

講座

電動機の技術 第3回

一直流電動機

森本 雅之*

1 はじめに

直流機電動機は、もっとも古くから実用化された電動機である。直流電圧を調節すれば容易に制御できることから、制御用電動機として使われてきた。近年、パワーエレクトロニクスの進歩により、交流電動機の制御が容易になり、また、直流電動機の保守性の問題から交流電動機への置きかえが進んでいる。本稿では、中大容量を中心とした巻線型の直流電動機について述べる。

2 直流電動機の原理と構造

直流電動機の原理を説明するため、まず直流発

電機の原理を説明する。図1に直流発電機の原理図を示す。図において、N極とS極の永久磁石は静止している固定子である。内側のコイルは回転子である。固定子は磁界を与える界磁であり、回転子のコイルがエネルギー変換を行う電機子である。回転子のコイルは整流子とよばれる回転電極に接続されており、ブラシを通して外部に接続される。ブラシと整流子の関係を図2に示す。コイルに接続された整流子はブラシと接触しながら回転する。ブラシは静止しており外部回路と接続されている。

いま、図1のコイルが反時計方向に回転したとする。このとき、コイルには、矢印の方向に速度

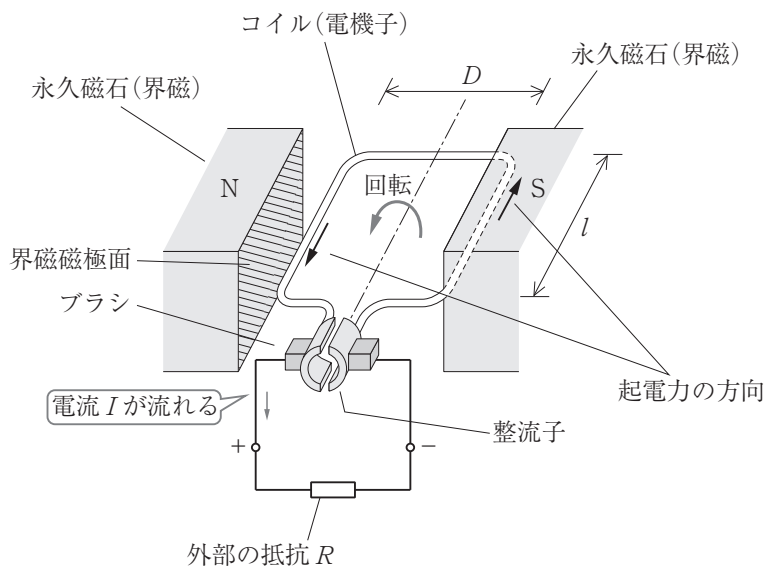


図1 直流発電機の原理

* Masayuki Morimoto モリモトラボ

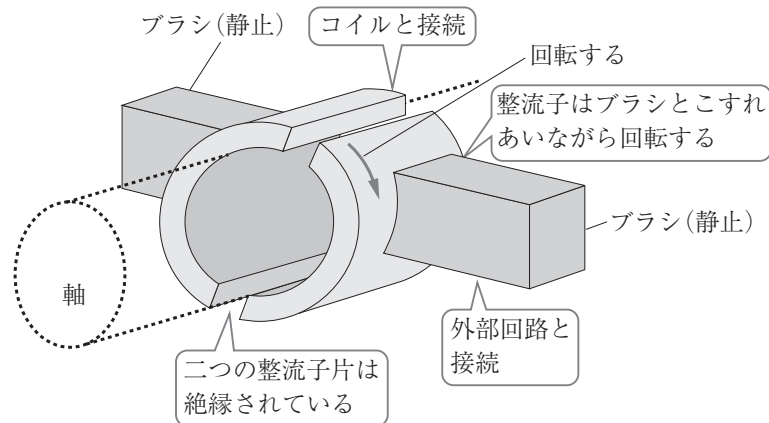


図2 ブラシと整流子

起電力が生じる（フレミングの右手の法則）。コイルはブラシを通して外部の抵抗 R に接続されているので、図1に示す方向に電流 I が流れる。コイルが回転してゆくと、磁界に対して移動する方向が反転するので起電力の方向も反転する。このとき整流子はもう一方のブラシに接触する。したがって、半回転してコイルの起電力の極性が反転しても外部の抵抗 R を流れる電流の向きは同一となる。コイルに流れる電流はコイルの位置により反転するが、ブラシを通して外部に流れ出す電流の向きは常に同一である。整流子はコイルの数に応じて設けられている。

図1のコイルの接線速度 v は次のように表される。

$$v = \frac{\omega D}{2} \quad (1)$$

ここで、 D はコイル直径、 ω はコイルの角速度である。また、磁束密度 B は、

$$B = \frac{\Psi}{S} \quad (2)$$

である。ここで、 Ψ は鎖交磁束数、 S は界磁磁極の表面積である。したがって、速度起電力 E は次のように表すことができる。

$$E = vBl = \frac{D\Psi l}{2S} \omega = K_E \omega \quad (3)$$

ここで、

$$K_E = \frac{D\Psi l}{2S} \quad (4)$$

を起電力定数とよぶ。

速度起電力 E は回転数に比例し、また磁束数 Ψ に比例する。この速度起電力を出力として利用するのが直流発電機である。

一方、図3に示すように、直流発電機に直流電源を接続すると直流電動機になる。このとき、コイルにはブラシを通して電流 I が外部から流れ込む。磁界中に電流が流れるので、電磁力が発生する。力の方向は、フレミングの左手の法則の方向である。トルクは、導体に働く力 f に半径 r 、すなわち、回転子の中心から導体までの距離 $D/2$ を乗じた値なので、発生するトルク T は次のように表される。

$$T = fr = BIl \frac{D}{2} = \frac{D\Psi l}{2S} I = K_T I \quad (5)$$

ここで、

$$K_T = \frac{D\Psi l}{2S} \quad (6)$$

をトルク定数とよぶ。

式(5)は、直流電動機のトルクは電流に比例し、また、磁束数に比例することを表している。ここで、速度起電力を表す電力定数の式(4)と、ここで示した式(6)は同一であり、 $K_T = K_E$ であることに注意してほしい。二つの定数は同一数値である。

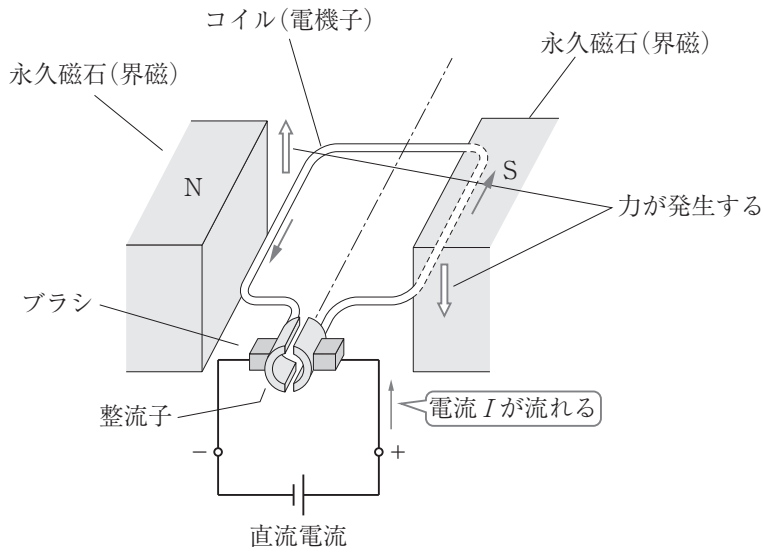


図3 直流電動機の原理

直流電動機は、式(5)で表すトルクを発生する。直流電動機がトルクを発生しているときでも式(3)の速度起電力は発生している。このとき、速度起電力の方向はトルク発生のための電流と反対方向となる。このため、電流を流しにくくするので、逆起電力とよばれることがある。

以上の基本特性を用いて、直流機の電圧方程式を求めると次のようになる。

$$V = E \pm r_a I \quad (7)$$

ここで、 r_a は電機子コイルの巻線抵抗である。式(7)では、+が電動機、-が発電機を表す。式(7)を用いて等価回路を書くと図4のようになる。

3 ブラシによる整流作用と電機子反作用

3.1 整流作用

直流機の断面を模式的に描くと、図5に示すようになる。電機子の右半分と左半分では電流の向きが異なっている。右側のN極下では電流は紙面方向から流れ出て、左側のS極下では紙面方向に流れ込んでいる。このように、各巻線に流れる電流の極性を分布させるためには、電源から供給される電流を各導体に振り分ける必要がある。電流は電機子が回転しても常時、同じ分布が保たれるようにブラシと整流子の機能により電流が振り分けられている。

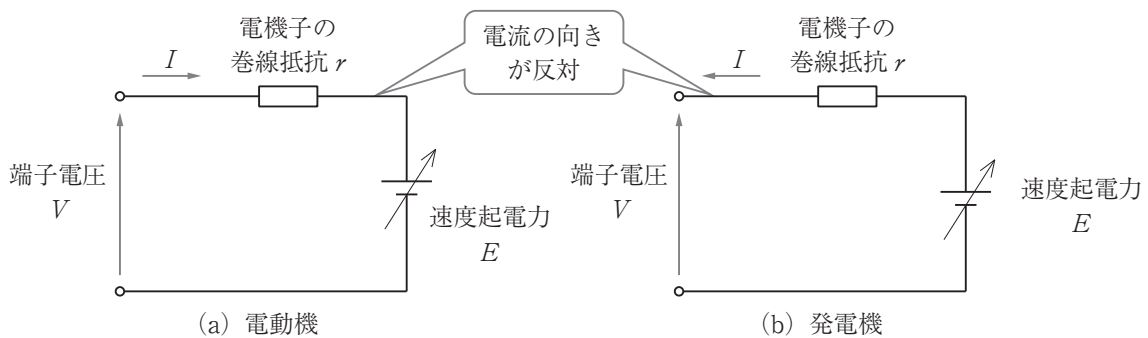


図4 直流機の等価回路

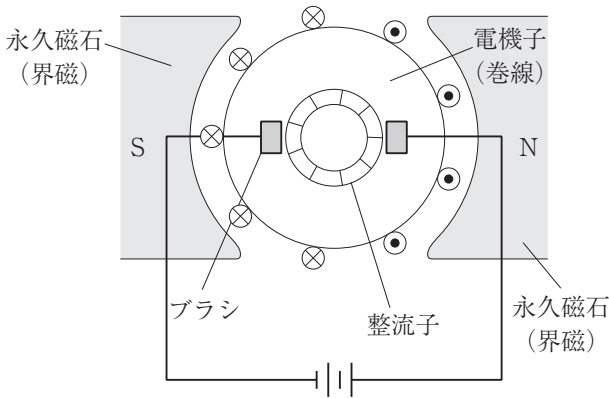


図5 直流機の断面模式図

直流機の巻線は図6に示すように結線されている。この図では、電機子は9個の巻線で構成されている。各巻線は整流子片を介して直列に接続されている。電流は(+)側のブラシから流入し、2路に分かれ電機子内を流れ、(-)側のブラシで集電される。このように接続しているため、図6のような電機子電流の分布になり、界磁の磁極下にある電流の向きが同一となる。したがって、各巻線から同方向のトルクが発生する。

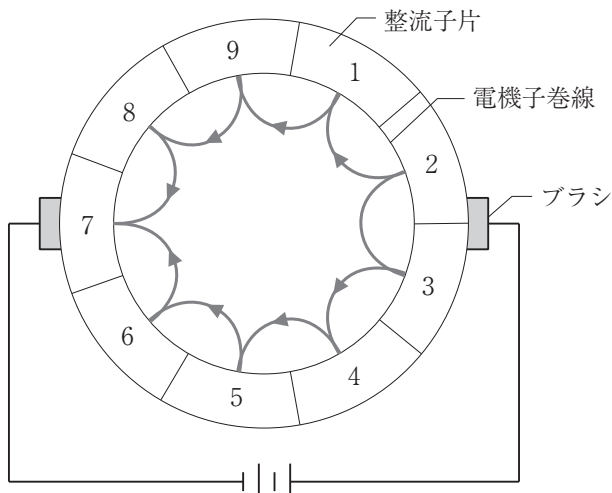


図6 電機子巻線の電流

電流の向きが反転することを転流という。しかし、直流機では整流とよぶ場合が多い。これは電機子に流れる電流は、回転により極性が反転するので交流であるが、外部を流れる電流は直流であり、ブラシと整流子によって直流に整流されて発電機として動作しているからである。そのため、電動機でも慣例的に整流と呼ばれる。

ブラシは固定子側に固定されており、静止している。一方、整流子は巻線とともに回転している。ブラシと整流子は、すり接触により電気的な結合をしている。この運動の様子を図7に示す。図(a)では整流子3に電流が流入し、巻線2と4に向けてそれぞれ I が流れる。図(b)の位置になるとブラシは整流子2と3に接触しているため、2から1に向けてと3から4に向けて電流が流れる。このため、整流子2と3の間の巻線には電流は流れない。図(c)では整流子2から1、3に向けて電流が流れる。2と3の間の巻線を考えてみると、(a)から(c)の間、電流が $+I \rightarrow 0 \rightarrow -I$ と変化する。一方、ブラシを流れる電流は常に同じ向きで $2I$ である。

図8に示すように、巻線電流が I から $-I$ に変化するまでの時間を整流時間という。整流時間中の電流の変化は巻線のインダクタンスの影響を受ける。電流変化率($\frac{dI}{dt}$)が大きいと電圧が高くなり、火花が発生する。火花はブラシの寿命を低下させる。

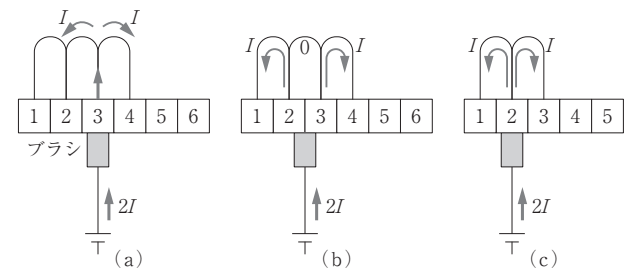


図7 転流

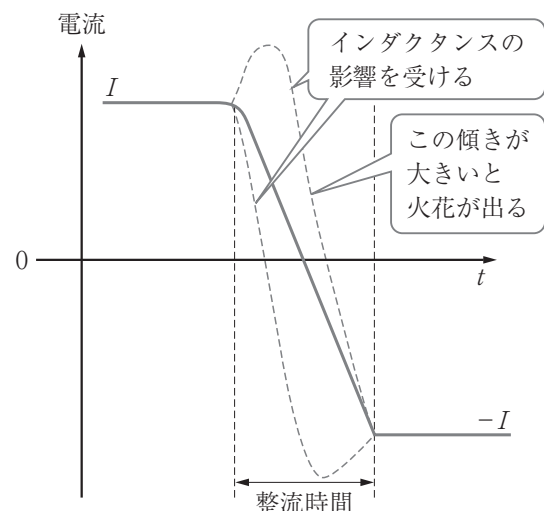


図8 整流時間

3.2 電機子反作用

直流機では電機子反作用が生じる。電機子反作用とは磁束の偏りにより生じる現象である。図9(a)は界磁磁束のみを示している。電機子電流が流れていない状態である。このとき、界磁のN極からS極へ一様な磁界が生じている。図(b)は、電機子電流のみによって生じる磁界を示す。ブラシ軸の方向に一様な磁界が生じている。運転中はこの両者の磁界が合成される。運転中の磁界を図(c)に示す。磁力線に粗密があり、位置により磁束密度が異なる。このような増磁作用および減磁作用を電機子反作用と呼ぶ。

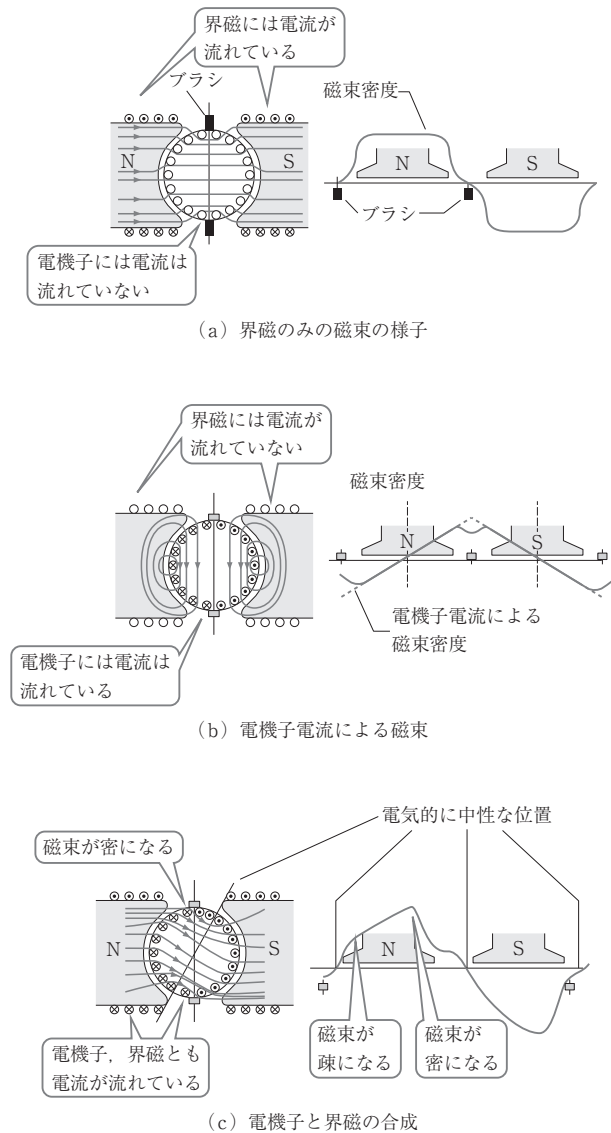


図9 電機子反作用

電機子反作用による磁束が偏るため、コイルに残留する磁気エネルギーにより高電圧が発生する。高電圧により、ブラシと整流子間にアークが発生する。また、整流子間に電位差があり、整流子間がアークで短絡され、これが進展するとブラシ間短絡（フラッシュオーバ）に至る。

電機子反作用によりブラシの位置は電氣的に中性の位置でなくなる。そのため、補極が設けられる。補極は、電機子反作用と逆極性の磁束を発生させるため、界磁の磁極間の中間に配置される。補極巻線は電機子巻線と直列接続されることにより補極直下の磁束分布を電機子巻線電流の大きさに応じて補正することができる。

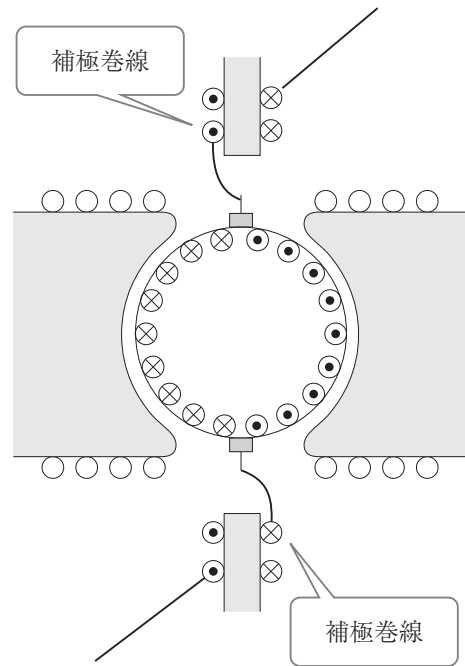


図10 補極巻線

さらに、大型機では電機子反作用による磁束を打ち消すために、界磁の磁極面に補償巻線を設けることも行われる。補償巻線は電機子巻線と直列接続され、電機子電流に比例した電流を流す。補償巻線が逆極性の磁束を発生することにより電機子反作用磁束を打ち消している。

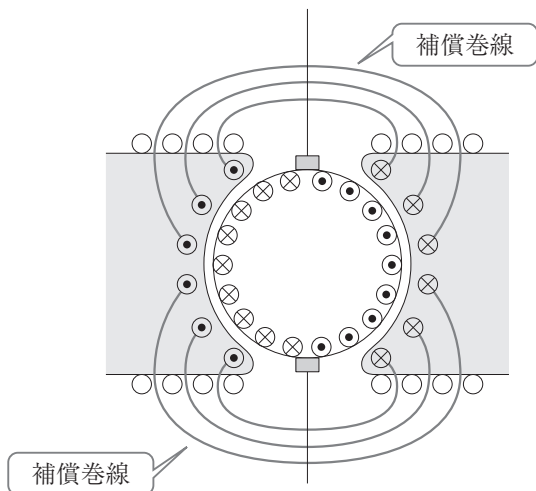


図11 補償巻線

4 直流電動機の励磁方式と特性

界磁に磁束を発生させることを励磁という。直流機の各種の励磁方式を図12に示す。界磁に永久磁石を用いるのが永久磁石方式，界磁巻線を別電源で励磁するのが他励方式，電機子巻線と同一電源を用いるのが自励方式である。自励方式には結線により直巻，分巻および複巻方式がある。各方式の結線を図13に示す。

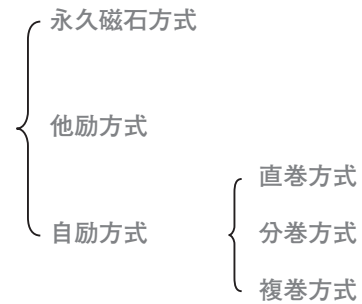


図12 直流機の励磁方式

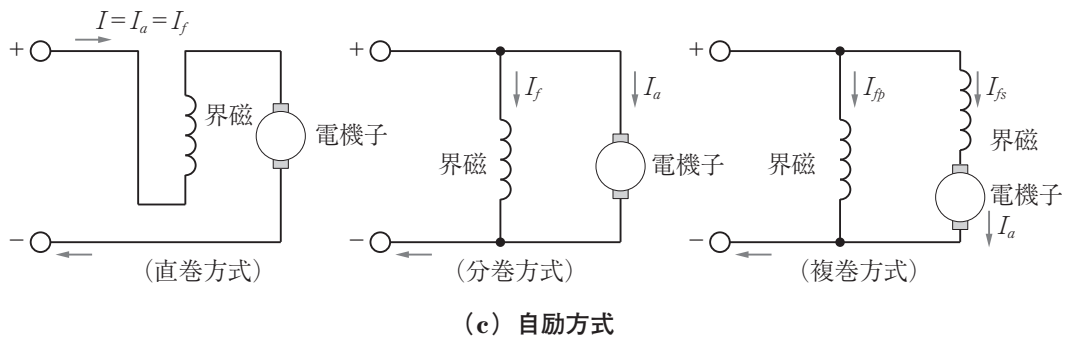
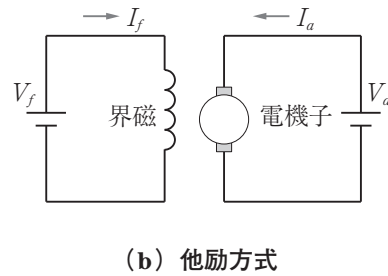
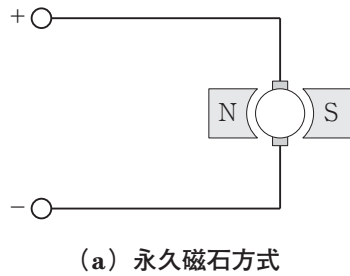


図13 直流機の励磁方式による結線

4.1 他励方式

他励方式では励磁に別電源を用いる。そのため、界磁電流を調節することにより界磁磁束が制御できる。界磁電流 I_f と界磁磁束が比例すると仮定すると、誘導起電力 E は次のようになる。

$$E = K_1 I_f \omega \quad (8)$$

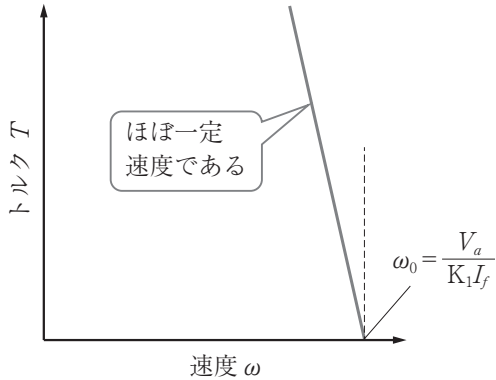
このときトルクは電機子電流 I_a と界磁電流 I_f の積に比例する。

$$T = K_1 I_f I_a \quad (9)$$

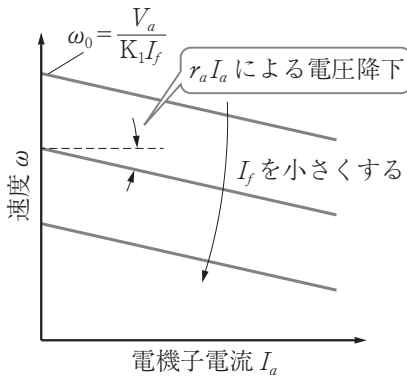
これより、回転速度は次のように表すことができる。

$$\omega = \frac{V_a - r_a I_a}{K_1 I_f} \quad (10)$$

式(10)を用いて速度とトルクとの関係を図示すると図14(a)のようになる。また、図(b)に示すように、電機子電流が変化しても速度の低下は電機子の巻線抵抗 r_a による電圧降下分のみである。つまり、他励電動機は、トルクが大きく変化しても、ほぼ定速度が得られる電動機である。



(a) 速度—トルク特性



(b) 電流—速度特性

図14 他励電動機の特性

電機子電流がゼロで、かつ、トルクがゼロのときを無負荷速度とする。無負荷速度 ω_0 は次のように表すことができる。

$$\omega_0 = \frac{V_a}{K_1 I_f} \quad (11)$$

つまり、電機子電圧 V_a を調節しても、界磁電流 I_f を調節しても速度が制御できるということになる。これを電機子制御または界磁制御という。界磁電流を制御するために、界磁巻線に可変抵抗を直列接続することも行われる。なお、永久磁石方式は他励方式の一種と考えることができるが、詳細は次回述べる。

4.2 分巻方式

分巻電動機は、巻数の多い界磁巻線を電機子巻線と並列接続することにより、小さな界磁電流を用いることができる方式である。分巻電動機では、界磁電流 I_f は電機子電圧 V_a により次のように変化する。

$$I_f = \frac{V_a}{r_f} \quad (12)$$

ここで、 r_f は界磁巻線の抵抗である。式(12)を式(10)に代入すれば、分巻電動機の基本式が得られる。

$$\omega = \frac{r_f (V_a - r_a I_a)}{K_1 V_a} \quad (13)$$

トルクは他励電動機と同じく式(9)で表される。分巻電動機の特性は、他励電動機において、界磁電圧が電機子電圧に等しい場合と考えることができる。ただし無負荷速度は

$$\omega_0 = \frac{r_f}{K_1} \quad (14)$$

となり、界磁抵抗 r_f の大きさにより決まってしまう。

4.3 直巻方式

直巻電動機は、巻数の少ない界磁巻線と電機子巻線が直列接続されている。したがって電機子電流がそのまま界磁電流となる。

$$I_f = I_a \quad (15)$$

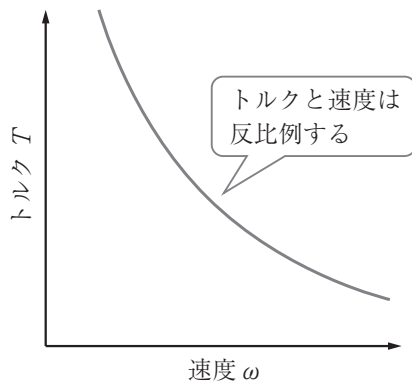
他励電動機の式(10)の r_a を $r_a + r_f$ とすれば直巻電動機の基本式が得られる。

$$\omega = \frac{V_a - (r_a + r_f) I_a}{K_1 I_a} \quad (16)$$

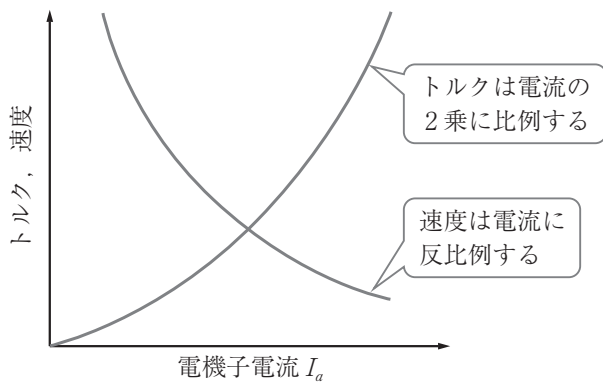
トルクは次のようになる。

$$T = K_1 I_a^2 \quad (17)$$

すなわち、直巻電動機のトルクは、電機子電流の2乗に比例する。この特性は図15のようになる。速度-トルク特性では低速で大トルク、高速で低トルクとなる。また、トルクは電機子電流の2乗に比例するので負荷トルクが小さいと電流は小さいが、無負荷では回転数は無限大となる。このような特性を直巻特性とよぶ。



(a) 速度-トルク特性



(b) 電流特性

図15 直巻電動機の特

4.4 複巻方式

複巻電動機は、界磁巻線を二分して一部を分巻界磁とし、一部を直巻界磁とする。二つの界磁巻線によって生ずる磁束が、同じ向きになるようにしたものを和動複巻、逆向きになるようにしたものを差動複巻という。実際に使われているのはほとんどが和動複巻である。

和動複巻電動機は、分巻電動機と直巻電動機の中間の特性となる。両巻線の起磁力の方向と強さの割合に応じて種々の特性をもち、使用目的に対応して設計される。

5 おわりに

今回は巻線型の直流電動機の原理、種類などについて述べた。永久磁石直流電動機、および直流電動機の制御については次回に述べる。なお、さらに詳細が知りたい場合、「電気機器」の教科書を参照されたい。

本講座の掲載予定を以下に示す。

- 1 電動機を理解するための電磁気と電気回路 (2022年4月号)
- 2 電動機の基礎技術 (2022年6月号)
- 3 直流電動機 (本号)
- 4 直流電動機の制御
- 5 誘導電動機
- 6 かご型誘導電動機の駆動と制御
- 7 巻線型誘導電動機
- 8 同期電動機
- 9 電動機の絶縁
- 10 電動機技術の動向