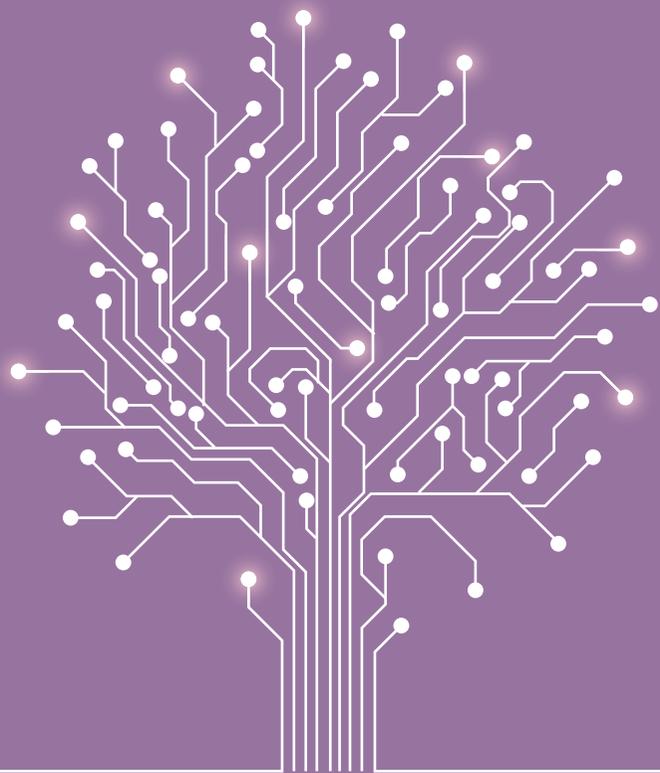


2022年度版

第二種電氣主任技術者

合格講座

機械編



1

章 直流機

「機械」科目で最初に学習する「直流機」分野は、電験三種の知識がそのまま活用できる問題が多く、三種に合格している方ならば、基本的には新しい知識を身につける必要はほとんどありません。二種特有の出題傾向も身につけつつ、三種の復習メインで学習を進めていきましょう。

一次試験「機械」科目では、「直流機」分野の問題は3～4年に1問程度と、他の分野と比較しても出題頻度は非常に少ないものになります。一通り読み進めたところで大体の知識が習得できたと思ったら、早々に切り上げて他の分野に学習時間を当てるのも戦略としては良いでしょう。

● 第1章の学習内容

- 1-1. 直流機の基礎
- 1-2. 直流機の電機子反作用と整流作用
- 1-3. 直流機の各種回路と特性

1-1 直流機の基礎

難易度



学習のポイント

本節では、「直流機の基礎」について学習します。この単元の内容は電験三種でも解説した直流機の基本構造や誘導起電力、電動機の実出力およびトルクの式について扱っていきます。まずは復習を兼ねつつ二種の対策をスタートしていきましょう。

直流機とは

直流機は回転機のうち、機械的動力により直流電力を発生させたり（発電機）、逆に直流電力により機械的動力を発生させる（電動機） 機器です。

回転機において、電磁誘導作用に必要な磁束を発生させる部分を界磁、誘導起電力および機械的動力であるトルクを発生させる部分を電機子といい、どちらも鉄心と巻線状の導体で構成されています。

直流機は一般的に電機子が回転する構造で、電機子導体が磁極を通過する際に発生する起電力を、**整流子とブラシ**の作用によって直流としています。

図 1-1 に直流機の一般的な構成を示します。同図は直流電動機の例で、直流電源を接続して電機子に電流を流し、これと界磁による磁束により電磁力を発生させます。

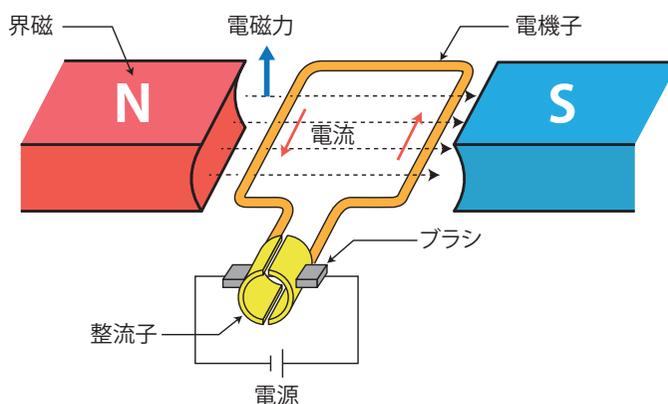


図 1-1 直流機の構成

+ 補足

直流電動機の中には、整流子とブラシの代わりに回転子の磁極位置検出センサと半導体スイッチを組み合わせることで、整流動作を電子的に行う**ブラシレス DC モータ**もあります。

電機子巻線の分類

電機子巻線は、鉄心表面に設けたスロット内に収納される構造となっています。

直流機の電機子巻線の形状による分類として、重ね巻と波巻があります。

重ね巻は図 1-2 のように巻線を「重ねる」ように配置し、位置を少しずつずらして接続する方式です。重ね巻は並列回路数が増えるのが特徴で、N・S の磁極に対して一つの閉回路を作り、ブラシ（取り出し口）を介した外側で各閉回路が並列接続されています（すなわち、並列回路数＝磁極数となります）。したがって、電機子電流は各並列回路の電流の総和になります。重ね巻は電流の大きい中出力以上の直流機に採用されます。

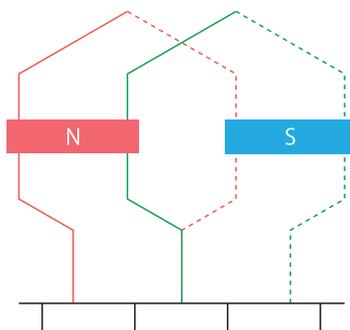


図 1-2 重ね巻

一方、**波巻**は図 1-3 のように各導体を一定間隔ごとに配置し、順番に接続していく方式で、まるで「波打つ」ような形状をしています。波巻は直列巻とも呼ばれ、すべての巻線を直列に接続して一つの閉回路とし、一对のブラシを取り付けます。このとき、ブラシからみた並列回路数は 2 となり、図 1-3 に示すように相対するすべての磁極によってこれらの閉回路は起電力を誘導します。波巻は比較的小さい出力の直流機に採用されます。

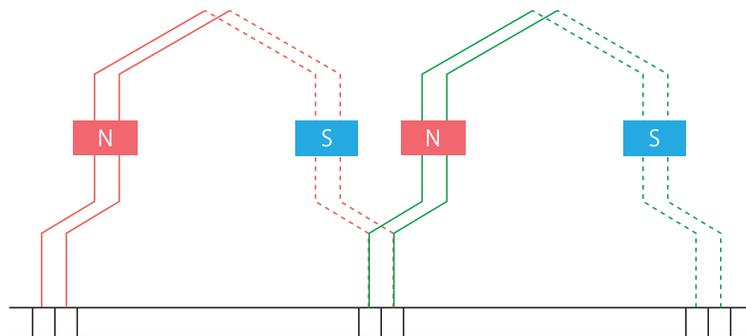


図 1-3 波巻

+ 補足

巻き方に関しては図 1-2 および図 1-3 のように一部を切り取った図でよく説明がされますが、電機子鉄心の断面は円形なので、全体をみると図 1-2 および図 1-3 の巻き方が円周に沿って続いていくことになります。

直流機の誘導起電力

本項では、直流機の誘導起電力の式を導出します。

図 1-4 のように、直径 D [m]、長さ l [m] の円筒状の電機子が速度 N [min^{-1}] で回転している場合を考えます。

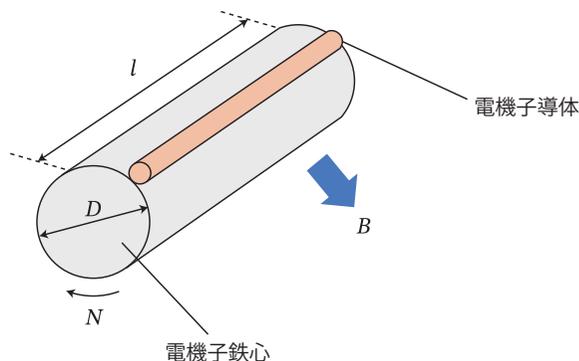


図 1-4 回転する電機子

まず、電機子の周辺速度 v [m/s] は、電機子の回転の軌道が円周 πD [m] となることから、

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

+ 補足

回転速度 N [min^{-1}] は、その単位をみてもわかるように「時間あたりの回転数」を表しています。一方、周辺速度 v [m/s] は「時間あたりに進む距離」を表すので、「時間あたりの回転数」に「1回転あたりの距離=円周」をかけて導出します。

なお、回転速度に関しては、1 min = 60 s の関係から、次のように単位換算できます。

$$N[\text{min}^{-1}] \Leftrightarrow \frac{N}{60}[\text{s}^{-1}]$$

回転速度に関する式を導出する際は、単位の換算を忘れないようにしましょう。

また、電機子表面の平均磁束密度を $B[\text{T}]$ とすると、1 導体あたりに発生する誘導起電力 $e[\text{V}]$ は、電機子導体が 1s あたりに切る磁束で表されます。かつ磁束が 1s あたりに鎖交する面積は、図 1-4 の円筒の (1s あたりの回転距離) \times (円筒の長さ) である $vl[\text{m}^2]$ で表されるため、

$$\begin{aligned} e &= B \cdot vl \\ &= \frac{\pi D l}{60} B N [\text{V}] \quad \cdots \cdots (1.1) \end{aligned}$$

+ 補足

ファラデーの電磁誘導の法則より、誘導起電力 e と鎖交磁束 ϕ の関係は、巻回数を 1 とすると、

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

であり、単位時間あたりに導体を鎖交する磁束が誘導起電力を表します。

また、電機子の極数を p 、1 極あたりの磁束を $\phi[\text{Wb}]$ とすると、平均磁束密度 B は総磁束 $p\phi$ を図 1-4 の円筒の側面積 $\pi D l[\text{m}^2]$ で割ることによって求められるため、

$$B = \frac{p\phi}{\pi D l} [\text{T}] \quad \cdots \cdots (1.2)$$

(1.2) 式を (1.1) 式に代入すると、1 導体あたりの誘導起電力 e は、

$$\begin{aligned} e &= \frac{\pi D l}{60} N \cdot \frac{p\phi}{\pi D l} \\ &= \frac{p}{60} \phi N [\text{V}] \end{aligned}$$

さらに、電機子総導体数を Z 、並列回路数を a とすると、回路 1 本あたりの直列導体数は $\frac{Z}{a}$ で表されるので、電機子誘導起電力 $E[\text{V}]$ は、

$$\begin{aligned} E &= \frac{Z}{a} e \\ &= \frac{pZ}{60a} \phi N [\text{V}] \end{aligned}$$

となり、誘導起電力 E は鎖交磁束 ϕ と回転速度 N に比例します。

直流機の誘導起電力

$$E = \frac{pZ}{60a} \phi N$$

E : 電機子誘導起電力 [V] p : 極数

Z : 電機子総導体数 a : 並列導体数

ϕ : 鎖交磁束 [Wb] N : 電機子回転速度 [min^{-1}]

+ 補足

直流機の誘導起電力の式は、発電機・電動機ともに成り立ちます。

発電機の場合、電機子導体を速度 v で回転させることにより、フレミングの右手の法則により誘導起電力 E が発生します。

一方、電動機では、外部電源からの供給により導体に電流 I が流れると、これと磁束 ϕ によってフレミングの左手の法則による電磁力がはたらきますが、このとき前述の式で表される**逆起電力** E が発生します。

一次試験「機械」科目では、本項の誘導起電力 E の式の導出が大問全体にわたって出題されますので、自力で導出できるように練習しておきましょう。

直流電動機の出力和トルク

直流電動機では、磁束中の電機子導体に電流を流すと、電磁力によるトルクがはたらきます。このとき、電動機出力とトルクの関係は次のようになります。

直流電動機の出力和トルク

$$P = \omega T = 2\pi \frac{N}{60} T$$

P : 電動機出力 [W] ω : 角速度 [rad/s]

T : トルク [N·m] N : 回転速度 [min^{-1}]

+ 補足

角速度 ω [rad/s] は、「1 s あたりの回転角」を表します。1 回転した場合の回転角は 2π であるため、「時間あたりの回転数」である回転速度 N [min^{-1}] との関係は、 $\left[\frac{1}{60}\text{s}^{-1}\right] \leftrightarrow [\text{min}^{-1}]$ の単位換算に注意して、

$$\omega = 2\pi \frac{N}{60}$$

となります。

次に、直流電動機の電機子電流 I_a [A] とトルク T [N·m] の関係について考えます。

前項の「直流機の誘導起電力」の式より、

$$\begin{aligned} E &= \frac{pZ}{60a} \phi N \\ &\equiv K \phi N \end{aligned}$$

上式では、 $K = \frac{pZ}{60a}$ と置いています。

このときのトルク T は、「直流電動機の実出力とトルク」の式を変形して、

$$\begin{aligned} T &= \frac{EI_a}{2\pi \frac{N}{60}} \\ &= \frac{K \phi N \cdot I_a}{2\pi \frac{N}{60}} \\ &= \frac{60K}{2\pi} \phi I_a \\ &\equiv K' \phi I_a \text{ [N·m]} \end{aligned}$$

となり、トルク T は鎖交磁束 ϕ [Wb] と電機子電流 I_a に比例します。

直流電動機の電機子電流とトルク

$$T = K' \phi I_a$$

T : トルク [N·m] K' : 係数

ϕ : 発生磁束 [Wb] I_a : 電機子電流 [A]

+ 補足

係数 K' を計算すると、

$$\begin{aligned} K' &= \frac{60K}{2\pi} \\ &= \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{pZ}{60a} \\ &= \frac{pZ}{2\pi a} \end{aligned}$$

なお、係数の式は無理に覚える必要はありません。「トルク T は鎖交磁束 ϕ と電機子電流 I_a に比例する」という関係性が重要です。

例題

次の文章は、直流機に関する記述である。文中の□に当てはまる最も適切なものを解答群の中から選べ。

磁束密度 B [T] の磁界中でこれと直角に長さ L [m] の導体を速度 v [m/s] で運動させると、この導体中には誘導起電力 $e = \square(1)$ [V] が発生し、また、磁界と直角に置かれた導体に電流 I [A] を流すと、導体は力 $f = \square(2)$ [N] を受ける。この両式から直流機の誘導起電力 E [V] およびトルク T [N·m] が導かれる。すなわち、 $E = \frac{Z}{2a} \cdot e$ および $T = Zfr$ から次の式を得る。

$$E = \frac{Zpn\phi}{\square(3)} \text{ [V]} \quad \dots\dots(1.3)$$

$$T = \frac{Zp\phi I_a}{\square(4)} \text{ [N·m]} \quad \dots\dots(1.4)$$

ただし、 Z : 電機子導体数、 $2a$: 電機子並列回路数、 r : 電機子半径 [m]、 $2p$: 磁極数、 ϕ : 1 極あたりの有効磁束 [Wb]、 n : 回転速度 [min^{-1}]、 I_a : 電機子電流 [A]

直流電動機に負荷をかけ、電機子電流 I_a が流れると、誘導起電力 E (逆起電力ともいう) と端子電圧 V の関係は、電機子回路抵抗を R_a [Ω] とすると $E = V - I_a R_a$ [V] となる。したがって、摩擦損、鉄損などを無視した機械的出力は $E I_a = V I_a - I_a^2 R_a$ [W] で示され、電気的入力 $V I_a$ から電機子回路の損失

$I_a^2 R_a$ を差し引いたものになる。この機械的出力 $E I_a$ は、(1.3) 式および(1.4) 式より、次のように示される。

$$E = \boxed{(5)} \cdot \frac{n}{60} [\text{W}]$$

[解答群]

(イ) BLv (ロ) πa (ハ) $4a$ (ニ) $\frac{BL}{I}$ (ホ) $2\pi T$ (ヘ) $\frac{BL}{v}$ (ト) $2\pi a$

(チ) a (リ) $60a$ (ヌ) πT (ル) $\frac{Bv}{L}$ (ヲ) $\frac{BI}{L}$ (ワ) BIL (カ) $2a$ (コ) T

(「機械」平成9年度問5改)

解答・解説

解答のアドバイス

本問は基本的に本節で解説した「直流機の誘導起電力」「直流電動機の電機子電流とトルク」の式の導出に関連していますが、(1.3) および(1.4) 式の注釈をみるとわかるように、各定数の定義が微妙に異なっています。具体的に示すと、次の通りです。

電機子の並列回路数： $a \rightarrow 2a$

電機子直径： $D \rightarrow 2r$ (r は電機子半径)

磁極数： $p \rightarrow 2p$

解答を見るとわかる通り、結果的に導出される式はこれまで解説したものと同じ形になりますが、計算の過程でミスが発生する可能性があるため、導出自体を自力でできるよう、本問で練習しましょう。

(1) 磁束密度 $B[\text{T}]$ の磁界中の導体に発生する誘導起電力 $e[\text{V}]$ は、導体が 1s あたりに切る磁束で表され、かつ磁束が 1s あたりに鎖交する面積は、(導体の長さ $L[\text{m}]$) \times (1s あたりに導体が進む距離 $v[\text{m}]$) で表されるため、

$$e = \underline{BLv} [\text{V}] \rightarrow \text{(イ)}$$

(2) 磁束密度 B の磁界と直角に置かれた導体に電流 I [A] を流したとき、導体の単位長あたりにはその両方の大きさに比例する力 BI がはたらきます。したがって、長さ L の導体にはたらく力 f [N] は、

$$\begin{aligned} f &= BI \cdot L \\ &= \underline{BIL} \text{ [N]} \rightarrow \text{(7)} \end{aligned}$$

(3) 直流機の電機子の回転の軌道は円となり、電機子半径 r を用いて円周 $2\pi r$ [m] で表すことができるので、電機子の周辺速度 v [m/s] は、

$$\begin{aligned} v &= 2\pi r \cdot \frac{n}{60} \\ &= \frac{2\pi rn}{60} \text{ [m/s]} \end{aligned}$$

また題意より、電機子の極数が $2p$ 、1 極あたりの有効磁束が ϕ [Wb] であるから、平均磁束密度 B は、総磁束 $2p\phi$ を円筒の側面積 $2\pi rL$ [m²] で割ることによって求められるため、

$$B = \frac{2p\phi}{2\pi rL} \text{ [T]}$$

したがって、直流機の誘導起電力 E [V] は、問題文で与えられた式を用いて、

$$\begin{aligned} E &= \frac{Z}{2a} \cdot e \\ &= \frac{Z}{2a} \cdot BLv \\ &= \frac{Z}{2a} \cdot \frac{2p\phi}{2\pi rL} \cdot L \cdot \frac{2\pi rn}{60} \\ &= \frac{Zpn\phi}{60a} \text{ [V]} \quad \dots\dots(1.3) \rightarrow \text{(1)} \end{aligned}$$

(4) 問題文より、電機子の並列回路数は $2a$ であるから、電機子の 1 導体あたりに流れる電流 I'_a [A] は、

$$I'_a = \frac{I_a}{2a} \text{ [A]}$$

したがって、直流機のトルク T [N·m] は問題文で与えられた式および (2) で求めた力 f の式を用いて、

$$\begin{aligned}
T &= Zfr \\
&= Z \cdot BI'_a L \cdot r \\
&= Z \cdot \frac{2p\phi}{2\pi rL} \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot L \cdot r \\
&= \frac{Zp\phi I_a}{2\pi a} [\text{N}\cdot\text{m}] \quad \dots\dots(1.4) \rightarrow \text{(ト)}
\end{aligned}$$

(5) (1.4) 式を I_a に関して変形すると、

$$I_a = \frac{2\pi a T}{Zp\phi}$$

上式と (1.3) 式より、機械的出力 EI_a [W] は、

$$\begin{aligned}
EI_a &= \frac{Zpn\phi}{60a} \cdot \frac{2\pi a T}{Zp\phi} \\
&= \frac{2\pi T \cdot n}{60} [\text{W}] \rightarrow \text{(ホ)}
\end{aligned}$$

答 (1) (イ) (2) (ワ) (3) (リ) (4) (ト) (5) (ホ)

1-2 直流機の電機子反作用と整流作用

難易度



学習の ポイント

本節では「直流機の電機子反作用」および「整流作用」について学習していきます。こちらも電験三種で登場した単元ですが、「直流機」分野の中でもやや発展的な内容が含まれています。時間がかかっても良いので確実に理解していきましょう。

電機子反作用とは

直流機を含む回転機は、界磁による主磁束により電機子に電磁誘導作用を生じさせ、起電力を発生させる原理ですが、このとき電機子に流れる電流によっても磁束が発生し、主磁束に影響を与える**電機子反作用**が発生します。

図 1-5 に直流発電機の磁束分布を示します。図 1-5 において、電機子反作用がない場合に磁束密度が零となる（回転子の回転方向と磁束の方向が平行になり、誘導起電力が発生しない）軸を**幾何学的中性軸**といいます。同図より、界磁による主磁束に電機子電流による磁束が合成されると、磁束密度が零となる軸が幾何学的中性軸から片側の磁極に偏ります（発電機では回転方向、電動機は反回転方向）。この移動後の軸を**電気的中性軸**といいます。

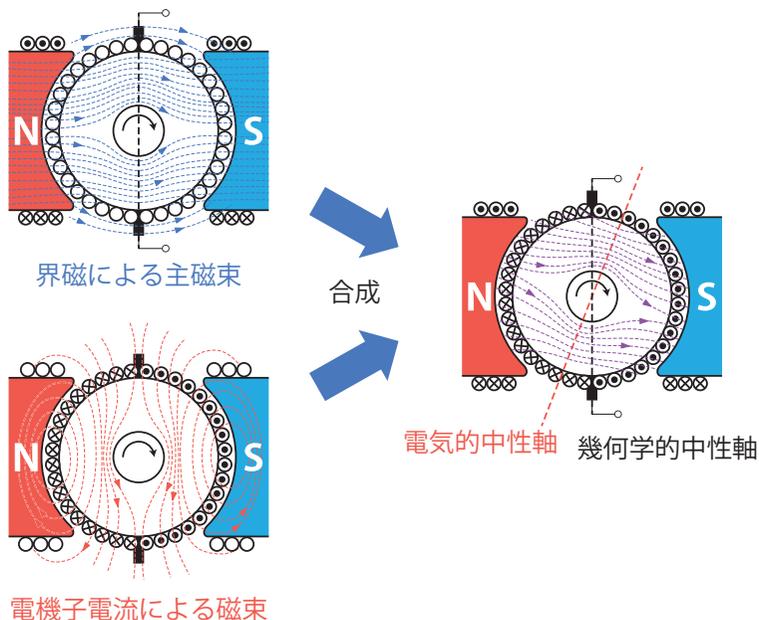


図 1-5 直流発電機の磁束分布

図 1-5 のような電機子反作用が発生すると、直流機に次のような悪影響を及ぼします。

- (i) 界磁による主磁束が減少し、誘導起電力が低下する。
- (ii) 電気的中性軸が移動すると、ブラシで短絡される巻線に起電力が発生し、過大な短絡電流が流れて火花が生じる。
- (iii) 整流子片間の電圧が不均一になり、局所的に電圧が高くなると、整流子片間にアーク短絡が生じる。

電機子反作用への対策

電機子反作用の影響を防ぐための対策としては、図 1-6 のように直流機に補極や補償巻線を設ける方法があります。

補極は、主磁極とは別に幾何学的中性軸上に設けた磁極です。図 1-6 のように電機子巻線と直列に接続し、電機子電流に比例した磁束を発生させることで、電機子電流による磁束を打ち消すことができます。

補償巻線は、主磁極の磁極片のスロット内に、電機子導体と並行に接続した巻線です。電機子巻線と直列に接続し、電機子電流と逆方向に流した電流によって電機子電流による磁束を打ち消すことができます。

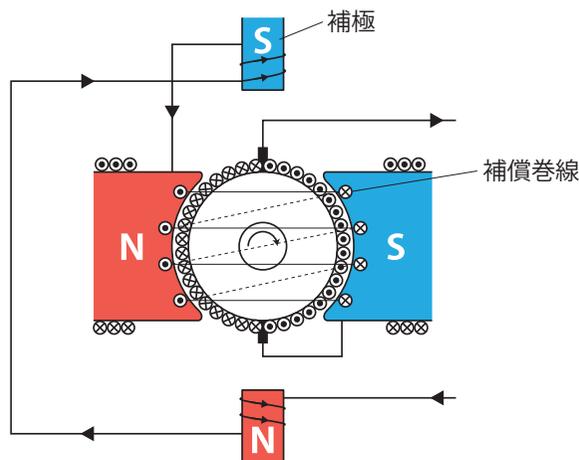


図 1-6 補極と補償巻線

整流作用

電機子巻線内の各コイルは、回転するごとにブラシで短絡され、その都度コイルの電流はその方向が逆になります。これが繰り返されることで、入力となる交流が直流となります。これを**整流作用**といいます。

図 1-7 に示すような整流中のコイルの電流変化を**整流曲線**といいます。同図において、ブラシの電流分布が一様である**直線整流**は電流変化の基準となります。さらに、理想的な整流では、整流終了時の電流変化が小さい（変化が緩やかになっている）ことで、火花の発生を防ぐことができます。

これらに対し、整流が遅れている**不足整流**、逆に整流が進みすぎている**過整流**という状態は、いずれも整流終了時の電流変化が急激で、ブラシ出口で火花を発生しやすく、好ましくない特性になります。

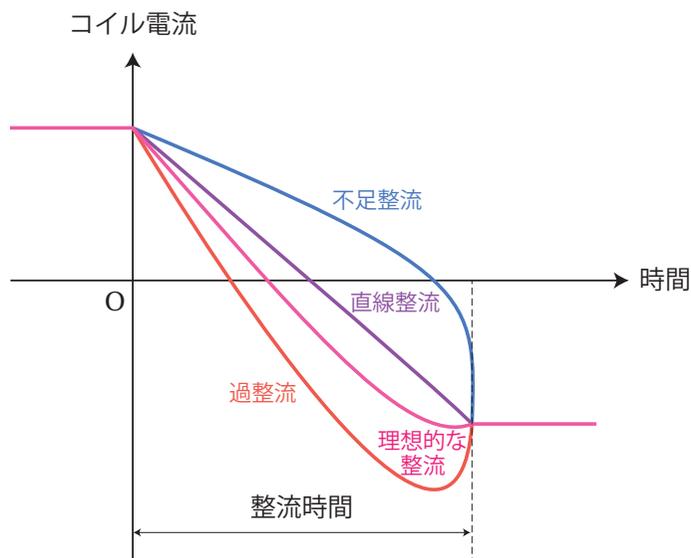


図 1-7 整流曲線

また、電機子コイル自身および隣接コイルとのインダクタンスにより、整流中にコイル電流の反転による電流変化が要因となって生じる誘導起電力を**リアクタンス電圧**といい、これが高いほど火花が発生しやすくなります。そこで、前項でも述べた補極を用いて、整流中のコイルが補極のつくる磁束を切って発生する起電力を利用し、リアクタンス電圧を相殺することで良好な整流を得ることができます。これを**電圧整流**といいます。

+補足

一方、ブラシと整流子片との接触面積の変化による接触抵抗の時間的变化を利用して、コイル電流の反転を促し、良好な整流を得ることを抵抗整流といいます。一般の直流機では、この電圧整流と抵抗整流を併用しています。

例題

次の文章は、直流機の整流作用に関する記述である。文中の に当てはまる最も適切なものを解答群の中から選べ。

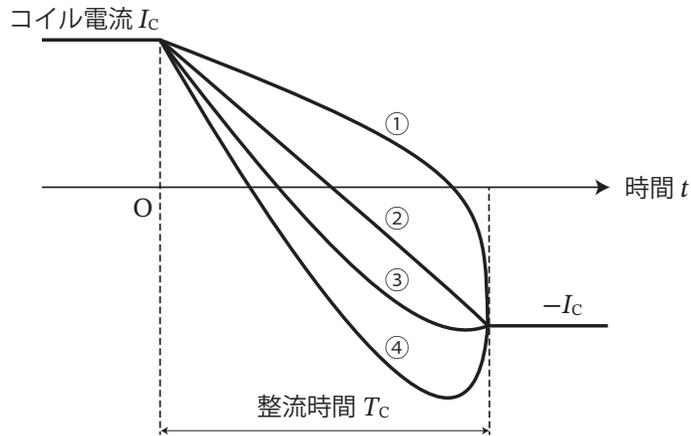
直流機では電機子巻線によって発生する交流を整流子によって直流に変えることを整流作用という。電機子が回転すると、隣り合った二つの整流子片がブラシで (1) される状態が生じ、その都度コイルの電流 I_c はその方向を反転する。いま、回転している整流子の周辺速度を v_c [m/s]、ブラシの幅を b [m]、整流子間の絶縁マイカの厚さを δ [m] とすれば、整流時間（整流周期） T_c [s] は次式で与えられる。

$$T_c = \text{ (2)}$$

主にコイルの自己インダクタンスによって、整流中に電流の反転による電流変化に応じてコイルの誘導起電力が生じる。これを (3) という。

整流時間 T_c におけるコイル内の電流変化を示した図を整流曲線といい、主な曲線例を図に示す。図中②は (4) 整流といい、ブラシと整流子片間の電流が接触面積に比例する場合で電流変化の基準となるものである。①は電流の変化が遅く整流の終わり近くで電流が急変するので、 (3) が発生し、ブラシの後端から火花を発生しやすい。④は電流の変化が速すぎ、過整流という。③は整流終了時の電流変化が小さく火花の発生を防ぐことができる。

良好な整流が得られないと整流子面の火花が激しくなり、整流子面を損傷させ、ブラシの摩耗を早めることになる。その対策として、主磁極間の幾何学的中性軸の位置に (5) を取り付け、 (3) を打ち消す方向に電圧を誘導して、良好な整流を得ることができる。これを電圧整流という。



[解答群]

- (イ) 直線 (ロ) 補償巻線 (ハ) 補極 (ニ) 短絡 (ホ) 整流起電力 (ヘ) $\frac{b + \delta}{v_c}$
 (ト) $\frac{\delta - b}{v_c}$ (チ) 電機子反作用 (リ) リアクタンス電圧 (ヌ) 開放 (ル) 減速
 (ヲ) 臨界 (ワ) $\frac{b - \delta}{v_c}$ (カ) 比例 (ヨ) 整流子

〔機械〕平成26年度問1)

解答・解説

(1) 電機子が回転すると、隣り合った2つの整流子片が図 1-8 右のようにブラシで短絡される状態が生じ、コイル電流 I_c は方向を反転します。 → (二)

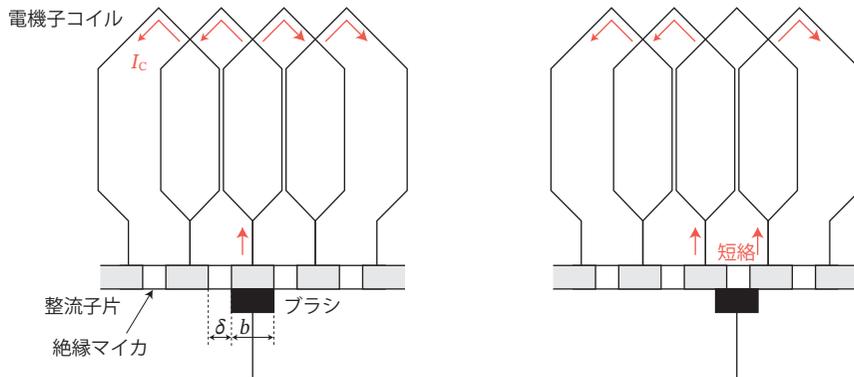


図 1-8 整流子の切り換え

(2) 図 1-8 において、ブラシが整流子片に接触している部分の長さは、ブラシの幅 b から絶縁マイカの厚さ δ を差し引いた $(b - \delta)$ になります。そして、整流時間 T_c は、接触している部分の長さ $(b - \delta)$ を整流子の周辺速度 v_c で割ることで求めることができ、

$$T_c = \frac{b - \delta}{v_c} \rightarrow (七)$$

(3) コイルのインダクタンスにより、整流中に電流の反転による電流変化によって生じる誘導起電力をリアクタンス電圧といいます。 → (リ)

(4) 整流曲線のうち、②は電流変化の基準となる直線整流です。 → (イ)

(5) 良好な整流を得るためには、主磁極間の幾何学的中性軸の位置に補極を取り付け、リアクタンス電圧を打ち消す方向に電圧（起電力）を誘導する方法があります。 → (ハ)

答 (1) (二) (2) (七) (3) (リ) (4) (イ) (5) (ハ)

1-3 直流機の各種回路と特性

難易度

学習の
ポイント

本節では「直流機の回路」の種類と特性について学習していきます。こちらも電験三種の知識プラスαで十分理解できる内容なので、復習も兼ねて進めていきましょう。

回路の種類

直流機の回路は、電磁誘導作用に必要な主磁束を作り出す**界磁回路**の位置により分類されます。本節では「他励式」「分巻式」「直巻式」「複巻式」の回路について解説します。

他励式

他励式は、界磁回路と電機子回路が分離されており、界磁回路は外部電源からの供給で主磁束を作り出すのが特徴です。例として他励式電動機の回路を図 1-9 に示します。

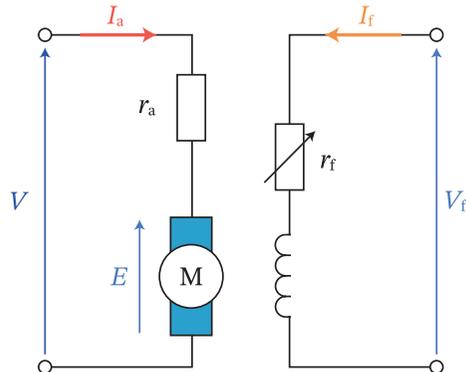


図 1-9 他励式電動機

回転機において、界磁電流 I_f を大きくすると、それに伴い発生する磁束 ϕ も増加します。

図 1-9 の回路において、界磁抵抗 r_f を可変式として小さくすると、界磁電流 $I_f = \frac{V_f}{r_f}$ は増加して磁束 ϕ を強め、電動機の誘導起電力 E を高めることができます。

また、他励式電動機の誘導起電力 E と端子電圧 V の関係は、次のように表すことができます。

他励式電動機の誘導起電力と端子電圧

$$E = V - r_a I_a$$

E : 誘導起電力 [V] V : 端子電圧 [V]
 r_a : 電機子抵抗 [Ω] I_a : 電機子電流 [A]

+ 補足

本節では電動機に関する式を取り上げますが、発電機に関しては、電機子電流 I_a の向きが逆になります。

また、発電機では端子電圧が出力となるため、他励式発電機の各電圧の関係式について、端子電圧 V の式とすると、

$$V = E - r_a I_a$$

となります。

分巻式

分巻式は、電機子回路と界磁回路が並列接続されているものです。例として分巻式電動機の回路を図 1-10 に示します。

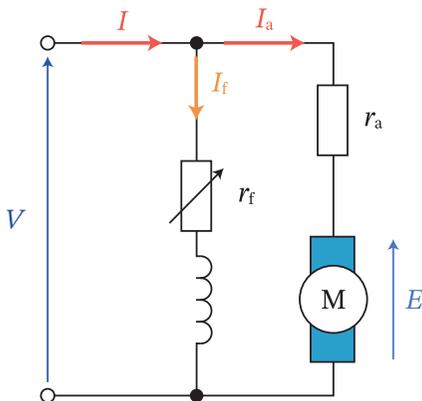


図 1-10 分巻式電動機

図 1-10 の回路において、負荷電流 I は界磁回路と電機子回路に分流する形になっており、 $I = I_a + I_f$ が成り立ちます。

また、分巻式電動機の誘導起電力 E と端子電圧 V の関係は、次のように表すことができます（他励式と同じ式になります）。

分巻式電動機の誘導起電力と端子電圧

$$E = V - r_a I_a$$

E : 誘導起電力 [V] V : 端子電圧 [V]
 r_a : 電機子抵抗 [Ω] I_a : 電機子電流 [A]

直巻式

直巻式は、電機子回路と界磁回路が直列接続されているものです。例として直巻式電動機の回路を図 1-11 に示します。

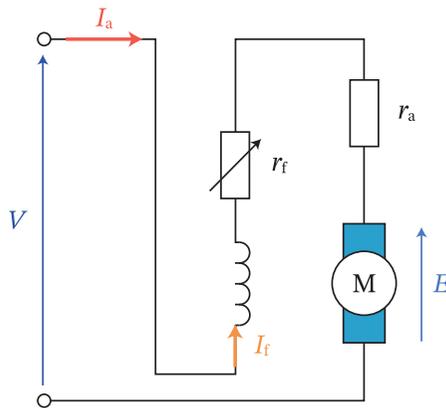


図 1-11 直巻式電動機

図 1-11 の回路において、界磁電流 I_f はそのまま電機子回路に流れ込む形になっており、 $I_a = I_f$ が成り立ちます。

また、直巻式電動機の誘導起電力 E と端子電圧 V の関係は、次のように表すことができます。

直巻式電動機の誘導起電力と端子電圧

$$E = V - (r_a + r_f)I_a$$

E : 誘導起電力 [V] V : 端子電圧 [V]
 r_a : 電機子抵抗 [Ω] r_f : 界磁抵抗 [Ω]
 I_a : 電機子電流 [A]

複巻式

複巻式は、電機子回路に並列および直列に接続された2つの界磁回路を有するものです。複巻式のうち、電機子電流と同じ大きさの電流が直巻界磁巻線に流れるように、直巻式電動機に分巻界磁巻線を並列に追加したものを**外分巻**、電機子と分巻界磁巻線とを足し合わせた電流が直巻界磁巻線に流れるものを**内分巻**といいます。

さらに、複巻式は界磁巻線の極性によっても分類することができます。合成界磁磁束が各界磁巻線による磁束の和となるものを**和動複巻**（和動接続）、逆に差となるものを**差動複巻**（差動接続）といいます。例として、内分巻複巻式電動機の回路を図1-12に示します。

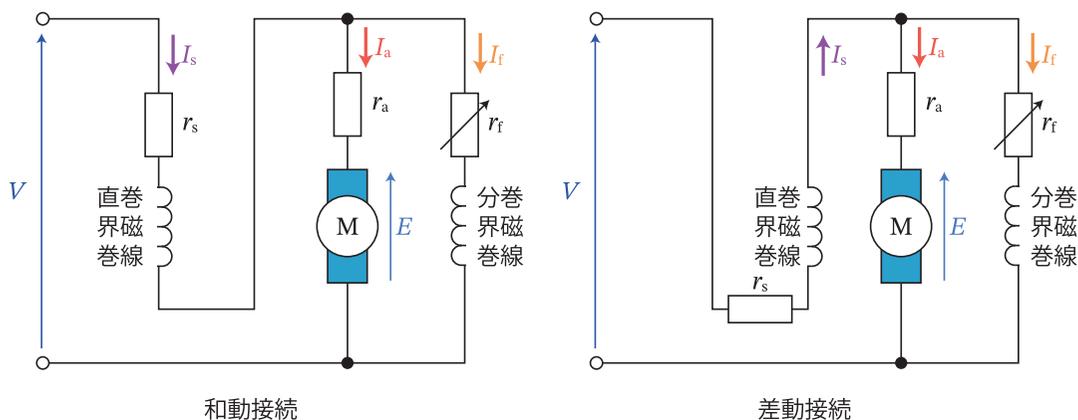


図1-12 複巻式電動機（内分巻）

直流発電機の特性曲線

ここでは、直流発電機の特性を表す曲線について解説します。

① 飽和曲線

発電機の定格回転速度を保ちながら無負荷で運転したときの、図 1-12 のように界磁電流と誘導起電力 (= 無負荷時の端子電圧) との関係を表す曲線を無負荷飽和曲線といいます。

分巻式発電機で磁極に残留磁気が存在する場合、これによる誘導起電力が発生し、さらに界磁電流が流れることにより電圧が上昇していきます。そして、この誘導起電力は、図 1-13 の界磁抵抗線 (傾きが界磁抵抗の値に等しい直線) と無負荷飽和曲線との交点で安定します。

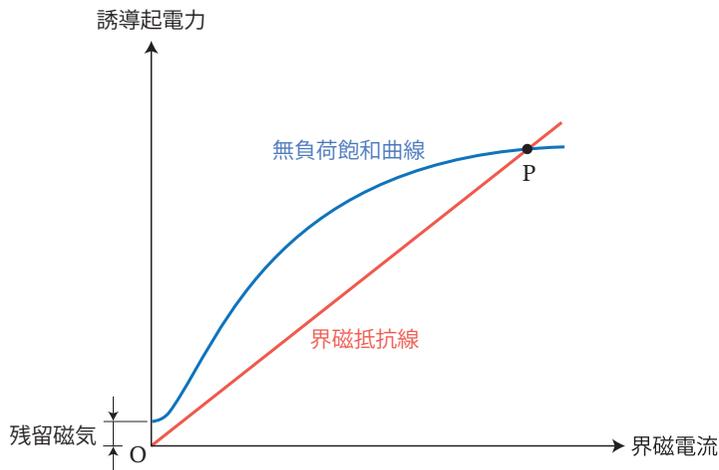


図 1-13 無負荷飽和曲線と界磁抵抗線

また、発電機の定格回転速度を保ちながら負荷電流を一定にして運転したときの、界磁電流と端子電圧との関係を表す曲線を負荷飽和曲線といいます。

② 外部特性曲線

発電機を一度定格負荷状態 (定格電流・電圧・回転速度) となるように界磁抵抗を調整し、その後界磁回路の抵抗を変えずに回転速度を一定に保って運転したときの、負荷電流 (= 電機子電流) と端子電圧との関係を表した曲線を外部特性曲線といいます。各発電機の外部特性曲線を図 1-14 に示します。

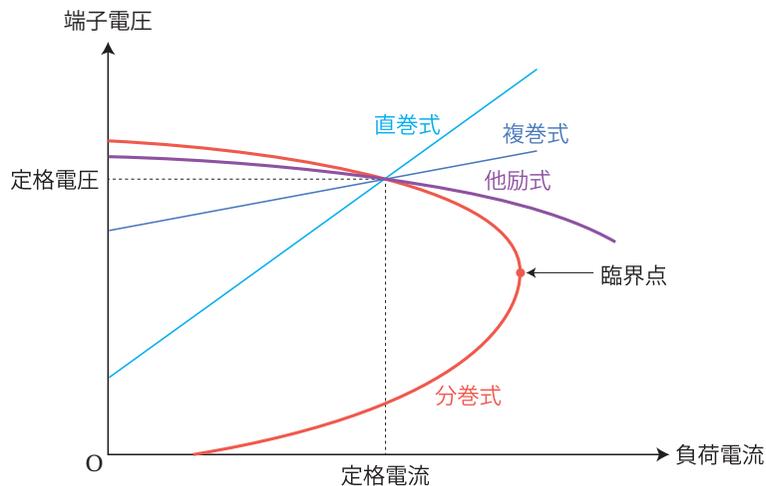


図 1-14 外部特性曲線

図 1-14 より、各発電機の特性は次のようになります。

- ▶ 他励式発電機： $V = E - r_a I_a$ の関係式より、端子電圧は誘導起電力 E より電機子電流 I_a (≡ 負荷電流) による電圧降下分 $r_a I_a$ だけ下がる特性になります。
- ▶ 直巻式および複巻式 (和動接続の場合) 発電機：負荷電流と端子電圧が比例する形になります。
- ▶ 分巻式発電機：負荷電流が大きくなると電圧降下により端子電圧は低下します。界磁電流は端子電圧に比例するため、発生磁束も小さくなって誘導起電力も低下し、端子電圧はますます低下してしまいます。そして、臨界点に達して以降は、負荷抵抗を減らすと負荷電流が逆に減少する状態になってしまいます。

直流電動機の特性曲線

直流電動機の特性を表す曲線としては、負荷電流に対する速度特性曲線およびトルク特性曲線があります。これらの特性曲線を図 1-15 に示します。

速度特性曲線は、電動機に加わる端子電圧および界磁回路の抵抗を一定にして運転したときの、負荷電流 (≡ 電機子電流) と回転速度との関係を表したものです。また、**トルク特性曲線**は、上記と同様の状態における負荷電流とトルクとの関係を表しています。

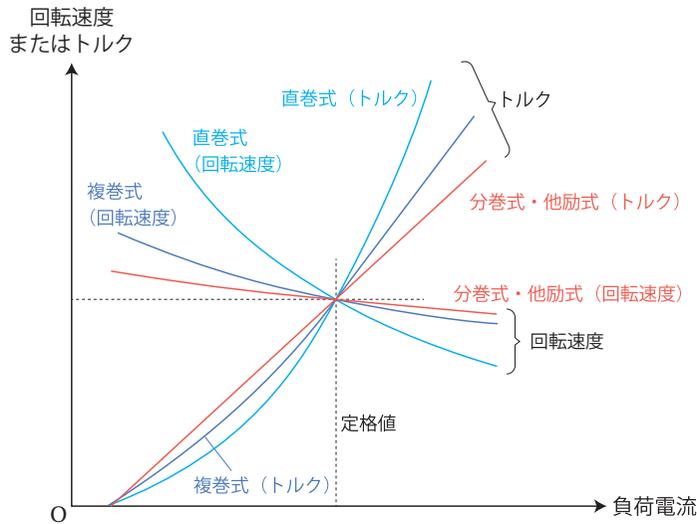


図 1-15 直流電動機の世界特性曲線およびトルク特性曲線

図 1-15 より、各発電機の特性は次のようになります。

- ▶ 他励式および分巻式電動機：回転速度は電機子電流 I_a （≡ 負荷電流）による電圧降下分 $r_a I_a$ だけ低下しますが、電機子抵抗 r_a が小さいのでその変化分は小さくなります。さらに I_a が大きくなると、電機子反作用の影響による磁束 ϕ の低下が、（反比例の関係にある）回転速度の低下を妨げるようにはたらき、負荷にかかわらずほぼ一定の特性に近づきます。また、トルクは $T = K' \phi I_a$ より、電機子電流に比例する直線になります。
- ▶ 直巻式電動機：負荷電流と界磁電流が等しくなるため、抵抗 $(r_a + r_f)$ が非常に小さいとすると、 $E = V - (r_a + r_f) I_a$ かつ $E = K \phi N$ より、

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{E}{K\phi} \\
 &= \frac{V - (r_a + r_f) I_a}{K\phi} \\
 &\propto \frac{V}{KI_f} \\
 &= \frac{V}{KI_a}
 \end{aligned}$$

となり、回転速度 N は電機子電流 I_a （≡ 負荷電流）に反比例する曲線（双曲線）になります。また、トルクは $T = K' \phi I_a \propto K' I_a^2$ より、電機子電流の 2 乗に比例する曲線になります。

- ▶ 複巻式電動機（和動接続）：回転速度・トルクともに上 2 つの中間の特性となります。

例題

次の文章は、直流電動機の基本的な特性に関する記述である。文中の に当てはまる最も適切なものを解答群の中から選べ。

直流電動機の回転速度は、電機子の (1) に比例し、界磁磁束の大きさに反比例する。また、トルクは電機子電流と界磁磁束の大きさの (2) に比例する。したがって、直流電動機では電機子巻線および界磁巻線の接続の仕方により種々の特性のものが得られる。

- a. 分巻式電動機は、電機子巻線および界磁巻線が並列に接続されており、界磁抵抗を変化させなければ磁束はほぼ一定になる。速度は、電機子抵抗の電圧降下により負荷の増加につれて下がろうとするが、 (3) により磁束が弱められ、それが速度の低下を妨げるようにはたらくので、負荷にかかわらずほぼ一定となる。また、トルクは電機子電流に比例するので、トルク特性曲線はほぼ直線になる。
- b. 直巻式電動機は電機子巻線および界磁巻線が直列に接続されており、磁気飽和のない領域では磁束は電機子電流に比例する。電機子および界磁の抵抗による電圧降下を無視すると、速度特性曲線は (4) になる。また、トルクは電機子電流の2乗に比例するので、トルク特性曲線は放物線となる。
- c. 複巻式電動機は、分巻界磁と直巻界磁の両方を持った電動機であり、両界磁の磁束が差になるか和になるかによって差動複巻式電動機または和動複巻式電動機になる。後者では、直巻式電動機に近い特性を持たせながら、無負荷においても (5) にならないようにすることができる。

[解答群]

- (イ) 和 (ロ) 著しい低速度 (ハ) 逆起電力 (ニ) 直線 (ホ) 整流作用
(ヘ) 整流起電力 (ト) 危険な高速度 (チ) 差 (リ) 電流 (ヌ) 不安定な回転
(ル) 平滑作用 (ヲ) 双曲線 (ワ) 放物線 (カ) 積 (ク) 電機子反作用

(「機械」平成13年度問1改)

解答・解説

- (1) 直流電動機の回転速度は、1-1 節「直流機の誘導起電力」の式より、電機子に発生する誘導起電力（逆起電力）に比例します。→ (ハ)
- (2) 直流電動機のトルクは、1-1 節「直流機の電機子電流とトルク」の式より、電機子電流と界磁磁束の大きさの積に比例します。→ (カ)
- (3) 分巻式電動機の回転速度は、負荷が増加しても電機子反作用によって磁束が弱められ、速度の低下を妨げるようにはたらくので、負荷にかかわらずほぼ一定となる特徴があります。→ (ヨ)
- (4) 直巻式電動機の世界速度特性曲線は、図 1-15 のように電機子電流（負荷電流）に反比例する双曲線になります。→ (ヲ)
- (5) 和動複巻式電動機では、無負荷においても直巻式電動機のように危険な高速度にならないよう、分巻界磁巻線により調整を行います。→ (ト)

答 (1) (ハ) (2) (カ) (3) (ヨ) (4) (ヲ) (5) (ト)

2 章 誘導機

「誘導機」分野は、「機械・制御」科目も含め電験二種では頻出の単元となっています。本書「機械」科目の対策では、その基礎理論および「速度制御」「特殊誘導電動機」といったやや応用的な知識まで学習していきます。この分野に関しては、覚えるべき事項とその理論をセットにして覚えると学習効率が良いでしょう。

一次試験「機械」科目では、「誘導機」分野の問題は1年に1問程度と、全範囲のなかでも出題頻度は比較的高めです。一部「機械・制御」科目と重複する部分は、同科目のテキストの方で学習してもらってもかまいません。一次および二次試験の両方に対応できる力を身に付けていくことを意識しましょう。

● 第2章の学習内容

- 2-1. 誘導電動機の基礎
- 2-2. 誘導電動機の始動・比例推移
- 2-3. 誘導電動機の制動
- 2-4. 誘導電動機の色度制御
- 2-5. 特殊誘導電動機

2-1 誘導電動機の基礎

難易度
☆☆☆学習の
ポイント

本節では「誘導電動機の基礎」について学習します。本節の内容を理解しておけば、「機械」科目の問題への対応力の下地ができます。まずは三種の内容の復習を兼ねておさえていきましょう。

誘導電動機とは

誘導電動機は他の回転機と同じく、界磁巻線が発生させる回転磁界と、電機子巻線に誘導される電流との相互作用により回転する構造ですが、回転磁界よりも遅い速度で回転するのが特徴です。

誘導電動機は、外部電源に接続して回転磁界を発生させる界磁の役割を固定子が、回転磁界と電流との作用により回転し、トルクを発生する電機子の役割を回転子が担っています。

誘導電動機の種類の一つとして、出力となる回転子の回路を外部に引き出さず、かご形の堅牢な導体環とした**かご形誘導電動機**があります。

かご形誘導電動機の回転子を図 2-1 に示します。回転子は同図のように鉄心に設けられたスロットに銅棒（またはアルミ）を押し込み、両端が**端絡環**という導体の環で短絡された構造となっています。堅牢な構造かつ安価であるのが特徴です。

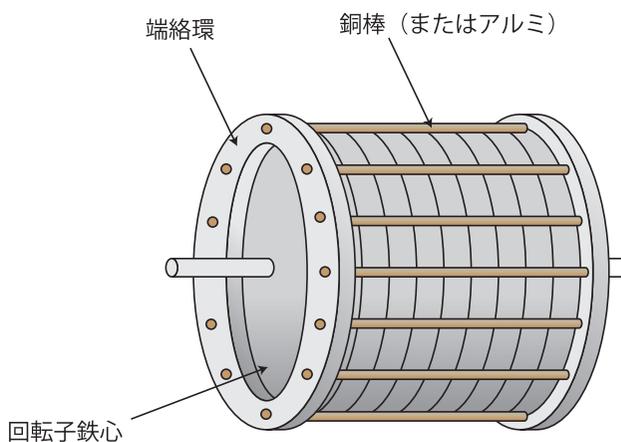


図 2-1 かご形誘導電動機の回転子

また、誘導電動機のもう一つの種類として、回転子端子をスリップリングとブラシで外部に引き出す構造になっている**巻線形誘導電動機**があります。巻線形誘導電動機の概要図を図 2-2 に示します。

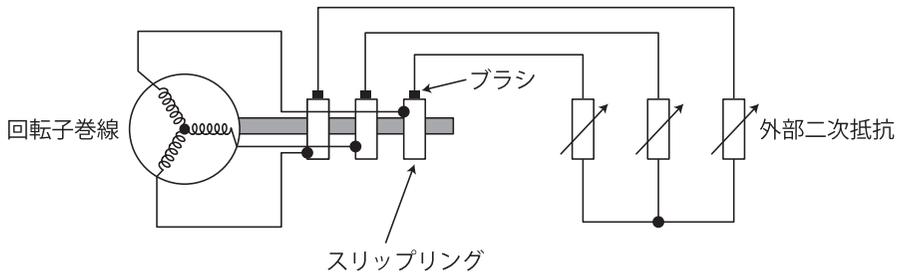


図 2-2 巻線形誘導電動機の概要図

同期速度と滑り

固定子が発生させる回転磁界の回転速度を**同期速度**といいます。

同期速度は、外部電源の周波数と、固定子内の配線方法によって決まる磁極の**極数**を用いて、次の式で求めることができます。

誘導機の同期速度

$$N_s = \frac{120f}{p}$$

N_s : 同期速度 [min^{-1}] f : 周波数 [Hz]
 p : 極数

＋補足

周波数 f は「1s あたりの電流のサイクル数」を表します。一方、極数（N・S 極のペアの数）は 1 周あたり p 極（磁極のペア（極対数）単位でカウントすると $\frac{p}{2}$ 組）配置されており、隣り合う同じ極性の磁極間の距離は「電流 1 サイクルあたりの回転磁界の周回距離」と同義であり、極数 p を用いて表すと $\frac{2}{p}$ 周となります。

例えば、図 2-3 は $p = 2$ の場合ですが、電流の極性が反転（= $\frac{1}{2}$ サイクル）すると、N・S の磁極も反転 = $\frac{1}{2}$ 周移動することになります。すなわち、同じ極性の磁極であればその間の距離は $\frac{2}{2} = 1$ 周分離れていることとなります。

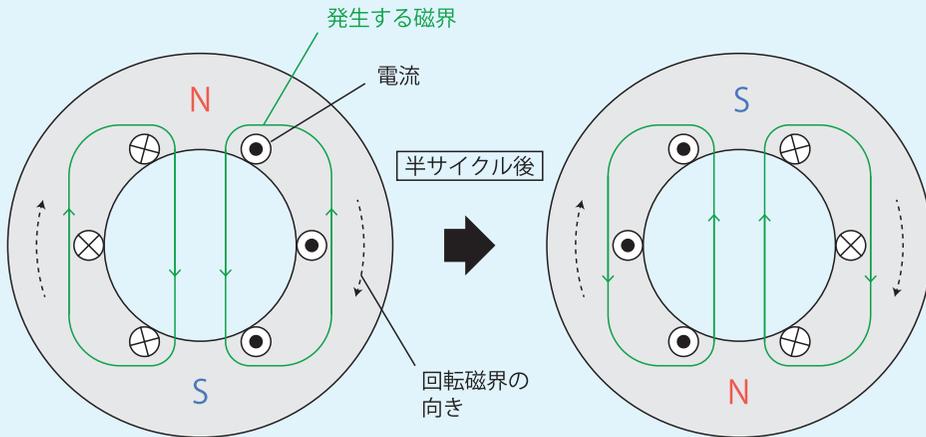


図 2-3 電流の極性と回転磁界 ($p = 2$ の場合)

したがって、同期速度 $N_s[\text{min}^{-1}]$ は、(1s あたりの電流のサイクル数) × (電流 1 サイクルあたりの回転磁界の周回距離) として求められ、60s → 1 min の単位換算を考慮すると、次のようになります。

$$N_s = \frac{2f}{p}[\text{s}^{-1}] \rightarrow \frac{120f}{p}[\text{min}^{-1}]$$

また、誘導電動機の滑りとは「同期速度（回転磁界の回転速度）と回転子の回転速度との速度差の、同期速度に対する割合」です。すなわち「回転子の回転は同期速度に対してどの程度遅れているか」を示す指標であり、次のように表されます。

誘導電動機の滑り

$$s = \frac{N_s - N}{N_s}$$

s: 滑り

N_s : 同期速度 [min^{-1}] N : 回転速度 [min^{-1}]

誘導電動機は、回転子が回転磁界より遅れている、すなわち「滑りが生じている」状態のときに誘導起電力が発生し、トルクが発生する仕組みです。このトルクは、回転磁界と回転子の速度差を減少させる方向にはたらきます。

誘導電動機の等価回路

誘導電動機は三相交流で用いる電動機であり、その特性を考える際は図 2-4 のような一相分の等価回路を用います。

誘導電動機の等価回路は変圧器と似ています (3 章で解説します)。一次側は入力となる固定子側、二次側は出力となる回転子側を表しており、二次側に発生する誘導起電力は sE_2 [V]、周波数は sf (**滑り周波数**という。s は滑り、 f [Hz] は一次側に接続される電源周波数) で表されます。

なお簡単のため、図 2-4 の一次側と二次側の巻数比は 1:1 であるとします。

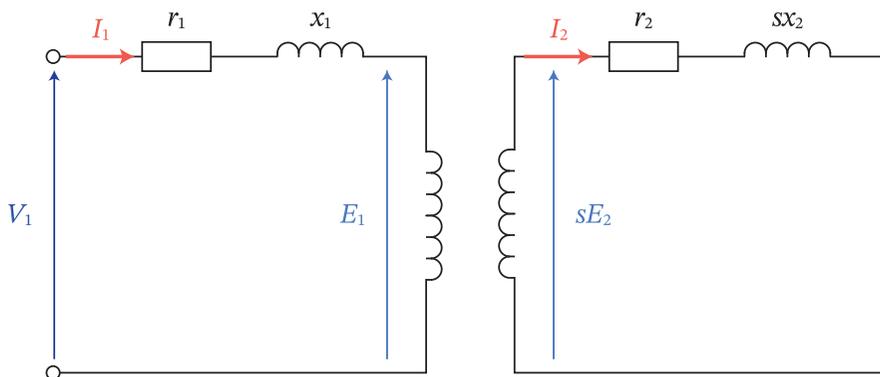


図 2-4 誘導電動機の等価回路

+ 補足

変圧器と同様に、誘導機の等価回路を考える際は、巻数比を用いて一次側もしくは二次側に電圧・電流および回路定数を換算する必要があります。実際の試験問題では二次側の回路定数が一次側に換算されることがほとんどです。

図 2-4 の等価回路において、二次誘導起電力および二次側のリアクタンスは滑り周波数 sf に比例するため、 sE_2 [V] および sx_2 [Ω] と表されます。

このとき、二次側に流れる電流 I_2 [A] は、

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \\ &= \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}} \text{ [A]} \end{aligned}$$

上の二次電流 I_2 の式より、二次誘導起電力を滑り s に依らない E_2 とおくと、抵抗 r_2 [Ω] は $\frac{r_2}{s}$ と置き換えられます。

また、この $\frac{r_2}{s}$ について変形すると、

$$\frac{r_2}{s} = r_2 + \frac{1-s}{s}r_2$$

となることから、二次側の抵抗は元々の抵抗 r_2 に加え、出力に相当する $\frac{1-s}{s}r_2$ となる負荷抵抗が挿入された形に置き換えることができます。

さらに、実際には励磁電流が流れる励磁回路が存在することも考慮して、以上を反映した **T 形等価回路** を図 2-5 に示します。

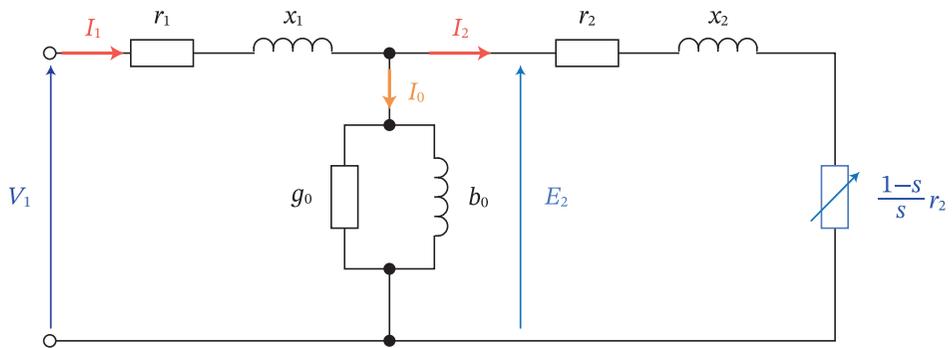


図 2-5 誘導電動機の T 形等価回路

加えて、励磁電流 I_0 は二次電流 I_2 と比較して無視できるほど小さいことを考慮して、図 2-5 の T 形等価回路において、励磁回路を電源側に移動させた **L 形等価回路** (簡易等価回路ともいう) を図 2-6 に示します。

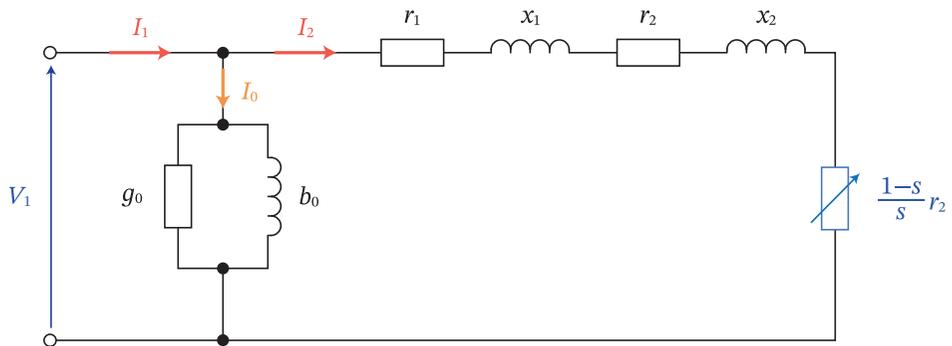


図 2-6 誘導電動機の L 形等価回路

図 2-6 の L 形等価回路において、二次電流 I_2 の式は、

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}} \text{ [A]}$$

となります。

+ 補足

励磁電流 I_0 は二次電流 I_2 と比較して小さいため、入力となる一次電流 $I_1 = I_0 + I_2 \doteq I_2$ という関係より、図 2-6 の L 形等価回路が近似的に成り立ちます。

なお、二次電流 I_2 の式において、電源電圧が線間電圧で与えられた場合は、このときの一相分の電圧は $\frac{V_1}{\sqrt{3}}$ になるとして、

$$I_2 = \frac{\frac{V_1}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}}$$

となることに注意しましょう。

二次入力・銅損・電動機出力

図 2-6 の L 形等価回路において、二次抵抗 r_2 で発生する**二次銅損** P_{c2} [W] は、三相分を表す係数 3 を考慮して、

$$P_{c2} = 3r_2I_2^2 [\text{W}]$$

また、一次側から二次側へ流入する電力である**二次入力** P_2 [W] は、二次抵抗 r_2 および出力に相当する抵抗 $\frac{1-s}{s}r_2$ との和である $\frac{r_2}{s}$ で消費される電力であり、

$$P_2 = 3\frac{r_2}{s}I_2^2 [\text{W}]$$

この二次入力 P_2 から二次銅損を差し引いたものが誘導電動機の出力(**機械的出力**) P_m [W] であり、その式は、

$$\begin{aligned} P_m &= P_2 - P_{c2} \\ &= 3\frac{r_2}{s}I_2^2 - 3r_2I_2^2 \\ &= 3\left(\frac{1}{s} - 1\right)r_2I_2^2 \\ &= 3\frac{1-s}{s}r_2I_2^2 [\text{W}] \end{aligned}$$

この式より、電動機出力 P_m は、抵抗 $\frac{1-s}{s}r_2$ で消費される電力に等しくなります。

なお、二次入力 P_2 、二次銅損 P_{c2} 、電動機出力 P_m の比をとると、

$$\begin{aligned} P_2 : P_{c2} : P_m &= 3\frac{r_2}{s}I_2^2 : 3r_2I_2^2 : 3\frac{1-s}{s}r_2I_2^2 \\ &= 1 : s : (1-s) \end{aligned}$$

誘導電動機の入出力と銅損の関係

P_2 : 二次入力 [W] P_{c2} : 二次銅損 [W]

$$P_2 : P_{c2} : P_m = 1 : s : (1-s) \quad P_m: \text{電動機出力 [W]} \quad s: \text{滑り}$$

+ 補足

上の関係式を覚えておけば、各電力の式をすべて覚えなくても、どれか一つの式から導出できます。

なお、この関係式は二次側でのみ成立するため、本節の例題のように一次銅損も考慮する場合は、単純に式に当てはめるだけでは正答できないので注意しましょう。

誘導電動機の効率

図 2-6 の L 形等価回路において、一次抵抗 r_1 で消費される一次銅損 P_{c1} [W] は、

$$P_{c1} = 3r_1I_1^2 [\text{W}]$$

+ 補足

「一次銅損」であるのに二次電流 I_2 を用いるのは一見違和感があるかもしれませんが、図 2-6 の L 形等価回路をみるとわかるように、一次電流 $I_1 \doteq$ 二次電流 I_2 であるため、電流について一次側と二次側で区別する必要はありません。

また、誘導電動機の無負荷損として鉄損および機械損があります。

このうち鉄損 P_i [W] は、図 2-6 の励磁回路のうち励磁コンダクタンス g_0 [S] で発生する損失で、その大きさは、

$$P_i = 3g_0V_1^2 [\text{W}]$$

また、機械損は軸受部における摩擦や、回転部分と空気が摩擦することにより発生します。機械損 W_m [W] を考慮する場合の誘導電動機の出力は、機械的出力 P_m から W_m を差し引くことにより求めることができ、 $(P_m - W_m)$ [W] となります。

以上を考慮すると、(誘導電動機への入力) = (電動機出力) + (損失) の関係から、(出力) / (入力) で表される誘導電動機の効率 η [%] は次のようになります。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_m - W_m}{(P_m - W_m) + P_{c1} + P_{c2} + W_m} \times 100 \\ &= \frac{P_m - W_m}{P_m + P_i + P_{c1} + P_{c2}} \times 100 [\%] \end{aligned}$$

誘導電動機の効率（機械損考慮）

$$\eta = \frac{P_m - W_m}{P_m + P_i + P_{c1} + P_{c2}} \times 100$$

η : 効率 [%] P_m : 電動機出力 [W]
 W_m : 機械損 [W] P_i : 鉄損 [W]
 P_{c1} : 一次銅損 [W] P_{c2} : 二次銅損 [W]

電動機出力とトルク

誘導電動機においても、電動機出力と発生トルクの関係について、直流電動機と同じ式が成り立ちます。

誘導電動機の出力とトルク

$$P_m = \omega T = 2\pi \frac{N}{60} T$$

P_m : 電動機出力 [W] ω : 角速度 [rad/s]
 T : トルク [N·m] N : 回転速度 [min^{-1}]

また、前式を変形すると、

$$P_m = 2\pi \frac{N}{60} T$$
$$3 \frac{1-s}{s} r_2 I_2^2 = 2\pi \frac{(1-s)N_s}{60} T$$
$$\therefore 3 \frac{r_2}{s} I_2^2 = 2\pi \frac{N_s}{60} T$$

上式の左辺は二次入力 P_2 を表しており、誘導電動機の二次入力とトルクの関係は、次のようになります。

誘導電動機の入力とトルク

$$P_2 = \omega_s T = 2\pi \frac{N_s}{60} T$$

P_2 : 二次入力 [W] ω_s : 同期角速度 [rad/s]
 T : トルク [N·m] N_s : 同期速度 [min^{-1}]

+ 補足

トルク T に同期角速度 ω_s をかけたものを**同期ワット**といいます。これは同期速度においてそのトルクを出したときの仮想出力の値を示しており、誘導電動機の場合はまさにそれが上式で表される二次入力 P_2 になります。 P_2 のことを「同期ワットで表したトルク」ということもあります。

例題

次の文章は、三相誘導電動機に関する記述である。文中の に当てはまる最も適切なものを解答群の中から選べ。

問題図は、三相誘導電動機の1相分のL形等価回路である。ただし、 r_1 は一次巻線抵抗、 r_2' は二次巻線抵抗の一次換算値、 x_1 は一次漏れリアクタンス、 x_2' は二次漏れリアクタンスの一次換算値、 b_0 および g_0 は励磁サセプタンスおよび励磁コンダクタンスである。三相交流電源の相電圧の実効値を V_1 、フェーズを \dot{V}_1 とする。また、滑りを s とし、漏れリアクタンスの和を $X = x_1 + x_2'$ とする。