



## 高出力電圧ファンクション・ジェネレータ 活用事例

- カー・エレクトロニクス、半導体、科学／工業分野の測定 -

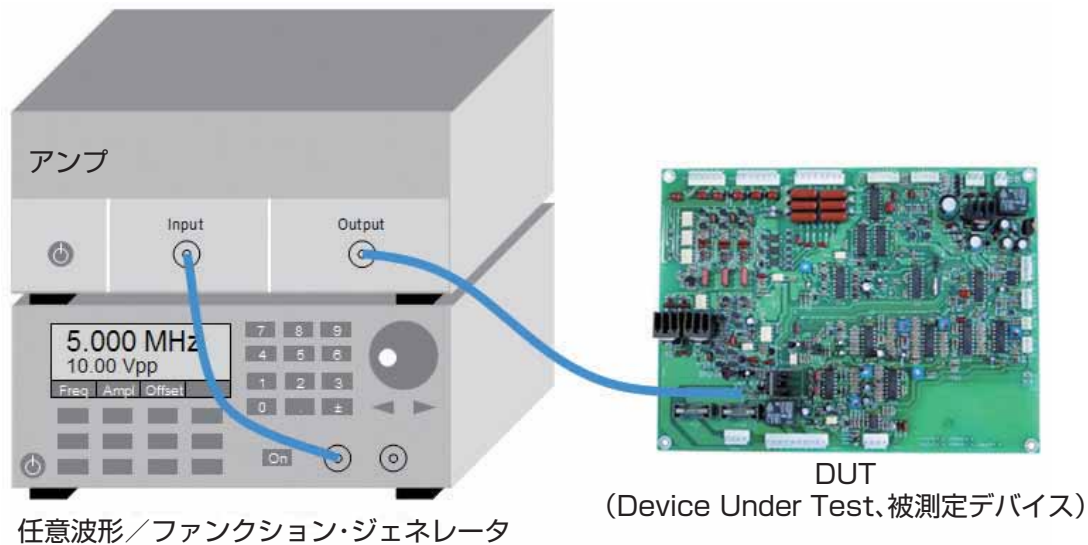


図1. 外部アンプを使用した測定セットアップ

電気回路設計の中には、一般に出回っている任意波形／ファンクション・ジェネレータの出力電圧以上の振幅が必要になるものがあります。アプリケーションとしては、カー・エレクトロニクス・システム、スイッチング電源などで広く使われているMOSFETやIGBTなどのパワー半導体、ガス・クロマトグラフや質量分析検出器用のアンプ、その他科学／工業分野にも及びます。

一般に、任意波形／ファンクション・ジェネレータは、50Ω負荷で10V<sub>D-P</sub>、オープン回路で20V<sub>D-P</sub>の振幅を出力します。MOSFETやIGBTには、この2倍以上の入力レンジで動作するものがあります。従来、このようなデバイスを動作レンジ以上でテストする場合、アンプを使用して標準的なジェネレータの出力を中間増幅する必要がありました。この方法では、テストのためのセットアップが複雑になります。また、アンプ出力での有効振幅が不確かであり、アンプのための追加コストもかかります。

このアプリケーション・ノートでは、まず外部アンプを使用して高い振幅を得る、従来の方法について説明します。次に、高振幅出力が可能な最新の任意波形／ファンクション・ジェネレータによる代表的なアプリケーションとその利点について説明します。アプリケーション例としては、カー・エレクトロニクスにおけるパワー半導体のタイミング／スイッチング特性と、ガス・クロマトグラフ検出器のアンプ特性の測定について説明します。

## 従来の方法

図1は、一般的な任意波形／ファンクション・ジェネレータと外部アンプを使用して、必要とされる振幅まで増幅するための測定セットアップ例を示します。ジェネレータの出力を、アンプの入力に接続します。アンプによっては、差動ソース、負荷インピーダンスとマッチングするように入出力を設定できるものもあります。一般に、アンプには出力状態の表示機能がないため、実際の出力振幅はオシロスコープやその他の測定機器でモニタしなければなりません。このため、測定のためのセットアップが複雑になり、テストで振幅レベルを調整したり、確認したりするのに余計な時間がかかります。

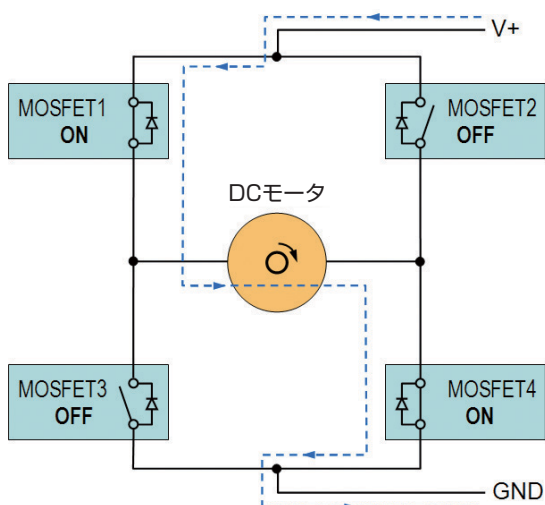


図2. DCモータ・ドライブ回路における4つのMOSFETによるHブリッジ

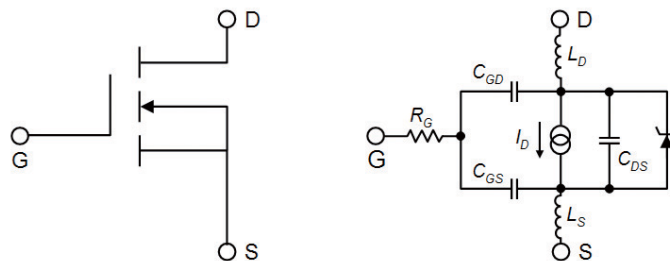


図3. MOSFETのシンボルと等価回路

## パワーMOSFETのスイッチング時間測定

パワーMOSFETは、自動車のモーション・コントロール、パワー・マネジメント、空調制御などのアプリケーションで使用されています。駆動するデバイスとしては、小型モータ、ソレノイド、アンチロック・ブレーキ、電動パワー・ステアリング、電子安定制御プログラム・システム、H.I.D.ランプの点灯回路などがあります。また、パワーMOSFETはスタータ／オルタネータの重要な部品でもあります。

図2は、Hブリッジ接続でDCモータを駆動するMOSFETの例を示します。この構成では、正転、逆転、ブレーキ機能があります。

スイッチとして使用する場合、MOSFETの基本機能はゲート信号でドレイン電流を制御することです。このアプリケーションでは、回路設計エンジニアにとってはスイッチング時間が部品選定において重要な要素となります。MOSFETのスイッチング性能は、内部コンデンサにかかる電圧変化が確立するのに要する時間で決まります（図3の等価回路を参照）。ドレイン電流が流れるには、まずゲート－ソース電圧によってMOSFETの入力コンデンサ $C_{GS}$ が所定のスレッショルド・レベルまで充電される必要があります。

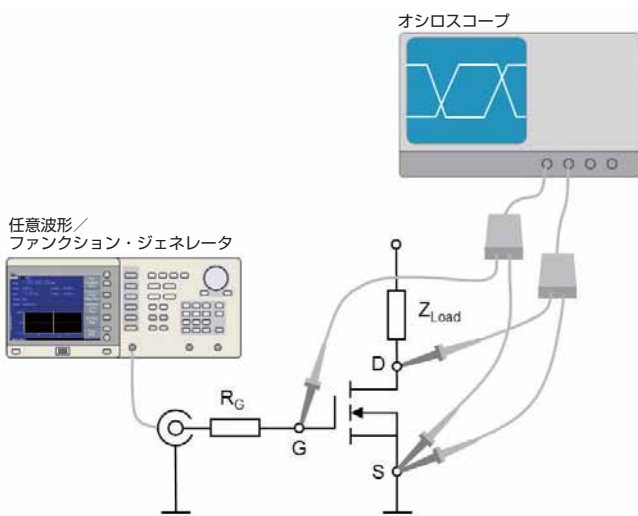


図4. パワー-MOSFETのスイッチング時間測定のためのセットアップ

時間に関するパラメータで重要となるのが、ターンオン遅延、ターンオフ遅延、立上り時間、立下り時間です。これらのパラメータ測定では、シグナル・ジェネレータから幅の狭いパルス信号をMOSFETのゲートに入力します。ゲートとドレインの電圧は、オシロスコープで測定します（図4を参照）。外部アンプの代わりに高出力電圧の任意波形/ファンクション・ジェネレータを使用することで、MOSFETの入力回路の実際の信号振幅を直接確認ことができ、オシロスコープで振幅を測定する必要がありません。

ターンオン遅延時間は、従来、オシロスコープに表示される波形からカーソルを使って測定していました。ターンオン遅延時間は、ゲート-ソース電圧のトップラインの10%に達する瞬間から、ドレイン-ソース電圧が最終値の90%に低下する瞬間までの時間です。同様に、ターンオフ遅延時間は、ゲート-ソース電圧がトップラインの90%に低下する瞬間から、ドレイン-ソース電圧がトップラインの10%に達する瞬間までの時間です。最新のオシロスコープには自動測定機能があり、ドレイン-ソース電圧の立上り/立下り時間は自動的に測定できます。

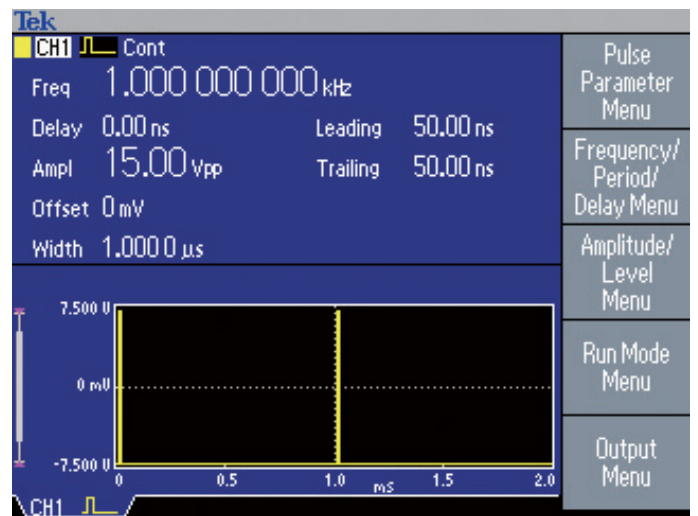


図5. AFG3011型では振幅が直接表示される

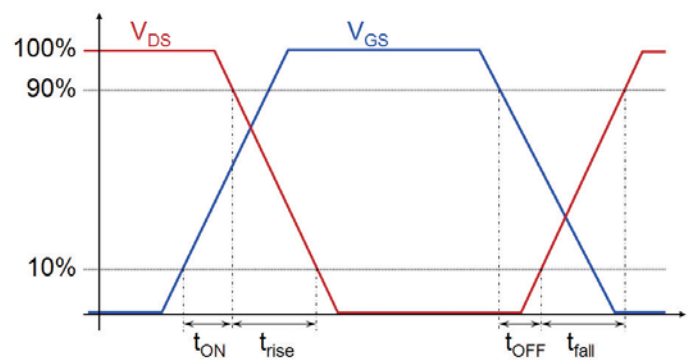


図6. パワー-MOSFETのスイッチング時間測定

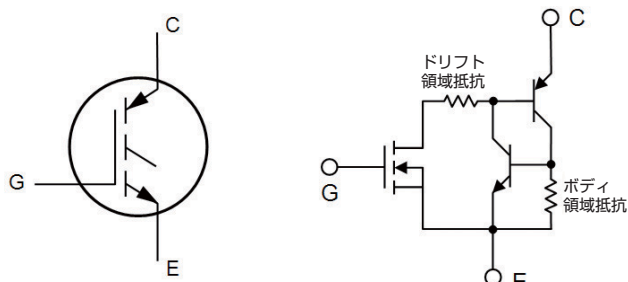


図7. IGBT回路のシンボルと等価回路

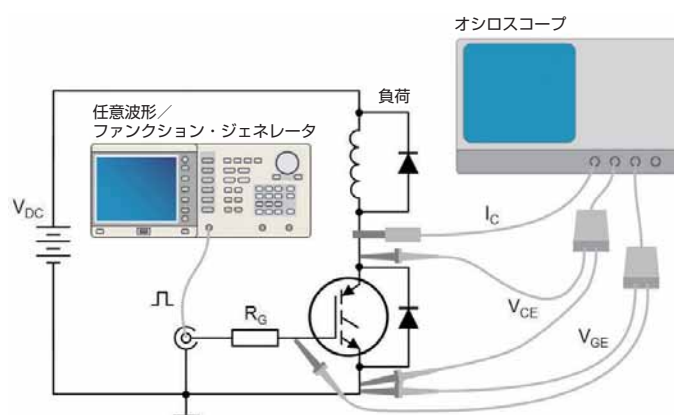


図8. IGBTのゲート・ドライブ回路とスイッチング・テスト回路

## IGBTのスイッチング波形解析

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor、絶縁ゲート・バイポーラ・トランジスタ) には、高速のスイッチング速度、大電流対応、大きなブロッキング電圧、シンプルなゲート・デバイス特性でありながら、オン時における少ない伝導損失、電圧低下という特性があり、電力産業やカー・エレクトロニクスのアプリケーションにおいてMOSFETと置き換わりつつあります。

IGBTの電力産業用アプリケーションとしては、運輸関連、可変速モータ回路、無停電電源装置 (UPS)、誘導 (IH) 加熱、溶接、通信やサーバ・システム用の高周波スイッチング電源などが挙げられます。自動車関連では、イグニッション・コイルの駆動回路、モータ制御回路、安全システムなどで大きな需要があります。

IGBTは、バイポーラ・トランジスタとMOSFETを足して2で割ったようなものです。出力のスイッチングと伝導特性は、バイポーラ・トランジスタに似ています。一方、バイポーラ・トランジスタは電流制御ですが、IGBTはMOSFETのように電圧制御です。完全な飽和と短絡電流防止のために、+15Vのゲート・ドライブ電圧が推奨されています。

IGBTは、MOSFETのようにゲート、エミッタ、コレクタ間に静電容量が存在します。ゲートとエミッタ間に電圧が印加されると、ゲート抵抗 $R_G$ を経由して入力容量はIGBTの特性スレッシュホールド電圧まで指数関数的に充電され、コレクタ - エミッタ間の導通が確

立します。同様に、ゲート - エミッタ間の入力容量は所定のプラト電圧まで放電されるとコレクタ - エミッタ間の導通は遮断され、IGBTはターンオフとなります。

IGBTの動的なターンオン／ターンオフ特性は、ゲート抵抗に大きく影響されます。ゲート抵抗が小さいと、IGBTのゲート - エミッタ間の静電容量は急速に充放電され、スイッチング時間は短く、スイッチング損失は小さくなります。しかし、小さいゲート抵抗はまた、IGBTのゲート - エミッタ間の容量とリードの浮遊インダクタンスのために発振を引き起こすこととなります。ターンオフ損失を低減し、誘導性負荷による実質的なコレクタ - エミッタ電圧の変化率によって印加される、IGBTのノイズ耐性を改善するためには、ゲート・ドライブ回路に十分なオン／オフ・バイアスを含めることが推奨されています。

IGBTの最適性能はアプリケーションによって異なるため、ゲート・ドライブ回路はアプリケーションに応じて適切に設計されなければなりません。モータ駆動回路や無停電電源装置など、ハードなスイッチング・アプリケーションでは、ゲート・ドライブのパラメータは、スイッチング波形がIGBTの安全動作領域を越えないように設定する必要があります。これは、スイッチング損失を大きくしないために、スイッチング速度を高速にできないということを意味します。ソフトなスイッチング・アプリケーションでは、スイッチング波形は十分に安全動作領域にあるため、ゲート・ドライブ回路は短いスイッチング時間、小さなスイッチング損失で設計できます。

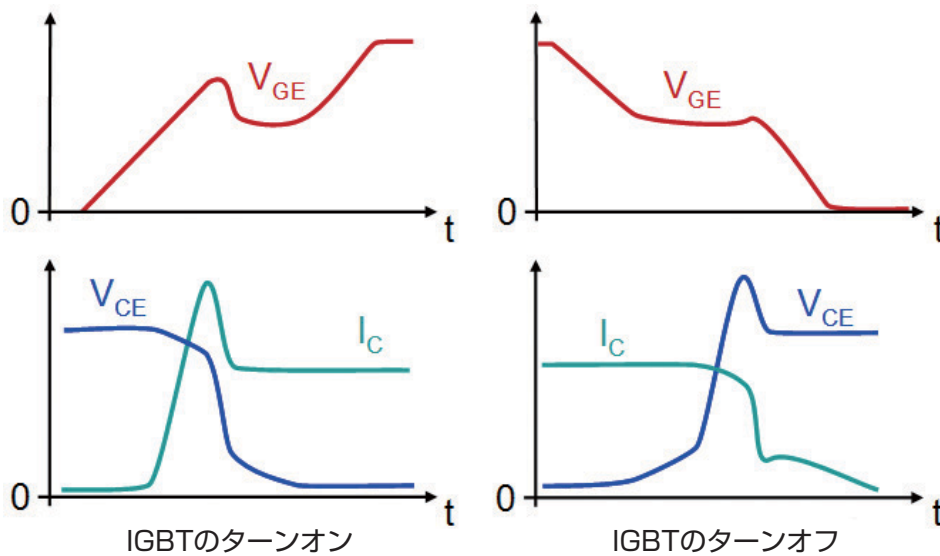


図9. IGBTのスイッチング波形

IGBTのゲート・ドライブ回路を最適に設計するためには、設計エンジニアは実際の負荷状態におけるデバイスのスイッチング特性を理解しておく必要があります。スイッチング特性を解析するためには、IGBTのゲートに連続した単発パルスを入力し、オシロスコープでゲート - エミッタ電圧、コレクタ - エミッタ電圧、コレクタ電流を測定します。AFG3011型任意波形／ファンクション・ジェネレータは高い電圧のパルスが出力できるため、このような用途には最適です。IGBTのコレクタ - エミッタ間電圧は、誘導負荷において非常に広いダイナミック・レンジがあるため、その測定には高電圧差動プローブが必要になります。ゲート - エミッタ間電圧は標準の受動電圧プローブで、コレクタ電流は回路を切断しないタイプの電流プローブで測定します。

図9は、IGBTの代表的なスイッチング波形と誘導負荷を示します。設計エンジニアは、この波形からスイッチング・エネルギーとオン状

態の損失を知ることができ、IGBTが安全動作領域内で動作しているかどうかを確認することができます。また、測定データを元に、パルスの繰返し周波数、振幅、エッジ・トランジションが適切であるか知ることができます。調整が必要な場合は、AFG3011型の前面パネルにある専用ボタンですべてのパルス・パラメータを直接設定することができます。また、汎用ノブや数値キーを使用することで、タイミング・グリッチを発生させることなく、またテストを中断することなくパラメータを変更できます。

測定においては、伝播遅延（スキュー）、オフセット、プローブ固有のノイズなど、さまざまな要素を考慮する必要があります。オシロスコープとソフトウェアを組み合わせることで、プローブに関連する問題、スイッチング・パワー損失の計算、IGBTの安全動作領域の特定が簡単になります。

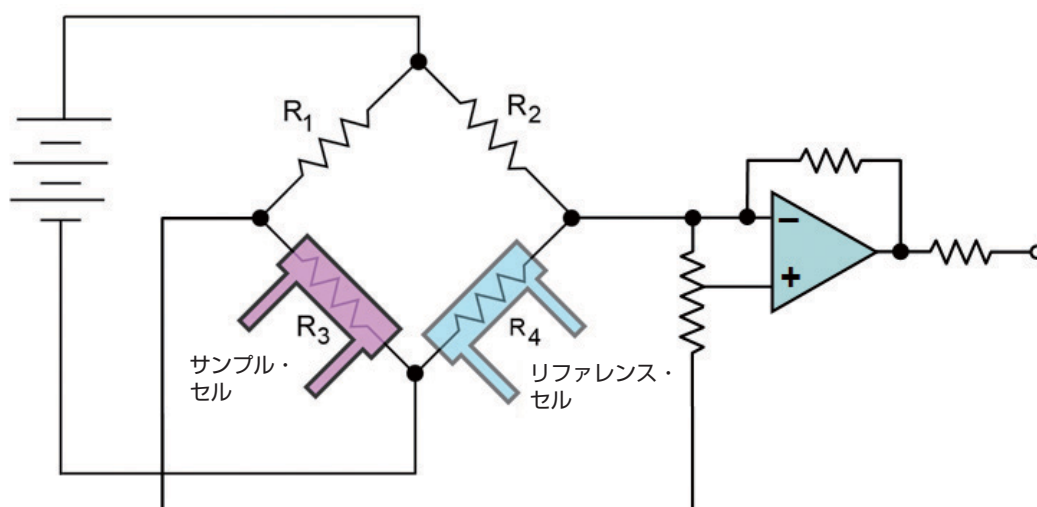


図10. 熱伝導度検出器とホイートストン・ブリッジ

## ガス・クロマトグラフ・アンプの特性評価

ガス・クロマトグラフィは、複雑なサンプルから化学物質の存在と濃縮を分離、解析する手法です。試料は気化され、連続的に流れる不活性キャリア・ガスに注入されます。キャリア・ガスには、熱伝導度の良いヘリウムが使用されます。キャリア・ガスに含まれるサンプル特性の検出には、さまざまなタイプの検出器があり、それぞれに長所、短所があります。

最も一般的なガス・クロマトグラフの検出器がTCD (Thermal Conductivity Detector、熱伝導度検出器)です。より感度の高い、特殊な検出器もありますが、TCDはその簡単な構造、堅牢性、汎用性、感度、直線性、低価格のために今でも広く使用されています。

TCDは、サンプル・セルとリファレンス・セルから成ります。サンプル・セルは、試料の特性を明らかにするために使用します。リファレンス・セルには、キャリア・ガスのみが入ります。各セルにはガ

スの流路にヒータ・エレメントがあり、温度制御されています。TCDによる測定では、試料ガスの流れによって生ずる温度変化によるヒータ・エレメントの抵抗の変化を測定します。

ヒータ・エレメントは、フィラメントまたはサーミスタです。温度が上がると、フィラメントの抵抗値は増え(抵抗の正係数)、サーミスタの抵抗値は小さくなります(抵抗の負係数)。ヒータ・エレメントは、セル内部の温度と測定対象の特性によって選択します。

セルにキャリア・ガスのみがある場合は、熱エネルギーはヒータ・エレメントから検出器本体まで安定した割合で流れます。試料がサンプル・セルに入るとセル内部の熱伝導度は変化し、ヒータ・エレメントが加熱してその抵抗が変化します。サンプルのヒータ・エレメントとリファレンス・セルは、図10のようにホイートストン・ブリッジに組込まれることがあります。このようにすると、サンプル・セル内のヒータ・エレメントの抵抗が変化することで、ブリッジの出力電圧が変化します。

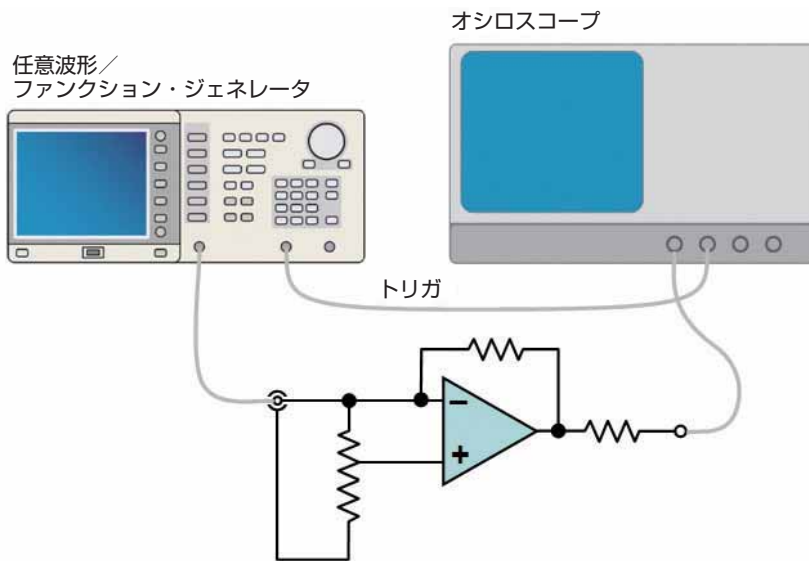


図11. アンプの特性評価のための測定セットアップ

TCDの感度は、ヒータ・エレメントを流れる電流とセル内の温度に依存します。電流が大きいと測定ブリッジの電圧変化が大きくなって高い温度になりますが、フィラメントの寿命も短くなります。電気回路をレイアウトする場合、このトレードオフを考慮する必要があります。一般に、ブリッジの出力電圧は15~20Vです。

測定ブリッジの出力は、アンプに接続されます。アンプ入力部の抵抗ネットワークにより、さまざまな感度レンジが選択できます。アンプの出力はアナログ-デジタル変換器によってデジタルに変換され、デジタル・プロセッサで処理します。

測定アンプの設計エンジニアは、アンプの周波数帯域、スルー・レート、ステップ応答、直線性、ダイナミック・レンジなどの特性を評価する必要があります。このためには、さまざまな波形形状、周波数、振幅を持った入力信号が必要になります。これらすべての

入力信号を、TCDを使用した実際の測定によって出力するのは現実的ではありません。最新の任意波形/ファンクション・ジェネレータを使用して、ホイートストン・ブリッジから信号を出力するのが便利な方法であり、さまざまな信号が出力できます。図11に測定セットアップを示します。アンプの出力はオシロスコープで測定します。

任意波形/ファンクション・ジェネレータの最大出力振幅が50Ωで10V<sub>pp</sub>しかない場合は、外部アンプを使用して、ホイートストン・ブリッジで必要となる15~20Vの信号レベルまで増幅しなければなりません。テクトロニクスのAFG3011型任意波形/ファンクション・ジェネレータはこのような高い振幅レベルで出力できるため、測定セットアップが簡単になります。また、アンプに入力されるテスト信号の実際の振幅を確認し、直接設定することもできます。



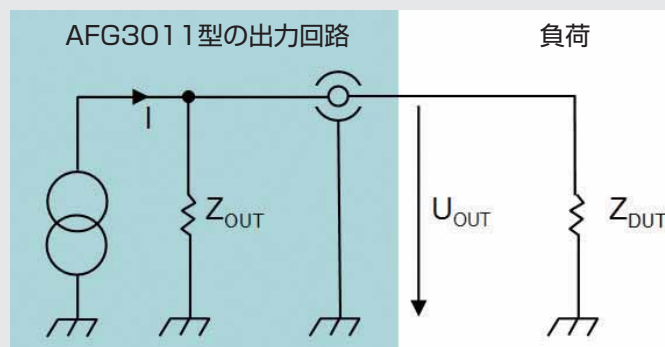
## 信号振幅と負荷インピーダンス

シグナル・ジェネレータの出力電圧は、接続される負荷またはDUT（Device Under Test、被測定デバイス）のインピーダンスによって異なります。これは、ジェネレータの出力インピーダンスと関連があるためです。例として、図xはAFG3011型の出力等価回路を示しています。振幅設定に応じてIという電流が流れます。ジェネレータの出力にZ<sub>DUT</sub>という50Ωの負荷が接続されると、Iの半分の電流はジェネレータの出力インピーダンスZ<sub>OUT</sub>に、もう半分はZ<sub>DUT</sub>に流れます。Z<sub>DUT</sub>のインピーダンスがZ<sub>OUT</sub>に比べて著しく大きい場合、Iのほとんどの電流はZ<sub>OUT</sub>に流れるため、50Ωに比べてほとんど2倍の出力電圧になります。

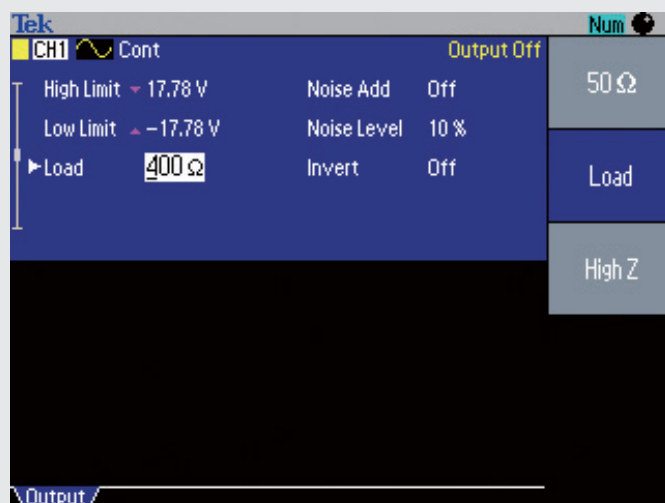
一般に、任意波形／ファンクション・ジェネレータの仕様には、50Ω負荷とハイ・インピーダンス負荷における最大出力電圧が記載されています。例えば、AFG3011型の出力振幅は、50Ω負荷で20V<sub>p-p</sub>、オープン回路で40V<sub>p-p</sub>となっています。その他の負荷インピーダンスにおける最大出力電圧は、次の式で計算できます。

$$\text{Max } U_{\text{OUT}} = \frac{40 \text{ V}_{\text{pp}}}{1 + \frac{50 \Omega}{Z_{\text{DUT}}}}$$

一般的な任意波形／ファンクション・ジェネレータでは、負荷インピーダンスは50Ωに設定されています。その他のインピーダンスでは、正しい振幅、オフセット値が表示されるようにインピーダンスの値を設定します。AFG3000シリーズでは、Sineなどの関数ボタンを押して表示されるOutputメニューから負荷インピーダンスを設定します。



図x. AFG3011型の出力等価回路



図y. AFG3000シリーズの負荷インピーダンス設定画面

負荷インピーダンス設定は、ジェネレータの出力インピーダンスも負荷インピーダンスそのものも変更するものではないことにご注意ください。単に振幅とオフセット表示に影響するだけであり、接続される負荷における実際の振幅が正しい値になるように表示するためのものです。

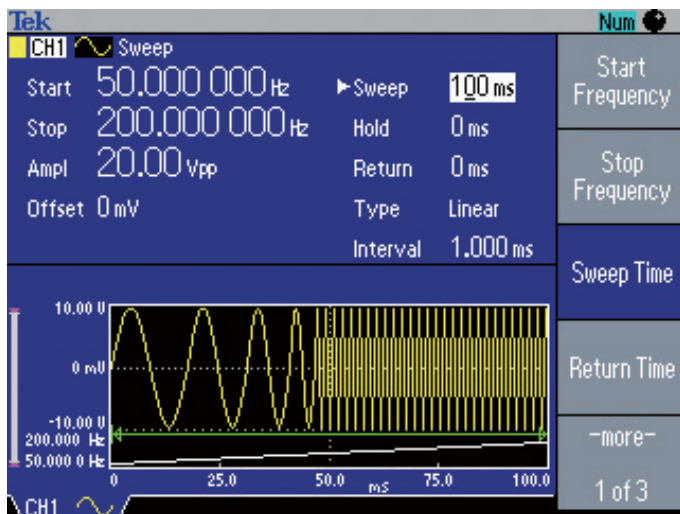


図12. AFG3011型のスイープ・モード表示

アンプの帯域を測定するには、ファンクション・ジェネレータをスイープ・モードにし、振幅、開始／終了周波数を選択し、設計の仕様に合わせてスイープ時間を設定します。AFG3011型は、前面パネルの専用ショートカット・キーとスクリーン・メニューにより、これらのパラメータを設定します。大型のディスプレイには、振幅と波形形状が一目でわかるように表示され、確実に設定することができます。スイープの開始ごとにオシロスコープをトリガすることができ、アンプの応答波形を観測することができます。

オシロスコープに表示される波形から、水平カーソルを使って-3dB振幅レベルを見つけます。これは、ピーク値の70.71%に相当します。次に、オシロスコープで波形を観測しながら、波形が下限帯域から始まり上限帯域で終わるまで、シグナル・ジェネレータの開始／終了周波数を調整してスイープ・レンジを狭めていきます。アンプの帯域は、シグナル・ジェネレータにおける開始／終了周波数の最後に設定した読み値になります。

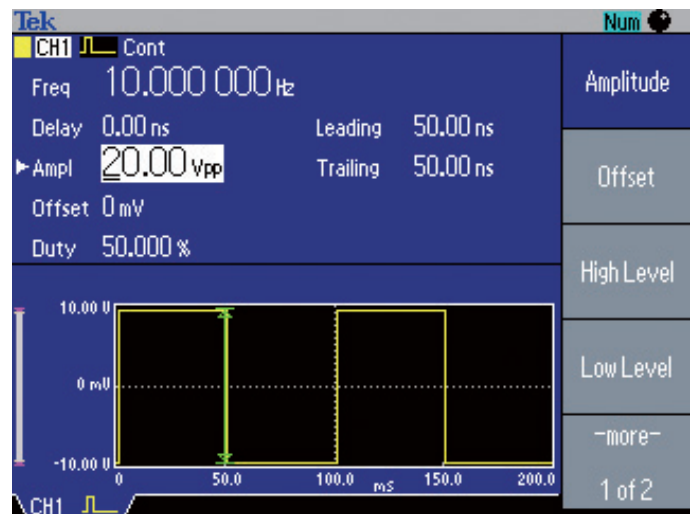


図13. AFG3011型のパルス・モード表示

もう1つの測定例として、アンプの立ち上がり時間について考えてみます。先の手順では、キャリア・ガスのサンプルの波形数によってパルスが発生するため、どの程度の狭いピークが測定できるかというアンプの能力がわかります。トリガ接続は必要ないということ以外は、測定セットアップは図11と同じです。任意波形／ファンクション・ジェネレータは、パルスを出力するように設定します。最新のデジタル・オシロスコープでは、アンプのステップ応答を測定し、信号の立ち上がり／立ち下り時間を自動測定することができます。

## まとめ

AFG3011型など、最新の任意波形／ファンクション・ジェネレータは、外部アンプなしに50Ω負荷で最大20V<sub>p-p</sub>の振幅を持った信号を出力することができます。これにより、多くのアプリケーションでテスト・セットアップが簡単になり、設備コストを削減できます。また、ディスプレイ上に実際の振幅を表示できるため、別途電圧計で振幅を測定する必要がありません。これにより測定時間を短縮することもできます。

このアプリケーション・ノートで説明したテスト・アプリケーションの他にも、高出力電圧の任意波形／ファンクション・ジェネレータは、ディスプレイ装置の試験、マイクロマシン技術、ソレノイドのテスト、さらに質量分析やその他の科学アプリケーションにも使用できます。



## Tektronix お問い合わせ先：

### 日本

本社 03-6714-3111  
SA営業統括部 03-6714-3004  
ビデオ計測営業部 03-6714-3005

大宮営業所 048-646-0711  
仙台オフィス 022-792-2011  
神奈川営業所 045-473-9871  
東京営業所 042-573-2111  
名古屋営業所 052-581-3547  
大阪営業所 06-6397-6531  
京都オフィス 075-323-9048  
福岡営業所 092-472-2626  
湘南カスタマ・サービス・センタ 0120-7-41046

### 地域拠点

米国 1-800-426-2200  
中南米 52-55-542-4700  
東南アジア諸国/豪州 65-6356-3900  
中国 86-10-6235-1230  
インド 91-80-2227-5577  
欧州 44-0-1344-392-400  
中近東/北アフリカ 41-52-675-3777  
他30カ国

Updated 17 October 2007

#### 詳細について

当社は、最先端テクノロジーに携わるエンジニアのために、資料を用意しています。当社ホームページ([www.tektronix.co.jp](http://www.tektronix.co.jp))または[www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)をご参照ください。



TEKTRONIXおよびTEKは、Tektronix, Inc.の登録商標です。記載された商品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。

06/08 FLG/WOW

752-21998-0



Enabling Innovation

## 日本テクトロニクス株式会社

東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟6階 〒108-6106  
製品についてのご質問・ご相談は、お客様コールセンターまでお問い合わせください。

**TEL 03-6714-3010 E-mail [ccc.jp@tektronix.com](mailto:ccc.jp@tektronix.com)**

電話受付時間/9:00~12:00・13:00~18:00 月曜~金曜(休祝日は除く)

当社ホームページをご覧ください。 [www.tektronix.co.jp](http://www.tektronix.co.jp)  
製品のFAQもご覧ください。 [www.tektronix.co.jp/faq/](http://www.tektronix.co.jp/faq/)

■ 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。

© Tektronix