

機 械

5章

パワーエレクトロニクス

パワーエレクトロニクスとは、電力用半導体素子（パワーデバイス）を用いて電力の変換・制御を効率よく行う技術分野である。電気機器の高効率化や省エネルギー化への要望から、この分野の重要性がますます高まっており、それを反映して出題数も多くなってきた。

5-1 パワーデバイス

5-2 整流回路

5-3 チョッパ回路

5-4 インバータ回路

●演習問題

5-1 パワーデバイス

半導体電力変換回路は電力用半導体素子（パワーデバイス）とインダクタ(L)、キャパシタ(C)、トランスなどで構成され、パワーデバイスのスイッチング動作によって電力の変換や制御が効率よく行われる。主なパワーデバイスとしては、ダイオード、サイリスタ(SCR)、パワートランジスタ、パワーMOSFET、IGBTなどがある。

1. ダイオード／サイリスタ

(1) ダイオード

ダイオードはpn接合をもつ2端子素子であり、アノード(A)の電位がカソード(K¹)よりも高くなると導通(オン)する。逆にカソード電位がアノードよりも高い場合は、電流を遮断(オフ)する。すなわち電流を一方にしか流さない素子である。

図5-1(a)、(b)にダイオードの回路記号と電圧-電流特性を示す。図(b)においてアノードからカソードへ電流が流れると、素子の両端にわずかな電圧 v_{AK} (1[V]前後)が生じる。これを順電圧降下という。また逆電圧($v_{AK} < 0$)を加えると、ブレイクダウン電圧 V_{BD} に達するまではごくわずかな漏れ電流(数 μA)しか流れない。

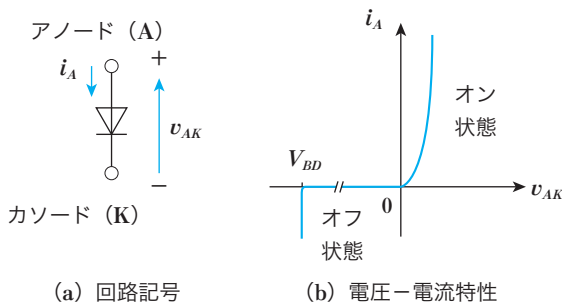


図5-1 ダイオード

¹ カソード (Cathode) であり、記号はCを用いるべきであるが、トランジスタのコレクタ (Collector) と同じになるのでKを用いる。

電力用ダイオードには、商用周波数の回路で用いる一般用ダイオードと数〔kHz〕以上の回路でも使用できる高周波用ダイオードがあり、電圧、電流定格は200〔V〕、10〔A〕程度から6 000〔V〕、3 000〔A〕の大容量まで多くの品種が作られている。

(2) サイリスタ

サイリスタとはpn接合を3つ以上持つ3端子素子の総称である。中でもpnpnの4層構造をもつSCRが最も一般に使用されるので、SCRのことをサイリスタとよぶことも多い。

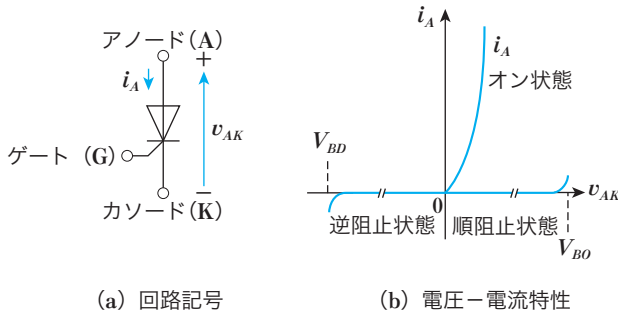


図5-2 サイリスタ

図5-2 (a), (b) に回路記号と電圧-電流特性を示す。ダイオードと異なる点は、順方向電圧 ($v_{AK} > 0$) が加わってもゲートからカソードへゲート電流を流さない限り導通しないことである。すなわち、ゲート信号によって素子をオンさせるタイミングを制御できることになる。

通常、ゲート信号は常時加える必要はなく、数〔ms〕程度のパルス電流でオンさせれば、その後はオン状態を維持する。一旦オンしたサイリスタは、ゲート信号でオフさせることはできず、アノード電流を0にするか、または逆電圧を印加する必要がある。オンしたサイリスタの順方向特性とオフしたサイリスタの逆方向特性は、ダイオードのそれとほぼ同じである。

サイリスタは高周波回路には不向きで、もっぱら商用周波数の回路で用いられる。電圧、電流定格は200〔V〕、10〔A〕程度から主に電力系統用変換器に用いられる光トリガサイリスタでは6 000〔V〕、3 000〔A〕程度の大容量までである。サイリスタにはSCRのほかTriacやGTOサイリスタなどがある。

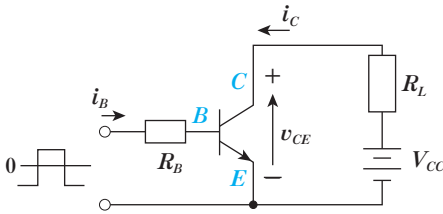
2. パワートランジスタ／パワー MOSFET ／ IGBT

(1) パワートランジスタ

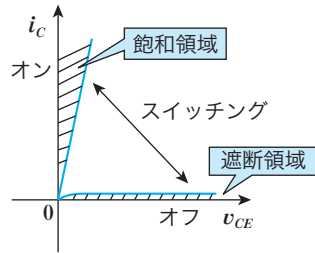
バイポーラトランジスタを電力用に高耐圧・大電流化したもので、npn形の素子が一般に使用される。図5-3(a)の基本回路において、立ち上がりの速い十分な大きなベース電流 i_B をベース(B)－エミッタ(E)間に流すと、トランジスタは飽和状態となりコレクタ電流 $i_C \doteq \frac{V_{CC}}{R_L}$ が流れる(スイッチオン)。

この時のコレクタ(C)－エミッタ(E)間の電圧降下を飽和電圧といい、バイポーラトランジスタはこれが小さい(0.6[V]程度)という特長がある。反面、電流駆動形デバイスであるため、後述のMOSFETやIGBTよりゲート(ベース)駆動電力が大きく、またオン・オフ周波数もMOSFETほど高くできないといった短所がある。

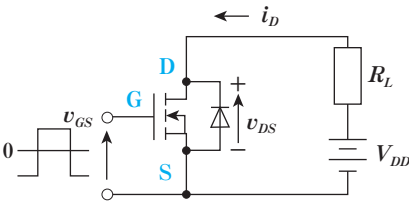
トランジスタ(スイッチ)をオフさせるには、ベースに0または少し負の電圧を加える。このようにトランジスタをスイッチとして使用する場合は、図(b)のようにトランジスタの遮断領域と飽和領域のみを使う。



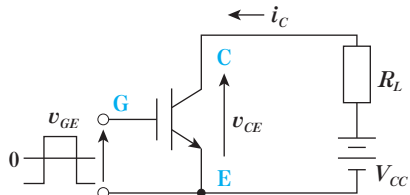
(a) バイポーラパワートランジスタ



(b) スwitching動作



(c) パワー MOSFET



(d) IGBT

図5-3 自己消弧素子とスイッチング回路

(2) パワー MOSFET

図 5-3 (c) は n チャネル形 MOSFET を用いた基本回路であり、ゲート(G) - ソース(S) 間に図の方向にゲート電圧 (数 [V] ~ 十数 [V]) を加えると、MOSFET は飽和し、ドレイン(D) 電流 i_D が流れる。またスイッチをオフさせるにはゲート電圧を 0 または負にすればよい。このときゲート電流はほとんど流れない。

パワー MOSFET は電圧駆動形デバイスであり、バイポーラパワートランジスタと比べてゲート駆動電力が小さく、高速なスイッチング動作が可能という長所をもっている。しかし、大容量 (高電圧) 素子では順電圧降下 (飽和電圧) が大きくなってしまふという欠点もある。

(3) IGBT

パワートランジスタの高耐圧・低飽和電圧と、パワー MOSFET の高速動作・低駆動電力という特長をあわせ持ったパワー半導体デバイスが IGBT である。図 (d) の基本回路においてゲート(G) - エミッタ(E) 間にパワー MOSFET と同等の電圧を加えるとオンし、0 または負の電圧を加えるとオフする。

パワートランジスタとパワー MOSFET の特長を兼ね備えた IGBT は、電圧駆動であるため駆動電力が小さいうえ、パワートランジスタに似てオン電圧降下も低い。また、パワートランジスタとパワー MOSFET の中間の比較的高いスイッチング周波数 (数 [kHz] ~ 数十 [kHz]) で動作させることが可能なため、近年広く使われるようになった。

表 5-1 は、ここで取り上げたパワーデバイスの特徴を比較したものである。

表 5-1 パワーデバイスの特徴比較

素子の種類	順電圧降下	駆動電力	動作周波数	電力容量
パワートランジスタ	小	大	低	小~中
パワー MOSFET	大	小	高	小
IGBT	小	小	中	中

3. 半導体スイッチの損失

理想的なスイッチでは、オン状態、オフ状態、スイッチング過渡期間、いずれにおいてもスイッチで消費される電力はゼロである。しかし、前述のように実際

のパワーデバイスでは、オン電圧降下やスイッチング時間が存在するので、これらに伴う損失が発生する。

損失には、トランジスタがオフのとき発生する**オフ損失**、オン期間に発生する**オン損失**、そしてオフからオンおよびオンからオフに切り替わる**過渡期間**に発生する**スイッチング損失**がある。したがって、パワーデバイスの損失はこれら3つの損失の和になるが、オフ損失は他に比べて非常に小さいので無視することが多い。オン損失を減らすためには飽和電圧の低い素子を選ぶ必要がある。また、スイッチング損失はスイッチング時間と周波数に比例するため、高周波スイッチング回路になるほど高速な素子を用いる必要がある。

基本問題

● 問題 1 (2008 年電験 3 種 A 問題)

電力用半導体素子（半導体バルブデバイス）である IGBT（絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）に関する記述として、正しいのは次のうちどれか。

- (1) ターンオフ時の駆動ゲート電力が GTO に比べて大きい。
- (2) 自己消弧能力がない。
- (3) MOS 構造のゲートとバイポーラトランジスタとを組み合わせた構造をしている。
- (4) MOS 形 FET パワートランジスタより高速でスイッチングできる。
- (5) 他の大電力用半導体素子に比べて、並列接続して使用することが困難な素子である。

答え：(3)

解説

IGBT は MOS 構造のゲートとバイポーラトランジスタとを組み合わせた構造をしており、両者の特長をバランスよく兼ね備えている。すなわち、MOS 形の特長であるゲート駆動電力が小さいこと、MOSFET には及ばないが、かなりの高速スイッチング（数十 [kHz]）が可能である。また、バイポーラトランジスタの特長である低飽和電圧、高耐圧、大電流という特性も持っている。