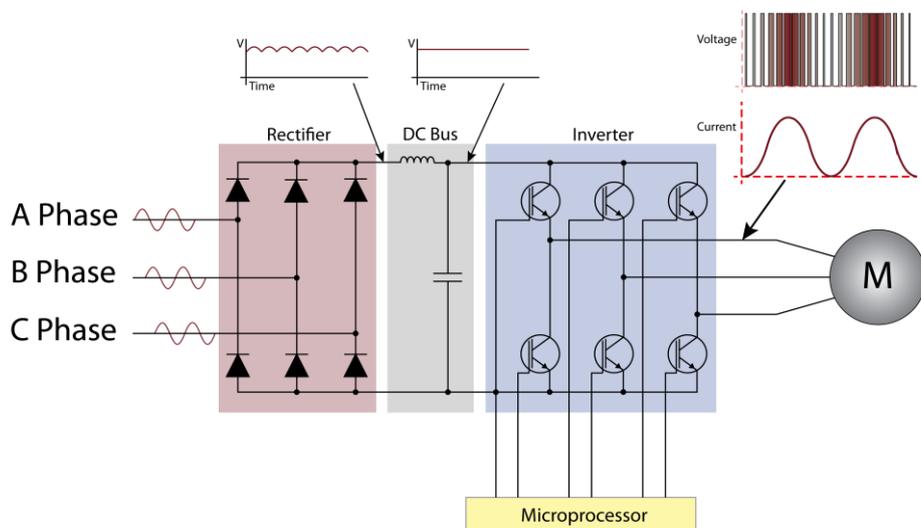


## インバータ回路の評価方法

## GaN/SiC/MOSFET 解析\_トータルソリューション V1.3 2018.1207



【図1：インバータ・モータシステム】

【図1】のインバータ・モータシステムは、三相交流入力を変換した後にモータを駆動する為の交流電力に変換しています。Inverter部のパワーデバイス(パワーモジュール)のスイッチング高速化とキャリア周波数のキャリア周波数の高周波化や制御の最適化によって、省エネルギー化を図っています。電力供給先のモータは、損失の抑制のために、低損失磁性体材料などが使われています。損失の低下によって、電気機器の小型化にも大きく貢献しており、単位体積当たりのシステムのエネルギー密度はさらに高まっています。このような状況において、設計者は、変化を見逃さないように、パワーアナライザやオシロスコープで変化を見極めようとしています。



【図2：インバータモジュール内部】

【図2】には、インバータの分解写真を掲載しています。

インバータ機器の底面に配置された三相インバータ機器は、左半分がインバータ部、右半分が制御系の回路が配置されています。インバータのスイッチング波形は、モジュールとプローブを確実に固定してから、ゲート信号、高電圧スイッチング波形を確認します。

それでは、オシロスコープ、差動プローブ、カーブトレーサなどの測定器を活用したインバータ回路の多角的な解析方法をご紹介します。

実際に測定すると、GaN/SiC/MOSFET デバイスのスイッチング波形は回路シミュレーション通りに、波形観測結果が

得られないことがあります。この一つの要因として「プロービング」の方法があります。

省エネルギー対策のために、Si デバイスから高速スイッチングデバイスが使われるようになってきました。これまで、ラフなプロービングでも簡単にクリアな波形が得られることがほとんどでした。しかし、高速スイッチングデバイス SiC/GaN/MOSFET は、高  $dv/dt$  化が進み、実装されている基板の特性やプロービング時のインピーダンス特性によって、電圧波形の歪みが見受けられるようになりました。プロービングすることで回路動作が変わってしまう事態になりつつあります。これは、電圧波形に限ったことではなく、電流の変化も高  $di/dt$  化が進んでいるため、正確な電流波形を捕らえる事が

難しくなっています。そこで、本資料において高速スイッチング動作する回路に対応する測定の課題と施策について紹介し、皆様の測定課題を解決できればと思い記述いたしました。

電圧や電流を正確に測定することで、電力損失が正確に測定できること、電流や電圧歪みが大きい場合に電圧波形×電流波形＝電力損失から、歪みによって電力が変わり、電圧プローブと電流プローブの性能によっても電力損失が変わる事につながってしまいます。なかなか上手いできないのが高速スイッチングデバイスの波形観測です。

まず、電力損失を正確に測定するために4つの電力計測方法について、後半は各種測定器及びアプリケーションについて紹介します。

1. 動的な電力損失を測定する方法
  2. 静的な電力損失を測定する方法
  3. 実効電力を測定する方法
  4. 高位相角のデバイスの損失を測定する方法
  5. インピーダンスアナライザによる部品の測定
  6. インバータの制御
  7. デジタルマルチメータを用いた電圧の監視
  8. インバータ測定、パワーデバイス/モジュール試験
  9. 三相 2 レベルインバータの測定
  10. インバータの高分解能・高精度測定の課題
  11. 電力損失を熱で捕らえる
- これらに測定提案を加えて紹介します。

### 1. 動的な電力損失を測定する方法

動的な力損失の計測では、スイッチング ON 時、ターン ON 時、ターン OFF 時の電圧・電流波形を、確実に捕らえる方法を、各種プローブ、オシロスコープ、光絶縁計測(アイソレーション・システム)を活用した事例を紹介しながら説明します。

【課題】

- (1) 電圧プローブの種類とプロービング方法
- (2) 電流プローブの種類とプロービング方法
- (3) プローブ校正方法
- (4) 位相調整方法

(1) 電圧観測の方法とプロービング方法

パワー用の電圧観測用ツールは、一般に高電圧信号を減衰させて測定しており、3つのタイプがあります。

- ① シングルエンドプローブ
- ② 高電圧差動プローブ(高電圧ペアプローブ含む)
- ③ 光絶縁方式(アイソレーションシステム)

① シングルエンドプローブ

○ 周波数特性/立ち上がり・立ち下がり遷移時間

電圧プロービングによって観測される波形は、プローブや測定器の特性を含んだ結果であり、以下に示す3つのプロービングの原則を考慮します。

- ・高入カインピーダンス
- ・デレーティング特性
- ・プロービングの形式があります。

入カインピーダンスは、抵抗値が「無限大」、容量が「0」、インダクタンスが「0」が望ましいのですが、実際には10MΩ・7.5pFとプローブによって異なりますが、抵抗、容量が存在します。インダクタンスもプロービングによって大きく現れることもあります。

まず、GaN デバイスの波形を PMK 社の【図 3】PHV-661—RO (100:1 自動認識ピン付き)を利用して、200V のスイッチング電圧を測定します。



【図 3. PHV-66x-RO シリーズプローブ】

500MHz 帯域のオシロスコープに入力抵抗は 50MΩ、入力容量は 7pF 未満、周波数帯域は 380MHz、プローブの立ち上がり特性は 0.95ns のプローブを接続します。数 ns のターン ON 時間を持つ GaN デバイスならば十分に【図 4】の様に測定できます。

500MHz 帯域のオシロスコープで PHV661-RO プローブを活用して観測された波形の立ち上がり時は 5.50ns (振幅変化 90%-10%の遷移時間)でしたが、プローブとオシロスコープの特性が加わった測定結果となるため、実際のターン ON 遷移時間は、以下の【式 1】から推定することができます。

ターン ON 測定結果 =

$$\sqrt{\text{ターン ON 時間}^2 + \text{オシロスコープの立ち上がり時間}^2 + \text{プローブの立ち上がり時間}^2}$$

(式 1)

の関係から 5.3715ns が本来のターン ON 遷移時間と推測されます。振幅は 206V でオーバーシュート、波形歪みが抑えられた波形が観測されています。波形は、GaN デバイスおよびプリント基板の特性が現れています。シングルプローブでも十分に正確な波形を捕らえていますね。



【図 4. GaN デバイス・ターン ON 波形】  
20ns/div

【測定のポイント 1】

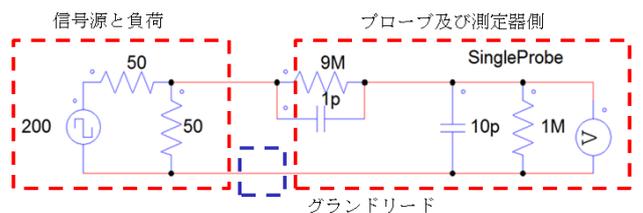
オシロスコープはフローティング測定(回路が、グランド基準で動作していても)

【測定のポイント 2】

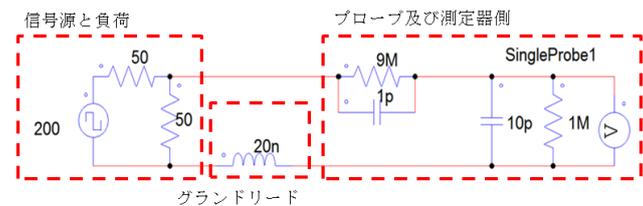
グランドリードは、インダクタが支配的であると考えます。

○ 高入カインピーダンス

プローブを利用する上での3原則のひとつである高入カインピーダンスについて以下に紹介します。



(a) : グランドリード=0 の等価回路

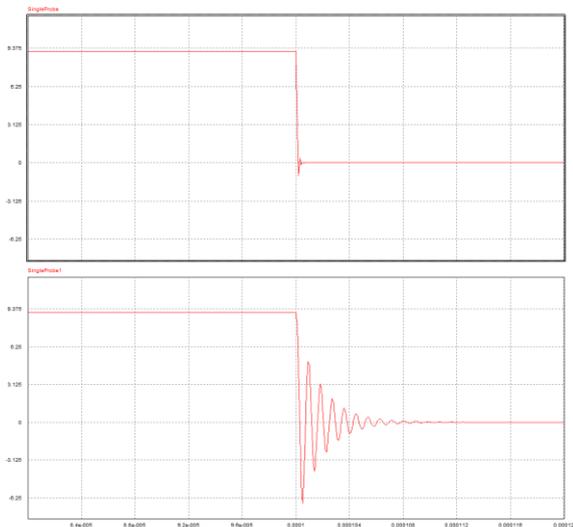


(b) : グランドリード含む等価回路

図 5 : パッシブプローブの等価回路

信号源出カインピーダンス 50Ω、終端抵抗 50Ω の回路に接続した、理想的な 10:1 のプローブの簡易等価回路を【図 5】(a)に示します。等価回路は、抵抗とコンデンサのみで構成されているため、終端 50Ω における信号出力にリンギングの様な歪みは抑えられますが、(b)の様に、グランドリー

ド部にインダクタンスが入ると大きな歪みが現れるので注意しましょう。これらの差異を図 6 に示します。上段のグランドリード最短(0.1nH)の場合と、グランドリード(20nH)の場合を比較すると大きい差が現れます。GaN/SiC/MOSFET デバイスのスイッチング測定では大きな測定誤差要因となります。

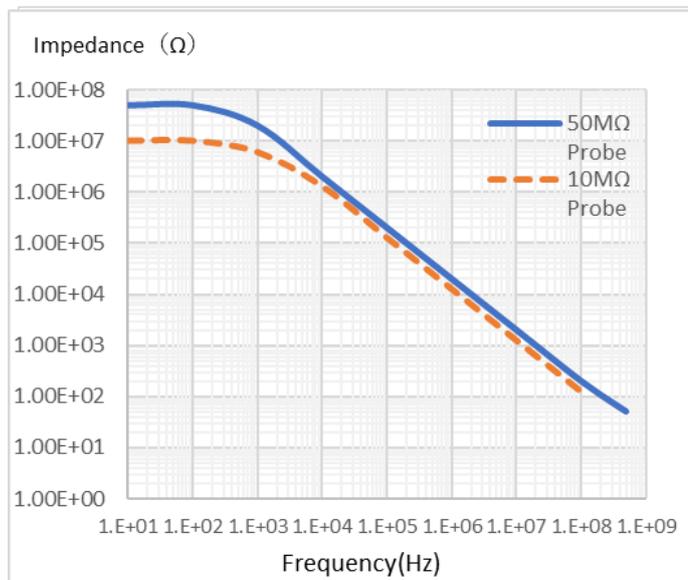


(上段)グランドリード最短  
(下段)グランドリード 20nH 相当  
【図 6: 高電圧プローブのディレーティング特性】  
20ns/div

【測定のポイント 3】

グランドリードを最短にすると波形歪みが抑えられます。

次に、振幅を確実に得るために高入力インピーダンス(高入力抵抗)のプローブを使いますが、10:1、100:1、1000:1 の高電圧プローブの殆どは高入力インピーダンスのプローブです。それらの中で、50MΩ と 10MΩ の入力インピーダンスを持つパッシブプローブの特性【図 7】を比較してみましょう。



【図 7. パッシブプローブの入力インピーダンス特性】

低い周波数では高入力インピーダンスを維持していますが、周波数が高くなるに従って、インピーダンスが低下します。一種のローパスフィルタの様な特性になります。

グラフでは、数 10MHz 当たりから被測定物の負荷インピーダンスとプローブの入力インピーダンスの差が縮まることが予測されます。高い周波数領域では、電圧測定誤差が生じやすくなります。

【測定ポイント 4】

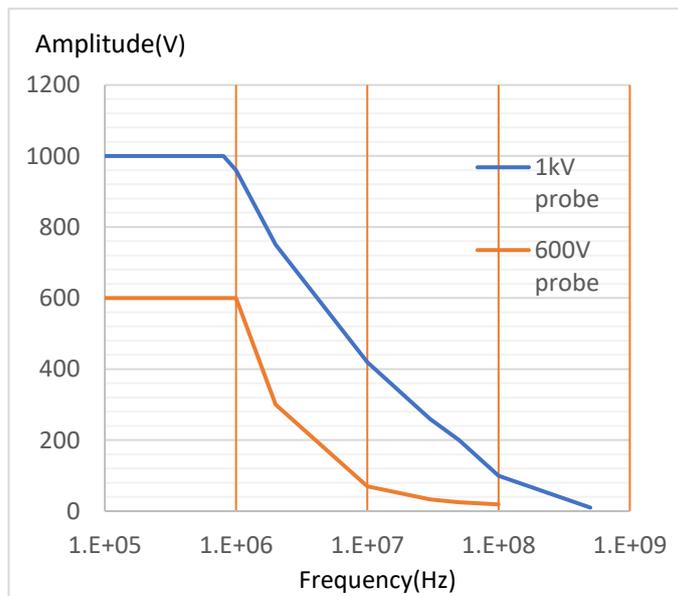
入力インピーダンスの高いプローブを選びます。

●ディレーティング特性

プローブは、【図 8】にディレーティング特性を示します。ディレーティング特性とは、プローブを安心して使っていただける入力電圧範囲を示す特性図です。理想的なサイン波は、基本波周波数における電圧範囲を考えます。パルス波/方形波/歪みのある波形は、基本波成分から高調波成分までディレーティング特性以下でなければなりません。大型機器(大電流・高電圧動作)のインバータなど、高電圧スイッチング波形に大きな歪みが現れることが予測されます。ディレーティング特性に対して余裕を持った高電圧測定をしましょう。

注意: 1kV 入力できるプローブは、すべての波形に対して 1kV 入力できるとは限りません。

高電圧プローブの外皮絶縁特性が優れたタイプもございます。



【図 8. 1kV/600V プローブのディレーティング特性例】

【測定のポイント 5】

電圧プローブには、ディレーティング特性があります。規定の入力範囲内で使います。

●シングルエンドプローブまとめ

【測定ポイント1~5】の集大成のプロービング方法を図 9 に示します。極カグランドリード、信号ピンを短くして測定します。なお、測定リードは状態に合わせて作り込みます。



【図9. プロービング方法】

## ②高電圧差動プローブ(高電圧ペアプローブ含む)

差動入力回路で構成された、バランス入力型のプローブで、2つのタイプがあります。

### ●差動ペアプローブ



【図 10. 差動ペアプローブ】

特性の一致したシングルエンドプローブ2本を組み合わせた差動ペアプローブと呼ばれるタイプがあります【図 10】。パワーデバイスの単体試験、市販されているパワーデバイスの評価ボードの計測、超高電圧測定などで使われています。20kV クラス以上の電圧でも測定することができるようなペアプローブも用意されています。【図 11】に実際のプロービング例を示します。差動ペアプローブ先端近くの金属製筒状のグランド部に銅線を巻き付けます(銅箔なども可)。測定器の入力側は、BNC コネクタで接続されてお互いのグランド側が機器共通グランドで電気的に繋がります。これによって、プローブの信号入力ラインとちょうど反対方向に同じ電流が流れて、同軸ケーブルの内側と外側の電流の磁界はキャンセルされます。誘導磁界は抑えられ、インダクタンスも抑えられた状態で計測する事ができます。高電圧スイッチングにしている所でも、沿面距離が許す限りペアプローブのグランド側の接続を短くします。同軸ケーブル部は若干ツイストさせておくと良いでしょう。

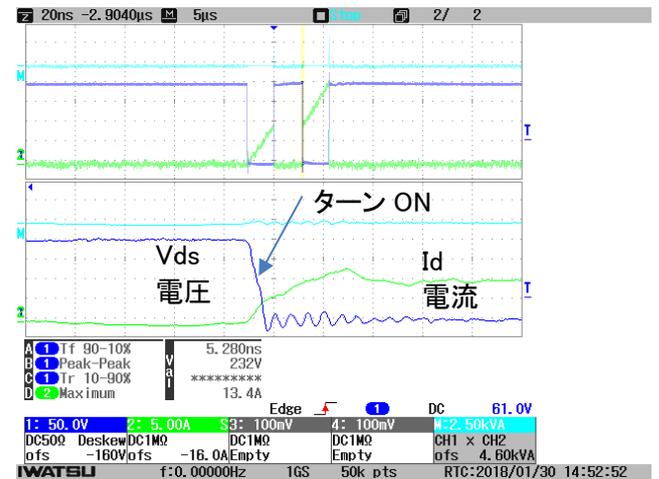


【図 11. 差動ペアプローブでプロービング】

### ●高電圧差動プローブ

簡単に GaN/SiC/MOSFET デバイスの高速スイッチング波形を観測可能な高電圧動作プローブが用意されています。一般に、100MHz 帯域の差動プローブは、コスト優位性があることから、最も使われている高電圧差動プローブと言えます(2018 年 10 月時点)。生産ラインの検証、パワー回路のデバック、故障解析にも役立ちます。

実際の測定は、【図 12】の様に、実際のダブルパルス試験による高電圧スイッチング電圧波形と電流波形を示します。ON/OFFの様子はプローブを確実に固定して安心して測定できます。ON 遷移時間は 5.21ns 高速スイッチングターン ON 5.21nsドレイン電流は、100MHz ログスキーム電流プローブで最大電流 21.7A(2回目のターン ON 時)を捕らえています。



【図 12. GaN スwitching電圧・電流波形】

【図 13】SKID PCBA フレームと3D ポジショナーを利用してプローブと基板を固定しています。デバイスの直近でプロービングしています。差動プローブを利用してもリードを長く取らないようにします。最短プロービングを可能とする各種ピンなどを使い、デバイス、基板などの状況に応じたプロービングを行います。



【図 13 プロービング拡大図と SKID フレーム固定のプローブ】

本実験では、差動プローブの先端には、基板に一定の力が加わるようなピン先を取り付けてあり、安定したプロービングができます。

【図 14】(a)に差動プローブ本体及び専用の電源(2ch)、(b)にプローブの先端に取り付けるアクセサリの一部を示します。(a)では、2chタイプの電源を示していますが、他に 4ch タイプもあります。BumbleBee を 3,4 本利用する場合は、4ch タイプの電源をお使い下さい。

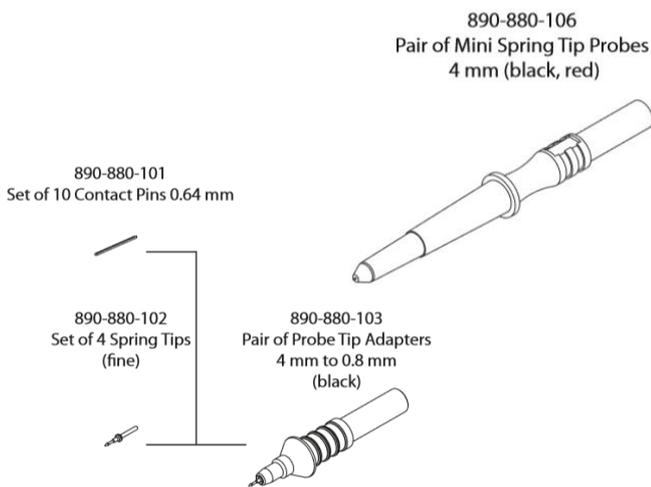


(a) BumbleBee 及び電源(2ch)

④ 光絶縁方式(アイソレーション・システム)

究極のインバータ測定ツール「光絶縁計測(光アイソレーションシステム)」を紹介します。SiC系やGaN系で作られたパワー半導体のように非常に高速にスイッチングする半導体の評価時には、アイソレーション・システム DM-8000を使用することでコモンモード・ノイズや波形ひずみを抑えた信号観測を確実に行うことができます。アイソレーション・システムは、バッテリー駆動する被信号測定部(プローブ、アイソレーションユニット)と信号観測部(制御部)を、光ファイバケーブルで電的に完全に分離することで理想的な測定環境を構築します。図16(a)はシステムの構成、(b)はアイソレーション・ユニット DM-900A シリーズと制御用のメインユニット、PMK社製高電圧プローブの接続例です。

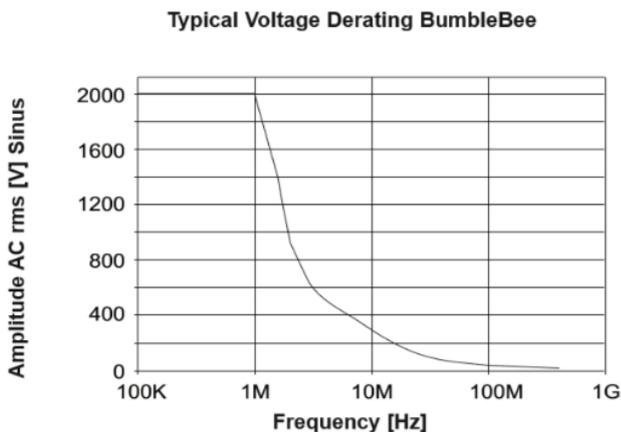
本システムは、取り付ける高電圧プローブ、減衰器によって100kVクラスの開閉器の試験や、非常に高いサージ電圧などが発生する自動車や電车用インバータの試験などに幅広く対応します。岩崎通信機は、PMK社、NORTHSTAR社などの高電圧プローブを扱っておりますので、どのような測定にも柔軟にお応えできます。



(b) プローブ先端治具の例

【図14. 高電圧差動プローブ BumbleBee】

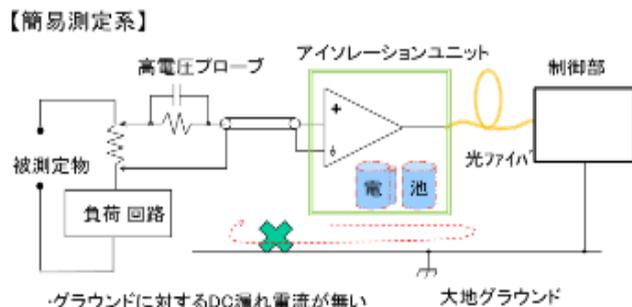
高電圧差動プローブのを安心してお使いいただける電圧範囲は、【図15】BumbleBeeのデレーティング特性を参考にして下さい。



【図15. BumbleBeeのデレーティング特性】

【測定のポイント6】

高電圧差動プローブ BumbleBeeを使うと簡単に高速スイッチング波形を観測できます。プロビングを助けるSKIDや、プローブ先端に取り付ける治具を利用しましょう。



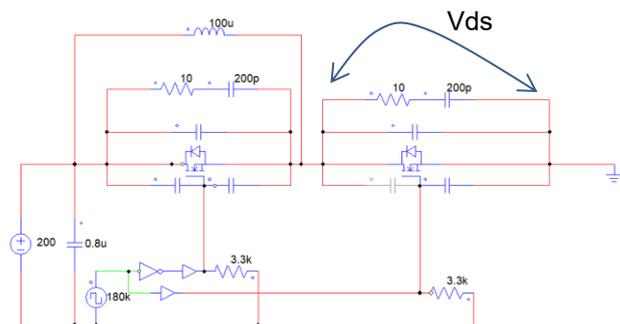
(a) 測定システムの構成



(b) アイソレーション・システムの外観

【図16. 光絶縁方式(アイソレーション・システム)】

それでは、GaNのスイッチング波形をご覧頂きましょう。



【図17. GaNスイッチング評価回路】

測定回路を【図 17】に示します。測定には、PHV1000-S(対地高耐圧対応シリコンチューブ被覆プローブ)を用いました。周波数特性は、PHV1000 シリーズと同じです。時間軸 20ns/div,電圧軸 50V/div 振,200V,ターン ON(10-90%)遷移時間 5.833ns,ターン OFF(90-10%)遷移時間 9.587ns と高速スイッチングしています。



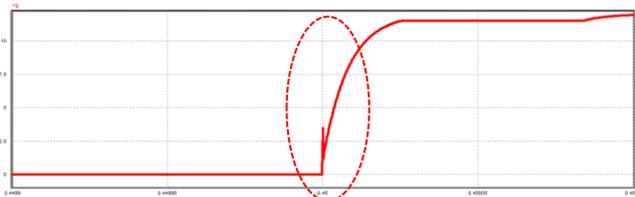
(a)ターン ON  
20ns/div,50V/div



(b)ターン OFF  
【図 18. GaN スイッチング波形】  
20ns/div,50V/div

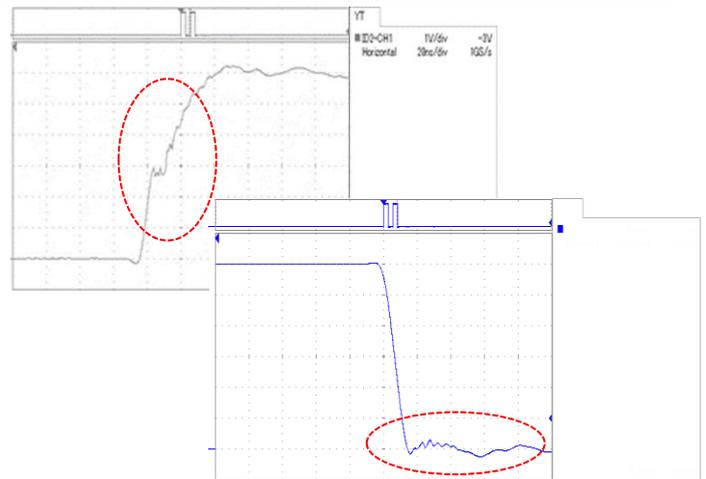
ゲート信号も確実に取得することができますが、GaN/SiC/MOSFET デバイスの信号を観測する際は、シミュレーションで回路の挙動を確認することをおすすめします。実際に波形歪みが現れているケースで、プローブの影響とされていた波形が、実は回路本来の動きであった事が確認されたケースが非常に多くあります。

まず、シミュレーションした例を【図 19】に示します。



【図 20.ゲート信号のシミュレーション結果】

プロービングしていない状態でシミュレーションをしましたが、電極間容量、配線のインダクタンスなどの影響により歪みが現れています。実際の波形【図 21】を確認するとゲート信号の L→H レベルの中間点に波形歪みが現れています。また、H→L レベルに変化した後にわずかな繰り返し波形が確認されています。デバイス回路の特性が出ているようです。これらの波形は、高電圧重畳されたハイサイド・ゲート信号の観測にも有効です。確実にコモンモード・ノイズを抑えて測定できます。



【図 21.ゲート信号 20ns/div,1V/div】

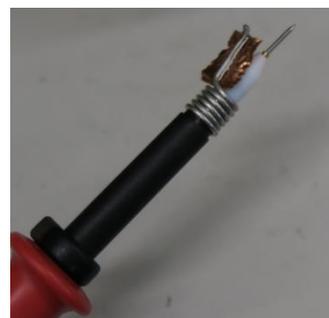
それでは、プロービング事例も確認してみましょう。

【図 22】に銅箔を使ったプロービング事例を紹介します。波形状歪みの大きな問題は、グランドと信号線間の信号の流れです。極力ループの距離を短くすることで歪みを低減できます。なお、基板の状況に合わせてグランドリードなどを作り込むだけで、低歪みの測定ができます。

本測定では、汎用品の PCB プローブ接続用コネクタをつかったり、基板上に測定パッドを設けたり、プローブ専用のピンを立てられるようにしたりすることはしていません。PCB パターンを測定の為に変更することによる動作への影響が懸念されます。



(a)銅箔グランドリードでプロービング



(b)銅箔グランドリード

【図 22. 銅箔を使ったプロービング】

【測定のポイント 7】

光絶縁計測 DM-8000H シリーズで確実に高電圧・高速スイッチング波形を離れたところから安心して測定できます。

(2) 電流プローブの種類とプロービング方法

GaN/SiC/MOSFET デバイスの電流計測は電圧計測よりも難しいと考える方が多いと思います。電圧計測は、直接プローブの先端を当てる行為で簡単に歪みの少ない波形が得られますが、電流計測は電流ラインを何らかの形で取り出す必要があるからです。たとえば、センサを挿入するために電流パターンを迂回させる事が求められます。

これらの方法の中で、極力回路に影響を与えず電流計測ができる方法が無いかを、これから検討します。

電流計測の方法は以下の方法があります。

- ① シャント抵抗方式
- ② ホール素子+CT方式
- ③ ログスキーコイル方式
- ④ CT方式

これらの4つの方法を簡単に紹介いたします

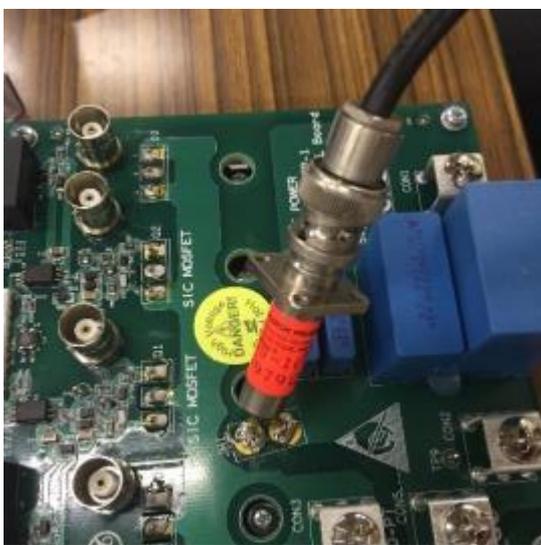
① シャント抵抗方式

シャント抵抗方式には大きく2つの方式があります。

●高周波シャント抵抗方式

図 23 にスイッチング回路とその電流測定ポイントを示します。同軸型シャント抵抗は、オシロスコープと直接 50Ω 系同軸ケーブルで接続して使います。シャント抵抗にはわずかなインダクタが(c)の様にあるため、電流波形に歪みが現れることがあります。広帯域 GHz のダブルパルス波形などを取り込むことができます。電流は、取り込む位置にもよりますが、原則フローティング状態で取得します。

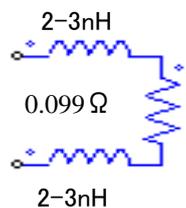
これは、配線インピーダンスによる電圧降下などにより、シャント抵抗を挿入した位置が完全にグランドにならない事が想定されます。



(a) 同軸型シャント抵抗取り付け例



(b) シャント抵抗



(c) 等価回路

【図 23. 同軸型シャント抵抗 T&M Research 社】

実際に、GaN デバイスの電流波形を取得した例を【図 24】に紹介します。シャント抵抗はインダクタンスが小さい電流検出用シャント抵抗を取り付けるようにして下さい。信号の取り出し方法は、差動入力形式のプローブもしくは、50Ω 終端のオシロスコープにセミリジッド同軸ケーブルで直接入力する方法があります(b)。GaN デバイスの電流計測の為に幅広タイプのシャント抵抗 47mΩ の両端電圧は、2.05V です。

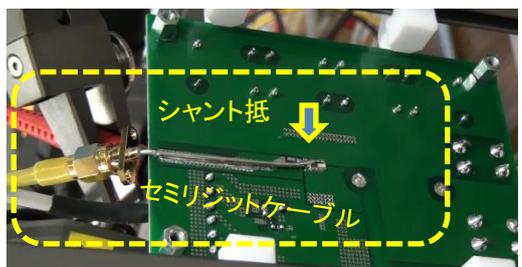
$2.05V / 47m\Omega = 43.6A$  max の電流が流れていました(c)。

波形は、大きな歪みも無く測定しています。

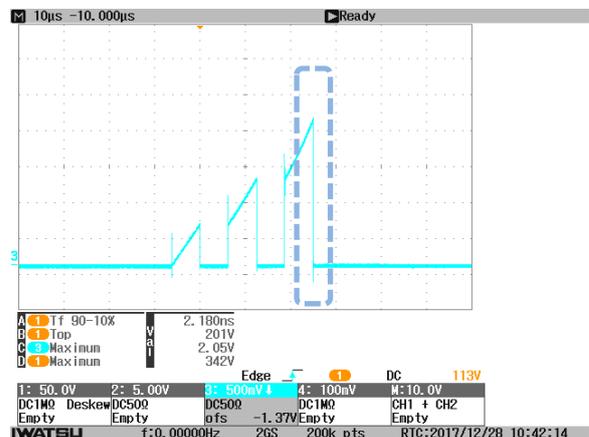
評価ボードで電流計測する際は、このような方式で十分なのですが、実際の回路で電流計測する際は、シャント抵抗引きでは瞬時の電力計測が困難になることがあります。低損失パワーデバイス、ON 抵抗が非常に低く、数 10mΩ 程度かそれ以下になります。そこに、47mΩ の抵抗が接続されるため、電圧降下により回路動作を確実に捕らえる事ができません。抵抗値を1mΩにした場合は、43.6mV、の信号出力が得られますが、10A では 10mV 前後の電圧値となり、ノイズフロアレベル近くの電位になってしまいます。小さいシャント抵抗値を使ってオシロスコープ、デジタイザで波形観測する事は難しくなってきます。



(a) シャント抵抗取り付け位置



(b) シャント抵抗取り付け位置



(c) トリプルパルス電流波形

【図 24. 電流計測】

●電力測定用のシャント抵抗

実効電力を測定する場合のシャント抵抗方式は、使われる測定器が高分解能、高精度、高感度の測定システムを使うことが主であるため、先ほどの高周波シャント抵抗方式の様な問題はありません。50Arms(1000Apk)で3mΩのシャント抵抗が使われています(Newtons4th PPS5530HC)。500Armsのシャント抵抗では0.2mΩが使われています。

熱の影響を抑え、インダクタンス低減を図るには、平面方式のシャント抵抗が必須です。平面型は、電流配線を分散して通しやすい利点があります。各々のシャント抵抗の配線は、折り返して配線されており、それぞれの磁界が打ち消し合うようになっており、インダクタンスの低減化を図っています。その上、電流パターンと抵抗は放射状に配置されているため、熱が一極集中しないように均等に分散されるため、熱の影響を抑えた特性となります。

本技術は、Newtons4th PPA5500/4500/1500/500 シリーズ、HF シリーズシャント抵抗製品に活かされています。

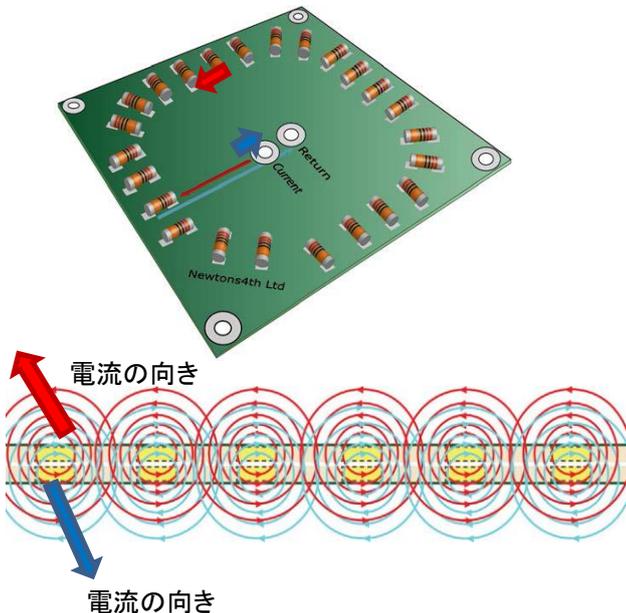
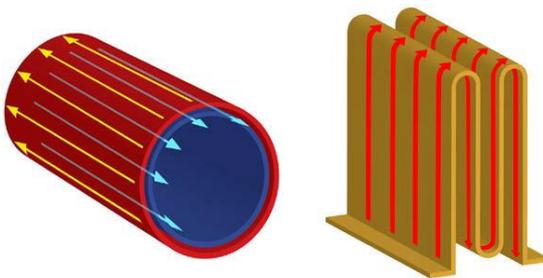


図 25. 新方式のシャント抵抗による電流検出方法

●他の電力測定用のシャント抵抗



(a) 同軸型, (b)ホイール型  
放熱・インダクタンスの改善は旧方式である  
【図 26 各種シャント抵抗】

このほか、【図 26】のように同軸型シャント抵抗や抵抗箔タイプのシャント抵抗があります。同軸型のシャント抵抗は、Newtons4th 社が旧来使ってきましたが、

シャント抵抗面積  
体積 の比が小さいため熱が十分に発散できない場合や、十分にインダクタンスを低減できない課題がありました。現在、Newtons4th 社製品では、この旧方式(PPA2500 世代)は採用されていません。

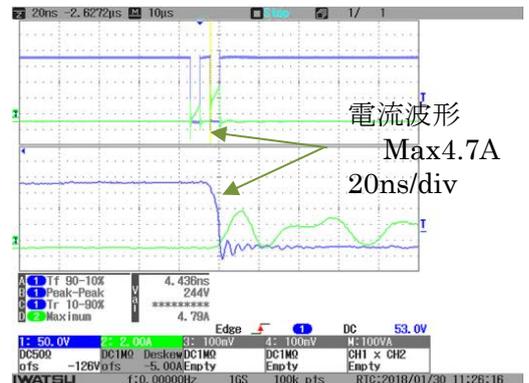
② ホール素子+CT 方式

通常オシロスコープで電流測定をする場合には、クランプ式の広帯域電流プローブ(CT とホール素子を組み合わせたタイプ)が使用されてきましたが、スイッチング電源の高周波数化や小型化により、今までのクランプ式の広帯域電流プローブが使用できない場面も増えてきています。

特長は、測定精度が高く、オシロスコープとの親和性が高いことです。弊社製 DSO ViewGo シリーズならば、プローブ専用メニューにより、プローブ名称を、チャンネルメニュー内で設定するだけで単位換算し、直読で電流値を読みながら測定することができます。交流成分だけでなく直流成分も正確に測定できることも特長としています。

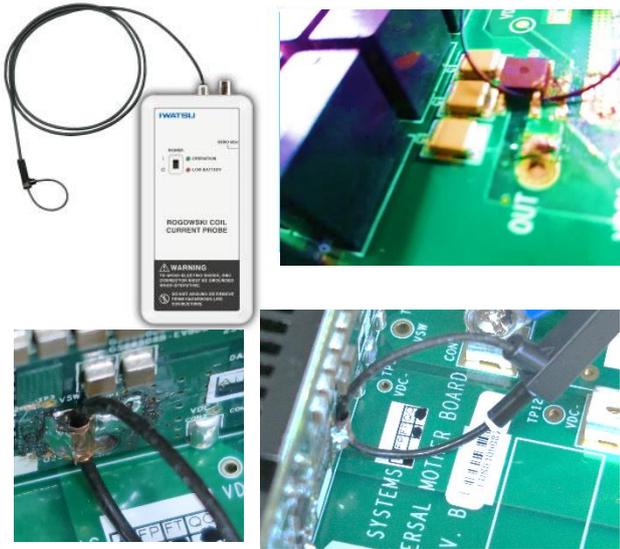
欠点としては大電流になるとクランプ部が大きくなってしまいます。高密度実装された電源の計測では使用できない場面が増えています。【図 27】は、SS-250 100MHz 電流プローブで実測した事例です。迂回路を長く(4~5cm)した事や、パターン上の影響を受けて、電流波形に大きな歪みが現れてしまいました。を基板上の GaN デバイスのドレイン電流を計測していますが、電流プローブの耐電圧を考慮しながら測定して下さい。

クランプが容易な場面では、威力を発揮する電流プローブですので、利用されておられる方々のご心配は無用です。測定シーンに応じて使い分けましょう。



【図 27. クランプ式電流プローブで測定した例】

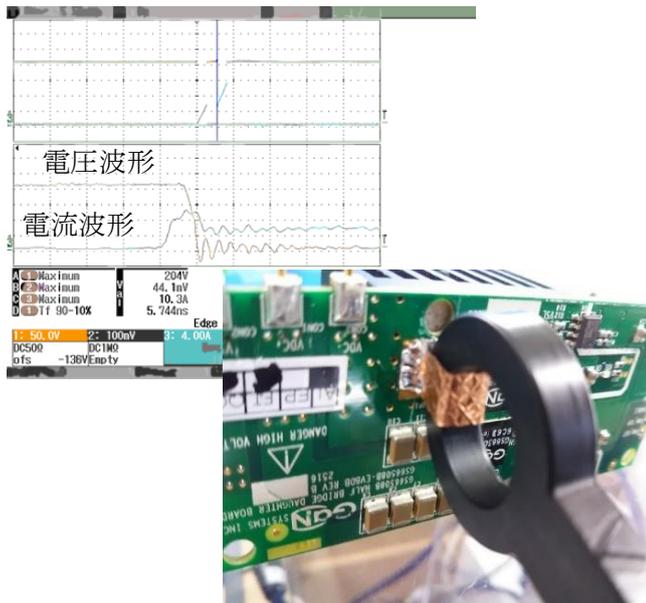
③ ログスキーコイル電流プローブ(非磁気飽和特性)



【図 28. ログスキー電流プローブ】

【図 28】にログスキーコイル電流プローブの例を示します。センサ部が細く柔軟なコイルで構成されるため、高密度実装化されたスイッチング電源の狭小部でも測定可能です。

DC 成分は通さない欠点を持ちますが、センサ部が空芯コイルで構成されるため、信号が大電流でも飽和しにくく、挿入インピーダンスも小さいため、回路への影響が極力避けられ、使用される場面が増えています。岩通の SS-280 シリーズログスキーコイル電流プローブは、細く柔軟な構造により、パワーデバイスのリードピンに絡ませることで大電流のパルス応答特性を簡単に測定することができるため、EV/EHV の主機インバータやエアコンディショナなどの大出力でありながら、小型化が進む電気機器の設計・開発などに使われています。【図 29】に 100MHz ログスキーコイル電流プローブ SS=68x シリーでダブルパルス試験を行った例を示します。ダブルパルス試験のスイッチング電圧・電流波形とターン ON 部の拡大波形を示します。SiC/GaN デバイスは高速ス



【図 29. 100MHz ログスキーコイル電流プローブの波形とプロービング事例】

イッチングしており、ターン ON/OFF 遷移時間は数 ns になる事があります。本測定では、電流波形は、最大 10.3A 得られています。ターン ON の遷移時間は、6nS 以下と高速動作していることがわかります。

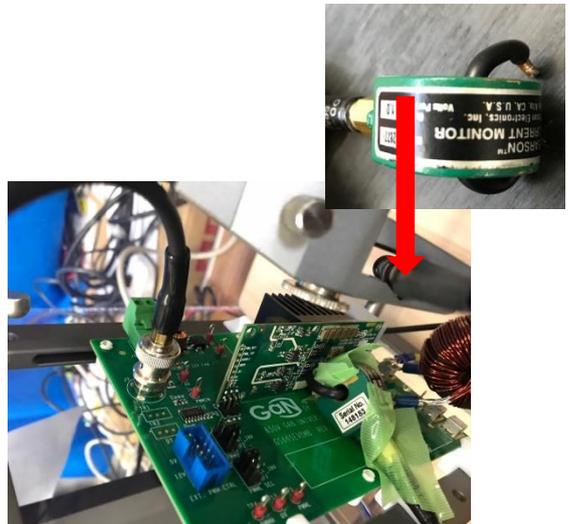
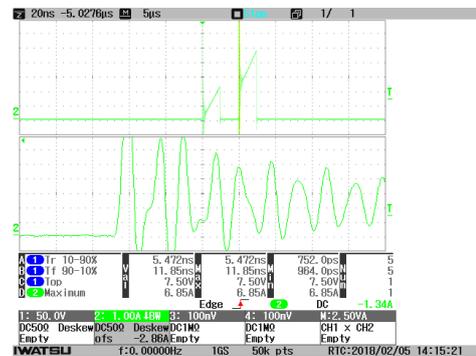
④ CT 方式

CT方式には、波形観測を得意とする高周波タイプと電流精度が高いタイプがあります。まず、波形観測用途の CT.について説明します。

●波形観測用 CT

金属ケース入りの CT.で注意したいことがあります。図 22 の GaN デバイスのドレイン電流を測定するシーンですが(図 2 電流計測では、センサと回路が短絡しないように絶縁を取り、基板との容量結合の影響を考慮した測定が求められます。

電流の取り出しの為の迂回路は、【図 30】タイプの CT.で 4cm 程必要であり、電圧波形の歪みにも影響します。狭い空間の測定は、この種のセンサの利用を避けた方が良さそうです。



【図 30. 金属ケース入り電流センサと電流波形】

●高精度 CT.

電力アナライザなどに利用される電流センサです。貫通型で、高精度計測を実現しています。外観は、【図 31】に示します。

岩通では、Newtons4th 社製品の取扱いの関係上、大電流の貫通型電流センサ(カレントトランジェンサ CT)を扱っています。電力アナライザに限らず、デジタルマルチメータ(VOAC76/75xx シリーズ)にも利用できます。使用する際は、指定される負荷抵抗、電源を利用します。



【図 31. CT】電流波形

【測定のポイント 8】

電流計測は、測定対象によって最適な方式のプローブを選定します。

- ・高精度 DC/AC 測定には、クランプ式のホール素子+CT. 方式の電流プローブ(フラックスゲート方式)
- ・狭小スペース、サージ電流などの、ピーク電流が大きく。長時間測定されたい場合は、非磁気飽和・高耐電圧・大電流・狭小スペースのログスキーコイル電流プローブ
- ・電力計測用には、Newtons4th のシャント抵抗がおすすめです。後方ページに電流プローブのセレクションガイドを掲載します。

(3)プローブ校正方法

プローブ校正には、電圧用と電流用があります。【図 32】(a)は、大電流パルス発生する校正器(KSZ100 (100A)) (b)は高電圧パルス発生する校正器(KHT6000 (6kV))です。プローブの状態を定期的に確認することをおすすめします。たとえば、高電圧プローブはオシロスコープ毎に調整しなければなりません。測定前に調整がずれていると、インパルス波形の波高値が小さくなり、波形が大きくひずみます。入力される電圧が低すぎる場合、調整の追い込みができずに、



(a)大電流校正器 KSZ100



(b)高電圧校正器 KHT6000

【図 32. 校正器】

調整ずれのまま使ってしまうこともあるため、プローブに合っ

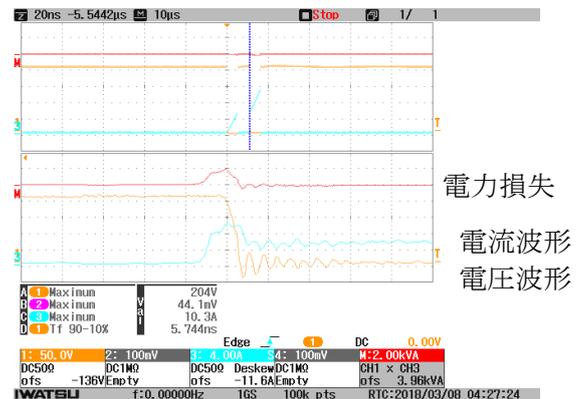
た適正な電圧入力で試験を行います。

(4)プローブの位相調整方法

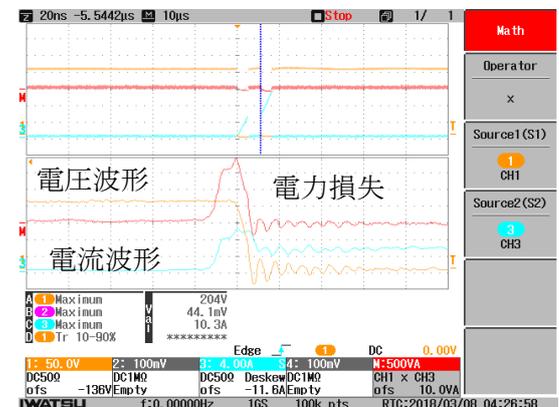
電力計測は、電圧×電流の波形演算から求めることができます。【図 33】は、実際のターン ON 時における電力損失の違いを示します。位相調整されていない状況では、電力損失に差が現れてしまいます。図(b)は、電力損失が大きく現れています。一方(a)は小さくなっています。ちなみに、リアクトルの損失測定もこの領域の位相差が大きな損失誤差につながります。

なお、電力アナライザで瞬時の電力計測は位相調整しても確実にできません。サンプリングがあまりにも不足しているからです。GaN/SiC/MOST の電力計測のわずかな効率差を確認する際は、電力アナライザと高速サンプリングで動作する絶縁計測かオシロスコープの両面で検証する必要があります。

さて、位相調整の方法について提案をしたいと思います。小信号ならば、信号発生器と終端抵抗器を使って合わせ込みができますが、大電流測定には対応できません。そこで高速パルス発生器を紹介します。使用機材は、高速パルス発生器で 40-50V 出力可能で 50Ω 終端時に数 ns 以下の立ち上がり波形が得られるタイプを使います。信号発生器と 50Ω 終端器の間には電流検出できるように治具をつくります。【図 34】に接続例を示します。

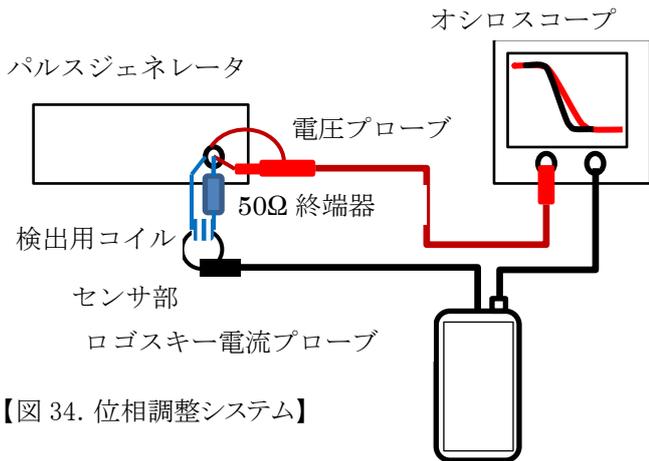


(a)電流・電圧位相調整済み



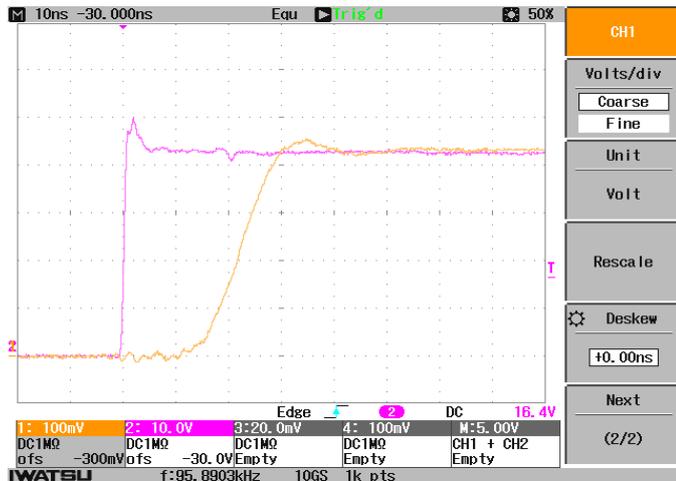
(b)電流・電圧位相がずれている

【図 33. 電力損失測定結果と位相差の影響】

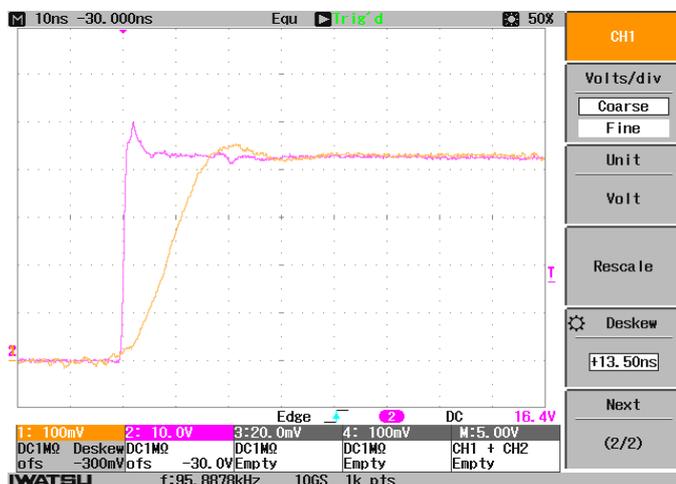


【図 34. 位相調整システム】

【図 34】の位相合わせは、電流:CH1,電圧:CH2として、電流プローブのクランプ時の方向性を終端器に流れる電流の方向に合わせます(GND 側に向けます)。図(a)は立ち上がりはじめての波形で位相差をデジタイザもしくはオシロスコープ側で時間補正する前の状態です。Deskew は 0.00ns を示しています。図(b)は、電流位相を 13.50ns 進めて位相合わせされた状態です。このとき気をつけたいのは、電圧の立ち上がり/立ち下がり特性が一致しない限り、振幅の中心で位相あわせしないようにして下さい。周波数帯域が低いほど、遅延時間が遅くなる傾向があるからです。



(a)位相調整前



(b) 位相調整後

【図 34. 位相調整システム】

ここで、パルスの立ち上がりが遅いと位相調整が困難になります。10ns 程度の立ち上がり時間のパルスジェネレータを使って調整することが望ましいです。ログスキーコイル電流プローブ等で価的に電流を増やして調整したい場合は、コイルのターン数を増やします。ただし、コイルのインダクタンスが増えてくると電圧/電流の位相差が出てきてしまいますので、コイルはなるべく小径にして 5 ターン程度にします。

【測定ポイント 9】

帯域の違うプローブ同士を位相調整する場合の位相合わせのポイントは立ち上がり/立ち下がりははじめです。

2. 静的な電力損失を測定する方法

スイッチング電源の設計段階で、それに使用するパワー半導体の選定は重要な作業です。

半導体カーブトレーサ CS シリーズは最大 15kV までのパワー半導体の静特性測定に対応可能です。

また、オプション関係も豊富でスキナシステムを使用した複数素子の自動測定や、ホットプレートを使用した温度特性試験などを専用の自動測定ソフトから行うことができます。

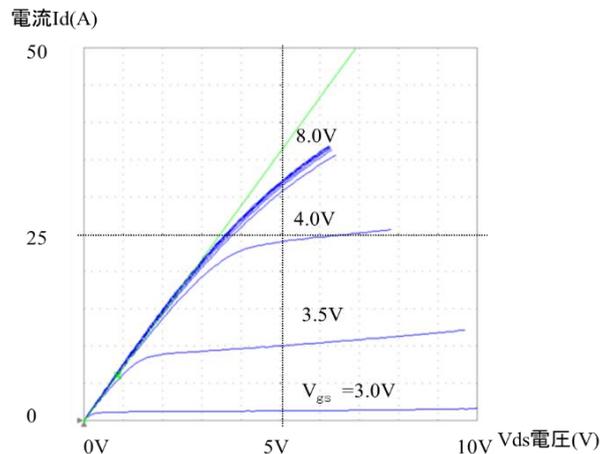
● I-V 特性試験

スイッチング電源の設計段階で、それに使用するパワー半導体の選定は重要な作業です。

半導体カーブトレーサ CS シリーズは最大 15kV までのパワー半導体の静特性測定に対応可能です。

また、オプション関係も豊富でスキナシステムを使用した複数素子の自動測定や、ホットプレートを使用した温度特性試験などを専用の自動測定ソフトから行うことができます。

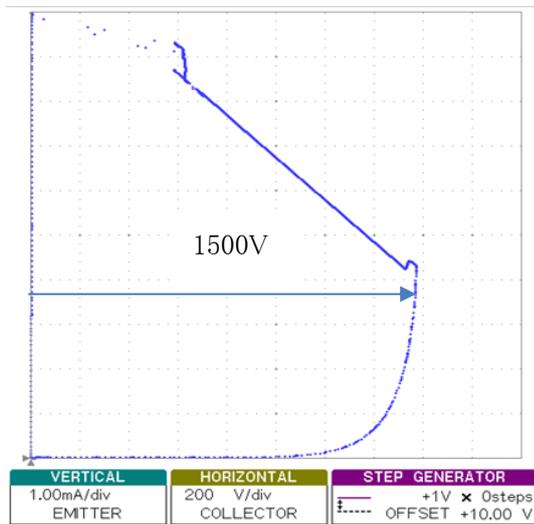
【図 35】にカーブトレーサと GaN デバイスの I-V 特性試験例を示します。



【図 35. GaN デバイスの I-V 特性, カーブトレーサ】

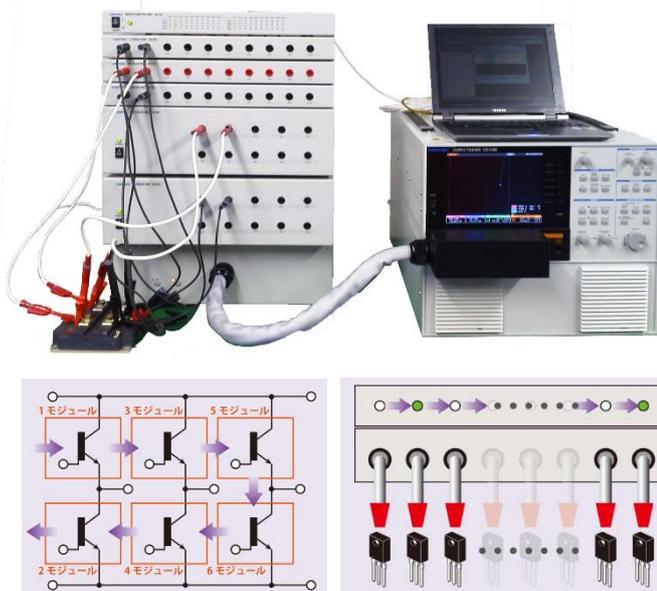
● ブレークダウン試験

図 36 は電力(電圧・電流積)発熱によって熱的な破壊が発生する状態を示しています。GaN デバイスのブレークダウン試験を行った結果、1500V までの耐圧が確認されました。



【図 36. GaN デバイスのブレークダウン試験】

【図 37】は本体(CS-3000 または CS-5000)、スキャナユニット(CS-700 シリーズ)、ソフトウェア(CS-800、CS-810)、接続ケーブルを組み合わせることにより、自動的に最大 10 個までのディスクリット・パワー半導体のパラメータを自動で測定することができるスキャナシステムです。検査工数削減に大きく貢献することができます。たとえば、6-in-1 SiC- IGBT モジュールや、GaN/SiC/MOSFET デバイスなどの複数個数の試験などが行えます。



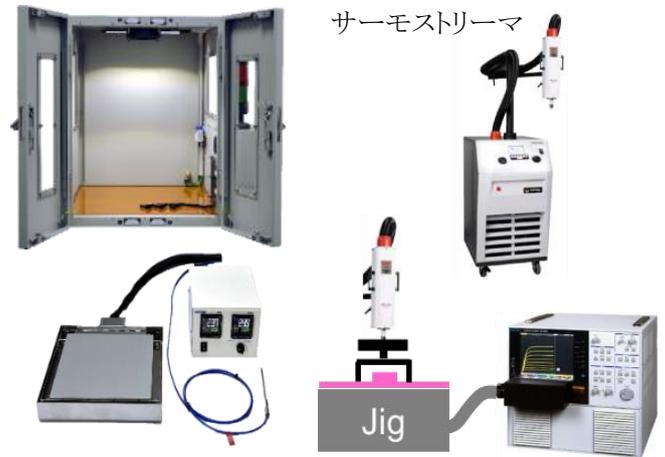
【図 37. スキャナシステムとカーブトレーサ】

● 耐環境試験

SiC デバイスや GaN デバイスを評価するために、デバイス自体を高温でテストできます。

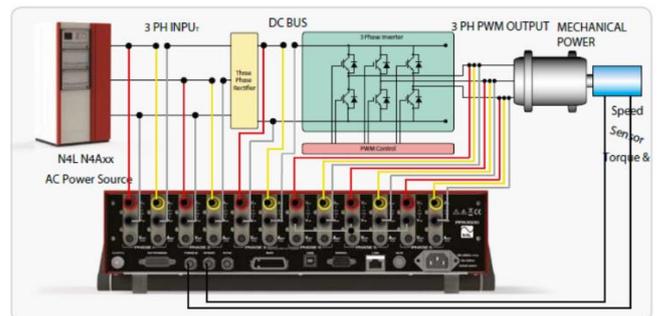
【図 38】のホットプレート JIG では 200 度までのビルトインホットプレート、300°C/400°Cまで対応するホットプレートシ

テムがあります。サーモストリーマシステムは、高低温の状態を短時間に発生させることができます。図 38 の例では、カーブトレーサは-80°Cから+225°Cまでの温度テスト範囲を実行します。300°Cも可能です。



【図 38. 温度試験システム】

3. 実効電力を測定する方法(パワーアナライザ)



【図39 インバータ・モータシステムの電力計測】

PPA3560、PPA5560シリーズは、6電力測定を提供します。同時に、電圧・電流の全12入力の結果をFPGA/DSPで取りこぼしなく同期して演算した結果を示すことができます。また、入出力20ch、温度入力最大6chを持つアナログ・デジタルI/O【図40】を拡張できます。パワー計測しながら温度計測できるため、データロガーが不要となります。



【図 40. アナログデジタルインタフェース(ADI-40)】

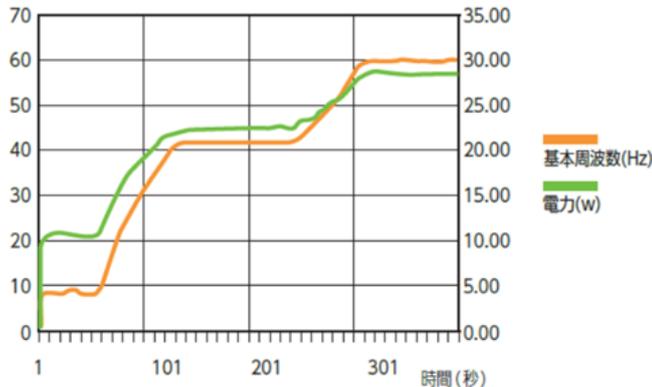
自動車、家電などに使われる可変速モータにおいては、サイクルバイ・サイクルの電力計測による細かい制御特性を検証しています。PPAシリーズは低回転から高速回転まで可変する信号を高速取り込みすることができます。

PPA5500は最速2m)、PPA3500シリーズは最速5ms間隔で測定できます。PCの制御も最高5ms(PPA5500)間隔でPC上にパラメータ数値の転送ができます。【図41】グラフ

は、Data Logger ソフトウェアで取得したデータをExcel上でグラフ化したデータです。写真は、インバータ計測したモータ及びインバータです。

**【電力測定の要 校正体系】**

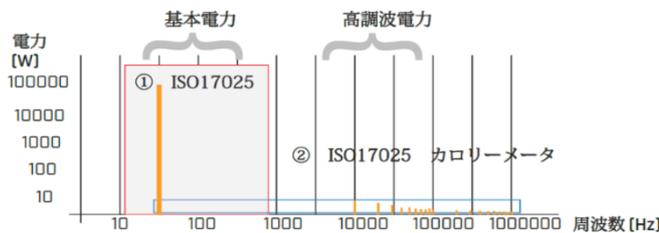
Newton's4th パワーアナライザは、ISO17025 UKAS



【図 41. インバータモータの始動特性】

Calibration Certificate で製品を提供しています。ILAC の取り決めを通じて、試験所及び検査機関の世界的な承認が得られた製品に付随する試験結果、検査結果、および校正データは、UKAS,IA JAPAN、JAB、VLAC、で相互に受け入れています。

また、Oxford Universityとの共同研究により、高周波領域における電力の校正体系Closed Loop Calorimetryを電力アナライザとして初めて確立し、電力アナライザの製品開発・製品品質にも活かしています。



(a)校正体系の範囲

```

N4L Calorimeter 01
Calibration of Phase: *** INSTRUMENT PHASE***
Data File: data_038
NW File : NW_2017_03_17_09_55

[----- applied -----]
RESULT Freq (Hz) Power Range (W) Power (W)
OK 1.00e+03 2.38 to 2.63 2.4811
OK 5.00e+03 2.38 to 2.63 2.4802
OK 1.00e+04 2.38 to 2.63 2.4808
OK 5.00e+04 2.38 to 2.63 2.4779
OK 1.00e+05 2.38 to 2.63 2.4866
OK 5.00e+05 2.38 to 2.63 2.4995
OK 1.00e+06 2.38 to 2.63 2.5233

[----- measured -----]
Power (W) Dev Spec Uncert
2.4802 <-0.037% [0.43%] (0.21%)
2.4808 <-0.026% [0.45%] (0.21%)
2.4808 <-0.002% [0.47%] (0.21%)
2.4779 <-0.007% [0.67%] (0.21%)
2.4855 <-0.047% [0.92%] (0.21%)
2.4984 <-0.044% [ 2.9%] (0.21%)
2.5094 <-0.554% [ 5.4%] (0.21%)
2.5233 <-0.211% [ 2.8%] (0.28%)
    
```

(b) 周波における電力校正結果

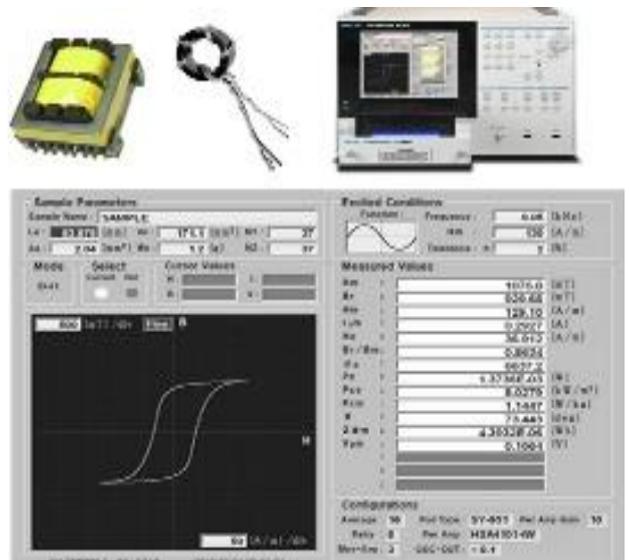
【図 42.パワーアナライザの校正】

**【測定ポイント 10】**

電力の校正体系 Closed Loop Calorimetry 法で電力測定をより正確に提供できるようになりました。

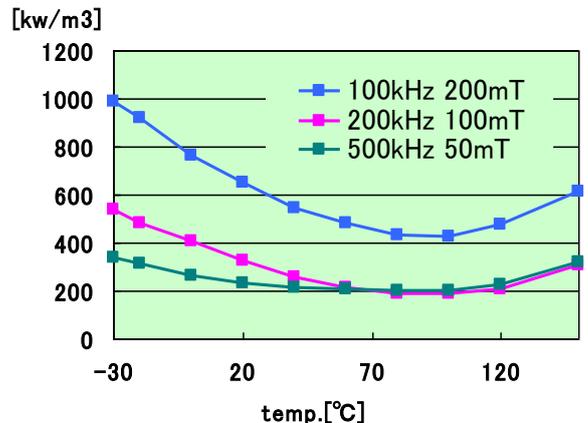
インバータの小型化、高周波化が進展するにつれ、トランスやインダクタなどの磁気特性やコアロス(鉄損)の解析が必要になる場面が増えてきました。今までは、スイッチング電源の開発に磁気特性の解析までする必要はありませんでしたが、高周波化によりトランスやインダクタで発生する損失による発熱が大きな問題となり、その対策を回路設計側も検討する必要が出てきたためです。【図 43】に軟磁性材料を使用したトランスやインダクタの例と、BH アナライザ(SY-8218/8219)の外観、解析画面の一例も示します。

磁性材料によっては、磁気特性に温度依存性を持つものがあり、トランスなどに使用されるフェライトは、室温では安定せず、高温で安定する性質も持ちます。BH アナライザを用いた温度特性評価システムを使用すると、-30℃から150℃の範囲で磁気特性を測定することができます。一般的なフェライトであるPC40のコアロスと周波数、磁束密度の関係を図(b)に示します。



(a)磁性体材料損失測定

**PC40 20T Pcv [SY-8258]**

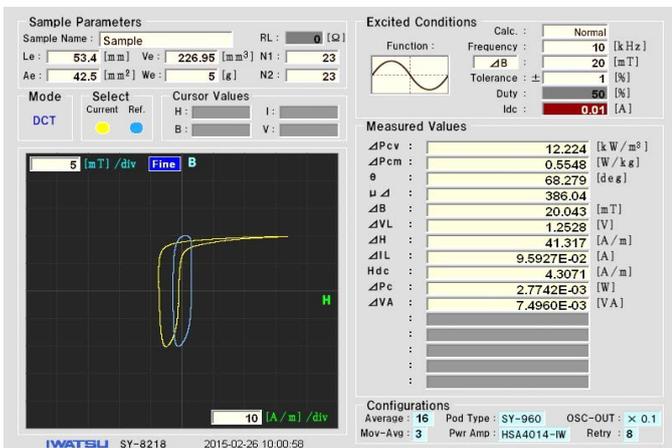


(b) 温度変化による高位相角の磁性体材料損失

【図 43. B-H アナライザと測定事例】

このほか、DC バイアス時の磁性体材料の特性を測定する DC-Bias Tester を【図 44】に示します。

**4. 高位相角、高精度の損失解析(B-H アナライザ)**



【図 44. B-H アナライザと DC バイアス、アンプ】

ところで、磁性体材料の損失を B-H アナライザで測定するのはなぜでしょうか？

損失を測定する方法を3つを紹介してきましたが、いずれも、入力の位相調整のみの補正に限定されていました。高位相角の磁性体材料の測定には、周波数特性を位相と振幅の2つの角度から補正しなければ、測定系の影響が現れます。

電流検出部のわずかなインダクタンス成分による周波数特性差につながることで、励磁電流検出部、誘導電圧の検出部の磁界波形、磁束密度波形の歪み、そして測定するレンジ間誤差を補償することは困難です。このため IEC62044-3 に紹介されている“ Cross Power Method”を活用して誤差補償しているため、B-H アナライザが有効です。

電力アナライザ、オシロスコープでの B-H 解析は、時間軸

要素のみの補正となっていますので、正確性に欠けます。さらに大きな励磁で印加したい場合は、B-Hアナライザにパワーアンプを取り付けて大出力を得ます。磁性体材料は、多種多様あり、要求事項も多くありますが使用用途によって材料を選別しなければなりません。たとえば、モータのステータ、コアなどは低損失タイプを求めます。熱の発散は、部品の大きさにも関わってくるからです。

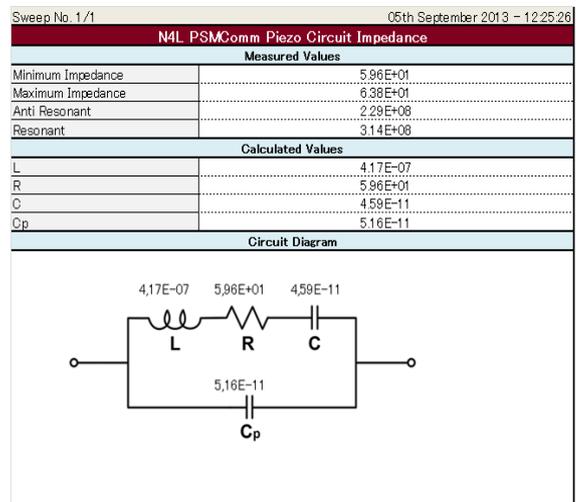
以上、4つの電力損失の測定方法について測定するため提案を致しましたが、このほか、パワーエレクトロニクスに必要な測定提案(インピーダンス測定、インバータ制御、デジタルマルチメータによる解析など)について紹介します。

### 5. インピーダンスアナライザによる部品の測定【インピーダンス解析】

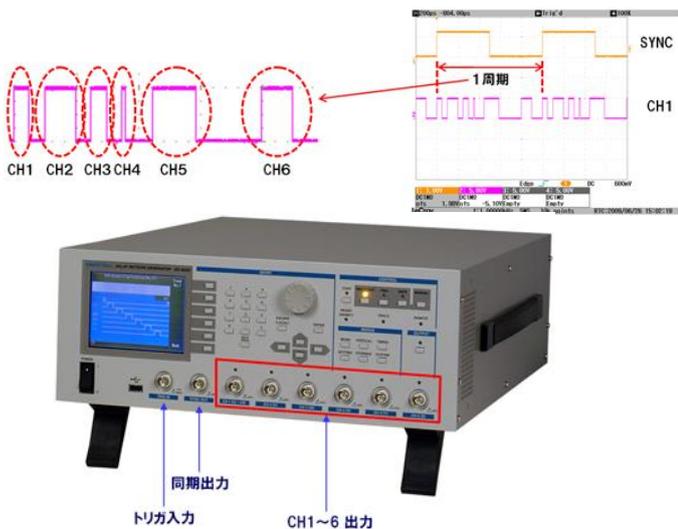
スイッチング電源のスイッチング速度の高周波化にともない、インダクタンスなどの受動部品のインピーダンスも広帯域で測定する必要が出てきています。

PSM3750 を使用してインピーダンスを測定するには、IAI2(Impedance Analysis Interface)オプションを使用します。PSM3750 は、IAI2 との組み合わせることで、外部シャントを使わず、4 線式ケルビン手法を使って LCR を正確に測定することができます。

IAI2 ではより高周波までのインピーダンスの測定が可能です。実際に圧電素子のインピーダンス測定事例を【図 45】に示します。圧電素子は、昇圧コンバータの圧電トランスなどに使われています。



【図 45. PSM3750 インピーダンスアナライザの測定】



【図 47. 任意のパルス幅、感覚のパルス生成例とディレイパターン・ジェネレータ DG-8000 の外観】

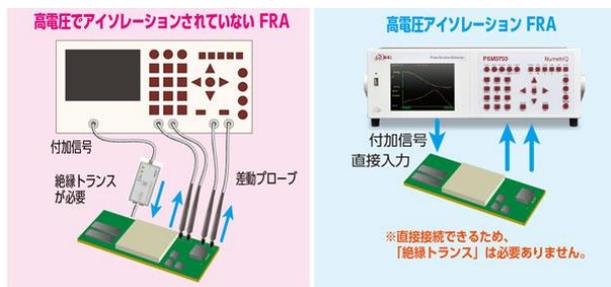
【フィードバック解析】

電源のフィードバックループの解析は、スイッチング電源のフィードバック系の高速化、スイッチング速度の高周波化、高周波域におけるトランスの特性やアイソレータ部品の特性など、使用される機器のアプリケーションによってフィードバックループの最適化を図る上で欠かせません。しかし、高電圧が印加している回路系に対して評価するには、絶縁トランスなどを利用して測定することが一般的に行われていました。

ここで、高電圧機器や電源入力部、スイッチング部などの検証を 500Vpk のアイソレーションで測定可能な周波数レスポンスアナライザ PSM3750 が威力を発揮します。

PSM3750 を使用すると、高電圧に対応できるため実際の電圧に合わせた測定が可能です。そのため、使用部品の実動作に近い特性での評価が可能となり、インダクタンスやコンデンサを含む回路系の特性を確実に捉えることができます。フィードバック解析やデバイスの特性試験において、アイソレーション・トランス不要で測定できることも魅力です。

図 46 に PSM3750 と他のモデルとの差を示します。



【図 46. インピーダンスアナライザの比較】  
 (左)PSM1700 シリーズ  
 (右)PSM3750 シリーズ

無償のリモートコントロールソフトウェアで、パソコンに直接データ転送することもできます。図35は、負帰還フィードバックループの安定性を評価した例を示します。このほか、パワーアンプ(N4L 社 LPA アンプシリーズなど)を用いて電源電圧変動による応答 PSRR(電源電圧変動除去比)特性を

解析することもできます。

6. インバータの制御

ディレイパターン・ジェネレータの制御機能を使うと特殊な知識や技術を必要としないで、インバータの動作検証、効率化検証が可能となります。複数台の信号発生器を組み合わせることで複雑なタイミング制御をする必要はありません。最大6チャンネルまでのパターンを簡単に作ることができます。

6チャンネル独立パルス制御で、連続する2つのパルス幅やパルス感覚を簡単に制御できます。単層バイポーラ、単層ユニポーラ、三相2レベルインバータの制御用 PWM 信号をキャリア周波数、偏重周波数、偏重度を設定するだけで生成できます。【図 47】に任意パルス出力例を示します。

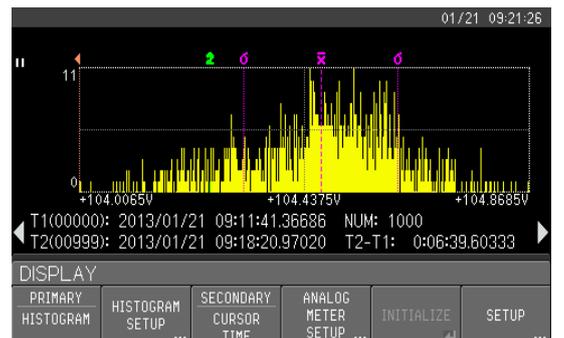
7. デジタルマルチメータを用いた電圧の監視

インバータや DC-DC コンバータなどの電源監視に利用できます。実測例は、一般的な実験室の電源ラインをモニタした結果です。電源電圧の変動の様子が分かります。

マルチメータ VOAC7602 の合否判定機能を活用すると、電圧変動が大きくなった場合にブザーを鳴らしたり、GO/HIGH/LOW 表示をわかりやすく表示させたりすることができます。エンジニアに注意を促せます。

また、マルチメータ VOAC7602 のヒストグラム機能を使用すると電圧ばらつきを視覚的に確認することができます。データは、USB ストレージに CSV 形式で保存され、PC 上で

【デジタルマルチメータ VOAC7602】



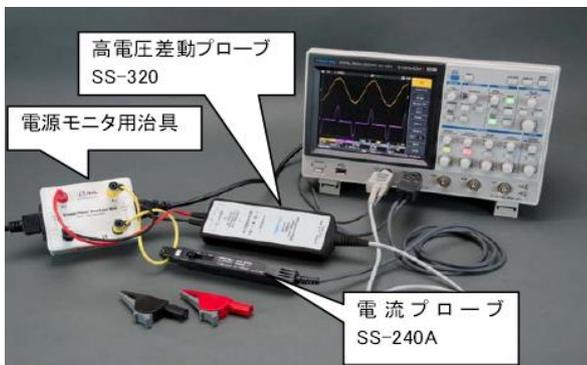
【図 48. 電源電圧変動をトレンドとヒストグラム表示】

グラフ表示や解析をすることもできます。

8. インバータ測定、パワーデバイス/モジュール試験

インバータは、回路をオン/オフすることで出力する電圧や電流を制御しています。実際にオン/オフするスイッチには MOSFET や IGBT などのパワーデバイスが使用されます。測定には【図 49】デジタルオシロスコープ、高電圧差動プローブ(SS-320)、電流プローブ(SS-240A)、100W クラス以下に利用可能な小電力インバータの入力電力モニター用治具などが使用されます。インバータ1相当りのシステムを【図 49】に示します。

スイッチング特性の試験項目には、ターンオン・ターンオフ・逆回復・短絡試験などがあります。数多くのパラメータを自動測定ソフトの使用で、簡単に特性を評価することができます【図 50】。制御ソフトがインストールされたパソコンから試験項目に応じてオシロスコープ(ViewGo シリーズなど)を自動制御し、各種パラメータを自動で表示します。



【図 49. インバータ測定セット】



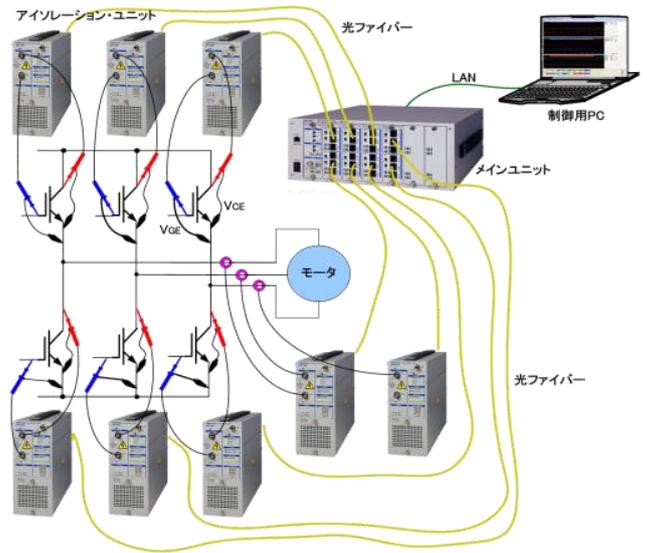
【図 50. 半導体パラメータ試験ソフト】

9. 三相 2 レベルインバータの測定

DM-8000H シリーズは光絶縁計測システムでインバータ波形を取り込む事にも優れています。共通モードノイズを軽減し、ハイサイドのスイッチング波形を確実に捕らえます。高電圧対応シングルエンド・パッシブプローブで自動車用インバータ、電車の用大電力インバータの測定に対応します。

【図 51 に】想定される接続例を示します。ハイサイド、ローサイドのゲート信号及びスイッチング電圧を同時に解析できます。最大 24ch 分の測定(高分解能モジュール DM910Ax シリーズの場合は 12ch)で各デバイス制御の最適化、GaN/SiC/MOSFET デバイスを搭載したモジュールの瞬時

の損失を捕らえ、電力アナライザで得られない電力損失の傾向を見極められます。



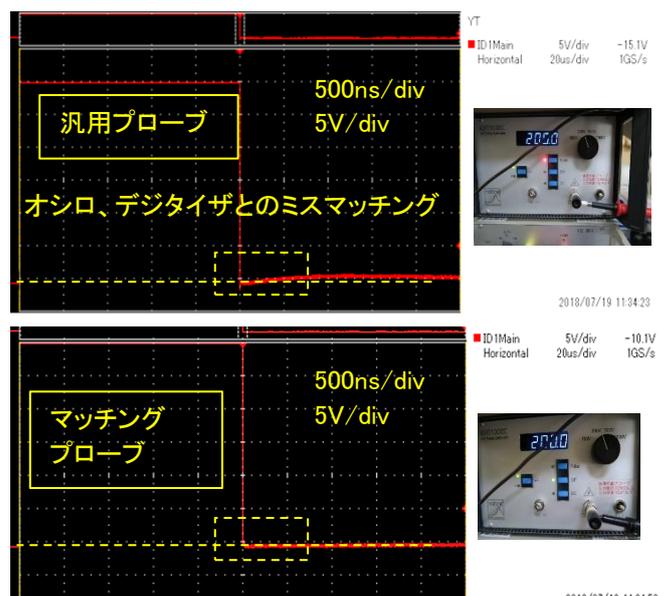
【図 51. 三相2レベルインバータのスイッチング測定例】

10. インバータの高分解能・高精度測定の問題

(1) 高分解能測定に必要なプローブ

高分解能で波形観測するとプローブの歪みが目立つことに気が付きます。もし、確認されていないのであれば、高電圧プローブ校正器などを活用して確認する事をおすすめします。

【図 52】はオシロスコープ/デジタイザとプローブのマッチングについて検証しています。高電圧パッシブプローブはプローブの調整が必要です。調整されていないと【図 52】のように 200V スwitching している波形 ON 直後が歪んでいます。



【図 52. インバータの高分解能測定】

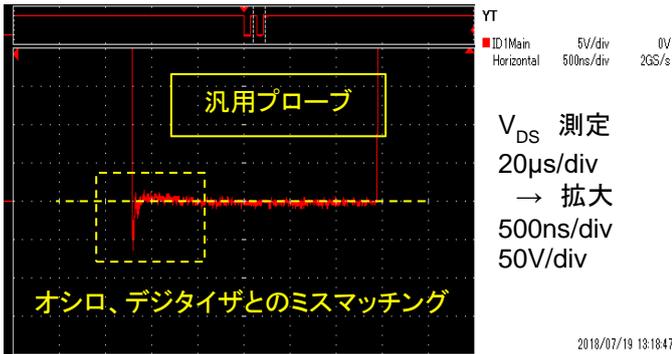
測定レンジは、V<sub>DS</sub> 20μs/div、で測定し 500ns/div で拡大。電圧レンジは 50V/div で測定可能なレンジを 5V/div レンジで拡大するとプローブの調整ができる範囲を超えた状態で

あった。最良点に合わせていますが、図(a)の様にはずれが目立ちます。一方、(b)はデジタイザとの相性が良いため、プローブを調整すると ON の直後の波形には歪みが見られていませんでした。

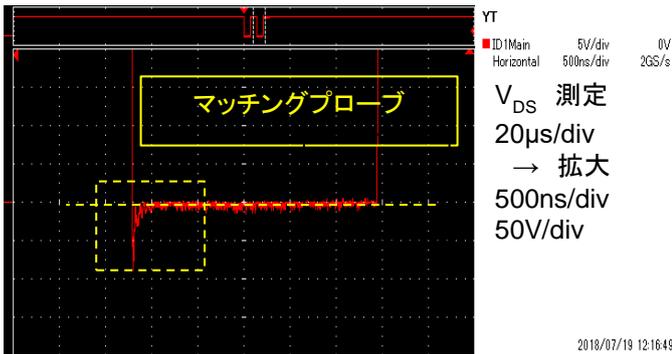
高電圧パルス校正器でこのような差が現れている事は、実際の波形でも同様な現象が見られるはずです。

【図 53】は、GaN デバイスのスイッチング電圧  $V_{DS}=200V$  のターン ON 波形です。ON する瞬間で大きな歪みを確認しました。

これはターン ON、ターン OFF スwitching 損失、Switching ON 時の最初の時間において差が現れます。高速デバイスの損失測定、電力変換効率の差異を見極める測定に支障する事になるでしょう。

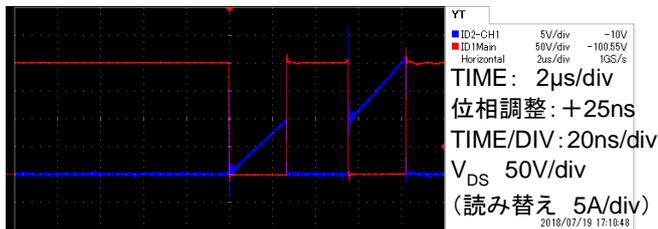


2018/07/19 13:18:47

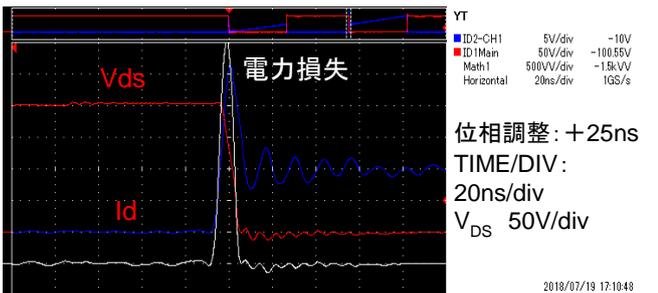


2018/07/19 12:16:49

【図 53. GaN スwitching  $V_{DS}$  波形の違い】



2018/07/19 17:10:48



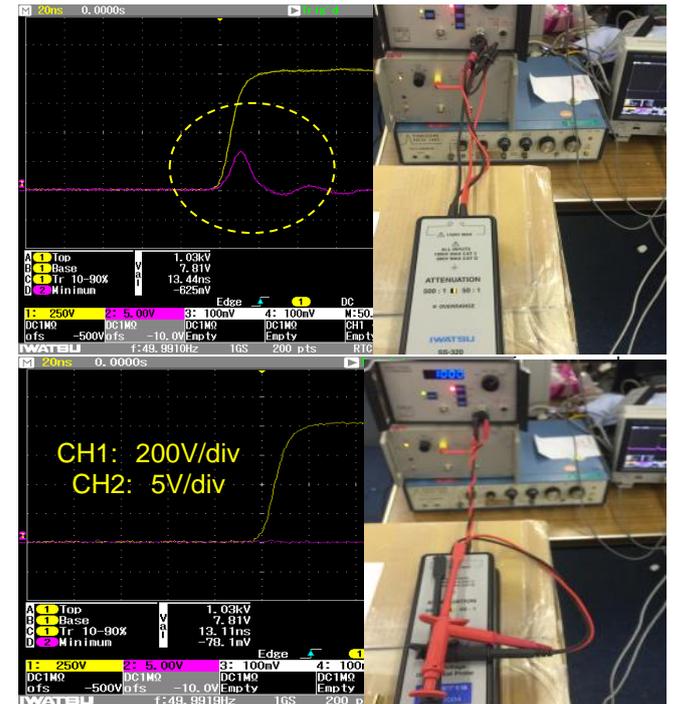
2018/07/19 17:10:48

【図 54. GaN スwitching 損失(ターン ON 損失)】

(2)瞬時電力の測定事例

【図 54】に GaN デバイスのターン ON 電力損失測定結果を示します。電流プローブ側の位相をパルス発生器にて+25ns の位相調整をしています。TIME/DIV:2µ/div で取り込み、20ns/div で拡大しています。プロービングには、前述の銅箔グランドロードによって低インダクタンス配線しており、波形歪みは抑えられております。電流プローブは、100MHz ログスキーコイル電流プローブと電流検出部に銅箔パターンを使い低インダクタンス配線にしており、Switching の歪みを抑えています。

(3)さらに目立つプロービングによる干渉



【図 55. 併走した場合の干渉】

差動プローブやバッシフプローブを併走させてプロービングはしてないでしょうか?

プロービングのリード、同軸ケーブルの配線などを併走させるとプローブ間の静電結合により、高電圧信号が高いに重畳し合います。【図 55】の例では、片側の CH1 に 1kV 信号入力、もう片側 CH2 は信号入力しない状態にしました。併走させることで、CH2 は無入力にも関わらず波形が現れていました。

プローブは、スペース、見た目でもまとめて設置しやすいですが、プローブ間で干渉することに注意して下さい。これは、電流プローブでも同様です。三相インバータなどの測定では、相間の距離が狭いことから、電流プローブや電圧プローブがお互いに干渉することがありますので、お互いなるべく併走されないように配線します。

理想的には、電流パターン、基板に対して直角にプローブを当てるようにすると電磁界の影響を避けやすくなりますが、複数本数の配線がある場合はなるべく互いの距離を離すようにします。

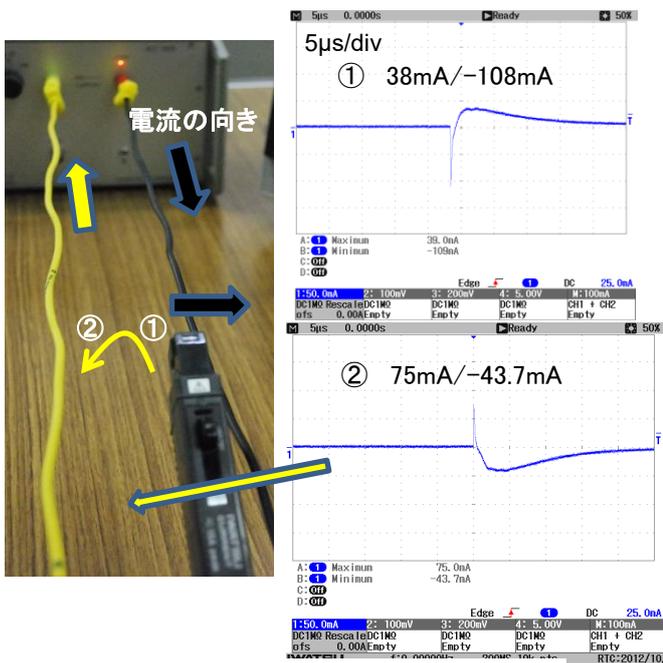
【測定ポイント 11】

プローブは互いを併走させないようにします。

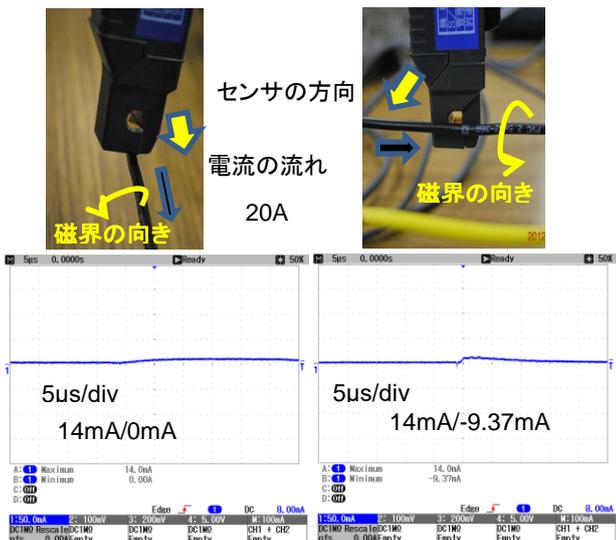
**(4)電流プローブの干渉**

電流プローブは、差動プローブと同様に他のチャンネルに干渉することになります。【図 56】は電流パルス 20A が流れる電流ラインに直接クランプせず、配線に併走させて配置しました。電流検出向きは右方向です。①の位置に電流プローブを近づけると、電流パルスの立ち上がり時にパルスが現れました。最大 -108mA です。②の位置では反対方向に電流波形が現れています。最大 75mA 流れていました。電流ラインに近づけると、電流振幅に対して 0.5%以上の影響が現れることが分かりました。これは、ターン ON 損失測定に影響を与えます。【図 56】の線路をツイストペアにすると、電磁界が相殺されて歪み低減を図れます。そこで、電流プロービングは以下の点に注意します。

【図 57】は電流プローブの配置を変えた時の電流波形です。電流プローブを直交するように配置することで、電磁界の影



【図 56. 電流プローブの干渉 1】



【図 57. 電流プローブの干渉 2】

響を抑えており、最大 14mA に抑えています。電流ラインに対して電流プローブのクランプ穴部を【図 57】の右の様に近づけると先ほどより電流値は上がりますが、併走させるよりも大幅に低減されていることがわかります。

**【測定ポイント 12】**

電流プローブを電流ラインに対して併走させない事と、電磁界の向きに対して直交させるように電流プローブを配置するようにして、外部電磁界の影響を避けるようにします。

**11. 電力損失を熱で捕らえる**

インバータの電力計測で温度計測しながら効率測定したり、評価基板のパワーモジュール、デバイスの熱破壊を防いだりする場面などで使われています。



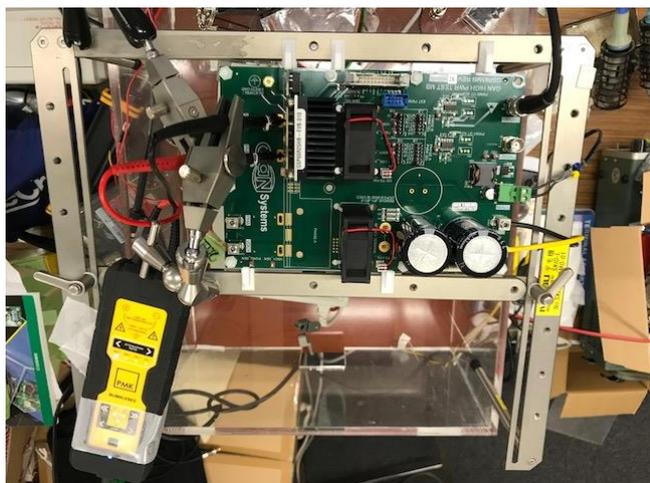
【図 58. インバータの電力測定時の温度計測】  
(首都大学東京和田研究室)

赤外線放射温度計(サーモグラフィ)FLIR 社の温度計で更に精細な温度計測も実現できます。【図 59】にある様なインバータモジュールに搭載されているデバイス、配線に発生する熱などです。細い配線材などを測定するには、高精細の測定器が必要です。



【図 59. FLIR サーモグラフィ(FLIR T1050sc)及び評価対象モジュール例】

## 使用したアクセサリの紹介



SKID-M/MSU-1500 を使ったプロービング事例

MSU 1500  
(893-350-006)  
着可能直径:5~17mm  
アーム長:200mm  
固定方式:  
1.2kg スチールベース



SKID M  
(893-500-010)  
サイズ:160mmx240mm  
高さ:20mm、100mm



SKID L  
(893-500-020)  
サイズ:300mmx340mm  
高さ:20mm、100mm



KHT-6000C  
500V ~ 6kV  
高電圧プローブ校正器  
 $T_{r20-80} < 45\text{ns}$



KHT-1000D  
100V/200V/500V/1kV  
高電圧プローブ校正器  
 $T_{r20-80} < 14\text{ns}$



KSZ100C  
20 / 50 / 100 A  
 $T_{r20-80} : 40 - 120\text{ns}$



## 【参考文献】

- GS665MB-EVB/GS66508T-EVBDB User's Manual / schematic diagram  
GaN Systems
- GSP65MB-EVB / GSP65R25HB-EVB: User's Manual / schematic diagram  
GaN Systems
- Printed Circuit Board Layout and Probing for GaN Power Switches  
Application Note AN-0003 Transphorm, Inc Zan Huang, Felix Recht and Yifeng Wu
- Design for Reliability: From Components to Systems  
Professional Education Seminar S17 APEC2017  
Center of Reliable Power Electronics (CORPE) Aalborg University, Denmark  
Frede Blaabjerg, Francesco Iannuzzo, Huai Wang
- GaN Transistor for Efficient Power Conversion Power Effect Technology Magazine  
Alex Lidow, Johan Strydom, Michel de Rooij, Yanping Ma
- JIPE-37-11 インバータの高電圧アイソレーション測定  
2011年8月6日
- JIPE-38-17 大電流、高電圧プローブの評価と使用上の注意点  
2012年10月20日
- 高度ポリテクセンター パワーエレクトロニクス計測のノウハウ セミナー  
2007~2017年
- これぞなっとくパワーエレクトロニクス  
コロナ社 (東京工科大学 高木教授)



- シミュレーション機材協力  
東京工科大学 高木教授研究室 (PSIM ソフトウェア)
- 大阪大 パワーエレクトロニクス技術に関する人材育成事業の展開  
プロービングセミナー資料 2018.01.27
- APEC2018 Exhibitor Seminar  
Comparison between Digitizer, Power Analyzer and  
CROSS POWER Method on Magnetic Material Analysis  
2018.3.7

**高電圧プローブセレクションガイド**

形式	パッシブ プローブ	アクティブ プローブ	高電圧 パッシブ プローブ	高電圧ベア パッシブ プローブ	汎用高電圧 プローブ	広帯域・高電圧 差動プローブ	光アイソレーショ ンシステム
外観							
減衰比の例	1:1 10:1 20:1	10:01	100:1 1001:1 2000:1	100:1 1000:1	50:1 500:1	50:1 100:1 250:1 500:1	プローブに依存 上記プローブ利用 可能
周波数帯域例	数MHz~ 500MHz	~2.5GHz	400MHz	400MHz	100MHz	400MHz	500MHz
入力抵抗・容量例	1MΩ//150pF 10MΩ//7.5-15pF	1MΩ//0.9pF	10-100MΩ //4-10pF	50MΩ//6-10pF	8MΩ //3.5 pF	10 MΩ // 2 pF	プローブに依存
電圧入力例	400V	8V	6kV	数kV~20kV	1kV	2kV	Wide Range
測定方式	シングル	シングル	シングル	差動ベア	差動	差動	光絶縁
測定事例 測定キーワード	ゲート信号 デジタル制御	ゲート信号 デジタル制御	スイッチング回路 ダブルパルス試験	スイッチング回路 ダブルパルス 試験	スイッチング回路 ダブルパルス 試験	スイッチング回路 ダブルパルス試験 インバータ回路 電力変換器 ハイサイド	スイッチング回路 ダブルパルス試験 インバータ回路 電力変換器 ハイサイド
GaNデバイス評価						最適	最適
SiCデバイス評価			最適	最適	最適	最適	最適
デジタル制御回路	最適	最適					

**岩通電流プローブセレクションガイド**

	ロゴスキーコイル <b>SS-68x/62x/28x/29x</b>	広帯域シャント抵抗 <b>T&amp;M RESEARCH</b>	ホール素子+CT <b>SS-240A/250/260/270</b>	シャント抵抗 <b>N4L HFシリーズ</b>	CT <b>PMK(LILCO)シリーズ</b>
外観または接続事例					
用途	波形観測用	波形観測用 (アイソレーション計測)	波形観測用	高精度電力計測	高精度電力計測
電流レンジ	中・大電流	大電流	小・中電流	小・中電流	中、大電流
精度	△ ±2%	× ±4%	○ ±1%	◎ ±0.1%	◎ ±1%
検出部 の絶縁	◎ クランプ式	× 回路に直接接続	◎ クランプ式	× 回路に直接接続	○ 塗装 カプトンテープ等で対策可
DC特性	× ACタイプ	◎ 直接入力	○ 間接入力	◎ 直接入力	◎ 直接入力
低周波特性 1Hz-1MHz	△ ACタイプ	◎ 直接入力	◎ ホール素子特性	◎ 直接入力	◎ 直接入力
高周波特性 >1MHz	○ 20MHz~100MHz	◎ ~2GHz	◎ 2MHz~100MHz	× 1MHz	○ 100MHz
磁気飽和	◎	◎	× 磁気飽和します	◎	○他のCT.より耐性あり
挿入方法	◎ クランプ式/貫通式	△ 回路を切断	○ クランプで用意	△ 回路を切断	△ 貫通式
出力形式	電圧	電圧	電圧	電圧	電圧

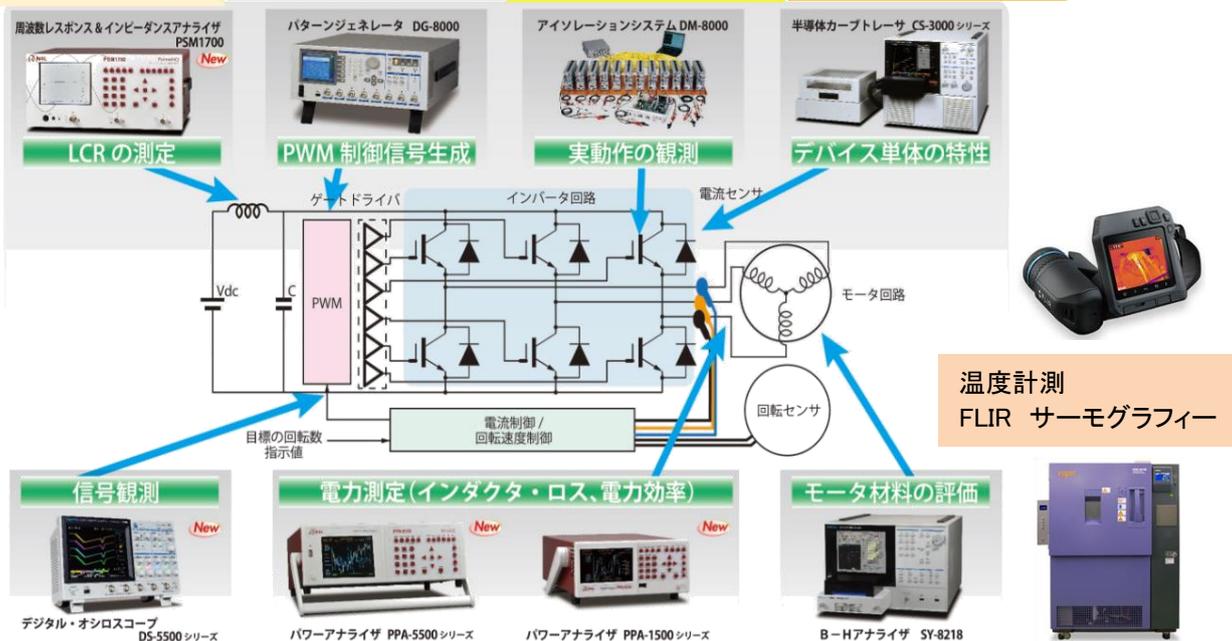
**瞬時電力損失～静特性試験&位相磁性体材料の損失測定**

電池、インダクタ、  
キャパシタ  
インピーダンス計測

タイミング制御

高電圧絶縁計測

高電圧・大電流  
パワーデバイスの  
静特性試験

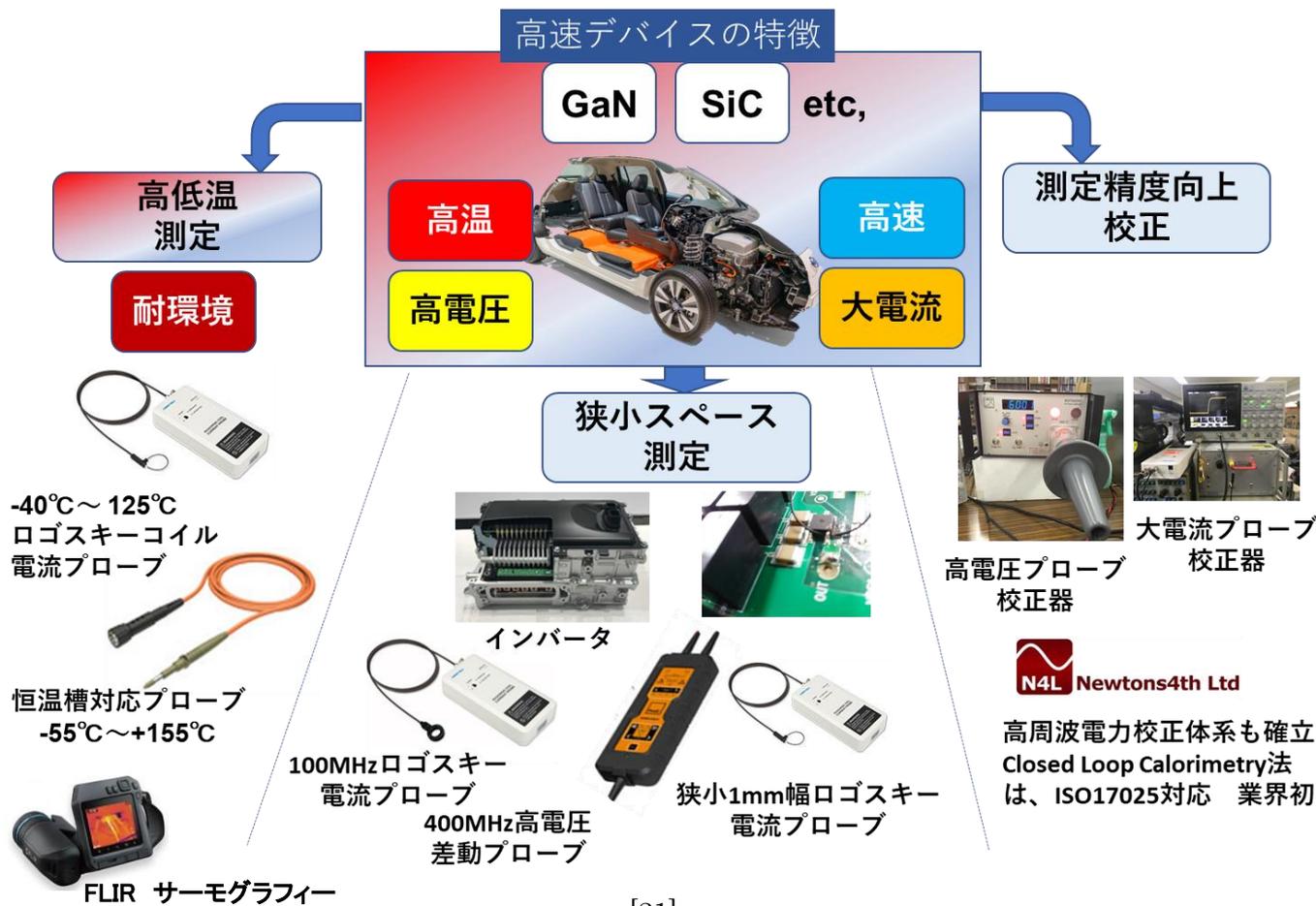


GaN/SiCの波形観測など  
幅広く対応

電力変換効率試験

AEC-Q200 Grade 0  
-55°C～+180°C対応  
磁性体材料損失試験

**GaN/SiC/MOSFET デバイス試験用プロービング**





**长沙力高捷创仪器有限公司**

电话:0731-85260926

地址:长沙市雨花区韶山南路  
亚商国际大厦A座2524室

网址:www.jectronic.com

邮箱:yujin.wu@miko.com.cn

〒168-8501 東京都杉並区久我山 1-7-41

TEL 03-5370-5474 FAX 03-5370-5492

**第二営業部**

**計測業担当/アカウント営業担当/フィールドサポート担当**

〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町 2-3-6

(山岡ビル 1F)

TEL 06-6535-9200 FAX 06-6535-9215

**西日本支店 計測営業担当**