

立坑巻上機の低周波制御

The Low Frequency Control of Winding Machines for Shaft Service

藤 木 勝 美* 木 暮 宏 政* 秋 田 六 郎**
 Katsumi Fujiki Hiromasa Kogure Rokuro Akita

内 容 梗 概

最近、巻上機電気設備の発達にはめざましいものがあり、押ボタン操作による全自動プログラム運転がさかんに採用されるようになってきた。本稿では巻上機のうち低周波制御方式による交流巻上機について自動制御の問題点とその実例について述べる。

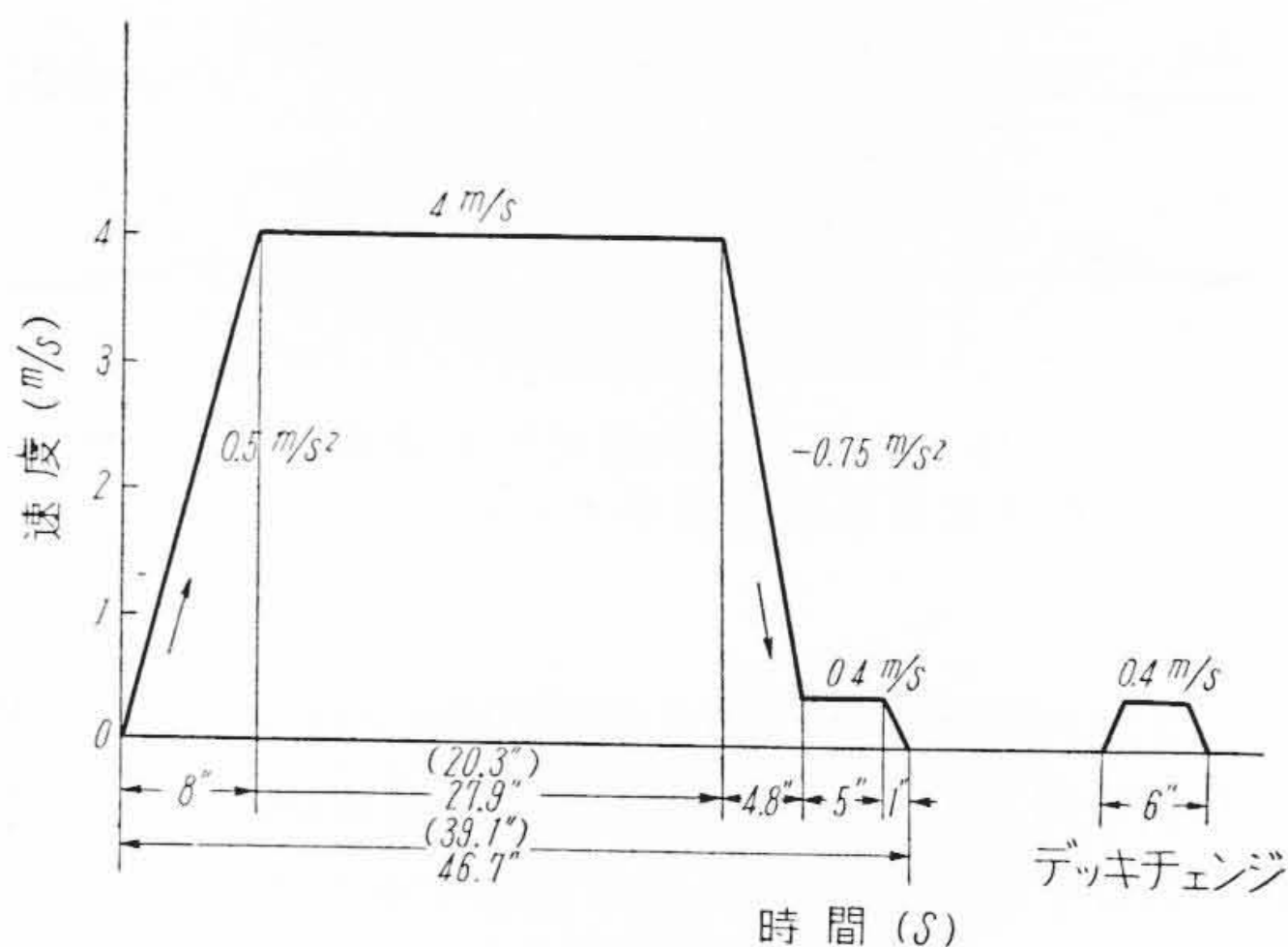
1. 緒 言

炭鉱や鉱山における機械化の著しい発達により、これらの設備、特に運搬装置の自動化がさかんに行われている。

巻上機設備においても坑底および坑口における操車装置の進歩とあいまって、直流巻上機、交流巻上機を問わず、その自動運転化が実施されんとする気運にあり、すでに実稼動に入っているものもある。特に最近における各種増幅機器の発達や自動制御技術の進歩により従来困難とされていた諸問題も解決し、巻上機自動運転方式の急速な発展をみた。巻上機の制御としては直流方式、交流方式の両者があり、それぞれ特長があつて述べるべき点が多いが、本稿においては紙面の都合上同和鉱業株式会社花岡鉱業所に最近納入した低周波制御立坑巻上機に関してその制御方式の概略を述べることにする。

2. 計画の概要

本巻上機設備は立坑（入気）坑外に設置し、2段ケージにより鉱車、人員および資材の運搬を行うものである。



注：全速運転時間中()内に示す時間は坑口一中段間運転の場合を示す

第1図 計画、速度—時間曲線

第1表 運転ケース一覧表

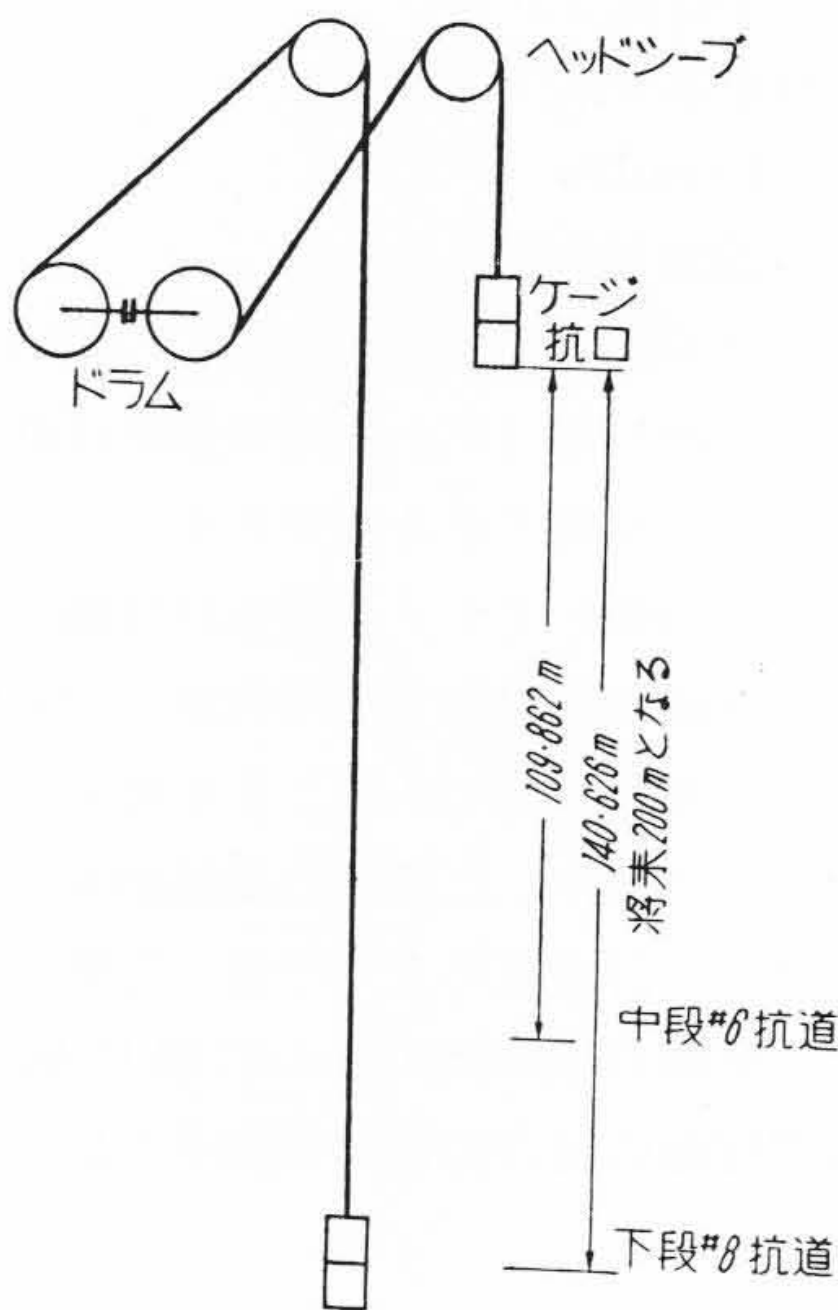
運 転 ケース	負 荷		不平衡荷重 (kg)	GD ² (kg-m ²)	備 考
	上 げ 側	下 げ 側			
1	実車×4	空車×4	4,790	468,350	自動手動
2	実車×2	空ケージ	3,590	446,250	自動手動
3	空ケージ	空車×4	— 810	440,150	自動手動
4	人員×20	空ケージ	1,990	438,150	自動手動
5	空ケージ	人員×20	— 410	438,150	自動手動
6					
7					
8	実車×2	—	6,220	392,150	手動(片巻)
9	空車×4	—	5,020	386,150	手動(片巻)
10	人員×20	空車×4	390	446,250	手 動
11	実車×2	人員×20	2,390	452,250	手 動
12	人員×4	空ケージ	1,030	433,350	手動(点検)
13	空ケージ	人員×4	550	433,350	手動(点検)

付記：ケージ自重 2,500 kg/ケージ
 鉱車自重 400 kg/車
 鉱 石 1,000 kg/車
 ロープ自重 5.62 kg/m

注：(1) 不平衡荷重は坑口一下段運転の起動時におけるもの
 (2) GD²はドラム軸換算

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所亀有工場



第2図 立坑坑道深さ

る。運転ケースは第1表に示すようにその荷重も広範囲にわたっているが、正確な着床を得るために5サイクル低周波制御方式にさらに減速時の自動制動力調整装置を組合せ安定な減速、微速を得るよう、細心の注意を払って計画した。その目標とする時間—速度特性を第1図に示す。また、着床精度はジャンクションレール、操車の方面より $\pm 35\text{mm}$ （ロープ伸びを除き）を要求された。立坑坑道の深さを第2図に示す。

機器仕様および構造

巻上機型式 DD-G₂PAP（複胴歯車式接子両胴設置，ポスト型圧気操作式常用制動機，平行動ポスト型圧気操作式非常制動機付）

巻胴寸法 直径 2,240 mm
幅 1,320 mm
鰐径 2,500 mm
鋼 索 直径 36 mm
6×F (J+12+12) 2種

主電動機 三相誘導電動機
型式 S-DQ
3,000 V 50～ 300 kW 12極

低周波電源設備

- 1 台—80 kVA 三相低周波交流発電機
350 V, 5～, 1,000 rpm, 1時間定格
SC₁ B₁-CIL 型（開放型整流子式）
- 1 台—100 kW 三相誘導電動機
3,000 V, 50～, 6極, 1,000 rpm
S-KK型（開放型特殊カゴ形）
- 1 台—12 kVA 交流励磁機
50 V, 50～/5～, 6P, 865 rpm チェイン連結
EF-F型（開放型周波数変換式）
- 1 台—20 kVA 三相交流発電機
68 V, 48.2～, 965 rpm
EFU-SD型（閉鎖通風型）

制御装置関係

- パイロット発電機
0.1 kW, 110 V, 1,000 rpm
- 減速指令用スライド抵抗器
- 歯車式制限開閉器
 - 1 個—直径 1,000 φ 自動運転プログラム用
 - 1 個—直径 700 φ 各種保護インターロック用

3. 制御運転方式

3.1 低周波方式採用の意義

3.1.1 自動制御の必要性

立坑巻上機の場合は人員専用ケージ以外の場合は鉱車の出入が伴うので着床位置を正確にしなければならぬ。着床精度が悪いことは鉱車の入替にはなほだ不

便となり、場合によつては再起動調整が必要となり著しく能率を損ずる。

着床精度は停止前の速度が低いほど、また安定しているほど良好である。しかし運搬能率上からは、微速度が低く、微速運転時間を長く要するのは好ましくない。普通、停止前速度は0.4～0.9m/s程度⁽⁴⁾を要求されるが、このためには全速の約 $\frac{1}{10}$ 以下の速度を安定に保つ必要がある。＋負荷より－負荷まで広範囲の負荷変動や電源変動などの外乱にもかかわらず所定の低速期間を経て精密に着床するためには高度の自動制御を必要とする。

本巻上機では各ケースの不均衡荷重は第1表に示すごとく、ケース1とケース3の間に含まれる。すなわち電動機トルクに対し $+57.5\sim-20.7\%$ の範囲にある。また電源電圧変動を $\pm 10\%$ 、周波数変動を $+0\sim-5\%$ とすれば、負荷および電源が同時に変動した場合の滑りのばらつきの範囲は電動機特性より $\pm 5.5\%$ （100%は低周波同期速度）の範囲内に入る。速度に換算すれば0.42～0.38m/sの範囲になる。

着床スイッチが動作してマグネットが落下し減速を始めるまでの時間遅れを0.3～0.35秒とすればこのばらつきによる誤差は $\pm 17\text{mm}$ と計算される。要求着床誤差 $\pm 35\text{mm}$ から上記 $\pm 17\text{mm}$ を差引いた $\pm 18\text{mm}$ が微速よりの減速点から、停止するまでのばらつきとして許される誤差である。

負荷および電源変動に対する微速度のばらつきは低周波同期速度の $\pm 5.5\%$ なるゆえ、低周波にするほど、速度（m/s）のばらつきは小になり、制動トルク一定とすれば、着床誤差も小になることは明らかである。しかしまた一方において、低周波速度をあまり小にすることは低速運転開始位置の誤差に伴う運転時間が長くなる欠点がある。

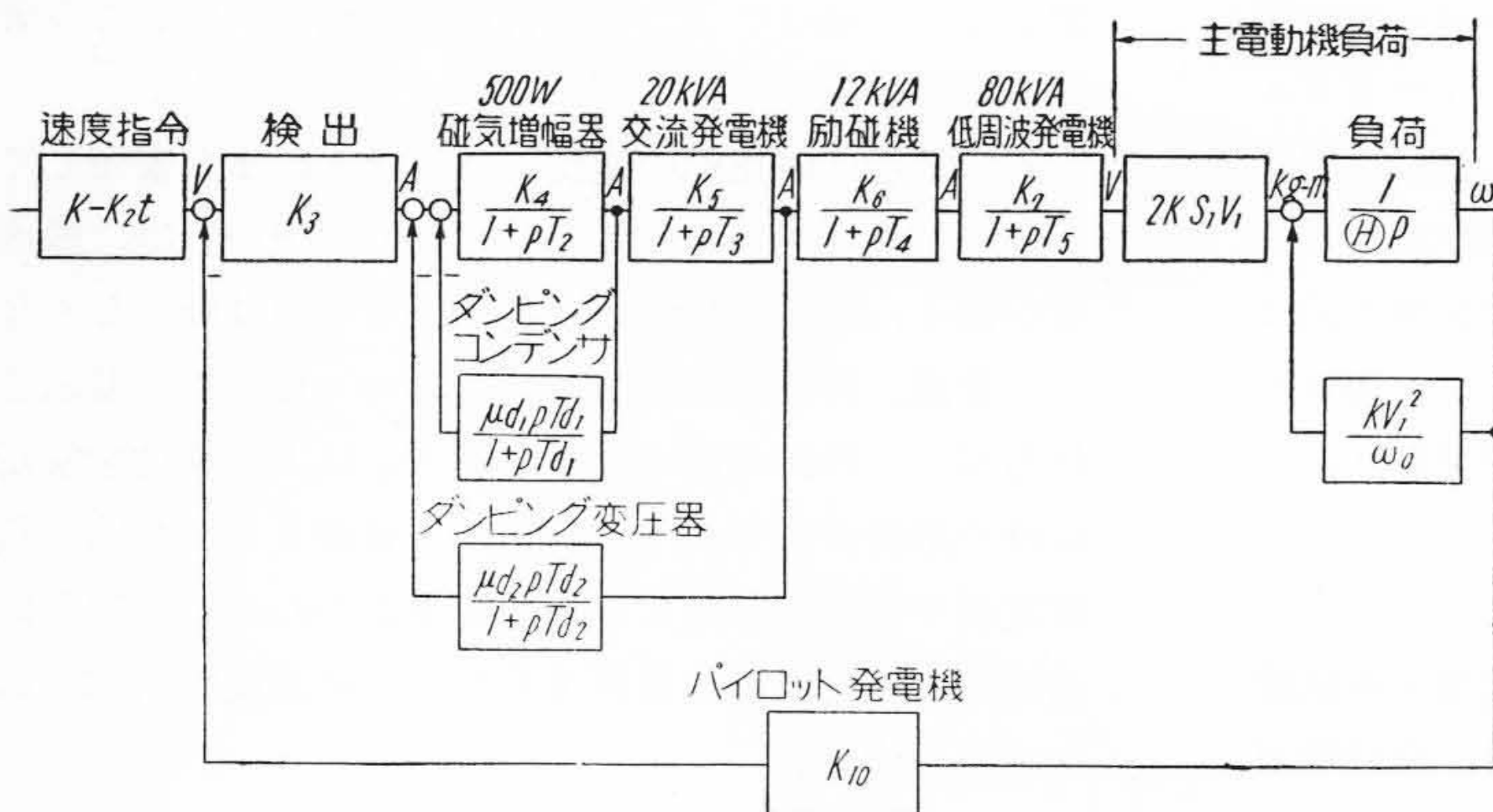
本巻上機では、5サイクルを採用することにより、要求着床誤差を満足し、かつ運搬能率をできるだけ高めることができた。

3.1.2 直流巻上機との比較

直流電動機を使用したワードレオード方式は巻上機制御としては理想的な特性を有している。すなわち、いかなる負荷条件においても微速から全速に至るまで能率良く円滑に速度制御できる。しかしながら一般に交流方式に比し高価となるのはやむを得ない。

3.1.3 低周波方式の特長

減速時低周波電源（2～5サイクル）⁽⁵⁾により、電力を供給すれば、回転磁界が回転子回転に比しおそいので直流発電制動の場合と同様に減速し、やがて低周波回転磁界に近づく。この時二次抵抗を短絡し、低周波電源電圧を大にすれば、トルク—速度曲線の傾斜大と



第 3 図 ブ ロ ッ ク 線 図

なり、負荷変動にもかかわらず、同期速度にごく近い速度で回転するに至る。すなわち安定した微速を得ることができる。

また減速中、低周波電源電圧や二次抵抗を調整することにより所定のプログラムで減速させることが容易である。本方式は安定な微速を得るという点においてほかの交流制御方式より特にすぐれている。

3.2 速度制御

3.2.1 減速中の誘導電動機の伝達函数

速度制御を低周波発電機により行っているのは減速に移ってから微速に至るまでの期間である。この制御系のブロック線図は第 3 図のようになる。パイロット発電機、増幅器、励磁機などはほぼ直線要素と考えられるから問題ないが、誘導電動機は次のように考える。

すなわち誘導電動機のトルク τ は、端子電圧 V 、滑り S なる時は大体 $\tau = F(S) V^2$ で表わせる。 $F(S)$ はいわゆるトルク—速度特性としてよく知られた函数である。

安定な自動制御を行うためトルク—速度曲線において最大制動トルクより滑りの小なる部分のみを使用し、かつ直線とすれば

$$\tau = K S V^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わすことができる。ただし K は比例常数とする。

今、トルク—速度曲線上の一点の電圧、滑り、トルクをそれぞれ V_1 、 S_1 、 τ_1 とし、同期角速度を ω_0 とすれば (1) 式より

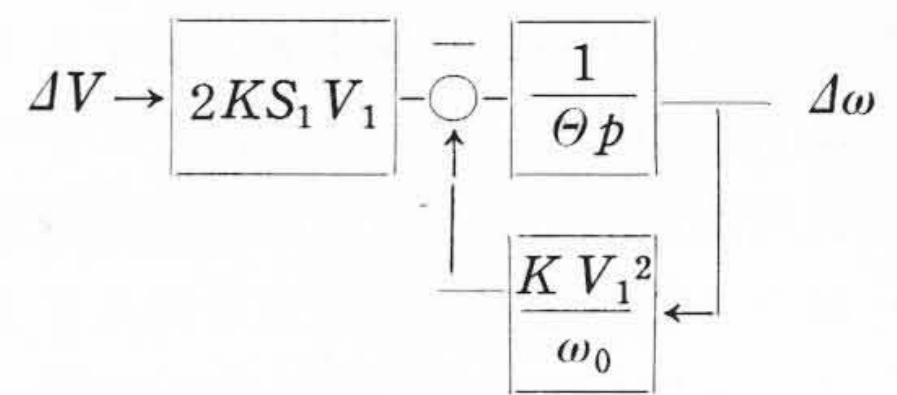
$$\Delta\tau = 2K S_1 V_1 \Delta V - \frac{K V_1^2}{\omega_0} \Delta\omega \quad \dots\dots\dots (2)$$

Θ : 慣性能率 ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{S}^2$) とすれば

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta\tau} = \frac{1}{\Theta p} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに p は演算子である。

(2), (3) 式よりブロック線図をかけば



これを変換すれば

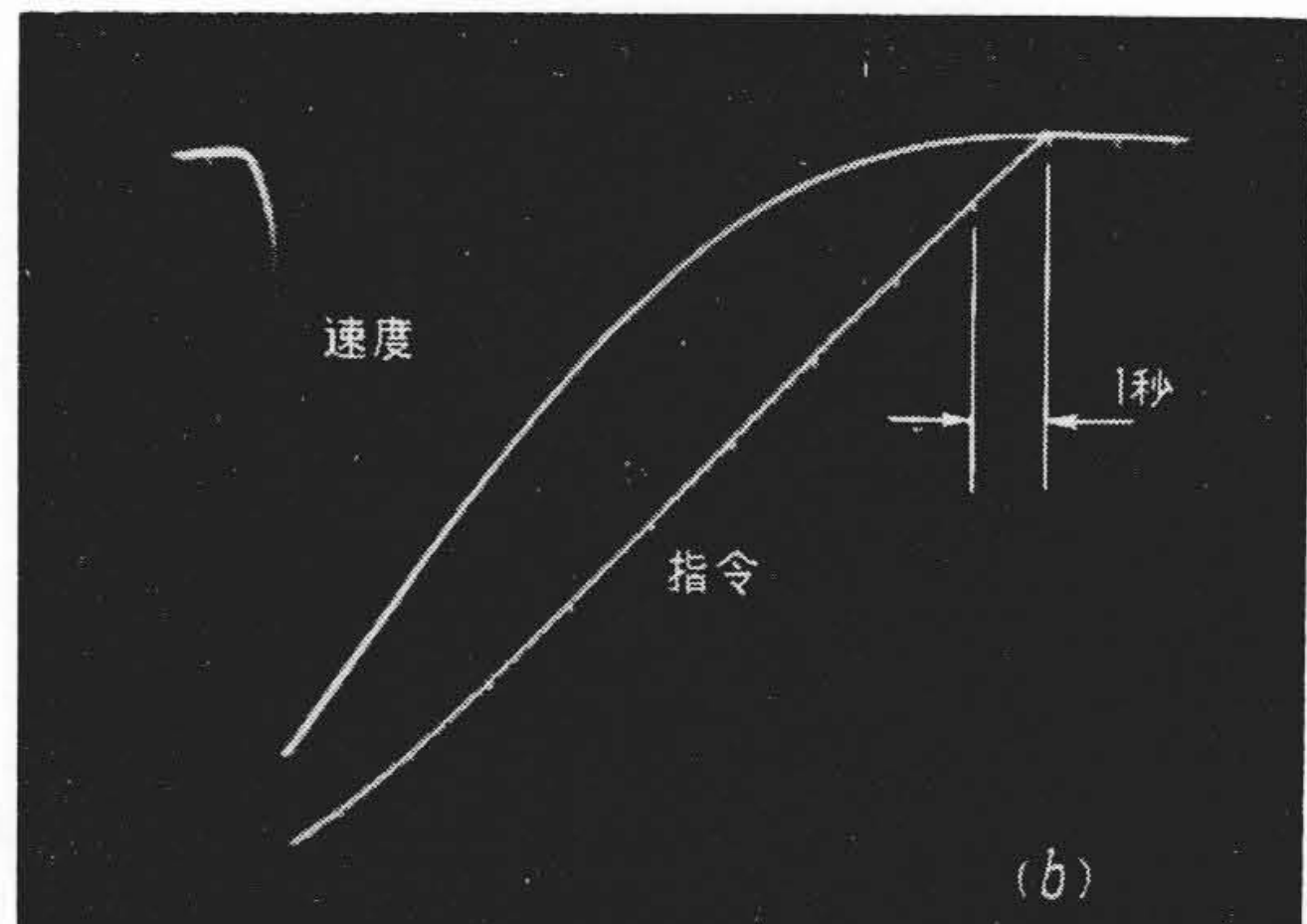
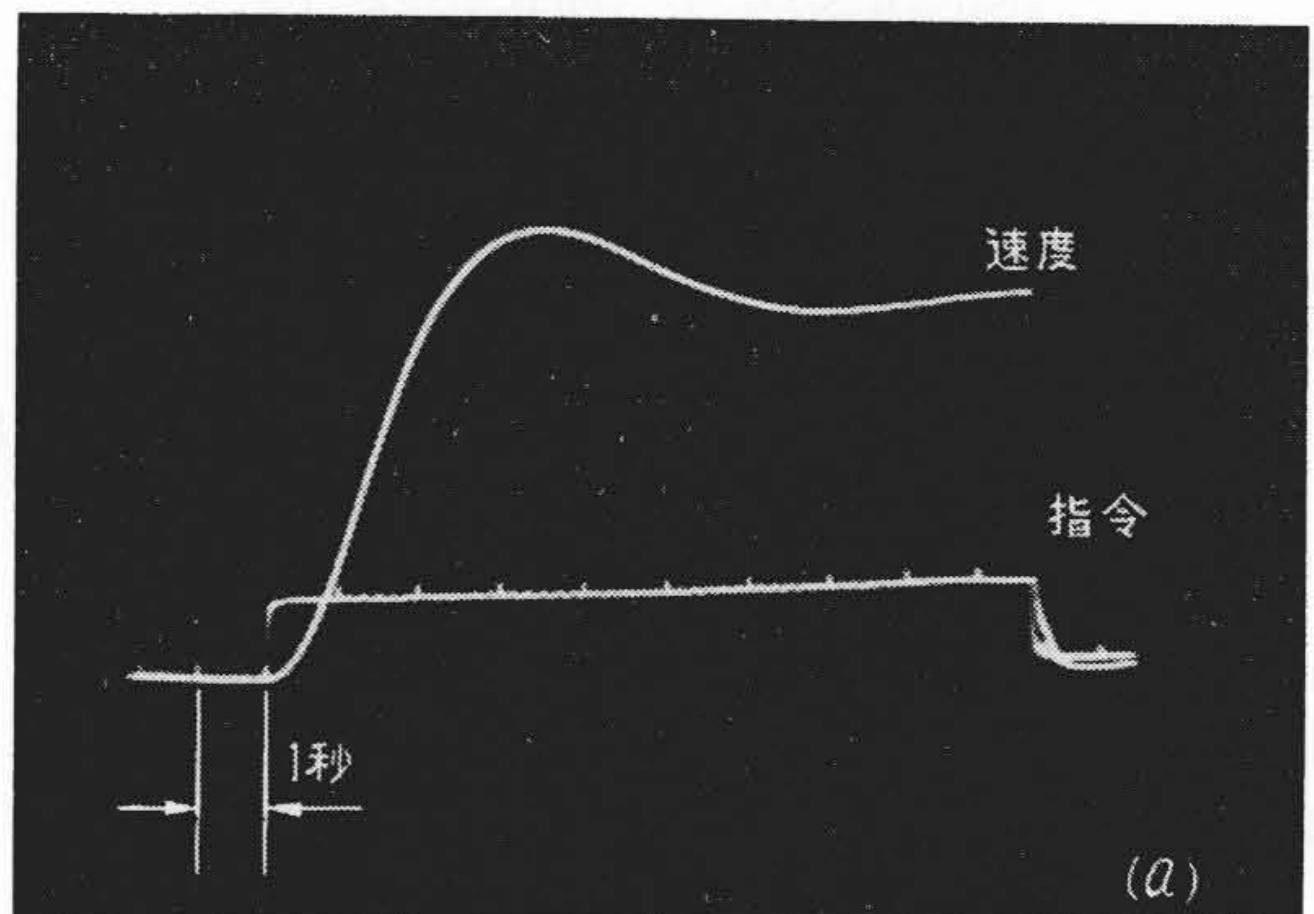
$$\Delta V \rightarrow \frac{2 S_1 \omega_0}{V_1} \frac{1}{\Theta \omega_0 S_1 P + 1} \rightarrow \Delta \omega$$

となる。

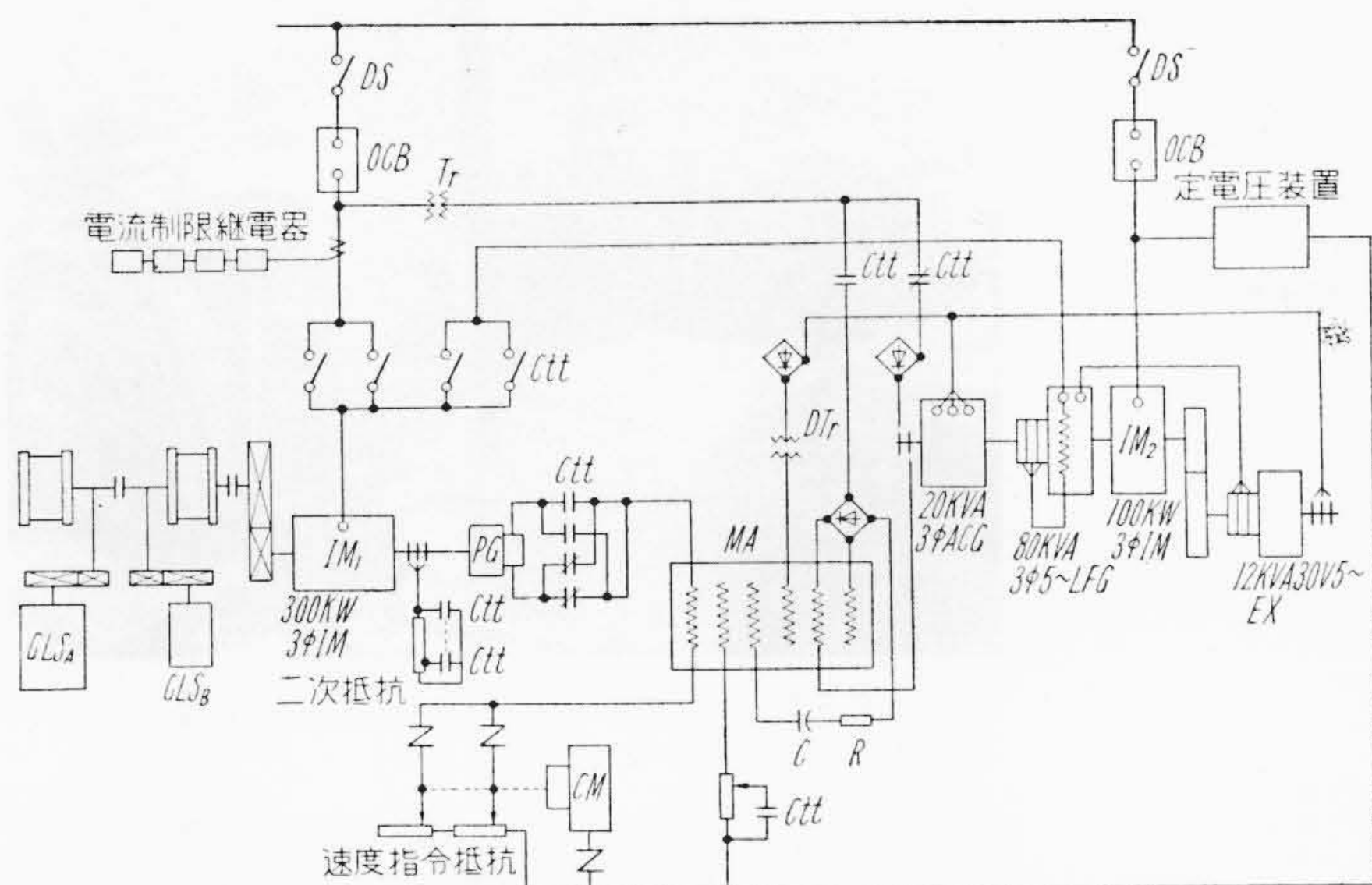
ゲインは $\frac{S_1}{V_1}$ に比例する。二次抵抗が一定で電圧によりトルクを加減して速度制御を行っている範囲

では減速指令が進むにつれて V_1 は次第に大になるように自動制御され、その結果 S_1 は次第に小になる。すなわち減速するにつれてゲインは減少することがわかる (第 7 図参照)。

しかし電圧制御のみでは減速プログラムの全範囲を出すことができないので、ある速度まで下ると二次抵抗を切り替えて抵抗値を減少させる。この時には電圧は自動制御により一時的に減少することになるからゲインも同時に増大する。その後の減速過程とゲイン変



第 4 図 ア ナ コ ン 解 析 結 果



第5図 低周波発電機方式主回路接続図

化は二次抵抗切替以前と同様である。

次に時定数であるが減速トルクおよび慣性能率を一定とすれば滑りに比例するから、減速するに従って時定数は小になることがわかる。

したがってループゲイン、時定数とも減速中刻々と変る。これは制御上特に注意を要する点であり、直流方式に比し安定性、プログラム減速などの点で制御がむづかしいのである。

3.2.2 アナコン解析結果

第1表ケース3の場合において滑り-4の点におけるアナコン結果を第4図に示す。第4図(a)は二次抵抗を短絡した場合などに相当し、擾乱を単位函数的に加えて安定性を見たものである。第4図(b)は減速指令のみによる減速開始時のおくれをみるためのアナコン結果である。3.2.1の所論では伝達函数を直線化したため減速の全過程を調べることが困難であるのでスリッパ-9におけるブロック線図を減速開始時のものと仮定して解析したものである。これによれば約1.2秒のおくれがある。したがって所定のプログラムを得るためには減速開始時挿入すべき二次抵抗の値とその時の低周波電源電圧とを適切にすることが必要である。

3.3 運転方式

本巻上機は一般巻上機と同様な手動運転ができることはもちろんであるが、先に述べたように巻上能率の向上と停止前の安定した微速とを得るため第1表ケース1～5は押ボタン操作による1サイクル全自動運転を採用した。また立坑点検を行なうため5サイクル低周波の微速で全坑道区間を手動運転することも可能である。本巻上機の主回路単線結線図を第5図に示す。以下実際の運転方法について述べる。

3.3.1 押ボタン全自動運転

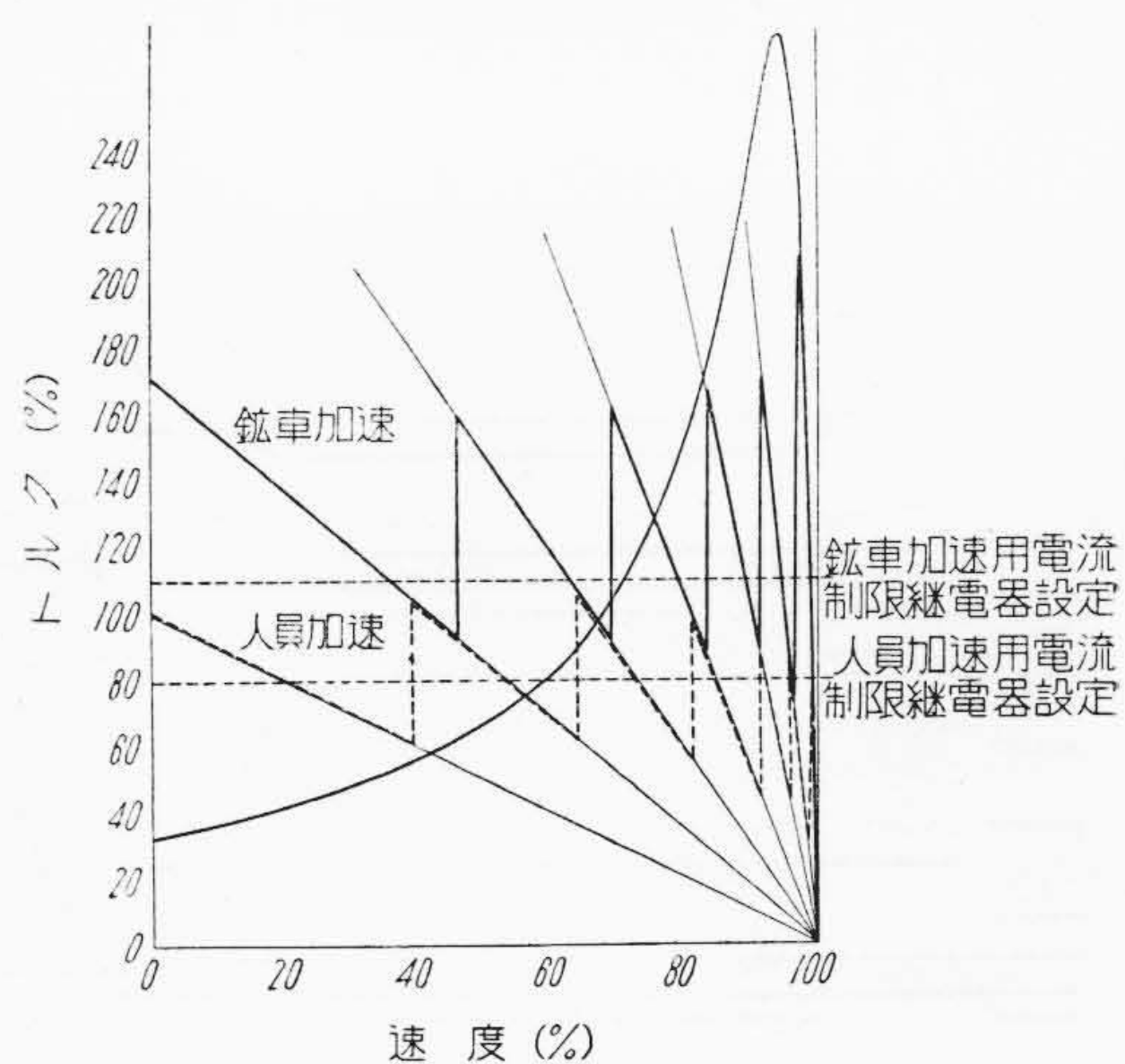
(a) 加速

坑底（または中段）および坑口からの人車自動運転、または鉱車自動運転の要求を受けた後押ボタンを押すと電源が投入され主電動機がトルクを出す。続いて電磁石が動作し、自動常用制動機がゆるみ、電動機は起動し、巻胴に連結された歯車式制限開閉器と電流制限継電器の動作により一定のプログラムに従って主電動機二次抵抗を順次短絡して加速する。この運転方向は歯車式制限開閉器および制限開閉器により自動的に選択され、人員昇降の加速は、主電動機

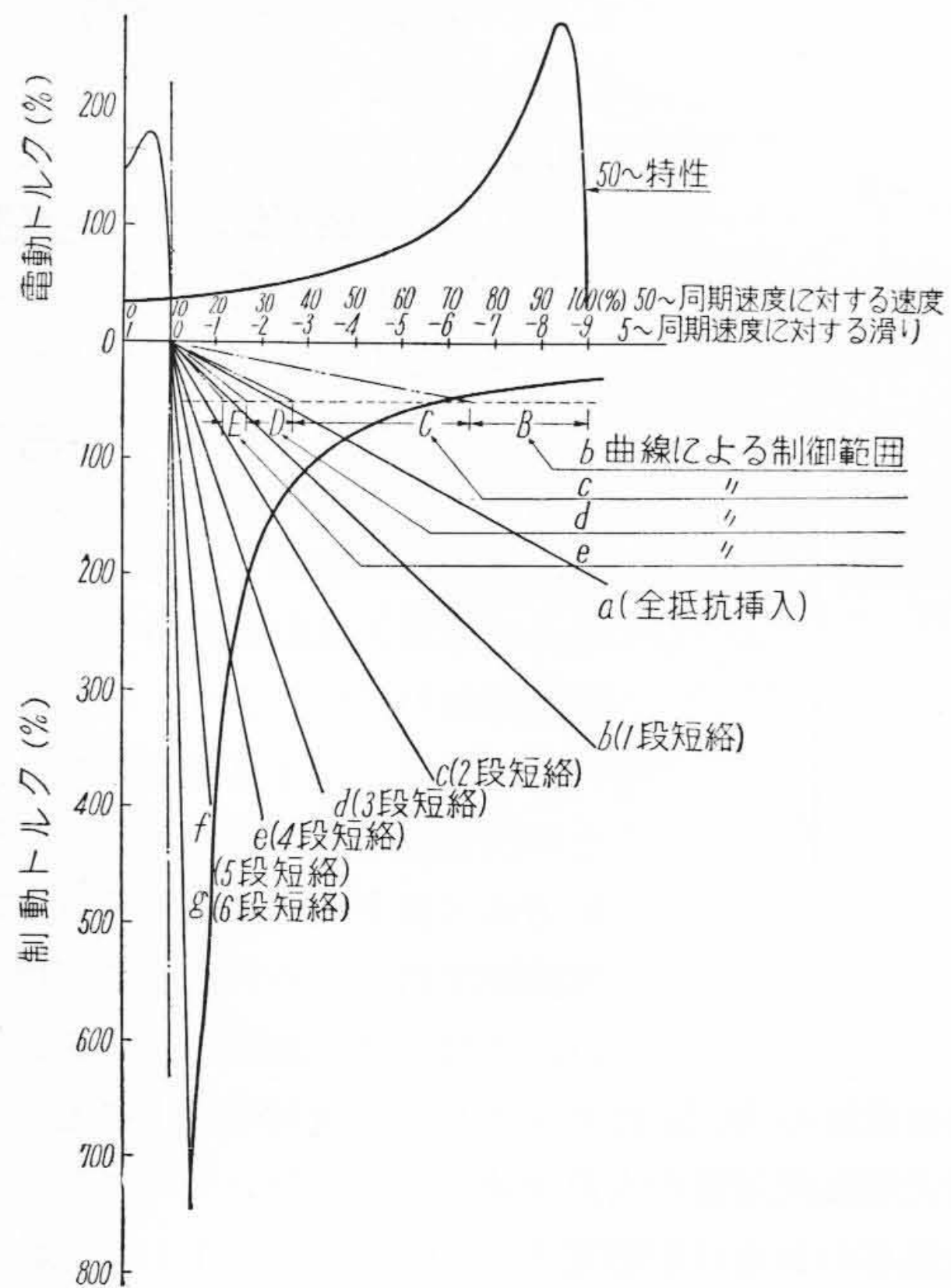
定格電流の80%にセットした電流制限継電器と、歯車式制限開閉器の人員加速カムとの組合せにより、また鉱車の加速は定格電流の110%にセットした電流制限継電器と歯車式制限開閉器の鉱車加速カムの組合せによつており、負荷の相異により加速度が変ることなく一定の加速度を得ている。また鉱車の下げ荷であるようなケースにおいては起動後の一定距離の点における速度を検出し、加速度が予定値より大である場合には自動的に電流制限継電器を切り換えて所定の加速を行つている。すなわち負荷により加速回路を弁別する方式を採用している。加速トルク曲線を第6図に示す。

(b) 減速および低速

全速運転が終り減速開始点に至れば歯車式制限開閉器により50サイクル電源は切り離され、誘導電動機は5サイクルの低周波電源に接続され、同時に電動操作

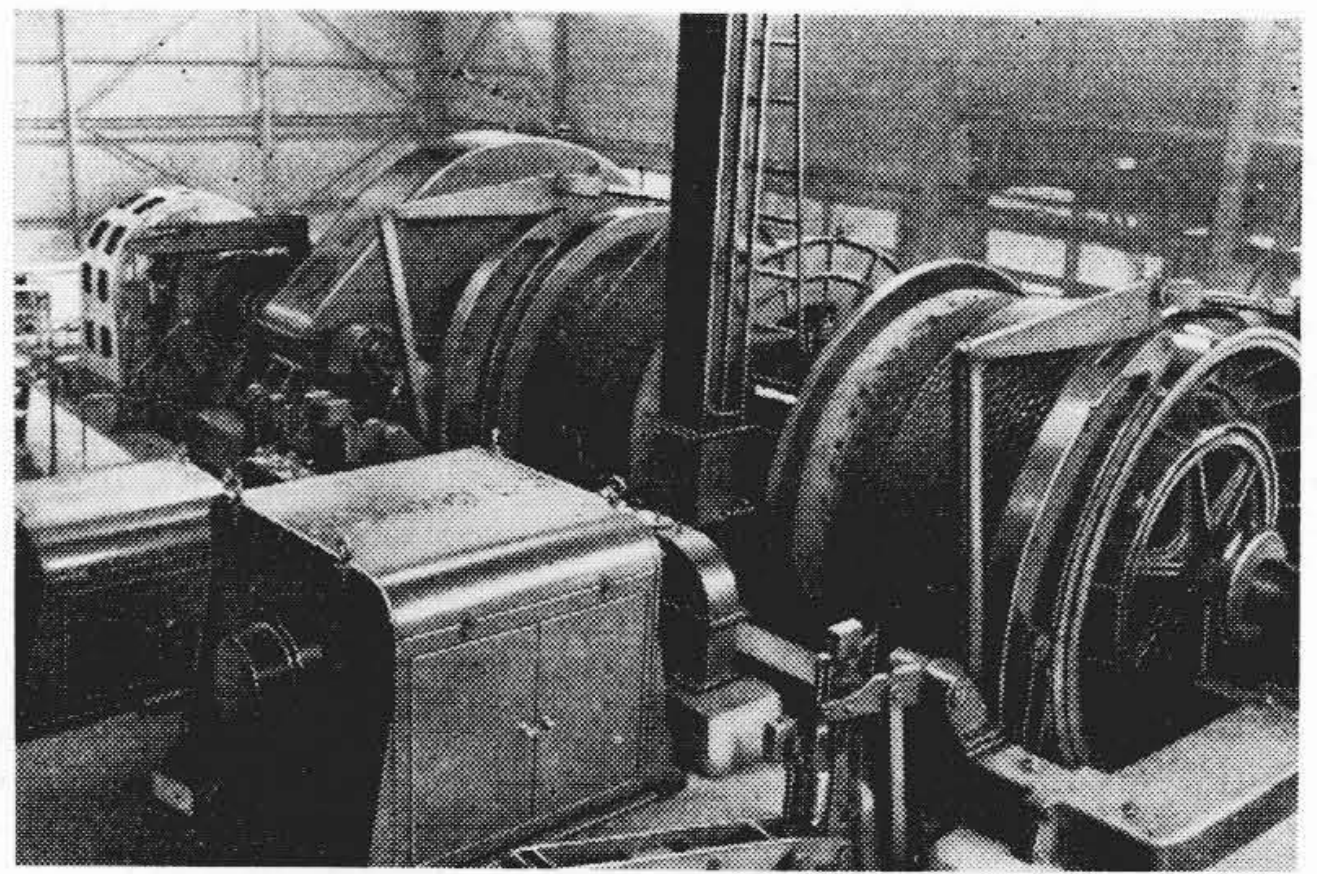


第6図 加速トルク曲線

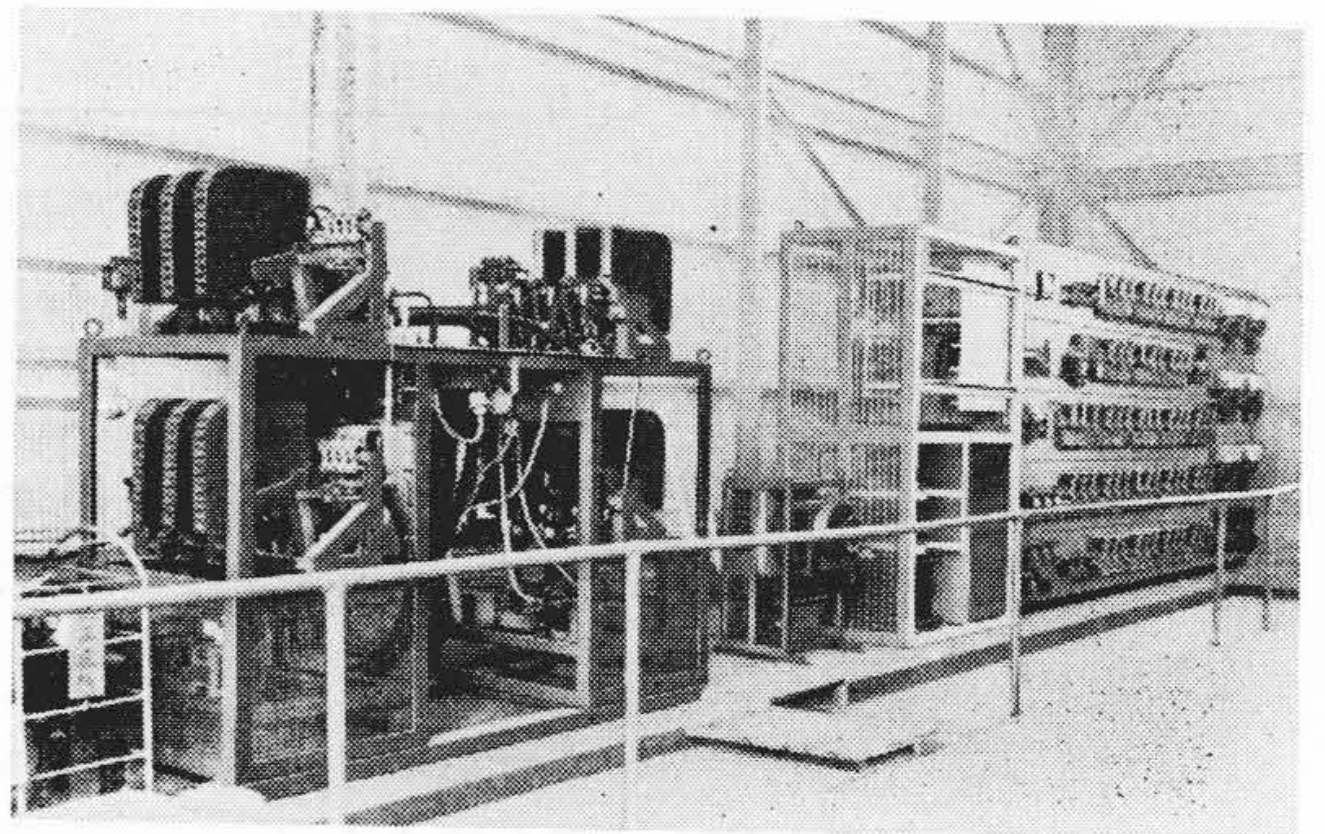


第7図 減速時5サイクルトルク曲線

速度指令抵抗器は駆動されて、与えられた減速度～時間曲線を電圧として指令する。この指令電圧と巻上機速度，すなわちパイロット発電機電圧との差電圧を磁気増幅器で増幅して第5図のように ACG-EX-LFG のそれぞれの電圧を変化せしめて制動力を調整し，さらに制動力を円滑に得るため二次抵抗を5段階に適時減ずることとした。適切な安定回路の設計により非直線要素を含む制御上むづかしい回路にもかかわらず，十分安定に所定の減速曲線を得ることができた。減速期間のトルク曲線を第7図に示す。減速終点に至れば速度が5サイクルの同期速度に近づいたことを検出

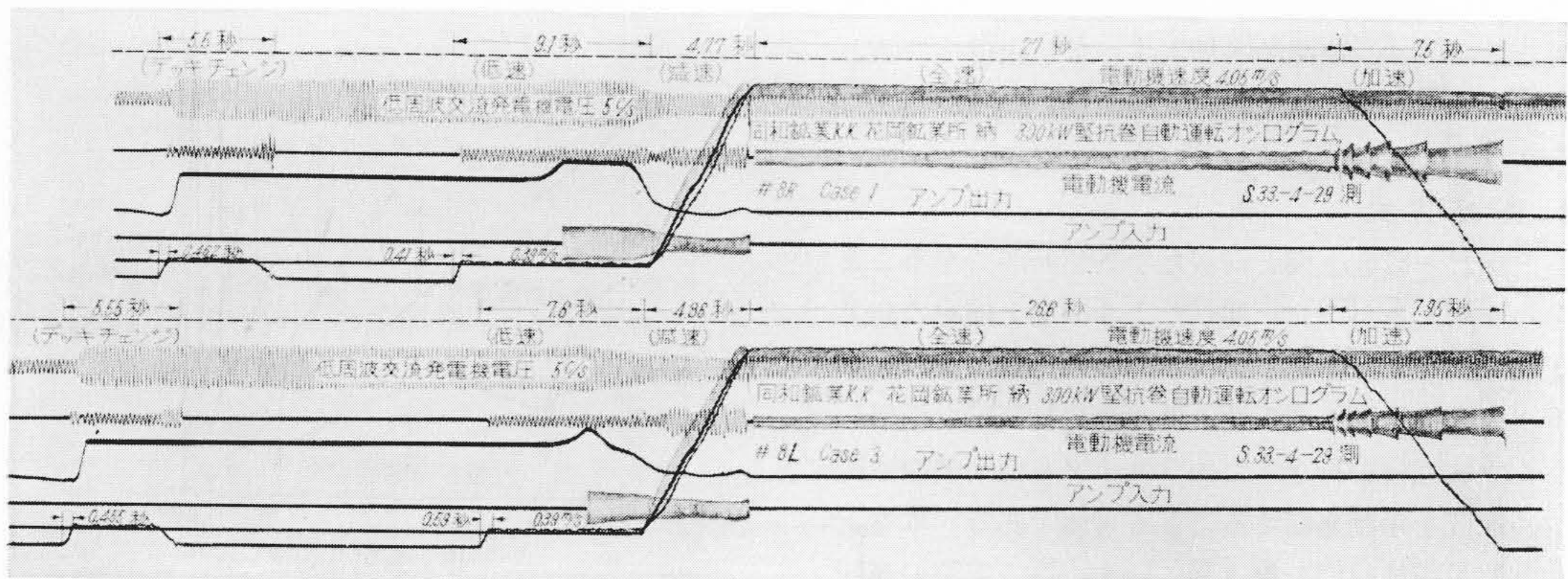


第8図 巻胴および歯車式制限開閉器



第9図 制御盤全景

し，全二次抵抗を短絡し，さらに5サイクル低周波発電機の電圧を定格電圧350Vまで上昇せしめることにより各ケースにおける負荷変動にもかかわらず安定した微速を得ることができた。停止点に至れば，坑口に設置した制限開閉器により電磁石を動作せしめ自動常用制動をかけ制動力十分となつたとき，電源を遮断し完全停止せしめる。デッキチェンジは押ボタン操作により5サイクル低周波運転を行い，制限開閉器により停止せしめる。切り換えれば5サイクル低周波電源に



第10図 自動運転オシログラム

よる立坑点検を手動にて行うことができる。また押ボタン操作による寸動運転も可能である。

第8図および第9図に現地写真を示す。

(c) 現地試験結果

最近調整試験を完了し、運転に入つた。最も稼動時間の大きなケース1と最も大きな下げ荷のケース3の運転オシログラムを第10図に示す。オシログラムに示すごとく加速時間、全速時間、減速時間、加速度、減速度など十分に仕様を満足するものである。微速時間は当初の予定より長くなっているが、これは試験当時立坑坪下の掘下げが未完であるため安全を期したものである。安定な微速運転と自動停止用制動機の動作により、着床精度は全自動運転ケースを通じ $\pm 30 \text{ mm}$ の範囲におさまり満足できる結果であつた。

3.3.2 保安回路および信号装置

一般巻上機における停電、過負荷、過巻、過速度、空気圧低下、そのほか電源投入時の各種条件のほかに保安上次の諸点が考慮されている。

(a) 70, 30% 速度監視

減速時に 70% および 30% 速度となるべき位置において、これ以上の速度であつた時に非常制動をかける。

(b) 停止時の制動不足

機械的制動開始より一定時限後においても、制動力が十分に出ていないときに非常制動をかける。

(c) ジャンクションレールインターロック

運転中にジャンクションレールを下げた場合に非常制動をかける。

(d) 減速制御の負帰還用パイロット発電機出力回路が形成されず帰還信号が十分出ないときに非常制動をかける。

本巻上機は、自動にしてかつ人員を扱うため、信号装置は視覚と聴覚を併用した安全確実な時計式（チェックインジケータ式）を採用した。この方式は信号押ボタンを押すと自己および相手方のベルを鳴らすとともに打数をも同時に指示板上に時計式に指示される。両者のいずれかより信号された数だけほかの場所で押ボタンを操作すれば前記と同様に指針が動作し、両者の指針が一致すれば巻上機の制御回路が形成され、運転可能になるとともに、信号には人員、鉱車の別、自動手動の別が含まれているので完全なるインターロックが行われ、誤操作の皆無を期した。

4. 結 言

以上低周波制御による立坑巻上機についてその概略を述べたが、交流方式は直流方式に比し制御上非直線要素を多く含み一般にむづかしい制御対象であるにもかかわらず、円滑なプログラム速度運転ができ、直流方式にも十分匹敵しうる結果を得たことは今後この方式の進展が大いに期待される。

最後に種々御援助、御協力をいただいた同和鉱業株式会社花岡鉱業所の関係各位に厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 中山, 木田: 日立評論別冊 No.8 p.69 (昭 29-10)
- (2) 横田, 角田: 日立評論 39,445 (昭 32-4)
- (3) 千葉, 渋谷, 檜垣, 横田: 日立評論 39,1009 (昭 32-9)
- (4) B. L. Metcalf, G. Cuttle: P I E E Dec. 1953 p.591
- (5) F. F. Dixon, G. L. Tiley: A I E I Dec. 1957 p.1140

最近の日立製作所社員の自動制御に関する社外寄稿一覧

(その7)

(第77頁より続く)

題 目	氏 名	誌 名	巻 号	頁	年 月
電子管式アナログ計算機とその応用 (2)	只 野	オ ー ム	45 2	264	33— 2
相関型サーボアナライザの計算機構	不 破, 猪 瀬	自動制御研究会資料	97	5	33— 2
油圧式倣い削り装置の動特性について	薄, 松 本	日 立 評 論	36 3	649	29— 3
電気倣いロール旋盤	橋 本	日 立 評 論	39 12	1,386	32—12
原子炉自動制御における機器の諸問題	鴨 井, 只 野	機 械 学 会 誌	59	484	31— 6
原子炉のシミュレータ	鴨 井	エレクトロニクス	1	40	31—10
原子炉における制御の諸問題	鴨 井, 太 組 西 脇	オ ー ム	44 10 11	1197 1351	32— 8 9

(第124頁へ続く)