

インダクションブレーキとその応用

Induction Brake and Its Application

渡 辺 英 雄* 藤 田 茂 惟*
Hideo Watanabe Shigenobu Fujita

内 容 梗 概

クレーン、巻上機などにおいて安定な低速運転を行なうため、CF制御、HM制御⁽¹⁾などが発表されているが、これについて純電氣的な渦電流を利用したブレーキによる速度制御装置が開発された。

日立製作所では、早くからインダクションブレーキ(以下IBという)と名づけて世に送っているが、今回大幅な小形化を図り、モートルにオーバーハングしたIB一体形モートルを開発し、シリーズ化したので、その構造、性能などについて述べるとともに、その応用例につき説明したものである。

1. 緒 言

クレーン、巻上機のような巻上装置においては、必ず巻上げ(正負荷)および巻下げ(負負荷)の正負両負荷に対し安定な低速運転が要求される。

従来よりこの種の装置はCF制御、HM制御をモートルの二次抵抗制御と併用して低速運転を行なっているが、近年渦電流を利用した純電氣的なIBを開発し、前記制御とともに広範囲な安定低速度制御装置として使用に供してきた。

しかしいずれもモートルとブレーキ部が独立しているため、据付面積が大きく機械が大形化するところから今回据付面積を大幅に縮小し、かつモートルの高速化を図って高速巻線形誘導電動機にIBをオーバーハングしたIB一体形モートルを開発、シリーズ化した。

IBは磁極を形成するコイルに流す励磁電流の大きさを変えることにより安定かつ広範囲に速度設定を行ないうるなどのすぐれた特長を有するのでその応用範囲は広い。

以下IB一体形モートルとその制御ならびに応用例について述べる。

2. IBの構造および動作原理

IBは渦電流を利用したブレーキであって、第1図に示すように自由に回転できる渦流円筒^⑥と固定された磁極^⑦および励磁コイル^⑤からできている。

磁極は第2図に示すような構造で励磁コイルに直流を流すと交互にN・Sに磁化され、また渦流円筒に第3図の点線で示す磁束を発生する。渦流円筒を矢印の方向に回転させると、その内部に実線で示すような電流(渦電流)が発生し、その電流と磁束の間に電磁力が発生する。この電磁力の方向は第3図に示すように回転方向と逆方向に発生するため制動力として働く。

そして制御トルクは制動力と渦流円筒の半径の積となり(1)式で示される。

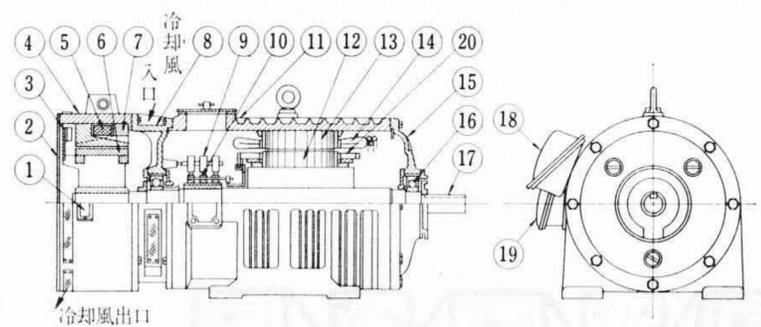
$$\text{制動トルク } T = \frac{W}{9.8 \omega} \quad (\text{kg-m}) \dots\dots\dots (1)$$

ω : 角 速 度 (rad/s)

W: 渦 電 流 損 失 (Watt)

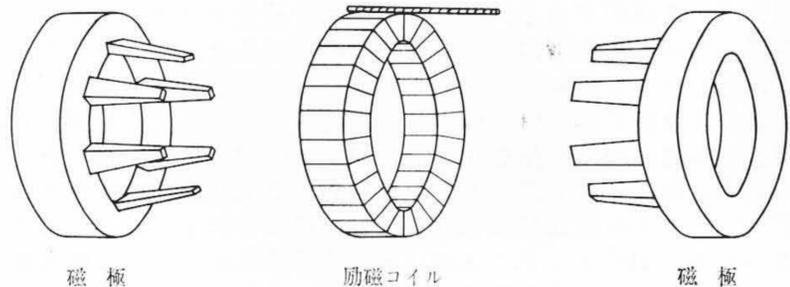
すなわち制動トルクの大きさは渦電流損失の大きさと、IBの回転数により決まることを示している。したがって運転中渦流円筒のなかには回転数と制動トルクの積に比例する多量の熱を発生するので、この熱による温度上昇を防止するよう渦流円筒ボスに冷却用ひだを持ち、さらに通風用のファンを設けている。なお慣性モーメントを小さくするため電磁的に不要な部分をできるだけ除いた簡単な

* 日立製作所習志野工場

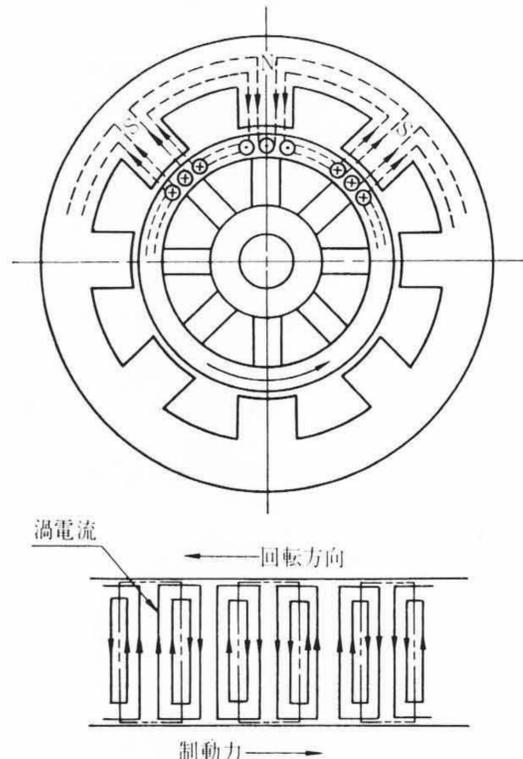


- | | |
|------------------|------------------|
| ① ターミナルボックス(IB) | ⑪ ハウジング |
| ② 当 板 | ⑫ ロータコア |
| ③ 冷却ファン | ⑬ ステータコア |
| ④ ヨーク | ⑭ ステータコイル |
| ⑤ 励磁コイル | ⑮ エンドブラケット(負荷側) |
| ⑥ 渦流円筒 | ⑯ 軸 受 |
| ⑦ 磁 極 | ⑰ シャフト |
| ⑧ エンドブラケット(反負荷側) | ⑱ ターミナルボックス(一次側) |
| ⑨ ブラシホルダー | ⑲ ターミナルボックス(二次側) |
| ⑩ スリップリング | ⑳ ロータコイル |

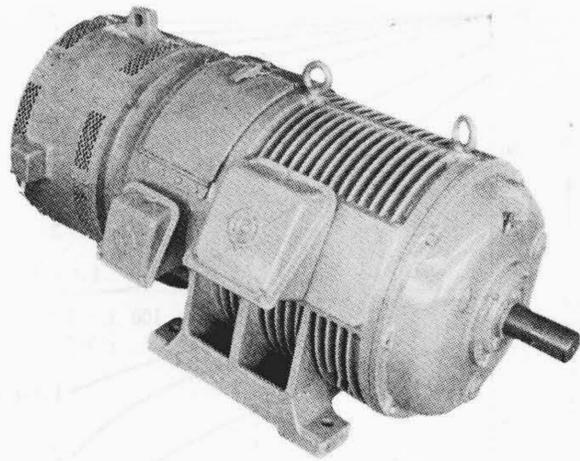
第1図 IB一体形モートル構造図



第2図 磁極とコイルの構造



第3図 制動トルク発生原理図



モートル仕様 20kW TO-DR₃₀ 6P 200/220V
50/60 \sim A種絶縁
IB仕様 20kg-m SB₀-EB₅ 165rpm
F種絶縁

第4図 IB一体形モートル

構造とした。

第4図にIB一体形モートルの外観を示す。

3. 特 性

3.1 制動トルク

(1)式に示したようにIBの制動トルクは渦電流損失に比例する。渦電流損失(W)は一般に(2)式で示される。

$$W = \frac{\pi^2 b^2}{6\rho} \cdot f^2 \cdot B_e^2 \cdot V \times 10^{-16} \text{ (Watt)}^{(2)}$$

- b : 鉄板の厚さ (cm)
- ρ : 鉄板の固有抵抗 (Ω -cm)
- B_e : 鉄板の磁束密度 (gauss)
- f : 周波数 (cps)
- V : 鉄板の体積 (cm^3)

(1), (2)式より制動トルク T を求めると

$$T = \frac{W}{9.8\omega} = \frac{\pi^2 \cdot b^2 \cdot f^2 \cdot B_e^2 \cdot V}{6 \cdot \rho \times 9.8\omega} \times 10^{-16} \text{ (kg-m)} \dots (3)$$

となる。

$$f = \frac{N \cdot p}{60} \text{ (cps)} \dots (4)$$

$$V = \pi \cdot D \cdot L \cdot b \text{ (cm}^3) \dots (5)$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \text{ (rad/s)} \dots (6)$$

- N : 回転数 (rpm)
- p : 極対数
- D : 渦流円筒平均直径 (cm)
- L : 渦流円筒の長さ (cm)

であるから(3)式に(4)(5)(6)式を代入すると、

$$T = \frac{N \cdot p^2 \cdot B_e^2 \cdot D \cdot L \cdot b^3}{715\rho} \times 10^{-15} \text{ (kg-m)} \dots (7)$$

となる。これは制動トルクが回転数(N)、渦流円筒の平均直径(D)、渦流円筒の長さ(L)、厚さ(b)の3乗に比例することを示している。

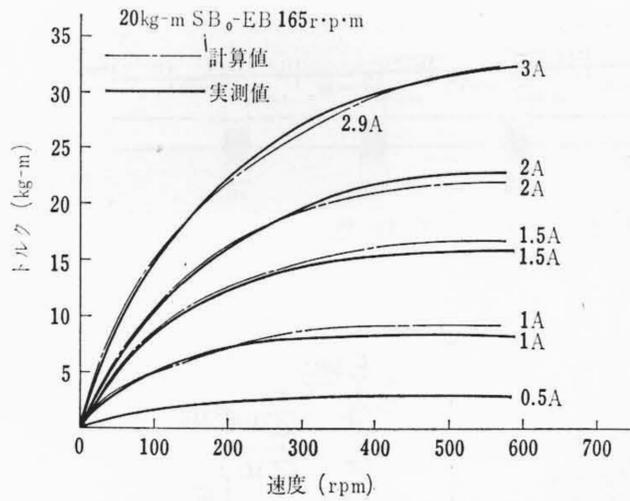
しかし実際には(7)式において鉄板の厚さ b 、渦流円筒の長さ L に修正を行いトルクの計算をしなければならない。

3.1.1 渦流円筒の実効厚み

渦流円筒に流れる渦電流の深さは周波数により大きく変化する。周波数が高くなると渦流円筒に流れる渦電流の深さは浅くなっていくのでこの影響を考慮すると、渦電流の深さ α は K_1 を定数とすると、

$$\alpha = K_1 b \dots (8)$$

となる。



第5図 制動トルク-速度特性

3.1.2 渦流円筒の実効長さ

渦流円筒の長さは、磁束が磁極の長さより短い部分で渦流円筒に移ると考えられるので、渦流円筒の実効長の影響を考慮して計算すればよい結果が得られる。

3.1.3 磁極幅と渦流円筒の極間隔

IBのトルクは渦流円筒の回転によって生ずるので、トルクは磁極の極弧長と渦流円筒の極間隔によって変わる。IBのトルクは磁極幅に関係するから、磁極の幅と渦流円筒の極間隔との比によって計算することができる。

以上の考えをもとに(7)式を補正するとIBの制動トルクの計算式は(9)式となる。

$$T = \frac{N p^2 B_e^2 D K_1 L (K_2 b)^3 \times 10^{-15}}{715\rho} \times \frac{\tau_p}{\tau_e} \text{ (kg-m)} \dots (9)$$

ただし、 N : IBの回転数 (rpm)

p : IBの極対数

B_e : 渦流円筒の磁束密度 (gauss)

D : 渦流円筒の直径 (cm)

K_1 : 定数(渦流円筒の実効長に対する渦流円筒の長さとの比)

L : 渦流円筒の長さ (cm)

K_2 : 定数(周波数によって定まる定数)

b : 渦流円筒の厚さ (cm)

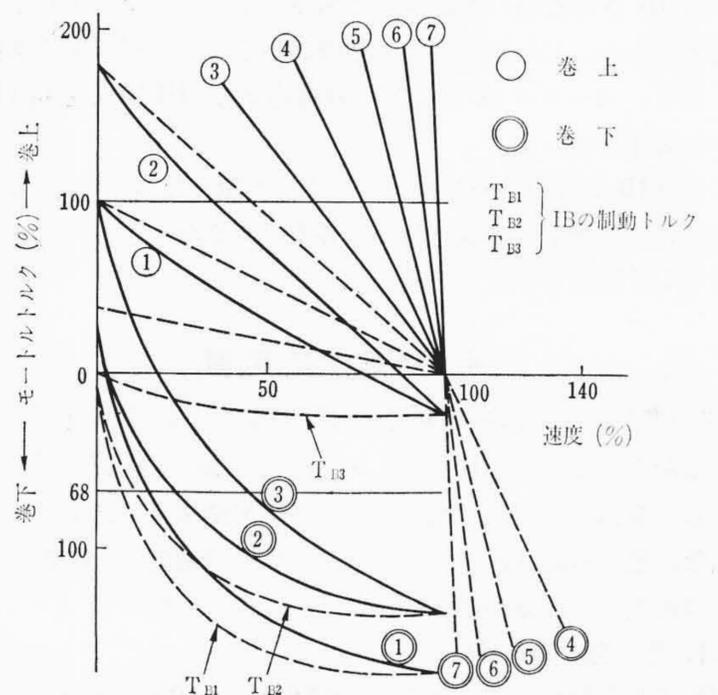
τ_p : 磁極の平均幅 (cm)

τ_e : 渦流円筒の極間隔 (cm)

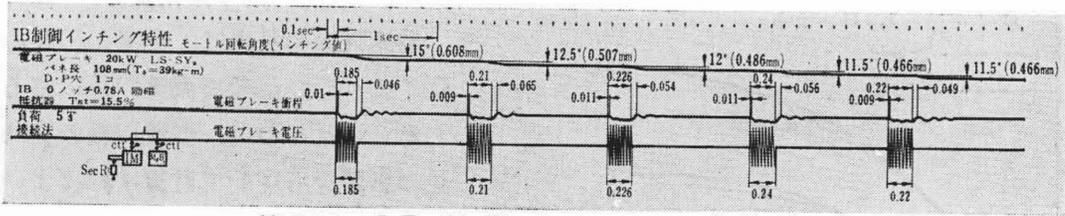
一例として20kg-m, 165rpmのIBについて励磁電流を変えた場合の速度に対する制動トルク特性を実測し、計算値と比較すると第5図に示すように両者ともほとんど一致している。

3.2 速度-トルク特性

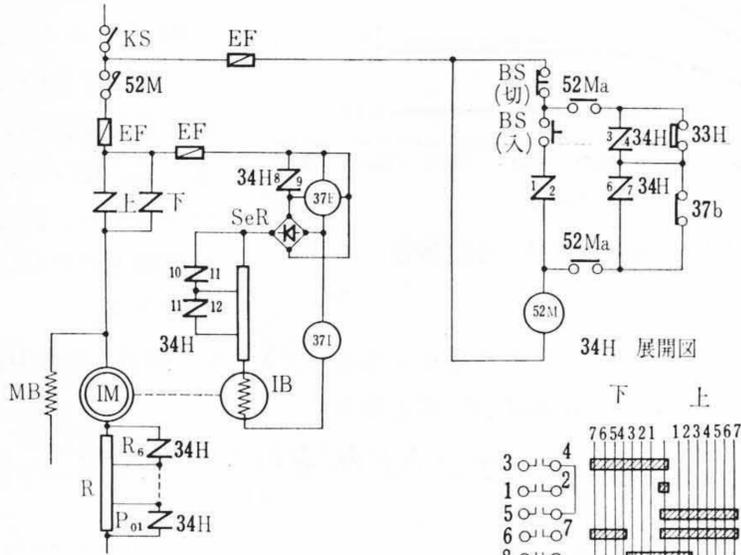
(9)式の制動トルクは磁束密度の2乗に比例し回転数に比例することを示している。すなわち第5図に示すように励磁電流を変えることにより制動トルクを制御することができる。このIBの制動トルクとモートルの二次抵抗による速度調整とを合成すれば第6図のように任意の速度を得ることができる。



第6図 IB制御速度トルク曲線

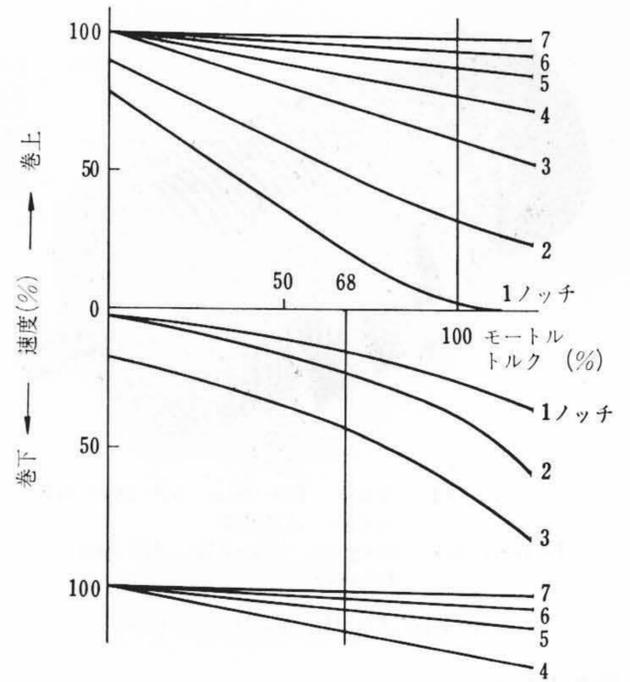


第 7 図 IB 制御 インチング 特性



- | | |
|----------------|----------------|
| 33 リミットスイッチ | IB インダクションブレーキ |
| 34 可逆コントローラ | R 抵抗器 |
| 37 電流リレー | SeR セレン整流器 |
| 52 電磁開閉器 | KS 刃形開閉器 |
| MB 電磁ブレーキ | BS ボタンスイッチ |
| IM インダクションモートル | EF 筒形ヒューズ |

第 9 図 手動制御展開接続図



第 8 図 手動制御速度トルク特性

特性は第 8 図に示すようになり、負荷量により速度が変化する欠点がある。しかし一般クレーンなどではあまり問題にならず安価なため最も多く利用されている。

実施例では日立新産業用天井クレーンなどに広く使用され第 9 図に示す回路が用いられる。これは可逆コントローラ③によりモートルの 2 次抵抗と IB の励磁電流の加減を同時に行ない、電動機トルクと一定励磁電流における制動トルクを合成し所要の速度を得るものである。このときの速度トルク特性を第 8 図に示す。

なお巻下し時の負荷トルクは機械効率を考え 68% となる。

またモートルの速度を検知し、これにより励磁電流を変化すれば速度を自動制御することもできる。

3.3 インチング特性

渦電流によるブレーキは従来の CF・HM 両方式に比較して、一般的に応答が悪いといわれているが、IB の励磁コイルにわずかな電流を常に流すことにより過渡応答を速くしてインチング特性を改良することができる⁽³⁾。日立新産業用天井クレーンにおいてインチング精度を実測した結果では 5 t 荷重のもので 0.608 mm という好成绩を取っており、前記方式と比べそん色のないことが確かめられている。インチング特性のオシログラムを第 7 図に示す。

3.4 IB 一体形モートルの定格

IB 一体形モートルの標準機種はモートル 30 分定格 (A 種絶縁), IB 5 分定格 (F 種絶縁) であるので一般産業用としては十分な定格である。しかし使用ひん度の高いところに使用する準標準機種として、モートル 60 分定格 (B 種絶縁), IB 10 分定格 (H 種絶縁) を製作している。

ここで IB の時間定格がモートルよりも短くなっているが、IB は巻上げおよび巻下げの低速時のみ必要であるから、モートルの時間定格の 1/6 程度で十分である。

4. 制御と応用例

IB の制動トルクは励磁電流を変化することにより簡単に制御することができるので、IB のコイルに直列に抵抗を接続しこの抵抗を変化して制御する方法、抵抗の代わりに可飽和リアクトルを用いる方法など種々考案されているが、これらの制御方法により手動制御、自動制御の区分がなされる。

4.1 手動制御

運転者が負荷の大小正負に応じて段階的に IB の励磁電流または、誘導電動機の二次抵抗を変化し速度調整する方法で、速度—トルク

4.2 自動制御

モートルの速度をパイロットジェネレータ (PG) またはモートルの二次誘起電圧により検出し、モートルが所要の速度で運転しているとき検出電圧との差が零となるように、あらかじめ基準電圧を設定する。そして基準電圧と検出電圧との間に電位差を生じたとき、モートルは所要の速度をはずれていることになる。したがって差電圧を増幅し励磁電流を変化せしめて速度を自動的に調整し、負荷変動にかかわらず速度を一定に保つ方法である。

実施例としてはモートルの二次電圧が速度に比例するのを利用して速度を検出し、一次電圧を基準電圧として両者の差を取りこれを磁気増幅器で増幅し、励磁電流を可変する方法で天井クレーンに用いた制御回路を第 10 図に、この時の速度トルク特性を第 11 図に示す。

なお増幅器としてシリコン制御整流素子を使用する方法や、速度検出に PG を用いる方法なども行なわれている。

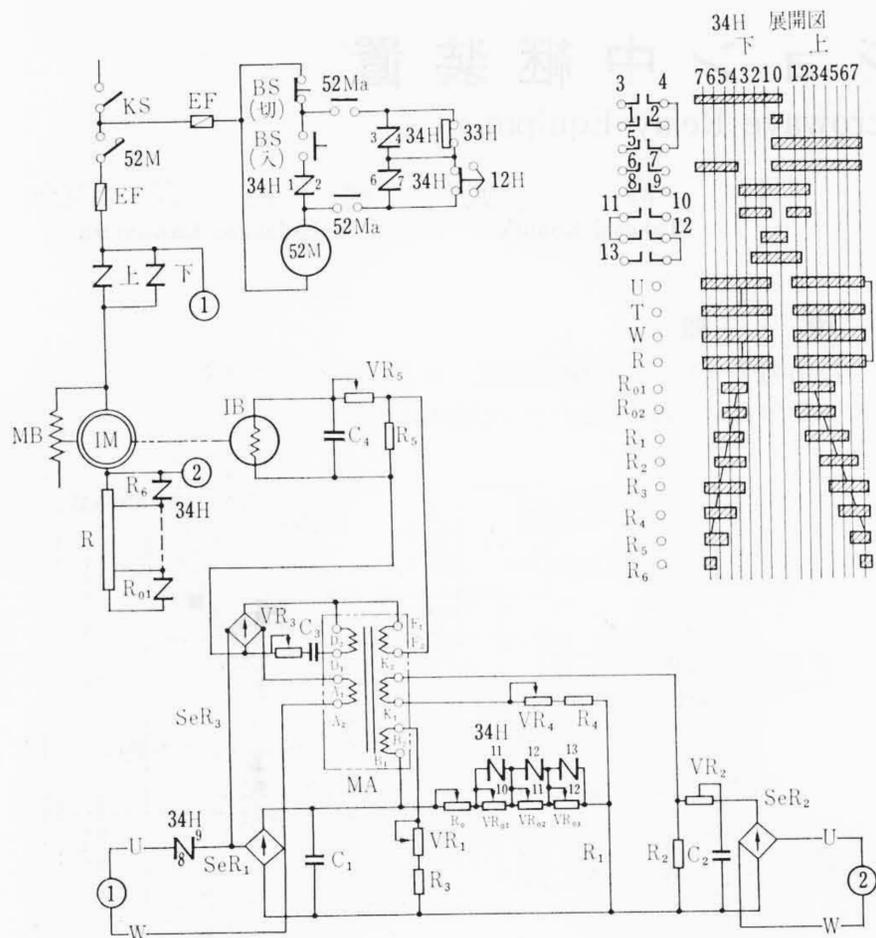
4.3 特殊制御

回転式揚貨機のように荷の積み方で負荷が正負に変化し、しかも積込、積却しをコンベヤなどで結ぶ場合着床精度を高くすることが要求される。このような機械では運転途中で負荷が正から負へ、負から正へ変わることがあるので、あらかじめ速度設定することはできない。

実施例としては電動機の二次電圧が同期速度で零となることを利用し、これを検出して負荷の正負を自動的に判断し、IB の励磁電流を変化せしめて着床精度を得る方法が考案⁽³⁾されている。

この方法によれば前項で述べた自動制御に比べ簡単かつ小容量の IB で所要の性能を得ることができる。

以上のように使用目的にあわせた回路を構成すれば自由に速度が選択できるので今後種々な用途に使用できるものと思う。



- 33 リミットスイッチ
- 34 可逆コントローラ
- 12 遠心力開閉器
- 52 電磁開閉器
- BS 押ボタンスイッチ
- KS 刃形開閉器
- EF 筒形ヒューズ
- R 抵抗器
- VR 可変抵抗器
- C コンデンサ
- SeR セレン整流器
- MA 磁気増幅器
- MB 電磁ブレーキ
- IB インダクションブレーキ
- IM インダクションモートル

第10図 自動制御展開接続図

5. 付属装置

IBで速度制御するような機械は負荷の多いものが多い。このような負荷は制動トルクがなんらかの原因でなくなると同期速度をはるかにこえて落下する危険がある。したがって下降速度を検出し危険速度に近づいたとき自動的に停止させなければならない。このため日立製作所では次の2種類を採用している。

(1) 遠心力開閉器による保護

遠心力開閉器を負荷の駆動軸に直結し危険速度で作動するようあらかじめ設定しておき、作動と同時に電動機回路を開き電磁ブレーキを掛け非常停止させる。第10図の12Hはこのリレーである。

クレーンに用いる場合トロリー線が必要であるため大形機のみ採用している。

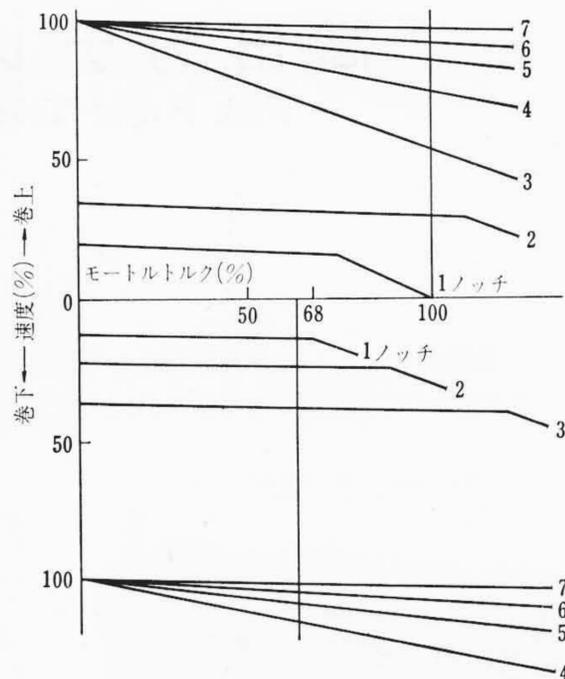
(2) 電流リレーによる保護

モートルの速度をパイロットジェネレータ (PG) で検出し、磁気増幅器で増幅しリレーを駆動させ回路を遮断する方法が提案されているが、日立製作所では小形クレーンのトロリーをできるだけ少なくする意味から、電磁接触器形の電流リレーでIBの励磁電流の小さくなるのを検出して、回路を遮断して間接的に危険を防止する方法を採用している。

6. 標準仕様

IBの標準仕様は次のとおりである。

- 形式 SB₀-EB (開放形)
- 制動トルク モートルの同期速度の1/6速度で回転しているときの大きさで表わし、第1表にその標準



第11図 自動制御速度トルク特性

第1表 標準仕様

形式	定格(分)	制動トルク (kg-m)	回転数 (rpm)	回転子Gb ² (kg-m ²)	適用クレーンモートル	
					出力(kW)	極数
SB ₀ -EB	5	10	165	0.96	10	6
SB ₀ -EB	5	15	165	1.57	15	6
SB ₀ -EB	5	20	165	1.94	20	6
SB ₀ -EB	5	40	125	4.66	30	8
SB ₀ -EB	5	53	125	5.71	40	8
SB ₀ -EB	5	66	125	7.97	50	8

値を示す。

- サイクル 50/60
- 時間定格 5分
- 使用率(% ED) 6%
- 絶縁階級 F種
- 制御方式 手動制御

7. 結 言

以上IBとその制御について述べたが、これを要約すると、

- (1) 摩耗部分がなく寿命が半永久的である。
- (2) 操作、制御が簡単でじょうぶである。
- (3) 励磁電流の調整により安定低速運転ができる。
- (4) 自動制御を行えば負荷変動に対し安定運転ができる。
- (5) GD²が小さくインテグ特性がよい。
- (6) 電動機とIB間のカップリングが不要であるため据付面積を節約することができる。
- (7) 保守点検が容易である。

などの利点がある。

したがって今後ますますその用途が拡大し、従来の機械的減速装置にとって代わるものと思われる。終わりに臨み、いろいろな面で絶大なご援助をいただいた日立機電工業株式会社の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 榎本, 清水: 日立評論別冊 22, 77 (昭 33-2)
- (2) 電気学会: 電気工学ハンドブック 193 (昭 37, 電気学会)
- (3) 実用新案申請中