

MITSUBISHI DENKI GIHO

三菱電機技報

Vol. 38 June 1964

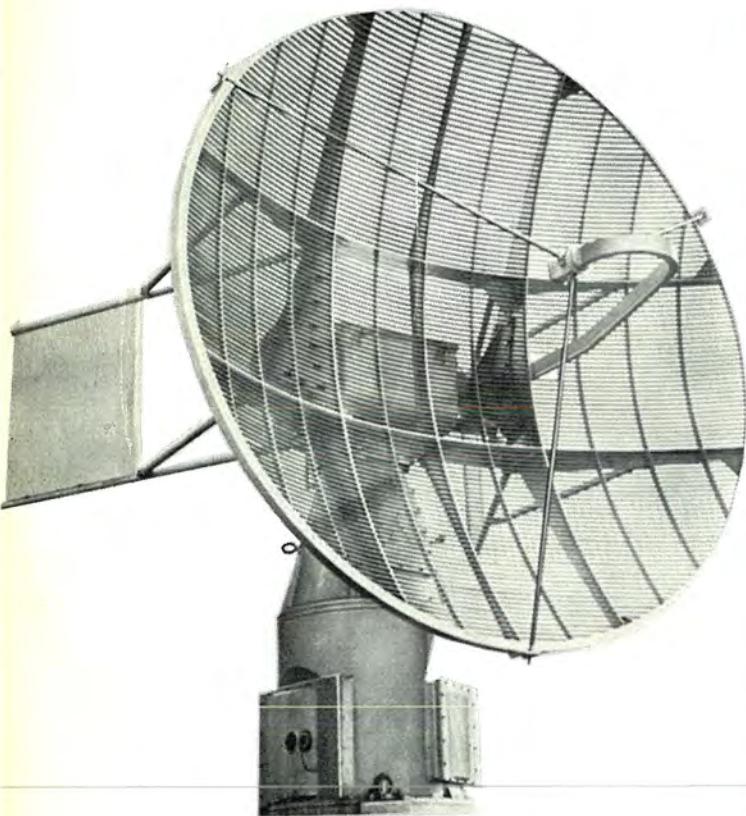
6

八幡製鉄(堺製鉄所)納め連続熱間圧延機用電機品

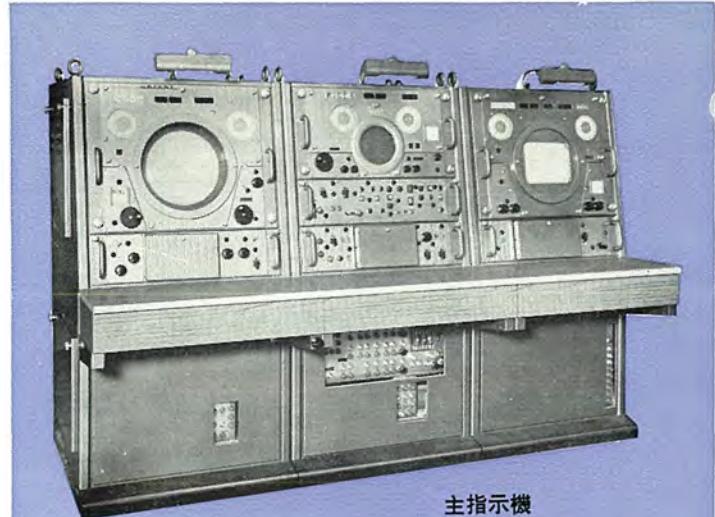
電動機特集



オーストラリヤ納め 気象用レーダ 完成！



空中線装置



主指示機

最近、気象用 レーダ は国内のみならず海外からの引き合いも活発になり、昨 38 年夏 フィリッピン（マニラ）に波長 5.7 cm の気象用 レーダ 一式を設置したのに引き続いて、同年末には オーストラリヤ（メルボルン）に 10 cm 波の新しい レーダ を納入した。この レーダ は本年 4 月に調整を完了し、5 月より観測を開始した。

オーストラリヤ は南半球における気象観測の重要な地域にあり、レーダ による観測も古くから行なわれて既に 20 台近くの レーダ が設備されている。このように レーダ による気象観測に関して最右翼にある オーストラリヤ に納入したことは、当社の技術が広く海外に認められたことを示すものである。

この レーダ は、アンテナ、送受信機を メルボルン 大学に設置し、映像は大学の指示機、およびこれより約 7 km の距離にある気象台の指示機により同時に観測される。また、気象台より アンテナ、および送受信機を リモートコントロール し、かつ レーダ の主要部分の動作監視を行なっているので、大学側が無人でも レーダ の操作ができるようになっている。

さらにこの レーダ は、降雨の探知能力を増すために受信機に雑音特性の良い パラメトリック 増幅器をもち、また雨雲の垂直断面を解析するための直角座標表示の RHI 指示機、あるいは レーダ 映像より雨量を計算をする等 エコー 装置を備えるなど、数多くの新しい技術が織り込まれており今後の活躍が期待されている。

■ 主要性能

周 波 数	2,800 Mc
送信セン頭出力	600 kW
パルス 幅	0.5 μs, 2 μs 切換え
繰返し周波数	310 pps
雑 音 指 数	3 dB
アンテナ 直径	3 mφ パラボラ
水 平 走 査	手動：任意の方向へ ±0.5 度の精度で停止可能 自動：10 rpm
	セクタ：任意の方向を中心に 10~60 度の範囲往復走査
垂 直 走 査	手動：-5~90 度の範囲 ±0.5 度の精度で停止可能 セクタ：0~18 度、および 0~60 度の 2 種、最大セクタ角度は 0 度から 60 度まで連続可変
観 测 範 囲	距離最大 200 マイル



表紙説明

わが国最大最高能率を誇る設備で、粗圧延用交流電動機群・仕上圧延用直流電動機群合計 56,850 kW および電源設備・制御装置・補助電動機・付帯設備その他電気品一式を製作し、現在好調に運転されている。新しい加速圧延方式、自動板厚制御装置を導入しており、将来的計算機制御が期待されている。写真は仕上直流電動機群の全景であり、伝統を誇る三菱直流機の技術の成果を示すものである。写真後方より仕上

No. 1 スタンド $2 \times 2,250\text{kW}$ 150/390rpm
No. 2 スタンド $2 \times 2,600\text{kW}$ 150/390rpm
No. 3 スタンド $2 \times 2,600\text{kW}$ 150/365rpm
No. 4 スタンド $2 \times 2,600\text{kW}$ 110/275rpm
No. 5 スタンド $2 \times 2,600\text{kW}$ 150/365rpm
No. 6 スタンド $2 \times 2,250\text{kW}$ 175/430rpm



三菱電機技報

昭和 39 年 第 38 卷 第 6 号

(電動機特集)

目 次

最近の直流電動機とその応用	高月 一・生原春夫・香川重光	2
最近の大容量高速度誘導電動機	甘粕忠男	11
電子計算機による誘導電動機の最適設計	衛藤 譲	19
誘導同期電動機	新良由幸	24
最近の同期電動機とその制御装置	東海林恵二郎・中野久夫	29
新形起重機用電動機	八木 勝・和田義彦	39
アルミ 錄込回転子使用中容量電動機	梶谷定之・名地 巍	46
水素ガス耐圧防爆形誘導電動機	秋吉俊男・田仲 勝	51
水中モートル	和田義彦・佐藤公夫	57
コーンブレーキモートル	和田義彦・光島辰己	65
三菱 SBU・SFU 形 フラットモートル	名地 巍・柴田隆夫	71
リラクタシモートル	梶谷定之・和田義彦	74
小形モートル	杉山昌司・森田 清	80
二相 サーボモートル および付属速度発電機	小島敏男	88
誘導電動機の保護装置とその選択	加来政博	92
SCR 可変周波数インバータによる交流電動機の速度制御	大野栄一・赤松昌彦	97
《技術解説》		
大形アナログ計算機の最近の進歩(その2)	柴谷浩二・持田雅夫・井塚秀弥	106
《技術講座》		
プラズマ(その4)——各種プラズマの発生およびその応用(2)	河合 正・伊藤利朗・近藤博通	113
《新製品紹介》		
中容量三菱可搬式ディーゼル発電機完成・ブラシレス交流発電機完成・瞬時要素付過電流遮断器(丸胴角埋込形)新発売・新形多接触遮断器シリーズ完成(MC-30-E形, MC-60-E形)・EM-105形電磁開閉器新発売・携帶用電気ジスクグラインダ(100 mm, 180 mm)・三菱ステレオ DSS-607形新発売		120
《ニュースフラッシュ》		
インド向け電力用変圧器大量受注・伊豆箱根鉄道納入新車完成・スクラップつり上用リフティングマグネット完成・新形アナログ計算機国際見本市で実演・ギリシャタンカーにマリンテレビジョン装置を納入・東海道本幹線用モレクトロン携帶無線機の試作機納入・MAR-3A形短波無線機納入開始		124
《特許と新案》		
車両用天井形冷房装置・磁力浮揚器		128
《最近登録された実用新案》		129
《表紙》		
2. オーストラリア 納め気象用レーダ完成 3. 第6回大阪国際見本市開幕、第5回日本産業巡航見本市開幕 4. '64 三菱扇風機		

最近の直流電動機とその応用

高月一*・生原春夫*・香川重光*

Modernized DC Motors and Their Applications

Kōbe Works Hajime TAKATSUKI・Haruo HAIBARA・Shigemitsu KAGAWA

The trend of the latest DC motors and their applications are described herein. Particularly standardizing of industrial DC motors to be used on the process line such as for steel mills and paper mills is expounded together with the features of Mitsubishi Super-line D and M DC motors and also introduction of modernized motors in 600 series for steel mill auxiliary machine use. Large motors for metal rolling are given description for their classification according to the use, and progress of motors and representative specifications are touched upon. Those used for machine tools are reported with the latest practical results about their precision and control. Modernized motors are built compact with good speed control characteristics by new techniques, and with high commutating ability under severe operations by especially attention.

1. まえがき

直流電動機はその速度制御性が、ほかの電動機よりもすぐれているので、電動機応用の分野において、電動機の回転速度を自由に広い範囲で連続的に変える必要のあるときには、電動機として直流電動機を使うことが多い。

最近の電動機応用設備としては、従来よりも高速大容量となって設備の能力を高める方向にあり、しかも自動制御方式を導入して自動化することによりその高速大容量化の真価を發揮するようになってきた。ここで直流電動機はその自由な速度特性を自動制御されて早く確実な運転をすることになり、直流電動機と制御との問題は非常に密接なものとなる。すなわち直流電動機は制御系のなかの一つの駆動要素として、与えられた制御特性をもつ必要な動力を発生することを課題とするようになった。

さていろいろの設備の能力範囲を広くすること、および自動化することが進むにつれて、直流電動機を多く使うことになり、直流電動機の合理的な標準仕様を確立して、使用者側に便利なようにするために、製造者側ではよく使用される容量範囲に対して用途別の新しい直流電動機の系列を整備している。

近代化された直流電動機の特色は、きびしい制御を受けるためにその慣性を小さくし、しかも整流能力を向上させたものであり、使用者の適用・保守に便利なようにいろいろの新しい工夫をこらしていることである。⁽¹⁾⁽²⁾

本文は最近の直流電動機に採用されている新しい方式を例挙し、次に標準電動機の新しい系列について、その標準化の成果と当社の標準系列 スーパーライン D および スーパーライン M 形の電動機の特色とを紹介し、金属圧延補機用 600 の番系列の近代化の模様を説明するとともに、圧延用の大形電動機については、熱間可逆圧延用、熱間仕上圧延用、線材圧延用および冷間圧延用の主電動機の特色と当社の最近の典型的な製作例とを述べたもので、特殊用途の直流電動機については、工作機械用直流電動機を中心として解説をする。

2. 最近の直流電動機の傾向

自動制御系のなかで直流電動機がそのすぐれた速度制御性を示したり、あるいは単に速度範囲を広く変えたりするときに問題と

なるのは、その直流電源のことであって、従来は直流発電機を電源とすることが多かったが、最近は次第に水銀整流器・シリコン整流器および制御素子付シリコン整流器(SCR)などが使われるようになり、とくに SCR の発達がめざましい。

次に速度を早く変えようとするときに問題となるのは、電動機の慣性(GD^2)のことであって、加速・減速のための電力をできるだけ少なくするために、電動機の GD^2 は小さいのがよいが、一般に直流電動機の GD^2 を小さくすると、その整流能力が低くなりがちななものであり、しかも直流電源として整流器を使うとその脈動電圧・電流のために、整流条件はますます苦しいものとなってくる。したがって GD^2 が小さく、しかも整流能力とくに過渡時の整流能力を高めた直流電動機が、きびしい運転すなわち急に負荷をかけたり、速度を急に変えたりするような、また電源に効率のよい整流器を使うような最近のシステムに適したものとなる。

新しい時代の新しい直流電動機の特色について、その要点を次に紹介する。

2.1 整流能力の向上と整流火花の評価

定常時および過渡時の整流能力を高めるためには次の手段を採用していることが多い。

(1) 磁気回路の断面積を十分に広くとり、所定の過負荷時に磁気飽和の影響をうけないようにする。過渡時の整流条件をよくするためには、整流磁束回路を成層構造とし、ウズ電流の効果をさせて、整流磁束の時間遅れを小さくする。

(2) ブラシ・ブラシホールダの電気的機械的性能に注意すること。タングステンブラシ・スプリットブラシなどのブラシ形式を採用したり、ブラシを整流子円周方向にスタッガしたりすることよりブラシの機械的動特性をよくするとともに、ブラシの物理的電気的特性を十分吟味する。

(3) 整流子の構造を熱的機械的に安定なものとする。とくに条件のきびしいものには、整流子片に銀入り整流子銅を使うことがあり、また整流子構造をアーチハウンド式としたり、スプリングマウント式にする。非常に速度の高いものは、ショーリングクリンク式の構造とする。

(4) 電機子巻線方式を十分吟味して、リアクタンス電圧を低くし、バランスのとれた巻線回路とする。均圧巻線の設計、スロットダンパ、トレスパン巻線などの採用、補極鉄心および補償巻線の設計などについて十分の考慮をはらう。

ここで注意すべきことは、整流火花についての実際的な考え方の問題であり、一般的な火花の分類の研究が進められている。⁽³⁾ 従来の経験からいえば、中小形直流機の整流子の条こん(痕)に対しては、ブラシの電流密度が低く過ぎることが原因になっていることが多く、むしろ若干の整流火花があれば、良好な整流子面となる例もあるくらいで、中小形に対しては無火花を整流状態の最終目標とする従来の考え方を改めて、整流子面の状態とブラシの減り方についての実際的な考え方をもつ必要があることを力説したい。

2.2 GD^2 の低減と負荷特性

回転電機子の GD^2 を小さくするためには、回転子鉄心外径を小さくし、したがって鉄心の軸方向の長さを、今までのものよりも長くするので、通風構造上は不利になるが、電動機の設計上からみて第一に考えることは、整流条件がきびしくなることで、2.1節に述べたようなことに注意しなければならない。たとえば後掲の工作機械用のある種の直流電動機、電気炉の電極昇降用直流電動機など位置制御に関係する電動機には、 GD^2 について特別の考慮が必要である。また圧延機用電動機の応用面でも GD^2 を問題とすることが多く、ある定格仕様に対して、電動機本体を分割していわゆる2重電機子、タンデム電機子の構造とすることがよく知られている。

次に GD^2 の低減と同じように重要なことは、電動機の負荷特性である。これは制御系のなかの駆動要素としての電動機の負荷特性に関することで、負荷と回転速度との関係が比例直線的であることを要求されることがある。しかもこの関係すなわち電動機の速度変動率が、電動機の界磁調整範囲および電機子電圧制御範囲内において一定であれば、制御系の動作上好都合であり、電動機の設計・調整の段階で十分な考慮を必要とする。もちろん制御系の動作範囲をせまくし、制御を楽にするために、電動機の寸法が大きくなったり、経済性が失なわれたりするようになってはいけないわけで、全体からみてバランスのとれた電動機の特性と制御装置の特性について、システム・エンジニアリングの面から考えなければならない。

2.3 重量の軽減と新しい材料および技術の導入

直流電動機が一般工業の自動化の原動力として活躍するようになるにつれて、はん用誘導電動機と同じように扱われる傾向が強くなってきた。ここで直流電動機は新しい時代の要求にそって、3章に述べるように根本的に再設計されるのであるが、すべての電動機の進歩と同じように、寸法・重量を縮減することが一つの課題となってくる。このために電動機内部の電磁的諸定数・通風冷却方式と冷却空気の流れ・機械構造部分の強度などについて、最近の科学的手法により再検討され、寸法・重量面でかなりの進歩を示しているが、新しい材料とくに絶縁材料の適用およびその絶縁処理についての新しい工作方法などの採用にも注目しなければならない。

たとえば、エポキシ絶縁、ポリエステル絶縁、合成マイカなどを使うことによって、電動機の許容温度上昇限度を高くすることができて、電動機の基本的寸法は、小さくなってきた。なお電動機の工作方式にも自動化が導入されて、性能のバラツキが少なくなってきた。もちろん材料の均一性も向上してきている。

2.4 限界出力の増大と二重重巻線方式の採用

直流機の限界出力⁽⁴⁾については、古くから多くの人たちによって研究されてきたが、最近では直流機の各種応用分野において、

限界出力に近いものが要求されるようになってきた。限界出力としては、現在のところ実用上次のように考えられている。

(1) 一重重巻方式で $N \cdot n = 1.8 \times 10^6$

(2) 二重重巻方式で $N \cdot n = 3.0 \times 10^6$

ここに N =定格容量 kW, n =定格回転速度 rpm である。

(1) の限度を克服するために二重重巻方式が採用され、特別な均圧コイル方式、適切なブラシの配置などを考慮して製作しているが、電機子コイル内の電流のバランスにとくに注意する必要がある。二重重巻方式は欧州でよく使われている。

2.5 未来の直流電動機

一般に直流電動機には、整流子・ブラシ・電機子鉄心および界磁があり、普通の構造のものでは、その進歩状況はかなり飽和してきている。一方最近の半導体技術、特殊材料などの進歩により新しい方式の直流電動機が考えられているが、これらは今までの直流電動機の各部に新しいアイデアを活かしたものであって、次に列記したものがその代表的なものである。

(1) 整流子なしの直流電動機：シリコン整流器の応用

(2) スロットなしの直流電動機：エポキシ材料の進歩により平滑電機子が可能となり、 GD^2 が小さい。

(3) ブリントモータ：ブリント配線技術を応用したもので GD^2 が小さい。

(4) 単極機：直流発電機として考えるものであるが、ブラシに共融液体合金を使用して、効率を高めたりさらに超電導技術を応用して鉄心不要とするなど。

これらの新しいアイデアが活かされるためには、工業技術レベルの発達が原動力となるもので、当分の間は現行の直流電動機の形式が存続するものと思う。また速度を自由に変えるものは直流電動機のみでなく、ほかの方式の発達についても見のがすことはできないが、ここでは述べないことにする。

2.6 直流電動機の整流器運転

未来の直流電動機の形式・存続の問題よりも、現実の問題として大きく取りあげられるのは、次の問題であろう。

(1) 大容量電動機の可逆運転に対する水銀整流器電源の適用

(2) SCRによるレオナード運転の実用化

(1) については、すでにヨーロッパで実用期にあるが、わが国およびアメリカではあまり例がなかった。しかし最近では水銀整流器の効用がよく知られるようになって、5章に述べる可逆式の熱間圧延ミルに対して、当社では電源に対する影響を慎重に検討し、あらゆる方式についての研究を終わり、すでに数件の圧延機の水銀整流器による可逆運転方式の電気品を製作中である。

(2) の SCR については、次第に容量が大きくなり、当社でも 0.37 kW 程度から数百 kW 程度までの電動機についての SCR 電源ユニットの標準化を終わり、あらゆる方面に採用されつつある。また直流電動機などの励磁電力を制御したいときにも、今までの水銀整流器方式に代わって、新しく SCR 方式が使われている。

整流器運転を行う直流電動機には、今までの直流発電機による運転のときよりも整流条件、温度上昇、軸電圧などのについて特別の配慮が必要であるが、制御系の速応性が高くなっている。正確な電流制限、有効な加減速電流の制御ができることが大きな特長である。なお可逆式でないときの直流電動機の電源として大容量のものは水銀整流器を、小容量用には SCR を使うことはよく知られているとおりであり、直流発電機の存続理由はきわめて弱いものとなってきている。

3. 工業用直流電動機^{(5),(6)}

3.1 標準化の経過

産業のあらゆる部門に直流電動機を使って自動化を容易にする傾向が強くなり、直流電動機の需要増大に対して、その仕様の標準化が、アメリカ電機製造業者の間で協議され、1956年に将来の推奨規格として、150 kW (200 HP) 以下の直流電動機について、今までの旧規格の代わりに、新しく Industrial DC Motor という分野を設けて、NEMA 規格が発表された。

この規格は、直流電動機が一般工業分野で可変電圧制御（レオード制御）を受けることに留意し、機械メーカーおよび使用者に便利なように定められている。すなわち

- (1) 回転速度は 9 種類の基底速度を定めている。
 - (2) 界磁制御による速度変化範囲は最高 1:4 までとする。
 - (3) 過負荷耐量は全速度範囲に対して一定 (150%) とする。
 - (4) 温度上昇限度は B 種絶縁に対して 60°C として、通常の規格で定める 70°C よりも 10°C の余裕をつけて、レオード制御による低速度連続運転が心配なくできるようにしたこと。
- などの特長がある。

この NEMA 規格に対して、わが国内でも、日本電機工業会 (JEM) から NEMA 規格に準じた工業用直流電動機標準規格 (JEM 1170, 1963) が発表された。さらに電動機の外形取付寸法についても協議中である。

3.2 スーパーライン D (通称 SD 形) 直流電動機の発展

当社では、工業用直流電動機の標準化に対して、電動機の外形寸法を IEC (万国電気工業委員会) の推奨規定の mm 系に合わせて、国際性のある新系列の開発を完成し、SD 形と名付けた。

三菱 スーパーライン D 直流電動機(以下 SD 形と略す)は、JEM 1170 工業用直流電動機標準規格のうちで、最もよく使用される 110 kW 以下のもので、軸中心高が 112 mm から 315 mm まで、厳密に

いうと、112 L から 315 M までのワク番号の系列に対する当社のモータ系列を形成するものである。

SD 形の標準定格は、表 3.1 に示すように、表中の A 線よりも小さいトルク定格に対する出力 (kW), 基底速度(rpm)で定められていて、防滴保護形を基本形とし、その適用ワク番号は表中に示される。たとえば、出力 30 kW, 回転速度を界磁制御により 850 rpm から 2,200 rpm まで変えるときには、表中から電動機のワク番が 280 M であることを知る。

SD 形の基本外形寸法は、表 3.2 に示すとおりで、17 種類のワク番が用意されている。表中の SD 形に対する基本外形寸法は、IEC Publication No. 72-1, 'Recommendations for the dimensions and output ratings of electric motors' の mm 系の Series I (ドイツ、フランス、ソ連、スウェーデンなど) を採用し、国際化されたものとなっている。インチ系の Series II (アメリカ、イギリス、カナダなど) と、mm 系の Series I とは、きわめて近似した寸法となっていて、NEMA 規格の定めるワク番には、IEC の Series I のワク番が、相当数含まれており、結局三菱の SD 形は全世界の小形電動機の寸法標準化の最先端を行くものとして、mm 系はもとより、インチ系の国にも、わずかの調整をすることにより適用できる。表 3.2 に SD ワク番と NEMA ワク番との対応を示す。

SD 形の特長は次のとおりである。

(1) 電圧制御と界磁制御とにより、回転速度を広い範囲で自由に変えることができて、しかも速度負荷特性が直線的であること。

(2) B 種絶縁の採用による小形軽量化。

(3) GD^2 が小さいから、加速・減速の時間を短くすることができる。

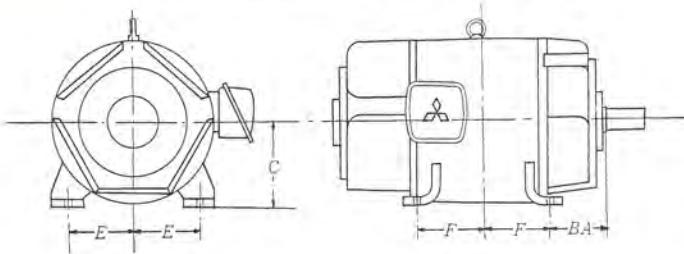
(4) 各種の付属品：ドラム形電磁ブレーキ、円板式電磁ブレーキ、電動通風機、回転計用発電機、速度制御用パイロット発電機などが整備されていて、容易に着脱できる。また管通風形、全閉形など

表 3.1 SD および SM 形直流電動機の標準定格とワク番 (防滴保護形)

回転速度 (rpm) 出力 (kW)	標準基底速度と弱め界磁による標準最高回転速度および適用ワク番号								
	3500	2500	1750	1150	850	650	500	400	300
0.37					3000 112L	2600 132L	2000 132L	1600 160M	
0.55					3200 112L	3000 132M	2600 132L	2000 160M	1600 160M
0.75			3500 112L	3200 132M	2800 132L	2600 160M	2000 160M	1600 160L	
1.1	4000 112L	4000 112L	3500 132M	3000 132L	2800 160M	2600 160M	2000 160L	1600 180M	
1.5	4000 112L	4000 132M	3300 132M	3000 132L	2600 160M	2600 160L	2000 180M	1600 180L	1200 200L
2.2	4000 132M	3700 132M	3300 132L	2800 160M	2600 180L	2600 180M	2000 200L	1600 200L	1200 225M
3.7	3700 132M	3700 132L	3000 160M	2800 160L	2400 200M	2000 200L	1600 225L	1200 250S	
5.5	3500 132L	3500 160M	3000 160L	2800 180M	2400 200L	2000 225L	1600 250S	1200 280S	
7.5	3500 160M	3500 160L	3000 180M	2800 180L	2500 200L	2200 225M	2000 250S	1600 250M	1200 280M
11	3500 160L	3300 180M	3000 180L	2600 200L	2500 225M	2200 250S	2000 280S	1600 280M	1200 315S
15	3500 180M	3300 180L	3000 200M	2600 225L	2400 250S	2200 250M	1800 280M	1600 315S	1200 315M
18.5		3100 200M	3000 200L	2600 225L	2400 250M	2000 280M	1800 315S	1600 315M	1200 355M
22		3100 200L	3000 225M	2600 250S	2400 280S	2000 280M	1800 315M	1600 355M	1200 355M
30		3100 225M	2700 225L	2400 250M	2200 280M	2000 315S	1800 355M	1600 355M	1200 355L
37			2700 250S	2400 280M	2200 315S	1800 315M	1800 355M	1600 355L	1200 400M
45			2400 250M	2200 280M	2000 315S	1800 355M	1600 355L	1600 400M	1200 400L
55			2400 280S	2200 315S	2000 315M	1800 355M	1600 355L	1600 400M	1200 450M
75			2200 280M	2000 315M	1800 355M	1600 355L	1600 400M	1600 400L	1200 450L
90			2000 315S	2000 355M	1800 355L	1600 400M	1600 400L	1600 450M	1200 450L
110	A 線		2000 315M	2000 355M	1800 355L	1600 400M	1600 450M	1600 450L	1200 500M
150			1900 355M	1800 355L	1700 400M	1600 450M	1600 500M	1600 500L	1200 560S
185	↑ B 線			1700 400M	1600 400L	1600 450L	1400 500M	1200 500L	1200 560M
220		↓ S M		1600 400L	1500 450M	1500 500M	1300 500L	1200 560S	1200 560L
300	JEM 1170 はこの線までの定格を定めている。			1500 450M	1500 500M	1400 500L	1200 560M	1200 560L	
370				1500 450L	1400 500L	1200 560M	1200 560L		
450				1500 500M	1300 560S				
520				1300 500L	1200 560M				
600				1250 550S	C 線				

C 線は NEMA MG1 工業用直流電動機の限界を示し、これより大きい定格は三菱独自のものである。

表 3.2 スーパーライン 直流電動機の基本外形寸法



スーパー ライン D: 略称 SD				対応 NEMA ワク番	スーパー ライン M: 略称 SM			
ワク 番号	寸法 (mm)				C	E	F	BA
112L	112	95	79.5	70	185A			
132M	132	108	89	89	215A			
132L			101.5		216A			
160M	160	127	105		254A			
160L			127	108	256A			
180M	180	139.5	120.5		284A			
180L			139.5	121	286A			
200M	200	159	133.5		324A			
200L			152.5	133	326A			
225M	225	178	155.5		365A			
225L			178	149	366A			
250S	250	203	155.5		404A			
250M			174.5	168	405A			
280S	280	228.5	184		444A			
280M			209.5	190	445A			
315S	315	254	203		504A			
315M			228.5	216	505A			

寸法はメーカ標準である

IEC Publication No. 72-1 による



図 3.1 スーパーライン D 直流電動機
(他力通風形)

Fig. 3.1 Super-line D DC motor
(blower mounted).



図 3.2 スーパーライン D 直流電動機
(全閉外扇形)

Fig. 3.2 Super-line D DC motor
(totally enclosed fan cooled).

の保護形式に簡単に変換できるなど、あらゆる用途に対しての適応性をもっている。

このような SD 形の特長を活かして、各方面からの要求に応じているが、フランジ立形、フランジ横形、全閉外扇形、減速電動機などの変形もできるようになっている。図 3.1 は、基本形の防滴保護形に電動通風機を取り付けた他力通風形で、図 3.2 は、全閉外扇形であり、図 3.3 は、減速電動機を示す。

このように、SD 形は、それぞれの用途に応じた形で生産されているが、最近の各種の生産 ライン の工期短縮に対するために、短期間内に納入できるような独自の製造体制が整備されている。

3.3 スーパーライン M (通称 SM 形) 直流電動機

SM 形は、SD 形よりも大きいトルクを出すことのできる新系列で、その標準定格、対応ワク番および基本外形寸法を、それぞれ表 3.1, 3.2 に示す。表 3.1 の中の境界 B 線(点線)までのものが、JEM1170(1963) で定められている。

NEMA 規格で 1963 年 8 月に発表された工業用直流電動機の標準定格には⁽⁷⁾、表 3.1 中の B 線から C 線までの出力および



図 3.3 スーパーライン D 直流減速電動機
Fig. 3.3 Super-line D DC geared motor.



図 3.4 スーパーライン M 直流電動機
(管通風形)

Fig. 3.4 Super-line M DC motor
(duct ventilated).

回転速度のものが追加されているが、当社ではすでに中形工業用直流電動機のあり方について深く研究を進めていて、SD 形ワク番の上の新ワク番が整備され、現在多数生産されている。

SM 形の特長は、SD と同じであるが、重量的な面から フランジ 形は標準外とし、用途から考えて他力通風または管通風に適するような ブラケット構造を標準としている。図 3.4 は SM 形の一例を示す。SD 形に比べて、容量が大きく、機械的な条件がきびしくなるので、ベアリング部分には グリース 交換が容易なようにするなど機

械的な面で細心の注意がはらわれ、電気的には、大形ワク番に補償コイルを取り付けて、整流その他の特性向上させている。

SM 形のワク番に対しては、IEC から基本外形寸法がまだ推奨されていないが、当社では、全世界にさきがけて表 3.2 に示す寸法を基本として採用した。すなわち、軸中心高その他の寸法の飛びを ISO (万国標準機関) の推奨する標準数系列を参考にして定めている。機械 メーカ などで電動機取付関係を設計するときには、標準数系列の SM 形電動機を採用すれば、その合理的な数系列により機械各部の寸法の調和がとれて、機構系列の標準化に役立つもの信じている。

表 3.1 において、下方の C 線が NEMA 規格の定める工業用直流電動機の標準定格のトルク上限を示すものであるが、当社では、最近のプロセスラインなどにおける各電動機の所要定格の傾向から考えて、この NEMA 規格の定格よりもさらに大きい定格のものまでを標準定格とした。

4. 製鉄圧延機用 600 番系列直流電動機

製鉄圧延 プラント の補助直流電動機の標準化については、AISE(米国鉄鋼技術協会)の標準が最も権威があり、全世界の圧延機械メーカー、プロセスラインのメーカーおよび電機メーカーが採用している。わが国の JEM1109(1961)も AISE に準じて改正されたもので、1956 年制定後の新しい要求に応じて、大形ワク番: 620 番、622 番および 624 番が追加され、通風口の寸法も標準化(JEM-R2029)された。

正延補機用直流電動機は、ひんぱんな正転・逆転、激しい過負荷などの圧延補機、たとえば、ロール圧下、テーブル駆動などに多く使用されるが、プロセスラインでもインゴットバギー、薄板シートなどにも広く採用されるとともに、クレーン駆動用にも使われる。

4.1 三菱 600 番系列 KM 形直流電動機の近代化

当社では、この系列の標準化以来多くの製作実績があるが、規格の改正と同時に全面的に再設計して新しい 600 番系列を完成した。当社の 600 番系列電動機は KM 形と称していてその近代化の特長は次の 2 点である。すなわち

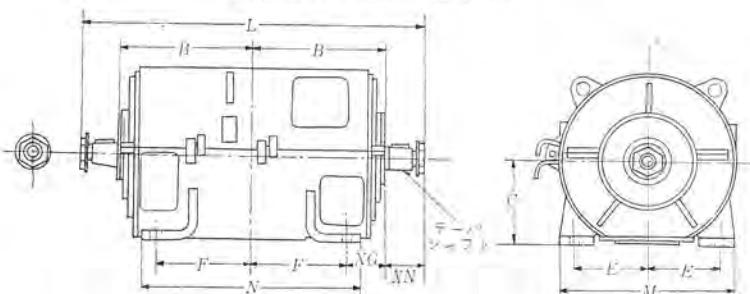
- (1) エポキシ絶縁を全面的に採用し、耐用年数を長くした。
- (2) 全世界で初めて丸形のフレームを採用し、機械的電気的特性を向上させた。

今までの B 種絶縁ワニスよりも機械的に安定なエポキシ絶縁ワニスは、KM 形電動機のコイル部分の耐振特性の向上に効果的であり、全般的に熱伝導がよくなり各部の温度分布を平均化させることができた。これは電動機の寿命が長くなったことを意味するものである。

フレームの外観は、今まで各社とも 8 角形の断面をもつものであったが、当社の新 KM 形では綿密な計画のもとに、丸形フレーム化の設計に成功した。機械的強度から考えても丸形フレームが

表 4.1 標準 KM 形直流電動機の基本定格、基本寸法表。

基本定格は全閉 1 時間定格、220 V、分巻



ワク番	出力 (kW)	回転速度 (rpm)	寸法 (mm)								
			L	B	C	E	F	M	N	XG	KN
601	3.7	1,025	834	305	193	158	210	380	465	95	112
602	5.5	900	834	305	193	158	210	380	465	95	112
603	7.5	800	940	343	215	178	228	432	535	115	127
604	11	725	990	368	228	190	240	458	560	128	127
606	19	650	1,074	394	254	210	265	508	625	129	143
608	26	575	1,208	445	285	238	315	578	725	130	159
610	37	550	1,276	476	311	260	330	622	775	146	162
612	55	515	1,396	520	339	285	362	685	840	158	178
614	75	485	1,542	590	374	318	405	762	950	185	181
616	110	460	1,714	660	406	342	445	825	1,040	215	197
618	150	420	1,792	698	450	380	495	915	1,155	203	198
620	205	390	1,980	762	530	458	560	1,055	1,320	202	228
622	280	360	2,192	838	584	508	655	1,155	1,575	183	258
624	370	340	2,444	914	609	535	710	1,205	1,728	204	308



図 4.1 ミルタイプ 600 番系列 KM 形直流電動機
Fig. 4.1 Mill type, 600 series, type KM DC motor.

最も合理的であり、鋼板溶接構造の採用を可能とし、磁気特性の均一度が高くなり、製品の特性のバラツキが小さくなっている。なお回転子については、既納の旧 KM 形との互換可能を考えている。表 4.1 に三菱新 KM 形直流電動機の標準のなかで最もよく使われる基本定格、ワク番および基本外形寸法を示す。その定格、寸法は、JEM 規格にすべて一致したものであり、代表的な外観写真が図 4.1 で、われわれは、新 KM 形を続々と生産中である。

4.2 低回転ライブテーブル用 KM 形直流電動機

熱間可逆圧延機、すなわち、分塊ミル、粗圧延ミルなどの主ロールの前後面テーブル、フィードローラなどは、主ロールの短時間内の正逆転と連動して、主ロールと同じように短時間で正逆転をひんぱんに繰り返すものであり、ミルの各種のテーブルのなかで最も活躍するテーブルとして、ライブテーブル(live table)と呼ばれる。このライブテーブルの駆動用として KM 形電動機が使用されるが、個々のロールごとに電動機をつける方式と、セクションごとに多くのロールをまとめてラインシャフト式で 1 台の電動機で駆動する方式がある。ラインシャフト方式では、減速機構その他の部分が故障したときの生産停止時間が長くなり、長い目でみたときの経済性から考えてライブテーブルには、各個電動機駆動方式を採用することが多くなってきた。

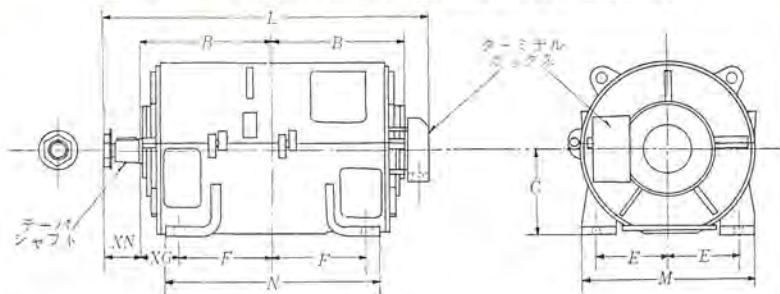
当社では、600 番系列に新しくライブテーブル専用の電動機の系列を追加して、多方面に適用している。この系列は、ロールに直結するためにとくにその回転速度を低くしておく必要があり、電気的設計が標準の KM 形のものと異なっていて、とくに高いトルクを出すことを目標としている。構造的には 600 番形の標準と同じであるが、実際の電動機の配置を考えて、片軸端とし、端子箱を反負荷側端面に取り付けている。

電気的設計内容の特色は、電機子電圧を 220 V において定格回転速度が標準の系列の 220 V のときのそれよりも約 5 分の 1 の低い値になっていて、電流値は小さい。したがって標準の KM 形を約 50 V 程度の低い電圧で使用して低回転を出すときに比べて、配線が楽であり、ロールのセクションごとの電源発電機の電流容量が小さく済み、全体からみて経済的になる。

表 4.2 に当社のライブテーブル専用の 600 番系列電動機の標準定格、基本外形図を示すが、取付寸法は、表 4.1 の標準のワク番のものと同じである。

ライブテーブルの回転速度は、圧延機の仕様により一定でないが、直流電動機の自由度を利用して、動作電圧を変えて回転速度を所要の値にする。したがってライブテーブル用 KM 形電動機は表 4.2 に

表 4.2 KM 形のライブテーブル 専用電動機の標準定格と外形



ワク番	定格トルク (kg·m)	定格出力 (kW)	回転速度 (rpm)	寸法 L (mm)
601	3.9	0.9	225	805
602	6.3	1.3	200	805
603	10.3	1.8	170	890
604	17.5	2.8	155	943
606	34.8	5	140	1,008
608	50.6	6.5	125	1,131
610	73.1	9	120	1,223
612	120	13.5	110	1,318
614	167	18	105	1,461
616	276	27	95	1,638
618	424	37	85	1,734

220 V, 管通風, 連続定格, L 以外の寸法は表 4.1 に示すとおりである。

示す電圧, 回転速度のみで適用されるのではなく, そのトルク値によって選定されるものである。

5. 圧延用直流電動機

直流電動機の広い用途のなかで大きな存在が圧延用直流電動機であり, 結合される圧延機の種類によってその性格も異なり, それぞれの特色があるが, その共通的な特長は,

- (1) 機械的にとくにがんじょうな構造であること,
- (2) 電気的な過負荷耐量が大きいこと,
- (3) 速度変動率が小さいこと,

などであり, 基幹産業の原動力として高い信頼度をもっている。

この分野でも NEMA 規格が権威があり, わが国では, JEM

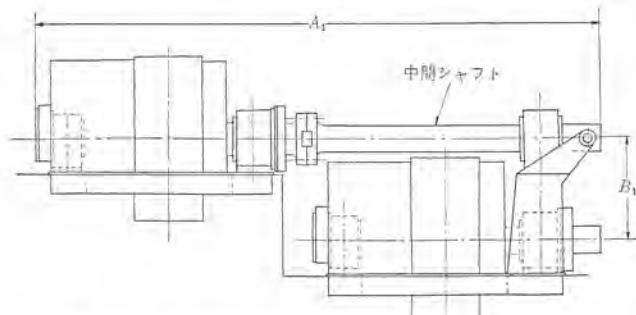


図 5.1 従来形式のトウインドライブ式可逆圧延電動機
Fig. 5.1 Conventional twin-drive reversing mill motor.

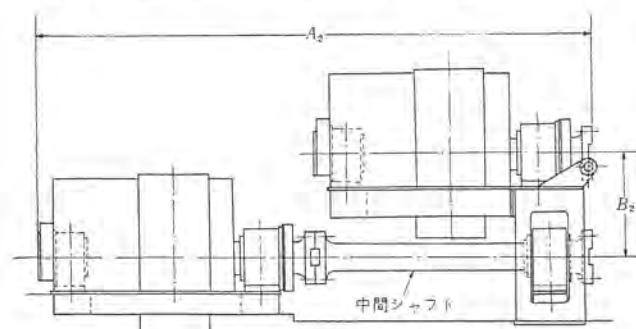


図 5.2 トップ ホワード のトウインドライブ式可逆圧延電動機
Fig. 5.2 Top forward twin-drive reversing mill motor.

1157(1961) が制定されているが, 大別すると, 可逆式と非可逆式の2種類になる。基底速度界磁における過負荷耐量は,

可逆式: 常用最大 225%, 非常用最大 275%,

非可逆式: 常用最大 175%, 非常用最大 200%, と規定されている。しかし, 最近の高速圧延作業を行なうためには, 熱的 RMS 定格に対して, 過負荷耐量を上記よりも大きくする必要性を認められる場合もある。

なお, 電動機の通風方式として国内でよく使われているのは, 可逆熱間ミル(分塊ミル, 厚板ミル, 粗圧延ミルなど), 热間仕上ミル用にダウンドラフト式, 冷間ミル用にはアップドラフト方式となっている。

次に圧延機の種類別に電動機の特色を紹介する。最近, 非鉄金属とくにアルミ圧延が盛んであるが, すべて金属圧延用として製鋼圧延用を代表例にあげて説明する⁽⁶⁾

5.1 热間可逆圧延用直流電動機

熱間で素材を圧延する方法については, 技術革新面からいろいろ論議されているが, 圧延用電動機のなかで, 歴史的にも, 体格的にも, 特異な存在が, 可逆式電動機であり, 単機としての最大トルクが, 他の圧延用電動機よりもはるかに大きく, 圧延用電動機中の王者の地位を占めている。

この電動機の特色は, 正逆転の時間を短くして生産性を向上させるために GD^2 が小さいことであり, 電動機の配置が上, 下ロールを各個に駆動する双子形駆動方式(Twin drive)となっていることである。双子形駆動方式には, Top Forward 方式がよく使われるようになった。

図 5.1 および図 5.2 は, 最近の進歩の状況を示すもので, 図 5.1 は, 従来の配置形式であるが, 図 5.2 は, Top Forward 方式で, 2,600 kW 40 rpm 級のものについての実例から比較すると, 全体の長さ A_1, A_2 および上下軸中心間隔 B_1, B_2 の寸法差は,

$$A_2 - A_1 = 80 \text{ mm}, B_1 - B_2 = 74 \text{ mm}$$

である。一方, 新設計機の GD^2 は, 旧形の約 65% まで下げる成功している。ここで A_1, A_2 の差は, 長大な電動機全体の寸法からみて問題となるが, B_1, B_2 については, 電機メーカーの泣きどころであり, 建屋寸法にも関係する寸法で, できるだけ小さい方がよく, 74 mm も小さくしたことは, いろいろの苦心の成果である。しかも GD^2 の低減は, 大きな威力であって, 加減速時の無効電力を節減できる。

最近の可逆式電動機の逆転時間は, NEMA 規格によると, 一応の目安として,

正の基底速度から逆の基底速度まで約 1.5 秒以内,

正の 2 倍速度から逆の 2 倍速度まで約 4.0 秒以内,

としている。ここに 2 倍速度とは, 界磁制御により弱め界磁で得られた速度のことである。あまり逆転時間を早くしてもライブテーブルやロール圧下などの補機の動作時間との協調の問題もあり, 全体からみて実用的な逆転時間が上記の程度となる。

代表的な仕様例は, ユニバーサルスラブミル用で⁽⁹⁾,

水平ロール駆動用 $2-2 \times 2,250 \text{ kW} 40/80 \text{ rpm}$,

立ロール駆動用 $1-2 \times 1,500 \text{ kW} 60/150 \text{ rpm}$,

であり, それぞれ 2 重電機子構造になっていて, GD^2 が小さく, 成層フレーム構造として, 過渡整流能力を向上させている。

ここで特筆すべきは、整流器運転のことであり、その方式としては、(1) 整流器を2組設置する方式、(2) 電機子回路に逆転用切換器を置く方式、(3) 界磁切換方式があるが、それぞれ長所短所があるので慎重に方式決定が行なわれる。界磁切換方式を採用するときは、直流電動機の整流条件がきびしくなるから、電動機の整流保守に注意する必要がある。

5.2 熱間仕上圧延用直流電動機

最近の高速熱間仕上ミルでは、加速圧延を行なう必要があり、電動機には、低い GD^2 と大きな瞬時過負荷、それに加速圧延のための加速電力を加味して、電動機の仕様が定まっている。しかも各スタンダード間の速度協調のことを考えて、その速度変動率、瞬時速度降下率、機械的なネジり振動の問題について十分に注意して製作されている。

代表的な製作例は、表 5.1 に示すもので、図 5.3 は、稼動中の姿である。

表 5.1 熱間仕上圧延用主電動機の仕様

スタンダード番号	車両比	電動機の定格				水銀整流器の容量(kW)
		出力(kW)	電圧(V)	回転速度(rpm)	駆動方式	
1	4.79:1 減速	2×2,250	2×600	150/390	2 タンデム電機子	1-4960
2	2.88:1 ×	2×2,600	2×600	150/365	×	1-5700
3	1.97:1 ×	2×2,600	2×600	150/365	×	1-5700
4	直結	2×2,600	2×600	110/275	×	1-5700
5	×	2×2,600	2×600	150/365	×	1-5700
6	×	2×2,250	2×600	175/430	×	1-4960



図 5.3 高速熱間仕上圧延用 ミルモータ群
Fig. 5.3 Main drive DC motors for high speed hot strip mill.

以前は、加速圧延を必要としない程度のミルであり、仕上ミルの電動機には、 GD^2 の大きいものがよく使われていたが、最近の加速圧延を行なうミルには、5.4節に述べる冷間ミル用と同じようなタンデム電機子構造または2重電機子構造を採用して GD^2 を小さくすることになった。ただし、冷間ミル用電動機と異なり、中間速度で無負荷運転のときに急に素材をかみこむために、過渡整流条件がきびしくなる。当社では、昭和 31 年に、世界で始めて熱間仕上ミル用電動機に成層フレーム構造を採用したが、これは、現在では、この種の電動機に不可欠の条件となってきた。

5.3 線材圧延用直流電動機⁽¹⁰⁾

上述の熱間仕上圧延用と同じような特色をもつ電動機であるが、線材の場合には加速圧延は行なわない。線材製品は最終製品となる場合が多いので、その最終仕上圧延スタンダード用電動機に対して要求される速度制御性能は、きわめてきびしく、高精度と早い速度回復時間と小さな瞬時速度降下量が、線材の品質を向上させる大

きな要素となってくる。

したがって、電動機の GD^2 を小さくし、すぐれた速度制御系をもつ各個水銀整流器電源方式を採用することが、高性能線材ミルの基本方式で、電動機速度を早く制御するために大きな過渡電流を流すから、電動機の整流能力は十分高くしておかなければならぬ。中規模のミルでは、水銀整流器の代わりに SCR が登場するようになってきた。

代表的な線材ミルの例は、表 5.2 に示すもので、4 本の線材を 30 m/sec 近い最高圧延速度で生産する世界最大の規模をもち、全 60 スタンド、電動機出力総計約 21,000 kW に達する。

表 5.2 線材圧延用主電動機の仕様

(電圧 600 V)

圧延スタンダード		台数	kW	速度範囲(rpm)	備考
粗圧延	1, 2, スタンド	横ロール	1	300 220-440/1,210	補機に連動
	3, 4, スタンド	×	1	500 175-350/ 962	
	5 スタンド	×	1	300 220-440/1,210	
	6 スタンド	×	1	250 220-440/1,210	
第一中間圧延	7 スタンド	×	1	400 175-350/ 962	補機に連動
	8 スタンド	×	1	400 175-350/ 962	
	9 スタンド	×	1	500 175-350/ 962	
	10 スタンド	×	1	400 175-350/ 962	
	11 スタンド	×	1	700 175-350/ 962	
	12 スタンド	×	1	500 175-350/ 962	
	13 スタンド	×	2	700 175-350/ 962	
	14 スタンド	×	2	500 175-350/ 962	
	15 スタンド	×	2	700 175-350/ 962	
	16 スタンド	×	2	500 175-350/ 962	
第二仕上圧延	17 ×スタンド	立てロール	4	500 175-360/ 962	補機に連動
	18 スタンド	横ロール	4	300 220-440/1,210	
	19 スタンド	立てロール	4	300 220-440/1,210	
	20 スタンド	横ロール	4	250 220-440/1,210	
第二仕上圧延	21 スタンド	立てロール	4	400 350/ 962	補機に連動
	22 スタンド	横ロール	4	250 440/1,210	
	23 スタンド	立てロール	4	250 440/1,210	
	24 スタンド	横ロール	4	250 440/1,210	
	25 スタンド	立てロール	4	250 440/1,210	
	26 スタンド	横ロール	4	250 440/1,210	

5.4 冷間圧延用直流電動機

冷間圧延機に属するものとしては、タンデム式冷間圧延機、可逆式冷間圧延機、スキンパスミルなどがあるが、駆動用電動機に要求される第一の性能は、 GD^2 が小さくしかも各電動機の加速特性がそろっていることが共通点である。このために電動機を、2 分割または3 分割として、 GD^2 を小さくし、特性を細かく調整して出荷する。

冷間圧延機の花形は、タンデム冷間圧延機で、最高圧延速度が 35 m/sec に達するものがある。現在 6 スタンドタンデムが最高で、せまいスタンダード間隔のところに大きな電動機出力を入れるために寸法制限があり、しかも歯車装置との関係もあり電動機の据付は、非常に苦しい。小さなスペースに大きな電動機が集中するので通風に注意が必要である。

表 5.3 はその仕様の代表例であり、巻取電動機を含めてその総出力は、約 27,000 kW で世界最大級である⁽¹¹⁾。

なお、最近の冷間圧延機およびその付帯プロセスラインでの傾向は、ユニットコイル重量の増大であり、約 30 t にも達し、内径と外径との比は、1:5 となり、界磁制御を行なう巻取りまたは巻もどし用電動機では、界磁範囲を 1:5 以上にすることもあり、しかも容量が次第に大きくなってきた。したがって、巻取電動機の製作には、細心の注意がはらわれている。

さらに、スキンパスミルでは、電動機の配置にとくに工夫を要する

表 5.3 6 スタンド 冷間連続圧延用主電動機の仕様

スタンダード番号	機車比	電動機の定格				電源発電機の容量(kW)
		出力(kW)	電圧(V)	回転速度(rpm)	駆動方式	
1	45:33 減速	2-1,100	750	125/375	単電機子双子形	1-2,400
2	46:32 ×	2-1,900	750	212/520	×	2-2,000
3	39:39 ×	2-1,900	750	212/520	×	2-2,000
4	37:41 増速	2-2×1,100	2×375	255/637	2 タンデム電機子 双子形	2-2,400
5	31:47 ×	2-3×1,100	2×375	255/637	×	2-2,400
6	51:95 ×	2-3×950	2×375	300/635	3 タンデム電機子 双子形	3-2,000
巻取り	1:1,768 ×	2-2×450	2×375	200/ 1,000	2 タンデム電機子 双子形	1-2,000

ものがあり、小容量ながら Top-Forward Twin Drive 方式にしたりする。この種の電動機では、圧延機との関係寸法によってその体格がきまるもので、単に kW, rpm などから一方的にきることはできない。

冷間圧延機用電動機の整流器運転の実施例は、非常に少ないが、加速中の速度制御、とくに巻取電動機の制御などに問題があるのを克服する必要があり、将来の問題であろう。

6. 特殊用途の直流電動機^{(12)~(18)}

直流電動機は、その界磁方式によって、希望する特性が比較的簡単に得られ、すぐれた制御性を有することによって、前述以外に工作機、エレベータ、巻上機、船舶、鉄道、航空機、自動車、その他特殊試験設備などきわめて広範囲にわたり使用されている。これらのうちには、船舶などのように、交流化によって使用量の減少したものも見受けられるが、最近の著しい整流器の発達によって装置全体が小型量化された結果、従来使用されなかった分野にも進出しつつある。ここに、近頃とくにその使用の増加しつつある工作機用直流電動機の概況について述べる。

6.1 直流電動機を必要とする工作機

ここに述べる工作機とは、いわゆる狭義の工作機に属するもので、このうち直流電動機が使用されているおもなものは、大形旋盤、大中形中ぐり盤、平削盤、歯切盤、フライス盤、研削盤などである。これらに直流電動機が使用される理由は次による。

(1) 広範囲の切削および送り速度を無段階で必要とする。

説明するまでもなく、工作機では切削に対して定出力、送り用には定トルクで広範囲の速度範囲が要求される。切削時の速度範囲は送りのそれに比べれば比較的狭いが、直流電動機の界磁制御範囲が 1:4 程度を限界としているため一般に一段または 2 段のギヤが組み込まれる。これに対し、送り用は速度範囲がきわめて広く電圧制御による速度範囲 1:50 は既に常識化しつつあり、目下 1:200 の超広範囲のものも製作されつつある。

(2) 起動、停止、逆転などの動作がひん繁に繰り返される。

直流電動機は起動トルクが大きく、設計の方法により GD^2 もある程度小さくでき、電源の種類の選定によって停止時の運動エネルギーを電力として母線に返還することが比較的簡単に行なえるためきわめて好都合である。この好例として平削盤があるが、直流電動機の採用によって、起動停止、逆転の操作は迅速に行なわれ、ベルト、クラッチなど機械的な消耗部分ではなく、広い切削速度範囲が無段階で得られ、電力が有効に使用でき、さらに機械自身の設計、操作、保安が著しく簡略化されるなどの利点がある。

(3) 精密な位置制御を必要とするもの

最近工作機は、高精度で生産性の高いものが要求される結果、

最近の直流電動機とその応用・高月・生原・香川

次第に自動化される傾向にあり、これは数値制御、ナライ加工などの形で実用化されつつある。この種の用途に用いられる電動機はサーボモータとしての特性が必要で、低慣性で応答特性がすぐれ、起動、停止が迅速に行なえるものが要求される。直流電動機は設計の方法によってこれらの諸特性を満足させられとくに大容量機では、他の電動機より有利である関係上、将来の発展が期待される。

(4) 高速回転を必要とする

高速旋盤、研削盤、ポール盤などで 10,000 rpm 以上の可変速度を必要とするものに対しても、電気的な設計および材料の著しい進歩によって、比較的簡単に適用することができる。

6.2 電動機に要求される事項

電動機が前項で述べたような特性を満足するためには、設計にあたり次の点に注意しなければならない。

(1) 制御性の向上を図るためにまず GD^2 の小さいものとする必要がある。一般的直流電動機はその直径と長さの比が 1:1 以下であるが、低慣性を必要とするものは 1:2 以上のものもある。また電気装荷、磁気装荷の値、磁束分布、主極形状、補極の強さなどを吟味し、回転数一負荷特性が直線性を持つようにする必要がある。

(2) 過負荷によく耐え、過渡特性がすぐれ、整流状態がよいこと。

工作機用電動機には短時間の過負荷が繰り返しがれることが多い。この過渡時の特性および整流状態がよくなければならぬ。細長い電機子は整流が困難になりがちであり、使用状態を十分検討して(1)を決定する必要がある。

(3) 機械的に十分な強度を持ち、振動の小さいものであること。

広い速度範囲と細長い電機子は、振動の点で十分な注意が必要となる。とくに、電機子、主極鉄心、絶縁、ブラケット類の共振についてあらかじめ検討を加えた強度を与える必要がある。

(4) ふんい気に対して強い保護方式を持つこと。

電動機の取り付けられる場所のふんい気は必ずしも良好ではない。一般に、切削油、研削油、機械潤滑油、切粉などにさらされていると考えるべきで、これらに対し十分に保護された形式が必要とされる。とくに研削盤に対して注意する必要がある。

(5) 工作精度の高いものであること。

速度範囲の拡大とともに、電動機の最低速度は次第に低くなる傾向にある。いま電圧制御による速度範囲を 1:200 とすると、その最高速度を 4,000 rpm としても、最低速度は 20 rpm の低速となり、電機子印加電圧は全負荷時 10 V 前後、無負荷では 1 V 以下の値となる。この速度で回転むらが小さく、すぐれた制御性を得るためにには、設計上の問題もさることながら、工作上より生ずる軸まがり、空ギヤの不同、回転部のアンバランスが小さく、長年月にわたり精度の下らない加工法が必要とされる。このほか、



図 6.1 工作機械用直流電動機（送りモータ）

Fig. 6.1 DC motor (feed motor) for milling and boring machine.

小形軽量、価格の安いものであることはいうまでもない。図 6.1 にその一例を示す。

6.3 その他

(1) 振動

前述のように、その使用速度範囲がきわめて広い電動機の振動階級について、現在規格化されたものがない。当社ではやむなく IM に対する JEM の振動測定法に準じ、使用範囲全域について測定を行ない、振動値と有害の共振現象のないことを確認している。振動そのものについては余り問題とならないが、電機子鉄心、主極、巻線などの共振による振動の「節」については設計、工作面で考慮の要がある。しかしここで注意すべきことは、工作機に適した電動機の振動階級を選定することであって、必要以上にきびしい指定は、いたずらに価格を引上げるのみで効果がない。電動機の価格は振動階級の上昇に伴い急激に上昇することに注意して振動階級を指定すべきである。

(2) 寿命

現在工作機の寿命は 10~15 年といわれている。これに対し電動機は専用の規格がなく JIS または JEC が適用される関係上 20 年前後の寿命が与えられ、このために電機品の価格が高くなるきらいがある。あくまでも機械にマッチした寿命とすべきであって、このためには専用規格の制定が必要であろう。

(3) 標準化

3 章において記載したとおり、直流電動機も出力、回転数、外形寸法について次第に標準化され、規格化される気運にある。これらの電動機は量産される関係上価格が安く、吟味された性能が与えられている。現在、工作機用電動機というと特殊なものと考えられがちであるが、標準電動機の使用は、貿易自由化のおりから、その価格低減に対する一つの対策として使用者各位に考慮願わなければならない問題と考えられる。

工作機に対する直流電動機の使用は、その制御性の良さを認めながらも直流電源が得難く、とかく大がかりなものとなり、価格も高いなどの理由によって歛遠されがちであった。しかし最近整流器とくに制御素子付整流器の著しい進歩によって、その制御特性も一段と改善されるとともに、比較的小規模な用途にも気軽に使用できるようになった。今後その価格の低下によって、工作機に対する直流電動機の使用はますます拡張されるものと信ずる。

7. む す び

直流電動機はそのすぐれた速度制御性能を發揮して、各分野に進出しているが、新しい時代にマッチするように再設計されたのは次の点であることを説明した。

- (1) コンパクトデザイン： 小形、軽量、基本寸法の合理化。
- (2) GD^2 を小さくし、負荷特性に直線性をもたせたこと。
- (3) 整流器運転が容易なようになったこと。

この三つの思想を具体的に実現している例として、当社の標準直流電動機： スーパーライン D および M(略称 SD 形および SM 形)，600 番系列 KM 形を紹介し、さらに用途によって電動機の特色が異なる実例として、圧延用電動機および工作機械用電動機を解説したが、電動力応用分野で直流電動機の占める地位は、自動化が進むについて重要視されてくるものと思う。

われわれは時代の要求に沿って、電動機はいかにあらるべきか、そして電動機はどのように選択され、運転され、保守されるものかを考えて、国際競争に立ち向わなければならないが、直流電動機だけの輸出は考えられず、産業機械設備などのなかの一つの駆動要素としての直流電動機の形で輸出されるものであるから、とくに機械メーカーの方々や設備計画の方々の理解を得て、必要にして十分な定格をできるだけ標準定格表のなかから選定し、プラントの合理化、コストの低減、生産性の向上ができるように、三菱直流機のご愛用を切望する次第である。

参 考 文 献

- (1) 小山： 日刊工業新聞社・最近の電力応用機器講習会、項目 2。(非公刊、昭 38)
- (2) 後藤： 電気学会専門講習会、最近の電力機器(昭 39)
- (3) 稲垣： 「電学誌」 84-1, No. 904, 13 (昭 39)
- (4) 萬谷、神浦、有働： 「三菱電機」 34, 252 (昭 35)
- (5) 小山、茶谷： 「三菱電機技報」 36, 1320 (昭 37)
- (6) 茶谷： 「産業と電気」 122, 8 (昭 37)
- (7) NEMA. MG1-10.61-B (AUG., 1963)
- (8) 高月： 電機学会連合大会 S. 4-2 (昭 38)
- (9) 高月、伊藤： 「三菱電機」 35, 952 (昭 36)
- (10) 茶谷ほか： 「三菱電機技報」 36, 1309 (昭 37)
- (11) 伊藤、茶谷： 「三菱電機技報」 36, 1299 (昭 37)
- (12) 池田、甘粕、有働： 「三菱電機技報」 36, 1017 (昭 37)
- (13) 高月： 「三菱電機」 35, 952 (昭 36)
- (14) 有働、熊本、富永： 「三菱電機技報」 36, 1006 (昭 37)
- (15) 新良、元木、長良： 「三菱電機技報」 36, 1098 (昭 37)
- (16) 谷、生原、岩垂： 「三菱電機技報」 36, 332 (昭 37)

最近の大容量高速度誘導電動機

甘粕忠男*

Recent Large-Capacity High-Speed Induction Motors

Nagasaki works Tadao AMAKASU

With development of industry, the demands for large-capacity high-speed induction motors are on the speedy increase and those exceeding 14,000 HP capacity have come to be produced. Large high speed machines, however, are subject to very large centrifugal force during operation at their rotating parts. This calls for special construction and materials to withstand high mechanical stress. Their huge sizes also pose a number of problems in the cooling and vibration as compared with low speed small sized ones. But modern technological progress has enabled very reliable motors of large capacity to come into being, overcoming the manufacturing limitation. As a result, 15,000 HP, 13,000 HP and 11,800 HP four pole motors are now under construction, while 5,800 kW two pole units and 18,000 kW eight pole ones are found among those completed.

1. まえがき

最近の産業のめざましい発達に伴い、設備機械が大型化し、これを駆動する電動機も大容量になり、かつ信頼性の高いものが要求されるにいたった。とくに顕著な傾向は高速度電動機の増加である。大型高速度電動機は、運転中回転部分に非常に大きい遠心力を受け、機械的応力が高く、特殊な構造・材料を採用する必要がある。その上冷却・振動などの面で種々考慮を払わねばならぬ点があり、低速機に比べ多くの問題がある。しかし材料の進歩と構造上の改良とあいまって、高速度誘導電動機の製作限界はますます拡大し、きわめて信頼性の高い大容量電動機が製作されるにいたった。当社では現在 11,000 kW, 8,800 kW 4 極機を製作中であり、すでに 5,800 kW 2 極機、18,000 kW 8 極機など記録的な誘導電動機を製作している。

以下大形の 2 極および 4 極誘導電動機の構造上ならびに選定上の問題について述べ、ご参考に供する。なお本文に述べている大型電動機とは、1,500~2,000 kW 以上のものである。



図 1.1 6,600 kW 11,000 V 60 c/s 4 極誘導電動機
Fig. 1.1 6,600 kW 60 c/s induction motor.

2. 高速度電動機の問題点

本章では、大形高速度誘導電動機の問題点のみ列挙し、それがいかに解決されているかは、あとで説明する。

(1) 回転部分の応力

誘導電動機の回転子は、ケイ素鋼板を積層して作っており、回転中 スロット内の導体や回転子歯の遠心力により、回転子鉄心には非常に大きな応力が働く。

このほか回転子コイル・コイルエンド部およびその接続導体なども

遠心力により変形し絶縁物を損傷し、事故を誘発しないような構造を採用しなければならない。

(2) 冷却

大型高速度電動機は、低速機に比べて回転子が細長くなり、鉄心中央部まで十分冷却風を送ることが困難であり、中央部の温度が高くなりがちである。

(3) 振動

高速度電動機は、大きな機械的応力が働くのを防止するため必然的に回転子が細長く、軸の剛性が低く、その上中央部でのバランス調整が困難であり、わずかの残留アンバランスによつても割合に大きな振動が誘起されやすい。

(4) スリップリングおよび短絡装置

大容量機になると、回転子の電流・電圧とも高く、それに大きな遠心力が加わり、スリップリングや短絡装置の絶縁・構造が問題になる。短絡装置の付かないものでは、ブラシの摩耗・温度上昇にも考慮を払う必要がある。

3. 電動機内部の通風

普通の電動機の内部通風は図 3.1 に示す様式が用いられる。図 3.1 で電動機内部に吸込まれた風の一部は、電動機の内部送風機により、コイルエンドを冷却し固定心鉄心背部を通ってフレーム外部へ吐き出される。他の一部は、回転子鉄心と軸とのスキマ・回転子ダクトを経て固定子ダクトを通り、回転子・固定子の熱を奪い、コイルエンド部を通った風と固定子鉄心背面で合流してフレーム外部へ出る。きわめて容量の大きい 4 極機、1,000 kW 程度以上の 2 極機以外には上記の方式が採用される。

しかし大容量の 2 極機・4 極機は鉄心長が長く、その上回転子

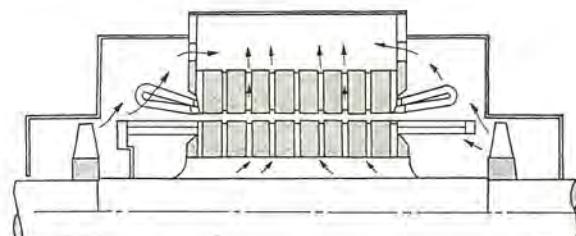


図 3.1 普通の電動機の通風
Fig. 3.1 Ventilation of ordinary motor.

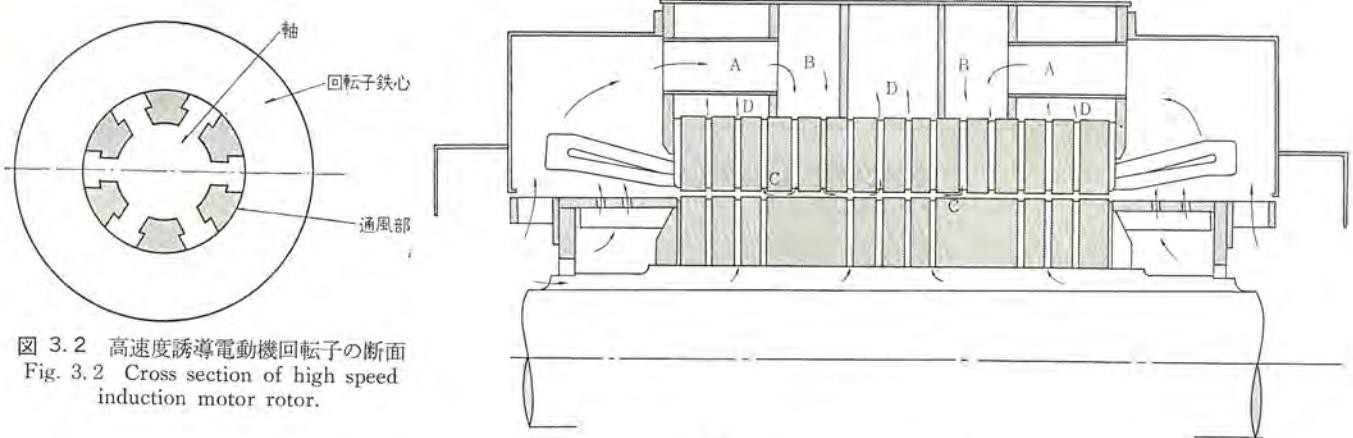


図 3.2 高速度誘導電動機回転子の断面
Fig. 3.2 Cross section of high speed induction motor rotor.



図 3.4 マルティブルラディアル通風方式の回転子
Fig. 3.4 Rotor of multiple radial ventilation system.

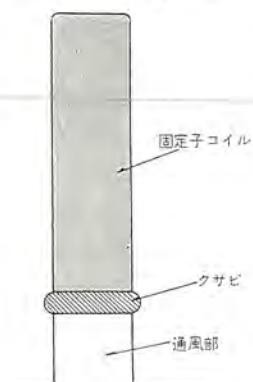


図 3.5 固定子スロット
Fig. 3.5 Stator slot.

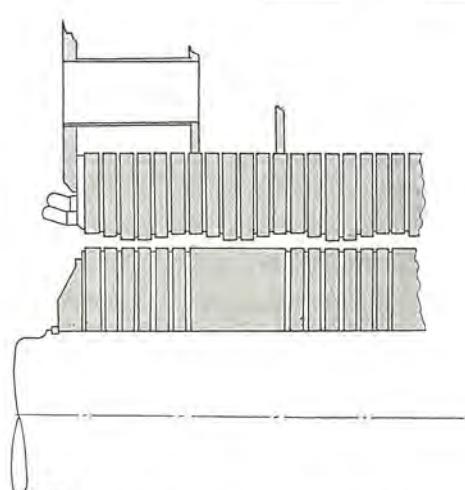


図 3.6 エアギャップの通風説明図
Fig. 3.6 Ventilation of air gap.

の内径が小さいので図 3.2 のように軸方向の通風面積が小さく、通風抵抗が大きくて、回転子ダクトを通る風量が不足し、固定子回転子とも中央部の冷却が不十分であり、この部分の温度が高くなる。

これを解決するためにマルティブルラディアル通風方式が採用されて

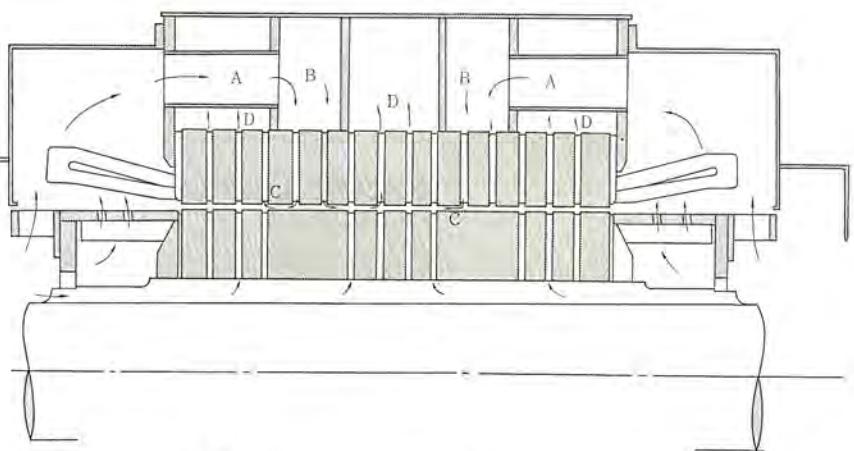


図 3.3 マルティブルラディアル通風方式説明図
Fig. 3.3 Drawing showing a multiple radial ventilation system.

いる。マルティブルラディアル通風方式では、図 3.3 のように回転子全体にダクトが設けられておらず、一部ダクトのない部分がある。内部送風機によってコイルエンドに送られた冷却風はただちにフレーム外に吐き出されず、図 3.3 の通風路 A を通り、B 室へ集まり、ここからふたたび固定子鉄心のダクトを通って回転子に向かって流れ、矢印 C のようにエアギャップを通り、固定子ダクトを経て D 室に集まり、鉄心背部を冷却しつつフレーム外へ吐き出される。誘導電動機は同期機に比べてエアギャップが狭まく、ここを通じての通風が行ないにくいので、図 3.5 のように固定子スロットのクサビ下の寸法を大きくとり、通風面積を拡大し通風を良好にしている。場合によっては固定子内径に図 3.6 のような段をつけて通風を向上することがある。

巻線形電動機は、回転子コイルの温度上昇限度に制約があるが、カゴ形回転子の場合には絶縁物がなく、回転子バーの温度は比較的高くとれる。それでカゴ形電動機では回転子のダクトを廃し、機械損・通風損の低減をはかることがある。

4. 固定子

4.1 フレームおよび鉄心

固定子フレーム・エンドカバーは鋼板を溶接して作られている。固定子鉄心には高級ケイ素鋼板を用い、鉄心打抜後焼ナシ・絶縁ワニスの焼付を行ない、鉄損の減少・効率の向上をはかっている。

4.2 固定子コイル

固定子コイルには図 4.2 のハーフコイルまたは図 4.3 のフルコイル



図 4.1 8,800 kW 4極誘導電動機の固定子
Fig. 4.1 8,800 kW induction motor stator.

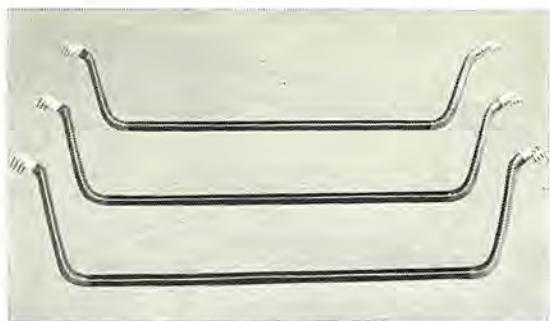


図 4.2 固定子 コイル（ハーフコイル）
Fig. 4.2 Stator coils (half coils).

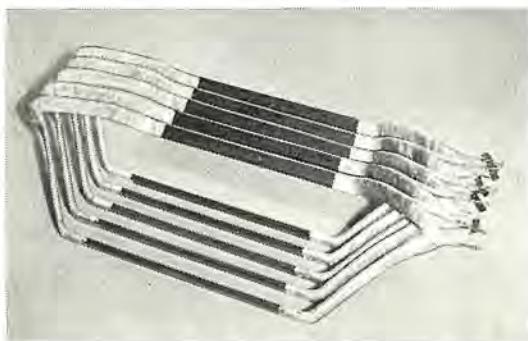


図 4.3 固定子 コイル（フルコイル）
Fig. 4.3 Stator coils (full coils).

が用いられ、電圧と極数により使いわけている。ハーフコイルにすると、コイルをスロットに入れるときにコイルに無理な力がかからなくてすむが、コイルエンドの結線に手数を要する。

大容量の電動機になると、表皮効果により見かけ上の抵抗が増し、固定子銅損が増大するのを防止するためにトランスポジションを行なっている。

大型電動機は工場において最も重要な機械を駆動し、きわめて信頼性の高いことを要求されるので、絶縁にはすぐれた特性を持つダイヤラスチック絶縁を採用している。ダイヤラスチック絶縁とは、ポリエステル樹脂を主成分とする絶縁であり、素線の外側に主絶縁を形成するマイカテープを巻き、これにダイヤレジンワニスを真空圧入含浸させた後、重合反応を行なわせたものである。ダイヤレジンは無溶剤であり、硬化前すなわちコイルに含浸させた状態では低粘度で、かつ硬化に際しては共重合という形をとるため溶剤の揮発などは起ららず、ピンホールやボイドの発生はない。

このコイルはマイカテープとダイヤレジンとが完全に一体になり、内部の空ガキを完全に充てんしており、耐湿性・耐油性・耐アルカリ性に富み、機械的に堅固であり、弹性に富み、絶縁耐力・絶縁抵抗が大きく、 $\tan \delta$ が低いなどすぐれた特性を有している。

5. 回転子

5.1 回転子鉄心

回転体の遠心力は、回転数の二乗に比例し、半径・重量に比例するので、高速度電動機になると回転子には非常に大きな遠心力が作用する。誘導電動機の回転子は、タービン発電機のようにソリッドの軸にスロットを切ったものではなく、ケイ素鋼板を軸に積層して作られている。回転子鉄心は図 5.1 のように外周に回転子歯およびスロット内導体の遠心力による外圧が働き、内周には軸と鉄心の締めシロによる内圧が作用する r_1 , r_2 の内外径を持つ回転円板と考えられる。

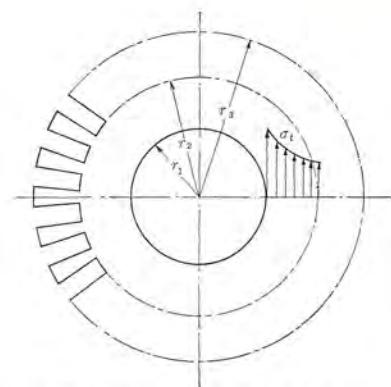


図 5.1 回転子の接線応力分布
Fig. 5.1 Tangential stress distribution of rotor.



図 5.2 光弾性（応力凍結法）による
回転円板の応力分布試験の一例
Fig. 5.2 Example of stress distribution test of rotating disk by means of photo elasticity (stress freezing method).

電動機運転中鉄心の温度は軸よりも高くなり、両者の熱膨張に差が生ずる。さらに遠心力による鉄心の伸びのために軸と鉄心の締めシロが減少する。もし十分の締めシロをとっていないと、運転中軸と鉄心にユルミを生じ振動の原因になる。

回転子内径にはキー ミヅが設けてあって、この部分には応力集中があるのでキー ミヅの形状には十分な検討がされている。軸の断面形状は図 3.2 に示したように完全な円形ではなく、通風 ミヅがあり、締めシロによって生ずる応力は、同一半径の点であっても円周上の位置によって異なり、複雑な応力分布を示す。これらについてはケイ素鋼板でモデルを作つて試験したり、光弾性の応力凍結法や、高速度電子計算機により十分な検討を行なつて製作している。

ケイ素鋼板にはあまり大きな機械的強度は期待できないので、機械的応力を低下させるためには、回転子の内外径とも小さくすることが望ましい。一方危険速度・振動・通風の点からは、なるべく内径を大きくする必要があり、このお互いに相反した条件と電気的特性との間の妥協点を見出し回転子の寸法を決定している。

5.2 回転子コイル

2極・4極の高速度巻線形電動機の回転子コイルには、波巻き・重ね巻・単層巻などが採用されるが、いずれの場合にも、コイルをスロット中に入れた後、十分乾燥した機械的強度の高いクサビで固定する。回転子コイルにも固定子同様絶縁特性のすぐれたダイヤラスチック絶縁を採用している。

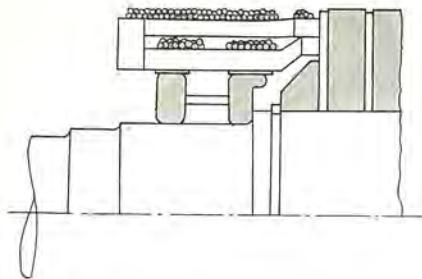
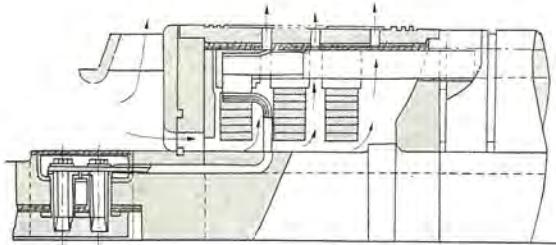


図 5.3 バインド線を巻いた回転子
Fig. 5.3 Rotor bound with binding wire.



図 5.4 バインド線を巻いた回転子
Fig. 5.4 Rotor bound with binding wire.



矢印は通風を示す
図 5.5 リテーニングリングを用いた回転子コイルエンド部
Fig. 5.5 Rotor coil ends provided with a retaining ring.



図 5.6 リテーニングリング取付前の回転子コイルエンド
Fig. 5.6 Rotor coil ends before the retaining ring is attached.

回転子コイルの端部は図 5.3 のようにコアから相当長く突き出しており、この部分が回転中遠心力を受けて変形し、絶縁物を破壊しないよう強固に保持しなければならない。その保持の仕方にふたとおりあり、高速機でもあまり遠心力の大きくなるものに対してはバインド線が使用される。しかし大容量機になると遠心力が大きく、バインド線では

(1) コイルエンドを抑えるために要するバインド線の巻回数が著しく増加する。

(2) バインド線巻回数増加に伴い、バインド線が一様に締まらず、応力分布が不均一になり、ユルミの原因になる。

(3) コイルの端部・ツナギ線まで十分抑えることが困難である。

(4) コイルエンドが全面バインド線におおわれ、冷却効果を阻害する。

などの欠点を生ずる。

上記の欠点を解決するために用いられるのがリテーニングリングである。リテーニングリングは高抗張力の非磁性材でできており、バインド



図 5.7 リテーニングリングを取り付けた回転子
Fig. 5.7 Rotor with retaining rings attached.

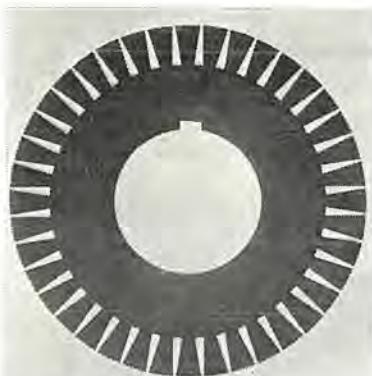


図 5.8 カゴ形回転子の鉄心
Fig. 5.8 Core punching of squirrel cage rotor.

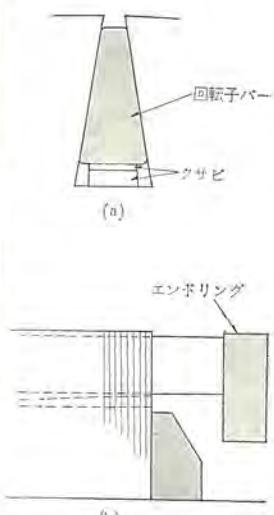


図 5.9 回転子バーの固定方法説明図
Fig. 5.9 Fastening of rotor bars.

(a)

(b)

線のようにゆるむことがなく、表面には通風孔があけてあり、図 5.5 および図 3.3 に矢印で示したようにコイルエンドの通風は十分に行なえる。リテーニングリングを用いる際には、コイルエンドとコイルエンドのツナギ線が円筒形に成形されやすく、かつ通風のためのスキマが十分とれ、コイルエンドの熱膨張によっても破壊しない構造にする必要がある。この要求を満たすものとして単層巻コイルがあげられる。

コイルエンドとスリップリングとを結ぶ導体は、通常軸の中を通すことが多い。とくに軸の中を通した導体を軸上に導き出す立ち上り部分は、回転子コイル同様起動時に高い電圧がかかり、運転時には大きな機械的応力が働きトラブルの原因になりやすい。これらの部分には構造・材質の面でとくに注意が払ってあり、絶縁物はダイヤレジンで処理して万全を期している。

5.3 カゴ形回転子

1,500 kW 程度以上の大形高速度のカゴ形誘導電動機には、二重カゴ形回転子は機械的制約から用いられず、図 5.8 のようなスロットにクサビ形の回転子バーを使用している。クサビ形にする理由は、起動時の表皮効果が大きく、起動特性が良いことと、バーとスロットとの間のガタが少なく、振動の要因になりにくく、回転子歯が機械的に堅固だからである。

回転子バーをスロットに固着する方法は、図 5.9 に示すごとくバーの下に 2 本のクサビを打ち込み、バーをスロットの傾斜面に強く押しつけている。

カゴ形電動機は巻線形と異なり、起動時に大きな起動電流が流れ、回転子バーやリングに多量の熱が発生し、バー・リングの温度は起動時に相当高くなる。エンドリングは、起動時の温度上昇と遠心力によって図 5.10 (a) の矢印の方向に膨張しようとしたし、図 5.10 (b) のように変形し、回転子バーやエンドリング自身にキ裂を生じさせことがある。これを防止するために、エンドリングに押えリングをつけてエンドリングの変形を阻止している。図 5.11 は

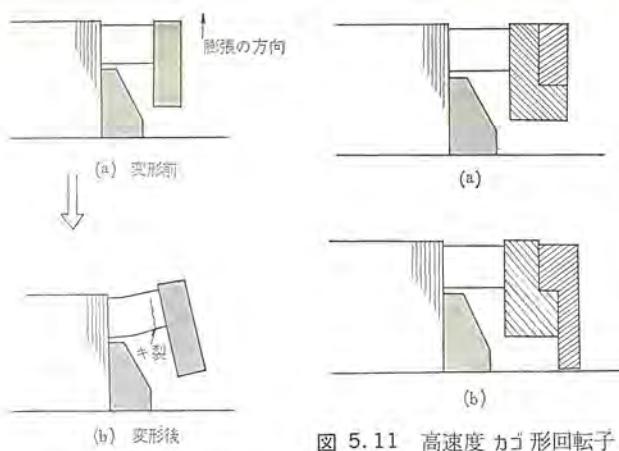


図 5.10 エンドリング、回転子バーの破損
Fig. 5.10 Breakage of end ring, rotor bar.

図 5.11 高速度カゴ形回転子のエンドリング支持方法
Fig. 5.11 End ring support of high speed squirrel cage rotor end ring.

エンドリングに押え リングをつけたいいくつかの例を示す。いずれの場合にもバーの熱膨張により エンドリングが軸方向に多少移動するのを許す構造にしておかなければならぬ。

6. 軸受

1,500~2,000 kW 以上の 2, 4 極機に用いられる軸受はスリップ軸受であり、ほとんどすべてが強制給油方式を採用している。カゴ形の 3,000 kW 程度以下の電動機（給水ポンプ駆動用が多い）では反負荷側軸端にギヤポンプを取り付け、外部に強制給油装置を設けないものもあるが、大形機になると起動に時間がかかり、起動中はギヤポンプの回転も低く、給油が不十分であるから原則として給油装置は別置きにしている。3,000 kW 程度までのものでは強制給油にオイルリング給油を併用しているものもあるが、それ以上になるとオイルリングは併用しない。

3,000~4,000 kW までのカゴ形 2, 4 極機はブラケット形にするが、それ以外の大形電動機はペデスタル形にしている。

ペデスタル形の場合、軸受台の数と配置は、図 8.2 の (a), (b), (c) のものが考えられるが、これについては後の振動の項で述べる。

軸受 メタルは球面座とし、軸の片当たりを防止し、軸のタワミに對し軸がなじみやすくしてある。軸受の設計に當って重要なことは、軸受の直径 (D) および長さ (L) をいかに決めるかということであるが、軸受の直径は軸のタワミ・振動の関連からも制約を受け、長さは軸受損失をなるべく少なくするように決めている。大形高速度電動機では軸受の L/D 比は 0.8~1.0 くらいに選ばれることが多い。

大形電動機では、軸電流が発生しないようなセグメント数を選ぶが、さらに万全を期しペデスタルの下または軸受 メタル裏面を絶縁し、軸電流の流路を形成しないようにしている。両側の軸端に負荷を連結した電動機では、絶縁 カップリングを用い、軸電流により負荷機械の軸受を焼損するのを防止することもある。

7. スリップリング

大容量機になると二次電圧・二次電流とも高く、その上大きな遠心力を受けるので、スリップリング部の構造・絶縁には十分注意を払っている。スリップリング間には、絶縁空間と沿面距離を十分にとり、スリップリングには特殊鋼を使用し、耐摩耗性を持たせ、リングの表面にはスパイラルグループを設け、リングおよびブラシの冷却効果を

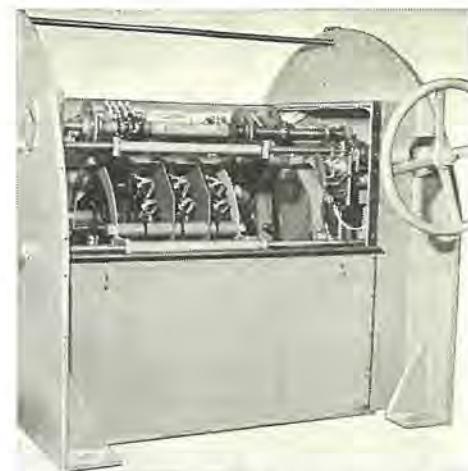


図 7.1 大形高速度電動機 スリップリング部
Fig. 7.1 Slip ring section of large high speed motor.

大きくしている。速度制御のないものには短絡装置、ブラシ引上げ装置を設置し運転中のブラシの摩耗を防止する。

高速機では、スリップリング間や短絡装置などの絶縁物に働く遠心力が大きいので、これを機械的に保護するのに特殊ガラス製のバインドを用い信頼性を増している。

爆発性のガスが漏れる可能性のある場所に対しては、スリップリング部分を内圧防爆または耐圧防爆構造にしたものを使用する。

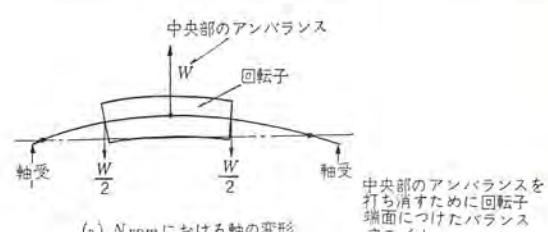
8. 振動

大形高速度電動機では、前に述べたように

(1) 機械的応力から制限を受け、回転子が細長く軸の剛性が低い。

(2) 回転子にわずかな量の残留アンバランスがあつても、遠心力によって大きな力になり、振動は大きくなる

(3) 回転子はケイ素鋼板を積層しているため、鉄心中央部でバランス調整が行ないにくい。などの理由のためバランス調整をとくに入念に行なわねば、振動を小さく抑えることができない。バランス調整は、鉄心を積んだだけの状態、コイルを入れた後、送風機を取り付けたあとなど、いくつかの段階で行なってはいるが、最終的には鉄心中央部に残ったアンバランスを、鉄心の両端面でとらねばならないことがある。とくに一次の危険速度を越えて運転する電動機では、軸の変形状



中央部のアンバランスを打ち消すために回転子端面につけたバランスウェイト

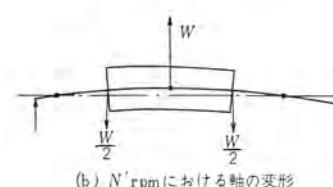


図 8.1 回転数の変化に伴う軸の変位
Fig. 8.1 Shaft deflection due to the change of speed in rotation.

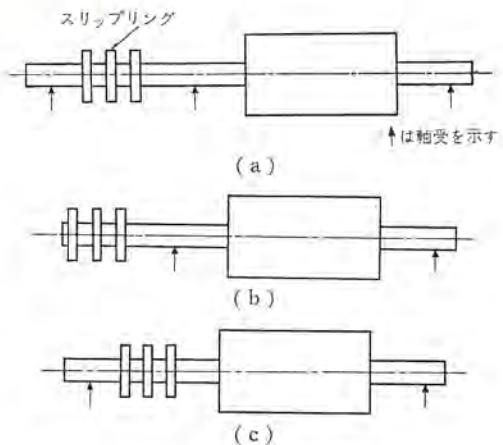


図 8.2 軸受数とスリップリングの配置
Fig. 8.2 Arrangement of number of bearings and slip ring.

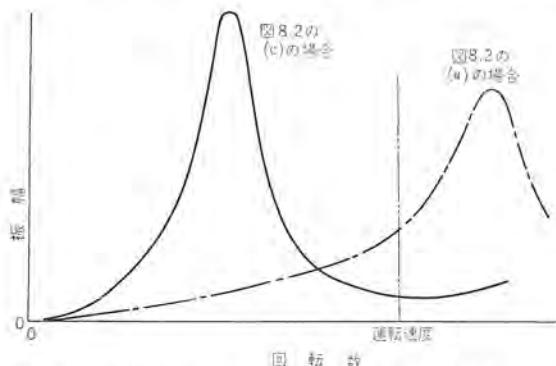


図 8.3 図 8.2 (a) と (c) の配置の回転数変化に伴う振幅の比較
Fig. 8.3 Comparison of amplitudes accompanying the changes of speed in rotation in the arrangements in Fig. 8.2 (a) & (c).

態や位相が回転数によって変わるので、図 8.1 のように限られた面でバランス調整を行ない、ある速度範囲にわたって振動を少なく押えることは非常に困難である。全速度範囲にわたって振動を少なくするには、鉄心中央部のアンバランスは中央部で取らねばならない。それで大形高速度電動機では、鉄心中央部にバランスウェイトを取り付ける調整板を設け、バランス調整を容易にし運転中の振動低下をはかっている。

ペデスタルの数とスリップリングとの関係は、図 8.2 に示す様式を考えられる。このいづれの配置を採用するかは、電子計算機を用い、図 8.3 のように回転数と振幅との関係がいかに変わるかを求め、運転点の振動が許容範囲に入るものの中から適当なものを選定する。図 8.2 の (a) よりも (c) のほうが運転点の振動は、かえって小さいこともある。

一次の危険速度の 2 倍以上の速度で運転する電動機で、振動上注意せねばならぬものにオイルウイップという現象がある。オイルウイップとは自励現象の一一種であり、危険速度の 2 倍以上の速度で運転する機械に起りやすい。危険速度による振動は、ある一定の速度（危険速度）でのみ振幅が大きくなるが、オイルウイップによる振動が出ると図 8.4 のように回転数が上っても振幅は低下しない。オイルウイップは

(1) 軸受の荷重が小さすぎる

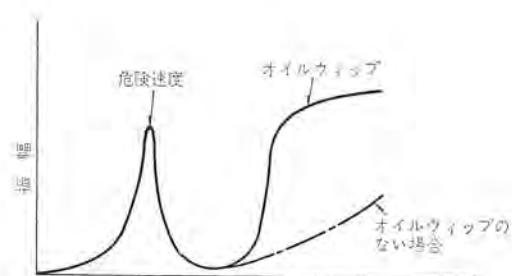


図 8.4 オイルウイップの説明図
Fig. 8.4 Oil whip phenomenon.

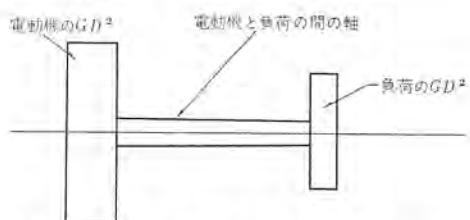


図 8.5 電動機と負荷によるネジリ振動系
Fig. 8.5 Torsion vibration system resulting from motor and load.

(2) 油の粘度が高すぎる

(3) 軸受のスリマが小さすぎる

場合には発生しやすい。危険速度の 2 倍以上で運転する機械ではオイルウイップが起らぬように軸寸法、軸受構造を考えねばならない。

以上述べたのは横方向の振動についてであったが、速度制御のあるものや、負荷のトルク変動の激しいものでは、負荷と電動機回転子から形成される図 8.5 の振動系のネジリの固有振動数と、トルクの脈動の周波数が一致してはならない。

9. 外被の形式

大型高速度誘導電動機に多く用いられる通風方式は、主として次にあげるものである。

9.1 全閉内冷形

全閉内冷形の特長は、完全に外気と遮断された構造であり、ジンマイの多い場所にも使用され、騒音も低いことである。冷却水の補給が簡単にできれば、他の形式に比べ最もすぐれている。

全閉内冷形は、普通図 9.1 に示すように電動機の基礎にピット

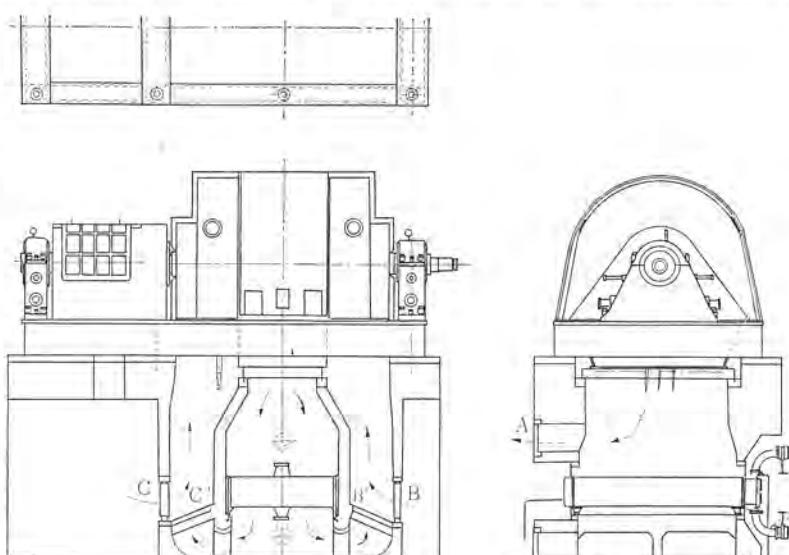


図 9.1 全閉内冷形通風説明図
Fig. 9.1 Ventilation of totally enclosed inner cooled type motor.



図 9.2 全閉内冷形の空気冷却器

Fig. 9.2 Air cooler for totally enclosed inner cooled motor.
を掘り、ここに水冷式の空気冷却器を設け、これによって電動機中央下部から吐き出される熱風を冷却する。冷却器で冷やされた空気はピット下部で、実線矢印のように軸方向に分かれて上り、両側のエンドカバーからふたたび電動機に吸い込まれて電動機内部を冷却する。以上の冷却風の循環は、通常電動機の内部送風機により行なわれている。冷却器は図 9.2 に示すものであり耐食性の高いアルミニウムプラスが用いられる。

もし断水などの事故が起り、負荷の性質上電動機を停止することができないとときは、図 9.1 のダンパ A, B, C を開き、B, C を B', C' の位置に倒し、これらによって電動機と冷却風通路とをシャット断し、点線のように B, C から外気を吸い込み熱風を A から吐き出し、開放防滴形として運転を続けることができる。

出力のあまり大きくないものでは、電動機の下にピットを掘らず、冷却器を台床の幅や電動機上部に取り付けたものもある。

9.2 管通風形

電動機を設置する場所にジンアイが多く、冷却器用の水がなくて全閉内冷形にできない場合に管通風形が用いられる。この場合電動機の吸気をジンアイのない所からダクトを通じて行なうか、あるいは吸気側のダクトの途中にエアフィルタを取り付け、ジンアイを除去した空気を電動機中に吸い込む。ジンアイが非常に多いときは、1段のエアフィルタのみでは十分にジンアイを除去できずエアフィルタを2段置くこともあるが、このようなときには全閉内冷形とすることが望ましい。

吸気側・排気側ともにダクトのついているものが全閉管通風形であり、吸気または排気のいずれか一方のみダクトがついているのが開放管通風形である。

9.3 他力通風形

管通風形で途中のダクトが長かったり、ダクト寸法が小さく内部の風速が速い場合には、ダクト中の風損が大きくて電動機の内部送風機のみでは冷却に必要な風量が送れず、ダクトの途中に外部送風機を置き強制通風とすることがある。外部送風機を置いたものは全閉他力通風形または開放他力通風形と呼ばれる。全閉と開放の区別は管通風形と同じである。このほか電動機を速度制御する際、低速時の冷却が内部送風機のみでは不十分になるので他力通風形を採用することがある。また 9.5 節(2) の内圧防爆形にも他力通風形を用いる。

9.4 開放形・防滴保護形

ジンアイを含まない場所に設置され、かつ騒音があまり問題にならない場所には開放形か防滴保護形を用いる。これらの形は他の形式に比べて寸法・重量が小さく価格も安い。

9.5 その他

(1) サイレンサ付

高速度電動機は通風音が高いので 9.1 節の全閉内冷形以外で

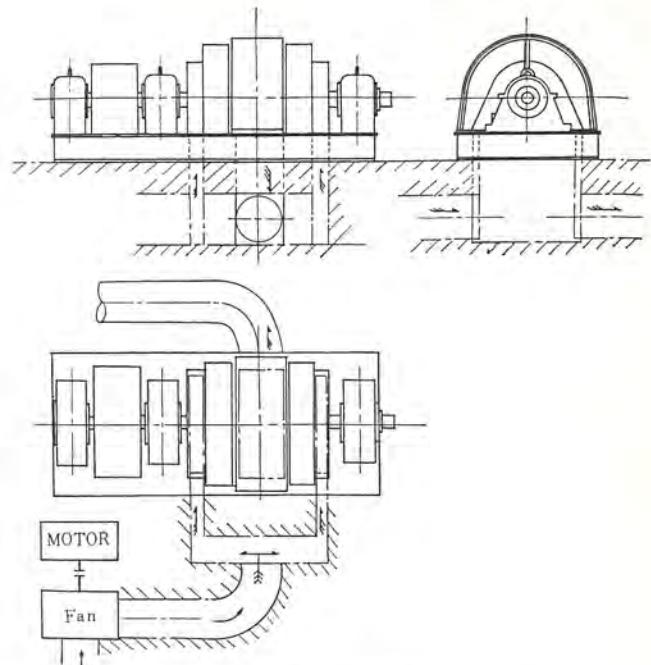


図 9.3 全閉他力通風形
Fig. 9.3 Totally enclosed forced ventilation type.



図 9.4 防滴保護形(サイレンサ付)カゴ形電動機
3,000kW 4P 3,300V 60c/s

Fig. 9.4 3,000 kW dripproof protected squirrel cage motor with silencer.

はサイレンサを吸排気口に取り付けることがある。

(2) 防爆形

爆発性のガスが漏れる可能性がある場所に電動機を設置するときには、その設置条件に応じて安全増防爆形・内圧防爆形などを採用する。

10. 保護装置

電動機本体の保護には次のようなものがある。

10.1 過負荷の保護

電動機の寿命はコイルの温度によって支配される。そこで過負荷による温度上昇を防止するために固定子コイルの間にサーチコイルまたはサーモカップルを埋め込み、固定子コイルの温度を指示させ、温度が一定値に達すると警報を出し、場合によっては電動機を停止させる。

定格値以上の電流が引き続きある時間以上流れるのに対する保護は、過電流继電器で行なう。

10.2 軸受の保護

軸受には軸受温度計を取り付け、現場指示・警報・トリップなどを用いることがある。

10.3 冷却器の保護

冷却器の保護というよりも、むしろ電動機自身の温度上昇の保護であるが、冷却器出口の空気温度を測定し、高くなると警報を出して冷却器の破損・冷却水断水・電動機の過負荷を検出する。冷却器の給水管中に流水継電器や圧力継電器を設け、常に給水を行なわれていることを確認することもある。冷却器の破損はドレン抜に一定値以上水がたまつたことから検出できる。

10.4 内部故障

常用範囲では、電動機の一次電流と二次電流の比が大体一定であり、電動機内部に故障が起ったときには一次二次の電流比が変化するのを利用し、比率動作継電器で内部故障の検出を行なうことがある。

10.5 停止中の保護

停止中に空気中の水分が電動機のコイルや鉄心などに凝縮し、絶縁抵抗を劣化させるのを防止するためにスペースヒータを取り付け、電動機内部の温度を室温よりも高く保つ。

このほか起動時・起動中の保護、低電圧・無電圧・単相・逆相に対する保護も種々講ぜられているが、これらについては本誌「誘導電動機の保護装置とその選択」をご参照願いたい。

11. 2極、4極電動機の比較

大形高速度誘導電動機を使用する場合、2極機にするか、4極機にするか、あるいは6極機を採用するかを決めなければならぬことがある。以下大形電動機の回転数を決めるとき考慮すべき事項について説明する。

11.1 製作限界

大容量の2極電動機と4極電動機とを比較すると、まず問題になるのは製作限界である。現在巻線形2極誘導電動機の製作限界は10,000~15,000kW程度であり、それ以上の大形機になると4極機か6極機としなければ製作できない。

11.2 振動

2極機も4極機も定格速度においては同程度の振動に抑えるこ

とができるが、2極機の回転子のほうが細長く、少しのバランスの狂いに対しても鋭敏である。

11.3 特性

2極と4極の大形誘導電動機の効率・力率を比較すると、4,000kW程度以上では効率・力率とも多少4極機が良い。その理由は次のとおりである。2極機のほうが風速が速く、風損摩擦損などの機械損が大きく、4極機よりも効率はやや低下する。2極機になると図3.5のように固定子スロットを深くし通風面積を増し、回転子スロットのクサビも厚く、漏れリアクタンスが大きく、これを補うために直列導体数が減り力率は4極機よりも悪い。

11.4 寸法・重量

2極機と4極機の寸法を比較すると、回転子直径は4極機が大きいが、固定子のコアパックの寸法は2極機が大きく固定子の外径は両者大差がない。コイルエンドの長さは2極機が長く、全体の長さは2極機が長くなることが多い。以上のことから2極機と4極機の寸法はほぼ同じであり、重量は一般に2極機が重くなる。

11.5 負荷の回転数との関連

負荷機械の回転数が3,000または3,600rpmであると途中にギヤを用いず2極機を採用し直結するのが、ギヤの損失がなく、スペースもとらず付帯設備も少なくて有利である。しかし負荷機械が3,600rpm以上であると、2極機を採用しても4極機を採用しても、ともにギヤで增速しなければならず、普通4極機を採用する。

11.6 信頼性

2極機と4極機の信頼性は10,000~15,000kW以下であると変わりはなく、ともに十分な信頼性を持つものを製作しうる。ただ取り扱い、保守上は4極機のほうが簡単なことが多い。

12. むすび

以上大形高速度誘導電動機について構造を中心に説明した。誘導電動機の用途は広く、あらゆる分野に用いられているので、その使用条件に適したものを見定すことが大切である。本文が多少なりとも大形誘導電動機選定のご参考になれば幸いである。当社は今後も新しい材料の開発、構造の研究、高速度電子計算機の応用などの面で努力し、よりすぐれた大形電動機を製作する所存である。

電子計算機による誘導電動機の最適設計

衛 藤 護*

Optimum Design of Induction Motors by Digital Computers

Nagasaki Works Mamoru ETŌ

Electronic computers have brought forth changes in the industries. Design of induction motors by the use of them is one example. Solution of logic equations, formerly considered unapplicable to machine design, have now become reality through the computers. Complicated calculations are settled in 10 second with no human error. Since the procurement of IBM 7090 electronic computer, Mitsubishi engineers have come to be able to design induction motors satisfying the users in every respect by applying this ingenious apparatus in a very short time. Saving the labor and time are now allocable to the study and development of new products.

1. まえがき

事務管理部面より始められた電子計算機の利用は、大容量高速度電子計算機が開発されるに従ってその使用分野も広がり、現在では複雑な技術計算や異国語間の翻訳などに広く応用されるに至った。

当社では、この電子計算機の利用面における重要性に早くより注目し、1960年3月末に、三菱グループの共同出資によって世界最高級のIBM 7090形電子計算機をわが国では最初に導入することを決定した。

われわれは、これが決定するやただちにそれを誘導電動機の設計に利用するための準備作業に着手し、設計式の再検討や設計資料の整理などの準備段階と数十回に及ぶプログラムテストを経て、1962年4月にはルーチンワークの設計にIBM 7090が全面的に採用できる体制を確立した。

この設計プログラムによれば、誘導電動機の定格と仕様とが与えられたときに、その定格と仕様とを満足する最も経済的な電動機を設計することができる。

われわれはこの設計プログラムを用いて、最近2年間に優秀な誘導電動機を多数設計製作納入したので、その方法と経験とを紹介しご参考に供したい。

紙面の都合により、本稿では電気的設計についてのみ説明するが、機械的設計の分野においてもわれわれは電子計算機を縦横に駆使していることを付言しておく。

2. IBM 7090 の概要

電子計算機の基本的機能は、加減乗除の四則演算機能と二数間の大小を判定する機能とであり、国内外の計算機 メーカによつてそれぞれの特長をもつものが多数製作されているが、IBM 7090はコマーシャル・ベースとして製作されている計算機では最大最高級のものであり、三菱グループに設置されたものはアジア地区における1号機である。

その概要を次に列挙する。

命令数	基本	220種類
記憶容量		32,768語
磁気テープ記録速度		62,500字/sec
カード読み込み速度		250枚/min

印刷速度	150行/min
演算速度 固定小数点方式	
加減算	229,000回/sec
乗 算	39,500回/sec
除 算	32,700回/sec
浮動小数点方式	
加減算	71,400回/sec
乗 算	41,500回/sec
除 算	35,200回/sec
判 定	458,000回/sec

3. プログラムのタイプ

電子計算機に与える一連の演算命令をプログラムと呼ぶが、誘導電動機の設計プログラムには一般に次の3種類のタイプがある。

第1のタイプは、図3.1のフローチャートに示すように、設計者が過去の設計例を参考にして、最適と思われる設計内容を決定してこれを計算機に与え、計算機はこの設計内容に対する機械定数および各種特性を計算して、その計算結果をプリントするタイプである。

この方法は、すでに計算方式の定まっている計算をそのまま電子計算機に代行させるだけに過ぎず、電子計算機の利用方法としては最も初歩的な方法であり、判定機構を全然含まないプログラムである。

したがって、その計算結果が顧客あるいは規格によって与えられた仕様を満足するかどうかの検討には設計者の判断を必要とし、もし、その計算結果が不適当であれば、設計者の判断において設計内容を変更して、満足すべき結果が得られるまでこの操作を繰り返さなければならない。

しかし、この第1のタイプのプログラムは、次に述べる第2、第3のタイプのプログラムのサブルーチン・プログラムとして利用できるものであって、誘導電動機の設計計算には不可欠なプログラムである。



図 3.1 誘導電動機設計 フローチャート (第1のタイプ)
Fig. 3.1 Flow chart of induction motor design
(first type).

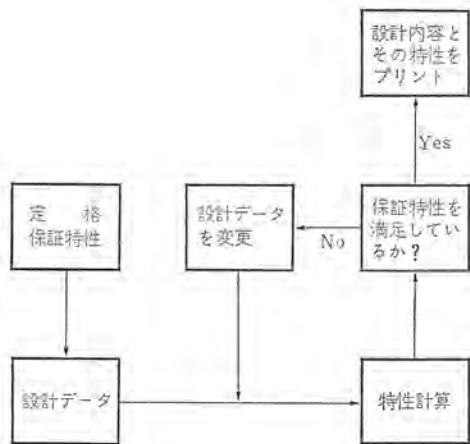


図 3.2 誘導電動機設計フローチャート（第2のタイプ）
Fig. 3.2 Flow chart of induction motor design (second type).

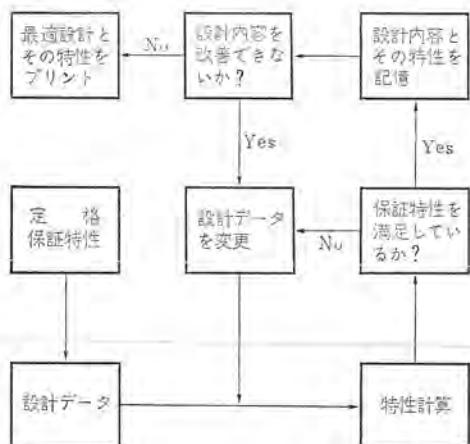


図 3.3 誘導電動機設計フローチャート（第3のタイプ）
Fig. 3.3 Flow chart of induction motor design (third type).

第2のタイプのプログラムは、上に述べた計算結果の適・不適の判定と設計内容との変更操作を電子計算機に自動的に行なわせるもので、図3.2にそのフローチャートを示す。

このタイプによれば、計算機がプリント・アウトする設計内容は顧客または規格の仕様を満足する。しかし、さらにより良い設計が存在するかという点についての検討や考察はなされていないため、実際の製品にその設計結果をそのまま適用するには難点が多い。

この点を補足したのが第3のタイプのプログラムであり、そのフローチャートを図3.3に示す。

この方法によれば、設計者の手数がほとんど不要となると同時に、設計者の個人差や気分差などによる設計内容のバラツキがなくなり、手計算ではほとんど不可能であった設計の最適化と均質化が可能となる。

ただし、図3.3における「設計内容を改善できないか」という設問は、何をもって設計内容が改善されたかという価値判断の基準と関係するもので、この判定基準が異なれば当然最適設計の内容も異なってくる。

われわれが現在、日常のルーチン・ワークに使用しているプログラムは、この第3のタイプである。そして、上記の価値判断基準としては、定格と仕様とを満足する範囲内において最も製品価格が安くなるような設計をもって最適設計と考えている。

したがって、電子計算機によって設計された当社の誘導電動機

は次の特長を兼ね備えるものである。

(1) 顧客または規格より与えられた定格と仕様とを完全に満足する。

(2) 最も経済的な設計である。

次章以下にその具体的な方法を順を追って説明する。

4. インプット（定格と仕様）

電子計算機に読み込ませるデータをインプットと呼ぶが、このインプットには設計すべき電動機の出力、電圧、周波数、極数、温度上界限度のほかに、顧客から与えられた保証特性や制限条件が含まれる。

このうち、保証特性は鉄心寸法（固定子、回転子鉄心の内外径寸法）やスロット寸法（スロット数、スロット形状）によって大きく左右されるものであって、これらの寸法を決定する手法の巧拙は誘導電動機設計上の一つの大いなキー・ポイントであるけれども、設計書を作成することに鉄心寸法やスロット寸法を新設していくはその抜形工具を要する費用がかさみ、不経済である。

そのため、ほとんどのメーカーではこれら鉄心寸法、スロット寸法を標準化しており、よほどの特殊品でない限りこの標準抜形を用いて工具費の節約を計るのが普通である。

当社においても、電子計算機を用いて大局的設計の立場から最適鉄心寸法、最適スロット寸法の標準系列をすでに決定しており、日常設計にはできるかぎりこの標準抜形を使用する立場をとっている。

すなわち、鉄心寸法、スロット寸法はあらかじめ定められているものであるから、電子計算機にインプットとして与えられることとなるが、この場合、とくに使用ひん度が高いものは磁気テープ内におさめ電子計算機自体に記憶させているので、設計者は顧客より与えられた定格と仕様のみをインプットで指定するだけで良い。

もちろん、設計者が標準抜形以外を使用したいときには、それらをインプットに指定できるようになっているから、融通性に富んだ設計ができる。

5. 保証特性と設計領域

誘導電動機の保証特性としては

- 起動電流
- 起動トルク
- 最大トルク
- 定格出力時のスベリ
- 力率
- 効率

があげられるが、これらの特性は図5.1の等価回路に示す回路常数の関数として求まる。しかし、この回路常数自体がまたいろいろなファクタの関数であって、そのため関数の数より変数の数の方がはるかに多くなり、特性の逆関数として設計内容を直接に求めることは不可能である。

ところが鉄心寸法、スロット寸法が定められているときには、これらの回路定数は鉄心長と直列導体数のみから定まるので、特性も鉄心長と直列導体数のみで定まるものと考えてよい。

ところで、この直列導体数は、結線（Y、△）、並列回路数、コイル巻回数の組み合わせとして定まるものであり、しかもこれらはすべて不連続量であるから、電子計算機のように連続量の取り扱いに適したもので、取り扱うには不都合な点が多く、できるな

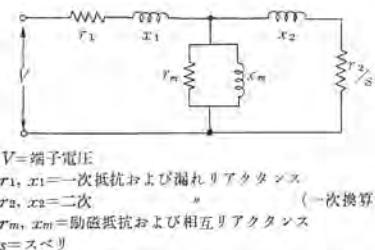


図 5.1 誘導電動機の等価回路
Fig. 5.1 Equivalent circuit of induction motor.

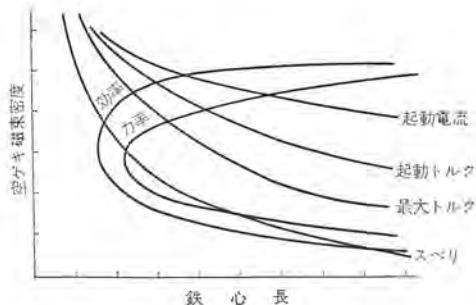


図 5.2 各特性をその保証値に保つための空隙
磁束密度と鉄心長との関係
Fig. 5.2 Relation between air flux density to keep various characteristics at guaranteed value and core length.

らばこの直列導体数を上記諸量とは直接には無関係な連続単一量に置換する方が得策である。

ところが、

$$N = \frac{E \times P \times 10^8}{\sqrt{2} \pi \times f \times D \cdot K_w} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{B_g} \quad \dots \dots \dots \quad (5.1)$$

ただし N =每相直列導体数

E =端子電圧(実効値, V)

P =極数

f =周波数(c/s)

D =固定子内径(cm)

K_w =巻線係数

L =鉄心長(cm)

B_g =空隙磁束密度(G)

とおけば、直列導体数を鉄心長と空隙磁束密度と巻線係数のみに関係する連続量として取り扱うことができ、さらにコイルピッチを一定とすれば、直列導体数は鉄心長と空隙磁束密度の関数となるので、前記の回路定数は鉄心長と空隙磁束密度の関数となる。したがって、誘導電動機の諸特性も空隙磁束密度と鉄心長の連続関数として取り扱うことができる。

この関数関係は表皮効果や鉄心飽和特性や鉄損特性の非直線性のために複雑な関係となる。その例を図 5.2 に示す。

図 5.2 は、各特性をその保証値に保つための空隙磁束密度と鉄心長との関係を、各特性について示したものである。

図 5.2 から知れるように、誘導電動機に要求される特性のうち、起動電流、起動トルク、最大トルク、定格出力時のスベリに対する鉄心長と空隙磁束密度との関係は一様の増減関係にあり、効率と力率に対しては多様関係にある。つまり、計算値が保証値を満足しないとき(計算の出発点において想定した磁束密度による計算結果は、ほとんどの場合保証特性を満足しない)、起動電流、起動トルク、最大トルク、スベリに対してはそれを修正する方法(空隙磁束密度を増すべきか減らすべきか)が一義的に定まつてくる。

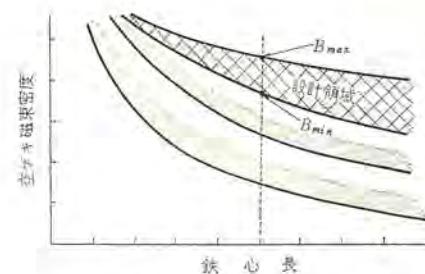


図 5.3 保証特性と設計領域
Fig. 5.3 Guaranteed characteristics and design region.

が、効率、力率に対しては一義的には定まらない。そのため、効率、力率を保証値まで収束させるに要する時間は必然的に長くなり、電子計算機の計算費用が増す。

しかし、誘導電動機を実際に設計する場合は、特性のほかに温度上昇を考慮して設計するために、電気荷重と磁気荷重とは必然的にある範囲内に抑えられることとなる。その結果効率と効率とはおのずからある範囲内に落ち着くので、実際問題としては起動電流、起動トルク、最大トルク、スベリの4特性のみを考えれば十分な場合が多い。

したがって、日常設計のように反復使用度が高いものでは、電子計算機の高価な計算時間を節約する意味からいってもこれら4特性のみを考える方がより実用的であり、また、プログラミングの作業も簡単である。

そして、これらの保証特性は~%以下、~%以上というように与えられるものであるから、空隙磁束密度としては起動電流より最大値 B_{max} が定められ、起動トルク、最大トルク、スベリのうち、いずれか一つから最小値 B_{min} が抑えられることになる。その結果、上記の4保証特性を満足するための空隙磁束密度が B_{max} 、 B_{min} の2個の量に還元され、図 5.3 に示すように設計領域として簡易化し得ることとなる。

6. 最適鉄心長の決定

このようにして設計領域が定まり、ある鉄心長に対する B_{max} と B_{min} の値が決定された。

次に行なうべき計算は、この B_{max} と B_{min} とに対して

$$B_{min} \leq B \leq B_{max} \quad \dots \dots \dots \quad (6.1)$$

を満足するような空隙磁束密度 B を与える直列導体数を求めることである。

この直列導体数は式(5.1)より求めればよいが、同時に

$$\text{每相直列導体数} = \frac{(\text{毎スロット導体数}) \times (\text{每相スロット数})}{(\text{並列回路数})}$$

の関係も満足しなければならないため、 B_{max} と B_{min} の値が定まったからといって必ずしも式(6.1)を満足する直列導体数が存在するとは限らない。

そのおもな理由には

- (1) スロット内に並ぶ素線の数は整数である。
- (2) スロット数は整数である。
- (3) 結線は Y 結線か△結線の2とおりしかない。
- (4) 並列回路数は極数によって定まるある整数しか選べない。
- (5) コイルピッチの選び方には限度があり、かつ短節係数は不連続に変わる。
- (6) 素線寸法は不連続に変わり、市販品の寸法を使用する必要がある。

(7) 素線の工作性や在庫の有無を考慮しなければならない。などがあげられる。

したがって、 B_{\max} と B_{\min} が求まつても $B_{\max} < B_{\min}$ の場合はもちろん、 $B_{\max} > B_{\min}$ の場合でもその幅が狭いときには式(6.1)の値を実現し得る直列導体数は存在し得ない。

ゆえに、ある鉄心長について B_{\max} と B_{\min} の値が求まつたら、その B_{\max} と B_{\min} との範囲にある磁束密度を実際に再現できるような巻線（以下の説明においては、このような再現可能な巻線を単に巻線と略称する）が具体的に存在し得るかどうかをまず確かめる必要があり、これが確認されてのちにはじめてその鉄心長は採用可能となる。

これと反対に、巻線が具体的に存在し得ないならば、 B_{\max} と B_{\min} との幅を広げて具体的に巻線が存在し得るに至るまで鉄心長を延ばさなければならぬ。

ただ、その場合に設計不能な保証特性がインプットに指定されていたりすると設計領域がもともと存在し得ないから、電子計算機はむだな計算を繰り返すことになる。これはインプットにミスがある場合でも同じである。

そのため、われわれのプログラムでは鉄心長が変わることにそのときの諸特性を on-line printer で打ち出させるようにしており、その打ち出した内容を追うことによって、設計者が実現可能な特性限度や インプット・ミス をただちに知ることができる仕組みとなっている。

一方、 B_{\max} と B_{\min} との幅が十分に広ければ当然巻線が存在し、さらに鉄心長を縮めて B_{\max} , B_{\min} の幅を狭めてもなおかつ巻線が存在する場合もあり得る。したがって、ある鉄心長に対する B_{\max} , B_{\min} の範囲から巻線が一つでも具体的に存在することがわかったならば、鉄心長をさらに縮めてより経済的な設計を試みなければならない。

われわれのプログラムでは、上記のプロセスを電子計算機が自動的に繰り返して、それ以上鉄心長を縮めると B_{\max} と B_{\min} との範囲が狭くなるために具体的に巻線が設計不可能となるまで計算することによって、最も経済的な鉄心長が決定される。

7. 最適鉄心外径の決定

鉄心外径と鉄心長との比は、外観のバランス、冷却、振動などの点からその取り得る範囲には限度がある。つまり、各鉄心外径ごとに最長最短の鉄心長が定まっている。

そのために、ある鉄心外径において許容し得る最短の鉄心長でも巻線が存在し得るならば、より経済的な設計を行なうためにはもう1段下の鉄心外径であらたな設計を試みる必要がある。

また、最長鉄心長でも具体的に巻線が存在し得ないときには、鉄心外径を1段上げて適当な設計領域が存在するか否かを調べなければならない。

最も経済的な鉄心外径は、われわれのプログラムではこのプロセスによって決定される。しかも、さきに述べたように使用ひん度のとくに高い範囲の鉄心寸法は磁気 テープにより電子計算機自体に記憶させているので、この鉄心外径の上下操作は電子計算機が自動的に行なうようになっている。

8. 最適コイルの決定

上記の方法で最適鉄心外径と最適鉄心長が決定された。次の作業はこれに対応する B_{\max} と B_{\min} とから式(6.1)を満足する具

体的な巻線をすべて求めることである。

具体的な巻線をすべて求めることは、結線、並列回路数、コイル・ピッチの組み合わせについて導体素線の寸法と並べ方をすべて求めることであるが、工作上から素線の並べ方に制限があり、また素線自体の工作性や在庫の有無が問題となってくる。

さらに市販されている素線寸法の種類も限られているので、これらの制限条件をすべて考慮してプログラムを作る作業は単なる数式の プログラミング とは異なりきわめてむずかしい作業ではあるけれども、従来より設計者が手計算で設計していた場合の思考過程を十分に分析して、そのとおり電子計算機に判断させればよい。

もちろん、この場合にもより経済的な コイル を製作するために使用材料および工作費が最小となるような コイル を電子計算機に選択させる必要がある。

9. アウトプット (設計書)

以上の過程をたどり、電子計算機は顧客より与えられた定格と仕様を満足する最も経済的な設計を アウトプット として導き出すが、この アウトプット は必ずしも 1 種類とは限らない。

なぜならば、同じ鉄心寸法、鉄心長でも結線、並列回路数、導体巻回数、素線配列、コイル・ピッチ の組み合わせによって、与えられた定格と仕様を満足する設計が幾種類も存在し得るからである。

そのため、これら多数の設計例のうち、どの設計を実際に採用するかが最後の問題として残る。

これを電子計算機に行なわせるためには、設計結果をすべて記憶させて、それらのなかから点数制度によって特性が最もすぐれた設計だけを導き出させるのも一つの方法である。この点数制度とは、計算特性と保証特性とを比較して、計算特性が保証特性より下回る場合には減点し、上回るときには得点を与えて、その点数が最も大きくなるものを最適設計と考える方法である。

この点数制度は、総合特性にすぐれた設計例を電子計算機に自動的に選択させる方法としてはすぐれた点が多いが、電子計算機は人間のような勘による判断力を持っていないため、製造方法のごとき外部条件の変化や設計者の長年の経験を反映させるには、すべての設計結果を プリント・アウト させる方が賢明であるともいえる。

その場合には、電子計算機が打ち出す幾とおりかの設計例のうちから、プログラムに組み入れられていない事項を設計者が勘案して、採用すべき設計を決定することになる。

なお、当社においては、この アウトプット は特別に作成された設計書用紙に適当に整理されて打ち出され、ただちに高速度データ伝送装置によって製作所に電送され、実際の製作工程に流される。

10. フローチャート

上述した事柄をすべてまとめて フローチャート で示せば 図 10.1 のようになる。

11. む す び

IBM 7090 のような大形高速度電子計算機は、本稿に述べたすべての計算を 10 秒以内に完了し、計算ミスは皆無である。

その結果、設計に要する日数は大幅に短縮され、設計経験の浅い設計者でも高度な設計が行なえるので、均質な高い品質の誘導

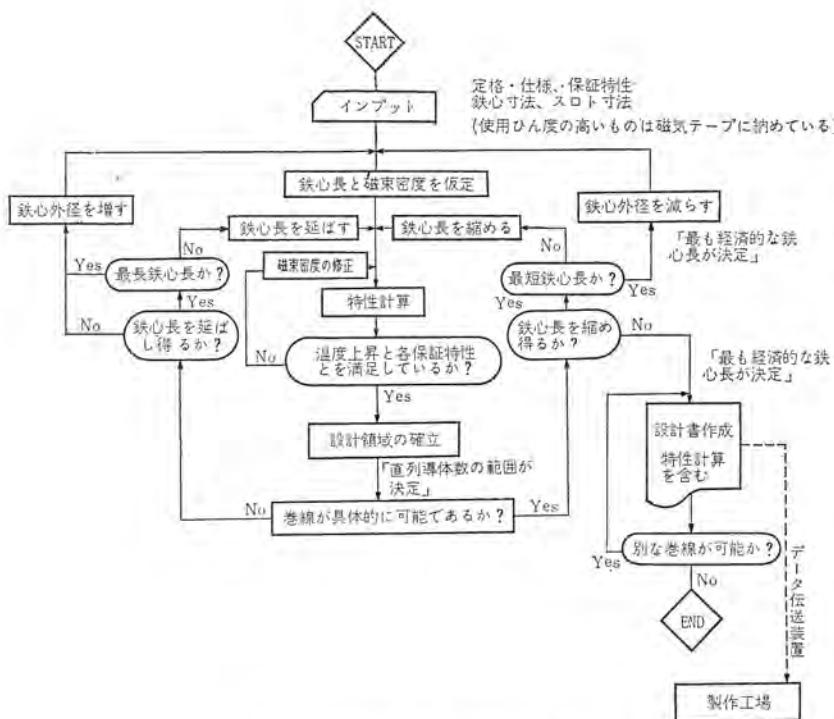


図 10.1 当社 プログラム 詳細 フローチャート
Fig. 10.1 Detailed flow chart of Mitsubishi program.

電動機を容易に製作し得るようになった。

さらに重要なことは、以前には設計者の日常業務の大部分を占めていた設計計算作業を電子計算機が代行するようになったため設計者がその能力と時間とを新製品の開発と研究に向け得るようになったことである。

その他、理論式は得られておりながらもそれを人力で計算するところなく大なる労力と時間を要するために現在まで放置されていた設計上の複雑な問題も、電子計算機を利用することにより容易に解決できるようになった。

われわれは、この革命的な計算装置を有効に利用し、今後ともさらにすぐれた誘導電動機の製作に専心するとともに、未踏の問題とも取り組んで解決していきたいと念願している。

最後に、プログラムの作成に際し大なるご援助をいただいた
当社計算管理課半場技術に深く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- (1) G. W. Herzog; The Application of Digital Computers to Rotating Machine Design, AIEE Transaction paper, 59-122.
 - (2) G. L. Godwin; Optimum Machine Design by Digital Computer, AIEE Transactions, Vol. 78 (1959).
 - (3) S. Lehmann; Anwendung von Digitalrechnern zur Berechnung von Asynchronmaschinen, ETZ-A, Bd. 82 H. 17, (1961).
 - (4) H. Frohne; Rationalisierung beim Entwurf elektrischer Maschinen unter Verwendung digitaler Rechenautomaten, ETZ-A, Bd. 84 H. 2, (1963).
 - (5) C. G. Veinott; Electric Machinery Design by Digital Computer After Nine Years, AIEE Transactions, Vol. 82 (1963).

誘導同期電動機

新良由幸*

Induction Synchronous Motors

Nagasaki Works Yuko SHINRYO

Synchronous motors have been preferably employed to keep the motor speed positively constant. However, their starting problems often upset their merits and place a limit to their applications. To master the drawback induction synchronous motors have been developed. They can start with safety under gruelling conditions, permitting the building of relatively high speed machines with ease. Their applications to cement industry are now widely acknowledged. The only handicap is slightly higher exciting current. But this is almost completely settled by the development of semiconductor rectifiers as exciter. Furthermore, exciting circuit systems have been devised to reduce the exciting current to the valve practically dowing away with the drawback.

1. まえがき

電動機の速度を正確に一定に保ちたい場合あるいは系統の力率を改善または調整したい場合には同期電動機が好んで用いられる。しかし普通の突極形同期電動機はカゴ形巻線によって起動されるので、しばしば起動が問題となり、大容量で大きな加速トルクを必要とする場合、または回転系の慣性モーメントが大きい場合などには実用困難となる。また割合に高速の機械では突極構造の限界が問題となる場合も多い。

このような標準の同期電動機の欠点を補うために考えられたのが誘導同期電動機で、巻線形誘導電動機として起動されるので慣性モーメントや起動トルクの大きさにほとんど制約がなく、また円筒形回転子であるため高速機の製作も容易である。唯一の欠点は励磁電流の値がやや大きいことであるが、これも最近の半導体整流器の発達により励磁装置としてはほとんど完全に解決され、さらに後述するように励磁回路方式には種々の考案が施され実用上問題にならない程度に励磁電流の値を減少させることは困難ではない。

上述のような利点が認められ、最近とくにセメントミルにはきわめて広く愛用され、さらに他の用途についても需要は増加する傾向にある。そこで本文には誘導同期電動機の一般的な解説を行ない、セメントミル用としての特殊な事項についても若干の説明を付記する。

2. 特 性

誘導同期電動機の電磁気的な構造は巻線形誘導電動機とまったく同一であり、したがって特性もきわめてよく似ている。このことは次のように考えればさらに具体的に理解できる。

誘導同期電動機の励磁巻線方式については後に詳しく説明するが、三相巻線を使用する代表的な方式とそれに対応する起磁力の波形とを図2.1に示す。(簡単のために全節巻と仮定した)

誘導電動機はその回転子に図2.2に示すような三相交流電流が流れるが、同図A点における起磁力波形は図2.1(a)に、またB点における波形は図2.1(b)にまったく一致する。このことは各相巻線内の電流分布が等価なことから容易に理解される。すなわち図2.1のように直流励磁することは、交流のある瞬時の

状態を永続的に維持させることと等価である。

誘導機の回転子側を固定子側とは別の独立した電源によって交流励磁し、力率改善や速度制御を行なう方式(たとえばクレーマ方式またはシェルビウス方式など)が実用される場合があるが、このように2個の交流電源をもつような交流機を総称して二重励磁交流機と呼び、一般的の誘導機や同期機等はその一変形であると見なすことができる。

今スベリ s において、運転中の二重励磁交流機の定常的な基本式は、次式によって与えられる。

$$\text{電圧 } \begin{bmatrix} e_s \\ e_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + jX_s & jX_m \\ jsX_m & r_r + jsX_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^s \\ i^r \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{トルク } T = -jX_m i^s i^r \text{ の実部 (同期ワット)} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

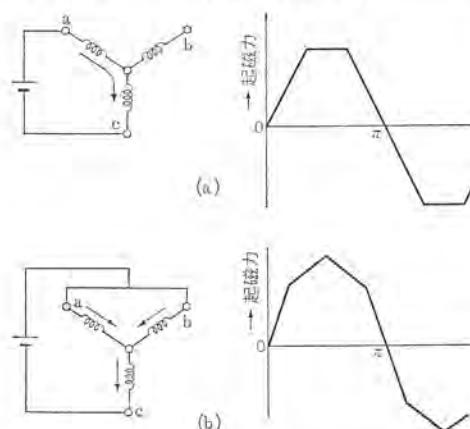


図 2.1 三相巻線の直流励磁と起磁力波形
Fig. 2.1 DC excitations of 3-phase winding and their mmf wave forms.

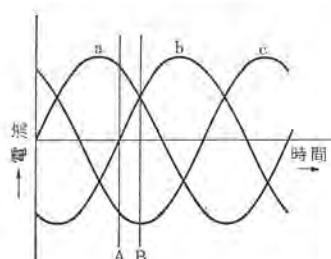


図 2.2 三相交流電流
Fig. 2.2 Three phase AC current.

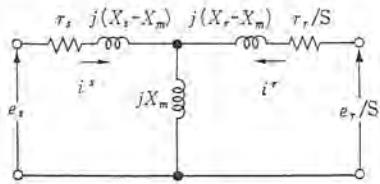


図 2.3 二重励磁交流機の等価回路
Fig. 2.3 Equivalent circuit of double-fed machine.

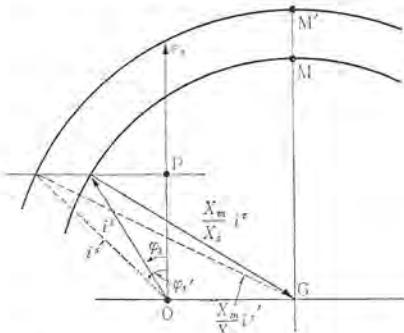


図 2.4 誘導同期電動機のベクトル図
Fig. 2.4 Vector diagram of induction synchronous motor.

ただし記号は図 2.3 に与えた式 (2.1) の等価回路に示される。また i^s は i^r の共役値を意味する。

式 (2.1) を電流について解けば次式を得る。

$$\begin{bmatrix} i^s \\ i^r \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} r_r + jsX_r & -jX_m \\ -jsX_m & r_s + jX_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_s \\ e_r \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

$$\Delta = (r_s + jX_s)(r_r + jsX_r) + sX_m^2 \quad \dots \dots \dots (2.4)$$

しかし誘導同期電動機においては、回転子は直流励磁され、したがって完全に同期運転されるから $s=0$ である。ゆえに式 (2.3) を計算して次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} i^s \\ i^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_s}{r_s + jX_s} & -\frac{jX_m e_r}{r_s(r_s + jX_s)} \\ \frac{e_r}{r_r} & 0 \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (2.5)$$

そこでこの値を式 (2.2) に代入して次のようなトルクの式を得る。

$$T = e_s i^s - r_s |i^s|^2 \text{ の実部} \quad \dots \dots \dots (2.6)$$

または $r_s=0$ と仮定して

$$T \cong -\frac{X_m}{X_s} e_s i^s \text{ の実部} \quad \dots \dots \dots (2.7)$$

式 (2.5) においても $r_s=0$ と仮定すれば

$$i^s = \frac{e_s}{jX_s} - \frac{X_m}{X_s} i^r \quad \dots \dots \dots (2.7)$$

を得るので、この関係は図 2.4 のベクトル図によって表現される。またトルクは式 (2.6) または式 (2.7) から、適当なスケールを与えることによって同図 OP の長さによって与えられることがわかる。

今励磁電流 i^r を一定のまま負荷を増せば i^s のベクトルは右方に回転しつゝに M 点に達する。この点を過ぎてさらに i^s のベクトルを右方に回転しても、もはやトルクは増大しないから M 点は安定運転限界を与える、トルク GM を脱出トルクと称する。

次に一定の負荷トルクに対して励磁電流 i^r を増せば、同図の点線に示すように力率角が大きくなり ($\varphi_s' > \varphi_s$) また脱出トルクの値も i^r に比例して大きくなる。このような特性は標準の同期機とまったく同一である。

3. 誘導電動機との比較

誘導同期電動機は前記のように起動時には完全な誘導電動機と

して動作するが、さらにたとえば励磁系統の事故の場合には誘導電動機として長時間運転を続行することも不可能ではない。そのためこの両者の関係について十分考察しておく必要がある。

誘導機として運転する場合には回転子側に電源はないので式 (2.1) において $e_r=0$ となる。そこで電流は式 (2.3) から

$$\begin{bmatrix} i^s \\ i^r \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} r_r + jsX_r & -jX_m \\ -jsX_m & r_s + jX_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

で表現され、 i^s と i^r の関係は図 3.1 の円線図によって示されることは周知のとおりである。ただし図は簡単のために $r_s=0$ と仮定した。そしてトルクは OP で与えられ最大トルクは O'M で示される。

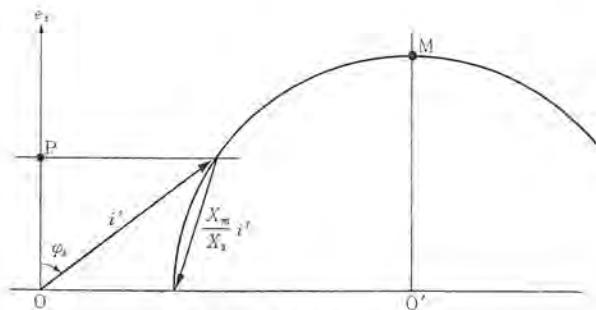


図 3.1 誘導電動機の円線図
Fig. 3.1 Circle diagram of induction motor.

この図を前項の結果と対比して、誘導同期電動機と誘導電動機とが次のような関係にあることが容易に説明される。

(a) 誘導同期電動機は、励磁電流 i^r の値を変えることにより相当自由に力率 $\cos \varphi_s$ を調整することができ、主として進み力率の領域において運転される。これに反し誘導電動機の力率は負荷によって一意的に支配され調整することはできず、かつ必ず遅れ力率の領域において運転される。

(b) 誘導同期電動機の脱出トルクは端子電圧と励磁電流との積に比例し、励磁電流を変えることによって比例的に変化するが、誘導電動機の最大トルクは端子電圧の二乗に比例するので電圧さえ一定ならば常に一定値となる。

4. 誘導同期電動機の定格力率

誘導同期電動機の定格力率を決定するにあたっては、系の総合力率について検討することももちろん重要であるが、さらに誘導電動機として長時間連続運転する場合についても十分考慮すべきである。

電動機の駆動する負荷に応じて要求される脱出トルクの値が決定されるが、この脱出トルクは励磁電流 i^r によって支配されるので、定格力率のいかんを問わずこの励磁電流は一定である。そこで今 2 種類の異なる定格力率の機械について、誘導同期電動機および誘導電動機としてのベクトル図の一例を図 4.1 に示す。

図において実線は 90% 力率、点線は 100% 力率の機械を示している。図から明らかのように 100% 力率の場合には 90% 力率の場合よりも空 i^r 起磁力成分 (ベクトル $i^s + i^r$) を大きくする必要がある。すなわち $OG' > OG$ 。このことは 100% 力率の機械は空 i^r を大きく設計する必要のあることを示している。したがって誘導電動機として運転する場合の力率は大幅に悪化し入力電流が増大する。すなわち $OB' > OB$ 。したがって今の場合には定格力率を 100% に決定すれば誘導電動機として連続運転するためには寸法が大きくなり不経済になることが理解される。以上

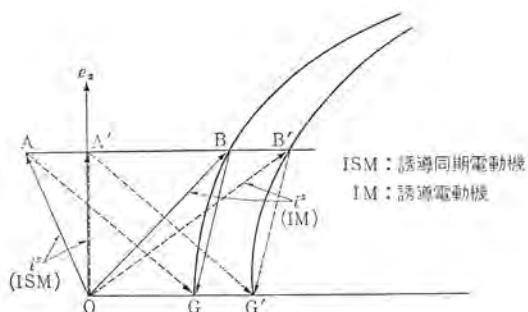


図 4.1 100% 力率機と 90% 力率機
Fig. 4.1 100% PF and 90% PF machine.

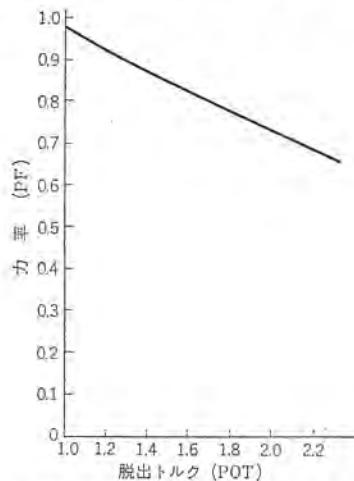


図 4.2 誘導同期電動機の脱出トルクと定格力率
Fig. 4.2 POT and rated PF induction synchronous motor.

の事柄に着目して図 4.2 には定格励磁電流に対する脱出トルクの種々な値に対して、誘導同期電動機としての力率と誘導電動機としての力率とが等しくなるような定格力率の値を示した。

幸いにして誘導同期電動機は円筒形回転子機であるため、空ガラ長は比較的に自由に設計することができ、突極形同期機のように定格力率の相違が価格に及ぼす影響がさほど顕著ではない。また誘導電動機として運転するときには回転子損失が減少するので、定格力率はなるべく図 4.2 に与えた値よりも上の範囲で、適当に選定することが得策であると考えられる。

5. 励磁巻線方式

先にも記したように誘導同期電動機の唯一の欠点は、励磁電流が一般的な突極形同期電動機に比較してやや大きいことである。これは起動時の回転子誘起電圧を、なるべく低く抑える必要のために生ずるものであるが、この欠点を緩和するために古くから種々の考案がなされている。そのうち現在実用されている代表的な方式を図 5.1 に示す。

励磁巻線方式の選定において、とくに注意すべきことは、まず起動時誘起電圧および励磁電流をなるべく小さくすることである。これらの要求は互いに相反するため特別な工夫が必要となる。また巻線の一部を適当に短絡して有効な制動巻線を構成し、外乱に対して有害な乱調を防止するとともに、誘導電動機として運転する際には、なるべく平衡な巻線になるように配慮することも重要である。

有効な制動巻線が構成されないような方式では、外乱に対して安定な運転を確保することはきわめて困難であり、この意味においてたとえば図 5.2 のような方式は決して採用すべきではない。また当然ながら起電力波形には、なるべく有害な高調波成分を含

起動中	運転中	I_f	誘起電圧 E_{exc}	スリップ S	適用、特長
(a)		$\frac{I}{n}$	E_n	3	構造、制御装置が簡単 1,000kW 以下程度に 好適
(b)		$\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I}{n}$	E_n	4	構造、制御装置が簡単 1,500kW 以下程度に 好適 制動特性良好
(c)		$\sqrt{3} \frac{I}{n}$	$\frac{1}{\sqrt{3}} E_n$	3	同上
(d)		$\frac{1}{2} \frac{I}{n}$	E_n	6	構造、制御装置は やや複雑 3,000kW 以下程度に 好適
(e)		$\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I}{n}$	$\frac{1}{\sqrt{3}} E_n$	6	構造、制御装置は 割合簡単 3,000kW 以下程度に 好適 制動特性良好
(f)		自由	E_n	5	構造はやや複雑 制御装置は簡単 とくに大容量機 に好適

n : 卷数 (1 相分) I_f : 励磁電流

図 5.1 誘導同期電動機の励磁巻線方式
Fig. 5.1 Exciting connections of induction synchronous motor.

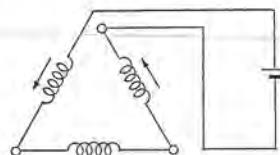
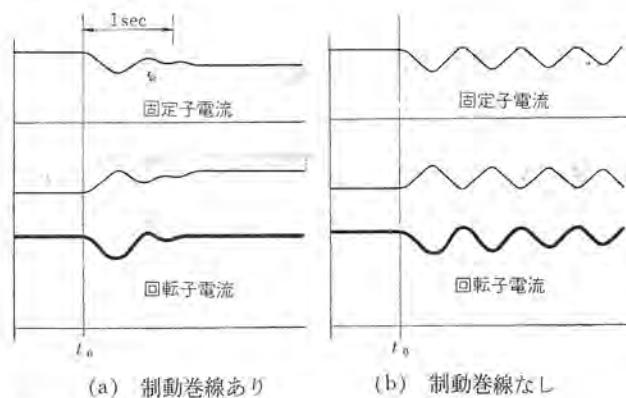
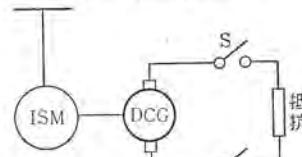


図 5.2 開放△結線
Fig. 5.2 Open delta connection.



(a) 制動巻線あり

(b) 制動巻線なし



(c) 試験方法 (ISM により
DCG を駆動、負荷抵抗
をスイッチ S により開放)

図 5.3 制動巻線の効果 (t_0 において全負荷 シヤ断)
Fig. 5.3 Effect of damper winding.

まないことが望ましく、この点からも図 5.2 の方式は避けるべきものである。

図 5.3 は運転中に急激にステップ状の負荷変動を与えた場合の電流のオシロを示し、制動巻線のある場合と、ない場合とを比較したものである。明らかに制動巻線のない場合には、きわめて長時間にわたり乱調が継続される。

誘導同期電動機の場合には図 4.1 から明らかなように、誘導電

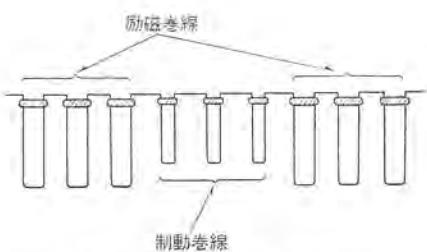


図 5.4 励磁巻線と制動巻線
Fig. 5.4 Exciting winding and damper winding.

動機として運転するときよりも回転子電流が大幅に増大するため、機械の寸法は回転子側から制限される場合が多い。これを緩和するために空げき直径（または固定子内径）を誘導電動機よりも大きくする場合が多いが、さらに図 5.4 に示すように、直流励磁する巻線と制動巻線を形状の異なるミリに収納することによって、占積率を大きくし経済性を高める方法もしばしば採用される。この場合巻線の断面積が異なるために、誘導電動機として運転する場合の特性が懸念されるが、誘導電動機として運転するときには回転子電流が小さいので、外部抵抗によって巻線抵抗の不均衡を除去することにより十分満足な運転が可能となる。

6. 運 転

6.1 起 動

すでにしたように誘導同期電動機は、巻線形誘導電動機として起動するから、その方式についてとくに説明する必要はない。しかし同期運転する際には、回転子側を直流励磁するので液体抵抗器を使用する場合には、電解液の分解を避けるため抵抗器を切り離す必要があり、回転子回路がやや複雑になることに注意しなければならない。

このためとくに必要がなければ金属抵抗方式が推奨される。

誘導同期電動機の起動特性は、他のいかなる同期電動機よりもはるかにすぐれており、負荷の慣性モーメントや要求するトルクに対して、ほとんど制限を設ける必要がなく、しかも起動電流を十分小さく抑えうることが最大の特長である。

6.2 同期化

誘導電動機としての加速が完了し、同期速度に十分近くなったときに回転子巻線に直流励磁を与えて同期化を行なうが、この間の現象はきわめて複雑な過渡現象であり、簡単に解説することは困難である。

結果のみ記すと同期化しうるか否かは次のような諸条件によって決まるものと考えられている。

(a) 系の慣性モーメント、または同期速度における回転系に蓄積された運動エネルギー

(b) 直流励磁電流の大きさ、または同期電動機としての最大出力

(c) 同期化直前のスベリ、および同期化中の制動トルク

(d) 固定子と回転子の磁極の相対的位置

さらに、このほかにも若干の要素はあるが、固定子と回転子の相対的位置のもっとも悪い条件において同期化しうる最大許容スベリの値は、近似的に次式で与えられることが認められている。

$$s_{\max} = \frac{240}{N} \sqrt{\frac{P_m}{GD^2 f}} \quad \dots \dots \dots \quad (6.1)$$

ただし N : 同期速度 (rpm) GD^2 : 系の GD^2 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

P_m : 同期電動機としての最大出力 (kW)

f : 電源周波数 (c/s)

この式は電気的な過渡現象を無視した近似式であるから、実際の設計にあたっては相当な余裕を見込んでおく必要はあるが、種々の実験により、ほぼ満足な結果を与えることが認められている。

さらに必要があれば、直流励磁を印加するための最適投入位置を選定することも可能であり、それによって同期化時の突入電流を減少せしめ、かつ s_{\max} の値を大きくすることもできる。しかし一般には回路が複雑化するので、最悪の条件においても十分同期化しうるよう、誘導電動機としてのスベリはなるべく小さく設計される。

6.3 停 止

誘導機は 1 個の交流電源に接続されるから、停止するためには単に電源から切り離せばよく、操作は至極簡単であるが、誘導同期電動機は 2 個の電源に接続されているためやや複雑である。

固定子側の交流電源を切り離せば停止することはできるが、回転子を直流励磁したまま固定子を開放すると、停止するまでに無負荷飽和曲線に沿った高い電圧を誘起する可能性があるて危険である。すなわち固定子側の電圧は図 6.1 のように、開路時定数に従って無負荷電圧まで上昇し、速度とともに降下する。この開路時定数は一般的の誘導機に比較して空げきが大きいために、小さいことに注意を要する。

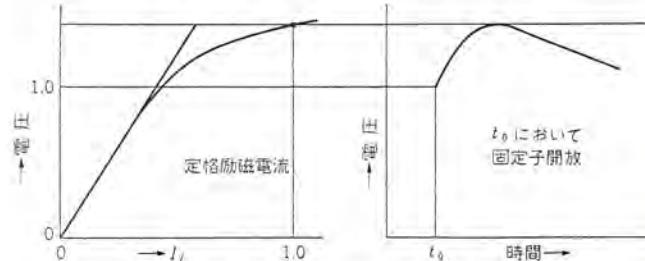


図 6.1 固定子開放時の電圧変化
Fig. 6.1 Voltage variation due to stator open circuit.

次に励磁電流を切斷したのみでは制動巻線によるトルクが存在するため、誘導電動機として運転され停止しない。しかも直流回路を急激に開放すれば、開放された端子間に高電圧を誘起する危険を伴う。

そこでこれらの危険を避けるために、停止は次のような順序で行なうことが望ましい。

(a) 回転励磁機方式の場合には、直流発電機の界磁回路を消勢、静止励磁器方式の場合には整流器の交流側変圧器の一次側を切斷

(b) 続いて固定子端子を開放

(c) 回転子側の直流電流が減衰したのちに励磁回路を開放ただし、緊急を要する場合には、固定子側と励磁機の一次側とをほとんど同時に開放する。

7. 構 造

われわれはすでに多数の誘導同期電動機を製作してきたが、図 7.1 に示すのは最近の一例で、2,200 kW 10 極のセメントミル用である。

図に見るようく、外観上は普通のペデスタル形誘導電動機となんら異なる点はないが、励磁巻線は図 5.1 (c) の方式を採用し、6 個のスリップリングを備えている。また励磁巻線はその占積率を向上するために、ミリ形状や絶縁方式には特別の工夫が施され、さらにセメント工場特有のセメント粉による絶縁のタストカットを防止



図 7.1 誘導同期電動機 2,200 kW 3,300 V 60 c/s 10 極
Fig. 7.1 Induction synchronous motor.

するための処置が講ぜられている。

また一般用のミル用誘導電動機と同様に、固定子 シュウ(摺)動装置をもち、現地における分解、点検および清掃が容易なるよう配慮されている。さらに反負荷側軸端には、クラッチを介して微速運転用の寸動装置が結合される。

励磁装置はシリコン整流器による静止励磁方式で、制御回路は、誘導電動機としての運転に簡単に切り換えられるように設計されている。

8. 励 磁 装 置

以前には、もっぱら電動式直流発電機による励磁方式が用いられてきたが、誘導同期電動機特有の低電圧大電流発電機となるため、さらに副励磁機を設ける場合が多く、この方式は回転機固有のすぐれた利点も多く、現在でも捨てがたいものではあるが、なにぶんにも直流機の整流子が存在する点が最大の欠点で、最近では逐次静止励磁方式に代わりつつある。

静止励磁方式には手動式と複巻特性をもたせた、たとえば自動力率制御方式などがあるが、負荷変動の割合に小さいセメントミル用としては、もっぱら手動式が用いられる。

整流器としてシリコン整流器を用いる場合最も注意すべき点は、整流器に対する異常なサージ電圧である。外部の電力系統から侵入する種々のサージまたは脱調時の異常電圧に対し十分耐えうるような設計とすることが重要である。しかしこれらの点については、一般的同期電動機とまったく同一であるので、ここには省略する。

9. 寸 動 装 置

セメントミル用の場合には、ミルのガット口を正確に合わせること、および据付調整などの便宜のために寸動装置を設けることが多い。この装置は定格速度の1/100前後の微速度で運転するためのものである。

この方式には特別に設けられた寸動用電動機による機械的なものと、たとえばサイクロコンバータを用いて主電動機を低周波運転する電気的なものと考えられる。(図9.1, 9.2参照)

機械的な方式の場合は、電動機出力は主電動機の約1%程度でよく、主電動機軸との間には減速機とハンドクラッチを設け、主電動機が運転するときには減速機および寸動用電動機は切り離される。また寸動用電動機には、ブレーキを設けて任意の位置で停止させることができる。(図9.3参照)

このような機械的な方式は、主電動機1台ごとに付属しなければならない点が大きな欠点であるが、一般的セメントミルのように1個所に数台の電動機が設置される場合には、たとえば図9.2に示

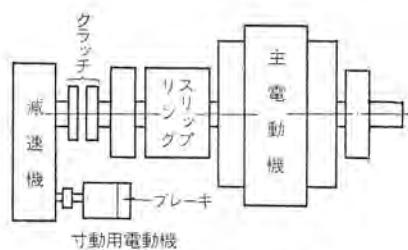


図 9.1 寸動装置配置図
Fig. 9.1 Arrangement of inching device.

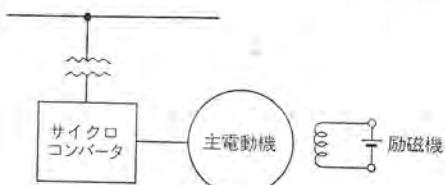


図 9.2 サイクロコンバータを使用する電気的寸動装置
Fig. 9.2 Electrical inching device using a cyclo converter.



図 9.3 機械的寸動装置用減速機およびクラッチ
Fig. 9.3 Speed reducer and clutch to be used for mechanical inching device.

すなわちサイクロコンバータによって微速度を得る方式も考えられ、全電動機を1台のコンバータによって運転しうるために、きわめて経済的になる。

サイクロコンバータには種々の方式が考えられるが、最近のSCRを用いるならば、経済的にもまた信頼度の面からも十分満足なものが容易に製作しうる。

10. む す び

本文には最近の誘導同期電動機について解説した。とくに誘導電動機との関係について述べ、今後の発展についても若干の示唆を与えた。

誘導同期電動機は、他の同期電動機に見られないすぐれた起動特性と同期引入特性をもつたため、将来さらに広く実用される可能性をもっており、われわれはさらに複巻誘導同期電動機および電気的な寸動装置などについて研究を進めるつもりである。

参 考 文 献

- (1) J. Griffin: Synchronous Induction Motors, Macdonald & Co. London.
- (2) Edgerton, H. E & Zak, F. J.: The pulling into step of a Synchronous Induction Motor, J. I. E. E. p. 1205, (1930)
- (3) Rawcliffe, G. H.: The secondary Circuits of Synchronous Induction Motors, J. I. E. E. p. 282, (1940)
- (4) C. Concordia, S. B. Crary & Gabriel Kron: The Doubly-fed Machine, T. A. I. E. E. p. 286, (1942)

最近の同期電動機とその制御装置

東海林恵二郎*・中野久夫*

The Latest Synchronous Motors and Their Control Equipment

Nagasaki Works Keijirō SHŌJI・Hisao NAKANO

Application of the semiconductor technique that has made a rapid progress of late to synchronous motors has brought a great improvement to them. With their numerous drawbacks, such as need of excitation power source, a large starting current, presence of slip rings, fear of stepping out and the like, synchronous motors are not used as common as induction motors in spite of their marked advantages. Now all these weak points are settled with semiconductor techniques and operation techniques and central performance have made a long stride toward improvement. This article deals with the latest synchronous motors in reference to brushless synchronous motors, compound wound synchronous motors, static exciters, automatic power factor regulators, static slipsyn device and the control equipment.

1. まえがき

従来から交流電動機を使用する場合、わが国では同期電動機よりも誘導電動機のほうが、より一般に使用されてきた。その理由として経済的な面もあるが、技術的な問題として次のような理由が考えられる。

(1) 勵磁用の直流電源が必要であり、従来励磁用に直流発電機が一般的に使用されてきたので、保守がめんどくさく、かつ据付面積も広くなる。

(2) 起動電流が大きく、また同期に入れなどやや操作が複雑である。

(3) 起動停止ひん度の高い機械や GD^2 の大きいものではカゴ形起動巻線の過熱の恐れがある。

(4) カゴ形誘導電動機と比較すれば集電環があり、保守点検が必要で防爆形では内圧防爆などを実施する必要があり、やっかいである。

(5) 脱調、起動渋滞などの検出保護がタイマ、過電流リレーなどを使用し確実性が薄かったなどがあげられる。

以上の事項に対し最近の三菱同期電動機は次の対策を実施し、より信頼度の高いものとなっている。

(a) 勵磁用直流電源には乾式変圧器、誘導電圧調整器、シリコン整流器を採用し、1個のキューピクル内に収納したコンパクトな形の静止機器があるので保守点検が容易で信頼性が高い。

(b) 最近、同期電動機を使用する工場の受電容量が大きくなり許容起動電流が著しく大きくなってしまい、起動はトランジスタイパックを使用した三菱 ステイックスリップシンを使用し、常に最適速度、最適位相で同期投入ができる、完全自動起動が可能となった。

(c) 起動停止ひん度の高いものや GD^2 の過大な負荷には特殊耐熱性合金をカゴ形起動巻線に使用するか、または塊状磁極を使用したダンパレス同期電動機を使用する。

(d) 交流励磁機を使用したブラシレス同期電動機を使用すればスリッピングが必要でなく、保守点検がほとんど不要で、特別な防爆構造も不要となる。

(e) 脱調、起動渋滞の検出保護に上記トランジスタイパックを使用した三菱 ステイックスリップシンを使用し確実に検出し、最適な保護が可能となった。

以上のように同期電動機の弱点とされてきた個所が、新しい技術によって、次々に改善され同期電動機本来の長所である力率の任意調整と高効率、さらに空気抵抗が大きめで据付保守が容易となり、また負荷が変動しても常に一定速度などの長所がありますが、発揮されることになった。ここに上記のような新しい技術を駆使した同期電動機と励磁および制御装置の概要を紹介する。

2. 同期電動機

2.1 カゴ形起動巻線付同期電動機

カゴ形起動巻線付同期電動機は最も普遍的に使用されている形式のもので、各国で製作されている同期電動機のほとんどがこの形式と解してもよい。突出磁極頭部に黄銅、特殊銅合金などのカゴ形起動巻線を設け、その両端を短絡環で接続している。この形式のものは、構造が簡単で生産性が高く、負荷の起動特性に合わせて、電動機の起動時トルク特性を任意に設計でき、また同期運転時の制動作用が良好であるなどの特長を有するが、起動時の起動巻線における熱応力および熱変形などを十分検討しないと、カゴ形起動巻線の焼損事故の原因となる。このようにこの形式の電動機では、負荷 GD^2 の大きさが問題であり加速可能 GD^2 を知るためやすとして次のような式がある。

$$GD^2 = 5.6 \times KW \times \left(\frac{1,000}{N} \right)^2 \times \frac{1}{PF} \text{ (kg-m}^2\text{)}$$

KW: 電動機定格出力

N: 電動機定格回転数 (rpm)

PF: 電動機定格力率 (単位法)

また負荷および電動機自身の GD^2 の和がわかっていないれば

$$E = 2.75 \times GD^2 \times \left(\frac{N}{1,000} \right) \left(\frac{1}{2} + \int_0^1 \frac{ST'}{T-T'} dS \right)$$

E=起動巻線に発生する熱量 (kW·sec)

GD^2 =回転体のモーメント全質量 × 車効果 (kg·m²)

T=電動機発生トルク (kg·m)

T'=負荷反抗トルク (kg·m)

S=スペリ (単位法)

の式から $\theta = \frac{E}{CW}$ (°C)

θ =起動巻線の温度上昇 (°C)

C=起動巻線の比熱 (kW·S/kg°C)

$W =$ 起動巻線重量 (kg)

となり、発生熱量が全部起動巻線中にたくわえられるとした場合の温度上昇を知ることができる。実際は起動中起動巻線から界磁鉄心に熱が伝達されるので、約その $1/3$ の値が起動巻線の温度上昇と考えられる。

従来から同期電動機のカゴ形起動巻線として使用されてきた材料は9/1 丹銅、6/4 黄銅、ニッケル銅、ケイ素青銅、特殊アルミニウム青銅、モネメタル、エバージュールなどが使用されてきたが、短絡環へのロード付時、軟化し著しく機械的強度の低下する材料は中高速機およびGD² の大きい負荷を起動する電動機には適用できない。当社は中高速機および比較的 GD² の大きい負荷を駆動する同期電動機には高抵抗の耐熱性特殊銅合金の断面積の大きな起動巻線を使用しており、熱的および機械的に十分な安全度を有する起動巻線を設けるようにしてある。

また以上のように十分な配慮のもとに設計された起動巻線でも短絡環の構造によって、やはりトラブルの発生を考えられるので、短絡環の構造にも十分な検討が必要である。このように十分な設計管理のもとで製作すれば信頼度の高い、高性能のカゴ形起動巻線付同期電動機を得ることができる。図2.1はこの形式の電動機を示したものである。

2.2 ブラシレス同期電動機

最近ブラシレス発電機が実用化され、当社でも、すでに相当数の

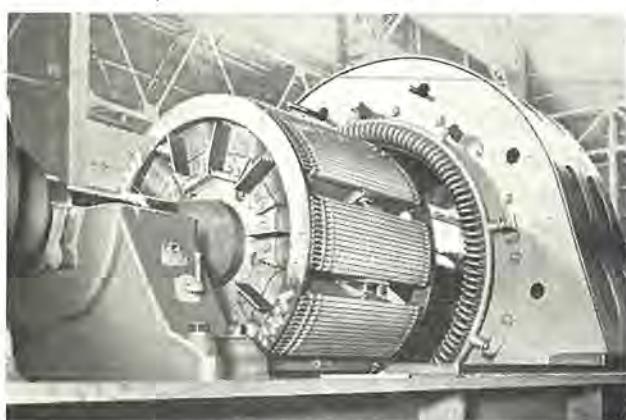


図 2.1 カゴ形起動巻線付同期電動機

Fig. 2.1 Salient pole synchronous motor with cage damper windings.

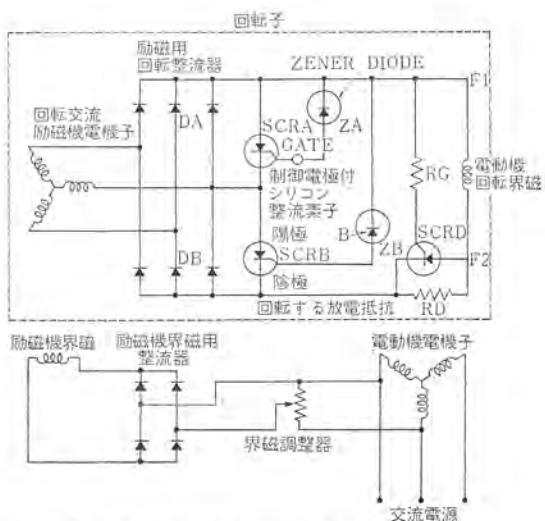


図 2.2 ブラシレス同期電動機結線図の一例

Fig. 2.2 Connection diagram of brushless synchronous motor.

ブラシレス発電機を納入および製作中である。その発電機の励磁回路に電動機の起動時に界磁に誘起する電圧、電流を考慮して制御電極付シリコン整流素子とゼナーダイオード、抵抗を追加した結線となり、その代表的結線の一例が図2.2である。

図2.2について簡単に動作を説明する。同期電動機は起動時界磁巻線に交流電圧を誘起する。この値は約2万ボルトにも達するので、適当な放電抵抗を通じて界磁回路を短絡する必要がある。図2.2で界磁の端子F₂が正のときは電流が放電抵抗RDおよび主シリコン整流器DAおよびDBを通って流れる。逆に端子F₁の電圧が正方向に増加していくとき、その電圧がある値以上になるとゼナーダイオードZBは通電し、SCRBを通電状態にする。SCRBが通電状態になると、界磁の全電圧はゼナーダイオードZAに加わり、同様な方法でSCRAが通電状態になる。結局界磁回路は放電抵抗RDを通じて完全に短絡された形となるので、電動機は同期速度に向かって加速され、励磁機が出力電流を供給はじめると、この電流は界磁誘起電圧が減るまで制御電極付シリコン整流素子を通じて流れることになる。そして界磁誘起電圧が制御電極付シリコン整流素子をトリガするに要する値以下に減じたとき、励磁機は電動機に全励磁を与えて同期に引き入れる。

また励磁機が界磁回路に直流電流を供給しているとき、シリコン整流器DAの順方向電圧降下が各サイクルごとに1回SCRAに対して逆方向に加えられる。この電圧により、SCRは不導通となる。放電抵抗回路もF₁が正のときはSCRDは不導通、F₂が正でも制御電極付シリコン整流素子に負の電圧がかかるので不導通である。電動機の速度が上昇し、励磁機が界磁に直流出力を与えはじめると端子F₁が正となる。SCRDには順方向電圧、制御電極電圧も正となりSCRDは導通状態となり、放電抵抗RDをカットする。

以上のようにブラシレス同期電動機はカゴ形誘導電動機と同様にスリップリングレスとなり、全自动起動および運転が可能であり保守点検がほとんど必要でなくなる。とくに防爆形や防食形が要求される場合は、スリップリング箱に特別な構造や通気配管が不要となり、著しくその特長が生かされる。

しかし直流投入が必ずしも最適位相で投入されるとは限らず、引入トルクが減少することは避けられない。またブラシレス同期電動機の界磁回路は三つの制御電極付シリコン整流素子と、二つのゼナーダイオードが同期化や保護のすべての機能を果たしているので、電気的にも機械的にも信頼度の高い制御電極付シリコン整流素子、ゼナーダイオードを使用しなければならない。

2.3 2極ターボ形同期電動機

最近製鉄、化学、風胴用などで高速大容量のプロセスやコンプレサが使用されるようになった。その駆動用電動機として2極の大容量の誘導電動機、同期電動機が要求されることが多い。

約12,000~15,000 kW以上の大容量機では現在材料上の制限で誘導電動機では製作することがむずかしいので、それ以上の大容量2極電動機がほしい場合、また力率を1.0か0.9、0.8の進み力率にして工場全体の力率改善を行ないたい場合には、2極ターボ形同期電動機を採用すればよい。構造的には、従来の2極ターピン発電機とほとんど変わりなく、回転子は単一鋼塊回転子となっており、ターピン発電機はわが国では単機で現在300 MW以上のものを製作されるほど安定した機種である。2極同期電動機も従来わが国ではありませんに使用されなかったが、ターピン発電機と同等に非常に信頼度の高い機種といえる。

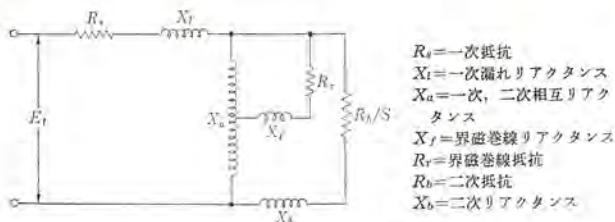


図 2.3 2 極同期電動機の等価回路
Fig. 2.3 Equivalent circuit of 2 P synchronous motor.

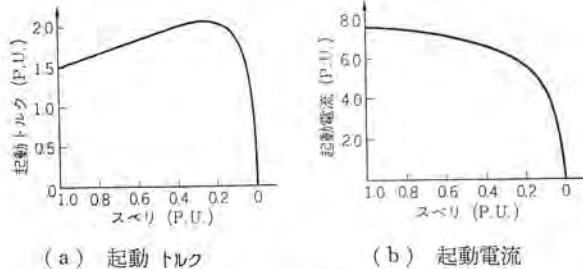


図 2.4 2 極同期電動機の起動特性
Fig. 2.4 Starting performance of 2 P synchronous motor.

起動方法は次の三つのうちいずれかが採用される。

- (1) 減電圧自己起動方式
- (2) 起動用電動機による方式
- (3) 低周波自己起動方式

容量が約数千 kW 以下で負荷 GD^2 が電動機 GD^2 の 3~4 倍以下の場合は、減電圧自己起動が可能である。しかし負荷 GD^2 が電動機 GD^2 に比較して数倍あるいはそれ以上の場合や、出力が 10,000 kW を越えるような場合は起動電動機を使用したほうがよい。

起動電動機としては短時間定格の巻線形誘導電動機を使用し、ターボ形同期電動機とは電磁クラッチを介して直結し、加速完了後主電動機から切り離す。この場合增速ギヤにより同期速度以上に增速し、普通の発電機を系統に投入するのと同じ方法で同期化する方法とスピリ 2~3% まで加速し、主電動機に直流を投入して同期化する方法の 2 方法が考えられるが、電源および負荷の状況に応じて適切なほうを採用する。

また主電動機に見合う自家発電設備を有する場合は、低周波で同期化したのちに周波数を上げて定格速度まで加速するという方法が採用できる。この場合は 10,000 kW 以上の大形機でも起動用電動機は必要としなくなる。自己起動の場合は電動機自身で加速トルクを発生する必要がある。前述のように回転子が単一鋼塊であるから、回転子表面にウズ電流が流れ、それにより加速トルクが発生する。

この起動時の等価回路は誘導電動機の等価回路と同じように図 2.3 のように書くことができる。その等価回路を解き、速度(スピリ)-電流、速度(スピリ)-起動トルクの曲線を算出することができる。ターボ形同期電動機の起動特性の一例を図 2.4 に示す。現在当社では某社向けとして 9,200 kW, 7,000 kW 2 極ターボ形同期電動機を製作中で、起動方法は負荷の GD^2 を考えて起動電動機による方式を採用している。

2.4 ダンパレス同期電動機

ダンパレス同期電動機とは突極形同期電動機で、界磁鉄心に塊状鋼を使い、その回転子表面のウズ電流を利用して自己起動する電動機をいう。2.1 節 カゴ形起動巻線付の項で述べたように、電動機出力に対して負荷の GD^2 が過大な場合や、起動停止のひん

度の高い機械では、カゴ形起動巻線が過熱の恐れがあり、また 4 極などの高速大容量機では機械的に過大な応力がカゴ形起動巻線に加わるようになる。このような場合はダンパレスの塊状回転子構造のものを使用すれば、熱容量が大で、かつ機械的にもがんじょうなものを得ることができる。

しかしダンパレス形は

- (1) 運転時にも回転子表面にウズ電流損が生ずるので効率が悪い
- (2) 起動特性を負荷トルクに合わせて任意に変えることができない
- (3) 運転時の制動作用が悪い
- (4) 回転子表面に常に損失があるので回転子コイルが高温にさらされやすい
- (5) 生産性が低いなどの欠点があるが前記の用途の場合はそれらの欠点を十分に補うだけの長所がある。

起動特性的算定は円筒形塊状回転子を持つ誘導電動機の解析を準用すればよい。ただし突極形なるため 2 軸法を使用する必要があり、めんどうになることは避けられない。二次抵抗は回転子におけるウズ電流損を求める式から算出することができる。二次抵抗 R_2 がわかれば二次リアクタンス X_2 は

$$X_2 = AR_2/S$$

の関係から求められる。A は実験的または経験的に求められる係数であり、S はスピリを表わす。

このような二次抵抗およびリアクタンスを直軸、横軸についてそれぞれ求めれば、誘導電動機の等価回路と同様に図 2.5 の等価回路を得る。直軸分には界磁巻線、放電抵抗を表わす回路を二次側ウズ電流回路に並列にはいるようになる。以上の等価回路を解き、直軸分トルク、入力電流 (T_{sd} , I_{sd})、横軸分トルク、入力電流 (T_{sq} , I_{sq}) を求めれば

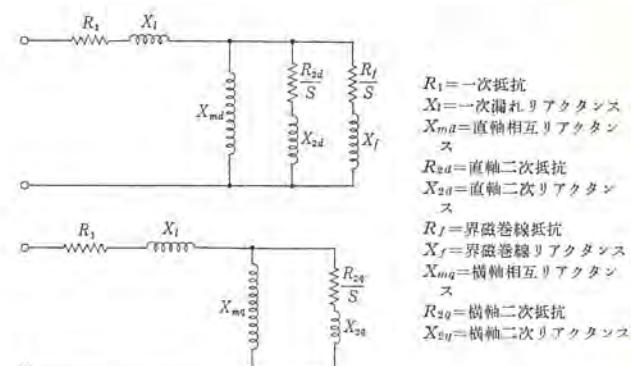


図 2.5 突極形ダンパレス同期電動機の等価回路
Fig. 2.5 Equivalent circuit of salient pole type damperless synchronous motor.



図 2.6 突極形ダンパレス同期電動機回転子
Fig. 2.6 Rotor of salient pole type damperless synchronous motor.

$$\text{起動トルクは } T_s = \frac{T_{sd} + T_{sq}}{2}$$

$$\text{起動電流は } I_s = \frac{I_{sd} + I_{sq}}{2}$$

の形で直軸分、横軸分の算術平均として求められる。また磁極表面に歯脈動損失を減少させるために円周方向にミジを切ることがある。ミジを切ることは二次抵抗を増加させて起動トルクおよび起動電流も減少させる結果となる。また起動時回転子表面上のみウズ電流が集中して流れるので、磁極表面のみ温度が著しく上昇するので、その熱膨張の逃げの役目をする。

また磁極端部に銅などのエンドリングを設けると、横軸分に大きな影響を与える。二次抵抗は直軸分よりも横軸分のほうが必ず非常に大きいので、エンドリングを設けることにより、直軸インピーダンスと横軸インピーダンスの差が減少して、単位アンペアあたりの起動トルクが増加するのみでなく、電流およびトルクの脈動の大きさを減少させる効果もある。図2.6は4極突極形ダンバレス同期電動機の回転子で、起動特性は高抵抗カゴ形巻線を使用した場合に類似している。

3. 運転上の諸問題

3.1 界磁巻線とメガ低下

突極形同期電動機の界磁コイルの形式として型巻と平打巻の2種があり、型巻は高速機、低速小容量機に、平打巻は中、低速大容量機に使用される。

(1) 型巻

型巻は図3.1のよう、素線として二重ガラス巻銅線を使用し、界磁コイルの上下に合成樹脂積層板のワッシャをそう入し、コイルの対地絶縁としてマイカ絶縁を施し、ベーカライト、ポリエステル、またはエボキシなどの合成樹脂ワニスで十分に処理した構造となっている。この形の界磁巻線は裸銅線が表面に露出されている個所がなく、製鉄、化学工場などの導電性ごみの多い所、腐食性ガスの多い所に使用しても、また高湿度のもとで運転してもメガ低下の恐れはない。

(2) 平打巻

大型機になると断面積の大きな素線が必要となり、型巻界磁コイルの製作は、工作上困難になってくる。この場合は素線に厚み1.0mmで幅が40mmというようなへん平な平角銅線を使用し、素線を平打巻にし、水圧機をかけて厚みの不同をなくし、層間に薄い絶縁物を焼き付け、運転時に受ける遠心力よりはるかに高い圧力で押し固め、合成樹脂系のサーモセッタニスで十分処理する。このコイルは図3.2のように表面が外気に直結露出した構造になっている。この構造のコイルは軸方向に素線が1層であるから鉄

心に近い円部も外部も温度上昇の差がほとんどなく、また冷却効果も非常によいという利点がある。JECの許容温度上昇も型巻コイルよりも10°C高いB種絶縁で80°Cまで許容している。

しかし外部が露出しているので、ほこりやガスの存在するふんい気で運転すると、導電性ほこりでなくても吸湿して、著しくメガ低下を引き起こす恐れがある。この対策として当社では、直接界磁コイルの裸露出部分にガラスローピングに合成樹脂を予備含浸処理したもので張力をもってまきつけ、かつまきつけ中に加熱して予備含浸の合成樹脂を溶融しつつ適用し、薄い絶縁層を表面に密着させることにより、冷却効果をそこなうことなくメガ低下を防止する方法を採用している。なおこの絶縁層はガラス繊維を含有するため機械的に強じんで、合成樹脂の性能とあいまって固いしかも熱伝達のすぐれた絶縁層を形成している（同方法は実用新案申請中）。

そのほか露出面に絶縁塗膜を塗布する方法もあるが、どうしても運転中の熱サイクルや機械的な応力を受けて塗膜自体にハク離やキ裂の発生の恐れがあり十分ではない。この対策によって平打巻も型巻と同様にふんい気の悪い環境で運転しても、メガ低下の恐れのない、しかも冷却効果がすぐれた界磁巻線を得ることができる。

3.2 系統電圧瞬時低下と安定限界

最近化学工業などで工場プロセスが非常に大きくなり、系統電圧の瞬時低下が起きた場合、同期電動機が脱調し、プロセスが運転を停止した場合の損失が甚大なものとなる。これらのことから、系統電圧瞬時低下時の同期電動機の安定運転限界がクローズアップしてきた。電動機自身の保護もたいせつであるが、それ以上にプロセス保護が重要視される場合は、電動機の保護が過度になることを避け、低電圧リレーはできる限り低く、時間リレーはできる限り長くセットするようなことが望ましい。それには正確な脱調検出と、安定運転限界を知る必要がある。

今図3.3のような系統を考え、定格電圧、電力条件は電動機の端子で定め、外部リアクタンス X_e は電動機定格入力kVAをベースにして単位法で表現する。力率1.0の機械と力率0.8の機械は同一kVAベースで表現するから、定格負荷トルクは力率1.0の機械では1.0、力率0.8の機械では0.8となる。同一kWで力率1.0と力率0.8のものを比較したい場合は、力率0.8の機械のほうが力率1.0の機械の1.25倍の定格kVAを持つから、当然その割合で外部リアクタンスを減ずる必要がある。今図3.4のごとく系統電圧 E_t が定格電圧 E_m から E_0 に下降し、それが t_0 間持続したと仮定する。このように系統電圧が瞬時低下した場合の電動機回転子の位置角度の変化を表わしたのが図3.5で、曲線1

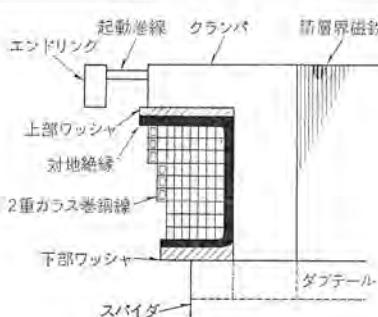


図3.1 界磁コイル(型巻)
Fig. 3.1 Field coil.

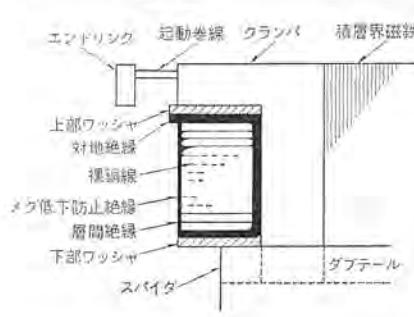


図3.2 界磁コイル(平打巻)
Fig. 3.2 Field coil (edgewise).

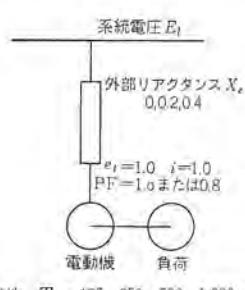


図3.3 系統電圧瞬時低下と安定限界
Fig. 3.3 Electric power system.

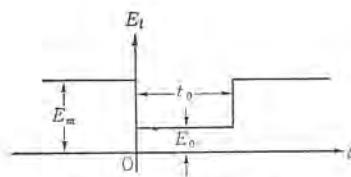


図 3.4 系統電圧低下
Fig. 3.4 Line voltage dip.

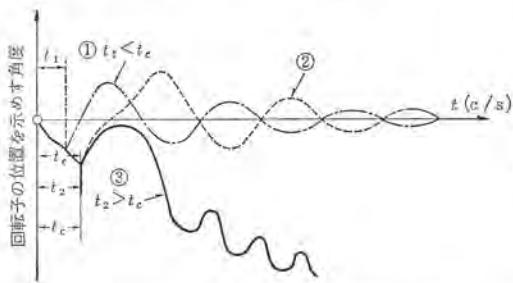


図 3.5 系統電圧瞬時低下時の同期電動機の過渡動作
Fig. 3.5 Transient behavior of synchronous motor following instantaneous dip of the system voltage.

表 3.1 リアクタンスおよび抵抗

巻	線	漏れリアクタンス	抵抗	相互リアクタンス
電機子		$x_1=0.15$	$r_a=0.015$	
制動巻線	直軸	$x_{kda}=0.10$	$r_{kda}=0.03$	
界磁	横軸	$x_{kg}=0.12$	$r_{kg}=0.04$	$x_{ad}=1.0$
		$x_f=0.25$	$r_f=0.001$	$x_{ag}=0.6$

は電圧低下持続時間 t_1 で脱調しない場合、曲線 2 は同じく持続時間が $t_c(t_c > t_1)$ で脱調を起こさない限界の場合を示し、曲線 3 は持続時間 $t_2(t_2 > t_c > t_1)$ で脱調した場合を示している。このような電圧低下の度合を示す E_0/E_m に対して、脱調しない持続限界時間 t_c が存在し、この値は外部 リアクタンス X_e と電動機慣性 T_m に関係し、表 3.1 のごとき定数を持つ電動機についてこの関係を示したものが図 3.6, 3.7 である。

電動機慣性 T_m は定格トルクで定格速度に加速に要する時間で表わす。この場合負荷トルク、励磁電流は一定と仮定した。往復動圧縮機を駆動しているような場合は負荷トルクが相当大きく変動するが、普通負荷トルクの変動周波数と電動機過渡固有周波数がある程度離れていることが多いので、安定度の問題を検討する場合は負荷トルク一定とした場合と大きな違いは生じない。また励磁電流は一定と仮定しているが、励磁装置に MG を使用した場合は、回転励磁機の時定数が相当大きいため問題なく、シリコン整流器などを使用した静止形では、励磁電流が指数関数的に減少すると仮定して修正を行なえばよい。このように図 3.6 および図 3.7 から、標準的な設計がなされている同期電動機の系統電圧低下時の安定運転限界を知ることができる。駆動負荷の重要性から電動機の安定運転限度を高めたい場合は、力率 0.8 の機械を採用するか、または急速な強制励磁を行なえる励磁回路を設けるなどの方法が考えられるが、コスト高になることは避けられない。

3.3 補償器起動とリアクトル起動

同期電動機の減電圧の方法として、単巻変圧器を使用した起動最近の同期電動機とその制御装置・東海林・中野

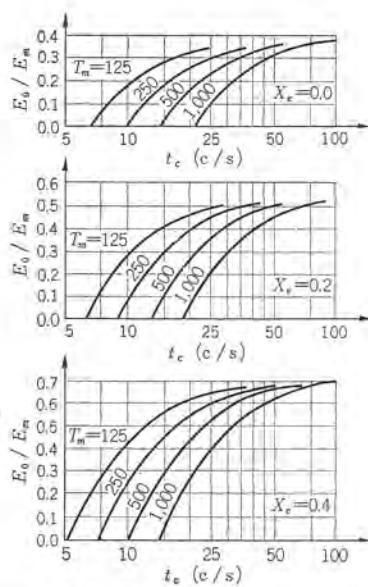


図 3.6 慣性 T_m 、外部 リアクタンス X_e をパラメータとした系統電圧低下率 E_0/E_m と安定運転限界持続時間 t_c との関係 (PF=0.8 の場合)
Fig. 3.6 Stability limits for system disturbance with the minimum system voltage e_0 taken as junction of disturbance time t_c , PF=0.8.

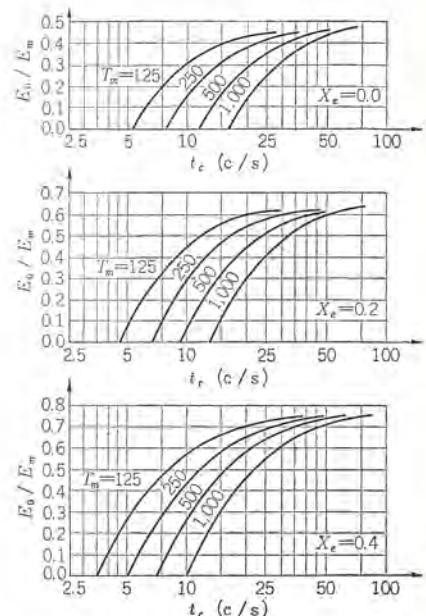


図 3.7 慣性 T_m 、外部 リアクタンス X_e をパラメータとした系統電圧低下率 E_0/E_m と安定運転限界持続時間 t_c との関係
Fig. 3.7 Stability limits for system taken disturbance, with the minimum system voltage e_0 as junction of disturbance time t_c , PF=1.0.

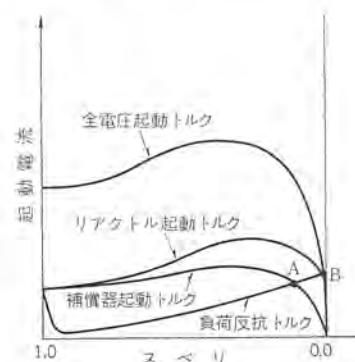


図 3.8 起動トルク-スベリ曲線
Fig. 3.8 Starting torque-slip curves.

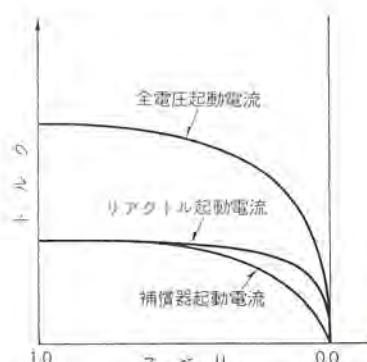


図 3.9 起動電流-スベリ曲線
Fig. 3.9 Starting current-slip curves.

補償器による方法とリアクトルによる方法とある。全電圧起動時の起動電流を I_s とし、電動機に加わる電圧が $a(\%)$ とすれば、減電圧起動の場合の起動電流は

$$\begin{array}{ll} \text{起動補償器起動の場合} & I_s \times a^2 (\%) \\ \text{リアクトル起動の場合} & I_s \times a \end{array}$$

となり、起動補償器によるほうが、リアクトルより相当小さな値となる。このような理由で以前は大形の同期電動機では起動補償を使用する例が多かった。しかし最近は各工場の規模が大きくなり、受電容量が増大したので、リアクトル起動を適用することが圧倒的に多くなっている。製鉄ミル用同期電動機などは 10,000 kW 以上でも、すべてリアクトル起動を行なっている。

起動期間、すなわちスベリ 1.0 から 0.0 の間における起動電流、起動トルクの変化はリアクトル起動と起動補償器起動でどのように異なるかを考えてみる。全電圧起動時の起動電流は図 3.9 のようにスベリの減少とともに電流も減少する。このことは電動機の内部インピーダンスがスベリとともに増加することを示している。しかもリアクトルのインピーダンスは不变であるから、スベリの減少とともに

にリアクトルによる電圧降下%が減少することになる。このようにリアクトル起動の場合は補償器起動の場合に比較してスベリが減少するとともにトルク、電流とも減少分が減る。この様子は図3.8および図3.9に示している。

図3.8を見てもわかるとおり、一般に負荷反抗トルクは速度の増加とともに増加する傾向のものが多いので、補償器起動なら途中でタップ切換を行なわない限りA点までしか加速できないが、リアクトル起動の場合はB点まで加速可能でタップの切換が不要となる。また加速トルクが増加するので短時間で加速が完了することにもなる。このようにリアクトル起動の場合は切換開閉器の数が少なくてすみ、起動器そのもののコストが安いなどという利点のほかに、トルク的にもこのような利点がある。

4. 励磁装置

4.1 静止励磁装置

同期電動機の直流励磁電源装置としては従来は直流電動発電機を使用してきたが、最近は下記のような静止励磁装置を使用するのを標準としている。静止励磁装置では、直流回転励磁機で問題となる整流子、ブラシなどの消耗品や回転部分がなく、保守点検は非常に簡単容易となる。以下三菱同期電動機用静止励磁装置につき簡単に説明する。

(1) 励磁電圧調整方式

同期電動機では、一定励磁電流のもとでは負荷変化により運転力率が変化するので、一定力率運転をするためには負荷変化に応じて励磁電流を調整する必要がある。このための励磁電圧調整方式により静止励磁装置には下記の各方式がある。

(a) 変圧器タップ調整式

図4.1に示すように、タップ付変圧器とシリコン整流器を組み合わせた方式で、電動機運転中は励磁電流の調整はできないが、停止時変圧器のタップを切り換えることにより励磁電流を階段的に調整する方式で、運転中の負荷変化が少なくまた少々運転力率が変化してもかまわないような用途に使用する。

(b) 手動移相器式

図4.2に示すように手動移相器と変圧器、シリコン整流器を組み合わせ、ハンドル操作で移相器出力電圧を変えて励磁電圧を調整する方式で、運転中でも必要に応じて、任意に無段階的に励

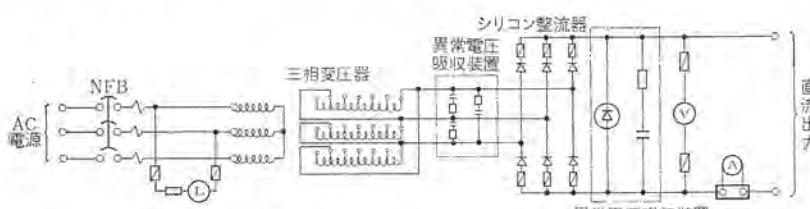


図4.1 変圧器タップ調整式静止励磁装置接続図

Fig. 4.1 Connection diagram of static exciter (transformer tap change type).

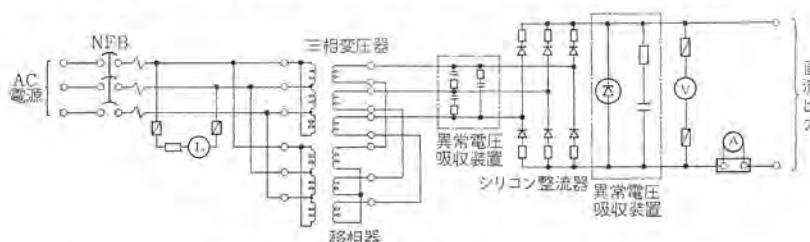


図4.2 手動移相器式静止励磁装置接続図

Fig. 4.2 Connection diagram of phase shifter type static exciter.

磁電流を調整できる方式である。なお本方式の移相器の代わりに、誘導電圧調整器を使用し変圧器とカスケードに接続して励磁電圧を調整する方式もあるが、移相器式に比べ変圧器容量が大となるため、通常の同期電動機には採用しない。誘導同期電動機の場合は励磁電圧が非常に低いが誘導電圧調整器では、これに無関係の製作しやすい出力電圧に選定できるため、これを採用している。

(c) 電動移相器式

(b) の移相器を電動操作式としたもので、遠隔あるいは2個所以上で必要に応じて励磁電流を調整したい場合に使用する。操作電動機としては、通常はカゴ形誘導電動機を使用するが、後記のように自動力率調整を行なう場合は二相サーボモータを使用する。

(2) 電 源

静止励磁装置の交流入力電圧は AC 200/220 V 50/60 c/s 三相または AC 400/440 V 50/60 c/s 三相を標準としている。

(3) 出 力

直流出力は 6.5 kW, 13 kW, 21 kW, 33 kW, 50 kW を標準とし、所要励磁容量がこれ以外のときは、所要容量に最も近い上の容量のものを使用することにしている。直流出力電圧は DC 110 V または 220 V を標準とし、この電圧から 40% 電圧まで励磁電圧を調整できるようにしてある。これだけの調整範囲をもてば、力率 1.0 の場合はもちろん、力率進み 0.8 運転の場合でも、全負荷から無負荷までの負荷変化に対し一定力率運転を行なうよう励磁を調整できる。

(4) 形式 構造

直流出力 21 kW までは、シリコン整流器、変圧器、移相器、電源ノーヒューズ断路器、その他の保護装置、計器一式を鋼板製キュビカルに収納しているが、33 kW 以上は変圧器と移相器は盤外に単独に設置するのを標準としている。

変圧器、移相器は 21 kW 用までは乾式、33 kW 以上は盤外に単独設置するものは油入自冷式としている。シリコン整流器は三相全波整流式で、出力電圧 DC 110 V では 21 kW まで自冷式、33 kW と 50 kW は風冷式、出力電圧 DC 220 V では 50 kW まですべて自冷式としている。シリコン整流器には保護ヒューズを設け、交流側、直流側ともに異常電圧吸収装置を設け、シリコン整流素子自体にも十分の過電圧、過負荷耐量をもたせ、電動機の運転時、事故時を通じて発生する異常電圧、異常電流にも十分耐えうるものとしている。

4.2 複巻特性静止励磁装置

図4.3のように交流自励磁発電機の場合と同様の回路方式とし、電源電圧に比例した一定励磁電流のリアクトル成分と電動機負荷電流に比例した励磁電流の CT 成分とをベクトル合成して、電動機負荷が増大した場合自動的に励磁電流を増すようにして電動機の脱出トルクを大きくし大きな過負荷耐量をもたせることのできる励磁装置である。セメントミル、木材チップ、製鉄ミル

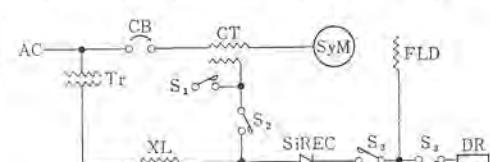


図4.3 複巻特性静止励磁装置単線図

Fig. 4.3 Connection diagram of compound characteristic static exciter.

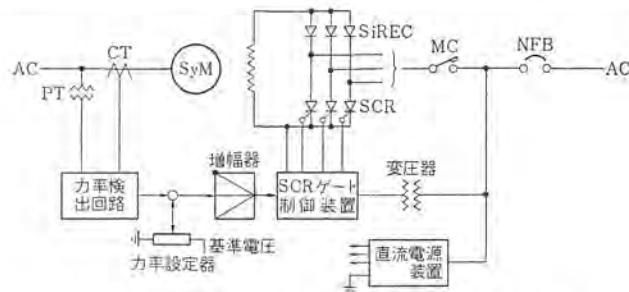
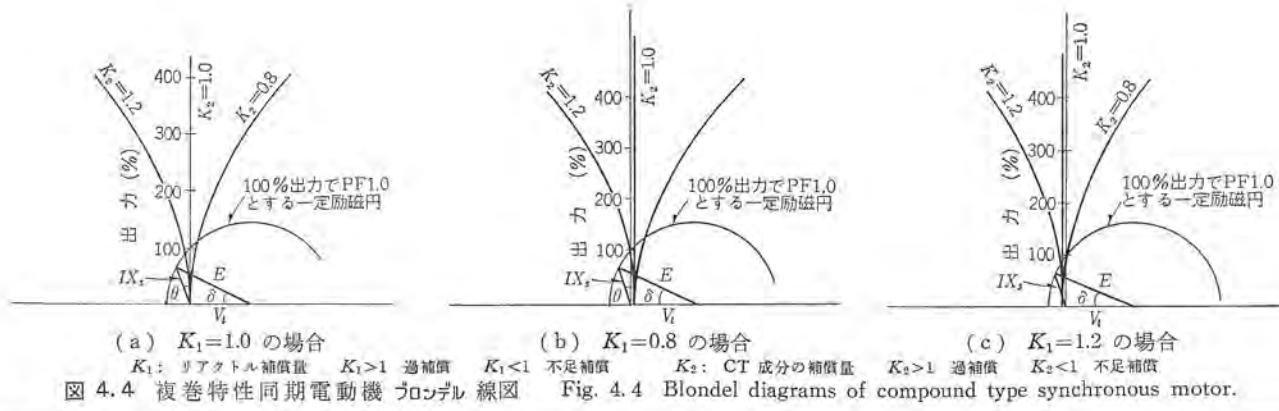


図 4.5 SCR 式静止励磁装置（自動力率調整装置付）
Fig. 4.5 Connection diagram of SCR type static exciter with automatic power factor control equipment.

など運転中過大トルクがかかるような用途に使用する。

リアクトル成分による電源電圧の過不足は、電動機軽負荷の運転力率を規定し電源電圧を過不足なく補償する場合力率 1.0、過補償では進み力率、不足補償では遅れ力率となる。CT成分による負荷電流に比例したインピーダンス降下電圧の補償の過不足は重負荷時の運転力率を規定し、過補償では負荷が増大するにつれ進み力率方向に、不足補償では遅れ力率方向に移動し、過不足なく補償すれば一定 kVar 運転を行なうようになる。この関係を図 4.4 に示す。図に示すように、リアクトル成分、CT成分の補償の過不足により、力率 1.0 の定力率運転、進みまたは遅れの一定 kVar 運転、あるいはかなりの負荷変化範囲に対しほぼ一定力率運転を行なうことができる。この方式では、一定励磁運転の場合の最大出力に対し数倍の最大出力を発生しうる。

4.3 SCR 制御静止励磁装置

図 4.5 のように、シリコン整流器と SCR を組み合わせ力率検出回路からの信号で SCR の点弧位相を制御し励磁電流を制御すれば、一定力率運転を行なうよう自動力率制御することができる。この方式では、電動機負荷が急変し運転力率が変化すれば、ほとんど時間おくれなく応答して一定力率になるよう励磁電流を調整するので、前記複巻特性静止励磁装置と同様に、電動機に大きな脱出トルクをもたせることができ、同様に負荷の急変でしかも大きな脱出トルクが要求される用途の電動機に使用できる。ただし現段階では、SCR の電流容量、逆耐電圧の関係で、直流励磁出力 21 kW 程度までにしか使用できない。

自動力率制御方式については後に説明する。

5. 制御方式

5.1 起動方式

同期電動機の起動方式を大別すれば、自己起動法と起動電動機法の 2 方式がある。自己起動法には

(1) 全電圧起動方式

(2) 減圧起動方式

(a) リアクトル起動方式

(b) 単巻変圧器起動方式

(3) 分割巻線起動方式

(4) 特殊起動方式 がある。

(1)～(3) は最も多く使用されているカゴ形起動巻線付同期電動機に採用される方式であるが、その中でもとくに(1)、(2)-(a)、(2)-(b) の 3 方式のいずれかを採用する場合がほとんどで、(3) の方式を採用するのはまれである。(1)、(2)-(a)、(2)-(b) の各起動方式の回路方式、起動特性、特長は、カゴ形誘導電動機のそれととくに変わることろがないので、詳細な説明は省略する。全電圧起動は最も簡単な起動方式であり大きな起動トルクが得られるが、起動突入電流も大きい。起動突入電流は低速機では 300～400 %程度で、電源容量にもよるが全電圧起動が可能な場合が多い。

高速機では定格電流の 500～1,000% 程度の電流が流れるので、一部の小容量機を除いては減圧起動方式を採用する必要がある。

分割巻線起動方式は電動機固定子巻線を複数個の並列回路に分け順次投入してゆく方式で、全電圧起動に比べ起動用シーカ断器を追加すればよく簡単であるが、電動機自身が大型化し減圧起動方式に比べ、価格的にあまり有利でない場合が多い。

減圧起動方式あるいは分割巻線起動方式では、軽負荷を起動するときは起動加速後、界磁に直流励磁を与える同期引込を行なった後電動機に全電圧を印加したり全固定子巻線を使用するよう切り換えるが、大きな同期引込トルクを必要とするような用途のものに対しては切換動作を行なった後、界磁に直流励磁を与える同期引込を行なう。

(4) の特殊起動法としては、重負荷起動用電動機として使用される電磁クラッチ付同期電動機や、超同期電動機のように負荷に関係なく、まず電動機だけを起動し同期引込を行わない同期電動機の状態にした後、なんらかの方法により負荷を起動する方式とか、相巻線形起動巻線付同期電動機のように巻線形誘導電動機と同様の方式で起動する起動方式などがある。

同期電動機を自己起動で起動する場合、界磁巻線にもスベリに比例した電圧と周波数をもった高電圧が誘起するので、これがスリップリング部に現われるのを防止するためと、この誘起電圧により界磁巻線に電流を流すことにより発生するトルクを有効に加速トルクとして利用するため、起動中は界磁巻線は適当な抵抗を通して短絡しておく。

起動電動機を用いる方式は、大容量機などで電源容量の関係から起動電流を非常に制限する必要のある場合に採用される。起動

電動機としては普通巻線形誘導電動機を使用する。起動電動機でもって、同期電動機の固定子巻線に電圧印加しても大きな突入電流が流れないような同期速度付近に加速した後、同期電動機運転用 シャ断器を投入し、次いで界磁に直流励磁を与える同期引入を行なう。同期電動機運転用 シャ断器が投入されれば、起動電動機用 シャ断器はトリップし、起動電動機は電磁 クラッチにより同期電動機から切り離し停止させる。

5.2 同期引込み方式

同期電動機を前述のような各方式で、同期速度付近の同期引込可能な速度に加速した後、界磁に直流励磁を与え同期引込を行う方式としては、従来は電動機起動後電動機が加速されるまでの時間を限時繼電器でとり、界磁シヤ断器を投入し同期引込を行う限時繼電器方式、あるいは電動機起動後同期速度付近に加速されると電動機電流は減少しほぼ一定電流におちつくので、これを電流繼電器で検出して、界磁投入を行なう電流繼電器方式が採用されてきた。しかしこれらの方式は、負荷変化、電源電圧変化で加速時間、起動電流が変われば、界磁投入動作の行なわれる速度が変わり、また回転子位置に無関係に界磁投入動作が行なわれるため、同期引入時大きな突入電流が流れたり、まれには同期引入失敗を起こすことがあった。

最近開発した スタティックスリップシン 装置は、起動時界磁回路に誘起する スベリ に比例した周波数をもつ交流電圧の大きさ、位相、周波数により、電動機が同期引入可能な速度に加速されたこと、および最適回転子位置を検出して界磁投入を行なうため、大きな引入トルク でもって、しかもほとんど突入電流を流すことなく確実円滑に同期引入を行なうことができる。スタティックスリップシン 装置については項を改めて説明する。

5.3 力率調整方式

同期電動機のV特性として知られているように、同期電動機では負荷が変化すれば運転力率も変化する。運転中の負荷変化があまりないような用途では、前記励磁装置の項で述べたような変圧器タップ調整式、あるいは手動または電動移相器式静止励磁装置を使用し、無負荷時の変圧器のタップを切り換えたり負荷時ハンドル操作あるいは操作開閉器で移相器出力電圧位相を変え、必要に応じて時々励磁電流を調整して規定力率になるようにすればよいが、負荷が大きくしかも急変するような場合、自動的に一定力率になるよう自動制御するのが望ましい。

当社では、最近トランジスタNOR要素を使用した簡単な回路方式で、しかも完全に無接点式で高ひん度の使用に耐える自動力率制御方式を開発し好結果を得たので以下これを説明する。

自動力率制御方式には、最終的励磁電流の調整方式に前述の電動式移相器を使用する方式と、SCR を使用する 2 方式があり、前者は応答速度の点で後者に劣り、あまり急激な負荷変化のない用途に適し、後者は急激な負荷に対してもすみやかに応答し一定力率運転を確保しうる方式である。

(1) 力率檢出方式

図 5.1 に力率検出回路を示す。図において PT は R, S 相間 CT は T 相に接続されているから、力率 1.0 のとき、全波整流器 REC₁, REC₂、出力端子 A, B には図 5.2 の (A), (B) のように 90° 位相の出力電圧が得られ、これをトランジスタNOR 要素 NOR₁, NOR₂ に加えれば、出力端子には全波出力電圧の 0 電圧付近のみ ON となる 90° 位相のずれたパルス電圧(C), (D)が得られ、トランジスタ NOR 要素で形成する記憶回路 NOR₃, NOR₄ に加える。

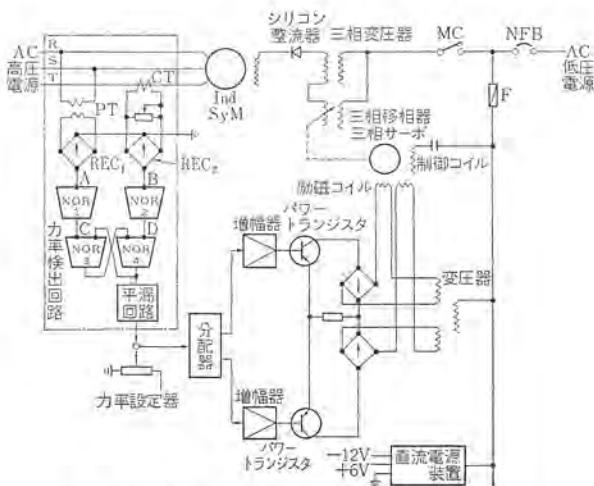


Fig. 5.1 Phase shifter type automatic power control circuits.

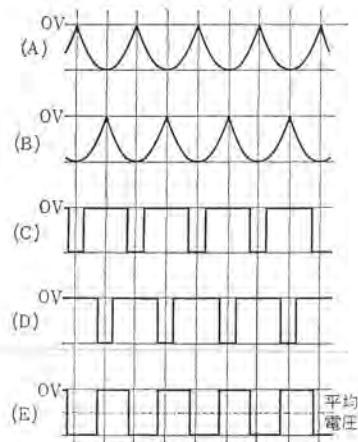


図 5.2 力率検出回路波形図

と、NOR₄ の出力電圧は図 5.2 の (E) に示すように (C) の パルスで ON, (D) の パルスで OFF となる方形波出力が得られる。この出力電圧をゼン-ダイオードで高さ一定とし、R, C で形成する平滑回路に入れれば、図 5.2 の (E) に点線で示すような直流平均電圧が得られる。電動機力率が変化し進み力率となれば、NOR₂ から NOR₄ に加えられるパルス電圧の位相が進み、NOR₂ の方形波出力の ON 期間の幅が狭くなり平均出力電圧は低下し逆に遅れ力率となれば出力電圧は増大し、運転力率に応じて変化する直流出力電圧が得られる。

(2) 励磁電流調整方式

力率検出回路からの運転力率に応じた入力電圧と、力率設定器から与えられる基準電圧を比較し、偏差量を増幅し励磁電流調整回路に入れて界磁電流を制御し、一定力率運転を行なうように制御する。図 5.1 は電動移相器を使用する場合で、操作電動機としては二相 サーボ を使用し、力率偏差量に応じて 1 個の制御巻線と 2 個の励磁巻線のいずれかを SCR 式、トランジスタ式無接点スイッチで「入」「切」し、二相 サーボ を正逆転して励磁電流を調整する ON-OFF 制御の力率制御方式で、回路は完全に無接点化し高ひん度の使用に耐えるものとしている。

図4.5はSCR式で、力率偏差量に応じてSCRの点弧角を制御し励磁電流を調整する方式で、制御系には同期電動機界磁巻線以外にはほとんど時間おくれ要素をもたないので、負荷の急変に対するすみやかに応答し一定力率になるよう制御する。

電動移相器式は現在 9,200 kW, 7,000 kW, 4,000 kW 同期電動機用として各 1 台ずつ製作中である。SCR 式は、今までのところ納入実績はないが、70 kW 同期電動機における工場試験では好結果を得ている。

6. 保護装置

同期電動機の保護装置としては通常下記のようなものを設けている。

(1) 過負荷保護 通常は誘導形または熱動形過電流継電器を使用して保護してきたが、最近電動機固定子巻線温度を直接検出して保護するガージスタモータリレーという商品名の保護リレーを開発した。これについては、

本誌の「誘導電動機の保護装置とその選択」で詳細に述べているので、ここでは説明を省く。

(2) 低電圧保護 通常は誘導形不足電圧継電器を使用するが、小容量のものでは補助継電器を使用して無電圧保護を行なう。

(3) 同期はずれ保護 従来は強反限特性的誘導形過電流継電器を使用し、同期はずれ時の電動機一次電流の増加を検出し保護してきたが、最近同期はずれ時界磁回路に誘起する交流電圧を検出して保護する方式を開発し、これを使用している。これについては、後記 スタティックスリップシン装置の章で説明する。

(4) 界磁喪失保護 界磁励磁電流が規定最小値以下に低下あるいは消滅したことを、従来は電磁式電流継電器で検出してきたが、最近はこの保護もスタティックスリップシン装置で保護するようしている。同期電動機では力率制御のため励磁電流は最大から 40%程度まで調整するから、この界磁喪失保護は事実上、界磁電源の喪失あるいは界磁回路の断線で励磁電流が完全に流れなくなった場合を保護できるにすぎない。

(5) 起動巻線保護 電動機起動途中加速不能となったり、加速に長時間を要するなどの起動渋滞を起こして、起動巻線（制動巻線）が過熱し損傷を受けるのを保護する方式としては、従来は特別の保護装置が設けられていなかったが、この保護も最近開発したスタティックスリップシン装置で行なうようにしている。

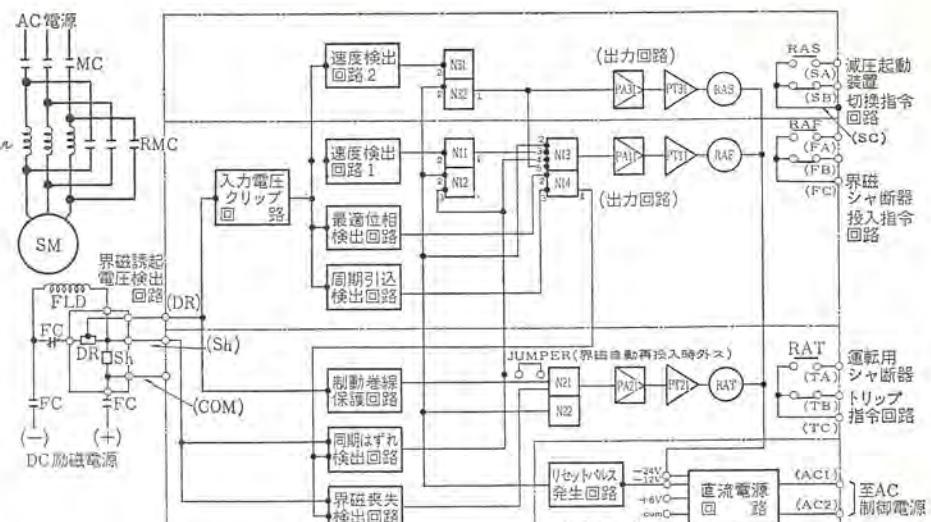
(6) 界磁投入動作不能保護 電動機起動後所定の時間たっても界磁シャンクが投入されず、同期引込動作が行なわれないことを、限時継電器でもって保護する。

(7) 起動 リアクトル または単巻変圧器の保護 リアクトル または単巻変圧器などの減圧起動装置を使用する場合、これらは単時間定格のものであるから起動後所定の時間を経過しても全電圧への切換動作が行なわれない場合は、限時継電器でもってこれを保護する。

(8) その他 大形電動機では、比率差動継電器を用いて電動機内部事故を検出保護することもあり、また必要に応じて軸受温度、潤滑油圧、油温、内圧防爆部の圧力を検出しこれを保護する。

7. 三菱スタティックスリップシン装置

最近開発した三菱 スタティックスリップシン装置は、同期電動機の起動の同期電動機とその制御装置・東海林・中野



MC=運転用シャンク SC=リアクトル短絡開閉器 FC=界磁シャンク DR=界磁起動放電抵抗 Sh=シャント
N=トランジスタ NOR 要素 PA=トランジスタ前段増幅器 PT=パワートランジスタ RAF=補助継電器
注：減圧起動切換指令回路は自動減圧起動装置のある時追加取付する。

図 7.1 スタティックスリップシンプロック線図
Fig. 7.1 Brock diagram of static slipsyn.

動、同期化制御および運転保護装置で、一つの装置をもって

- (1) 起動同期化時の界磁投入指令
- (2) リアクトル起動、単巻変圧器起動などの減圧起動装置の切換指令
- (3) 起動渋滞時の起動巻線（制動巻線）保護
- (4) 同期はずれ保護、同期化失敗保護
- (5) 界磁喪失保護

の機能をもっており、トランジスタ論理要素、ダイオード、サーミスタ、抵抗、コンデンサなどの最新の半導体技術を応用した完全な静止回路から構成され、従来の方式には見られない制御、保護性能をもっている。図 7.1 にスタティックスリップシン装置のブロック線図を示す。以下各回路の機能動作につき簡単に説明する。

7.1 界磁投入指令回路

起動時、界磁巻線に誘起するスペリに比例した周波数をもつ交流電圧を入力信号とし、その大きさ、周波数、位相で電動機速度と回転子位置を検出し、最適位相で同期引込を行なうための界磁投入指令を発する。

速度検出回路1は、スペリ周波数により電動機速度を検出する回路で電動機が同期速度付近の同期引込可能な速度になり、入力周波数が低下すれば ON となる回路で、この出力 ON となるスペリは、ポテンショメータによりほとんどスペリ 0~5% の範囲で容易に調整できるようにしている。

界磁誘起電圧は、回転子位置に応じて位相大きさが変化する交流電圧である。最適位相検出回路は、この界磁誘起電圧の位相により回転子位置を検出し、回転子が同期引込する最適位相位置を通過する瞬間のみ ON となるようなパルス電圧を発生する回路で、速度検出回路が ON となっておって、最適位相検出回路が ON となつたとき補助リレー RAF が作動し界磁投入を行なう。

突極形の同期電動機では軽負荷の場合、いわゆるリラクタンストルクのため、とくに界磁に直流励磁を与えるとともに自動的に同期引込を行なうことがある。このような場合界磁誘起電圧は急速に減少し 0 となるため、最適位相検出回路が作動しない場合がある。同期引込検出回路は、界磁誘起電圧が同期引込で 0 となつたとき最適位相検出回路に代わって ON なり、RAF を動作させ界磁投入

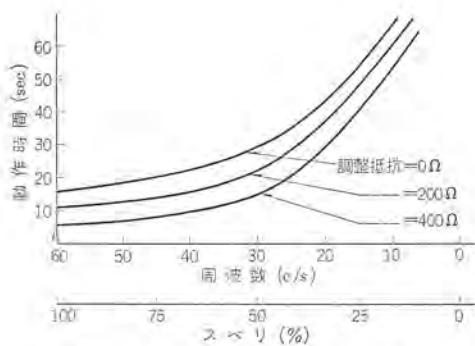


図 7.2 起動巻線保護回路動作特性
Fig. 7.2 Characteristics of damper windings protecting circuit of static slipsyn.

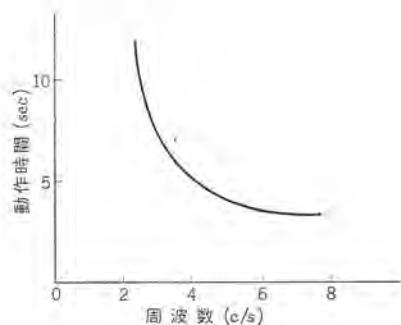


図 7.3 同期はずれ検出回路の動作特性
Fig. 7.3 Characteristics of step-out detecting circuit of static slipsyn.

を行なうためのものである。

7.2 減圧起動装置切換指令回路

起動時の負荷が軽負荷で、同期引入後リアクトルを短絡したり単巻変圧器を切り換えて全電圧を電動機に加える場合は、界磁シヤンタを投入後限時継電器を作動させて一定時間後切換動作を行えばよいが、大きな負荷を起動する場合のように、全電圧に切り換えてから同期を入れを行なう場合に、この回路を使用する。

速度検出回路 2 は、界磁投入指令回路の速度検出回路と同様の回路方式で、界磁誘起電圧のスベリ周波数の変化で電動機速度を検出し、電動機電流が減圧起動装置を切り換えるに足る電流まで減少した速度で作動するよう、ポテンショメータで容易にセットすることができ、界磁投入指令と同時またはこれより遅れて、切換指令を発すことのないようインターロックをとっている。

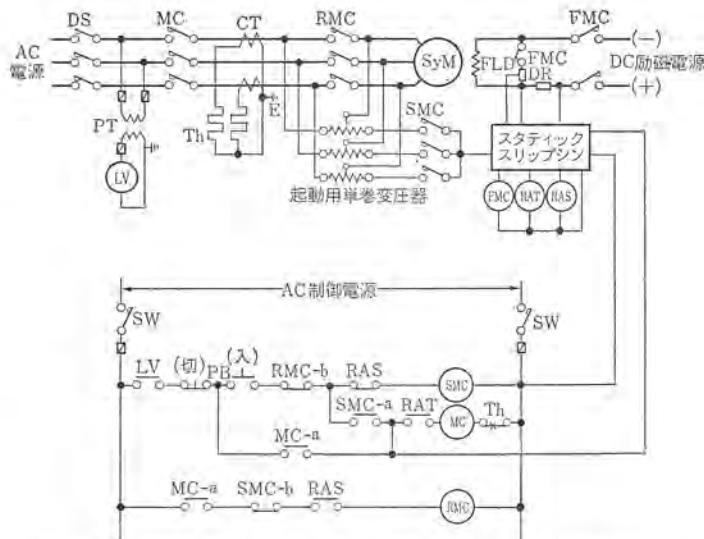
7.3 運転用シャンタ断器トリップ回路

(1) 起動巻線保護回路

起動時界磁巻線に誘起するスベリ周波数をもつ交流を入力信号とし、サーミスタの発生熱による抵抗変化と、リアクトルによる周波数によるリアクタンス変化で起動巻線の温度上昇を模擬し、回転数が低くスベリ周波数の高いときは短時間で作動し、回転数が上がりスベリ周波数が低くなるほど遅く働く図 7.2 に示すような動作時間をもって、電動機の起動渋滞を保護する。

(2) 同期はずれ検出回路

電動機運転中同期はずれを起こすと、直流励磁電流に重畠してスベリ周波数をもつ交流が発生する。これを界磁励磁回路に直列に接続したシャント Sh で取り出し、交流のサイクルを数え、図 7.3 に示すよう時限をもって動作し同期はずれを検出保護する。またこの回路は界磁投入後同期引入に失敗したり、同期引入までに



注：FMC はスタティックスリップシン内パワートランジスタ CPT で直接操作する。

図 7.4 スタティックスリップシンの使用回路
Fig. 7.4 Synchronous motor control circuit with static slipsyn.

長時間を要したりした場合も作動しこれを保護するが、運転中負荷の急変あるいは同期引入時過渡的に現われる交流電圧では、誤動作しないようにしている。

(3) 界磁喪失検出回路

運転中直流励磁電流がなくなればシャント Sh での直流励磁電流が消滅するので、これを検出し保護する。

スタティックスリップシン装置では、同期引入可能な速度でしかも最適回転子位置で界磁投入指令を出したり、電動機速度を検出して減圧起動装置を最適速度で切り換えるよう指令するよう容易に調整でき、従来の電磁継電器式を使用する方式に比べ、起動、同期引入動作を非常に円滑に行ないうるとともに、従来の方法では確実性のなかった同期はずれ保護、起動巻線保護を確実に行なうことができる。図 7.4 にスタティックスリップシンを使用した回路例を示す。

8. む す び

同期電動機の応用分野はそのすぐれた特長にもかかわらず、そのどちらかといえば非常に限られたものであったが、以上の説明のように、最近は近年急速な発展を見た半導体技術の応用により、運転特性、制御性能の両面において長足の進歩をとげており、今後もいっそう努力して改良と性能の向上に努力したいと考えているので、広く電動力応用の各種分野に同期電動機をご使用いただければ幸いである。

参 考 文 献

- (1) 松村：最近の同期電動機 (1)，「三菱電機」35, No. 4 (昭 36)
- (2) L. Hannakam, C. Concordia: Stability limits of Syn. motor during power system, TAIEE III. 80 (1,962)
- (3) M. Rosenberry. A new brushless D-C excited rotating field syn. motor, AIEE T. P. 65-127.
- (4) J. Gibbs: Induction and syn. motors with unlaminated rotors, JIEE 95, (1,948)

新形起重機用電動機

八木 勝*・和田 義彦*

New Series Crane Motors

Nagoya Works Masaru YAGI・Yoshihiko WADA

New series crane motors with an aim of small size and light weight in conformity to the JEM 1065 and 1066 have been developed. Their construction and performance are briefly discussed herein. Employment of class E insulation all over and radical design in construction have resulted in reduction of the weight and GD^2 of the motor by 20% from the old standard product, yet with no less sturdiness in construction. The characteristics satisfy those prescribed in the JEM 1065. The temperature rise is almost the same as that of the standard one. Turning the motor small sized and employing an effective cooling system have contributed to the reduction of the thermal time constant. This has increased the working load factor of the new crane motors in comparison with the old standard machines.

1. まえがき

今日の重工業の発展はまったく過去において想像も及ばなかつた驚異的なものであり、国家経済の伸長に対する一大原動力となつてゐる。とくに製鉄製鋼工業関係、造船工業関係、建築土木工業関係などの進展はまことにめざましいものがある。

ある見方をすれば、これらの重工業の発展に偉大な寄与をなしたものは、荷役機械すなわち起重機であり、起重機用電動機であることができると思う。

現在起重機用電動機に関しては、一応昭和 28 年に制定公布された JEM 1065, 1066 起重機用全閉巻線形低圧三相誘導電動機の特性、寸法という規格があり、わが社においてもこの規格に準拠した起重機用電動機が標準化され、以来幾多の電動機が生産されなお現在も盛大にその生産を続けている。しかしこの規定が制定されて以来すでに 10 年余の時日が経過しており、その間の電気材料の改良進歩、製作技術の向上などによって、規格それ自体の見直しが要望されるにいたつていて、この規格改訂に関しては、現在、日本電機工業会の誘導機技術常任委員会が関連の学会や委員会などの意向をくんで審議検討をはじめようとする段階であり、この改訂公布に至るまでにはなおかなりの時間を要するものと考えられる。

これに先だってわが社では起重機用電動機の設計に関して全面的な見直しを実施し、一応従来の JEM 1065, 1066 に準じたものではあるが、とくに E 種絶縁を採用し小形軽量化したにもかかわらず起重機用電動機としての構造的な堅ろう性は少しもそこなわれることなく、特性に関しては全面的に改良を施し、まったく新しい感覚の起重機用電動機として今後の飛躍が大いに期待される新系列の開発に成功した。

以下本論においてこれらの新形起重機用電動機の寸法構造性能などに関し、その概要を述べることにする。

2. 新形起重機用電動機の概要

新形起重機用電動機は JEM 1065, 1066 に準拠して、しかも大幅の小形化、重量軽減を図るために鉄心寸法を従来の形式のものに比べ 1 段階以上下げることで設計を計画した。JEM 1065, 1066 に規定せられる起重機用電動機は、比較的多極機がその主力をなしている関係上、鉄心寸法を下げるることは特性面とくにトルク特性に相当の影響を与えるものであるが、適切な鉄心形状と ミツ数との選定により、JEM 規定を十分満足し、しかも従前と変わらない特性を得ることに成功した。

2.1 特長

(1) 旧標準と完全な互換性をもつてゐる。

特性、寸法は JEM 1065, 1066 に完全に準拠しているので新規製作の場合はもちろんのこと、旧形の予備品としても完全な互換性をもつてゐる。

(2) 旧形に比べ重量は約 20% 軽減している。

取付寸法は旧形と同一にもかかわらず設計の合理化により、その重量は旧形に比べ平均約 20% 軽減することができた。

(3) 回転子 GD^2 は旧形に比べ約 20~30% 減少した。

鉄心の外径寸法を縮少したこと、内部 ファン を全廃したことより回転子の全 GD^2 は旧形に比べ約 20~30% 減



図 1.1 新形起重機用電動機
Fig. 1.1 New series crane motors.

表 2.1 重量および GD^2 比較

出力 (kW)	重量 (kg)		GD^2 (kg·m ²)	
	新	旧	新	旧
2	80	95	0.2	0.26
3	95	140	0.26	0.51
5	180	195	0.71	0.78
7.5	215	255	1.51	1.86
10	270	335	1.88	2.11
15	310	380	2.57	2.91
20	410	500	4.0	4.86
30	670	800	10.1	11.50
40	740	920	12.8	14.80
50	910	980	17.7	26.0
60	980	1,080	20.5	30.5
75	1,210	1,490	31.0	41.0
100	1,380	1,660	39.0	49.8

少し、激しい起動停止および速度変動に際しての応答速度を向上させることができた。

(4) 温度上昇は旧形とほとんど変わらない。

寸法を縮少し、さらに内部 ファンを取り除いたにもかかわらず、冷却設計の合理化により各部の温度上昇は旧形とほとんど変わらない。しかも E 種絶縁の採用により耐熱性は向上しているので、さらに長い寿命が期待できる。

(5) 完全な防水構造を採用している。

完全な防水構造、とくに軸貫通部、端子箱などには完全な防水構造が採用されており、屋外での相当な悪条件下でも安定した特性を発揮することができる。

(6) 振動および音響はきわめて少ない。

ミジ数組み合わせの適切な選定、回転子スキーの全面的実施および構造部分に十分の考慮が払ってあるので振動、音響はきわめて少なくなっている。

2.2 各種規格の関連

今回開発した新系列の起重機用電動機は JEM 1065(特性) JEM 1066(外形寸法)に準拠して製作されているが、前述のように、今日 JEM 規格の改訂見直しの審議が始められようとしている。これに先だって電気学会の荷役機械用電気品専門委員会では、国内の需要家、機械メーカーにアンケートして、その改訂に関する意見を調査しているが、寸法の変更は別としても現行 JEM の改訂に関しては異存ないようである。しかし一部には、アメリカにおいて採用されている AISE の暫定規定に準じた改訂を要望される向きがあるが、これは製鉄補機として heavy use のものを対象としており、今日なお一般用起動機用電動機の需要が大部分を占めていることを考えれば、必ずしも全面的な AISE の採用の要はないものと考えられる。

今、本文をまとめに際して将来の現行 JEM の改訂の動向が大きな問題として浮んでくるのであるが、以下にこの審議の話題に上ってくると予想される NEMA あるいは AISE などのアメリカ規格と JEM の差異について検討してみることにする。

(1) 形式および定格

JEM は全閉形 30 分または 1 時間定格の起重機用電動機について規定している。NEMA は全閉形および開放形の 30 分または 1 時間定格について規定している。AISE は全閉形で 1 時間定格を基本定格とし、通風冷却を行なった場合の定格についても規定している。すなわち

(a) 開放形で全閉形 1 時間定格の 125% 出力で 1 時間定格とする。

(b) 開放形で全閉形 1 時間定格と同一出力で連続定格とする。

(c) 強制通風方式で全閉形 1 時間定格の 125% 出力で連続定格とする。

(d) 全閉形で外被強制通風方式の場合は、全閉形 1 時間定格と同一出力で連続定格とする。

新形起重機用電動機系列では全閉形 1 時間定格を標準とし、通風冷却を行なうことにより同一出力で開放形連続定格に使用できるよう設計されている。すなわち一部には AISE の特殊定格規定事項にも適合するよう考慮を払っている。

(2) 出力と回転数との関係

JEM においては 50 c/s, 60 c/s 両用として 2 kW および 3 kW については 6 極を、5 kW~20 kW までについては 8 極を、30 kW 以上については 10 極を標準極数として規定している。NEMA では、この関連についての規定は特になく、各出力、各極数ごとにそれぞれ適合ワク番が定められている。AISE では 60 c/s 専用として、全閉形 1 時間定格について 5~60 HP まで 6 極、60~150 HP まで 8 極、150 HP 以上 10 極と JEM と比較して高速化された標準出力系列が規定せられている。以上のように出力、回転数(極数)に関しては kW 標準と HP 標準または高速化など関連性はまったくないといえる。

(3) 特性

特性一般について JEM では規定を設けているが、NEMA および AISE では停動トルクおよび二次特性を除いては規定せられていない。停動トルクについては JEM では 225% 以上、NEMA では 275% 以上、AISE では 325~425% の範囲の規定を設けており、これらの規格間には大幅な相異がみられる。

過速度については JEM では具体的な規定がないため JEC 規定の 125% 1 分間耐えうるということが適用されるが、NEMA および AISE では最高許容速度という表現で、NEMA では 150%, AISE では 200% を最高許容回転数とするよう規定されている。

二次特性関係はいずれの規格においても規定がある。JEM では単に参考値としての二次電圧を規定しているのみであるが、NEMA および AISE は同一値を規定し、さらにそろ入二次抵抗の値についても規定している。ここで注目しなければならないことは JEM については、二次電圧の項は規格としての拘束力をもたないことであるが、NEMA および AISE ではこの規定に対して ±10% の幅を許容差として設け拘束力をもつ点にある。

新形起重機用電動機では特性値は JEM に準拠しているのでまったく関連性はない。とくに停動トルクについては 225% を最低目標値として設計してあるので NEMA または AISE のような高トルクの特性にはまったく適合しない。これは出力一回転数の標準関係が JME とアメリカ 規格との間で差があり、とくにアメリカ 規格では JEM に対し非常に高速化している点が、高停動トルク適用可能の一つの理由になっているように考えられる。

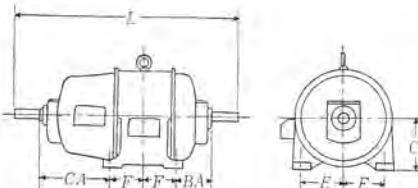
過速度については、いずれも 200% に耐えうるよう各部の構造を検討しているので問題はない。ただし、これは JEM 規定の低速機を基準にとった場合であり、モータの高速化を考慮した場合は再検討の必要があろう。

二次特性については JEM によっているのでアメリカ 規格とは大きな開きがあり、関連性はまったくない。ただし二次の巻線の変更により AISE の線まで変更は可能であるが、トルク特性が異なるため起動条件により決定されるそろ入二次抵抗は当然異なる。

表 2.2 同一出力に対する JEM, AISE

主要寸法比較表

() 内出力 AISE 標準出力を示す

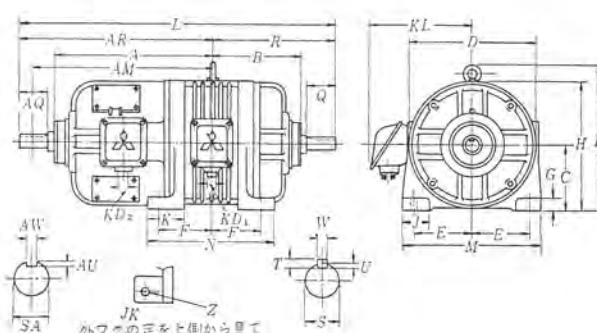


出力 (kW)	C		E		F		BA		CA		L	
	JEM	AISE	JEM	AISE	JEM	AISE	JEM	AISE	JEM	AISE	JEM	AISE
2	160	130	178	140	172	120	186	130	130	220	685	685
3(3.7)	180	140	178	160	172	150	186	140	140	225	735	853
5	205	180	178	180	172	145	186	155	155	250	850	850
7.5(7.5)	230	180	178	200	172	155	186	175	175	315	930	856
10	250	200	198	200	198	175	195	175	175	335	1,020	1,020
15(15)	250	203	230	250	215	200	240	220	205	375	1,180	1,180
20	280	230	250	250	242	230	258	220	156	440	1,330	1,074
30(30)	320	228	250	250	240	220	240	175	175	440	1,390	1,150
40(45)	320	254	250	250	242	230	258	220	—	—	—	—
50	345	287.5	340	340	328	340	328	120	120	—	1,350	1,350
60(67)	345	318	298	340	328	215	—	—	215	215	1,350	1,410
75	390	337.5	405	405	—	—	—	—	—	—	1,505	1,505
100(110)	390	368	342	405	388	120	252	—	—	252	1,505	1,634
125	450	395	435	435	—	—	—	—	—	—	1,590	1,590
150(150)	450	432	395	400	435	450	450	120	292	—	292	1,590
											1844	

表 2.3 標準外形寸法

kW	極数	ワク番号	電動機												取付ボルト									
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	JK	K	KD ₁	KD ₂	KL	L	M	N	R	AR	Z	
2	6	KE1621	320	215	160	320	130	105	26	320	371	60	10	75	30以下	30以下	271	685	320	250	290	395	15	W _{1/2}
3	6	KE1824	340	235	180	320	140	120	26	340	391	70	10	75	30以下	30以下	274	735	350	280	320	415	15	W _{1/2}
5	8	KE2030	395	285	205	380	160	150	30	395	446	80	13	90	40以下	30以下	340	850	410	340	370	480	19	W _{9/8}
7.5	8	KE2329	455	295	230	435	180	145	30	448	508	85	15	90	40以下	40以下	370	930	460	330	390	540	19	W _{9/8}
10	8	KE2531	485	325	250	460	200	155	35	480	551	85	17	110	40以下	40以下	385	1,020	500	370	440	580	22	W _{3/4}
15	8	KE2535	505	345	250	460	200	175	35	480	551	85	17	110	40以下	40以下	385	1,060	500	410	460	600	22	W _{3/4}
20	8	KE2837	540	385	280	515	230	185	35	538	609	90	18	115	40以下	40以下	435	1,180	560	430	510	670	22	W _{3/4}
30	10	KE3240	620	415	320	565	250	200	35	603	683	105	20	125	40以下	40以下	461	1,330	640	470	570	760	25	W _{7/8}
40	10	KE3246	650	445	320	565	250	230	35	603	683	105	20	125	40以下	40以下	461	1,390	640	530	600	790	25	W _{7/8}

@S	Q	T	U	W	軸端 (連結側)					軸端 (反連結側)				
					@SA	AQ	AU	AW	AM	KL	D	H	G	C
30	70	7	4	7	30	70	4	7	405					
32	70	8	4.5	10	32	70	4.5	10	405					
42	80	8	4.5	12	42	80	4.5	12	450					
48	90	8	4.5	12	42	80	4.5	12	535					
55	110	10	5	15	48	90	4.5	12	575					
55	110	10	5	15	48	90	4.5	12	595					
60	120	10	5	15	55	110	5	15	635					
75	150	13	7	20	60	120	5	15	720					
75	150	13	7	20	60	120	5	15	750					



kW	極数	ワク番号	電動機								取付ボルト
			A	B	C	D	E	F	G	H	
50	10	KE3468B	700	450	345	650	287.5	340	70	670	
60	10	KE3468B	700	450	345	650	287.5	340	70	670	
75	10	KE3981B	770	515	390	735	337.5	405	80	758	
100	10	KE3981B	770	515	390	735	337.5	405	80	758	

I	J	JK	K	KD ₁	KD ₂	KL	L	M	N	R	Z	電動機					取付ボルト
												SA	AQ	AR	AU	AW	AM
760	160	25	190	65以下	65以下	555	1,510	695	780	640	28	W1					
760	160	25	190	65以下	65以下	555	1,510	695	780	640	28	W1					
868	170	25	240	65以下	65以下	600	1,694	805	920	725	35	W1 1/2					
868	170	25	240	65以下	65以下	600	1,694	805	920	725	35	W1 1/2					

備考: ② 軸径の上下寸法差は日本工業規格 JIS B 0401

ハメトイ方式 "m6" による。

キーは日本工業規格 JIS B 1301 頭付コウ配キーである。

この表に示す寸法は日本電機工業会協約寸法。

た値となることが予想されるので関連性はまったくないと考えられる。

(4) 温度上昇と絶縁階級

JEMにおいては、とくに絶縁階級について規定を設けないか、いずれの絶縁階級をも選定することができる。

NEMA では A 種および B 種について温度上昇面での適用が規定されているが、一般的な絶縁階級選定に関する拘束力はないと考えてよい。しかしながら AISE では、全部 B 種絶縁とするよう明確な規定がある。

温度上昇限度については JEM, NEMA および AISE ともまったく同一である。

(5) 寸法

同一出力に関する JEM と AISE との主要寸法の比較表を表

新形起重機用電動機・八木・和田

2.2 に示す、NEMA は同一出力でも各極数についての適用ワク番の規定があり、直接の比較にはならないと考える。JEM に比べ AISE のほうが小形化されているが、これは高速で設計されているからで、この点からみて寸法的な関連性はまったくない。

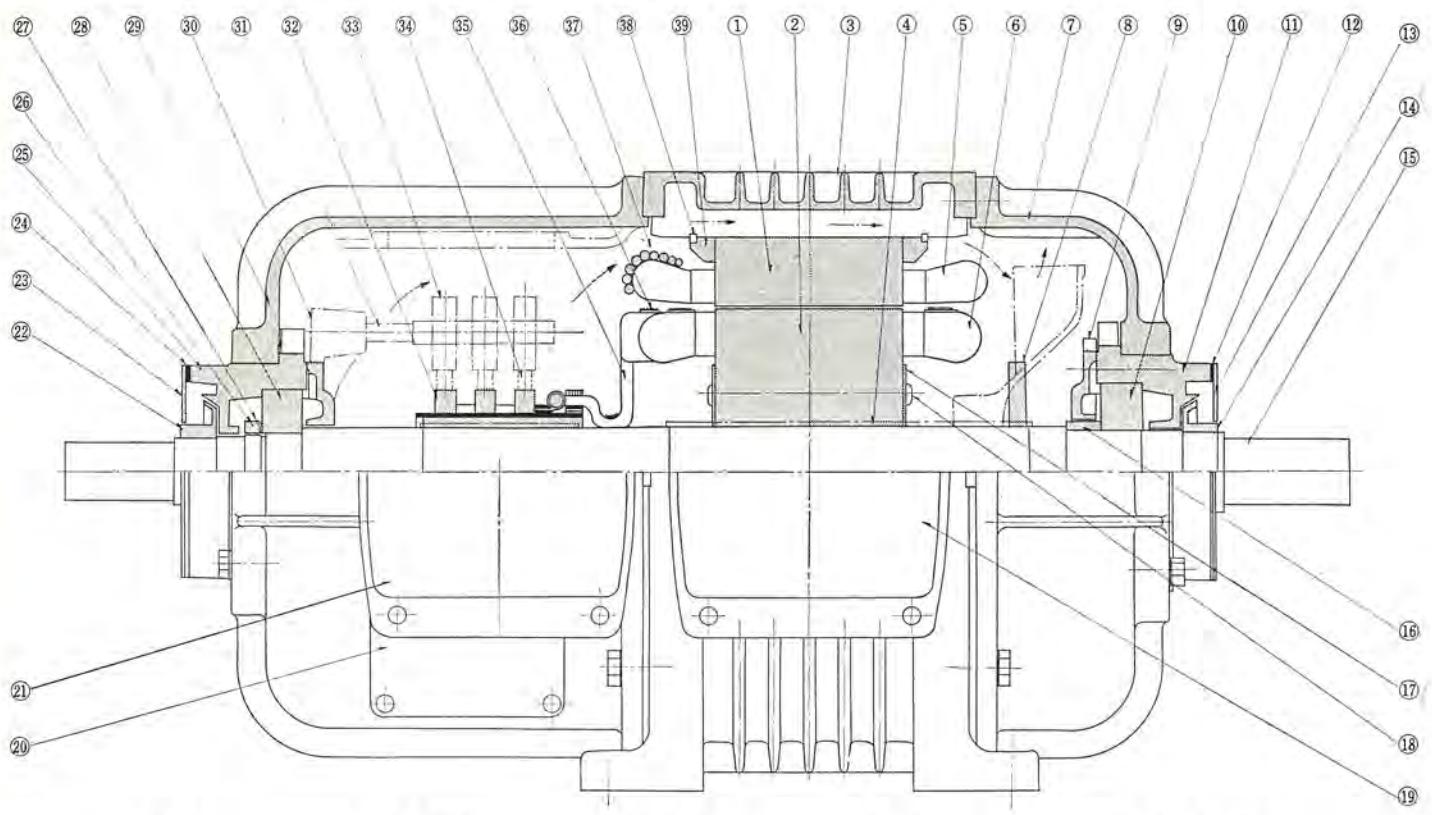
2.3 標準と外形寸法

新形起重機用電動機の標準出力に対する外形寸法表を表 2.3 に示す。

3. 構造

3.1 構造一般

図 3.1 に新形起重機用電動機の構造を示す。各部の構造は全閉形と開放形とを兼ねうるよう考慮されている。すなわち反負荷



① 固定子鉄心
② 回転子鉄心
③ フレーム
④ 回転子鉄心キー
⑤ 固定子コイル
⑥ 回転子コイル
⑦ ブラケット
⑧ パラシスリッジ

⑨ 軸箱カバー
⑩ コロ軸受
⑪ 軸箱
⑫ バッキン
⑬ 端ブタ
⑭ 回転レール
⑮ 軸
⑯ 間隔管

⑰ 回転子クラシバ
⑱ コアリベット
⑲ 固定子端子箱
⑳ 全閉板
㉑ 回転子端子箱
㉒ 回転レール
㉓ 端ブタ
㉔ バッキン

㉕ 軸箱
㉖ ナット
㉗ 座金
㉘ 玉軸受
㉙ ブラケット
㉚ 軸箱カバー
㉛ ブラシ取付棒
㉜ スリップリング

㉝ ブラシ保持器
㉞ カーボンブラシ
㉟ 回転子口出し線
㉟ バインド線
㉟ 固定子口出線
㉟ 固定子ケランバキー
㉟ 固定子クラシバ

図 3.1 新形起重機用電動機構造図

Fig. 3.1 Construction of new series crane motor.

側 ブラケット の下部全閉 カバー をはずし、内部に軸流 ファン を取り付け、負荷側 ブラケット を開放形専用に取り換えることにより、開放形連続定格として使用できる。図 3.1 において、鎖線で示したのは開放形とした場合のもので、矢印はそのときの通風経路を示す。全閉形短時間定格で使用するときには、内部 ファン は使用しない。

全閉形の場合は屋外形を標準とし、防水構造を採用している。端子箱は負荷側から見て、すべて左側にあるのを標準構造とした。一般に起重機用電動機は負荷の性質上、相当過酷な運転が行なわれる所以、各部の締付 ボルト 類には完全な ユルミ 止めが施してある。軸受は コロガリ 軸受を使用し、負荷側には円筒 コロ 軸受、反負荷側には玉軸受を採用している。反負荷側に ブレーキホイール が取り付けられるため、両軸端出しを標準構造としている。



図 3.2 新形起重機用電動機固定子
Fig. 3.2 Startor assembly.

3.2 固定子構造

(1) フレーム および ブラケット

フレーム および ブラケット はすべて鋳鉄製である。フレーム は表面の放熱効果を増加させるため、円筒方向の放熱ヒレ を 6~8 本配置した構造とした。従来は一般に放熱ヒレ ではなく大形の一部のもののみに採用していた。フレーム 内面には固定子鉄心を支持するための リブ を設け、フレーム 自体の強度を増すと同時に開放形連続定格として使用するときの通風路を形成するようしている。ブラケット にも表面に数本の補強用 リブ を設けてある。これらの リブ は構造物の強度を増すとともに構造的な美観と、起重機用電動機としての安定感を与えるにも役だっている。

フレーム および 反負荷側 ブラケット には、固定子 および 回転子端子箱取付用の座が設けられている。反負荷側 ブラケット の上面には集電環点検用の窓と、下面には清掃の便宜と開放形とするための窓が設けられており、常時はこれらは全閉カバーにて完全な防水構造になるように密閉されている。

(2) 固定子 コイル

固定子 コイル には、ポリエチレン 電線の丸線のものを全機種にわたって採用した。従来、大形以上については、平角線の ソロ巻き が使用されていたが、これを丸線の パラ巻 に変更することにより、大いに作業性の向上に役立つことができた。大形機において平角線の ソロ巻き を採用しているのは、大容量化に伴う電線断面積の増大、占積率の改善、起動時における電磁力によるコイル の動きの防止などを目的としたものであったが、クレーンモータ のような多極機を標準とするもので、出力も一般的に多いのは 100kW



図 3.3 新形起重機用電動機回転子
Fig. 3.3 Rotor assembly.

程度のものでこれらについては、上記のような問題はとくに考慮するにはおよばないとの結論を得たので全面的な丸線の採用に踏み切ったものである。

絶縁は完全 E 種絶縁で、特殊熱硬化性ワニスにより処理が施され、耐熱性と耐湿性は非常に向上している。

3.3 回転子構造

起重機用電動機は通常運転時において、過激な起動停止が繰り返され、さらに負荷の種類によっては過速度となったり、急激な逆回転が繰り返し行なわれる。したがって回転子構造は、これらの機械的衝撃に対して十分な強度をもつよう考慮されている。

(1) 回転子鉄心およびコイル

回転子鉄心にはすぐれた特性で、十分の機械的強度をもったケイ素鋼板が使用されている。とくに回転子歯部については過速度による過激な遠心力に耐えうるようその寸法を決定している。小形および中形機に対しては鉄心自体をクランプでリベット締めののち、軸に圧入する方法が採用されており、大形機に対しては回転子スピーダに鉄心をジカ積みしてのち、クランプでカシメる方式を採用している。

回転子コイルは E 種絶縁であるから全部ポリエチル電線が使用されている。小形機においては、ポリエチル丸線を小判巻きとしてパラ巻きする。中形以上では、ポリエチル平角線を使用し、ソロエ巻きとしている。絶縁は完全 E 種絶縁で、特殊熱硬化性ワニスで処理されているので、耐熱性と耐湿性は非常に向上することができた。バインド線には高抗張力鋼線を使用し、2 倍の過速度に対して十分の安全率をもち、さらに機械的衝撃をも十分考慮して設計している。また小形機においては、比較的遠心力が小さいのでコイルエンドの特殊処理のみで、2 倍の過速度に対し十分の耐力を保証できることが確認できたので、バインド線を省略した。

(2) 集電環部

集電環部は定格二次電圧、二次電流に対してはもちろんのこと、ブレーキングまたは回生制動時の二次電圧の急上昇に対しても、十分の絶縁耐力をもつよう考慮している。スリップリングには青銅鋳物を使用し、定格二次電流に対するのみならず起動停止を繰り返す場合に予想される突入電流に対して余裕のあるように、その寸法を選定している。また冷却効果と絶縁耐力の両面からリング間隔を選定し、リング間表面は特殊処理を施して平滑に仕上げ カーボン粉末の付着が少なくなるよう考慮している。リング間の絶縁管には経年変化の少ないものを選定使用している。

回転子コイルから集電環に至る渡り線には一般のロ出線を使用し、これらは3本まとめて2軸に固着されている。

集電用ブラシについては、リング表面の状況、周速、周囲温度および電流密度などを考慮した実用寿命試験を実施して、摩耗、温度上昇についてのデータをまとめたうえ、適確な銘柄の選定を行なっている。

(3) 軸

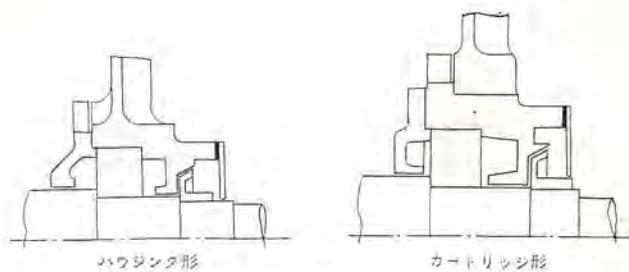


図 3.4 軸受構造図
Fig. 3.4 Construction of bearing box.

小形機においては、一般機械構造用炭素鋼を、大形機では丸タン(鍛)鋼を使用している。軸の強度に対しては起重機用電動機といふ特殊でしかも過激な使用条件で使用されるため、とくに著しいネジメントをうけるので、これらについて十分考慮の上、軸径を選定している。回転子全体のダイナミックバランスをとるため、軸には黄銅製のバランスリングがそう入されている。

3.4 軸受

負荷側には円筒コロ軸受を、反負荷側には玉軸受を採用している。新形ではモール寸法は小形化されているが、軸受については従来のものと同一の形番を採用している。いずれも過酷な使用条件に対して十分の寿命をもつようとくに負荷耐量の選定には留意している。

軸箱の構造としては、小形機ではハウジング形を、中形機以上ではカートリッジ形を採用した。小形機はブラケットが軽量で分解手入れが比較的容易であることから構造簡単なハウジング形を採用し、中形機以上のものでは軸受の完全保護を考えて、従来と同様のカートリッジ形をそのまま使用した。いずれもグリース潤滑であり、グリースの入口にはセクターを設け、新しいグリースは必ずボルトを通過する構造とし、グリースの給排面を効果的に行なうようにしている。軸貫通部はグリースパッキン方式により軸受内のグリースが漏れないようにしている。

3.5 防水形構造

全閉形で使用するときは、防水形構造を標準構造としている。防水形として十分の機能を保証するため次のような点を考慮している。

(1) 軸貫通部にはラビリンク構造を採用し、さらにラビリンクを外側カバーから保護するという二重シール構造を採用しているので、軸方向からの水シザキの軸箱内に入る恐れはまったくない。外側カバーの下部はドレン抜き穴が設けられており、カバー内に入った水はこの部分から自然に排出される。(図 3.4)

(2) フレームおよびブラケットなどのハメイ面は、とくに加工精度を高くし、十分のハメイ面の長さをとり、組立に際しては特



図 3.5 端子箱
Fig. 3.5 Terminal construction.

殊防水塗料を使用して組み立てているから、完全な防水効果が保証できる。また締付けボルトの締付面は、特殊座金と防水塗料の使用によって防水の完全を期している。

(3) 集電環部点検窓は堅固な鉄製のフタで閉鎖する構造とし、接合面には段を設け、外部からの水の流れが内部に入るのを防止している。さらにパッキンの併用により、完全な水密効果をあげるよう考慮している。

(4) 端子箱は鉄製で座とフタとはパッキンを介して締め付けられる。フタは座に対して十分余裕のある大きさとし、幅広なパッキンを使用するようにした。フタのヘリには全周に段を設け、流れ落ちる水がパッキン部に直接触れないようにした。外部リードの引出口は、合成ゴム製のパッキンを使用してシールするパッキン方式を採用した。

4. 性能

一般特性は JEM 1065 規定の特性値を完全に満足している。停動トルクもまた JEM 規定に対して余裕をもって満足する値となっている。温度上昇値も E 種絶縁ではあるが、従前のものと大差のない $\#60^{\circ}\text{C}$ 以下に十分合格した。図 4.1, 4.2 は 20 kW 8P および 60 kW 10P の温度上昇曲線を例として示したもので全負荷時および 1/3 負荷時について示している。この曲線での原点における切線と最終温度上昇線との交点までの横軸上の長さは熱時定数 (h) を与えるが、これによれば 20 kW 8P は約 1.3 h,

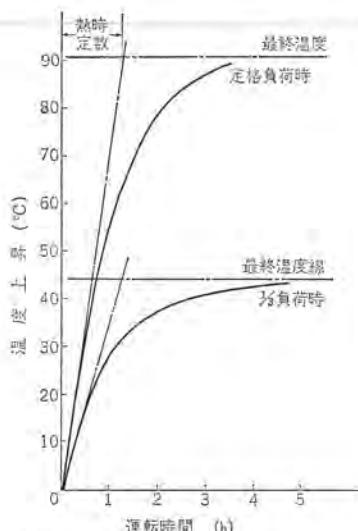


図 4.1 20 kW 8P 温度上昇曲線図
Fig. 4.1 Temperature rise curves, 20 kW 8P.

表 4.1 一般特性的例

220 kW 8P 特性値一覧

電圧 (V)	周波数 (c/s)	全負荷電流 (A)	効率 (%)	力率 (%)	スペリ (%)	停動トルク (%)	最大出力 (%)	温度上昇 (1 時間連続運転後) (°C)			
								固定子コイル (抵抗法)	回転子コイル (抵抗法)	外ワク	負荷側軸受
200	50	82.6	89.0	78.5	5.1	238	197	59.5	55.0	35.5	17.5
220	60	72.3	90.3	80.4	4.2	246	209	51.5	47.0	33.0	18.0
(JEM 1065) 200	50	91.9	84.5	74.5	6.0	225 以上	75 以下	75 以下	75 以下		

60 kW 10 P 特性値一覧

電圧 (V)	周波数 (c/s)	全負荷電流 (A)	効率 (%)	力率 (%)	スペリ (%)	停動トルク (%)	最大出力 (%)	温度上昇 (1 時間定格) (°C)			
								固定子コイル (抵抗法)	回転子コイル (抵抗法)	外ワク	負荷側軸受
200	50	242	92.5	77.5	2.9	250	223	58.0	50.5	33.0	19.0
220	60	211	93.2	79.7	2.7	257	230	54.5	46.0	32.0	19.5
(JEM 1065) 200	50	268	87.0	74.5	5.0	225 以上	75.0 以下	75 以下	75 以下		

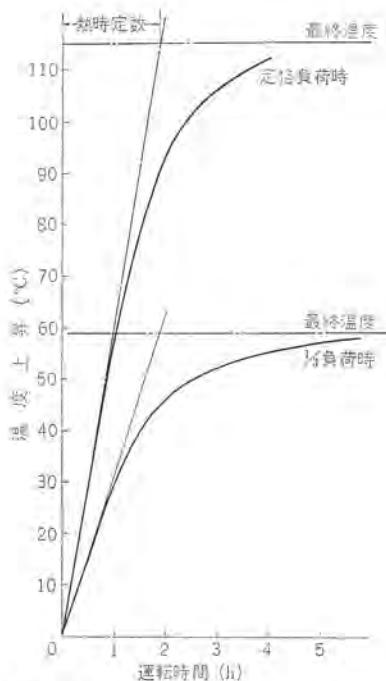


図 4.2 60 kW 10P 温度上昇曲線図
Fig. 4.2 Temperature rise curves, 60 kW 10P.

60 kW 10P は約 1.9 h と推定される。表 4.1 は 20 kW 8P と 60 kW 10P の一般特性を示したものである。

実用状態における試験の確認として、起動トルクが 150% になるような二次抵抗値をそう入し、起動停止を繰り返して試験を行なった。とくに停止においては逆相制動を採用して、1 分間 4 回程度の起動停止のサイクルで、運転時間と停止時間をとそれぞれ 50% 程度となるように調整して行ない、各代表例について温度上昇限度が許容温度上昇内にあることを確認した。

振動は全機種について 10μ 以下に収まっている。回転子スキーと適正なミジン組み合わせの採用により磁気音響はまったくなく電動機の騒音は 75 phon 以下に収まっている。

5. 热時定数と時間定格

起重機用電動機の許容使用ひん度の決定に際しては、その熱時定数の値を知ることが必要となる。その意味で、参考までに新形起重機用電動機の熱時定数の算定を試みた。

5.1 热回路網による熱時定数の算定

熱時定数とは、原点における加熱曲線の切線が最終温度線と交わる点の、原点からの水平距離をもって与えられ、その値は

$$T = \frac{C\gamma}{\alpha} \cdot \frac{V}{F} \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

で与えられる。ここに T は熱時定数 (Time constant) C は発熱物体の比熱、 γ はその比重を、 α は発熱物体表面からの熱放散係数を表わす。 V は発熱物体の全容積、 F は全放熱面積である。

発熱体がそれ自身の場合は、この熱時定数の算定は比較的容易であるが、電動機のように数種の発熱体の集合からなり、求める発熱体からの熱放散量も単純な電動機外被の全放

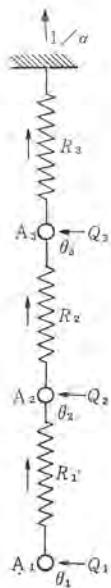


図 5.1 簡単な熱回路網
Fig. 5.1 Simple thermal net-work.

散量のみではなく、発熱体と表面との間にいくつかの他の発熱体が介在しているときは単純に計算することはできなくなる。しかも発熱体の位置によって熱時定数に変化がある。すなわち鉄心部分、固定子コイル、回転子コイルなど厳密な意味では熱時定数は異なるわけである。

この場合の熱時定数の算定には熱回路網を利用して、求めるべき発熱体と表面との間に介在する他の発熱体の条件を取り入れて、いわゆる有効熱放散係数を求め、これと求めるべき発熱体の全熱容量とから熱時定数を求める方法を用いることとした。図 5.1 のような熱回路において、求めるべき発熱体を A_1 とし、表面との間に A_2, A_3, \dots という発熱体が存在し、それぞれの間に熱貫流抵抗 R_1, R_2, \dots が存在するものとする。 A_1, A_2, \dots の発熱損失をそれぞれ Q_1, Q_2, \dots で表わし、温度上昇を $\theta_1, \theta_2, \dots$ とすれば、次の式が成立する。すなわち

$$\theta_1 = B_{11}Q_1 + B_{12}Q_2 + \dots \quad (5.2)$$

ここに B_{11}, B_{12}, \dots は熱貫流抵抗の行列を示すものである。単純な熱回路においては、その発熱損失と表面放熱量と、その発熱体の温度上昇との間には、定常状態において $\theta = \frac{Q}{\alpha F}$ なる関係が成立するから、その熱貫流抵抗 $R = \frac{1}{\alpha F} = \theta/Q$ で与えられる。この関係から式 (5.1) の $1/\alpha F$ にあたる項は、求める発熱体に対する熱貫流抵抗を与えるものであるから

$$R = \frac{1}{\alpha F} = \frac{\theta_1}{Q_1} = B_{11} + B_{12} \frac{Q_2}{Q_1} + B_{13} \frac{Q_3}{Q_1} + \dots \quad (5.3)$$

なる関係式が成立する。よって式 (5.3) から求める発熱体と、それと表面との間に介在する他の発熱体のそれぞれの損失と、それらの間の熱貫流抵抗が求めれば、熱時定数算定の基礎となる求める発熱体から表面に至るまでの全熱貫流抵抗を求めることができる。したがって、発熱体の熱容量は簡単に求まるから

$$T = C\gamma \cdot V \cdot R \quad (5.4)$$

により、熱時定数を求めることができる。

式 (5.4) を利用して、電動機内各部の発熱体を結ぶ熱回路網を作成し、固定子コイルについての熱時定数を求めれば図 5.2 に示すような図表を作成することができる。この図表を利用すれば新形起重機用電動機の時間定格と負荷率との関係を求めることができる。

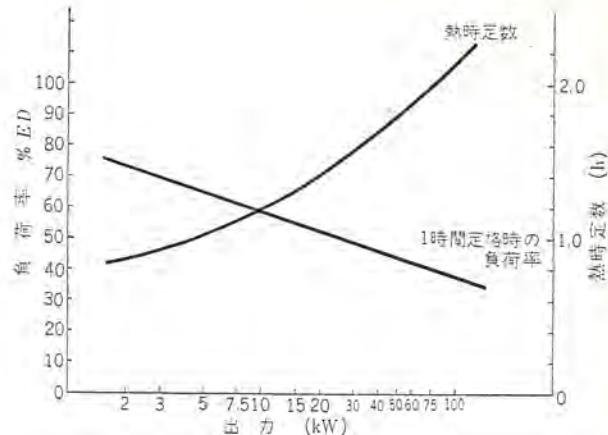


図 5.2 出力に対する熱時定数および負荷率との関係
Fig. 5.2 Output vs thermal time constant and %ED curve.

5.2 新形起重機用電動機の時間定格と負荷率との関係

熱時定数が求まれば、その電動機の時間定格と負荷率 (%ED)との関係は、次式で与えられる。ただしこの場合、起動時において起動電流による過大な熱損失が発生しないものとする。巻線形の場合は抵抗操作により通常起動時の異常損失は発生しないと考えてよい。

$$\%ED = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \text{ または } t = T \log \left(\frac{1}{1 - \%ED} \right) \quad \dots (5.5)$$

ここで t は電動機の時間定格を与える。

新形起重機用電動機系列では、全閉形の場合 1 時間定格を標準にしているから前節で求めた熱時定数を使用して時間定格と %ED との関係を求めれば、各出力について、その関係は図 5.2 に示される。すなわち小形機では 60~70% の負荷率をもち、大型機に進むにつれて減少し 100 kW で 40% 程度となる。

6. む す び

以上今回当社において開発完了した新系列の起重機用電動機について、その構造機能などの概要を述べたのであるが、今回の開発に関して、特記すべき事項を要約してみればヨーロッパ製品ではその使用がすでに一般化されている E 種絶縁をここでも採用し、耐熱的な特性向上し、一貫して堅固な放熱ヒートをフレームに設け熱放散効果を増大し、二重に過酷な使用に対しての熱的な安全性を増大し得たことと鉄心寸法を従来のものに比べて小さくしたことにより起重機用電動機として、最もその運転効率の向上に貢献した GD^2 を小さくすることができ、最も実用に即した起重機用電動機の系列が完成したということに尽きると思う。

材料や加工作業の進歩改善は、各小部品にいたるまで十分な配慮を用いその耐久性を向上させたことは、三菱起重機用電動機の寿命をさらに増長し得たものと考えている。

起重機用電動機の仕様の選定は、一概に容易なものとはいいかたく、千差万別の使用状況と、設置場所の周囲環境に依存する要因も多く、設計者の頭を悩ます問題であろうと思うが、熱的な安全性の高揚は、その苦勞を大いに緩和するものと思っている。今回本文に発表した性能に関して、われわれとしてはさらに負荷率定格に対するモータ出力の関連表などを発表し、選定の利便に供したく考えていたが、やむをえない事情でできず筆者としてまことに不本意に残念に思っている。別の機会にその詳細について発表致したく考えている。

今回開発された新系列の起重機用電動機が従来の製品にも増して使用され、その成果を高揚するであろうことを期待して筆をおくる。

アルミ鋳回転子使用中容量電動機

梶谷定之*・名地 魏*

Medium Size Induction Motors with Aluminium Die-Casting Rotors

Nagoya works Sadayuki KAJITANI・Takashi NACHI

Aluminium die-casting rotors of squirrel cage induction motors have been gradually expanding the fields of application because of advanced technique in manufacture. Most of general purpose motors are provided with the aluminium die-casting rotor. However, increase in the capacity of motor has come to pose many technical problems. This paper takes up problems of medium size motors to discuss stray load loss which is a large obstacle in the characteristic in the production of the motors referred to. Discussion further goes on the manufacture result of a 100kW 4P motor built based on the above study. It has been concluded that the aluminium die-cast rotor helps improve the mechanical strength and permissible starting time together with the increase of dependability.

1. まえがき

カゴ形誘導電動機の回転子導体が銅あるいは黄銅製から鋳込方式のアルミ導体に変わってからすでに相当の年月を経ており、とくに小容量電動機については今日ではアルミ鋳回転子の使用が常識的なものとなっている。

多数の回転子導棒を1本1本鉄心ミリ内にそろ入し、その端末をエンドリングに入念にロー付するのは、多大の時間を要するが、これをアルミ鋳込方式に変えると、その生産性は比較にならないほど著しく向上する。これが回転子導体の製法にアルミ鋳込方式の採用を促した大きな要因であるが、さらに回転子を機械的、熱的に強固にし、カゴ形電動機に対する信頼性をいっそう高めていることも見のがせない。

アルミ鋳回転子は、製作技術の進歩によって次第にその採用範囲が拡大され、一般に37kWまで、いわゆる仕込生産されている般用電動機にはほとんどがこのアルミ鋳回転子が使用されている現況である。しかしながらなお一層にすべてのカゴ形回転子をアルミ鋳回転子に切り換えることを許さないのは、解決すべき技術的な問題が存在しており、これが電動機の容量の増大とともに、ますます困難な問題となってくるからである。

当社ではこのアルミ鋳回転子の採用拡大については大いに関心をもち、設計および工作技術面からこの問題の解決に努力してきたが、現在では中容量電動機100kW 4極についても好成績をもってアルミ鋳回転子の採用に成功し、一般に市場で要求される容量範囲の低圧カゴ形電動機に関しては、すべてアルミ鋳回転子の採用が可能となった。

この機会に、とくに中容量電動機のアルミ鋳回転子使用に関する問題点を説明し、また特性について改良された点を述べてみたい。

2. アルミ鋳回転子採用の得失

アルミ鋳回転子を採用する場合の得失を通常の銅導体使用の回転子と比較しながら考えると次のようになる。

利点

- (1) 生産性が著しく向上する。
- (2) 機械的強度がすぐれる。

(3) 耐熱性が向上する。

(4) 回転バランスが良好となる。

(5) 回転子が軽量化される。

(6) 鉄心ミリ形状および導棒形状を比較的自由に選択でき設計上の有利点がある。

問題点

(1) アルミの導電率が銅に比べて低いという設計上の不利がある。

(2) 漂遊負荷損が多くなり特性がそこなわれやすい。

(3) 鋳回転子特有の工作法とその管理に十分な考慮を必要とする。

したがって適切な手段をもってこれらの問題点を開拓すれば、アルミ鋳回転子採用の成果に多くが期待できる。

中容量電動機に対するこれらの問題は、その障害が著しく拡大されて容易に所期の特性が得られないこと、品質の変動が大きくなりやすいことにむずかしさがある。

3. アルミ鋳回転子の問題点

3.1 設計上の問題点

設計上の問題点としては、まずアルミの導電率は銅の導電率に比べて著しく低いことである。純アルミにおいても導電率は純銅の55%であるが、鋳後の導電率は不純分の混入、鋳物巣によってさらに低下する恐れがある。これらに対しては、後述のように工作法の改善とその十分な管理により、鋳アルミとしては最高の導電率でしかも常に均一に安定した値を得るようにした上、さらに次のような設計的考慮によって解決している。

すなわち、回転子に銅の導棒を使用するときは、断面についてあまり複雑な形をした異形棒の製作が困難で、主として台形、方形、円形などに限定されてくる。したがって回転子鉄心のミリ形状もある程度限定されたものになる。ところがアルミ鋳回転子の場合は比較的自由にミリ形状を選択することができるので与えられた鉄心磁路断面積に対してミリ断面積を最大ならしめるように適当なミリ形状を選ぶことができる。しかも銅導棒の場合と異なりミリ断面積はすべて有効に導体断面で占めることができる。また、銅導棒ではその端末をエンドリングに接続させるとときロー付作業上の必要から導棒の長さを鉄心長さよりいくらか延長させて

表 3.1 100 kW 4 P アルミ 鋳込回転子と銅導棒回転子の二次抵抗の比較

導電率比	鉄心ミヅ 断面積比	導体断面積 比	導棒長さ 比	導体のミヅ 占積率比	二次抵抗比
0.55	1.58	1.76	0.875	1.12	0.91

同一固定子に対し、かつ回転子磁路の磁気抵抗はほぼ同一として設計されたもの（二重カゴ形の下部導棒についてのみ比較）

数値はアルミ鋳込回転子の各値を銅導棒回転子に対する比率で表わす。

いるが、アルミ鋳込回転子ではエンドリングは鉄心の側面に密着させてるので導体長さは鉄心長さでよいことなどによって導電率の低下による電動機二次抵抗の増大は十分補うことができる。われわれはアルミ鋳込回転子の採用にあたってはこの点を十分検討の上適切な鉄心ミヅ形状の設計に注意を払っている。表 3.1 は 100 kW 4 極における上記の関係を示すものである。

アルミ鋳込回転子を設計する上に最も重要な問題は、漂遊負荷損の発生をいかに抑制するかということである。アルミ鋳込回転子の成否はほとんどこのことによって決まるといつても過言でないほど重要であり、これは工作上の問題と関連した考慮すべき事項でもあるので、とくに項を改めて説明する。

3.2 工作上の問題

良好なアルミ鋳込回転子としては、電気的にも機械的にも常に安定して所期の性能が確保されるものでなければならない。そのためには、アルミ導体中に巣やワレを生じないようにすること、導電率が均一で常に所期値を有していること、また鉄心のミヅ側壁と導体との適当な接触抵抗を保っていること、積層鉄心の間など、ミヅ、エンドリング以外の不要の箇所にアルミが乱入していないことに注意すべきである。

鋳込製品に対する巣やワレの発生防止は、はなはだ厄介な問題であるが、とくにアルミ鋳込回転子は単なる機械構造物ではなく、その導体は重要な電気回路を構成するものであるからとりわけ細かい配慮を必要とする。当社では、鋳造作業、材料、鋳型、ダイカスト機械などについて多くの改良研究が続けられてきたが、とくに鋳込圧力、鋳込速度、鋳込温度、湯口の位置と数、ガス抜位置、型温度、鉄心のミヅ形状、鉄心幅、など諸条件を変えて実験研究を繰り返し最適条件の選定に努めた。そのほか、鉄心抜板の抜き加工面（ミヅ側壁の表面の粗度）の影響、鉄心予備加熱の問題、鉄心付着油の影響、離型剤の影響など広く検討を行ない、この結果に基づいて標準作業法を確立し、その管理を厳にして十分な成果を納めることができた。

とくに中容量電動機のアルミ鋳込回転子に対しては、さらに次のような対策を施した。

(1) 高射出圧力をとした。

(2) アルミ量の増大に伴って起こりがちな温度変化を防止するためとくに注意を払っている。

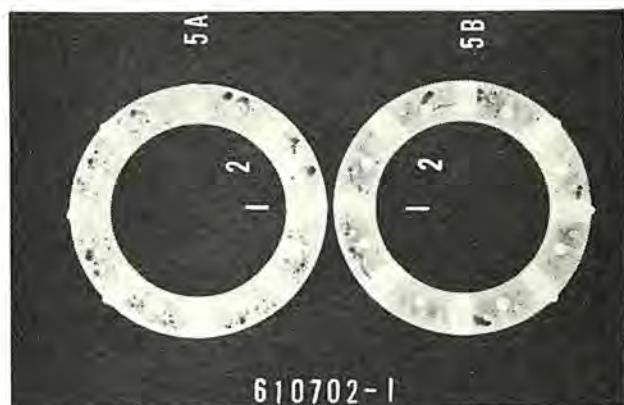
(3) 鋳型は放射形湯道を配置し、溶湯の速度は回転子全周が均一となるような特殊構造となっている。

(4) とくにアルミの充テンを重視し、適切なガス抜、オーバフローなどの設置を十分考慮した。

(5) ダイカスト機械はとくに大型回転子用のものを特殊仕様で製作した。

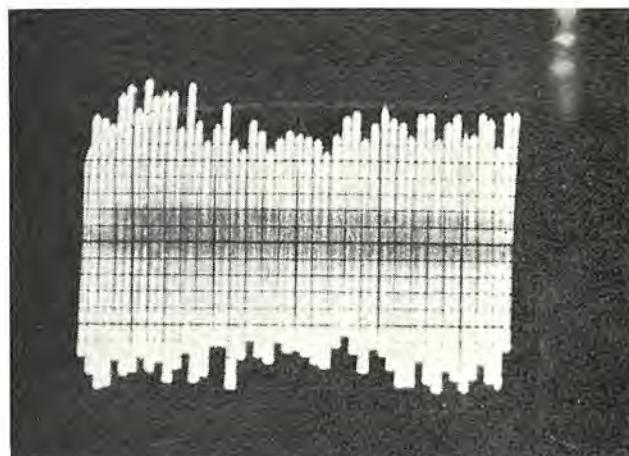
このようにしてきわめて安定した品質のアルミ鋳込回転子を生産することに成功した。

なお、アルミ鋳込回転子の製品チェックは、テストピースによる導電率のチェック、外観検査、X線検査、電動機組立後の完成品試験

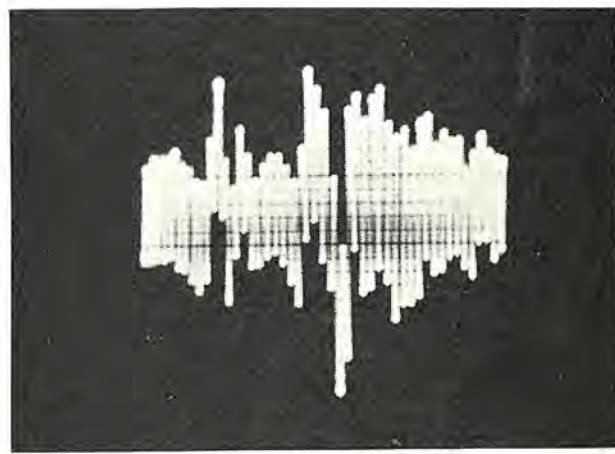


アルミ鋳込作業条件を検討するために実験用として製作したもの
黒く見える部分が巣である。

図 3.1 エンドリング部分の X 線透過写真
Fig. 3.1 X-ray photograph of end ring part.



(a) 良好なもの



(b) 不良品

導棒の巣またはワレによって生ずる抵抗変化がオシロ波形の乱れとなつて表われるようになっている。

図 3.2 ブローカンバーテスターによるアルミ鋳込回転子の良否の判別
Fig. 3.2 Judgement of the quality of aluminium casting by the use of a broken bar tester.

など通常の方法による以外、とくにアルミ鋳込回転子形成後に、導体中の巣、ワレ異常抵抗を高精度をもって検出できる当社独自のブローカンバーテスター⁽¹⁾によって万全を期していることを付言しておく。図 3.2 はこのブローカンバーテスターによるアルミ鋳込回転子の良否の判別法を示したものである。

3.3 漂遊負荷損

回転子導体を鋳込アルミ製にする場合、漂遊負荷損の著しい増大に悩まされ、これがその採用に大きな支障となっていた。この

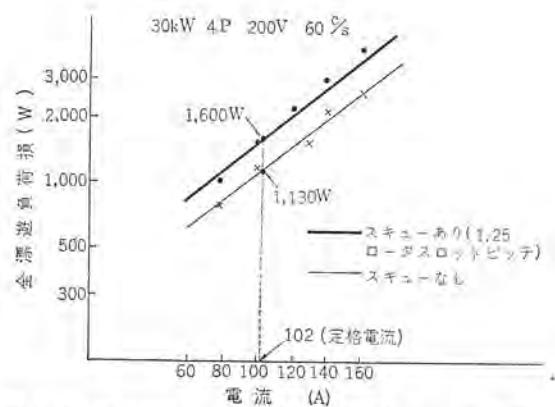


図 3.3 漂遊負荷損の実測結果（回転子スキーの影響）
Fig. 3.3 Measurement result stray load loss.
(Effect of rotor skew)

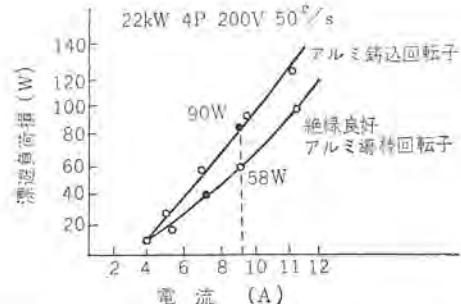


図 3.4 漂遊負荷損の実測結果（回転子導体とミジ絶縁の影響）
Fig. 3.4 Measurement result of stray load loss.
(Effect of rotor conductors and slot insulation)

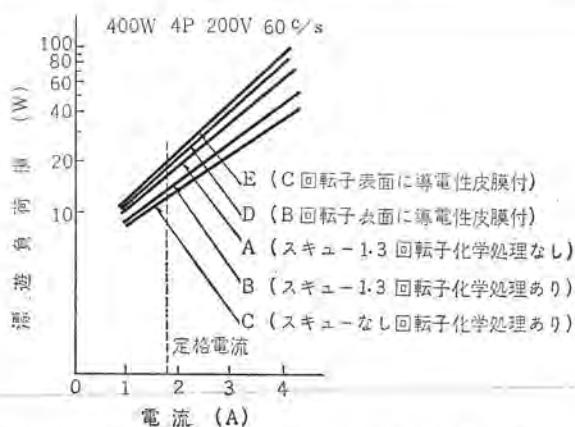


図 3.5 漂遊負荷損の実測結果（回転子表面状態の影響）
Fig. 3.5 Measurement result of stray load loss.
(Effect of the state of rotor surface)

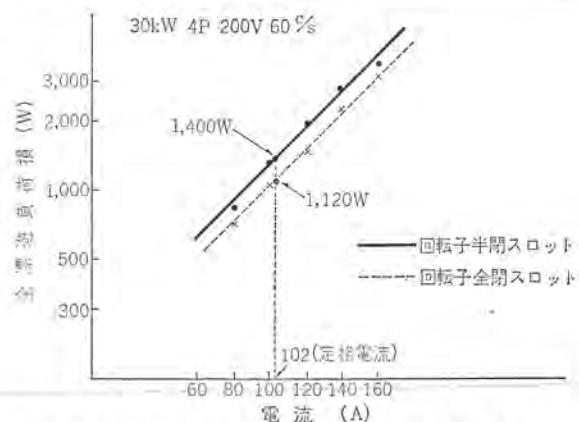


図 3.6 漂遊負荷損の実測結果（回転子全閉ミジと半閉ミジの影響）
Fig. 3.6 Measurement result of stray load loss.
(Effect of totally enclosed rotor slots and semi closed slots.)

漂遊負荷損は、加速トルクの大幅な低下、運転中の効率低下、そして異常な温度上昇の原因となって電動機特性をそこなう。漂遊負荷損の研究についてはすでに多くの研究結果が発表されているが、われわれもまた中容量電動機に対するアルミ鑄込回転子採用の目的をもって種々研究を続けてきた。これらの結果はすでに文献(2)に発表したところであるがここでは関係分を要約して述べることにする。

アルミ鑄込回転子を使用することによって、漂遊負荷損が増大する理由として次のことが考えられる。

(1) 回転子にスキーのある場合

回転子導棒と鉄心間の絶縁が十分でない場合、スキーを施された回転子にあっては導棒間の電位差によって短絡電流が流れ、このウエーブ電流損のため付加的に損失を発生するものと説明され、とくにアルミ鑄込回転子は銅および黄銅製導棒を使用する場合と異なり、その製法上導棒と鉄心間の絶縁を保つことが困難でこの異常損を発生しやすい。図3.3はスキーによる漂遊負荷損の増加を示す実験例であり、図3.4は回転子導体とミジ絶縁の影響を示すものである。

スキーは磁気音防止、トルク異常現象の改良など他の理由により廃止するわけにはいかないので、この場合、回転子導棒とミジ絶縁に対する考慮が必要である。たとえば鉄心ミジ側壁に特殊処理を行なって絶縁被膜を設けることも考えられるが、アルミ鑄込回転子の熱的後処理の実施、あるいは前述の鉄心抜板の抜き加工面を平滑にし、かつその積層鉄心のソロエ(削)に注意しならかなる。

ミジ側壁を形成することによってかなりの改善効果をあげうるものである。

(2) 回転子にスキーのない場合

アルミ鑄込回転子における漂遊負荷損の増大については、前記のような回転子スキーの影響とは別に、スキーを施していない場合でも発生するもので、われわれもまた次のような実験結果からそのことを確認することができた。すなわち回転子表面に一つの導電性の薄い被膜が存在するときはその被膜におけるウエーブ電流損によってスキーに関係なく大きな漂遊負荷損を発生する。このような回転子表面における導電性被膜の発生は実際に電動機製造の際、回転子加工時のカエリ、ケイ素鋼板絶縁被膜の損傷、回転子積層鉄心間にアルミを侵入させることなどにより生ずるものである。とくに後者のアルミ侵入による漂遊負荷損の増加については半閉ミジにおいて見られる表面にオーバーフローした鑄込アルミを回転子表面加工の際鉄心層間に侵入させることが多い。この意味では全閉ミジがその心配がなく、良好な結果をもたらすものと考えられるが図3.6における実験結果でもこのことを示している。

なお全閉ミジと半閉ミジの採用の適否については、この漂遊負荷損問題以外に一長一短があり、もっと広い視野から判断されるべき問題であるが、要是回転子表面に形成される導電性被膜が漂遊負荷損の大きな原因となり、アルミ鑄込回転子においては十分注意すべき問題であることを述べるものである。また半閉ミジを採用する場合も化学的な処理法でこの種導電性被膜の除去を有効に行なうことができる。

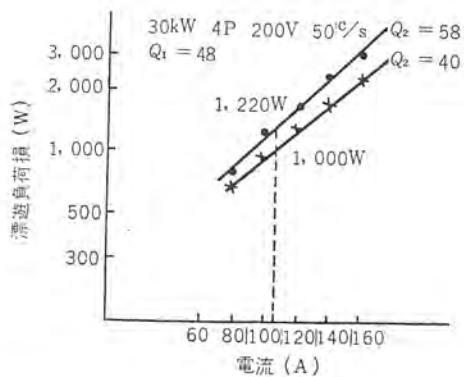


図 3.7 漂遊負荷損の実測結果（回転子ミジ数の影響）
Fig. 3.7 Measurement result of stray load loss.
(Effect of the number of rotor slots.)

(3) 固定子と回転子のミジ数組み合わせ

アルミ 鋳込回転子は上記のような理由によってカゴ形回転子における漂遊負荷損を増幅させたような状態になるから危険であると解釈される。

漂遊負荷損は、固定子高調波磁束の発生が第一原因と考えてよく、その固定子高調波磁束の中でも固定子ミジ数に関係がある固定子ミジ高調波を重視しなければならない。これに対して回転子ミジ数は、この固定子高調波と反応していかほどの漂遊負荷損を発生するか大いに関係がある。たとえば固定子高調波によって回転子歯の鉄心中に生ずるウズ電流損は

$$\sin^2\left(\frac{n_1\theta_{12}}{2}\right) \text{ なる係数によって変化する。}$$

n_1 : 固定子高調波次数 θ_{12} : 回転子歯幅を空間角で表わしたもの、この中 n_1 は比較的高い周波数で、鉄損値として大きな影響をもつ前述の固定子ミジ高調波について考えれば固定子ミジ数 Q_1 に関係し、歯幅 θ_{12} は回転子ミジ数 Q_2 に関係する値であるから Q_1 と Q_2 の関係すなわち固定子対回転子のミジ数組み合わせによって相当この値が変動することがわかる。

この結果から一般に小さな値となるには $Q_2 = (0.7 \sim 0.9)Q_1$ なる範囲が好ましくなる。

したがってまず通常の導棒カゴ回転子における漂遊負荷損の発生要因を極力抑制するような適切な手段を施せば、たとえアルミ 鋳込回転子に変えそのため導棒とミジ絶縁の低下 アルミニウムの積層鉄心間の侵入による導電回路の形成など、漂遊負荷損を増幅的に増加させる作用が働いても比較的小さな漂遊負荷損値にとどまっているといいう一つの考え方もありたつわけである。

この意味で漂遊負荷損の少ないアルミ 鋳込回転子製作の成否はそのミジ数選定が重要な要素になることがわかる。

図 3.7 はアルミ 鋳込回転子にあって回転子ミジ数と漂遊負荷損の関係を示したものである。

4. アルミ 鋳込回転子使用電動機の特性

防滴保護形 SB-A 100 kW 4 P, 200/220 V 50/60 c/s 2845 フレームの中容量電動機にアルミ 鋳込回転子を採用した結果について報告する。この電動機は回転子ミジに特殊な二重カゴ形を採用しまた、前述のように設計、工作中に十分な考慮を払って製作したものであるが、その結果アルミ 鋳込回転子で懸念されるようなトラブルはまったくなく、むしろ従来の銅導棒回転子使用電動機を上

表 4.1 SB-A 形 100 kW 4 P アルミ 鋳込回転子の特性

特性	効率	力率	最大出力	停動トルク	起動トルク	起動電流	固定子巻線温度上界
* 比率 (%)	99.5	101	104	108	153	113	88

* Cu 導棒回転子の電動機特性を 100 とした場合の、アルミダイカスト回転子の電動機特性の比率を示す。

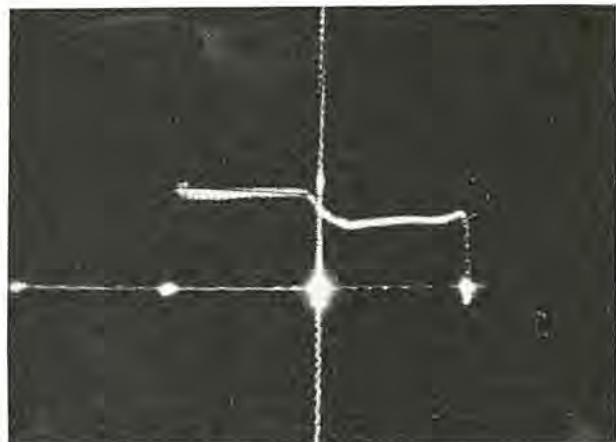


図 4.1 SB-A 形 100 kW 4 P アルミ 鋳込回転子
速度-トルク 曲線

Fig. 4.1 Rotor speed of cast rotor vs torque curve.



図 4.2 SB-A 形 100 kW 4 P 2845 フレームの
アルミ 鋳込回転子の外観

Fig. 4.2 Exterior view of aluminium cast rotor.

回の好特性を得た。表 4.1 は両者の特性比較であるが、全負荷特性はほとんど変更がなく、しかもトルク特性は全般に向上しており、温度上昇もきわめて良好である。また図 4.1 はその速度対トルク曲線を示すが、タルミのない良好な特性を示し、これからも漂遊負荷損の少ないアルミ 鋳込回転子になっていることがわかる。図 4.2 はその回転子の外観を示すものである。

5. アルミ 鋳込回転子使用の利点

5.1 機械的強度の向上

カゴ形回転子導体を鋳込 アルミ 製にすることにより、構造がきわめて堅固になり、回転子事故の主要部分を占める回転子導棒とエンドリングとの接続不良、回転子導棒の折損事故をほとんどなくすことができ、電動機全体の信頼性をいっそう高めることができ。一般に回転子導棒に銅導棒などをロー付けしたものが切損する原因として次のようなことが考えられる。

(1) ロー付不良

ロー付作業が悪くロー付けの接着や肉盛り不十分のため機械的強度が不足して使用中に破断する。

(2) 機械的な振動

回転子導棒とミジとのハメイがゆるく回転中に導棒が振動してその繰返し荷重のために切断する。

(3) 起動時の熱膨張

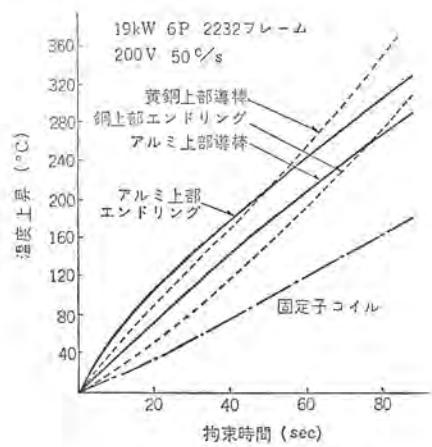


図 5.1 回転子拘束時の各部温度上昇
Fig. 5.1 Temperature rise at various parts of rotor in lacked state.

負荷の慣性モーメントが大きいとき、起動がひんぱんに繰り返される場合など、回転子導棒やエンドリングが起動電流のため異常な温度上昇を生じ、またはそのヒートサイクルの繰り返しによって熱応力が生じそのため破断する。

(4) 腐食作用

腐食性のガスによりローフ付部が腐食されて破断する。

などがあげられる。もちろん現在製作されているものは、ローフ方法やフラックス剤の吟味により、このような事故を生じないよう注意されて製作されているが、この点アルミ鑄込回転子は機械的にまったく心配なく堅固であり、導棒部とエンドリング部とが一体になっている上に、通常放熱用の羽根（エンドリングファン）をも備えているので、熱応力による破損はほとんど発生せず、さらにローフ付けのような手作業による製作工程がなく、安定した品質のものが得られるなど機械強度の面ではよりすぐれた特長をもっている。

5.2 耐熱性の向上（許容拘束時間、許容起動時間の増大）

図5.1は全閉外扇形 19 kW 6P 2232フレーム電動機について、ともに二重カゴ形でアルミ鑄込回転子と従来の銅導棒回転子のものについて、回転子拘束時の各部の温度上昇を比較したものである。この場合、上部導棒の断面積比が0.64、上部エンドリングの断面積比が0.28とアルミ鑄込回転子の場合大幅に減少していることを考慮すると、アルミ鑄込回転子のほうが温度上昇の度合が少なく、銅導棒回転子に比べて多少飽和の傾向が見られる。これは回転子鉄心からの放熱効果によるものと考えられる。さらに導棒

ローフ方式のものは一般にその許容温度が約200°Cであるのに対し、鑄込アルミの場合はさらに高く上昇することも許容できるので許容拘束時間、または許容起動時間が増大することになる。

5.3 回転バランスが良好

アルミ鑄込回転子はその導棒が回転軸に対してすべて均質で均一な位置に配置され、かつ導棒がミジ内で密着固定されているので回転バランスがいっそう良好なものとなる。

5.4 回転子の軽量化

アルミニウムの比重は銅の約1/3にあたりこのため回転子導体の重量が著しく軽減する。回転子全体としては先の100 kW 4Pについては約17%の軽量となり、この回転子の慣性モーメントの減少は起動に対して好ましい影響を与える。

5.5 生産性の向上と品質の均一化

前述の工作管理が行き届けば、銅導棒回転子におけるローフのような手作業の製作工程をまったく含まないので品質の均一化がいっそう高められ、また生産性は向上する。

このようにアルミ鑄込回転子に対しては多くの利点をあげることができると、これらは従来の小容量電動機において十分実証されているところであり、今回の中容量電動機においても同等もしくはそれ以上の成果を上げるものと十分期待することができる。

6. むすび

今日では誘導電動機、とりわけカゴ形誘導電動機は取り扱いが簡単で保守が容易であること、構造ががんじょうであることなどからあらゆる方面で広く使用されているが、われわれはこの長所をいっそう伸ばすために種々設計上有るいは工作上の改良研究を続けていく。今回は、従来から37 kWまでの般用電動機に採用されてきたアルミ鑄込回転子の使用範囲を、100 kW程度の電動機まで拡大できたのを機会に、改めてこの問題に触れてみたわけであるが、今後の問題としてアルミ鑄込回転子使用電動機の性能のいっそうの向上を図るとともに、高起動トルク電動機用としての高抵抗アルミ鑄込回転子、高効率電動機用としてのアルミ鑄込回転子など、すでに実用化されたものをさらに改良発展させ、いっそう堅ろうですぐれた性能の電動機を製作したいと考えている。

参考文献

- (1) 白田、梶谷：カゴ形誘導電動機の回転子試験装置「三菱電機」29 No. 8 (昭 28)
- (2) 八木、梶谷：カゴ形誘導電動機の漂遊負荷損「三菱電機技術」37 No. 9 (昭 38)

水素ガス耐圧防爆形誘導電動機

秋吉俊男*・田仲勝

Flameproof Induction Motors for Hydrogen Gas

Fukuoka Works Toshio AKIYOSHI・Masaru TANAKA

Up to the present flameproof induction motors for factory use have been manufactured with an aim of providing for gases of explosion grade class 2. In dangerous locations where class 2 gases are present, pressurized construction motors have been employed with drawback of relatively high cost and complicated construction for small capacity motors. Hence, flameproof motors for class 3 gases have been hoped for long. Overcoming difficulties, Mitsubishi has been successful in producing motors guarded against hydrogen gas—the most popular class 3 gas. Of many features of the new epochal development, the most outstanding is a shaft contact detecting device which assures the safety.

1. まえがき

防爆規格 JIS C 0903「電気機器の一般防爆構造通則」および「工場電気設備防爆指針」(1961)により製作される一般工場用耐圧防爆形誘導電動機は表 1.1, 1.2 および表 1.3 に規定されるごとき爆発等級 2 級のガスまでを対象として製作され、3 級ガスについては内圧防爆構造のものが一般に採用されてきた。これは爆発等級 3 級のガスがきわめて危険性があり、また防爆スキマ(隙)とその奥行の値は爆発試験により決定されねばならない極微小スキマであり、これらの防爆スキマは相当長期にわたって保持されることが必要とされ、したがってその安全性について 2 級ガスの場合以上の考慮を払わねばならないなどの特殊事情があることと、回転部分の微小防爆スキマを確保するため、製作に当つての寸法的な精度が高度であることを要するために特別の困難性があり、

表 1.1 爆発等級の分類

爆発等級	スキの奥行 25 mmにおいて点火波及を生ずるスキの値	
1	0.6 mm 超過	
2	0.4 mm 超過	0.6 mm 以下
3	0.4 mm 以下	

表 1.2 発火度の分類

発火度	発火点の範囲	
G 1	450°C 超過	
G 2	300°C 超過	450°C 以下
G 3	200°C 超過	300°C 以下
G 4	135°C 超過	200°C 以下
G 5	135°C 以下	

表 1.3 爆発性ガスの分類例

発火度 爆発等級	G 1	G 2	G 3	G 4	G 5
1	アセトン エタン 醋酸エチル アンモニア ベンゾール (純) 醋酸 一酸化炭素 メタノン メチルアルコール ブロバン トルオール	エチルアルコール 醋酸アミル(イソ) ブタノン(正) ブチルアルコール (正) 酸化エチレン	ガソリン ヘキサン(正) エチルエーテル	アセトアルデヒド	
2	エチレン 石炭ガス				
3	水性ガス 水素	アセチレン		二硫化炭素	

一般に製作されなかったことによる。

近年化学工業のめざましい発展に伴い、3 級ガスを対象とした防爆機器の使用が大形、小形の場合を問わざりますます必要となり、従来のごとく内圧防爆構造の機器のみの使用では、とくに比較的小形の機種では高価格となり、かつ取り扱い上複雑となることのため 3 級ガスに対する耐圧防爆構造のもの必要性が切望されてきた。当社では先にわが国最大級の爆発試験設備を設置し、種々の防爆基礎研究を実施しているが、今回 3 級ガスのうち最も一般的な水素ガスについての幾多の基礎研究をもととして、水素ガス耐圧防爆形電動機を完成したのでここにその概要を紹介する。電動機仕様は 25 kW 6 極 200 V 50 c/s 2236 フレーム ブーリー付である。

2. 耐圧防爆構造一般

耐圧防爆構造の電気機器は全閉構造にして、万一容器内部で爆発性ガスの爆発が起こっても、その圧力に耐え、かつ外部の爆発性ガスに引火する恐れのない構造をいい、したがって回転機の場合主として次に述べる個所につき特別の考慮を払わねばならない。

2.1 容器の強さ

耐圧防爆構造の容器はその内容積に応じて、表 2.1 に示す内部圧力に耐えるものでなければならず、ここに内容積の算定は容器自身の内容積から運転上欠くことのできない内容物を差し引いた容積で決定される。

3 級ガスの場合の内部圧力は、爆発試験により測定した爆発圧力の 1.5 倍という点が、とくに異なっている。一般に可燃性ガス蒸気が空気中で爆発を起こすのは、これらの混合割合により異なっており、いわゆる爆発限界といいうものがあり、水素ガスの場合爆発下限界が 4.1 vol%，上限界 74.2 vol% といわれ、最大爆発圧力の点は水素ガス濃度がほぼ 30% の附近にあり、その圧力は 6.7 kg/cm² という発表がある。

この最大爆発圧力は、爆発時の火炎の温度を知れば計算によっ

表 2.1 容器の耐えるべき内部圧力(ゲージ)

内容積	2 cm ³ 以下	2 cm ³ をこえ 100 cm ³ 以下	100 cm ³ をこえるもの
爆発等級 1			
* 2	製作上必要な強さ	8 kg/cm ² 以上	10 kg/cm ² 以上
* 3	爆発試験により測定した爆発圧力の 1.5 倍ただし最小値は 8 kg/cm ²		10 kg/cm ²

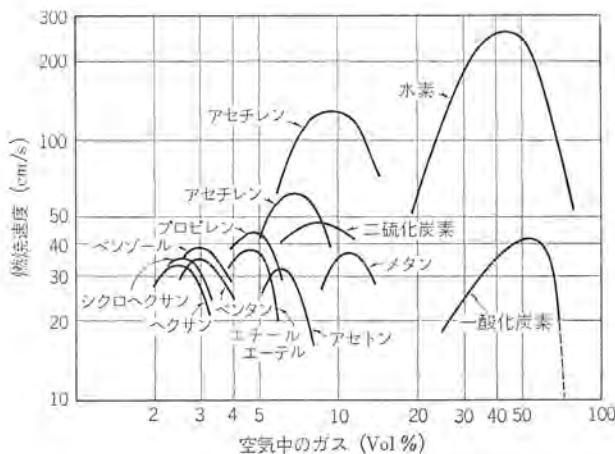


図 2.1 可燃性ガス、蒸気と空気混合物の燃焼速度と濃度との関係

Fig. 2.1 Relations between inflammation speed and density of the inflammable gas, vapour and air mixture.

て推定することもでき、水素と空気との混合割合 31.6% のとき火炎温度 2045°C という値を用いれば、計算値は 8 kg/cm^2 である。今その 1.5 倍をとれば 12 kg/cm^2 となり、相当大きな値に耐えねばならないことになるが、実際はこれほど大きな値を考えなくてよいと思われる。しかし水素ガスの爆発速度は、図 2.1 に示すようにきわめて早く、すなわち爆発時間の二乗に逆比例して爆発圧力を衝撃的に作用させることを考えれば、相当の安全度を見込まねばならない。

2.2 容器外面の温度上昇

耐圧防爆構造の電気機器の運転中あるいはいかなる場合においてもその外表面の温度が外部に存在するガスの発火点になれば、防爆の意味がなくなるので、この温度を抑えなければならない。防爆規格では、表 2.2 のように温度上昇限度を抑えている。これを表 1.2 の発火度の分類と比較すると相当の余裕があり、普通は問題にならないが、周囲温度がかなり高い場合、発火度 G4, G5 のガスは注意を要すると思われる。

また電気機器の事故による温度上昇については、もちろん温度過大になる以前に保護装置が動作するが、たとえば通風路の詰まりによる温度上昇のごとき場合には、電気的保護装置に無関係に温度上昇するので一応問題となる事柄である。このような場合には、温度により作動する保護装置などを設置するのが望ましい。水素ガスの発火度は G1 であり、この点は一番条件のよいグリーブの一つである。

表 2.2 耐圧防爆構造外面における温度上昇限度 (°C)

発火度	G 1	G 2	G 3	G 4	G 5
温度上昇限度	320	200	120	70	40

2.3 静止部分の防爆スキおよびスキの奥行

回転機の場合に問題となる静止部分の防爆スキの個所とは、フレーム、ブラケットのハメイ部、端子箱とフレームの接合面、および端子箱のケースとフタの接合面、端子の貫通部分、その他ブラケットとハウジングのハメイ部などであるが、これらの部分のスキができるだけ小さくし、その奥行を適当に長くして、たとえば電動機の内部で爆発が起こった場合、高温のガスがこれらのスキマや次に述べる回転部分のスキより噴出するので、外部のガスに引火しない程度に冷却しなければならない。

防爆規格では表 2.3 のようなスキとその奥行を規定している

表 2.3 静止部分またはまれに動く部分のスキおよびスキの奥行 (単位 mm)

スキ およびスキの奥行	内容積 以下	2cm ³ をこえ 100cm ³ 以下		100cm ³ をこえ 2,000cm ³ 以下		2,000cm ³ を こえるもの	
		爆発等級 1	2	爆発等級 1	2	爆発等級 1	2
最大スキ (直径差) W	0.3	0.2	0.25	0.3	0.4		
" 2	0.2	0.1	0.15	0.2	0.25		
" 3	0.1					爆発試験において点火波及しない最大スキの 50%	
スキの最小奥行 L	5		10	15	25	40	
ボルト穴までの最短距離 L ₁	5	6	8	10	15		

が、このようなスキを作ってやれば爆発ガスがこのスキを通過するとき、熱の伝導とフク射により壁面に熱が吸収される。この場合通過するガスの量が少ないので、通過距離が長いほど温度低下が大となるという理由が大部分で種々の実験により確認され決定されているものである。水素ガスの場合は、爆発試験により点火波及しない最大スキの 50% にしなければならない点が異なるが、静止部はすべてハメイおよび接合面であり、ほとんど問題にはならない。

2.4 回転軸の防爆スキおよびスキの奥行

防爆規格によると回転部分の防爆スキとその奥行については表 2.4 に示されるとおりであるが、水素ガスの場合実際にこの部分が一番問題になる個所で、すなわち 3 級ガスの場合のスキは静止部分と同様に爆発試験を行ない、点火波及しない最大スキの 50% ということで、したがってこの値はきわめて小さい値となる。そこで実際運転の場合はこのスキはある程度大きいほうが望ましく、防爆上からは小さいほうが良いという相反する条件を満足するよう考慮しなければならない。

過去に発表されているフランジの場合の点火逸走に関するスキとスキの奥行の曲線例を図 2.2 に示すが、水素ガス以外のガスは(アセチレンを除く)スキの奥行が 25 mm でほぼ飽和した形となり、したがって 25 mm 以上のスキの奥行に対しては大なる効果を期待できないことを示しているが、水素の場合はスキの奥行を 25

表 2.4 回転軸のスキおよびスキの奥行 (単位 mm)

スキ およびスキの奥行	内容積 以下	2cm ³ をこえ 100cm ³ 以下		100cm ³ をこえ 500cm ³ 以下		500cm ³ を こえるもの	
		爆 発 等 級 1	2	爆 発 等 級 1	2	爆 発 等 級 1	2
最大スキ (直径差) W	0.45	0.3	0.45	0.3	0.45	0.6	
コロガリ軸受	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	
スキの 最小奥行 L	0.15					爆発試験において点火波及しない最大スキの 5 %	
" 1							
" 2	5		10	15	25	40	
" 3							

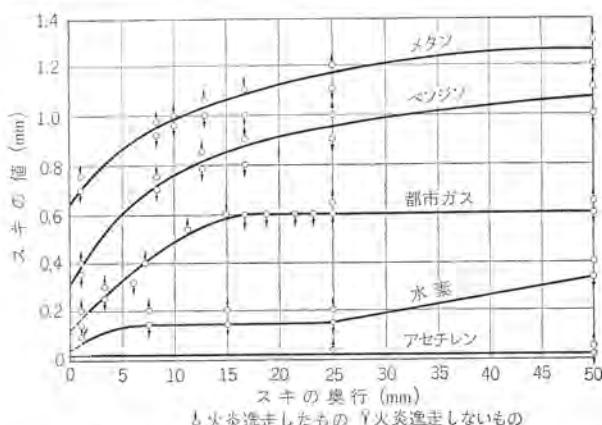


図 2.2 可燃性ガス蒸気と空気混合物に対するスキとスキの奥行の関係 (フランジスキ)

Fig. 2.2 Relation of gap size and depth of gap with the inflammable gas vapour and air mixture.

mm以上深くすれば、それだけ効果があるという特異性を示している。静止部分、回転部分を問わず、これらスキとスキの奥行の存在する部分は常に一定の値を保持しなければならない。たとえば腐食に対し、また機械的損傷に対し長期間の寿命を持たせねばならない。水素ガスの場合の回転部のスキはきわめて小さいので、なんらかの原因による回転接触を起こさないように、とくに保護されなければ完全ではない。

3. 軸貫通部モデルの火炎逸走試験

水素ガスの場合、防爆スキとその奥行の決定は爆発試験によらなければならない。このうち最も問題となる軸貫通部につき、当社爆発試験設備により、モデルによる基礎試験を実施し、種々のデータを得たのでその概要を紹介する。これらの結果はもちろん



図 3.1 小形火炎逸走実験器
Fig. 3.1 A small size testing device of communicating the internal inflammation to the external explosive gas.

水素ガス耐圧防爆形電動機に適用されている。

3.1 実験器

従来発表されている防爆スキとその奥行の火炎逸走試験は、フランジ細ゲージのものであり、実際の軸貫通部は円周細ゲージであるので、円周細ゲージの場合につき実験を行なってみた。図3.1～3.4が実験器の写真である。図3.5はこれらの断面を示す。



図 3.2 小形実験器内部構造
Fig. 3.2 Internal construction of the small size testing device.



図 3.3 大形火炎逸走実験器
Fig. 3.3 A big size testing device of communicating the internal inflammation to the external explosive gas.



図 3.4 大形実験器内部
Fig. 3.4 An internal view of the big size testing device.

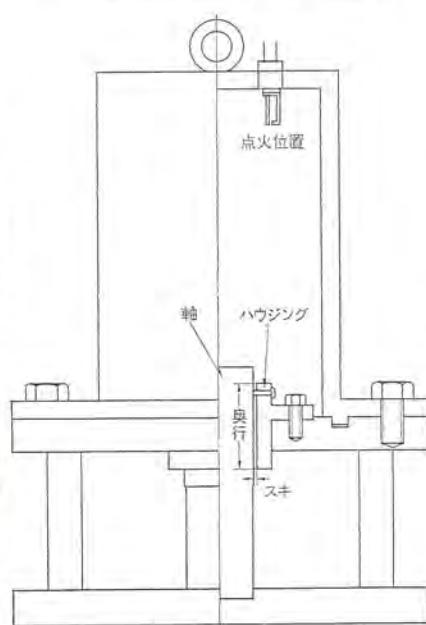


図 3.5 実験器断面図
Fig. 3.5 Cross sectional drawing of the testing device.

す。防爆スキの場所と点火位置との間には一般に関係があり、点火位置がスキに近いほど火炎が逸走しやすいことがわかっているが、水素ガスの場合はほとんど位置に関係がないようである。

3.2 水素空気混合ガスの濃度

防爆指針の爆発引火試験法によれば、爆発等級3級ガスの機器については、対象ガスと空気混合物で最も火炎逸走しやすい混合比のもので行なうことと規定されている。爆発時発生ガスが完全燃焼するごとき濃度が最も引火しやすく、また爆発圧力が高いため火炎速度も早く、条件として最も過酷になる。完全燃焼する水素空気の混合比は約30 vol%である。図3.6は安全研究所で求めたデータで、30%の付近が最も火炎逸走しやすい濃度を示している。

3.3 試験方法

実験器の軸外周にスキとスキの奥行を作り、この部分以外から引火しないように完全に密閉し、これを当社の密閉形爆発試験容器の中に入れ、実験器に点火プラグ、吸排気用パイプを取り付け真空中に引き、30%水素空気混合ガスを実験器内外に入れ、初圧0kg/cm²の状態で実験器内のガスに点火し、爆発火炎が外部に存在するガスにスキを通じて点火逸走するかどうかを調べる。

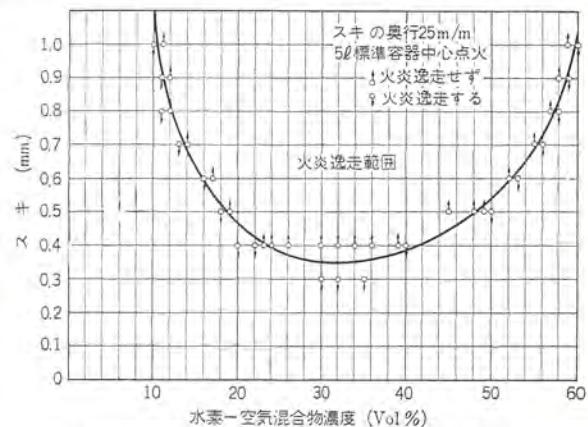
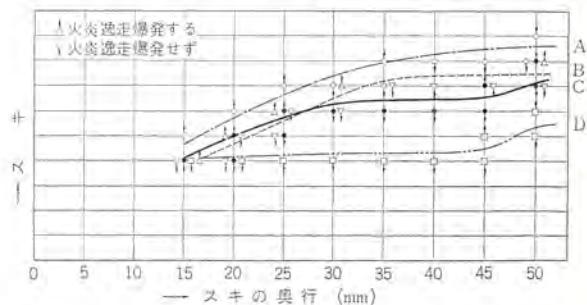


図 3.6 水素-空気混合ガス濃度とスキの関係
Fig. 3.6 Relation of gap size and depth of gap with the hydrogen density in the air.



A: 軸を穴の一方に向かって他方に最大径差のスキを有する場合 小形実験器
B: 軸を穴の一方に向かって他方に最大径差のスキを有する場合 大形実験器
C: 軸が穴の中心にあり軸の円周一様にスキを有する場合(半径差) 小形実験器
D: 軸が穴の中心にあり軸の円周一様にスキを有する場合(半径差) 大形実験器

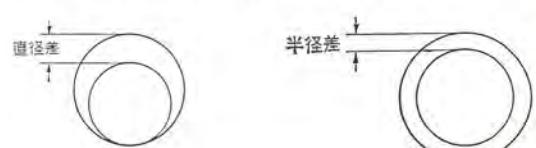


図 3.7 水素-空気混合ガスに対するスキの限界値とスキの奥行の関係
Fig. 3.7 Relation of gap size and depth of gap with hydrogen and air mixture.

試験条件は小形実験器、大形実験器のおののにつき、軸心が中央にある場合および軸が片側に完全に偏心している場合につき、スキおよびスキの奥行の値を種々変化させ実験を実施した。爆発回数はそれぞれ數十回ずつ行ない、また爆発を続けて行なうと実験器が相当熱せられ、スキの部分の熱放散効果が低下すること、また外部ガスの温度も上昇し引火しやすくなることが考えられるので、時々冷却しながら長期間にわたって実験を行なった。

3.4 試験結果の概要

試験結果の概要を図3.7に示すが、すでに発表されている Müller Hillebrand の結果(図2.2)とはかなり異なる結果を得た。

すなわちスキの値は同一の奥行としてかなり大きな値に出たことと、スキの奥行が45mm付近から曲線が上昇していること、このほか軸心が中央にある場合と、偏心している場合とでは、もし直径差のスキで比較するとすれば(図3.7のC,D曲線は半径差で表わしている)、同一スキの奥行の場合で軸心が中央にある場合のほうが条件としては楽であることがわかった。

4. 水素ガス耐圧防爆形電動機

従来一般に水素ガスに対しては内圧防爆構造などが用いられてきたが、ここに初めて紹介する水素ガス耐圧防爆形電動機の製作にあたっては、次に述べるような問題点がある。

(1) 回転軸の防爆スキ部の構造

水素ガスに対する爆発引火試験結果によると、スキおよびスキの奥行の限界値はきわめてきびしいものであり、この値に対する完全に安全な回転部分の防爆スキおよびスキの奥行を有する構造は、プラケットのハウジング部、軸受外輪外径寸法、ハウジングカバーハメアイ部、防爆環内径、防爆環部の軸外径などの機工精度を十分考慮し、さらに軸受の半径方向スキマ、軸のタウミ量についても検討する必要がある。これらを総合的に掌握しスキの決定を行なわねばならない。

(2) 軸接触検出装置の必要性

回転部分の防爆スキは、前記(1)の理由により極微小スキマとなるため、運転中なんらかの事故により軸と防爆環が接触を起こし、火花発生、焼き付き、防爆部スキの増大、さらに事故拡大へと発展する恐れがあり、防爆環材料の選択を行なうと同時に軸接触事故を何かの方法により検出して、ただちに運転停止または警報を発する必要がある。以下、上記問題点を考えつつ各部構造に

について述べる。

4.1 ワクおよびプラケットの構造

図4.1に組立断面図を示し、図4.2に管制器部分をも含めて写真を示す。外形寸法は、JEM 1110規定の低圧三相カゴ形誘導電動機(一般用)寸法による全閉外扇形である。ワク、プラケットの材料は鉄を使用し、爆発圧力10~12kg/cm²の圧力に十分耐えうるよう材質、構造設計を考慮した。また機械加工は標準品に比べ、とくに精密に行なう必要があり、荒仕上加工をして焼純を行ない、内部ヒズミとり後、仕上げ加工を行なって時後誤差がないよう配慮した。負荷側プラケット、反負荷側プラケットの上下にはそれぞれグリース注入プラグおよびグリース排出プラグを取り付け、このプラグを取りはずすことによって、軸受へのグリースの注入あるいは軸受からのグリース排出が可能な構造とした。

4.2 軸受部

軸と防爆環および検出環との直径スキはきわめて小さいので、軸受は半径方向スキマの小さなものが必要である。三菱電機標準の爆発等級1,2級ガスに使用されるXF形耐圧防爆形電動機は、2200フレーム以上のペリ付軸端のものは、負荷側には円筒コロ軸受を使用し、反負荷側には単列深ミヅ形ラジアル玉軸受を使用しているが、円筒コロ軸受は単列深ミヅ形ラジアル玉軸受に比較し



図4.2 XF形水素ガス耐圧防爆形電動機と管制器
25kW 6P 200V 50c/s

Fig. 4.2 Type XF flameproof motor for hydrogen and control.

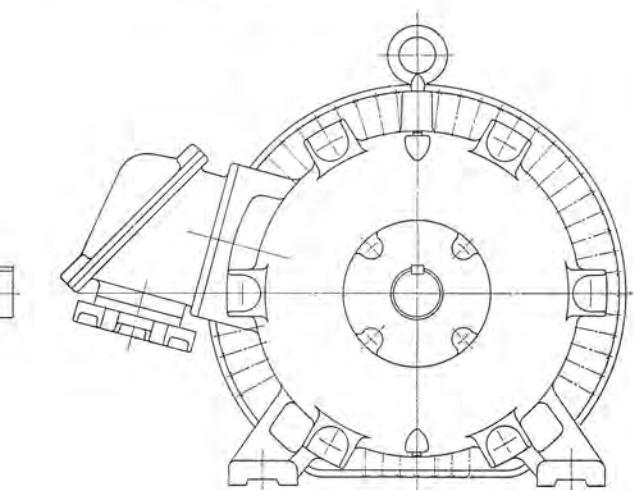


図4.1 XF形水素ガス耐圧防爆形電動機組立断面図
Fig. 4.1 Sectional drawing of type XF flameproof motor for hydrogen gas.

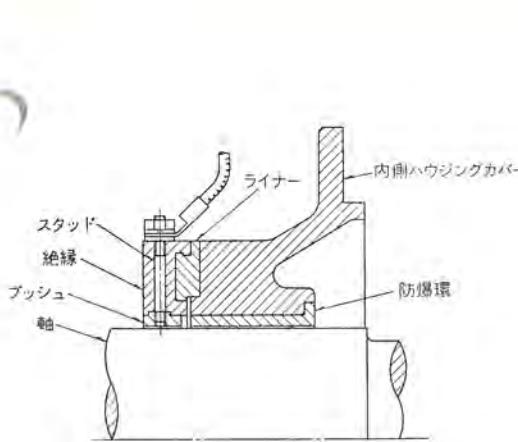


図 4.3 軸接触検出環部断面図
Fig. 4.3 Sectional drawing of shaft contact detecting housing part.

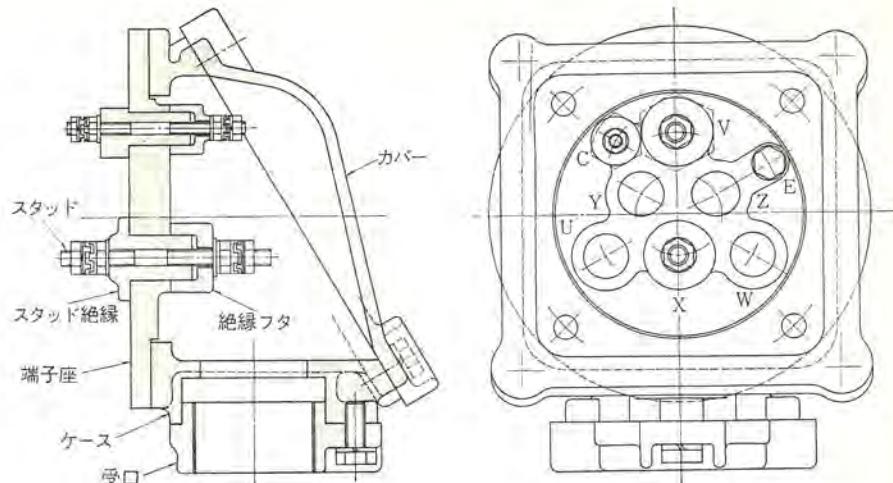


図 4.4 水素ガス耐圧防爆形端子箱
Fig. 4.4 Cross sectional drawing of flameproof terminal box for hydrogen.

て半径方向スキマが大きいので、水素ガス耐圧防爆形電動機はブーリ付軸端の場合でも、負荷側、反負荷側とも単列深ミヅ形ラジアル玉軸受を使用し、かつ半径方向スキマの小さいものを選んだ。ここに紹介するものは、ブーリ付軸端のため、負荷側単列深ミヅ形ラジアル玉軸受を使用し、したがって当然軸受の寿命が問題となってくるが、負荷の連続運転に十分満足すべき容量のものを使用した。

4.3 内側ハウジングカバー

内側ハウジングカバーはその内径側に防爆環を取り付け、電動機内部側には軸接触検出環が取り付くようになっている。反負荷側の内側ハウジングカバーは、軸受外輪を軸方向の動きに対して固定させ、スラスト方向荷重は反負荷側軸受で受けるようにした。

4.4 防爆環

防爆環部分の回転軸との直径スキオおよびスキの奥行あるいは防爆環の材質は、防爆上最も重要な条件であるから、これらの決定にあたってはとくに慎重を期して行なった。すなわち JIS C 0903 では回転軸のスキオおよびスキの奥行は、表 2.4 のように定められている。この表から明らかのように、爆発等級 3 級に属する水素ガスについてはその最大スキ (W) の値は、爆発試験を実際に行なって決定する必要があり、種々の直径スキオおよびスキの奥行について、前述のごとき爆発試験を行ないその値を決定した。これらのスキはなんらかの事故により、防爆環と回転軸が接触を起こすことが考えられ、特別に考慮する必要がある。そこで防爆環の具備すべき条件として

(1) 防爆環と回転軸がなんらかの事故により接触を起こした場合、火花を発生しないこと。

(2) 接触部分において焼き付きを起こしてはならない。

(3) 爆発圧力に対して十分耐えうる強度を有すること。

これらの条件を満足するよう種々検討を行なった結果、特殊金属を選択使用した。

4.5 軸接触検出環

図 4.3 に軸接触検出環部分の断面図を示す。前節防爆環のところで述べたように、もしなんらかの事故で回転軸と防爆環が接触を起こした場合、火花発生、焼き付きを起こしてはならないことはもちろん、事故拡大防止、原因調査のためにも瞬時に運転停止または警報を発することが必要である。このため図 4.3 に示すように内側ハウジングカバーに軸接触検出環を設けた。これはブッシュと回転軸との間にもし接触が起こった場合、軸→ブッシュ→スタッド→軸接触監視装置→軸受または防爆環→軸という信号回路を形成

させ、ただちに接触監視装置を働かせてその事故を検出できるようにしたものである。軸接触検出環は負荷側、反負荷側にそれぞれ取り付け、並列接続としているので負荷側、反負荷側どちらに軸接触が生じても検出できる。

軸接触検出環のブッシュ内径は防爆環内径と同一寸法とし、防爆環部分の軸径をブッシュ部分の軸径よりわずか小さくして、軸が防爆環に接触する前にブッシュに接触し、軸接触監視装置をただちに働かせて防爆スキオおよびスキの奥行がそこなわれるのを防止している。軸接触検出環中の絶縁材料の経年変化は軸接触検出環の性能に影響するので、経年寸法変化のとくに少ない成形樹脂を選択し、軸接触検出環と内側ハウジングカバーとのハメイ部は、とくにこの影響が大きいので金属を埋め込んで使用するなど種々の考慮を払った。

4.6 軸

ブーリ付軸端電動機の軸は負荷のラジアル方向荷重は大きく、その他ロータ自重、空気のアンバランスによる磁気吸引力などによって軸のタワミが生じ、軸と防爆環との間の半径スキマの減少となって現われるので、その算出には慎重を要する。また機械加工の際、軸の軸受部径と防爆環、軸接触検出環部径とにフレが生ずると、そのまま半径スキの減少となって現われ、機械加工についても特別の精度を要した。機械加工の精度については軸のみにかかるらず、防爆環、軸接触検出環、内側ハウジングカバーなどについてもいえることである。

4.7 端子箱

図 4.4 に端子箱の構造図を示す。端子箱は水素ガス耐圧防爆構造とし、外部導線から端子箱内への引込方式は電線管方式を採用し、端子箱から電動機内部への導線引込方式は耐圧スタッド式とした。スタッドは電動機電源供給用端子のはかに軸接触検出環用のスタッドを設け、ほかに内部接地用端子を取り付けた。軸接触監視装置へはこの軸接触検出環用スタッドと、内部接地用端子から配線する。これらスタッドは堅固に製作されているが、万一破損を生じた場合は個々に取り換えるようにしている。端子箱において防爆上最も重要な部分はこのスタッド貫通部分で、導体絶縁部と端子座とのスキオおよびスキの奥行は、絶縁材料の選択とともに十分安全を見込んだ値とした。

5. 軸接触監視装置

軸接触監視装置は電動機本体とは別置式としているが、簡単に

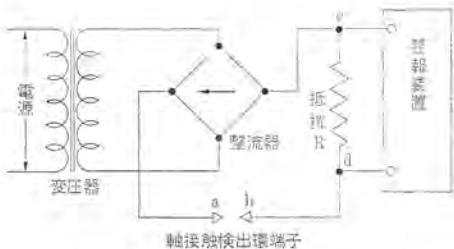


図 5.1 軸接触監視装置の回路
Fig. 5.1 Shaft contact detecting device circuit.



図 5.2 軸接触監視装置
Fig. 5.2 Shaft contact detecting apparatus.

その原理を述べる。図 5.1 にその回路を示し、外観写真を図 5.2 に示す。端子箱内の軸接触検出用端子および内部接地端子からの導線は、それぞれ a および b 端子に接続する。正常運転の場合には a , b 間は回転軸と軸接触検出環の間にスリマがある、導通状態ではない。したがって抵抗 R には信号電流は流れず、 c , d 間の電位差はゼロである。しかし、なんらかの事故により回転軸と軸接触検出環とが接触を起こすと、 a , b 端子間は短絡状態となるので抵抗 R には信号電流が流れ c , d 間には電位差が生ずる。この信号電圧を警報装置へ送り込み、ただちに電動機の運転を停止させるか、またはランプ点灯、ブザーなどの警報を発するようとする。

ここで注意すべきことは a , b 間が短絡状態になった場合、すなわち軸と軸接触検出環とが接触した場合に、軸 \rightarrow 軸接触検出環、軸 \leftarrow 軸受あるいはもし軸と防爆環とが接触したとすれば、軸 \leftarrow 防爆環との間に信号電流が流れ、電気火花の発生が考えられる。しかしこの a , b 間短絡時に流れる信号電流をきわめて小さなものにしておけば、その電気エネルギーはごく微弱なものとなり、たとえ電気火花を発生してもこの電気火花が周囲の水素ガスへ点火波及するエネルギー源とはなりえない。

もちろん、信号電流の値のみの条件で点火波及の有無を決定することは問題であり、これら着火試験にあたっては自己インダクタンス、静電容量などの外部条件を与えて試験を行ない、さらに接触部分の形状、材質等についても種々の条件を与えて試験し、自己安全性を有する本質的に安全な防爆構造 (Intrinsic Safety Circuit) であることを確認した。このほか自己安全回路を使用しないです



図 6.1 爆発試験後の電動機および端子箱
Fig. 6.1 Motor and terminal box after explosion proof test.

む安全な軸接触検出装置についても開発している。

6. 爆発試験

実際の電動機につき、水素空気混合ガス 30 vol% 濃度の場合、供試機の状態は静止状態、運転状態とし、いずれも当社の密閉形爆発試験容器にて実施した。

6.1 電動機本体の爆発引火試験

静止状態の場合、初圧を加え最高 8.9 kg/cm^2 の圧力の場合を含め 40 回実施し引火なし、無負荷運転中で、初圧を加え最高 8.4 kg/cm^2 の場合を含み 30 回実施し引火を起こしていない。

6.2 電動機本体爆発強度試験

ロータを取りはずし軸貫通部を閉鎖して実施、初圧を加え最高 12.2 kg/cm^2 の圧力の場合を含め 10 回実施し異常を認めなかった。

6.3 端子箱

引火試験 15 回の後、強度試験 10 kg/cm^2 で 10 回、その後さらに引火試験 15 回実施しいずれも合格であった。参考までに試験後の写真を図 6.1 に示す。

7. む す び

今回の水素ガス耐圧防爆形電動機の完成により、同種電動機のシリーズ化が行なわれることとなったのは喜ばしき限りであるが、なお問題点なしとしない。すなわち大容量機における内圧防爆形電動機との関係もその一つであり、また量産に適した信頼のおける加工法の進歩的簡略化もその一つである。われわれはさらに各関係者の協力により進歩発展の道をひらきたいと切望するものである。終わりに当り種々協力をいただいた神岡製作所の関係者に心から謝意を述べ、なお今後の助力を仰ぎたい。

参 考 文 献

- (1) 労働省産業安全研究所: 「工場電気設備防爆指針」
- (2) Muller Hillebrand: 蒲生訳「防爆電気機器原論」

水中モートル

和田義彦・佐藤公夫*

Water Submersible Pump Motors

Nagoya Works Yoshihiko WADA · Kimio SATO

Water submersible pump motors have advantages of improved pump efficiency, simplified grounding equipment and easy handling of pumps as a whole. Because of these features their demands for diving under water pumps are increasing year after year. Since starting the development of water submersible pump motors in 1954, Mitsubishi has kept working hard in the improvement of materials, design and productive technique and established standard products of presentday models. In addition, those to be used for special purposes are also now ready for building on order. This article deals with the present status of the water submersible pump motors and outlines of construction and performance together with their unique points.

1. まえがき

われわれの日常生活において水の利用ということは不可欠の問題である。すなわち飲料水、工業用水としての地下水の利用、農業かんがい、水道用としての河川の利用をはじめとして、排水の問題および汚水処理の問題などは、人間生活に欠くべからざるものである。

水中モートルポンプは地下水の利用が盛んになるにつれ、井戸の深さに応じたポンプ製作上の問題を解決するために開発されたもので、地下水の利用のあい路となっていた種々の問題を、一挙に解決した画期的なものであった。水中モートルポンプが開発されてからすでに十余年を経過し、その間において、絶縁材料の進歩による耐水性の問題の改良、各構造物材料の進歩、向上によって水中モートルポンプの信頼性はますます高まり、その生産量も飛躍的に増大している。また地下水の揚水の問題を一挙に解決した水中モートルポンプの長所が一般にも認識されるに及び、地下水揚水のみならず、河川利用あるいは汚水処理用として、その用途はますます増大の一途をたどっている現状である。

当社では、昭和29年水中モートルの開発に着手して以来、絶えず材料面、設計面および生産面での研究努力を重ね、三菱水中モートルとして今日、深井戸用、汚水処理用としての標準系列を確立し、さらに、特殊水中モートルについても3インチ径用、海水用、温水用または数百kWに及ぶ大容量機など電圧の問題を問わず、その生産態勢を確立するにいたった。

ここに、三菱水中モートルの構造、性能の概要などについて紹介するものである。

2. 三菱水中モートルの概要

三菱水中モートルは、すべてモートル内にあらかじめ清水を封入した完全水封式水中モートルで、標準形式として、深井戸用および汚水処理用の2種類を製作している。深井戸用は限られた内径のサク泉パイプにはいりうるよう一般に細長い形状であり、一方汚水処理用は、据付外径に制限のない一般電動機と同一形状をしている。汚水処理用水中モートルは開発当初の目的が、汚水処理用と限定されたためそのように呼称されてきたが、汚水処理のみならず、据付外径に制限のない用途に使用できる一般用水中モートルとして十分役だつことはもちろんである。

当社水中モートルには、コイル自体が直接水に触れる方式と、コイルが他の物質で保護され直接水には触れない二つの方式がある。前者は中容量以上の水中モートルに、後者は小容量水中モートルに採用されている。

2.1 三菱水中モートルの特長

(1) 完全水封式を採用している。

内部に封入された水と外部の水との流通はまったくなく、外部水中に含まれる土砂などによりモートル内部機構が損傷をうける恐れはまったくない。モートルの温度上昇による内部封水の膨張、収縮は別に設けられた封水膨張調整装置により完全に行なわれる。

(2) 完全な耐水絶縁を採用している。

とくに改良を加えられた絶縁電線の使用と、当社独自の絶縁処理により耐水性は完全でしかも安定している。

(3) 高いスラスト荷重に耐える軸受

スラスト軸受は、とくに厳選された材料と、適切な構造の採用に



図 2.2 立チ軸汚水処理用水中モートル
Fig. 2.2 Water submersible pump motor with vertical shaft for sewage disposal.



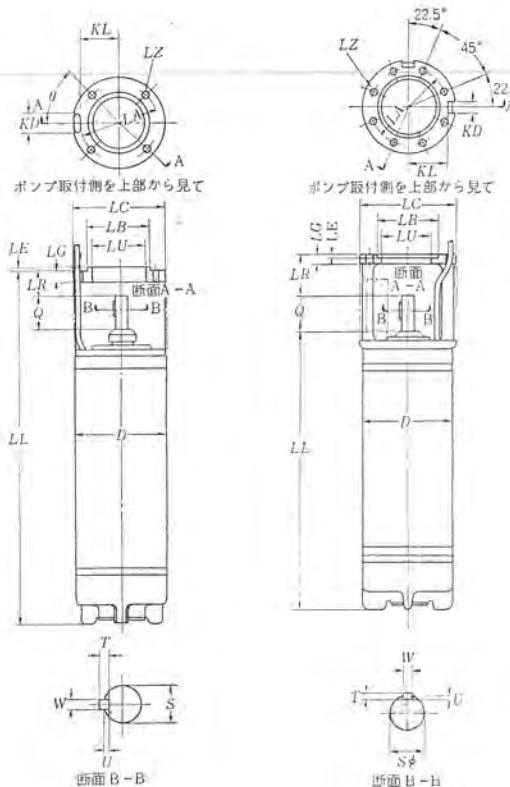
図 2.1 深井戸用
水中モートル
Fig. 2.1 Water submersible pump motor for deep well use.



図 2.3 横軸汚水処理用水中モートル
Fig. 2.3 Water submersible pump motor with horizontal shaft for sewage disposal.

表 2.1 WSC, WSB 40~100S 水中モータ外寸寸法

形式	井戸径	(kW)	ワク番号														軸端					出線太さ (mm)	備考	
				LL	D	LA	LB	LC	LU	LR	LG	LE	KL	KD	LZ	θ	Q	S	T	U	W			
WSC	100	0.4	40S	467	91	72	55h6	91	47	24	10	3	38	18	4-9	45	13	12j7	4	2.5	4	0.9 ²		
"	"	0.75	"	517	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"		
"	"	1.1	"	567	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"		
"	"	1.5	"	617	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"		
"	"	2.2	"	697	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"		
"	"	1.5	"	535	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	67.5	"	20h6	"	"	"	3.5 ²	
"	"	2.2	"	575	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	8-9	22.5	"	"	"	"	5.5 ²	取付穴 8 個所
WSB	"	3.7	"	844	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	63	25	18h7	6	3.5	6	2 ²	
"	"	5.5	"	1044	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	53	25h6	7	4	7	8 ²		
"	"	7.5	"	1164	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	53	25m7	7	4	7	8 ²	リード線 1 本	
"	"	200	5.5	80S	995	176	155	130h7	180	120	113	18	4	82	24	11	53	25h6	7	4	7	8 ²		
"	"	7.5	"	1055	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	53	25m7	7	4	7	8 ²		
"	"	11	"	1155	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	53	25m7	7	4	7	8 ²	2-8 ²	
"	"	15	"	1385	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	53	25m7	7	4	7	8 ²		
"	"	19	"	1535	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	53	25m7	7	4	7	8 ²		
"	"	250	11	90S	1165	213	195	170h7	220	150	96	24	"	93	30	14	63	31.5h6	8	4.5	10	2-14 ²		
"	"	15	"	1235	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	63	31.5h6	8	4.5	10	2-14 ²		
"	"	19	"	1335	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	63	31.5h6	8	4.5	10	2-14 ²		
"	"	22	"	1405	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	63	31.5h6	8	4.5	10	2-14 ²		
"	"	30	"	1575	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	63	31.5h6	8	4.5	10	2-14 ²		
"	"	37	"	1725	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	63	31.5h6	8	4.5	10	2-14 ²		
"	"	300	37	100S	1450	237	230	200h7	260	185	110	27	6	110	37	17	90	38m7	"	"	12	2-22 ²		
"	"	45	"	1560	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	90	38m7	"	"	12	2-22 ²		
"	"	55	"	1660	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	90	38m7	"	"	12	2-22 ²		
"	"	60	"	1660	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	90	38m7	"	"	12	2-22 ²		
"	"	65	"	1710	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	90	38m7	"	"	12	2-22 ²		
"	"	75	"	1790	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	90	38m7	"	"	12	2-22 ²		



(ワク番号 50S 以下)

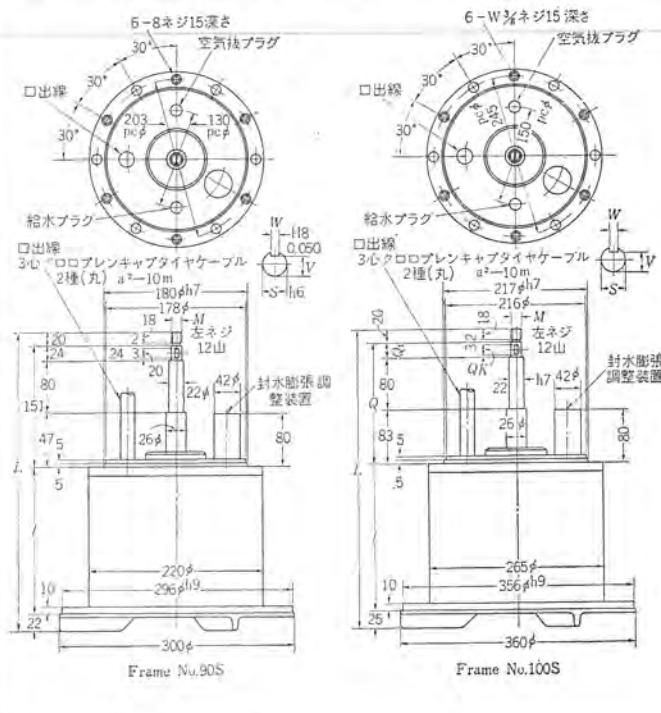
(ワク番号 80S 以上)

より、高速においてきわめて高荷重に耐え、しかも非常に安定した性能をもっている。

(4) 完全な防ショウ(錆)処理

モータル主要部はもちろんのこと、締付ボルトなどの材料にいたるまで耐食性材料を使用し、その他の部分には特殊耐水塗料を焼き付けているので、各部の防ショウは完全であり、長い寿命が保証できる。

表 2.2 立軸汚水処理水中モータ WSS-V 形寸法

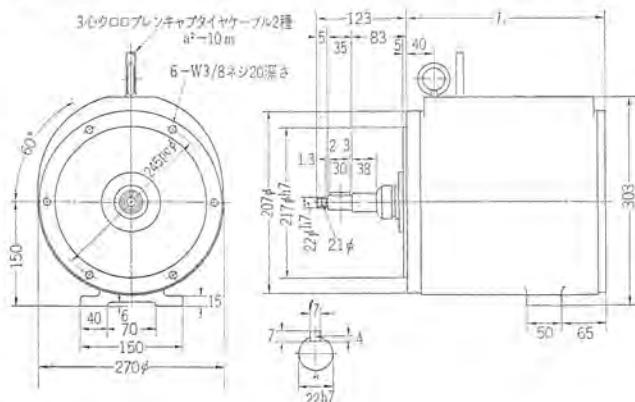


これ以外の寸法は上図による。

2.2 標準水中モータル

深井戸用の標準系列としては 4 インチ 径 400 W から 12 インチ 径 55 kWまでの 2 極機が、また汚水処理用としては 400 W から 11 kWまでの 4 極機がその主製品となっている。表 2.1, 2.2

表 2.3 横軸汚水処理水中モータ WSS-H 形 100S 外形寸法



ワク番号	出力 (kW)	極数	L	t	d ²
100S	0.4	4	292		2 ²
	0.75	4	292		2 ²
	1.5	4	292		2 ²
	2.2	4	342		2 ²
	3.7	4	342		3.5 ²
	5.5	4	392		5.5 ²
	7.5	4	392		5.5 ²
	11.0	4	442		3.5 ²

および表 2.3 は深井戸用および汚水処理用の立チ軸、横軸の標準外形寸法を示したものである。

2.3 特殊水中モータ

標準形式のほか、特殊水中モータについても多数の製作実績があるが、その一例を次に示す。

(1) 3 インチ径水中モータ

75 mm のサク泉パイプに収めうることを目的として設計されたもので、わが国最小の深井戸用水中モータである。単相 100 V で 400 W のものがその主製品となっている。主として家庭用などの簡便な戸内動力源として使用されるものである。

(2) 海水用水中モータ

標準形式と同一であるが、海水の直接揚水または海岸の地下水揚水などの用途に使用されるものである。このモータはとくに



図 2.4 3 インチ径水中モータ
Fig. 2.4 Three inch water submersible pump motor, the smallest in Japan.

図 2.5 190 kW 水中モータ
Fig. 2.5 190 kW submersible pump motor, the largest in Japan.

強固な耐食処理を施しているほか、海水による電食の発生を最少限にとどめるよう材料の選定、構造の適切化に考慮を払っている。またこの種のもので、全黄銅系材料を使用した水中モータを製作した経験をもっている。

(3) 温水用水中モータ

50°C 以上の温水中で使用できる水中モータをも製作している。揚水温度としては 50°C と 80°C 用との 2 系列を標準としている。単なる温水用のほか種々の化学成分を含有する温泉用のものをも製作している。この場合は海水用と同様な考慮を払っている。

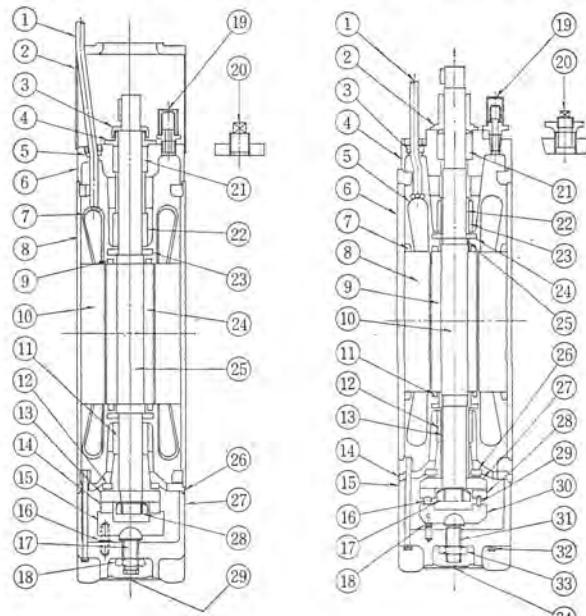
(4) その他

標準形式のほか 100 kW 以上の大容量のもの、あるいは深井戸用で 4 極、6 極などの回転数のもの、あるいは低揚程用として 10 極、12 極というような低速のものをも需要により製作している。

汚水処理用としては、標準形式以外のもの、すなわち 2 極機、または 6 極機以上のものについても、需要により製作している。

3. 構 造

水中モータには、深井戸用と汚水処理用とで大別できる用途



品番	部品名	品番	部品名
1	口出線	16	スラスト受回り止め
2	ストレーナ	17	スラスト調節ネジ
3	砂除け	18	止めナット
4	上部端カバー	19	封水膨張調整装置
5	口出線シール	20	注水口
6	上部プラケット	21	上部端カバー
7	固定子コイル	22	軸シール
8	モータフレーム	23	上部メタル
9	エンドリング	24	上部軸受
10	固定子鉄心	25	スリーブ
11	下部メタル	26	バランスリング
12	上部スラスト受	27	回転子ランバ
13	スラスト円板	28	回転子鉄心
14	下部スラスト受	29	モータ軸
15	スラスト受座	30	上部スクスト受
16	スラスト受	31	スラスト回板
17	スラスト受	32	下部スラスト受
18	スラスト受	33	回り止めビン
19	スラスト受	34	スラスト受座
20	スラスト受	35	スラスト調整ねじ
21	スラスト受	36	木抜きブラグ
22	スラスト受	37	端プラ

図 3.1 深井戸用水中モータ構造図 (2.2 kW 以下)

Fig. 3.1 Longitudinal section of water submersible pump motor for deep well. (below 2.2 kW)

図 3.2 深井戸用水中モータ構造図 (3.7 kW 以上)

Fig. 3.2 Longitudinal section of water submersible pump motor for deep well. (above 3.7 kW)

上の種別が存在するが、構造的には一部の部分を除いて、ほとんどの共通の要素が多いので、深井戸用について構造の大要を述べ、次に汚水処理用について深井戸用と異なった点のみを列挙する。

3.1 深井戸用水中モータルの構造

図 3.1, 3.2 に深井戸用水中モータルの構造図を示す。

(1) 固定子巻線

小形水中モータルでは、固定子巻線が直接水にふれない巻線方式を採用している。電線としては特殊耐水合成エナメル電線を使用し、巻線完了後、タツミ性のすぐれた合成樹脂により完全に保護する方式を採用している。中形水中モータル以上は、固定子巻線が直接水にふれる方式の巻線を採用している。とくに改良を加えられた特殊耐水電線により巻線を行ない巻線部分と出線との接続箇所には、当社独自の方式により、完全な耐水性と機械強度を保たせている。

(2) 固定子構造

フレームは鋼管製で、フレームの両端にはブラケット締付用のリブがあり、あるいは溶接により取り付けられている。固定子鉄心はフレームにそう入されたのち、フレームと一緒にとして完全な下地処理の上、防ショウ塗料の焼き付けが行なわれる。ブラケットおよび下部スラスト室を形成する端カバー類は全部鋳鉄製で、もちろん十分な防ショウ処理が行なわれる。

(3) 回転子構造

回転子構造は、水中で高速で運転されることを考慮して、回転子ミヅ形状は全閉形を採用し、回転による流体損失の減少を図るよう留意している。

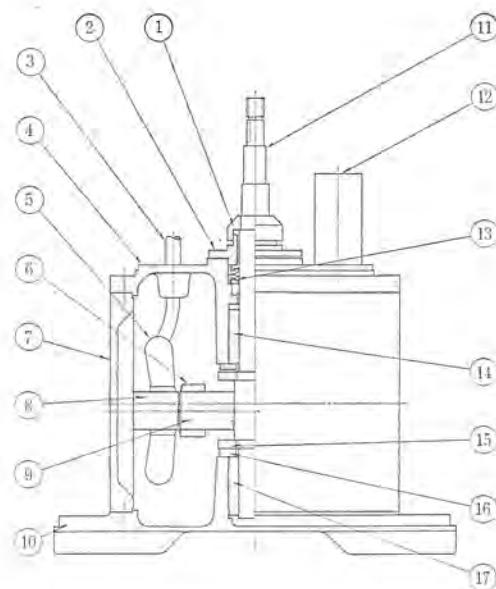
小形機および中形機においては、全面的にアルミニウムカスト回転子とし、大形機においては溶接構造によるカゴ形回転子としている。軸はステンレス鋼製で、アルミニウムカストを採用している回転子では回転子は軸に焼ハメまたは圧入により装着される。溶接構造による回転子では、回転子鉄心は軸にジカ積みされ、回転子クラップでカシメられたのち、エンドリングとロータバーとを溶接する構造を採用している。軸には上下2個の黄銅製バランスリングが装着され、これにより十分なダイナミックバランスをとっている。軸の最下部には、スラスト円板が装着される。回転子表面は十分な下地処理の上、特殊防ショウ塗料により完全な防ショウ処理が行なわれている。

(4) 軸受構造

上下2個の案内軸受は、回転子を正常な位置に保持するために上下それぞれのブラケットに装着されている。下部端カバー内には、上下2個のスラスト軸受が装着され、ポンプの運転による上下いずれの方向へのスラスト荷重にも耐えうるようになっている。軸受は、いずれも特殊合成樹脂系材料で製作されており、とくに下部スラスト軸受は小形機ではピボット支持方式の構造を、中形機以上ではミッセル式の分割式自動調心形の軸受構造を採用している。これらのスラスト軸受を支持するピボットは、いずれも調整可能な構造となっており、ポンプ組立時の再調整の便宜を図っている。スラスト円板はステンレス鋼製で、表面は熱処理後適当な硬度に調質され、さらに超仕上がなされている。

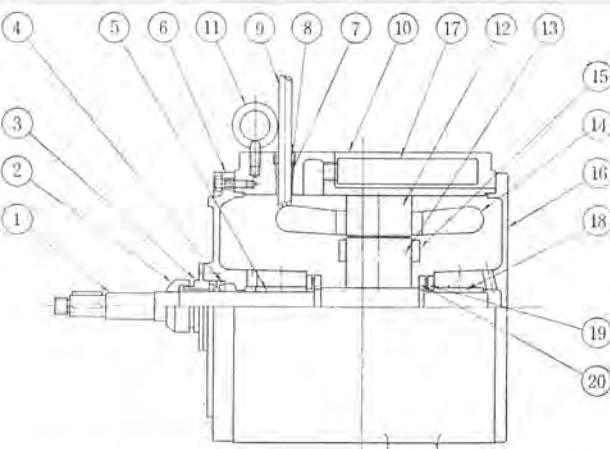
(5) シール構造

軸貫通部のシールには、メカニカルシール、あるいは特殊シール機構を採用している。軸貫通部にはラバーリンク部分を設け、土砂などがシール部分に侵入するのを防止している。各ハメイ部分は、適切なハメイ公差とハメイ長さを選定しさらにシールペイントを併用



品番	部品名	品番	部品名	品番	部品名
1	砂除け	7	モータフレーム	13	軸シール
2	端カバー	8	固定子鉄心	14	上部メタル
3	口田錫	9	回転子鉄心	15	スラスト円板
4	上部ブラケット	10	下部ブラケット	16	スラスト受
5	固定子コイル	11	モータ軸	17	下部メタル
6	エンドリング	12	封水膨張調整装置		

図 3.3 立軸汚水処理用水中モータル構造図
Fig. 3.3 Longitudinal section of water submersible pump motor with vertical shaft for sewage disposal.



品番	部品名	品番	部品名	品番	部品名
1	モータ軸	8	口出線締付金具	15	エンドリング
2	砂除け	9	口出線	16	アソビ側ブラケット
3	端カバー	10	モータフレーム	17	封水膨張調整装置
4	軸シール	11	アイボルト	18	アソビ側ブラケット
5	負荷側メタル	12	固定子鉄心	19	スラスト受
6	負荷側ブラケット	13	回転子鉄心	20	スラスト円板
7	口出線シールパッキン	14	固定子コイル		

図 3.4 横軸汚水処理用水中モータル構造図
Fig. 3.4 Longitudinal section of water submersible pump motor with horizontal shaft for sewage disposal.

している。各締付ボルトの貫通部分も漏水を防ぐための考慮を払っている。

(6) 封水膨張調整装置

内部封水の温度変化に伴う膨張収縮を調整するため、モータル上部に封水膨張調整装置が設けられている。この装置は、特殊材料からなるゴム袋と、これを保護するための合成樹脂製の外筒からなる。ゴム袋の容積は内部封水の量とその温度上昇とにより決定されている。

3.2 汚水処理用水中モータ

汚水処理用水中モータは、深井戸用に比べ、外径寸法の制限がないため、一般に外径が大きく長さの短い一般電動機に近い形式となる。しかし、回転子の回転による円筒摩擦損失を減少させる意味から、一般用に比べ長さ方向のやや長くなる細長いモータの傾向をもっている。

汚水処理用水中モータでは外径寸法の制限がないので、フレームには一般に鉄が採用される。また用途からみても、鉄のほうが耐食特性において鋼管より有効である。スラスト軸受はこの種のポンプでは一般にスラスト荷重が少ないから、最も構造簡単な固定式スラスト軸受を採用しても機能上まったく問題はないので、深井戸用に比べ非常に簡単な構造となっている。しかし、材料面およびスラスト円板の硬度、仕上については深井戸同様の考慮を払っている。軸シールは深井戸用と同等以上のものを採用している。封水膨張調整装置についても同様である。

図3.4、3.4は汚水処理用水中モータの立軸形式と横軸形式の構造図を示したものである。

4. 設計上の諸問題

水中モータはほかの一般用電動機と異なり、設計上種々の特異性が存在する。次にそれら設計上の特異性について説明する。

4.1 電線

水中モータ用絶縁電線の具備する条件としては

- (1) 完全な耐水性をもち、水中での絶縁抵抗が安定であること。
- (2) 環境キ裂性がまったくないこと。
- (3) 耐熱性が良好で、とくに熱衝撃に対してすぐれた耐久力をもっていること。
- (4)すぐれた機械強度をもち、巻線作業によって損傷をうけることのないこと。

あげられる。これらの条件を一応満足するものとしては、ポリエチレン電線および塩化ビニール電線が考えられる。ポリエチレン電線は耐水性が最も良好な電線として、一般によく使用されている。この電線はポリエチレン製作工程の差により3種類があり、高圧法、中圧法および低圧法ポリエチレンがある。ポリエチレン電線は非常にすぐれた耐水性をもっているが、熱軟化温度が低いこと(とくに高圧法が少ない)、機械的強度が弱く、巻線作業中、損傷をうけやすい欠点がある。しかし、水中モータでは水中で運転されるということから、巻線温度上昇は比較的低く、ポリエチレンの軟化温度以下に容易に設計可能であり、また機械的強度の点は表面を別の材料でコーティングすることにより、補うことができるために従来から使用してきた。しかし、ポリエチレン電線は耐水性は非常にすぐれているが周囲の水の条件と、周囲温度および使用電圧に影響される環境キ裂性をもつことが明らかとなった。これはポリエチレン電線にとって致命的な欠陥であり、これによりいかに高い絶縁抵抗を維持しても、一瞬にして絶縁破壊に至ることになる。この環境キ裂性は、われわれの実験結果では周囲温度40°C以上、使用電圧400V以上のとき顕著となることが確認され、一応の周囲温度と使用電圧に対する限界が明らかにできた。環境キ裂性は、低圧法および中圧法ポリエチレンに発生しやすく、高圧法は比較的安定していることが明らかにされた。熱軟化温度が低い欠点があるが、高圧法ポリエチレン電線がこのうちでは最も安定しており、なお研究すべき要素をもっている電線のように思われる。

われる。

塩化ビニール電線は、絶縁抵抗の初期の値はポリエチレンに比べ、1/3以下であるが、時間に対する変化が比較的ゆるやかで、しかも安定性があるから水中モータ用として望ましい電線の一つである。環境キ裂性も現在までの実験においては発生しておらず、熱軟化温度も大体ポリエチレン並みで、機械的にはポリエチレン以上の特性をもっている。しかし、初期の絶縁抵抗の値が低いことは耐電圧の点に問題があり、最少被覆厚さを相当大きく採らねばならないという欠点をもっている。

ポリエチレンの機械的特性、熱軟化特性を改善するために、ポリエチレンを架橋した架橋ポリエチレン電線が製作されている。

この電線はポリエチレンの欠陥をすべて解決しており、環境キ裂性も現段階では皆無であり、熱衝撃性も向上されており、70~80°Cの温水中において非常に安定した絶縁抵抗を示している。

この電線は大体100°C程度まであれば安定して使用できることが確認されている。

その他、新しい材料を使用した電線も一部紹介されてはいるが、まだ、みるべき結論は得られていないようである。

一般水中モータ用の絶縁電線としては、以上の3種類のうちから選択決定するのが現在のところ好ましいと考えられる。出力が大きくなれば、巻線の温度上昇は当然高くなることより、出力の大きさ、使用電圧、および周囲条件の三つを検討して決定しなければならないと考える。図4.1は浸セキ日数に対する各種電線の絶縁破壊電圧の一例を示したものであり、表4.1は低圧法ポリエチレン電線と架橋ポリエチレン電線の浸セキ日数に対して、温度と使用電圧を変えた場合の環境キ裂の発生状況の実験データの一例を示したものである。

表4.1 浸セキ日数-キ裂の有無の実験結果

試料	条件	浸水日数(日)					
		温度	電圧	1	15	40	80
低圧法 ポリエチレン 電線	40°C	220	0/24	0/21	0/9	0/6	0/3
		440	#	#	#	#	#
	70°C	220	#	#	1/9	1/6	2/3
		440	#	#	1/9	3/6	—
架橋 ポリエチレン 電線	40°C	220	#	#	0/9	0/6	0/3
		440	#	#	#	#	#
	70°C	220	#	#	#	#	#
		440	#	#	#	#	#

表中の1/6とは試料6本中キ裂の入ったもの1本ということである。

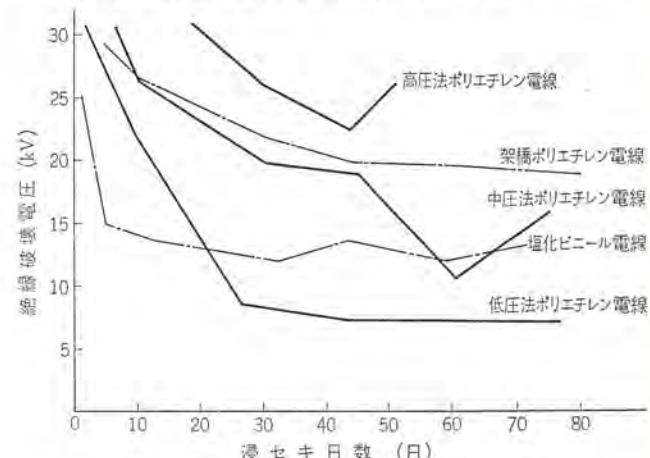


図4.1 60°C 440V 加電における浸セキ日数-絶縁破壊電圧の関係

Fig. 4.1 Rupturing volt characteristics of magnet wires for submersible pump motor at 440 V supply in 60°C temp.



図 4.2 小形水中モートル 固定子
Fig. 4.2 Stator of small submersible pump motor.

上記の電線は、一般に被覆厚みが大きく小形機に使用する場合ミジ 占積率の点から製作不能におちいる場合がある。このため小形水中モートルでは、一般的マグネットワイヤと絶縁厚のそれほど違わない耐水合成エナメル電線を使用している。この電線は、それ自身では水中において非常に安定した絶縁抵抗を維持するが、巻線作業中ピンホールが発生しやすく、そのままで使用できないので、一般にはその上から耐水性のすぐれた合成樹脂材料でキャストする方式が使用せられている。この場合はキャスティング用樹脂と、鉄心あるいは銅線間との熱膨張係数の差異により、接着箇所にハク(剥)離を生ずる恐れのあるため、この接着強度を増すよう、設計的に工作的に種々の考慮を払う必要がある。図4.2は小形水中モートルの固定子巻線の一例を示したものである。

4.2 水潤滑軸受

水中モートルの特色は水潤滑軸受をもち、さらに、高速、高荷重に耐えうるスラスト軸受を備えることにある。

(1) 材料の選定

水の粘度は油の1/20~1/30であるから単純な考え方をすれば、水による潤滑膜の形成は不可能であり、潤滑条件としては、境界面潤滑あるいは接触潤滑のいずれかに移行するものと予想してよい。

したがって、材料の選定にあたっては、このような潤滑条件においても良好な特性を得られるようなものを実験的に考慮する必要がある。この場合、固体潤滑剤であるグラファイトならびに二硫化モリブデンを適当な合成樹脂で固着させたものが有効である。これに相対するスラスト円板には、表面熱処理を施したステンレス鋼が選定される。

(2) 冷却剤としての水

水潤滑軸受においては、水は潤滑剤と考えるべきではなく、むしろ冷却剤として考えたほうがよい。軸受の特性を維持するためには潤滑はもちろんあるが、軸受の焼付キを防ぐための冷却効果は重要である。潤滑が行なわれなくても、焼付キが防止できるような処置がとられるならば、軸受は安定した特性を維持することができる。

したがって、冷却剤としての水をいかにして軸受表面に、より効果的に流しうるかが軸受の性能を決定する要素となる。固体潤滑剤を基盤とした合成樹脂系軸受は熱伝導係数が非常に小さく、他の部分への効果的な伝熱がまったく期待できない。すなわち軸受面での発熱は、軸受面において除去する必要があり、直接軸受面へ有効に冷却水を流すよう構造的に十分検討すべきである。

(3) 構造

軸受の構造については冷却水が、軸受面に、より効果的に入り



図 4.3 水中モートル用スラスト軸受
Fig. 4.3 Thrust bearing.

うるよう十分の考慮が必要である。筒軸受は、小形機では単純な固定式を採用するが、大形機では自動調心形が採用される場合がある。筒軸受にはラセン状の水ミヅを切り、水ミヅの幅を適切に決め、軸の回転によって、冷却水が十分軸受面にゆきわたるよう考慮を要する。軸受のクリアランスは、水潤滑の場合は種々の条件を考慮し、油潤滑の場合の2~3倍とするのが好ましいと考える。しかしクリアランスを大きくしすぎると軸振れが大きくなるので、適切で最小限の値に選定する必要がある。

スラスト軸受は、非常に軽荷重のものでは固定式が、小形機でかなりの荷重のかかるものにはピボット式が、さらに高荷重のものではミッセル形の構造を考慮している。固定子およびピボット式では、回転方向に対して水ミヅの状態を変化させ、軸受面に冷却水の入りうるよう考慮する。ミッセル式では3~7個程度のパッドを使用し、それぞれが独立したピボットで支持されるが構造を簡単にするため、一般的のものについてはパッドの数は3個とし、確実に調整なしで平面が構成できる最も簡単な方式を採用している。図4.3は当社水中モートルの一般的なミッセル式スラスト軸受を示したものである。

(4) PV 値(荷重×周速)

軸受の設計を決める基準としてのPV値の決定は、種々の条件を与えて、実験的に確立しなければならない。われわれは種々の実験と、過去における経験の統計からスラスト軸受においては400~450まで、筒軸受においては20~30までに選定する必要があると考えている。これに関連するPおよびVについては、固体潤滑剤を基盤とした合成樹脂系の場合、Pはスラスト軸受においては30~35以下、筒軸受においては5~10以下、Vは最大25~30としそれ以上の周速の場合は、非常に焼付キの可能性があるものと考えている。PV値は、潤滑方式、構造などにより相当左右されるものであり、さらに実験を重ね、この値を検討してゆく必要があるものと考えている。

4.3 円筒摩擦損失

水中モートルは水中で回転するから空気面において非常に大きい流体損失を発生する。この流体損失はレイノルド数が低い場合ほぼ下記の関係により求めることができる。

$$P = C \cdot D^{4.5} \cdot N^{2.5 \sim 3} \cdot L \cdot G^{-0.5} (\text{kW})$$

ここにDは回転子外径、Nは回転数、Lは鉄心幅、Gは固定子回転子間の空気長、Cは比例定数を与える。回転子の回転による空気摩擦損失は、2極機では全損失の50%以上を、4極機では20~30%を含めるものであるから、水中モートルの設計にあたっては、この機械損失を十分検討の上、鉄心外径と鉄心幅との相互関係を決定しなければならない。この機械損を減少させるため、水中モートルは一般的電動機に比べ、細長い形状を採用するのが好ましいようである。円筒摩擦損失を軽減するために固定子、回

転子とも全閉ミクを使用するのが望ましいが、普通は巻線の問題で回転子のみ全閉ミクとするのが良い。この場合、回転子直径に対する空隙の選定を適切に行なうことが必要である。

4.4 防ショウ処理

水中モータの特異性として、最後に防ショウ処理を考える。防ショウを完璧に行なうか、どうかは寿命に重大な影響を与えるものであり、十分の検討を要する。主要部分すなわち軸、締付ボルト類などにはステンレス鋼を全面的に採用し、鉄心関係、鋳物部品などは十分な脱脂処理と下地処理を行なったうえ、特殊耐水塗料の焼き付けを行なっている。とくに回転子鉄心の表面については入念に実施している。特殊耐水塗料は、当社における十分の実験研究を経て選択採用されたもので、とくに金属との接着性にすぐれ、強い皮覆強度をもつものである。

しかしながら、温度の変化に対する金属との間の熱膨張係数の差による接着強度の問題などは残されており、水中モータ用塗料としての検討をさらに続けてゆく必要があろう。

防ショウと並んで電食についても考慮を要する。使用液に電解液が含まれる場合、緩慢ではあるが電食現象が発生する。これについては異種金属の使用は避け、さらに厳重な防ショウ塗料の塗布などによりある程度は防ぎうることはできるが、完全なものとはいいがたく、今後の研究成果に期待しなければならない。

5. 特 性

5.1 効率

水中モータでは回転子が水中で回転するため、非常に大きい流体摩擦損失を生ずる。この値は、高速機においては全損失の50%以上に達するため、効率は同出力の一般電動機に比べ5~10%の低下を見る。それに加えて、電線の占積率が他のマグネットワイヤに比べ悪いため、銅損の増分により、さらに効率は低下する。水中モータの効率を向上させるためには、電気的損失よりも機械損の減少に意を注ぐべきであり、回転子の外径と鉄心幅の関係に回転数の要素を加えて検討を加えなければならない。

図5.1は、深井戸用2極機と一般用2極機との効率の比較の一例を示したものである。

5.2 トルク特性

水中モータは負荷の定まったポンプを運転するため、トルク特性については、とくに考慮する必要はない。しかし、深井戸用の場合始動時ポンプを含めた全回転子重量がスラスト荷重として軸受に加えられるため、この重量とスラスト軸受の静摩擦係数から所要起動トルクを算定し、その値を設計上の基礎としなければならない。

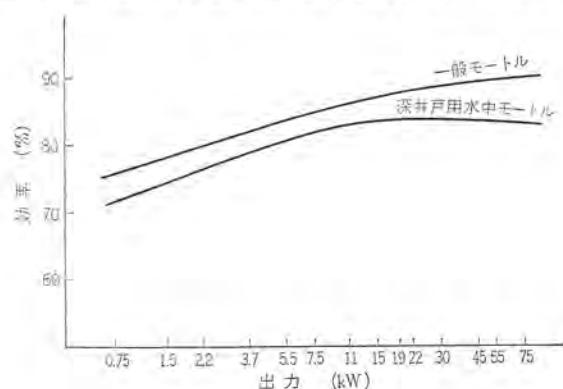
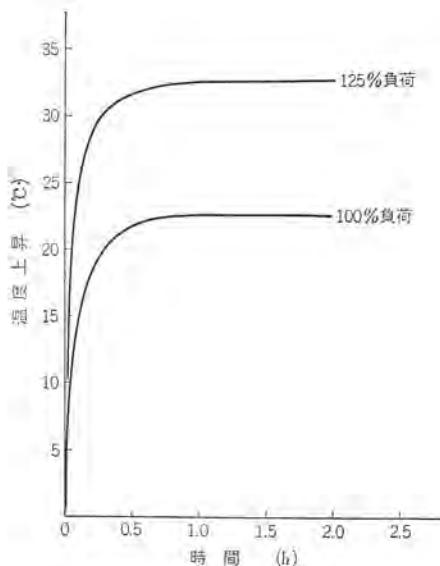


図5.1 2極機における効率の比較

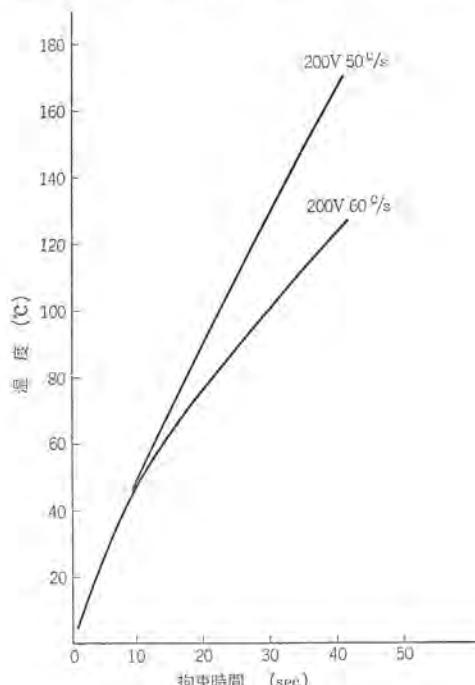
Fig. 5.1 Comparison between efficiencies of 2 P machines.

水中モータ・和田・佐藤



2.2 kW 2P 200 V 50 c/s 水温 18°C

図5.2 溫度上昇曲線の一例
Fig. 5.2 Example of temperature rise curve.



2.2 kW 2P 200 V 50 c/s 水温 18°C

図5.3 拘束時温度上昇曲線の一例
Fig. 5.3 Example of temperature rise curve at locked condition.

とくに減圧起動またはY-△起動方式を採用するものでは、全電圧起動時のトルク特性を、それに見合った値にしておく必要がある。起動トルクはその極数により値は異なるが、2極機でY-△起動をするものでは、定格電圧時約150%程度としている。

5.3 溫度上昇

水中モータは、水中で運転される関係で温度上昇は一般に低く、連続運転時においてはほとんど問題はない。許容温度上昇は使用電線の性質により決定されるが、当社では標準水中モータにおいて、周囲温度25°C、温度上昇限度30°Cで設計を進めている。

しかしながら水中モータの弱点は、構造上の制約から固定子コイルの熱容量が大きくとれないため、拘束時における温度上昇は他の一般電動機に比べ急で、しかも電線自体の温度特性が比較的低いことより、危険状態に急速に達するにいたる。図5.2、5.3

は一例として 2.2 kW 2P 水中モートルの温度上昇曲線、拘束時温度上昇曲線とを示したものである。したがって、水中モートルでは拘束時のモートル保護について十分な考慮を必要とする。

5.4 寿命試験

実際にポンプを直結しての総合的寿命試験および重スラスト荷重を与えてのスラスト軸受の寿命試験を常時実施している。運転方法としては、総合的寿命試験において常時連続運転と5分運転、5分休止の2種を実施している。絶縁抵抗は長年にわたりきわめて安定していること、スラスト軸受面は美麗で摩耗がほとんどないことが確認された。また重スラスト荷重試験でもスラスト軸受は摩耗、温度上昇とも予期した好成績を収めることができ、当社水中モートルの安定性と長い寿命を保証できることが確認された。

6. 水中モートルの保護と保守

6.1 保護

水中モートルはコイルの軟化温度が低いこと、コイル自体の熱容量が小さいことなどから過負荷および拘束に対して厳重な保護装置を必要とするものである。とくに図5.3によれば、拘束時は10秒程度で巻線許容温度に達するため、拘束に対しては数秒以内で動作するリレーを設定しなければならない。

水中モートルは年間を通して、比較的温度が一定している井戸またはそれに準じた水中で使用されるため、保護装置を設置する場所との温度差が大きく、一般的のサーマルリレーでの保護では適確な動作ができず、電流リレーを使用する保護方式が普通とされている。

最近、当社では温度校正付サーマルリレーの開発に成功し、水中モ

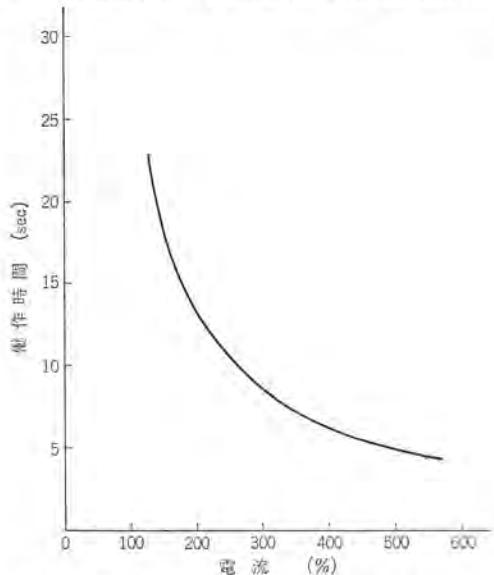


図 6.1 水中モートル用保護装置の特性曲線の一例
Fig. 6.1 Example of characteristics curve of protecting device for submersible pump motor.

ートルの保護装置としてサーマルリレーを使用することができるようになった。図6.1は水中モートル用保護装置の代表特性曲線を示す。

6.2 保守

水中モートルは水中で使用されるので、直接地上から運転状況を調査することは不可能である。したがって、その保守は一般モートルに比べ困難であるが、適切な方法により目で観察するのと同様の十分の保守が可能である。すなわち、一定期間ごとに絶縁抵抗を実測記録する。これを図表化し絶縁抵抗推移の傾向を観察するとよい。この場合、急に絶縁抵抗の低下が見られるようなときは一応危険状態にあるものとして注意を払うようにする。また、運転の際の電流計の読みを毎日調査し、これを図表化する。電流に大きい変動が認められたり急に増加したような場合は、主として機械部分に問題が起きたとして注意を要する。

なお定期的な分解点検も保守には欠くことのできない事項である。

7. む す び

以上、水中モートルの構造、特性の概要、および水中モートル特有の問題点について紹介した。水中モートルは一般電動機に比べ、水中で使用されるための絶縁上の問題、潤滑の問題、防ショウの問題など特異な点が数多くあり、さらに製作経歴が浅く、いまだ需要家側に完全な信頼をもって迎えられていないのが現状である。しかし、合成樹脂材料の最近の目ざましい進歩、設計製作面における研究の積み重ねと、今日までに経た尊い経験により、絶えず改良が行なわれており、われわれ設計にたずさわる者として、今日の水中モートルはもう普通のモートル同様に考えていただく段階にきており、安心してお使い願いたいと申上げることのできるほど、品質は改善されている。今日ポンプ用として採用されている電動機は一般用モートルの1/4程度を占めていると考えられ、これからみれば伸びているとはいえる、需要いまだしの感がある。ポンプ用といえば水中モートルが必ず使用される日の来るのを念じつて品質の改善と、価格の低下に一層の努力を払ってゆきたいと考えている。

なお大形水中モートルについては、標準形とは異なった種々の問題点もあり、これについては別の機会において論じたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) 八木、本間：山王国際会館納め三菱電動水中ポンプ「三菱電機」34 No. 9 (昭 35)
- (2) "Submersible pumping plant" PIEE No. 2 (1960)
- (3) 機械設計便覧 機械設計便覧編集委員会編纂
- (4) 潤滑・潤滑剤 日刊工業新聞社発行

コーンブレーキモートル

和田 義彦*・光島辰巳*

Cone Brake Motors

Nagoya Works

Yoshihiko WADA・Tatsumi MITSUJIMA

With the development of motor application in various fields, dependable brake equipment withstanding frequent start and stop or operating on heavy loads has come in demand. Under the circumstances Mitsubishi has brought to completion cone brake motors which have been under development for a while. This article reports on the standard of the cone brake motors, touching upon the operation, construction and adjustment of them in brief. These motors have very superior advantages to other motors with independent brake equipment. The new motors involve many design problems posed on them as a machine to be used as a part of brake. The problems are discussed with results of practical operation tests. Various remarks in the use and selection of the motors are also described for the reference to users.

1. まえがき

電動力応用の分野の発展に伴いひんぱんな起動停止、あるいは重い負荷に耐える確実なブレーキ動作を必要とする用途が増加し、電動機にブレーキ装置を内蔵したいわゆるブレーキ付電動機が非常に多く使用されている。ブレーキ付電動機としては、従来から電動機とは別個の独立したブレーキ機構をもつたものが多く使用されてきたが、最近にいたり、ブレーキ機構と電動機部分とを一体としたコーンブレーキモートルが開発された。

コーンブレーキモートルは、従来の別個のブレーキを内蔵したブレーキ付電動機に比べ

- (1) 軸方向の長さが短く、標準電動機とほとんど変わらない。
- (2) ブレーキ機構は電動機自体の磁気吸引力を利用して行なわれるため、電磁石やリンク機構などの複雑な機構は不要となり、ブレーキ動作が確実迅速で、かつ保守が容易である。
- (3) 電動機の制動力発生源はそれ自身の励磁電流によって行なわれるので、特別な電源入力を必要とせず、総合効率が向上する。

などの特長をもっている。

とくに寸法が標準電動機とほとんど変わらない点は据付面積を節約できる利点があり、従来のブレーキ付電動機に代わって、その需要は急速に伸びつつある。

当社では、かねてから業界の要望にこたえコーンブレーキモートルの開発を進めていたが、その系列化が完成したので、その概要につき以下に紹介する。

2. 標準および外形寸法

三菱コーンブレーキモートルの系列としては、JEM 1110 に規定された外扇形の床取付横軸形、フランジ取付横軸形およびフランジ取付立テ軸形の4極および6極を整備した。またそれらについての屋内形および屋外形につき標準系列の整備をも完了した。

正式名称 当社形名

- (1) 床取付横軸全閉外扇形.....SFC-A
- (2) フランジ取付横軸全閉外扇形.....SFC-F
- (3) フランジ取付立テ軸全閉外扇形 ..SFC-V
- (4) 床取付横軸全閉形.....SEC-A



図 2.1 SFC-A 形
コーンブレーキモートル
Fig. 2.1 Type SFC-A
cone brake motor



図 2.2 SFC-F 形
コーンブレーキモートル
Fig. 2.2 Type SFC-F
cone brake motor.

(5) フランジ取付横軸全閉形.....SEC-F

(6) フランジ取付立テ軸全閉形SEC-V

またそれぞれにつきブレーキトルク 80% 以上のもの、150% 以上のものの 2 種類を準備している。図 2.1 および図 2.2 はコーンブレーキモートルの製品写真を、表 2.1 はコーンブレーキモートルの適用ワク番号一覧、表 2.2~2.5 は各形式の外形寸法図を示したものである。なお、全閉形は外扇形とまったく同一寸法である。

表 2.1 コーンブレーキモートル適用ワク番

出力 (kW)	4 極				6 極			
	連続		30 分		連続		30 分	
	80%	150%	80%	150%	80%	150%	80%	150%
0.4	910	1111	910	910	1111	1114	910	1111
0.75	1111	1114	910	1111	1114	1314	1111	1114
1.5	1114	1314	1111	1114	1314	1318	1114	1314
2.2	1314	1318	1114	1314	1318	1621	1314	1318
3.7	1318	1621	1314	1318	1621	1625	1318	1621
5.5	1621	1625	1318	1621	1625	1824	1621	1824
7.5	1625	1828	1625	1828	1824	2027	1625	1828
11	1824	2027	1824	2027	1828	2031	1828	2027
15	1828	2031	1828	2031	2031	—	2031	—
19	2027	—	2027	—	—	—	—	—
22	2031	—	2031	—	—	—	—	—

80% 定格トルクの 80% 以上
150% " 150% "

表 2.2 (A) コーンブレーキモータ 外形寸法図 SFC-A

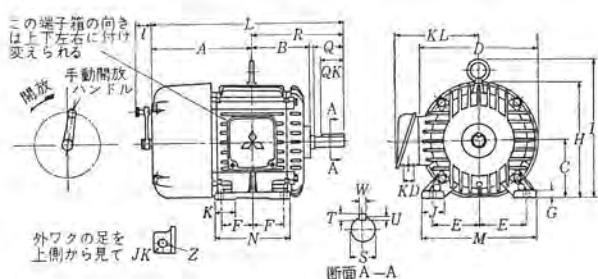


表 2.3 (A) コーンブレーキモータ 外形寸法図 SFC-A

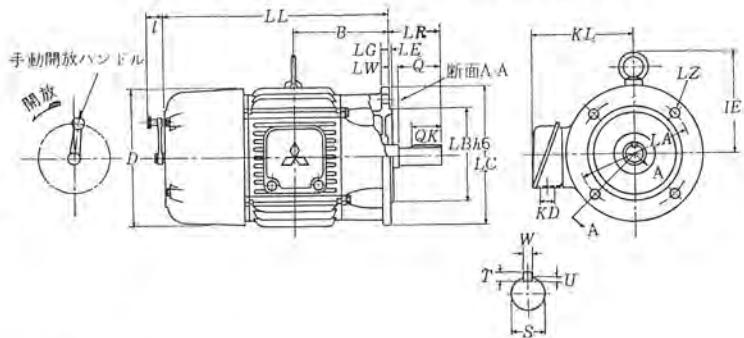


表 2.2 (B) SFC-A 寸 法

ワ ク 番 号	電 動 機												手動開 放装置	軸 端												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	JK	K	KD	KL	*L	M	N	Z	I	Q	QK	*R	@S	T	U	W
910	175	102	90	185	70	50	11	182.5	—	40	5	35	25	145	320	180	130	9	29	40	30	145	16	5	3	5
1111	185	121	115	235	95	55	18	232.5	—	45	5	45	25	165	350	225	150	11	34	40	25	165	22	7	4	7
1114	200	136	115	235	95	70	18	232.5	280	45	5	45	25	165	390	225	180	11	34	50	35	190	22	7	4	7
1314	235	155	135	275	110	70	20	272.5	318	50	6	55	25	185	455	260	180	11	34	60	45	220	28	7	4	7
1318	255	175	135	275	110	90	20	272.5	318	50	6	55	25	185	495	260	220	11	34	60	45	240	28	7	4	7
1621	265	209	160	315	125	105	22	317.5	381	65	6	70	35	260	560	310	270	15	38	80	65	295	35	8	4.5	10
1625	285	229	160	315	125	125	22	317.5	381	65	6	70	35	260	600	310	310	15	38	80	65	315	35	8	4.5	10
1824	315	233	180	370	140	120	22	365	425	70	8	70	35	280	645	350	300	15	38	90	70	330	42	8	4.5	12
1828	335	253	180	370	140	140	22	365	425	70	8	70	35	280	685	350	340	15	38	90	70	350	42	8	4.5	12
2027	350	257	205	415	160	135	25	412.5	483.5	90	8	85	35	305	720	410	350	18	53	105	85	370	48	8	4.5	12
2031	370	277	205	415	160	155	25	412.5	483.5	90	8	85	35	305	760	410	390	18	53	105	85	390	48	8	4.5	12

備考

ワク番号 910 には外被の冷却ヒレは付かない。

※ この寸法は運転中を示す。ブレーキ時には 1 mm 外側へ移動する。

※ この寸法は表に示すものを超過しない。もし、正確に表示寸法に合わせる必要のあるときには 0.5 mm までのライナを使用。

◎ 軸径の上下寸法差は、日本工業規格 (JIS) B 0401 ハメイ方式 "h6" による。

表 2.3 (B) SFC-F 寸 法

ワ ク 番 号	電 動 機												手動開 放装置	軸 端						軸 端			
	B	D	E	IE	KD	KL	LA	*LB	LC	LE	LG	LL	LZ	*LR	*LW	Q	QK	@S	T	U	W		
910F	130	185	—	—	25	145	130	110	160	3.5	10	305	9	29	48	8	40	30	16	5	3	5	
1111F	140	235	—	—	25	165	165	130	200	3.5	12	325	11	34	48	8	40	25	22	7	4	7	
1114F	155	235	165	25	25	165	165	130	200	3.5	12	355	11	34	58	8	50	35	22	7	4	7	
1314F	175	275	183	25	25	185	215	180	250	4	16	410	15	34	68	8	60	45	28	7	4	7	
1318F	195	275	183	25	25	185	215	180	250	4	16	450	15	34	68	8	60	45	28	7	4	7	
1621F	225	315	221	35	260	265	230	300	4	20	490	15	38	88	8	80	65	35	8	4.5	10		
1625F	245	315	221	35	260	265	230	300	4	20	530	15	38	88	8	80	65	35	8	4.5	10		
1824F	255	370	245	35	280	300	250	350	5	20	570	18	38	98	8	90	75	42	8	4.5	12		
1828F	275	370	245	35	280	300	250	350	5	20	610	18	38	98	8	90	75	42	8	4.5	12		
2027F	280	415	278.5	35	305	400	350	450	5	22	630	18	53	113	8	105	85	48	8	4.5	12		
2031F	300	415	278.5	35	305	400	350	450	5	22	670	18	53	113	8	105	85	48	8	4.5	12		

備考

ワク番号 910F には外被の冷却ヒレは付かない。

※ この寸法は運転中を示す。ブレーキ時には 1 mm 外側へ移動する。

※ フランジハメコミ部の上下寸法差は、日本工業規格 (JIS) B 0401 ハメイ方式 "h7" による。

◎ 軸径の上下寸法差は "h6" による。

3. 構造と動作

図 3.1 はコーンブレーキモータの構造図を示す。コーンブレーキモータは、構造的にみてコーン形鉄心をもった電動機部分と、外扇ファンを兼ねたブレーキ機構部分とに大別することができる。当社コーンブレーキモータの大きな特長は、ブレーキ圧力がブレーキカバー部分ではなく、ブラケット側すなわち電動機側に加えられるということであり、これは機械的な強度の大きい部分でブレーキ圧力を受けることを意味し、ブレーキ圧力によるラニング部その他の部分の構造的な変形はまったくなく、安定したブレーキ動作の行なえる点にある。

3.1 電動機部分

全閉外扇形の標準形式のフレームを使用し、固定子鉄心および回転子鉄心はコーン形の形状とし、両者相互間の磁気吸引力の軸方向分力をブレーキ吸引力として使用できるようになっている。

軸受は、吸引力の発生による軸の移動が行なわれるため円筒コロ軸受を使用し、それとは別に、磁気吸引力によるスラスト荷重を受けるためのスラスト軸受を装備している。スラスト軸受としては、小形機でスラスト荷重の小さいものには一般的のボールベアリングで片側シールのものを、スラスト荷重の比較的大きいものではアンギュラーコンタクト玉軸受を使用している。いずれもグリース給油を必要とする形式のものである。とくにスラスト軸受は磁気吸引力による静圧のほか起動時に加えられる起動電流による衝撃的なスラスト荷重にも耐えうるよう選定されている。

制動力を発生させるためのバネは、電動機内の負荷側ブラケットと回転子鉄心との間に、バネ圧調整装置を介して取り付けられる。

このバネ圧調整装置は、ブレーキ力の調整用として設けられているもので、負荷側ブラケットを取りはずすのみで簡単にバネ圧の調整が可能である。バネ圧はロッドを通して反負荷側ブラケットに加えられる。

表 2.4 (A) コーンブレーキモータ 外形寸法図 SFC-V (1625 FV 以下) 表 2.5 (A) コーンブレーキモータ 外形寸法図 SFC-V (1824 FV 以上)

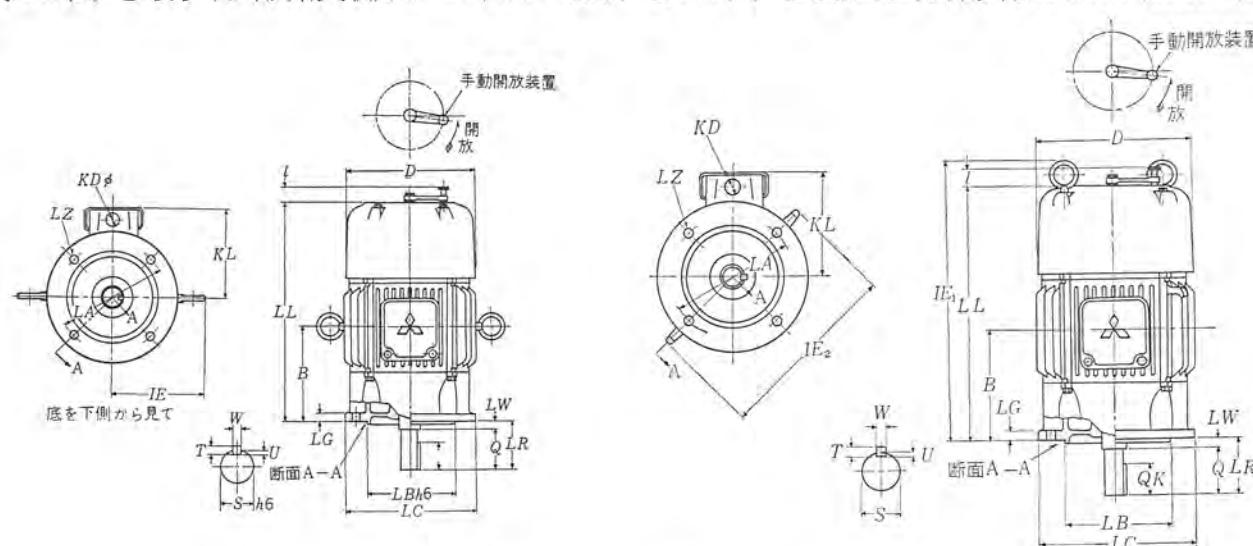


表 2.4 (B) SFC-V 寸 法

ワク番号	電 動 機												手動開放装置	軸 端							
	B	D	IE	KD	KI	LA	※LB	LC	LE	LG	LL	LZ		*LR	*LW	Q	QK	◎S	T	U	W
910V	130	185	—	25	145	150	110	160	3.5	10	305	9	29	48	8	40	30	16	5	3	5
1111V	140	235	—	25	165	165	130	200	3.5	12	325	11	34	48	8	40	25	22	7	4	7
1114V	155	235	—	25	165	165	130	200	3.5	12	355	11	34	58	8	50	35	22	7	4	7
1314V	175	275	174.5	25	185	215	180	250	4	16	410	15	34	68	8	60	45	28	7	4	7
1318V	195	275	174.5	25	185	215	180	250	4	16	450	15	34	68	8	60	45	28	7	4	7
1621V	225	315	206	35	260	265	230	300	4	20	490	15	38	88	8	80	65	35	8	4.5	10
1625V	245	315	206	35	260	265	230	300	4	20	550	15	38	88	8	80	65	35	8	4.5	10

備考 ワク番号 910V には外被の冷却ヒレは付かない。

* この寸法は運転中を示す。ブレーキ時には 1mm 下部へ移動する。

※ フランジハメコミ部の上下寸法差は、日本工業規格 JIS B 0401 ハメアイ方式 "h7" ◎軸径の上下寸法差は "h6" による。

表 2.5 (B) SFC-V 寸 法

ワク番号	電 動 機												手動開放装置	軸 端								
	B	D	IE ₁	IE ₂	KD	KL	LA	※LB	LC	LE	LG	LL	*LZ	約 t	*LR	*LW	Q	QK	◎S	T	U	W
1824V	255	370	596	—	35	280	300	250	350	5	20	570	18	38	98	8	90	75	42	8	4.5	12
1828V	275	370	636	—	35	280	300	250	350	5	20	610	18	38	98	8	90	75	42	8	4.5	12
2027V	280	415	—	500	35	305	400	350	450	5	22	630	18	53	113	8	105	85	48	8	4.5	12
2031V	300	415	—	500	35	305	400	350	450	5	22	670	18	53	113	8	105	85	48	8	4.5	12

備考 * この寸法は運転中を示す。ブレーキ時には 1mm 下部へ移動する。

※ フランジハメコミ部の上下寸法差は日本工業規格 JIS B 0401 ハメアイ方式 "h6" ; ◎軸径の上下寸法差は "h6" による。

* ワク番号 2027V 2031V のフランジ取付穴は 8 個所になる。

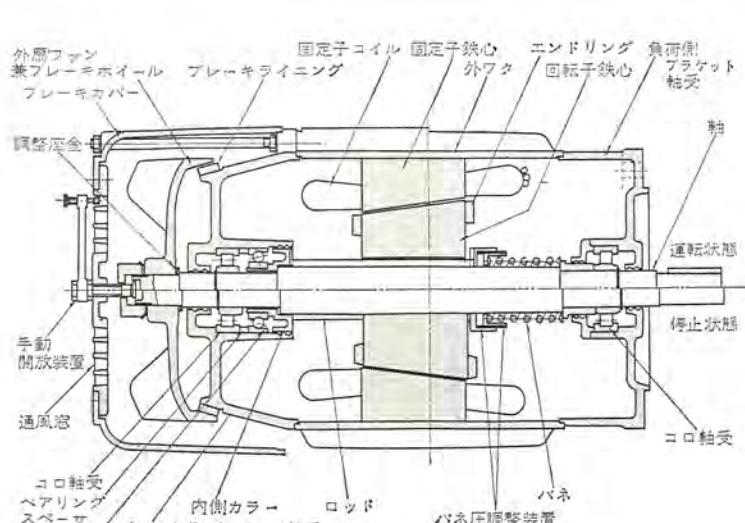


図 3.2 コーンブレーキモータ 固定子および回転子
Fig. 3.2 Stator and rotor of cone brake motor.

◀ 図 3.1 コーンブレーキモータ 構造図
Fig. 3.1 Construction of cone brake motor.

3.2 ブレーキ部分

ブレーキホイール は外扇 ファン を兼ねており、一般的のものは鋳鉄製
コーンブレーキモータ・和田・光島

である。反負荷側 ブラケット には適当な角度に配置された コーン 形
の ブレーキライニング が装着されている。ブレーキライニング には、とくに

耐摩耗性、機械強度および熱伝導性のよい特殊材料を使用している。また、とくに屋外使用のものでブレーキ部分のサビをきらうような用途に使用する場合には、ステンレス鋼と特殊ライニング材料とを組み合わせたものを使用する。ブレーキホイールは調整座金を利用して、ブレーキ引はずし時にライニングとの間の間隔が適当な値になるよう位置の調整がなされる。またこの部分の調整座金の調整で、ライニング摩耗時の調整を行なうことができる。ブレーキ部分には電動機据付時の調整を容易にするためブレーキ開放装置が設けられている。ブレーキ開放装置は、外扇カバーを基点として回転子全体を反負荷側に引張り、ブレーキシューとライニングとの間を引はずす機構で、開放ハンドルの操作により達成される。

コーンブレーキモートルは全閉外扇形が標準形式で、ブレーキホイールが外扇ファンを兼ねている関係上、モートルの冷却風がブレーキ部分の冷却を同時に行なうため、ブレーキ部分の温度上昇がきわめて低く、安定したブレーキ動作を行なえるという利点をもっている。

3.3 動作

図3.1の構造図の上半分は運転状態を、下半分は停止状態を示す。停止時においては、回転子はブレーキホイールおよびブレーキライニングが接触した状態に位置している。次に電源を入れると、磁気吸引力が固定子、回転子相互間に働き、その軸方向分力がバネ圧に打ち勝って回転子を左方へ移動させる。この移動は軸の肩がスラスト軸受部分に当たるまで続き、当たった位置で運転状態に入ることになる。運転中はスラスト軸受は全スラスト荷重をうける。

電源を切斷すれば磁気吸引力は消滅し、バネの力によって、回転子はブレーキ面に接触が生ずるまで右方に移動し、接触によりブレーキ力を生じ電動機は速かに停止するにいたる。

4. 調整と手動開放装置

(1) 制動トルクの調整

制動トルクの調整は、負荷側のブラケットをはずし、バネ圧調整装置の内側および外側カバーを相互に回転することによりバネの長さを変更することができ、これによりバネ圧を調整し、制動トルクの加減を行なうことができる。

負荷側ブラケットはブレーキ機構とはまったく関係がないので、分解のたびにブレーキ再調整の必要はまったくない。

(2) ブレーキライニングの摩耗調整

軸の移動距離の増加が認められるような場合は、ライニングに摩耗を生じたものと考えられるので、摩耗に応じてブレーキホイールの取付位置を調整する必要がある。この場合はブレーキホイール部分に使用されている調整座金の量を加減して調整することができる。

(3) ブレーキ手動開放装置

負荷機械の微調整、停電などの電動機の位置の調整の場合、ブレーキを引きはずす必要がある。このために手動開放装置が設けられている。手動開放装置は、外扇カバー部分に設けられた手動開放ハンドルを左の方向へ回転することにより回転子全体を反負荷側に引張り、ブレーキ部分の接触をはずし、ブレーキ開放を行なうことができる。運転に入る前には、手動開放ハンドルを前とは逆方向に回転させ、正規の位置にもどす必要がある。この場合、引き棒の位置が回転部分にふれないよう注意を要する。

5. 設計上の諸問題

5.1 磁気吸引力の軸方向分力

空ゲキ内の磁束分布を平等磁界とすれば、空ゲキを隔てて相対

する固定子、回転子相互間には $df = \frac{1}{8\pi} B^2 dA$ で表わされる磁気吸引力が発生する。ここに df は dA なる面積に働く磁気吸引力、 B は平等磁界の磁束密度、 dA は相対する微少面積を示す。この磁気吸引力は電動機の場合は全円周において発生するが、相対する点では大きさ等しく方向反対のため打ち消し合って、合成として現われない。しかし軸推力を得るため、固定子および回転子を一定の空ゲキを隔てて水平面に対して、ある傾斜を与えるようなコーン状配置とすれば、軸方向分力として $df_s = \frac{1}{8\pi} B^2 dA \cdot \sin \phi$ なる力を得ることができる。ここで ϕ は軸線と空ゲキ面との傾斜角を与える。

この式を全円周および鉄心幅について積分し、これを kg で表わせば、次の関係式を得る。

$$F = 0.0637 B_{\max}^2 D \cdot L \cdot \sin \phi \quad (\text{kg}) \quad \dots \dots \dots \quad (5.1)$$

ここで B_{\max} は空ゲキ最大磁束密度 (kG)、 D および L は回転子の外径および鉄心幅 (cm) を与える。

式(5.1)がコーンブレーキモートルの基本となるブレーキ吸引力を与えるものであり、この値は空ゲキ最大磁束密度の二乗と傾斜角の sine に比例することがわかる。すなわち、ある与えられた制動力をもつコーンブレーキモートルの設計にあたっては、ブレーキ機構の構造から所要バネ圧を算定し、さらにこのバネ圧に打ち勝つ磁気吸引力を得るよう回転子鉄心外径、鉄心幅、空ゲキ磁束密度、および傾斜角を決定しなければならない。しかも電動機は運転特性を規格および仕様値に合わせる必要があり、このため磁気吸引力に最も影響を与える空ゲキ磁束密度の選定については十分の考慮を払う必要がある。傾斜角度 ϕ を大きくすれば大きく磁気吸引力を得ることができますが、角度 ϕ が大きくなれば鉄心各部の寸法差が非常に大きくなり、各部の鉄心磁束密度の不均等を生じ局部的な過度の飽和のため励磁電流増加の原因となる。したがって最小鉄心寸法の制限について考察を加え、鉄心内径と鉄心幅との相關関係から、その選定には十分の考慮が必要である。

5.2 ブレーキ力の発生とコーン形ブレーキ面の決定

図5.1に示すような任意の傾斜をもつコーン形ブレーキ面のブレーキトルクは $T = \mu NR$ で与えられる。ここで T はブレーキトルク、 μ は動摩擦係数、 N はブレーキ面押力、 R はブレーキ面の平均半径である。今ブレーキ面の傾斜角を β で表わせば、ブレーキ押力 N を発生させるための水平力 Q は

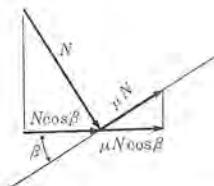


図 5.1 ブレーキ原理図
Fig. 5.1 Principle of brake action.

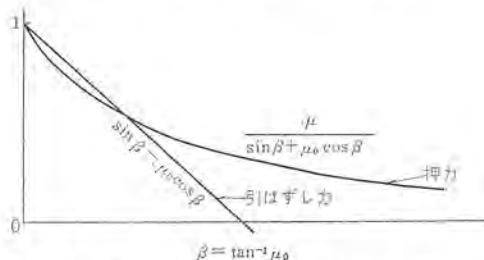


図 5.2 傾斜角と押力および引はずし力との関係図
Fig. 5.2 Angle of inclination vs pressing and separating force.

$$Q = N(\sin \beta + \mu_0 \cos \beta) \quad \dots \dots \dots \quad (5.2)$$

で与えられる。ここで μ_0 は静摩擦係数を示す。ゆえに、与えられたラーキトルクを発生するための水平力 Q 、すなわち P の圧は次式で与えられる。

$$Q = \frac{\sin \beta + \mu_0 \cos \beta}{\mu R T} \dots \dots \dots (5.3)$$

一方 ブレーキ面を引きはなし運転状態に入るためには、バネ圧と ブレーキ面の引きはなしのための力を両者を磁気吸引力により 加えなければならない。コーン状 ブレーキ面において ブレーキを引きはなす力は

で与えられる。したがって $F > Q + Q'$ を満足せねばならない。

式(5.4)において、 $Q' = 0$ とすれば磁気吸引力はばね圧のみに打ち勝てばよいからこの条件を与える β を決定する必要がある。すなわち

を満足するようブレーキ面の角度を選定せねばならない。図5.2は角度 β とブレーキ力 T および引はずし力 Q' との関係を示したもので、 μ_0 の値を 0.3 として、 β は通常 $17\sim20^\circ$ に設定されるのが普通である。

5.3 ボールベアリングの選定

主軸受としては、軸の移動があってもさしつかえないよう円筒コロ軸受が使用せられている。このほか運転中の磁気吸引力によるスラスト荷重を受けるためのスラスト軸受が設けられる。このスラスト軸受には、そのスラスト荷重に応じて、小形モートルでは一般的の玉軸受が、中形モートル以上ではアンギュラー玉軸受が使用されるのが普通である。この軸受の選定にあたっては式(5.1)で示される軸推力のほか回転子のスキーによる軸推力、および起動時の衝撃的軸推力を検討の上、これらに十分耐えるものを選定せねばならない。コーンブレーキモートルは、停止時は固定子と回転子の磁気中心にえれがあるため、起動電流により次式で与えられる軸推力を生ずる。

$$F_x = 0.403 \frac{E \cdot I}{L} \left[1 - \frac{2}{\pi} \cot^{-1} \frac{h}{g} \right] \text{ (kg)} \quad \dots \dots \dots \quad (5, 6)$$

ここに E : 相電圧 I : 相電流 L : 鉄心幅 h : 偏位量
 g : 空ゲージ長 である.

したがって衝撃荷重を繰り返し受ける場合のベアリングに対する等価荷重について、衝撲荷重の大きさと、そのひん度について検討の上決定し、スラスト軸受決定の基礎としなければならない。

5.4 振動精度

ブレーキ付モータの最も大切な用途の一つに工作機用があげられる。工作機用に使用される場合は相当の振動精度を要求される場合が多い。コーンブレーキモータは一般電動機と異なり、コロ軸受を使用しているところから、ラジアル遊サキ(隙)が普通のものより大きいこと、スラスト軸受をもっており反復的にスラスト軸受に加えられる衝撃荷重によるわずかな軸受と軸の肩当たりの変化が生じやすいこと、および回転子にバネなどの可動部分をもっていることなどから、一般電動機と同程度の振動精度を与えることは非常に困難である。したがって、とくに超精度を要求せられる用途に使用するためには、これらの機構的な問題点を十分検討してゆくことが必要である。

5.5 制動時間

全制動時間は、正規回転状態から ブレーキ 部分の接触に至るま

コンブレーキモートル・和田・光島

での惰行時間と接触が始まってからの正味制動時間の和で与えられる。惰行時間 t_0 は

$$t_0 = \sqrt{\frac{2WS}{gQ}} \text{ (sec)} \quad \dots \dots \dots \quad (5.7)$$

また、正味制動時間 t_B は

$$t_B = \frac{GD^2 N}{375 T} \quad (\text{sec}) \quad \dots \dots \dots \quad (5.8)$$

で与えられる。ここに W : 回転子重量, S : 軸移動距離,
 g : 重力の加速度, Q : バネ圧, GD^2 : 全回転系の慣性モーメント
 N : モータの定格回転数, T : ブレーキトルクである。
 そこで全制動時間は $t = \frac{4}{3} + \frac{S}{N}$ で与えられる。

ブレーキ付モートルにおいては、ブレーキ力を規定するために 80% と 150% との 2 種類を標準として称呼している。しかしながら通常 ブレーキトルクの実測に際しては、静止時に測定するのが普通であるため制動中における摩擦係数の変化のため静止時のみでの実測が妥当なものであるか、どうか十分検討する余地があるようと考えられる。当社では ブレーキトルクの決定法として、全制動時間が 0.5~0.6 秒に納まるよう パネ圧を調整している。この場合静止トルクとはまったく異なる数値となる場合もあるが、適切な調整の方法を考えている。

しかしながら、このような場合 80% と 150% ブレーキトルクの 2 種類について、どのような区別をするかが問題となる。連続定格の場合 150% ブレーキトルクのモートルは 80% のものよりもワク番が 1 段上がるため(表 2.1 参照)モートル単独の GD^2 は 2 倍近くになり、したがって全制動時間はまったく変わらないということになる。このような問題は、必要なブレーキトルクを得るためにバネ圧に対抗した磁気吸引力を発生させるための鉄心の傾き角 ϕ 、空ゲキ 磁束密度 B_{max} の選定の制限によって、たとえ静的 ブレーキトルクが称呼上 2 倍となつても、電動機の GD^2 が 2 倍になるということから制動時間はまったく変わらないという矛盾が生ずるわけで、コーンブレーキモートル 設計上の問題点として考慮すべき事項と考える。

負荷の GD^2 は、ブレーキ付モータの場合電動機 GD^2 の約 10 % 程度のものが多いことから、制動時間は制動トルクと電動機の GD^2 によって決定されると考えてよい。

コーンブレーキモートルの場合、ブレーキホイールとライニング間の距離はきわめて小さく、しかも軸方向に対して複雑な機構をもつていていため、惰行時間は他のブレーキ付モートルに比べ小さく通常0.1秒前後である。

6. 動 作 試 驗

試作完了後実用試験に入り、ブレーキの寿命試験を実施した。

寿命試験は 50 万回を目標とし、1 分間 10 回の起動停止ひん度で実施した。この結果、ブレーキライニングの摩耗は 50 万回の動作試験後もその摩耗量は僅少で、卓越した高性能をもつことが確認された。制動時間は図 6.1 に示されるように実用試験時 6 時間 30 分の運転時間で非常に安定した値を示し、0.7 秒前後 11.5 回転で停止している。温度上昇は、1 分間 10 回のひん度で サーモカップル を ライニング 面に埋め込み実測した。ブレーキ 部分の温度は約 20 ~ 25°C 程度で飽和し、非常に安定していることが確認された。ブレーキ 時の騒音もほとんどなく、標準電動機と変わらない静かな運転のできることが確認された。

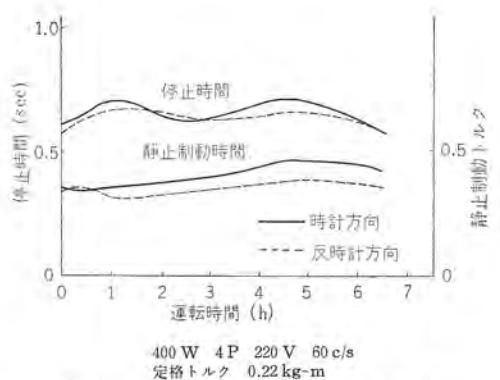
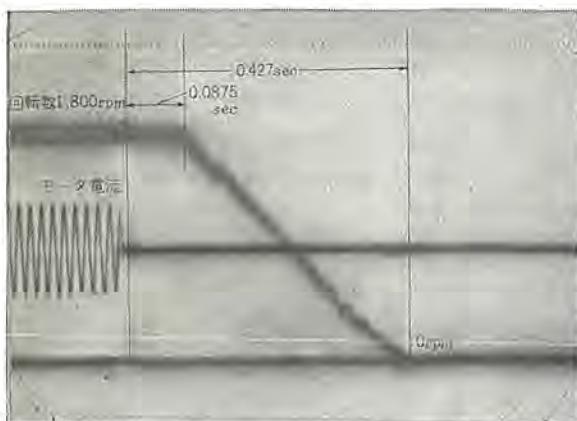


図 6.1 コーンブレーキモータ 停止特性曲線
Fig. 6.1 Braking characteristics of cone brake motor 400 W 4 P.



栗本鉄工 H-42197SE-F 1.5 kW 4P
No. 72197003
60 c/s 220 V
負荷なし
静止制動トルク 770.9 kg-m
図 6.2 コーンブレーキモータブレーキ動作オシロ
Fig. 6.2 Oscillogram of braking action.

7. 負荷定格の選定

ブレーキモータ は当然ひんぱんな起動停止が行なわれるため、時間定格の選定については十分の考慮が必要である。1分間に何回という高ひん度の用途に使用される場合と、ひん度は高くても1回の運転時間が比較的長いものがある。

- (1) 1回の運転時間が比較的長いもので、しかも比較的起動ひん度の高いもの、ときどき数回程度のインチングが行なわれるもの……連続定格で一般用の電動機を選定する。
- (2) 1回の運転時間が比較的長いが、起動ひん度が少ないも

の……運転時間の長さに応じて連続定格または短時間定格を選定する。一般用電動機と同一形式でよい。

(3) 1回の運転時間が1分以内で、起動停止のひん度の非常に少いもの……短時間定格で、電動機は一般用または高抵抗カゴ形のいずれでもよい。

(4) 1回の運転時間が1分以内で、起動ひん度が1分間何回というよう非常に高いもの……短時間定格で高抵抗カゴ形がよい。

ブレーキトルクは、いずれの場合も80~100%あれば十分である。

ただ、とくにホイスト、ウインチなどのようなもので、大きな荷がかかるような用途には150%以上のブレーキトルクのものを選ぶのがよい。

8. 選定上の注意事項

コーンブレーキモータ は、ブレーキ動作の際軸の移動があるため、負荷の選定については十分な考慮を必要とする。すなわちベルトドライバ、平歯車ドライブなどのように軸の移動が問題にならない用途のみを選定して使用することが必要であり、ヘリカル歯車駆動または完全な直結の場合のように軸の移動が許容できない用途は避けるべきである。

また軸推力は端子電圧の二乗に比例するので、減圧起動をすることは起動不能になる恐れがあり好ましくない。すべてジグ入れ起動によらねばならない。据付状態はバネ圧に大きい影響を与える。すなわち立テ軸傾斜取付のような場合、回転子の重量がバネ圧に影響する。この場合は軸推力の大きさの検討、バネ圧の検討などを行なう必要がある。したがって標準形式については、すべて指定された取付方法を厳守しなければならない。

9. むすび

コーンブレーキモータ はブレーキ部分と電動機部分とが一体の構造となっているため、軸方向長さが短かく、据付に場所をとらないこと、機構が簡単であるので保守が容易になることなどの利点をもっており、その需要は急速に伸びつつあるが、この反面、設計上、構造上検討すべき要素は数多く残されており、われわれはこれらの問題を解決し、さらに品質優秀なコーンブレーキモータ を製作するための努力を続けている。

ここに、当社コーンブレーキモータ の構造、性能などの概要を紹介したが当社製品についての大の方のご批判とご指導とをお願いする次第である。

三菱 SBU, SFU 形 フラットモーター

名地 魏*・柴田 隆夫*

Mitsubishi Type SBU, SFU Flat Motors

Nagoya Works Takashi NACHI・Takao SHIBATA

A series of flange type motors with their length in an axial direction has been completed for the purpose of being used chiefly for machine tools. They are named Flat Motors. This series is subdivided into a Drip-proof Fully Guarded type and a Totally enclosed Fan-cooled type. The axial length of the motor is almost a half of that of the standard one. The weight is also greatly reduced. E class insulation being used, the motor has nearly the same characteristics as the general purpose motors despite the small size. When these motors are used, the machines can be made small as a whole and built with a smart look so as to improve the merchandize value, which enables the new motors to find new market other for them machine tool application.

1. まえがき

三相誘導電動機は工業のあらゆる分野で使用されておりとくに標準三相電動機は、その寸法についても規格化され、工業の発展とともに、ますます利用度が高まり、生産量も増大している。また、電動機は材料の進歩と製作技術の向上によって、常に小形量化の方向に向っているが、電動機を小形化することにより、機械全体をコンパクトにまとめ上げることができ、その外観や機能を向上させることができる点から、とくに工作機用電動機などでは、需要者側からもその要求が強い。

一般に電動機を小形化する場合、全体の寸法を縮少するのが普通であるが、工作機用電動機ではフランジ取付のものが多いので、とくに軸方向の長さを短くしたものが機械全体を小形化する上で有利であり、このような要求に最も適するものとして当社フラットモーターの系列化が完成したので、その概要を説明する。

2. 構 造

この電動機の特長は、軸方向の長さ、すなわち LL 寸法が非常に短いことである。全閉外扇形について現在の標準電動機との比較を図 2.1 に示す。これにより、各出力の電動機とも、 LL 寸法がほぼ 50% 以下となっていることがわかる。また、電動機容積を $D^2 \times LL$ で表わして標準電動機と比較したものを図 2.2 に示したが、同様に大幅に小形化している。

図 2.3, 2.4 は SBU 形（防滴保護形）および SFU 形（全閉外扇形）について、標準電動機と比較した外観写真である。

このようにフラットモーターは、非常に小形化され、とくに軸方向長さを極度に切りつめた構造となっているが、このような寸法で製作するために多くの工夫がなされている。すなわち、

(1) 鉄心については、ミリの数、形状な

どについて適切なものを選び、また空ガリ径を大きくするなどして積幅を大幅に減少させた。

一般に電動機の出力 P は次式で表わされる。

$$P = KB_0(ac)D_0^2Ln$$

K : 定数

B_0 : 空ガリにおける磁束密度

(ac): 空ガリにおける単位長さあたりのアンペアコンダクタ

D_0 : 空ガリ径

L : 鉄心積幅

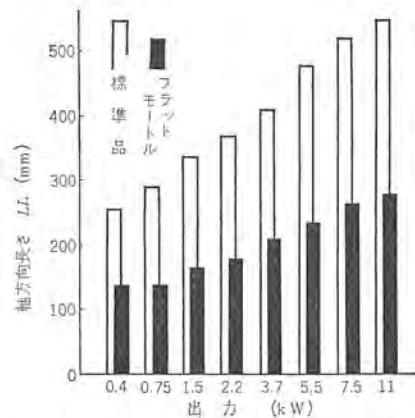


図 2.1 軸方向長さの比較 (全閉外扇形)

Fig. 2.1 Comparison of length in an axial direction of totally enclosed fan cooled motors.

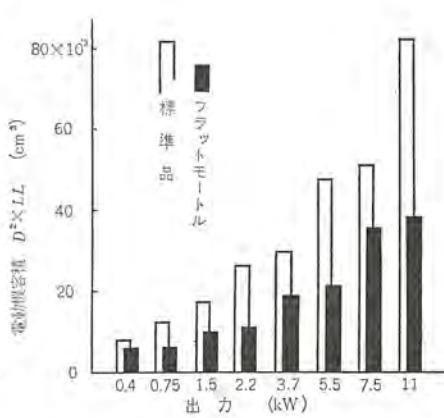


図 2.2 電動機容積の比較 (全閉外扇形)

Fig. 2.2 Comparison of volumes of motors. (totally enclosed fan cooled type)



図 2.3 フラットモーター (左) と標準電動機 (右) の比較 (防滴形)

Fig. 2.3 Comparison between a flat motor (left) and a standard motor (right) in dripproof type.

図 2.4 フラットモーター (左) と標準電動機 (右) の比較 (全閉外扇形)

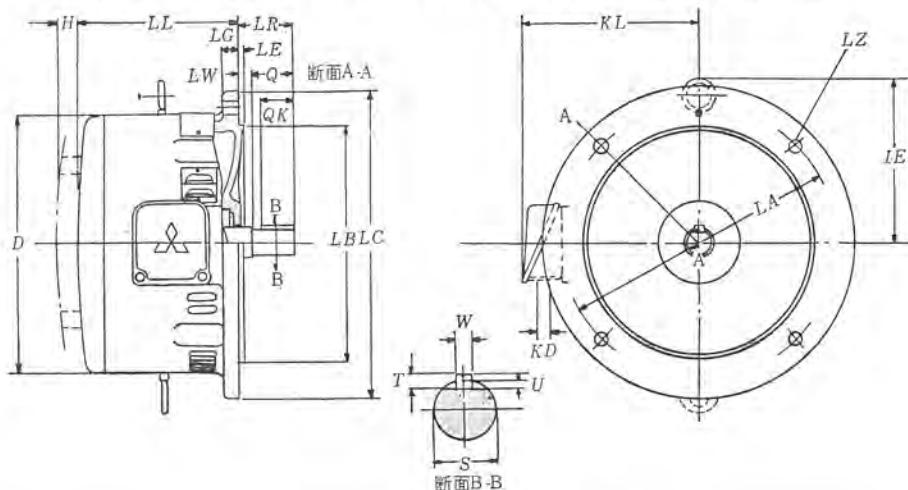
Fig. 2.4 Comparison between a flat motor (left) and a standard motor (right) in totally enclosed fan cooled type.

n: 回転数

したがって、積幅 *L* を減少させて、しかも同一の出力を得るためにには *D₀* を大きくすればよいが、これは電動機外径も大きくするため、小形化の上では制限される。*n* はほぼ一定であるから、

B₀ および (ac) を増大する必要があり、この場合、鉄心および電線の単位体積あたりの発生損失を増大させる。これは温度上昇に関係するが、後述のように効果的な冷却方式により解決し、さらに余裕をもたせるために耐熱度の高い絶縁物を採用した。

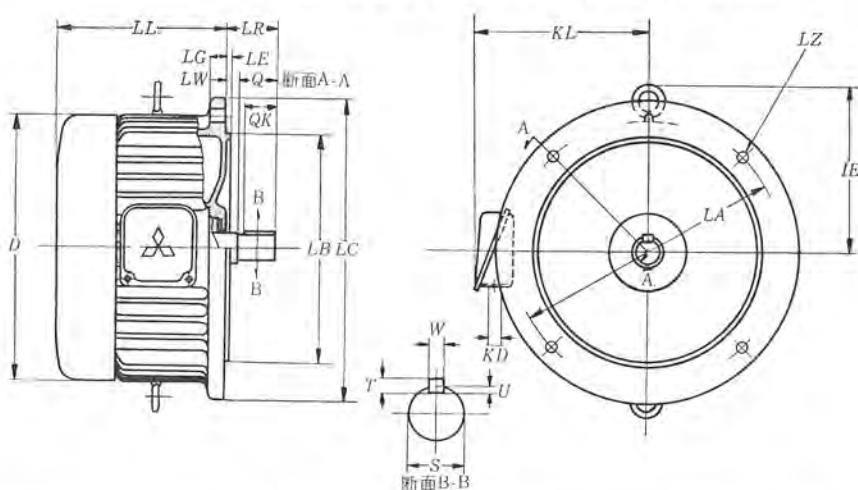
表 2.1 防滴保護形フラットモータ外寸法 (mm)



キロワット			ワク番号	電動機										軸端							立形		
2極	4極	6極		D	IE	KD	KL	LA	※LB	LC	LE	LG	LL	LZ	LR	LW	Q	QK	◎S	T	U	W	
0.4	0.4	0.2	1100L	210	—	22	146	215	180	250	3.5	12	120	11	48	8	40	25	22	7	4	7	12
0.75	0.75	0.4	1100M	244	—	22	163	265	230	300	4	16	138	15	58	8	50	35	22	7	4	7	14
1.5	1.5	0.75	1300M	244	—	22	163	265	230	300	4	16	153	15	68	8	60	45	28	7	4	7	14
2.2	2.2	1.5	1300L	244	—	22	163	265	230	300	4	16	184	15	68	8	60	45	28	7	4	7	14
3.7	3.7	2.2	1600M	295	189	25	200	300	250	350	5	16	199	15	88	8	80	65	35	8	4.5	10	16
5.5	5.5	3.7	1600L	295	189	25	200	300	250	350	5	16	230	18	88	8	80	65	35	8	4.5	10	16
7.5	7.5	5.5	1800M	346	215	35	275	400	350	450	5	20	260	18	98	8	90	75	42	8	4.5	12	18
11	11	7.5	1800L	346	215	35	275	400	350	450	5	20	280	18	98	8	90	75	42	8	4.5	12	18

備考 1. 挙フランジハメコミ部の上下寸法差は日本工業規格 (JIS) B0401 ハメアイ方式 "h7" ◎軸端の上下寸法差は "h6" による。
2. 立形の場合は LL 寸法に H 寸法を加え、アイボルトが鎖縫の位置と 2 個所になる。

表 2.2 全閉外扇形フラットモータ外寸法 (mm)



キロワット			ワク番号	電動機										軸端								
2極	4極	6極		D	IE	KD	KL	LA	※LB	LC	LE	LG	LL	LZ	LR	LW	Q	QK	◎S	T	U	W
0.4	0.4	0.2	1100L	220	—	22	148	215	180	250	3.5	12	140	11	48	8	40	25	22	7	4	7
0.75	0.75	0.4	1100M	252	—	22	165	265	230	300	4	16	165	15	58	8	50	35	22	7	4	7
1.5	1.5	0.75	1300M	252	—	22	165	265	230	300	4	16	180	15	68	8	60	45	28	7	4	7
2.2	2.2	1.5	1300L	252	—	22	165	265	230	300	4	16	210	15	68	8	60	45	28	7	4	7
3.7	3.7	2.2	1600M	306	193	25	201	300	250	350	5	16	235	15	88	8	80	65	35	8	4.5	10
5.5	5.5	3.7	1600L	306	193	25	201	300	250	350	5	16	265	18	88	8	80	65	35	8	4.5	10
7.5	7.5	5.5	1800M	372	222	35	280	400	350	450	5	20	280	18	98	8	90	75	42	8	4.5	12
11	11	7.5	1800L	372	222	35	280	400	350	450	5	20	280	18	98	8	90	75	42	8	4.5	12

備考 1. 挙フランジハメコミ部の上下寸法差は日本工業規格 (JIS) B0401 ハメアイ方式 "h7" ◎軸端の上下寸法差は "h6" による。
2. 立形の場合にはアイボルトが鎖縫の位置と 2 個所になる。

(2) コイルエンド長さを短くすることは、軸方向長さに大きな効果があり、この点については、巻線形状、線径、ミヅ占積率、絶縁仕様などを検討し、標準電動機より数10%短縮した。これは寸法的な面のほかに、特性の向上および冷却の上で大きな効果が得られる。

(3) 外被の構造としては、負荷側ブラケットと外ワクを一体の鉄物とした、いわゆる2分割方式を採用し、構造を簡素化した。防滴形ではアルミニウムドリッピングファンと、反負荷側ブラケットの構成を十分考慮して、とくに内部ファンを付けずに効果的な通風を行なっている。全閉外扇形ではとくに外扇ファンの幅を大幅に減少させ外径を大きくしたことと、ファンの形状を改良したことにより、十分な冷却を行なうことができる。外扇カバーは、すべて鋼板製にして、寸法短縮と軽量化に寄与している。

このようにして、軸方向寸法を半減することに成功した。なお当社フラットモータルは、法兰寸法については、すべて標準電動機の一段上のワク番ではあるが、標準電動機と同じL-50系列法兰(JEM 1125)を採用しており、軸端寸法は標準電動機の同一出力のものに合わせ、使用者の便を計っている。また軸受には油漏れのほとんどない非接触形ゴムシールドボールベアリングを使用し、グリースは耐老化性、潤滑性能のすぐれたリチウム系グリースを使用しているため、長い寿命を保証できる。さらにブラケットの軸貫通部分にはフランジを付け、外部からベアリング内部へじんあいや水、油などが侵入するのを防止している。

表2.1, 2.2に、今回開発された当社フラットモータルの外形寸法を示す。

3. 特 性

この電動機ではE種絶縁を採用しており、耐熱性は標準電動機より一段と向上している。電動機を小形化してゆくと、放熱面積が減少するので、温度上昇をいかにして低く抑えるかが重要な問題となる。とくに全閉外扇形では冷却のほとんどが外被のファンの表面から外部空気への熱伝達によって行なわれているので、フラットモータルのように、軸方向長さの短いものでは非常に不利となる。この点については放熱ファンの数を増すこと、あるいは回転子エンドリッピングファンにより内気を循環させて、ブラケットや外ワク全体からの放熱量を増し、さらに外扇ファンの改良と相まって、

E種絶縁の許容温度上昇に余裕をもって製作することに成功した。したがって、温度変化により精度の狂うのをきらうような高級な工作機などにも十分使用できる。

また、トルク特性は標準電動機とほぼ同等に設計されており、その他の特性もA種絶縁電動機のJIS規格値に余裕をもって合格する。さらに、回転子鉄心は、全閉ミヅを採用するとか、特殊な化学処理を施すなどにより、漂遊負荷損を大幅に減少させたこと、加速時のトルク曲線はほとんどタルミのない点が大きな特長となっている。

騒音は、ファン形状の改良、回転子ミヅのスキーなどにより非常に低く抑えられており、振動に関しても、厳選されたポールベアリングを使用し、回転子はダイナミックバランスをとるなど、標準電動機と同様に、十分考慮が払われている。

4. 用 途

一般に、機械に電動機を取り付ける場合、十分なスペースがある場合は少なく、電動機はできるだけ小形であることが望ましい。このような場合、フラットモータルを使用すれば、機械全体をコンパクトにまとめ上げることができ、さらに外観的にもスマートになり、商品価値を向上できる。したがって、工作機械、減速機などに納入した実績が最も多いが、そのほか小形化が要求されるあらゆる用途に使用できる。もちろん、使用環境により、B種絶縁のもの、あるいは屋外形などの応用品も製作している。

5. む す び

世界的なすう勢として、電動機は小形軽量化の方向に向っており、われわれも常にそのために技術の向上をめざしているが、もう一つの方向として、電動機系列の多様化があげられよう。すなわち、標準電動機はたしかにほとんどの要求にこたえることができ、すぐれた性能をもっているが、すべての用途に最も適した電動機となることはできない。あらゆる工業は急速に高度化、専門化しつつあり、用途用途に最適の特性、構造を有する電動機の需要が多くなってきている。ここに説明したSBU、SFU形(三菱フラットモータル)はそうした系列の電動機の一つであり、さらに、各種の用途向の系列を開発するための需要家各位のご指示をお願いし、またご期待にそいたいと考えている。

リラクタンスマートル

梶谷定之*・和田義彦*

Reluctance Motors

Nagoya Works Sadayuki KAJITANI・Yoshihiko WADA

Reluctance motors, being synchronous motors having salient type squirrel cage rotors, are not in need of DC excitation, of simple construction, sturdy, easy to handle and inexpensive. They are widely applied to industries where speed change is not allowed and synchronous operation with other machines is called for because of such a load as spinning and paper manufacturing. On the other hand there are handicaps of poor characteristics—particularly poor power factor and poor torque—and the dimensions becoming large for the same output as other machines. This article describes the construction and principle of reluctance motors with discussion on the relation between their rotor construction and characteristics. Finally, introduction to Mitsubishi reluctance motor as an outcome of improvement based on the above consideration.

1. まえがき

近年化成、紡績、製紙工場などのオートメーション化に伴って、均質な紡糸、抄紙作業を行なうため、その駆動装置として負荷によって速度の変動しない同期電動機が要求されることが多くなってきた。

リラクタンスマートルは別名を反動電動機または反作用電動機と呼ばれる一種の誘導同期電動機でトツ(凸)極のカゴ形回転子をもち、起動時は誘導電動機として自己起動ができ、起動完了後は同期電動機として同期速度で運転することができるものである。さらに普通の同期電動機のように直流励磁を必要とせず、そのための界磁巻線、スリップリング、ブラシおよび直流電源設備が不要となるので、構造簡単、取り扱いが容易であることから手軽で便利な同期電動機として広く使用されている。

この反面、界磁を励磁するための電流を固定子(電機子)側から供給しなければならないので、力率が悪く、したがって同一出力における電流が大きく、機械寸法も大きくなる欠点があるので、従来は比較的小容量のものが計測用、通信用などに使用されるにすぎなかった。

リラクタンスマートルの特性の改善にはまず同一機械寸法で、より大きい最大同期トルクを出すようにすることが望まれる。

このためには回転子の形状、すなわち極弧と極間隔の関係、極弧の形状の適正化、直軸および横軸磁束に対する磁路および空ゲギの大きさなどに十分の考慮を払う必要がある。従来のリラクタンスマートルは比較的小容量機を対象としていたため、回転子の構造についてとくに考慮を払うことなく、単に誘導電動機のカゴ形回転子にトツ(凸)極加工を施したもののが多かった。

当社では、リラクタンスマートル特性の改善については種々の実験研究を重ね、従来のものに比べ特性の大幅な改良に成功している。

本文では、まずリラクタンスマートルの構造、原理について説明を加え、さらに回転子構造と特性との関係について考察を加え、合わせてこれらの結果に基づいて改良を加えた当社のリラクタンスマートルについて紹介を行なうものである。

2. 構 造

リラクタンスマートルの外観はカゴ形誘導電動機となんら変わりなく、その構造も通常のものでは、単にカゴ形回転子の表面に固定子(電機子)巻線の極数に等しいトツ(凸)極を設ける以外、ほとんど異なるところはない。固定子には誘導電動機と同様の三相巻線が施され、回転子(界磁)は鉄心抜形または加工によってトツ(凸)極形状をもたせ、これにカゴ形導体およびエッジリングを施したものである。

図2.1は通常のカゴ形回転子を加工によりトツ(凸)極形状としたリラクタンスマートルの回転子(界磁)構造を示したものである。

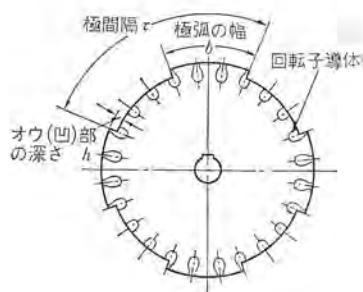


図2.1 リラクタンスマートルの回転子構造
Fig. 2.1 Rotor construction of simple reluctance motor.

3. 回 転 原 理

リラクタンスマートルの固定子に電源を投入すれば、固定子には三相巻線が施されているから、その巻線によって $120 f/P$ (rpm) なる速度をもった回転磁界を生ずる。 $[f: \text{電源周波数 c/s } P: \text{極数}]$ 初めに回転子をなんらかの方法で固定子回転磁界の方向に回転させてやれば、回転子上のトツ(凸)極におけるリラクタンス(磁気抵抗)は、オウ(凹)極部におけるリラクタンスよりも小さいので、空ゲギを通過する磁束はトツ(凸)極部に集中するため、界磁極を固定子巻線磁界で拘束しようとする。このため固定子回転磁界の速度と同一速度で回転子は回転する。もし外部負荷がかかれれば、界磁極の中心に対してある角度だけ遅れる。すると図3.1に示すように回転



図 3.1 回転原理の説明
Fig. 3.1 Description of rotating principle.

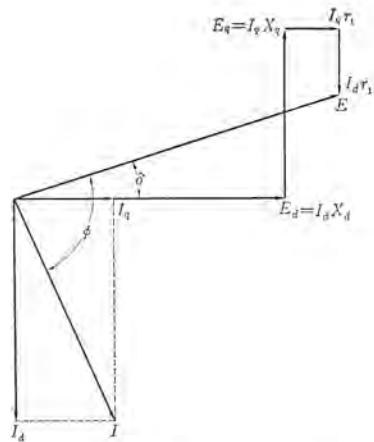


図 4.1 ベクトル図
Fig. 4.1 Vector diagram.

磁界の切線方向に引張り力を生ずる。これがトルクとなって回転子は同期速度で回転することになる。

4. 特 性

4.1 ベクトル図と同期特性の算定

突極同期機の解析には、固定子（電機子）起磁力を磁極の中心に最大値をもつものと磁極間の間隔の中心に最大値をもつものとの2成分に分けて考える2反作用法が便利である。

2 反作用法による リラクタンスマートル の同期速度におけるベクトル図は図 4.1 で示される。ここにおいて

E : 相電圧

I : 相電流

E_d : 直軸誘起起電力

I_d : 直軸電流

E_q : 横軸誘起起電力

I_q : 横軸電流

X_d : 直軸 リアクタンス

X_q : 横軸 リアクタンス

r_1 : 固定子巻線相抵抗

δ : 相電圧と直軸誘起起電力との位相角

ϕ : 相電圧と相電流との位相角

を与える。このベクトル図から次の関係が成立する。

$$E = I_d X_d + I_q r_1 + j(I_q X_q - I_d r_1)$$

これを I_d , I_q について解けば

$$I_d = \frac{E}{X_d} \cdot \frac{1}{1 + (r_1/X_d)(r_1/X_q)} \left(\cos \delta - \frac{r_1}{X_q} \sin \delta \right) \quad \dots \dots (4.1)$$

$$I_q = \frac{E}{X_d} \cdot \frac{1}{1 + (r_1/X_d)(r_1/X_q)} \left(\frac{X_d}{X_q} \sin \delta + \frac{r_1}{X_q} \cos \delta \right) \quad \dots \dots (4.2)$$

を得る。よって相電流は

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad \dots \dots (4.3)$$

で与えられる。電動機入力 P は

$$P = 3E \cdot I \cos \phi = 3E(I_q \cos \delta - I_d \sin \delta) \\ = \frac{3}{2} \cdot \frac{E^2}{X_d} \cdot \frac{1}{1 + (r_1/X_d)(r_1/X_q)} \cdot \left[\left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right) \sin 2\delta + \frac{2r_1}{X_q} \right] \quad (4.4)$$

となる。出力 P_0 は入力 P から電動機全損失（鉄損+機械損+固定子巻線銅損）を差し引いたものとして与えられる。したがって電動機の効率は $\eta = P_0/P$, 力率は $PF = P/3EI$ によって求めることができる。

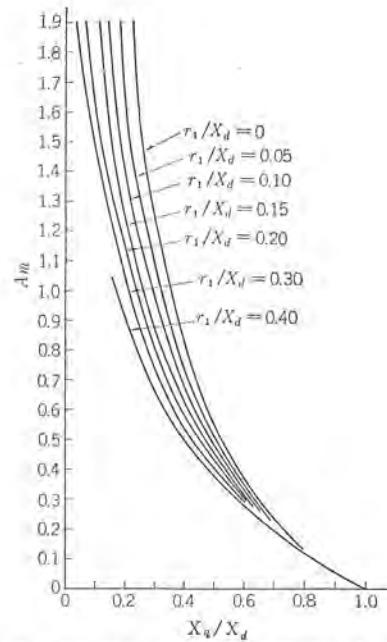


図 4.2 最大同期トルクの計算に用いる A_m の値
Fig. 4.2 X_q/X_d vs A_m curve for calculation of max syn torque.

4.2 最大同期トルク

電動機の損失中、鉄損および機械損は同期速度においては本質的に一定とみなしうるので、最大同期トルクは入力 P と固定子巻線銅損との差のみを考え、この値が最大値となるときに生ずるものと考えればよい。すなわち $P_1 = (\text{入力} - \text{固定子銅損})$ で与えれば式 (4.1)～(4.4) を利用して

$$P_1 = 3 \cdot \frac{E^2}{X_d} \cdot \frac{1}{1 + (r_1/X_d)(r_1/X_q)} \cdot A \quad \dots \dots (4.5)$$

で与えることができる。ここで

$$A = \frac{X_d}{X_q} \left(1 - 2 \frac{r_1}{X_d} \cdot B \right) \left(1 - \frac{X_q}{X_d} \right) \sin \delta \cdot \cos^2 \delta$$

$$- B \left(\frac{X_d}{X_q} \sin^2 \delta + \frac{X_q}{X_d} \cos^2 \delta - 1 \right)$$

$$B = \frac{r_1}{X_d} \cdot \frac{1}{1 + (r_1/X_d)^2}$$

である。よって最大同期トルクを求めるには P_1 の最大値を求めればよいが、これは A の最大値を求ることにより得られる。

δ に対する A の最大値 A_m は X_q/X_d および r_1/X_d の各値に対して変化する値として得られる。この関係は図 4.2 に示される。

固定子巻線抵抗を省略すれば リラクタンスマートル の同期トルクは

$$T = \frac{3}{2} \cdot E^2 \cdot \frac{1}{X_d} \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right) \sin 2\delta \quad (\text{Syn. Watt}) \quad \dots \dots (4.6)$$

で与えられ、したがって最大同期トルクは

$$T_m = \frac{3}{2} \cdot E^2 \cdot \frac{1}{X_d} \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right) \quad (\text{Syn. Watt}) \quad \dots \dots (4.7)$$

となる。一般に リラクタンスマートル では r_1 は X_d に比べ小さいので、式 (4.7) の近似式で最大同期化トルクを求めてても誤差は少なく、通常の計算上のめやすをつけるために使用すると便利である。

上記の算式における最大同期トルクは、鉄損を同期速度において一定と仮定して求めたが、このほか、負荷電流の関数として増減する漂遊負荷損のため、上記にて算定した値より一般的には減少するものである。

4.3 直軸および横軸リアクタンス

前節の解析にあたっては、電機子反作用による同期回転磁界を

界磁極中心において最大値をもつ直軸磁界と、界磁極間の中心において最大値をもつ横軸磁界とに分け、これらの磁界による直軸および横軸電機子反作用 リアクタンスを算定する。漏れ リアクタンスは、電機子反作用 リアクタンスに比べ一般に小さいから、これを無視すれば、直軸および横軸 リアクタンスは次のように与えられる。

$$X_d = X \cdot C_{d1} \cdot \lambda_a \quad \dots \dots \dots (4.8)$$

$$X_q = X \cdot C_{q1} \cdot \lambda_a \quad \dots \dots \dots (4.9)$$

ここに X は固定子巻線、鉄心幅、電源周波数から決まる定数で λ_a は 1 極あたりのパーミアンスを与える。

C_{d1} は直軸電機子電流によって生ずる空ゲキ 磁束基本波と、磁極面全体に均一空ゲキをもつ場合に生ずる磁極の空ゲキ 磁束基本波の比を、 C_{q1} は横軸電機子電流によって生ずる空ゲキ 磁束基本波と磁極面全体に均一空ゲキをもつ場合に生ずる磁極の空ゲキ 磁束基本波との比を表わすもので、それぞれ直軸および横軸磁束分布係数と呼ばれる。 C_{d1} は $C_{d1} = C_m \cdot C_1$ という形で表わされ、 C_m を減磁係数、 C_1 を磁束分布係数と呼び、電機子起磁力の基本波によって生ずる空ゲキ 磁束基本波と、それと最大値が同じの界磁により生ずる空ゲキ 磁束基本波との比を与えるもので、普通界磁の形状から図形上の操作で求められる。 C_m は一様な空ゲキの場合

$$C_m = \frac{\alpha\pi + \sin\alpha\pi}{4\sin\alpha \cdot \frac{\pi}{2}} \quad \dots \dots \dots (4.10)$$

で与えられる。 C_{d1} および C_{q1} は磁極面全体に一様な空ゲキをもつ場合、図 4.3, 4.4 から直接求めることもできる、次の形で与えられる。

$$C_{d1} = \frac{\alpha\pi + \sin\alpha\pi}{\pi} \quad \dots \dots \dots (4.11)$$

$$C_{q1} = \frac{\alpha\pi - \sin\alpha\pi + \frac{2}{3}\cos\alpha \cdot \frac{\pi}{2}}{\pi} \quad \dots \dots \dots (4.12)$$

ここで α は極弧の幅/極間隔である。

C_{q1} の値は、通常極間部分での磁束の大きさをその最大値の $1/6$ として求めたものである。空ゲキ 分布が一様でない場合、 C_{d1} および C_{q1} は上記と異なった値を示す。

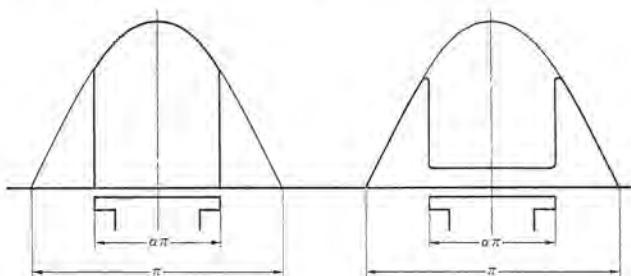
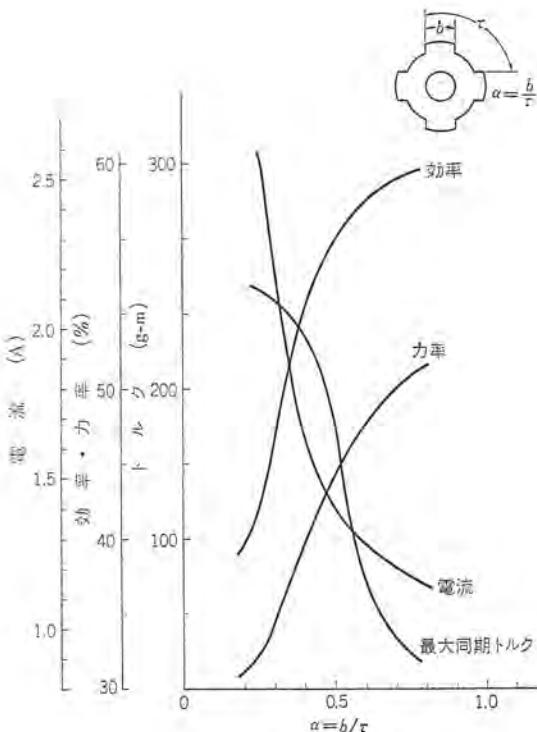


図 4.3 直軸磁束分布
Fig. 4.3 Direct-axis flux distribution.

図 4.4 横軸磁束分布
Fig. 4.4 Quadrature-axis flux distribution.

4.4 界磁構造と同期特性との関係

リラクタンスマートルの同期トルクは固定子巻線抵抗を省略した場合、式 (4.6) で示されることはずすでに述べた。この式によれば、同期トルクは X_d に逆比例して X_d/X_q にはほぼ比例するという関係がある。リラクタンスマートルの特性を改善する方法は、同一寸法において、できるだけ最大同期トルクを大きくすることであり、これが他の特性の改善につながることになる。同期トルクを増すには、 X_d/X_q を増加させ、かつ X_d を減少させることが必要である。あまりに X_d を減らせば式 (4.1), (4.2) から無電負荷電流を増すこととなり、したがって力率を低下させ、それに関連する諸特



200 V 60 c/s 効率、力率、電流は 75 g·m トルクにおける値を示す $\beta = 0.0302$

図 4.5 極弧と極間隔の比と同期特性との関係

Fig. 4.5 Relation between ratio of pole arc to polepitch and motor characteristics.

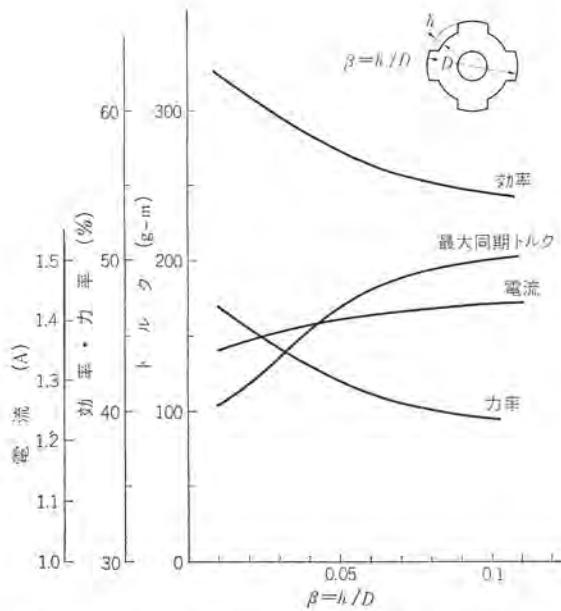
性を悪化させることになって好ましくない。これらの諸特性を低下させることなく同期トルクを向上させるためには、 X_d をほぼ一定としておき、 X_q を大きく減少させ X_d/X_q の値を増加させるのがよい。 X_q は横軸磁束の量によってきまるので横軸磁束をできるだけ通らないようにすれば X_q を減少させることができる。また逆に X_d を増加させるような方法も同時に実行ねば力率を改善した上、さらにトルク特性を向上させることができる。

(1) 極弧の幅と同期特性との関係

極弧の幅を狭くすれば X_q は減少する。 X_d はほぼ一定値をとるが、ある限度をすぎると急激に低下する。すなわち極弧の幅を減少させることにより X_d/X_q を大きくすることができる。しかしあまり減少させると、 X_d は減少するため無負荷電流が増加して特性を悪化させる。図 4.5 は極弧と極間隔の比 b/π と電動機特性との関係を示したもので α の変化は電動機特性に大きく影響し、 α の値を減少すれば最大同期トルクは増大するが、他の特性は急激に悪化する。逆に、 α の値が増加すれば特性は改善されるが、最大同期トルクは大幅に減少する。 α の値はこれら特性値全般を考慮して決定されるが、一般に 0.5 前後の値が選ばれる。

(2) 磁極の深さと同期特性との関係

界磁極の深さを深くすれば、横軸磁束は減少し X_q が小さくなるため X_d/X_q の値を増加することができ、最大同期トルクを増加できる。すなわち横軸磁束の磁極間隔における値は、通常 $1/6$ として計算しているが、界磁極の深さの増大はこの値を小さくすることになるわけである。またこの深さの影響は極弧と極間隔の比 α と関連するもので、界磁鉄心の外径に対する磁極の深さの比を β とすれば、 α の小さいときは β の値により X_d/X_q の値は非常に影響をうける。また β の値が小さい場合は全般に特性に与える影響は大きいが、ある値以上になればほとんど影響はなくなる。図 4.6 は $\alpha=0.55$ の場合、 β の変化に対する電動



200 V 50 c/s 効率、力率、電流は 75 g·m トルクにおける値を示す $\alpha=0.55$

図 4.6 突極部の深さと特性との関係
Fig. 4.6 Relation between depth of pole and motor characteristics.

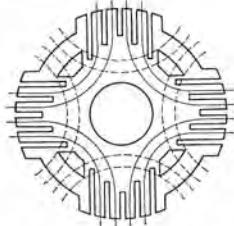


図 4.7 界磁鉄心内の磁束経路
Fig. 4.7 Flux path in pole core.

機特性を示したもので、これで明らかなように $\alpha=0.5$ 以上の場合には $\beta=0.1$ 程度になれば、界磁の深さの影響はほとんど無視できる。 β の値の決定は α と重大な関係があるが、 $\alpha=0.5$ 程度であれば β は普通 0.05~0.1 の範囲に選定せられる。

(3) 界磁鉄心の構造と同期特性との関係

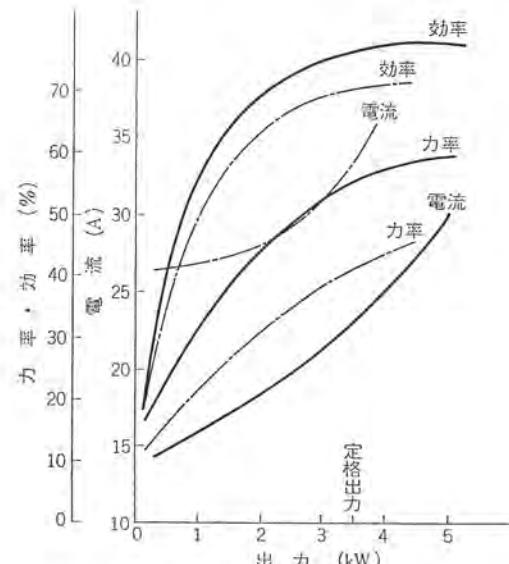
横軸磁束を減少させ、 X_q を減らすと同時に直軸磁束を通りやすくして X_d を増す方法として、磁気回路の構造を特殊構造とし、直軸に対しては、よりリラクタンスを小さく、横軸に対しては大きくする手段をとることが特性向上に効果がある。よって図 4.7 に示すような界磁鉄心を考えた。すなわち横軸磁束は図中破線で示される経路をたどって界磁鉄心を通過するから、図に示すような横軸磁束を妨げるようなくぎ部分を設け、横軸磁束に対し磁気抵抗を増加させる。逆に直軸分に対しては直軸磁束が通りやすいような磁路を形成し、直軸磁束に対する磁気抵抗を減少させる。この場合、直軸磁束に対して局部的な磁気飽和の起きないよう、その磁路の面積を選ばねばならないことはいうまでもない。図 4.8 はこの考察により製作された界磁鉄心を示す。

固定子巻線を同一として、この界磁鉄心を使用した電動機と、単にトツ極加工を施した界磁をもつ電動機との特性の比較を行なった。

この特性は図 4.9 に示される。もちろんこの場合は α と β とは両鉄心とも等しく製作した。すなわち 3.7 kW 4P について実験したところ、効率において約 5%、力率において約 10% 以上という格段の向上を示した。さらに最大同期トルクも向上し、



図 4.8 新形界磁鉄心
Fig. 4.8 New type pole core.



200 V 60 c/s 3.7 kW 4P
新形界磁鉄心·····実験
従来の界磁鉄心·····点鎖線

図 4.9 リラクタンスマートル 特性曲線
Fig. 4.9 Reluctance motor load characteristics curve.

直軸および横軸磁束に対して磁気抵抗を考慮した界磁鉄心は好結果をあげることを確認した。また実際に X_d および X_q を実測して X_d/X_q の値が増加していることを確認した。これは“スペリ法”といわれる方法で、求めようとするリラクタンスマートルと同じ極数で出力の十分大きい誘導電動機とを直結し、リラクタンスマートルの電機子巻線を定格電圧、定格周波数で励磁する。一方誘導電動機を定格電圧で、リラクタンスマートルよりわずかに遅い同期速度になるような周波数で運転する。この場合、リラクタンスマートルと誘導電動機とは同一回転方向になるよう結線しておく必要がある。誘導電動機のほうが出力が大きいため、リラクタンスマートルとともにその同期速度に対し、わずかなスペリをもって回転する。界磁のトツ極の中心およびオウ極の中心が固定子磁極の中心を通過する際、電流の値が変化する。これをオシログラフで測定し、そのときの電圧/最少電流値が X_d を、電圧/最大電流値が X_q を与えるとして、それぞれの値を近似的に求めることができる。この方法により、単にトツ極加工を行なったのみの界磁では $X_d/X_q=3.1$ であったのに対し、磁気抵抗を考慮した界磁では $X_d/X_q=3.6$ となり、したがって (X_d/X_q-1) の比は約 25% の増加を示していることが確認できた。

(4) 極弧の形状と同期特性との関係

極弧の形状を改善することによっても同期特性の向上が期待で

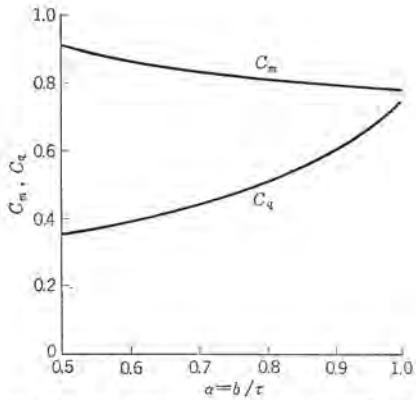


図 4.10 空隙一定のときの α と C_m , C_q との関係
Fig. 4.10 Relation between α and C_m , C_q when gap length on pole arc is constant.

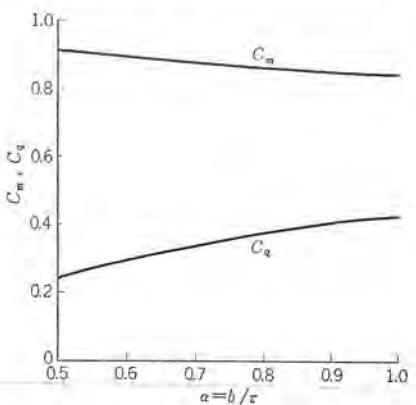


図 4.11 界磁波形が正弦波分布となるように空隙を決定したときの α と C_m , C_q との関係
Fig. 4.11 Relation between α and C_m , C_q when gap length on pole are determined for sine distributed flux wave form.

きる。すなわち 4.3 節において述べたように、直軸および横軸リアクタンスを与える C_{d1} および C_{q1} は極弧の形状を変化させた場合変化を生ずる。すなわち極弧において一定空隙の場合は、すでに述べた式 (4.11), (4.12) で与えられるが、しかるに極弧の形状を変更し、界磁束の形状が正弦波になるように空隙の分布を行なえば、この場合の C_m および C_q は次の式で与えられる。

$$C_m = \frac{4}{3} \frac{\sin \alpha \frac{\pi}{2} \left(\cos^2 \alpha \cdot \frac{\pi}{2} + 2 \right)}{\alpha \pi + \sin \alpha \pi} \quad \dots \dots \dots (4.12)$$

$$C_q = \frac{4}{3} \frac{\sin^3 \alpha \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4} \cos^2 \alpha \cdot \frac{\pi}{2}}{\alpha \pi + \sin \alpha \pi} \quad \dots \dots \dots (4.13)$$

で与えられる。これらの関係は図 4.10, 4.11 で示される。 X_d および X_q は、これら C_m および C_q に比例するから、空隙一定の界磁極に対し、空隙分布を変え、界磁束分布が正弦波になるような界磁極の形状を選定したときは X_d/X_q を増加させることができ。この場合同一 α について X_d の値はほとんど変化せず X_q が減少するので同期特性を全般に向上させることができる。すなわち極弧の形状は同期特性に大きく影響するものであり、この形状の決定には十分の考慮が必要である。任意の極弧については適切な磁束分布を図形上の操作により求め C_m および C_q を算定する必要がある。

4.5 周波数特性と同期特性との関係

リアクタンスマートルは紡糸機などの同期運転用に使用される場合、周波数変換機を電源として周波数制御を行なう場合が多い。した

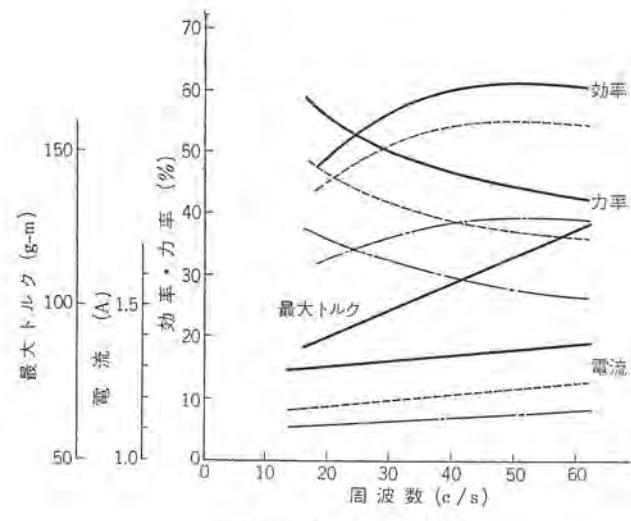


図 4.12 周波数の変化と同期特性との関係
Fig. 4.12 Relation between frequency and motor characteristics.

がって周波数特性と同期特性との関係を次に示し参考に供する。周波数制御を行なう場合は、原則として電圧を周波数に比例させ、定トルク特性となるような制御を行なうのが普通である。定トルク以上の制御を行なう場合は、モータの磁気特性の関係から余裕のあるモータを使用しなければならないが、設計上の考慮が必要となる。任意のモータを選定し、定トルク負荷を与えて、電圧一周波数が比例するように電源を制御した場合の特性を図 4.12 に示す。この試験結果によれば、次のように考察することができる。

(1) 電流はほぼ一定の値を保つが周波数が低下した場合、固定子巻線の電圧降下の影響が強くなってわずかな低下を示す。

(2) 損失は周波数の低下による鉄損の減少、漂遊損の減少のため、周波数が低下するにつれ減少するが、損失の主成分である銅損が周波数にかかわらず一定のため、回転数の低下による出力の減少により効率は低下の傾向を示す。

(3) 力率は励磁電流が一定であること、周波数の低下によるリアクタンス 分の減少と、それに効率の低下による有効分電流の増加により周波数の低下に伴いやや向上する。

したがって電流値は効率・力率の変動に影響をうけるが、全体として上記のような傾向をたどるものと思われる。

(4) 最大同期トルクは周波数の低下につれ低下する傾向を示す。これは周波数の低下に伴ってリアクタンス 分が減少し、固定子相抵抗値とリアクタンス の値との関係が変化し、 (r_1/X_d) および (r_1/X_q) の値が無視できなくなるためと考えられる。したがって同一最大トルクを得るためには電圧一周波数の関係を比例関係よりもやや大きくすればよいが、このようにすれば、他の同期特性に変化を生ずることは明らかである。

4.6 損失

リアクタンスマートルでは、同期速度で回転中は、スペリはまったくないから回転子導体内に基本波電流は流れない。すなわち二次銅損はまったく生じない。しかしながら、固定子巻線が有限個のミリ内に納められているため固定子起磁力は階段状の波形となり、固定子磁束中に相帶高調波およびミリ高調波などの高調波成分が含まれる。これら高調波成分は基本波同期速度に対してスペリをもっているため回転子導体中に高調波スペリ電流を生じ、また回

転子表面にウズ電流を発生しこれが漂遊損となる。高調波成分は負荷電流の増加とともに増加し、したがって漂遊損は負荷の増加とともに増大する。

一般に高調波成分により回転子電流は基本波に比べ高い周波数をもつので、主として損失は回転子表面に発生する。

実験によればトッ極加工を施した回転子のオウ極部に導体(アルミ)を充満したものと、まったく取り除いたものでは、効率において約8~10%の増加を、温度上昇においては約20°Cの減少をみていることから、これら高調波成分による回転子表面での増大については、設計上十分な考慮を払わねばならないと考える。

一般にリラクタンスマートルは小形機が多いため、回転子導体はアルミダイカストにより一体として鋳造される場合が多い。

この場合普通のカゴ形回転子をトッ極加工したものでは、オウ極部にアルミが残らないから問題とはならないが、この場合は、すでに述べたように同期特性がよくないので、鉄心抜板から界磁極構造を考慮した回転子を使用する。このようなとき、オウ極部はあらかじめ抜板として加工されているため、この部分に鋲込みによりアルミが詰まることになる。オウ極部にアルミを詰めないでダイカストを施すことは普通困難で、このため、せっかく同期特性を改善しても、オウ極部分のアルミのため異常損失を発生し使用に耐えなくなる場合がある。この部分の損失を軽減する方法として、オウ極部アルミの表面に中心方向のミヅを多数入れ、損失を減少させるように考慮を払うこともあるが、完全にオウ極部の損失をなくすることはできない。当社では、鉄心抜板を使用した界磁鉄心のアルミダイカスト法として画期的な方法を考案し、これによってアルミダイカスト法によってもオウ極部にアルミが入ることがまったくなくなり、通常回転子をオウ極加工したものと同等になり、さらに界磁鉄心の形状の改善により、同期特性良好で異常損失が少なく、温度上昇の低い性能のすぐれたリラクタンスマートルの製作に成功した。

5. リラクタンスマートルの用途

リラクタンスマートルは構造簡単で取り扱い容易なため、特性上の改良が行なわれるならば、相当の広範囲にわたって使用されるものと考えられる。とくに負荷によって速度の変動の許されない用途、および各機械系との間に同期運転を必要とする用途に使用すれば有効にその目的を達成できる。簡単なものとしては、通信または自動制御用、電気時計、ガバナーなどのような周波数と回転数との間の一定の関係が成立することが望まれる用途に使用される。

最近増加した用途としては、紡糸機、抄紙機などのような糸の径や紙の厚さの均質なものを得るために駆動装置である。これは負荷によって変動することなく常に回転数を一定に保ちしかもこれら多数の機械の回転系について同期運転が必要であり、さらに糸または紙の種類によって、それら機械の回転数を一齊に変える必要も生ずる。このような用途にリラクタンスマートルを使用すれば、容易に、その要求を満たすことができる。すなわちこれらのモータルを各回転主軸または送り装置の動力源として使用し、電源として周波数変換機を使用して、この系全体の周波数を変化すれば同期速度が変わり、簡単に速度調整ができる。しかも、いったんセ

ットされれば、規定値以下の負荷ではその大きさにかかわらず一定の速度が得られるわけである。この場合、電源となる周波数変換機の駆動電動機として使用すれば、負荷の変動に対しても周波数の変化はまったくなくさらに好結果が得られる。

最近、歯車研削盤の駆動装置として研石主軸の回転数と被研削物の送り機構との速度とを同期させる用途に使用せられるようになつた。これは、歯車の研削精度を高めるために使用せられるもので、駆動機構と送り機構との間は回転数の同期のみではなく、両者の偏角の間にも大きな誤差を生じてはならないほどの精度を要求されるものである。種々検討の結果、両者の偏角の差は機械角で10°以内に収めることができ、好調に使用されている。

今後このような精密工作機としての用途も拡大されるようと考える。

このほか、各種測定器の動力源としても使用せられている。

6. む す び

以上、リラクタンスマートルの構造、特性の概要について実例をあげて説明した。

すなわちリラクタンスマートルでは界磁極の構造を十分検討することにより、その特性を相当向上させることができる。とくに直軸および横軸に対する磁気抵抗の適切な処置は著しい効果をあげることが確認された。

また負荷電流による漂遊損は、オウ極部に導体が存在するとき顕著な増加を示し、電動機が使用に耐えないような温度上昇となって現われる。したがってオウ極部には抜形鉄心の場合でも、導体とくにアルミダイカストの場合アルミを詰めないよう留意しなければならないことを述べた。

リラクタンスマートルは特性が一般に悪く、ごく小容量機にしか使用されなかつたが、以上述べたような考慮を払うことにより大幅な特性の改善が可能となり、そのため約20kW程度までのものについては一般誘導電動機とほとんど変わらぬ大きさで製作ができるようになった。

現在前述の各用途に盛んに使用されつつあるが保守容易で安価という利点からますますその用途は拡大されるものと思われる。

以上のようにこのリラクタンスマートルは技術的な進歩によって最近広くご愛用いただいている機種であるが、もとより技術的になお進歩発展の余地がないわけではない。さらにこれらの点について十分な検討を加え、いっそ特性の改善に努力してゆきたいと考える。本論においては三相機のみについて述べたが単相機についても、同様な問題を今後の課題として研究してゆきたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) P. H. Trickey: Performance Calculations on Polyphase Reluctance Motors, AIEE, Trans. (1,946).
- (2) L. A. Kigove: Calculation of Syn. Machine Constants, AIEE Trans. (Dec. 1,931)
- (3) リヴァンツ (原著): 電気機械、第1巻、第2巻 修教社発行
- (4) 士師: 同期機、修教社発行

小形モートル

杉山昌司・森田清*

Fractional Horse Power Motors

Nagoya Works Masashi SUGIYAMA・Kiyoshi MORITA

Small motors with dimensions below those stipulated in the JEM agreement have no standard about their capacities and dimensions throughout the world, while their demands are on the increase nowadays. All the individual manufactures are building these motors according to their own choice as for the dimensions, paying no heed to their interchangeability, and giving troubles to the users in many cases. This article describes a suggestion of a guide to the industrial world concerned by giving the names of frame size as a result of studying the foreign standards of these ununified small motors and also by establishing a classification with capacities and dimensions. Description is also made on Mitsubishi small motors about their features backed up by actual examples for the reference to users of motors.

1. まえがき

電化ブームの波は近代産業の革命ともいべき事務用機械や自動販売機およびその他の自動機器の手足として小形モートルの需要を急増するに至った。さらに貿易自由化により諸外国の各種自動機器を目にすることの多い機会に数多く恵まれるのであるが、それらの駆動源となる小形モートルは直流機を始めとして、単相整流子電動機、単相および三相誘導電動機、限取極電動機および特殊電動機などモートルと考えられるあらゆるもののが使用されている。わが国でも当社をはじめ数多くのメーカーが製造販売にしのぎを削っているが、これらに使用されているモートルは、既設の国内規格や国外規格に定められた標準、容量、寸法よりもはるかに小形であるためいまだに容量、寸法に関する標準仕様が確立されていない。したがって各社とも長年の経験と社内事情により、固有の標準を決めて製作しているため互換性がなく、最終需要においてもその選択には大いに困却しているのではないかと考えられる。

わが社では今回これら各種類のモートルを統一された寸法と標準仕様の系列にまとめ、フレームサイズの称呼を新JEM寸法に準じて与える試みを行なった。このフレームサイズの決定と設計開発にあたっては、AS規格(American Standard)、BS規格(British Standard)、NEMA規格(National Electrical Manufacturers Associations)などで規定している誘導電動機およびユニバーサルモートルの標準値を参考とし、かつ当社長年の小形モートルの実績を総括的にまとめたものであり、高水準の小形モートルとしてあらゆる用途に需要家の満足をいただけるものと確信している。とくに標準小形モートルの特長としている点は直流機、整流子電動機、および単相、三相誘導電動機を通じて同一フレームにおいては固定子コアの外径をまったく同一とし、同時に取付寸法にはすべて互換性を持たせている点であり、また特殊品の製作にあたってはこれら標準品の主要部品を流用可能とし、従来特殊用途がその特色であった小形モートルの分野において、新規型手配を極力避け、納期短縮とコストを可能にした点である。

2. 標準系列小形モートル

前述のように全機種を通じてフレームと固定子コアの外径寸法を一つの系列化におさめたのであるがそのフレームとセンターハイト

の関係は表2.1のとおりである。

これによって各機種の外形寸法は総括的に統一することが可能となったが、標準仕様と外形寸法の関係を以下の項目において詳述する。

外観は図2.1のとおりであり近代的なスマートでコンパクトな形にまとめており、横置、開放形を標準とし、立取付また全閉形を必要とする場合はブラケットやフランジを別に用意してそのまま同一設計のもとに各容量、各形式に関する顧客の特殊な要望に対し卓越した新形モートルを供給することができるようになった。また小形モートルでは用途上とくに低騒音を要求される場合が多く、各種目的に応じたスリープ軸受およびボールベアリングの選択を行なって細心の注意を払っている。すなわちスリープベアリングとしては主として銅系焼結油軸受(JIS B1581)を使用し、保油機構をもたらし、焼結油軸受の含油量を補充して長時間の連続運転を可能にしている。

ボールベアリングについてはシールドボールベアリングを使用して騒音を少なくし、トルクを軽くするようにグリースの銘柄選択と封入量の決定を行ない、アルパニヤNo.2(シェル石油製)を使用している。また小

表2.1 標準フレームとコア外径

フレームサイズ	350	400	450	500	550
フレーム外径	62	72	82	92	102
センターハイト	35	40	45	50	55

(単位mm)



図2.1 標準小形モートル

Fig. 2.1 Standard fractional horse power motors.

形モータであるため損失をなるべく小さくするよう非接触形シール形式を採用している。

フレームおよびブラケットは小形モータであるため、軽量を目的としてアルミニウム合金鉄物 AC2AF (JIS H 5201) を使用し、ダイカスト形または金型鉄物を標準としており、一部鋼板フレームを採用しているものもある。

その他小形モータとして必要な小形、低価格などの条件を具備しており共通的な特長としては一口にまとめると次のことがあげられる。

特長

- (1) スマートでコンパクトである。
- (2) 十分な保護形式である。
- (3) 力率、能率等特性がよい。
- (4) 保守取扱が容易である。

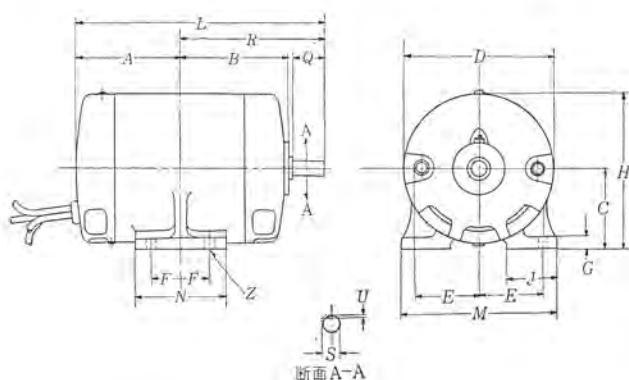
2.1. 単相誘導電動機形

2.1.1 SL形コンデンサモータ

単相誘導電動機には起動方式によって各種の形式があるが、当



図 2.2 SL形コンデンサモータ
Fig. 2.2 Type SL condenser motor.



50/60 c/s 100 V 定格連続

ワク番号	電動機												軸端				
	A	B	※C	D	E	F	G	H	J	L	M	N	Z	Q	R	◎S	U
400	60	60	40	72	35	16	6	76	27	140	85	50	4.5	18	80	6	0.5
450	65	60	45	82	35	16	6	86	27	145	85	50	4.5	18	80	6	0.5
500	75	70	50	92	40	18	6	96	30	170	100	55	5.5	23	95	8	1
550	75	70	55	102	40	18	6	106	30	170	100	55	5.5	23	95	8	1

※ 軸心高の上下寸法差は -0.500 である

◎ 輸送の上下寸法差は日本工業規格 (JIS) B 0401 6 級ハメアイ “h6” による

図 2.3 SL形コンデンサモータ 標準外形寸法
Fig. 2.3 Outline dimensions of type SL condenser motors.

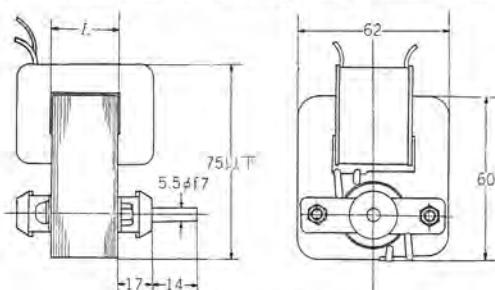


図 2.4 FE形限取極電動機外形寸法

Fig. 2.4 Outline dimensions of type FE shaded pole motors.

小形モータ・杉山・森田

表 2.2 SL形コンデンサモータ 標準出力フレーム

出力(W)	1	2	3	5	7.5	10	15	25	35	40
極数										
2	350		400			450		500		550

(ワク内の数字はフレームを示す)

表 2.3 FE形限取極電動機標準仕様

出力(W)	電圧(V)	周波数(c/s)	定格	L寸法(mm)
0.5	100	50/60	連続	15
4	*	*	10分	*
1	*	*	連続	20
6	*	*	10分	*
2	*	*	連続	25
8	*	*	10分	*
3	*	*	連続	30
10	*	*	10分	*

社の小形モータとしては能率力率がよく、取り扱い容易なコンデンサモータを標準形式としている。このコンデンサモータは構造をコンパクトにしてかつ取り扱いを容易にするため起動運転用コンデンサをブラケット内蔵させる形式を採用した。電圧は100V、極数は2、4極を標準として各出力に応じたフレームに収納しており、表2.2および図2.3にそれらの関係を示す。

2.1.2 FE形限取極電動機

低成本用モータとしてFE形限取極電動機があるが、4極の場合は上記SL形と同じフレーム呼称で製作され、その出力は表2.2に示される値の約1/2となる。

2極用としては現在コア寸法は図2.4によるものを標準としており、定格仕様は表2.3で示されるようにコア幅の変更により各出力および時間定格を定めている。

これらのモータはモータ単体としては起動トルクが小さいため、ファン用として多く使用されるほか、ギヤと組み合わせ、自動販売機用として減速電動機の形式で使用されることが多い。

2.2 FB形シリーズモータ

2.2.1 ブラシ固定形單相整流子電動機

標準単相整流子電動機はFB形と総称し、直巻特性を持たせたい、わゆるシリーズモータである。本機は100V, 50/60c/s用を標準としているがとくに直流を通電した場合でも使用できる点からユニバーサルモータとも称呼されている。外見は図2.5のとおりであるが、

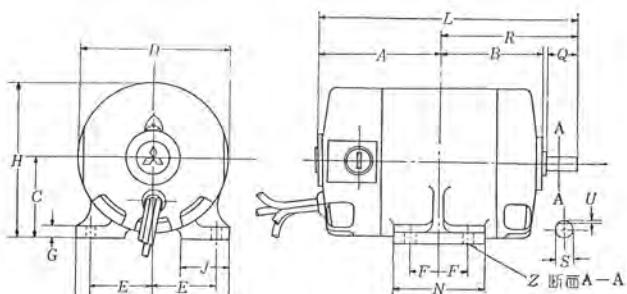


図 2.5 FB形シリーズモータ
Fig. 2.5 Type FB series motor.

表 2.4 FB形シリーズモータ 標準出力フレーム

出力(W)	7.5	10	15	25	35	50	75	100	125
回転数(rpm)									
5,000									550
8,000									
10,000			400				450		500
12,000									

(ワク内の数字はフレームを示す)



50/60 c/s 100 V 定格連続

ワク番号	電動機												軸端				
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	L	M	N	Z	Q	R	S	U
400	65	60	40	72	35	16	6	76	27	145	85	50	4.5	18	80	6	0.5
450	75	60	45	82	35	16	6	86	27	155	85	50	4.5	18	80	6	0.5
500	85	70	50	92	40	18	6	96	30	180	100	55	5.5	23	95	8	1
550	85	70	55	102	40	18	6	106	30	180	100	55	5.5	23	95	8	1

※ 軸中心高の上下寸法差は -0.500 である

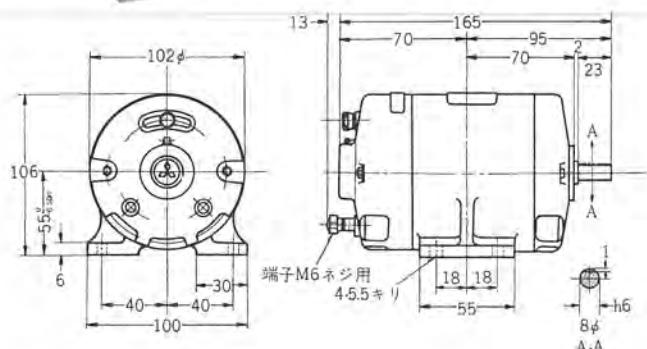
◎ 軸径の上下寸法差は日本工業規格(JIS)B 0401 6 級ハメマイ “h6” による

図 2.6 FB 形 シリーズモータ 外形寸法図

Fig. 2.6 Outline dimensions of type FB series motors.



図 2.7 FB 形 ブラシ移動形 シリーズモータ
Fig. 2.7 Type FB brush-shift series motor.



W	V	c/s	毎分回転	励磁	定格
35	100	50/60	600~3,000	直巻	連続
50	〃	〃	〃	〃	〃
75	〃	〃	〃	〃	〃

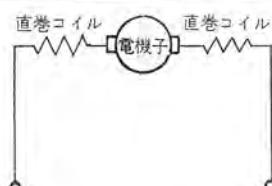


図 2.8 FB 形 ブラシ移動形 シリーズモータ 外形寸法図

Fig. 2.8 Outline dimensions of type FB brush shift series motors.

結線図

表 2.4 および図 2.6 に出力、回転数およびフレームの関係を示す。本機は設計上からとくに高速運転にその特色を有しており、ボルベアリングの採用にはとくに入念な注意を払っている。

シリーズモータ はまた電圧を変えることにより速度制御ができるためスライダックや抵抗器と組み合わせてモータ 端子電圧を変えて速度を変化させることができる。またシリーズモータ は高速回転が容易にえられることから小形軽量となり、かつ起動トルクが大きいため短時間定格のモータ としてガバ付きで使用されることがある。

2.2.2 ブラシ移動形シリーズモータ

単相整流子電動機はそれ自体 ブラシ位置を相動させることによって速度を容易に制御ができるので、前述と別の標準シリーズを持っている。この場合は外形寸法を 550 フレーム一本にして 35~75 W の出力のものをまとめるようにしている。図 2.8 にその外形寸法を示す。

2.3 FK 形小形直流電動機

直流電動機はその速度制御特性がすぐれているため精密機械用として多くの需要にこたえているが、構造的には前述の FB 形シリーズモータ とまったく同一といってよく、とくに 4,000 rpm 以下の精密機械の駆動源として大いに威力を發揮するものである。

最近では制御装置として SCR (Silicon Controlled Rectifier) と組み合わせ、小形でコンパクトな使いやすさのために速度制御モータ としての機能を十分発揮している。

フレーム外形寸法は、図 2.6 とまったく同一であるが、出力回転数とフレームの関係は表 2.5 のとおりである。



図 2.9 SCR 制御装置
Fig. 2.9 SCR control panel.

表 2.5 FK 形直流電動機標準出力 フレーム

出力(W) 回転数(rpm)	7.5	10	15	25	35	50	75
	600	500		550			
1,000		450		500		550	
1,500							
1,750							
2,500		400		450	500		550
3,000							
3,600							

(ワク内の数字はフレームを示す)

3. 設計内容

標準小形モータ は高度な設計技術により、著しく小形軽量化されているが、電気的性質および温度上昇は JIS-C-4004 回転電気機械通則および電気用品取締法第 18 条に十分余裕を持って合格する性能であり、現在型式認可の申請中である。とくにトルク特性、振動、騒音など他に見られないすぐれた値を保証している。

小形化してもなおかつ特性的にすぐれたものを作ることができたのは卓越した技術と同時に使用材料が著しく進歩したためである。

3.1 誘導電動機

単相モータ では設計的に最も困難となる点は起動特性でありその改善にあたっては合理的な設計を行なうことが非常に大事な要素となる。

すなわち、

(1) 固定子、回転子のミザ組み合わせの研究と実験により異

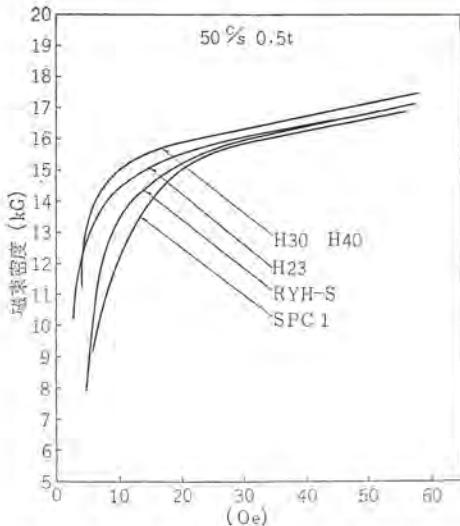


図 3.1 鉄損曲線
Fig. 3.1 Iron loss curves.

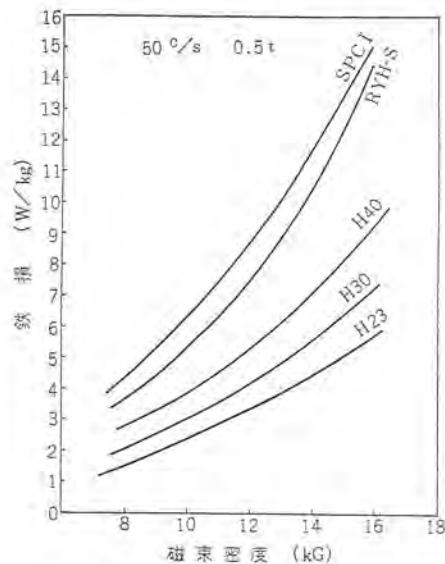


図 3.2 磁化曲線
Fig. 3.2 Magnetizing curves.

常現象を除去し、スピードトルク特性の向上、磁気騒音、振動の低減を計った。

とくに単相2極機については空ギギ高調波発生に起因する磁気力波の影響を最少限に押えるよう巻線分布を含めて検討した。

(2) 鉄心のミヅの形状および磁気材料、および電気材料の配分を適正にして効率の増大を計った。

(3) ダイキャスト回転子には各種の特殊処理を施し、本質的欠陥を除去した。

などがあげられるが、使用材料の進歩の例としては、

(1) ポリエチレン銅線を使用し、とくに高温に耐え、寿命の増大を計った。

(2) コアのミヅ絶縁にはマイラーを使用した。

(3) 口出線にはハイパーロン絶縁電線を使用し、上記(1), (2)を含めてE種用モータとして十分使用に耐え得るものである。元来これらのモータの温度上昇値は低く設計されているが、とくに周囲温度が高い場合には高い絶縁階級を採用しているので有効と考えられる。

(4) 鉄心には特性的にもすぐれしており、かつ打抜特性の優秀さとあいまって低コストを目標にしてRXH-Sを使用している。

図3.1, 3.2は鉄損曲線および磁化曲線である。

以上のように合理的設計と新規材料の採用により卓越したモータの概要がうかがわれる所以あるが、その他設計的には

(1) 鉄心ミヅを打抜作業性が良く、かつコイル収納の際できるだけ損傷の少ない底部丸形としている。

同時に磁路の長さによる励磁電流と鉄損の減少を計った。

(2) 鉄心の積層方法に対しては丸リベットカシメや、山形リベットカシメを止め、外周溶接によって作業性を高め、同時に磁気有効断面積を増した。

さらに溶接時のヒズミに対しては熱処理を行なって、損失の増大を極力少なくしている。

などの考慮を払い、その他工作的にはダイキャストされた回転子に対し、ダイナミックバランスを完全にとり、またアルミダイキャストに伴う必然的欠陥と考えられている漂遊負荷損増大という問題に対しては熱的処理、化学的処理を施している。次に限取極電動機については図3.3に2極用、図3.4に4極用鉄心の概略を示すが起動用付属品を必要としない点が大いにその特長である。

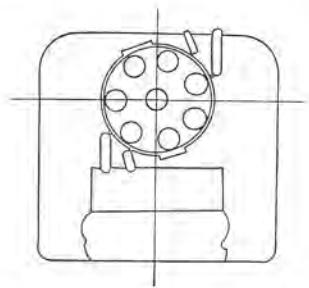


図 3.3 2極限取極電動機鉄心
Fig. 3.3 Core of two pole shaded pole motor.

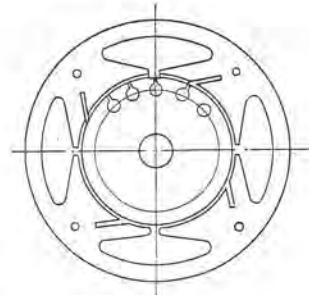


図 3.4 4極限取極電動機鉄心
Fig. 3.4 Core of four pole shaded pole motor.

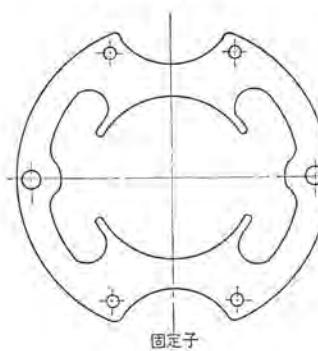


図 3.5 FB形シリーズモータコア抜板
Fig. 3.5 Core punching of type FB series motor.

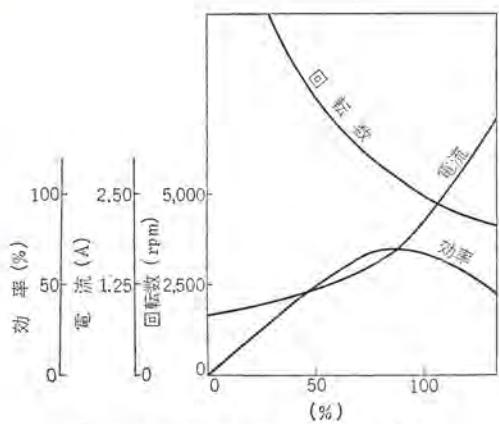
このモータにおいては元来起動トルクが少なく、従来はファン用がその主たる用途であったが、最近においてはとくに短時間定格、高起動トルク特性を持つ設計によってサーボモータとして用いられるケースが増大している。

3.2 整流子電動機

FB形シリーズモータは高起動トルク、高速運転がその特性上大きな特長であるが、標準モータでは2極機を採用して5,000 rpm以上に使用することとした。

そのコアの形状は特殊な小判状で図3.5のとおりである。とくに固定子側は直巻コイル用として極度に導電部分を少なくし、磁気有効断面積を増大させ、コアマシンとしての性格を強調した設計とした。図3.6には当所FB形標準シリーズモータの特性の一例を示す。

次にこのシリーズモータについてはNEMA規格(Part 7 Definite-Purpose Motors-Universal Motor Parts)の内で標準ステータコア外径およびブラシ周りの寸法を定めており、表3.1を参照するとわかるように今回の標準フレームおよびコア外径寸法の規準はNEMA規格がその骨子となっているわけで、ユニバーサルモータを母体として誘導電動機および直流機が一つのさんかとして統一化されたものである。したがって今後外国製品が国内に多数出回るような事態となった時でも機械本体の主要部分を変更することなくいかなる種類のモータでも当社製小形モータによってた



(FB 形 125 W 100 V 50/60 c/s 5,000 r/m 2P 連続)

図 3.6 FB 形シリーズモータ特性例
Fig. 3.6 Example of characteristics of type FB series motor.

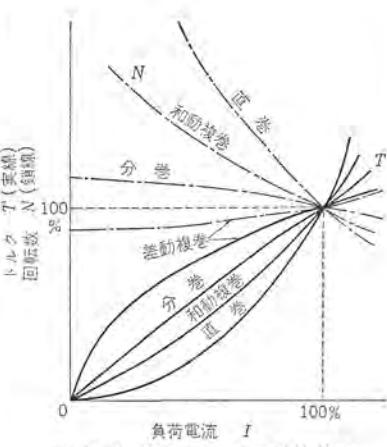


図 3.7 FK 形直流電動機特性
Fig. 3.7 Characteristics of type KF DC motor.

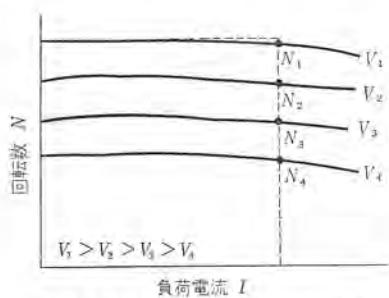


図 3.10 直流電動機電圧制御特性
Fig. 3.10 Characteristics of DC motor voltage control.

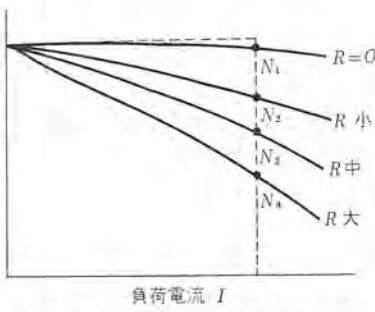


図 3.11 直流電動機抵抗制御曲線
Fig. 3.11 Resistance control curves of DC motor.

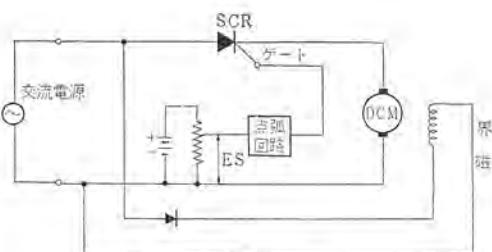


図 3.8 SCR 製御回路
Fig. 3.8 SCR control circuit.

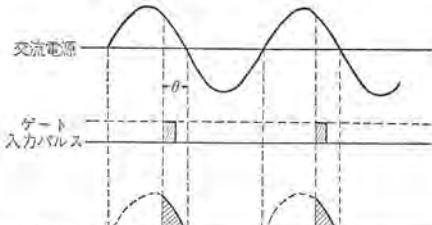


図 3.9 原理図
Fig. 3.9 Principle diagrams.

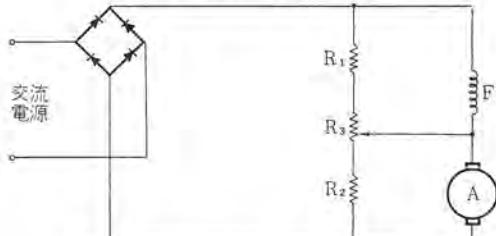
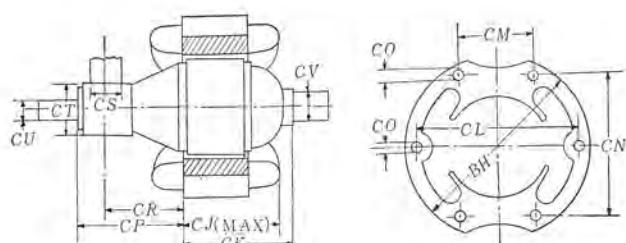


図 3.12 直流電動機ブリッジ制御回路
Fig. 3.12 Bridge control curves of DC motor.

表 3.1 NEMA 規格 (Part 7. Definite-Purpose Motors-Universal Motor Parts)



BH (+0.000) (-0.002)	CJ Max	CK†	CL	CM	CN	CO	CR†	CS	CT (+0.000) (-0.003)	CV
2.125(54 mm)	17/16	11/2	153/64	ナシ	ナシ	6 Screw	43/64	3/16	7/8	0.2363
"	23/16	21/4	"	"	"		45/64	1/4	"	"
2.437(61.7 mm)	17/16	11/2	21/8	"	"	8 Screw	49/64	"	"	3/8
"	111/16	123/4	"	"	"		"	"	"	"
"	115/16	2	"	"	"		"	"	"	"
"	23/16	21/4	"	"	"		53/64	3/8	"	"
2.875(73 mm)	11/2	19/16	27/16	"	"		55/64	1/4	1	0.3151
"	17/4	113/16	"	"	"		59/64	3/8	"	"
"	2	21/16	"	"	"		63/64	"	"	"
"	21/4	25/16	"	"	"		67/64	1/2	"	"
3.187(81 mm)	11/2	119/32	23/4	111/16	29/32	※	63/64	1/4	11/8	1/2
"	17/8	131/32	"	"	"	※	67/64	3/8	"	"
"	21/4	211/32	"	"	"	※	71/64	1/2	"	"
"	25/8	233/32	"	"	"	※	75/64	"	"	"
3.687(93.6 mm)	2	23/32	31/4	ナシ	ナシ	10 Screw	13/32	3/8	11/4	0.3939
"	23/4	227/32	"	"	"		149/64	3/4	"	"
"	35/8	329/32	"	"	"		"	"	"	"
4.375(111 mm)	23/16	213/32	41/8	"	"		127/64	3/4	15/8	0.4724
"	31/16	355/32	"	"	"		135/64	1	17/8	"
"	315/16	41/32	"	"	"		143/64	11/4	"	"

指定なき単位はインチ

※ 4 本の場合は 8 ネジとし CM, CN の位置に置く、2 本の場合は 10 ネジとし CL の位置に置く

† ハウジングはこの寸法に対しすきまがなければならない

だちに国産ができるわけである。

次に ブラシ 摆動形可変シリーズモータでは整流の問題および用途上の点から 600~3,000 rpm を標準とした。したがってコアについて 4 極とし、同期回転数を低いところに選んで異常な損失の発生を除いている。

3.3 直流機

直流機は図 3.7 のようにその励磁方式により各種の速度 トルク特性が得られる。精密な速度制御はこれらの特長を生かして各種の方式が行なわれているが、当社ではとくに SCR 回路を用いて、

より精度の高い、より低コストのモータを供給できるように標準形式を決定している。図 3.8

および図 3.9 にその回路の一例と原理を示す。

この場合は電圧制御により速度制御を行なつたことになり、速度範囲は 1 対 30 近くまで制御できる。その特性は図 3.10 のとおりである。また抵抗器による電流制御の場合は図 3.11 のとおりの特性となるが、一般的にはその速度範囲は 1 対 3 ぐらいが限度とされている。さらに近時事務用機械などにおいて大いに利用されている図 3.12 のようなブリッジ制御回路を用いることによって約 1 対 30 まで速度を制御できるようになった。ただしこの場合制御要素に対し、速度の追従性は上記の電圧制御のように必ずしも直線的ではなくワニ曲しているのはやむを得ない。

4. 特殊品

小形モーターは用途的に非常に他方面に広がっており、とくに事務用機械または自動販売機などに用いられる際は小形歯車と組み合わせて低速度、高トルクを要求される場合や、その他ブレーキやガバなどを付属させたり特殊な構造となることが多い。以下にその一例を示す。

4.1 誘導電動機

(1) SC形コンデンサ起動形単相モーター

テレタイプや電信カナタイプなどの電子機器を始めとしてとくに高起動トルクを必要とする場合には起動用コンデンサおよび起動リレーを組み合わせてその特性を改善している。図4.2に示されるように当社RO形起動リレーは小形でしかも起動電流の時間的变化をたくみに利用している点など故障も少なく、すぐれた性能である。

図4.1はさらに振動を外部に伝達しないような防振構造をとっている。JEM協約寸法以下の小形モーターでこのような複雑な性能を持つモーターの先駆けをつけたといつても過言ではない。

(2) FM形三相誘導電動機

三相誘導電動機の場合もJEM協約寸法以下のサイズにおいては標準コンデンサモーターとフレームおよびコア外径を同一にするが、その他電子計算機などの高精度用モーターとして図4.3、4.4のように特殊な外観を持った構造のものも製作している。

とくにこれらの機種は米国UL規格(Underwriter Laboratories)に合格するような性能と構造をそなえており、好評である。

(3) 歯車付電動機

事務機械用やサーボモーターにはとくに低速が要求される場合が多く、図4.5はコンデンサモーターに歯車を組み合わせ、複写機駆動用として用いられたものである。またこのタイプのモーターは同時



図4.1 SC-S形コンデンサ起動モーター
(防振形)

Fig. 4.1 Type SC-S condenser start motor.
(suspension type)

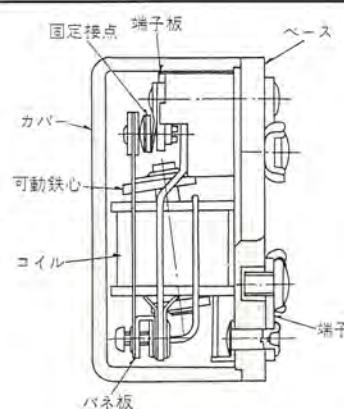


図4.2 RO形起動繼電器断面図
Fig. 4.2 Cross section of type RO starting relay.



図4.3 FH形三相誘導電動機
Fig. 4.3 Type FH three phase induction motor.



図4.4 FH形三相誘導電動機(全閉形)

Fig. 4.4 Type FH three phase induction motor (totally enclosed)



図4.5 SL-G形コンデンサギヤードモーター
Fig. 4.5 Type SL-G condenser gear motor.



図4.6 SL-G形コンデンサギヤードモーター
Fig. 4.6 Type SL-G condenser gear motor.

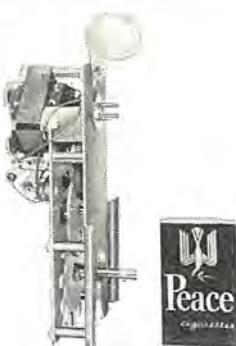


図4.7 SL-G形コンデンサギヤードモーター
Fig. 4.7 Type SL-G condenser gear motor.



図4.8 FE-G形限取極ギヤードモーター
Fig. 4.8 Type FE-G shaded pole gear motor.



図4.9 FB形シリーズモーター(400W 100V 50/60c/s
20,000r/m)
Fig. 4.9 Type FB series motor

に自動販売機のサーボモータとして用いられるケースも多く、この場合は當時人の手によって運転状態を管理されていない点からサーマルスイッチを内蔵して焼損防止を行なっている。

図4.6のモータはサーボモータとして当社ポールレグ(柱上用自動誘導電圧調整器)の駆動源となり、トランジスタと組み合わせサーボ系を形成している。とくにこの場合トランジスタにより制御されるため制御巻線のみは電圧が低く選択された特殊設計である。図4.7はテレビチューナのチャネルを遠隔操作切換用としてステップ状に回転するように工夫されているコンデンサギヤードモータである。

また図4.8は限取極モータにギヤを組み合わせたものであり、複写機用および自動販売機用に好評を得ているものである。

4.2 整流子電動機

整流子電動機は単相交流で容易に高速回転が得られ、かつ小形となるため、それらの特長を生かして専用小形工作機(電動工具)として使用される場合が多く、この場合軸受部分の設計にはとくに入念な配慮がなされている。図4.9にはメガネワク加工用モータで立形で15,000~20,000 rpmで運転され、ペアリングのdn値が400,000を越えるためポールベアリングを霧状潤滑によって運転し、合わせて速度制御を行なうため、スライダックをモータフレームに内蔵し電圧制御により回転数を広い範囲にわたって変化できるようにしてある。

図4.10はスピンドルシャフト付きのモータで、立形で使用され金属板の彫刻を行なう回転数が10,000 rpmのモータである。

整流子電動機は設計上高速、小形となるが、反面トルク速度曲線が2乗曲線となり速度変動率が大きく、同時に起動トルクが非常に大きいので速度調整用ガバナを取り付けて速度一定とし、計



図4.10 FB形シリーズモータ (スピンドルシャフト付)
Fig. 4.10 Type FB series motor (attached spindle-shaft).



図4.11 FB-NG形シリーズモータ (ガバナー付)
Fig. 4.11 Type FB-NG series motor (attached speed govner).



図4.12 FK-G形直流ギヤードモータ (ウォーム歯車)
Fig. 4.12 Type FK-G DC gear motor (worm gear).

算器、加算器などに組み込まれるものが多いが、図4.11はFB形シリーズモータにガバナとウォームギヤを組み合わせ使用されているもので小形であること、速度変動率が5%以下の定速度が得られること、またガバナを調整して設定速度を変えられるなどの特長があり、各方面に常用されている。

4.3 小形直流電動機

直流電動機は速度制御が容易に行なえるため、速度制御が必要な複写機に多く使用されているが、いずれも低速が必要なためウォームおよびスパーギヤと組み合わせたものが特殊仕様として製作されている。これらの制御装置は前述のSCR制御器、抵抗やスライダックによる電圧制御、および抵抗器の組み合わせによるブリッジ制御などがあり、それぞれの用途目的によって制御回路や減速方式が使いわけされている。図4.12はウォーム1段、図4.13はスパー2段、図4.14はウォーム、およびスパー各1段と小形直流電動機とを組み合わせたもので、いずれも複写機用として使用されている。

その他直流電動機はサーボモータとしても多く使用されているが、用途的に低慣性電機子とするためD/Lを小さくして速応性を増すよう考慮されるのが通常である。この場合反負荷側軸端に安定性の良い永久磁石式直流発電機(指速発電機)を直結して速度検出を行ない、サーボモータとしての運転を完全にしている(図4.15)。またサーボモータとして直巻電動機を使用する場合これを分割界磁形(Split field type)図4.16および図4.17とし、正回転より逆回転まで無段階に連続的な速度制御ができる、操作が容易となる。



図4.13 FK-G形直流ギヤードモータ (スパーギヤ)
Fig. 4.13 Type FK-G DC gear motor (spur gear).



図4.14 FK-G形直流ギヤードモータ (ウォームギヤ, スパーギヤ)
Fig. 4.14 Type FK-G DC gear motor (worm, spur gear).



図4.15 FK-T形直流指速発機付直流電動機
Fig. 4.15 Type FK-T DC motor (attached with pilot generator).

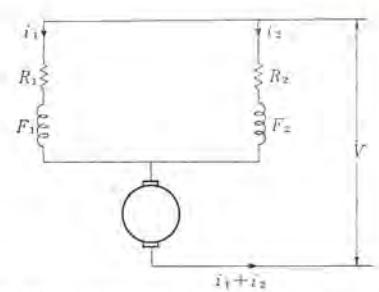


図 4.16 分割界磁形直流電動機制御回路(その 1)
Fig. 4.16 Split field type DC motor control circuit.

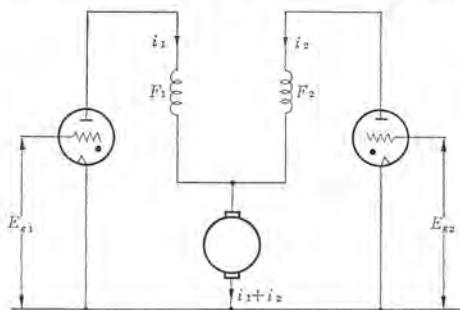


図 4.17 分割界磁形直流電動機制御回路(その 2)
Fig. 4.17 Split field type DC motor control circuit.

直流より交流への変換の一方法として逆用回転変流機 (Inverted Rotary Converter 略称 Inverter) が使用される場合があるが、



図 4.18 逆用回転変流機
Fig. 4.18 Rotary inverter.

図 4.18 は小形直流機を応用して製作したインバータの一例を示す。このインバータは入力電圧と出力電圧との間に一定比率があるためこの比率によらない出力電圧を必要とする場合、特殊な巻線を電機子に巻きこみ、変圧器の作用も兼ねて所定電圧をうることができるように考慮されている。上記図4.18 は容量 0.25 kVA で入力直流 115 V を出力交流 115 V に変換したものである。(特許第 411849 号仁礼, 杉山考案)

5. む す び

以上当社の小形電動機としての標準形式やそれらの設計内容および特殊品について記述したが、これら協約寸法外の小形モートルは各メーカー独自の寸法により製作される場合が多く、メーカーが乱立し標準化することが困難な現情であるが、一応これらを体系づけることができ業界の指針ともなれば幸いである。

小形モートルは自動販売機や事務機、映写機など機械化への原動力として使用される場合が多く、今後の需要は拡大の一途をたどるものと考えられるが、当社としては今後さらに研究を重ね、高性能低価格への大指標を目指して精進する次第である。

参 考 文 献

- (1) 関野, 小野: 「三菱電機」32 No. 11 (昭 33)
- (2) 大隅, 茂木: 小形回転機 ハンドブック (電気書院)

二相サーボモータルおよび付属速度発電機

小島 敏男*

Two-Phase Servo Motors and Tachometer Generators

Nagoya Works Toshio KOJIMA

Mitsubishi two-phase servo motors are of high performance and relatively small output, being provided with a drag cup rotor of a small moment of inertia and having a small dead time and quick response. Its special construction also permits to provide good linearity to its attached tachometer generator with small residual voltage. To confirm its performance, twenty-seven items containing environmental tests have been conducted on the motors, which has brought good results in the no-load starting voltage of the motor and the linearity and residual voltage of the tachometer generators. Especially remarkable in the success in minimizing the residual voltage variation through the study on the material of the drag cup and the proper selection of its manufacturing process.

1. まえがき

最近の自動制御装置の発達とともに、自動制御装置の操作部にあって信号入力に速応した機械的出力を出すサーボモータの性能はきわめて重要になってきた。

一般的モータは電力を与えて発生する機械的出力を連続的に使用し、その回転速度、回転方向はあまり変えない。しかしサーボモータは自動制御装置が必要とするときに適当な信号入力を与えて回転し、信号入力の停止とともにすみやかに停止させるとともに、回転速度も回転方向も自由に制御できなければならない。

したがって一般的モータとは構造、性能がおのずから相異する。サーボモータとしては二相サーボモータのはか、いろいろな種類のものが使用されるが、二相サーボモータには

(1) 回転子に巻線を持たず機械的に堅ろうであるためひんばんな起動停止に適している。

(2) 直流電源を必要とせず制御回路は比較的簡単で制御が容易である。

(3) ブラシによる機械的摩擦損がなく低トルクで使用する場合、制御精度を上げることができるもの。

(4) ブラシ、整流子などがなく構造が簡単であるため保守、価格の点で有利である。

などの利点があるため、トルクが低く回転速度の範囲が同期速度によって定まるなどの欠点があるが、最も広く使用される。

一般に二相サーボモータの応答特性は、商用周波数のものより400 c/s のもののが良く、高性能が必要な場合には 400 c/s が使用される。当社では防衛機器管制装置用など精密用として 400 c/s、一般工業向け自動制御装置用として商用周波数の二相サーボモータを開発し、製作している。

なお、二相サーボモータには制

動用、あるいは計算用として速度発電機を直結して使用される場合が多く、当社でも速度発電機付二相サーボモータを製作している。速度発電機としては出力電圧の直線性および残留電圧などの特性が重要であるが、当社のものはとくに残留電圧を小さくしてあるので、本文では残留電圧を中心に当社の二相サーボモータおよび速度発電機の仕様、構造およびおもな性能についてその大要を説明する。

2. 仕 様

当社における代表的な二相サーボモータおよび速度発電機付二相サーボモータの仕様を表 2.1 に外観写真を図 2.1 に示す。



図 2.1 二相サーボモータおよび速度発電機付二相サーボモータ
Fig. 2.1 Two-phase servo motor and similar one with tachometer generator.

表 2.1 二相サーボモータおよび速度発電機付二相サーボモータ仕様

仕様	形名	MR-110-2A	MR-111-2A	MR-0102-4B	MR-0112-4B	MR-0101-5B	MR-1101-5A
サーボモータ	周波数 (c/s)	400	400	400	400	50	50
	励磁電圧 (V)	115	115	115	115	110	64
	制御電圧 (V)	115/57.5	115/57.5	75	26/13	160	64
	無負荷回転数 (rpm)	4,400	4,800	9,000	9,000	2,800	2,800
	無負荷起動電圧 (V)	3	3	2	1	2	2
	起動トルク (g·cm)	120	170	85	85	195	475
	最大出力 (W)	1.5	2.3	1.8	1.8	2.5	6.5
	慣性モーメント (g·cm ²)	3.5	4.0	4.8	4.8	13	48
直結速度発電機	重量 (kg)	0.2	0.35	0.6	0.6	0.6	1.0
	外径寸法(外径×長さ) (mm)	36.5φ×43	44.5φ×52	51φ×96.5	51φ×96.5	51φ×96.5	64φ×126.3
	周波数 (c/s)	—	—	400	400	50	50
	励磁電圧 (V)	—	—	21	21	64	64
	出力電圧 (V)	—	—	1.98±0.05	1.98±0.05	2.73±0.4	2.73±0.4
	出力電圧の位相	—	—	36°30'±3°30'	36°30'±3°30'	36°±6°	30°±6°
	残留電圧 (mV)	—	—	5	5	32	32
	直線性 (%)	—	—	1	1	2.5	2.5
(備考)							
1. MR-0101-5B, MR-1101-5B はいずれも 50 c/s のときの仕様のみ記載した。							
2. 慣性モーメント、重量は直結速度発電機の分も含む。							
3. 出力電圧とその位相は 400 c/s 用は 3,000 rpm, 50 c/s 用は 1,000 rpm における値である。							
4. 軸端はピニオン加工を施したものと丸軸のものがある。							
5. 外径寸法は軸端、端子を含んでいない最大寸法である。							

3. 構造

当社の 400 c/s 用速度発電機付二相 サーボモータ MR-0102-4B を例として図 3.1 により、その構造の大要を説明する。モータ部 分も発電機部分も、基本的電磁構造としては二相誘導電動機と同じであるが、ドラグカップ回転子を採用しているところが異なる。

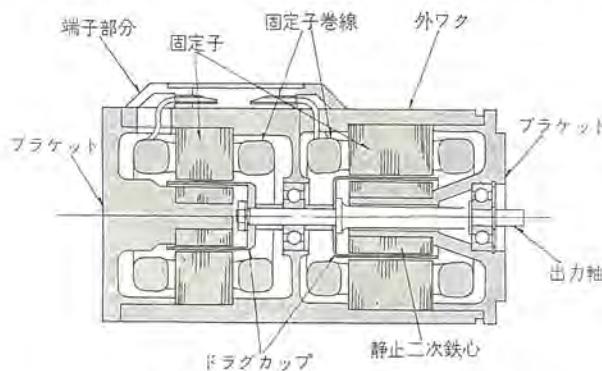


図 3.1 速度発電機付二相 サーボモータ
Fig. 3.1 Two-phase servo motor with tachometer generator.

まず外ワクは非磁性の耐食処理を施したアルミ合金で、モータ部分と発電機部分を一体構造としている。固定子は磁気回路の不平衡を避けるため、素材の圧延方向にも十分注意して組み立てている。固定子巻線はモータ側では励磁巻線と制御巻線、発電機側では励磁巻線と出力巻線とから、それぞれなっているが、巻線の非対称を避けるため巻線端部の成形そのほかには十分注意を払っている。なお、発電機側には温度補償巻線を設け、温度による抵抗値の変化を利用して温度による影響を補償することができる。

回転子は前述のごとくドラグカップ構造で、この回転子を支持する玉軸受は摩擦損を減らすため、その軌道面が特殊形状のものを使用している。潤滑剤も広範囲な温度変化により粘度そのほか特性上の変化の少ないものをとくに選択して用いている。

ドラグカップ回転子の内側には静止二次鉄心を設け、モータ側も発電機側もブラケットに固定している。発電機側の静止二次鉄心はその表面に極数と同数の数ミリ幅の切り欠きを設け、外部から残留電圧最少の位置に調整できるようにしている。さらに残留電圧を少なくするために、外部から微調整できる特殊形状の残留電圧低減機構と、磁気シャペイ板を設けた。

このほか、端子部分は着脱容易な端子カバーを採用し外部に端子を露出することなくコンパクトな構造にした。

4. 性能

前述の当社製 MR-0102-4B の場合は、防衛機器管制装置用としての要求性能があり、主要なものを仕様として表 2.1 に示している。これらの性能は環境条件を含めた表 4.1 に示す試験項目を実施し、次に述べるような満足な結果を得た。

以下、主要な特性を試験結果に基づいて説明する。

4.1 サーボモーターとしての特性

サーボモーターとして図 4.1 に制御電圧—無負荷速度、起動トルク特性、図 4.2 に負荷特性、図 4.3 に速度—トルク特性を実測値によって示した。これらの図から、無負荷速度、起動トルクおよび最大出力などは、表 2.1 の仕様を十分満足していることがわかる。なお、無負荷起動電圧は数ワット級のものでは普通、定格制御電圧の 1~5% 程度であるが、実測値では回転子の初期位置を変化

表 4.1 速度発電機付二相 サーボモータ MR-0102-4B の試験項目

1. 外観仕上検査	10. モータ起動電流	19. 高温試験
2. モータ回転方向	11. モータ起動トルク	20. 耐熱試験
3. 軸アソビ	12. モータ無負荷起動電圧	21. 濡度試験
4. キートル異常音	13. モータ単相運転	22. 耐久試験
5. 耐圧試験	14. 速度発電機出力電圧	23. 振動試験
6. 温度上昇試験	15. 速度発電機位相ズレ	24. 衝撃試験
7. 耐錆抵抗試験	16. 速度発電機直線性	25. 電圧および周波数の変動
8. モータ無負荷回転数	17. 速度発電機残留電圧	26. 過電圧耐力
9. モータ入力インピーダンス	18. 低温試験	27. 慣性モーメント

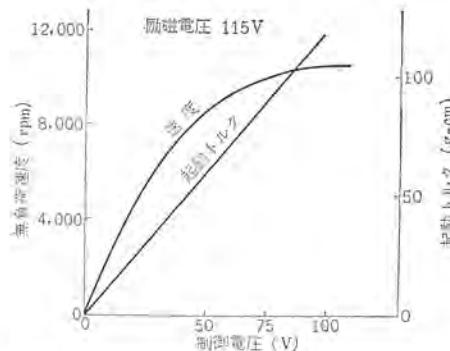


図 4.1 制御電圧—無負荷速度、起動トルク
Fig. 4.1 Control voltage—no load speed, starting torque.

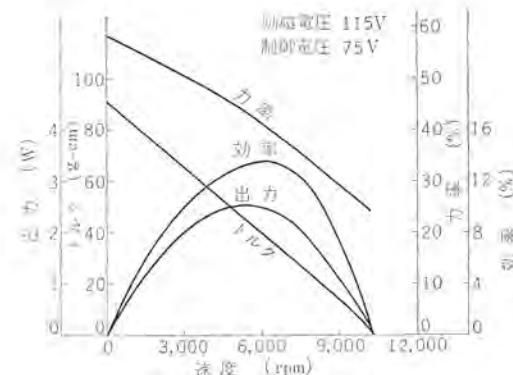


図 4.2 負荷特性
Fig. 4.2 Load characteristics.

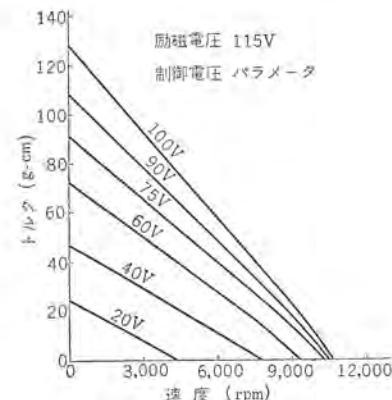


図 4.3 速度—トルク特性
Fig. 4.3 Speed—torque characteristics.

させた最大値で 0.4~0.75 V で、定格制御電圧 75 V の 1% 以下であった。

次にサーボモーターの応答特性を表わす時定数の実測値を図 4.4 に示す。この図の時定数は、慣性モーメントに付属速度発電機の回転子の分を含んでいるため、やや大きくなっているが、モータ部分だけではこの値の約半分になる。

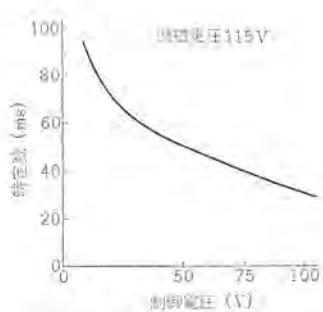


図 4.4 時定数—制御電圧
Fig. 4.4 Time constant—control voltage.

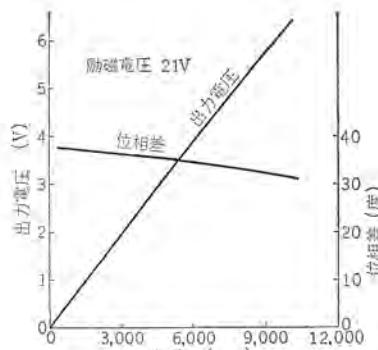


図 4.5 速度—出力電圧, 位相差
Fig. 4.5 Speed—output voltage, phase angle.

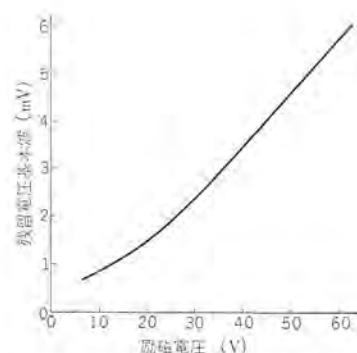


図 4.6 励磁電圧による残留電圧の変化
Fig. 4.6 Variation of residual voltage by excited voltage.

4.2 付属速度発電機としての特性

付属速度発電機としては、前述のごとくその出力電圧を計算機の微分、積分要素として使用するので、出力電圧の直線性が良く、残留電圧が少ないとくに必要である。図 4.5 に速度—出力電圧、位相差特性の実測値を示す。この図で 0~6,000 rpm の速度範囲では直線性が 0.8% 以下、位相差は 3° 以下で、いずれも要求性能を十分満足している。

次に図 4.6 に励磁電圧に対する残留電圧基本波の変化を示す。この図から定格励磁電圧を印加した場合の残留電圧基本波分は 1.4 mV であるが、このときの全残留電圧は最大 2.5 mV で要求性能 5 mV と比較して非常に小さい。なお、残留電圧については 2、3 検討した事項について 5 章に詳述する。

4.3 環境試験

上記の性能のほか、この二相サーボモータの用途上遭遇すると想像される下記の環境試験を行ない、過酷な環境条件のもとでも十分性能を発揮できることを確認した。実施した試験の概要は下記のとおりである。

- (1) 低温試験 (-30°C および常温にもどしたときの特性に変化ないこと)
- (2) 高温試験 (60°C および常温にもどしたときの特性に変化ないこと)
- (3) 耐熱試験 (100°C および常温にもどしたときの特性に変化ないこと)
- (4) 湿度試験 (相対湿度 90~95%，温度 40°C および 50°C に 120 時間放置後、異常のこと)
- (5) 耐久試験 (規定の条件で合計 1,000 時間運転後の特性に変化ないこと)
- (6) 耐動試験 (周波数 10~33 c/s の規定振動を 3 軸方向に加えた後、異常のこと)
- (7) 衝撃試験 (3 軸方向に合計 18 回の規定衝撃を加えた後、異常のこと)

5. 残留電圧の検討

二相サーボモータの軸が静止しているにもかかわらず、付属速度発電機の機械的、磁気的の非対称などによって励磁巻線と出力巻線とが結合し、出力電圧が発生することは計算用として使用する場合、とくに好ましくない。

今励磁電圧 V_i を

$$V_i = V \sin \omega t \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

と示すと残留電圧 V_r は近似的に次式によって表わすことがで

きる。

$$V_r = K_1 \sin(\omega t + \alpha) + (K_2 \sin PQ + K_3) \cos(\omega t + \alpha) \dots (5.2)$$

K_1 : 固定子鉄心、静止二次鉄心の磁気抵抗の不均衡、空隙の不均一などによって決まる定数

K_2 : ドラッグカップ回転子の部分的な抵抗の不均一によって決まる定数

P : 極数

Q : 回転子の固定子に対する関係角度

K_3 : 鉄心のウズ電流損、二次銅損によって決まる定数

この式の中 $K_2 \sin PQ$ の項以外は発電機として組み立てた状態で固定する残留電圧成分で変動しないが、 $K_2 \sin PQ$ の項は回転子の位置による残留電圧成分で変動する。前者は主として切り欠きを施した静止二次鉄心および特殊形状の残留電圧低減機構の調整などによって低減できるが、後者はドラッグカップ回転子によるものであり、組立後は調整によって低減できない。したがって残留電圧に対する要求がきびしい場合は、調整によって低減できない、ドラッグカップによる残留電圧をまず抑える必要がある。

図 5.1 に示す寸法の ドラッグカップ を用いたときの偏心、変形の残留電圧に及ぼす影響を図 5.2 に示す。偏心量はインジケータの読み

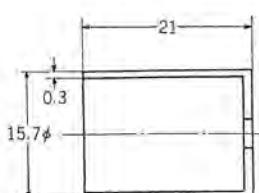


図 5.1 ドラッグカップの一例
Fig. 5.1 Example of dimensions of drag cup.

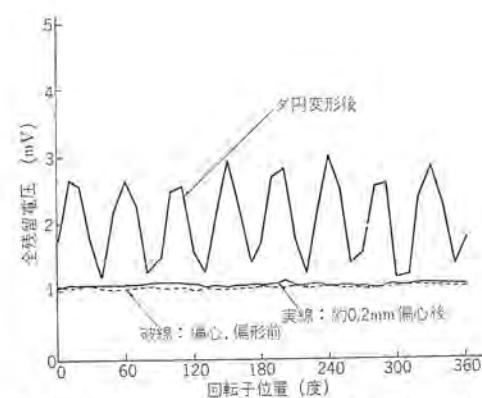


図 5.2 ドラッグカップの偏心、変形と残留電圧との関係
Fig. 5.2 Relation of eccentricity and deformation of drag cup with its residual voltage.

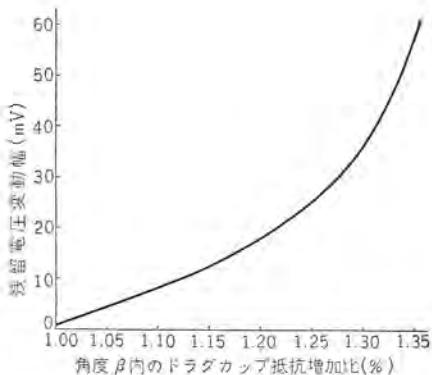


図 5.3 抵抗増加と残留電圧変動の関係
Fig. 5.3 Relation of resistance increase with residual voltage variation.

で 0.2 mm の場合を示し、変形量はドラグカップの開放端における△円変形の長軸と短軸との差が 0.135 mm の場合である。次に図 5.3 に偏肉による残留電圧の変化を示す。この図で β は固定子の極幅に相当する角度で、残留電圧の変動幅はドラグカップの円周上の 1 個所の抵抗が偏肉によって部分的に増加したとき指数関数的に増加している。しかし、実際の製品では偏心、変形および偏肉は残留電圧を著しく増大させるほど大きくないので問題にならなかった。

表 5.1 には素材、加工法の残留電圧に及ぼす影響の一例を示す。この表の素材は成分組成の点ではまったく同一であり、素材の形状および加工方法によって残留電圧は大きく影響を受けることがわかる。すなわち均一な結晶の方向をそのまま保つような加工方法が最も適当と思われる。

表 5.1 素材、加工方法による残留電圧変動の一例

素 材	加 工 方 法	残留電圧変動幅 (mV)
板	絞り	2.5 ~ 5.9
丸 棒	絞り	0.7 ~ 1.8
丸 棒	切削	0.7 ~ 1.2

上述したごとく、残留電圧の変動分を押えるためにはドラグカップの加工方法の選定が最も重要であり、この加工方法についてさらに検討を進め、残留電圧の変動幅として約 0.5 mV、残留電圧最大値としては前述のごとく 2.5 mV に押えることができた。

6. む す び

自動制御装置に対する要求精度が高くなるにつれてサーボモータにも高性能が要求され、サーボモータとしては速応性、付属速度発電機としては直線性と残留電圧が問題となる。本文に一例をあげて説明したように、当社の二相サーボモータおよび付属速度発電機は高性能なものであり、とくに残留電圧は種々検討の結果、著しく小さい。しかし外国製品ではさらに高性能、たとえば残留電圧 1 mV 以下、直線誤差 0.1% 以下のものもあり、今後いっそう最適設計の採用、加工精度の向上、最適材料の使用などについて検討を重ねて性能の向上をはかりたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) 大隅、茂木： 小形回転機 ハンドブック 10-89 (昭 34)
- (2) 伊藤： 二相サーボモータ および二相減速発電機、電学誌 80, 401 (昭 35)
- (3) 大野、横塚： ドラグカップ 形誘導速度発電機の残留電圧偏差の検討、自動制御学会講演予稿 (昭 36)
- (4) 茂木： シンクロ と サーボモータ 199 (昭 36)

誘導電動機の保護装置とその選択

加来政博*

Protection Systems of Induction Motors and Their Selection

Nagasaki Works Masahiro KAKU

To provide appropriate protection systems for induction motors is essential to make full use of motor ability. In the selection of protection systems and their setting, thorough study must be made on the following subjects, (1) performance and characteristics of motors, (2) characteristics of driven machines, their working conditions and importance, and (3) electric apparatus in the factory and their relation with motors. Existing protection systems, however, can hardly catch up with the progress of electric equipment, where as the introduction of Thermistor has changed the technique of protection such that direct temperature protection has come into use. The old protection systems are employed for watching the stator side of motors. But future problems are to find the most fitting device to protect the rotors as well.

1. まえがき

電動機に適正な保護装置を付けることは、その電動機の能力を十分にいかし利用するために重要なことである。保護装置の選択およびその整定にあたっては

- (1) 電動機の性能、特性
- (2) 駆動機械の特性、使用条件およびその重要性
- (3) 工場の電気設備との関連

などを知って必要十分な保護装置を設けることがたいせつである。ここでは誘導電動機の各種保護方式の概要とその得失、とくに最近実用化されたサーミスタによる直接温度保護方式を中心に述べ、これらの保護装置の選択の条件についてまとめた。

2. 誘導電動機保護装置の種類

誘導電動機の保護は電動機容量、形式、配電設備などにより異なるが電動機の過熱保護、電動機巻線の短絡保護、駆動機械および操作上の安全のための保護などを目的とするもので次のものが考えられる。

- (1) 過負荷保護 { 電流検出による保護
 温度検出による保護
- (2) 拘束保護
- (3) 短絡保護
- (4) 不足電圧保護
- (5) 欠相(単相)、逆相保護
- (6) 三相不平衡保護
- (7) 軸受温度、軸受油面監視

これらのうち、不足電圧、欠相、逆相保護などはむしろ外部の条件により、要求される保護である。以下おのおのの保護方式について記す。

3. 電流検出による過負荷保護装置

電動機の過負荷保護には直接電動機巻線温度を監視して、これを許容温度以内に保つ(4)の方式と電動機巻線の温度上昇の要因である電動機入力電流を検出し、電動機の温度上昇を模擬させて保護する方式がある。電流を検出することは容易なため、従来過負荷保護はほとんどこの方式によっていた。電動機が過負荷

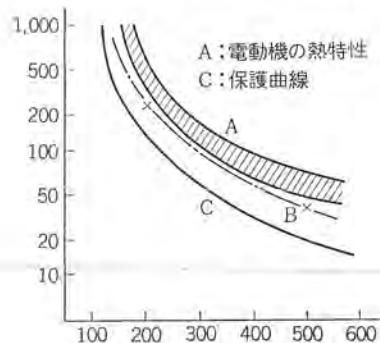


図 3.1 電動機の熱特性と保護曲線
Fig. 3.1 Thermal characteristic of motor and protection curve.

になると温度上昇制限の値 (JEC 37 規定, A 種絶縁巻線温度上昇限度, 50°C, B 種絶縁 70°C) を越える、しかし温度上昇がこれ以上となてもただちに巻線は焼損するわけではなく、許容される過負荷と時間の関係はたとえば、図 3.1 の曲線 A のようになる、これを電動機の熱特性といっている。電流による過負荷保護はこの熱特性が基準となり、これを模擬して曲線 C のような保護曲線を得ている。しかしこの電動機の熱特性は電動機の容量、保護形式、冷却方式により異なるため、平均特性の安全側をとつて、JEM 1001 離電器の動作特性では次のように定めている。

- (1) 電動機全負荷電流の 500 % の電流を通じ 45 秒以内に作動すること。
- (2) 電動機全負荷電流を通じ、温度一定となった後その電流値の 200 % の電流を通じ 4 分以内に作動すること。
- (3) 電動機全負荷電流の 110 % の電流を通じても作動せず温度一定となった後 125 % に上昇して作動すること。

(1) の条件は電動機拘束時の保護のため、(3) の 110 % で作動しない条件は 10 % の電源電圧低下を考慮している。これらの特性は図 3.1 の曲線 B の×点となる。保護曲線 C のような反限時特性を持つ過電流離電器として、熱形過電流離電器 (Thermal overcurrent Relay) と誘導形過電流離電器 (Induction over current Relay) が従来から最も多く使用されている。これらの原理構造についてはよく知られており、カタログ、文献なども多数あるのでここでは省略しその得失についてのみ記す。

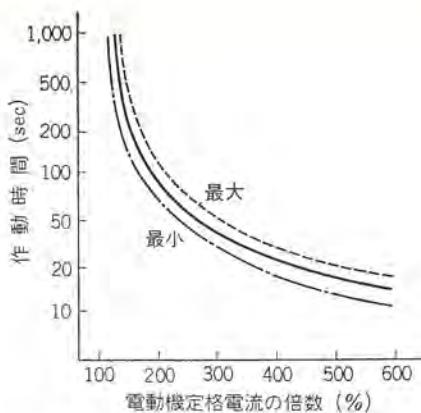


図 3.2 熱動形過電流繼電器の特性
Fig. 3.2 Characteristic of thermal overcurrent relay.

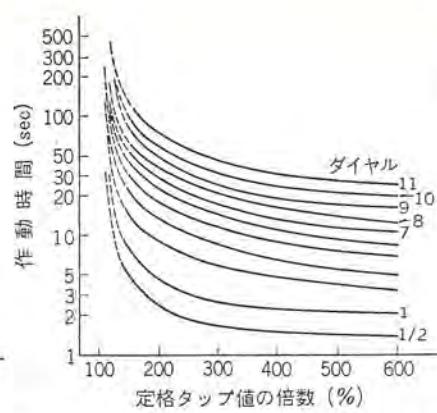


図 3.3 CO-51 形誘導過電流繼電器の特性
Fig. 3.3 Characteristic of type CO-51 induction overcurrent relay.

熱動形過電流繼電器は

- (1) 誘導形過電流繼電器に比べ非常に小形で通常電磁接触器の一部品として取付可能であること。
- (2) 他の繼電器に比べて非常に安価なこと。
- (3) 適正なヒータの選定により良好な反限時特性が得られるうこと。
- (4) 電動機設置場所と同一条件であれば、周囲温度による特性変化が、電動機熱特性の周囲温度による変化を補正する。しかしこれは設置条件によっては欠点ともなる。

などの長所があり、一方欠点としては

- (1) 適用電動機により適正なヒータの選定が必要なること。
- (2) 調整範囲が狭いこと

などであるが、安価で簡単なため現在低圧電動機にはほとんどこの繼電器が使用されている。誘導形過電流繼電器にはいろいろな特性のものがあるが、電動機保護用としては起動時の過電流に誤動作をしない長時限形(三菱CO-51形過電流繼電器)が使用される。起動時の過電流値が小さい巻線形誘導電動機用としては時にはフィーダ、変圧器保護用に使用される強反限時特性の繼電器(三菱CO-8形またはCO-11形)を使用しより安全側に保護することもあるが、150~300%程度の過電流に対し、やや過保護の傾向となる。図3.3はCO-51形過電流繼電器の特性を示す。図のように調整範囲が非常に広くとれるので、広範囲の用途の電動機に適用されるがそれだけにその整定には注意を要する。一般に短時間定格のない連続定格の電動機では定格電流の115%に整定し、115%過負荷保証のものでは125%以下で作動するように整定している。誘導電動機は通常非接地式であるから接地繼電器を使用しない場合は2個のCTおよび過電流繼電器により三相の保護が行なわれる。しかし後述のごとく三相不平衡に対して考慮する場合は各相に1組の過電流繼電器を使用する。

4 温度検出による過負荷保護

電動機の巻線の温度を直接検出しこれによって過熱保護を行なう方式は電流による間接的な過負荷保護方式に比べ、原理的にはよりすぐれていることは明らかであるが、従来この式のものは、

- (1) 電流検出に比べて検出しがたい。
- (2) 小形で信頼性のあるものがなかった。
- (3) 一般に高価であった。

誘導電動機の保護装置とその選択・加来

(4) 保守点検上に難があった。

などの問題点があつたため、あまり使用されず電流繼電器と併用し、二重保護用として補助的に使用されていた。しかし、最近半導体技術の発達によりサーミスタのごときすぐれた温度検出装置が開発されて注目され、新しい保護方式として、実用化されている。温度検出による過負荷保護装置としては次のようなものがある。

(1) バイメタル式、バイメタル接点を電動機巻線に取り付けるもの。

(2) 固定子巻線の各相に1個または2個のサーチコイルを埋め込み、自動平衡形温度計と組み合わせて固定子巻線の温度監視を行なうもの。

(3) サーミスタ素子を直接固定子巻線に取り付け、その温度による急激な抵抗変化を利用するもの。

などがある。(1)のバイメタル接点にするものは当社ではオートカットモータとして数100W以下の小容量のものに広く使用されている。これはその名のごとくバイメタル接点で過熱時直接オートカッ

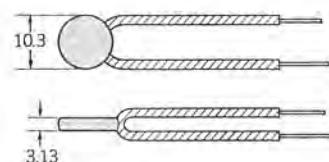


図 4.1 PTC サーミスタ素子
Fig. 4.1 Type PTC thermistor element.

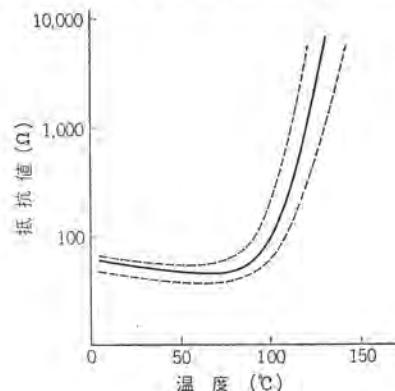


図 4.2 PTC サーミスタの温度-抵抗特性の一例
Fig. 4.2 Example of temperature-resistance characteristic of type PTC thermistor.

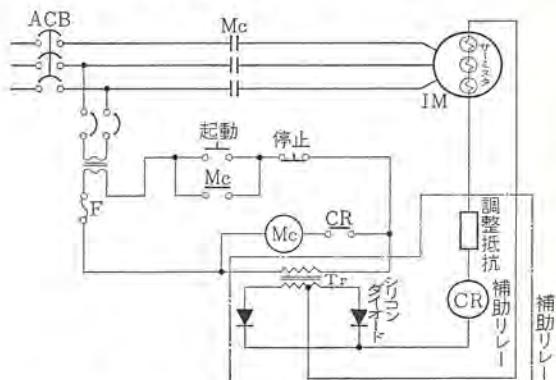


図 4.3 ガーディストモータリレー 保護回路
Fig. 4.3 Gardistor motor relay protection circuit.

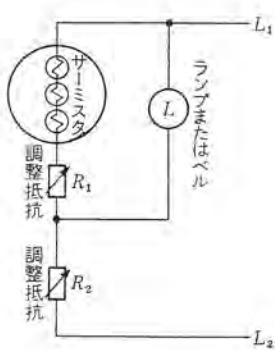


図 4.4 サーミスタ 使用の警報回路
Fig. 4.4 Alarm circuit using thermistor.

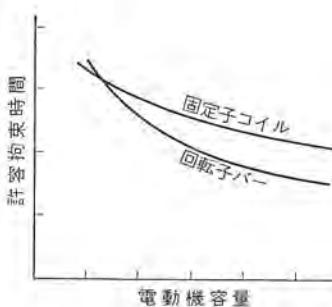


図 4.5 電動機の許容拘束時間と容量の関係
Fig. 4.5 Relation between permissible locked time and capacity of motor.

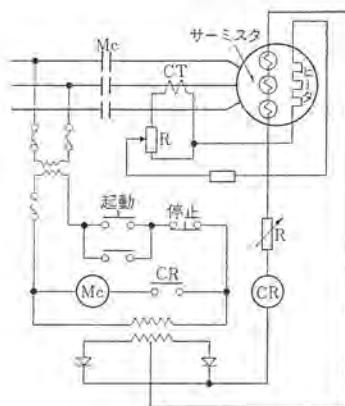


図 4.6 サーミスタ 温度上昇遅れ補償方式の一例
Fig. 4.6 Example of compensation system of thermistor temperature rise.

トを行ない、これだけで十分な過負荷保護ができる。(2)のサーチコイルを固定子巻線に埋め込むものは温度検出精度は最もよい($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)が比較的高価であるため数100 kW以上の大容量の電動機で重要な用途に使用されるものや起動停止が多いまたは短時間過負荷運転が行なわれ蓄積過熱がある場合などに過電流继電器と併用され、固定子巻線に対する二重保護用として使用されている。急激な過負荷、拘束などに対しては巻線の絶縁によりサーチコイルの温度上昇が遅れるためこれらに対しては保護ができないので必ず過電流继電器を併用する必要がある。(3)のサーミスタによる保護方式は最も新しい方式で、当社ではウエスチングハウス社で開発されたPTCサーミスタを使用している。PTCサーミスタ(Positive-Temperature-Coefficient Thermistor)は正の温度係数を持つ図4.1のごときスピリットの大きさの半導体装置で定格温度(A種絶縁用 110°C 、B種絶縁用 125°C)付近では図4.2のようにその抵抗値が急激に100倍以上に増加する。このPTCサーミスタによる保護装置はウエスチングハウス社で開発され当社でも研究試験されガーディスマータリレーの商品名で実用されている。図4.3はガーディスマータリレーによる保護回路を示すものでPTCサーミスタ固定子巻線のコイルエンド部に各相に1個はり付け3個を直列に接続する。温度が定格温度近くになると抵抗が急激に増加するため保護继電器CRが落下しラインコンタクタMCをトリップさせる。図4.3の鎖線内がガーディスマータリレー装置でこれだけがコンパクトにまとめられる。また図4.4のように警報回路にも使用される。このガーディスマータリレー保護方式は

(1) 直接巻線の温度により作動するので周囲温度変化の補正が不要である。

(2) 過電流继電器では検出されないような短時間の反復過負荷、変動負荷、特殊運転サイクルなどによる蓄積の過熱に対しても保護される。

(3) 整定調整が不要であり、常に同一な特性で保護される。

(4) 不平衡電圧、欠相などによる過熱も保護される。

(5) 冷却ファン、通風路の故障などによる温度上昇に対しても保護される。

などのすぐれた特長を持っている。問題点としてはサーミスタは小さいがやはり温度上昇の遅れがある。これは通常の過負荷による温度上昇に対しては問題にならないが、電動機拘束時の急激な温度上昇に対してはその遅れのために十分な保護ができなくなる。

しかし小容量の電動機では遅れが小さいので拘束に対して保護ができる。この急激な温度上昇に対しサーミスタの温度上昇の遅れを補うために拘束時の電動機電流を利用する方式が最近考えられている。図4.6はその原理の一例を示すもので拘束時の電動機電流をサーミスタに接触させたヒータに流しサーミスタを加熱し温度上昇を補償している。今一つの問題は電動機の回転子側の温度上昇制限である。電動機の容量が大きくなると回転子の温度上昇率は固定子のそれよりも大きくなり、許容拘束時間は図4.5のように回転子側の方が短くなる傾向にある。したがって固定子側の温度検出のみでは回転子の保護ができなくなる。このため現在のところガーディスマータリレーのみによる保護は100~150 kW程度以下に制限されておりそれ以上の容量の電動機に適用する場合は過電流继電器を併用している。ガーディスマータリレーによる保護方式は以上の問題点があるが前述のようにすぐれた多くの特長を持っているので今後大いに利用されるものと思う。

5. 拘束保護

電動機拘束の状態では定格電流の5~6倍の電流が流れるため電動機は急激に加熱される。電動機の許容拘束時間は容量、形式、冷却方式などにより異なるが、一般に20~40秒程度で前記のように回転子側から制限を受けることが多い。これに対する保護は通常のものは、熱動形または誘導形過電流继電器によって保護される。しかしながら負荷の慣性能率が非常に大きいために、長時間起動用に設計されたカゴ形電動機では許容拘束時間が起動時間より短い場合があり、この場合は電流検出の過負荷保護继電器では起動時の長時間特性との協調がとれないで拘束保護は別に考える必要がある。許容拘束時間が固定子温度のみにより制限される小容量の電動機ではガーディスマータリレーにより保護されるが、回転子側の温度上昇により制限される場合はゼロスピード検出装置その他の拘束保護装置を設ける。表5.1は7.5 kW三相誘導電動機の試

表 5.1 110°C サーミスタ保護方式による 7.5 kW 三相電動機のウエスチングハウス社の試験結果

	固定子巻線温度 ($^{\circ}\text{C}$)	トリップまでの時間 (秒)	再起動可能時の巻線温度 ($^{\circ}\text{C}$)	再起動可能までの時間 (min)
運転時の過負荷	112	—	94	2.75
拘束三相定格電圧	135	35	95	2.33
拘束三相 110% 過電圧	145	29	94.5	3.24
拘束欠相定格電圧	133	50	94	1.66

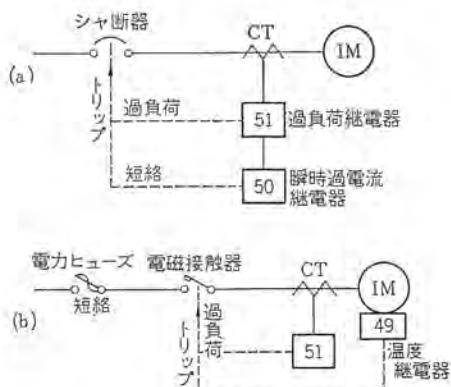


図 6.1 過負荷保護と短絡保護の組み合わせ
Fig. 6.1 Combination of overload protection and short circuit protection.

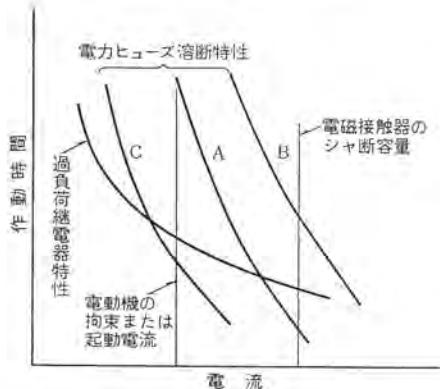


図 6.2 過負荷繼電器と電力ヒューズの協調
Fig. 6.2 Coordination of overload relay and power fuse.

験結果を示す。

6. 短絡保護

電動機の巻線短絡および電動機回路の短絡時は電源容量、回路抵抗、リアクタンスにより変わるが通常定格の 10 倍以上の電流が瞬時に流れるので電動機保護上または配電系統の保護上急速に回路をショートすることが必要である。低圧用ではヒューズまたはノーヒューズショート断器を、高圧用では電力ヒューズや磁気または油入ショート断器が使用される。図 6.1 (a) のように過負時のショート、短絡時のショートを同一のショート断器によって行なう場合は過負荷保護继电器 51 と短絡保護用瞬時作動過電流继电器 50 の調協は 50 が過負荷および起動電流により誤動作しないよう約定格の 10 倍に整定しておけばよいが図 6.1 (b) のように電力ヒューズにより短絡保護を行なう。コンビネーションライニスターでは電磁接触器で短絡電流をショートしないように、また電力ヒューズが起動または拘束電流で誤動作をしないように過負荷继电器 51 と電力ヒューズ定格の協調に注意を要する。図 6.2 はこの関係を示すもので B はヒューズ定格が過大なため短絡時過負荷继电器 51 が先に作動する場合 C はヒューズ定格過小で起動、拘束電流に電力ヒューズが作動することを示している。

7. 不足電圧・保護

不足電圧保護は電源電圧低下により電動機電流が増加し過熱されることを防ぐ目的もあるが、むしろ駆動機械操作上の安全を目的とすることが多い。たとえば巻上機やクレーンのように電圧低下によりトルクが減少すると危険がある場合、停電により電動機

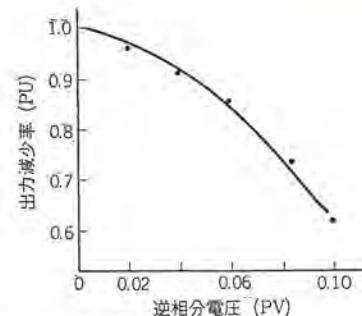


図 8.1 最悪条件の不balanceにおける誘導電動機の出力減少率
Fig. 8.1 Output decrease rate of induction motor at unbalance under the worst condition.

停止後電源復帰して電動機が自動再起動すると危険がある場合などである。不足電圧保護に使用される继电器には反限時特性を持つ誘導形不足電圧继电器と瞬時作動無電圧继电器があり、再起動防止の目的だけであれば、瞬時作動のものでよいが、他の目的を持つ場合は誘導形不足電圧继电器（三菱 CV 形）が使用される。

誘導形不足電圧继电器の整定にあたってはカゴ形の大容量の電動機は電源容量により起動時にかなりの電圧低下があるので注意を要する。

8. 欠相、三相不平衡および逆相保護

欠相は配電系統に電力ヒューズを使用している場合に一相溶断した場合、また断路器などの配電機器の故障、操作不良などにより起こり得る。欠相には運転中の欠相と起動前から欠相があり運転中の欠相は負荷条件により異なるが、起動前の欠相は拘束と同じく 5~6 倍の電流が流れる。これに対する保護装置は誘導形單相逆相继电器（三菱 CP 形單相逆相继电器）が使用される。しかし電力ヒューズは定格の 10 倍以上の短絡電流では必ず二相溶断することが当社のものでは確められており欠相となる条件は少いので一般に過負荷继电器で代用しとくに考慮することは少い。

次に三相不平衡電圧が電動機に加えられる場合は不平衡電流のため巻線は不均一に加熱され、定格の出力では運転できなくなる。不平衡における最も悪い場合は三相のうちの一相の電流が最大となり他の二相の電流が最小となる場合で、一般に使用される負電流继电器 2 個による三相保護方式ではこの場合はまったく保護できない。図 8.1 は最悪不平衡条件において温度上昇を同一とする場合の出力の減少の一例を示す。一般的配電系統ではこのような不平衡は起こり得ないので考慮しないが、配電系統にアーチ灯や大容量の整流装置がある場合は不平衡度を検討しそれによっては各相に過負荷继电器を入れるか、ガーディスタモータリレーなど直接電動機巻線温度を監視する保護装置を備えることを考える。

次に逆相保護であるが、これは電動機の保護というよりはむしろ駆動機械系の逆転による危険を防止が目的であるから、その要否は駆動機械の方から決定される。逆相となるのは電動機および配電盤の配電工事、関連配電系統の変更などの工事の時の誤配線によるものであるから、配線工事中に十分に注意しましたテストをすることにより省略される。保護继电器としては当社では単相および無電圧保護を兼ねた三菱 CP 形逆相继电器を使用している。

9. 電動機の保護方式の選択条件

以上今日実用されている誘導電動機の保護方式の概略を記述したが、個々の電動機について必要十分な保護を行なうためには、

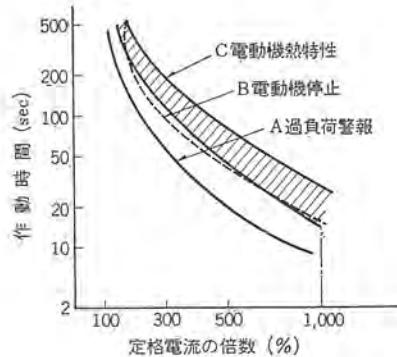


図 9.1 過負荷警報と停止
Fig. 9.1 Overload alarm and stop.

保護装置の適切な選定、組み合わせ、適切な整定が必要である。これらの選択にあたり基本となるべき事項をまとめると

(1) 電動機の仕様、特性を考える。

電動機の容量、電圧は保護選択の基本要素であるがそのほか、電動機が連続定格か、短時間定格か、絶縁種別、カゴ形、巻線形、などにより過負荷保護を熱動形または誘導形過電流继電器によるか、サーミスタ、バイメタルなどの直接巻線温度により作動する保護方式によるか、またはそれらを併用すかが考えられるが、さらに次の事項が条件となる。

(2) 負荷の条件、性質を考える。

負荷の特性が特殊なもの、負荷の慣性能率が非常に大きく、起動時間が長いものは起動時の過電流により過負荷继電器が誤動作しないように整定するが、この場合拘束保護との協調に注意を要する。また起動、停止の多い反復負荷、負荷変動が大きく短時間過負荷のあるものなどでは過電流继電器のみでは整定によっては十分保護されない場合があるので直接温度検出による保護を考えるか、または併用することが望ましい。

(3) 電動機および駆動機械の重要度を考える。

駆動される機械系および関連 プロセス の工場設備における重要性、故障停止による被害の大きさを考えて、相当の保護を考える。重要な用途の電動機では場合によっては電動機の寿命を短くする過負荷になってしまってもトリップさせず、真に危険な過負荷、故障時のみにトリップさせることも考える。このような場合はたとえば図 9.1 のように過負荷検出を二段に設け過負荷警報A曲線と非常過負荷

および短絡故障トリップ曲線Bを区別して設けることが行なわれる。

(4) 工場の配電系統、電気設備を考える。

電動機への配電系統、給電変圧器の容量を考え短絡時の保護が十分に行なわれるよう、また配電系統により避雷装置、接地保護装置の要否を考える。アーフ 灯や整流装置などの不平衡負荷が同一系統にある場合はその大きさを調べ保護を考える。

配電系統の外部で短絡した場合は 300~400 % の逆流電流が流れるのでこの電流に対し電動機短絡保護装置とくに電力 ヒューズは作動しないように考慮しておく。

以上が電動機の保護方式の選択にあたり考慮すべき基本事項であるが、このほかにも運転、保守、操作員の安全性、遠隔操作、無人運転のための監視保護装置があり、これらについても十分に考慮する。

10. む す び

以上今日実用されている誘導電動機の各種保護方式についてとくに最近実用化された サーミスタ による温度保護方式を中心にその概要、得失を述べまた保護装置選択の条件をまとめた。電動機の保護装置は日進月歩の電気機器のなかにあってあまり進展のないものの一つであったが、最近 サーミスタなどの半導体によるすぐれた温度検出装置ができるようになり電流のみによる保護から温度による新しい保護方式が実用化されつつある。しかしこの新しい保護方式にもまだ問題点があり現在のところでは比較的小容量の一部の電動機に実用されているにすぎないが、今後は大いに実用されるものと思う。現在の保護方式はすべて電動機の固定子側からの監視のみによっているが、電動機の温度上昇は大容量のものではむしろ回転子側から制限を受けることが多いので、回転子に対する直接の保護方式、保護装置を考えることが今後の大きな課題であろう。

参 考 文 献

- (1) "Optimize Protection for 3 Phase AC Motors" Electrical World 9, (1963).
- (2) "Applying the Gurdistor Motor Protection" Westinghouse Engineer Vol 22 9, (1962).
- (3) "Protect your Motors with temperature-sensing devices" Power 5, (1961).

SCR 可変周波数インバータによる交流電動機の速度制御

大野 栄一・赤松 昌彦*

Speed Control of AC Motors with Adjustable Frequency SCR Inverters

Research Laboratory Eiichi ŌNO・Masahiko AKAMATSU

With the development in practical operation of static inverters using silicon controlled rectifiers, attempts have been extensively made to use them as adjustable frequency sources with an aim of realizing simple and accurate speed control of AC motors. This calls for a variable frequency static inverter operating with stability and simplicity under variable conditions. To meet the requirements, Mitsubishi has developed one having auxiliary commutation circuits and feedback current transformers, the former functioning to improve the commutation characteristics even at low DC voltage while the latter bettering the efficiency and stability. The distinguished characteristics of this new inverter rated at 4.5 kVA has been proved by an experimental drive of a squirrel cage induction motor controlled at frequencies ranging from 15 to 120 cycles.

1. まえがき

従来、交流電動機、とくに誘導電動機は堅ろうで保守の必要もなく、商用電源から直接駆動できるため一般の動力源として広く各種産業の分野に利用されてきた。しかしながらこれを用いて広範囲の速度調整や、精密な定速度運転を行なうことは困難で、極数変換、二次抵抗制御、リアクトル制御あるいはクレーマ、セルビウスなど種々の方式が試みられているが、決定的なものとはいがたい。

これに反して直流電動機はラシ、整流子の摩耗部分をもつ欠点はあるが、制御性能はすぐれており、精密定速度制御はいうに及ばず、可変速度調整、急激な可逆運転が可能なため、製鉄、製紙などの生産設備として広く用いられている。

これら両者の特長を結びつけ、交流機によって制御性能を直流機並みにしたのが、ここに述べる可変周波数電源による交流機駆動方式で、この内には一般に無整流子電動機と呼ばれているものもある。この方式の中心は可変周波数電源で、従来も回転機あるいはサイラトロンやイグナイトロンなどの放電管によるものは試みられていたが、最近の半導体技術の発達に伴う産物としてのSCR（シリコン制御整流器）の出現によりにわかに注目されるに至った。それはSCRの出現により小形軽量で性能もよく、信頼度の高い実用的な可変周波数電源が得られる見とおしが立ったからである。^{(1), (2), (5), (6), (7)}

しかしながら、本格的な実用段階に入るにはまだ種々の問題もあると考えられる。ここでは広範囲の可変速度制御を可能とするような可変周波数インバータについて考察を加え、新たに転流補助回路と変流器幅還回路をもつことを特長とする改良形SCR並列インバータについて述べ、合わせて実際に般用誘導電動機を用いて15~120c/sの範囲で運転した結果を報告する。

2. 電動機駆動用可変周波数インバータの必要条件

2.1 必要な特性

インバータによる交流電動機の駆動には高速一定回転を得るものと、広範囲の速度調整を目的とするものがあるが、ここでは1章にも述べたように後者に主眼をおいている。そこでまずこの場合のインバータに要求されるおもな特性を列挙してみよう。

(1) 周波数の変化できる範囲が十分広いこと。しかも定数の切り換えや、起動停止などの複雑な操作なしで連続的に任意の周波数に設定できること。また三相以上の場合相回転の方向も容易に反転できること。

(2) 交流電動機内部の磁束振幅を一定に保つため、周波数にほぼ比例して出力電圧も広範囲に変化できること。（次節参照）

(3) 上記のように周波数・電圧が変化したときにも常に十分な起動電流が得られること。

(4) 電動機の広範囲な負荷変動に対して静的にも動的にも十分安定で、転流失敗など生じないこと。

(5) 回生制動ができるようにインバータを通じて電力返還が可能のこと。

このほか高効率、小形、軽量、安価であるとともに保守が容易で高信頼度・長寿命であることが要求されるのは当然である。

2.2 周波数と電圧の関係

前節の(2)で必要な特性として電圧も周波数と大体比例して変化させることを述べたが、ここでさらに詳しくこの関係を検討してみよう。

誘導電動機の等価回路は一般に図2.1(a)のようにおわされる。ここで、抵抗分は周波数に無関係で、リアクタンス分は周波数に比例するものと仮定すると等価回路は同図(b)のように変換できる。

ただしFは電源の周波数、 f_1 はスペリ周波数で、 x_1 、 x_2 、 b はそれ

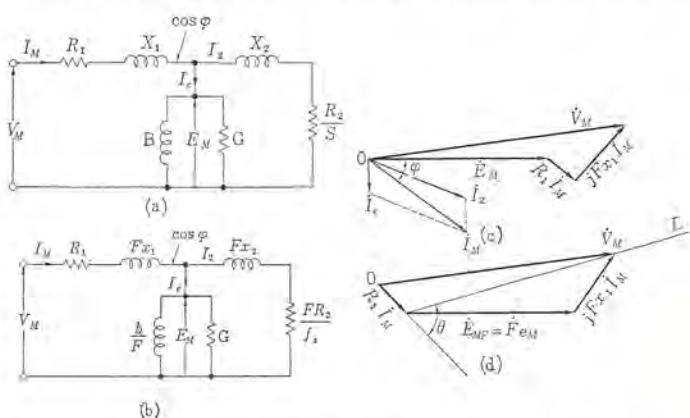


図 2.1 誘導電動機の等価回路およびベクトル線図
Fig. 2.1 Equivalent circuits and vector diagrams of an induction motor,

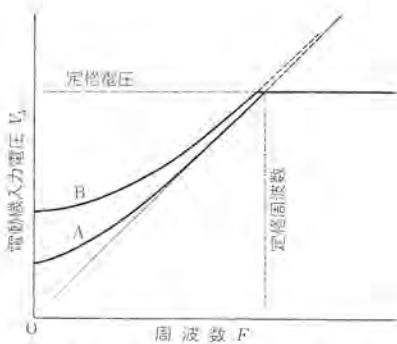


図 2.2 周波数と電動機電圧の関係
Fig. 2.2 Relation between frequency and motor input voltage.

それ X_1, X_2, B の F に対する比例係数と考える。

この等価回路のベクトル線図は同図(c)のようになるが、これを少し書き換えると同図(d)のように変換できる。

ここで電源周波数 F が変化した場合に、誘導電動機に磁気飽和を生じないようにするため、空ゲキ磁束密度を一定にするよう電源電圧 V_M を変化させることにする。空ゲキ磁束密度は等価回路における e_M に比例し、一方電動機逆起電力 E_M は周波数と空ゲキ磁束密度の積に比例するから、図 2.1 (d)において e_M を一定として $E_M = Fe_M$ の関係を保って変化したときの V_M の大きさが、磁束密度一定のときの周波数と電圧の関係を与える。このときの V_M の軌跡は図の直線 L となることから V_M の大きさは

$$V_M = \sqrt{(F e_M + R_1 I_M \cos \varphi + F x_2 \sin \varphi)^2 + (R_1 I_M \sin \varphi + F x_2 \cos \varphi)^2} \quad (2.1)$$

の関係が得られる。

この式は電動機の入力電流 I_M の関数にもなっているので、一般には I_M として定格電流を考えればよいが、とくに低い周波数での起動トルクを大きく得たいときには、 I_M としてさらに大きな電流を式(2.1)に代入すればよい。

図 2.2において、曲線 A は定格電流時の空ゲキ磁束密度を一定にした場合、曲線 B は低周波での起動トルク増加を目的とした場合の周波数と電動機入力電圧の関係を示したものである。

定格周波数以上では、式(2.1)によれば V_M はさらに大きくできるが、機器の絶縁その他を考慮して一定とした。したがって周波数に無関係に一定の定格電流が得られるとすれば、電動機出力は定格周波数以下では周波数にほぼ比例し、それ以上ではほぼ一定となる。

3. 従来のインバータとその特性

ここで従来からよく知られている直列形および並列形インバータ(図 3.1)の基本特性について前節の要求事項を考えながら検討を加えてみよう。

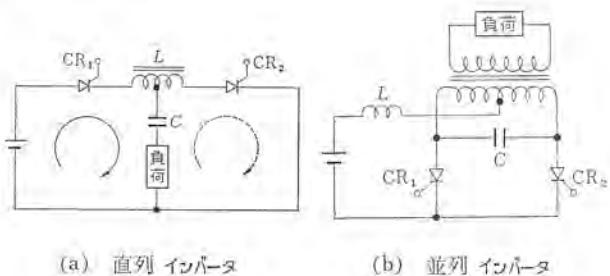


図 3.1 インバータ基本回路
Fig. 3.1 Basic inverter circuits.

3.1 正弦波出力インバータ(共振形インバータ)

従来の電力用インバータは一定周波数の正弦波出力を目的としたため、自然転流が可能で重負荷になると余裕角が増大する直列形がすぐれたものとされてきたが、直列形に限らず正弦波出力インバータの場合には転流リアクタと転流コンデンサはその周波数でほぼ共振となるように定数が選ばれる。したがって周波数が広範囲に変化する場合には、それらのいずれか一方または両方を切り換えて、絶えず共振状態に近くなるようにする必要があり、簡単に周波数の連続切り換えができるない。また負荷変動に対する安定性においても問題があるが、高い周波数では有利な点もあり、高速電動機用の電源として用いられた例が多い。

3.2 方形波出力インバータ

この場合には転流用の L および C による共振周波数は出力周波数よりもかなり高く選ばれるため、出力波形はほぼ方形波となり、転流用 LC の値が小さくなるとともに、周波数変化に対しても原理的に制約がなく、パラメータの切換なしで連続的に広い周波数範囲の可変周波数インバータを得ることができる。

さらに、正弦波インバータでは全期間が過渡現象であるのに対して、方形波インバータでは転流時の過渡現象は短時間で終わり、大半の期間は電源が負荷と直結した状態となるためきわめて安定で、負荷変動にも強く、電動機の駆動に適したものと考えられる。

このような方形波インバータは回路としては並列形によって実現されるが、並列形では常に強制転流を行なうため、重負荷時の逆電圧時間(従来の一定周波数インバータでは余裕角と呼んでいたものであるが、可変周波数のときには時間で表わす)が短かくなり、遂には転流失敗を生ずる欠点を持っている。また軽負荷時に出力電圧が増大したり、低力率負荷の場合高いセンタ電圧を生じて、電圧変動率を大きくするとともにSCRの耐圧をもおびやすくなる。

これに対してMc Murrayらの考案した改良形インバータ⁽³⁾では、図 3.2 に示すように帰還用ダイオードによって負荷および転流回路の無効電力を直流側に帰還して特性の改善を行なったもので、高効率で電圧変動も小さく、負荷力率の変動に対しても安定となった。このMc Murray回路はその後の並列インバータ発展の基礎となったもので、次章で詳述するわれわれの改良形インバータも、これを電動機制御に適するようこれをさらに改良したものである。

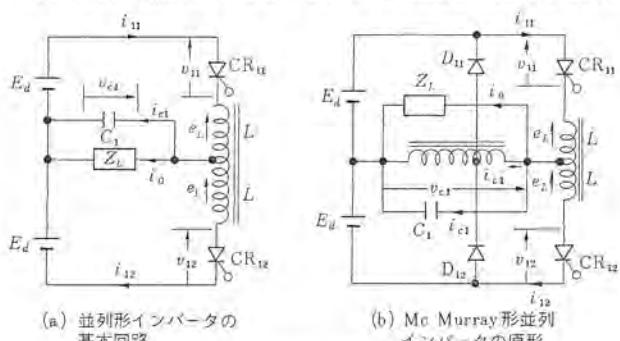


図 3.2 並列インバータ回路
Fig. 3.2 Parallel type inverter circuits.

3.3 並列形インバータの転流限界

並列形インバータが転流失敗することなく安定に運転できる限界は、転流時に消弧すべきSCRが、その素子のターンオフ時間より長い逆電圧期間を持つことができるかどうかによって決まる。

図 3.2 (a)の並列形インバータの基本回路においてCR11からCR12への転流を考えてみよう。CR12点弧前にはCR11によって転流コンデンサは図の極性には電源電圧 E_d に近く充電されて

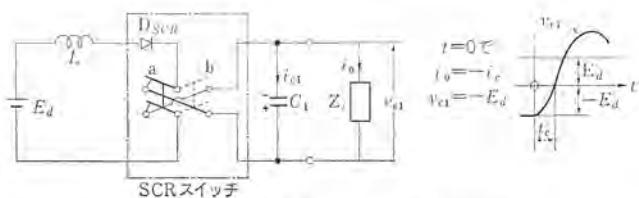


図 3.3 並列形 インバータの等価回路
Fig. 3.3 Equivalent circuit of parallel type inverter.

おり、これが CR12 の点弧によって転流リクトルの下半分に印加され、リクトルの電磁結合によって上半分にも同じ電圧 v_L が誘起する。CR12 点弧後の CR11 の端子電圧は同図から

$$v_{11} = E_d - v_{cl} - e_L = E_d - v_{cl} - (E_d + v_{cl}) = -2v_{cl} \quad \dots(3.1)$$

となる。

コンデンサ電圧 v_{cl} は CR12 の点弧により今までとは逆極性の電源につながれたことになるから当然 $+E_d$ から $-E_d$ に向って変化し始める。これはちょうど図 3.3 の等価スイッチを切り換えたことに相当し、 v_{cl} は回路定数によって決まる過渡現象を示す。

式 (3.1) からわかるように CR11 端子電圧はコンデンサ電圧の 2 倍の大きさで極性は逆であるから、 v_{cl} が $+E_d$ から減少して、0 になるまでの間が逆電圧期間となる。

負荷の L 分によってこの期間に負荷電流は変化しないものとすれば逆電圧期間 t_c は

$$t_c = \sqrt{LC} [\sin^{-1}(x/\sqrt{x^2+1}) - \sin^{-1}(x/2\sqrt{x^2+1})] \quad \dots(3.2)$$

$$\text{ただし } x = (E_d/I_0) \cdot \sqrt{C/L}$$

となる⁽³⁾。ここで I_0 は転流直前に負荷および転流リクトルを流れていた電流である。

式 (3.2) は L が十分大きいとき $x \ll 1$ となって

$$t_c = (C/2) \cdot (E_d/I_0) \quad \dots(3.3)$$

となる。

すなわち逆電圧期間は直流電源電圧と転流コンデンサ容量に比例し、転流直前の負荷電流に逆比例することがわかる。したがって転流限界出力電流 I_{oc} は逆電圧期間が、SCR のターンオフ時間 (t_{OFF}) と等しくなったとき生じ、式 (3.3) から

$$I_{oc} = C \cdot E_d / 2 \cdot t_{OFF} \quad \dots(3.4)$$

となり、直流電源電圧と転流コンデンサ容量とに比例し、SCR のターンオフ時間には逆比例する。図 3.4 の $I_{oc}(1)$ はその特性を示したものである。

ところで 2.2 節で検討したように、電動機の条件から周波数を変える際には、電圧もほぼ比例して変化さざるを得ないが、このときの出力電流は常に一定の最大電流が安全に得られることが望ましい。これを図 3.4 の I_M で示すと、 $I_{oc}(1) < I_M$ となる範囲、

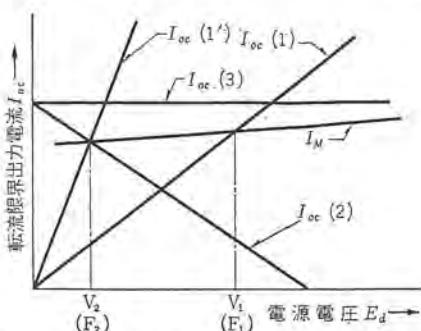


図 3.4 電圧または周波数と所要出力電流との関係
Fig. 3.4 Relation between maximum output current and input voltage in parallel type inverter.

すなわち $V < V_1$ または $F < F_1$ では転流失敗を生じて使用できないことになる。もし転流コンデンサの容量を増せば限界出力は $I_{oc}(1')$ となり、使用範囲は広くなるが、依然として転流失敗領域が残る上に転流時の損失は増し、効率が低下する。

結局これを解決するためには、電源電圧によらず、一定の転流限界特性をもつ新しい可変周波数インバータを開発しなくてはならない。次章でその詳細を論ずることにしたい。

4. 転流補助回路付改良形インバータ

前章までに電動機駆動用インバータの所要特性、およびこれに最も適したものと思われる方形波出力並列形インバータについて説明し、問題点を明らかにした。この章では、これらの問題点を解決するため考案した転流補助回路と、変流器帰還とを採用した改良形インバータについて述べることにする⁽⁴⁾。

4.1 転流補助回路

前章で並列形インバータの転流限界は直流電源電圧に比例することを示したが、これは電源電圧が低下することにより、転流時の転流コンデンサの電荷が少くなり、十分な逆電圧期間を得ることができなくなるためである。そこで、転流時に外部から積極的に消弧しようとする SCR に逆電圧を印加して、特性を改善しようとしたのがこの転流補助回路の考え方である。(特許出願中)

図 4.1 はこれを具体化した一つの例で、図 3.2 に対して点線で包まれた部分が付加された形である。この転流補助回路は負荷が補助転流コンデンサ C_2 で直流電源は一定の E_e であるような並列形インバータで、転流リクトルのみが主回路と結合したものである。

転流補助回路の SCR である CR₂₁, CR₂₂ はそれぞれ主回路の CR₁₁, CR₁₂ と同期して点弧され C_2 に充電された電圧を転流リクトルの二次巻線に印加する。これが一次巻線に誘起され消弧すべき SCR に逆電圧となって加えられる。CR₂₁ または CR₂₂ は、 C_2 の充電電流のみが流れて次の転流に至る前に自然転流で消弧するため、補助回路には転流失敗の危険はない。

ここで転流補助回路による転流限界特性を求めてみよう。簡単のために主転流コンデンサ C_1 はないものとして転流補助回路単独式の場合を考える。また転流リクトルの巻数比を $\alpha = n_1/n_2$ とすると図 4.1 から主回路について

$$v_{11} = E_d - e_0 - e_{L1} \quad \dots(4.1)$$

補助回路について

$$e_{L1} = \alpha e_{L2} = \alpha (E_e + v_{c2}) \quad \dots(4.2)$$

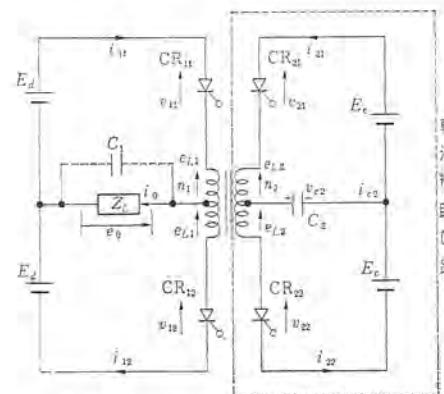


図 4.1 転流補助回路付並列形インバータ
Fig. 4.1 Improved parallel type inverter with an auxiliary commutation circuit.

がなりたつ。

また転流の前後を通じて転流 リアクトルの磁束が連続であることから、転流時の C_2 放電電流 i_{d20} は転流直前の主回路電流 i_{0L} に等しい。転流期間中での放電電流の変化を無視すれば

$$i_{C_2} = i_{C_0} = \alpha \cdot i_{0,l} \quad \dots \dots \dots \quad (4.3)$$

と近似できるから、補助転流コンデンサ C_2 の電圧 v_{d2} は

ここで v_{C_2} の初期値 v_{C_20} は後述の変流器帰還回路方式を採用したとき、変流比を $\beta = N_1/N_2$ とすると

$$v_{C_20} = (1 + \beta/\alpha) E_0 \quad \dots \dots \dots \quad (4.5)$$

以上の関係式を式(4.1)に代入して

$$v_{11} = -2(\alpha E_d - E_a) + (\alpha^2/C_2) \cdot i_{01} \cdot t \quad \dots \dots \dots (4.7)$$

となる。転流が成功するためには $v_{11} \leq 0$ の期間が SCR のターンオフ時間 t_{OFF} より長いことが必要で、その限界出力電流を i_{OLmax} とすると式(4.7)から

$$i_{0l\max} = (2/\alpha^2) \cdot (\alpha E_C - E_d) \cdot C_2/t_{OFF} \quad \dots \dots \dots \quad (4.8)$$

を得ることができる。

この転流限界出力電流は図 3.4 に示す $I_{oc}(2)$ のように主回路電圧 E_d が低いほど大きくなる性質のものであるから、これと主転流コンデンサ C_1 による従来の並列形インバータの転流限界出力電流 $I_{oc}(1)$ を合わせれば、電源電圧 E_d によらず常に一定の限界出力電流 $I_{oc}(3)$ をもつ、すぐれた可変電圧インバータを得ることができる。

さらに、この転流補助回路があれば、主回路電源の内部インピーダンスを過負荷時に高くして電圧に垂下特性をもたせておけば、過電流によって主回路が転流失敗したとしても、 E_d が降下すれば転流補助回路の転流能力は増加して、正常な負荷にもどれば自動的に自己復帰するという実用上きわめて優れた特性をも生ずる。

4.2 变流器慢速回路

前章で述べた Mc Murray の帰還回路は出力変圧器の中間タップからダイオードを通じて帰還する方式であったが、これによると、元来出力変圧器の不要な図4.2(a)の場合にも帰還用変圧器を使用しなくてはならない。したがって低い周波数ではこの飽和が問題になり、周波数の下限を生ずる。

また Mc Murray 形においても、抵抗帰還形を用いれば低周波まで動作可能となるが、抵抗で転流 エネルギーを消費するため高周波での効率が著しく低下し実用的でない。

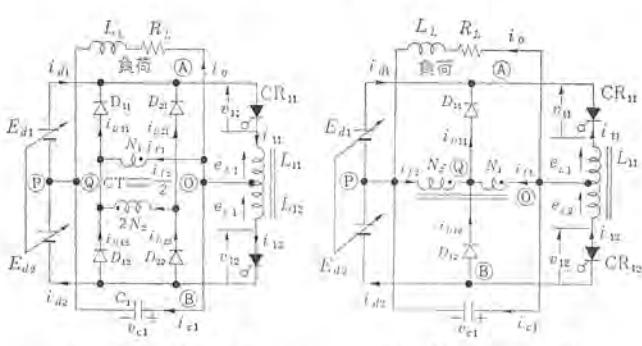


Fig. 4.2 Improved parallel type inverter with

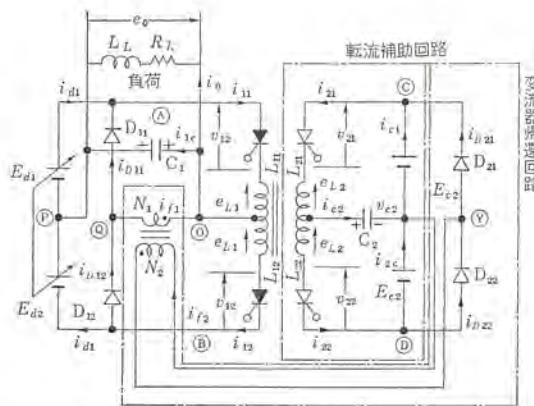
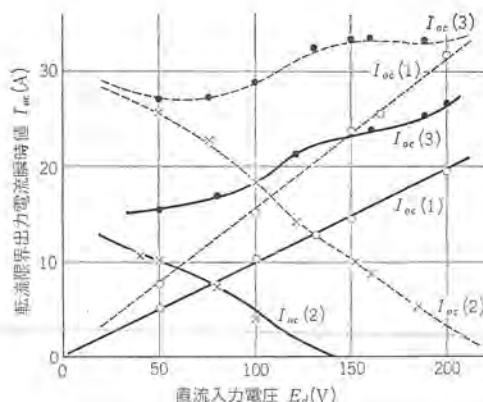


図 4.3 転流補助回路式変流器帰還形改良形 インバータ
Fig. 4.3 Improved parallel type inverter with an auxiliary commutation circuit and a feed back current transformer.



	曲線と回路形式	C ₁	C ₂
回路: 図 4.3	<i>Loc(1)</i> 従来の並列形	10 μF	0 μF
$L_1 = L_2 = 300 \mu H$	<i>Loc(2)</i> 帳流補助回路単独形	0	6 μF
$E_C = 160 V$	<i>Loc(3)</i> 並流補助回路付	10 μF	6 μF
実験: オンダクタンス負荷			
点線: 純抵抗負荷			

図 4.4 転流限界出力電流と電圧との関係の例
Fig. 4.4 An example of maximum output current characteristics of the improved inverter with an auxiliary commutation circuit.

これらの問題を解決するのが図 4.2 (b) の変流器帰還方式である。これは帰還電流を変流器二次巻線から整流器を通じて帰還するもので、変流器は帰還電流の流れる各サイクルの初期にのみ動作すればよいかから Mc Murray 形の帰還用変圧器に比べ小形ででき、低い周波数でも正常に動作する。

さらにこの回路は、前述の転流補助回路とともに用いると、いっそう効果を發揮する。この場合主回路の転流時の蓄積エネルギーは変流器を通って補助回路電源に帰還されるから、主電源が変化しても常に最適の条件で帰還を行なうことができるからである。

4.3 転流補助回路付変流器型還形インバータ

前述の転流補助回路と変流器帰還回路を組み合わせた図4.3の改良形インバータは両者の特長を兼ね備え、電動機制御に適したすぐれたものとなることがわかった。

図4.4はこの回路において主電源電圧を変化して実際に転流限界出力電流を求めた一例で、実線は誘導性負荷時、点線は抵抗負荷時の特性である。図中 $I_{oc}(1)$ は転流補助回路なしの場合で、3.3節で検討したとおり電源電圧 E_d に比例している。また $I_{oc}(2)$ は転流補助回路のみで転流を行なわせたときの特性で、4.1節で検討したところ E_d の増加とともに直線的に下降している。1た

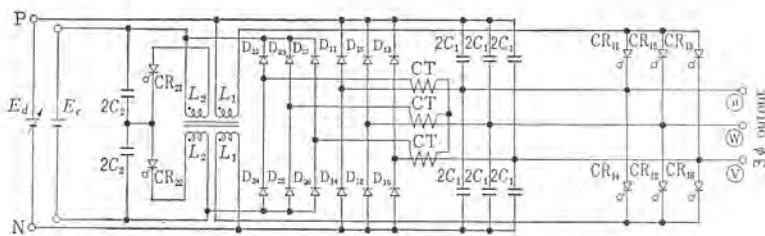


図 4.5 改良形可変周波数駆動用三相 SCR インバータ回路
Fig. 4.5 Improved 3-phase inverter for AC motor drive.

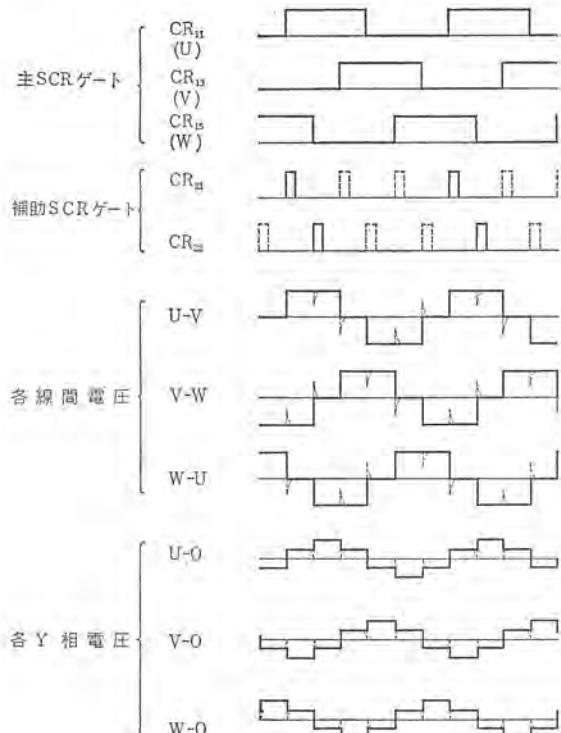


図 4.6 三相方形波 インバータ 出力波形
Fig. 4.6 Output wave forms of the improved 3-phase inverter.

がって両者を併用した場合の特性は $I_{oc}(3)$ となって、 E_d によらずほぼ一定の転流限界となる。図 4.4 では実験のつごうで $C_1 > C_2$ となり、 $I_{oc}(2)$ がやや小さいため $I_{oc}(3)$ は完全に一定にならないが、これは $C_1 = C_2$ とすることによりさらに改善できる。

4.4 改良形三相インバータ

実際に大きな電動機を制御するためには、三相出力とする必要がある。図 4.5 は前述の単相インバータを三相にしたものである。ここで、簡単化のため転流補助回路は一括してあり、図の左半分がこれに当る。したがって転流補助回路はいずれの相が転流するときにも動作することになり、単相の場合の 3 倍の周波数で働く。

図 4.6 は理解しやすいように各部の波形を示したものである。各相の出力電圧に点線で示したクビレがあるのは転流補助回路を一括したためで、大容量の場合、各相に補助回路をつければこのクビレはなくなる。

三相インバータの具体例は次章の電動機制御の項で述べる。

5. 誘導電動機の可変周波数駆動^{(5), (6)}

可変周波数インバータによる交流電動機の速度制御の第一段階として、まず般用カゴ形誘導電動機を対象とした装置を試作し、実験を行なったので以下に概要を述べる。

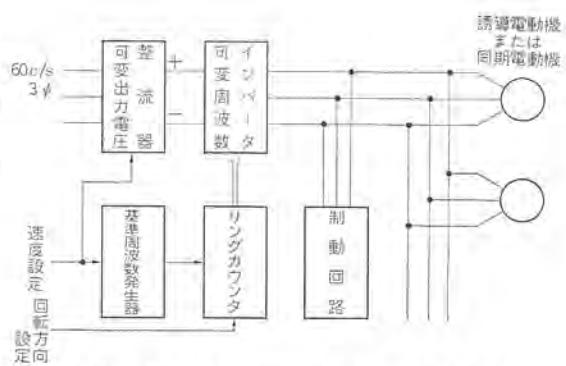


図 5.1 可変周波数 インバータによる速度制御装置
Fig. 5.1 Speed control system of AC motors using variable frequency inverter.

5.1 装置の構成方式

実際に商用電源から電力を供給を受けて可変周波数駆動を行なうためには、前章で述べた改良形インバータを中心として、図 5.1 のような構成を取らねばならない。

ここで電力回生の可能性に関連して、制動回路の要・不要およびインバータ出力電力の制御方法が問題になる。改良形インバータ自身は前述のように帰還回路をもっており、直流側へ電力回生が可能であるが、一般に図 5.1 のように整流電源を用いた場合には、整流器が商用電源への電力回生を不可能にする。

したがって電動機の急激な速度低下や逆転が要求されるときは、回生はやめて制動抵抗をそう入して、ここに電力を消費するのが最も簡単な方法であろう。

もし、この整流電源に対してインバータ特性を付加すれば、商用電源への電力回生が可能となって特性が向上するが、装置はかなり複雑となるため大容量以外には適さないであろう。

そのほか、直流電源電圧は一定とし、2 台のインバータを同一周波数で位相のみをずらせて運転し、その合成電圧を出力すれば位相角によってパルス幅変調ができる、出力電圧を可変とすることができます⁽⁷⁾。このようにすれば直流電源の電圧調整を行なう必要はないので、電池などを電源とする場合に適した方式であるが、商用電源に電力回生を行なうためには、やはり整流器にインバータ部を付加して可逆変換器としなくてはならない。

ここでは最も基本的な方式として、単なる可変電圧整流器を用いた方式によって装置を構成し実験を行なった。

5.2 構成要素とその特性

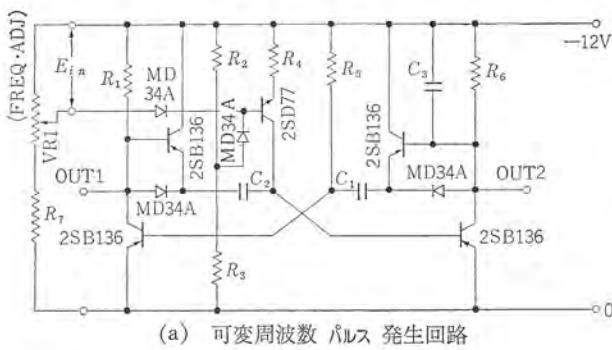
5.2.1 可変周波数パルス発生器および点弧回路

三相インバータを制御するためには、基準パルスの周波数は出力周波数の 6 倍が必要となる。図 5.2(a) の可変周波数パルス発生器は、同図(b) に示すように制御電圧に比例した周波数のパルスを発生する。これを基準として図 5.3 に示すような構成により 6 進のリングカウンタにより、各相 SCR の点弧回路へ必要なパルスを分配する。

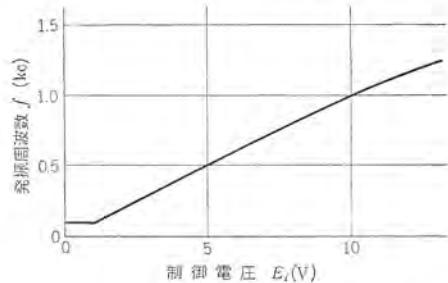
図 5.4 はそれらのパルスを示すオシログラム、図 5.5 は実際の装置のパッケージを示した写真である。

5.2.2 整流電源

直流電源は三相商用電源を整流して得ているが、前述のように交流電動機を駆動するためには周波数には比例して電圧も変化させる必要があった。ここでは簡単のため交流側に三相シユウ(摺)動電圧調整器をそう入して、ここで電圧調整を行なわせる方式とした。また直流電源には過負荷保護として磁気增幅器式過電流リ



(a) 可変周波数 パルス 発生回路



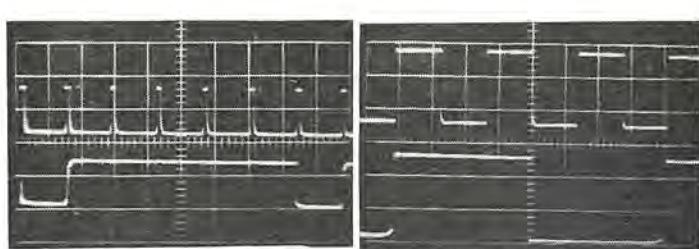
(b) 制御特性

図 5.2 可変周波数 パルス 発生器
Fig. 5.2 Frequency characteristics of variable frequency pulse generator.



図 5.3
点弧 パルス 制御
回路の構成

Fig. 5.3
Block diagram
of control
circuits of
gate pulses.



上 パルス発生器出力パルス
下 リングカウンタ出力パルス
周波数 60 c/s 横軸 2 ms/div

図 5.4 点弧回路波形
Fig. 5.4 Wave form of gate pulses.

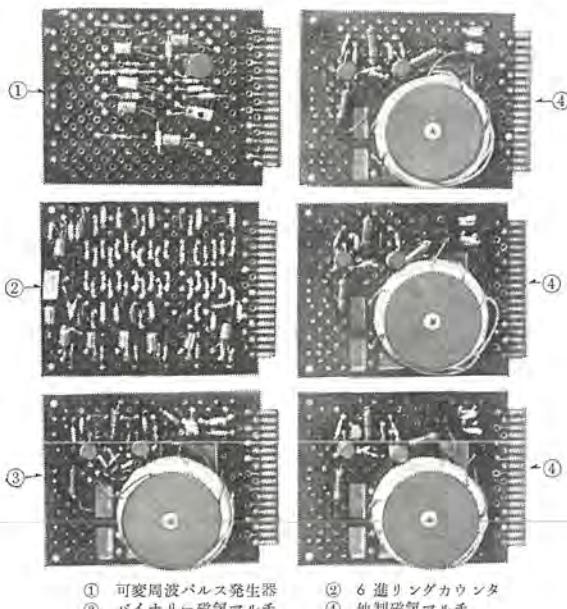


図 5.5 点弧回路 パッケージ

Fig. 5.5 Package of the gate firing circuit.

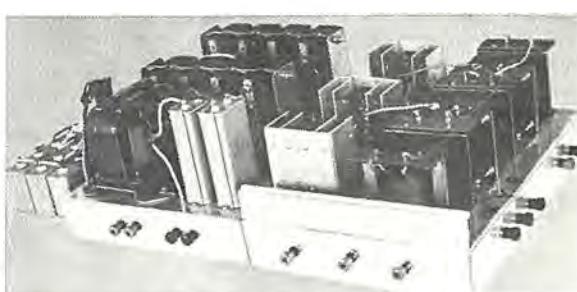


図 5.6 試作 インバータ の外観

Fig. 5.6 Experimental set of main part of the improved inverter.

短絡電流が長時間続ければ保護回路が動作して電源を断つ。

この例からも転流補助回路付インバータは、きわめて安定で信頼度の高いものであることがわかる。

5.2.4 電動機

実験に用いたものは三相標準カゴ形誘導電動機 200V, 8.5A, 60c/s, 2.2kW, 4極のもので、とくに可変周波数駆動用に設計したものではない。したがって前記のようにインバータは 150c/s までの設計となっているが、電動機との組み合わせ試験は最高 120c/s にとどめ、負荷試験など長時間をするものは 75c/s までとした。

5.3 総合試験結果

5.3.1 静特性

上記装置を組み合わせて、実際に 15~120c/s の特性をまと

図 5.6 はインバータ部の試作装置の外観を示す。また図 5.7 には抵抗負荷時の 15~150c/s における線間出力電圧波形のオシログラムである。

図 5.6 はインバータ部の試作装置の外観を示す。また図 5.7 には抵抗負荷時の 15~150c/s における線間出力電圧波形のオシログラムである。

また 60c/s、抵抗負荷時の出力特性の実測結果が図 5.8 である。試作セットでは出力に昇圧トランジスタを用いており、また転流補助回路を三相共通にしたため、効率はやや低く最大 88% となっているが、上記の点を改めれば 90% 以上にすることは容易であろう。

図 5.9 は転流補助回路による過負荷時の自己復帰特性を示したオシログラムである。すなわち 0.5Ω の低抵抗を通じて出力を短絡すると、約 120A の短絡電流が流れ転流失敗を生じているが、これを取り除けば、ただちに正常な動作に移っている。もちろん

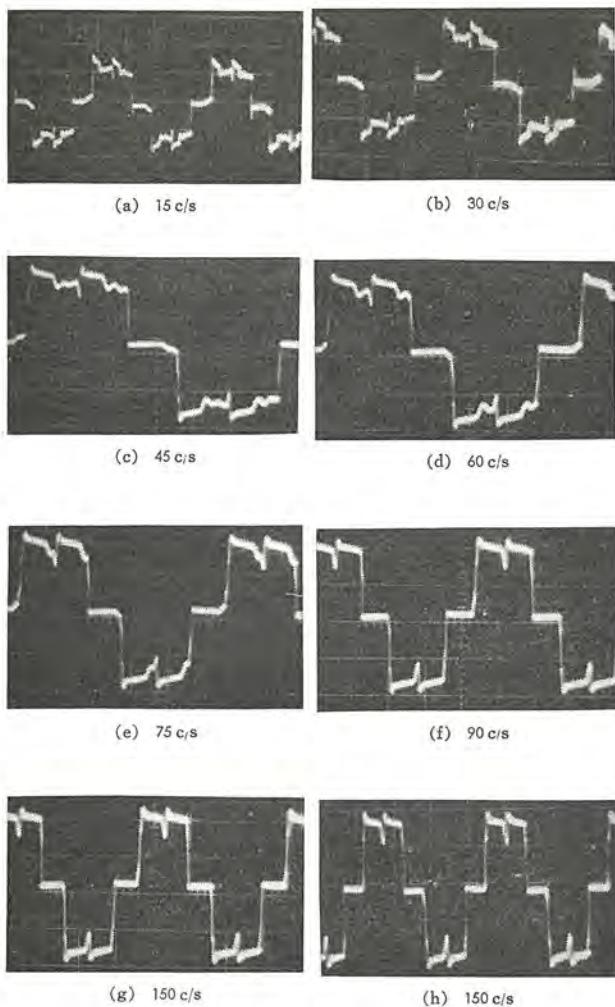


図 5.7 周波数 15~150 c/s における インバータ出力電圧波形 (抵抗負荷時)

Fig. 5.7 Output voltage waveform in the inverter with resistive load.

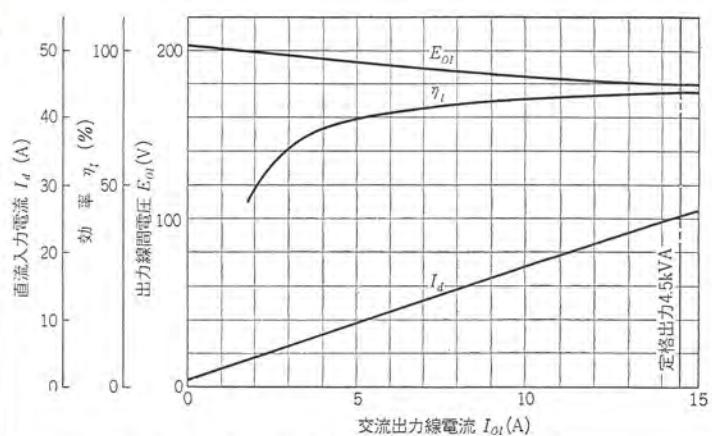
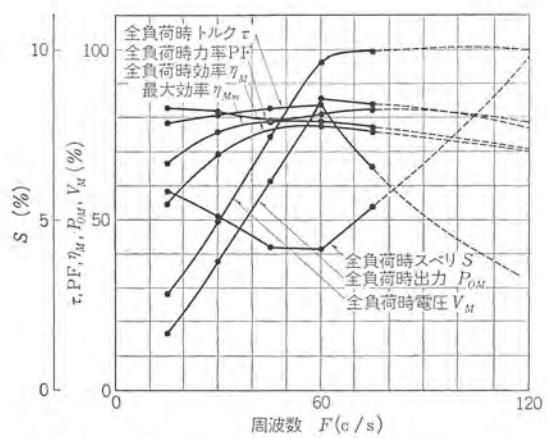


図 5.8 インバータ負荷特性 (60 c/s, 抵抗負荷時)
Fig. 5.8 Output characteristics of the inverter.



誘導電動機定格
電圧: 200 (V) 電流: 8.5 (A) トルク: 1.24 (kg-m) 周波数: 60 (c/s)
極数: 4 スペリ: 5 (%) 出力: 2.2 (kW) 相数: 3
(注) 全負荷時とは電流が定格値のとき

図 5.10 2.2 kW 誘導電動機駆動特性 (実測)
Fig. 5.10 Driving characteristics of 2.2 kW induction motor with the variable frequency inverter.

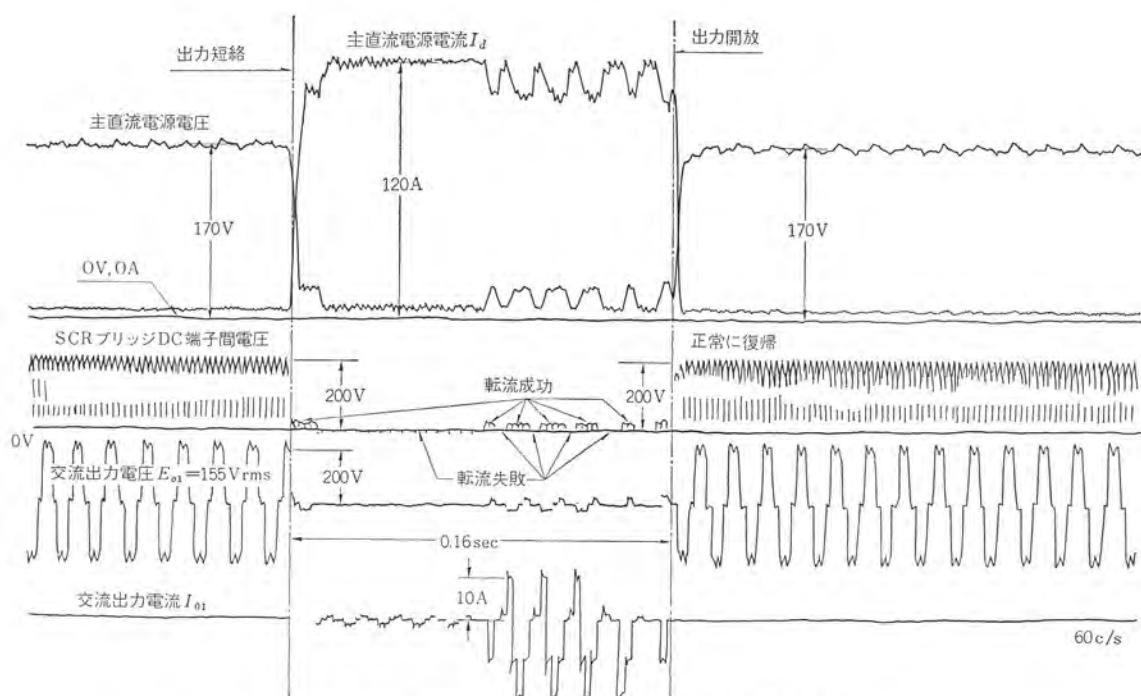


図 5.9 出力端子を一時短絡した場合の過渡現象 (0.5 \Omega 直列)
Fig. 5.9 Transient behavior when load is short circuited during time interval of 0.16 sec.

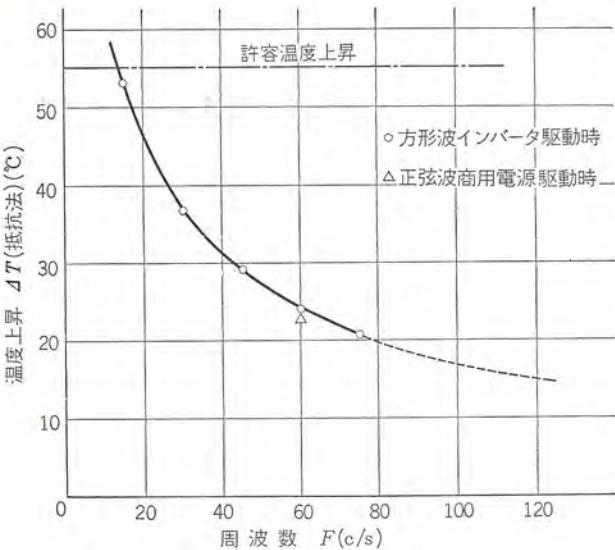


図 5.11 各周波数における電動機温度上昇
Fig. 5.11 Temperature rise of induction motor in various frequencies.

めて示したのが図 5.10 である。このグラフは、各周波数において電動機入力電流が定格値 (8.5 A) となるときを全負荷時として諸量を示したものである。

この実験では、簡単のためインバータの主直流電源電圧を無負荷時に $20 + (f/60) \cdot 200$ V で、上限を 220 V としたため、全負荷時電圧は図のように電源の変動率分だけ低下している。

この結果から全負荷時の力率、効率は全周波数範囲ではほぼ一定であり、全負荷時のスベリも大体定格 (60 c/s) の 5%，すなわち 3 c/s 程度であることがわかる。

電圧を 60 c/s までは周波数にはほぼ比例的に上昇し、60 c/s 以上では一定にしているから、当然全負荷時出力はこの電圧の変化と同じになり、トルクは逆に 60 c/s 以下ではほぼ一定、60 c/s 以上では周波数に逆比例して低下することになる。

5.3.2 力率、効率

このインバータの出力波形は方形波であり、第 3 高調波は含まないが、第 5, 7, 11, 13, …… 高調波を含み、そのヒュミ率はそれぞれ $1/5, 1/7, 1/11, \dots$ である。このような波形を加えた場合の電動機の力率および効率は、正弦波電源に比べ多少低下することが予想される。

実際にこのインバータで周波数を 60 c/s としたときの電動機特性と、同一条件で商用電源 (60 c/s) から直接駆動したときの特性を比較すると、前者では全負荷時に力率が 7.5%，効率が 2% 程度低下しているため、同一の定格電流 (実効値) において出力は約 10% 低下する。またトルクは約 7% 減少し、スベリは 0.4% 増なっている。

このように力率低下はかなり大きいが、効率低下は予期以上に小さく、第 5 高調波以上の影響が比較的少ないことを示している。

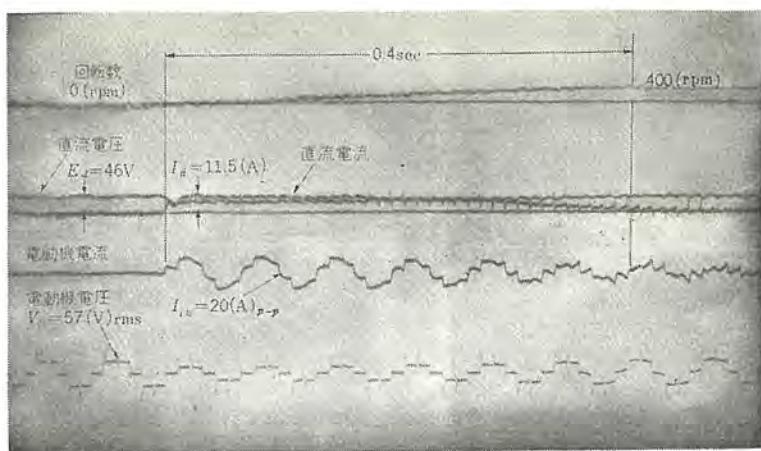


図 5.12 起動時過渡現象 (15 c/s, 57 V)
Fig. 5.12 Transient of starting at 15 c/s.

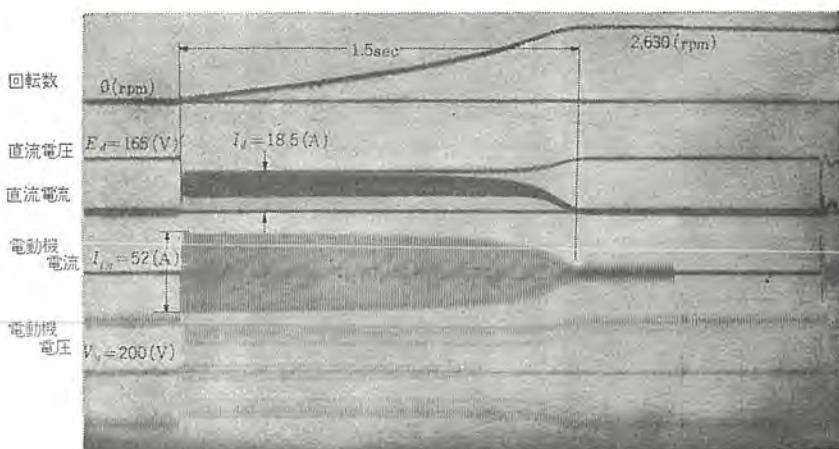


図 5.13 起動時過渡現象 (90 c/s, 200 V)
Fig. 5.13 Transient in starting at 90 c/s.

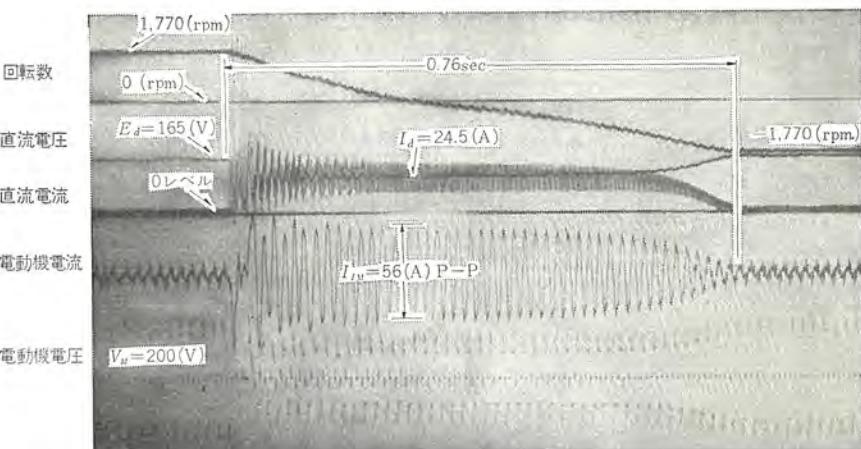


図 5.14 逆転時過渡現象 (60 c/s, 200 V)
Fig. 5.14 Transient in reversing at 60 c/s (plugging)

5.3.3 温度上昇

図 5.11 にこの可変周波数インバータで駆動した場合の、定格電流 (8.5 A) 時における温度上昇を抵抗法によって測定した結果を示した。これによると温度上昇は冷却効果の悪い低周波ほど大きく、15 c/s では A 級絶縁での許容温度上昇 55°C に近い 53°C を示し、これより低い周波数に対しては別に冷却を必要とすることがわかる。

また図中 60 c/s の△印は正弦波電源の場合であるが、ほとんど

差がなく方形波でもこの点では問題がないといえよう。

この温度上昇は固定子についてであり、回転子は測定不能のため明確にはわからない。高調波分のため回転子のほうが低周波時の温度上昇がやや高くなることも考えられるが、この点は巻線形電動機などによりさらに検討する必要があろう。

5.3.4 過渡特性

最後に、このインバータを用いたときの誘導電動機の起動時および逆転時の過渡特性について記す。ただしここに述べる過渡特性の結果のみは、転流回路の改造前に、1.5 kW の電動機を用いて行なったものであり、静特性に関する諸データより転流限界が低い状態のものであるが、とりあえず報告しておく。

図 5.12 および図 5.13 はそれぞれ 15 c/s, 57 V と 90 c/s, 200 V の場合に誘導電動機をインバータにジカ入れ起動したときの過渡特性で、いずれも転流失敗は生ぜず、それぞれ 0.4 sec と 1.5 sec で最高回転数に達している。

図 5.14 は 60 c/s, 200 V の場合、インバータ SCR の転弧順序を切り換えて相回転を反転して誘導電動機を逆転したときの過渡特性である。この場合反転の初期に 2, 3 回転失敗を生じているが、前に説明した転流補助回路の自己回復特性により正常に復帰して 0.76 sec で逆転を完了している。

6. む す び

以上、最近の SCR 素子の発展とともに大きく注目を浴びている可変周波数 インバータによる交流電動機の速度制御について、とくに広範囲の可変速度制御を円滑に行なうためのインバータの所要特性について検討し、それを満たすものとして、転流補助回路付改良形インバータを開発した経過と、その特性について述べた。この新しいインバータを用いた交流電動機制御方式は下記のような特長をもっている。

(1) 周波数を 0 から数百 c/s まで連続して変化できる。また任意の速度に確実に保つことが容易で速度の ドリフト がない。

(2) どの周波数でも電動機の特性を十分に活用できる。すなわち常に空 ゲキ 磁束を一定に保ち、低周波のときにもほぼ一定の定格 トルク を得ることができる。

(3) インバータの動作性がすぐれ、安定度もよいのでジカ入れ起動、きわめて迅速な速度調節、さらに逆転（ラッピング）を行なうことができる。

このような特長は実際に般用誘導電動機を用いた試験により実証されたが、このインバータ出力電圧波形が方形波であるため高調波による電動機の出力低下と トルクの振動の影響については、さらに詳細な検討が必要であるように思われる。

しかしここに示したような小形電動機については効率低下は 2% 程度で、温度上昇も差がないことから低速時の温度上昇と、高速時の機械強度による制約をこえない限り十分実用的なものであるといえよう。

さらにまた同期電動機を用いることにより、超精密制御や多数電動機の同期運転がきわめて容易に行ないうるであろう。今後半導体制御素子の発展により、さらに高性能で安価なインバータが得られるようになれば、安価で堅ろうな交流電動機と組み合わせた可変周波数 インバータ 方式は、ますます多方面に実用化されるものと大きな期待が寄せられる。

(昭 39-3-16 受付)

参 考 文 献

- (1) C. G. Helmick, I. M. MacDonald : "Adjustable-Frequency AC Drive System with Static Inverter" Westinghouse Engineer, (July 1961)
- (2) 河合ほか: "SCR のインバータへの応用" 「三菱電機技報」 37, No. 5 (昭 38)
- (3) W. McMurray, D. P. Shattuck : "A Silicon-Controlled Rectifier Inverter with Improved Commutation" Comm. & Electronics (Nov. 1961)
- (4) 大野, 赤松: "交流電動機駆動用 SCR インバータ" 電学関西支部 7-23 (昭 38)
- (5) 大野, 赤松: "SCR 可変周波数 インバータによる電動機速度制御" 第 6 回自動制御連合大会 319 (昭 38)
- (6) 佐藤, 重里: "三相 SCR インバータによる誘導電動機の可变速運転" 東芝 レビュー 18, No. 7 (昭 38)
- (7) T. E. Usher, C. D. Back : "Adjustable Speed A-C Drive with SCR Frequency Inverters" Electro-Tech, (Aug. 1963)

大形アナログ計算機の最近の進歩(その2)

柴谷浩二*・持田雅夫*・井塚秀弥*

1. まえがき

MELCOM EA-7100 シリーズ 大形低速度高性能形電子管式 アナログ 計算機は、すでに多数の納入実績を有し各方面で愛用いただいているが、本稿ではその1で紹介した演算制御の自動化に引き続き、その後開発した新しい非線形演算要素について報告するとともに、最近取扱った演算例の2、3について紹介する。

アナログ計算機(以下アナコンという)の利点は非線形演算要素を豊富に用意し、それらを組み合わせ使用することにより多くの非線形問題を簡単に解くことができる点にあり、この意味でここに紹介する非線形演算要素の意義も大きい。

またアナコンで取り扱われる問題の分野も最近は単に航空機、原子力、電力、自動制御工学の方面だけでなく、自動車、化学、土木、建築、医学、経済など多方面にわたっており、とくに本稿で紹介する医学方面への利用は、新分野として今後の発展が期待される分野である。

2. 新しく開発された非線形演算要素

アナコンの特長は非線形問題が線形問題と同じ手法で解けることがあるが、このためにも種々な非線形要素を用意しておき、要求に応じてこれを使用することが望ましい。以下最近までに開発した新しい非線形演算要素について述べる。

2.1 テープ式むだ時間発生器

むだ時間発生器としてはすでに発表した⁽¹⁾ように e^{-ts} を s に関する有理式に展開する関数近似方式があり、プロセス制御などに賞用されているが、とくに過渡特性を問題にするもの、相関関数計算のごとき広い範囲のむだ時間を要求するもの、またアナロゲメモリとして使用したいなどの場合は磁気テープによるむだ時間発生器が必要である。

このテープ式むだ時間発生器は独立のラック構成になっており



図 2.1 テープ式むだ時間発生器の外観

表 2.1 テープ式むだ時間発生器の性能

項目	仕様
方 式	PWM 方式による磁気テープ記録再生
標準遅延時間	0.2~2秒(速度 17.5インチ/秒のとき) 2~20秒(速度 1.75インチ/秒のとき) 目盛板はフルスケールの 1/10 の vernier 付属
テープ速度 速度偏差	1.75インチ/秒、17.5インチ/秒の2段切換 速度変動幅を含めて ±0.3% 以下
最大入出力電圧	±100V
最大出力電流	10mA
入力インピーダンス	500kΩ
周波数特性	0~25c/s まで 30dB 以内
テープ幅	1/4インチ
テープ長	10m 以上エンドレス
ヘッド数	記録ヘッド(2CH) 1個 再生ヘッド(2CH) 2個 消去ヘッド(全幅) 1個
直線性	±1% 以下
S/N 比	40dB 以上
むだ時間精度	0.5% 以下

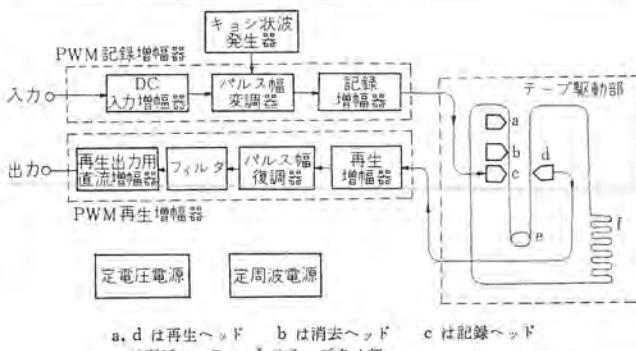


図 2.2 テープ式むだ時間発生器機能ブロック線図

装置の外観を図 2.1 に、性能表を表 2.1 に示す。構成は

- | | |
|----------------------|-----|
| (1) テープ駆動装置(制御装置を含む) | 1 式 |
| (2) 記録増幅器 | 2 台 |
| (3) 再生増幅器 | 2 台 |
| (4) 再生出力増幅用直流増幅器 | 2 台 |
| (5) 定周波電源 | 1 台 |
| (6) 増幅器用定電圧電源 | 1 台 |

からなり、テープ駆動に専用の定周波電源を用い駆動速度を電源周波数変動に無関係にしていること、またリール式でなくテープタメ(溜)方式にしてテープをエンドレスにし、テープ位置による速度偏差をなくすことによりむだ時間のあいまい性を少なくするとともに、連続的に長時間の模擬が可能であること、相関関数計算およびアナロゲメモリ回路として使用するに便利なヘッド構成になっていることなど多くの特長をもっている。なおこの装置の機能ブロック線図を図 2.2 に示す。

入力はキヨシ(鋸歯)状波発生器からのキヨシ状波電圧と比較されて、パルス幅に変換され、高周波を重複させて磁気テープに記録され、ヘッドの機械的位置とテープ速度によってきまるむだ時間後再生復調されてフィルタにかけられ、その直流分のみを増幅されて出力となる。なおこの装置にはアナコンからの演算制御との連動機構、テープセンシングによって自動的に1回転停止機構、4ケタ

のテープ回転数表示機構などを備えている。

2.2 サーボ閾数発生器⁽²⁾

アナコンに用いる任意関数発生器としてはすでに時分割方式の特色のある非常に取り扱いの簡単な電子管式任意関数発生器⁽¹⁾が製作されて好評を得ているが、関数形の保存ができない欠点があった。また横座標の設定点は可変にできるので通常の使用にはさしつかえがないが、とくに折点数の多い複雑な関数形を設定したい場合には近似しにくいうらみがあった。

この装置はこれらの点を改良していて、次のような特長をもっている。

- (1) 関数形は直観的にわかる。
 - (2) 関数形の保存ができる。
 - (3) 電子管式時分割方式の特長もそのままもつていて、高精度でしかも直線補間ができる。
 - (4) 通常の任意関数発生器ではできない同時乗算機能も備えている。

この装置の外観を図 2.3 に、性能を表 2.2 に示す。

電子管式時分割形任意関数発生器⁽¹⁾はすぐれた特性をもつてゐるのであるが、折点数を多くしてゆくと装置に含まれる電圧比較器と電子管スイッチの数が折点数だけいるので装置の規模が大き

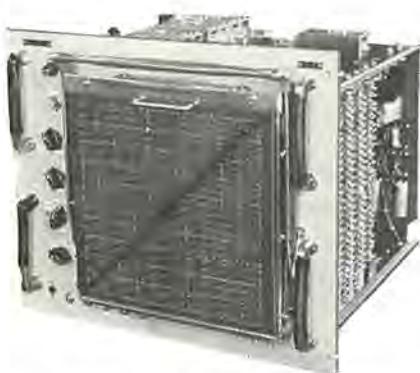


図 2.3 サーボ式関数発生器の外観

表 2.2 サーボ関数発生器の性能

項目	仕 様	欄
設定折線数	正負全範囲に対し 50 セクション 正範囲のみに対し 50 セクション 負範囲のみに対し 50 セクション XY とも上記いずれかの組み合せ 計 9 種類の設定範囲を選択	
出力関数形	$Y=F(X)$ $Y=\pm F(X)$ $Y=-F(X)$ 上記のいずれかまたは下記の同時乗算のいずれか $Y=ZF(X)/100$ $Y=\pm ZF(X)/100$ $Y=-ZF(X)/100$	
入力電圧範囲	$X=0 \sim \pm 10\text{ V}$ の場合 $Y=F(10X)$ など $X=0 \sim \pm 50\text{ V}$ の場合 $Y=F(2X)$ など $X=0 \sim \pm 100\text{ V}$ の場合 $Y=F(X)$ など	
精度	横座標 $\pm 0.5\%$ 以内 縦座標 $\pm 1.0\%$ 以内	
出力電流	10 mA 以内	
入力抵抗	X に対し $1\text{ M}\Omega$ Z に対し $25\text{ k}\Omega$	
周波数特性	100 V (P-P) 正弦波に対し 0.7 c/s 3 dB 低下以内の振幅で追従 10 V (P-P) 正弦波に対しては 2 c/s 3 dB 低下以内で追従	
応答速度	90 V ステップ入力に対し 0.5 秒以下	

くなりすぎ、同時に所要電流値も多くなるので、この部分を特殊なスイッチを用いてただ1組の電圧比較器と電子管スイッチに置き換えてこれを解決し、また入力 X に対してはフォローアップポテンショ用いたサーボ系とし、補間を行なう基準電圧を与えるポテンショはこれとは別のものを用いている。

図 2.4 は サーボ 関数発生器の原理図である。このうち電圧比較器は、時分割方式の関数乗算器または関数発生器で用いられているヒステレシス 特性をもつ双安定 マルチバイブルーダ⁽¹⁾で、いま X が一定であれば積分器の出力は、図 2.5 のように ヒステレシス の電圧幅を振幅とする三角波形となる。電子管 スイッチ は乗算入力 Z の極性が正負両極性にわたることが考えられるので、両極性のものを用いて $F(X)$ を制御している。

いま電圧比較器の出力 レベルが反転する入力電圧を、それぞれ e_+ , e_- とすると電圧比較器の a 点の出力 レベルが u_+ である時間 T_1 と u_- である時間 T_2 はそれぞれ次のようになる.

$$T_1 = (e_- - e_+)/KE \quad \dots \dots \dots \quad (2, 1)$$

K : 積分器倍率

したがって電子管スイッチにより制御された $F(X)$ の平均値は

$$F = (T_1 Y_{i-1} + T_2 Y_i) / (T_1 + T_2)$$

$$= (Y_i - Y_{i-1})E/E_0 + Y_{i-1} \quad (0 \leq E \leq E_f) \quad \cdots (2.3)$$

ここで入力が X_i のとき E が E_i , X_{i-1} のとき 0 となるように f オーロー・アップポテンショと E 発生 ポテンショを組み合わせておけば

$$F(X) = (Y_i - Y_{i-1})(X - X_{i-1}) / (X_i - X_{i-1}) + Y_{i-1} \quad \dots (2, 4)$$

$(X_{i-1} \leq X \leq X_i)$

次に X が変化して $X_i \leq X \leq X_{i+1}$ になったとき $Y_{t-1} \rightarrow Y_{t+1}$ に

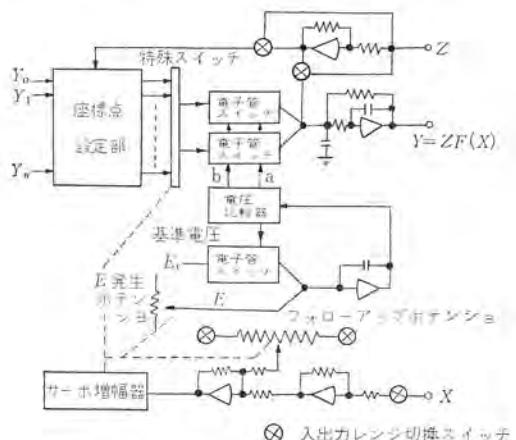


図 2.4 サーボ式関数発生器原理図

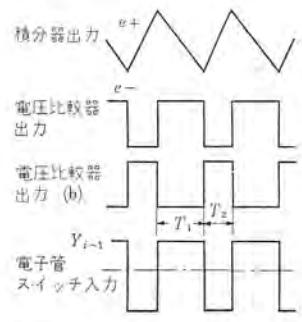


図 2.5 各部信号波形

技術解説

なるよう特殊スイッチとポテンショを組み合わせておけば

$$F(X) = (Y_i - Y_{i+1})(X - X_{i+1})/(X_i - X_{i+1}) + Y_{i+1} \quad \cdots (2.5)$$

$$(X_i \leq X \leq X_{i+1})$$

こうして X と $F(X)$ は設定各折点を直線補間した関係となる。入力 X が変化しても特殊スイッチで各設定点を通ることに他方の設定値を切り換えてゆけば、任意の X に対して $F(X)$ を得ることができる。各設定点を過ぎるときに瞬時に他方を切り換えるために、スイッチには特別な考慮が払われている。

電子管スイッチには、多数の Y_n からいつもただ二つだけが選択されているので、 Y 座標系設定用の抵抗に流れる電流は少なく、したがって Z 入力との同時乗算が可能である。

こうして X 入力に対しては位置サーボ系として動作し、これと巧妙に組み合わされたポテンショおよびスイッチにより $F(X)$ を発生させているが、 X 座標系と Y 座標系は機械的に結びつけられているだけであるから、入力に対応する Z 設定点以外の座標点が output に影響を及ぼすことはなく、また設定点は選択されて電子管スイッチに接続されるだけなので、設定点は他方の設定点の影響を受けることもないうえに、負荷効果も完全に補償できるので高精度が期待できる。折点を交互に ±100V に設定し、入力電圧に対して、三角波電圧を発生させた場合の波形例を図 2.6 に示す。

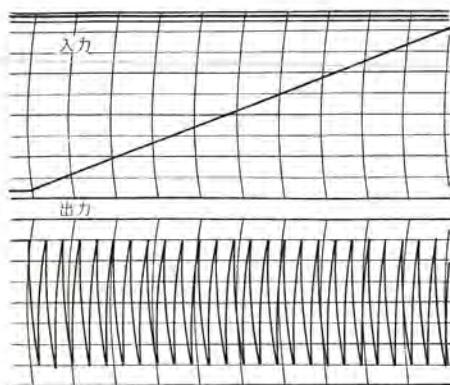


図 2.6 サーボ関数発生器による関数設定の一例

2.3 逆ヒステリシス要素

非線形特性を示すもののうち、ヒステリシスあるいはパックラッシュのように出入力間に二値関数形で表されるものがあるが、これはそれらのほかの例の一つで、パックラッシュの逆関数を発生させるものであり次の特長がある。

(1) 装置を専用化しているので精度を上げられるとともに取り扱いがきわめて簡単になっている。

(2) 利得は 0~1 倍、0~10 倍 0~100 倍に切り換えられる。

図 2.7 はこの装置の外観で、表 2.3 はその性能である。

逆ヒステリシス特性とは図 2.8 に示される形であるが、この特性は比例関係と、入力が増加するか減少するか、つまり入力の 1 次微分の符号が正か負かによって異なる一定電圧との和で与えられる。図 2.8 の原理図で a の部分は比例関係を、b の部分は微分出力を与えるものである。ただ完全な微分回路を用いると入力側に対して容量負荷となり不安定となり、雑音入力に対しても動作が乱されるので不完全微分回路を採用したが、これが使用周波数範囲を制限する原因となっている。



図 2.7 逆ヒステリシス要素の外観

表 2.3 逆ヒステリシス要素の性能

項目	仕様
入出力電圧	-100 ~ +100 V
出力電流	最大 10 mA
感度部利得	0~1, 0~10, 0~100 の内の連続可変
チャウタ振幅	0~100 V (正負対称)
静的精度	±0.5% 以内
使用周波数範囲	0.002 c/s ~ 10 c/s
ドリフト	入力換算 10 mV/h 以内

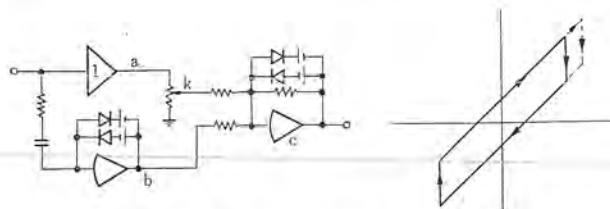


図 2.8 逆ヒステリシス要素原理図

2.4 飽和・不感帶要素

非線形系の代表的な特性として、リミッタ、デッドゾーン特性があり、これらの模擬には通常、般用演算增幅器とバイアスを与えた 2 極管とを組み合わせて行なうが、この組み立ての煩雑さを救うための専用の特性発生装置がこのパネルで、その特長は下記のとおりである。

(1) 2 極管のシャット特性が理想的でないという事実に基づく誤差を補償しているので特性が良い。

(2) 組み立ての煩わしさがなく、スイッチで切り換えて飽和特性または不感帶特性のいずれかを選択できる。

図 2.9 にこの外観を示し、表 2.4 に性能を示す。

通常の飽和特性、不感帶特性の模擬回路では線形領域から非線形領域に移る部分で理想特性からはずれていたが、この装置では図 2.10 に示すように 2 極管と増幅器を組み合わせ、コンペレータ形の動作をさせており、さらに 2 極管にもわずかの逆方向バイアスを与えているので線形領域から非線形領域への移行がきわめて鋭くなっている。

2.5 オンオフ要素

非線形系にはリミッタ、デッドゾーン特性などのほかに、図 2.12 に表わされるようなオンオフ特性を示すものがある。この装置はこの特性を専用に発生させるもので次の特長がある。

(1) 設定値はそれぞれ任意に変化できる。

(2) 専用なので取り扱いが簡単である。

(4) 特性が改善されている。



図 2.9 飽和不感帶要素の外観

表 2.4 飽和・不感帶要素の性能

項 目	仕 様
入出力電圧	-100~+100 V
利得	1
飽和値	それぞれ独立に 0~-100 V, 0~100 V
不感帯幅	正負入力に対し 0~-100 V, 0~100 V
入出力符号	正負いずれも可能
出力電流	最大 10 mA
静的精度	0.3% 以内
ドリフト	10 mA/h 以内

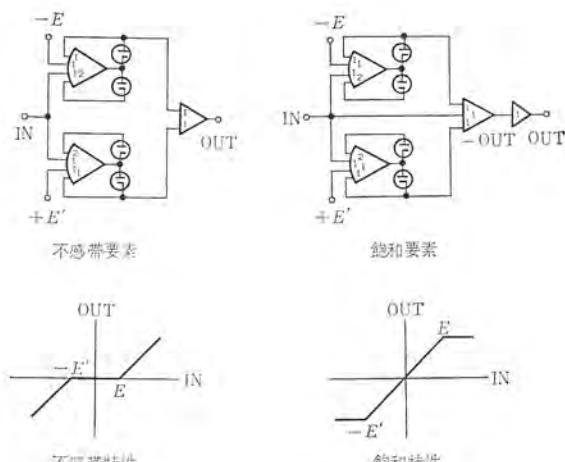


図 2.10 飽和・不感帶要素原理図

図 2.11 はこの装置の外観で、表 2.5 は性能である。

演算増幅器と 2 極管を組み合わせて図 2.12 の上半分で示される、いわゆる電圧比較回路を構成すると、入力電圧が比較基準電圧の符号反転値を境にして出力電圧が急激に変化するが、この装置は二つの逆方向に変化する電圧比較回路に加算回路を付して所望の特性を得ている。

設定は加算形式を採用して精度の向上につとめており、設定値 E , $-E'$, KE_B , $-K'E_B$ はそれぞれ独立に定めることができる。また必要に応じて切り換えて入力軸に関して対称な特性の出力を得ることもできる。

3. アナコンの演算例

最近の アナコン の応用範囲は単に航空機、原子力、電力系統および自動制御工学の方面のみならず、自動車、化学、土木、建築、医学、経済などあらゆる方面に利用されるにいたった。ここでは最近当社 アナコン で行なった特長ある演算例の 2, 3 について述べる。



図 2.11 オンオフ要素の外観

表 2.5 オンオフ要素の性能

項 目	仕 様
入出力電圧	-100~+100 V
出力電流	最大 10 mA
入出力符号	同符号および異符号の切換可能
設定範囲	それぞれ独立に 0~100 V 可変
静的精度	±0.2% 以内
ドリフト	10 mV/h 以内

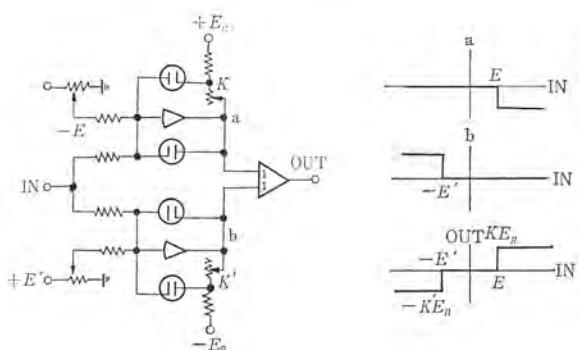


図 2.12 オンオフ要素原理図

3.1 自動車の車体設計

新しい自動車を作り出す場合に車体設計は重要な部分を占めている。乗りごこちのよい振動の少ない車を作るには各定数をどう定めればよいかが問題になるが、こうしたとき各種の応答波形を得て適当な値を得ることができる。

ここではダンパは平方根比例形のもの、バネは変位一力比例形のものについて波形を求めた。問題を簡単にするため次の仮定をおいた。

- (1) 車は ローリング がなく、左右同じ運動をする。
 (2) ピッキング および バウンシング はわずかである。

以上の仮定により図 3.1 および表 3.1 で与えられる系について方程式は次のような.

$$M\ddot{Z} \pm C_F(\dot{Z}_F - \dot{Z}_{TF})^{1/2} \pm C_R(\dot{Z}_R - \dot{Z}_{TR})^{1/2} \\ + K_F(Z_F - Z_{TF}) + K_R(Z_R - Z_{TR}) = 0 \quad \dots\dots(3.1)$$

$$\ddot{I\phi} \pm C_F(\dot{Z}_F - \dot{Z}_{TF})^{1/2}l_F \pm C_R(\dot{Z}_R - \dot{Z}_{TR})^{1/2}l_R$$

$$-K_F(Z_F - Z_{TF})l_F + K_R(Z_R - Z_{TR})l_R = 0 \dots\dots (3.2)$$

$$M_{TF}\ddot{Z}_{TF} \mp C_F(\dot{Z}_F - \dot{Z}_{TF})^{1/2} - K_F(Z_F - Z_{TF})$$

$$+K_{TF}(Z_{TF}-Z_{OF})=0 \quad \dots \dots \dots \quad (3.3)$$

$$M_{TR}\ddot{Z}_{TR} \mp C_R(\dot{Z}_R - \dot{Z}_{TR})^{1/2} - K_R(Z_R - Z_{TR})$$

技術解説

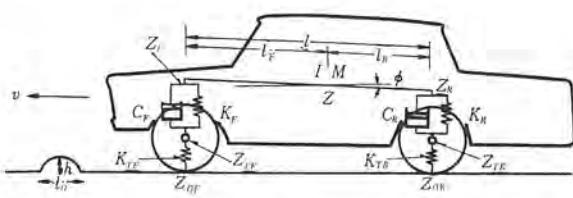


図 3.1 自動車の各部定数

表 3.1 各 部 定 数

記号	意味	数値
M [$\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}$]	車体質量	97
I [$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$]	慣性能率	220
M_{TF} [$\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}$]	タイヤ質量(前輪)	5.1
M_{TR} [$\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}$]	タイヤ質量(後輪)	5.1
C_P [$\text{kg}, \text{s}^{1/2}, \text{m}^{-1/2}$]	ダンパ減衰定数(前部)	265
C_R [$\text{kg}, \text{s}^{1/2}, \text{m}^{-1/2}$]	ダンパ減衰定数(後部)	345
K_F [kg/m]	バネ定数(前部)	2.4×10^3
K_R [kg/m]	バネ定数(後部)	6.0×10^3
K_{TF} [kg/m]	タイヤバネ定数(前輪)	36.4×10^3
K_{TR} [kg/m]	タイヤバネ定数(後輪)	64.4×10^3
l_F [m]	前輪の重心からの距離	1.5
l_R [m]	後輪の重心からの距離	0.65
l [m]	軸間距離	2.15
v [m/s]	車速	{ 40, 60 80, 100 }

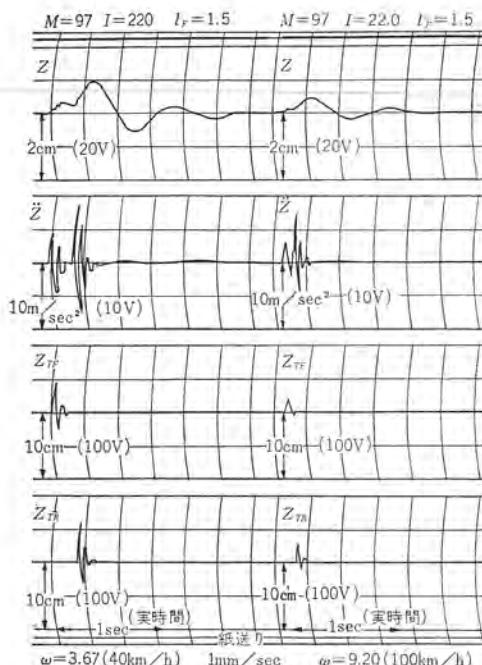


図 3.3 障害物乗越時の応答

以上の諸式から アナコン 演算回路を組むと図 3.2 のようになる。この系の代表的な応答として正弦半波状の障害物を時速 40 km, および 100 km で乗り越したときの各部波形を図 3.3 に示す。同様にして他の バネ, ダンパー, 乗員数, 重心位置の組み合わせに対し, また種々の障害物形状に対し各定数値を変えるだけで比較検討することができる。

3.2 熱発生を伴うガス吸収塔の設計

アンモニアのガス吸収塔での反応を求める。

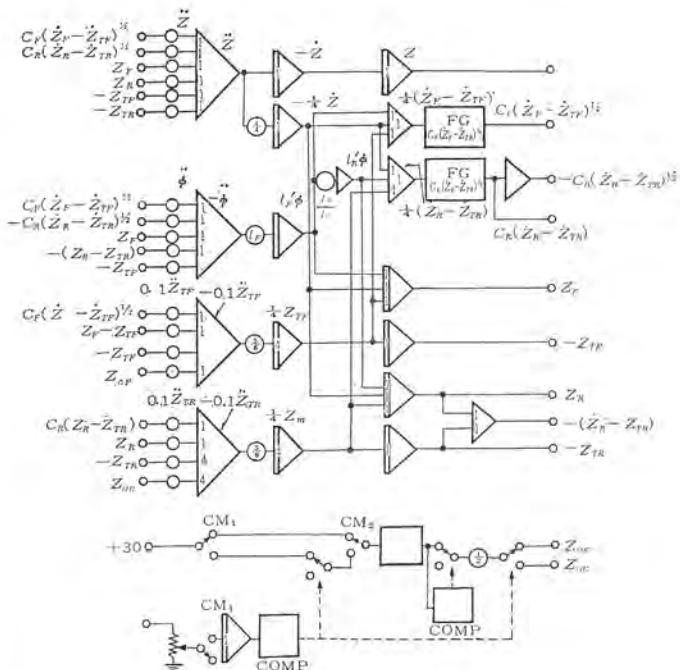


図 3.2 痢 算 回 路

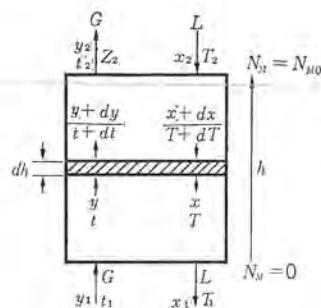


図 3.4 ガス吸収塔

表 3.2 記号の意味

記号	意味
G	液体量
L	ガス流量
x	液中の溶質ガスマル分率
y	気相中の溶質ガスマル分率
y^{∞}	液中の溶質ガスと平衡な気相中の溶質ガスマル分率
z	気相中の溶媒蒸気モル分率
z^{∞}	気相中の溶媒蒸気の飽和モル分率
t	気相温度
T	液相温度
N_M	溶質ガスの移動単位数
C_{PL}	液モル比熱
C_{PG}	ガス比熱
Q_y	NH_3 の溶解熱
Q_z	水の蒸発潜熱
	$a, a', b, b', c, c', \alpha$: 定数

25°C (t_1)、1at、5 Vol% (y_1) の NH₃ を含むガス G を 20°C (t_2) の水 L と充てん塔に通し、出口ガス濃度を 0.25 Vol% (y_2) にしたい。ガス G は 5.0×10^3 kg-mol/h、水 L は 10.0×10^2 kg-mol/h で断熱されている。求めるものは移動単位数 N_H 、出口液体温度 T_1 である。

方程式は次のようになる.

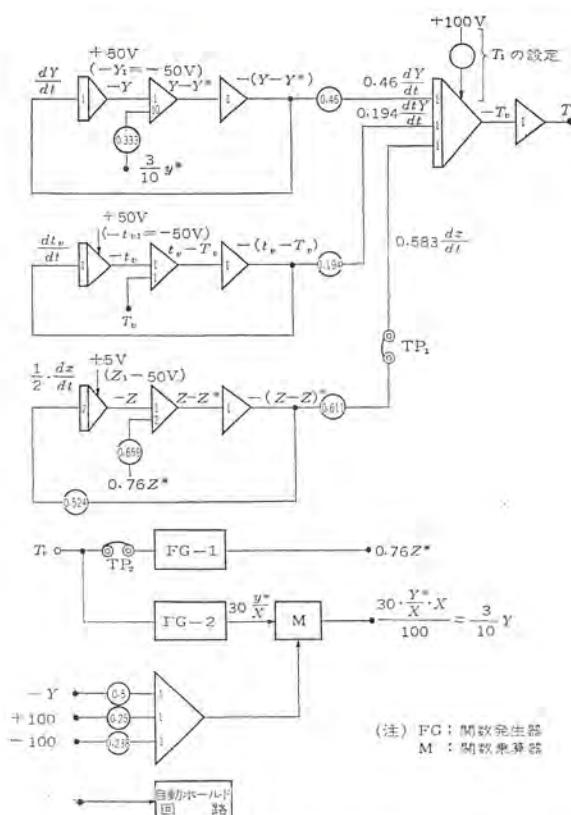


図 3.5 ガス吸収塔反応演算回路

$$x_1 - x = (y_1 - y)G/L \quad (3.7)$$

$$-\frac{dy}{dN_M} = y - y^* \quad (3.8)$$

$$-\frac{dz}{dN_M} = \alpha(z - z^*) \quad (3.9)$$

$$-\frac{dt}{dN_M} = t - T \quad (3.10)$$

$$-\frac{dT}{dN_M} = \left(\frac{G}{LC_{PL}} \right) \left[C_{PG} \frac{dt}{dN_M} + Q_y \frac{dy}{dN_M} + Q_z \frac{dz}{dN_M} \right] \quad (3.11)$$

$$\log_{10}(y^*/x) = a - b/(T + c) \quad (3.12)$$

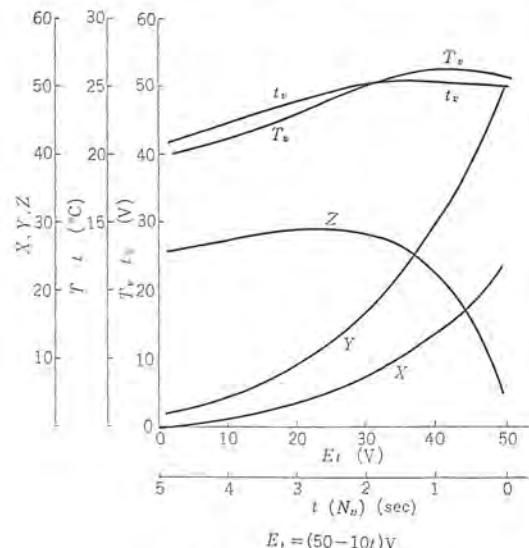


図 3.6 ガス吸収塔の反応

$$\log_{10} z^* = a' - b'/(T + c') \quad (3.13)$$

以上の諸式を演算回路に組んだものが図 3.5 である。ただし最後の 2 式は指数関数に変換し関数発生器で模擬した。演算結果は図 3.6 に示す。

3.3 医学への応用

人体（広い意味では生物体）の各機能のシミュレーションは、従来から種々な方法でなされてきた。とくに自動制御理論の立場からみた人体の機能のシミュレーションには使いやすさ、般用性から次第にアナコンが用いられてきている。現在は主として呼吸器系の機能、心臓のハク（搏）出機構、発汗現象、血球の増殖現象、目の調節作用などで、近い将来さらに自律神経系、脳細胞系などの分野にも拡大される。

一例として換気血流の不均一による静脈混合⁽³⁾を計算する場合の肺胞のシミュレーションについて述べる。

炭酸ガス (CO_2) についての関係式は下記のごとく与えられる。

$$V_{\text{CO}_2,T} = V_{\text{CO}_2,1} + V_{\text{CO}_2,2} \quad (3.14)$$

$$V_{\text{CO}_2,1} = Q_1(C_{V,\text{CO}_2} - C_{C,\text{CO}_2,1}) \quad (3.15)$$

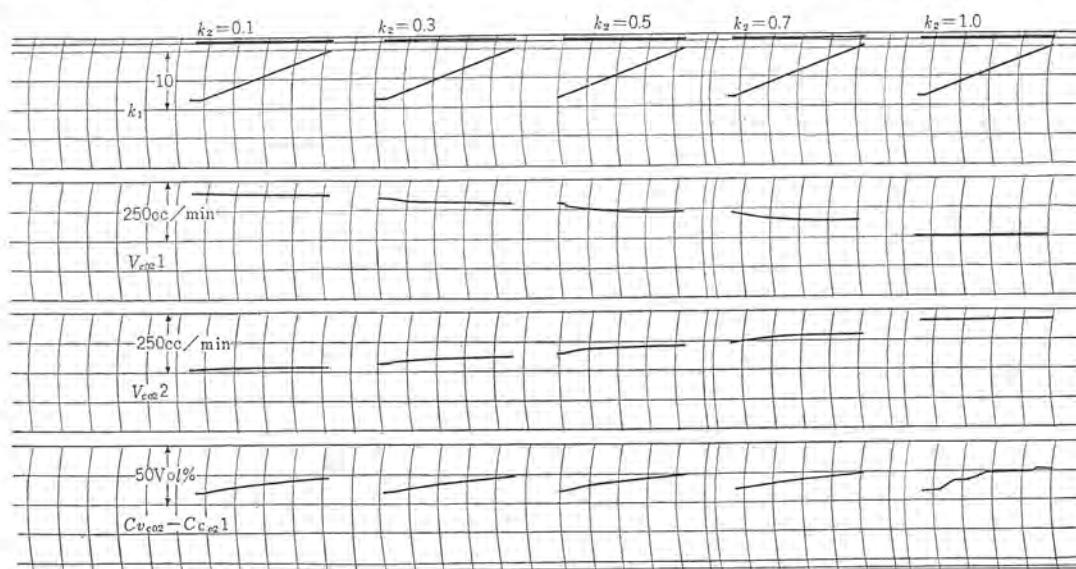


図 3.7 炭酸ガスの産出量

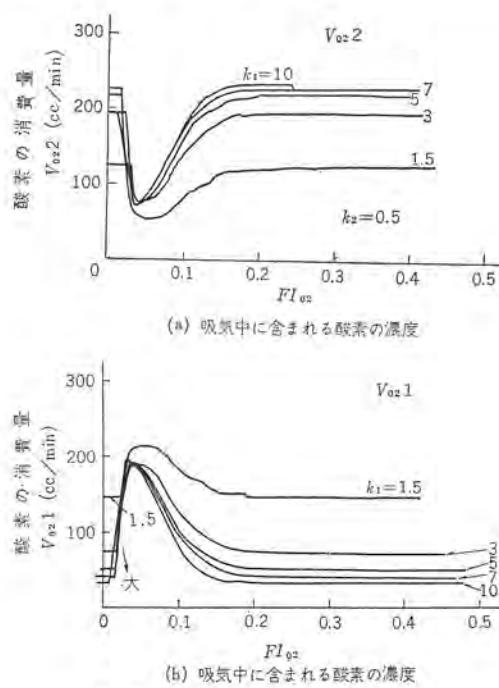


図 3.8 酸素の消費量

表 3.3 演算に必要な要素数

演 算 要 素		要 素 数 (台)
演 算 增 幅 器		4 3
ポ テ ン シ ョ メ ー タ		3 2
リ ミ ミ フ ダ タ		3
開 数 乘 離 算 器		1 0
開 数 発 生 器		6

$$V_{CO_2} = Q_2(C_V(\bar{O}_2 - C_{CO_2}) \dots \dots \dots (3.16)$$

$$C_{CO_2 1} = f(F_A CO_2 1) \dots \dots \dots (3.17)$$

$$C_{CO_2 2} = f(F_A CO_2 2) \dots \dots \dots (3.18)$$

$$F_A CO_2 1 = V_{CO_2 1} / V_1 \dots \dots \dots (3.19)$$

$$F_A CO_2 2 = V_{CO_2 2} / V_2 \dots \dots \dots (3.20)$$

$$V_T = V_1 + V_2 \dots \dots \dots (3.21)$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 \dots \dots \dots (3.22)$$

$$k_1 = V_1 / Q_1 \dots \dots \dots (3.23)$$

$$k_2 = V_2 / Q_2 \dots \dots \dots (3.24)$$

$$C_A^e CO_2 = (C_{CO_2 1} \cdot Q_1 + C_{CO_2 2} \cdot Q_2) / Q_T \dots \dots \dots (3.25)$$

$$C_A^e CO_2 = f^{-1}(F_A^e CO_2) \dots \dots \dots (3.26)$$

V_{CO_2} : 肺胞中に含まれる炭酸ガス量, Q : 血流量, C : 毛細管血

液中に含まれる炭酸ガスの濃度, C_V : 混合静脈血中に含まれる炭酸ガスの濃度, V : 肺の内圧, f : CO_2 の dissociation curve, な
お式中の T は総量を, 添数字 1, 2 は肺胞 1, 2 をそれぞれ表わす.
酸素 (O_2) についても, 同様に関係式が成立するが, 紙面の都合で記載を割愛する.

ここで印加条件として, $V_{CO_2 T}$, Q_T , k_1 , k_2 , $F_A^e CO_2$, f , FI_{O_2} (吸気中に含まれる酸素の濃度) を与え演算する.

図 3.7 は k_1 , k_2 を変数とした場合の炭酸ガス (V_{CO_2}) の産出量, 図 3.8 は k_1 , k_2 , FI_{O_2} を変数とした場合の酸素の消費量を, それぞれ演算記録したものである. 表 3.3 にこの演算に要した要素数を示す.

4. む す び

以上 MELCOM EA-7100 シリーズ 低速度高性能形電子管式 アナログ計算機の新しく開発された非線形演算要素と, 最近の演算例の 2, 3 について紹介した. 最近 デジタル計算機の発達に伴い, アスコン 軽視の風潮もないではなかったが, パラメータが実系と 1 対 1 に対応づけられる点, 並列演算方式による演算の高速性, および非線形問題の取り扱いの簡便性などから, とくに シミュレータや専用機, 制御用演算装置, 計測装置などの応用分野で今後その真価が一層見直されるようになるであろう. また本稿その 1 で取り扱った演算の自動化は, デジタル的性格を大幅に アスコンにも持たせるものであり, これを足がかりとして両計算機を組み合わせたハイブリッド計算システムもようやく各方面の注目を浴びるようになってきた. 筆者らとしても, このような新しい分野における計算機使用の促進を大いに期待するものであるが, その一助として拙文が役立つべきである.

本稿を終るにあたり, 演算例の作成について種々ご教授賜わった関係会社, 大学, 病院の各位に心からの謝意を表する次第である.

参 考 文 献

- (1) 馬場, 大鳥羽, 柴谷, 松本, 桑田: MELCOM 精密低速度形 アナログコンピュータ (2) 「三菱電機」34, No. 3, (昭 35).
- (2) 柴谷, 井塚: サーボ式任意関数発生器, 電学関西支部連大, 4-12, (昭 38).
- (3) 山林: 数式より見た呼吸機能「呼吸と循環」10, No. 11, (昭 37).

プラズマ（その4）—各種プラズマの発生およびその応用（2）—

河合 正*・伊藤利朗*・近藤博通**

13. 運動するプラズマの発生およびその応用

13.1 プラズモイド（Plasmoid）の発生と応用

いったん高温 プラズマを発生した後、それを電磁力によって一方向に駆動させ、急に強い静磁界中にたたき込んで、それまでに獲得した方向性の運動エネルギーを熱エネルギーに転換する過程は、カスプ磁界の高温 プラズマ実験で、プラズマを作るためにしばしば用いられている。この方法も プラズマ 加熱の一過程と考えれば前章に含めて論すべきであるが、プラズマを運動させるという点で以下の種々の過程と関係が深いので本章に含めることとした。

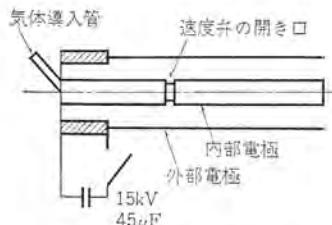


図 13.1 同軸 プラズマ銃

上の場合のように一方向に向って加速された プラズマの塊のことを プラズモイド と呼ぶが、その発生のためには通常 プラズマ銃が用いられる。その一つ Marshall が提案した同軸形式の銃を図 13.1 に略示した。放電に先だって速動性にとくに注意して設計された弁 (Puffer とも呼ばれる。スプリングで押さえつけた導体板を立ち上がりの速い電流パルスで励磁したコイルではね返す構造がとられる。) をたとえば 100 μs くらい開き 1 気圧 1 cc くらいの気体を真空容器中に吹き込む。放電は対向した同軸電極の間で行なわれ、加熱された プラズマは反発電磁力を受けて右方すなわち プラズマの閉じ込め領域に向って進む。図示の装置で 1 回の放電あたり 5×10^9 個ほどの イオン (水素気体中で) が発生し 5×10^5 m/sec に加速されたと報告されている。もし閉じ込め領域に至った後、この方向性エネルギーがすべて熱エネルギーに転換されるとすれば、優に 7keV の プラズマが出現するであろう。銃の構造には、このほかにも種々の形式のものが提案されており、たとえば急ゆんに立ち上がる磁界を印加することにより プラズマを発生するとともに、その磁界の磁気圧でその プラズマを吹き飛ばす方法もある。また図 13.2 は大阪大学 カスプ 装置（当社製）の ピンチガン と呼ばれる プラズマ銃 であって、円スイ形のガラス筒を介して対向している リング 状および円板状の電極の間に、急しゅんな大電流 ピンチ 放電を発生し、プラズマを自己磁界の圧力で円スイの開孔部のほうに打ち出す方式のものである。この大阪大学方式の銃は性能もすぐれており カスプ装置の実験によく貢献している。

13.2 回転 プラズマの発生と応用

\approx 軸方向の一様な静磁界 $B = B_z k$ の中へ プラズマを入れ、さら



図 13.2 大阪大学 カスプ 装置に用いられている ピンチ方式 プラズマ銃

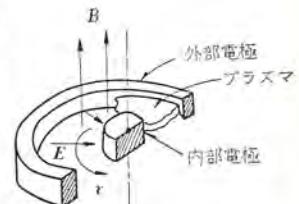


図 13.3 回転 プラズマ配位

になんらかの方法で プラズマ 中に r 方向の電界 E_r を発生してやると イオン および電子は先に式 (2.8) で与えられるように回転に伴う遠心力効果を無視すれば、ともに速さ E_r/B_z で $-\phi$ 方向に ドリフト運動をするから、プラズマ全体も同じ速度で回転すると考えられる。図 13.3 に示すように電極を同軸状に配置し、軸と平行に一様な静磁界をかけ、電極間に電圧 V を印加すると、電極間にある プラズマ は上記の原理に従って V/RB_z (ただし R は両電極間の距離 = $b-a$) なる速さで回転するであろう。これは一種の 単極機 (Homopolar machine) であって、プラズマがその回転子となつたものと考えてもよい。プラズマ領域の磁界に沿った長さを l とすると、プラズマ中にたくわえられた運動エネルギーは プラズマ密度を ρ_m として

$$\pi(b^2 - a^2)l\epsilon_0 V^2 [1 + (\rho_m/\epsilon_0 B_z^2)]/2R = (1/2)CV^2 \cdots (13.1)$$

で与えられる。

この式で定義される量 C はこの電極端子間を外部から見たときの等価的な容量とを考えることができる。電極端子から注入されたエネルギーの中、後述の損失分を除いた残りは、プラズマの回転エネルギーとしてたくわえられているが、電極に印加した電圧 V を取り除きその代わりに負荷を電極につなげば、上述の回転エネルギーは 電気エネルギーの形で負荷側に取り出される。これがいわゆる プラズマコンデンサ の原理である。式 (13.1) の $\epsilon_0 [1 + (\rho_m/\epsilon_0 B_z^2)]$ は プラズマコンデンサ の等価的な誘電率であって、たとえば粒子密度 = $10^{21}/m^3$, $B_z = 1Wb/m^2$ の重水素 プラズマの場合、この誘電率は真空のそれの 1.7×10^5 倍という大きな値となるから、プラズマ等価容量 C もたとえば何十 μF といった値となりうる。ただし プラズマ柱からの放射、あるいは放電空間中における荷電粒子と中性気体との電荷交換衝突などの損失機構がかなり活発であるから、損失は非常に大きい。プラズマコンデンサを等価的に書けば図 13.4 のようになるであろうが上記諸損失が与える等価的抵抗値 R_2 はかなり小さいわけである。また抵抗 R_1 は プラズマ塊の回転の確立にあたってその機械的慣性が関係する時定数を与える。

技 術 講 座

プラズマコンデンサがたくわえうる式(13.1)に与えられたエネルギーをかなり大きくとりうることに着目して、これを直流送電回路のシャン断器に利用しようという試みがある⁽⁶¹⁾。プラズマが回転していないときは逆起電力を誘起しないので、直流回路にコンデンサを直列に投入するとその瞬間は回路は導通状態を保つ。しかし、プラズマの回転の確立とともに逆起電力が上昇して回路電流が抑制されるわけで、原理的には直流機を回路と直列に投入したのと似ている。

種々の形状の ラズマシヤ断器が提案され、また実験的にも検討が加えられているが、強磁场の経済的な発生方法が実現すればかなり大容量の直流回路の シヤ断の可能性が十分考えられる。

TORNADON は当所で開発試作された回転 プラズマ 装置であつて、当所で研究された進行磁界を用いる プラズマ の閉じ込め方法の効果を巨視的に実証するために作られた一種の大形 サイラトロンである。図 13.5 はその内部構造を示す写真、図 13.6 は内部電極配置と予定されている実験の回路構成を示したものである。同心状に配置された陽極と陰極の間に、陰極からの熱電子放出によって水素 プラズマ が作られ、半径方向の電界と外部から軸方向に加えられた一様磁界によって、一方向に回転させられる。実現される プラズマ の回転速度は、おそらく Alfvén limit つまり プラズマ の回転速さが管内の中性気体の電離 エネルギ を越すと急に損失が増加する値以下に止まるであろうが、数百A程度の放電々流において $\sim 10^4$ m/sec が期待されるので、もし管の外側に図に示すように円周状に配置された 6 本の平行の直線状導体に、隣り同志互いに向きの反対の直流電流を流してやると、それらが作る静的な多極磁界は、プラズマ から見れば等価的には 2.2 節に述べた進行磁界のように感じられるであろう。進行場の等価的な周波数は $\sim 10^5$ c/s となるので、プラズマ の平均的な導電率 σ が 10^4 S/m 程度であったとしても、磁界の プラズマ 中への浸み込みの深さは 1 cm 以下となるであろう。このとき多極磁界の電流を プラズマ が式 (2.15) のような形で観測するように正弦波状に分布させると、多極電流のある位置を $r=r_0$ 、プラズマ の半径を $r=r$ として プラズマ が表面に受ける圧力の時間平均は

⁽⁶²⁾ で近似されることとなる。

最後に回転 プラズマ を使った高温 プラズマ 発生装置の例として、Los Alamos で作られた Ixion 装置についてふれておこう。図 13.

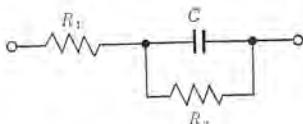


図 13.4 プラズマコンデンサの等価回路



図 13.5 当社の TORNADON 装置の構造

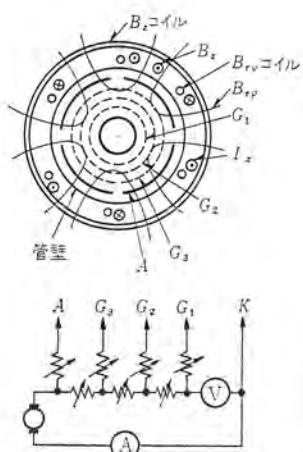


図 13.6 TORNADON の内部電極と回路構成

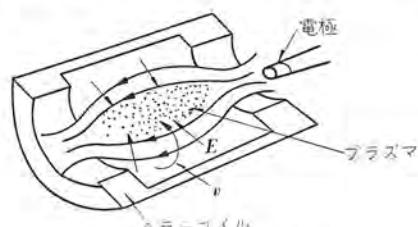


図 13.7 Ixion 装置原理図

7 は装置の略図である。プラズマは前述の プラズマ 鋸によって作られ ミラー 磁界の中へ投入される。ミラー 磁界による閉じ込めは先に Scylla 装置の例によって説明したところであるが、カスプ 損失の 機構でふれたように ミラー 端における ミラー 損失を避けることが できない。しかしもし プラズマ を構成する粒子に磁界に垂直方向 の速度成分を加えることができれば、この ミラー 損失は減殺させ られる。Ixion では ミラー 磁界中に閉じ込められた プラズマ に電極 を接し、これと放電管壁の間に電圧を加えて プラズマ を回転させ、その遠心力効果によって粒子に磁界と垂直の速度成分を与えて ミラー 損失を減らそうとするものである。しかしこの場合 プラズマ と電極が直接接触しなければならないことは本質的な難点で ある。

13.3 プラズマジェット (plasma jet) の発生と応用⁽⁶³⁾⁽⁶⁴⁾

大気圧程度の気圧において放電によって発生する プラズマ の温

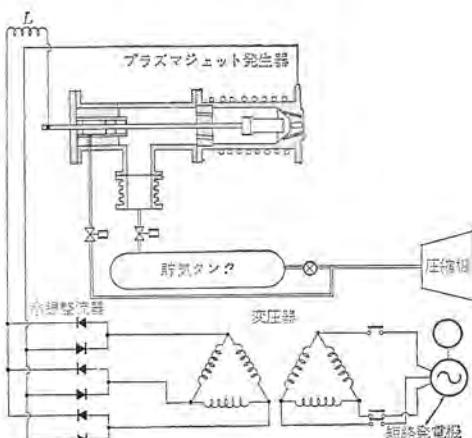


図 13.8 当社の MHD 発電研究用 プラズマジェット発生装置



図 13.9 当社の MHD 発電研究用 プラズマジェット の発生状況

度が、周囲から冷たい気流を送り込んでアーチ柱のヒロガリを適当に抑制してやると、普通の化学反応を用いて作られる炎では到底及ばないほど高い数万度といった程度の高温が得られることを利用して溶融点の高い金属やセラミックの切断や塗装（coating）などが行なわれる。このような高温のプラズマ流がいわゆる「プラズマジェット」であって、図 13.8 に示すような装置によって発生させられる。流入気体には空気のほか用途に応じてアルゴン、ヘリウムなどの不活性気体も使われる。図 13.9 は MHD 発電機の実験装置のプラズマ源として、当社で開発された空気の「プラズマジェット」の発生状況を示す写真であって、背圧 5 気圧の気流をノズルから噴出させ、これに短絡発電機から 1.3～1.5 MW の電気入力を加えて炎長さ約 65cm におよぶ高エネルギージェットを発生しているところである。

14. フク射の利用

プラズマは各種の光源——アーチ灯、ネオンサイン、水銀灯、ケイ光灯、セン光放電管など——として広く用いられている。このような光源としての利用は「プラズマ応用」の中で最も重要なものではあるが、これらの個々については今さらここで説明するまでもなかろう。

最近この方面で新しい話題となっているのはガスレーザ^{(65)～(68)}である。1960 年 Javan たちが He と Ne との混合気体を用いて波長 1.1523, 1.118, 1.161, 1.199, 1.207 μ の近赤外発振に成功して以来、同じく He-Ne レーザによる 6,328 Å、各種希ガス、Cs, Hg, N₂, O やそれらの混合ガスを用いた遠赤外から紫外に及ぶ各種波長の発振が可能となってきた。

ガスレーザから出る光はすべて励起フク射である。元来、励起フク射は、自然放射（spontaneous emission）か誘導放射（induced emission）かいずれかの機構により行なわれる。エネルギー準位 E₂ の励起状態から、より低い準位 E₁ の状態に、なんらの外的誘因なしに自然に遷移するのが自然放射である。この際放射される光の振動数 ν は $(E_2 - E_1)/h$ に等しいが、これらは各励起原子からお互いにまったく無関係に放出されるので、それぞれの位相は全然そろっていない。この自然放出の遷移確率は ν^3 に比例するので、可視光線の場合 $10^7 \sim 10^8 \text{ sec}^{-1}$ 程度のかなり大きな値となるが、波長が長くなるにつれ急速に小さくなる。

これに対し、準位 E₁ にある励起原子に $\nu = (E_2 - E_1)/h$ なる振動数の電磁波が入射したとき、この原子が高い準位 E₂ に励起されるのが、誘導吸収である。逆にこの電磁波が準位 E₂ にある励起原子に入射したときに、この原子が入射波と同じ位相、同じ

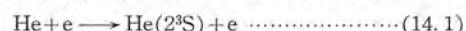
波長の電磁波を出して、準位 E₁ の状態に移る現象を誘導放射と呼ぶ。電磁波のエネルギー密度を w_v とすると、上述の誘導放射、誘導吸収の確率は $B_{12}w_v, B_{21}w_v$ で表わされ両者は互いに等しい。準位 E₁, E₂ にある粒子の密度を n_1, n_2 とすると、これらによって吸収、放出される単位体積あたりの光量子の数はそれぞれ $n_1 B_{12}w_v, n_2 B_{21}w_v$ である。ところが、一般に熱平衡状態では励起原子密度は前号式 (7.11) で与えられ、したがって n_1, n_2 は

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{g_1}{g_2} \exp \{- (E_2 - E_1)/kT\} \dots \dots \dots (14.1)$$

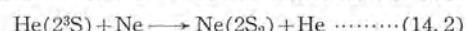
で与えられる。このような状態では一般に $n_1 > n_2$ があるので、誘導吸収が誘導放射よりも顕著に起こる。

もしならかの方法によって $n_1 > n_2$ の状態（population inversion, ないし負温度状態）を実現できれば、放射が吸収に勝つためにプラズマ中で振動数 ν の電磁波の增幅が起こることになり、したがってまたこの「プラズマ」を用いてその電磁波の発振を行なうことも可能となる。

He-Ne レーザについて、この発振の機構を具体的に説明してみよう。図 14.1 はその構造を示す図であって、放電管中には He および Ne がそれぞれ 1 mm, 0.1 mmHg 程度の分圧で封入されており、管壁に巻いた電極に 30 Mc 程度の高周波を印加して管内に放電を生じさせる。このとき、電子衝突により He が基底状態から 2^3S 準安定状態に励起される。これを式にかけば



次にこの準安定 He 原子と Ne 原子との衝突により次の過程



が生ずる。このような励起エネルギーの転移を伴う過程を第 2 種の衝突と呼ぶが、これが可能となるのは He の 2^3S 準位と Ne の $2S_2$ 準位とがほぼ等しいエネルギーを持っているからである。さて $2S_2$ 準位の Ne 原子が $2P_4$ 準位に落ちるときに波長 1.15 μ の赤外光が放射されるが、 $2S_2$ および $2P_4$ の状態の寿命はそれぞれ 0.1, 0.01 μs 程度であるので、 $2S_2$ 状態にある粒子の数が $2P_4$ 状態のそれよりも多い負温度状態が生じ、したがって多数の $2S_2$ 原

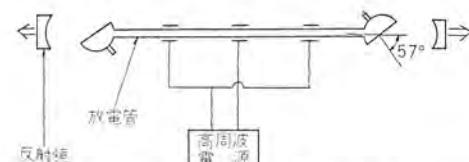


図 14.1 ガスレーザの構造の一例



図 14.2 当社のガスレーザの動作状況

技術講座

子から位相のそろった〔コヒーレントな〕 $1.15\text{ }\mu$ の赤外光が誘導放出によって放出される。この赤外光は放電管の両端に設けられた 2 枚の反射鏡の間を往復反射する定在波の形で存在して、次々にと生れて来る $2S_1$ 原子に誘導放射を行なわせる。図 14.2 は当社製のガスレーザの発振時の状況を示す写真である。

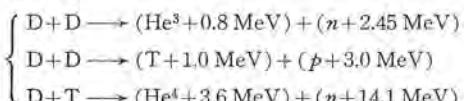
レーザ動作において原子をまず高い準位にあげる〔ポンピング、たとえば式(14.1)～(14.2)〕方法は、必ずしも上述のような方法だけに限らない。現在までに種々異なるガスおよび発光機構を用いた、何百種類のレーザ発振が報告されているが、これらについての詳細は専門誌にゆづりたい。なお、最近 N_2 ガスを用いたパルスセンサ出力 $10 \sim 100\text{ W}$ の紫外線ガスレーザも出現してはいるが、一般的にいってガスレーザは、固体レーザと異なり、小出力の連続動作形のものが多い。したがって現在のところ、ガスレーザは、波長、長さ、角速度などの超精密測定の際の標準器として用いられようとしているに過ぎないが、研究はきわめて熱心に急テンポで進められているので、新しい応用面も次々にとひらけてくるであろう。

15. 発電

15.1 核融合発電

これまでに種々論じてきたように、すでにいくつかの種類のプラズマは人類の生活の中に広く応用され非常に重要な役割を果すようになった。しかし現在プラズマの応用の可能性として考えられているさまざまのものなかで、おそらく最も困難かつちょう戦的であって、しかもそれが可能となったとき人類に対する寄与の最も豊かなものと考えられるのは、水素爆弾の形で人類がその解放に成功した熱核融合反応熱の動力利用であろう。その実現の曉には化石燃料や核分裂反応などと異って、無尽蔵で放射性などの問題のない窮屈的なエネルギー源がもたらされるであろうことは広く知られているとおりである。

重水素の高温プラズマ中で発生するおもな熱核融合反応は、次の 3 種類である。



これらのうち前 2 者の起こる確率はほぼ等しく、また第 3 の反応は、2 番目の反応の結果生じた 3 重水素 T がもともとあった重水素と反応するものである。

図 15.1 は、上記の反応によって発生する熱密度をプラズマの温度および粒子密度を変数として示したもの、また図 15.2 は、そのときの粒子の反応時間を示したものである。これらの図からたとえば 10 keV の重水素プラズマの D-D 反応によって 100 W/cm^3 程度の熱密度を実現するためには、 $10^{22}\text{ 個}/\text{m}^3$ ぐらいの粒子密度を得なければならないことがわかる。このときの平均反応時間は 100 sec 程度であるが、 10 keV の重水素イオンの熱運動速度は 10^6 m/sec であるから、結局十分な熱核エネルギーを取り出すためには重水素イオンは 10 keV またはそれ以上の温度で、およそ 10^8 m ほどの距離だけ運動する間上記の粒子密度で炉の中に閉じ込められなければならないことが結論される。このときのプラズマの巨視的な圧力を熱平衡にあるものとして $p=nkT$ から算出するとその値は 100 気圧 にも達する。

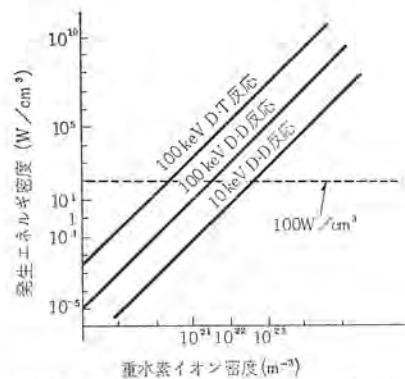


図 15.1 热核反応による発生エネルギー密度

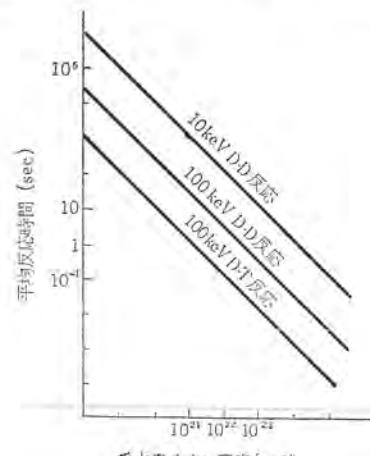


図 15.2 热核反応に要する平均時間

このような高温高圧のプラズマを通常の物体でとり囲むことは不可能であろうし、また容器壁からプラズマ中に不純物が入るときは、先に述べたようにプラズマからの放射損がふえて、せっかく暖めたプラズマを冷却することとなるので、プラズマと外界との間はすべて真空の領域で隔離されることが必要である。その方法としてこれまでに提案されているのは電磁界を使うことであって、静磁界によるもの、過渡的な立ち上がりの速い磁界によるもの、高周波場によるもの等々、これまでに折りにふれて説明した諸種の装置が考案されている。磁界が有する圧力は $p_m = B^2/2\mu_0$ で与えられる。これが 100 気圧 に及ぶプラズマ圧力とつり合うものとすると $B \approx 7\text{ Wb/m}^2$ 程度の磁束密度が必要である。プラズマの閉じ込めのために静磁界のみを用いる場合には、プラズマが時間の経過とともに磁界中に浸み込むことを考慮すると、磁束密度はもっと高い値に選ばなければならないであろう。

たしかに経済的な立場から考えると、静磁界による閉じ込め方法は最も有利であるけれども、いったんプラズマと磁界とが完全に混ざり合ってしまうと、プラズマ境界にはもはや積極的な閉じ込め力は及ぼないという点から、たとえば 1 sec 以上というような持続的な閉じ込めを行なうことは、静磁界のみによっては不可能ではないかと考えられる。おそらく持続的な閉じ込めを必要とする限り、たとえば先に述べた進行磁界配位などの高周波電磁界を静磁界に重畠するか、あるいはそれを単独で用いることが必要であろう。一方静磁界のみによっては、2 章に述べた進行磁界配位にみられた单一の荷電粒子に対して復原的な閉じ込め力が働くこ

とはあまり期待できないので、プラズマ表面からの粒子の逃逸はかなりすみやかに起こるものと考えられ、その上、いったんは安定な閉じ込め配位が実現されたとしても、わずかの空間電荷の発生によってそれがくずされる危険も大きい。

これらの事情を勘案すると、熱核的なプラズマを閉じ込めるとの困難さはようやく明らかとなる。真空中にプラズマを浮かせるという方法の代わりに、高圧の重水素気体の中でプラズマを発生しようという試みや、低温高密度で反応を起こさせようという試みがあるが⁽⁷⁾、その実現は電磁界を用いる方法よりも、さらにほど遠いものと考えられる。

現在までのところ、最も長時間にわたってプラズマの安定な閉じ込めが得られたと考えられるのは、先に紹介した Ioffe の実験であるが、そのときに得られた閉じ込め時間は 3 ms、プラズマのイオン温度は $T_i \approx 5 \text{ keV}$ 、電子温度は $T_e \approx 20 \text{ eV}$ であったと報告されている。ところがこの実験条件で得られたイオン密度は $10^9 \text{ 個}/\text{cm}^3$ にしか過ぎなかつた。熱核的プラズマの粒子密度にはまだ実に 10^{12} 倍ぐらい足りないわけである。Ioffe の成功の後、いくつかの研究機関でその磁界配位のさらに粒子密度の高いプラズマに対する閉じ込め効果が検討されているので、その結果は大いに興味のあるところであり、また大きな期待がかけられている。

15.2 MHD 発電

前節で述べた核融合発電が実現されない限り、人類によって利用されるエネルギーの大部分は、石炭、石油などの火石燃料あるいはウランから供給されることは明らかであろう。しかもこれらのエネルギー源はたいていの場合、いったん熱エネルギーの形にされた後、電気エネルギーあるいは機械エネルギーの形に変換され、利用されている。

MHD 発電とは、熱エネルギーをいかにして有効に電気エネルギーに変換するかという問題を解決するために考案された、「新しいエネルギー変換方式」の一種である。したがって新しいエネルギー源を解放することを目的とする核融合発電に比べると、将来のエネルギー問題の解決策に対する積極性という点では、いささかヒケを取るが、それだけ実用化の早いことが予想され、しかもそれがもじうまく実用化されたとすれば、変換効率を 40% から一挙に 50% 以上に高めうることが予想⁽⁵⁾されるので、最近その研究が非常に重視されている。

さて MHD 発電の原理はきわめて簡単なものであって、11.3 節で述べたシーデンクという方法によって電離度が高められた 2,000 ~ 3,000°K の高速気体流を、磁界と直角な方向に流し、この際発生する起電力 $u \times B$ を利用して外部に接続された負荷に電力を供給して発電を行なおうとするものである。

図 15.3 は MHD 発電の原理図である。紙面と直角な方向すなわち x 方向に磁界 B を印加し、 x 方向に導電性流体を流速 u で流すと、 z 方向に起電力 $u \times B$ が発生する。したがって電極間に適当な負荷を接続すれば、これに電流が流れ、高温ガス流のエネルギーの一部が電力に変換される。

この場合、単位体積あたりの発電出力は次のようにになる。まずガス中の電流密度 j は起電力 $u \times B$ と負荷電圧による電界 E によって決まり、導電率を σ とすれば、

$$j = \sigma(uB - E)$$

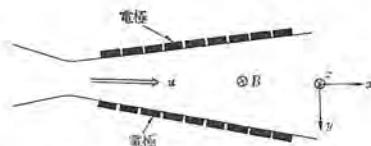


図 15.3 MHD 発電の原理図

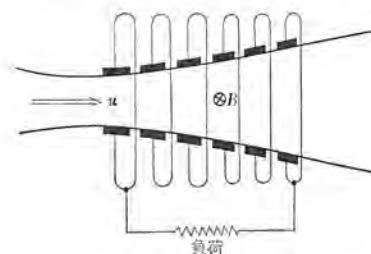


図 15.4 ホール形発電機

となる。したがって開放電圧と負荷電圧との比すなわち uB/E を ν_e とおくと、単位体積あたりの出力 P は、

$$P = \sigma(uB - E)E = \sigma(uB)^2 \left(1 - \frac{1}{\nu_e}\right) \frac{1}{\nu_e}$$

で与えられる。

さて MHD 発電を有効に行なわせるためには、 P をできるだけ大きくするということが最も基本的な要請となるが、現在 σ として $10 \sim 20 \text{ S/m}$ 、 B として 3 Wb/m^2 程度の値が実現できれば、 $10 \sim 20 \text{ MW/m}^3$ 程度の出力密度が得られ、MHD 発電の実現が可能になるとされている。

ただし、ここで注意すべきことは、以上のような簡単な方法で電力を取り出す場合には、負荷電流と磁束とが作用してホール電界が発生し、これが電極によって短絡されるので 6 章で述べたように σ がテンソル量となって磁界に直角な方向の導電率が $1/\{1 + (w_0\tau)^2\}$ (ここに τ は電子の衝突時間である) だけ減少することである。

この現象が生ずると MHD 発電には不利であるので、その対策として電極を細分割してホール電界の短絡を防止するか、あるいはそれをふたたび回収するかによって、オープンサイクル発電機とクローズドサイクル発電機の二つの形式が考えられている。

さて以上の MHD 発電機を実際のプラントに適用する場合⁽⁷⁾、作業流体のエンタルピーを十分回収した後、外部に放棄するか、あるいはそれをふたたび回収するかによって、オープンサイクル発電機とクローズドサイクル発電機の二つの形式が考えられる。

オープンサイクルは構造が簡単なため、化石燃料を熱源とする発電機に適用されることが予想され、この場合当然のことながら、燃焼生成物が直接作業流体として使用される。

一方クローズドサイクル方式では、高温の熱交換器を必要とするので、化石燃料燃焼炉に結合する場合に対しては、具現性に乏しいとされているが、作業流体として希ガス+Cs 混合気体のような導電率の高い気体が使用できるという長所がある。したがって燃料棒が熱交換器を兼ね、しかも比較的の低温での運転が要求される「原子炉を熱源とする MHD 発電」には、この方式が適用される。もちろん、放射性物質を外部に放出しないという要請からも、クローズドサイクルの適用が必要なことは明らかであろう。

技術講座

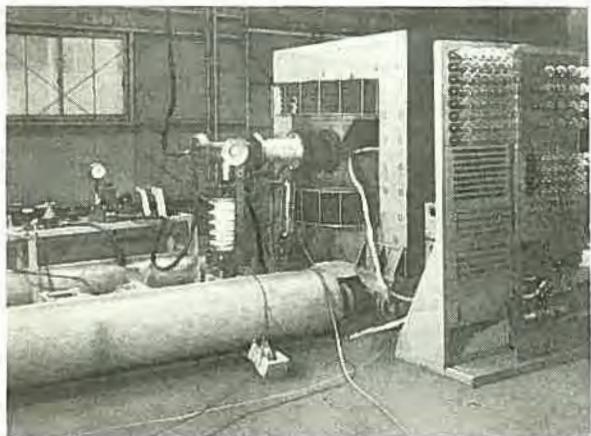


図 15.5 当社の MHD 発電装置

希ガスを利用できるクローズドサイクル方式で、興味あることは、11.4節で述べた非平衡電離が実用できる可能性があることである。もしこれが実現すれば、1,500K程度の低温でもMHD発電が可能となるので、現在高温ガス冷却動力炉の開発とあいまって、これに関する活発な研究が行なわれている。

なお当社中央研究所においても13.3節で述べた大電力プラズマジェットを熱源とした、図15.5に示すような実験用発電機を開発して実験を行ない、すでに10kW以上の発電に成功している。

16. その他の応用

16.1 荷電粒子源としての応用

プラズマを電子源として用いている例は少ない。3極形プラズマトロン⁽⁷⁶⁾⁽⁷⁷⁾はプラズマを一種の電子源とする増幅管であると考えられるが、プラズマから純粹に電子だけを取り出しているという構造にはなっていない。

イオン源としての応用例はかなり多い。これには種々な形がある。高周波無電極放電で作られたプラズマからイオンを引き出す高周波放電形、図16.1、16.2にそれぞれ示されたようなP.I.G.放電形、von Ardenne形〔あるいはDuo Plasmatron形〕などがその代表的なものであるが、これらにはそれぞれ特色がある。たとえば水素の原子イオンの含有率〔atomic content〕の点では高周波放電形が最も良いが、大出力ビームを望む場合にはvon Ardenne形がよいであろう。ただしビームの集束の度合の目安となるエミッタスについて von Ardenne形が最も悪いといえる。

図16.1のP.I.G.放電形では下部の陰極に穴をあけ、そこから下部のほうにイオンを取り出す。図のものでは、放電電流が2Aのとき、取り出されるイオン電流は1mAの程度であるが、当社中央研究所で開発され現在使用されている500keV Cockcroft-Walton形イオン加速器用P.I.G.イオン源はパルス幅50~250μs、繰り返し20~60ppsのときの出力が5mAであって、目下これを50mAにすべく改造中である。

図16.2のvon Ardenne形は、熱陰極アーカ放電を10,000ガウス程度の強い磁場のもとで発生させ、その陽光柱部分から小さい放出孔を通してイオンを引き出す方式のものであって、図(a)のCは熱陰極、Iは中間電極、Aは陽極である。これらの部分を拡大して示したのが(b)であって、磁力線BがIを通ってアーカ室

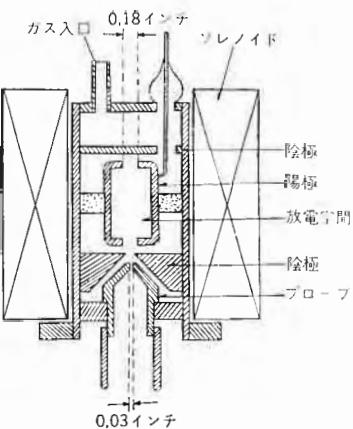
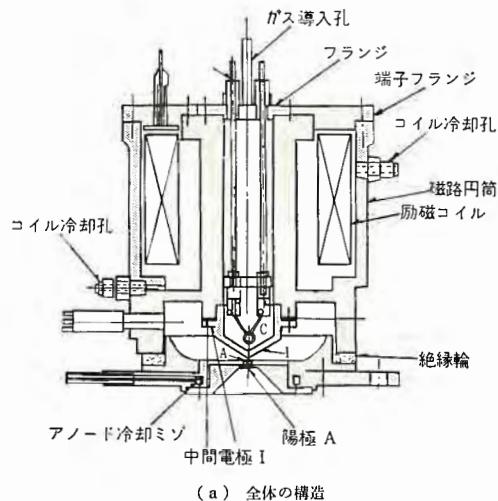
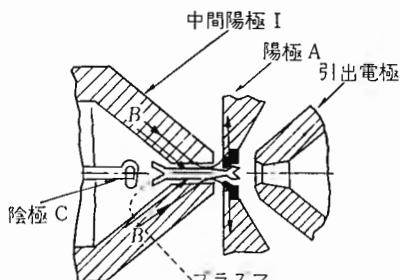


図 16.1 P.I.G. 形 イオン 源



(a) 全体の構造



(b) プラズマ引出し部の近傍

図 16.2 von Ardenne 形 イオン 源 (Duo plasmatron)

に集中するようになっている。この磁界はプラズマを閉じこめるカスプ磁界として作用するのでプラズマは絞られる。引出電極に負電圧を印加すると、陽極部に突出したプラズマの部分からイオンが引き出される。三菱原子力工業が、当社の協力を得て試作した出力30mAのvon Ardenne型イオン源は、すでに本誌上で報告⁽⁷⁸⁾されている。高エネルギー入射方式の超高温プラズマ装置に必要とされているイオン源はきわめて大きな出力のものであって、現在でもすでに出力数百mAのものが使用されている。

16.2 電磁波との相互干渉作用の利用

レーダで用いられる切換放電管⁽⁷⁹⁾—TR放電管およびATR放電管—は、電波の伝搬およびシャット断るためにプラズマを用いた好個の例であるといえる。これらの実用化は、マイクロ波による放

技 術 講 座

表 16.1 プラズマ中の進行增幅波の実測例

測定者	周波数 (kMc)	ビーム電圧 (V)	ビーム電流 (mA)	利得	ガス	磁場 (G)
Boyd	≈3	≈400	2	正味 7~8 dB/cm	Hg	0
Bogdanov	1.2~10	—	<1	合計 30~40 dB	Hg	0
Agdur	3	1,000	20	3~4 dB/cm [合計 40 dB]	Air	1,000
Kino	1~3	750	1	5~9 dB/cm	Cs	400~500

電開始、高周波におけるプラズマのインピーダンスなどについての理論の発達に刺激を与えたけれども、これらの機能そのものは比較的簡単であって、端的にいえば導波管の入口ないし側壁を短絡するスイッチとして用いられているに過ぎない。

プラズマ振動や、プラズマと電磁波——たとえばマイクロ波——との相互作用の研究は、超高温プラズマ研究と関係して最近急速に発展しつつある。その中で本節にとってとくに関係の深いのは、ビームとプラズマの相互作用⁽⁵¹⁾の研究であって、変調された電子ビームを入射したときのプラズマ中における進行波管形增幅作用について、たとえば表 16.1 のような結果が得られている。これらの研究が今後どのような発展を見せるかは大いに興味をひくことである。

17. む す び

最近超高温プラズマの研究に付随して急速に発達してきたプラズマ物理と、従来から多くの人々がなじんできた放電現象論とを適当に組み合わせて、超高温プラズマや通常の放電の陽光柱など広い範囲にわたるプラズマの現象やその応用を統一的な立場で展望してみようというのが、本講座での新しい試みの一つであったが、準備の不足のため種々不備の点があったことはおわびしなければならない。ことに基礎理論にその 1 からその 3 までをあて、読者の興味をとくに強くひくと思われる実際的なことがらについてはその 4 で触れたにとどまったのは、この講座をいささか堅苦しいものにし過ぎた感がないでもないが、その 4 の内容の個々については、国内の各誌に種々名解説が掲載されていることでもあるので詳述を避けた次第である。

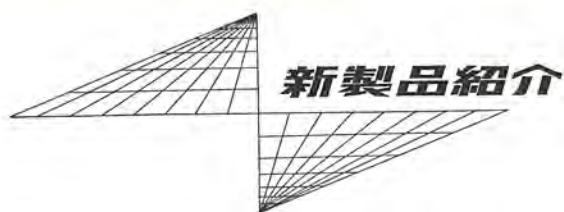
最近のガス電子工学、プラズマ物理は、たとえば天体现象、超高温プラズマの研究や、MHD 発電、ガスレーザー、プラズマジェットなどの開発に刺激されて急速に進展しつつある。たとえば、理論の面で

も本講座ではとうていふれることのできなかつたような新しい進展が行なわれている。また、再現性のないこと、正確な測定の行ないにくいことでは代表的なものであると考えられた放電実験も、最近では実験装置技術、測定技術の進歩により、次第に精密な信頼性のあるデータを生むようになりつつある。このような理論、実験の進歩はプラズマのかくれた物性を引き出し、今まで知られなかつたその応用を生むであろう。本講座が、このような将来性をになっている分野の理解に少しでも役だてば幸いである。

(昭 39-4-8 受付)

参 考 文 献

- (61) J. J. Mathews: Direct Current, July (1963)
- (62) 河合、近藤ほか: 昭 39 春物理学予 1ap-11
- (63) 放電研究グループ会報 No. 13 [「プラズマジェットに関するシンポジウム」] (1962)
- (64) 岡田: 超高温研究, 1, 26 (1964)
- (65) 霜田: 物学誌 19, 120, (1964)
- (66) L. Pulberger: Electronics, p. 39, Oct. 24, (1961), p. 40 Nov. 3, (1961)
- (67) 難波ほか: 明日のエネルギー, 1, 216 (1963)
- (68) 伊藤: 放電研究グループ会報 No. 16, p 17 (1963)
- (69) S. M. Osovets: "Plasma Physics and the Problem of Controlled Thermonuclear Reactions" [Pergamon Press IV p. 1, 1959]
- (70) T. F. Volkov, B. B. Kadomtsev: Atomnaya Energiya 13 429 (1962)
- (71) 近藤、利岡、飛田: 昭 39 春物理学予 1ap-10
- (72) E. R. Harrison: Conf. on Plasma Physics, Culham (1963)
- (73) 伊藤、森川、村井: 「三菱電機技報」 36 No. 11 (昭 38)
- (74) 矢野ほか: JAERI 1037
- (75) G. W. Sutton, A. Sherman: Symposium on MHD Electrical Power Generation at Kings College, Session II, Paper 12 (1962)
- (76) 電学会放電専門委員会: 「放電管便覧」(電気書院)
- (77) Johnson, Webster: IRE 40 645 (1952)
- (78) 山本、奥田: 応用物理, 26, 615 (1957)
- (79) 上島、今村ほか: 「三菱電機技報」 37 317 (昭 38)



未経験者でも簡単に運転できる移動発電所 中容量三菱可搬式ディーゼル発電機完成

当社では先に小容量三菱可搬式ディーゼル発電機として DU-7.5 形 (7.5 kVA) から DU-75 形 (75 kVA) まで発売し好評を博しておりますが、今度新たに DU-88 形、DU-100 形、DU-140 形の中容量可搬式ディーゼル発電機を完成し、いっそうその使用範囲が拡大された。DU-88 形、DU-100 形、DU-140 形とも三菱日本重工の三菱 DB, DH 形ディーゼルエンジンと当社の自励交流発電機とを共通台ワク上に直結し、これに燃料タンク、ラジエータ、バッテリおよび配電盤などを取り付けたもので、移動用はもちろん定置用発電所としても各用途に広く使用することができる。

■ 特長

- (1) ディーゼルエンジンにはトラック、ブルトーザーなどで定評のある三菱 DB, DH ディーゼルエンジンを使用している。
- (2) 高速のため小形軽量であり、基礎工事不要、簡単に移動できる。
- (3) 自動電圧調整器を有する自励式のため電圧変動が小さく、速応性がよい。
- (4) 50, 60 c/s の接続変更が盤内に設けた切換端子盤で簡単にできる。
- (5) 必要に応じて発電機に、回転計発電機を取り付け、自動起動装置も簡単に取り付けられる。

(6) 発電機は両軸受形を採用し、可トウ接手でエンジンと直結しているので振動がきわめて少ない。

(7) 卷線の素線にはポリエスチレンアルミ銅線を使用し、ワニスには合成樹脂のサーモセッターワニスを使用した信頼度が高く、寿命の長い絶縁となっている。

(8) 取扱が簡単で維持費が安い。

■ 仕様

項目	形式	DU-88	DU-100	DU-140
エンジン形式	DB31P	DB34P	DH21P	
発電機形式	開放保護形	開放保護形	開放保護形	
出力(kVA)	75	87.5	87.5	100
電圧(V)	210	220	210	220
電流(A)	206	229	240	262
周波数(c/s)	50	60	50	60
回転数(rpm)	1,500	1,800	1,500	1,800
力率	0.8 逆	0.8 逆	0.8 逆	
励磁方式	自励式	自励式	自励式	
セット全重量(約)(kg)	2,600	2,800	3,900	
外形寸法(縦×横×高)	3,200×1,000×1,780	3,400×1,000×1,800	3,800×1,200×2,000	

ブラシレス交流発電機完成

同期発電機の励磁方式としては、従来、発電機軸端または別置きの直流分巻発電機より励磁電力をとるに回転励磁方式と、セレンまたはシリコン整流器などの半導体整流器を用いて発電機端子より励磁電力をとるに回転整流器方式とが用いられてきたのであるが、最近、半導体整流器技術の飛躍的な進歩によって、その寿命、信頼性が著しく向上してきたため、ここに新しいタイプの発電機として、ブラシレス交流発電機が登場してきた。

従来の回転励磁方式交流発電機においては、直流発電機の整流



図 1 150 kW ブラシレス交流発電機

台数		3台	2台	1台
発電機定格出力(kVA)	開放防滴形	全閉内冷形	開放保護	
" " (kW)	150	937.5	5	
相数	3	3	4	単相
電圧(V)	450	450	115	
電流(A)	192	1,202	43.5	
周波数(c/s)	60	60	60	
回転数(rpm)	600	1,200	1,800	
力率(%)	80	80	80	
励磁機定格出力(kVA)	5	7.5	0.3	
相数	3	3	3	
電圧(V)	110	90	40	
電流(A)	26.2	48.1	4.33	
周波数(c/s)	60	60	60	
回転数(rpm)	600	1,200	1,800	
力率(%)	93.2	96.3	97.2	
絶縁耐电压(月)	B ロイド	B AB, AIEE	A JEC	
規格	38年12月	39年3月	39年2月	

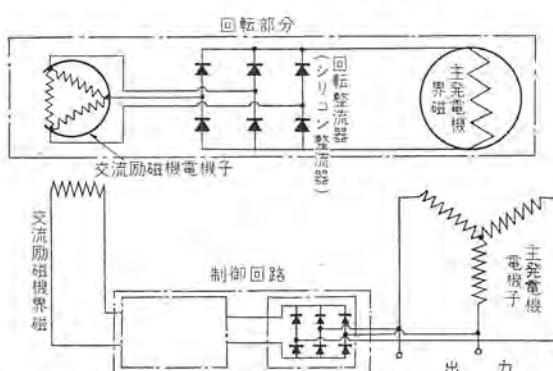


図 2 ブラシレス交流発電機接続図

子、ブラシ回りの保守点検が面倒で、とくに有害なふんい気中の運転では、整流悪化、ブラシ摩耗の危険性が多く、不適当であった。また、自励式交流発電機においては、直流機の整流子はなくなったものの、やはり回転している界磁コイルに励磁電力を供給するためのスリップリング、ブラシは必要であり、その保守点検の問題は残されていた。

ここで述べるブラシレス交流発電機とは、整流子、スリップリング、

ブラシなどの摺動部分をすべて取り除いた最も新しい励磁方式であって、保守が簡単なこと、信頼度が高いこと、特性が良好なことなどすぐれた特長を有しており、従来の発電機にかわる新しい発電機として注目される。

当社においては、最近、船用および陸上用として表1に示すよろうな、3種類、6台のブラシレス交流発電機をあいついで製作し、納入した。

瞬時要素付過電流継電器(丸胴角埋込形)新発売

昨年より単体販売している丸胴形CO形過電流継電器シリーズに、瞬時過電流要素を内蔵したものを新しく発売開始することになった。

この継電器は高圧需要家の受電用として製作したもので、短絡事故のような過大電流では瞬時過電流要素により高速度で故障を検出し、過負荷保護には誘導円板要素で適当な時間限をもって保護するため、電力会社変電所の継電器と時間協調が容易にできる利点がある。

■特長

- (1) 10~35Aまたは20~70A連続可調整の瞬時過電流要素がケース内に内蔵されている。
- (2) 新しい設計による誘導要素を用いて温度変化、周波数変化による誤差を小さくしている。また強力なMK磁石を用いているので経年変化なく正確な動作時間が得られる。
- (3) 円板の回転角度が大きいので正確な時間整定ができる。
- (4) 調整機構が完備している。
- (5) 過電流に強い。

■仕様

この継電器には制御電源回路の違いにより下記の4種類の形式がある。

- (1) 直流トリップ用 CO-6I-R形
- (2) CTトリップ用 COT-6I-R形
- (3) ノーボルト・トリップ用 CON-6I-R形
- (4) 交流トリップ用(常時開接点) COA-6I-R形

また定格の大様は下記のとおり。

瞬時過電流要素整定範囲	10~35A 20~70A
誘導円板要素整定範囲	いずれも連続可調整 2~6A 4~12A
消費VA	いずれも7タップ 約15VA



COT-6I-R形瞬時要素付過電流継電器

新形多接触継電器シリーズ完成(MC-30-E形、MC-60-E形)

従来から製作していたSG-20、MC-40およびMC-60形多接触継電器シリーズに代わって、新しくMC-30-E、MC-60-E形多接触継電器シリーズを開発し発売を開始した。

これは電力用の補助継電器として、従来、3種類あったものを2種類に機種統合し、部品の共通化をはかった。

■特長

- (1) MC-30-E形は3組、MC-60-E形は6組の接点を有し、いずれの接点も容易にa接点、b接点に組み換え可能である。
- (2) 電力用補助継電器として、機械的、電気的に十分信頼性のある構造となっている。
- (3) 10A連続通電可能、シャット断はDC 110V 3A、AC 110V 5A(いずれも誘導負荷 L/R=0.012)の接点容量を持っている。

■仕様

定格電圧 AC 110V、220V 50c/s または 60c/s
DC 24V、48V、110V、220V

重量 MC-30-E 約2kg
MC-60-E 約3kg

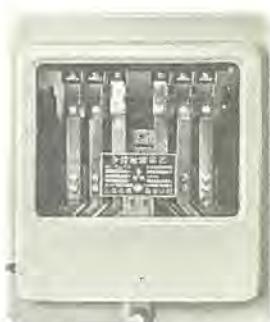


図2 MC-60-E形多接触継電器

図1 MC-30-E形多接触継電器

EM-105 形 電磁開閉器新発売

EM-75 形までの EM シリーズに引き続き EM-105 形の開発を完了し量産市販を開始した。EM-105 形は 600 V 100A クラスで従来の EK-105 形に代わるもので大幅に小形軽量化、性能の向上、低価格を計っている。

■ 特長と性能

- (1) 最高級の性能: JIS の A 級 1 号 1 種以上で電気の寿命は、100 万回以上の高性能である。
- (2) 小形軽量: 部品数の少ないコンパクトな構造により取付面積の縮小を計り EK-105 形に比べて箱入りで 69%，盤用の開放形で 79%，電磁接触器として 51% とした。
- (3) 信頼性が高く長寿命: 水平動作の機構は確実な動作をし、デイオングリッド付の消弧室はシャ断能力が高く、接点は Ag-CdO を用い合理的な設計とあいまって非常に長寿命で信頼性が高い。
- (4) 広範囲な使用: インチング、プラギングなどひん繁過酷な開閉に耐え補助接点も 2a2b を内蔵し使用範囲が広い。
- (5) 確実な過負荷保護: EM シリーズの統一設計で EM-75 までと同じ上面の調整ツマミによる動作電流可調整、周囲温度補正付、リレー接点 1ab 付、3 素子も可能としている。
- (6) 保守点検が容易: 消弧室をとると接点部分が見え接点の点検取扱いが容易でありまた操作電磁コイル、サーマルリレーの取り換えも簡単にできる。

■ 仕様

形名	電磁開閉器		電磁接触器 M-105
	箱入 EM-105	開放 EMO-105	
定格電圧 (V)	600		600
定格容量 (kW)	200-220 V 400-550 V	22 45	定格電流 100A 連続通電容量 120A
補助接点	2a2b		2a2b
操作電磁コイル	AC 200 V 50 c/s, 200-220 V 60 c/s その他 100 V, 400 V, 500 V 級		
重量 (kg)	11	6.8	5.4

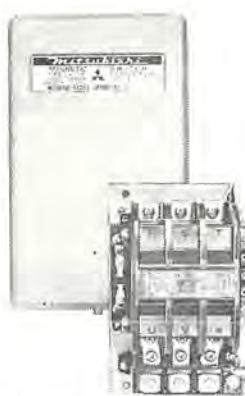


図 1 EM-105 形電磁開閉器



図 2 EMO-105 形電磁開閉器

携帯用電気ジスクグラインダ (100 mm, 180 mm)

レジノイドオフセット研削トイシを使用し、鉄物のバリ取り溶接面の仕上、鉄物、鉄鋼などの仕上、コンクリート、花崗岩、大理石などの研削に使用されるもので、この種、電気ジスクグラインダの中で最も使用の多い 100 mm 180 mm の 2 種類の新形を開発した。携帯用電気グラインダに比較して、変速回転で研削するので能率がよくしかも研削仕上がりが美しく仕上がる有望な機種である。作業状況からとくに 180 mm では、重研削に使用される機会が多いので、本機ではとくに重研削にも耐えうるよう電動機出力を大きくし、十分この重研削に耐えうる強力形としている。

また 100 mm の方は、小形軽量で片手操作で使用しうるように使い易い形状にし、小物研削用とした。

さらに 2 機種とも レジノイドオフセット研削トイシの代わりに、研磨ジスク、ワイヤーブラシを取り付けて使用することにより、サビ落し、塗装ハガなどの広範囲の作業に使用されるものである。

■ 特長

- (1) 研削力が大きい。
研削力を大きく、しかも能率をよくするため、電動機を大きくし、とくに電機子絶縁ワニスを高温度に耐えうる特殊絶縁ワニスを用いた。
- (2) オーバーロードランプ（過負荷防止警報ランプ）を付けた。
必要以上の過負荷で使用され、電動機の焼損事故を防止するため、三菱独特の過負荷防止警報リレーによるオーバーロードランプ（過負荷防止警報ランプ）を取り付けて、電動機の保護を行なった。

■ 仕様

容 量	100 mm 電気ジスクグラインダ	180 mm 電気ジスクグラインダ
電源	レジノイドオフセット研削トイシ 100×36×15.0	レジノイドオフセット研削トイシ
電動機出力	100 V 50/60 c/s 単相交流	100 V 50/60 c/s 単相交流
全負荷電流	180 W	700 W
無負荷回転数	3.7 A	12 A
重 量	9,000 rpm	5,400 rpm
	2.1 kg	7.4 kg



図 1 100 mm 電気ジスクグラインダ



図 2 180 mm 電気ジスクグラインダ

(3) 歯車騒音を低くした。
騒音の少ない曲歯傘歯車（スパイラルベルギヤ）を使用し、歯車のかみ合状態を確実かつ容易にするための微調整装置を設けるとともに、検視穴を設け、穴には簡単に取り付け、取りはずし可能な

ピニール製のキャップを取り付け、グリースの検視および取換、補充のできる構造とした。

(4) 近代意匠にした。
作業容易なしかも使いやすい形状にした。

連続5時間の自動演奏ができる

三菱ステレオ DSS-607 形新発売

三菱電機は、このたび「パーカー・オート・チェンジ」の採用をはじめ、レコードのスタート位置を自動的に探知識別する自動レコード探知装置プレーヤーの内部照明には新たに開発した画期的な光る壁EL板を採用したデラックスステレオを新発売いたします。

■特長

(1) パーカー・オート・チェンジ付き

画期的な新機構を採用し、30cmまたは25cmレコードで10枚17cmレコードで12枚と連続5時間の自動演奏が楽しめます。さらに演奏が終われば、自動的にピックアップがもどり電源が切れます。

(2) 自動レコード探知装置付き

レコード盤の大きさにより演奏のスタート位置が違いますが、これを機械が自動的に探知識別しますから、大きさの異なったレコード盤でも連続自動演奏ができます。

(3) FM受信機内蔵

AFC付FM受信機が内蔵されていますから、話題のFM放送が常に安定した状態でお聞きになれます。

(4) 25cmダブルコーンスピーカと5cmトゥイータを左右2個使用
再生幅の広い25cmダブルコーンスピーカと5cmトゥイータを左右2個ずつ計4個使用していますから、低音から高音まで美しい音を再生いたします。

(5) 画期的な“光る壁”EL板採用

新たに開発した‘光る壁’EL板（エレクトロ・ルミネセンス）をプレーヤーの内部に採用してありますから、部屋を暗くしてのレコード演奏でも針先が暗くならず、しかもその美しいELの輝きは演奏会場そのままのムードをいっそう盛り上げてくれます。

(6) 音質調整ツマミ付き

低音部、高温部とも本格的な音質調整回路がついていますから、豊富な低音、鮮明な高音がお好みに応じて調整できます。

(7) 音の深まりを増すエコー装置付き

(8) 音の広がりを調整するステレオコントロール付き

(9) 小さな音量でも臨場感をそこなわないラウドネスコントロール付き

- (10) 弱い電波もあまさずキャッチするフェライトアンテナ内蔵
- (11) 長寿命のダイヤ針付き
- (12) 操作の簡単なピアノ式押しボタンスイッチ採用
- (13) 中波ステレオ放送聴取可能
- (14) リモートコントロール接続可能

■仕様

形	式	17球5ダイオード使用、3バンドチューナ付
受信周波数範囲	右チャネル	FM 76~90 Mc MW 535~1,605 kc
	左チャネル	SW 3.8~12.0 Mc MW 535~1,605 kc
音声出力	無歪	6.0+6.0(W) 最大 9.0+9.0(W)
スピーカ	P-2511形	25cmダブルコーンスピーカ2個
	TW-502形	5cmトゥイータ2個
電源	交流	100V 50または60c/s
ターンテーブル	直径	23cm ゴムシート付
ピックアップ	ステレオ・クリスタル・カートリッジ	ターンオーバ形ダイヤモンド針付き
速度	度	4スピード(16 $\frac{2}{3}$, 33 $\frac{1}{3}$, 45, 78 rpm)
針圧	ST-LP, SPとも	8g
大きさ	さ	(幅)110×(高さ)87×(奥行)43 cm
重さ	さ	48.2 kg



DSS-607形三菱ステレオ
現金正価 ￥79,500 月賦正価 ￥84,000

NEWS FLASH!

■ インド向け電力用変圧器大量受注

当社では、このほどインド各州から合計33台、総容量130万kVAにのぼる電力用変圧器を受注した。これらの変圧器の入札は、昭和37年末ごろからインド各州ごとに行なわれ、激しい受注競争のうち当社の受注が内定し、今回第3次円借款引き当ての決定とともに、正式受注となったものである。これらの変圧器の内容は次のとおりで、昭和39年末から40年春にかけて逐次出荷される。

(1) パンジャブ州各変電所用

90,000 kVA 220/132 kV 送油風冷式外鉄形三相単巻変圧器

6台

117,500 kVA 220/66-33/11 kV 送油風冷式外鉄形三相変圧器

2台

(2) グジャラット州ゴタリ変電所用

50,000 kVA 220/138.6 kV 油入風冷式外鉄形三相単巻変圧器

2台

(3) グジャラット州ナバサリ変電所用

50,000 kVA 220/69.3 kV 油入風冷式外鉄形三相変圧器 2台

(4) マドラス州ショラタール発電所用

13,000 kVA $11/\sqrt{3}$ kV 送油水冷式外鉄形単相変圧器 7台

(5) マドラス州サルカルパン発電所用

33,000 kVA 11/110 kV 送油水冷式外鉄形三相変圧器 1台

(6) マドラス州各変電所用

25,000 kVA 110/33-11 kV 送油風冷式内鉄形三相変圧器 4台

25,000 kVA 110/22-11 kV 送油風冷式内鉄形三相変圧器 4台

20,000 kVA 33/11 kV 油入自冷式内鉄形三相変圧器 2台

(7) マデアグラデシュ州ガンジガール発電所用

9,567 kVA $11/\sqrt{3}$ kV 送油水冷式外鉄形単相変圧器 3台

■ 伊豆箱根鉄道納め新車完成

昭和38年9月受注以来製作を急がれていた伊豆箱根鉄道納め制御装置1台ができ上り、厳格な種々の試験を受け、昭和39年3月中旬に納入された。この制御装置の特長は、従来接点荒れその他でとかく保守点検上問題となりがちであった短絡繼電器、および限流繼電器を磁気増幅器に置き換え、完全無接点方式としたことである。そのため機械的運動部分もなくなり、接点荒れの心配もなく、保守点検がきわめて容易となるとともに、従来の限流

繼電器による限流値制御の場合よりもはるかに応答性、制御性の面でもすぐれたものである。

その制御系統は図のとおりである。

直流変流器により主回路電流を検知し、抵抗を通しこれをパートン電圧と比較する。ここでパートン電圧の方が大きければ限流値制御用磁気増幅器に入力信号が入らない。この磁気増幅器はプロック線図に示すような特性を有しており、入力が入らないと出力が出たままとなる。この出力がカム軸操作電動機制御用磁気増幅器の制御巻線に入力として入ると、この磁気増幅器が出力を出し、カム軸操作電動機を駆動させるものである。

性能要目

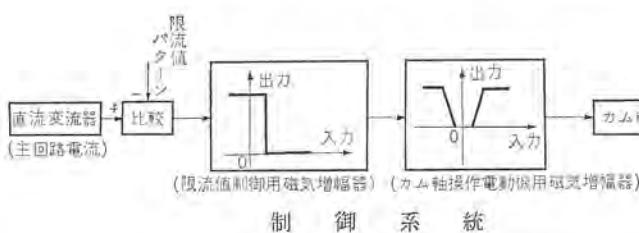
編成	MMT
員	M車；160名 T車；168名
車重	M車；34t T車；27t
最高速度	110 km/h
加速度	空車；2.7 km/h/S 定員；2.1 km/h/S 満車；1.7 km/h/S
減速度	常用；4 km/h/S 非常；4.5 km/h/S
主電動機	MT-15 (100 kW×8, 675 V 172A) 将来 MB-3039A (120 kW×8, 340 V 392A) に変更
歯車比	MB-3,039A の場合 89/18 MT-15 の場合 63/25
車輪径	910 mm
制御装置形名	ABFM-168-15MH 主電動機 8台直・並列弱界磁制御
架線電圧	1,500 V D-C
制御電圧	DC 100 V AC 100 V ±7.5% 60 c/s ±5%
制御空気圧	5 kg/cm ²
ブレーキ装置	空気ブレーキ装置

■ スクラップつり上用リフティングマグネット完成

最近の労働力不足に伴う荷役運搬作業合理化能率化の傾向に沿うべくリフティングマグネットの使用が再認識されるようになった。

標準シリーズの丸形および角形の外に今回スクラップ専用船用として5tウインチ搭載用リフティングマグネットを製作し大阪港において公開試運転を行ない好成績を収めスクラップ荷役業者の好評を得た。従来のつり上具使用作業に対し4~5倍の運搬能力が発揮でき作業人員を大幅に減少することができる。

定格	
形名	HM17
自重	3.65 t
直徑	1,700 mm
使用率	50%
コイル	H種絶縁
励磁容量	22 kW (冷時) 14 kW (熱時)



つり上量は No. 1 および No. 2 ヘビー 級 スクラップ で各 3 時間にそれぞれ 95, 50 t. 一回のつり上量はおのの 660, 400 kg であった。今後のスクラップ専用船への販路増加が期待される。これで丸形 シリーズ として 200, 250, 300, 350, 500, 700, 900, 1,100, 1,300, 1,500, 1,800 mm 直径、角形 シリーズ として 1,400 × 500mm, 1,100 × 500 mm のものに対し受注体制が整った。



スクラップ 荷役試験中の リフティングマグネット

■ 新形アナログ計算機国際見本市で実演

昭和 39 年 4 月 9 日から 4 月 29 日まで大阪市港会場で開催された第 6 回国際見本市に新形 アナログ 計算機を展示、実演し、連日関係各位の注目を集めた。

この計算機は低速度精密形で、長年当社で製作してきた MELCOM EA 7100 シリーズ 精密級低速度形 アナログ 計算機を製作使用経験の両面から徹底的に再検討して、精度、信頼度および演算の自動化に重点をおいて設計製作したもので、MELCOM EA 7150 形高性能 アナログ 計算機と命名している。

構成は基本架と非線形架よりなり、標準品は演算增幅器 100 台 ポテンショメータ 120 台、関数乗除算器 10 台、関数発生器 7 台、まで実装可能であり パッチペイ の端子数は 2,600 点まであるので、すべての理工学方面の問題の解析が可能になっている。また、アナログ 計算機の大形化に伴う機能の拡張、操作量の軽減を意図した画期的な自動演算機構を採用し、デジタル 入出力装置の付加によってデジタル 計算機との連動動作を行なういわゆるハイブリッドシステム の採用が可能になるよう十分な考慮が払われている。

この計算機の特長をあげれば次のとおりである。

- (1) 多数の演算要素を実装している。たとえば演算增幅器 100 台
- (2) 高性能、高安定度である。たとえば単体精度 0.05% ドリフト 20 μ V/8h
- (3) 大容量、高信頼度の プレパッチボード を有している。たとえば 2,600 点
- (4) 完全自动 プログラミング 装置を実装している。
分割演算、自動繰返し演算が可能
- (5) あらゆる点で取り扱いが簡明である。
フルプルーフシステム の採用

(6) 特長ある自動化 システム を採用している。

ステイック、ダイナミックプログラムチェック など

(7) すぐれた非線形要素を多種多様にわたって持っている。



MELCOM EA 7150 形高性能 アナログ 計算機

■ ギリシャ・タンカーにマリンテレビジョン装置を納入

ここ数年来船の自動化、合理化が進められてきているが、この一環としてこのほど船用 テレビジョン 装置（マリンテレビジョン）を完成し、浦賀重工業株式会社で建造した ギリシャ の タンカー “キンクカドマス号” (53,000 t) に取り付けた。

最近の タンカー は、ますます大形となり数万トンから十数万トンにも及ぶものが建造されつつあるが、このような大形船では、従来のものとは異なり、エンジン、ブリッジ ともに船尾に配置された。いわゆる アフターエンジン、アフターブリッジ 方式が採られている。このように船の長さが長くなりさらにアフターブリッジ 方式となると、ブリッジ から前方海面を見る場合に、船首に視界をさえぎられて見えなくなる部分が広くなり、入出港時の操船が困難となる。

この テレビジョン 装置は上記のような欠点を除くために使用されるもので、船首の マスト に、テレビジョンカメラ を取り付け、ブリッジ 操舵室に モニタ を設置し、この間を ケーブル で接続している。

図 1 は、船首部の マスト に取り付けた カメラ 部を、図 2 は操舵室に取り付けた モニタ および操作器を示している。

この テレビジョン 装置は、海上の悪条件にも十分耐えるように製作されており次のとおり特長を持っている。

(1) カメラ は全天候形 カメラケース に納められ、リモートコントロール形回転台に取り付けられている。またこの部分は、耐海水、耐波浪、耐振性を有し、周囲温度は -20°C ~ $+50^{\circ}\text{C}$ まで動作し、60 m/sec の風速まで耐えられる。

(2) カメラケース 前面の ガラス は特殊な構造で温度差による露結や低温時の氷結を防止している。

(3) カメラケース 前面 ガラス には ウィンドウイップ を有し、操作器から リモート ON-OFF が可能である。

(4) カメラケース 前面 ガラス 部には自動開閉の カバー を有し、大洋を航行する場合など、テレビジョン を使用しない時は、カバー を閉じて ガラス 面を保護している。

(5) レンズ には自動光量調整絞り (E. E) 付 ズームレンズ を使用

している。

(6) レンズと撮像管の間には自動シャッタを設けてあり、太陽光が直接レンズより入射して撮像管を焼損するのを防止している。

(7) 自船の一部を視野に入れず、海面のみを写した場合でもカメラの方向がわかるように、俯仰、回転角を操作器のメータで指示している。

概略仕様

1. テレビジョンカメラ IFTI 形 メルビジョン

2. モニタ 14 形 ビデオモニタ

3. 回転台およびカメラケース

左右回転角 ±160°

同回転速度 約 3°/sec

上下俯仰角 0~-45°

同俯仰速度 約 3°/sec

4. 許容周囲温度

カメラ部 -20°C~+50°C

モニタ部 0°C~40°C

5. 電源

電源電圧 AC 115 V ±5%



図 1 船首部マストに取り付けたカメラ部



図 2 操舵室のモニタコンソール
(モニタおよび操作器)

周波数 60 c/s
消費電力 約 250 VA

6. レンズ
形 式 電動式 E.E 形 ズームレンズ
焦点距離 25~100 mm
明るさ 1:1.8~1:22

■ 東海道本幹線用モレクトロン携帯無線機の試作機納入

従来モレクトロンを応用した無線機の開発に努めてきたが、本年3月国鉄新幹線用として、防護警報送信機(150 Mc/FM, 0.5 W)および保守者用受信機(400 Mc/FM)の試作を完成し納入した。

これら無線機は、150 Mc 帯の電力増幅部および400 Mc 帯のRF増幅部にトランジスタを使用するほか、すべてモレクトロン化し、小形・軽量・高信頼度を実現している。モレクトロンは HC-18/u 形水晶ホルダに似た外形を有する7本脚のケース MO-6 に密封される。同調回路は、調整の作業性を考慮し、可変同調器を用いている。モレクトロンは、これら同調回路、水晶発振子、セラミック・フィルタなど組み合わされた場合、総合的にスペース・ファクタがよいように考慮されているのである。

これら無線機はモレクトロン化された無線機としてわが国最初の製品であり、新時代の先駆をなす画期的製品であるといふことができる。なお送信機は正式採用時は改良される予定である。

1. 防護警報送信機

この送信機は、超特急化された新幹線の列車事故防止のための防護警報(トーン信号)を発射するためのものであり、従来の発煙筒と同一目的に使用される。電源スイッチをONにすると、トーンでFM変調された電波が発射され、1~3 kmに近接した列車の受信機で受信され、列車はただちに急停車するのである。

その概略性能は次のとおりである。

変調方式	F2
送信周波数	150 Mc 帯の一波
送信出力	0.5 W
寸法	60×156×28 mm
重量	360 g (電池 130 g を含む)
電源	12 V 220 mAH アルカリ蓄電池
アンテナ	ホイップ(伸縮形)

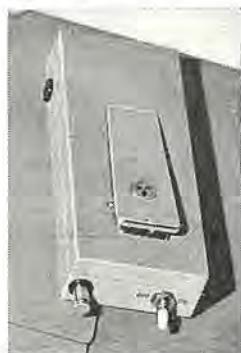


図 1 防護警報送信機

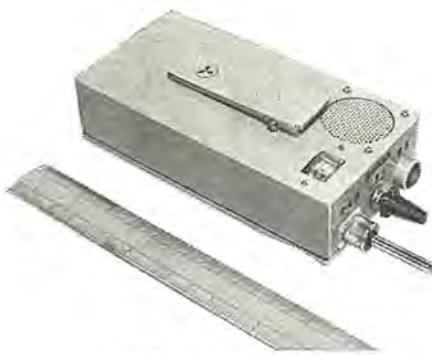


図2 保守者用受信機

2. 保守者用受信機

この受信機は、線路沿線の保守者が携帯し、基地局よりの指令を受信し、沿線の電話ボックスより基地に連絡するための指令受信機であり、3チャネル切換式である。

その概略性能は次のとおりである。

電波形式	F3
受信方式	二重スーパーヘテロダイン
受信周波数	400 Mc 帯の 3 波切換
受信感度	NF 14 dB
寸法	80×159×40 mm
重量	830 g (電池 270 g を含む)
電源	12 V 500 mAH アルカリ蓄電池
アンテナ	ホイップ (伸縮形)

■ MAR-3A 形短波無線機納入開始

国産機 YS-11 の試作機は現在、日本航空機製造株式会社において試験飛行が続けられているが、これに搭載する HF 無線装置は当社で製作、MAR-3 形を去る 38 年 2 月に納入した。

今回さらに改良を加え、量産 1 号機用として MAR-3A 形 2 台を去る 3 月出荷し、引き続き納入の予定である。



MAR-3A 形短波無線機

MAR-3A 形の外形、外部接セッ (栓) は米国 ARINC 規格に合致し、主要性能は米国 Collins 製品、Aero-Com 製品と同等のもので、新電波法による型式検定に合格済である。中形クラスの旅客機搭載用としてわが国最初の製品である。

送受信機本体は 7 個の プラグイン 方式の モジュール によって構成され、ユニット交換を容易にしているのも特長の一つである。

その他おもな性能をあげると次のとおりである。

- | | |
|--------------|---|
| (1) 周波数範囲 | 2.0~22.0 Mc |
| (2) チャネル数 | 最大 20 |
| (3) チャネル切換時間 | 30 秒以内 |
| (4) 電波形式 | A1, A3 |
| (5) 周波数安定度 | ±0.01% 以内 |
| (6) 送信出力 | 52 Ω △ 100 W |
| (7) 受信出力 | 500 Ω 100 mW |
| (8) 受信感度 | 入力電圧 6 μV で S+N/N 10 dB 以上 |
| (9) 重量 | 構成品合計 約 35 kg |
| (10) 消費電力 | DC 27.5 V; 3A 以下, AC 115 V, 400 c/s; 受信時 0.8A, 送信時 4.5A |

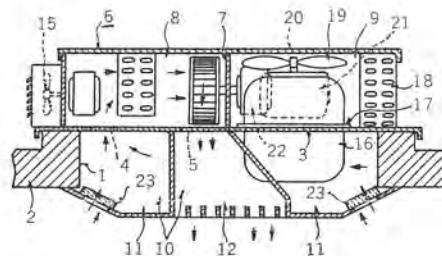
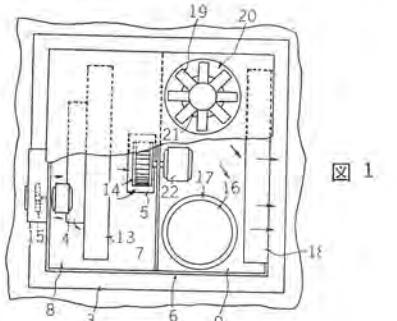
さらに本機は去る 3 月海上保安庁に納入し、ピーチクラフト E-18S に搭載され、従来の Bendix 社製無線機に置き換えられており、海洋観測その他に活躍が期待されている。

車両用天井形冷房装置

考案者 牛田善和・加藤敏夫

この考案は車両の天井に取り付けられ車内を冷房する冷房装置に関する。図において、(3)は吸気孔(4)と送気孔(5)とを有し車両の天井(2)に設けた開口(1)を封塞する台板、(6)はこの台板(3)の上面に取り付けられ内部を仕切板(7)により冷却室(8)と機械室(9)とに仕切った箱体、(10)は上記台板(3)の下面に設けられ上記吸気孔(4)に通ずる吸気通路(11)と上記送気孔(5)に通ずる送気通路(12)とからなる通気室、そして本考案においては、上記機械室(9)内に据え付けた圧縮機(16)の下部を上記通気室(10)内に突き出せしめるとともに上記機械室(9)内の冷却ファン(19)を縦形にしている。本考案では上述したように圧縮機(16)の下部を通気室(10)に突き出させるとともに、凝縮器の冷却ファン(19)を縦形にし、箱体(6)の高さを可及的に低くしているので、箱体(6)の上にかぶせる車両の屋根の高さが低くなり、車両の美観を増すことができる。さらに車両の屋根の高さを従来のとおりにしておけば、車両の天井の高さを高くできるので、乗客にゆったりとした感じを与えることができるものである。

(実用新案登録第703557号)(倉屋記)



磁力浮揚器

考案者 加藤庸夫・柳下儀兵衛

この考案は積層した鉄板の最上層部から順次これを取りあげる場合に最上層部にある鉄板を磁力により浮遊状態にハク離浮揚する磁力浮揚器に関するものである。すなわち図において(1)は基台、(2)は基台の一側に定着された直立する非磁性案内板で、一端に磁石装置(6)の支承部(3)を、他端に押えバネ(4)を有している。(5)は上記基台(1)上に載置された積層薄鉄板、(6)は板状磁石(7)および板状磁極片(8)を交互に重複しこれを一体に結合した磁石装置で、隣接する磁石の同性極で磁極片をキョウ(挟)持するようにされ、かつ外側にある磁極片(8)の外側面にはヒンジ(9)(9)が定着されている。(10)は中央部(11)にネジ(12)が植え立てられ両端を上記ヒンジ(9)にピン(13)により回転自在に結合したコ字状の支持子で、ネジ(12)を支承部(3)に設けた締ミヅ(14)にカッ(嵌)合レショウナット(15)をラ(螺)合して支持子の中央部(11)を支承部(3)に上下移動自在に定着している。また磁石装置(6)が鉄板の積層面に対向するよう案内板(2)の後面の押えバネ(4)により圧着している。従ってショウネジ(15)をゆるめて磁石装置(6)を上下するのはもちろん、おさえバネ(4)との係合をはずしピン(13)(13)を中心として回転して磁石装置(6)を積層鉄板(5)の積層面より遠ざけることができる。

本考案の磁力浮揚器は上述したように磁石装置(6)を積層鉄板(5)の積層高さにより容易に上下移動し得るのはもちろん、

基台(1)上に鉄板を積層する際などに鉄板の積層面から磁石装置(6)を遠ざける必要がある時には、これを簡単に回転することができる。(実用新案登録第570135号)(倉屋記)

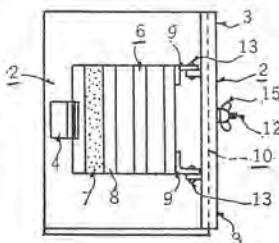
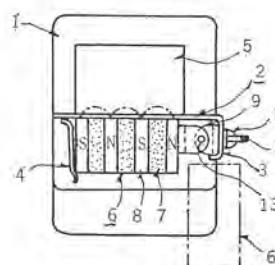


図1

図2

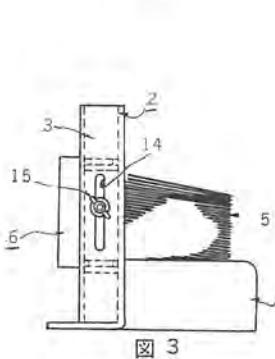


図3

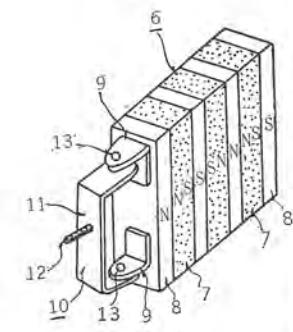


図4

==== 最近登録された実用新案 ====

名 称	登録日	登録番号	発明・考案者	関係場所
電気車の保護装置	38-12- 9	728335	北岡 隆	伊丹
ボタン形電池	38-12- 9	728338	佐藤五郎・植松滋幸 石井勇雄	中央研究所
レーダの給電装置	38-12- 9	728632	堀川博敏	鎌倉製作所 伊丹工場
TRAVATOR	38-12- 9	631499		名古屋・本社
トラベータ	38-12- 9	631500		"
MODULET	38-12- 9	631464		無線機・本社
変圧器の放熱装置	38-12- 9	586441	石川嘉孝	静岡
回転圧縮機	38-12- 9	728317	山口耕一郎	静岡
空気調和装置の箱体	38-12- 9	728319	池田日登志・加藤敏夫	静岡
照明器具のカバー ワク保持装置	38-12- 9	728327	船田淳三・石井重行	大船
コードロ出部固定装置	38-12- 9	728329	曾我武夫・中村進 井町隆一	中津川
刷子保持装置	38-12- 9	728331	武井久夫・加藤悟	群馬
冷蔵庫を荷造り用木ワクに固定する装置	38-12- 9	728332	藤田一枝	静岡
磁気 フィルタ	38-12- 9	728336	諫訪寧・加藤庸夫 柳下儀兵衛	大船
除鉄装置	38-12- 9	728337	諫訪寧・加藤庸夫 柳下儀兵衛	大船
ケイ光灯器具	38-12- 9	728340	船田淳三・鈴木実	大船
ケイ光灯器具のランプカバー支持装置	38-12- 9	728341	山崎肇	大船
"	38-12- 9	728342	"	"
"	38-12- 9	728343	船田淳三・山崎肇	"
電気掃除機の可トウホース	38-12- 9	728480	太刀川英昭	群馬
埋込形照明器具	38-12- 9	728787	高島秀二・山下源一郎	大船
電線接続装置	38-12- 9	728788	吉村宏・炭窪忠一	中津川
照明器具カバー	38-12- 9	728789	山下源一郎・西山貞	大船
円形放電管用ソケット	38-12- 9	728790	船田淳三・高田弘	"
水銀整流器の逆弧保護装置	38-12-12	586504	加藤又彦	伊丹
机型制御盤の蓄板開閉装置	38-12-27	729775	文珠義夫・久保博和	神戸
可変抵抗器	38-12-27	729776	近藤敬吉・森川洋	無線機
"	38-12-27	729777	"	"
"	38-12-27	729778	"	"
"	38-12-27	729779	"	"
可トウ導波管	38-12-27	729800	東野義夫・香川哲	"
移動体の脱落検出装置	38-12-27	729781	吉田太郎	古屋
導波管	38-12-27	729784	川上昭	無線機
開閉操作装置	38-12-27	729793	入江厚	福岡
誘導円筒形繼電器	38-12-27	729794	北浦孝一	神戸
ジラザグミシンの千鳥量手動調節装置	39- 1-17	730589	三津沢武夫	和歌山
赤外線ガス分析計の光学 クサビ	39- 1-17	730590	安東滋	中央研究所
内燃機関始動電動機の制御装置	39- 1-17	730593	平田毅	姫路
原子炉燃料取換装置	39- 1-17	730594	岸田公治・大野玲	伊丹
テレビジョン受像機のチューナ	39- 1-17	730595	杉田重雄・芝田正己	無線機
低圧点火装置の補助装置	39- 1-17	730596	高橋福重	姫路
自吸式エスコポン	39- 1-17	730597	井上誠治	福岡
多翼型通風機の羽根車	39- 1-17	730600	大旗康文・池上秋水	長崎
磁気增幅装置	39- 1-17	730609	浜岡文夫・山崎英藏 赤松昌彦	中央研究所
"	39- 1-17	730610	"	"
"	39- 1-17	730611	"	"
機関点火用継続装置	39- 1-17	730601	柏木義民	姫路
井戸ポンプの安全弁	39- 1-17	730602	井上誠治	福岡
可変インダクタンスコイル	39- 1-17	730603	藤田恒郎	無線機
試験端子用接続片	39- 1-17	730604	立石俊夫	神戸
端子装置	39- 1-17	730605	"	"
非凸極型誘導シリコン 繼電要素	39- 1-17	730606	三上一郎	"
検査受信装置	39- 1-20	586856	田原清一	無線機
積算電力計の位相調整装置	39- 1-20	586857	山県穆	福山

次号予定

三菱電機技報 Vol. 38 No. 7

はん用制御器具特集

- 新形電磁開閉器接触器
- 新形電磁繼電器
- 手動スイッチ
- 新形電磁起動器
- 半導体を応用した制御器具

- 20,000 c/s 高周波発電機
- 東京電力北東京変電所納め 345,000 kVA 変圧器
- 通信用衛星追尾装置
- 最近の送電線保護継電装置
- HCB-4 形表示線継電装置
- 30 MeV フィールドバイアス形ベータロン
- 線形電子加速器
- 半導体放射線検出器
- 光を使ったアルカリ金属原子の磁気共鳴
- 技術解説：負荷時タップ切換器の適用

三菱電機技報編集委員会

委員長	小倉 弘毅
副委員長	宗村 平
常任委員	明石 精
"	安藤 安二
"	大野 寛孝
"	河合 武彦
"	小堀 富次
"	篠崎 善助
"	高井 得一郎
"	中野 光雄
"	馬場 文夫
"	宮内 圭次
"	山田 栄一
委員	岩原 二郎
"	大森 淳夫
"	片岡 高示
"	樺本 俊弥
"	神崎 邦邁
"	堀 真幸
(以上 50 音順)	

昭和39年6月22日印刷 昭和39年6月25日発行
「禁無断転載」定価1部 金100円(送料別)

編集兼発行人

東京都千代田区丸の内2丁目12番地 小倉 弘毅

印刷所

東京都新宿区市谷加賀町1丁目 大日本印刷株式会社

印刷者

東京都新宿区市谷加賀町1丁目 高橋 武夫

発行所

三菱電機株式会社内 「三菱電機技報社」

東京都千代田区丸の内2丁目12番地(三菱電機ビル内)

(電) 東京 (212) 大代表 6111

発売元

東京都千代田区神田錦町3の1 株式会社オーム社書店

電話 (291) 0912 振替東京 20018

本社 営業所 研究所 製作所 工場 所在地

本社	東京都千代田区丸の内2丁目12番地 (三菱電機ビル内)
大阪営業所	大阪市北区堂島北町8の1 (電) 大阪 (312) 大代表 1231
名古屋営業所	名古屋市中村区広井町3の88・大名古屋ビル (電) 名古屋 (56) 大代表 5311
福岡営業所	福岡市天神町58・天神ビル (電) 福岡 (75) 大代表 6231
札幌営業所	札幌市北二条西4の1・北海道ビル (電) 札幌 (26) 大代表 9111
仙台営業所	仙台市大町4の175・新仙台ビル (電) 仙台 (22) 大代表 6101
富山営業所	富山市総曲輪490の3・明治生命館 (電) 富山 (3) 大代表 3151
広島営業所	広島市八丁堀63・昭和ビル (電) 広島 (21) 大代表 4411
高松営業所	高松市寿町1の4・第1生命ビル (電) 高松 (2) 大代表 1111
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2の12・三菱電機ビル (電) 東京 (212) 大代表 6111
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8の1・(電) 大阪 (312) 大代表 1231
名古屋商品営業所	名古屋市中村区広井町3の88・大名古屋ビル (電) 名古屋 (56) 大代表 5311
福岡商品営業所	福岡市天神町58・天神ビル (電) 福岡 (75) 大代表 6231
札幌商品営業所	札幌市北二条西4の1・北海道ビル (電) 札幌 (6) 大代表 9111
仙台商品営業所	仙台市大町4の175・新仙台ビル (電) 仙台 (22) 大代表 6101
富山商品営業所	富山市総曲輪490の3・明治生命館 (電) 富山 (3) 大代表 3151
広島商品営業所	広島市八丁堀63・昭和ビル (電) 広島 (21) 大代表 4411
高松商品営業所	高松市寿町1の4・第1生命ビル (電) 高松 (2) 大代表 5021
北九州出張所	北九州市小倉区京町10の281・五十鈴ビル (電) 小倉 (52) 代表 8234
静岡出張所	静岡市七間町9の10・池田ビル (電) 静岡 (53) 代表 9186
岡山出張所	岡山市上石井174・岡山会館 (電) 岡山 (4) 0331~2
長崎出張所	長崎市大黒町3番1号長崎交通産業ビル (電) 長崎 (2) 0293
金沢出張所	金沢市幸町13番28号 (電) 金沢 (31) 6213~4
長野出張所	松本市本町3の123 (電) 松本 (2) 1058
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地 (電) 大阪 (481) 大代表 8021
商品研究所	鎌倉市大船782番地 (電) 大船 (6) 代表 3131
神戸製作所	神戸市兵庫区和田崎町3丁目 (電) 兵庫 (67) 代表 5041
伊丹製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (電) 大阪 (481) 8021 伊丹局 代表 2481
長崎製作所	長崎市平戸小屋町122番地 (電) 長崎 (3) 代表 3101
名古屋製作所	名古屋市東区矢田町18丁目1番地 (電) 名古屋 (73) 代表 1531
福岡製作所	福岡市今宿青木690番地 (電) 福岡 (代表) 0431
福山製作所	福山市沖野上町6丁目709番地 (電) 福山 (2) 代表 2800
姫路製作所	姫路市千代田町840番地 (電) 姫路 (23) 大代表 1251
相模製作所	相模原市小山字久保224の224 (電) 相模原 (0427) 1-(7) 代表 3231~3241
静岡製作所	静岡市小鹿110番地 (電) 静岡 (85) 大代表 1111
中津川製作所	中津川市駒場928番地2 (電) 中津川 2121~8
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地 (電) 和歌山 (3) 代表 1275
大船製作所	鎌倉市大船800番地 (電) 鎌倉 (6) 代表 2121
郡山製作所	郡山市字境橋町1番地 (電) 郡山 (2) 1220~1223
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地 (電) 尾島 270番 太田代表 4311番
無線機製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (電) 大阪 (481) 大代表 8021
京都製作所	京都府乙訓郡長岡町大字馬場小字岡所1 (電) 京都 (92) 代表 1141
北伊丹製作所	伊丹市大庭字主ヶ池1番地 (電) 伊丹 大代表 5131
鎌倉製作所	鎌倉市上町屋325番地 (電) 鎌倉 (6) 大代表 6171
鎌倉製作所	尼崎市南清水字中野80番地 (電) 大阪 (481) 8021
伊丹工場	名古屋市東区矢田町18丁目1番地 (電) 名古屋 (73) 代表 1531

第6回 大阪国際見本市開かる！

第6回大阪国際見本市は、4月9日～29日まで21日間にわたりて大阪港会場などで34カ国が参加して開催された。

今回の見本市は、各国ともデラックスな実演をおりこむなど、開放経済下にふさわしい大規模な商品オリンピックがはなやかに展開された。

当社も、三菱グループの一環として、各種新製品、新技術を展示し技術の幅広さ、水準の高さを示した。



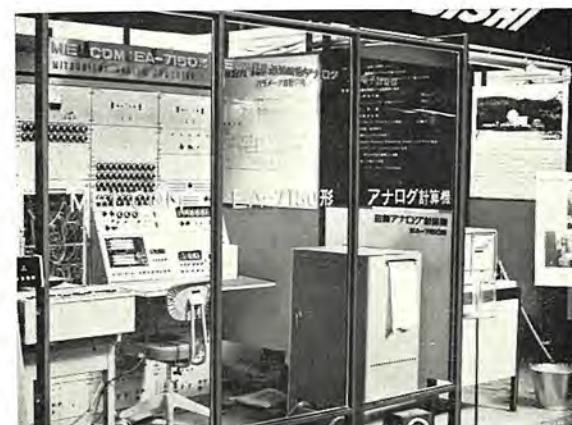
見本市会場



新方式による画期的な三菱カラーテレビ“カラット6”



人体の放射能を測定するヒューマンカウンタ



電子計算機

第5回 日本産業巡航見本市開かる！

現代日本産業をじかに海外の人に見てもらう日本産業巡航見本市は、今年で第5回をむかえ、昨年から専用船“さくら丸”(12,628t)もでき、ますます海外で人気を博している。

今回も5月2日東京湾を出航して約4ヶ月、イタリア・イギリス・フランスなど西ヨーロッパ諸国11カ国を訪れる予定である。

当社も、テレビ・ラジオ・ステレオ・半導体製品など、電子関係製品を中心に数多くの製品を展示している。



専用見本市船“さくら丸”



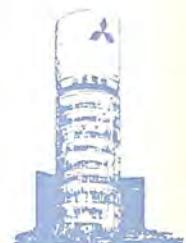
インフォメーション



音響製品コーナー



家庭電気品コーナー



社会と企業を結ぶPR施設
三菱電機スカイリンク