

新形 HC モーター (HC-B) とその応用

New Type HC Motor (HC-B) and Its Applications

小林 日出明* 藤田 捷* 近藤 佐兎司*
 Hideaki Kobayashi Masaru Fujita Satoshi Kondō

要 旨

従来、日立製作所ではかご形誘導電動機と渦(うず)電流継手を組み合わせた交流無段変速モートル (Hitachi Induction Coupling 以下 HC モートルという) を生産してきた。今回この HC モートルに小形軽量, 特性向上を行なった新形 HC モートル(以下 HC-B 形という)を開発したので, トルク特性の解析, 磁気漏えいについて述べる。また HC モートルと交流発電機を組み合わせた可変周波数電源(以下 HCG という)について説明する。

1. 緒 言

最近の産業機械のめざましい発展に伴い, 各種機械の駆動源として無段変速モートルの使用が著しく増加してきた。なかでも構造が堅牢(けんろう)で, 操作が簡単で特性が良く, 安価な HC モートルの使用が増大している。

そこで日立製作所では従来より生産してきた HC モートルに対して, 小形軽量, 高性能にした新形 HC モートルを開発した。ここではその伝達トルクを渦電流損失より解析し, ドラムの有効長および固有抵抗の増加に対する補正を加え, また HC モートルのような機器では特に問題となる磁気漏えいの解析を等価磁気回路によって行なった結果を報告し, さらに HC モートルの特性・用途および制御装置について述べる。

また HC モートルの新しい用途である可変周波数電源(HCG)の構成要素としての交流発電機の種類および制御装置についても紹介する。

2. HC モートルの構造

HC モートルの構造は図1に示すようにかご形三相誘導電動機の軸にオーバーハングされたドラムがあり, このドラムと空隙(くうげき)を介して磁極がありドラムの表面に交番磁束を作っている。この交番磁束によってドラム内に渦電流を発生させトルクの伝達を行なうしくみである。

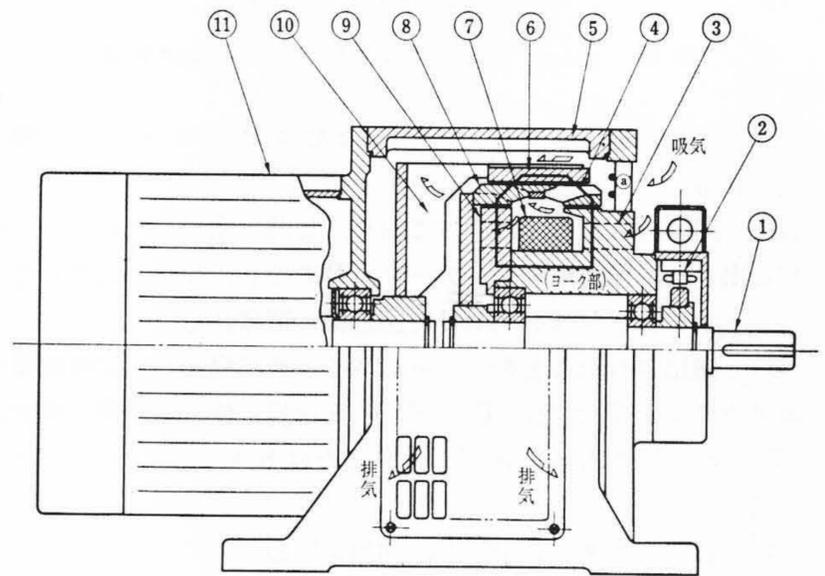
ドラムと磁極と磁気回路をなすヨーク, ブラケットがあり, このヨーク, ブラケット間に固定された励磁コイルがある。また出力軸は磁極に直結されており, この出力軸には速度検出用発電機(以下 PG という)がある。

PG には三相, 48 極の発電機を使用し, 低速運転時も安定な速度制御ができるようになっている。

図2は HC モートル (HC-B) の外観を示したものである。

3. 磁気漏えい

HC モートルにおいては漏えい磁束の検討が必要となってくる。まず構造的に磁気漏えいの影響の大きいところは磁極相互間とドラムとハウジング間となる。磁極相互間は伝達トルクの大きさに著しく影響するので, 伝達トルク式と同時に考えてあわせて磁極相互間の磁気漏えいの検討を行なう。ドラム, ハウジング間についてはハウジングの径を大きくしドラムとの空間を大きくすれば漏えい磁束は小さくできるが, それでは小形軽量にはならない。そこでドラムとハウジングとの磁位差を小さくすれば漏えい磁束は減少することになるので, ドラム, モートル, ハウジング, エンドブラケットの磁気回路(図3)を考え漏えい磁束 ϕ_0 を検討すると



- | | |
|------------|-----------|
| ① 出力軸 | ⑦ 励磁コイル |
| ② 速度検出用発電機 | ⑧ 磁極 |
| ③ エンドブラケット | ⑨ ヨーク |
| ④ 磁気回路 | ⑩ 冷却ファン |
| ⑤ ハウジング | ⑪ 駆動用モートル |
| ⑥ ドラム | |

図1 HC モートル構造図

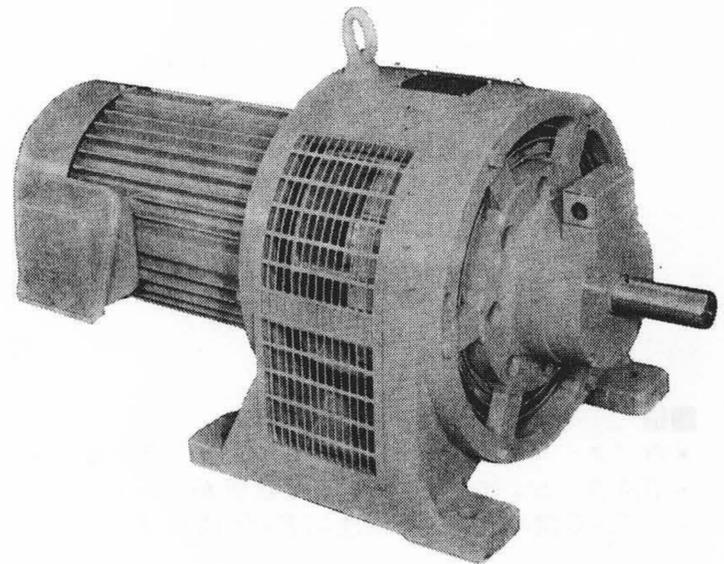
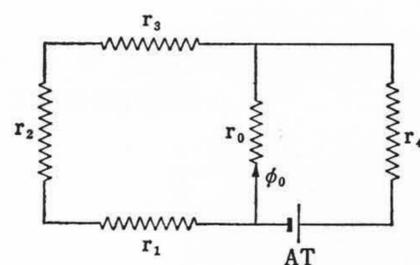


図2 HC モートル (HC-B)



- | |
|------------------------------|
| r_1 : ドラムの磁気抵抗 |
| r_2 : モートル磁気抵抗 |
| r_3 : ハウジング磁気抵抗 |
| r_4 : ブラケット磁気抵抗 |
| r_0 : ドラム, ハウジング間の漏えい磁気抵抗 |
| ϕ_0 : ドラム, ハウジング間の漏えい磁束 |

図3 ドラム, ハウジング間磁気等価回路

* 日立製作所習志野工場

$$\phi_0 = \frac{AT}{r_4 + \frac{(r_1+r_2+r_3) \times r_0}{r_1+r_2+r_3+r_0}} \times \frac{r_1+r_2+r_3}{r_1+r_2+r_3+r_0}$$

$$= \frac{AT}{r_4 \left(1 + \frac{r_0}{r_1+r_2+r_3}\right) + r_0} \dots\dots\dots(1)$$

となる。

ところで ϕ_0 を小さくするためには r_4, r_0 を大きくし r_1, r_2, r_3 を小さくすればよい。ところが r_0 は小形化の面であり大きくできないので r_4 を大きくすればよいことになる。そこでエンドブラケットの (a) 部 (図 1) を非磁性体とすることにより、ドラム、ハウジング間の磁気漏えいを減小させる構造とした。

磁極相互間の漏えいについては図 4 の等価磁気回路と (2) 式により解析した。主磁束に対する漏えい磁束は 10~20% の値となっている。

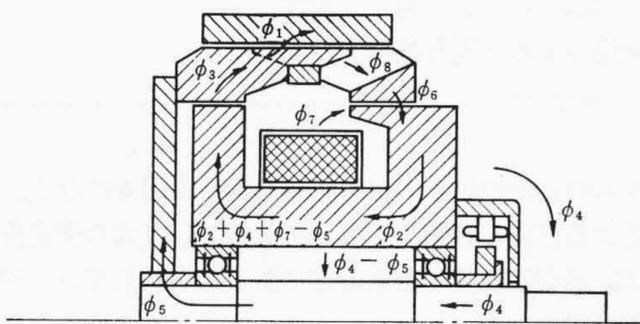


図 4 HC-B 等価磁気回路

$R_d + 2R_{g1} + R_{gi1}$	0	$-R_{gi1}$	0	0	0	0	R_{gi1}	×	ϕ_1	0
$-R_{gi1}$	0	$R_{gi1} + 2R_i + R_{gi2}$	0	0	$-R_{gi2}$	0	$R_{gi2} - R_{gi1}$		ϕ_2	0
0	0	$R_i + R_{gi2}$	0	0	$-R_{gi2}$	0	$R_{gi3} + R_{gi2}$		ϕ_3	0
0	$-R_{gee}$	$-R_{gi2}$	$-R_{gee}$	$-RR$	$\frac{R_{gi2} + R_{gei2}}{R_{gee} + RR}$	R_{gee}	$-R_{gi2}$		ϕ_4	0
0	$R_{c1} + R_{e1}$	0	$R_{gcs} + R_{c1} + R_{e1}$	$\frac{-R_{gcs} - R_{c1} - R_{e1}}{-R_{bs} - R_{s1} - RR}$	RR	$-R_{c1} - R_{e1}$	0		ϕ_5	0
0	$R_{e1} + R_{c1} + R_{gee}$	0	$R_{gee} + R_{c1} + R_{e1}$	$-R_{e1} - R_{c1}$	$-R_{gee}$	$\frac{-R_{e1} - R_{gee}}{-R_{c1} - R_{ec}}$	0		ϕ_6	0
0	$R_{E2} + R_{C2}$	0	$-R_{gcs} - R_{ges} - R_{s2}$	R_{gcs}	0	0	0		ϕ_7	0
0	$R_{E2} + R_{C2}$	0	0	0	0	R_{gec}	0		ϕ_8	AT

$$\dots\dots\dots(2)$$

ここに R_d : ドラムのレクタンス
 R_{g1}, R_{g2} : ドラム, 磁極間のレクタンス
 $R_{gi1}, R_{gi2}, R_{gi3}$: 磁極相互間のレクタンス
 R_{i1}, R_{i2} : 磁極のレクタンス
 $R_{geb}, R_{gei1}, R_{gei2}$: 磁極とヨーク間のレクタンス
 R_{gec}, R_{gee} : ヨーク間の漏えいレクタンス

$RR = \frac{R_{geb} \cdot R_{gei1}}{R_{geb} + R_{gei1}}$
 $R_{e1}, R_{e2}, R_{c1}, R_{c2}$: ヨークのレクタンス
 R_{ges}, R_{gcs} : 出力軸とヨークの漏えいレクタンス
 R_{s1}, R_{s2} : 出力軸のレクタンス
 R_{bs} : 磁極ホスのレクタンス

4. 伝達トルク

HC モーターはドラムに渦電流を流し、磁束と渦電流の電磁力によりドラムから磁極にトルク伝達を行なう機構である。この伝達トルクと渦電流損失との間には (3) 式の関係がある。

$$T = \frac{W_e}{9.8 \omega} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 T : 伝達トルク (kg・m)

$$\omega = \frac{2\pi N_0}{60} \text{ (rad/s)}$$

W_e : 渦電流損失 (W)

N_0 : すべり回転数 (rpm)

π : 円周率

すなわち、ドラム内部に発生する渦電流損失を算出すれば HC モーターの伝達トルクの算出ができる。この渦電流損失は鉄板の渦電流損失の計算式より求められる。鉄板における渦電流損失は

$$W_e = k_1 \frac{\pi^2 \cdot b^2}{6 \cdot \rho} \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot V \times 10^{-16} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 b : ドラムの一極の幅 (cm)

ρ : ドラムの固有抵抗 (Ω -cm)

B_m : ドラムの最大磁束密度 (G)

f : 交番磁束の周波数

V : 渦電流の発生する部分の体積 (cm^3)

k_1 : 補正係数 (1.1~1.5)

$$f = N_0 P / 60 \dots\dots\dots(5)$$

$$V = \pi \cdot D \cdot L \cdot x \dots\dots\dots(6)$$

$$b = \pi \cdot D / 2 \cdot P \dots\dots\dots(7)$$

P : 磁極の極対数

D : ドラムの内径 (cm)

L : ドラムの長さ (cm)

x : ドラムに流れる渦電流の深さ (cm)

となる。(3)式に(4), (5), (6), (7)式を代入整理すると、

$$T = k_1 \frac{D^3 \cdot N_0^2 \cdot B_m^2 \cdot L \cdot x}{290 \cdot \rho} \times 10^{-16} \dots\dots\dots(8)$$

になる。次にドラムに流れる渦電流の深さ x は一般的に

$$x = 2.06 \sqrt{\frac{\rho H_m}{2\pi \cdot f B_m \times 10^8}} \text{ (cm)} \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 H_m : ドラムの磁化力 (AT/cm)

となり(7)式を(6)式に入れ整理すると

$$T = K \frac{N_0^{1/2} \cdot B_m^{2/3} \cdot D^3 \cdot L \cdot H_m^{1/2}}{P^{1/2} \cdot \rho^{1/2}} \dots\dots\dots(10)$$

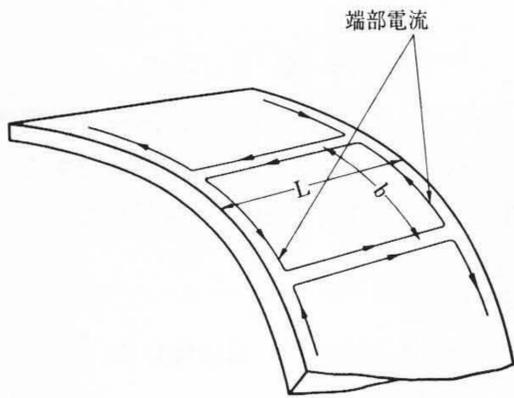


図5 ドラムに流れる渦電流の経路

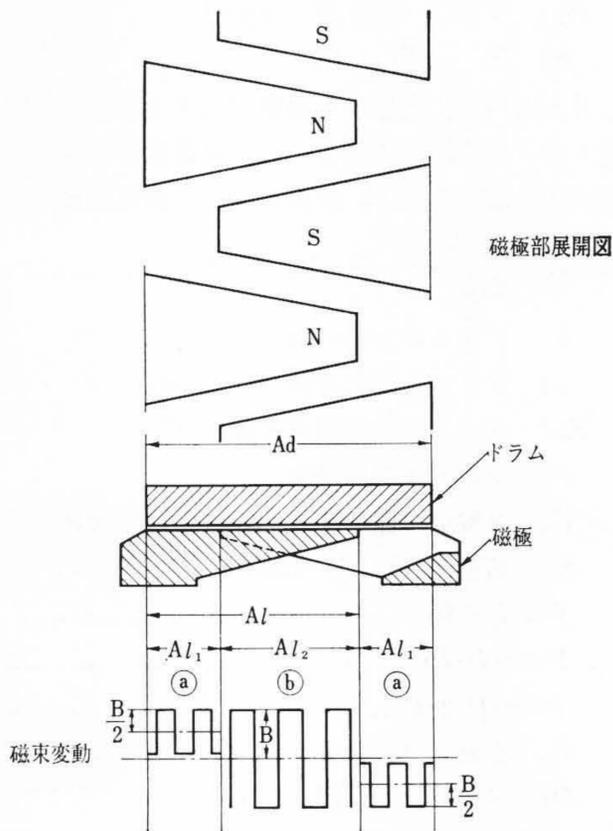


図6 磁極の交さ度合と磁束の脈動

ここに、 K : k_1 および定数をまとめた定数

(8)式において固有抵抗 ρ については渦電流が流れることによりみかけの固有抵抗は増加するため次の3項目の補正が必要となる。

- (1) ドラムの温度に対するもの
- (2) ドラムの曲率に対するもの
- (3) ドラムの両端面に対するもの

まずドラムの温度に対するものはHCモータのドラムに使用した鉄板の固有抵抗温度特性を調べ(11)式の結果を得た。

$$P_{\theta} = 9.22 \times 10^{-11} \theta^2 + 4.66 \times 10^{-8} \theta + 10.8 \times 10^{-6} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 ρ_{θ} : $\theta^{\circ}\text{C}$ のときの固有抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)

θ : ドラム温度 ($^{\circ}\text{C}$) ($\theta < 600^{\circ}\text{C}$)

次にドラムの曲率に対するものはその増加係数 β_1 は Keasa-vamuthy (AIEE 1959.12) により

$$\beta_1 = \frac{D^2}{\left(D - \frac{2}{3}x\right)^2} \doteq 1 \quad (\because D \gg x) \dots\dots\dots (12)$$

となる。

またドラムの両端面のエンド効果は図5のように渦電流が流れると仮定すると、電流経路よりドラムの長さ L に対して極弧長 b だけ増加したことになる。これに周波数による抵抗の増加を考え合わせると(13)式となる。

$$\beta_2 = \left(1 + \frac{b}{L}\right) \left(1 + \frac{\beta_3 f \cdot L}{b}\right) \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 β_2 : エンド効果による増加係数

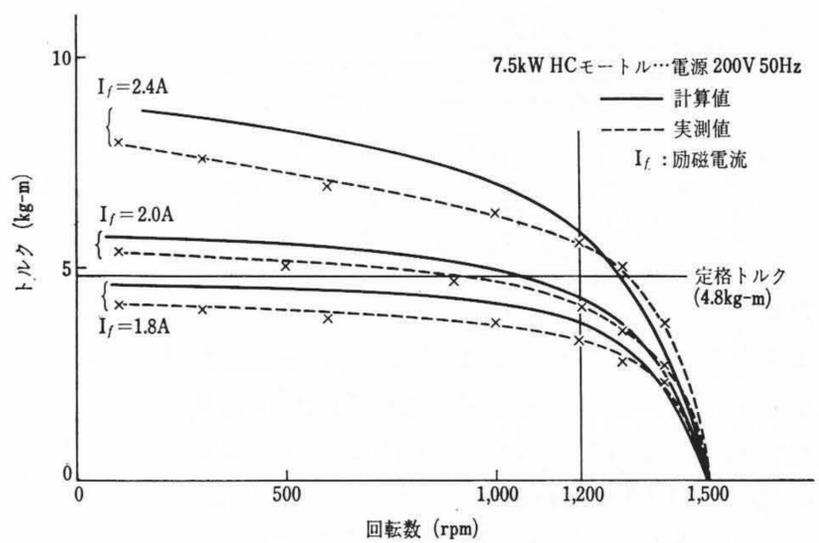


図7 トルク回転数特性

β_3 : 周波数に関する係数

これらを総合すると固有抵抗 ρ は

$$\rho = \rho_{\theta} \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \quad (\Omega\text{-cm}) \dots\dots\dots (14)$$

となる。

次にドラムの表面の磁束の交番状態をみると図6になる。つまり磁束の交番する部分と脈動する部分がある。(4)式の渦電流損失式における B_m が交番状態の磁束密度であるから脈動部分は磁束の振幅の幅が交番磁束の $\frac{1}{2}$ であることより、交番磁束密度は $\frac{1}{2}$ になったと考えられる。そこで実際のドラムの長さ L に対して磁束がすべてのドラム長さにおいて交番磁束であると仮定した実効ドラム長 L_e は

$$T \propto \beta^{2/3} L$$

より換算できる。

$$T \propto \beta^{2/3} L_e = 2(AL) \left(\frac{B_n}{2}\right)^{3/2} + (2AL - L) \beta^{3/2} \\ = (1.292 AL - 0.292 L) B_m^{3/2}$$

$$L_e = 1.292 AL - 0.292 L \dots\dots\dots (15)$$

このように伝達トルク式(10式)を固有抵抗、ドラムの実効長によって補正することでHCモータの伝達トルク式としてじゅうぶん実用的なものとなった。この伝達トルクの計算値を実測値と比較したものが図7である。

また、HCモータの設計に対してはドラムの温度によるドラムの熱膨張、磁気漏えいを考察し図8のフローチャートにより電算機で計算する。

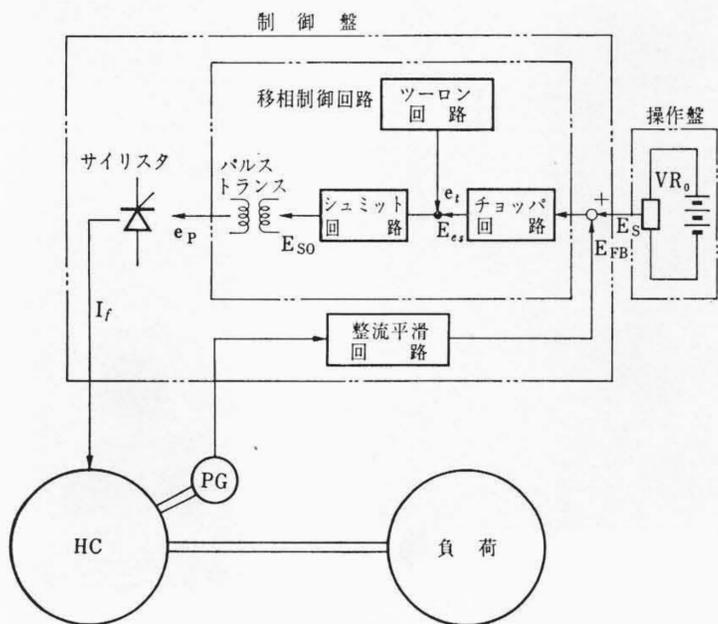
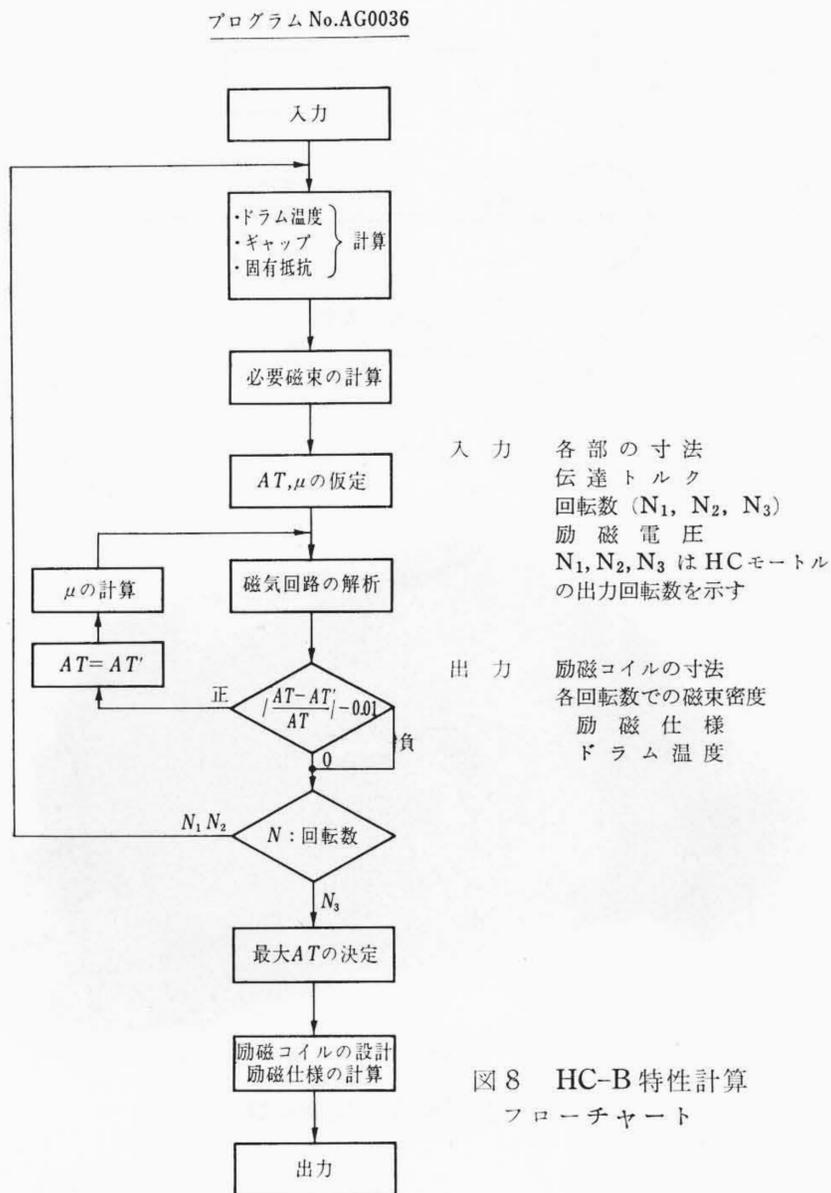
5. HCモータ制御装置

制御系全体の構成は図9に示すとおりである。操作盤に取り付けた速度設定用可変抵抗器によって設定された E_S と PG によってHCの回転数を検出し、整流、平滑した電圧 E_{FB} を制御盤内で比較し、その差を増幅してHCを励磁する。したがってHC励磁電流は負荷の増減に伴って増減されるので回転数が一定になる。

ここで増幅器としてはサイリスタを用い、その点弧する位相を制御することによりHCの励磁電流を調整する。なお移相制御回路はチョップ回路、ツーロン回路、シュミット回路より構成されている。

チョップ回路は E_S と E_{FB} の差 $E_S - E_{FB}$ を交流電源に同期しチョップする(サイリスタは交流半波制御回路を構成しているので負の半サイクルは $E_S - E_{FB}$ が次の回路に加わらないようにする)。チョップ回路の入力、出力は図10の $E_S - E_{FB}$ および E_{es} となる。

ツーロン回路によって交流電源波形より90度位相の遅れた波形を発生させこの電圧とチョップ回路の出力電圧 E_{es} を加え、シュミット回路の入力とする。この入力電圧 $e_i + E_{es}$ によってシュミット



ト回路内の2個のトランジスタが交互に、ON、OFFし、図10中の E_{S0} の出力電圧となる。この出力のON、OFFの位相のずれは入力電圧 $e_t + E_{es}$ によって異なる。シュミット回路の出力をパルス変圧器の入力とし図10のゲートパルス波形を得てサイリスタに入れてサイリスタの点弧位相を制御する方式となっている。

以上の回路によりHCの負荷が増加してHCの速度が低下すると信号 ($E_S - E_{FB}$) が増大してゲートパルスの位相が進み、HCの励磁電流が増大し、その結果HCのトルクが増大してHCの速度低下が押えられる。またHCの速度が速くなるとHCの励磁電流が切れ、速度の低下を待って今度は前より小さな励磁電流を流し速度が一定になるよう自動制御する。速度が設定より高くなったときには

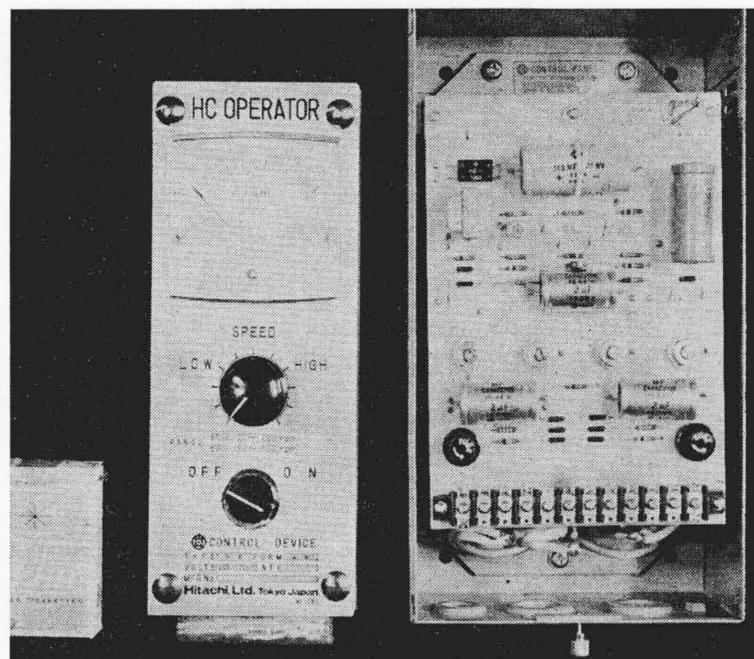
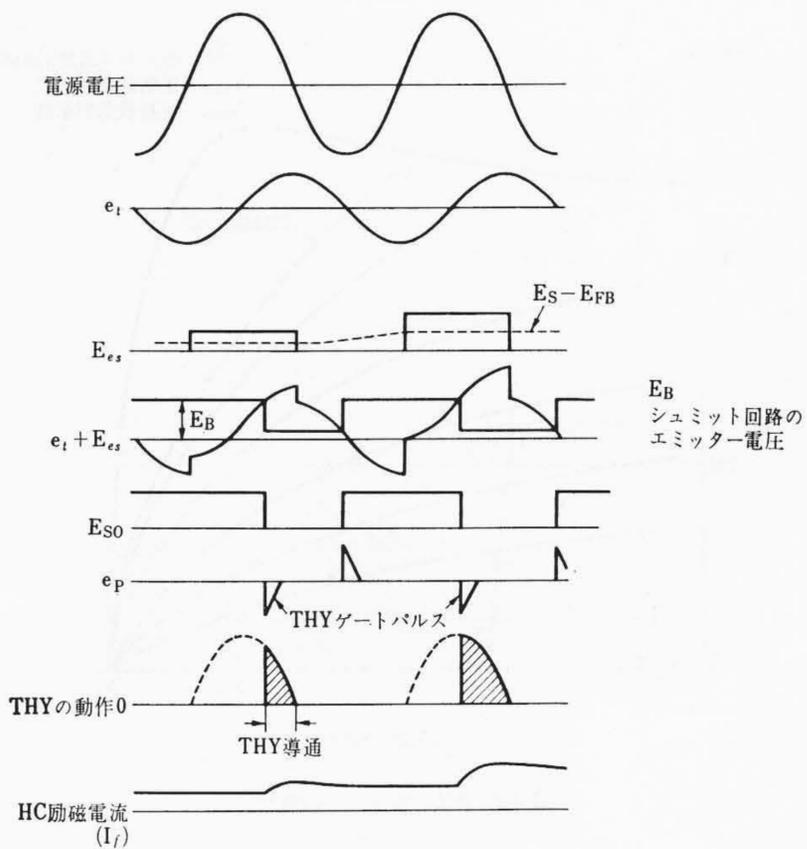


図10の $E_S - E_{FB}$ が負となり、 E_{es} は0となり、 E_B の電圧は e_t より大きく設定されているので、シュミット回路の出力は一定の電圧となり、ゲートパルスの発生がなくサイリスタは点弧しなくなる制御回路となっている。図10は各部の入力、出力波形を、図11は操作盤と制御盤を示したものである。

6. 特性および用途

HCモートルのトルク特性は図12のようになる。HCの励磁電流を大きくすると伝達トルクは大きくなり、またHCの出力軸回転数が小さくなる。すなわちすべり回転数が大きくなると伝達トルクは大きくなる単調増加の特性になっている。

HCモートルの最大トルクは、HCがトルク伝達機構であることより、モートルの最大トルク (T_{max}) まで出せる。

HCモートルはPGからの速度電圧によって、任意の回転数で負荷が変動しても、回転数を一定にする自動制御(制御特性)ができる。

この速度制御の程度を表わす量に速度変動率があり(16)式で定義される。

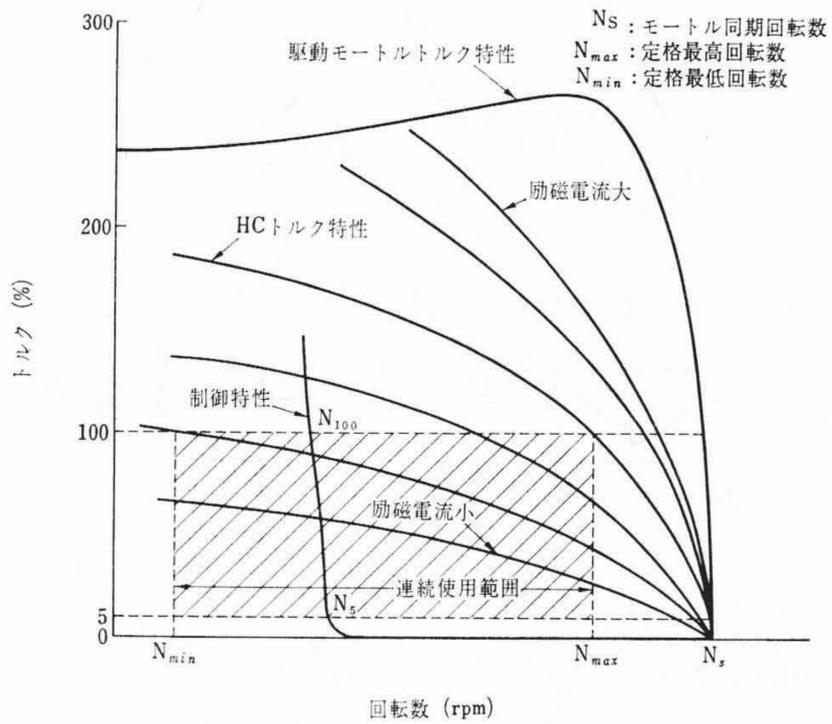


図12 HCモートル特性

表1 HCモートル用途例

業種	用途
流体機械	ポンプ・ファン・ブロワ
化学工業	混合機・かくはん機・焼結機・プラスチック成形機
電線工業	より線機・巻取機・伸線機
製紙工業	抄紙機・巻取機・ダンボール製造機
金属工業	圧延補機・巻取機
繊維工業	精紡機・巻取機・のり付機・ねん糸機・捺染機
食品工業	コンベヤ・フィーダ・製袋機
印刷機械	印刷速度の調整・巻取機
荷役機械	走行装置・コンベヤ・フィーダ
その他	試験機・可変周波数電源 (HCG)

$$\gamma = \frac{N_{100} - N_5}{N_{max}} \times 100 \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 γ : 速度変動率 (%)
 N_{100} : 100%トルク時の回転数 (rpm)
 N_5 : 5%トルク時の回転数 (rpm)
 N_{max} : 定格最高回転数

この速度変動率 γ は1~2%になる。このような基本的特性があり、しかも制御装置は小さな励磁電流(1~5A)を制御すればよいので応用面も広く、表1のような用途がある。

7. HCモートル駆動可変周波発電機(HCG)

かご形インダクションモートル(IM)やシンクロナスモートル(SyM)は一般に商用電源で運転され、一定の回転数が得られるが、各種産業機械および設備など、その大部分は機械的な変速機構と組み合わせて使用される。したがってこれらのIMやSyMをそのまま速度制御できれば非常に便利で、その制御方式は種々あるが、効率よく行なうには可変周波電源による周波数制御がすぐれている。

可変周波電源は

- (1) 同期発電機や誘導周波変換機などの回転機
- (2) サイリスタインバータなどの静止器

に大別できるが、今回開発したHCGは(1)に属し、駆動源として上述のHCモートルを使用し、ブラシレス可変周波発電機と組み合わせたものである。

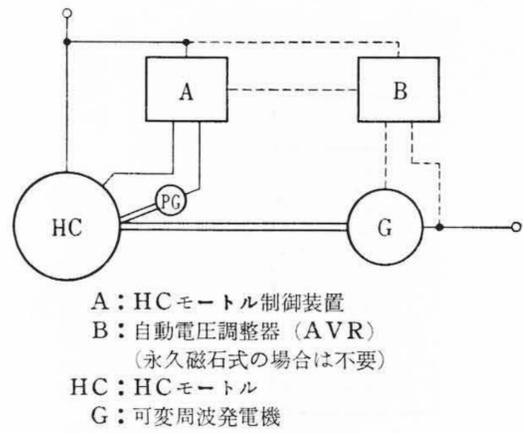
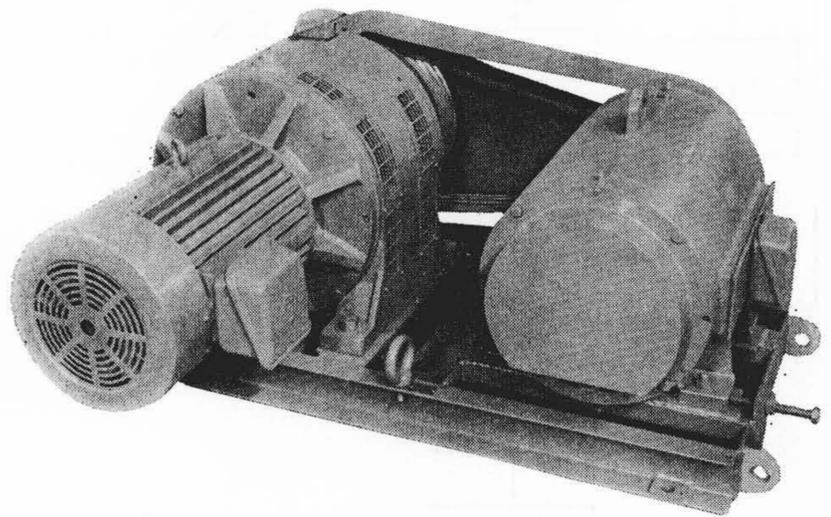
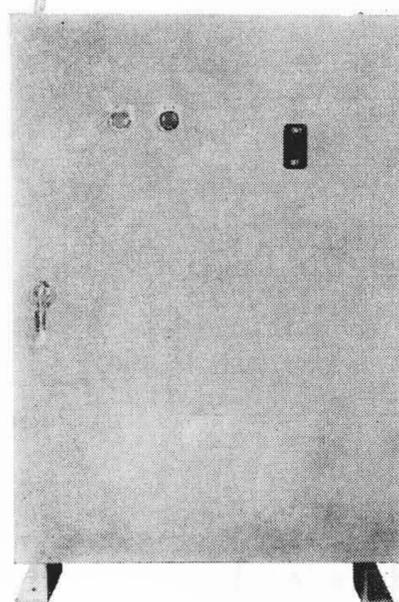


図13 HCGの構成



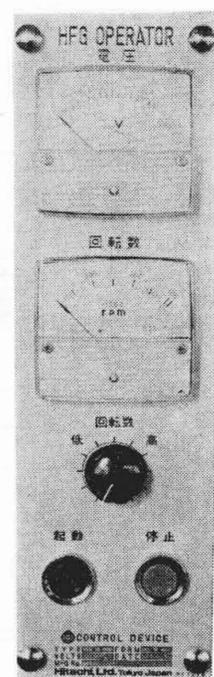
(HCG 本体)

図14(a) HCGと制御装置



(制御盤)

図14(b) HCGと制御装置



(操作盤)

図14(c) HCGと制御装置

7.1 HCGの構成

HCGの構成は図13に示すとおりで、図14がその外観である。

7.2 HCGの構成要素

HCGの構成要素はHCモートル、可変周波発電機およびこれらの制御装置の3部分から成っている。

- (1) HCモートル(上述)
- (2) 可変周波発電機

可変周波発電機としては広い回転数範囲で出力が安定し、しかも保守の容易なものが望ましい。HCGに用いる可変周波発電機として次の4種のを標準として採用し、いずれもブラシレス方式で保守の容易なものとしている。

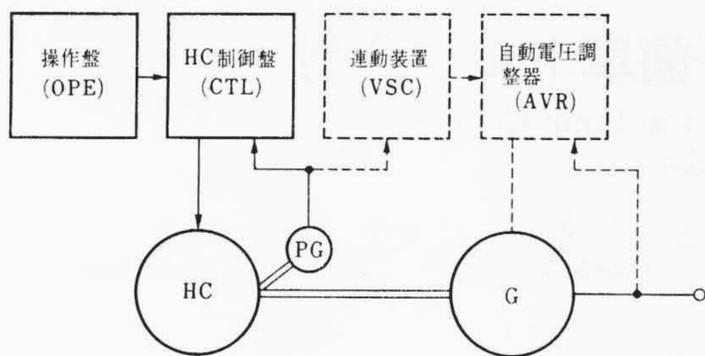


図 15 HCG 制御系ブロック線図

(a) 永久磁石回転子式同期発電機

凸(とつ)極界磁に永久磁石を用いたもので、構造が簡単で発生周波数と電圧がほぼ比例して得られ、10:1 程度の広範囲な可変周波数が得られる。構造上 4 極を標準とし 150 Hz 以下の小形発電機に使用されている。

(b) 円筒界磁形同期発電機

この発電機も界磁の構造上 4 極ないし 6 極を標準とし、周波数範囲 5:1 程度で 120 Hz 以下のものに使用されている。また界磁はスリップリングやブラシをなくすため同軸上に回転励磁機を設けている。回転励磁機は回転電機子形交流発電機で、その交流出力をやはり同軸上に設けた回転整流器により整流して界磁コイルに供給している。

(c) 交さ磁極形発電機

Lundel 形発電機で、固定励磁コイル構造を採用しブラシレス方式としている。磁極部の構造は HC モートルのそれと類似のものである。500 Hz 以下の高周波発電機として使用されている。

(d) 誘導子形高周波発電機

構造上固定励磁コイル方式が簡単である。機械的にかんじょうで多極に向いているので 300~10,000 Hz 程度の高周波発電機として使用されている。

(3) 制 御 装 置

制御系のブロック線図は図 15 に示すとおりである。制御回路の構成部品はいずれもサイリスタ、トランジスタなどの半導体を用いた信頼性の高いものである。

図 15 の OPE の回転数設定抵抗により HC モートルの速度を設定すると、HC モートルは設定回転数で運転される。HC モートル回転数検出用の PG の出力は、CTL と同時に VSC を通して AVR の電圧設定に使用されている。これによって HFG は任意の回転数(すなわち周波数)に応じて自動電圧調整を行なうこと

ができる。

また AVR は HC モートルの CTL で PG の電圧により回転数を検出し、HC 部の励磁電流を制御しているが、これを HFG の出力電圧検出に置き換えるだけで原理的には変わらないから、同一の回路構成のものを使用している。

(a) の磁石発電機の場合は励磁不要であるから、VSC および AVR は不要で、出力の電圧と周波数はほぼ比例し、負荷のモートルは定トルク特性となる。

(b~d) の発電機は励磁調整により電圧制御が可能であるから、VSC により所要の電圧と周波数の関係になるよう自動調整できる。すなわち負荷のモートルが定トルク特性ならば電圧と周波数を比例して変化させ、定出力が必要ならば出力電圧を周波数比の平方根にほぼ比例させて効率のよい定出力特性を持たせることができる。

7.3 特 長

- (1) スリップリング、ブラシがなく保守が容易。
- (2) 一定回転数の機械をそのまま変速可能にする。
- (3) 変速モートルとして DCM より小形で取り扱いの容易な IM や SyM が使用できる。
- (4) 2 台以上のモートルを同一電源で運転でき、かつ同一回転数または比例回転が得られる。
- (5) ふん囲気の悪い所で使用する場合、電源のみ別置にして防爆形や防食形モートルを使用できる。
- (6) リモートコントロールが簡単にできる。

8. 結 言

HC モートルの構造について説明し、磁気漏えいの検討を加え、磁極相互間の漏えいが 10~20% ぐらいになることを等価磁気回路より解析した。また伝達トルクを渦電流損失より求め、磁極形状による補正および固有抵抗の増加を考慮し 10~20% の相違でじゅうぶん合致する式とした。また HC モートルの新しい用途である HCG の紹介をした。

本論文が各種機械の設計、計画にお役にたてば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 電気学会： 直流機
- (2) N. Kesavamurthy, P. K. Rajagopalan: The Polyphase Induction Machine with Solid Iron Rotor. 1959, 12, AIEE
- (3) Paul D. Agarwal: Eddy-current losses in Solid and Laminated Iron 1959, 12, AIEE
- (4) 日本鉄鋼協会： 鉄鋼便覧： 丸善株式会社

日立評論 Vol. 53 No. 2「中部電力株式会社 高根第一発電所納 斜流ポンプ水車および発電電動機の運転特性」の中で、74 頁 図 13 発電電動機断面図の配置を誤りましたので、おわび申し上げます。

正しくは図の左側が上端になるようにご訂正をお願いいたします。