには、両方のプローブを同じ信号に接続する必要があります。これは、以下のいずれかの方法で行うことができます。

- ・図に示すように、注入抵抗の同じ側に両方のプローブを接続する
- ・または、Bode 100 の OUTPUT 信号にプローブを直接接続する。



Figure 10: 両方のプローブを同一点に接続した状態

プローブを接続した後、Single Sweep ボタンを押して測定を開始します。  Single

測定結果として、0 dB および 0°のフラットな直線が得られるはずですが、これは、両プローブが同一の周波数特性を持っており、追加のキャリブレーションが不要であることを示しています。次ページに示す測定グラフは、キャリブレーションを必要としない、特性の揃ったプローブを使用した代表的な測定例です。

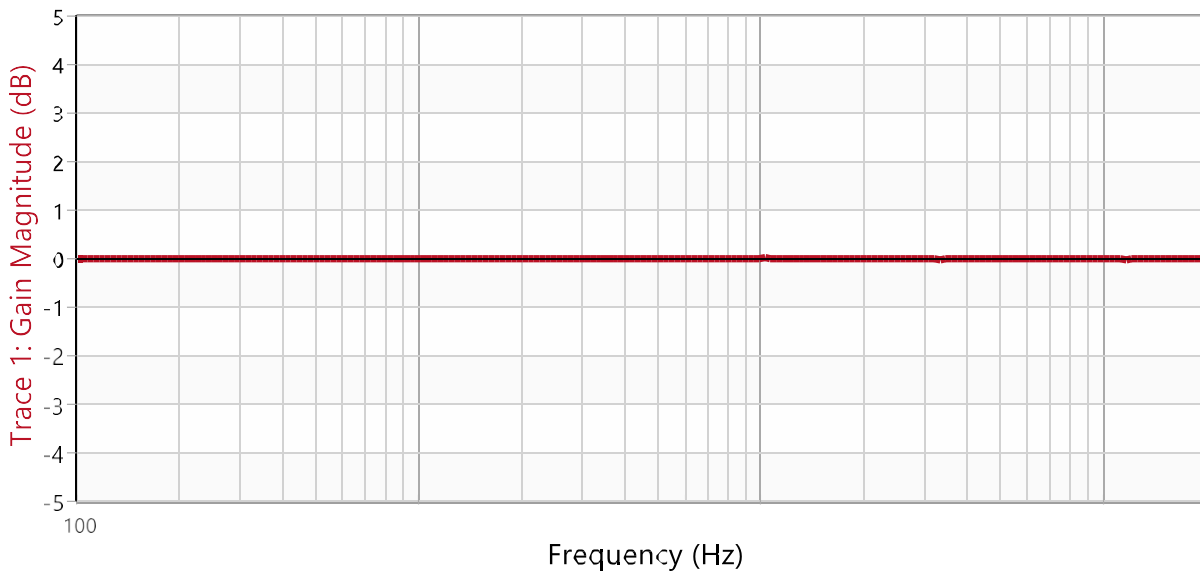


Figure 11: Flat 0dB Gain curve shows that no additional calibration is required

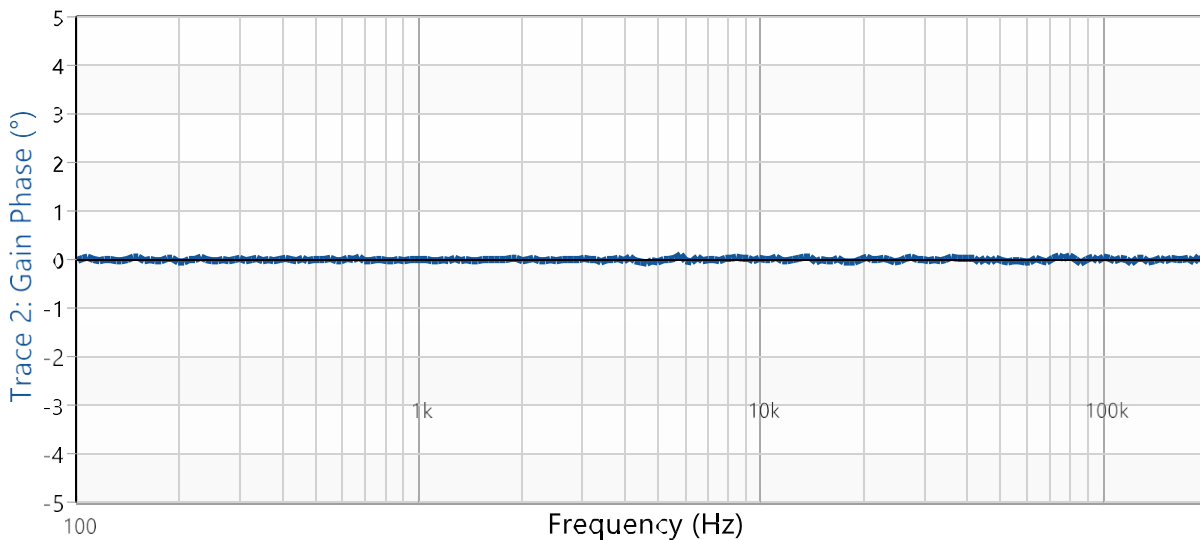


Figure 12: Flat 0° Phase curve shows that no additional calibration is required

キャリブレーションの実施

測定結果が 0 dB および 0° から大きく逸脱している場合は、THRU キャリブレーションを実施してください。キャリブレーションの実施方法に関する詳細は、Bode 100 ユーザーマニュアルを参照してください。

注意: キャリブレーションによってノイズを除去することはできません。ノイズを低減するためには、以下の対策を行ってください。

4.2 シェイプレベル(Shaped Level)

最初の安定性測定は、電源電圧 12 V、負荷電流 1 Aの条件で実施します。

周波数応答測定では、電子負荷は使用しないでください。電子負荷の制御回路が、被測定回路に干渉する可能性があるためです。

注入レベルを -20 dBm に設定して周波数掃引を開始すると、以下のボード線図が得られます。

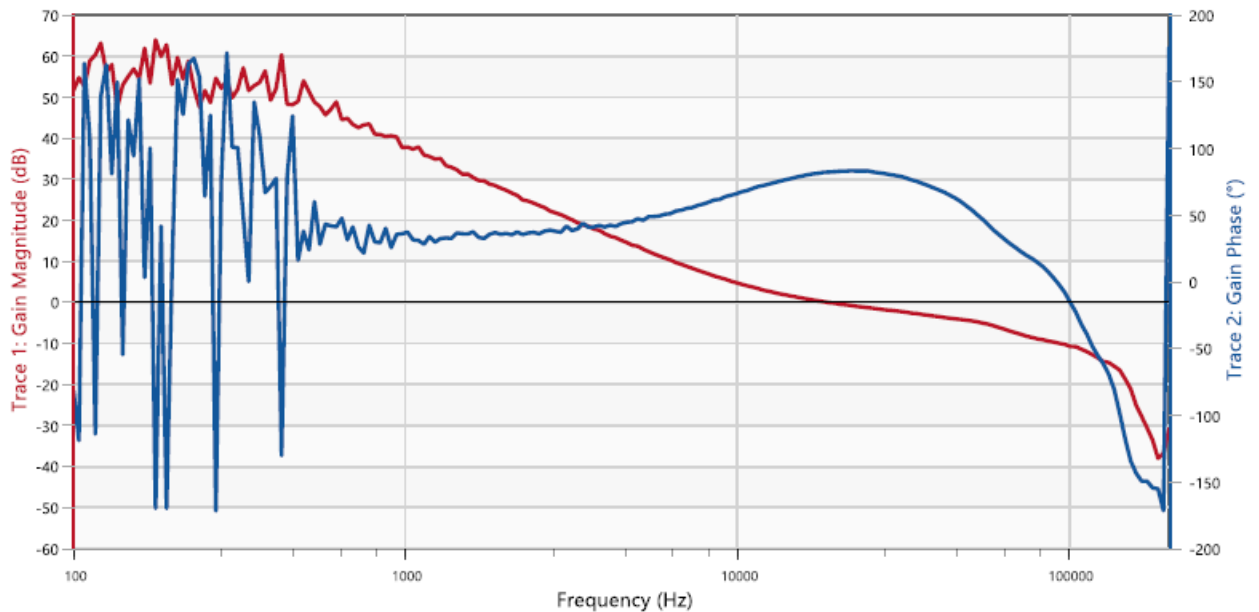


Figure 13: ループゲイン曲線

赤色のラインはゲイン振幅を、青色のカーブはゲイン位相を示しています。1 kHz 以上の周波数帯域ではノイズはあまり見られませんが、低周波数帯域では曲線に大きなノイズが見られます。

この原因は、注入レベルが非常に小さいことと、ループゲインが約 60 dB と高いことにあります。低周波数領域のノイズを低減するために、ここでは Bode 100 のシェイプレベル(Shaped Level)機能を使用します。

Bode Analyzer Suite の左側にある設定画面で、Bode 100 の出力レベルを「Constant」から「Variable」に設定します。すると「Shaped Level」ボタンが表示されます。このボタンをクリックすると、Shaped Level ウィンドウでシェイプレベルを設定することができます。

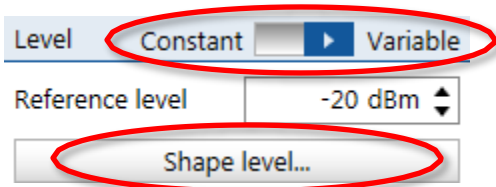


Figure 14: 基準レベル(Reference level)

基準レベルを -20 dBm に設定し、 100 Hz から 500 Hz の周波数範囲において出力レベルを -20 dBm から 0 dBm まで増加させます。これは、 Δ レベルとして $+20$ dB を入力するか、図上をダブルクリックしてポイントを設定することで行います。

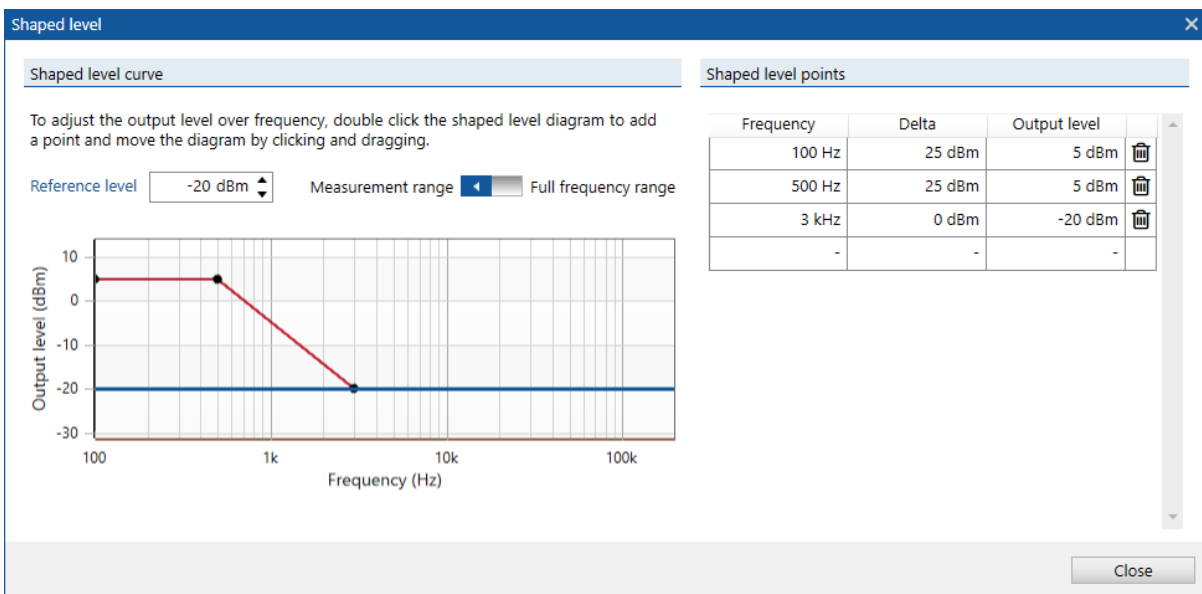


Figure 15: Shaped level - window

測定を再開すると、以下に示す ゲイン/位相カーブが得られます。

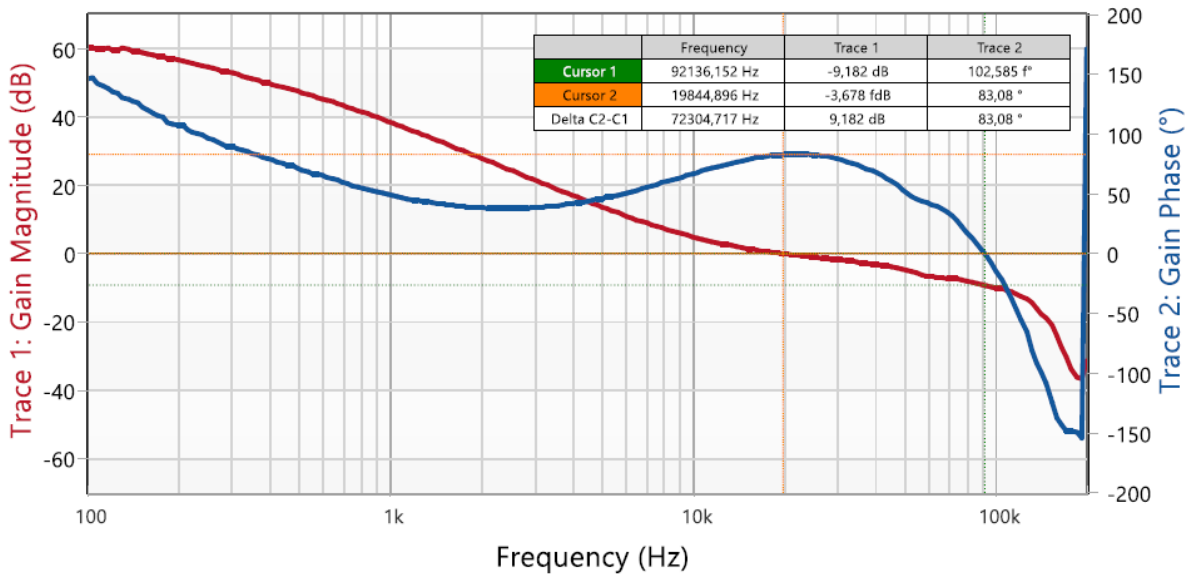


Figure 16: ループゲイン測定結果(入力電圧 12 V、負荷電流 1 A)

カーソルを使用することで、システムのゲイン余裕(Gain Margin)および位相余裕(Phase Margin)を読み取ることができます。本測定では、位相余裕 $PM = 83.1^\circ$ 、ゲイン余裕 $GM = 9.2 \text{ dB}$ が得られました。

4.3 注入レベル(Injection Level)

本測定では、 -20dBm という非常に低い出力レベルを使用していることにお気付きかもしれません。これは、レギュレータの小信号動作を解析することが目的であるためです。一部のレギュレータは注入信号レベルに対して非常に敏感であり、注入レベルが高すぎると非線形性や大信号効果を示す場合があります。例えば、DUT(被測定デバイス)の負荷を設定して80mAの電流が流れる条件とし、測定に -18dBm の出力レベルを使用した場合、以下に示すように誤った測定結果が得られます:

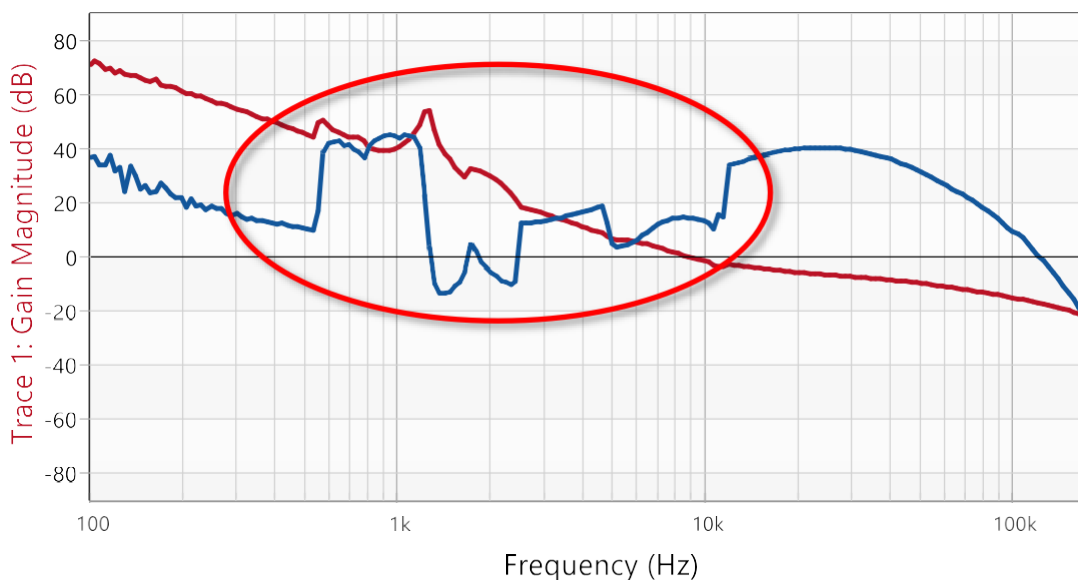


Figure 17: 過大な注入信号による大信号効果(非線形性)

このような 誤った測定結果は、注入信号レベルを下げることで回避できます。Shaped Level機能を使用すると、必要な周波数帯域においてのみ出力レベルを低減することが可能です。

4.4 電源電圧の影響

次の測定では、電源電圧の変化が LT1976 制御回路の特性にどのような影響を与えるかを確認します。そのため、電源電圧を 5 V に変更します。周波数スイープを再開し、0 dB および 0° の位置に再度カーソルを配置すると、以下のグラフが得られます。

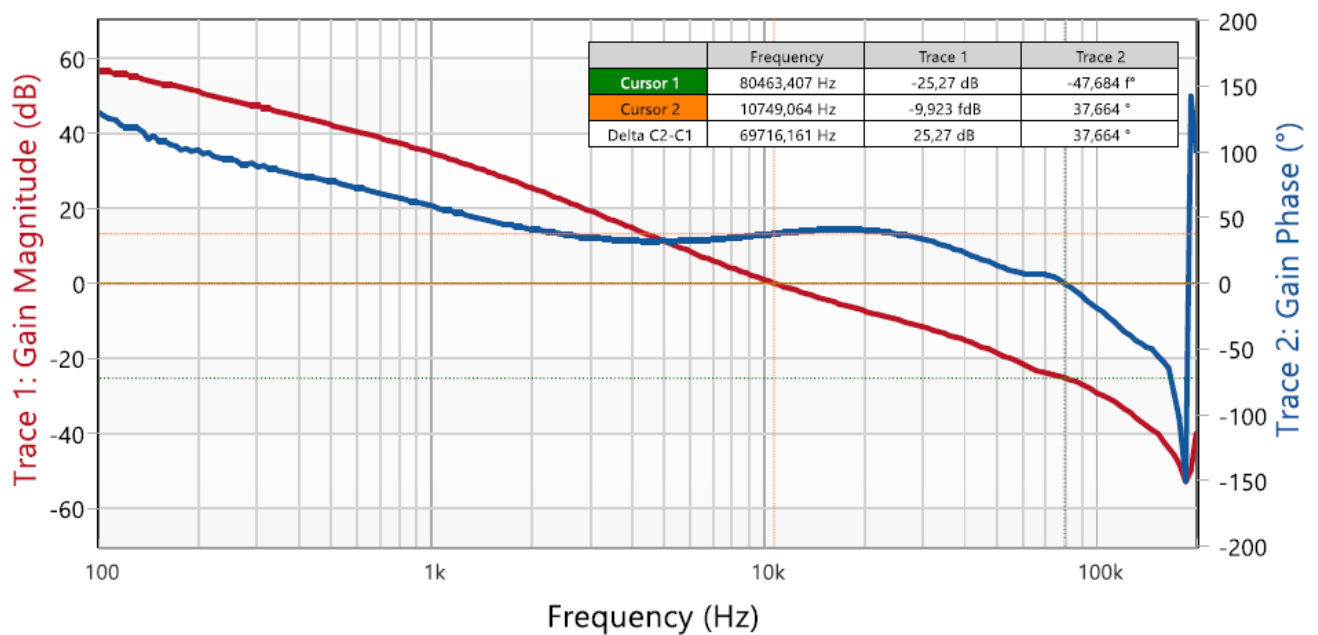


Figure 18: ループゲイン測定結果(入力電圧 5 V、負荷電流 1 A)

この結果から、位相余裕は $PM = 37.7^\circ$ に低下している一方で、ゲイン余裕は $GM = 25.3$ dB に増加していることが分かります。

4.5 負荷電流の影響

負荷電流を変化させ、レギュレータの電源電圧を一定に保つことで、異なる負荷電流に対するシステムの感度を確認することができます。以下のグラフは、異なる負荷電流条件におけるループゲイン測定結果を示しています。

すべての測定は、電源電圧 12 V の条件で実施されました。

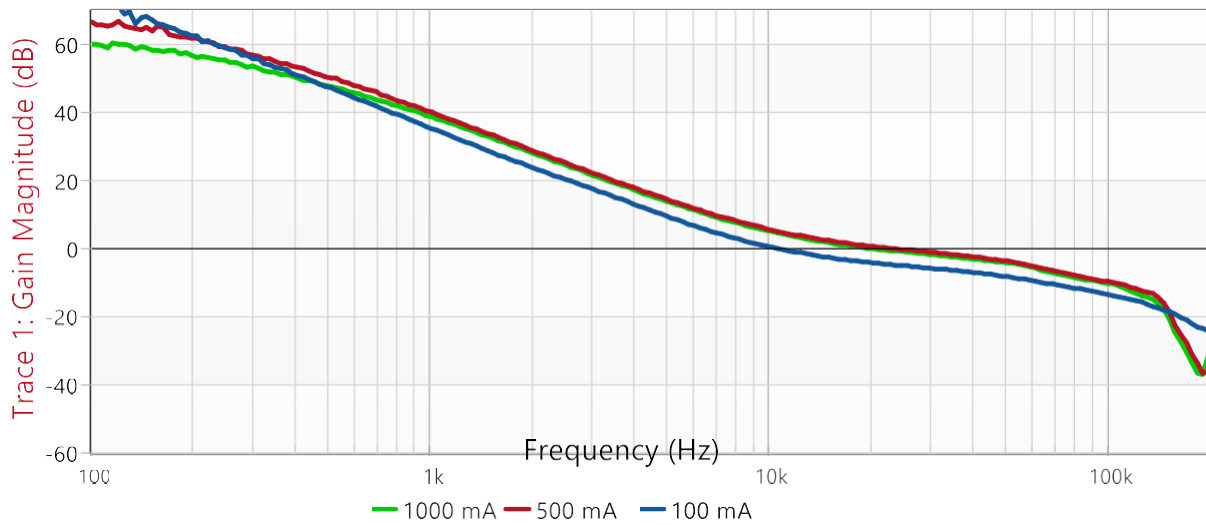


Figure 19: ループゲイン測定結果 — 振幅(dB)

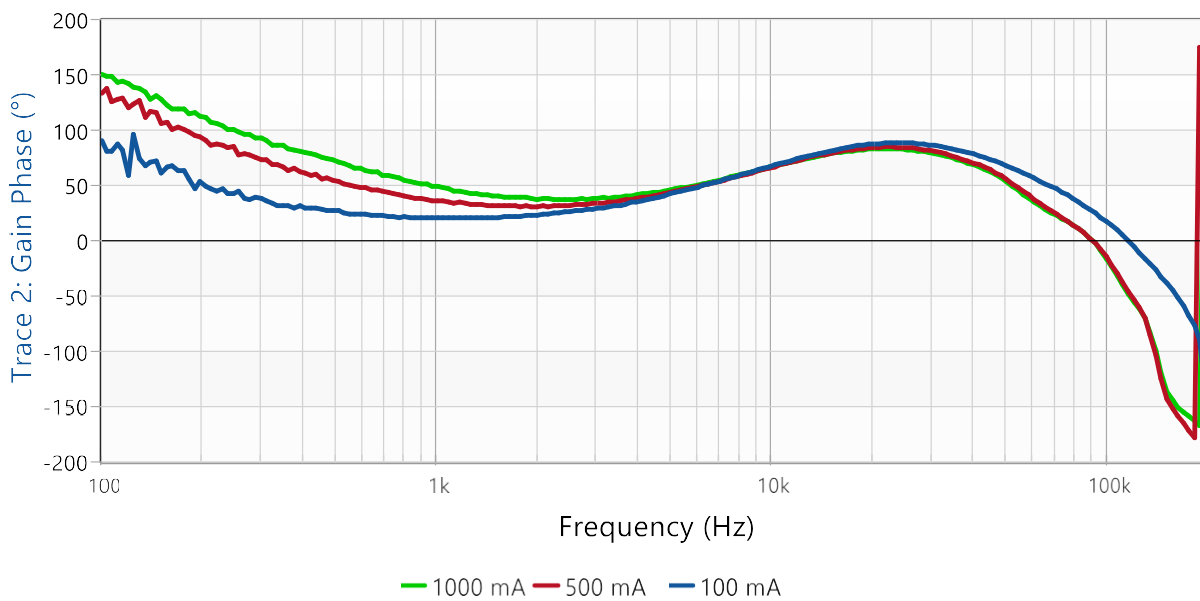


Figure 20: ループゲイン測定結果 — 位相(°)

5 まとめ

Bode 100 は、広帯域注入トランス B-WIT 100 と組み合わせることで、制御システムの安定性を迅速かつ容易に解析するための最適なツールセットを提供します。この組み合わせにより、スイッチング電源やリニアレギュレータなどの制御システムにおけるゲイン余裕(Gain Margin)および位相余裕(Phase Margin)を測定することが可能です。ゲイン余裕および位相余裕は、制御ループの安定性を評価するための、広く受け入れられた指標です。

さらに、Bode Analyzer Suite は、電源電圧の変化や負荷電流の変化といった動作条件の変動に対するシステム応答を表示するための強力な機能を備えています。実使用環境における電源の安定性を保証するためには、許容されるすべての負荷条件および環境条件の組み合わせについて評価を行う必要があります。

これにより、さまざまな動作条件下における DC/DC コンバータの動的挙動を詳細に把握することが可能となります。



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®