

第2章 電気機器

第1節 総 説

1 電気機器の分類

電気機器は広義には発電機、電動機、変圧器、整流器等のエネルギーの変換に用いられる機器と、遮断器、開閉器、避雷器、盤等の機器が含まれるが、本章では前者を対象とする。

エネルギーの変換では、機械エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機、電気エネルギーを機械エネルギーに変換する電動機、電気エネルギーの状態を変える変圧器（電圧変化）、整流器（交流電気を直流電気に変換）に分類できる。また変換時の動態から、発電機・電動機は回転機、変圧器や整流器は静止器との分類ができる。

機器の構成は、主要機能面から、①構造部分、②鉄心等の磁気部分、③巻線等の電気部分、に区分できる。

2 電気機器の定格

電気機器の定格とは、その機器に対して指定された回転速度、電圧、周波数、周囲温度などの条件のもとで、機器が使用できる限度である。通常の機器では、使用限度を出力で表し、これを定格出力という。定格出力の単位は、 $[\text{W}]$ または $[\text{kW}]$ である。この場合、機械的出力がある機器（電動機など）では問題ないが、電氣的出力のある機器のうち交流出力のものでは、負荷によって出力側の力率が変動し、 $[\text{W}]$ または $[\text{kW}]$ 値が定まらず、不都合である。そこで電氣的出力のある変圧器では $[\text{VA}]$ または $[\text{kVA}]$ で表し、交流発電機では $[\text{W}]$ または $[\text{kW}]$ と力率（定格力率）を併記する方法を用いる。

定格は、一般に、①定格出力または定格容量、②定格電圧、③定格電流、④相数または周波数、⑤定格回転数、⑥定格の種類（連続または短時間）、⑦型式等であり、鉄板に表示する。

定格で指定された条件を大きく外れて使用する場合は、特性の変化を来し、不経済な運転になったり、温度上昇が大きく機器寿命を減じたり、焼損をきたす等影響が大きいので、特性変化を認識して使用する必要がある。

電気機器の出力を制限するものにはいろいろあるが、通常の機器では、巻線その他の導電部に施された絶縁体の許容温度が主要なものである。使用上の許容最高温度は絶縁物の劣化に関係する。すなわち、この許容温度を超過すると著しく劣化が進み、すぐ焼損には至らずとも寿命を短くする。一般に、 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ 超過するごとに絶縁物寿命は $1/2$ になる。機器温度上昇の基準とする媒体温度は、空気では 40°C 、水では 25°C である。

回転機（電車用主電動機を除く）および静止誘導機器の温度上昇限度を、各々表 4.2、表 4.3 に示す。

表 4.2 回転機（電管用主電動機を除く）の温度上昇限度（℃）

項	回転機の部分	A 種 絶 縁	E 種 絶 縁	B 種 絶 縁	F 種 絶 縁	H 種 絶 縁
		温 抵 埋	温 抵 埋	温 抵 埋	温 抵 埋	温 抵 埋
1	交流機固定子巻線	50* 60 6	65* 75 75	70* 80 80	85* 100 100	105* 125 125
2 A	整流子をもつ電機子巻線	50* — —	65* — —	70* — —	85* — —	105* — —
2 B	絶縁された回転子巻線	50* 60 —	65* 75 —	70* 80 —	85* 100 —	105* 125 —
3 A	多層界磁巻線	50* 60 —	65* 75 —	70* 80 —	85* 100 —	105* 125 —
3 B	低抵抗界磁巻線及び補償巻線	60 60 —	75 75 —	80 80 —	100 100 —	125 125 —
3 C	露出した単層界磁巻線	65 65 —	80 80 —	90 90 —	110 110 —	135 135 —
3 D	塊状円筒形回転子を有する同期機の界磁巻線	— — —	— — —	— 90 —	— 100 —	— 125 —
4	鉄心その他の機械的部分で絶縁した巻線と近接した部分	60 — —	75 — —	80 — —	100 — —	125 — —
5	絶縁されない短絡巻線、鉄心その他の機械的部分で絶縁した巻線と近接した部分、ブラシ及びブラシ保持器	機械に支障なく、かつ付近の絶縁物に損傷を起こさない温度。				
6	整流子及びスリップリング	60 — —	70 — —	80 — —	90 — —	100 — —
7	軸受（自冷式）	表面で測定するとき40〔℃〕、メタルに温度計素子を埋め込んで測定するとき45〔℃〕。ただし水冷式軸受又は耐熱潤滑剤によるときは、注文者、製造業者間でそのたびに協定すること。				

- 〔備考〕
1. 上表中「温」は温度計法、「抵」は抵抗法、「埋」は埋込温度計法による場合を表す。
 2. 全閉形に対しては、*印を付けてある上表の値よりも5〔℃〕高く温度上昇限度を定める。
 3. 水冷式電機、全閉内冷形電機、閉鎖風道循環電機のように、主として水で冷却される電機の場合は、上表の値に10〔℃〕を加える。
 4. 定格出力500〔kW〕又は500〔kVA〕以下の回転機の定格電圧が、5000〔V〕を超す巻線の温度計法による温度上昇限度は、5000〔V〕を超えること1000〔V〕又はその端数を増すごとに、上表の値から1.5〔℃〕が減じられる。

表 4.3 静止誘導機器の温度上昇限度（℃）

項	機 器 の 部 分	温度測定法	A 種 絶 縁	B 種 絶 縁
1	乾式自冷式巻線	温度計法 抵抗法	50 55	70 75
2	乾式風冷式巻線	抵抗法	55	75
3	油入自冷式巻線 油入風冷式巻線 油入水冷式巻線	抵抗法	55	—
4	送油自冷式巻線 送油水冷式巻線 送油風冷式巻線	抵抗法	60	—
5	油	温度計法	50	
6	鉄心その他の金属部分で絶縁物に近接した部分	温度計法	近接絶縁物に許された温度	
7	6に含まれない金属部分		いかなる点でも損傷を起こさない温度	

3 電気機器の損失

電気機器の損失の主なものを次に示す。

(1) 機械損

軸受摩擦損，ブラシ摩擦損，風損などで速度が一定ならば電流に無関係にほぼ一定である。

(2) 鉄 損

磁器回路を構成する鉄心内で磁化の方向が交互に変わるために鉄心部に生ずる損失で，ヒステリシス損と過電流損とから成る。商用周波数では，残留磁気によるエネルギー損失であるヒステリシス損が鉄損の大部分を占める。

(3) 銅 損

銅損は抵抗損とも呼ばれ，負荷電流および励磁電流による抵抗損（ $[\text{電流}]^2 \times [\text{抵抗}]$ ）であって電機子巻線，界磁巻線，界磁調整器などから生ずる。

(4) 漂遊負荷損

上記の損失以外に，例えば漏れ磁束により構造材料内部（ケース，クランプ，締付けボルト等）に発生する損失や，導体断面の電流不均等による銅損など，測定や計算によって求められない損失がある。これらをまとめて漂遊負荷損といい，負荷に比例して増減する。

(5) 無負荷損と負荷損

以上の損失のうち，機械損，鉄損など負荷に無関係にほぼ一定のものを一括して無負荷損と呼び，銅損，漂遊負荷損のように負荷によって変化するものを負荷損と呼ぶ。

4 電気機器の効率と電圧変動率

(1) 効 率

電気機器の効率は次の式で表される。一般に kW 入力および kW 出力の百分率で表す。

$$\text{効率} = \frac{\text{出力}}{\text{入力}} \times 100 = \frac{\text{出力}}{\text{出力} + \text{損失}} \times 100 = \frac{\text{入力} - \text{損失}}{\text{入 力}} \times 100 \quad [\%] \quad \cdots \cdots (4.45)$$

実負荷にて入出力を実測して得た効率を実効効率といい，無負荷で測定した過失から約定された方法で算定して得た効率を規約効率という。

(2) 電圧変動率

発電機の電圧変動率は，定電圧特性を有する発電機で使用する。すなわち，定格状態（交流では指定の力率）における励磁回路をそのままとし，かつ回転速度を一定に保って，全負荷から無負荷としたときの二次端子電圧の変動率で，次式で表される。

$$\text{電圧変動率} = \frac{V_o - V_n}{V_n} \times 100 [\%] \quad \cdots \cdots (4.46)$$

ただし V_o : 無負荷電圧

V_n : 定格電圧

5 電気機器の接地

電路に施設する電気機器の鉄台および金属製外箱（外箱のない変圧器、変成器は鉄心）の接地は、電気設備技術基準第29条によって規定されている。充電部（電線等）の絶縁不良で鉄心外箱へ漏えい通電されると外箱等に電圧が現れ、また、充電部からの直接の接触がなくても外箱と大地間には電圧が生ずる。これに対応し、外箱等への人の接触による感電の危害を防ぐため、接地により電圧を安全内に抑制する。

表 4.4 機器の電圧区分と接地工事

機器区分	接地工事	接地抵抗値
300V以下の低圧用機器	D種 接地工事	100Ω以下
300V以上の低圧用機器	C種 接地工事	10Ω以下
高圧用または特別高圧用機器	A種 接地工事	10Ω以下

機器の電圧区分と接地工事の種別を、表 4.4 に示す（詳細：電気設備技術基準）。

第2節 誘導電動機

1 誘導電動機概要

(1) 構造

誘導電動機は、交流電源でほぼ定速度特性が得られ、構造が簡単で取扱いも容易であることから、汎用電動機として最も一般に普及している。外部から供給した交流によ回転磁界を作る固定子と、回転磁界との相互作用によりトルクを生ずる回転子から成る。

固定子は薄い硅素鋼板を積み重ねた円筒形の鉄心の内側に溝があり、この中に絶縁された巻線を取めて交流電源につなぐ。回転子は同様にドラム形の鉄心の外側に溝があり、この中に回転子巻線を取めたもので、この巻線の種類により、かご形回転子と巻線形回転子の2種がある。かご形は比較的小容量のものに、巻線形は中容量以上のものに用いる。

外被の型により開放型、閉鎖型、全閉型等冷却通風の分類もあり、保護方式により防滴型、水中型、防爆型等の分類がある。

(2) 原理 —アラゴ円板

磁性を持たない銅やアルミニウムの円盤が、磁石につられて回転する現象を発見者Aragoの名を取り、アラゴの円板という（図4.22参照）。誘導電動機の説明にはアラゴの円板が最も分かりやすい。

永久磁石でこの円板を挟み、図のように動かすと、円板は磁石の回転方向に回る。これは、磁石の磁束が下から上に向かって円板を切っており、この磁束が動くため、円板にはフレミング右手の法則により電流が流れる。電流が円板に流れると、磁束と円板との間にフレミング左手の法則により円板が回転を始める。従って誘導電動機には回転する磁束と、この磁

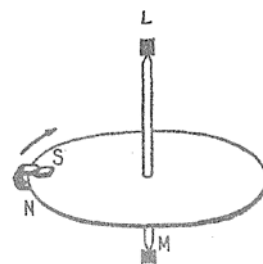


図 4.22 アラゴの円板

束の中で回転できる導体が必要である。この回転する磁束を作る巻線を、通常固定子巻線と呼び、交流電圧を印加すると回転磁界ができる。また回転磁界により回転を始める導体を、回転子と呼ぶ。

三相交流を流した場合の、波形および回転磁界を、各々図4.23、図4.24に示す。この場合、ABC各相に図4.25のABC三相交流が流れるものとする。

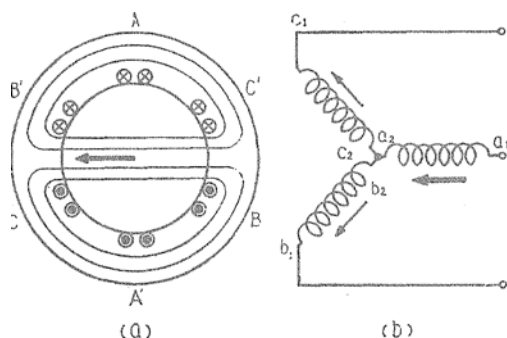


図 4.23 三相交流の波形と回転磁界
(図 4.25 ①の瞬時)

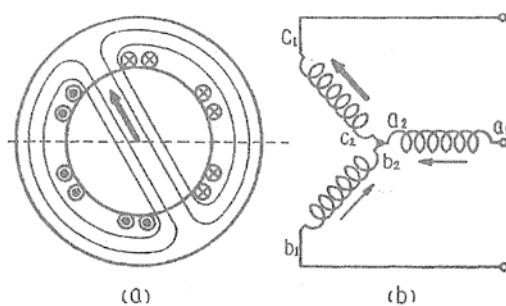


図 4.24 三相交流の波形と回転磁界
(図 4.25 ②の瞬時)

三相交流を流した場合にできる磁束のようすを、図4.25(a)に示す。図4.25中の①の瞬時を、図4.23(a)に示し、②の瞬時を、図4.24(a)に示したものとする。

図4.23(a)と図4.24(a)とでは、磁束の中心すなわち磁極が 60° 回転している。このように図4.25の①から⑥までの磁束の変化をみると1サイクルに磁界が1回転することが分かる。

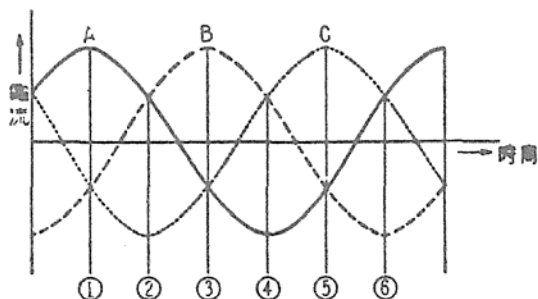


図 4.25 三相交流の波形と瞬時値

(3) 三相誘導電動機の特性

1) 滑り

回転子が回転するためには回転子の導体が磁束を切らねばならない。従って回転子の速度 N は、回転磁界の速度 N_s より幾分遅れることが必要である。この速度の差の同期速度に対する比を滑り S という。滑りは電動機の容量、極数により幾分異なるが、普通3~6%の範囲内にある。

極数が P 、交流の周波数が f [Hz] ならば、回転磁界の回転速度 N_s は次式で与えられる。

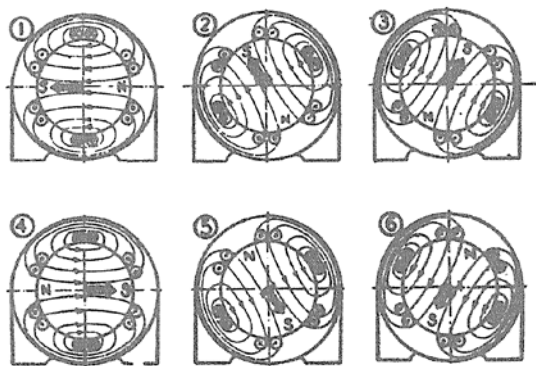


図 4.26 三相交流による回転磁界

これを同期速度という。

$$N_s = \frac{120 \times f}{P} \text{ [r p m]} \quad \cdots (4.47)$$

滑り S は、次の式で表される。

$$S = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100 \text{ [%]} \quad \cdots (4.48)$$

回転子の速度 N は、次式で表される。

$$N = N_s (1 - S) = \frac{120 \times f}{P} (1 - S) \text{ [r p m]} \quad \cdots (4.49)$$

2) 速度特性

三相誘導電動機の一次電流、トルク、出力、力率、効率は、何れも滑りの関数として表される。いま一次電圧を一定に保ち、滑りまたは速度によってそれらの値が如何に変化するかを示したものを速度特性曲線と呼び、誘導機を知る上で極めて重要な曲線である(図4.27参照)。

3) トルク特性

巻線形電動機の二次抵抗を変化しても、最大トルクには変化がない(図4.28参照)。二次抵抗を増やしていくと、図中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲと順次トルク曲線が変化する。この変化は二次抵抗に比例し、同一のトルクが異なる滑りの箇所に移動する。これを比例推移という。

4) 全負荷電流

全負荷電流は、次の式より求められる。

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} E \cdot \cos \theta \cdot \eta} \quad \cdots (4.50)$$

ただし、 I : 全負荷電流 [A]

P : 定格出力 [W]

E : 定格電圧 [V]

$\cos \theta$: 定格出力時の力率

η : 定格出力時の効率

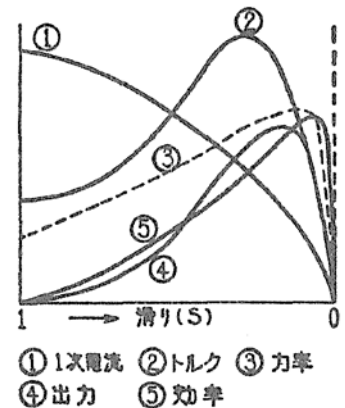


図 4.27 速度特性曲線

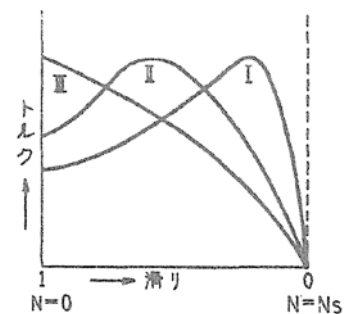


図 4.28 トルク特性曲線

2 三相誘導電動機の起動

(1) かご形電動機の起動

1) 直入起動法

電動機を初めから全電圧で起動する方法で、起動装置としては簡単である。しかし、大きな起動電流(全負荷電流の4~6倍)が流入するので、この大きさと継続時間によっては電動機の温度を異常に

上昇させる。線路が十分太くないと、電圧降下が大きく、電磁開閉器の投入ができず、また起動トルク不足で起動不能になる。一般に、小容量で特に大きな起動トルクを必要としない場合に使う。

2) スター、デルタ起動法

固定子の各巻線をYに接続し定格電圧の $1/\sqrt{3}$ の電圧を加えて起動し、定速近くまで上昇した後に Δ に切り換えて定格電圧を供給する。この方法によれば、起動の際各相の巻線に加わる電圧は運転状態の $1/\sqrt{3}$ となるから、各相巻線の起動電流は Δ で始動する場合の $1/\sqrt{3}$ になり、電源から流れる線電流は Δ 起動の場合の $1/\sqrt{3} \times 1/\sqrt{3} = 1/3$ となる。しかし、トルクも $1/3$ に減少する（トルクは電圧の2乗に比例する）。この方式は、軽い負荷で起動する場合に用いる。

3) 起動補償器法

起動補償器と呼ばれる三相単巻変圧器を用いる。起動の際には、切換えスイッチにより低い電圧から次第に高い電圧を電動機に供給し、最終速度は近づいたとき、ハンドルを運転側に操作して定格電圧を与えると同時に起動補償器を回路より切り離す。

4) リアクトル起動法

起動補償器の代わりに、一次的にリアクトル(静止誘導機器)を直列に挿入する方法で起動し、速度が高まるに従い電流が減じ、リアクトル内の電圧降下が減るのでタップの必要はない。起動補償器と比較して、同じ起動電流に対する起動トルクが著しく低下することが欠点である。ただし、リアクトルは、安価で取扱いが簡単である。特に自動起動が容易で、また起動に際しての衝動が少ない。

(2) 巻線形誘導電動機の起動

巻線形誘導電動機は、各相の巻線がスリップリングに接続され、スリップリングを経て各相巻線と直列に外部抵抗を入れることができる。このため、抵抗によって電流を制限し、大きなトルクで起動し、速度の上昇とともに各部抵抗を逐次減少して、最後にスリップリングの所で短絡しブラシをあげる装置を設けている。重負荷起動に用いる。

(3) 特殊かご形電動機の起動

かご形回転子の誘導電動機は、構造が簡単かつ堅固で運転特性もよいが、起動電流が大きいにもかかわらず、起動トルクが貧弱である。巻線形回転子は、起動特性はよいが構造が複雑で運転特性も劣る。ここでは、かご型の構造で始動特性を巻線形に接近させる特殊のかご形電動機について述べる。

1) 二重かご形電動機

回転子鉄心の溝内に上下2段に回転子導体A Bを納め、外側の導体Aに抵抗大でリアクタンスが小に、内側導体Bは抵抗小でリアクタンスが大になるよう製作されている(図4.29(左)参照)。それぞれの両端を短絡環に接続してかご形の回転子を構成する。起動始めは、二次電圧の周波数が高いので、Bのリアクタンスがきいて、ほとんどAに電流が流れ、

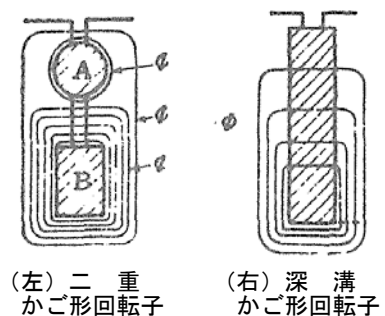


図 4.29 特殊かご形回転子

二次抵抗の高い誘導電動機として動作する。

電動機が加速すると、しだいに周波数が減少して、Bのリアクタンスが減少しAの抵抗より小さくなり、多くの電流がBを流れる。すなわち起動時には電流は抵抗の大きい外側導体に、運転時には抵抗の小さい内側導体に多く流れ、あたかも抵抗挿入の場合と同じ結果になる。

2) 深溝かご形電動機

回転の溝を著しく深くした、単一かご形回転子を持つ電動機である(図4.29(右)参照)。この構造にすると、自己インダクタンスは内部が大きく表面は小さく、高周波数時の電流密度は表面が高く内部は著しく減少し、その結果あたかも断面積が減少した働きをし、みかけの抵抗が増えてトルクが増す。起動完了後は周波数が減少し、電流分布は平均化され実効抵抗が減少して特性が良好となる。

3 誘導電動機の世界制御と運転

(1) 誘導電動機の世界制御

1) 二次回路の抵抗を加減する法

巻線形誘導電動機のみを使用される方法で、二次回路の抵抗の変化によるトルク速度特性の比例推移を応用したものである。この目的に用いる抵抗器を速度調整器と呼ぶ。この方法は、二次抵抗損が著しく大きく、効率が低くなる欠点がある。

2) 電源の周波数を変える方法

同期速度は(4.47)式により、

$Ns = 120 \times f / p$ で表され、電源周波数 f を変

えると連続的に円滑に速度制御を行える。しかしこの方法は可変周波数の電源(サイリスタによるインバータを電源とするものなど)を必要とし、設備費が大きくなる。近年、比較的安価なものが製造されており、多用されるようになった。

3) 極数を変える方法

誘導電動機の回転数は極数に反比例するので、極数を変えることにより回転数を変えることができる。この場合は、速度の変化は不連続である。また電動機の極数変換装置も複雑になるので、実用されているのは2~3段切換である。主として、かご形電動機に用いられている。

4) 継手を用いる方法

誘導電動機と負荷の間に継ぎ手を設け、誘導電動機は一定速度で回転しておき、継ぎ手を調整することにより負荷の速度を変える。継ぎ手には、電磁継手(うず電流継手)がよい。この方法は、継ぎ手内に損失が多く、冷却に工夫を要するため効率は良くないが、簡単である。一般には定速度特性が要求されるので、磁気増幅器やサイリスタにより自動速度制御装置を付属し、一体化したものと

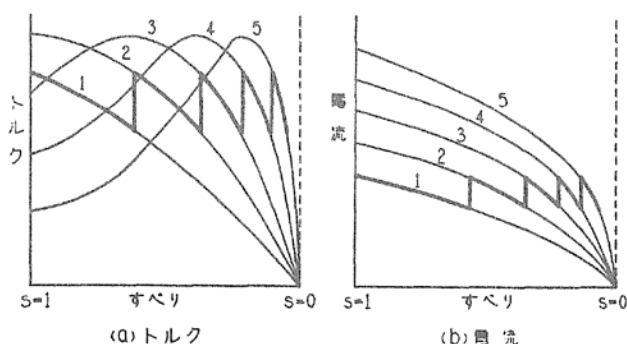


図 4.30 速度調整器使用時の
起動中のトルクおよび電流の変化

使用されている。

(2) 誘導電動機の運転

1) 三相誘導電動機の逆回転

3線のうち2線の接続を交換すれば、回転方向が逆になる。

2) 周波数の低下

周波数が低下すると、電動機の手数が減少するから、一般に負荷も減少する。

3) 電圧降下

トルクは電圧の2乗に比例するから、起動トルクは著しく減少する。特に、かご形電動機では起動しないことがある。一定のトルクを出すための電流が過大となり電動機は過熱する。また、滑りも多くなり、速度は低下するとともに二次銅損を増し、出力も効率も低下する。

4) 電圧の不平衡

電源電圧が不平衡になれば、逆相電圧が現れ、誘導電動機は逆回転磁界を生じ、逆トルクのため電動機の機能は低下し、電流は増加し、過熱の原因となる。

4 単相誘導電動機

単相誘導電動機は、二次巻線がかご形であるが、一次巻線は単相巻線であるため起動トルクは発生せず、このままでは起動することができない。そこで、次のような種々起動方式が工夫されている。

- ① (抵抗) 分相起動形
- ② コンデンサ起動形
- ③ くまとりコイル起動形
- ④ モノサイクリック起動形
- ⑤ 反発起動形
- ⑥ 反発誘導起動形