

第3章 機器の選定

3.1 電動機

3.1.1 電動機の種類と構造

(1) 電動機の種類

電動機は電気の力（電気エネルギー）を受け取り、電動機軸に回転力（機械エネルギー）を発生し、ポンプ等の負荷設備に動力を伝達するもので電気－機械エネルギーの変換装置といえる。

電動機は、エネルギー変換の原理や構造により図 3.1-1 のように分類することができる。

これらの電動機の中で用排水ポンプ場、ダム、頭首工他においては大型ポンプ用として誘導電動機が最も多く用いられている。なお、同期電動機は古くは大型ポンプ等に適用されていたが、現在では誘導電動機の性能向上等により、ほとんど適用されてはいない。

誘導電動機の種類は、交流電源の相数により単相、三相誘導電動機に分類できるが、一般に工業用等には三相誘導電動機（以下電動機と言う）が多く用いられ、単相誘導電動機は家庭用電気製品を中心に多く用いられるほか、小形電動バルブ、コンプレッサ等の駆動に用いられている。

なお、電動機は回転速度をほぼ一定で、使用することが多いが、用排水機の最適運転の見地から電動機の手速度制御運転が必要な場合もある。一方、近年の半導体応用技術の進歩により速度制御装置の技術的發展は目覚ましく、誘導電動機との組合せにより容易にポンプ等の速度制御ができるようになった。

本項では主として誘導電動機とその速度制御方法について述べる。

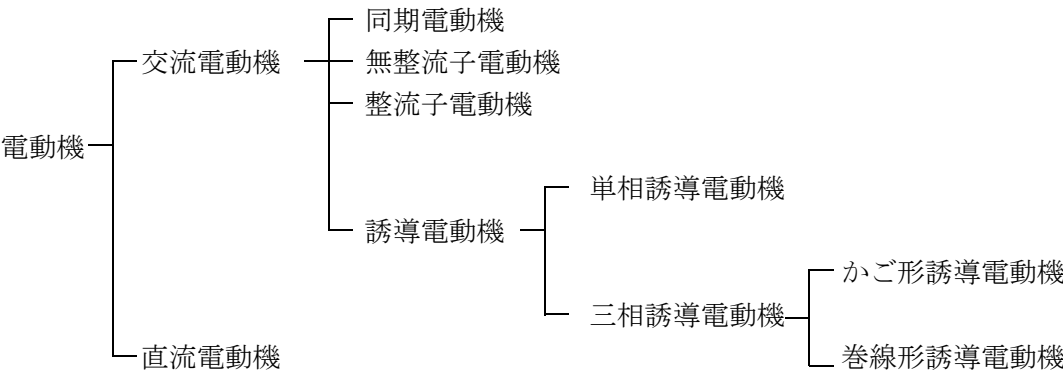


図 3.1-1 電動機の分類

(2) 誘導電動機の形式

誘導電動機は、軸方向(横軸形、立軸形)、保護方式、冷却方式などの組み合わせにより各種の形式があり、それぞれに呼称を設けている。

(a) 軸方向及び取付

- ① 横軸形 一般に横方向片軸、足付下方取付。(注)
- ② 立軸形 一般に下方向片軸、フランジによる下方向取付。

(注)：制水弁用等横方向片軸、フランジによる横方向取付や油圧ポンプ用に横方向両軸などもある。

(b) 保護方式

回転機の外被による保護方式は人体及び固形異物と水の侵入に関する保護形式の組合わせによって分類する。これら保護形式を表 3.1-1 及び表 3.1-2 に示す。

表 3.1-1 人体及び固形異物に関する保護形式 (JEC 2110 抜粋)

第1数字 記号	保護の程度	
	概 要	定 義
0	保護を施していない誘導機	特別の保護を施していない構造
1 ⁽¹⁾	50 mm超過の固形異物に対して保護を施した誘導機	手の甲のような人体の大きな表面が、外被内部の通電部分や回転部分に偶然に、又は不注意に接触したりしない構造(ただし故意の接近に対しては無保護) 直径50 mm超過の固形異物が侵入しない構造
2 ⁽¹⁾	12 mm超過の固形異物に対して保護を施した誘導機	80 mm長さを超えない指又は類似物が、外被内部の通電部分や回転部分に接触したり接近したりしない構造 直径12 mm超過の固形異物が侵入しない構造
3 ⁽¹⁾	2.5 mm超過の固形異物に対して保護を施した誘導機	直径2.5 mmを超える道具やワイヤが、外被内部の通電部分や回転部分に接触したり接近したりしない構造 直径2.5 mm超過の固形異物が侵入しない構造
4 ⁽¹⁾	1 mm超過の固形異物に対して保護を施した誘導機	直径1 mm超過のワイヤ又は小薄片が、外被内部の通電部分や回転部分に接触したり接近したりしない構造 直径1 mm超過の固形異物が侵入しない構造
5 ⁽²⁾	じんあい(塵埃)に対して保護を施した誘導機	外部からの物体が、外被内部の通電部分や回転部分に接触したり接近したりしない構造 じんあいの侵入を極力阻止し、たとえ侵入しても正常な運転に支障がない構造
6 ⁽²⁾	じんあい(塵埃)に対して高度な保護を施した誘導機	じんあいの侵入を阻止した構造

注(1) 固形異物の大きさは、互いに直角の三方向において定義欄にある数値を超えるもの。

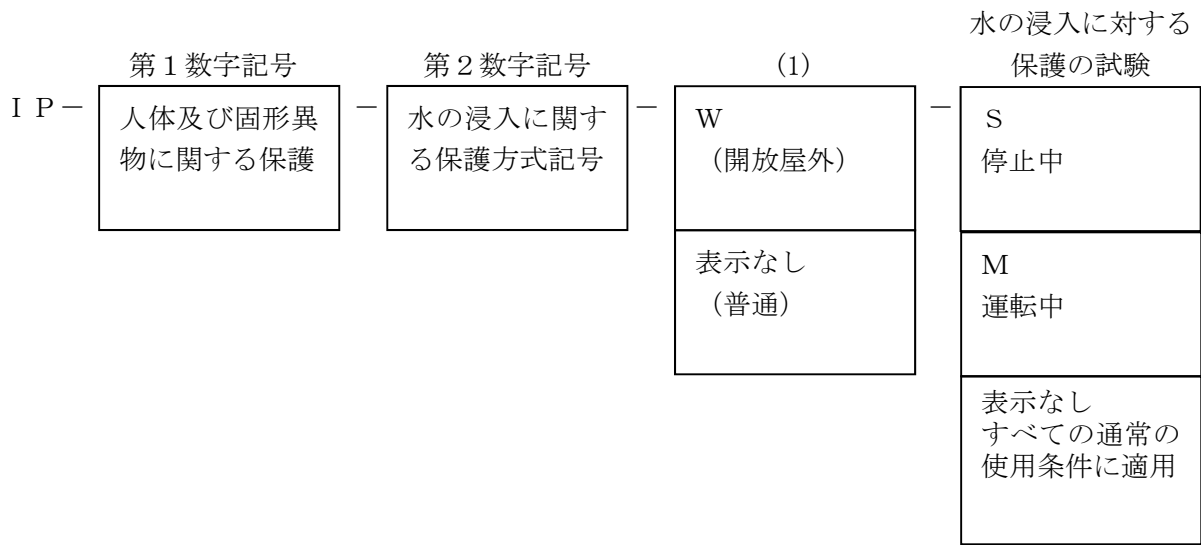
(2) じんあいの材質、大きさなどがわかっている場合、試験条件は製造者と注文者間の協議によって定める。

表 3.1-2 水の侵入に関する保護形式（JEC 2110 抜粋）

第2数字 記号	保護の程度	
	概 要	定 義
0	保護を施していない誘導機	水の浸入に対して特別の保護を施していない構造
1	落下する水滴に対して保護を施した誘導機	鉛直方向に落下する水滴によって有害な影響を受けない構造
2	鉛直から15°以内に落下する水滴に対して保護を施した誘導機	通常の設置位置から15°までに機械を自由に傾けた場合に、鉛直方向に落下する水滴によって有害な影響を受けない構造
3	散水に対して保護を施した誘導機	鉛直から60°以内の角度で落下する散水状態の水によって有害な影響を受けない構造
4	飛まつに対して保護を施した誘導機	いかなる方向からの飛まつによっても有害な影響を受けない構造
5	噴水流に対して保護を施した誘導機	いかなる方向からのノズルによる噴流によっても有害な影響を受けない構造
6	波浪に対して保護を施した誘導機	波浪又は強力なジェット噴流によっても有害な影響を与えるだけの水が機内に浸入しない構造
7	浸水に対して保護を施した誘導機	規定の水圧、時間で水中に浸したとき、有害な影響を与えるだけの水が機内に浸入しない構造
8	水中の使用に対して保護を施した誘導機	製造者が規定した条件下の水中で、連続的に運転できる構造 ⁽¹⁾

注(1) 通常これは誘導機が密閉していることを意味するが、運転に支障のない程度の水の浸入を認める場合もある。

電動機の保護方式の表わし方



注(1) 屋外形回転機の記号Wは、開放通路冷却式の回転機（保護の程度が IC0X～IC3X のもの）についてのみ使用し、全体カバー、モールド絶縁など、その他屋外対策については、記号Wによる指定は行わない。

表 3.1-3 によく使用する保護方式を示す。

表 3.1-3 よく使用する保護方式（JEC2110 抜粋）

第1数字記号	第2数字記号					
	0	1	2	3	4	5
1			IP12			
2		IP21	IP22	IP23	IP24W	
4					IP44	
5					IP54	IP55
注記 従来から用いられている慣用語の主な例を以下に示す。 開放形：IP2X 全閉形：IP4X 防滴形：IPX2 防まつ形：IPX4						

(c) 冷却方式

電動機を運転すると、その内部に損失を発生するがそのほとんどが熱になる。
以下に発生する熱量の計算式と計算例を示す。

$$W = \frac{P \times (1 - \eta)}{\eta} \times \frac{860}{2.39 \times 10^{-4}}$$

W：電動機の発生熱量〔J/h〕

P：電動機出力〔kW〕

η：電動機効率

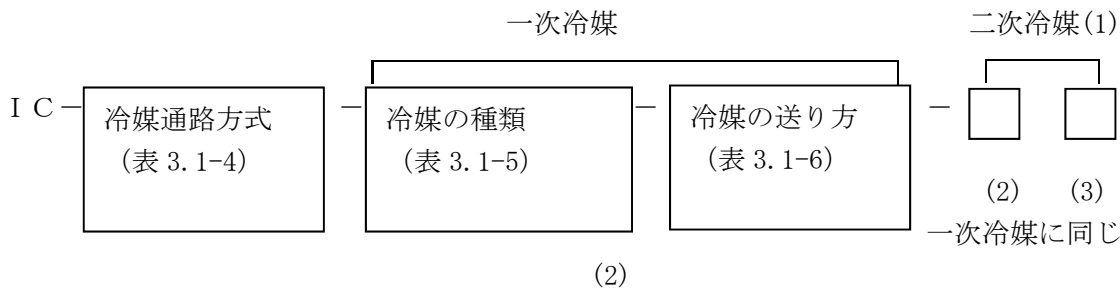
例) 400V、150kW かご形誘導電動機 (効率=93.0%) の場合

$$W = \frac{150 \times (1 - 0.93)}{0.93} \times \frac{860}{2.39 \times 10^{-4}} = 4.06 \times 10^7 \text{ [J/h]}$$

この熱を外部に放散するために何らかの冷却を行う必要がある。
その冷却方式を次の組合せで分類する。

- ① 冷媒の通路及び熱拡散の種類による方式
- ② 冷媒の種類による方式
- ③ 冷媒の送り方による方式

電動機の冷却方式の表わし方



注(1) 二次冷媒がない場合は省略する。

(2) 文字記号がAの場合は、簡易記号では省略する。

(3) 二次冷媒として水(W)を使用し、数字記号が7の場合は簡易記号では省略する。

(例) 完全記号

簡易記号

I C 8 A 1 W 7 冷媒通路方式 8 : 取付け熱交換器形 I C 8 1 W

(遠方媒体を利用)

一次冷媒の種類 A : 空気 (省略)

〃 送り方 1 : 自力通流

二次冷媒の種類 W : 水

〃 送り方 7 : 他力通流 (別置き装置による通流) (省略)

表 3.1-4 冷媒通路方式 (JIS C 4034-6 参考)

数字記号	名 称	定 義
0 ^{a)}	自由通流	冷媒は直接、周囲媒体から外被にある開口部を通じて自由に取り入れ、誘導機を冷却してから、自由に直接周囲媒体に戻す。(開放通路)
1 ^{a)}	入口管又は入口ダクト通流	冷媒は誘導機から離れたところにある媒体から取り入れ、入口管又は入口ダクトを経て誘導機へ導き、誘導機を通過して直接周囲媒体へ戻す。(開放通路)
2 ^{a)}	出口管又は出口ダクト通流	冷媒は直接周囲媒体から取り入れ、誘導機を通過してから、出口管又は出口ダクトを経て、誘導機から離れたところにある媒体へ放出する。(開放通路)
3 ^{a)}	両側管又は両側ダクト通流	冷媒は誘導機から離れたところにある媒体から取り入れ、入口管又は入口ダクトを経て誘導機へ導き、誘導機を通過してから出口管又は出口ダクトを経て、誘導機から離れたところにある媒体へ放出する。(開放通路)
4	外被表面冷却形	一次冷媒は誘導機中の閉じた通路を循環し固定子鉄心や、他の熱を伝える部分を介した熱の伝達に加えて、外被表面を通じて、周囲媒体である最終冷媒にその熱を伝える。
5 ^{b)}	作り付け熱交換器形 (周囲媒体を利用)	一次冷媒は閉じた通路内を循環し、誘導機に作り付けた熱交換器を介して、周囲媒体である最終媒体にその熱を伝える。
6 ^{b)}	取付け熱交換器形 (周囲媒体を利用)	一次冷媒は閉じた通路内を循環し、誘導機に直接取付けた熱交換器を介して、周囲媒体である最終冷媒にその熱を伝える。
7 ^{b)}	作り付け熱交換器形 (遠方媒体を利用)	一次冷媒は閉じた通路内を循環し、誘導機に作り付けた熱交換器を介して、遠方媒体である二次冷媒にその熱を伝える。
8 ^{b)}	取付け熱交換器形 (遠方媒体を利用)	一次冷媒は閉じた通路内を循環し、誘導機に直接取付けた熱交換器を介して、遠方媒体である二次冷媒にその熱を伝える。
9 ^{b)} c)	別置き熱交換器形 (周囲媒体又は遠方媒体を利用)	一次冷媒は閉じた通路内を循環し、誘導機とは別置きした熱交換器を介して、周囲媒体又は遠方媒体である二次冷媒にその熱を伝える。
注記 冷媒が空気の場合、通流を通風としてもよい。 注 a) フィルタやラビリンスを除じんや消音のために外被やダクトに設けることがある。数字記号の0から3は、周囲媒体より低い温度の媒体を取り入れるために熱交換器を通じて、周囲媒体から冷媒を取り入れる誘導機、又は周囲媒体の温度をより低く保つために熱交換器を通じて冷媒を排出する誘導機にも適用する。 注 b) 熱交換器の種類については規定しない(平滑又はリブ付管、その他) 注 c) 別置き熱交換器は、誘導機のそばに置く場合と、誘導機から離れた位置に置く場合がある。気体の二次冷媒は、周囲媒体の場合と、遠方媒体の場合がある。		

表 3.1-5 冷媒の種類

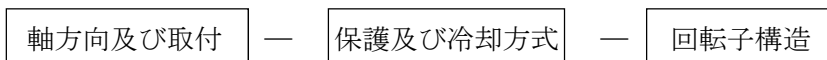
文字記号	冷 媒
A ^{a)}	空 気
F	フロン
H	水 素
N	窒 素
C	二酸化炭素
W	水
U	油
S ^{b)}	その他の冷媒
Y ^{c)}	未規定の冷媒
注 a) 簡略記号を用いる場合、冷媒を表す文字記号Aは省略する。 注 b) 文字記号Sに対しては、冷媒について何らかの形（例えば、技術資料又は仕様書）で規定するものとする。 例：IC3S7, Sは仕様書で規定 注 c) 冷媒を最終的に選定したときには、一時的に用いた文字記号Yは最終の文字記号に置き換えるものとする。	

表 3.1-6 冷媒の送り方

数字記号	名 称	定 義
0	自由対流	冷媒の流れは温度差による。 回転子のファン作用は無視できる。
1	自力通流	冷媒は回転子自身のファン作用によるか、若しくはこの目的のために軸に直接取付けられた部品、又は主機の回転子によって機械的に駆動されるファン若しくはポンプのいずれかによって主機の回転速度に応じて通流する。
2, 3, 4		予備番号
5 ^{a)}	他力通流 (作り付け装置による通流)	冷媒は、主機から独立して駆動される作り付け装置によって流れ、その動力は主機の回転速度とは無関係である。例えば、主機とは別な電動機によって駆動する内部ファン又はポンプによる通流。
6 ^{a)}	他力通流 (取付け装置による通流)	冷媒は、主機に取付けた装置によって流れ、その動力は主機の回転速度とは無関係である。例えば、主機とは別な電動機によって駆動する主機取付けファン又はポンプによる通流。
7 ^{a)}	他力通流 (別置き装置による通流)	冷媒の流れは、別置きした電氣的若しくは機械的装置によるか、又は、冷媒循環システムの圧力による。例えば、給水システム又はガス圧力による通流。
8 ^{a)}	相対通流	冷媒の流れは、冷媒と誘導機との相対的運動による。冷媒内を誘導機が運動するか又は周囲冷媒（空気又は液体）が流れるかのいずれかによる。
9 ^{a)}	その他の形式	冷媒の送り方を上記以外の方法で行う。 冷媒の送り方を詳細に記述しなければならない。
注記 冷媒が空気の場合、通流を通風としてもよい。 注 a) 冷媒通流源としての独立した装置を使用しても、回転子のファン作用、又は主機の回転子に直接取付けられたファンはあってもよい。		

(d) 電動機の全体としての形式表現

以上(a)～(c)をまとめ電動機の形式表現は次の様に行う。



ただし、横軸形、空冷形、自力形は一般に多く用いるのでまぎらわしくないかぎり、その表現を省略することができる。次にその例を示す。

例1 横軸形、保護防滴2、空冷、自由通流、自力形、かご形は保護防滴自由通流形かご形とする。
(形式表現：IP22 IC0)

例2 横軸形、全閉防まつ、取付け熱交換器形（水冷）、自力形、かご形は全閉防まつ水冷熱交換器形かご形とする。(形式表現：IP44 IC8)

例3 立軸形、保護防滴2、空冷、自由通流、自力形、巻線形は立軸保護防滴自由通流形巻線形とする。
(形式表現：IP22 IC0)

(注) 電動機の全体としての形式表現は製造者により多少異なることがある。

(3) 誘導電動機の構造

(a) 外 観

従来、ポンプ等には、保護防滴自由通流形かご形又は巻線形や、立軸形保護防滴自由通流形かご形又は巻線形が多く用いられていたが、全閉外扇自力通流形かご形が主流となっている。これらの電動機の外観を図 3.1-2～3 に示す。



図 3.1-2 立軸保護防滴自由通流形巻線形電動機の外観例
(形式表現：IP22 IC0)

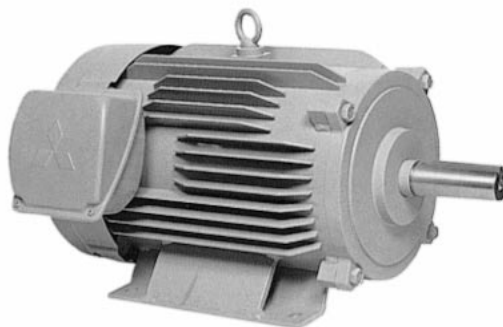


図 3.1-3 全閉外扇防まつ自力通流形かご形電動機の外観例
(形式表現：IP44 IC41)

(b) 構造

① 主要構成

三相誘導電動機の基本的構造は三相交流電流から回転磁界をつくる固定子と、この磁界によって回転し、負荷設備を回転する回転子に大別できる。更にこれらを電動機として十分機能を発揮し、各種用途にマッチした前述の形式構造を構成するものが必要となる。

ア. かご形誘導電動機

図 3.1-4 に示すかご状回転子導体を持ち、構造が簡単、堅牢、取扱い容易、安価のため小容量から大容量まで広く用いられる。この構造を図 3.1-5 に示す。

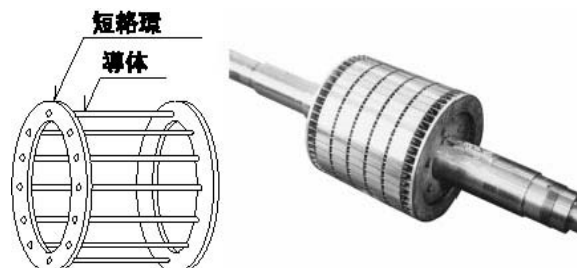


図 3.1-4 かご状回転子の外観例

イ. 巻線形誘導電動機

回転子導体として回転子巻線（2次巻線ともいう）を用いスリップリング、刷子を介して外部の始動用抵抗器又は速度制御装置（3.1.4 項参照）と接続できる構造にした電動機であり次のような場合に用いる。

- ・電源容量を小さくするため、始動電流を抑える必要がある場合
- ・制御用抵抗器又は速度制御装置で速度制御を行う場合
- ・負荷の慣性（ GD^2 ）が大きい、始動頻度が高くかご形では対応できない場合

この構造を図 3.1-6 に示す。

なお、始動が完了した後、2次巻線を短絡して利用する場合、2次短絡装置と刷子引上装置（手動又は電動）を有する刷子引上装置付と、速度制御するため常時スリップリングと刷子が接触して運転する刷子引上装置なしの2種類がある。

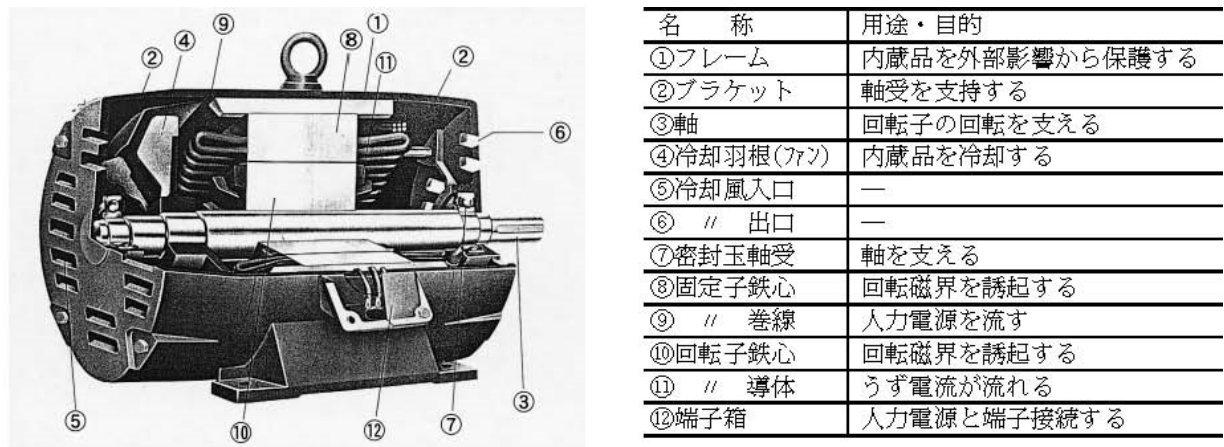


図 3.1-5 防滴かご形誘導電動機の構造例

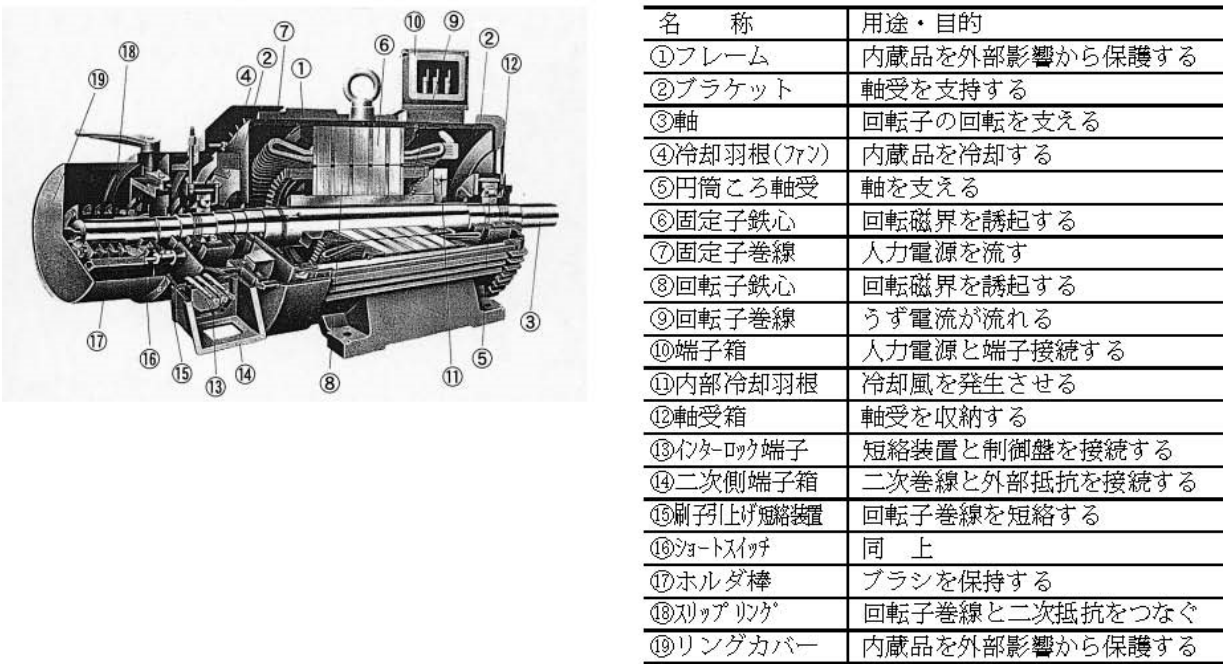


図 3.1-6 防滴巻線形誘導電動機の構造例

② 軸形式

以下、電動機の構造で重要でしかも留意を要する軸受回りについて詳しく述べる。

a. 横軸形軸受

横軸形軸受の種類とその潤滑方式を表 3. 1-7 に示す。

電動機は保守が容易で信頼性の高い事が望まれその軸受には大形又は高速機を除いて一般に「ころがり軸受」を使用している。

なお、水冷却式、強制給油方式の場合は、冷却水及び強制給油用潤滑油の設備が必要となる。

表 3. 1-7 横軸形軸受の種類と潤滑方式

軸受の種類		潤滑方式		備考
ころがり軸受	ボールベアリング	グリース潤滑	密封式	小容量汎用に広く用いる。
			交換式	—
		油潤滑	油浴式	—
	ローラーベアリング	グリース潤滑	交換式	—
		油潤滑	油浴式	—
	すべり軸受	オイルリング給油	自冷式	—
			水冷却式	—
		強制給油	—	—

b. 立軸形軸受

立軸形電動機にポンプを連結する場合、電動機の下にポンプが連結されることが多く、スラスト荷重をポンプ側で支持するか、電動機側で支持するかで軸受の種類が異なる。立軸形軸受の種類とその潤滑方式を表 3. 1-8 に示す。

表 3.1-8 立軸形軸受の種類と潤滑方式

軸受の種類			潤滑方式	
スラスト・ガイド軸受	ころがり軸受	ボールベアリング	グリース潤滑	密封式
				交換式
		ローラベアリング	グリース潤滑	交換式
	すべり軸受	ガイドメタル	油潤滑	油浴式 〔※負荷側からのスラスト荷重により上部軸受として使用する〕
		セクターメタル式		

特に立軸ポンプで問題になることであるが、電動機の電源を遮断してそのまま放置すると水が逆流し、電動機は逆転をはじめ逸走を起こす場合がある。

このため大容量機械では逆転しはじめる前に真空破壊弁を開くなどの保護装置を設けているが、万一を考えて電動機の機械的強度を増している。また、システムの逆転が許されない場合には逆転防止装置を設けて、機械的に逆転しないような構造を採用している。

3.1.2 誘導電動機の定格と特性

(1) 定格出力

定格出力は、定格電圧、定格周波数において電動機軸で得られる機械的回転出力で、kW で示す。一般に連続して定められた温度上昇限度を超過せずポンプ等の負荷を運転できる機械的出力である。

トップランナー制度対象の定格出力は JIS C 4213 に、対象外の定格出力については JEM1188(1969) による。

トップランナー制度のモータ（2015 年 4 月以降）の対象範囲は、次のとおりである。

- (a) 出力 0.75～375 kW
- (b) 極数 2、4、6 極
- (c) 電圧 1000V 以下
- (d) 形式 単一速度三相かご形誘導電動機
- (e) 主な除外機種 ゲートモータ等

表 3.1-9 誘導電動機の標準出力 単位 [kW] (JIS C 4213 抜粋、JEM 1188)

定格出力
0.75, 1.1, 1.5, 2.2, 3, 3.7, 4, 5.5, 7.5, 11, 15, 18.5, 22, 30, 37, 45, 55, 75, 90, 110, 132, 150, 160, 185, 200, 220, 250, 280, 300, 315, 355, 375, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1800, 2000

(注) 1100kW 以上は JEM1188 の規格の規定外であるが、一般に上記に示す出力が多く用いられている。

(2) 極 数

2 極、4 極、6 極、8 極……というように 2 の整数倍で表現される。一般に 2、4、6 極が多く用いられる。

(3) 同期速度

同期速度 N_0 とは回転磁界の回転速度を 1 分間の回転数で表わし次式で計算する。

$$N_0 \text{ [min}^{-1}\text{]} = \frac{2 \times 60 \times f}{p} \text{ [回転毎分} = \text{min}^{-1}\text{]} \quad \begin{array}{l} f : \text{電源周波数 [Hz]} \\ p : \text{極数} \end{array}$$

(例) 4 極、電源周波数 50Hz の場合

$$N_0 = \frac{2 \times 60 \times 50}{4} = 1500 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

(4) すべりと回転数

誘導電動機は同期速度よりやや遅い速度で回転する。この遅れの程度をすべりといい次式で表わす。

$$S = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100$$

S : すべり [%]
 N_0 : 同期速度 [min⁻¹]
 N : 実際の回転数 [min⁻¹]

(例) 4極、電源周波数 50 [Hz] の場合、ある負荷を負って $N=1470$ [rpm] で回転しているときのすべりは次式で示される。

$$S = \frac{1500-1470}{1500} \times 100 = 2.0 \text{ [\%]}$$

定格出力つまり全負荷を負って回転しているときのすべりを特に全負荷すべりという。

すべりは式からわかるように電動機停止時は 100 [%]、同期速度で回転すれば 0 [%] である。

一般に無負荷（空回り時）ではほとんどすべりは 0 [%] で、負荷を増加するにしたがって、回転数が低下するのですべりは増加する。

（図 3.1-7 参照）

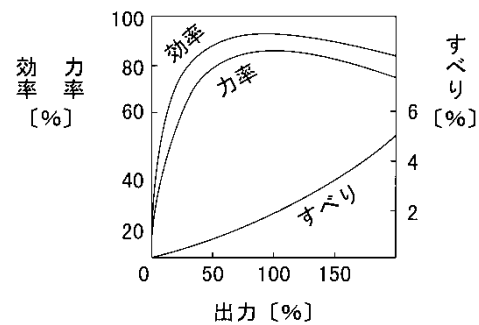


図 3.1-7 出力と効率、力率、すべりの一般的関係

(5) 効 率

電動機は電氣的エネルギーを受け機械的回転エネルギーを出力するエネルギー変換装置である。このエネルギー変換時電動機内部でいくらかの損失（コイルの抵抗損、鉄心の磁気エネルギー損失、回転時の軸受摩擦損、冷却ファンの損失等々）を生じる。この出力の入力に対する比を効率といい次式で表わす。

$$\text{効率 } \eta = \frac{\text{有効出力}}{\text{有効入力}} \times 100 = \frac{\text{有効入力} - \text{損失}}{\text{有効入力}} \times 100 \text{ [\%]}$$

有効出力：機械的回転出力

有効入力：電氣的入力

効率は一般に定格出力付近で最大となるように設計され、また、出力の大きい電動機ほど定格出力時の効率は高い。

図 3.1-7 に出力と効率、力率、すべりの一般的関係を示す。

(6) 力 率

(a) 電動機の出力と力率の関係は図 3.1-7 の一般的関係に示すように無負荷で 5～20 [%] と極めて低く、負荷の増加とともにその力率も上昇し全負荷近くで最大になる。

力率の改善はコンデンサを電動機と並列に入れることにより行われるが、コンデンサの容量の計算は 2.5.2 項で記述するので、ここでは省略する。

なお、改善後の力率を 100 [%] とすることは必要コンデンサ容量が非常に大きくなり不経済で、一般には、90～95 [%] を力率改善の目標とする。また、過大なコンデンサ容量（励磁電流相当分以上）を並列に接続することは避けなければならない。その理由は、コンデンサを電動機と並列のまま電源から切離すと、コンデンサの残留電荷が電動機を励磁し、電動機定格電圧以上の異常電圧を発生するいわゆる自励現象を発生し、絶縁劣化を生ずるおそれがあるからである。

- (b) 各種計算に用いる電動機の効率と力率は、低圧電動機についてはトップランナー制度の対象となる電動機が JIS C 4213、対象外の場合は JIS C 4210、3 [kV] 高圧電動機については JEM1381 による。また、6 [kV] 高圧電動機については図 3.1-9、10 に示す値を用いる。JIS C 4210(2010) 及び JEM 1381(1993)を参考資料 7.5 に示す。

(7) すべりとトルク（回転力）及び電流の関係

図 3.1-8 に誘導電動機のすべり・トルク・電流の関係例を示す。電動機が停止しているときに電圧を加えると、電流 I_s が流れ、トルク T_s が発生する。この I_s が始動電流、 T_s が始動トルクである。

T_s が負荷の必要とするトルクより大きければこの差が加速トルクとなって電動機は回転を始める。 I_s の値は極数、出力などによって異なるが普通かご形電動機では全負荷電流の 500～900 [%] である。（巻線形の場合は二次側に抵抗を挿入して I_s を 100～150 [%] 程度にしている。）

電動機が回転を始めれば、すべりの変化（回転数の変化）とともにトルクも変化し、ある点（図 3.1-8 においてすべり S_m ）で最大値 T_m （これを最大トルクという）に達し同期速度（ $S = 0$ ）でトルクは零となる。

一方、始動電流 I_s は回転の上昇とともにゆるやかに減少するが最大トルク T_m 直前から急速に低下し始め、定格出力の負荷を負っていれば定格電流で落ちつく。もし、無負荷であればほとんどすべり 0 [%]（同期速度付近）の点に落ちつく、この時の電流を無負荷電流という。

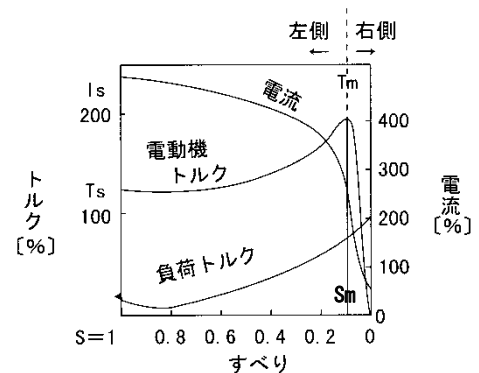


図 3.1-8 すべり・トルク・電流特性例

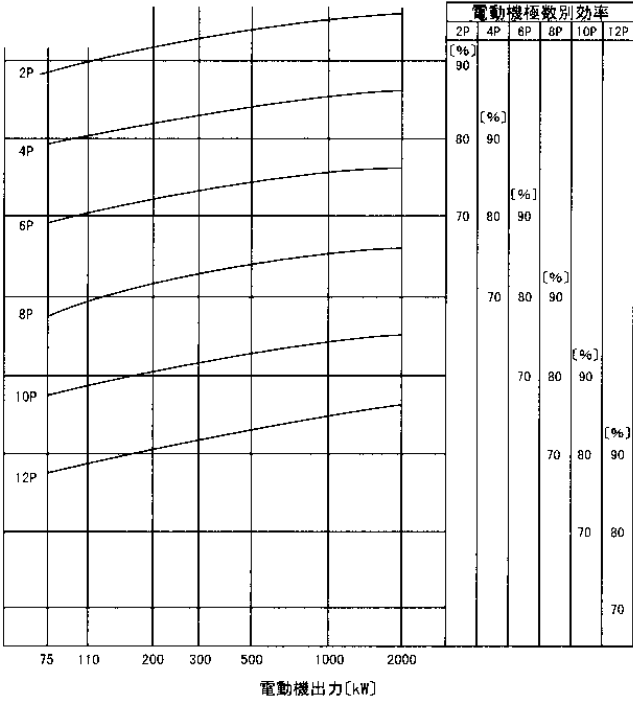


図 3.1-9 電動機効率

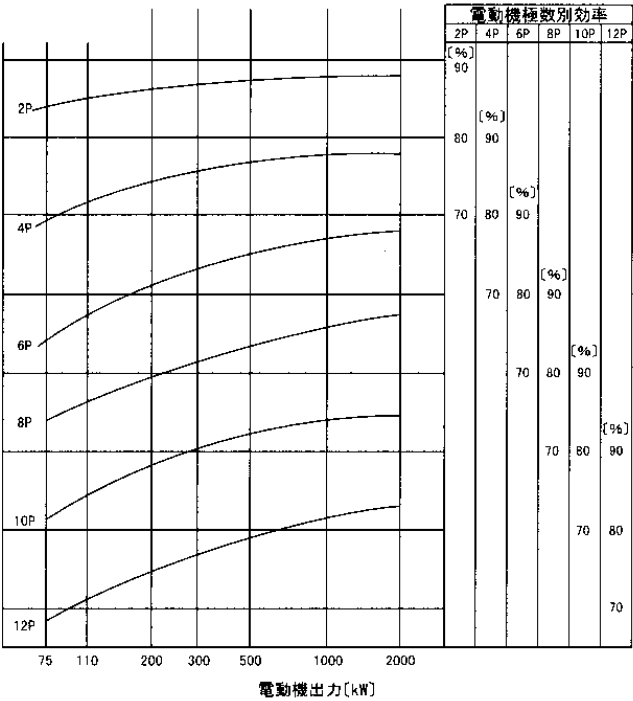


図 3.1-10 電動機力率

T_m の値は、ポンプ用の電動機で普通定格トルクの 180～300 [%] である。トルクとすべり及び出力の関係はトルク T を [N・m] で表わせば、

$$T = \frac{9,550 P}{N}$$

$$P = \frac{N \times T}{9,550}$$

$$P = 1.047 \times N_0 (1-S) T \times 10^{-4}$$

P : 出力 [kW]

N : 全負荷回転数 [min^{-1}]

N_0 : 定格回転数 [min^{-1}]

S : すべり

T : トルク [N・m]

で示される。

電動機として安定した運転をなし得るのは図 3.1-8 に示すように T_m より右側の部分であって、左側の部分は始動時に短い時間で通過する。もし T_m を超える負荷がかかった場合、電動機は停止する。(詳細 3.1.5(1)誘導電動機の選定要領を参照)

(8) 比例推移

巻線形誘導電動機の二次側に抵抗を挿入するとトルク特性が変化する。

今、二次挿入抵抗で二次巻線を含めた二次側の抵抗を m 倍にしたとすると、同一トルクを発生するすべりがもとの抵抗値のすべりの m 倍になる。これが誘導電動機の比例推移といわれる現象であって、巻線形誘導電動機の始動、速度制御などに利用されている。

図 3.1-11 に二次抵抗を変化させた場合のすべりに対するトルク・電流の関係例を示す。

(9) 電動機絶縁

電気機械の絶縁の種類は、耐熱特性により Y 種、A 種、E 種、B 種、F 種、H 種に区別されている。

一般に Y 種は使用されない。

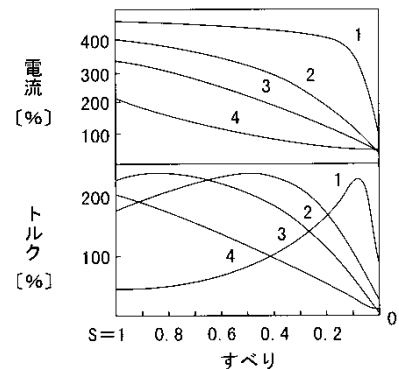
許容最高温度は次のとおりである。

Y 種 90℃、A 種 105℃、E 種 120℃、B 種 130℃、F 種 155℃、H 種 180℃

一般に低圧電動機には E、B、F 種絶縁が、高圧電動機には F 種絶縁が用いられている。

(10) 温度上昇

JEC-2110(2017)に規定されている誘導機の温度上昇限度を表 3.1-10 に示す。



(注) 図中1→4の順に2次抵抗大→小を示す。

図 3.1-11 二次抵抗を変えた時のすべりとトルク、電流の関係例

表 3. 1-10 誘導機の温度上昇限度 (JEC 2110 抜粋)

項目	誘導機の部分	耐熱クラス											
		105 (A)			120 (E)			130 (B)			155 (F)		
		温度計法	抵抗法	埋込温度計法	温度計法	抵抗法	埋込温度計法	温度計法	抵抗法	埋込温度計法	温度計法	抵抗法	埋込温度計法
1a)	出力5 000 kW (又はkVA) 以上の誘導機の固定子巻線	—	60	65 ^{a)}	—	75	80 ^{a)}	—	80	85 ^{a)}	—	105	110 ^{a)}
1b)	出力200 kW (又はkVA) 超過, 5 000 kW (又はkVA) 未満の誘導機の固定子巻線	—	60	65 ^{a)}	—	75	80 ^{a)}	—	80	90 ^{a)}	—	105	115 ^{a)}
1c)	出力200 kW (又はkVA) 以下で, 項目1d) 又は1e) 以外の誘導機の固定子巻線 ^{b)}	⊖	60	—	⊖	75	—	⊖	80	—	⊖	105	—
1d)	出力600 W (又はVA) 未満の誘導機の固定子巻線 ^{b)}	⊖	65	—	⊖	75	—	⊖	85	—	⊖	110	—
1e)	冷却扇なしの自冷形 (IC40) ・モールド絶縁巻線 ^{b)}	—	65	—	—	75	—	—	85	—	—	110	—
2	絶縁を施した回転子巻線 ^{b)}	—	60	—	—	75	—	—	80	—	—	105	—
3	かご形巻線	この部分の温度上昇又は温度は, その部分の絶縁物や近傍の材料に有害な影響を与えてはならない。											
4	ブラシ及びブラシホルダ, スリップリング, 整流子	これらの部分の温度上昇又は温度は, その部分の絶縁物や近傍の材料に有害な影響を与えてはならない。また, ブラシ材料とスリップリング又は整流子材料の組合せで, 全運転範囲における電流を扱えるような温度範囲に収まらなければならない。											
5	絶縁物との接触に関係なく鉄心とすべての構造構成物 (軸受を除く)	これらの部分の温度上昇又は温度は, その部分の絶縁物や近傍の材料に有害な影響を与えてはならない。											
注 ^{a)}	高電圧固定子巻線の場合に補正が適用される項目												
注 ^{b)}	耐熱クラスが105 (A), 120 (E), 130 (B), 155 (F) であり, 定格が200 kW (又はkVA) 以下である誘導機巻線に重ね合わせ等価負荷法を適用する場合は, 抵抗法の温度上昇限度を5 Kだけ超えてもよい。												
注 ^{c)}	製造者と使用者/購入者間で協定がある場合は, 温度計法によって決定してもよい。												

(11) 騒音

騒音とは、その存在が好ましくない音の総称であり、物理的性質だけでなく、聞く人の心理的、生理的な影響をも考える必要がある。

騒音レベル〔dB〕は耳に感ずる音の大きさに近いように補正された量を表わすものであり、騒音計の周波数特性のうちA特性が最も聴覚の特性に近いところから、電動機の騒音レベルはA特性によることになっている。電動機の騒音発生原因は、①機械騒音、②通風騒音、③電磁音に大別される。

騒音原因は種々あるが、通風騒音が大きな部分を占めることが多い。

したがって騒音で問題を生ずる場合、サイレンサを付属し、冷却風の吸排気はすべてサイレンサを通して行なうようにする。

サイレンサ付の低騒音形誘導電動機としては、

(a) サイレンサ付防滴自由通流形電動機

(b) サイレンサ付全閉防まつ外被表面冷却自由通流形電動機

がある。また、全閉防まつ水冷取り付け熱交換器形誘導電動機は全閉形となるためサイレンサ付よりも更に低騒音とすることができる。

なお、低圧汎用電動機では最初から低騒音設計した低騒音形電動機が製作されており、適用することが容易である。

一般低圧三相かご形誘導電動機、高圧（3kV）三相かご形誘導電動機の騒音レベルはJEM1313(1983)、JEM1381(1993)に規定されている。

これらの騒音レベルより更に低騒音とする場合には上記のような対策をほどこした電動機を用いる。

3.1.3 誘導電動機の始動方式

(1) かご形誘導電動機の始動

誘導電動機が静止しているとき定格電圧を加えれば定格電流の500～900〔%〕の大きな電流が流れる。

この電流（始動電流）は力率が悪く、電源容量が小さい場合には著しく電圧を降下させ電磁接触器の離落あるいは系統に接続されている他の機器に対して悪影響を与える。

かご形誘導電動機は、その構造上、始動時に二次側回路に抵抗を挿入することができないので、始動電流の制御は、一般には電動機の一次側電圧を変化させて行う。この場合、始動電流は端子電圧に比例し、始動トルクは端子電圧の2乗に比例する。したがって、各種減電圧始動方式が考案され実用に供されている。なお、それらの始動方式及び減電圧タップの値を決定するには、電源容量及び負荷の始動時に必要とするトルクなどを十分に考慮して行わなければならない。

また、大容量の巻線形電動機からかご形電動機に更新する際には、電圧変動が大きくなることから電力会社に電圧変動値及びフリッカ許容値を問合せの上、過渡的電圧変動に問題ないか確認が必要である。

電圧降下が生じると同じ送電線から電力を供給されている他の需要家に悪影響を及ぼすため、受電点における電圧降下率（ ΔV ）以下であることの確認が必要である。確認に当たっては送電線のインピーダンス（ $\%R$ 、 $\%X$ ）を電力会社に確認する必要がある。

需要家側は許容電圧降下率以下にするための始動方式の検討を行う必要があるが、始動方式の検討でも許容電圧降下率を満たせない場合は、電力会社と送電線の張替え等の協議を行う必要がある。

フリッカとは、負荷の変動によって配電電圧が短時間の周期的変動を繰り返す現象であり、照明のちらつきや機器の動作不良などの悪影響を生じさせることがある。

このフリッカ対策としては需要家における対策と電源側における対策があり、それぞれの対策は以下のとおりである。

- ① 需要家側における対策では配電用変圧器の容量を上げることやフリッカ抑制装置の設置である。
- ② 電源側（電力会社）における対策では、送電線の変更・張替えや電圧降下補償装置の設置、専用線の採用等である。この場合、電力会社との協議を行う必要がある。

以下各種始動方式の内容を説明し、その適用については3.1.5(1)(d)③項で述べる。

(a) 全電圧始動（直入れ始動）

端子に直接電源を加えて始動する方法で、通常始動電流は定格電流の500～900 [%]、始動トルクは100～200 [%]である。この始動方法は主として小容量電動機を中心に広く用いられている。（図3.1-12参照）

(b) スターデルタ始動（人-△始動）

一次巻線を星形接続（人）にして始動し、ほぼ定格速度に達したとき、これを三角接続（△）する始動方式で、図3.1-13において電磁接触器MS1、MS2を閉として人接続で始動し、ほぼ定格速度になった時間後MS2を開き、MS3を閉にして始動が完了する。この場合MS2が開となるため一次巻線が開放となり、MS3が入る時始動電流程度の電流が再び流入する場合がある。この改善策として図3.1-14に示すようにMS4を閉にして抵抗を通して仮に△にしてからMS2を開にし、すばやくMS3を閉、MS4を開とし始動を完了する。この方法をクローズド人-△始動方式といい、一次巻線が開放されず、再突入のおそれはなくなるため、かご形電動機を非常用発電機で始動する場合等にも有効である。

オープン人は5.5kW以上で無負荷又は軽負荷始動できるものに適用され、クローズド人は5.5kW以上のポンプ等ある程度負荷をかけて始動するもので電源容量の小さい場合に適用される。クローズドのほうがデルタ切替時のショックが小さい。

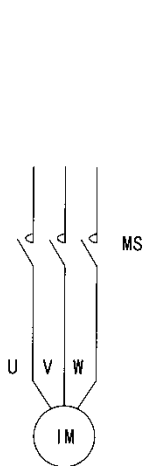


図 3.1-12 全電圧始動図

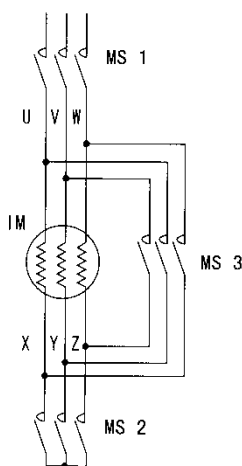


図 3.1-13 人-△ 始動

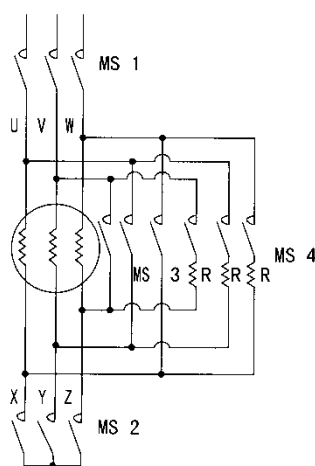


図 3.1-14 クローズド 人-△ 始動

(c) コンドルファ始動

この始動方式は始動変圧器を用いて始動し、次に変圧器の中性点を切離してリアクトルとして利用し、最後にリアクトルを短絡して始動を完了する方式である。この方式によれば電源から流れる始動電流は補償器の電圧タップの2乗により減少し、始動トルクもこのタップの2乗により減少する。したがって、良好な始動特性が得られる。他の方式と比べてやや設備費が高くなる。

(図 3. 1-15 参照)

(d) リアクトル始動

一次回路に直列にリアクトル（このリアクトルを始動リアクトルという）を入れ始動する方法である。この方法は直列に入れたリアクトル中で電圧を降下させるものであるから補償器始動に比べて始動時入力〔kVA〕は大きくなる。しかし、補償器始動、コンドルファ始動より安価で比較的良好な始動が得られるので良く用いられる。(図 3. 1-16 参照)

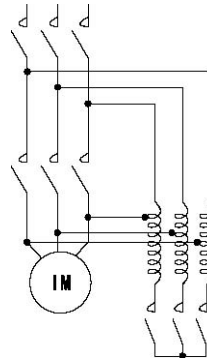


図 3. 1-15 コンドルファ始動

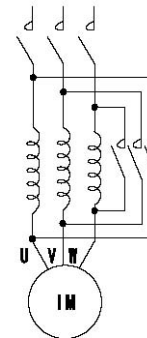


図 3. 1-16 リアクトル始動

以上の各種始動法の電動機に印加される端子電圧、始動トルク、始動電流をまとめて表 3. 1-11 に示す。

表 3. 1-11 かご形電動機の始動法別端子電圧、始動トルク、始動電流
(土地改良計画設計基準「ポンプ場」技術書 6. 1. 1. 1 主ポンプ用電動機より抜粋)

始 動 方 式		端子電圧 電源電圧	始動トルク 全電圧始動トルク	始動電流 全電圧始動電流
か ご 形 誘 導 電 動 機	直 入 れ (全電圧始動)	1. 0	1. 0 (70～150%)	1. 0 (500～900%)
	減 電 圧 始 動	人-Δ 始 動		
		オープン回路	0. 577 ($=1/\sqrt{3}$)	0. 667
		クローズド回路	0. 577 ($=1/\sqrt{3}$)	0. 333
		リアクトル始動		
		80% タップ	0. 80	0. 80
		65% タップ	0. 65	0. 65
		50% タップ	0. 50	0. 50
		コンドルファ始動		
		80% タップ	0. 64	0. 64
		65% タップ	0. 42	0. 42
		50% タップ	0. 25	0. 25
		特殊コンドルファ始動 50%→70%2 段タップ	0. 5→0. 7	0. 25 (発電機) 0. 49 (商用電源)
	V V V F 始動		—	1. 0
				0. 167

- 注 1) 本表の数値は、直入れ（全電圧始動）を 1.0 としたときの他の始動方式について比率で表している。
- 2) かご形誘導電動機の直入れ始動の場合の始動トルクは定格値の 70～150%、始動電流は定格値の 500～900%である。トップランナーモータの場合は、これらの確認が必要である。
- 3) タップ値はメーカー参考値である。
- 4) 特殊コンドルファ始動は、発電機の過渡時最大電圧降下による出力を低減させる目的で用いる始動方式で、初期始動用 50%タップで始動し、加速用 70%タップに自動昇圧する。始動トルクは比率 0.49 と考えて良いが、始動電流は、発電機の容量を決める際には 0.25、商用電源の変圧器容量を決める際には 0.49 と考える必要がある。（一般社団法人日本内燃力発電設備協会 NEGA C201）

(2) 巻線形誘導電動機の 2 次抵抗による始動と速度制御

a 巻線形誘導電動機の始動

巻線形誘導電動機では先に述べた比例推移を利用して二次抵抗により定格運転近辺の点を始動の点まで推移させて使用するので、始動電流は小さく（一般に定格電流 100～150 [%]）始動効率も良いため、かご形誘導電動機に比べ始動特性は非常にすぐれているとともに始動時の電源容量が小さくてすむ（図 3.1-17 参照）。二次抵抗は速度が上昇するにしたがって順次小さくしていき最後に短絡する。このように二次抵抗を変化させて始動電流又は始動トルクを制限する方法を二次抵抗始動という。図 3.1-18 に始動時のすべりに対するトルクの関係例を示す。

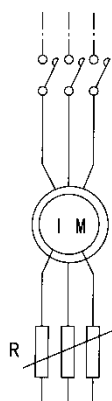


図 3.1-17 二次抵抗始動

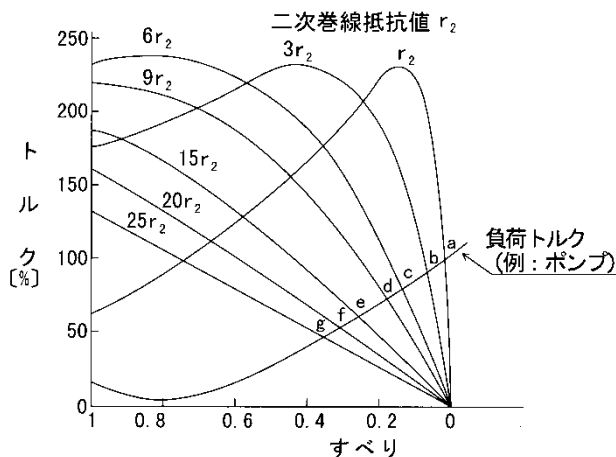


図 3.1-18 巻線形誘導電動機の二次抵抗変化時（始動時及び速度制御時）のすべりとトルクの関係例

b 巻線形誘導電動機の 2 次抵抗による速度制御

2 次抵抗の挿入による速度制御は、前述の比例推移を利用したもので、図 3.1-18 に示すようにポンプを定格運転点で運転中 2 次抵抗を r_2 , $3r_2$, $6r_2$, ……と増加すると、運転点は a, b, ……のように減速する。つまり 2 次抵抗値を加減するだけで簡便に速度制御を行うことができる。しかし、減速時も定格出力のままで二次電力を熱として放出する分効率が悪い。

一般的に無段階で速度制御する場合には液体抵抗器の使用が望ましい。

(3) 巻線形誘導電動機の制御器

巻線形誘導電動機の2次抵抗始動用制御器及び速度制御用制御器には金属抵抗器と液体抵抗器とがある。

- ・ 始動用制御器
 - ・ 金属抵抗器及び制御器
巻線形電動機の始動用に広く用いられる。
 - ・ 液体抵抗器
主として大容量巻線形電動機に用いる。
- ・ 速度制御用制御器
 - ・ 金属抵抗器及び制御器
クレーン用等多く用いるが、ポンプの速度制御には段階的でスムーズな制御が難しいのでほとんど用いられない。
 - ・ 液体抵抗器
速度制御を行う巻線形電動機に広く用いる。

a 始動用金属抵抗器及び制御器

始動抵抗器は一般に特殊鋳鉄製グリッド抵抗を用い、その外観を図3.1-19に示す。

電動機を加速するために抵抗器を順次短絡（抵抗値を小さくする。）する始動制御器を組合せて用いる。

また、始動制御器は遠方操作を行うことが多く、電動操作とするのが一般的である。

なお、手動操作も可能である。



図 3.1-19 屋内開放形始動抵抗器外観例



図 3.1-20 電動操作始動制御器外観例

始動制御器の外観と内部構造を図 3.1-20 と図 3.1-21 に示す。

電動機を始動する場合、電動機及び負荷のGD2（慣性）を定格回転数に上昇するためのエネルギーのほとんどが始動抵抗器で熱となる。

したがって、停止中の電動機を繰返し始動できる回数は始動抵抗器の熱容量の関係から標準始動回数が JEM1023 (1968) で次のように規定されている。

適用電動機定格出力	始動用金属抵抗器 (気中) に対する 標準始動回数
電動機出力 40 [kW] 以下	3 回 (注)
電動機出力 40 [kW] 超過	2 回 (注)

(注) 停止電動機をくりかえし (停止のための 冷却時間は考えない)
始動できる標準回数

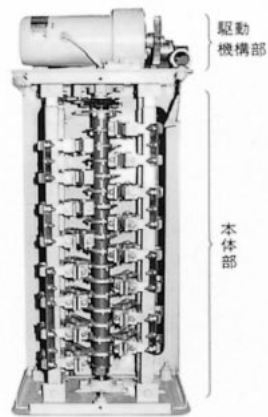


図 3.1-21 電動操作始動制御器内部例

b 始動用及び速度制御用液体抵抗器

液体抵抗器は、炭酸ソーダ溶液中（通常 1 ～ 5 % 濃度）で可動電極を上下して、固定電極間の抵抗値を連続的に変化させることができる構造になっている。これは、金属抵抗器では抵抗値を段階的にしか変化できないのに対し大きな長所である。

電極の上下操作は遠方操作及び自動制御運転が多いので、一般に電動操作を用いる。なお、手動操作も可能である。

また、大容量始動用及び速度制御用では、始動及び速度制御（電動機のすべり）で発生する熱容量の関係から水冷式又は冷却器付液体循環式を用いる。図 3.1-22 に液体抵抗器の外観例を示す。

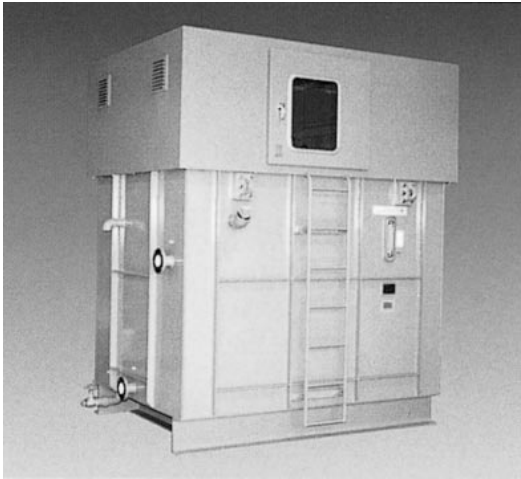


図 3.1-22 液体抵抗器の外観例

表 3.1-12 に液体抵抗器の始動抵抗器及び速度制御用の適用の一例を示す。

表 3.1-12 液体抵抗器適用の一例

(a) 始動抵抗用

定格		適用電動機容量 [kW]		水溶液量 [リットル]
最高二次電圧 [V]	最高二次電流 [A]	全負荷始動	軽負荷始動	
1800	800	1000	1500	900
2400	1100	2000	3000	1500
3000	1500	4000	6000	2000
3600	2000	6000	10000	3000
3600	2500	10000	—	4000

注 1. 適用電動機の特性、負荷の慣性などにより異なる場合がある。

(b) 速度制御用

定格		適用電動機容量 [kW]	水溶液量 [リットル]	所要冷却水量 [リットル/min]
最高二次電圧 [V]	最高二次電流 [A]			
1800	450	450	900	100 ~ 150
1800	450	600	900	100 ~ 250
2400	650	1000	1500	200 ~ 300
3000	850	2000	2000	300 ~ 400
3600	1100	3500	3000	400 ~ 600
3600	1500	5000	4000	600 ~ 1000

注 1. 適用電動機容量は電動機の特性、運転条件などにより異なる場合がある。

2. 適用電動機容量は 2 乗てい減トルク負荷の場合である。

c 液体抵抗器の残留抵抗

電動機の始動完了時又は速度制御運転の最高速度時は液体抵抗器の可動及び固定電極の極間が最小となっているが、わずかに抵抗値が残る。この最小抵抗値のことを残留抵抗という。

この残留抵抗が電動機の2次回路に加算接続される結果となり、前述の比例推移により、残留抵抗がある場合のすべりが2次短絡運転時のすべりより大きくなる。

この結果、液体抵抗器を短絡して運転に入る時、瞬間的に過大電流が流れる場合があるので注意を要する。

したがって、残留抵抗の影響を軽減するため、金属抵抗器を液体抵抗器と並列又は直列に接続し、並列抵抗は2次短絡前に投入、直列抵抗は順次短絡してから2次短絡を行うなどの対策を要する場合がある。

(4) 始動頻度と GD^2

電動機を始動する場合、1回の始動で回転子側回路に発生する損失は、電動機の機械損及び負荷の反抗トルクを無視すれば次式で表わされる。

$$W = \frac{GD^2 \times N^2}{730} \quad [J]$$

W：回転子回路に発生する損失 [J]

N：定格回転速度 [min^{-1}]

GD^2 ：電動機回転子の慣性と電動機軸に換算した負荷慣性の和 [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

この損失Wは巻線形の場合、そのほとんどが二次挿入抵抗中で発生するが、かご形の場合では回転子導体内で発生するため二次導体の温度は始動時に急激に上昇する。

したがって、始動、停止をくり返すと回転数の高い場合又は GD^2 が大きい場合においては回転子はバー及びエンドリングの膨張、縮小あるいは振動による疲労のため回転子バーが切損したり、始動時発熱のため固定子コイルが焼損することがある。許容始動頻度の限度は、電動機の実出力、極数、負荷 GD^2 、設計内容などによって異なってくるが、1日数回を超えるもの、特に水位による自動運転を行うような場合など、あるいは頻度は少なくとも負荷 GD^2 が表3.1-13の値を超える場合には、かご形電動機においては設計製作に特別な考慮を払うか、又は巻線形誘導電動機を使用するかを十分に検討する。(参照：設計基準「パイプライン」技術書 10.3.2 ポンプによる制御方法)

なお、JEM 1224(1990)に規定されている高圧三相かご形誘導電動機の負荷 GD^2 の許容値を表3.1-13に示す。この値を超える負荷 GD^2 のものは特別な考慮を必要とする。

表 3.1-13 高圧三相かご形誘導電動機の負荷 $G D^2$ の許容量値例単位 $[N \cdot m^2]$

極数 周波数 〔Hz〕 出力〔kW〕	2		4		6	
	50	60	50	60	50	50
45	150	100	720	490	1900	1200
55	190	120	870	550	2300	1500
75	250	160	1100	740	3100	2000
90	290	190	1300	880	3700	2300
110	350	230	1600	980	4400	2800
132	410	260	1900	1200	5100	3300
160	470	300	2300	1400	6100	4000
200	580	380	2800	1800	7600	4900
250	710	460	3500	2200	9300	5900
280	750	490	3800	2400	9800	6400
315	850	550	4200	2600	11000	7400
355	940	610	4700	2900	13000	8100
400	980	670	5100	3200	14000	9200
450	1100	740	5700	3600	16000	9800
500	1300	810	6300	4100	17000	11000

注1 上表の数値は、負荷側の $G D^2$ を電動機軸に換算した値を示す。

2 定格電圧、定格周波数で、直入れ始動を行うものとする。

3 電動機各部の温度が、周囲温度に等しい状態から始動する場合は、連続2回（ただし第2回目の始動は第1回目の始動が行われた後、電源を切って自然停止させた後行うものとする）とし、各部の温度が定格負荷で連続使用したときの温度を超えない状態から始動する場合は、1回とする。

4 負荷トルク（加速時間中）は、回転速度の2乗に比例し、定格回転速度において電動機の定格トルクを超えないものとする。

5 回転体の慣性 $G D^2$ について

車を発進する時、すぐに一定の速度に上げることはできない。また、走行中の車をすぐに止めることはできない。この現象は車（質量のある物体）の慣性によるものである。

ポンプ等の回転体も同様に慣性を持っているので、停止状態から定格回転数に加速する時は加速トルクとある加速時間を要する。ポンプの慣性は割合小さいがプロワ等（直径が大きくその外周に質量が集っている形の回転体ほど慣性大きい）は慣性大きい。

3.1.4 誘導電動機の世界制御方式

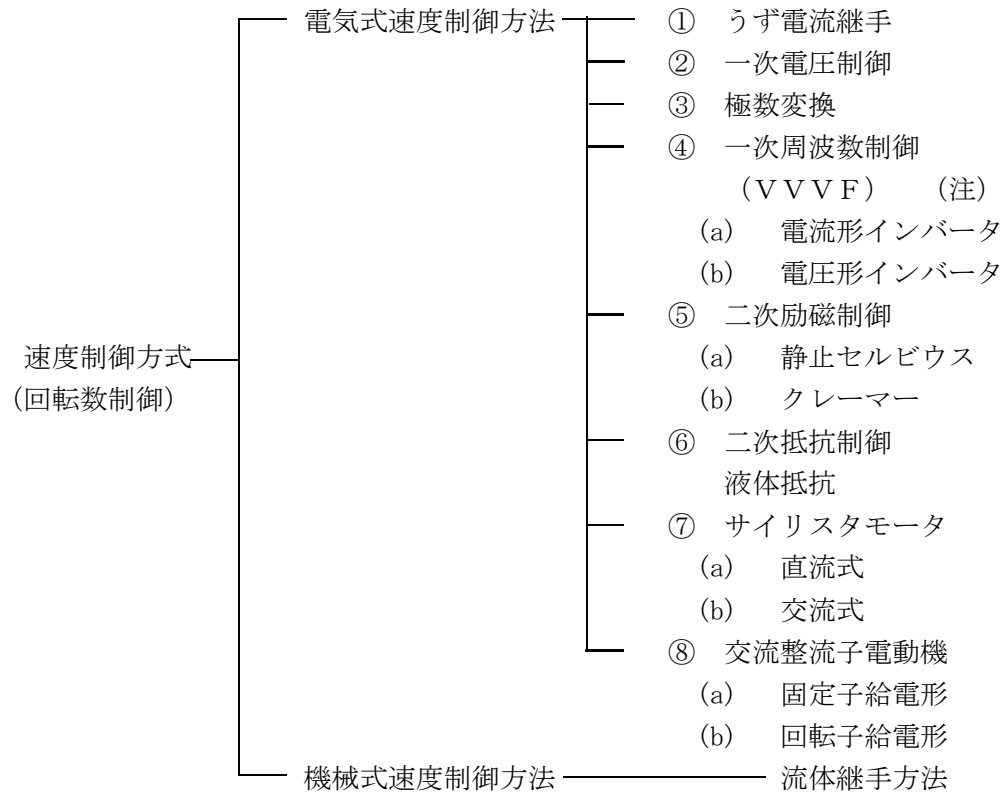
(1) ポンプの世界制御の特長

ポンプの世界制御には次のような特長があるので、検討のうへ制御方式を決定する必要がある。

- ① ポンプの軸動力は回転数の3乗に比例する。
- ② ポンプの吐出量は回転数に比例する。
- ③ ポンプで発生する揚程は回転数の2乗に比例するので送水管路特性との関係を検討して、制御範囲を決定する必要がある。
- ④ 逆転制御の必要がなく、制動トルクを発生する必要がない。
- ⑤ 速度制御の速応性の必要は少ない。
- ⑥ 信頼性が高く、維持管理が容易であること。

(2) 速度制御方式の分類

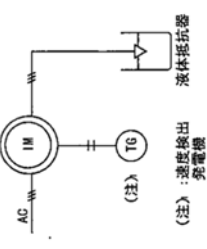
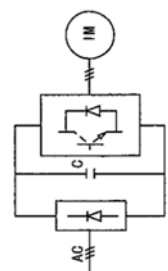
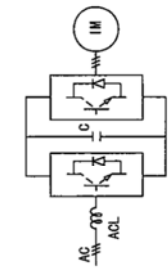
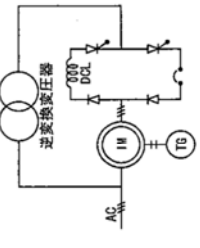
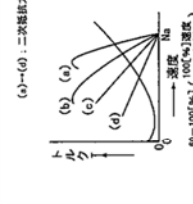
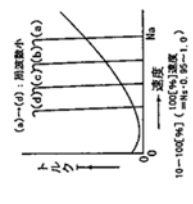
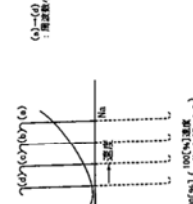
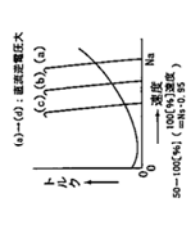
速度制御方式には各種の方法があるが、代表的な種類を図3.1-23に示す。これらの内、現在多く用いられている速度制御方式と適用範囲を表3.1-14に示す。



(注) VVVF=Variable Voltage Variable Frequency ,

図 3.1-23 速度制御の方式の種類表

表 3.1-14 各種速度制御方式

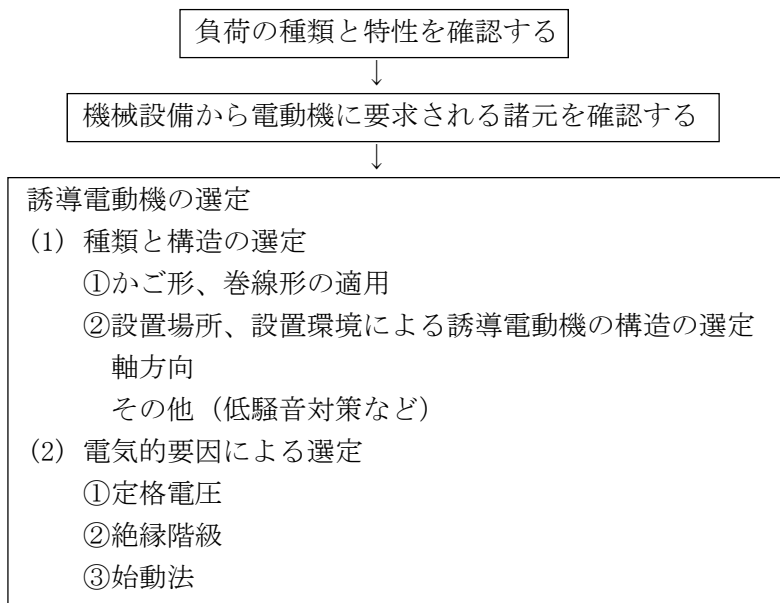
制 御 方 式	主 電 機	二 次 抵 抗 制 御		一 次 周 波 数 制 御 (VVVF)		静止セルピウス
		巻線形誘導電動機	二次抵抗制御	三相ブリッジ (コデック平滑)	自励三相ブリッジ (電圧型PWM制御)	
構 成	主 電 機					巻線形誘導電動機
		80 巻線形誘導電動機の二次抵抗値を調整して速度制御する。二次抵抗器には制御をスムーズにするため液体抵抗器を用いる。 操作方式は遠方及び自動制御を行う関係上電動操作とする。(切替で手動が可能。)	100 トランジスタインバータにより出力周波数および電圧を可変して速度制御する。	130 順逆変換共等価正弦PWM制御にて出力電圧、周波数を可変して速度制御する。(注) 2	140 サイリスタインバータの点弧角を調整して直流逆電圧を印加し速度制御する。 二次出力をサイリスタインバータにより電源周波数の交流に変換する。	
価 格 比 (注) 1						
制 御 方 法						
出 力 範 囲	速度一トルク特性 Ns : 同期速度	数十～1000 [kW]	0.75～数百 [kW]	0.75～数百 [kW]	数百～数千 [kW]	
速度制御範囲						1. 無段階速度制御ができる。 2. 複数台の一括制御が可能である。 3. 始動抵抗器が必要。 4. 速度範囲が狭くなるにつれ、装置は小形となる。
特 徴		1. 構成が単純であるが、ブラシ等の保守が必要。 2. 二次電力をすべて二次抵抗で熱として放出するので効率が悪い。 3. 制御範囲が他の方式に比し狭い。	1. 商用電源周波数に関係なく広範囲の無段階制御ができる。 2. 全速度領域で高効率の運転ができる。 3. 多数電動機の相互運転にも適する。 4. 再生制動や可逆運転を要する負荷には適さない。	1. 電源側高調波を大幅に低減できる。 2. 無段階速度制御が可能である。		

(注) 1: 315kW相当の参考値を示すが、電動機の容量、高調波抑制装置の有無により異なるので、その都度価格比較が必要となる。(注) 2: PWM Pulse Width Modulation

3.1.5 誘導電動機の選定要領

(1) 誘導電動機の選定要領

以下に誘導電動機の選定要領フローを示し、各選定要領を説明する。



(a) 負荷の種類と特性

負荷として次のようなものが挙げられる。

(ア) 各種ポンプ及びその補機

（電動弁、冷却水ポンプ、封水ポンプ、ストレーナ、真空ポンプ他）

(イ) ゲート及びその補機（油圧ポンプ他）

(ウ) 除塵機

(エ) 各種電動バルブ

(オ) 予備発電設備用補機（燃料移送ポンプ、潤滑油ポンプ、冷却水ポンプ他）

(カ) 電動機補機（刷子引上装置用及び始動又は速度制御抵抗器用電動機）

(キ) クレーン用

(ク) その他（換気装置他）

これらの負荷は図 3.1-24 の実線で示すような速度－トルク特性を持っているので、点線で示すような右下りの特性を持つ電動機で駆動することにより安定運転ができる。

このような右下りの速度－トルク特性を持つ電動機は多数あるが、経済性、保守性、取扱いの容易さ等から図 3.1-25 で示す誘導電動機が適している。

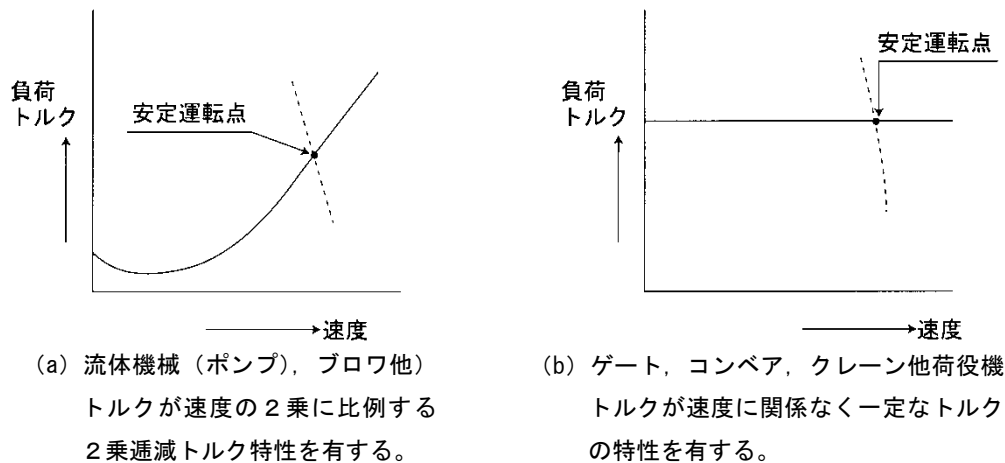


図 3.1-24 負荷の要求するトルク

次に、これら機械設備の機能を十分満足するとともに全体システムとしての機能を十分発揮できるように電動機が計画設計される。これら電動機の諸元を求める設計については、土地改良事業計画設計基準を参照されたい。

以上から機械設備設計によって次項のような電動機に対する要求諸元が求められる。

(b) 電動機に要求される諸元

(ア) 用途：機械設備名称及び用途

(例) ○○ポンプ用

(イ) 電動機定格出力 [kW]、台数

(ウ) 電動機に対する必要トルク（負荷の速度—トルク曲線、始動トルク、最大トルク、定格トルクなどで示される。）

(エ) 電動機の時間定格（一般に連続定格であるがクレーン、ゲート等は反復定格、短時間定格のものが多い。）

(オ) 電動機回転数 (min^{-1} ：1 分間の回転数) 又は極数及び周波数。

(カ) 電動機の軸方向（ポンプではその種類により横軸／立軸共広く用いられる。一方その他の負荷は一般に横軸が多く用いられている。）

(キ) 電動機の連結（一般に直結が多い）

(ク) 電動機の機械設備との取付方法

(ケ) 電動機軸換算 GD^2 （慣性）

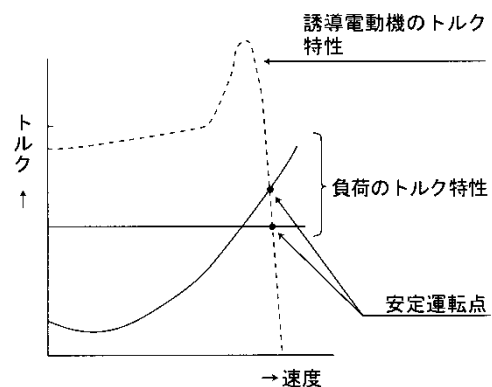


図 3.1-25 誘導電動機及び負荷の速度—トルク特性

(コ)電動機の始動頻度

(サ)設置場所：屋外、屋内、水中（水中ポンプの場合）：電動機の形式

(シ)設置環境：

- 全天候形（屋外設置）
- 湿度の高い所や水滴をかぶるおそれのある場所
- 騒音を避けたい場所
- 周囲温度、標高

(ス)その他：

- 回転方向
- 端子方向
- 可逆運転の有無（ゲート他荷役機は有）
- 付属品
- 予備品

(セ)特 性 ： 速度制御を行う場合 —— 制御回転数範囲

(c) 誘導電動機の選定

(b)の様な要求諸元を満足する誘導電動機の選定について以下に述べるが、機械設備からの要求諸元によって電動機の選定が一義的に決まるものは省略する。

① 種類と構造の選定

表 3.1-15 にかご形／巻線形誘導電動機の特徴をまとめる。これを参考にかご形と巻線形の適用を決定する。

表 3.1-15 かご形／巻線形誘導電動機の特徴
(土地改良計画設計基準「ポンプ場」技術書 6.1.1.1 主ポンプ用電動機より引用)

	かご形誘導電動機		巻線形誘導電動機
	トッランナーモータ	標準型	
構 造	簡単、堅牢である。		やや複雑である。
保 守	故障少なく、簡単である。		スリップリング、ブラシがあり、やや複雑である。
始動電流	大 (600～900 [%])	大 (500～800 [%])	小 (100～150 [%])
始動トルク	70～150 [%]		100～150 [%]
始動方式	直入れ又は減電圧始動		二次抵抗始動 ^{注)}
回転速度制御方式	インバータ制御 (VVVF)		制御用抵抗器 ^{注)} 又は静止セルビウス
適 用	① 構造簡単、保守簡単、安価などの点から小容量から大容量まで広く適用されている。 ② トッランナーモータは、JIS C4213 における、極数が 2P～6P、出力が 0.75kW～375kW の低圧電動機が対象となる。		① 始動電流を制限する必要がある場合。 ② 回転速度制御を制御用抵抗器又は静止セルビウスで行う場合。 ③ はずみ車効果 (GD ²) の大きい負荷、始動頻度が高くかご形では対応できない負荷の場合。

(注) 電動機の始動方式及び回転速度制御方式の抵抗器には金属抵抗器と液体抵抗器がある。回転速度制御方式の抵抗器は、無段階での制御が可能であることと発熱量を抑えきれることから、一般的には液体抵抗器が使用される。

② 設置場所、設置環境による誘導電動機の構造の選定

前述 3.1.1(2)を参照して電動機の保護方式と冷却方式を選定する。

ア 屋外設置の電動機

全天候形が要求されるが保守の容易な点から自力通流形が好ましく、

保護方式：屋外、全閉形、防まつ形（記号：I P 4 4）

冷却方式：外被表面冷却形（記号：I C 4）

が小中出力に多く用いられる。

また、中大出力（数百 kW 以上）では、

保護方式：屋外、保護形、防まつ形（記号：I P W 2 4）

冷却方式：自由通流形（記号：I C 0）

（注）：必要な場合管通流も可能

又は

保護方式：屋外、全閉形、防まつ形（記号：I P 4 4）

冷却方式：取付け熱交換器形（空冷）（記号：I C 6）

が用いられる。

なお、運転停止時の湿気による絶縁低下を防止するためスペースヒータを設けることが多い。

ただし、小容量の全閉形は除く。

イ 屋内設置の電動機

直接水滴がかからないとはいえ、何らかの原因による水滴の落下等の保護及び異物に対する保護を考慮するとともに保守の容易な点から自力通流形が好ましいので、

保護方式：保護形、防滴形（記号：I P 2 2）

冷却方式：自由通流形（記号：I C 0）

が出力の大小を問わず多く用いられる。

ただし、湿度の高い場所や水滴をかぶるおそれのある場所では前述の屋外仕様とする。

また、機械設備によっては設置が標準的に屋外、屋内両用に設計されている場合が多く、特に汎用小出力電動機は屋外全閉防まつ外被表面冷却形（記号：I P 4 4、I C 4）を用いるか、屋内設置がはっきりしている場合は、全閉防まつ外被表面冷却形（記号：I P 4 4、I C 4）を用いることが少なくない。

③ 軸方向

一般に横軸形の適用が多いが、ポンプ用ではポンプ形式により立軸形も多く用いられる。

この場合次の点に注意する必要がある。

ポンプの場合、スラスト荷重をポンプ側で支持するか、電動機側で支持するかを明確にする。近年それぞれ独自にスラスト軸受を持つケースも多いが、すべてのスラストを電動機側で支持する場合は下記を明確にする。

- ・常用スラスト荷重 [N] 上向、下向
- ・最大スラスト荷重 [N] 上向、下向

④ その他

低騒音対策のある場合は3.1.2(11)を参照。

(d) 電氣的要因による電動機の選定

① 定格電圧

2.4.1 電動機電圧の選定を参照して決定する。

② 絶縁階級

高圧は耐熱性にすぐれ、従来のB種より同一出力で寸法重量が小さく製作できるF種が標準化している。一方低圧はE、B、F種があり選定できるがF種の採用が多くなっている。

③ 始動法

3.1.3 で各種始動法を述べたが多く用いられている始動法を表3.1-16にまとめるとともにその適用の目安を示す。最終的にどの始動法にするかは負荷の必要トルク、速度特性、始動頻度、電源容量等総合的に検討し選定する必要がある。

表 3.1-16 誘導電動機の始動法適用の目安

電動機	始動法		適用の目安	備考
かご形	全電圧始動	直入始動	・ 低圧 200〔V〕級：11〔kW〕未満 400〔V〕級：22〔kW〕未満 ・ 高圧：適用しない	小出力電動機を中心に広く用いられている。 (注1) 参照
	減電圧始動	人 — △始動	・ 低圧 200〔V〕級：45〔kW〕未満 400〔V〕級：75〔kW〕未満 ・ 高圧：適用しない	始動中のトルクが1/3になるのでポンプの場合、バルブ全開始動時では負荷トルクと電動機トルクが非常に接近したりクロスして始動があやぶまれることがあるのでトルク — 速度カーブで良くチェックすること。 適用：ポンプ、流体機械 (注2) 参照
		リアクトル始動	・ 低圧 200〔V〕級：11〔kW〕以上 400〔V〕級：22〔kW〕以上 ・ 高圧：3kV/6kV級	コンドルファより安価な利点により高圧で多く用いられる。 適用：ポンプ、流体機械
		コンドルファ始動	同 上	始動電流を特に制限したい場合に用いる。 適用：ポンプ、流体機械
巻線形	二 次 抵 抗 始 動		高圧、低圧	

(注 1) 内線規程 3305 節-2 において、3.7〔kW〕を超える電動機は始動装置を使用し、始動電流を抑制することと規定している。しかし、11〔kW〕未満の特殊かご形（このクラスは標準仕様で特殊かご形である）は直入始動を認めている。

ただし、十分始動条件を検討すれば 11〔kW〕以上でも直入始動が可能で 37〔kW〕以下でも可能である。

(注 2) 同上規程の中で、ポンプ用電動機など自動運転を行う電動機に使用される電磁式スターデルタ始動装置は、一次側電磁開閉器付などとし、電動機使用停止中には電動機巻線に電圧を加えないような措置を講じるものとする。

(2) 誘導電動機の標準仕様

(a) かご形電動機

かご形電動機の標準仕様の例を下に示す。

表 3.1-17 かご形電動機標準仕様（参考）

規格	J I S、J E C、J E M		回転子構造	かご形
保護方式 冷却方式	屋内	・保護形、防滴形、自由通流形（I P 2 2、I C 0） ・全閉形、防まつ形、外被表面冷却形（I P 4 4、I C 4）		
	屋外	・全閉形、防まつ形（I P 4 4、I C 4） 外被表面冷却形 ・保護形、防まつ形、自由通流形（I P 2 4 W、I C 0） ・全閉形、防まつ形、（空冷）（I P 4 4、I C 6）		
定格出力	_____ [kW]			
回転数	_____ [min ⁻¹]			
極数	_____ 極			
定格電圧、周波数	高圧	6000 [V] (50 [Hz]) 3000 [V] (50 [Hz]) 6600 [V] (60 [Hz]) 3300 [V] (60 [Hz])	低圧	200 [V] (50、60 [Hz]) 220 [V] (60 [Hz]) 400 [V] (50 [Hz]、60 [Hz]) 440 [V] (60 [Hz])
絶縁階級	F 種		E 種以上（E、B、F 種）	
周囲温度、標高	-20 [℃] ~40 [℃]、1000m以下			
時間定格	連 続			
始動電流	500~900 [%]			
始動トルク	70~100 [%]（ゲート用：200 [%] 以上 300 [%] 以下）			
最大トルク	160 [%] 以上（ゲート用：200 [%] 以上 300 [%] 以下）			
始動頻度	冷時 2 回、熱時 1 回			
始動方式	全電圧、人-△、リアクトル、コンドルファ			
軸方向	横軸、立軸（スラスト荷重、常用 _____ [N] $\frac{\uparrow}{\downarrow}$ 向、最大 _____ [N] $\frac{\uparrow}{\downarrow}$ 向）			
軸受	ころがり軸受（グリース潤滑）を標準とする。 ただし、スラスト軸受はすべり軸受（油潤滑）となることがある。			
回転方向	連結から見て反時計			
端子箱位置	上部または連結反対から見て右側			
端子箱 引込口方向	端子箱上部：軸方向または左右方向 ただし通風をさまたげないこと 端子箱側面：軸方向または上下方向			
騒音指定	_____ [dB(A)]（無負荷時）			
オプション	・軸受ダイヤル温度計 ・巻線、軸受用測温抵抗体 ・ベース ・基礎ボルト ・スペースヒータ ・ソールプレート、ジャッキボルト、ノックボルト			

（注）1 立軸の場合のスラストは原則として負荷側で受ける。

（注）2 保護方式、冷却方式の記号表現については 3.1.1 を参照。

（注）3 ゲート用電動機は鋼構造計画設計技術指針（水門扉編）に準拠すること。

(b) 卷線形電動機

巻線形電動機の標準仕様の例を示す。

表 3.1-18 卷線形電動機標準仕様 (参考)

規格	J I S、J E C、J E M	回転子構造	巻線形
保護方式 冷却方式	屋内	・保護形、防滴形、自由通流形（I P 2 2、I C 0） ・全閉形、防まつ形、外被表面冷却形（I P 4 4、I C 4）	
	屋外	・全閉形、防まつ形、外被表面冷却形（I P 4 4、I C 4） ・保護形、防まつ形、自由通流形（I P 2 4 W、I C 0） ・全閉形、防まつ形、取付け熱交換器形（空冷）（I P 4 4、I C 6）	
定格出力	_____ [kW]		
回転数	_____ [min ⁻¹]		
極数	_____ 極		
定格電圧、周波数	高圧 6000 [V] (50 [Hz]) 3000 [V] (50 [Hz]) 6600 [V] (60 [Hz]) 3300 [V] (60 [Hz])	低圧 200 [V] (50、60 [Hz]) 220 [V] (60 [Hz]) 400 [V] (50、60 [Hz]) 440 [V] (60 [Hz])	
絶縁階級	F 種	E 種以上（E、B、F 種）	
周囲温度、標高	-20 [°C] ~40 [°C]、1000m以下		
時間定格	連続		
始動トルク	100 [%]		
最大トルク	160 [%] 以上		
軸方向	横軸、立軸（スラスト荷重、常用_____ [N] 上 向、最大_____ [N] 上 向） 下 下		
軸受	ころがり軸受（グリース潤滑）を標準とする。 ただし、スラスト軸受はすべり軸受（油潤滑）となることがある。		
回転方向	連結から見て反時計		
端子箱位置	上部又は連結反対から見て右側		
端子箱 引込口方向	端子箱上部：軸方向又は左右方向 ただし通風を妨げないこと 端子箱側面：軸方向又は上下方向		
ブラシ引上及び 二次短絡装置	電動操作ブラシ引上及び二次短絡装置付（なお、速度制御する場合はブラシ引上なしの場合が一般的。）		
騒音指定	_____ [db] (A) (無負荷時)		
オプション	・軸受ダイヤル温度計 ・巻線、軸受用側温抵抗体 ・ベース ・基礎ボルト ・スペースヒータ ・ソールプレート、ジャッキボルト、ノックボルト		

(注) 1 立軸の場合のスラストは原則として負荷側で受ける。

(注) 2 始動用抵抗器及び制御器等の始動装置又は速度制御用抵抗器は別途必要になる。

(3) トップランナーモータ採用に関する留意点

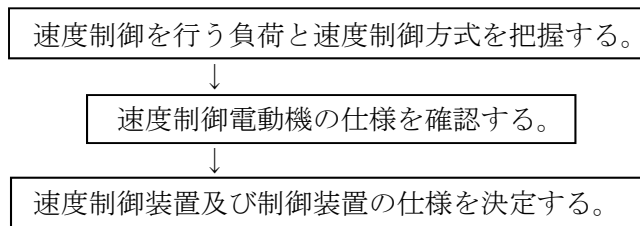
既設のモータからトップランナーモータに交換する場合は、始動電流、寸法や重量等が変わる場合があるため留意する必要がある。(6.3.3 保全実施計画検討の手順と留意点 表 6.3-1 を参照)

3.1.6 速度制御方式の選定要領

(1) 速度制御方式の選定要領

選定に当たっては、負荷の特性、速度制御装置の特性、保守性、経済性、信頼性等の見地から総合的に検討し決定する。

以下に選定フローを示し、選定要領を説明する。



① 速度制御を行う負荷と速度制御方式の把握

速度制御はポンプの流量、圧力、水位制御等に多く用いられるがその目的を明確にし、運転制御方式を明らかにする。運転制御方式は、一般に台数制御と回転数制御の組合せで行う場合が多い。全体として台数制御をかけ各台数間の細かな流量調整を速度制御ポンプが分担する。

また、万一制御装置がダウンした場合でも固定速で運転する必要があるか確認する。

更に全体ポンプ台数、予備機台数、速度制御すべきポンプ台数（速度制御運転するポンプは個別運転か又は複数台のポンプを一括して回転数をそろえるのか）を明確にする。（セルビウスの計画では特に重要。）

② 速度制御電動機の仕様

台数、出力、極数、電圧、回転数、周波数、速度制御範囲等を明確にする。その他前述の電動機の選定 3.1.5 項で述べた事項にしたがってチェックする。

③ 速度制御装置及び制御装置の仕様

一般的にポンプの場合は、その特長から次の仕様となる。

(ア) 逆転又は再生制動は不必要である。

(イ) 速度制御範囲は 50～100 [%] 以内が多い。

(ウ) 制御の精度・応答性は各種産業ラインプロセスに比較すれば、それ程高度なものは要求されない。

(エ) 運転効率が良いこと。

(オ) 設置環境は良いかチェックする、即ち腐食ガス粉塵はないかなど確認する。

④ 速度制御方式（回転数制御）の選定

速度制御方式は、表 3.1-14 各種速度制御方式を参照し選定するが、ポンプ特性、初期投資、ランニングコスト等総合的判断の下に行う必要がある。図 3.1-26 に一般的な選定フローを以下に示す。

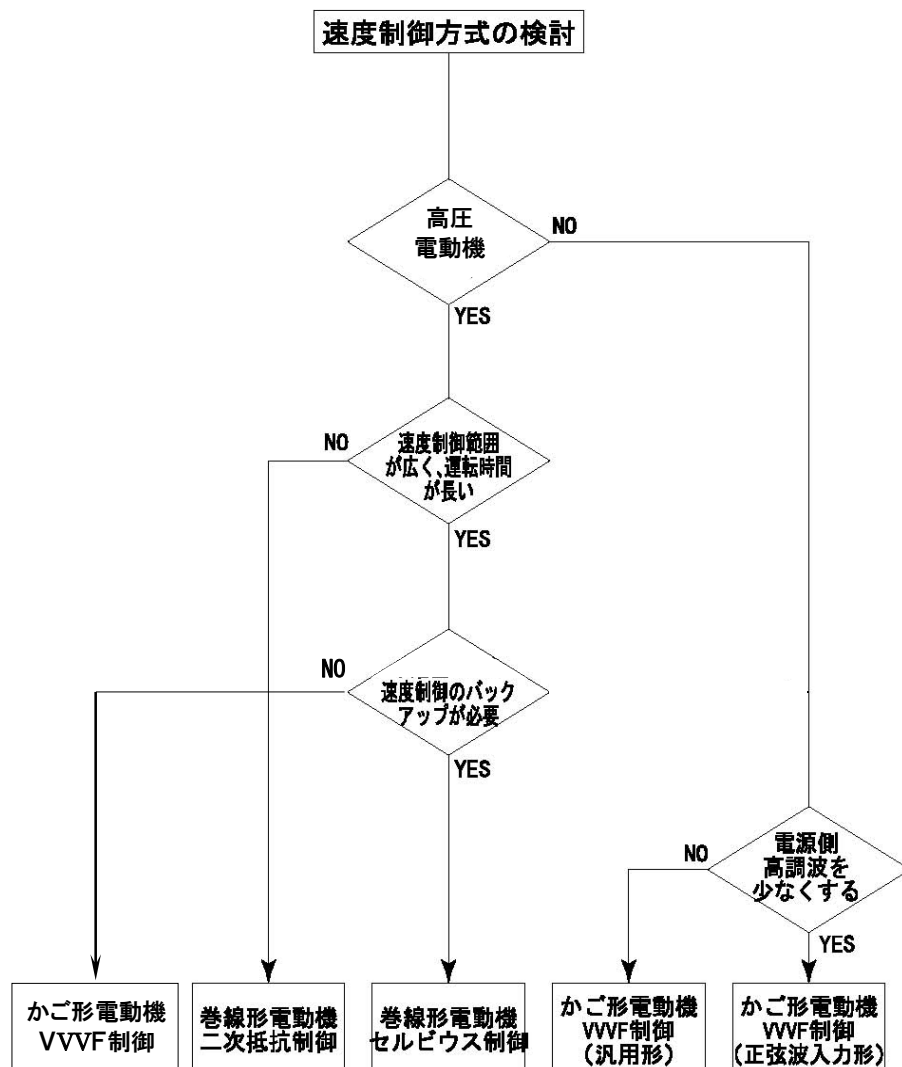


図 3.1-26 速度制御方式選定フロー

- (注) 1. 電動機の電圧種別は、2.4.1 電動機電圧の選定、2.4.2 配電電圧と配電方式を考慮して選定のこととする。
 2. 速度制御のバックアップは、二次抵抗（液体抵抗器等）制御で行うこととする。

⑤ 速度制御装置適用時の注意点

V V V F、セルビウス等を適用する場合は速度制御装置即ち整流変換装置の整流器のスイッチング特性に起因して電圧、電流に歪を生じる。基本波（50/60〔Hz〕正弦波）以外の高次の電流、いわゆる高調波電流が流れる。このため実際の施工に当たっては適用される電動機の熱的耐量及び振動騒音及び速度制御装置外への高調波電流の影響等について検討を要する。

(2) 速度制御装置の標準仕様

トランジスタインバータの標準仕様の例を表 3.1-19 に、装置外観を図 3.1-27 に示す。

表 3.1-19 トランジスタインバータの標準仕様（参考）

最大適用電動機 kW	200V 級	0.4～ 90 [kW] （4P 電動機換算）				
	400V 級	0.4～500 [kW] （ 同 上 ）				
交流入力(電源)	電圧 周波数	三相 3 線式	200～240 [V] 50 [Hz] ／60 [Hz]			
			380～500 [V] 50 [Hz] ／60 [Hz]			
	許容変動範囲			電圧	±10 [%]	周波数
交流出力	電圧	三相 3 線式	200～240 [V]			
			380～500 [V]			
	周波数	0.2～590 [Hz] ※制御方式による				
	制御方式	等価正弦波 PWM 制御				
		設定入力	・ DC0～10 [V] ・ DC4～20 [mA]			
制御範囲	1:10(初期値) ※制御方式により 1:1500 まで可					
制御精度	・ アナログ入力 最大出力周波数 ±0.2 [%] 以内 (25 [℃] ±10 [℃]) ・ デジタル入力 設定周波数 0.01 [%] 以内					
始動トルク	50 [%] (初期値) ※制御方式及び定格により 250%まで可					
一般仕様	周囲温度	-10～+50 [℃]				
	相対湿度	90 [%] 以下(結露のないこと)				
	設置	屋内(腐食性ガス、引火性ガス、オイルミスト、塵埃のないこと)				
	標高	2500 [m] 以下 ※1000m を超える標高に設置する場合、500m 毎に 3%の定格電流低減が必要				



図 3.1-27 インバータ装置の外観例