

トランジスタ技術 SPECIAL

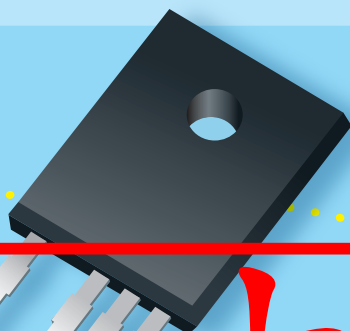
トランジスタからヒューズまで! 高効率・低損失な設計のために

パワエレ回路技術 部品特性から入門

power
semiconductor

IGBT

SiC



MOSFET

見本

transformer &
inductor

GaN

実務
教科書
「学ぶ」を応援!

パワエレ回路は 部品からおさえるべし

岡田 芳夫 Yoshio Okada

パワエレはこれから大注目 進化中の分野

● 電力効率の向上を使命とする

私たちの身の周りにある製品の多くは、電力で動いています。それらの製品において電力の供給を担当しているのが、パワー・デバイス(パワー半導体)です。

社会を支える基盤を見ても、電力発電、情報機器、交通車両(車や鉄道車両)、通信放送、工場など、幅広い分野で電力が使われており、電力変換機器が活躍しています。

「パワー(電力)」と「エレクトロニクス(半導体デバイス)」、「コントロール(制御)」にかかわる技術分野を「パワー・エレクトロニクス(パワエレ)」と呼びます(Dr. Newellが1973年に定義)。パワエレはすべての社会と家庭を動かすエレクトロニクスといえます。そして、パワー・デバイスには、電力効率の向上が求められています。

社会生活の利便性や快適さを得ながら、地球温暖化防止や廃棄物処理、環境ホルモンに対処するためにもパワエレは重要です。人類の将来に大きく影響するといっても過言ではありません。

パワエレ回路の 基本構成と主な部品

パワエレ部品がどのようなものを説明するため、パワエレ回路の構成例を図1と図2に示します。キー部品の大まかな動作の役割がイメージできると思います。

ひとくちにパワエレといっても、扱う電力量や動作周波数は幅広いです。図1はAC100V入力のスイッチング電源回路、図2はリチウム電池などの直流電源(400Vなど)で駆動する電気自動車(EV)用インバータ回路です。

● スイッチング電源

一般的な絶縁方式の回路ブロック構成を図1に示します。商用の交流電源を入力し、ノイズ対策用(EMC)ライン・フィルタを介して、整流回路(ブリッジ・ダイオード)と平滑コンデンサで直流の整流電圧を得ます。整流電圧はPFC(力率改善回路)を通り、MOSFETのLLC共振方式によるスイッチングによって、高周波トランスを通じて2次側へ電力を変換します。アイソレーション(絶縁)した2次側電力は整流さ

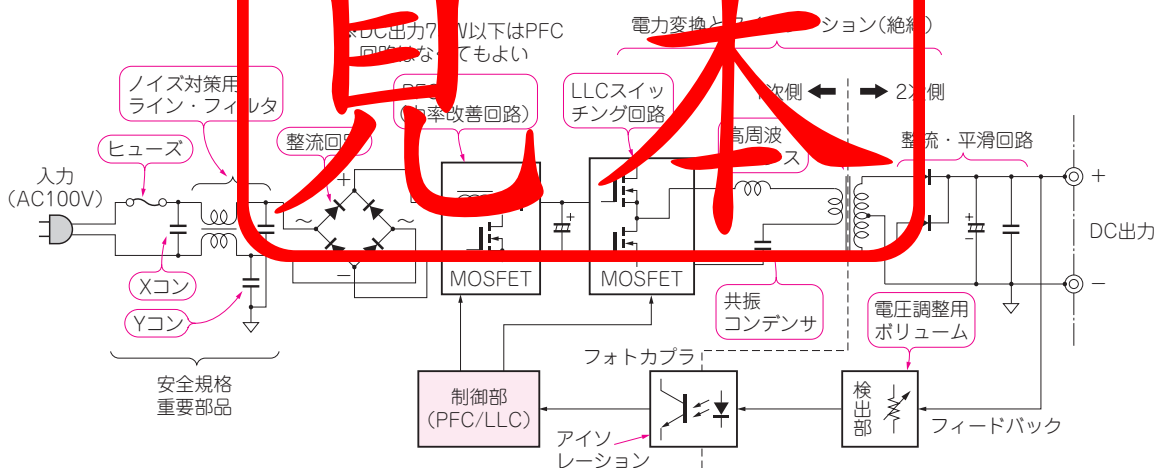


図1 AC100V入力 スイッチング電源の回路構成例

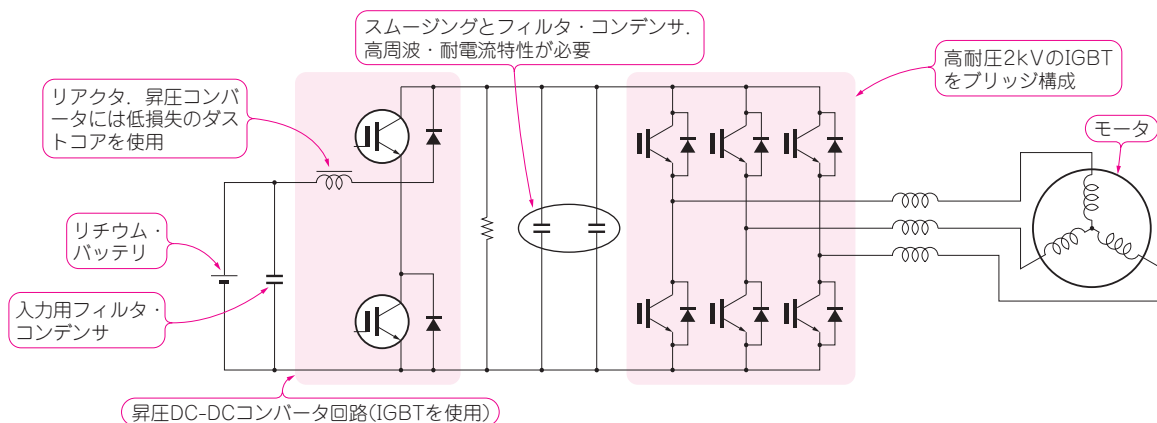


図2 EV用インバータの回路構成例

れ、DC電圧を出力します。また、出力電圧を、フォトカプラを介して1次側へフィードバックすることで、安定した制御を行います。

● EVインバータ

図2のインバータ回路は、3相のEV用交流駆動モータの回路ブロックを示しています。

リチウム電池などの直流電源を入力し、入力電圧を昇圧コンバータで高め、3相のIGBTブリッジ回路へ供給します。この昇圧コンバータのリアクタは直流重畳特性の良い、うなり音の発生しないダストコアなどが使われます。インバータ回路の入力コンデンサはスミージングとノイズ・フィルタ用で、高周波特性の良いフィルム・コンデンサなどが使われます。入力電圧を上げて、電力効率、馬力、燃費などEVとして総合特性を高めることができます。

特に重要なパワー半導体と進化

電力効率の向上に中心的な役割を果たす一部品は、なんといっても、電力変換のためにON/OFFを繰り返すパワー半導体素子（スイッチング素子）です。また、磁気部品であるトランスやインダクタ（コイル）、共振回路であれば共振タンクや力率改善コンデンサ、フィルタなども重要です。

● パワー半導体の種類

パワー半導体は大別すると、整流作用をするダイオードとスイッチングするトランジスタ、MOSFET、IGBT、GaN、SiCなどがあります。

GaNやSiC材料を使ったHEMT(High Electron Mobility Transistor)やMOSFETなどは研究開発段階が終わり、製品化の域に入っています。しかし、まだ価格や流通などにおいて課題があり、Si MOSFETやIGBTもまだまだ欠かせない存在です。

● これからのパワー半導体…GaN, SiCの状況

SiCやGaNを使った、次世代パワー半導体(トランジスタ・タイプ)の実用化状況を表1に示します。一般に、サンプル程度の小数であれば、実用化されているものであれば販売代理店などから入手可能です。

次世代パワー・デバイスの研究開発は、現在、日本、米国、欧州それぞれで進められています。SiCは自動車EVや鉄道車両、産業機器向けインバータなどの大容量域で、GaNは高周波・小容量域であるデジタル情報機器・通信機器の分野において、実用化に向けた研究開発が進められています。

● パワー半導体に合わせて磁性材料も進化中

スイッチング電源・インバータなどにGaNやSiCを採用しても、実は、従来の磁性材料の特性では十分な

表1 進化中…パワー・トランジスタの状況(2021年8月現在)

項目/材料	Si(シリコン)		GaN		SiC	
デバイス	MOSFET	IGBT	HEMT/MOSFET	MOSFET	MOSFET	IGBT
用途	低電圧・低電流	高電圧・大電流	高周波(SiC・Si)*1 低電圧・低電流	高電圧・ 低電流(GaN)*2	高電圧・大電流	超高電圧・超大電流
製品化	完了	完了	完了	未	完了	未
備考	実用化済み	実用化済み	実用化済み	開発段階	自動車EV/鉄道車両において開始	開発段階

*1: SiやSiCの基板上にGaNエピタキシャル層を形成したもの、*2: GaNの基板上にGaNエピタキシャル層を形成したもの

パワー MOSFET と スイッチング動作入門

瀬川 毅 Takeshi Segawa

キー・デバイス…パワー MOSFETとは

● パワー MOSFET は「MOSFET」

パワー MOSFET の回路記号を図1に示します。パワー MOSFET にはNチャネル(N channel)とPチャネル(P channel)があり、回路記号では小さな矢印の方向で区別します。また、パワー MOSFET とそうではないMOSFET の区別はありません。図1ではサークルあり(サークルはパッケージを表す)とサークルなしの記号を示しています。基本的に回路記号は、回路エンジニア同士が互いにパワー MOSFET とわかればどちらでもよいのです。本稿でMOSFET はサークルなしの回路記号を使います。

端子はNチャネルでもPチャネルでも3つあり、それぞれ名前がついていて、ゲート(gate)、ソース(source)、ドレイン(drain)と呼ばれます。

● サイズが大きい

パワー MOSFET の外観を写真1に示します。パワ

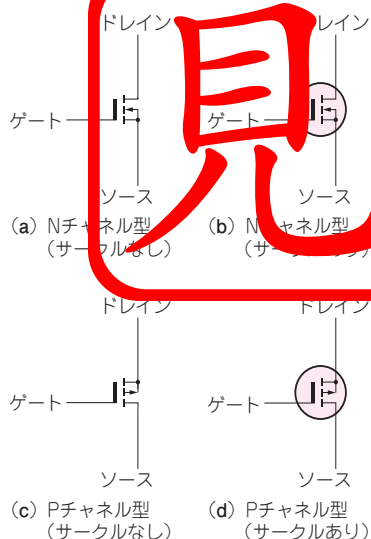


図1 パワー MOSFET の回路記号
矢印の方向でPチャネルとNチャネルを区別する

ー MOSFET のパッケージには名前がついていることが多いです。写真1の右からTO-247、TO-3P、TO-220、TO-252、TO-263です。

TO-247、TO-3P、TO-220は外形からわかるように大きなパッケージです。このため、高耐圧で50 A以上の大きな電流を流すことができます。また、高い電圧で使う素子は、UL規格など各国の安全規格の適用を受け、端子間の距離などに制約があります。TO-247、TO-3P、TO-220のようなパッケージが必要です。

パッケージには多くの種類があり写真1には載せられません。パワー MOSFET の外形の特徴は、ほかの半導体素子と比べると「大きい」ことでしょう。外形が大きいには理由があります。それは大きな電流を流すためです。大きな電流を流すと素子が発熱するので、TO-247、TO-3P、TO-220のように放熱器をつけて放熱できるようにしてあります。

● 新たなパワー MOSFET はパッケージ裏側に注目

TO-247、TO-3P、TO-220といったパッケージは、30年以上前から使われてきた十分に信頼性のあるものです。しかし、パワー MOSFET の進化によってそれだけでは対応できないことが増えました。そこで新たなパッケージの登場です。一例として写真2(a)を挙げます。

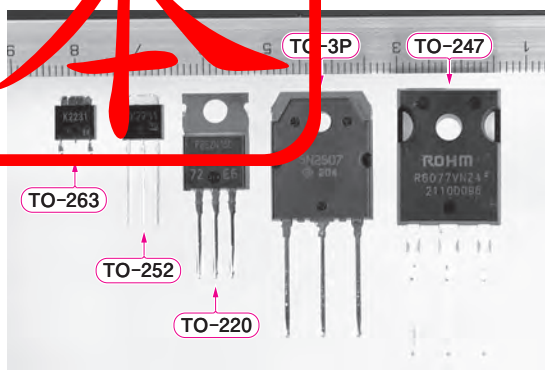


写真1 いろいろなパワー MOSFET の外観

後述しますが、パワー MOSFETが高速にスイッチングすると、自分自身のインダクタンス成分によって大きなサージ電圧が生じます。インダクタンス成分は、内部の配線と接続のための端子のリード線で生じます。これらの配線を極限まで短くしてインダクタンス成分を減少させようとした例が、写真2(b)の裏面です。

このパッケージの裏面は、内部の半導体と直付けされたドレインの電極です。こうすることで、最短の配線でインダクタンス成分を大幅に減少させています。さらに、この外形では放熱器で放熱することなど無理なので、プリント基板の太いパターンを使って放熱することが必須です。

パワー MOSFETのはたらき

● 大きな電流をコントロールする

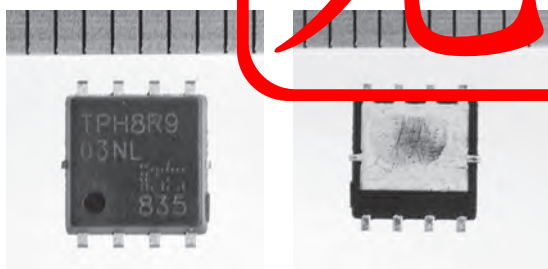
パワー MOSFETを英語にすると Power Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor です。Field Effect Transistorは頭文字をとるとFETです。パワー MOSFETもトランジスタの仲間です。FETの一種です。

名前の最初に大きさにPowerがついていますが、英語を直訳した「力」ではなく、大きな電流によって大きな「電力」をコントロールする素子と考えます。つまり、パワー MOSFETとは電力用のMOSFETと考えるのです。大きな電流は、ドレインの端子とソースの端子の間に流れます。大きな電力をコントロールする目的でパワー MOSFETは大きな電流を流し、そのために外形が大きくなったのです。

ところで、大きな電流とは何A以上を指すのか、実は曖昧です。筆者の主観的な感覚では、1A以上の電流を連続的に流すことができるMOSFETは、パワー MOSFETと呼んでもよいように思います。

● パワー MOSFETはスイッチング動作で使う

大きな電流を流せるパワー MOSFETは、どのように使われるのかと言うと、それはスイッチング (switching) です。



(a) 表面

(b) 裏面

写真2 配線を極限まで短くしたパワー MOSFETのパッケージ

スイッチは、図2(a)のように人間の手でON/OFFさせて使います。人間の手を使った場合、1 μ sなどの短時間でON/OFFさせたりすることには無理があります。

そこで、半導体でスイッチの動作をさせる、つまりスイッチング動作が考え出されました [図2(b)]。そして、スイッチング動作にとっても適した素子が40年ほど前に登場しました。それがパワー MOSFETです。

● スwitching・コンバータの回路例

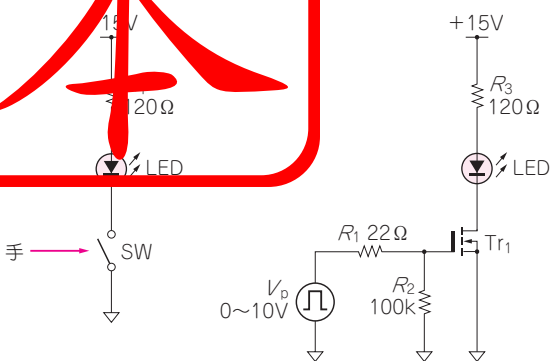
パワー MOSFETが使われている回路の事例を図3に示します。

図3(a)はバック・コンバータ (buck converter) です。降圧コンバータと呼ばれることもあります。入力DC電圧より低いDC電圧を得るために使います。具体的には、おもにCPU (Central Processing Unit) やマイコンなどの電源電圧である +5V、+3.3V、+1.2V といった電圧を供給するための電源として使われています。

図3(b)はブースト・コンバータ (boost converter) です。昇圧コンバータとも呼ばれます。入力DC電圧より高いDC電圧を得るために使います。具体的には、スマートフォン (cell phone または mobile phone)、タブレット PC (tablet computer) などのバッテリー (battery) で動作する機器の表示器の液晶背面のLED (Light Emitting Diode) などに使われています。

図3(c)はブースト・コンバータの応用なのですが、PFCコンバータ (Power Factor Correction converter) です。なかでも図3(c)は、効率99%を超える高効率を実現した回路で、トータム・ポールPFC (totem pole PFC) と呼ばれています。トータム・ポールPFCコンバータは高効率なので、5G、次世代の6Gといった携帯の基地局で使われています。

一般に、PFCコンバータはAC 100Vなどの商用電源の国際的な高調波電流規制 (具体的には IEC 61000-



(a) 普通のスイッチ

(b) パワー MOSFET によるスイッチ

図2 パワー MOSFET はスイッチングで使う

第2章 高耐圧と低オン抵抗を両立できるSiCやGaNが期待される背景

パワー MOSFET の
半導体構造とシリコンの限界

瀬川 毅 Takeshi Segawa

はじめに、MOS(Metal Oxide Semiconductor)とは何かという話をします。

Metal Oxide Semiconductorは、直訳すると酸化金属半導体ですが、これは半導体の内部の構造の話です。パワー MOSFETにはNチャネルとPチャネルがあります。

パワー MOSFET 内部の
半導体としての動作

● p型半導体の内部にNチャネルが発生

パワー MOSFETのゲート端子の電極はアルミニウムなどの金属です。このゲートの金属に、酸化させたシリコン(SiO_2)が接合されています。この酸化させたシリコンを酸化膜(silicon dioxide)と呼びます。酸化膜は導体ではないので電気を通しません。図1(a)のように、ゲートの電極と酸化膜とさらにp型半導体を接合させた状態で考えます。p型半導体は正孔が多く、電子が少ない半導体です。

今、図1(b)のようにゲートの端子に+の電圧を加えたとします。すると、p型半導体内部の少ない自由電子は酸化膜のほうに引き寄せられ、正孔は-側の電極のほうに引き寄せられます。また、酸化膜は電気

を通さないで、酸化膜の近くに集まった電子はゲート端子に流れ出ることはありません。

その結果、p型半導体でありながら、酸化膜の周辺にはn型半導体のように電子が多く存在する層ができます。この層はn型半導体のような性質をもつので、Nチャネルと呼ばれます(p型半導体にできるのがNチャネルで、n型半導体にできるのがPチャネル。紛らわしい)。

図1(b)では自由電子あるいは正孔がない領域が存在しています。この領域は空乏層(depletion layer)と呼ばれます。

● n型半導体の内部にPチャネルが発生

図2(a)のように、ゲートの電極と酸化膜とn型半導体を接合させた状態で考えます。n型半導体は、自由電子が多く正孔が少ない半導体です。n型半導体のゲートの端子に図2(b)のように-の電圧を加えたとします。すると、n型半導体内部の少ない正孔は酸化膜のほうに引き寄せられ、自由電子は+側の電極のほうに引き寄せられます。酸化膜は電気を通さないで、酸化膜の近くに集まった正孔はゲート端子に流れ出ることはありません。

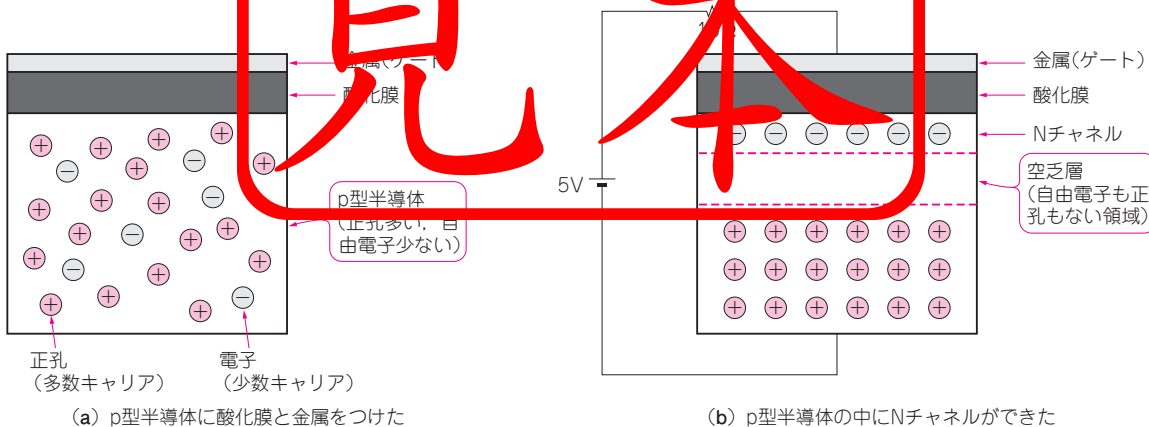


図1 p型半導体の断面図

新しいパワー MOSFET… SiC と GaN

瀬川 毅 Takeshi Segawa

シリコン(以下、Si)におけるパワー MOSFETの耐圧を高くするとオン抵抗も大きくなる関係は、Si自身の耐圧の限界に近づき、高耐圧のパワー MOSFETやオン抵抗を低くできなくなってきました。このままパワー MOSFETの特性は限界となり頭打ちかと思われたのですが、さにあらず…パワー MOSFETの新しい形、ワイド・バンドギャップ(wide bandgap)半導体であるSiC(silicon carbide)やGaN(gallium nitride)が登場してきました。

シリコンの限界を超えるSiCとGaN

● ハイパワー化はSiC、小型化はGaN

SiCやGaNを使ったパワー MOSFETの特徴と、応用面での出力電力とスイッチング周波数の関係を、筆者の主観も入れて図1に示します。

SiCのパワー MOSFETは、原理的にソース・ドレイン間電圧の絶対最大定格(以下、耐圧)を大きくすることができます。耐圧が大きいと、電流が同じならより多くの電力が扱えます。また、オン抵抗も低いのでパワー MOSFET自身の電力損失が少ない、つまり高効率(high efficiency)で電力変換が可能です。また、Siと比べて高い温度でも使用できます。そのためモータ・インバータ(motor inverter)、太陽光発電

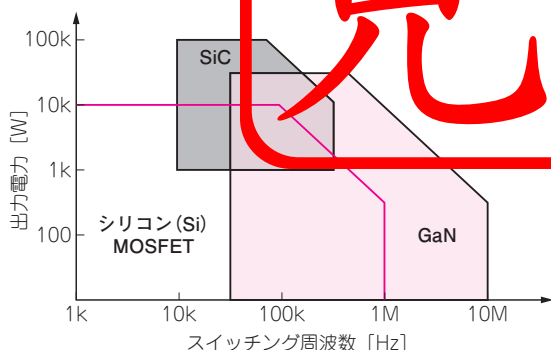


図1 従来のパワー MOSFET (Si-MOSFET) と SiC や GaN のパワー MOSFET の使いどころ

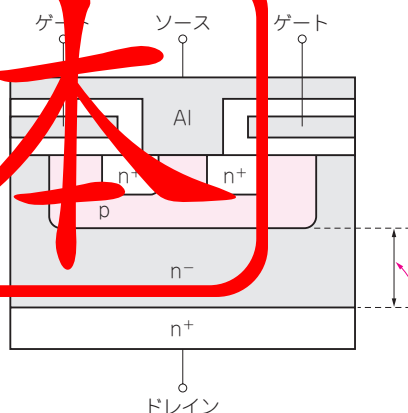
のソーラ・インバータ(solar inverter)、電気自動車(electric vehicle)、大型のバッテリー充電器などの電力が大きい用途に応用が広がるでしょう。

GaNは自身の物性として、電子移動度 μ_e がSiと比較すると約1.4倍もあります。そのため、GaNのパワー MOSFETは、ターン ONの時間やターン OFFの時間が非常に短い、つまりスイッチング特性がとても良好なので、スイッチング損失が少ないです。オン抵抗も少ないので、1 MHz以上のスイッチング周波数かつ高効率で電力変換が可能になります。こちらは従来からあるDC-DCコンバータで、Siのパワー MOSFETからの置き換えが進むと思われます。

● SiCやGaNの半導体の耐圧はシリコンの約10倍

SiCやGaNの半導体でパワー MOSFETを作ると何が良いのでしょうか。SiCやGaNの場合、耐圧がシリコン(以下Si)に対して約10倍もあります。これは何を意味しているのでしょうか。

図2は、Siプレーナ型のパワー MOSFETの構造を示しています。パワー MOSFETがOFFしているとき、



SiCやGaNのように材料自身の耐圧が10倍になると、同じ耐圧のパワー MOSFETを作るときでもドリフト層の厚さを1/10にできる→オン抵抗を低くできる

図2 パワー MOSFETの耐圧はドリフト層で決まる

第4章 パワーMOSFETと構造は似ているが得意/不得意が異なる

大電流スイッチング素子
「IGBT」のしくみ

山田 順治 Junji Yamada



- 高速スイッチングができない
- 接点が劣化する
- 大電流の遮断が困難

- 高速スイッチング(数k~数十kHz)が可能
⇒ 出力の細かい制御が可能
- 接点がないため劣化しない
⇒ 長寿命
- 大電流の遮断が比較的容易

図1 半導体は高速にON/OFFの切り替えができる長寿命な高信頼性スイッチになる

機械的なスイッチと半導体スイッチの違い



図2 半導体スイッチを使えば機械スイッチでは不可能なスピードで高速にON/OFFの切り替えができる

このような無茶をしなくても半導体スイッチを使えばよい

パワー半導体は、主に電力変換装置の中で電気の流れをON/OFFするスイッチング用途に使われます。スイッチング素子は、パワー半導体の中心的な役割を担っています。例えば、モータ制御用インバータの損失は5~7割がスイッチング素子で発生します。

本稿では、パワー半導体のスイッチング素子の中でも特によく使われるMOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)とIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)についてしくみと働きを解説します。

MOSFETとIGBTは、どちらもシリコンを材料に使ったスイッチング素子で、構造もよく似ていますが、それぞれに得意、不得意があります。誤った設計をすると、スイッチング素子からの発熱量が大きくなります。その結果、大型冷却ファンが必要になってしまい、スリムで高出力なパワーエレ設計ができません。スイッチング素子の構造とメカニズムを理解し、損失が発生する理由を把握しておく、最適設計に役立ちます。

スイッチが速いほどスリムに作れる

- 半導体スイッチはON/OFFの切り替えを電気エネルギーで行う

半導体は状態によって電気抵抗の値が変化して、導体になったり絶縁体になったりする物質です。p型半導体とn型半導体を組み合わせることで、外部から電気エネルギーを加えてON/OFFを切り替えるスイッチのように使えます。特徴は次のとおりです。

- ON/OFFの切り替えが速い
- 高電圧・大電流に耐えられる
- 長寿命

特にON/OFFの切り替えスピードが速い点は、パワー電子回路の高速化に貢献しています。

- 高速スイッチングで周辺部品を小型化できる

図1に機械スイッチと半導体スイッチの違いを示します。半導体スイッチを使えば、高速かつ信頼性の高いスイッチングが可能で、図2のように機械スイッチでは不可能な動きも実現できます。

機械スイッチによるON/OFFの切り替え速度は、

実測比較! SiC MOSFETと従来パワー半導体の性能

山本 真義 Masayoshi Yamamoto

パワー半導体の実力を調べるために

パワー・エレクトロニクスでは、SiCやGaNなどの新しい素材を使ったパワー半導体が注目されています。しかし、それらの特性を比較するために、インバータやDC-DCコンバータを作るのは大変です。本稿で紹介するダブル・パルス回路により、パワー半導体の特性をチェックできます。

実験用には3つのパワー・トランジスタを使用しました(写真1)。

- Si MOSFET IXFK20N120(リテルヒューズ)
- Si IGBT GT40QR21(東芝デバイス&ストレージ)
- SiC MOSFET SCH2080KE(ローム)

測定するデバイスの主な特性を表1に示します。ドレイン-ソース間電圧(絶対最大定格)を1200Vに合わせました。

スイッチング特性評価に便利なダブル・パルス回路

ダブル・パルス回路の等価回路を図1に示します。この回路は、電気自動車に使われているインバータの1相分を取り出した形です。インバータ動作時と同じ条件でスイッチング特性を確認できます。試験対象の半導体は Q_1 、 Q_2 2個を用意します。



写真1 1200V耐圧のパワー半導体のスイッチング特性を比べてみる
3つのデバイスをDigiKeyで同時に購入した。なお2024年9月現在、IXFK20N120とSCH2080KEは生産中止になっている

そのほか、直流電源、環流インダクタを用意します。

上側半導体スイッチ Q_1 は、スイッチとしては動かしません。ゲート-ソース間(ゲート-エミッタ間)を短絡してOFF状態に保ち、図2(a)のようにダイオードとしてのみ機能させます。スイッチとして機能させるのは下側の Q_2 のみです。

したがって、ダブル・パルス回路の動作は、下側スイッチ Q_2 がON状態かOFF状態の2つしかありません。図2(b)のように Q_2 がON状態では、スイッチ Q_2 を介して環流インダクタに電流が流れ、電流は線形的に増加していきます。ここで Q_2 をOFFすると図2(c)へ移行し、インダクタに蓄積されたエネルギーは上側 Q_1 、すなわちダイオードを介して環流します。

● 測定したい電流値でON/OFFがどちらも観測できる

ダブル・パルス回路は、下側スイッチのターンON特性とターンOFF特性、上側スイッチのダイオード

表1 比較する3種類のパワー半導体…パワー MOSFET/IGBT/SiC MOSFET(写真1)

No.	項	記号	Si MOSFET	Si IGBT	SiC MOSFET
			IXFK20N120	GT40QR21	SCH2080KE
1	ドレイン-ソース間電圧[V]	V_{DSS}	1200	1200	1200
2	ゲート-ソース間電圧[V]	V_{GS}	± 30	± 25	-6~22
3	ドレイン電流[A]	I_D	20	40	40
4	ゲートしきい値電圧[V](最小)	$V_{GS(th)}$	2.5	4.5	1.6
5	逆回復時間[ns]	t_{rr}	300	600	37
6	許容損失[W]	P_D	780	230	262
7	入力容量[pF]	C_{iss}	7400	1500	1850
8	出力容量[pF]	C_{oss}	550	18	175
9	帰還容量[pF]	C_{rss}	100	14	20

Si MOSFET では耐圧を確保すると寄生容量が大きくなる

ゲートしきい値電圧が低い

第7章 よく使う数十W以下のスイッチング電源作りを例に

スイッチング電源に使える
ダイオードの選び方

梅前 尚 Hisashi Umezaki

スイッチング電源にはMOSFETなどのパワー・トランジスタが使われており、数十kから数百kHzという高周波で大電流をON/OFFスイッチングしています(図1)。

MOSFETがONのときは①、OFFのときは②のように電流の流れる経路が高速に切り換わります。ダイオード D_1 は、 Tr_1 がOFFのときは順方向(グラウンド $\rightarrow D_1 \rightarrow L_1$)に電流を流し、 Tr_1 がONしたら①の電流がカソードからアノード(グラウンド)に向かって流れ込まないように完全に遮断することが要求されます。この動作によって、MOSFETのスイッチングによって生じる交流電流を直流電流に変換できます。これを整流と呼びます。

この電流経路が数百kHzという高い周波数で切り換わると、ダイオードの応答がついていくことができなくなって、③($Tr_1 \rightarrow D_1 \rightarrow$ グラウンド)の経路で電流が流れるようになり、大きなロスが生じます。

本章では、よく使う数十W以下のスイッチング電源の設計を例に、効率の高いスイッチング電源を作るための整流用ダイオードの選び方と、ダイオードをMOSFETに置き換えて低電圧大電流を効率良く整流する同期整流回路の作り方を紹介します。

(編集部)

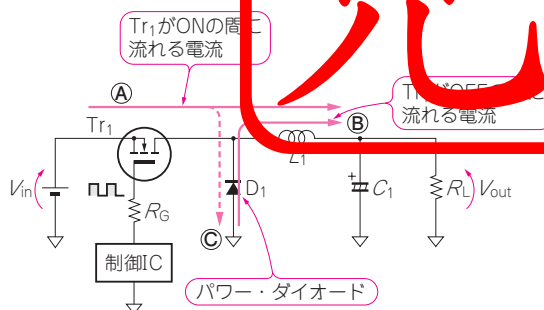


図1 スイッチング電源に用いられるMOSFETなどのパワー・トランジスタは数十k～数百kHzの高周波で大電流をON/OFFスイッチングしている

特性から使えるダイオードを絞り込む

● 使えないダイオード

▶ 大電流を流せない小信号用ダイオード

1S4148に代表される小信号ダイオードは、スイッチング周期に対して数nsと十分短い逆回復時間を持ちますが、定格電流が100m～1Aと、スイッチング電源に搭載するにはパワー不足です。

▶ スイッチングの応答についていけない一般整流ダイオード

図1に示すようなスイッチング電源に使う整流素子(ダイオード)は、全動作周波数で整流作用を失ってはいけません。100kHzで発振しているスイッチング電源では、1周期の時間は10 μ sです。このときのデューティ比が50%だった場合は、ON時間もOFF時間も半分の5 μ sです。

一般整流用の安価なダイオードは、順方向に導通している状態から逆バイアスが加わって電流を遮断するまでの時間(逆回復時間 t_{rr})は4 μ ～数十 μ sです(表1)。これでは、スイッチング電源の整流素子として使えません。MOSFETが100kHzでスイッチングする電源

表1 DC-DCコンバータによく使われる整流用ダイオードの特性

略号	型式名称	電圧範囲 [V]	順方向電圧 V_F [V]	逆回復時間 t_{rr}
	一般整流ダイオード	100～1000	0.6～2	4～12 μ s
FRD	ファスト・リカバリ・ダイオード	100～1000	0.9～3	20～200ns
SBD	ショットキー・バリア・ダイオード	20～200	0.4～1	—

SBDの V_F はほかと比べて低く、導通損を小さくできる

SBDは原理的に t_{rr} が存在しないのでスイッチング損失はほとんどない(ただし配線のインダクタンスや周辺部品の影響でゼロにはならない)

インバータ機器向けパワー・モジュールに見る パワエレ・パターン設計の勘どころ

市村 徹 Toru Ichimura

インバータは、新幹線や電気自動車のみならず、エアコンや洗濯機、冷蔵庫など身近な電化製品でも用いられているDC-AC交換装置(回路)です(注1)。

エアコンを例にすると、運転開始時はモータを高速で回し、設定温度付近になったら低速にして、省エネに貢献してくれます。

インバータ回路や基板パターンの設計にはポイントがあります。そこを怠ると全く動作しなかったり、壊れてしまったりします。

本稿では、定格電圧100V、200Vのモータ駆動を想定し、インテリジェント・パワー・モジュール(IPM)を使ったインバータ回路とパターン設計の勘どころを解説します。

交流を出力する インバータ回路設計のポイント

● インバータ回路の特徴

インバータ回路は、直流(DC)を交流(AC)に変換するものです。単相交流を出力する場合にはフル・ブリッジ回路、3相交流を出力する場合には3相ブリッジ回路を用意します(図1)。

インバータ回路では、出力交流周波数に対して半導体スイッチを何倍もの周波数で高速ON/OFFして交流出力を得ています。入出力の電圧・電流波形を図2に示します。この波形からわかることは、次の2点です。

- (1)入力電圧は直流だが、入力電流は急峻な変化(di/dt)をもつ
- (2)出力電流は正弦波状になっているが、出力電圧は急峻な変化(dv/dt)をもつ

di/dt 、 dv/dt は、基板もしくは搭載部品の寄生インダクタンスや寄生容量を介して伝搬したり、放射ノイ

注1：インバータ(Inverter)：パワエレの世界では、AC-DC変換のことをコンバータ(順変換)、DC-AC変換のことをインバータ(逆変換)と称します。

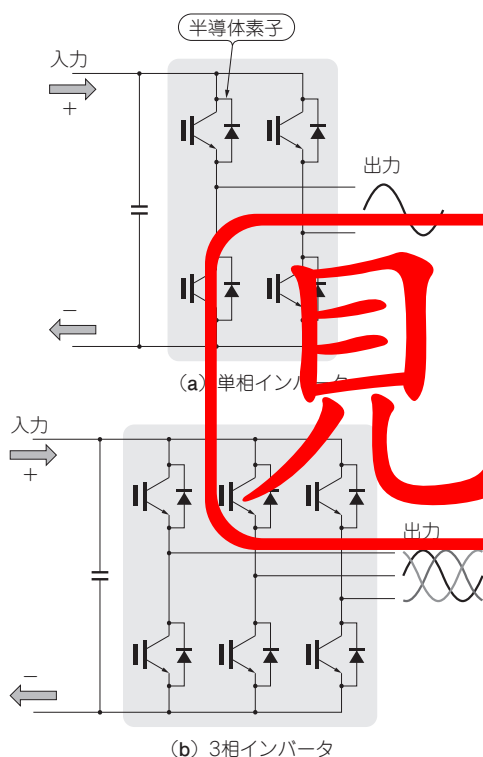


図1 インバータ回路

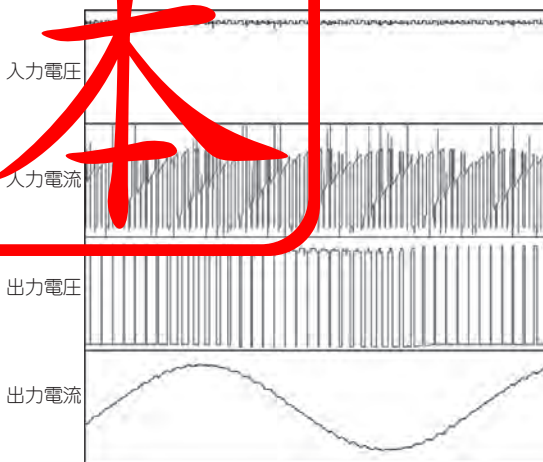


図2 インバータの入力/出力波形

スイッチング電源用トランスの基礎

梅前 尚 Hisashi Umezaki

トランスの仕事は変換と絶縁

● スイッチング・トランスの役割

電源用のトランスが担う役割は電圧変換と絶縁の2つに要約できます。そもそもトランスという呼びかたは、transformer(変換器)を略したもので、機能そのものが名前の由来となっています。

トランスの構成要素は図1のように、1次側コイル、2次側コイル、コアの3つが基本です。1次側コイルに流れる電流が変化すると磁束が発生し、この磁束が2次側コイルを通過することで、2つのコイルの巻き数比に比例した電圧が2次側コイルに発生します。

このように、トランスは直接つながっていない1次側から2次側に電気エネルギーを伝達します。

コアは磁束を通りやすくするもので、1次側コイルでより多くの磁束を発生させて効率良く2次側コイルに通すために用いられます。

● トランスの原理をおさらいする

導体(電線)に電流を流すと、導体のまわりに電流の大きさに比例した磁界が発生します。磁界は磁気の影響を及ぼす空間を意味しますが、この磁界がどのような様子で発生しているのか、図2の磁界の様子を直感的にわかりやすく表したものが磁力線です。

1本の電線に電流を流して生じる磁界は、ごく小さなものですが、これをコイル状に巻くと巻き数に比例して磁力線の数を増やすことができます。

1次側コイルから2次側コイルにエネルギーが伝わるのは電磁誘導によるものです。磁界の中に置かれた

コイルに生じる起電力は、次式で表されます。

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

ε : 起電力 [V]

Φ : N 回巻いたコイルに鎖交する磁束 [Wb]

2次側コイルに鎖交する磁束は変化していなければなりません。トランスではコイルは固定されているのでコイルを動かして磁界を変化させることはできないため、1次側コイルに流す電流を交流にしたり、電流を入り切りするなどして、発生する磁界の向きや強さを変化させて2次側コイルに電圧を発生させます。

また、単位時間あたりに変化する磁束が多いほど、より大きな起電力を得られます。1次側巻き線で作られた磁束をできるだけ漏れないようにして、2次側巻き線を通るようにすればよいことになります。これを実現するのがコアの役割です。

ただ導体を巻いただけのコイルでも磁束は発生しますが、より磁束を通しやすい材料をコイルの中に置くことで、発生する磁束を格段に増やすことができます。この磁束の通りやすさを透磁率と呼びます。トランスで一般に使われるコア材料には、コアを入れない場合に比べて数十倍～数千倍高い透磁率をもつものが使用されています。

このコアを、1次側コイルを環状に取り囲む形状にして磁束の通り道を作り、さらにそのコアを中心にして2次側コイルを巻くと、1次側コイルで発生した磁束がほとんどコアの透磁率の高いコアを通り、その磁束は

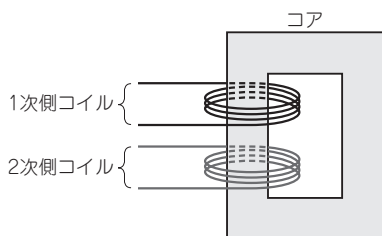


図1 トランスの構成要素

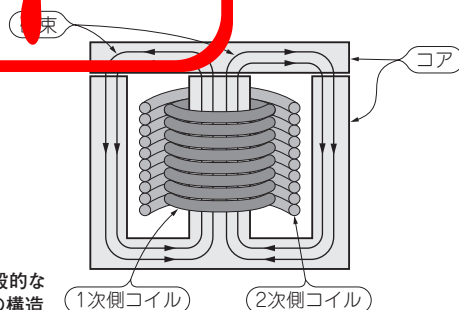


図2 一般的なトランスの構造

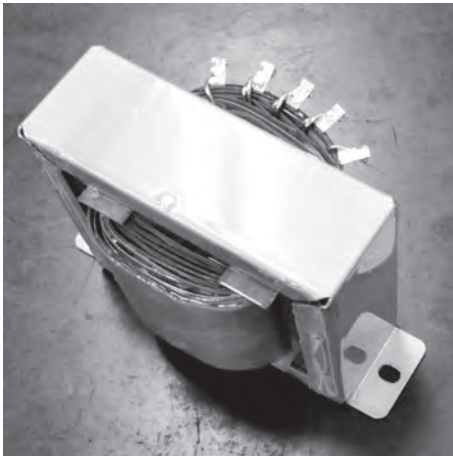


写真1 低周波トランス
(100 V → 12 V/3 A)

2次側コイルを貫くことになるので、多くの磁束を2次側コイルに鎖交させることができます(図2)。

スイッチング電源用のトランス

● 低周波トランスとスイッチング・トランスの違い

スイッチング電源になじみのない多くの方が抱くトランスのイメージは写真1のような形状でしょう。

コイルには隣り合う巻き線がショートしないようにポリウレタンなどの絶縁材料で表面がコーティングされたエナメル銅線を用い、コアにはケイ素鋼板と呼ばれる板状のトランス用の特殊鋼板を何枚も積み重ねたものが使われているのが特徴です。

このタイプのものは、1次側コイルはコンセントから得られる交流50/60 Hzの商用電源に直接接続され、2つのコイルの巻き数比に応じて電圧が変換(変圧)された交流が出力されます。取り扱う周波数が低いので、低周波トランスあるいは商用トランスと呼ばれます。

一方、スイッチング電源では整流器によって低周波トランスに比べて小さなものが作れます。高周波ト

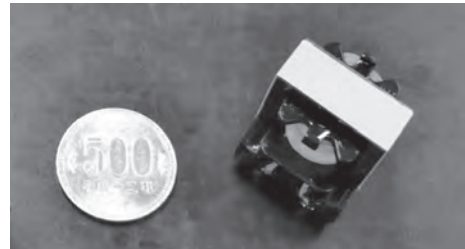


写真2 スイッチング・トランス(12 V/3.2 A出力、動作周波数100 kHz)

ランス、スイッチング・トランスといった呼びかたで低周波トランスと区別しています。

コイルは低周波トランスと同じエナメル銅線が使われますが、コア材質はフェライトと呼ばれる酸化鉄を主体とした素材を焼き固めたものが使用されます。

低周波トランスとの最も大きな違いは1次側コイルに加える電圧の周波数です。スイッチング電源では、コンセントから得られる交流電源をそのまま整流/平滑して直流に変換したものを数十k～数MHz程度の高周波でスイッチングし、この高周波電圧を1次側コイルに入力します(図3)。

周波数が高くなると、1サイクルごとの時間(周期)は短くなります。前述の式(1)より、1サイクルの時間(dt)が小さくなれば、2次側コイルに鎖交する磁束の変化量($d\Phi$)が同じように小さくなっても起電力は変わらないことになります。

コアの断面積に対する磁束の数を磁束密度といい、単位はテスラ($T = Wb/m^2$)で表しますが、周波数を高くすることで1サイクルあたりの総磁束は少なくなるので、磁束密度はそのままに断面積の小さなコアを使えるようになり、トランスを小さくすることができます。また、コイルのインダクタンスを小さくすることもできるので、コイルの巻き数を少なくすることができ、こちらもトランスの小型化につながります。

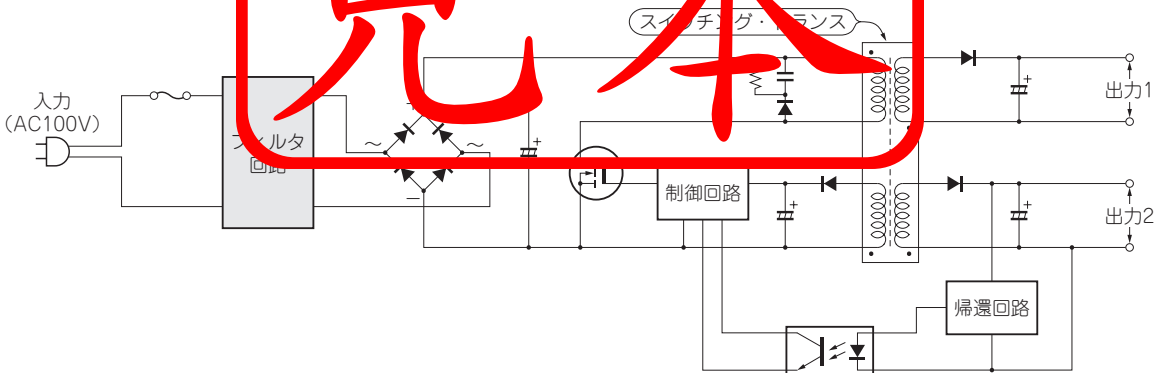


図3 スイッチング電源におけるスイッチング・トランスの位置付け

トランスを 磁気目で見よう

富澤 裕介 Yusuke Tomizawa

トランスは、磁気を利用した電気部品の1つです。トランスの役割は、交流電圧の大きさを変えること、いわゆる変圧です。発電所でつくられる電気は数千～数万Vの高い電圧であるため、私たちが家庭で使うコンセントに到達する間にいくつものトランスを通して100Vになるように変圧しています。

トランスは、約200年前の18世紀にヨーロッパで発明されましたが、ほとんどその形を変えずに現在でも使われています。

本章では、この200年変わることのないトランスのふるまいを、磁気目で見えます。

トランスを使うと何ができる？

● 電氣的につながっていない2つの回路間で信号や電力の伝達ができる

通常の電気回路は、入力端子と出力端子が電線でつながっています。もし何らかの原因で入力電圧が回路の許容値を上回るほど上昇したり、回路の部品が故障して電流を抑制できない状況に陥ったりすると、ダムが崩壊して水が流れ込むように、大きな電流が流れ込んで弱い部品が破壊されてしまいます。

このような事態を防ぐために「電氣的には切り離されているけれども、信号や電力の受け渡しが可能」といった都合の良い部品が必要になります。それがトランスです。

トランスは、回路を電氣的には切断し、磁氣的に結合させることによって、電気絶縁した状態で電力や信号を伝えることができます。

● 交流電圧を変更できる

電源回路を設計していると、交流の入力電圧20Vを100Vに昇圧したり、100Vを20Vに降圧したりしなければならないことがあります。トランスを使うと、交流電圧を変更することができます。

図1にトランスの基本構造を示します。トランスは、コアと呼ばれる骨組み部分に、電線を2組以上巻き付

けて構成されています。

電気は通れないけれども磁気はよく通る材料でできた芯(コア)に、電気がよく通る電線を巻きつけた構造です。コアは、磁束が通るための専用通路みたいなものです。巻き線の起磁力によって磁束が発生しやすい材料を磁性材料といい、トランスのコアには磁性材料が使われます。

信号を送る側(1次側)を1次コイル、信号を受ける側(2次側)を2次コイルと呼びます。

コイルの巻き数を1次側 N_1 [ターン]、2次側 N_2 [ターン]として、1次コイルに最大値 v_1 [V]の正弦波を与えると、2次側に発生する電圧 v_2 [V]は巻き数比に比例します。つまり、次式が成り立ちます。

$$v_1 : v_2 = N_1 : N_2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\therefore v_2 = \frac{N_2 v_1}{N_1} \dots\dots\dots (2)$$

コアに巻きつける電線の回数 N_1 と N_2 を調整すれば、2次側に所望の電圧を発生させることができます。

トランスは磁気で電力を伝える

● 電力はコアを伝わる

入力と出力が電線で直接つながっていないにもかかわらず、電気信号や電力を伝えることのできる都合のよい機能をもつトランスは、どのような原理で動作するのでしょうか。図2に示すトランスのモデルを使っ

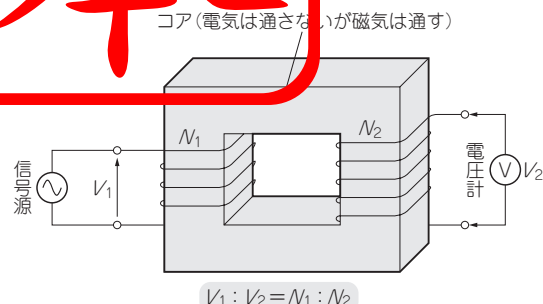


図1 1次電圧と2次電圧の比はコイルの巻き数比で決まる

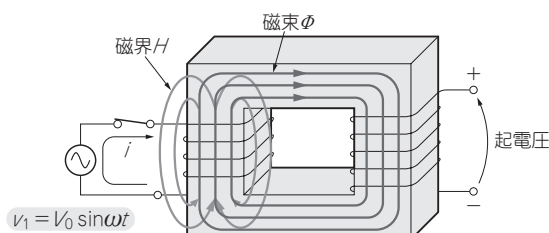


図2 1次側の交流電流は磁界を変化させ、磁界の変化は磁束密度を変化させる
2次側には、磁束密度の変化を打ち消すような電流を流す電圧が発生する

て動作を確認してみます。

1次コイルに交流電流が流れると、電流の大きさに比例した磁界が発生します。磁界中に配置されたコアの中には、図2のように磁束が発生します。1次側の交流電流が変化すると、磁界も変化し、コア中の磁束の量も追従して変化します。このとき磁性体であるコアの中の磁束量の変化は、周りの空間よりも大きく変化します。

コア内に発生した磁束は、コアを共有しているため2次コイルにも鎖交し、2次コイルの両端に電圧を発生させます。この電圧は、磁束の時間的な変化量に比例します。このとき2次側に回路(負荷)をつなげば電流が流れます。つまり、1次側の電流が2次側に伝わったことを意味しています。

● トランスが伝達できるのは交流だけ

▶ 電気→磁気の変換は電磁石の原理と同じ

トランスは電気エネルギー→磁気エネルギー→電気エネルギーという2回の変換を行って、信号や電力を伝達します(図3)。

電気から磁気へは、電磁石とまったく同じ原理で変換されます。図4に示すように、釘にエナメル線を巻いて電流を流すと、釘が磁石になる実験を小学校でしたと思います。トランスのコアに巻いたコイルに電流を流すと、釘が磁石になるのと同じ原理でコアが電磁石になります。

▶ 磁気→電気の変換は発電機の原理

磁気から電気への変換方法を理解するために、もう1つ懐かしい理科の実験を思い出してみましょう。

図5のように、コイルに磁石を近づけたり遠ざけたりすると、コイルに電流が流れます。磁石のN極を近づけるとコイルの鎖交磁束が増加して、起電圧が発生

図4 釘にコイルを巻いて電流を流すと釘は磁石になる(電気から磁気への変換)

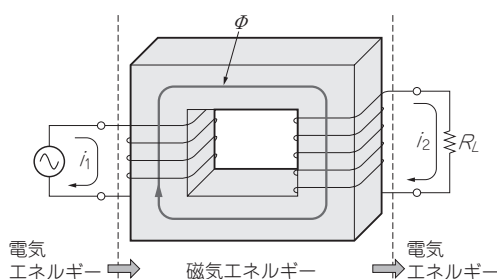
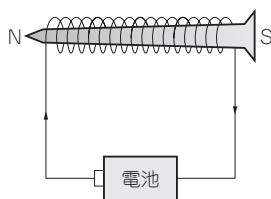


図3 トランスの1次-2次間のエネルギーの伝達

します。このとき、磁石を近づけるスピードが速ければ速いほど、また、磁石の磁力が強く、磁石磁束の本数が多いほど、さらに巻き数が多ければ多いほど、鎖交磁束が多くなり、発生する電圧が大きくなります。

コイルに発生する起電圧 V_{LR} [V] は、

$$V_{LR} = n \frac{d\Phi}{dt} \dots \dots \dots (3)$$

と表されます。 n はコイルの巻き数[ターン]、 Φ は磁束数[本]で、 $d\Phi/dt$ は、1秒間に变化した磁束 Φ の本数を表します。

トランスの1次コイルと2次コイルは固定されているため、近づけたり遠ざけたりできませんが、1次側に時間とともに変化する交流電流を流すと、コアの中に発生する磁束の方向が変化して、磁石を近づけたり遠ざけたりするのと同様の効果が得られます(図6)。この実験からもわかるように、トランスで伝達できる信号は、時間的に変化する電圧、すなわち交流電圧に限られます。

変圧の原理

● 1次側と2次側は磁束を共有しているので巻き数比で電圧比が決まる

1次コイルに交流電圧を与えると、コイルに交流電流が流れます。電流が流れると、電流の大きさに応じた磁界が発生します。電流が増えると、磁化されたコア中の磁束数は増加します。

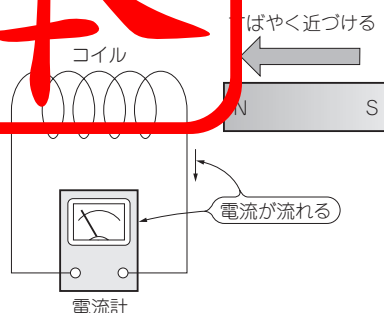


図5 コイル周辺の磁界を乱すと電流が流れる(磁気から電気への変換)

コンデンサの種類

八幡 和志 Kazushi Yawata

コンデンサは多種多様な材料と形状の製品があります。電子回路を設計する際には、いろいろなコンデンサと、さまざまなデバイスをうまく組み合わせることが大切です。

誘電体による分類

コンデンサは、使われている誘電体物質によって分類できます。そして、誘電体の特性が部品としての製造プロセス、製品形状を決め、最終的な部品としての性能が決まります。

● 古くから使われてきた誘電体

歴史的に古くから使われてきた誘電体として、空気、紙、雲母が挙げられます。

空気の誘電率は赤外領域の下では周波数に無関係で、密度に依存することが知られています。これにより、空気コンデンサ(エアギャップ・コンデンサ)は、高周波領域でも安定して使えます。むしろ、高周波を与えた際には、空気の誘電体物性ではなく、金属の表皮効果で抵抗成分がわずかに上がるのが見えます。温度安定性も、構造にもよりますが、電極や支柱として使われている金属や絶縁体の熱膨張に依存します。

難点は、比誘電率が小さく、極小であること、容量あたりの体積が非常に大きくなることです。

紙コンデンサも古くからあります。紙の両面に金属箔を付けて巻回(けんかい)して作られたものや、紙に金属電極を蒸着して巻回したものがあります。

紙、つまりセルロースの比誘電率は2程度と低いため、紙に誘電率の高いオイルを含浸させたコンデンサもあります。これは、音響用のコンデンサとして今も生産されているようです。なお、環境に悪いPCB(PolyChlorinated Biphenyl: ポリ塩化ビフェニル)を含浸させたコンデンサが過去に使われ、これの保管、取り扱い、今も法的に厳重に管理されています。

紙コンデンサの進化系が今日のフィルム・コンデンサですが、誘電体のフィルム材料も変遷があります。

スチロールを使ったスチコンは電気特性が良かったのですが、耐熱性が低く、またアルコール洗浄で溶けてしまうといった問題から、手はんだ実装からフロー、リフローによる自動実装に移り変わるなかで、ほとんど使われなくなりました。

● マイカ・コンデンサ

セラミック・コンデンサの先祖ともいえるべき、雲母(マイカ)を使ったコンデンサは歴史が長く、第2次世界大戦前から使われていたようです。

マイカは比誘電率が7であり、安定な誘電体材料で、温度依存性が小さく信頼性が高いことから、今でも信号機や地中配線などの壊れてはいけないところで多く使われています。

筆者も、超低温の実験で、10 mKくらいまで冷却して使ったことがあります。日本では、双信電機がリード線付きや面実装品を生産供給しています。

● セラミック・コンデンサ

セラミック(ceramic; 磁器)を誘電体としたコンデンサです。今日では、酸化チタンやジルコニアカルシウム系の常誘電体を使った温度補償系のI型、チタン酸バリウム系の強誘電体を使った高誘電率系のII型、半導体セラミックスを使った粒界絶縁型のIII型が、一般的なセラミック・コンデンサとして分類されています。

主に流通している3種類の誘電体は、白色や灰色、II型は焦げ茶色なので、見た目でも区別がつきます(写真1)。近年は、内部の誘電体や電極の厚みが1 μm より薄くなってきているようだが、つまり、この誘電体や電極を作る材料がナノ粒子になっていて、半導体の製造プロセスと同じようなスケールです。直接、大気中プロセスと真空プロセスを比較するものではありませんが、そこで使われる顕微鏡などのベースとなる技術は同様なので、常に最先端の装置が必要になります。

先にも触れた、先祖のマイカ・コンデンサもまだまだ現役ですし、温度安定度の高い、標準コンデンサと

見本

ヒューズの基礎知識

布施 和昭 Kazuaki Fuse

ヒューズ(fuse)の構造は至ってシンプルです。流れる電流によるジュール熱で内部の導電金属が溶けて断線することで回路を遮断します。

ヒューズの役割

● 故障時の最後のとりで

ヒューズは、製品や設備の故障時の最後のとりでのような存在です。ジュール熱で金属が溶断することを利用して、制御電源や機械的な機構をもたないぶん、いたってシンプルな構造で故障要因が少ない、自己完結型の部品です。

● 壊れて働く

電気の過電流の異常状態を止めるには回路を確実に遮断すれば異常を解除できます。ヒューズは一定の電流値に達すると自動的に身を呈して回路を切断して復帰させません。部品としては故障(溶断)してこそ本来の働きなのでから妙な部品です。

ヒューズはほかの電子部品と異なり、製品の機能や性能には直接関与しません。いたって地味な存在で、切れない限りは関心を引かれない部品でもあります。

ヒューズの使われどころ

● 多くの分野で利用される

ヒューズはさまざまな分野で使用されています。一部を紹介すると、FAX、パソコン、コピー機、プリンタなどの事務機器、オーディオ、テレビ、電子レンジなどの家庭電化製品、自動車、電車、工場やプラントの電力設備などなど、あらゆる分野でどこにでも潜り込んでいる部品です。

● 携帯機器の普及とともにヒューズの応用分野も拡大

現在は、携帯端末やスマートフォンをはじめ、リチウム・イオン蓄電池を使用している製品が数多くあります(写真1)。リチウム・イオン蓄電池は、容量が大

きく安定して大きな電流を流せるエネルギー密度が高い電池のため、過負荷やショートした場合には大きな事故につながります。

リチウム・イオン蓄電池が使用されている航空機やスマートフォン、パソコンなどの事故例としては、バッテリー内部での不具合による電極間セパレータのショートや、過充電、過放電などの制御システムの問題などがあります。原因はともかく、電池性能が向上している一方で、事故が起きると発煙や発火を伴う事故になりかねないので、回路内部には必ずヒューズが実装されています。

電池内部の故障では保護は難しいですが、電池外部における保護にはいろいろと対策が講じられています。

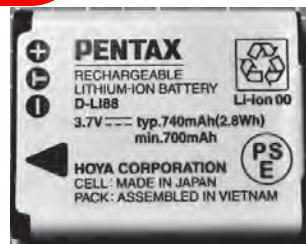
● 安全を担保している自動車には1台あたり50～60個のヒューズが張りめぐらされている

普段、何気なく運転している自動車は、車種によっても異なりますが、大きな容量の鉛バッテリーやリチウム・イオン蓄電池が搭載されています。これがショートすると非常に大きな電流(数十～100 A以上)が流れ、配線類などは瞬時に過熱します。下手をすると車体の炎上までの事故につながります。

そのため、車に搭載されている各種の電装品にはヒューズが組み込まれています。車のマイナス・ラインは車体につながれているので、各プラス側にはヒューズが装着されています。

自動車の各種電装品は走行時の安全面を考慮して、ヘッド・ライト右、ヘッド・ライト左のように片方の

写真1 携帯機器などに使われているリチウム電池



ライトが切れても、もう片方のライトは生きるように設計されています(フェイル・セーフになっている)。

自動車の部品故障は、人身事故につながることもあります。そこで安全面から部品単体で保護し、すべての機能が一度に失われることがないように、故障部分を最小限に切り離すべく考慮されています。そのため、電装品の数だけヒューズが組み込まれていると言っても過言ではありません。

自動車内のヒューズ・ボックスだけでも20～30個くらいはあります。また、ボンネットの中にもヒューズ・ボックスが分散配置されています(写真2)。1台に50～60個くらいのヒューズが装着されています。この数も走行時の安全面の確保から考慮されています。

● 公共の電力設備では陸上競技で使うボタン・サイズの大型ヒューズが使われている

6.6 kVや3.3 kVといった高圧を扱う電力会社の配電設備や高圧を受電している施設や工場、プラント事業所などの大口需要家では、高圧受配電設備が必要になりますが、そこにも電力用遮断器などとともに電力ヒューズが使われています。

図1に示すように、陸上競技で使うリレーのボタンのような大きなサイズ(φ6×30 cmほど)です。電圧

が高いぶん、ヒューズが溶断したときのアーク放電を切り離す機構が必要になります(電圧が高いぶん、溶断した空間部の空気がイオン化されて導電状態になり、なかなかアーク放電が切れない状態になる)。これには、消弧剤を挿入するなどの対策が必要となるので、どうしてもサイズが大きくなります。

ヒューズの動作時間は、ほかの遮断器の動作時間(数サイクル)とは異なります。電流ヒューズなどでは半サイクル以下の動作時間によって機器の損傷を軽減できるので、あらゆる分野で電気保護のため使用されています。

用途はさまざまであり、身近なところでも多くの種類があります。形状もチップ・サイズからボタン・サイズまでと多種多様です。

感電、火災、漏電…被害を最小限度に食い止める

● 電子機器を搭載する製品や設備は突然故障する

電子機器を搭載した製品や設備は、単なる使用時の故障だけでなく、製品を落下させてケースが割れたとか、水をこぼしてしまったとか、塵埃の付着、高温下での放置などの環境によるストレス、部品の経年劣化、ひいては部品寿命に至るまで、長期間にわたって故障要因を含んでいます。

電気の故障は、前兆がある場合もありますが突然の場合がほとんどです。感電や火災、漏電など大きな事故を引き起こす可能性を常に有しています。



(a) 車載のヒューズ・ボックス



(b) ブレード型ヒューズ

写真2 車載に使われているブレード型ヒューズ。電流値により色分けされている。エレメントは外部から目視できる。

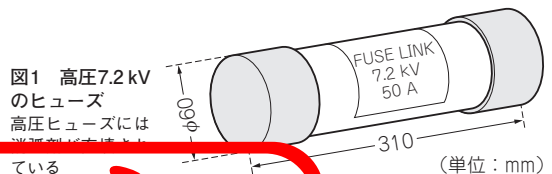


図1 高圧7.2 kVのヒューズ
高圧ヒューズには消弧剤が充填されている

(単位: mm)

column 01 ヒューズ製品と市場の適合性(一般、産業、車載)

高藤 裕介

回路保護素子であるヒューズは、スマートフォンなどの民生機器から通信機器などの産業機器、車載部品など幅広い製品で使用されています。そのため、ヒューズに求める性能も製品により異なります。

産業機器の場合、一般的に製品寿命は、民生機器よりも長く設定されています。そのため、ヒューズ

に長期間での信頼性

車載用途の場合に環境でヒューズが使用場合には、高温下で

る信頼性の保証が必要になる場合があります。

具体的なヒューズの設計の工夫としては、次のような例があります。

- (1) 温度変化による膨張と収縮を吸収できるようなヒューズ・パターンにする
- (2) 酸化防止のために、銅や銅ナトリウムの酸化防止

このPDFは、CQ出版社発売の「トランジスタ技術SPECIAL No.168」の一部見本です。内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MSP/MSP202410.html>
購入方法 <https://www.cqpub.co.jp/order.htm>