

1章 回転機

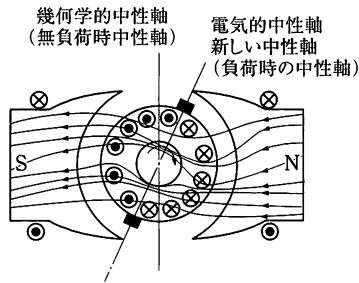
1. 直流機

(1) 直流機の性質と理論

1) 電機子反作用とその対策

① 電機子反作用

電機子巻線に電流が流れると、電機子鉄心に主磁界とほぼ直角方向に起磁力が生じる。この起磁力が、図1-1に示すように主磁界の分布を乱す作用をする。これを電機子反作用という。



●図1-1 電機子反作用による磁束分布（発電機の場合）

(a) 中性軸の移動

図1-1に示すように、無負荷時には、磁界の中性軸は両磁極の中間軸（幾何学的中性軸という）となるが、負荷がかかり、電機子巻線に電流が流れ、電機子反作用が生じると、新しい中性軸位置（傾斜した位置）となる。これを電機的中性軸という。

電機的中性軸は、発電機の場合には、図1-1に示すように回転方向に移動し、電動機の場合には、回転方向と反対方向に移動する。

(b) 中性軸移動による問題点

電機子巻線が回転すると、隣りあった二つの整流子片がブラシによって短絡する状態が生じる。一つのコイルがブラシで短絡されるのは、そのコイルが中性軸を通り過ぎるときであって、コイルはN極側からS極側に移るので、電流の方向が反転する。このとき中性軸が主磁界と直角方向にあり、しかも、整流曲線が直線整流の場合は、ほとんど火花を発生しないが、電機子反作用によって中性軸が傾斜しているときは、ブラシが無負荷の位置にあるので、中性軸とブラシの位置のズレのため大きな火花を発生することになる。

チェック

●電機子反作用とは
電機子電流による磁界が、主磁界(束)の分布や大きさに影響を与えること。

チェック

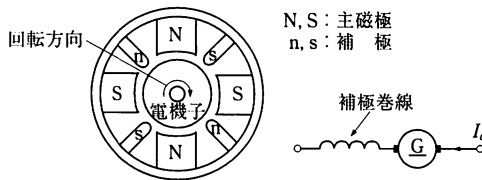
●電機的中性軸の移動
・発電機→回転方向へ
・電動機→回転方向と反対方向

② 電機子反作用発生防止策

良好な整流を行うためには、ブラシの位置を中性軸の傾斜角度まで移動すればよいが、その傾斜角度は負荷の大小によって決まるので、負荷が変動するときには不都合となる。電機子反作用を分析すると、中性軸付近に磁束を発生する作用および片側の磁束密度を大きくし、ほかの側において磁束密度を小さくする作用（図1—1参照）とがあるが、後者は磁気回路に飽和のあるときは、減磁作用として作用する。以上のことから、中性軸付近の電機子反作用をなくし、良好な整流を行うために次の対策をとっている。

(a) 補 極

N, S主磁極の中間に、図1—2に示すように補極を設ける。その極性は、発電機の場合、電機子の誘導起電力と電機子電流とが同方向であるから、電流の変化を促進するために、補極の極性を電機子の回転方向に対し、次にくる主極の極性と同じにする。電動機の場合は、この逆にする。



●図1—2 補極の位置と極性

補極巻線に電機子電流が流れると、電機子コイルがブラシで短絡され、整流状態になったとき、コイルのインダクタンスのためにリアクタンス電圧を生じ、整流中のコイルの電流変化を妨げる。このため、補極の起磁力は電機子反作用を打ち消すとともに、リアクタンス電圧を打ち消すための整流起電力を発生する。

以上のように、補極は中性軸付近の電機子反作用を打ち消すが、それ以外の電機子反作用は残るので、補極の一部の磁束密度が過度に高くなって整流子部分でフラッシュオーバを起こすことがある。これを防ぐために補償巻線を設ける。

(b) 補償巻線

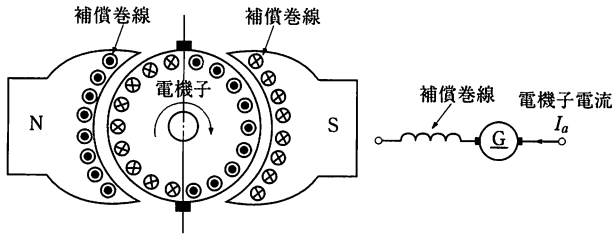
図1—3に示すように、この巻線は主磁極の磁極片の全面に設けたスロットルに導体を通して巻線としたもので、電機子巻線に直列に接続し、電機子電流と逆向きに電流を流し、電機子電流によって発生した電機子磁束を完全に打ち消し、整流の改善を図るものであ

チェック

●補極の極性

発電機では回転方向に対し、次にくる主極の極性と同じ。電動機の場合は、発電機の逆である。

る。補償巻線は大容量機にだけ設けるが、補極はすべての直流機に必要なものである。

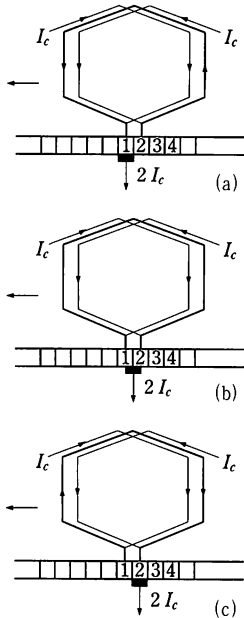


●図1-3 補償巻線（発電機の場合）

2) 整流

ブラシで短絡したコイルの電流の方向がその短絡期間中に反転することを整流という。

図1-4は、重ね巻きの場合に、固定されたブラシに電機子巻線（整流子片と接続）が図の(a), (b), (c)の順に矢印の方向に移動すると、コイル中の電流が反転することを示している。



●図1-4 整流中のコイルの電流

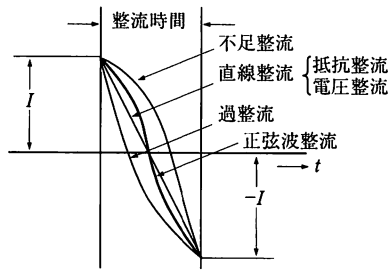
●図1-5 電機子コイルの電流変化（整流曲線）

一つのコイルがブラシによって短絡されている期間を整流期間（時間）といい、図1-5に示すような整流周期中のコイル電流の変化を表す曲線を整流曲線という。

チェック

●電機子巻線法

- 重ね巻き（並列巻）
コイルの巻き終わりを次のコイルの巻き始めと一つにして整流子片に接続する巻き方。
- 波巻（直列巻）
次の磁極、次の磁極と進んでいくコイルのつながり方。



① 不足整流

補極が弱い場合やブラシの接触抵抗が小さい場合は、電機子コイルのインダクタンスの影響で電流変化が遅れるため、ブラシ後端から火花が生じる。これを防ぐには補極の巻数を多くし、中性軸上の整流磁束数を多くして、これによって大きくなった起電力を利用して整流を促進させる。この方法を電圧整流という。

また、ブラシと整流子片間の接触抵抗を大きくして、リアクタンスの影響を相対的に小さくする。この方法を抵抗整流という。

② 過整流

補極が強い場合は、電流の変化が速すぎてブラシの前端から火花を発生するので、補極の巻数を少なく修正して、直線整流が得られるようにする。

③ 直線整流

電圧整流および抵抗整流が最適に行われ、無火花の理想的な整流法である。

④ 正弦波整流

整流開始前後、終了直前の電流変化がゆるやかであり、火花を発生しない。

例 1-1 次の文は電機子反作用に関する説明文である。

□の中に適当な用語を記入しなさい。(以下の例題において、～の問題文は省略)

① 電気的中性軸の移動は、電動機の場合は回転方向と

□(1)方向となり、発電機の場合は□(2)となる。

② 一般に、良好な整流を行うためには、ブラシの位置を中性軸の□(3)まで移動すればよいと考えられるが、負荷が変動すると不都合となるので、□(4)機では実施しない。

【解 答】(1) 反対, (2) 同一, (3) 角度 (位置), (4) 直流

例 1-2 大容量の直流機においては、電機子起磁力によ

って生じる主磁極下の交さ磁束を打ち消すため、□(1)極片の表面に近く、電機子導体と□(2)に、かつ、電機子電流と□(3)方向に電流が流れるように接続して、□(4)磁束と等しく、かつ、□(5)方向の磁束を生じる巻線を設け

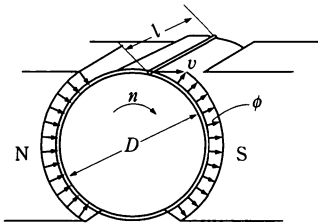
る。これを補償巻線という。

- [解答] (1) 主磁 (主), (2) 平行, (3) 反対 (逆),
 (4) 電機子, (5) 反対 (逆)

3) 直流機の理論

① 誘導起電力

磁束密度 B (T) の磁界中に長さ l (m) の導体が B (Wb) と直角方向に v (m/s) の速度で運動する場合, その導体の両端に誘起される起電力 e (V) は, $e = Blv$ (V) で表される。



- D : 電機子直径 (m)
- l : 導体の有効長 (m)
- n : 電機子の回転速度 (r/s)
- v : 導体の周辺速度 (m/s)
- ϕ : 毎極の有効磁束数 (Wb)
- p : 磁極数

●図 1-6

いま, 図 1-6 に示すように電機子の直径を D (m), 1 分間の回転数を N (r/min) とすると,

$$v = \frac{\pi DN}{60} \text{ [m/s]}$$

また, $l\pi D$ (m²) は電機子の周辺の面積であるから, B を電機子周辺の平均磁束密度とすると, $l\pi DB$ は電機子周辺を出入りする総磁束となる。したがって, 極数を p とし, 毎極の磁束数を ϕ (Wb) とすると, 導体 1 本の起電力 e (V) は次の式で表される。

$$e = \frac{p\phi N}{60} \text{ [V]}$$

電機子導体の総数を z , 並列回路数を a とすると, ブラシ間の直列導体数は z/a 本であるから, 合成誘導起電力 E (V) は, 次のように表される。

$$E = \frac{z}{a} p \phi \frac{N}{60} = K_1 \phi N \text{ [V]}$$

(1-1)

ただし,

$$K_1 = \frac{pz}{60a}$$

② トルク

電機子の半径を r (m), 磁束密度を B (T), 電機子導体 1 本の長

チェック

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{\phi}{\pi D l}$$

$$e = Blv = \frac{p\phi}{\pi D l} \cdot l \cdot \frac{\pi DN}{60} = \frac{p\phi N}{60} \text{ [V]}$$

チェック

$K_1 = \frac{pz}{60a}$ は, 発電機の構造から決まる定数である。

チェック

導体に流れる電流は $\frac{I_a}{a}$ (A) である。

さを l [m], 並列回路数を a , 電機子電流を I_a [A] とすると, 導体 1 本に働く力は $F' = BlrI_a/a$ [N] であり, トルク T' [N·m] は, 次式で表される。

$$T' = F' \cdot r = \frac{BlrI_a}{a} \text{ [N·m]} \quad (1-2)$$

毎極の磁束数を ϕ [Wb], 極数を p とすると, 磁束密度 B [T] は, 次式で表される。

$$B = \frac{\phi}{2\pi rl} = \frac{p\phi}{2\pi rl} \text{ [T]} \quad (1-3)$$

電機子導体の総数を z とすると, 電機子を回転させるトルク T [N·m] は, 式 (1-2) と (1-3) から, 式 (1-4) となる。

$$\begin{aligned} T &= T' \times z = \frac{p\phi}{2\pi rl} \times \frac{lrI_a}{a} \times z \\ &= \frac{pz}{2\pi a} \phi I_a = K_2 \phi I_a \text{ [N·m]} \quad (1-4) \end{aligned}$$

例 1-3 直流分巻発電機の極数 6, 電機子導体全数 600, 各磁極の磁束 0.01 Wb, 回転数は 600 r/min で, 電機子巻線は波巻とするときの電機子の誘導起電力を求めよ。

【解 説】

式 (1-1) を用いて解くが, 題意は波巻であるから並列回路数 a は 2 である (重ね巻きの場合, $a=p$)。

$$E = \frac{600}{2} \times 6 \times 0.01 \times \frac{600}{60} = 180 \text{ V}$$

【解 答】 180 V

例 1-4 10 kW の 4 極波巻直流電動機で, 電機子導体総数 702, 毎極磁束 0.006 Wb のとき, 全負荷時に電機子電流が 65 A であったときのトルクを求めよ。

【解 説】

式 (1-4) を用いて解く。

$$T = \frac{4}{2\pi \times 2} \times 702 \times 0.006 \times 65 = 87.1 \text{ N·m}$$

【解 答】 87.1 N·m

チェック

$K_2 = \frac{pz}{2\pi a}$ は, 電機子の構造で決まる定数。

チェック

並列回路数 a は, 巻線法により, 次のようになる。

重ね巻 $a=p$

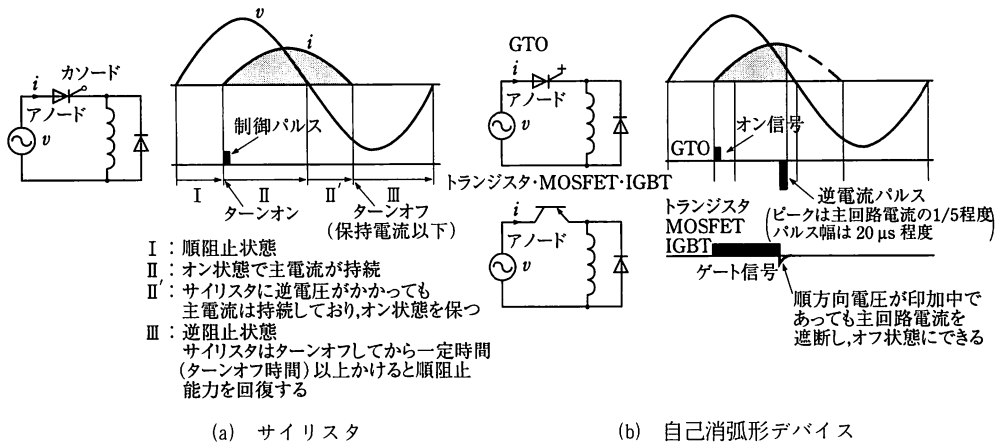
波巻 $a=2$

4章 パワーエレクトロニクス

1. 電力用半導体デバイスの種類

(1) 電力用半導体デバイスの分類

半導体電力変換装置は半導体素子（デバイス）のオン・オフにより動作する。図4-1にサイリスタと自己消弧形デバイスの制御の違いをリアクトル電流の制御の例で示し、デバイスの分類を表4-1に示す。



●図4-1 半導体デバイスの動作概念(リアクトル電流制御の例)

●表4-1 半導体デバイスの分類

	オン機能可制御デバイス	オン・オフ機能可制御デバイス (自己消弧形)
素子	逆阻止三端子サイリスタ	電流制御形デバイス ●GTOサイリスタ ●バイポーラトランジスタ 電圧制御形デバイス ●パワーMOSFET ●IGBT
オン・オフ制御方法	自己消弧機能をもたないので、外部電源によって転流が行われる。 オン: 順電圧 (アノード+・カソード-) を加えた状態でゲートに制御信号を与えるとオフからオンへと移る (ターンオンする)。一度オンすると制御信号がなくてもオン状態を保ち、外部回路の主電流は持続する。	GTO ターンオンはサイリスタと同じ。 ターンオフは順電圧がかかってもゲートに逆電流パルスを加えるとオフ状態に切り換わる。 バイポーラパワー トランジスタ パワー MOSFET, IGBT ゲート・ベース信号を連続的に加えることによりオン状態を維持し、ゲート・ベース信号を取り除けばオフ状態にも

チェック

パワーエレクトロニクスは、半導体デバイスの大容量化・高性能化への開発とマイクロプロセッサを応用した制御技術の進歩で急速に適用が拡大している。

チェック

半導体デバイスによるスイッチングは制御信号に対する遅れ時間がなく、正確なタイミングでのオンオフが可能である。

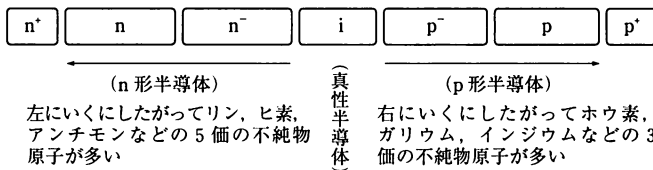
参照

GTO: gate turn-off thyristor
MOSFET: metal-oxide-semiconductor field-effect transistor
IGBT: insulated gate bipolar transistor

オフ	主電流を保持電流以下に絞るとオフする(ターンオフする)。さらに逆電圧をターンオフ時間以上の間加えると順阻止能力を回復し、オフ状態を保つ。	どる。 信号は電流制御形が電流、電圧制御形が電圧。
----	--	------------------------------

(2) p・n 層の不純物濃度とその特徴

理想的な半導体デバイスは、①オン抵抗が小さい、②高耐圧である、③スイッチング速度が速い、であり、これに近づけるため種々の濃度の層構造にしている。



●図4-2 半導体の不純物濃度

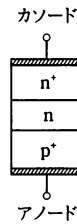
(特徴)

- p⁺ n⁺ 半導体 : 不純物濃度が高い → 低抵抗である
- p⁻ n⁻, i 半導体 : 不純物濃度が低い → 高抵抗である
- p⁺ n⁺ 接合 : 不純物濃度の高いもの同士の pn 接合では空乏層が狭く逆耐圧が低い
- P⁺ n⁻ 接合 : 不純物濃度の高いものと低いものによる pn 接合では不純物濃度の低いほうに空乏層が広がり、逆耐圧が高い

(3) 電力用半導体素子の基本構造と動作原理

1) ダイオード

電力用ダイオードは、図4-3に示すように p⁺ nn⁺ 構造となっている。これは順電圧降下を小さくするためには p⁺ n⁺ 接合にしたいが、それでは空乏層が広がりにくくて逆耐圧が低くなってしまいます。そこで高抵抗の n 層を p⁺ 層、n⁺ 層で挟んだ構造にして、n 層に空乏層を広らせて逆耐圧を高くしている。表4-2にオ



●図4-3 ダイオードの構造

チェック

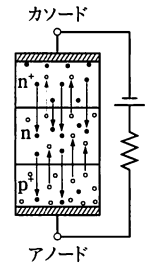
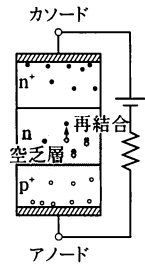
- 電流制御形デバイス
電流制御信号で動作
- 電圧制御形デバイス
電圧制御信号で動作。
小電力であり、電子回路(IC)の信号で制御できる。

チェック

- キャリア
自由電子, 正孔
- 多数キャリア
p形 → 正孔
n形 → 自由電子
少数キャリアはその逆
- 空乏層
キャリアがなく高い抵抗領域
- ドリフト
電界によるキャリアの移動
- 拡散
密度差によるキャリアの移動

ン・オフ時の動作過程を示す。

●表 4-2 ダイオードの動作原理 (は正孔, ●は電子を表す)

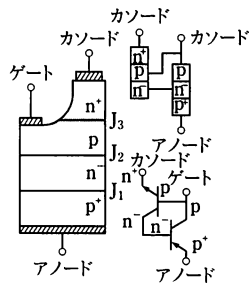
オン過程	オフ過程
 <p>アノード・カソード間に順方向電圧が印加されていると、p^+ 層の正孔は n 層に、n^+ 層の電子も n 層にそれぞれ注入される。p^+ 層と n^+ 層の不純物濃度が等しければ等量の正孔・電子が n 層に注入され、n 層は高注入状態となって電気抵抗は著しく低下する。これを伝導度変調という。 n 層に注入された正孔・電子は再結合によって消滅するものもあるが、大部分は、正孔は n^+ 層へ、電子は p^+ 層へ到達し、電界によってドリフトして各電極に集められる。</p>	 <p>アノード・カソード間に逆方向電圧が印加されていると、アノード側では負の電界によって p^+ 層の正孔がアノード電極に引き寄せられ、n 層への正孔の供給が停止する。一方カソード側においても正の電界によって電子が引き寄せられ、同様にカソードからの電子の供給が停止する。 n 層に残された正孔はアノードに、電子はカソードに吸い出され、n 層に空乏層が広がってターンオフ動作が完了する。この期間ではアノードには負の電流が流れる。</p>

2) サイリスタ (逆阻止 3 端子サイリスタ)

サイリスタは図 4-4 のように pnpn の 4 層構造で、等価的には npn, pnp の二つのトランジスタを結合した動作となる。ターンオンすると二つのトランジスタが相互にベース電流を供給し合うので、ゲート信号を取り去ってもオン状態が保持される (ラッチアップ現象)。ターンオフには、逆方向電圧を一定時間以上印加しなければならない。逆阻止状態のジャンクションは、 J_2 (順方向電圧) と J_1, J_3 (逆方向電圧) である。光サイリスタは J_3 ジャンクションに光信号を当てて電子-正孔対を発生させ、これをキャリアにしてターンオンさせる。

光サイリスタは、主回路と点弧用光パルス発生回路を分離でき、ノイズ耐量の向上、使用部品点数の低減が可能である。周波数変換装置や SVC など大容量変換器に用いられる。最大級の素子定格は、8000 V-3500 A である。

表 4-3 にオン・オフ時の動作過程を示す。



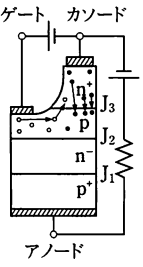
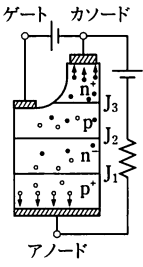
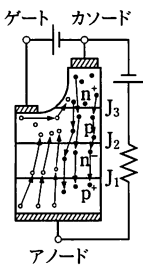
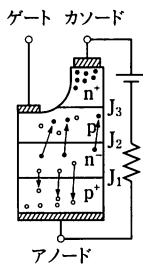
(a) 基本構造 (b) 等価回路

●図 4-4
サイリスタの構造



SVC: static var compensator

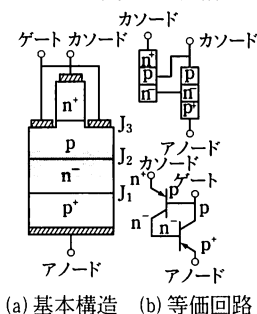
●表 4-3 サイリスタの動作原理 (○は正孔, ●は電子を表す)

オン過程	オフ過程
 <p>アノード・カソード間に順方向電圧が印加されると J_2 ジャンクションで逆バイアス状態となり n^- 層に空乏層が広がる。この状態でゲート・カソード間に順方向電圧が印加されるとゲートから p 層に正孔が注入されて同時にカソードの負の電界によって正孔が n^+ 層に注入される。これを中和するように n^+ 層からは不純物濃度に比例して電子が p 層に注入される。</p>	 <p>アノード・カソード間に逆方向電圧が印加されると p^+ 層ではアノードの負の電界によって正孔がアノード電極に引き寄せられ, n^- 層への正孔の供給が停止する。一方, n^+ 層でもカソードの正の電界によって電子の供給が停止する。</p>
 <p>p 層に注入された電子の一部は再結合によって消滅するが, 大部分は拡散しながら n^- 層に達し, n^- 層をドリフトしてアノードに達する。一方, p^+ 層からは電子を中和するように正孔が n^- 層に注入され, n^- 層は高注入状態となり低抵抗状態となる。n^- 層では再結合によって正孔の一部は消滅するが大部分は p 層に達する。これは n^+pn^- トランジスタのベース電流となり, この状態でゲート電流をなくしてもオン状態は保持される。</p>	 <p>n^- 層に取り残された正孔は負の電界によってアノード電極に吸い込まれる。また, 電子については p 層に吸い出されて p 層において再結合によって消滅し, ターンオフ動作は完了する。中央部のキャリアがなくなるまでアノードには負の電流が流れる。</p>

3) GTO サイリスタ

GTO サイリスタは図 4-5 のようにサイリスタと同じ 4 層構造の素子であるが, 大きな違いはターンオフ時に p 層からのキャリアの引抜き能力を高めるためにカソード幅を狭くし, カソードの周りをゲートで取り囲む構造にしていることである。また, 電流定格により図の単位 GTO セグメントを数百~数千個並列に接続した構造になっている。

自励式 SVC や鉄鋼圧延機用インバータ, 電車駆動用インバータなど, 数百 kVA か



●図 4-5 GTO サイリスタの構造