

動力設備用モータの特性と過負荷保護

誘導電動機を五感で学ぶビジロ (Visilo)


兵庫職業能力開発促進センター ビル設備サービス科

2024年7月更新

もくじ

1.	はじめに	3
2.	回転の仕組み	4
	コラム アラゴの円盤	5
3.	三相誘導電動機の構造	5
4.	三相誘導電動機の回転原理	6
5.	極数	7
6.	同期速度（極数と周波数）	8
7.	電磁誘導、すべり	8
8.	誘導電動機の運転特性とその選定	9
8.1.	速度—トルク特性（回転速度とトルクの関係）	10
8.2.	速度—電流特性（回転速度と電流の関係）	10
9.	温度上昇限度（最高使用温度）	11
10.	誘導電動機の外被方式	13
10.1.	保護方式	13
10.2.	冷却方式	15
11.	負荷特性	16
11.1.	効率と損失	16
11.2.	力率	17
12.	負荷の種類と速度特性（トルク、出力）	18
12.1.	定トルク負荷と電動機の運転	19
13.	ビジロによる実習	21
	実習 1 銘板の読み取り	22
	実習 2 軽負荷運転	23
	実習 3 定格負荷運転	24
	実習 4 過負荷運転（サーマルトリップ確認）	25
	実習 5 超過負荷運転（停動トルク確認）	26
	実習 6 測定結果まとめ	27
14.	保護協調の考え方について	28
15.	サーマルリレーの動作確認	29

15.1. 過負荷時の動作	29
15.2. 動作特性の確認	29
16. 主要機器のスペック等.....	30
16.1. 三相誘導電動機	30
16.1.1. 外観および銘板.....	30
16.1.2. 三相誘導電動機の検査成績表.....	31
16.2. 電源およびシーケンス図.....	32
16.3. 発電機（オルタネータ）	33
16.3.1. 外観	33
16.3.2. 基本スペック.....	33
16.3.3. 発電機内部回路およびコントローラ	33
16.4. ハロゲンランプ負荷	34
16.4.1. 外観	34
16.4.2. 基本スペック.....	34
16.4.3. 結線図	34
17. 追加実習	35
追加実習 1 無負荷運転.....	35
追加実習 2 過負荷運転（その2）	35
追加実習 3 過負荷運転（その3）	35
18. 実測データサンプル	36
19. 参考文献	37



スマホでビジろう！

この教材にスマホのアイコンがある場合は YouTube 動画で実習の様子が視聴できます。授業の復習や実習教材「ビジロ」がない場合にご活用ください。

なお、YouTube を視聴するにあたり、通信料が発生いたします。予めご了承ください。

1. はじめに

オフィスビルや商業施設などの各種設備で使用される動力設備用モータのうち、実に9割以上が誘導電動機とされている。誘導電動機は無負荷時の回転速度と定格負荷時の回転速度が大きく変わらない特性を持っており、定速度運転に向いている。特に速度制御をしなくても一定速度で回転するため、機器への応用には都合がよい。また、国内の送配電に用いられている三相交流電源につなぐだけで回転を得られるのも魅力の一つである。ちなみに、直流分巻電動機も定速度特性があるが、直流機はブラシなどの摩耗部品があってメンテナンス面でのデメリットがあり、ビル建物で使用されるポンプやファンなどの動力には誘導電動機が用いられる。

誘導電動機は商用電源で駆動する交流電動機として、特に0.2~37kWの範囲はJIS C 4210（一般用低圧三相かご形誘導電動機）があり、標準電動機としての汎用性が高い。

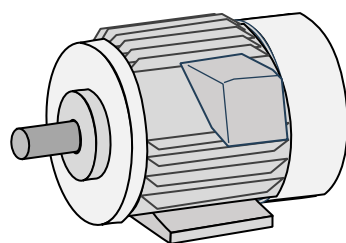


図1 三相誘導電動機



2. 回転の仕組み

電動機の回転を生み出す原理として、右ネジの法則やフレミングの左手の法則が知られている。磁界の中に電流が流れる導体があると、磁石が作る磁力線と、電流が作る磁力線（右ネジの法則）が重ね合わされる。例えば、図3のような配置と電流・磁界の向きの場合、導体の下部では磁石が作る磁界の向きと電流が作る磁力線とが逆向きになる。逆に、上部では、2つの磁界の向きが同じになる。その結果、導体の上部は磁力線の密度が高くなり、下部は密度が低くなる。導体は磁力線密度の高いところから低いところへ押し出されるような力を受けることになる。つまり、図3のように導体には下向きの力が働くことになる。導体を止めておこうとする力がなければ、導体は下向きに運動を始める。これが電動機の回転原理となっている。

また、この図に合わせて、左手の人さし指を磁界の方向に、中指をこれと直角に電流の方向に向けたとき、これらに垂直に向けた親指の方向が導体の受ける力の向きを表すことになるというのがフレミングの左手の法則である（図4）。



図2 右ねじの法則

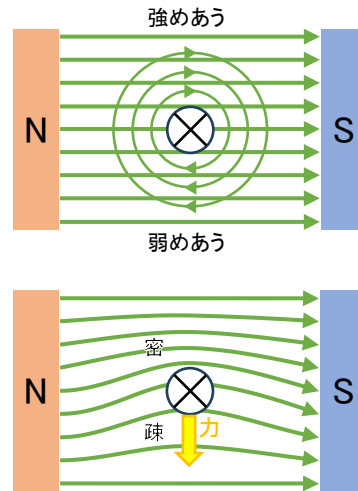


図3 導体に働く力

フレミングの左手の法則

磁界の中にある導体に電流が流れると、電流が磁界から力を受ける。電流の向き、磁界の向き、と受ける力の関係を覚えやすくしたのがフレミングの左手の法則である。左手の親指、中指、人差し指をそれぞれ直角に広げたとき、

中指	電流の向き
人差し指	磁界の向き
親指	力の向き



を表わしている。

図4 フレミングの左手の法則

コラム アラゴの円盤

日本の硬貨はアルミニウムや銅、真鍮などの非磁性材料で作られている。水に浮かべた発泡スチロールの上に1円硬貨を並べ容器のふたをし、その上で磁石を回転させる。すると、硬貨を乗せた発泡スチロールの円盤が回転する。硬貨は非磁性材料であるので、磁力の吸引力による回転ではない。磁石の回転によって硬貨に誘導起電力を生じ、そのうず電流と磁力の影響でトルクを生じ回転している。

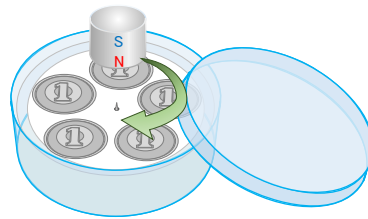


図5 アラゴの円盤



3. 三相誘導電動機の構造

誘導電動機は、シャフト（軸）と、一体に回転する回転子（ロータ）、回転子と相互作用してトルクを発生させる固定子（ステータ）、回転するシャフトを支えるベアリング、発生した熱を逃がす冷却ファン（外扇）、それらを保護するフレーム、ブラケット等から構成される。回転子には、溝を軸方向に対して斜めに切った斜溝回転子がよく使われている。そうすることで、回転子の位置に関わらず始動トルクが一樣になり、磁気的うなり音も小さくなる。かご形誘導電動機の固定子と回転子の隙間は、効率や力率を向上させるため極めて狭くなっている。

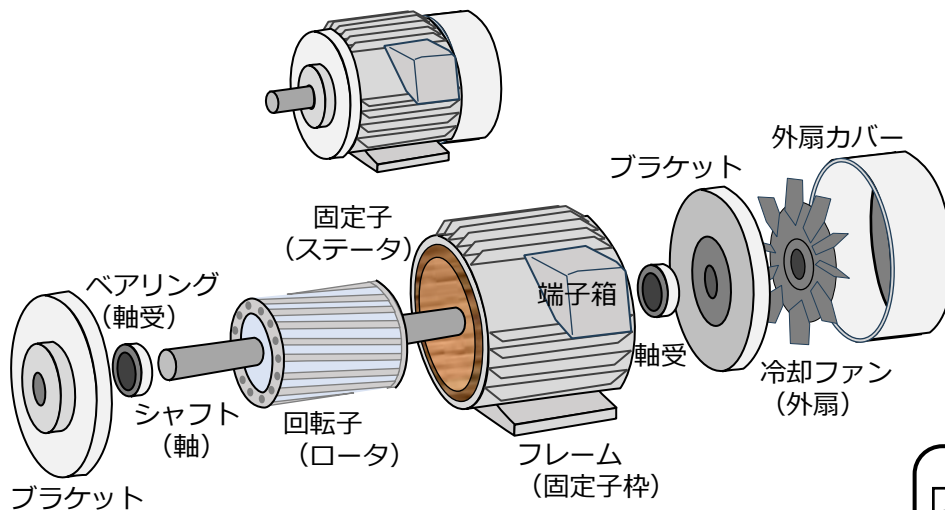


図6 誘導電動機の構造



回転子は軸、鉄心、巻線の三つの主要部分から成立っている。回転子の鉄心には固定子鉄心と同じけい素鋼板を用いるのが普通で、1枚1枚に絶縁を施すのも同様である。また、スロット内に納めるコイルの種類によって、回転子がかご形回転子(図7)と巻線型回転子との二つに大別される。

ビル建物の設備に使用される誘導電動機は37kW程度以下のかご形がほとんどであり、回転子鉄心のスロットに同じ形の銅またはアルミの棒をはめ込み、その両端を短絡環(エンドリング)で短絡したものである。鉄心を取り去ると、図8のようなかご形になっているので、この名前がついている。

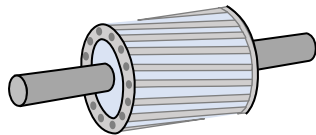


図7 かご形回転子

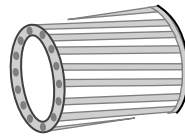


図8 かご形導体

4. 三相誘導電動機の回転原理

右図は三相誘導電動機の固定子巻線を簡略して表したものである。A、B、Cの3つのコイルが 120° ずつ、ずらして配置してあり、それらに図9の三相交流電流を流した場合を考える。

①のタイミングではコイルAにはプラスの電流、BおよびCにはマイナスの電流が流れている。プラスの電流を流れ込む向き、マイナスの電流を流れ出す向きと仮定する。その様子を固定子断面図に書き込んだものが図10である。

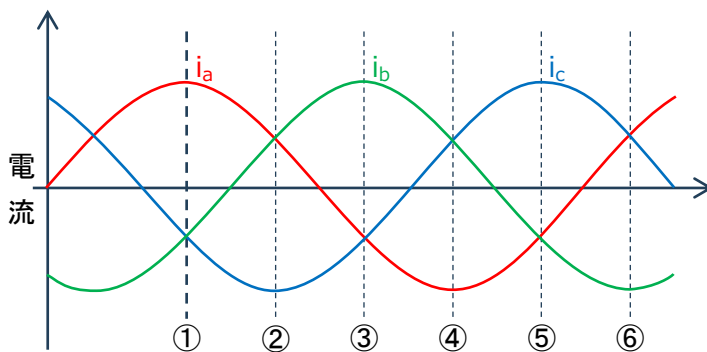


図9 三相交流

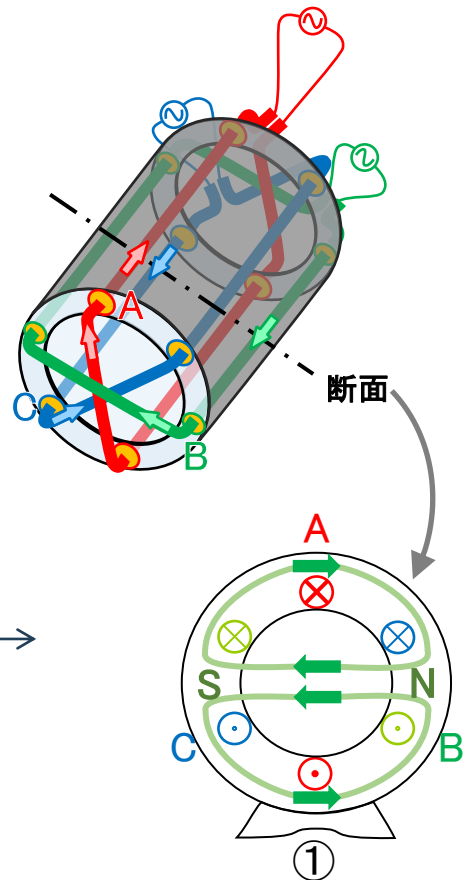


図10 固定子巻線

更に、②～⑥のタイミングでの電流の向きと、その電流によって発生する磁力線を書き込んだものが図 11 である。磁力線の向きに注目すると、時間と共に 2 極 (N、S) の磁界が時計回りに回転しているのが分かる。これを回転磁界という。

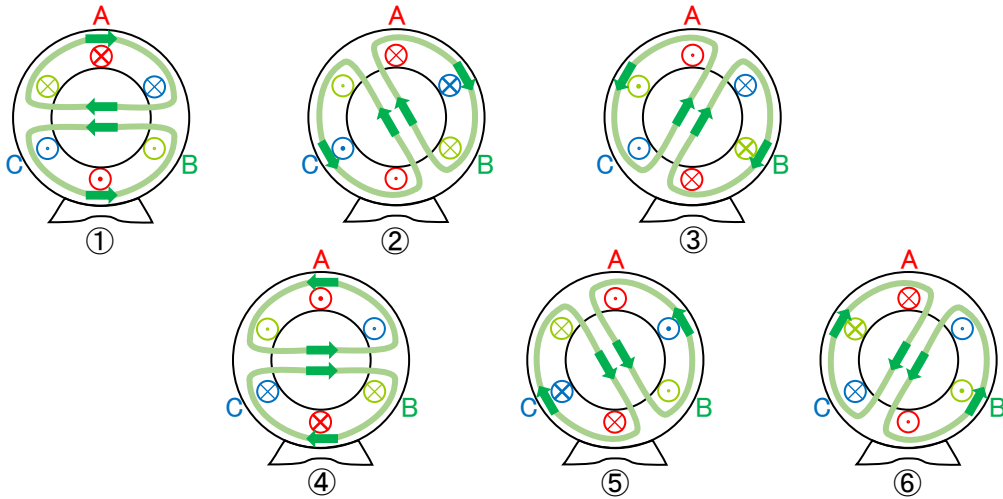


図 11 回転磁界 (2 極機)

5. 極数

下図は 6 ページ図 9 の三相交流電流において、①のタイミングを表している。固定子巻線の巻き方をアレンジすることで磁極の数を変えることができる。磁極の数を極数といい、N 極・S 極がペアになるため 2 極, 4 極, 6 極, . . . と偶数になる。

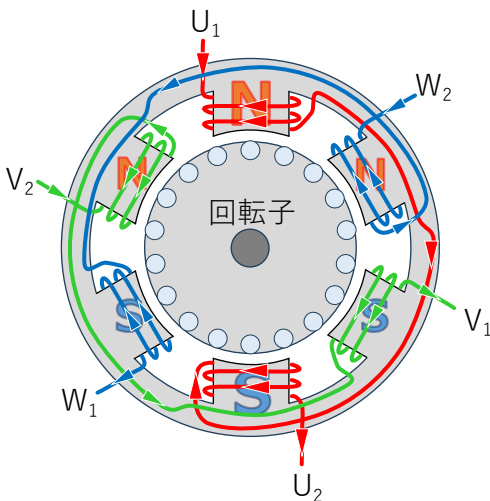


図 12 2 極機

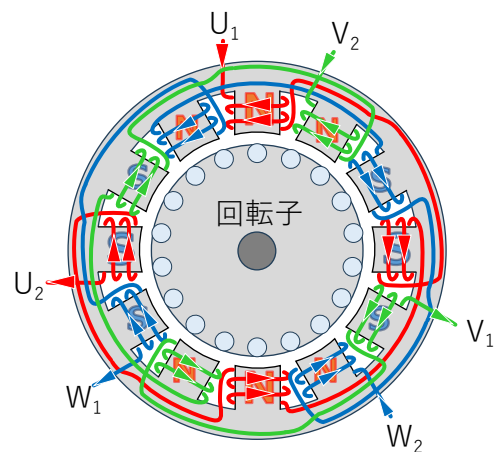


図 13 4 極機

6. 同期速度（極数と周波数）

回転磁界の回転速度を同期速度という。2極機の場合は、前述のように交流1サイクルで1回転（360°）する。仮に60Hzの電源であれば1秒当たり60回転、通常電動機の回転速度は1分当たりの回転数で表され、 $60\text{sec}^{-1} \times 60\text{秒} = 3600\text{min}^{-1}$ となる。

4極機の場合、交流1サイクルで1/2回転（180°）するため、同期速度は 1800min^{-1} 。6極機の場合、交流1サイクルで1/3回転（120°）するため、同期速度は 1200min^{-1} となる。以上のことから、同期速度 N_s の一般式は次式となる。

$$N_s = 120 \cdot f / p \quad f : \text{周波数、} p : \text{極数}$$

7. 電磁誘導、すべり

先に述べたように、フレミングの左手の法則により電動機は回転する。回転磁界からの力を受ける導体は回転子側になる。この回転子に電流を流すのが電磁誘導現象である（図14）。2極機の場合、停止時に回転子と同期速度との速度差は最大で 3600min^{-1} となる。電磁誘導によって生じる誘導起電力の大きさは、その回路を貫く磁束の変化のスピードに比例することから、停止時に回転子には最大の電流が流れる。力を受けた導体（回転子）は速度を増加していくが、同期速度に達することはない。仮に回転子が同期速度に達したとすると、回転子と同期速度の速度差がゼロになり誘導起電力もゼロになる。その結果、導体（回転子）には力が生じなくなり、速度は減少する。実際には負荷トルクと電動機トルクがバランスする点で運転することになる（10ページに詳細）。回転子速度は同期速度より少し遅くなるため、この現象をすべりと呼んでいる。すべりの大きさは小容量のもので7%程度、大容量のもので3%程度となる。

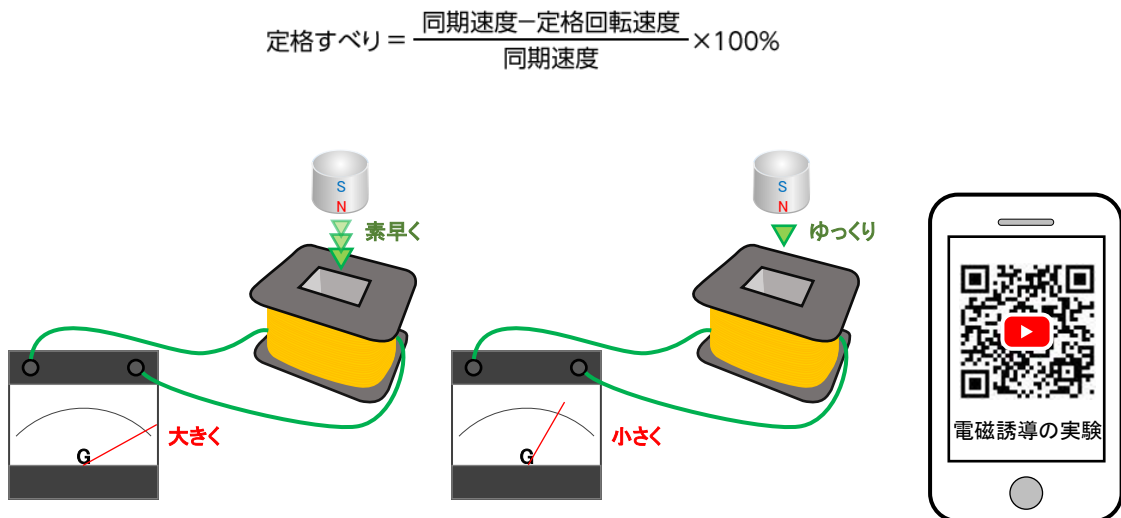


図14 電磁誘導の実験

8. 誘導電動機の運転特性とその選定

かご形誘導電動機は、負荷と接続して一定電圧・一定周波数（例えば 200V・60Hz）の商用電源を投入した時、始動→加速→一定速に到る過程でのトルク、電流は回転速度によって変化する基本特性がある。一般的に、図 15 のような回転速度とトルクおよび電流の関係となる。従って、運転時に能力（定格）を超えての過負荷にならない電動機を選定する必要がある。

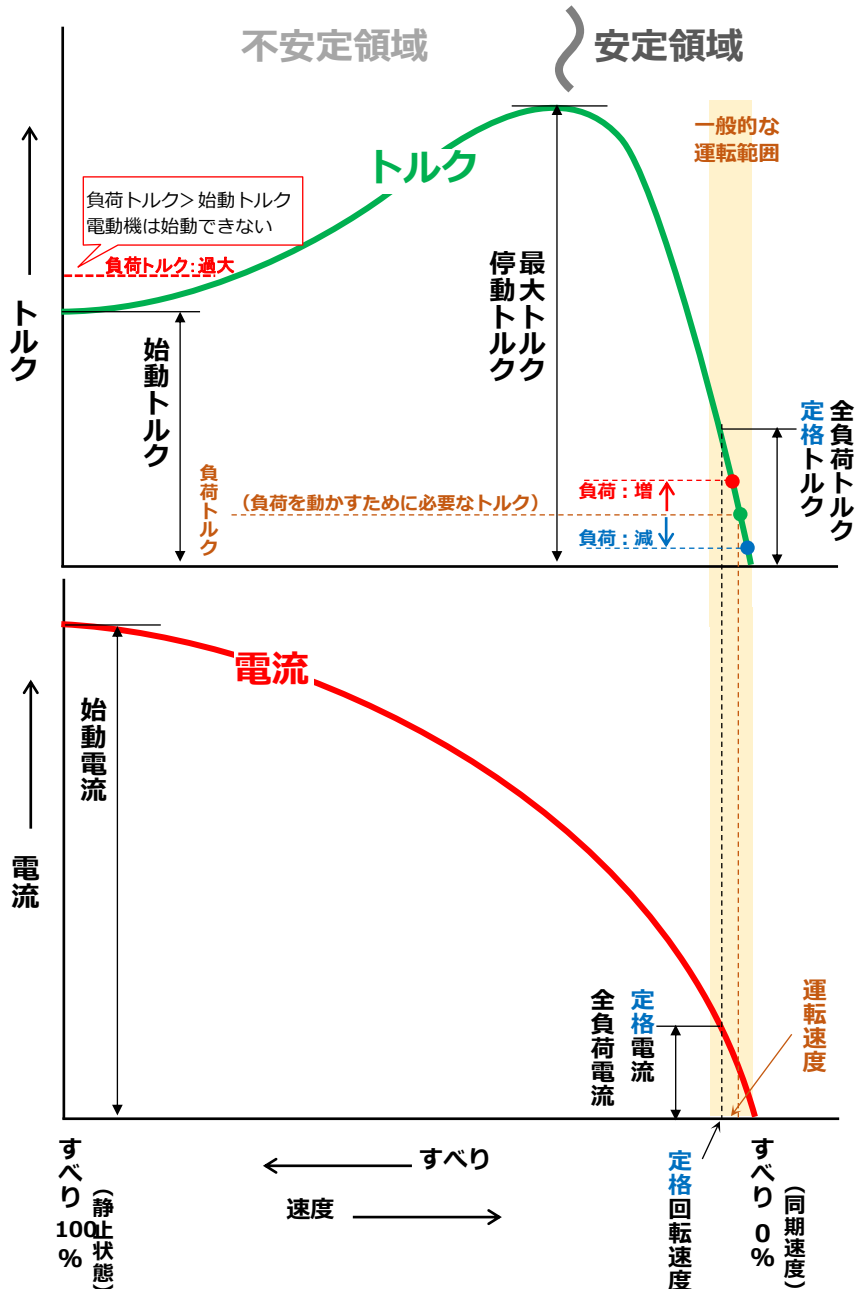


図 15 誘導電動機の特性格線（速度—トルク、速度—電流）
（すべり） （すべり）

8.1. 速度－トルク特性（回転速度とトルクの関係）

電動機の発生するトルクを電動機トルク、負荷の要求するトルクを負荷トルクという。始動時の電動機トルク（始動トルク）は定格トルクの2～3倍になるが、負荷トルクが始動トルクより大きい場合、電動機は始動できない。始動トルクが負荷トルクより大きい場合、そのトルク差は回転速度を上げるために使用でき、回転速度は上昇する。回転速度が上昇するにつれて電動機トルクは徐々に増加して、最大トルクに達した後は減少し、最終的に負荷トルクと電動機トルクがバランスする点で回転速度は安定する。

例えば、図15において●点で運転が安定しているとする。負荷トルクが増えると、回転速度は減少するが、電動機トルクが増加するので（●点）結果的には極端に回転速度が下がることは無い。また、負荷トルクが減ると、回転速度は増加するが、電動機トルクが減少するので（●点）極端に回転数が上がることは無い。つまり、定格回転速度近くの領域では事実上の定回転電動機となる（＝安定領域）。

誘導電動機は能力に対して負荷が大きすぎて始動できなかつたり、負荷の慣性モーメントが大きく始動に時間がかかたりする場合、定格を超える電流が長時間流れ、巻線を焼損する恐れがある。そのため、電動機出力・始動方式の選定に当たっては相手機械の起動トルクや運転トルク等の負荷の特性を十分に確認することが必要である。また、電動機の回転中でも負荷トルクが最大トルクよりも大きくなると、電動機は減速して最終的には停止する。このため最大トルクのことを停動トルクとも言う。

8.2. 速度－電流特性（回転速度と電流の関係）

直入れ始動の場合、始動時に二次回路（回転子）にはその回路のインピーダンスを通じて大きな二次電流が流れる。一次側（固定子）はこの二次電流による起磁力の影響を受け、定格を超える大きな一次負荷電流（始動電流）が流れる。商用電源で直入れ始動の場合は、定格（全負荷、100%負荷）電流に対して最大6～8倍程度の始動電流が流れ、回転速度が上昇するにつれて減少する。負荷が繋がれていない運転状態（無負荷運転）でも電流は流れている。つまり、始動時には大きな電流が流れることを想定する必要があるが、ある回転速度以上になれば大きな電流は必要でなくなる。

例えば、速度－トルク曲線において定速運転状態から電動機にかかる負荷が大きくなると、電動機トルクと負荷トルクがバランスする点が左上に移動する。その結果、回転速度は低下し電流は増加する。逆に負荷が小さくなるとバランスする点が右下に移動、回転速度は同期速度に近づくように上昇し電流は減少する。電動機に流れる電流が増加して過大になると、巻線が発熱し温度が上昇して遂には焼損してしまう。従って、電動機の通常運転範囲は、必要以上の負荷がかからない、つまり連続運転できる定格トルクの範囲で運転する必要がある。

別冊の【誘導電動機の各種試験と回路定数（ビジロ補足資料）】もご確認ください。運転特性について等価回路および数式を用いて説明しています。

9. 温度上昇限度（最高使用温度）

一般に電気機器を使用するとき、巻線による抵抗損、鉄心の鉄損などによって内部に熱を発生し、電気機器の温度を上昇させる。温度は機器の損失により発生する熱量と放熱する熱量が等しくなるまで上昇する。機器の絶縁はその耐熱特性から、Y、A、E、B、F、H、N、Rおよび250°C以上に区別され、それぞれの許容最高温度が定められている（表1）。

表1 耐熱クラスおよび温度(JIS C 4003 : 2010)

耐熱クラス(°C)	指定文字
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	N
220	R
250	-

一般に汎用の電動機の耐熱クラス（絶縁種別）は次のようになっている。

低圧かご形誘導電動機	120(E)
高圧かご形誘導電動機	130(B)
巻線型誘導電動機	155(F)
直流電動機	155(F)

ただし、絶縁物の耐熱性の良さは電動機の小形・軽量化につながることから、最近では低圧かご形誘導電動機に130(B)が、高圧かご形誘導電動機に155(F)が採用されたり、直流電動機では180(H)に移行されたりしつつある。

電気機器の温度上昇が高すぎると絶縁物は劣化し、寿命が短くなるばかりでなく、巻線の短絡や地絡などの故障の原因となる。絶縁材料は、使用温度10°C上回るごとに寿命が半減するといわれている。したがって、電気機器を運転するにあたっては温度上昇に十分注意することが大切である。

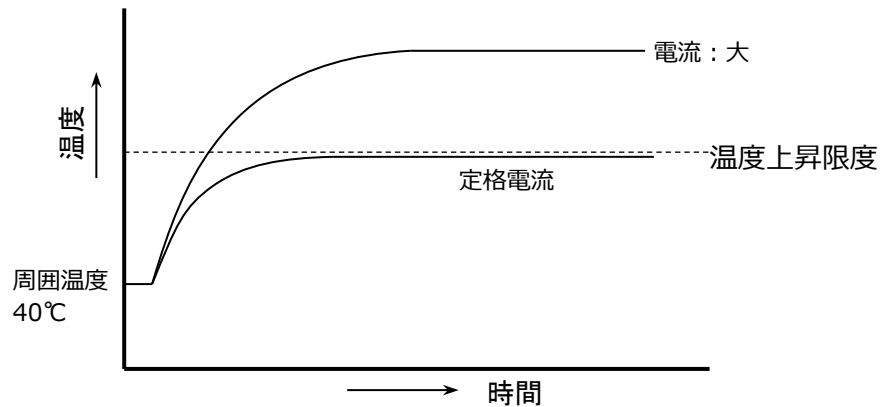


図 16 温度上昇曲線

定格 (Rating) には、連続定格、短時間定格などがある (JIS C 4034-1 : 2023)。連続定格 (S1, continuous) とは指定された条件のもとで連続使用し、定められた温度上昇限度を超過しないような定格で、一般の電気機器は連続定格である (図 16)。短時間定格 (S2) とは一定短時間 (例えば 30 分や 1 時間など) 指定された条件のもとで運転したとき、定められた温度上昇限度を超過しないような定格である (図 17)。また、反復定格 (S3 %) というものもあり、クレーンなど運転と停止を繰り返す用途の電動機は、例えば S3 15% のように断続的反復使用の記号 S3 のあとに負荷時間率 15% を付記する。負荷時間率の 15% は 1 周期 10 分間において、運転時間 1.5 分間、休止時間 8.5 分間を表している。

固定子巻線温度は電動機表面温度より 15~30°C 高いと考えられるので、E 種絶縁 (120°C) の低圧かご形誘導電動機の場合、表面温度が 90°C 以下で運転しなければならない。

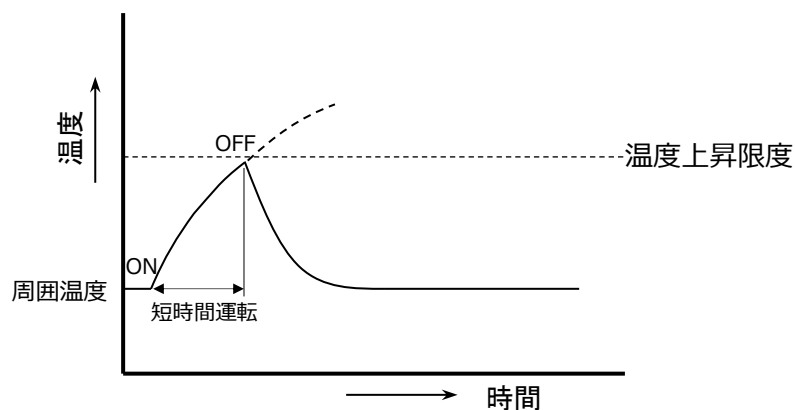


図 17 短時間定格

ちなみに、元々の絶縁階級は、A、B、Cの3区分であった。第二次大戦中に180°Cという高温に耐える「シリコンレジン（ワニス）」が開発され、H種と命名され、その後、「ポリエステル」が開発されてE種となり、更に「シリコン」と「ポリエステル」を掛けあわせた材料がF種として追加され、現状に近いものとなった。

10. 誘導電動機の外被方式

10.1. 保護方式

誘導電動機の保護方式（IP表示：Ingress Protection）は以下のように分類されている（JIS C 4034-5：1999）。保護形式の記号はIPのあとに第1記号（表2）、第2記号（表3）を並べて表記する。記号は、それ以下の数字の保護の程度は全て満足している。

表2 人体および固形異物に対する保護方式（第1記号）

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回転機 (無保護形)	特別の保護を施していない構造
1	50mm 超過の固形異物に対して 保護を施した回転機(半保護形)	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、または不注意に接触したり接近したりしない構造(ただし、故意の接近に対しては無保護) 直径 50mm 超過の固形異物が侵入しない構造
2	12mm 超過の固形異物に対して 保護を施した回転機(保護形)	80mm 長さを超えない指また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 12mm 超過の固形異物が侵入しない構造
3	2.5mm 超過の固形異物に対して 保護を施した回転機(閉鎖形)	直径 2.5mm 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 2.5mm 超過の固形異物が侵入しない構造
4	1mm 超過の固形異物に対して保 護を施した回転機(全閉形)	直径 1mm 超過のワイヤまたは小薄片が、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 1mm 超過の固形異物が侵入しない構造
5	じんあい(塵埃)に対して保護を 施した回転機(防じん形)	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

表3 水の浸入に対する保護方式（第2記号）

第2数字 記号	保護の程度	
	概要	概要
0	保護を施していない回転機（無保護形）	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回転機（防滴形1）	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回転機（防滴形2）	通常の設定位置から15°まで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回転機（防雨形）	鉛直方向から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回転機（防まつ形）	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	波浪に対して保護を施した回転機（防噴流形）	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	噴水流に対して保護を施した回転機（防波浪形）	波浪あるい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侵入しない構造
7	浸水に対して保護を施した回転機（防浸形）	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侵入しない構造
8	水中の使用に対して保護を施した回転機（水中形）	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 備考：通常これは回転機が密封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

<表記例>

第1記号 第2記号

I P 4 4

全閉形/防まつ形

10.2. 冷却方式

回転機の冷却方式（IC 表示：Ingress Protection）は次の組み合わせによって分類されている（JIS C 4034-6：1999）。

- (1) 冷媒の通路および熱放散の種類による形式
- (2) 冷媒の種類による形式－空冷形、水クーラなど
- (3) 冷媒の送り方による形式－自由通流形、外被表面冷却形など

以下に、代表的なものを挙げる。

表 4 回転機の冷却方式

通路方式	0	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、回転機を冷却してから、自由に直接周囲媒体に戻る
	4	外被表面冷却形	一次冷媒は回転機中の閉じた通路を循環し、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。
	6	取付熱交換器形	一次冷媒は閉じた通路内を循環し、回転機に直接取り付けられ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。
冷媒	A	空気	※ A の場合は簡易記号では省略する
	W	水	
冷媒の送り方	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り通流する
	6	他力通流 (強制冷却ファン)	冷媒は主機に取り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。

回転機の冷却形式の記号は IC のあとに上記(1)～(3) 項のそれぞれの形式記号を並べて表現するが、記号を全て並べると複雑になるため簡易記号方式が使用されている。

<表記例> 通路方式 一次冷媒の送り方 二次冷媒の送り方

IC 4 A 1 A 1 完全記号方式

↑ ↑

一次冷媒 二次冷媒

IC 4 1 1 簡易記号方式

外被表面冷却/自力通流（空冷）

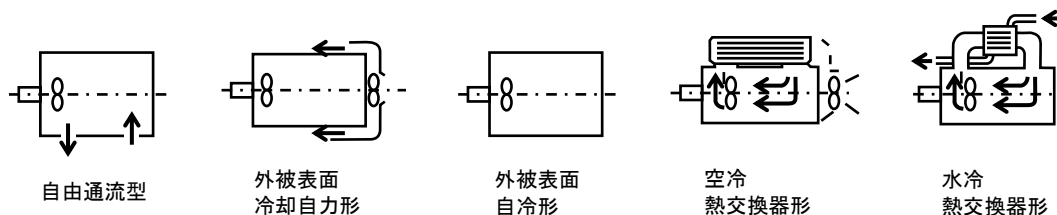


図 18 回転機の冷却方式

11. 負荷特性

三相かご形誘導電動機の諸特性は、図 19 のように負荷の大きさにより変化する。全負荷（負荷率 100%）より右側の範囲では定格電流を超えるため連続運転に耐えられない。従って、全負荷より左側の範囲で運転する必要がある。また、負荷率の低い範囲で運転すると、効率・力率が悪く損失が多くなる。従って、図 19 の効率や力率が良い緑色の範囲で運転できる電動機を選定する必要がある。

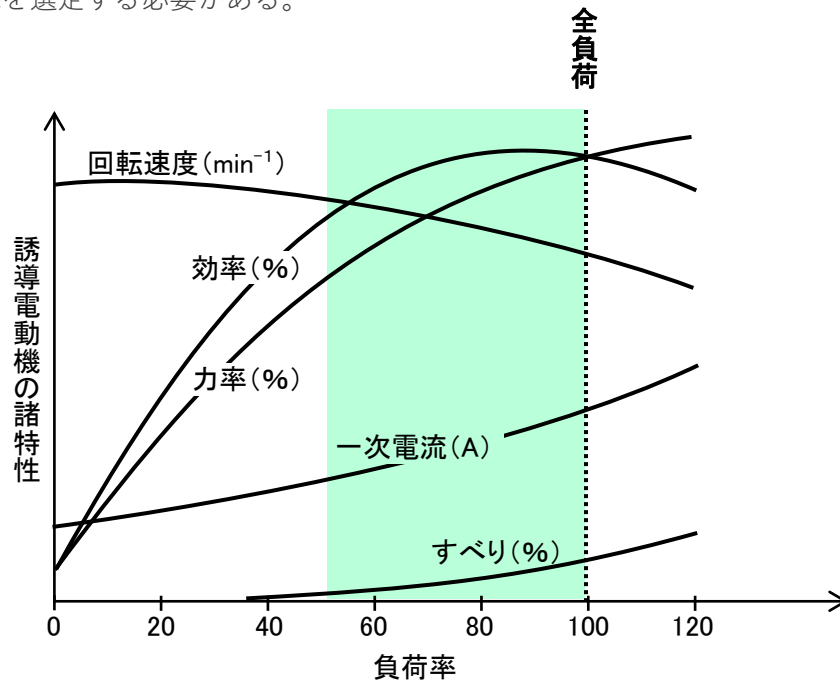


図 19 負荷特性

11.1. 効率と損失

電動機の効率は一般的に下式のように表される。

$$\text{効率(\%)} = \frac{\text{出力}}{\text{入力}} \times 100 = \frac{\text{入力} - \text{損失}}{\text{入力}} \times 100$$

出力 = 入力 - 損失から、損失は入力 - 出力として定義され、銅損、鉄損等の電気的な損失と、軸受けの摩擦損失や冷却ファン損失による機械的な損失等からなる。

損失には負荷に無関係にほぼ一定の鉄損（無負荷損）と、負荷の二乗に比例する銅損（負荷損）とがある。負荷が小さい時には、鉄損の影響が大きくなり効率が低下する。負荷が増えると効率が增大するが、あるところを過ぎると負荷の増大による銅損の増大の割合が大きくなり効率が低下する。一般的には定格負荷運転付近（余裕を見て負荷率 80~90%あたり）で効率が最大となるように設計してある（図 19）。

鉄損は主としてヒステリシス損とウズ電流損からなる。ヒステリシス損は鉄心内の磁束方向の変化によって、鉄心中の磁気分子の方向と配列が変化し、分子相互間で摩擦が生じることによる損失であり、ウズ電流損は鉄心に流れるウズ電流により鉄心にジュール熱が発生し生じる損失である。一方、負荷損の大半は銅損であり、巻線抵抗と負荷電流により発生するジュール熱である。

また、鉄損と銅損以外に機械損がある。機械損には軸と軸受間の摩擦損ならびに回転部分と空気との摩擦による風損などがあり、速度によってその値が変化し、速度が一定であれば負荷電流に関わらずほぼ一定とみなされる。

標準的な電動機の場合、効率の最高値は75～90%前後で、大容量になるほど効率が高くなり、小容量になるほど低下する。

11.2. 力率

誘導電動機の力率は定格負荷では一般的に0.7～0.9程度で、電動機容量が大きいものほど大きくなる。又、負荷率の高低によっても力率は変化し、負荷率が高いほうが大きくなる（図19）。誘導電動機に流れる電流を大きく分けると励磁分電流（固定子コイルに流れ、鉄心などの磁性体を磁化するの目的）と、トルク分電流（かご型回転子側に流れ、トルクを発生するための電流）のベクトル和として表される。励磁分電流は固定子コイルに流れる電流なので、90°遅れの電流が流れ、負荷電流の大きさに関わらず一定である。一方、負荷によって変化するトルク分電流は負荷率が低くなると小さくなり、負荷率が高くなると大きくなる。無負荷状態で誘導電動機を運転すると、トルク分電流は殆んど流れないので力率は0%近くになる。

低すぎる力率は電源側の負担となるので、0.7以上の範囲で使うことができるような電動機を選定すべきである。実際の設備においては誘導電動機に並列にコンデンサを設置し、力率を補償しながら運転している。



12. 負荷の種類と速度特性（トルク、出力）

ある負荷を負って安定に運転を継続するのに必要な電動機出力容量を所要出力という。電動機によって負荷を運転する場合、電動機トルクと負荷トルクとが平衡した点の速度で運転されるので、安定した運転状態を得るには電動機特性とあわせて、負荷の速度特性を知る必要がある。負荷の速度特性と速度動力特性を大別すると表5および図20のようになる。

表5 負荷の種類と速度特性

負荷の種類	速度とトルクの関係	速度と出力の関係	負荷の例
定トルク負荷	トルク = 一定	出力 \propto 速度	エレベータ コンベア
低減トルク負荷	トルク \propto (速度) ²	出力 \propto (速度) ³	渦巻ポンプ 送風機
定出力負荷	トルク \propto (速度) ⁻¹	出力 = 一定	巻取機 切削工作機

定トルク特性をもつ負荷とは、回転速度を変化させてもトルクが変化しないもので、速度と出力が比例する種類をいい、エレベータや巻上機などが挙げられる。

低減トルク負荷特性は回転速度の2乗に対してほぼトルクが一定となる特性（トルクの発生曲線が2乗カーブになっている特性）で、かつ低速域では大きなトルクを必要としない特性を低減トルク負荷という。この特性を利用する例として、ファンやポンプなどの負荷が挙げられる。

定出力特性をもつ負荷とは、回転速度の可変範囲で常に一定出力を必要とするものである。例えば、定張力巻取機や、大きい物は低速で小さい物は高速で処理する工作機械、および圧延機などがある。

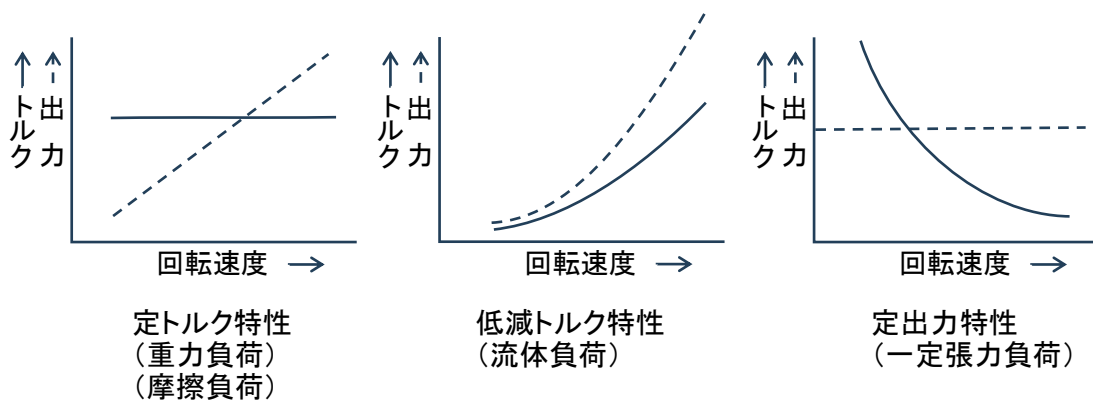


図20 負荷の種類と速度特性

12.1. 定トルク負荷と電動機の運転

ここでは定トルク負荷であるエレベータを例に考える。定員6名のエレベータに、子どもが3名乗っている場合と大人が6名乗っている場合を比較すると、当然後の方がワイヤを巻き上げるための力が必要な事が分かる。このような負荷を動かすに必要なトルクを負荷トルクという。負荷トルクは負荷の状況（何人乗っているか）によって変化し、誘導電動機の運転状況も変化する。

例えば、定員6名のエレベータに大人6名の乗客を乗せている状態を定格負荷という（日本のエレベータの場合、一人当たりの体重を65kgと設定しており、定員6名のエレベータは積載450kgである）。

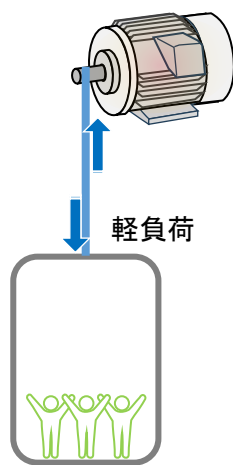


図 21 軽負荷運転
(イメージ)

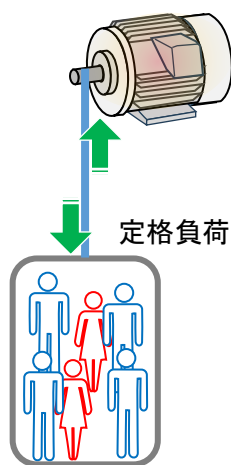


図 22 定格負荷運転
(イメージ)

実際のエレベータは重量オーバーになると安全装置が働き、ブザが鳴り運転できなくなるが、安全装置が無ければ誘導電動機は定格を超えて運転してしまう。これを過負荷運転という。

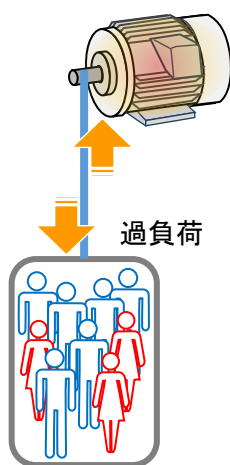


図 23 過負荷運転
(イメージ)

図 24 はエレベータの乗客数と電動機の運転状況をイメージした特性曲線である。運転中に負荷トルクが増えれば運転点は左上に、負荷トルクが減れば運転点は右下に移動する。例えば、定員 6 名のエレベータに 6 名の大人が乗っている場合が定格運転●である。速度および電流が定格速度、定格電流であり電動機の銘板に記載してある。定格は電動機巻線の温度上昇限度によって決まり、定格を超えて運転を続けると巻線の焼損につながるため、サーマルリレー等の過負荷保護装置で保護される。子どもが 3 名乗っている場合は定格以下（軽負荷運転）●で、定格運転時に比べ回転速度は速く、電動機電流は減少する。大人が 9 名乗っていれば過負荷運転●となり、定格運転時に比べ回転速度は遅く、電動機電流は上昇する。誘導電動機の軸に何も接続されていない場合は無負荷運転で、限りなく同期速度に近い速度で運転される。

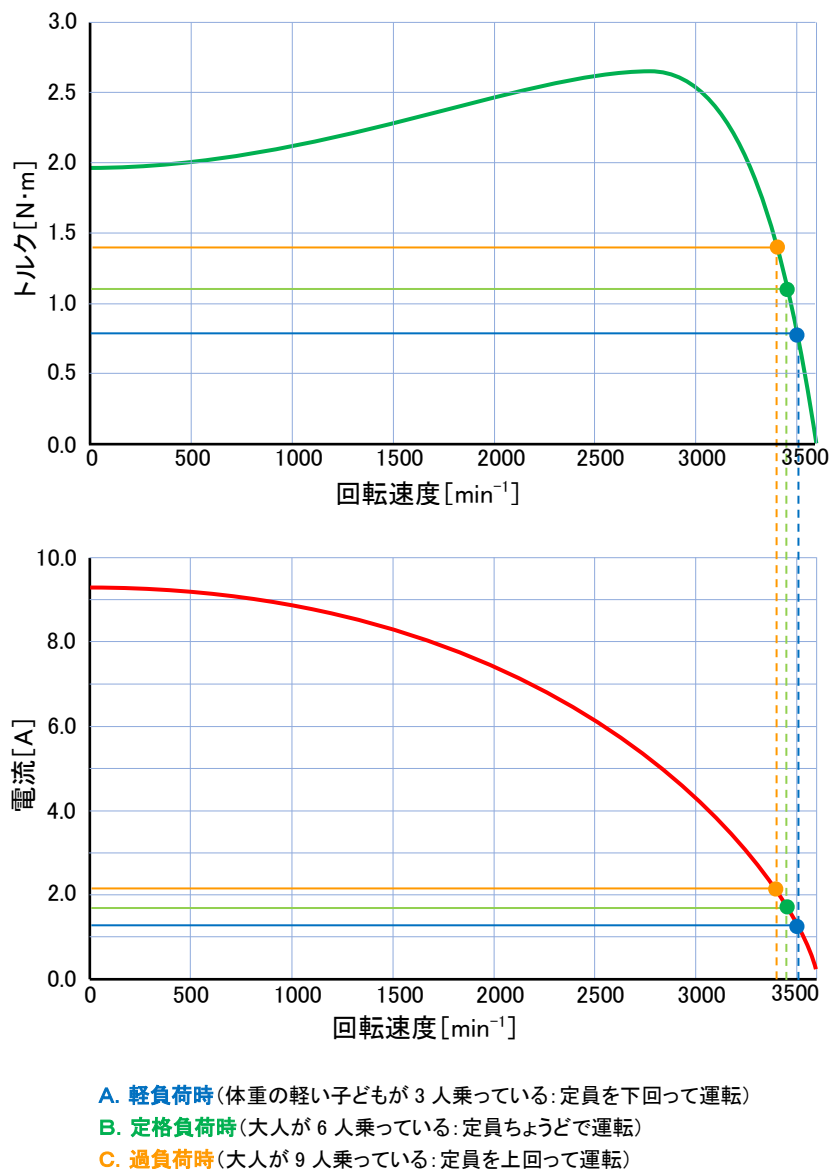


図 24 負荷の大きさと特性曲線

13. ビジロによる実習

本実習装置「ビジロ」は『電源・制御盤』、『動力伝達装置（電動機－発電機）』、『ハロゲンランプ負荷装置』からなる。直入れ始動で運転される誘導電動機からプーリ、ベルトを介して発電機に動力が伝えられ、発電された電力はハロゲンランプによって消費される。ハロゲンランプの負荷を増減すれば消費される電力の大きさが変わり、それが誘導電動機の負荷となる。負荷を変化した時の諸量を測定し、図 15 の誘導電動機の運転特性を確認する。また、運転の状況により変化する音や振動、温度等を五感使って確認する。

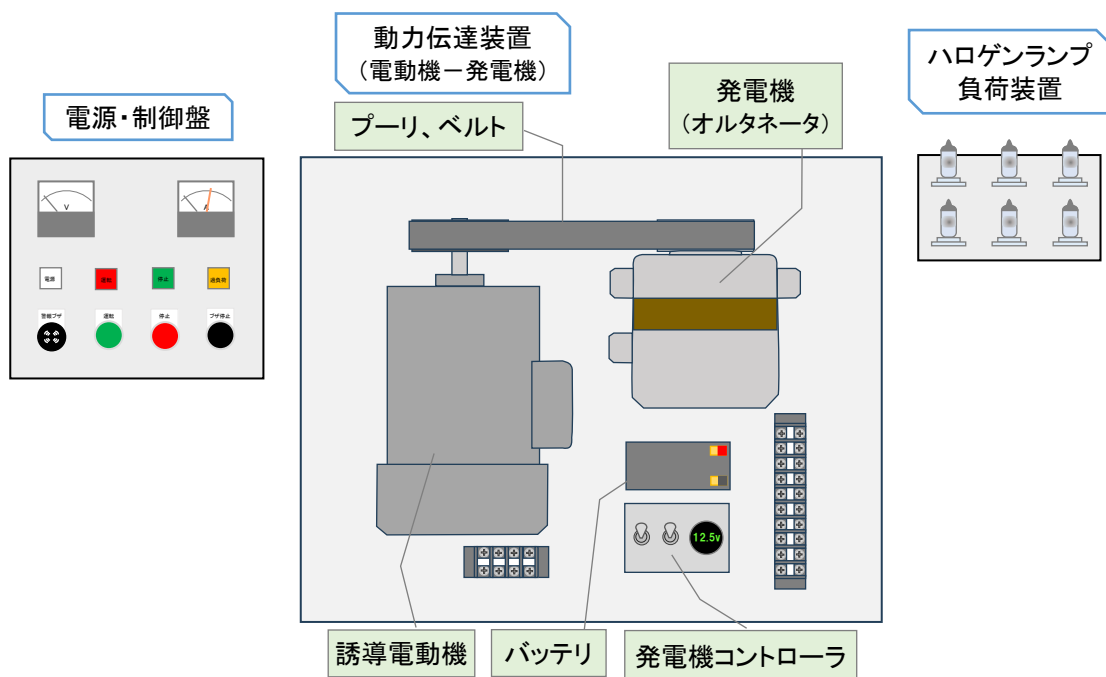


図 25 実習装置（ビジロ）

基本の操作手順

1. ハロゲンランプ負荷装置のスイッチOFFを確認
2. 電源を投入後、始動ボタンスイッチで電動機始動
3. 電圧計、電流計、回転数計を確認
4. 発電機コントローラで、界磁電源をON(直流電圧表示)
5. ハロゲンランプ負荷装置のスイッチ操作で負荷を調整
6. 各種測定(電圧、電流、電力、力率、回転速度、電動機表面温度、トリップ時間等)
7. 停止ボタンスイッチで電動機運転停止、界磁電源OFF
8. サーマルトリップの際は、ブザ停止スイッチで警報ブザ音を停止後、サーマルリレーリセットボタンにてサーマルリセット

実習 1 銘板の読み取り

誘導電動機の銘板または 30 ページの写真から定格を読み取り、能力を確認する。

表 6 銘板の読み取り

項目	読み取り	意味	参考ページ
メーカー			
型番			
定格出力	W	軸出力 電動機入力電力－損失	16
極数	P		7
周波数	60 Hz		
電圧	200 V		
定格電流	A	連続運転中に定格を上回らないように	
定格回転速度	min ⁻¹	連続運転中にこれを下回らないように	
フレームサイズ			
耐熱クラス	種 °C		12
保護方式		全閉/無保護型	13,14
冷却方式		外被表面冷却/自力通流型	15
定格の種類		連続定格	12
同期速度		回転磁界の速度 計算で求める	8
定格すべり		定格運転状態のすべり 計算で求める	8

実習2 軽負荷運転

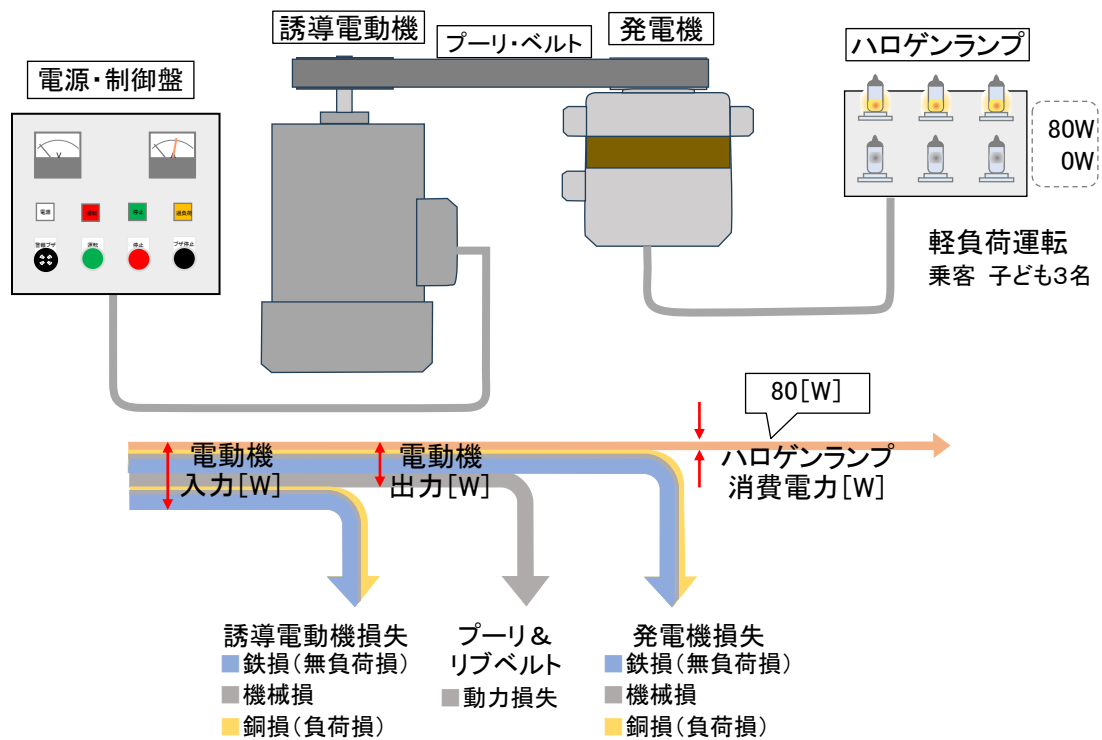


図26 軽負荷運転時の設定と装置の入出力イメージ

表7 測定結果（軽負荷運転）

制御盤電圧計	AC	V
制御盤電流計	AC	A
電動機入力電力	AC	W
電動機回転速度		min ⁻¹
発電機発電電圧	DC	V
電動機表面温度		°C
騒音測定		dB
力率		



図27 軽負荷運転30分後の表面温度（周囲温度20°C）



実習3 定格負荷運転

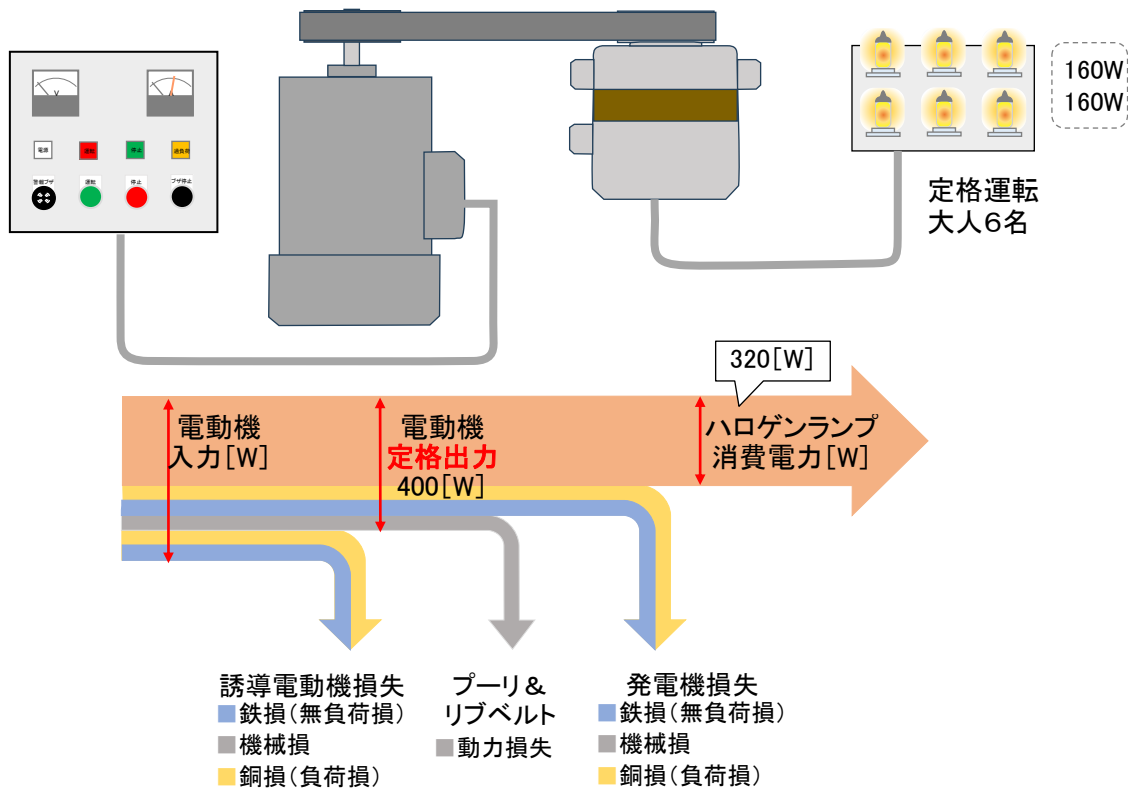


図 28 定格負荷運転時の設定と装置の入出カイメージ

表 8 測定結果 (定格負荷運転)

制御盤電圧計	AC	V
制御盤電流計	AC	A
電動機入力電力	AC	W
電動機回転速度		min ⁻¹
発電機発電電圧	DC	V
電動機表面温度		°C
騒音測定		dB
力率		



図 29 定格負荷運転 30 分後の表面温度 (周囲温度 20°C)



実習4 過負荷運転（サーマルトリップ確認）

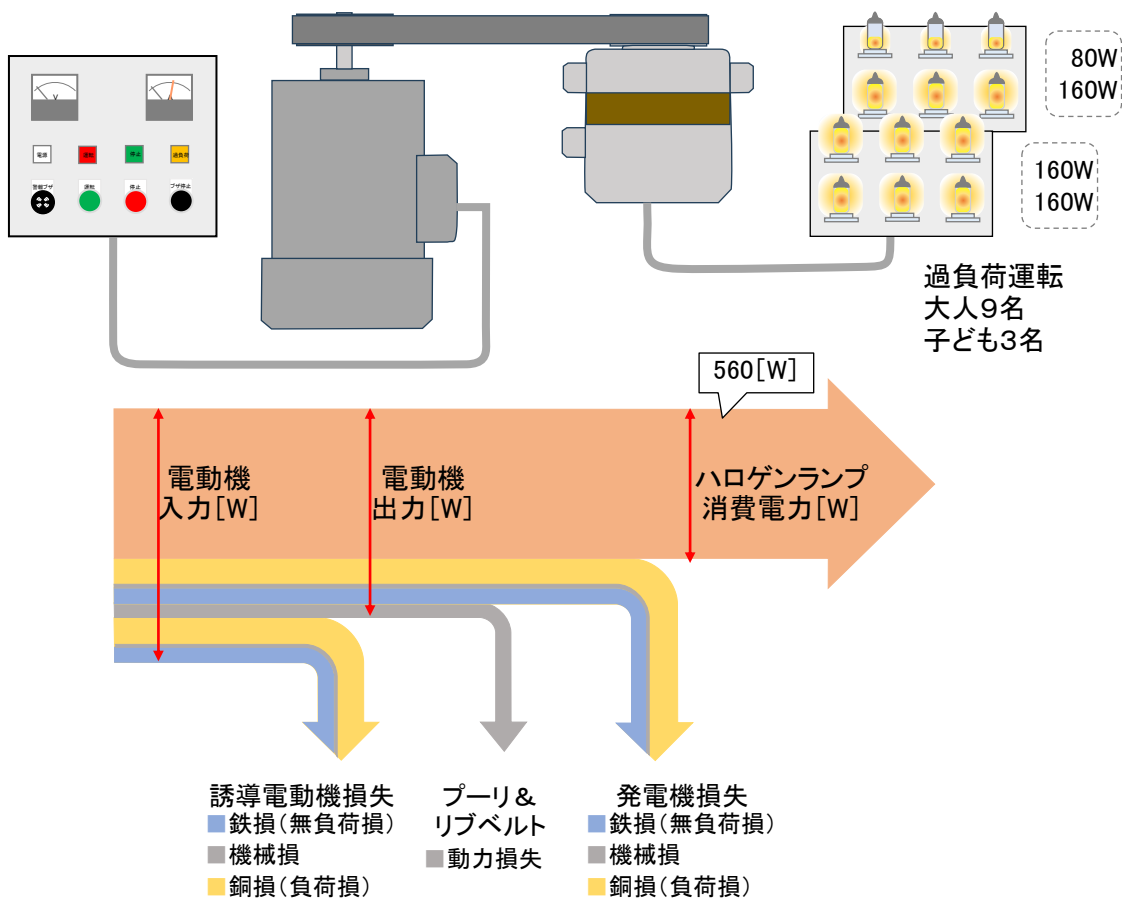


図 30 過負荷運転時の設定と装置の入出力イメージ

表 9 測定結果（過負荷運転）

制御盤電圧計	AC	V
制御盤電流計	AC	A
電動機入力電力	AC	W
電動機回転速度		min ⁻¹
発電機発電電圧	DC	V
電動機表面温度		°C
騒音測定		
サーマルリレー トリップ時間		
力率		



図 31 定格運転→過負荷運転トリップ時の表面温度（周囲温度 20°C）



実習5 超過負荷運転（停動トルク確認）

なるべく手早く測定する

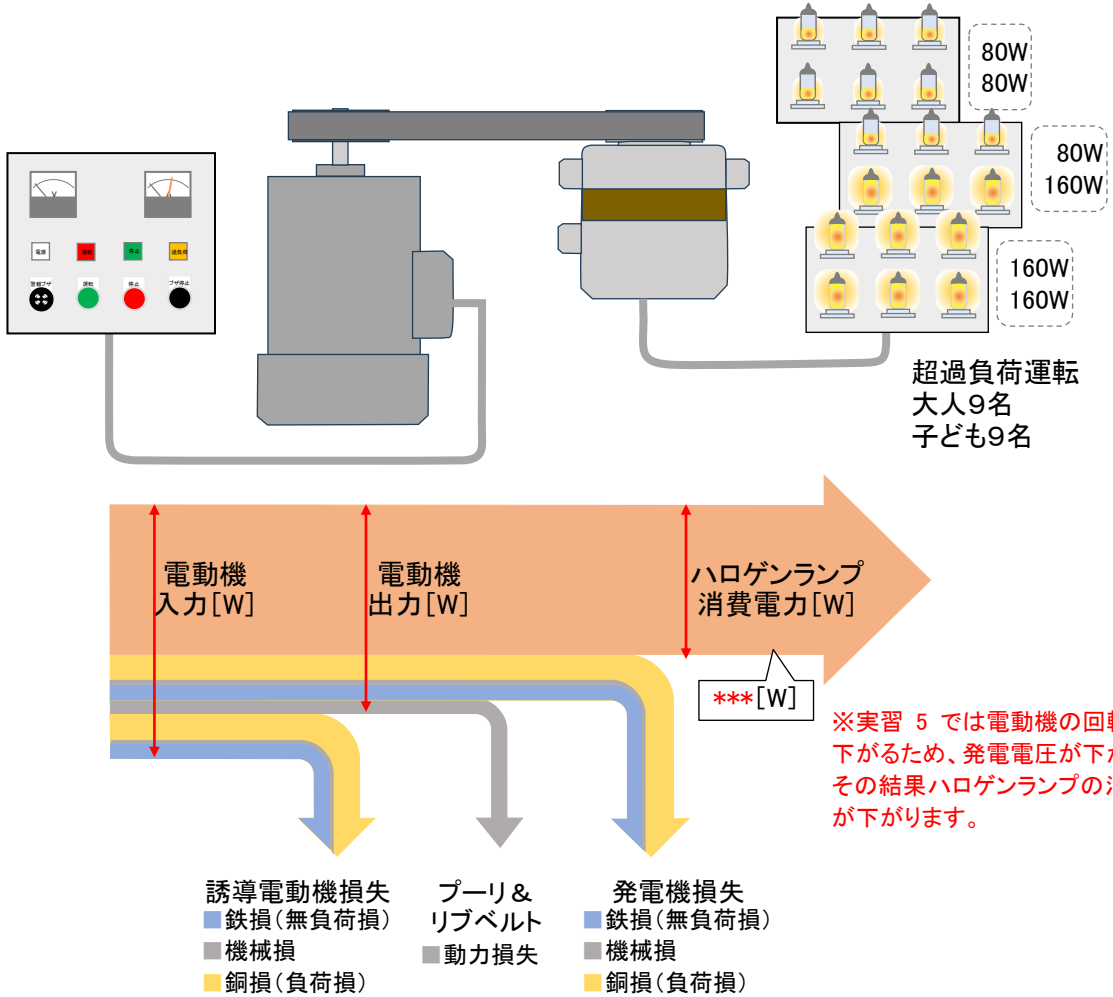


図 32 超過負荷運転時の設定と装置の入出力イメージ

表 10 測定結果（超過負荷運転）

制御盤電圧計	AC	V
制御盤電流計	AC	A
電動機入力電力	AC	W
電動機回転速度		min ⁻¹
発電機発電電圧	DC	V
電動機表面温度		°C
騒音測定		dB
サーマルリレー トリップ時間		



図 33 定格運転→過負荷運転トリップ時の表面温度（周囲温度 20°C）



実習6 測定結果まとめ

電流および回転速度を特性曲線上にプロットする

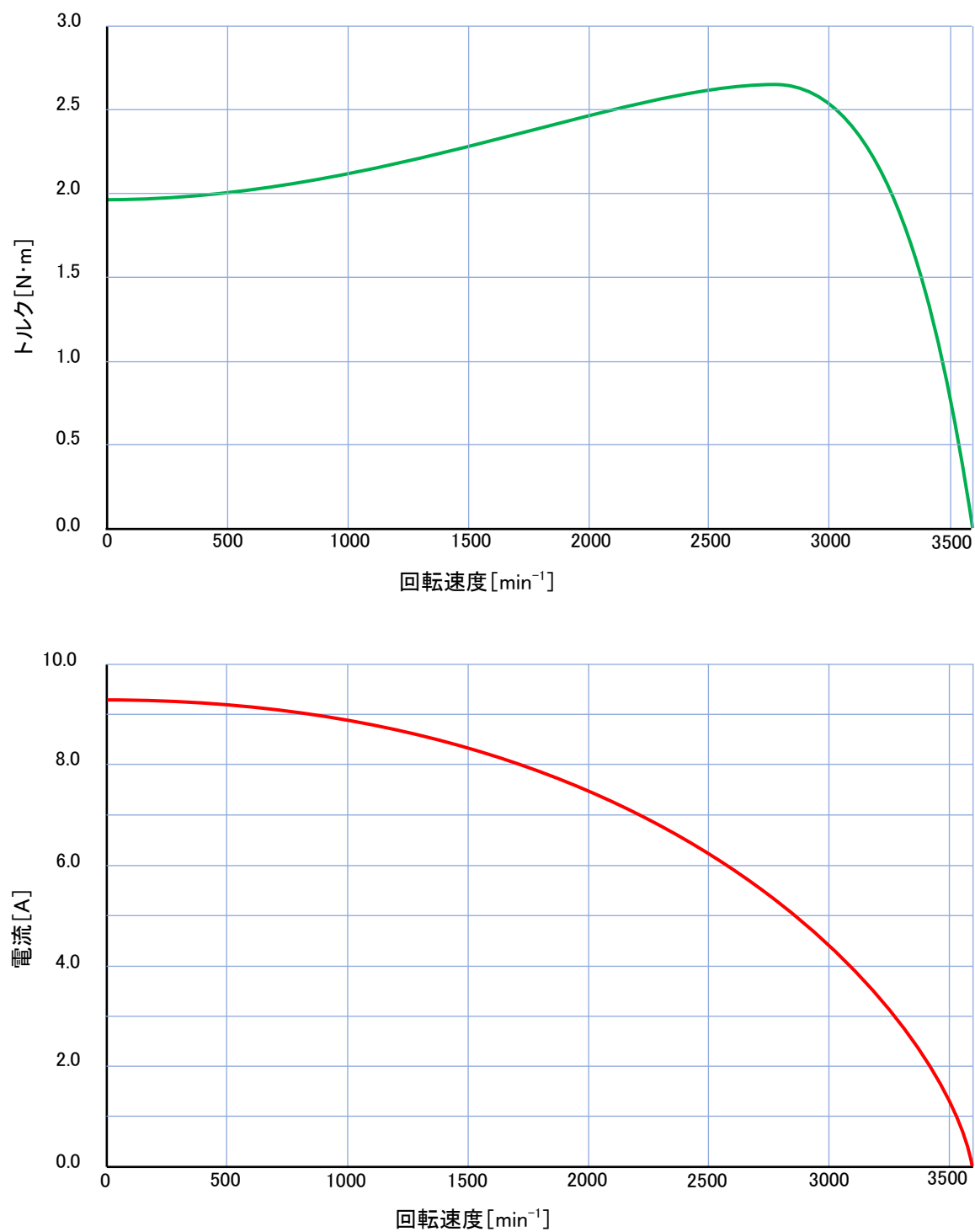


図 34 誘導電動機特性曲線（実習まとめ用）

14. 保護協調の考え方について

電磁開閉器は電動機の過負荷、拘束、欠相などによる焼損保護および通常の開閉操作を目的としている。過負荷以上の電流（定格電流の10倍以上）が短絡電流として流れる場合は、開閉・遮断能力はもたない。したがって、短絡時の過大電流に対する保護には、短絡遮断能力を持つ配線用遮断器や限流ヒューズなどの過電流遮断器を使用する必要がある。つまり、過負荷、拘束、欠相保護は電磁開閉器（サーマルリレー）で行い、短絡保護は過電流遮断器で行う保護協調が必要となる。

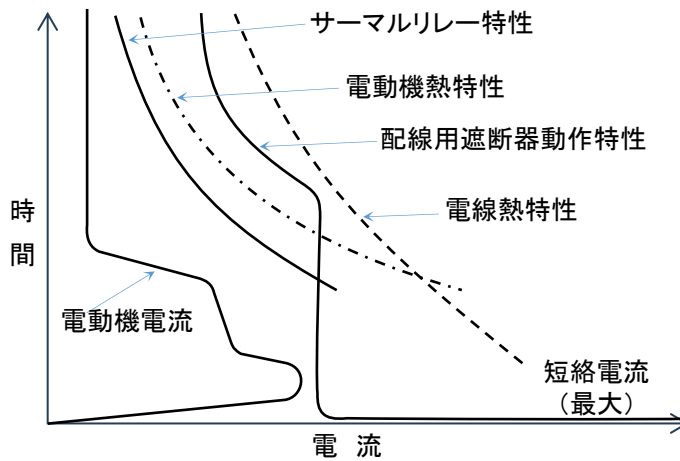


図 35 電動機の過負荷保護（保護協調）

この教材で使用しているサーマルリレー及びモーターブレーカの動作特性曲線は下図のとおりである。

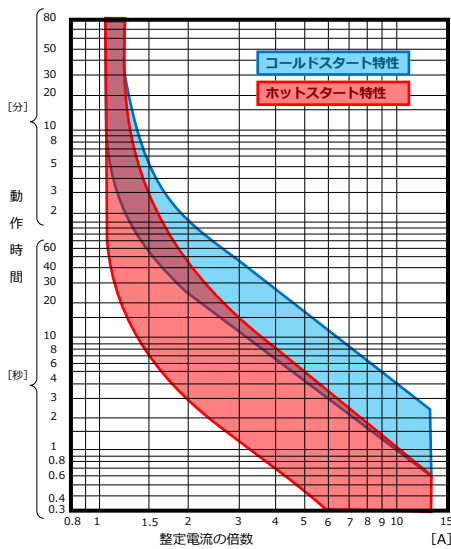


図 36 サーマルリレーの動作特性（富士電機 TR-0N 1.7A）

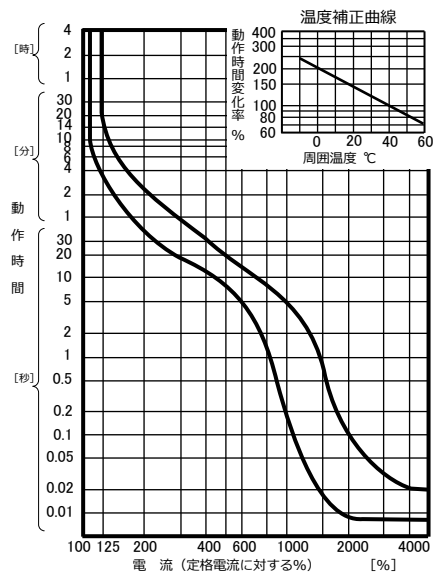


図 37 モーターブレーカ動作特性（パナソニック BBW 3025CMK）

運転前は電動機が冷えた状態であることから、運転開始時の過負荷保護特性をコールドスタートという。また、ホットスタートとは 100%負荷連続運転後の過負荷保護特性を示している。

15. サーマルリレーの動作確認

15.1. 過負荷時の動作

誘導電動機に過負荷になった際に、定格電流以上の過電流が流れるとサーマルリレーのヒータ部の過熱によりバイメタルが湾曲し（図 39）、その結果接点が動作する（サーマルトリップ）。リセットボタンにより復帰するが、バイメタルが冷めて元の形状に戻るまでにはリセットできない。

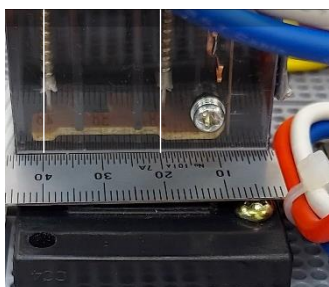


図 38 バイメタル
(無負荷運転時)

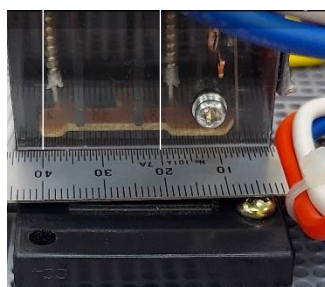


図 39 バイメタル
(トリップ時)



15.2. 動作特性の確認

実習 4 および **実習 5** で、運転電流とサーマルトリップ時間を測定し、図 36 の動作特性図で確認する。

16. 主要機器のスペック等

16.1. 三相誘導電動機

16.1.1. 外観および銘板

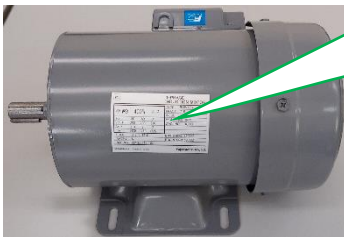


図 40 電動機外観

FE 400W 2 P			3-PHASE INDUCTION MOTOR	
Hz	50	60	60	TYPE MLH8075M
VOLT	200	200	220	FRAME 71M
AMP	1.9	1.7	1.7	INSUL 120(E)
min ⁻¹	2900	3475	3500	PROTECTION IP40
RULE	JIS C 4210		BRG D-END 6202ZZ	
RATING	S1		BRG N-END 6202ZZ	
SER NO.	227H00511 15			
YM5B4820-1 Made in Japan			Fuji Electric Co., Ltd.	

図 41 電動機銘板

16.1.2. 三相誘導電動機の検査成績表

誘導電動機検査成績表										品番コード MLH1244
INSPECTION REPORT OF INDUCTION MOTOR										
御注文主名 Customer					項目 Pos. No.					H0051
客先番号 Cust's No.					製造番号 Work No.					
機番 Serial No.					試験日 Test date					
用途 Service					承認 Approved by					作成 A.SATOJI

形式 Type	MLH8075M	枠番 Fram	71M	相数 Phase	3	出力 Out Put	0.4 kW	極数 Poles	2
電圧 Volt	200/200-220 V	周波数 Frequency	50/60 Hz	電流 Current	1.9/1.7-1.7 A	回転数 Revolution	2900/3475-3500 min ⁻¹	耐熱クラス Insul.	120(E)
定格 Rating	S1	二次電圧 Sec. Volt	V	二次電流 Sec. Current	A	規格 Rule	JISC4210		

特性試験
Characteristics Test

巻線抵抗 (Ω) Winding Resistance		周囲温度 Amb. Temp. (°C)	周波数 Frequency (Hz)	無負荷試験 No Load Test			拘束試験 Locked Rotor Test			極数 Poles
単相:主 1 Phase: Main 三相:固定子 3 Phase: Stator	単相:補助 1 Phase: Aux. 三相:回転子 3 Phase: Rotor			電圧(V) Volts	電流(A) Current	入力(W) Watts	電圧(V) Volts	電流(A) Current	入力(W) Watts	
10.27		14.0	50	200	1.21	79	36.0	1.9	86	2
10.27		14.0	60	200	0.860	53	36.8	1.7	70	2
10.27		14.0	60	220	1.02	70	36.8	1.7	70	2

負荷特性
Load Characteristics Test

負荷率 (%) Load	50 (Hz), 200 (V), 2 (P)					60 (Hz), 200 (V), 2 (P)				
	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
電流 (A) Current	1.27	1.42	1.64	1.93	2.29	0.942	1.13	1.40	1.74	2.14
効率 (%) Efficiency	53.7	67.6	72.7	74.1	73.5	62.9	74.3	77.4	77.4	75.8
力率 (%) Power factor	42.4	60.3	72.7	80.7	85.6	48.7	68.7	79.8	85.8	89.0
滑り (%) Slip	0.90	1.79	2.77	3.90	5.21	0.99	1.92	2.95	4.14	5.55

	50 Hz 200 V		60 Hz 220 V		絶縁抵抗 Insul. Resistance (by 500V Megger)	固定子 Stator	回転子 Rotor	振動 (全振幅) Vibration (Peak to Peak) μm
	最大出力 (%) Max. Output	214	199	239				
最大トルク (%) Breakdown Torque	261		238	287	絶縁耐力 Dielectric Strength (A-C60Hz)	1500 (V) for 1 min. Good	- (V) for 1 min. Good	外観・構造・寸法検査: 良 Inspection of Outer View Construction & Dimension: Good
最小始動トルク (%) Locked Rotor Torque	225		180	220				
最大始動電流 (A) Locked Rotor Current	10.6		9.24	10.2				

TEMP. RISE TEST (TEMP. RISE BY THERMOMETER METHOD, K (AMB. TEMP. 14.0 °C))										
Hz	VOLT (V)	LOAD (%)	HOURS RUN	STATOR (R.M)	FRAME	ROTOR (R.M)	SLIP RING	BEARING DRIVE	ANTI-D.	POLE
50	200	100	3	57.5	26.5	-	-	35.0	-	2

Fuji Electric Co.,Ltd.
富士電機株式会社
811 502602 01

図 42 検査成績表

16.2. 電源およびシーケンス図

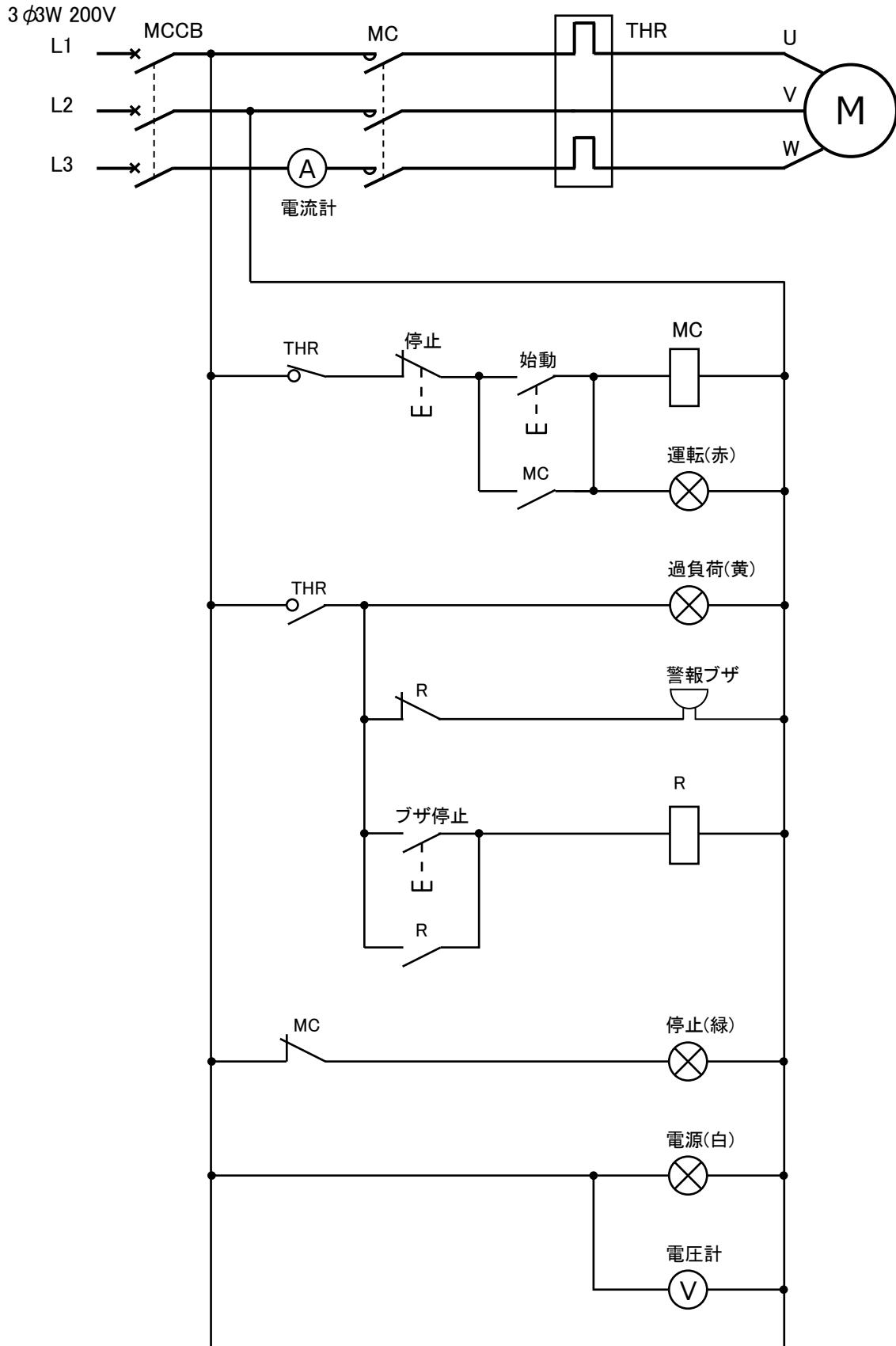


図 43 直入れ始動回路

16.3. 発電機（オルタネータ）

16.3.1. 外観



図 44 発電機外観

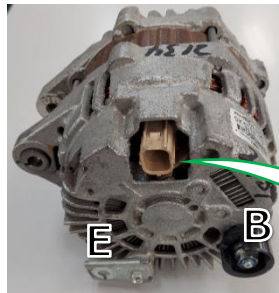
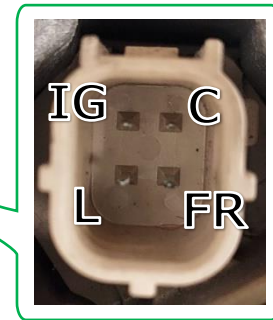


図 45 発電機端子



16.3.2. 基本スペック

表 11 発電機のスペック

型番	AHGA77
定格電圧	12V
出力電流	95A

16.3.3. 発電機内部回路およびコントローラ

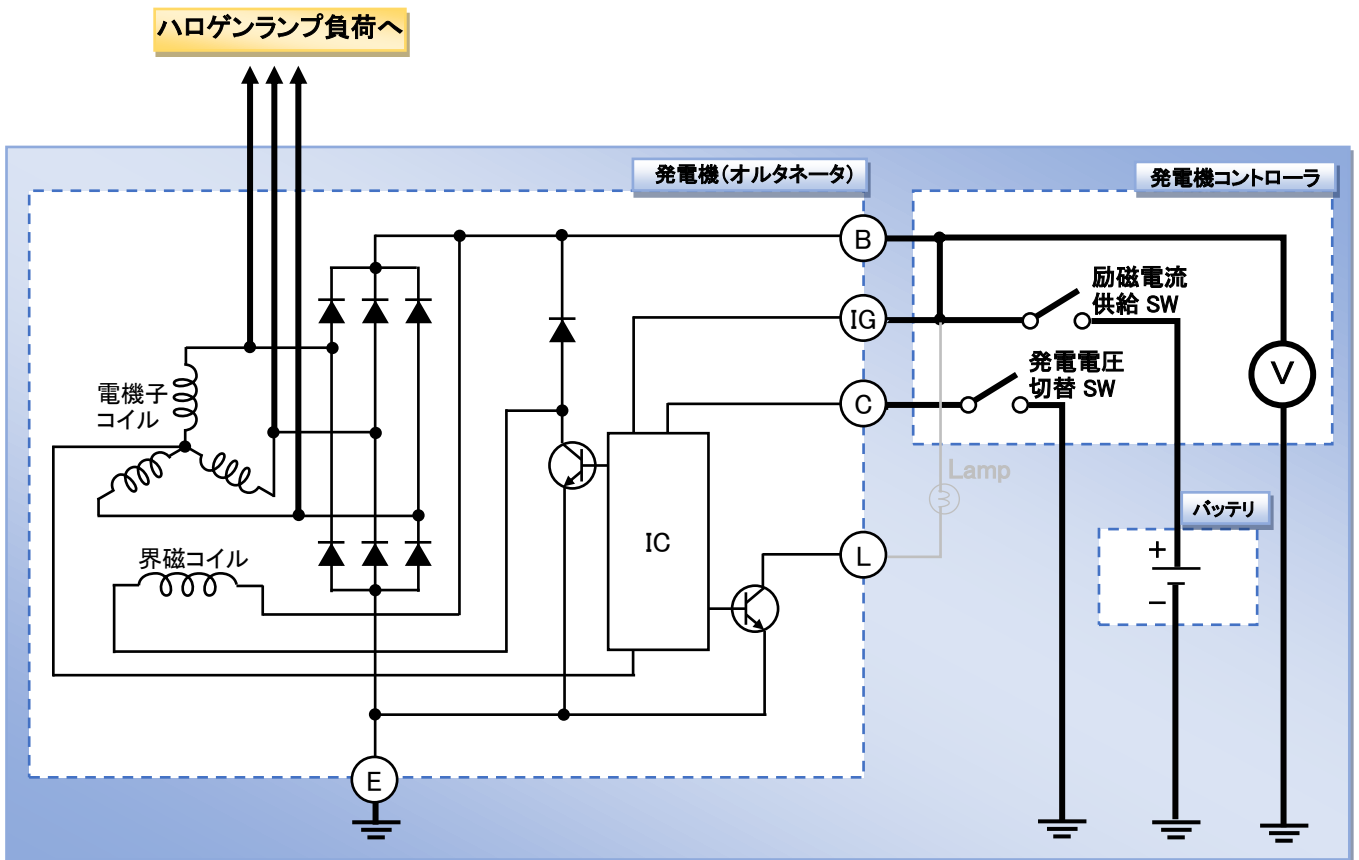


図 46 発電機回路図

16.4. ハロゲンランプ負荷

16.4.1. 外観



図 47 H4u ハロゲンランプ

16.4.2. 基本スペック

自動車ヘッドライト用ハロゲンランプ

規格：H4u〔直流 12V で使用時、消費電力 60W/55W (High/Low)〕

※ただし、オルタネータ発電電圧により消費電力は変動

16.4.3. 結線図

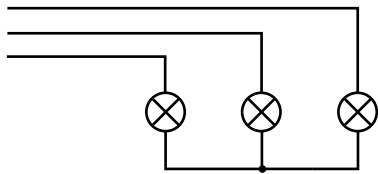


図 48 スター結線 (80W)

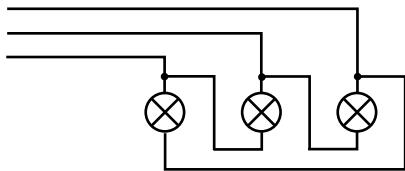
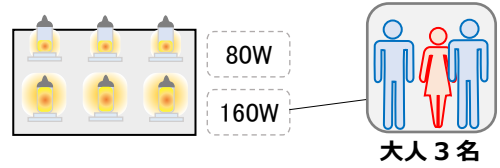
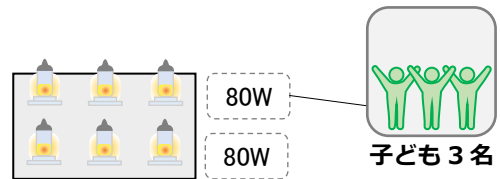
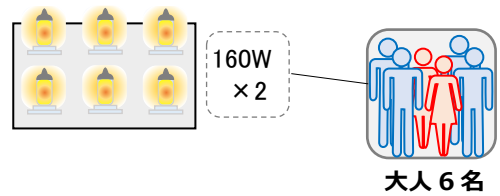


図 49 デルタ結線 (160W)



17. 追加実習

追加実習 1 無負荷運転

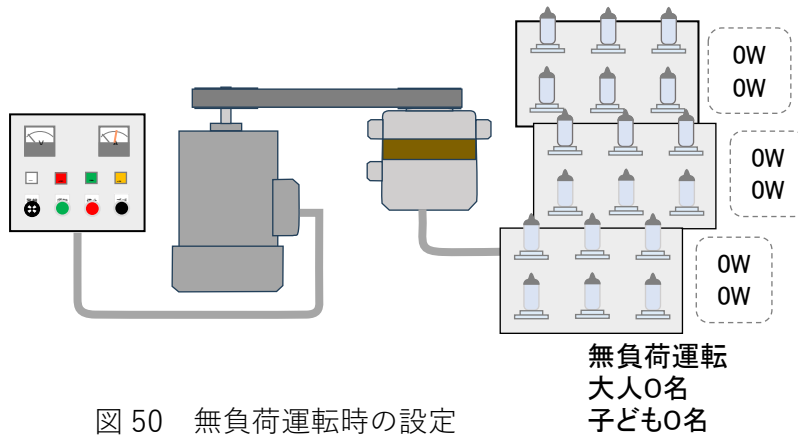


図 50 無負荷運転時の設定



追加実習 2 過負荷運転 (その2)

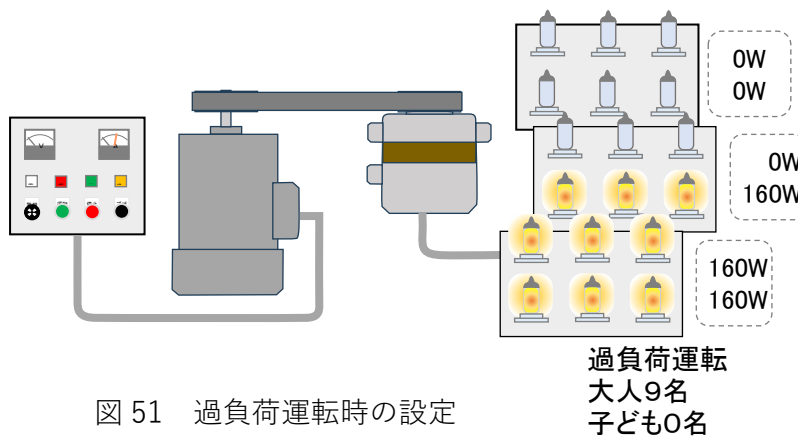


図 51 過負荷運転時の設定



追加実習 3 過負荷運転 (その3)

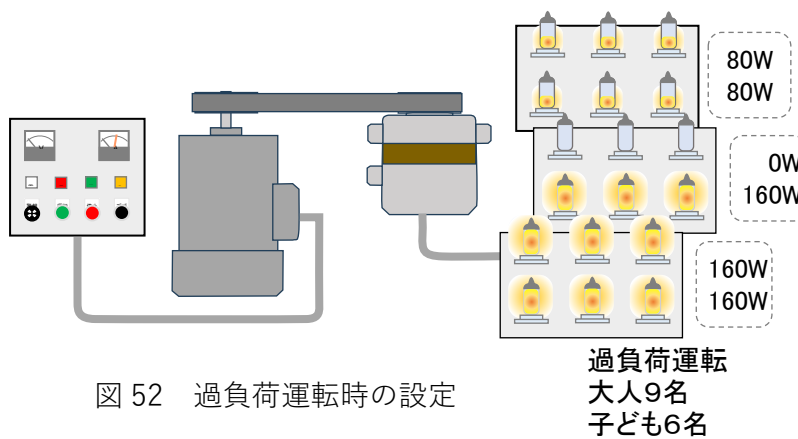


図 52 過負荷運転時の設定



18. 実測データサンプル

表 12 実測データサンプル

オルタネータ 発電電圧	ハロゲンランプ (乗客数)	電源電圧 [V]	電動機電流 [A]	電動機入力 [W]	力率	回転速度 [min ⁻¹]
Low 約 12.8V	大人 0 子ども 0	201.5	1.032	185	0.497	3559
	大人 0 子ども 3	201.5	1.135	242	0.615	3536
	大人 0 子ども 6	201.8	1.246	305	0.711	3512
	大人 0 子ども 9	202.4	1.445	428	0.793	3483
	大人 3 子ども 0	202.1	1.322	341	0.731	3503
	大人 3 子ども 3	202.1	1.456	400	0.773	3485
	大人 3 子ども 6	202.0	1.603	455	0.814	3465
	大人 3 子ども 9	201.9	1.885	568	0.855	3423
	大人 6 子ども 0	200.9	1.706	494	0.832	3428
	大人 6 子ども 3	201.1	2.035	595	0.861	3405
	大人 6 子ども 6	201.1	2.338	723	0.890	3347
	大人 6 子ども 9	200.6	2649	830	0.900	3306
	大人 9 子ども 0	200.2	2.661	830	0.897	3286
	大人 9 子ども 3	199.9	3.018	945	0.905	3228
	大人 9 子ども 6	199.1	3.966	1249	0.914	3050
	大人 9 子ども 9	198.5	4.757	1489	0.905	2950
High 約 14.8V	大人 0 子ども 0	202.4	1.006	183	0.556	3552
	大人 0 子ども 3	202.3	1.158	258	0.655	3515
	大人 0 子ども 6	201.8	1.385	369	0.756	3489
	大人 0 子ども 9	201.6	1.655	473	0.822	3447
	大人 3 子ども 0	201.4	1.478	402	0.774	3476
	大人 3 子ども 3	201.5	1.654	472	0.825	3447
	大人 3 子ども 6	201.3	1.867	557	0.849	3417
	大人 3 子ども 9	200.4	2.315	715	0.899	3353
	大人 6 子ども 0	200.9	2.023	614	0.865	3392
	大人 6 子ども 3	200.1	2.454	755	0.884	3329
	大人 6 子ども 6	199.8	3.000	928	0.906	3234
	大人 6 子ども 9	199.8	3.601	1133	0.909	3125
	大人 9 子ども 0	198.9	3.608	1130	0.909	3114
	大人 9 子ども 3	198.2	4.854	1515	0.909	3000
	大人 9 子ども 6	194.9	8.96	2780	0.819	1994
	大人 9 子ども 9	—	—	—	—	—

19. 参考文献

- ・ヘイシンモノポンプ ウェブサイト <https://www.mohno-pump.co.jp/>
- ・富士電機カタログ D&C14 版 A_電磁開閉器・電磁接触器
- ・パナソニック モーターブレーカ B B W - 3 0 C M 商品仕様書
- ・東芝三菱電機産業システム株式会社 TMEIC モータ豆知識
- ・富士電機株式会社 誘導電動機検査成績表

Memo