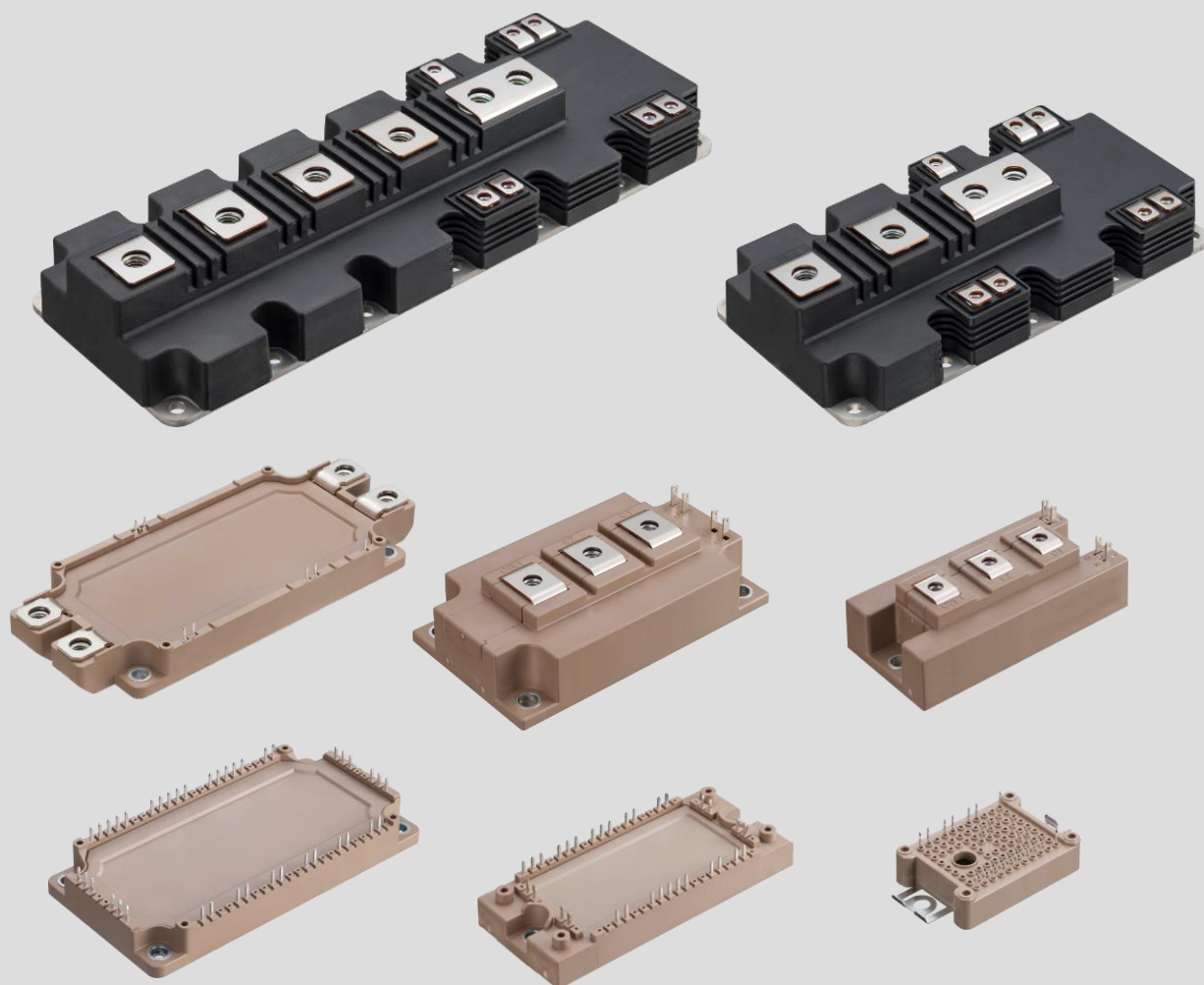




富士 IGBT モジュール 第9章 評価・測定方法

Application Manual

 注意

本資料の内容(製品の仕様、特性、データ、材料、構造など)は2025年1月現在のものです。
この内容は製品の仕様変更のため、または他の理由により事前の予告なく変更されることがあります。
このマニュアルに記載されている製品を使用される場合には、その製品の最新版の仕様書を入手して、
データを確認して下さい。

富士電機は絶えず製品の品質と信頼性の向上に努めています。しかし、半導体製品はまれに故障、誤作動が発生する場合があります。富士電機製半導体製品の故障または誤動作が、結果として人身事故・火災などによる財産に対する損害や社会的な損害を起こさないように冗長設計・延焼防止設計・誤動作防止設計など安全確保のための手段を講じて下さい。

本資料の記載内容は工業所有権、その他権利の実施に対する保障または実施権の許諾を行なうものではありません。

本資料に記載された製品は、人命にかかわるような状況下で使用される機器あるいはシステムに用いられることを目的として設計・製造されたものではありません。本資料の製品を車両機器、船舶、航空宇宙、医療機器、原子力制御、海底中継機器あるいはシステムなど、特殊用途への使用に対して弊社は一切の責任を負いません。

本資料には製品を保証する項目が記載されていますが、製品が顧客装置に組み込まれた際の特性及び品質に対して保証するものではありません。製品を使用される際は、製品が使用されるアプリケーションにて評価いただいた上で、適用側の責任において適用可否を判断して下さい。

富士電機は、適用可否に対する責任を負いません。

第9章 評価・測定方法

1. 適用範囲	9-2
2. 評価・測定方法	9-2

本章では、IGBTモジュールの特性評価方法及び電圧、電流の測定方法について説明します。

1. 適用範囲

本章では、スイッチング周波数：数kHz～20kHz、装置容量：数百VA以上のパワーエレクトロニクス製品に適用されるIGBTモジュールの特性評価方法及び電圧、電流などの測定方法について説明します。

2. 評価・測定方法

2.1 評価・測定方法の概要

パワーエレクトロニクス応用装置の開発、或いは試験段階では、実際に装置に組み込まれた状態で電力用半導体素子の特性評価や素子責務の測定などを行なう必要があります。評価項目と測定方法の概要を表9-1に示します。

表9-1 評価項目と測定方法の概要

No.	評価項目	測定項目	測定方法	測定器例
1	絶縁耐圧	電圧	素子の電極部を予め短絡し、導電部と装置のフレーム間に電圧を印加します。	耐圧試験器
2	素子の耐圧		G-E間を短絡してC-E間に電圧を印加します。 ※印加電圧が回路に接続した機器の定格をこえる可能性がある場合はこれらを開放してから行ないます。	カーブトレーサ
3	飽和電圧		動作時の飽和電圧の測定はC-E間に電圧クリップ回路を接続し、オシロスコープ内蔵アンプが飽和しないようにして測定します。 ※静的な特性はカーブトレーサ又はパルス h_{FE} メータで測定します。	オシロスコープ
4	ターンオフ時のサージ電圧	電圧	コレクタ・エミッタ共に素子の端子間の電圧を直接測定します。	オシロスコープ
5	スイッチング時間	電圧 電流	各々スイッチング時間の定義に従い、所要の電圧、電流波形を測定します。	オシロスコープ 電流プローブ
6	電流分担 (並列使用の場合)	電流	治具及び計測用変流器を用いて個々の素子に流れる電流を測定します。	オシロスコープ 電流プローブ
7	スイッチング損失	電圧 電流	スイッチング時に素子に流れる電流と素子の端子間電圧との瞬時値の積から電力を得ます。これを所定の期間積分して、スイッチング1回当たりの発生損失を求めます。 (1) 電圧・電流波形を基に計算で求めます。 (2) 演算機能付測定器を使う方法もあります。	オシロスコープ
8	動作軌跡		スイッチング時に素子に流れる電流と素子の端子間電圧を電流－電圧平面上にプロットして得ます。	X-Y表示機能付 オシロスコープ
9	ケース温度	温度	IGBT下の銅ベースの温度を測定します。 ※一般に銅ベース温度とは第6章の図6-7で示したA点の値です。	熱電対温度計
10	接合温度		IGBT(例えば飽和電圧)の温度特性に着目し、予め、接合温度と素子特性の校正カーブを作成し、実際に動作中の素子特性を測定して接合温度を推定します。 ※直接接合温度を測定する方法として、サーモビューアを用いた方法があります。	サーモビューア

2.2 電圧の測定

IGBT動作時の電圧測定は、大振幅の高速スイッチング動作に起因するノイズの影響を受け易いので注意を必要とします。

(1) 測定器と校正

対象の電圧は値と共にその波形も重要です。通常、測定器はオシロスコープを使用し、電圧測定には電圧プローブを用います。オシロスコープとプローブの組合せが変わるとプローブ/オシロスコープの電圧分割素子RCの時定数が変動します。このためプローブを使用する前には必ず、オシロスコープの校正端子にプローブを接続して全周波数帯域で減衰が一樣になるようにプローブ補正を行なう必要があります。

適切な感度に設定(一般に表示面3~4div振幅)し、入力結合をDCに行ないます。プローブの調整用容量とオシロスコープの入力容量が適合しないと調整がとれませんのでプローブ選択には注意が必要です。なお、オシロスコープ及びプローブの選定方法については2-5、2-6項を参照して下さい。

(2) 飽和電圧の測定

一般にIGBTを使用する回路の電圧は数百Vと高いのに比べ、飽和電圧は数V程度と低い値となります。一方、オシロスコープの画面の大きさは有限であり、飽和電圧を精度良く読み取ろうとして電圧感度を上げると、オシロスコープ内部の増幅器が飽和するなどの影響で実際の波形と異なった波形が画面に現れます。したがって、スイッチング動作中のIGBT飽和電圧は、素子のC-E間電圧を直接オシロスコープで測定する方法では得られません。

そこで、飽和電圧を測定する方法として、例えば図9-1に示す電圧クリップ回路を付加して測定する方法があります。

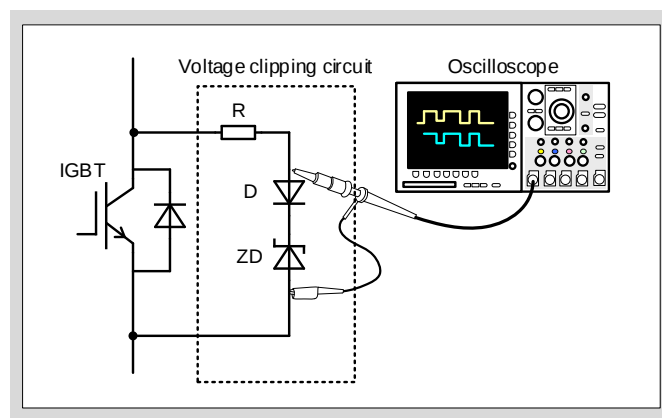


図9-1 動作時の飽和電圧の測定方法

図9-1においてツェナーダイオードZDはIGBTがオフ時の高電圧を制限するためのもので、通常ツェナー電圧が10V以下のものを使用します。Rは電流制限用抵抗であり、IGBTがオフ時には回路電圧のほとんどがこの抵抗に加わるため、比較的大容量の抵抗器が必要となります。ダイオードDはツェナーダイオードZDの接合容量に蓄えられた電荷の放電を防止し、接合容量と電流制限抵抗によるRCフィルタ形成を防いでいます。

(3) サージ電圧の測定 (C-E間電圧 V_{CE} の測定)

IGBTはスイッチングスピードが速いという利点がある一方、ターンオフ時の電流変化率 di/dt が大きく、応用装置の主回路配線インダクタンス L_S に誘起する電圧も大きくなり、直流回路電圧に重畳され、スパイク状の電圧となり、素子に加わります。この電圧はサージ電圧と呼ばれ、その電圧が素子の最大定格に対し、所定の電圧余裕を持った値となっていることを確認する必要があります。

サージ電圧は素子の端子間電圧をオシロスコープで測定し、画面の表示値を直読して得られますが、測定に際し以下の注意が必要です。

- 十分な周波数帯域を持ったプローブ及びオシロスコープを使用する。
- オシロスコープの感度調整、プローブの周波数補正を事前に行なう。
- 測定用プローブは素子の端子に直接接続する。

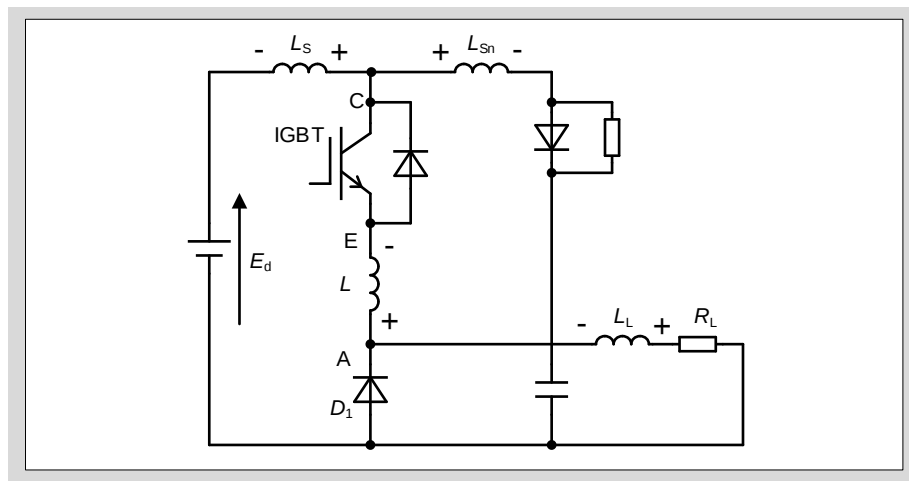


図9-2 サージ電圧測定回路(例)

図9-2に示す回路でIGBTターンオフ時のサージ電圧を測定する場合、回路各部のインダクタンスには図示の極性の電圧が誘起します。今、サージ電圧を測定しようとして V_{CE} ではなくC-A間電圧 V_{CA} を測定した場合は、実際の V_{CE} よりも $-L \cdot di/dt$ だけ低い誤った電圧を測定することになります。したがって、IGBTのサージ電圧を測定する場合、IGBTモジュール端子に直接電圧プローブを接続するなど、 L_S の影響を極力小さくした状態で測定する必要があります。

- プローブの測定用リードは最短とする。
- ノイズの混入に注意する。

電圧プローブを被測定回路に接続した場合、オシロスコープの基準電位は、スイッチング回路と同電位になります。スイッチング回路の対地電位変動が大きいと、オシロスコープの電源ラインを介して共通モードの電流が流れ、オシロスコープ内部の回路に誤動作を引き起こすおそれがあります。ノイズの混入の有無を確認する方法としては、以下が挙げられます。

- a. 測定波形が物理的に説明がつけられるか否かを検討する。
- b. ノイズの影響を受け難い、バッテリー電源タイプのオシロスコープで測定した波形と比較する。

(4) ゲート電圧の測定 (G-E間電圧 V_{GE} の測定)

V_{GE} はサージ電圧と同様にオシロスコープで直接測定可能です。しかしIGBTのゲートは容量性負荷であり、電圧プローブも容量性のインピーダンスがあることから、動作時に電圧プローブを着脱して測定しないで下さい。また、測定に際してはサージ電圧測定と同様の注意が必要です。

2.3 電流の測定

電流の測定には電流プローブを用いますが、実際の装置では、 L_S の低減や装置構造を簡略化するため、装置の主回路はコンパクトにまとめられています。このため、素子の電流を測定するには配線を延長しなければなりません。この影響をできるだけ小さくするため変流器を用いて延長配線の最短化を図ります。また電流プローブの測定能力にも限界があることから変流器の使用が必要となります。

電流プローブは、導電部と絶縁を保っての電流測定が可能です。信号レベルが小さいこと、電磁誘導を利用した検出器のため誘導によるノイズを受け易いことなどから、ノイズが混入しないよう注意して下さい。

(1) 測定器

電流検出器の例を表9-2に示します。

表9-2 電流検出器の例

No.	品 名	型 式	メーカー	備 考
1	DC電流プローブ 専用増幅器、電源要	A6302型	テクトロニクス	回路電圧最大値: 500V DC~50MHzで20Aまで ピークパルス電流50Aまで
2		A6303型		回路電圧最大値: 700V DC~15MHzで100Aまで ピークパルス電流500Aまで
3	AC電流プローブ	P6021型		回路電圧最大値: 600V 120Hz~60MHz 15Ap-p ピークパルス電流250A
4		P6022型		回路電圧最大値: 600V 935Hz~120MHz 6Ap-p ピークパルス電流100A
5	ACCT	様々有り	ピアソン	~35MHz
6	ロゴスキーコイル式 電流波形測定器 (電流プローブ)	CWT型	PEM	測定電流範囲: 300mA~300kA 周波数範囲: 0.1Hz~16MHz

(2) 電流プローブの感度の確認

測定に先立ち、プローブの感度を確認しておく必要があります。

電流プローブの校正はオシロスコプの校正出力を使用して行なうか、図9-3に示すような発振器を用いて行なう方法があります。図9-3の方法は既知の抵抗 R (無誘導)を使用して R の両端電圧 e を測定し、電流 i を求めます。電流と電流プローブの波形を比較し、電流プローブの校正をします。 i が小さい場合は、電流プローブの一次巻数を増やすことで感度を上げられます

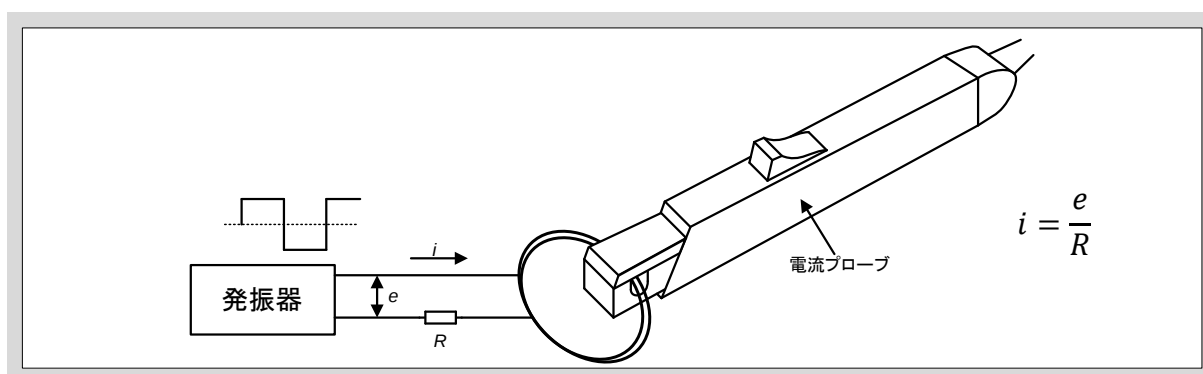


図9-3 電流プローブの校正方法

(3) 電流の測定方法

2素子並列接続を例に、素子電流を測定する時の変流器CTの挿入位置と、電流の測定方法を図9-4に示します。正極側 T_{11} の電流を測定する場合、 CT_1 の2次側電流を電流プローブで測定します。また、 T_{12} の電流は CT_2 の2次側電流を電流プローブで測定します。正極側アームの電流(T_{11} の電流と T_{12} の電流の和)は CT_1 、 CT_2 の2次側電流の向きを合わせてから一括して測定することで、同じ電流プローブで測定できます。

電流プローブ及び変流器の適用については2-6、2-7項を参照して下さい。

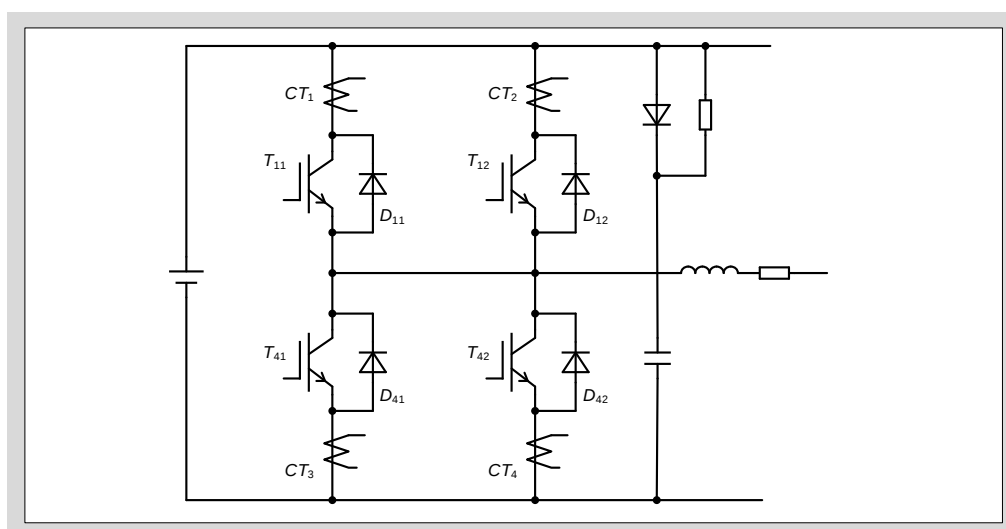


図9-4 CTの挿入位置と電流測定方法

2.4 スイッチング損失の測定

スイッチング損失は、スイッチング開始時点からスイッチング動作が終了し定常状態になるまでの期間の発生損失を表します。例えばターンオン損失は V_{GE} が0Vを横切ってから V_{CE} が飽和電圧に到達するまでの間IGBTに発生する損失です。

スイッチング損失は通常、スイッチング1回当たりの発生エネルギーで表します。

図9-5にスイッチング動作波形とスイッチング損失の例を示します。スイッチング損失を測定するには、まず電流・電圧波形を正しく測定しなければなりません。個々の測定方法については前述の通りですが、電流と電圧を同時に測定しようとすると、電圧プローブ側から流入する共通モード電流によって、電流波形に歪みが生じることがありますので注意が必要です。影響の有無は、電圧プローブ接続前後で電流波形に歪みが生じるか否かで判断できます。電流波形に歪みが生じる場合、図9-6に示すように電圧プローブのケーブル及びオシロスコープの電源ケーブルに共通モードチョークコイルを挿入(高周波特性の優れたコアにケーブルを巻きつける)すれば、波形の歪みは軽減されます。

この他、基準となる0V、0Aの設定も重要です。特にAC電流プローブを使用する場合は、測定電流の値や通流率によって0Aの位置が変化しますので注意が必要です。

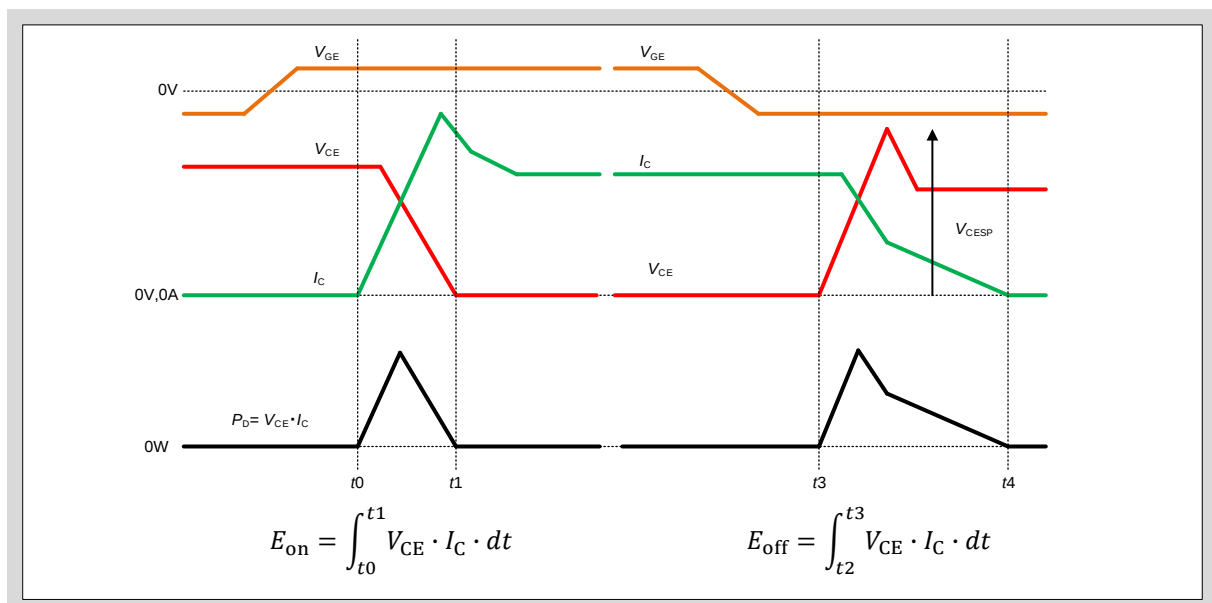


図9-5 スイッチング損失

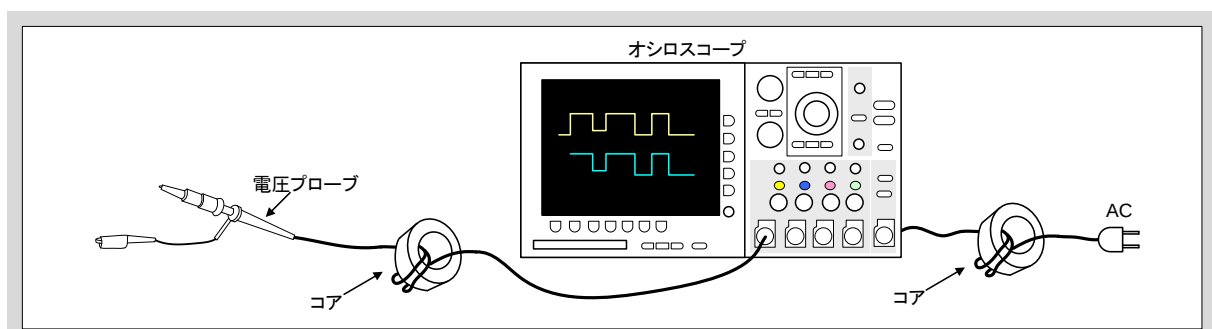


図9-6 コモンモードチョークコイルの挿入方法

2.5 オシロスコープの選択

オシロスコープには様々な機能・性能のものがあり、測定項目や測定対象とする信号変化の速さによって、適切なものを使い分ける必要があります。本項では信号源の立上り時間と使用するオシロスコープの所要周波数帯域について概説します。

(1) パルス波形の立上り時間と周波数帯域の関係

パルス波形の立上り時間は図9-7に示すように電圧が10%から90%まで変化するのに要する時間で定義されます。

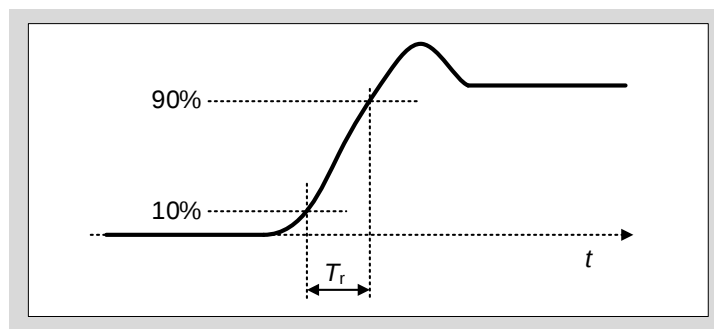


図9-7 パルス波形の立上り時間の定義

立上り時間 T_r が-3dBとなる周波数を F_{-3dB} とすると、これらの間には次の関係があります。

$$T_r \cdot F_{-3dB} \doteq 0.35 \quad \text{.....(1)}$$

(2) 信号源の立上り時間 T_{r1} とオシロスコープの選択

実際の測定系における各部の立上り時間は図9-8で表されます。

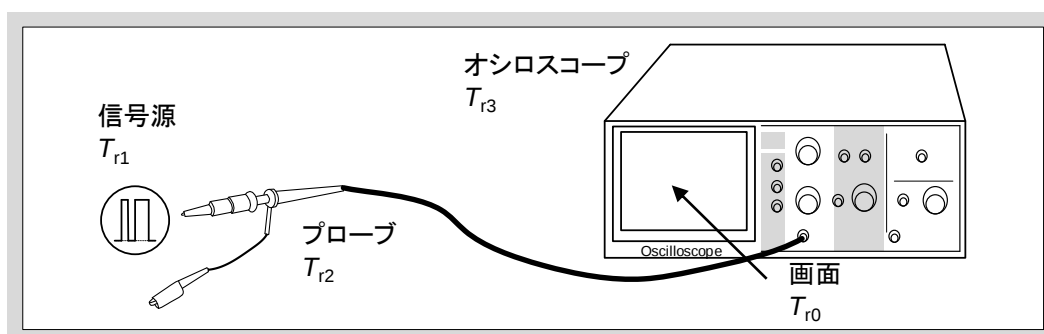


図9-8 測定系と各部の立上り時間

オシロスコープの画面上に表示される波形の立上り時間 T_{r0} は各部の立上り時間によって決まり、次式で与えられます。

$$T_{r0} = \sqrt{T_{r1}^2 + T_{r2}^2} \quad \text{.....(2)}$$

信号源の波形を正しく再現するには $T_{r0}=T_{r1}$ とすればよいため、

$$\varepsilon = \frac{T_{r0} - T_{r1}}{T_{r1}} \times 100(\%) \quad k = \frac{T_{r2} + T_{r3}}{T_{r1}} \quad \text{.....(3)}$$

として、(2)式を用いて ε と k の関係を求めると表9-3のようになります。

表9-3 波形の測定誤差と信号源及び測定器の立上り時間比率

ε (%)	1	2	3
k	7	5	4

これより、例えば立上り時間が3.5nsecの信号を3%の精度で測定するには、プローブとオシロスコープの立上り時間の合計は信号源の立上り時間の1/4($3.5/4=0.87\text{ns}$)以下でなければなりません。プローブの立上り時間を無視した場合、(1)式からオシロスコープの所要周波数帯域は $0.35/0.87 \times 10^{-9} \approx 4 \times 10^8$ すなわち400MHzとなります。したがって、オシロスコープは400MHz以上の周波数帯域を持つものを使用しなければなりません。

以上のように、信号の立上り時間の長短によって、使用するオシロスコープを選択しなければならないことがわかります。

2.6 プローブの選択

プローブは前述の通り、電圧プローブと電流プローブがあります。

本項ではこれらプローブを選択するための基本的な事項と、使用上の注意について説明します。

2.6.1 電圧プローブ

(1)立上り時間

2.5項に記載したように、信号立上り時間の長短に応じて使用するプローブの周波数帯域を考慮する必要があります。考え方はオシロスコープの場合とまったく同じであり、ここでは省略します。

(2)信号源インピーダンスとプローブ容量の立上り時間に対する影響

測定系の電氣的な等価回路を図9-9に示します。 R_1 、 C_1 は信号源の出力インピーダンスと容量、 R_2 、 C_2 はプローブ及びオシロスコープの入力インピーダンス及び入力容量を示します。

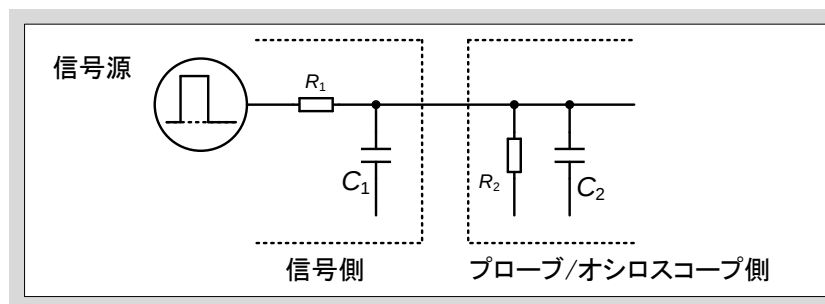


図9-9 測定系の電氣的等価回路

RCフィルタの場合立上り時間(T_r)は

$$T_r = 2.2 \cdot R \cdot C$$

で表され、図9-9の場合、 R 、 C はそれぞれ下記となります。

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad C = C_1 + C_2$$

これより、以下のことが判ります。

- 信号源の出力インピーダンスが大きい場合は立上り時間が長くなる。
- プローブやオシロスコープの容量が大きい場合も同様に長くなる。

例えば、通常使用される受動形10:1プローブ($C_2=9.5\text{pF}$ 、 $R_2=10\text{M}\Omega$)を用いて、信号源($R_1=500\Omega$ 、 $C_1=2\text{pF}$)の信号を測定した場合、プローブを接続しない時の立上り時間2.2nsに対しプローブ接続時の立上り時間は12nsとなり、大きな誤差を生じることになります。

(3) プローブの選択

測定目的に応じたプローブの選択条件及び測定上の注意を表9-4に示します。

表9-4 測定目的に応じたプローブの選択目安

測定目的 項目	振幅の測定	立上り時間etc.	位相(差)
使用するプローブの要件	使用する周波数帯域で入力インピーダンスが高いこと。	信号源の立上り時間に対し、十分な周波数帯域を持っていること。	入力容量が小さいこと。 ケーブル長、特性が揃っていること。
測定上の注意	パルス幅はプローブ、オシロスコープの時定数の5倍以上であること。 できるだけ低インピーダンスの信号源を測定点に選ぶ。	同左	予めプローブ間の時間差を測定しておくこと。 ※ 3.5フィートプローブの遅延は5ns

(4) 使用上の注意事項

信号を正しく測定するには、プローブの特性を理解し、適切なものを選定しなければなりません。プローブを実際に使用する場合の注意事項を以下に示します。

- a. 測定目的に適したプローブを選択しているかどうか
- b. プローブの周波数補正は適正かどうか
- c. 最大入力電圧(耐圧)は十分であるかどうか
- d. プローブの負荷効果は影響していないか(最適な測定ポイントの選択)
- e. グラウンド(アース線)の取り方に問題がないか
- f. 機械的、物理的に無理がないかどうか

特に高速スイッチング素子のパルス測定を行なう場合、グラウンドリードのインダクタンスとプローブ容量により共振を生じることがあります、特に広帯域のオシロスコープほど顕著に発生します。この共振はグラウンドリードを短くし、プローブ先端でグラウンドを取ることで対策できます。必要なアダプタは通常アクセサリとして付属されています。

また、誘導によるノイズの混入を防ぐため、図9-10に示すように複数のプローブ個々にグラウンドリードを接続する場合があります。但しこの場合、グラウンドリードを接続する点の電位は等しくなければなりません。

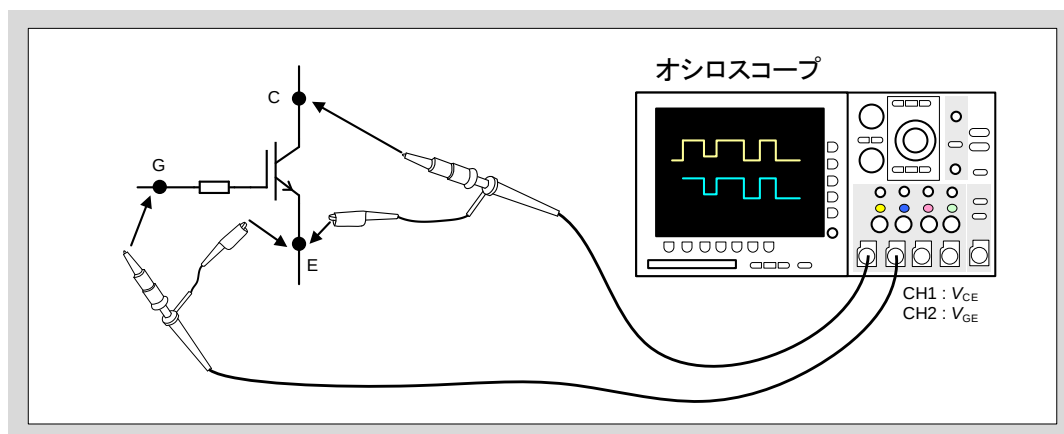


図9-10 電圧プローブの接続

2.6.2 電流プローブ

電流プローブの種類と概要は2.3項に示した通りです。ここでは実際に使用する上での注意事項を主体に説明します。

(1) 電流プローブの選択

電流プローブには前述の通り、直流電流プローブと交流電流プローブがあり、高速スイッチング動作時の電流波形測定には耐ノイズ性に優れた後者が推奨されます。

交流電流プローブに直流、または低周波の交流電流を流すと、プローブ内のコアが飽和し、出力が得られなくなります。したがって、直流または低周波の交流を扱う回路に使用するIGBTのスイッチング動作を測定するには、実際の動作を模擬するためのタイミング制御回路を製作、使用するなどの工夫が必要です。

(2) 使用上の注意事項

- a. 電流プローブ先端にはフェライトコアが収納されており、衝撃に対し極めて弱いので、落下などがないよう取り扱いには注意して下さい。
- b. 定格を超えないよう注意して下さい。
 - ・ 耐電圧……………回路電圧が高い場合は測定部に耐圧チューブをかぶせる。
 - ・ A-S(電流積)……………パルス電流定格を示す。過大な電流を流すとプローブが破壊することがあります。
 - ・ 耐最大RMS電流……プローブ内トランス2次側回路の電力容量から制約されています。

したがって、これを越えると、プローブが焼損することがあります。

- c. クリップ形の場合は確実にクリップして測定を行なって下さい。
- d. 電流プローブを回路にクリップしたまま二次側を開放にしないで下さい。
(特にターミネータの無い場合は二次側に高電圧が発生します。)
- e. 挿入インピーダンス

プローブを挿入することにより、一次側回路には挿入インピーダンスが生じます。挿入インピーダンスが測定対象に影響を与えないことが重要となります。

プローブを理想トランスとした場合、挿入インピーダンスは図9-11に示すように表されます。

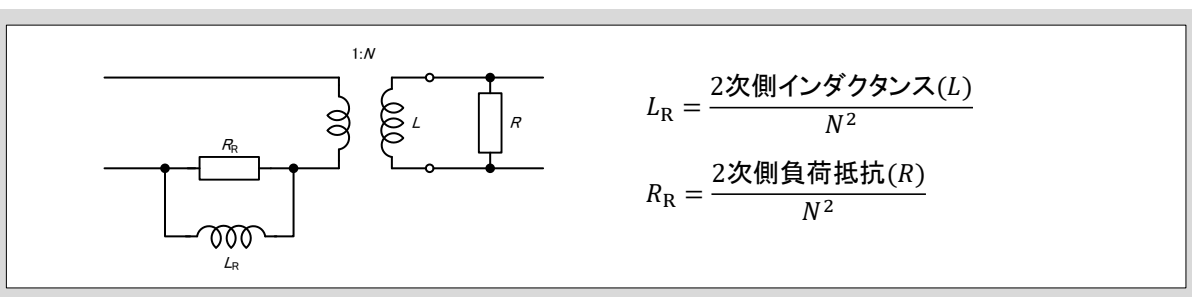


図9-11 プローブの挿入インピーダンス

2.7 変流器の使用

電流プローブの適用範囲に制約があること、及び測定のための部分的な変更が回路動作に及ぼす影響を最小にするため、変流器を使用する場合があります。変流器の挿入位置と電流の測定方法は9.2.3項を参照して下さい。

変流器の巻数比を N とし、一次電流を I_1 、二次電流を I_2 とすると、理想的な変圧器の場合には $I_2 = I_1/N$ で表されますが、励磁電流 I_0 を考えると、

$$I_0 = I_1 - N \cdot I_2$$

となります。励磁電流 I_0 は測定誤差となるため十分小さな値でなければなりません。変流器については N を確認し、 I_1 、 I_2 を測定して上式より I_0 を求め、測定精度に問題がないか確認する必要があります。また、変流器に使用するフェライトコアは機械的強度が小さいことから、落下などがないよう注意して下さい。