

電動機の技術 第4回

一直流電動機の制御と永久磁石直流電動機一

森本 雅之*

1 はじめに

直流電動機は制御用電動機として古くから使われてきた。近年、交流電動機への置き換えが進んでいるが、まだ多くの直流電動機が現役で活躍している。また、交流機へ更新せずに、既設機を延命化する努力も行われている。

今回は、中大容量を中心とする巻線型直流電動機の制御について述べる。

さらに、バッテリーなどを電源とする小型家電や自動車搭載用電動機などには小容量の永久磁石直流電動機が多数使われている。そこで、永久磁石直流電動機についても述べてゆく。

2 直流電動機の始動、制動、速度制御

2.1 始動

直流電動機の電圧方程式は次のように表せる。

$$V_a = E + r_a I_a \quad (1)$$

この式から、電機子電流を次のように表す。

$$I_a = \frac{V_a - E}{r_a} \quad (2)$$

始動時には速度がゼロなので、速度起電力 E はゼロである。したがって、始動時の電流 I_s は

$$I_s = \frac{V_a}{r_a} \quad (3)$$

となる。数100W以下の小型電動機では、電機子抵抗 r_a は比較的大きいので直接始動できる。しかし、大型の電動機では r_a が小さな値であるため、始動時に非常に大きな電流が流れてしまう。始動電流を低下させるために、始動用抵抗器を電機子巻線回路に直列に接続する。可変抵抗を用い、

回転数の上昇に伴って抵抗値を低下させて加速する。これに用いる可変抵抗を始動器という。分巻電動機の場合の始動器の接続を図1に示す。

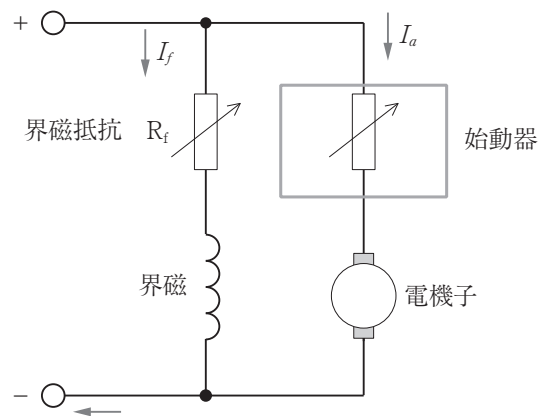


図1 始動器

2.2 速度制御

直流電動機の手速度は次のように表される。

$$\omega = \frac{V_a - r_a I_a}{K \phi_f} \quad (4)$$

これより、次のように速度制御することができる。

- ・電機子電圧 V_a を調節する：電圧制御法
- ・界磁磁束 ϕ_f を調節する：界磁制御法
- ・電機子抵抗 r_a を調節する：抵抗制御法

他励電動機では、電圧制御法と界磁制御法が用いられる。抵抗制御法は効率が低下するのであまり用いられない。電圧制御の場合、速度が変化しても電機子電流を一定に保てば定トルクで運転できる。界磁制御の場合、界磁磁束 ϕ_f を大きくすると速度は低下し、小さくすると高速運転となる。界磁制御の場合、速度が変化しても電機子電流を一定に保てば、定出力で運転できる。そのため、

* Masayuki Morimoto モリモトラボ

この二つの制御法を速度により切り換えて用いる。定トルク運転は基底速度（定格速度）以下で行い、基底速度以上では定出力運転に切り換える。なお、定出力運転は界磁磁束 ϕ_f を小さくするので、弱め界磁と呼ばれる。

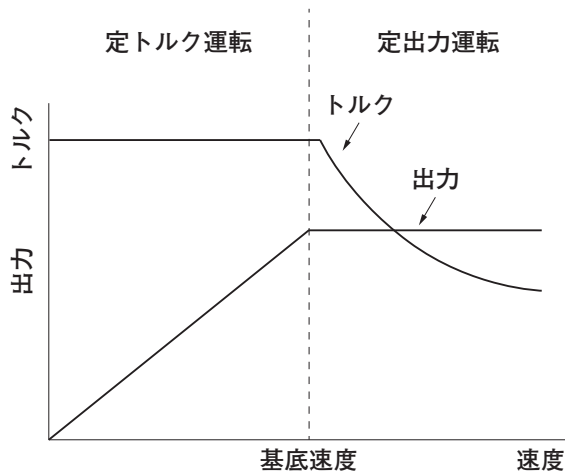


図2 他励電動機の世界速度制御

分巻電動機では電機子電圧を一定に保ち、界磁磁束 ϕ_f を調節する界磁制御法が用いられる。図1に示すように、界磁巻線に直列に可変抵抗を接続すればよい。速度制御範囲が大きい場合、可変抵抗による損失が大きくなることに注意を要する。なお、電圧制御をすると電機子、界磁が並列なので、分巻電動機の場合、電機子電圧とともに界磁磁束 ϕ_f も変化してしまうので、あまり用いられない。

直巻電動機は様々な制御法が用いられる。電機子電圧 V_a の電圧制御を行うと、図3に示すような特性が得られる。このほか、界磁磁束 ϕ_f を調節するため、図4 (a) に示すように界磁巻線に並列抵抗を入れることも行われる。また、(b) のように界磁巻線に中間タップを設けることも行われる。さらに、(c) に示すように電機子回路に直列に可変抵抗を入れる抵抗制御も用いられる。

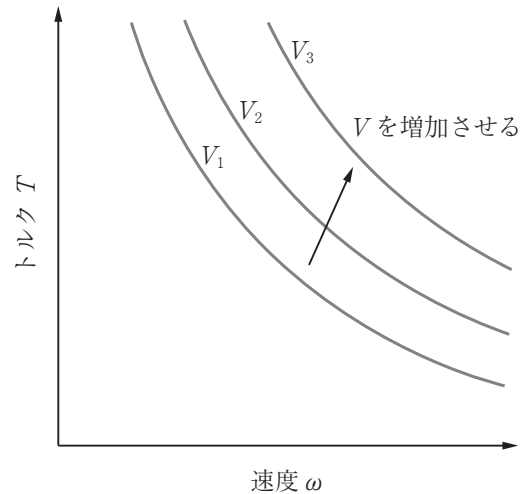
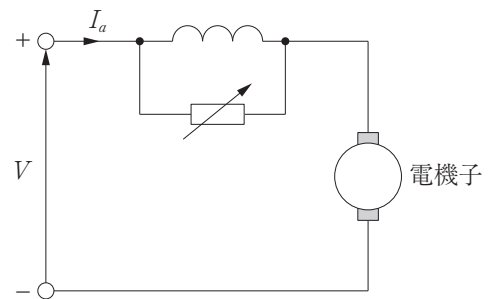
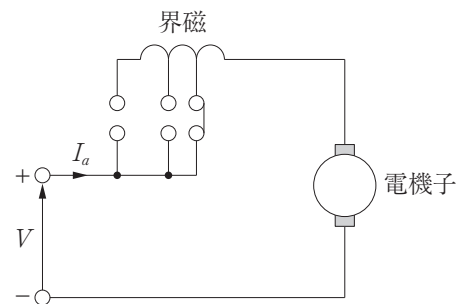


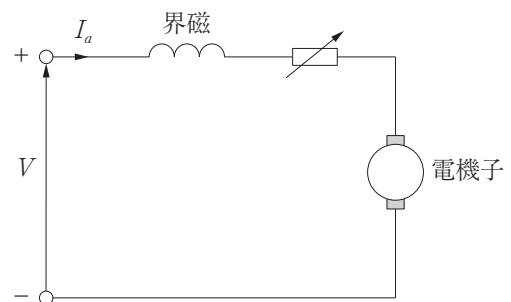
図3 直巻電動機の電圧制御



(a) 界磁抵抗法



(b) タップ法



(c) 抵抗制御

図4 直巻電動機の世界速度制御

2.3 制動

運転中の電動機は、電源を切り離せばやがて停止する。しかし、回転中の電動機および負荷には運動エネルギーが蓄積している。この運動エネルギーを何らかの形で消費しないと回転は停止しない。そのため停止までにかなり時間がかかる。急激に停止したい場合、制動を行う必要がある。制動には、以下に述べる三つの方法がある。

(1)電気制動

制動時に電動機を発電機として運転する。これを一般に電気制動という。発電により回転の運動のエネルギーが電気エネルギーに変換されて電流となる。発電した電力を電源に戻して、他の用途で電力を利用する方法は回生制動とよばれる。また、発電した電力を抵抗によりジュール熱として消費する場合、発電制動という。

(2)逆相制動

運転中に電機子回路の正負を逆に接続し、逆方向のトルクを発生させて制動する。急激に制動できるが、制動のために大電流が流れる。回転の運動エネルギーは電動機の発熱となる。なお、この方法はプラグングと呼ばれることがある¹⁾。

(3)機械制動

摩擦ブレーキなどにより機械的に回転数を低下させる。運動エネルギーはブレーキにより熱に変換される。すなわち、ブレーキが発熱する。

3 直流電動機の制御モデル

直流電動機を精密に制御するためには直流電動機の過渡的な特性を考慮した動特性まで制御することが必要である。そのための制御モデルについて説明する。

ここでは、界磁磁束が一定として考え、他励電動機としてモデル化する。直流電動機の電圧方程式において、速度起電力は回転数に比例して変化する電圧源として考える。

$$v_a = r_a i_a + L \frac{di_a}{dt} + K_E \omega \quad (5)$$

ここで、電動機の慣性モーメントを導入する。慣性モーメント J_M を用いると運動方程式は次の

ようになる。

$$T = J_M \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

この式を積分し、 $T = K_E i_a$ の関係を用いると次のように表すことができる。

$$v_a = r_a i_a + L \frac{di_a}{dt} + \frac{K_E K_T}{J_M} \int_0^t i_a dt \quad (7)$$

ここで、 $\frac{J_M}{K_T K_E} = C$ とおくと、電動機の電圧方程式は次のようになる。

$$v_a = r_a i_a + L \frac{di_a}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_a dt \quad (8)$$

すなわち、速度起電力は等価なコンデンサとしてあらわすことができる。これにより等価回路を使って、制御を検討することが可能になる。

電動機が駆動する負荷を考慮すると、運動方程式は次のように表される。

$$J \frac{d\omega}{dt} + D\omega = T_M - T_L = K_T i_a - T_L \quad (9)$$

ここで、 J は電動機と負荷の合成慣性モーメント ($J = J_M + J_L$)、 T_M は電動機のトルク、 T_L は負荷トルク、 D は粘性抵抗係数である。

粘性抵抗係数は一般に小さいので、ここでは無視する。これらを使うと電動機の動特性を次のような電圧方程式であらわすことができる。

$$v_a = r_a i_a + L \frac{di_a}{dt} + \frac{K_T K_E}{J_M} \int_0^t \left(i_a - \frac{T_L}{K_T} \right) dt \quad (10)$$

ここで、 $-\frac{T_L}{K_T}$ は負荷電流を表している。すなわち、**図5**に示すように、電動機はRLC回路で表され、負荷電流は負の電流源として考えることができる。

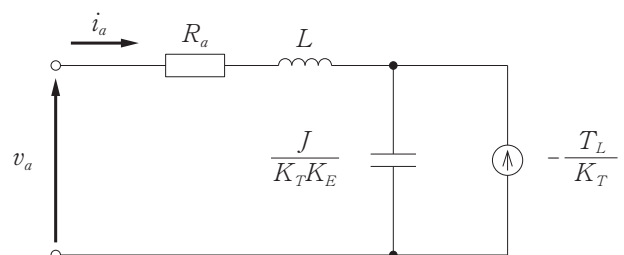


図5 直流電動機の負荷を含んだ等価回路

¹⁾ プラグングと呼ばれることがあるが正しくは plugging である。

一般に、制御演算ではラプラス変換を用いて行うことが多い。そこで、ラプラス変換での説明を行う。基本となるのは次の方程式である。

電気回路モデル

$$\left. \begin{aligned} v &= Ri + L \frac{di}{dt} + e \\ e &= K_E \omega \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

運動モデル

$$\left. \begin{aligned} T_M - T_L &= J \frac{d\omega}{dt} + D\omega \\ T_M &= K_T i \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

これらの式をラプラス変換すると次のようになる。

$$\begin{aligned} V(s) &= sLI(s) + RI(s) + E(s) \\ E(s) &= K_E \Omega(s) \\ T_M(s) - T_L(s) &= sJ\Omega(s) + D_f\Omega(s) \\ T_M(s) &= K_T I(s) \end{aligned} \quad (13)$$

(13)式がラプラス変換で表した基本式である。4つの式の相互関係をブロック図であらわすと図6のようになる。このモデルは電機子電圧指令が入力で、回転数が出力である。このブロック図を使えば直流電動機のトルク、回転数などの制御を検討することができる。

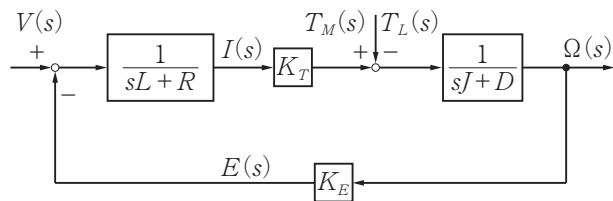


図6 直流電動機の制御ブロック図

4 レオナード方式

レオナード方式は直流電動機の電機子電圧を制御することにより広範囲で速度制御するドライブシステムである。このうち、ワードレオナード方式と呼ばれるのは直流発電機を用いる方式である。20世紀前半には広く使われた。

図7にワードレオナード方式を示す。図において、DCMが可変速度で運転しようとする他励直流電動機、DCGは専用の他励直流発電機、ACMは発電機を駆動するための交流電動機である。

他励直流電動機の回転速度を広範囲に変えるには、電動機の界磁を一定にしておき、発電機の界磁電流を0から最大まで変化させればよい。電動機を逆方向に回転させるには、発電機の界磁電流の極性を反対にする。そのため、発電機の界磁回路は電圧可変範囲が広く、極性も変更できるようにしておく必要がある。

ワードレオナード方式は制御性能が高いが、専用の発電機が必要なため設備費が高価であり、据え付け面積が広いという欠点があった。

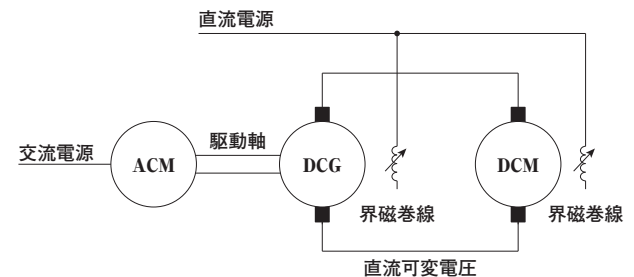


図7 ワードレオナード方式

そのため、発電機に代えて、水銀整流器、シリコン整流器などの静止器を使用する方式が出現した。これらを静止レオナード方式と呼ぶ。サイリスタの発明によりサイリスタで制御する静止レオナード方式を特にサイリスタレオナード方式と呼ぶことが多い。

図8に示すサイリスタレオナード方式は正方向電流用と逆方向電流用の2組のサイリスタブリッジを逆並列接続している。これにより正転運転、逆転運転が可能である。さらに、サイリスタブリッジをインバータとして動作させることができるので、回生制動も可能となる。このような運転を4象限運転という。

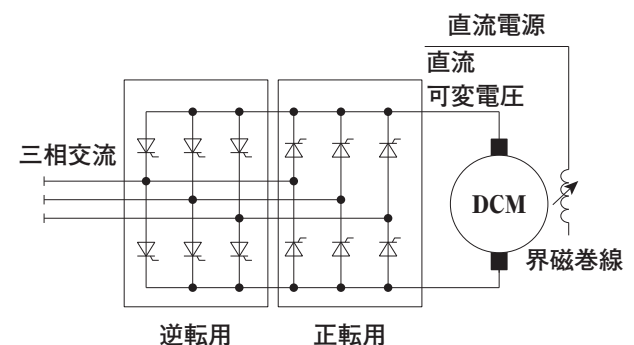


図8 サイリスタレオナード方式

5 チョップパ制御

チョップパは直流電圧を制御するパワーエレクトロニクス回路である。基本回路を図9に示す。チョップパはスイッチングにより電圧を連続パルスに切り刻むことにより平均電圧を制御する。(a)の降圧チョップパは直流電圧を降圧する回路である。(b)の昇圧チョップパは直流電圧を昇圧する回路である。また、(c)に示す4象限チョップパ(Hブリッジ)は電流の方向が変更できるので正逆転が可能で、さらに回生が可能である。なお、図で示したスイッチSはサイリスタ、トランジスタなどのパワーデバイスである。

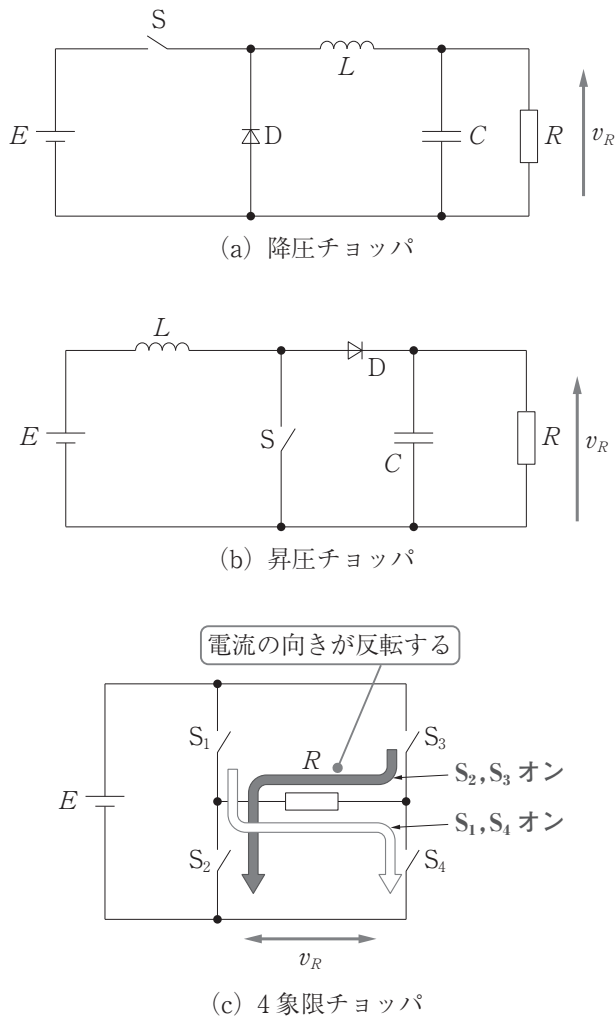


図9 チョップパ回路

チョップパにより電機子電圧を制御する方式を電機子チョップパという。直巻方式, 分巻方式では, 電動機電圧を直接制御することになる。ただし, 電動機の電機子電流すべてをチョップパで制御するので, 電動機の出力に相当する容量のチョップパが必要である。

界磁チョップパは, 界磁電流のみ制御するので小容量のチョップパが使用できる。また弱め界磁制御も可能となる。4象限チョップパを用いれば逆転も可能となる。なお, 図10では複巻電動機を用いて示している。

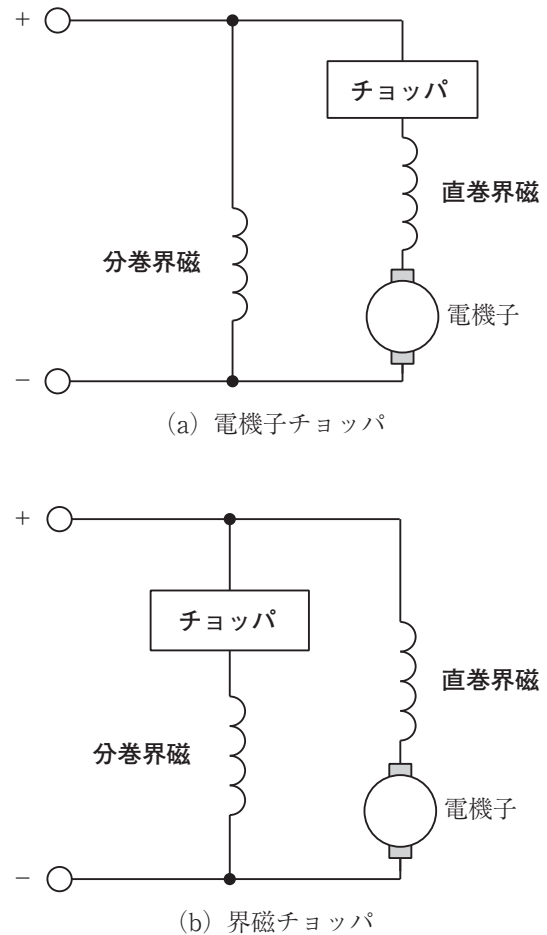


図10 チョップパ制御

6 永久磁石直流電動機

永久磁石方式は、界磁に永久磁石を用いているため、界磁磁束が一定である。他励方式で界磁を制御せずに一定とする場合とも考えることができる。

永久磁石電動機の基本式は次のように表される。

$$V_a = K_E \omega + r_a I_a \quad (14)$$

$$T = K_T I_a \quad (15)$$

K_E 、 K_T は磁束 ψ を含んでいるが、永久磁石方式は磁束が一定であると考えられるので、 K_E 、 K_T とも一定値である。電動機の構造、設計で決まる定数である。

式(14)(15)から、次の特性式が得られる。

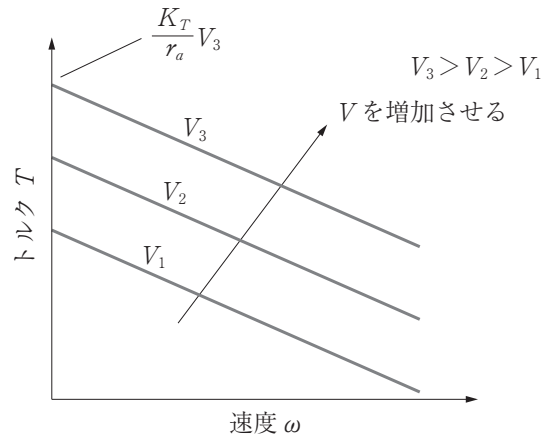
$$T = \frac{K_T}{r_a} V_a - \frac{K_T K_E}{r_a} \omega \quad (16)$$

$$I_a = \frac{V_a - K_E \omega}{r_a} \quad (17)$$

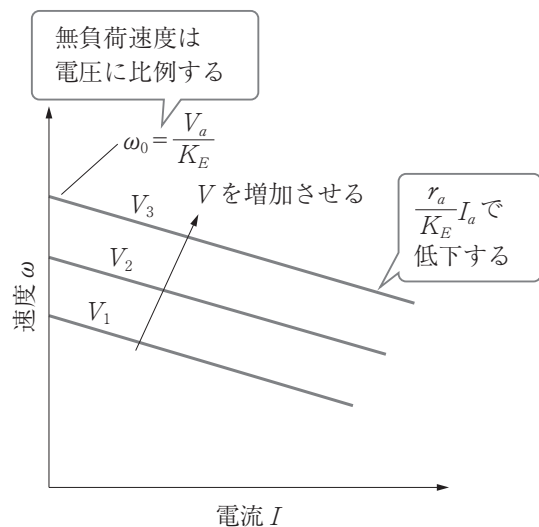
この式により表される永久磁石電動機の特性を図11に示す。図(a)に示すように、端子電圧 V_a を一定に保てばトルクと回転数の関係は直線である。さらに、端子電圧を $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3$ のように変化させるとトルクの直線が平行に移動する。すなわち、端子電圧を高くすれば高速、高トルクの運転が可能になる。図(b)には電機子電流と速度の関係を示す。電機子電流の増加により r_a による電圧降下が増加して速度が低下する。電機子電流がゼロのときの無負荷速度は次のようになり、端子電圧に比例する。

$$\omega_0 = \frac{V_a}{K_E} \quad (18)$$

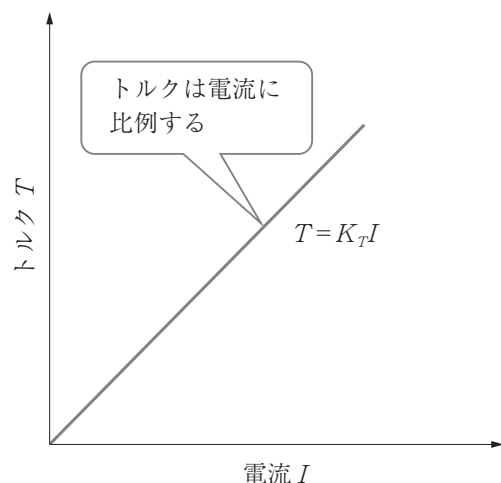
また、図(c)にはトルクと電流の関係を示す。トルクは電流に比例する。このように、永久磁石直流電動機は無負荷速度が電圧に比例し、トルクが電流に比例するという性質をもっている。このため電流を制御すればトルクが制御できることになり制御用電動機として広く使われている。近年は、低電圧のバッテリー駆動の電動機として広く使われている。



(a) 速度—トルク特性



(b) 速度—電流特性



(c) 電流—トルク特性

図11 永久磁石電動機の特性

7 おわりに

小容量を除いて、直流電動機の新設は減っており、既存設備の交流電動機への置き換えが進んでいる。しかし、電動機の原理、基本を学ぶ場合、直流電動機の理解は不可欠である。また、小容量の永久磁石電動機は今後も広く使われると考えられる。直流電動機は、自動車電装品をはじめとして、第10回で述べるブラシレスモータとして、また、さらに展開してゆくものと思われる。

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 (2022年8月号)
- 4 直流電動機の制御と永久磁石直流電動機 (本号)
- 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

定期自主検査実施のステッカーを貼ろう

クレーン等安全規則では1年以内ごとに1回、1月以内ごとに1回定期的に自主検査を行うことを定めています。

当協会の支部では、厚生労働大臣が定めた定期自主検査指針に沿って、**天井クレーン、移動式クレーン及び積載形トラッククレーンの定期自主検査者に対する安全教育**を行っています。

また、当協会が実施した上記教育の修了者が、1年以内ごとに1回確実に年次の定期自主検査を実施したことを示すために、右図の**ステッカー**を貼付することを広く呼びかけております。

定期自主検査者安全教育の申込み及びステッカーの購入については当協会各支部へ。



年次定期自主検査：令和4年 月実施

検査実施者氏名：

教育修了証番号：

一般社団法人 日本クレーン協会

No. 000000

一般社団法人 日本クレーン協会