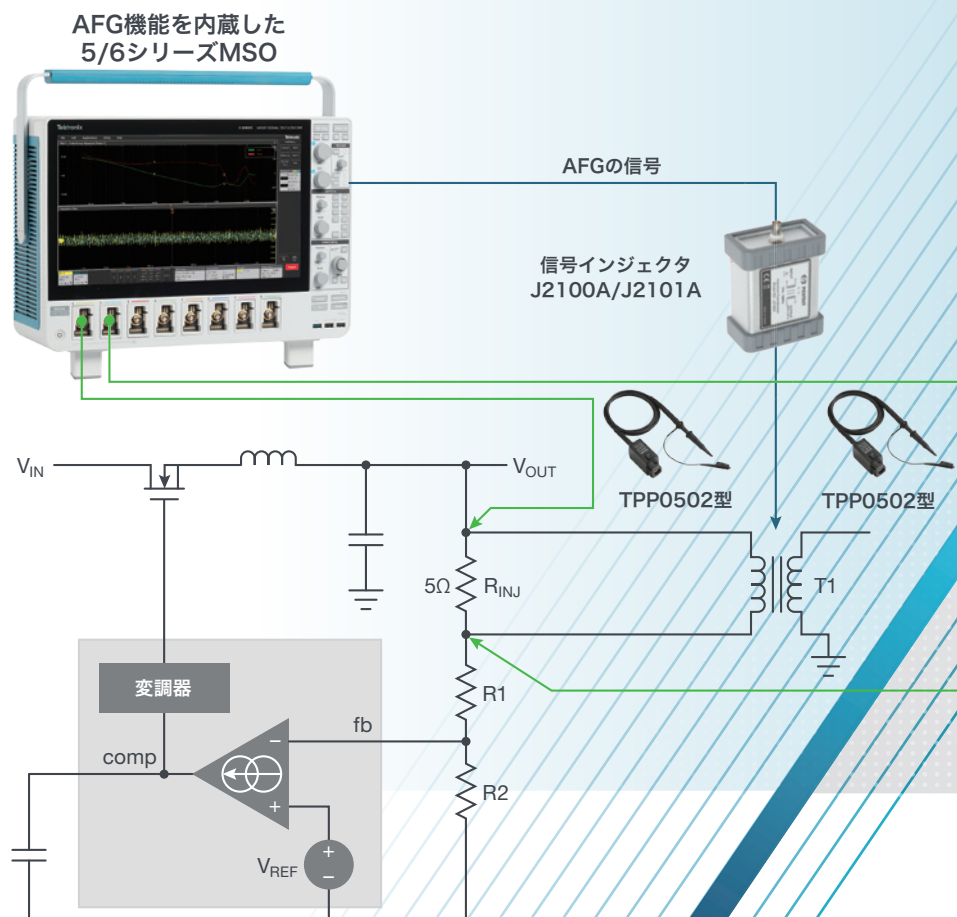


オシロスコープを使用した、 電源制御ループ応答の測定

アプリケーション・ノート



ほとんどの電源、レギュレータは、規定の電流レンジにおいて一定の電圧を維持するように設計されています。これを実現するため、電源、レギュレータは基本的にはクローズド・フィードバック・ループを持ったアンプになっています。理想的な電源は、負荷の変動にただちに応答し、過度のリングングや発振なしに一定の出力を維持する必要があります。制御ループを測定することで、出力負荷条件に対して電源がどのように応答するかを評価できます。

従来、周波数応答は専用の計測器で解析されてきましたが、新しいオシロスコープは電源の制御ループ応答を測定できるようになりました。オシロスコープ、シグナル・ジェネレータ、自動化ソフトウェアを使用すると、ボード線図がすばやく自動生成され、マージンの評価、回路性能とモデルとの比較が容易に行えます。ボード線図では、ボード振幅プロットとボード位相プロット（度による位相）の2つのグラフでシステムの周波数応答を示します。2つのプロットのゲイン・マージンと位相マージンから、電源の安定度を求めます。

このアプリケーション・ノートでは、以下の項目について説明します。

- 制御ループ、周波数応答解析、ボード線図の概要について
- ゲイン/位相マージンの概要について
- オシロスコープによる制御ループ応答解析のセットアップ方法
- 周波数応答のプロット、測定の読み取り方

このアプリケーション・ノートでは、オプションの5-PWR拡張パワー測定/解析を装備した5シリーズMSOを使用してボード線図の基礎を説明します。4シリーズMSO、6シリーズMSOも同様のパワー解析オプションが用意されており、同様の機能を備えています。操作方法は3つのシリーズ共によく似ているため、このアプリケーション・ノートの説明で3つのシリーズによる周波数応答解析が理解できるようになっています。

周波数応答解析について

システムの周波数応答は周波数に依存する関数であり、システムに特定の周波数の基準信号（通常は正弦波）を入力した場合の様子を表します。

一般的な制御ループを図1に示します。図1では、正弦波 $a(t)$ が伝達関数 $G(s)$ のシステムに入力されています。初期条件による変化の後、出力 $b(t)$ は正弦波にはなりますが、入力とは異なった振幅 B 、相対位相 Φ を持ちます。実際には、出力 $b(t)$ の振幅と位相は、入力された正弦の周波数 (ω rad/s) における伝達関数 $G(s)$ によって関連付けられます。フィードバック係数 k は、出力の負荷によって入力信号がどのように条件づけられるかを意味します。

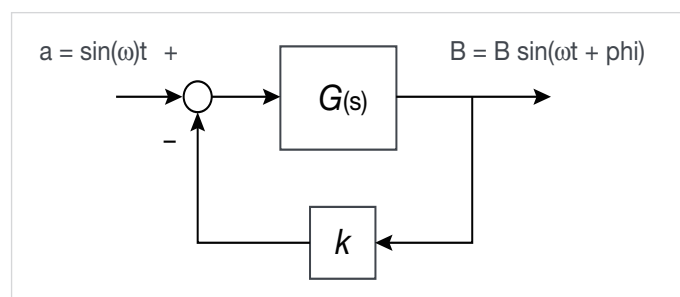


図1. 伝達関数 $G(s)$ の制御ループの一般的な例。

ここで、 $B/A = |G(j\omega)|$ は ω におけるゲインであり、 $\Phi = \angle G(j\omega)$ は ω における位相です。

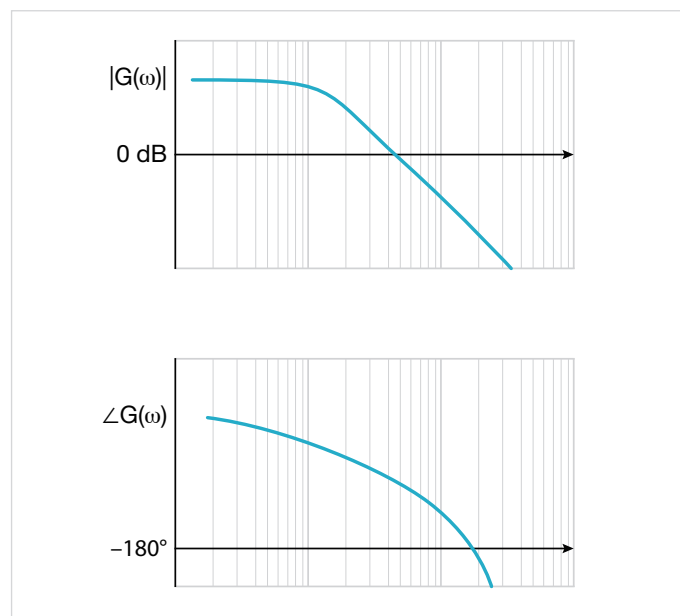


図2.

システムの振る舞いを理解するために、入力の正弦波信号は周波数レンジの範囲内で、振幅を変化させながら周波数をスイープさせます。これにより、さまざまな周波数でのフィードバック・ループのゲインと位相のシフトが得られ、その電源の制御ループの速度と安定度を知るための重要な情報になります。さまざまな周波数でゲインと位相を連続的に測定することで、周波数に対するゲインと位相のグラフがプロットできます。対数による周波数スケールを使用することで、広い周波数レンジまでカバーできます。このプロットは、制御システム的设计手法での使用の先駆者であるヘンドリック・ウェイド・ボード (Hendrik Wade Bode) 氏にちなんでボード線図と呼ばれています。

ボード氏は、1940年にBell System Technical Journal誌において、Relations Between Attenuation and Phase in Feedback Amplifier Designという記事を寄稿しています。

フィードバック・アンプの設計を始めるエンジニアは、複雑な気持ちになるものです。片方では、フィードバックが約束するという構造での特性改善を楽しむことができます。しかし他方では、フィードバック・ループまわりの位相と減衰の特性をしっかりと調整できない限り、アンプは突然に制御不能な状態に突入し、何一つとしてその利点を実現できないということを知っています。

電源設計では、制御ループを測定することで、出力の負荷条件、入力電圧の変化、温度の変化などに対して、電源がどのように応答するかを評価できます。理想的な電源は、負荷の変動にただちに応答し、過度のリングングや発振なしに一定の出力を維持する必要があります。これは通常、電源入力と負荷の間にあるMOSFETなどのコンポーネントの高速スイッチングを制御することで実現します。コンポーネントのオフ時間に比べてスイッチのオン時間が長くなるほど、負荷には多くのパワーが供給されます。

不安定な電源、レギュレータは発振することがあり、制御ループの帯域内ではっきりとわかる大きなリップルが発生します。また、発振はEMI問題の原因にもなります。

ゲイン・マージンと位相マージン

ループが正のゲイン (1以上) の状態で、位相シフトが -180° になると不安定になります。このような状態になると、ループは正のフィードバックになって不安定になります。ボード線図では、ゲインと位相は同じ周波数スケール上で表示され、好ましくない状況にどれくらい近づいているかがわかります。ボード線図の2つの測定から、位相マージン (位相余裕) とゲイン・マージン (ゲイン余裕) という、電源制御ループの安全マージンが得られます。

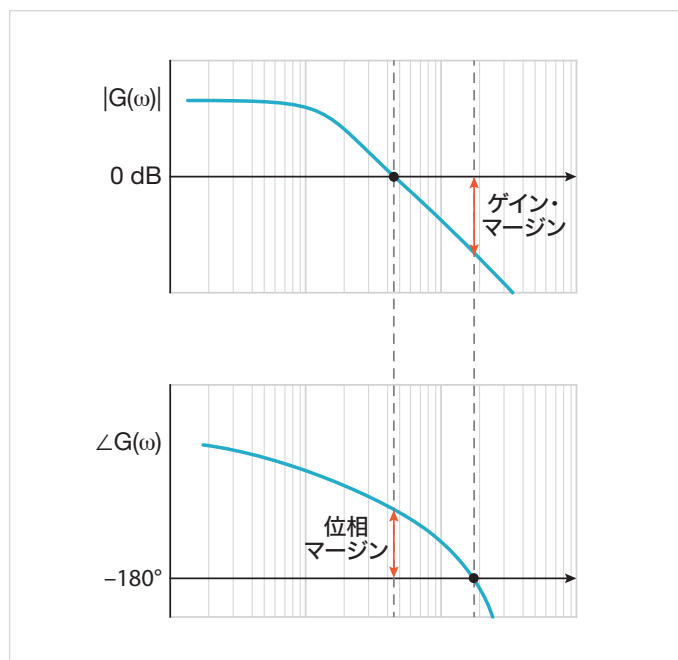


図3. ゲイン・マージンは、位相が -180° まで落ちたときの周波数で測定する。位相マージンは、ゲインが0dBまで下がったとき (出力の振幅が入力の振幅と等しくなったとき) の周波数で測定する。

上の図に示すように、ボード線図は周波数に対するゲインと位相のプロットで構成されます。ゲインのプロットは、スペックされたスイープ周波数帯域で以下のように計算されます。

$$G = 20 \log \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

V_{IN} は制御ループに入力される電圧であり、 V_{OUT} はバンドの各ポイントにおけるループの応答です。

位相プロットは、スイープ周波数帯域における周波数ごとの V_{IN} と V_{OUT} の位相差を表します。測定した位相が 180° より大きい場合、プロットされる位相角は -360° と測定されます。測定した位相が -180° より小さい場合、プロットされる位相は $+360^\circ$ と測定されます。

位相とゲインのマージン測定は、このプロットをもとにしています。
位相マージン (PM) の式を以下に示します。

$$PM = \Phi - (-180^\circ)$$

ここで、 Φ はゲインが 0dB の時に測定される位相の遅れです。

位相マージン (PM) は、° (度) で表し、不安定な状態 (ゲインが 1 で位相が -180°) からシステムがどれだけ余裕があるかを示します。ゲインが 0dB (ゲインが 1) に近づくときの、許容可能な位相シフトの量を表します。言い換えると、位相マージンとは、システムが不安定になることなく、増えるまたは減ることが可能な位相シフトの量です。通常は、° (度) で表されます。位相マージンが大きくなるほど、システムの安定度は増します。

位相マージンは、ボード線図の振幅プロットが 0dB になる周波数における、位相カーブと X 軸 (-180°) との垂直方向の差分を計算することで求めます。このポイントは、“ゲイン・クロスオーバー周波数” と呼ばれます。ゲイン・マージンは、位相が -180° でゲインが 1 (0dB) からそのシステムがどの程度離れているかを示す dB 値です。これは、位相シフトが -180° の時に 0dB になるまでに更にそのシステムに追加できるゲインの量です。ゲイン・マージンは、そのシステムが不安定になることなく増えることが可能な、あるいは減るべきゲインの量を意味します。ゲイン・マージン (GM) が大きくなるほど、システムの安定度は増します。

ゲイン・マージン (GM) は、以下の式で求められます。

$$GM = 0 - G \text{ dB}$$

ここで、G は位相シフト -180° で測定されるゲインです。

ゲイン・マージンは、ボード線図の位相プロットが -180° になる周波数における、ゲイン・カーブと X 軸 (0dB) との垂直方向の差分を計算することで求めます。このポイントは、“位相クロスオーバー周波数” と呼ばれます。先のグラフの例では、クロスオーバー周波数におけるゲイン (G) は -20dB です。したがって、ゲイン・マージンの式から、ゲイン・マージンは $0 - (-20\text{dB}) = 20\text{dB}$ となり、ループは安定しています。

つまり、制御ループで十分な位相/ゲイン・マージンを維持することで、電源は不安定にならずに動作します。

自動周波数応答解析を使用した、 オシロスコープによる測定

さまざまな周波数における、実際の回路のゲインと位相を測定することで、シミュレーションのみの場合に比べて、設計の安定度を確実に把握できます。

制御ループ応答の測定では、制御ループのフィードバック経路にさまざまな周波数の信号を注入します。オシロスコープ、シグナル・ジェネレータ、自動化ソフトウェアを使用するとボード線図がすばやく自動生成され、マージンの評価、回路性能とモデルとの比較が容易に行えます。

制御ループ応答測定のテスト・セットアップ

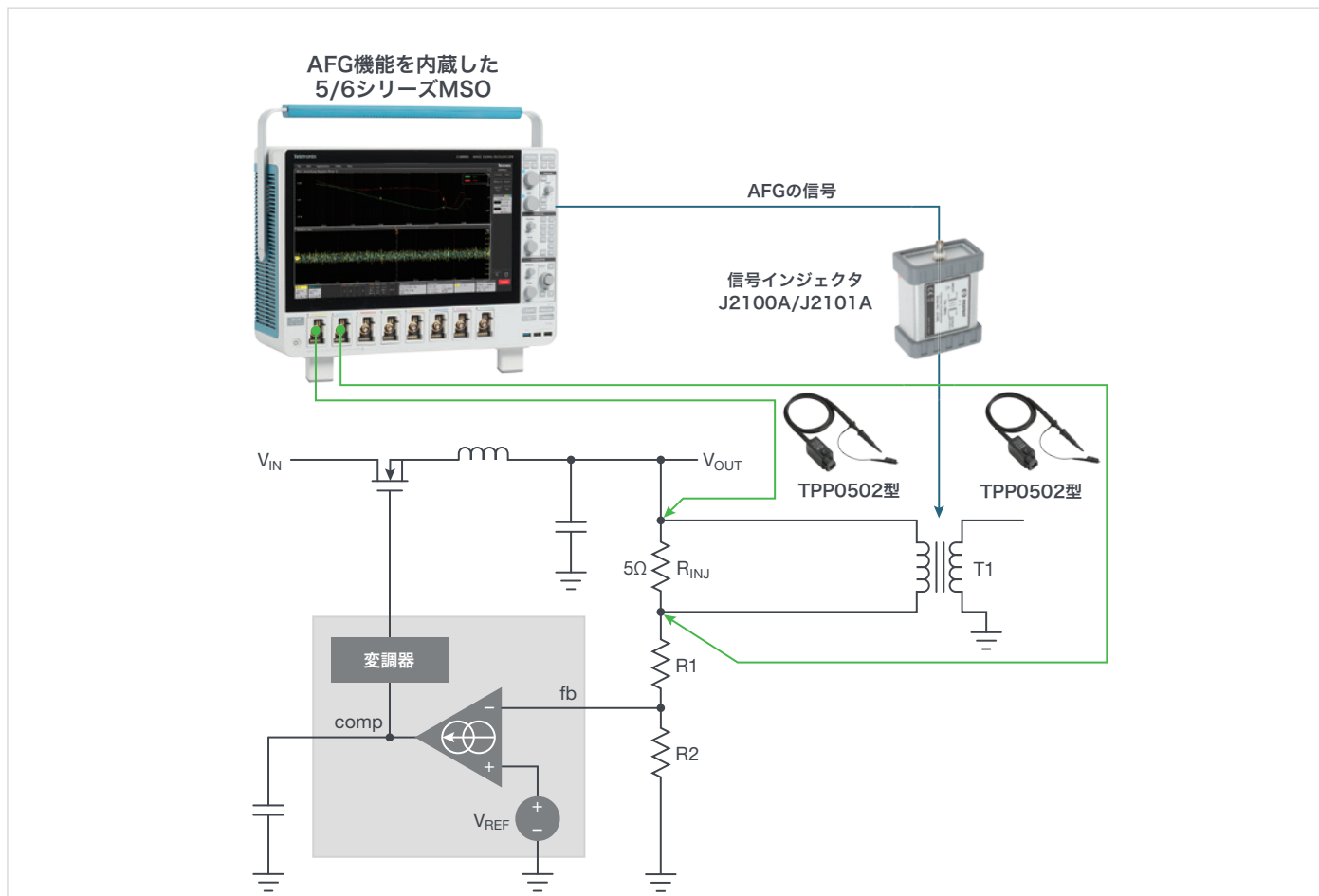


図4. 制御ループ応答測定のための、オシロスコープをベースとしたシステム。測定ソフトウェア、ファンクション・ジェネレータ（オシロスコープに内蔵）、信号インジェクタ、インジェクション抵抗、2本の低減衰比受動プローブ。

4シリーズ、5シリーズ、または6シリーズMSOは、オプション（4/5/6-PWR）で拡張パワー測定／解析ソフトウェアを装備できます。このアプリケーション・ソフトウェアには、以下のような周波数応答測定機能があります。

- 制御ループ応答
- 電源電圧変動除去比 (PSRR)
- インピーダンス

このアプリケーション・ノートでは、制御ループ応答測定機能を中心に説明します。制御ループ応答測定のために、この解析ソフトウェアは以下の機能を実行します。

- ファンクション・ジェネレータの制御
- 2つの電圧入力をもとにしてゲイン ($20 \text{ Log } V_{\text{OUT}}/V_{\text{IN}}$) を計算し、プロットする（ここで、 V_{IN} はファンクション・ジェネレータからの入力電圧）
- 2つの電圧入力をもとにした V_{IN} と V_{OUT} 間の位相シフトを計算し、プロットする
- ゲイン・マージン、位相マージンを計算する

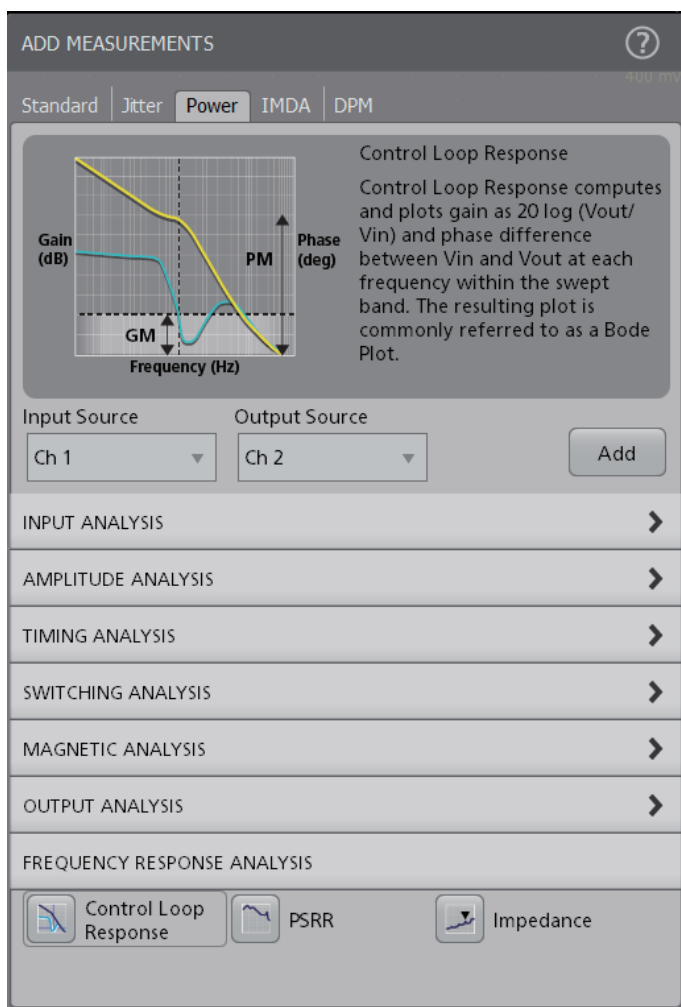


図5. 拡張パワー測定／解析アプリケーション・ソフトウェア (4/5/6-PWR) による測定の例。

解析ソフトウェアに必要な情報は、小さなインジェクション抵抗に接続した2本のプローブから得られます。入力と応答の振幅を測定することでゲインを計算し、同時に入力と応答間の位相遅延を測定します。

電源システムの応答を測定するには、既知の信号をフィードバック・ループに注入する必要があります。テクトロニクスのオシロスコープには、シグナル・ジェネレータ機能を内蔵しているものもあり、信号インジェクタを経由して制御ループに信号を注入できます。この例では、5シリーズMSOでオプションのAFG (任意波形／ファンクション・ジェネレータ) を使用して、指定された周波数レンジにわたって正弦波を発生します。DC-DCコンバータまたはLDOに小さな (5～10Ω) の注入抵抗／終端抵抗をそのフィードバック・ループに入れることで、ファンクション・ジェネレータの信号をループ内に注入できます。制御ループのオーバードライブを防ぐために、注入する信号の振幅は小さくする必要があります。

広い周波数帯域においてフラットな応答を持ったインジェクション・トランスフォーマ (信号インジェクタ) を注入抵抗の両端に接続し、電源から信号ソースのグラウンドを絶縁します。信号インジェクタは、目的の周波数に応じて選定する必要があります。Picotest社のJ2101A信号インジェクタには10Hz～45MHzのレンジがあり、4/5/6シリーズMSOのオプションの内蔵ファンクション・ジェネレータに十分に対応しています。Picotest社には、1Hz～5MHzのレンジに対応したJ2100A信号インジェクタも用意されています。

電圧測定には、TPP0502型などの低減衰比受動プローブがお勧めです。小さな減衰比のプローブには優れた感度があります。TPP0502型の減衰比は2：1であり、4/5/6シリーズMSOと組み合わせて1mV/divの感度で測定できます。プローブ容量は12.7pFであり、プローブによる負荷効果を抑えることができます。

周波数応答の測定

DUTを正しく接続したならば、入力の周波数スイープを設定する必要があります。セットアップ・メニューを**図6**に示します。

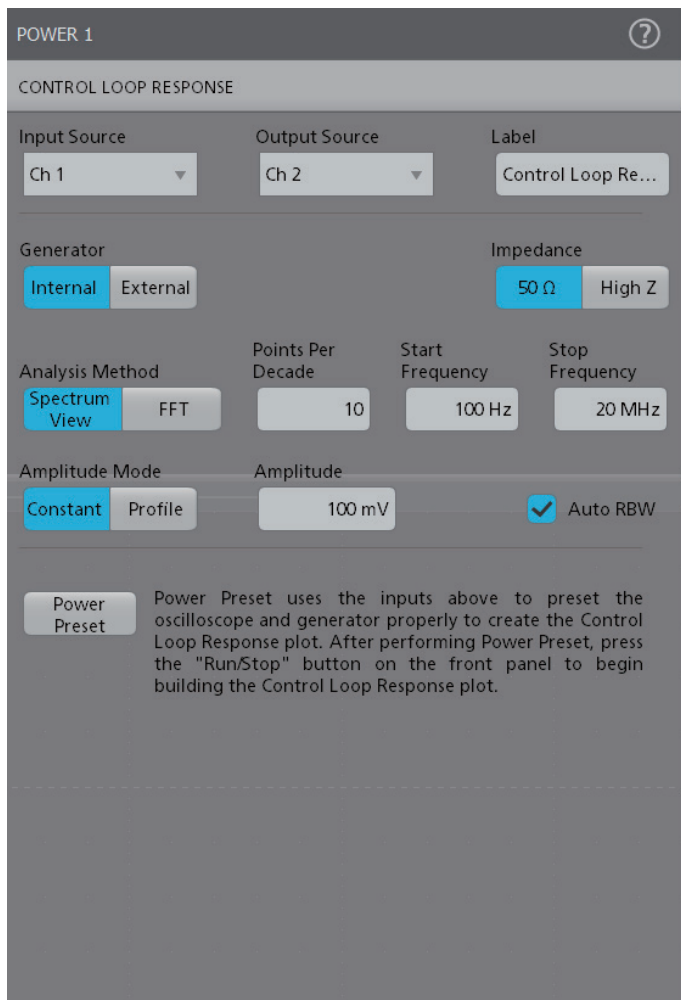


図6. 制御ループ応答のセットアップ・メニュー。入力チャンネル、スイープ・パラメータ、周波数の解析方法を設定する。

ボード線図のプロットのポイント数は、Points Per Decade、Start Frequency、Stop Frequencyで決まります。(Points Per Decade (ppd)のデフォルトの値は10であり、最大値は100)

周波数ポイントの数は、以下のように計算されます。

$$\text{周波数ポイント数} = \text{ppd} (\log (f_{\text{STOP}}) - \log (f_{\text{START}}))$$

例えば、Points Per Decadeを10、Start Frequencyを100Hz、Stop Frequencyを10MHzに設定すると、周波数ポイントの数は以下のように計算されます。

$$\text{周波数ポイント数} = 10 (\log (10^7) - \log (10^2)) = 50 \text{ポイント}$$

Analysis Methodでは、周波数応答測定で使用する周波数解析方法を設定します。デフォルトの解析方法は、4/5/6シリーズMSOのSpectrum Viewです。この方法は、オシロスコープの各チャンネルに組み込まれているデジタル・ダウンコンバータを使用します。従来のFFTによる方法に比べて分解能帯域幅 (RBW) の設定が柔軟であり、したがって優れた周波数分解能が得られます (通常はmHz)。Spectrum Viewによる周波数解析方法を推奨しますが、FFTも利用できます。

Spectrum Viewは、従来のFFTによる方法と比べて周波数分解能を細かく設定できます。測定のセットアップでは“Auto RBW”の項目も選択でき (**図6**参照)、高い周波数分解能と柔軟性を活用して、分解能設定で大いに役立ちます。

Auto RBWは、スイープ周波数をもとに、分解能帯域幅 (RBW)、中心周波数 (CF)、スパンなどのパラメータを自動的に調整します。これにより、周波数におけるRBWとスパンのバランスがとれ、安定した、再現性のある測定が可能になります。

表1は、ボード線図の1Hzから10MHz以上において、Auto RBWによって最適な結果になるように調整されるRBWとスパンを示しています。

スイープ周波数範囲 (Hz)	RBW (Hz)	スパン
1~10	0.5	1K
10~100	1	1K
100~1k	1	10K
1k~10k	10	1M
10k~1M	100	10M
10M以上	100	6M

表1. Auto RBWモードは、ボード線図において最適な結果になるようにRBWとスパンを調整する。

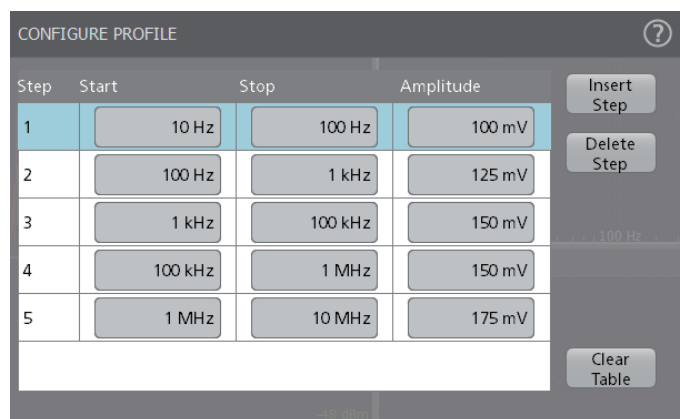


図7. 振幅プロファイルを設定することで改善されるSNR。

4/5/6-PWRソフトウェアは、一定の振幅と、プロファイルによる振幅に対応しています。

- Amplitude Modeが“Constant”（一定の振幅スイープ）では、すべての周波数で同じ振幅を維持します。開始／停止周波数、振幅、ディケード（10倍）当たりのポイント数の設定によってスイープが決まります。
- Amplitude Modeが“Profile”（プロファイルによるスイープ）では、周波数バンドごとに異なる振幅を設定できます。これにより、SNR（Signal to Noise Ratio、信号対ノイズ比）が改善されます。例えば、DUTが飽和あるいは損傷しやすい周波数では低振幅に設定し、影響を受けにくい周波数では大きな振幅に設定できます。

測定結果

テストを実行するには、前面パネルのRunボタンを押します。測定が開始し、位相とゲインのプロットがオシロスコープ画面に表示されます。緑のプロットが0dBを切ると位相マージンが表示されます。赤のプロットが0°（-180°との差分が0°）のスレッシュホールドを切るとゲインのマージンが表示されます。

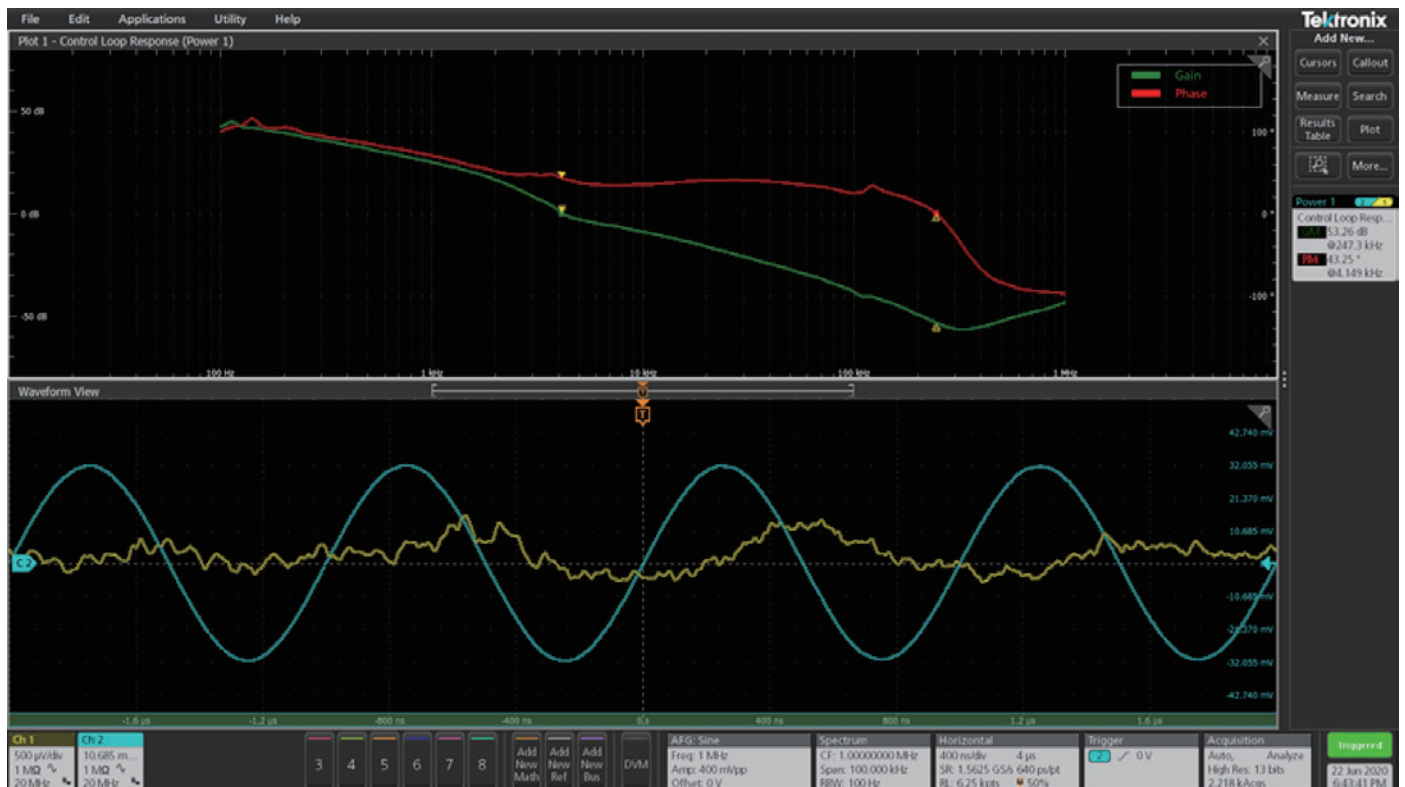


図8.5シリーズMSOで測定したゲイン/位相対周波数、ゲイン・マージン、位相マージンの例。

図8は、5シリーズMSOを使用し、以下の設定でポイントオブロード・レギュレータのゲインと位相をプロットしたものです。

開始周波数	100Hz
停止周波数	1MHz
ポイント数/ディケード	20
周波数解析	Spectrum View
分解能帯域幅 (画面下のスペクトラム・バッジを参照)	100Hz
入力振幅	ジェネレータ出力で 400mVppの一定振幅に設定

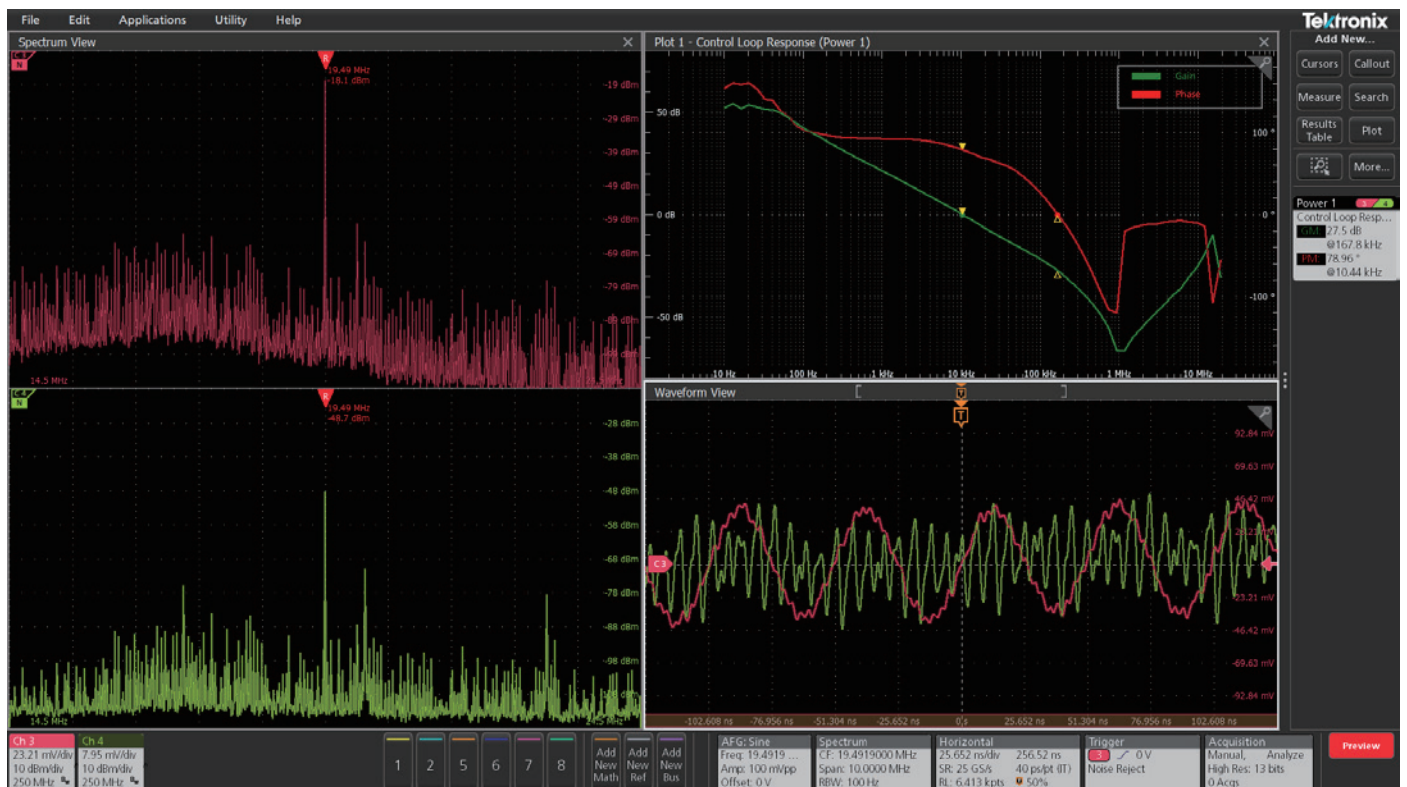


図9. スイープ・レンジ10Hz~20MHzのボード線図(右上)。その左はSpectrum Viewのウィンドウ。測定は5シリーズMSOで実行。

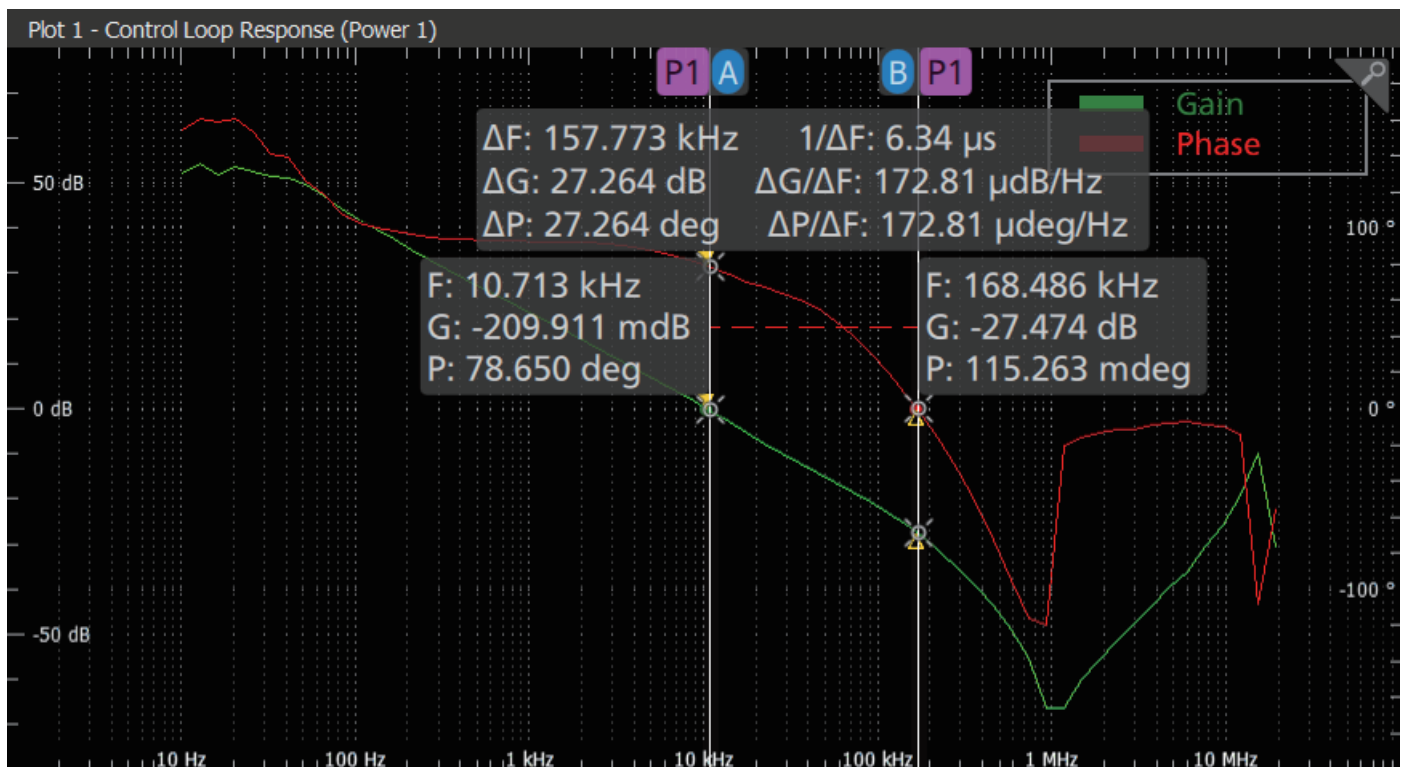


図10. カーソルは特定の周波数におけるゲインと位相、ポイント間の差を示している。

解析結果のボード線図と測定は、以下の内容を表しています。

- X軸は周波数であり、対数スケールでプロットされます。
- ゲインの曲線（緑）がY軸でプロットされ、スケールは左に表示されます。単位はdBであり、 $20 \log(V_{OUT}/V_{IN})$ で計算されます。
- 入力と出力間の位相差（の -180° との差分）の曲線（赤の波形）はY軸でプロットされ、スケールは右に表示されます。単位は $^\circ$ （度）で、リニア・スケールでプロットされます。
- 入力信号と出力信号用に設定されたSpectrum Viewウィンドウ。

ゲインと位相のマージンは、画面右のバッジに表示されます。図8の例では、ゲイン・マージンは53dB、位相マージンは 43° と測定されています。図10に示すように、カーソルはボード線図上で使用でき、任意の周波数におけるゲインと位相を示します。カーソル間の差も表示されます。測定値が即座にわかるので、デバッグも迅速に実行できます。

まとめ

ほとんどの、電源、電圧レギュレータは基本的にはクロード・フィードバック・ループを持ったアンプになっています。制御ループを測定することで、電源が出力の負荷条件の変動に対して過度のリングングや発振を生じることなく応答するかを評価できます。

周波数応答解析は、専用の計測器でおこなうことができますが、新しいオシロスコープでは電源の制御ループ応答の測定が行えます。ファンクション・ジェネレータ機能を内蔵した4/5/6シリーズMSOを使用することで、特殊な計測器の出番が減り、周波数応答アナライザやVNAなどの必要性も少なくなります。

オシロスコープ、シグナル・ジェネレータ、自動化ソフトウェアを使用することで、ボード線図がすばやく自動生成され、マージンの評価、回路性能とモデルとの比較が容易に行えます。

お問い合わせ先：

オーストラリア 1 800 709 465
オーストリア 00800 2255 4835
バルカン諸国、イスラエル、南アフリカ、その他ISE諸国 +41 52 675 3777
ベルギー 00800 2255 4835
ブラジル +55 (11) 3759 7627
カナダ 1 800 833 9200
中央/東ヨーロッパ、バルト海諸国 +41 52 675 3777
中央ヨーロッパ/ギリシャ +41 52 675 3777
デンマーク +45 80 88 1401
フィンランド +41 52 675 3777
フランス 00800 2255 4835
ドイツ 00800 2255 4835
香港 400 820 5835
インド 000 800 650 1835
インドネシア 007 803 601 5249
イタリア 00800 2255 4835
日本 81 (3) 6714 3086
ルクセンブルク +41 52 675 3777
マレーシア 1 800 22 55835
メキシコ、中央/南アメリカ、カリブ海諸国 52 (55) 56 04 50 90
中東、アジア、北アフリカ +41 52 675 3777
オランダ 00800 2255 4835
ニュージーランド 0800 800 238
ノルウェー 800 16098
中国 400 820 5835
フィリピン 1 800 1601 0077
ポーランド +41 52 675 3777
ポルトガル 80 08 12370
韓国 +82 2 6917 5000
ロシア +7 (495) 6647564
シンガポール 800 6011 473
南アフリカ +41 52 675 3777
スペイン 00800 2255 4835
スウェーデン 00800 2255 4835
スイス 00800 2255 4835
台湾 886 (2) 2656 6688
タイ 1 800 011 931
イギリス、アイルランド 00800 2255 4835
アメリカ 1 800 833 9200
ベトナム 1 2060128

2017年4月現在



jp.tek.com

テクトロニクス／ケースレイインストゥルメンツ

各種お問い合わせ先：<https://jp.tek.com/contact-us>

技術的な質問、製品の購入、価格・納期、営業への連絡、修理・校正依頼
〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟6階

記載内容は予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。

Copyright © 2021, Tektronix. All rights reserved. TEKTRONIX およびTEK はTektronix, Inc. の登録商標です。
記載された製品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。

2021年8月 48Z-73793-1