

電動機の技術 第5回

—誘導電動機—

森本 雅之*

1 はじめに

今回から交流電動機について述べてゆく。まず、交流電動機のうち最も広く使われている誘導電動機について、3回にわたって説明してゆく。電磁誘導を利用するので誘導電動機と呼ばれる。そのため、同じように電磁誘導を利用する変圧器についての説明から始めてゆく。

2 変圧器

誘導電動機は電磁誘導による誘導起電力を利用する。誘導電動機の回転子巻線は固定子巻線に対して、変圧器の二次巻線となっていると考えることができる。回転子電流は誘導起電力により流れている。

変圧器とは、鉄心に二つ以上の巻線を巻き、電磁誘導による起電力を利用する機器である。変圧器の原理を図1に示す。鉄心に二つの巻線が巻かれている。それぞれ一次巻線と二次巻線とよぶ。一次巻線の巻数を N_1 、二次巻線の巻数を N_2 とする。交流電圧を一次巻線に印加すると、鉄心内に磁束が発生し、その磁束は一次巻線と鎖交する。

そのため、一次巻線には印加した電圧とは別に電磁誘導による起電力が生じる。このとき、与えられた端子電圧 v と発生する誘導起電力 e は等しい。

鉄心内の磁束を ϕ [Wb] とすると、一次巻線に鎖交する磁束数は $N_1\phi$ となる。鉄心内の磁束 ϕ は二次巻線とも鎖交する。二次巻線に鎖交する磁束数は $N_2\phi$ となる。磁束から一次巻線と二次巻線の誘導起電力の関係を求めると次のようになる。

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (1)$$

ここで、 a を巻数比とよぶ。巻数比は変圧器の基本的な定数である。

図2に示すように変圧器の二次巻線に負荷インピーダンス Z_L を接続したとする。このとき負荷インピーダンスを流れる交流電流を二次電流 I_2 とする。また一次巻線を流れる交流電流を一次電流 I_1 とする。このとき、一次電流と二次電流の関係は次のようになる。

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (2)$$

ここで、 $\frac{1}{a}$ を変流比とよぶ。

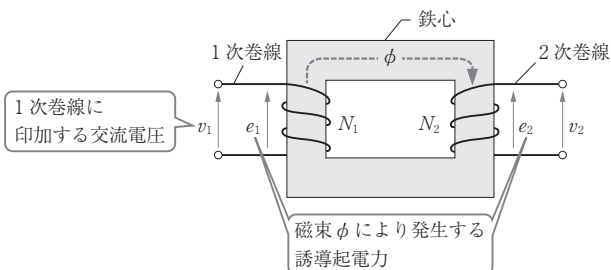


図1 変圧器の原理

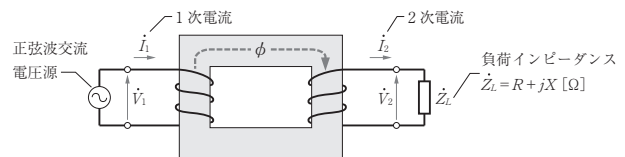


図2 負荷と接続した変圧器

* Masayuki Morimoto モリモトラボ

図2の負荷インピーダンスについて、次のオームの法則が成立する。

$$\dot{V}_2 = \dot{Z}_L \dot{I}_2 \quad (3)$$

式(3)の関係を、式(2)の巻数比 a を使って、 \dot{V}_1 、 \dot{I}_1 の関係を表すと次のようになる。

$$\dot{V}_1 = (a^2 \dot{Z}_L) \dot{I}_1 \quad (4)$$

式(4)の関係を回路で表すと、図3に示すような変圧器のない回路となる。これが理想変圧器の等価回路である。

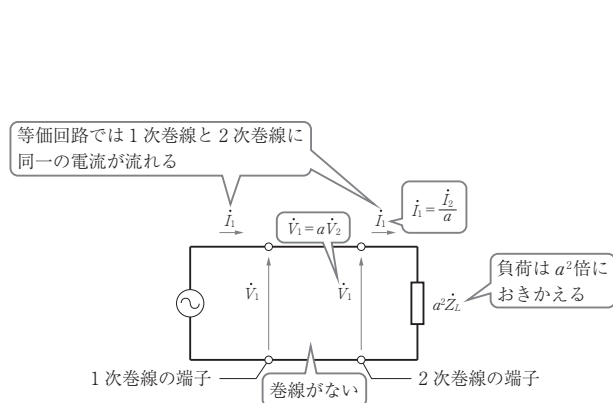
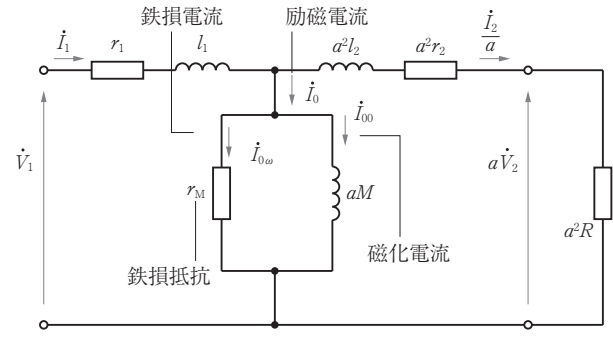
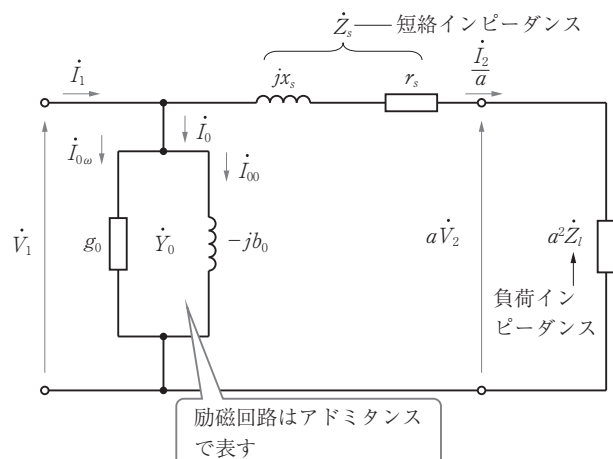


図3 理想変圧器の等価回路

理想変圧器は鉄心の透磁率は無限大、損失がない、などの仮定のうえに成り立っている。実際の変圧器では透磁率は有限であり、インダクタンスを考える必要がある。さらに、損失も発生する。そこで、実際の変圧器では巻線抵抗、鉄損、漏れ磁束を考慮して図4(a)に示す等価回路として扱う。なお、(b)に示すL型等価回路は、一次巻線抵抗 r_1 と一次漏れインダクタンス l_1 による電圧降下が小さいという仮定し、取り扱いを簡便にするためアドミタンス、リアクタンスにより表した簡易等価回路である。



(a) T型等価回路



(b) L型等価回路 (簡易等価回路)

図4 変圧器の等価回路

3 誘導電動機の原理と構造

3.1 誘導電動機の原理

誘導電動機の原理を図5を用いて説明する。図に示すような短絡したコイル状の導体を回転磁界中におく。このコイルは回転できるように取り付けられている。回転磁界は一定の回転数 $n_0 [s^{-1}]$ で回転しているとす。導体と磁界が相対的に運動しているので、導体に起電力を生じる(速度起電力)。導体は短絡したコイルなので閉回路になっており、起電力により電流が流れる。この電流は磁界中を流れるので、コイルに力が発生する(電磁力)。コイルの上と下を流れる電流の向きは反対なので、それぞれのコイルに発生する力は反対方向となりトルクが発生する。これが誘導電動機の回転原理である。

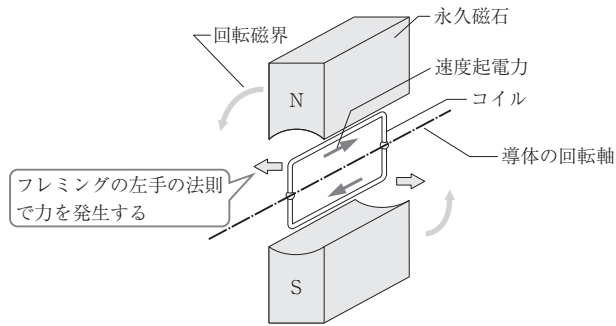


図5 誘導電動機の原理

コイルの回転数を n_2 [s^{-1}] とする。コイルに誘導起電力が生じるためには、常に $n_0 \neq n_2$ の状態でなくてはならない。電動機トルクを発生するためには $n_0 > n_2$ である必要がある。すなわち、コイルは回転磁界中を相対的に $n_0 - n_2$ の回転数で回転していることになる。その相対速度により起電力が誘導され、連続してトルクを発生する。

回転磁界の回転数 n_0 を同期速度とよぶ。コイルと回転磁界との相対速度と同期速度の比を滑りという。滑り s は次のように表せる。

$$s = \frac{n_0 - n_2}{n_0} \quad (5)$$

滑りが0のときが同期速度であり、滑りが1のときが停止を表す。滑りは、誘導電動機の運転状態を表す際の重要な量である。

3.2 誘導電動機の構造

誘導電動機の固定子の構造を図6に示す。固定子はリング状の鉄心と巻線で構成されている。鉄心の内側にはスロットとよぶ溝があり、スロット中に巻線が収められている。鉄心は電磁鋼板を積層して作られている。渦電流は軸方向に流れやすいため、渦電流が流れる範囲を極力狭くするために積層鉄心を用いる。巻線は二つのスロットの間を巻かれているため鉄心の端部で他のスロットへ引き回される。この鉄心の外部の引き回しのための部分をコイルエンドとよぶ。固定子を一次側とよぶ。固定子巻線の三相コイルに三相交流電流を流すと、固定子の内側に回転磁界が生じる。

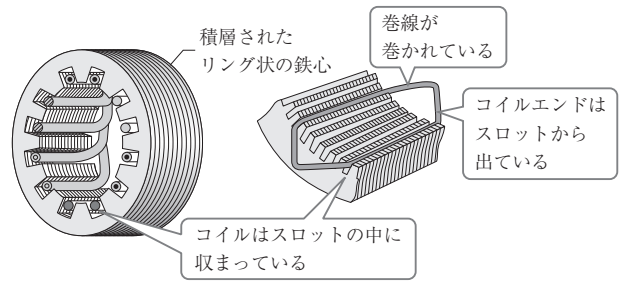


図6 誘導電動機の固定子

回転子も電磁鋼板の積層鉄心を用いる。回転子の巻線を二次巻線と呼ぶ。回転子の構造から巻線型回転子とかご型回転子に分類される。かご型回転子の構造を図7に示す。かご型回転子の巻線は、銅またはアルミの導体棒をスロット内に納め、導体棒の両端が端絡環に接続されている。

巻線型回転子は回転子に三相巻線があり、各相巻線の端子はスリップリングに接続されている。ブラシを介して外部の抵抗に接続できるようになっている。巻線型回転子は大容量を中心に使われてきたが、近年、製造される誘導電動機の大半は、かご型回転子を使っている。

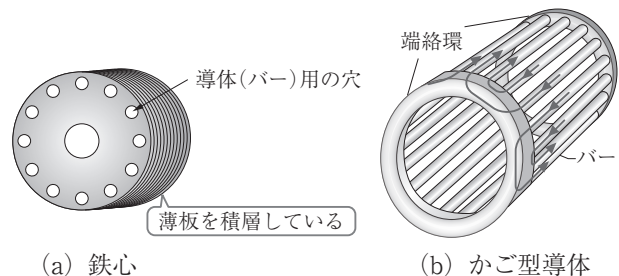


図7 かご型回転子

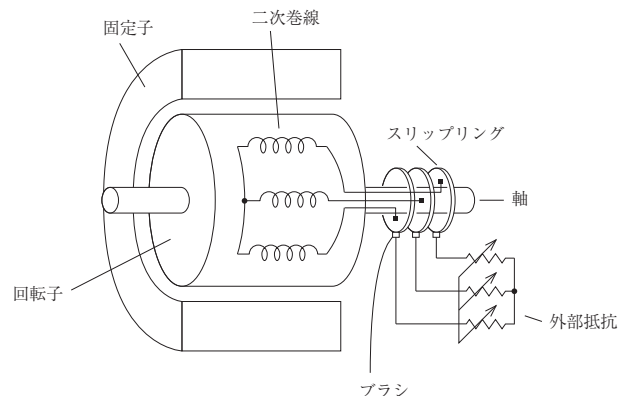


図8 巻線型回転子

固定子に三相交流電流が流れたとき、固定子内側に生じる各相の磁界を合成した磁界を描くと図9 (a) のようになる。その結果、固定子の内側にS極とN極が生じる。NとSの二つの極があるのでこれを2極とよぶ。極数 $P=2$ である。スロットおよび巻線の数 Z を2倍にして図 (b) のように配置すれば極数は $P=4$ である。2極の場合、交流電流の1周期で磁界が1回転する。ところが4極の場合、交流電流が2周期で磁界が1回転する。同期速度 N_0 は、極数 P と周波数 f により次のように表される。

$$N_0 = \frac{120f}{P} \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (6)$$

また、回転子の機械的回転速度 N は、滑り s を用いて次のように表される。

$$N = \frac{120f}{P} (1-s) \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (7)$$

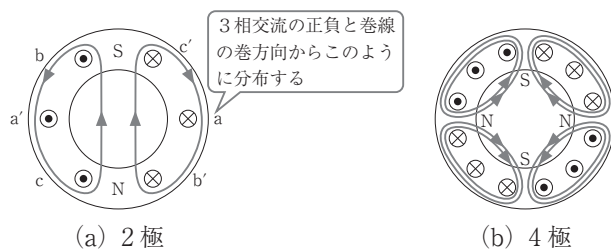


図9 極数

4 誘導電動機の等価回路

4.1 誘導起電力

固定子巻線を通る交流電流により発生する回転磁界は固定子巻線自身とも鎖交している。そのため、固定子巻線に誘導起電力が生じる。回転磁界の磁束は移動しているため静止している巻線からみると時間的に変化するように見える。巻線に鎖交する磁束 ϕ は次のように表せる。

$$\phi = \Phi_m \cos \omega t \quad (8)$$

このとき、一つの相の一次巻線に生じる誘導起電力の実効値は次のようになる。

$$E_1 = 4.44 f w_1 \Phi_m \quad (9)$$

ここで、 w_1 は一次巻線の巻数である。

回転子が静止しているとするとき、回転磁界は回転子に対して同期速度で移動している。そのため、相互誘導により二次巻線にも次式で示す誘導起電力が生じる。

$$E_2 = 4.44 f w_2 \Phi_m \quad (10)$$

ここで、 w_2 は二次巻線の巻数である。式(10)は停止中に二次巻線に誘導される起電力を表している。

次に、回転子が回転している状態を考える。滑り s で回転しているとするとき、回転子と回転磁界の相対速度は

$$n_0 - n_2 = s n_0 \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (11)$$

である。回転中の誘導起電力 E_{2s} は、回転磁界と回転子の相対速度により生じるので、次のように表すことができる。

$$E_{2s} = 4.44 s f w_2 \Phi_m = s E_2 \quad (12)$$

(12)式は、回転中の誘導起電力は停止時の s 倍になることを示している。さらに、このときの誘導起電力により回転子導体に流れる二次電流の周波数 f_2 は

$$f_2 = s f \quad (13)$$

であることも示している。 $s f$ を滑り周波数とよぶ。誘導起電力により回転子導体に流れる滑り周波数の交流電流と固定子の回転磁界により電磁力が発生する。

4.2 等価回路

誘導電動機の固定子と回転子は、磁気的には変圧器として結合している。したがって、誘導機の等価回路は変圧器と類似である。そこで、変圧器の等価回路をもとにして誘導電動機の等価回路を考える。

回転子が静止しているとするとき、図10に示すような理想変圧器を用いた回路として考えることができる。図では、変圧器の二次側の出力を短絡している。これは、回転子の巻線が短絡されていることを示している。等価回路は1相分で考えるので、一次側に印加される電圧 V_1 は相電圧である。その周波数を f_1 とする。回転子が静止しているため、二次回路の電流の周波数 $f_2 = f_1$ である。すなわち、変圧器として考えることができる。

滑り s で回転しているとき、同様な回路を書いてみると図11のようになる。回転子の誘導起電力は式(12)に示すように s 倍され、 $s E_2$ になる。回転子回路を通る電流の周波数は $s f_1$ となる。周波数が s 倍なので、回転子のリアクタンスも s 倍になる。しかし、一次、二次の周波数が異なるので、この状態では変圧器として考えることはできない。

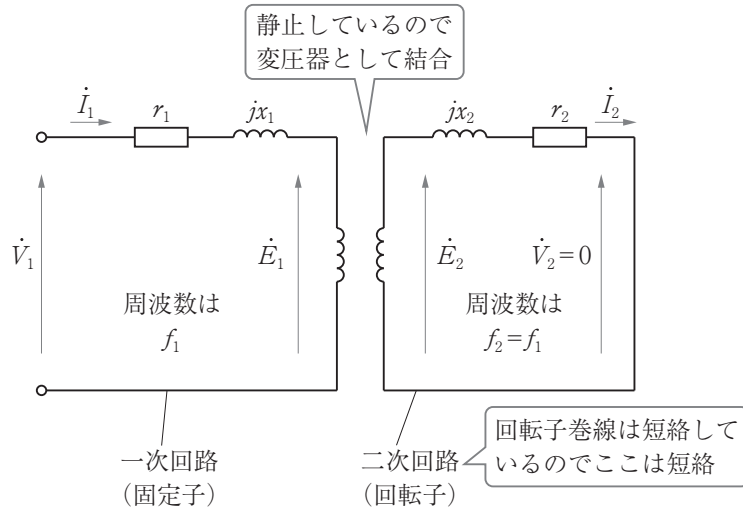


図10 静止時の変圧器としての等価回路

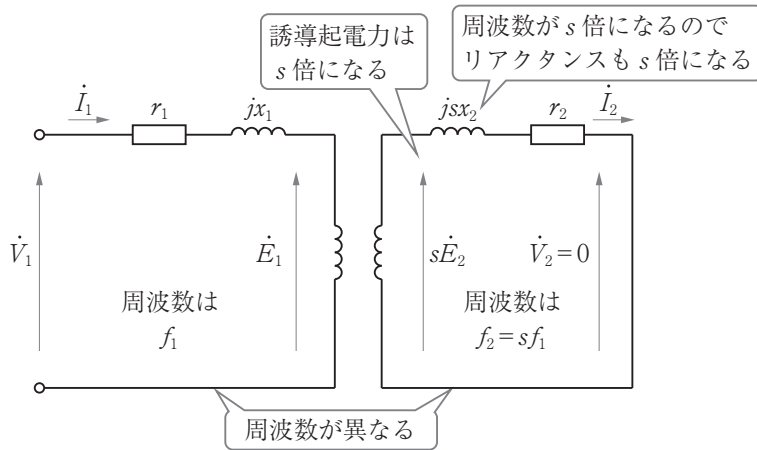


図11 回転時の変圧器としての等価回路

図11の二次回路の電流 \dot{I}_2 は次のように表すことができる。

$$\dot{I}_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}} \quad (13)$$

この式は、二次電流 \dot{I}_2 は E_2 によって表すことができることを示している。つまり、この式で表された二次電流の周波数は $f_2=f_1$ となっていると考えることができる。このように、 r_2 を r_2/s に置き換えて考えれば一次、二次の周波数が同一となるので変圧器として扱うことができるようになる。

電動機を考えているので等価回路に機械的出力を導入する必要がある。誘導電動機の二次側に供給される電力を二次入力とよぶ。二次入力 P_2 は次のように表すことができる。

$$P_2 = \frac{r_2}{s} I_2^2 \quad (14)$$

二次入力のうち、二次回路の損失となる以外はすべて機械的出力になるはずである。すなわち、出力 P_0 は二次入力 P_2 から二次銅損 P_{c2} を差し引いたものになる。

$$P_0 = P_2 - P_{c2} = \frac{r_2}{s} I_2^2 - r_2 I_2^2 = \frac{1-s}{s} r_2 I_2^2 \quad (15)$$

したがって、二次抵抗 $\frac{r_2}{s}$ を次のように二つに分けて考えれば、二次銅損と機械的出力をそれぞれの抵抗で表現できることになる。

$$\frac{r_2}{s} = r_2 + \frac{1-s}{s} r_2 \quad (16)$$

ここで、変圧器としての巻数比を導入し、二次側諸量を一次側に換算する。巻数比 a を用いて

二次側の諸量を一次側に換算すると、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} r_2' &= a^2 r_2 \\ x_2' &= a^2 x_2 \\ E_2' &= a E_2 \\ I_2' &= \frac{I_2}{a} \end{aligned} \tag{17}$$

(17)式で示した諸量を用いれば、巻数比が $a = 1$ の変圧器と考えることができ、一次二次を共通の回路で考えることができる。ここで、変圧器の相互インダクタンスに相当する励磁リアクタンスを x_M とおくと、**図12**のような回路が得られる。

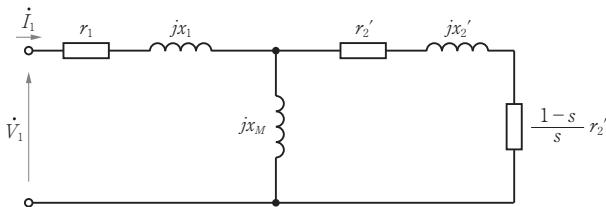


図 12 一次側に換算した回路

変圧器と同様に等価回路に鉄損を導入する。鉄損コンダクタンスを g_0 、励磁サセプタンスを b_0 として、励磁回路をアドミタンス Y_0 として表すと、**図13**に示す誘導電動機の T 形等価回路が得られる。変圧器と同様に一次回路による電圧降下が無視できるとすれば、取り扱いが容易な、L 形等価回路（簡易等価回路）が得られる。これを**図14**に示す。

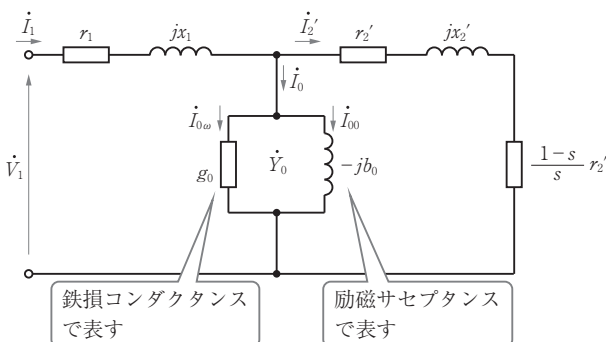


図 13 誘導電動機の T 型等価回路

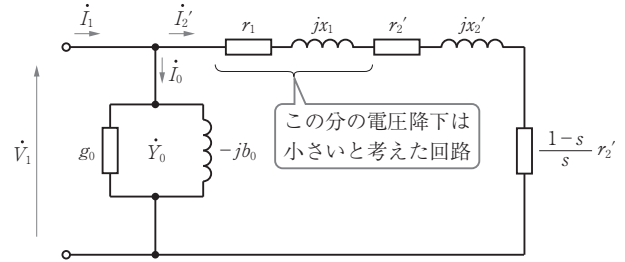


図 14 誘導電動機の L 型等価回路

5 誘導電動機の特性計算

等価回路を用いて、各種の特性を計算することができる。以下に L 型等価回路を用いた計算式を示す。なお、等価回路定数は既知であるとする。

(1)入力電流

$$I_1 = V_1 \sqrt{\left(g_0 + \frac{r_1 + (r_2'/s)}{Z^2} \right)^2 + \left(b_0 + \frac{x_1 + x_2'}{Z^2} \right)^2} \tag{18}$$

ただし、 $Z = \sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2}$ とする。

(2)入力電力

$$P_1 = 3V_1^2 \left(g_0 + \frac{r_1 + (r_2'/s)}{Z^2} \right)^2 \tag{19}$$

(3)二次入力

$$P_2 = 3V_1^2 \frac{(r_2'/s)}{Z^2} \tag{20}$$

(4)出力

$$P_o = (1-s)P_2 = (1-s) 3V_1^2 \frac{(r_2'/s)}{Z^2} \tag{21}$$

(5)力率

$$\cos\theta = \frac{g_0 + \frac{r_1 + (r_2'/s)}{Z^2}}{\sqrt{\left(g_0 + \frac{r_1 + (r_2'/s)}{Z^2} \right)^2 + \left(b_0 + \frac{x_1 + x_2'}{Z^2} \right)^2}} \tag{22}$$

(6)効率

$$\eta = \frac{P_o}{P_1} \tag{23}$$

(7)トルク

$$T = \frac{P_o}{\omega_m} = \frac{P_2}{\omega_0} \tag{24}$$

ここで、 ω_m は軸の回転速度 (rad/s)、 ω_0 は同期速度 (rad/s) である。

この式はトルクが二次入力に比例することを表

している。そのため、二次入力を同期ワットとよぶことがある。

6 誘導電動機の特徴

ここでは、誘導電動機の動作と特性について述べる。

6.1 誘導機のトルク

誘導機の滑り s を1.5から-1.5まで変化させたときのトルクの変化を図15に示す。滑りが1の状態は誘導機が回転していない状態を示す。また、滑りが0の状態は誘導機が同期速度で回転している状態を示す。この図は右側ほど回転数が高い。滑りが $0 < s < 1$ の間を電動機動作という。この領域では、誘導機の発生するトルクは回転磁界と同方向である。

同期速度以上で回転すると $s < 0$ となる。この状態では、電動機の発生トルクは負になっている。この状態は誘導機が回転磁界と同方向に回転しているが、回転方向とは逆の制動方向のトルクを発生することになる。つまり、減速させようと働く。このときは発電機動作をしている。電源に接続し、同期速度よりも速く回せば誘導発電機として動作する。電動機の制御によりこの状態を作り出せば、回生ブレーキとして使用できる。

図の左側の $s > 1$ の領域では、誘導機は回転磁界に対し逆向きに回転している。したがって、発生トルクは回転磁界と同方向なので制動トルクを

発生している。この状態を逆相制動という。

6.2 速度特性

誘導機の滑りが0から1の間の特性を図16に示す。ここでは電動機動作するので、この特性は誘導電動機の数値特性とよばれる。滑りが0に近いあたりで最大トルクとなっている。最大トルクは電動機が発生する最大のトルクであり、これより負荷のトルクが大きいと電動機は運転することができず、停止してしまう。そのため停動トルクともよばれる。電動機として使用する場合、通常は最大トルクの右側で使用する。したがって、滑りはたかだか数%で運転する。そのため、負荷トルクが大きく変化しても数%程度しか速度が変化しないことになる。つまり、誘導電動機は負荷に関わらずほぼ一定速で運転できるという特徴がある。

また、図16には滑りに対する電流の変化も示してある。この図は、滑り s が s_1 のときには発生トルクは T_1 であり、そのときの一次電流は I_1 であることを示している。電流は滑り1の停止状態で最大で、滑りの減少とともに低下し、滑りが1の同期速度で最小値になる。

電動機が停止状態で発生するトルクを始動トルクという。始動トルクは通常、定格トルクより小さい。また始動時には電流が最大である。これを始動電流とよぶ。始動後、加速すると滑りが低下し、それにともない電流が低下する。始動電流は通常、定格電流の6～8倍程度である。

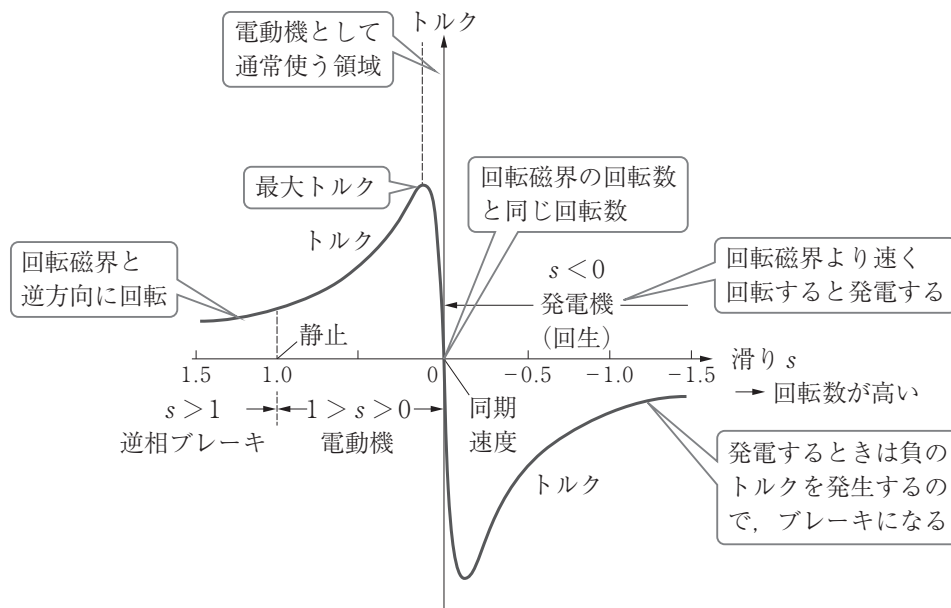


図15 誘導機のトルク特性

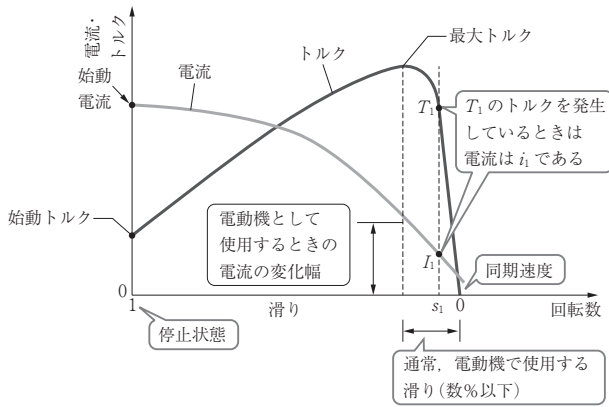


図 16 誘導電動機の世界特性

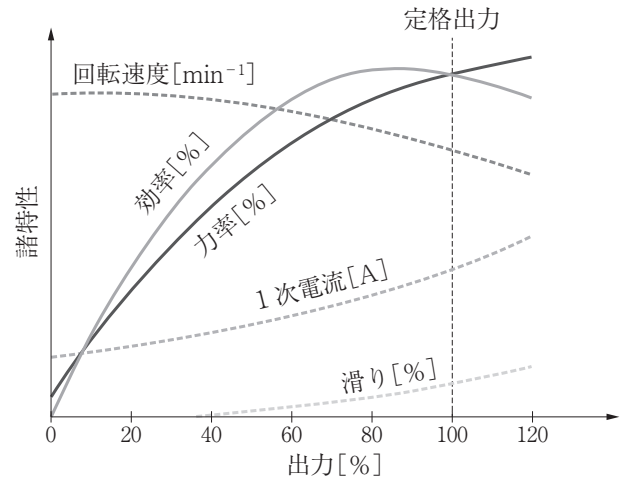


図 17 誘導電動機の世界特性

6.3 負荷特性

誘導電動機は、同期速度と最大トルクとの間の滑りの小さな領域で運転する。この範囲の特性を示したのが負荷特性である。負荷特性を図17に示す。横軸は出力である。ここでは、定格出力を100%としてパーセント表示している。

負荷特性は出力特性ともよばれる。速度、効率、力率、電流、入力、トルク、滑りなどの出力による変化を示している。この図から、定格出力付近で効率が最大になっていることがわかる。

7 おわりに

本稿では交流電動機として最も多く使われている誘導電動機についての基本事項を述べた。実際に使用する際の特性、制御法などについては次回、次々回に述べる。

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 (2022年10月号)
- 5 誘導電動機 (本号)
- 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