

東海製鉄株式会社 納

2 タンデム冷間圧延機の電気制御

Electric Controls of Two-stand Tandem Cold Mill for Tokai Iron Steel Co., Ltd.

齋藤 奎二*
Keiji Saitō地福 順人*
Yorito Jifuku清水 広蔵*
Kôzô Shimizu

要 旨

昭和40年2月より営業運転にはいった東海製鉄株式会社納2スタンドタンデムコールドミルは2タンダムテンパーミルおよびD. C. R. (再冷間圧延)として国産第1号機で機械電気設備とも、日立製作所にて設計製作納入したもので、現在好調に運転中である。

本電気設備ではSCRを大量に適用し、理想的な電気制御を可能とした。たとえばスタンド間および入側出側の張力計制御、AGC、加減速板厚補正などの新しい制御を成功させている。本文ではこれらの電気設備につきその特長を主眼として紹介する。

1. 緒 言

東海製鉄株式会社納2タンデムコールドミルはわが国最初の極薄ブリキ圧延用のミルとタンデムスキンパスミルの兼用機で、昨年2月より営業運転にはいり現在好調に運転中である。

本設備には各種の新しい制御方式を採用している。すなわち従来の回転励磁機に代わって静止励磁器としてのSCRを採用し、高い制御性能を得ている。またタンデムスキンパス圧延、極薄ブリキ圧延において不可欠の張力計制御には磁気演算増幅器(MOA)を使用し、所期の制御をなし得たほか、磁束一定制御、加減速圧下補正、自動板厚一定制御器を採用し、歩留りの良い高い品質の鋼帯が圧延できるよう考慮した。以下本稿では電気品の概要について説明し、SCRを採用したための問題点とその解決法および結果、その他の制御についての試験結果などを報告する。

2. 設備の概要と特長

本設備は調質圧延機とDCR⁽¹⁾⁽²⁾(Double Cold Reduction)圧延機との兼用ミルで、DCR圧延機としてはわが国最初の設備で機械品電気品とも日立製作所にて設計製作納入したものである。

DCR圧延は近年アメリカにおいて極薄ブリキの製造が急速に増加し、わが国においてもこの種のミルの建設が各鉄鋼メーカーで考慮していたが今回初めて設備された。極薄ブリキは通常0.15mm以内のものが考えられ、通常のミルとは違った条件がミルに要求され、アメリカにおいても約10基ほどこの種のミルが設置されたが、現在なお研究段階を脱し得ない状態である。極薄ブリキを作るため多くの解析と実験が行なわれ種々の圧延プロセスが考えられたが、現在ではDCRの工程が採用されている。すなわちDCRは通常5~6スタンドのタンデムコールドミルで圧延された0.2~3.8mmのストリップを焼鈍炉にて焼鈍したのち、2スタンドもしくは3スタンド圧延機にて0.076~0.168mmくらいまで圧延する。このミルにおける全圧下率は35~75%で通常は50%程度の圧下が加えられる。

現在までアメリカで建設されたDCRミルにおいて、その配置、圧延速度、駆動容量、制御方式、自動板厚制御(AGC)など種々さまざまな方式が採用されたが、普遍的な方法はまだ確立されていない現状である。この意味において本設備は純国産技術によるわが国第一号機として意義深いものがある。図1は本設備の全貌を示したものである。

本設備の電気品は制御器具、制御方式などのめざましい発展により、各種の新しい制御方式が採用されている。本方式は日立研究所

* 日立製作所日立工場

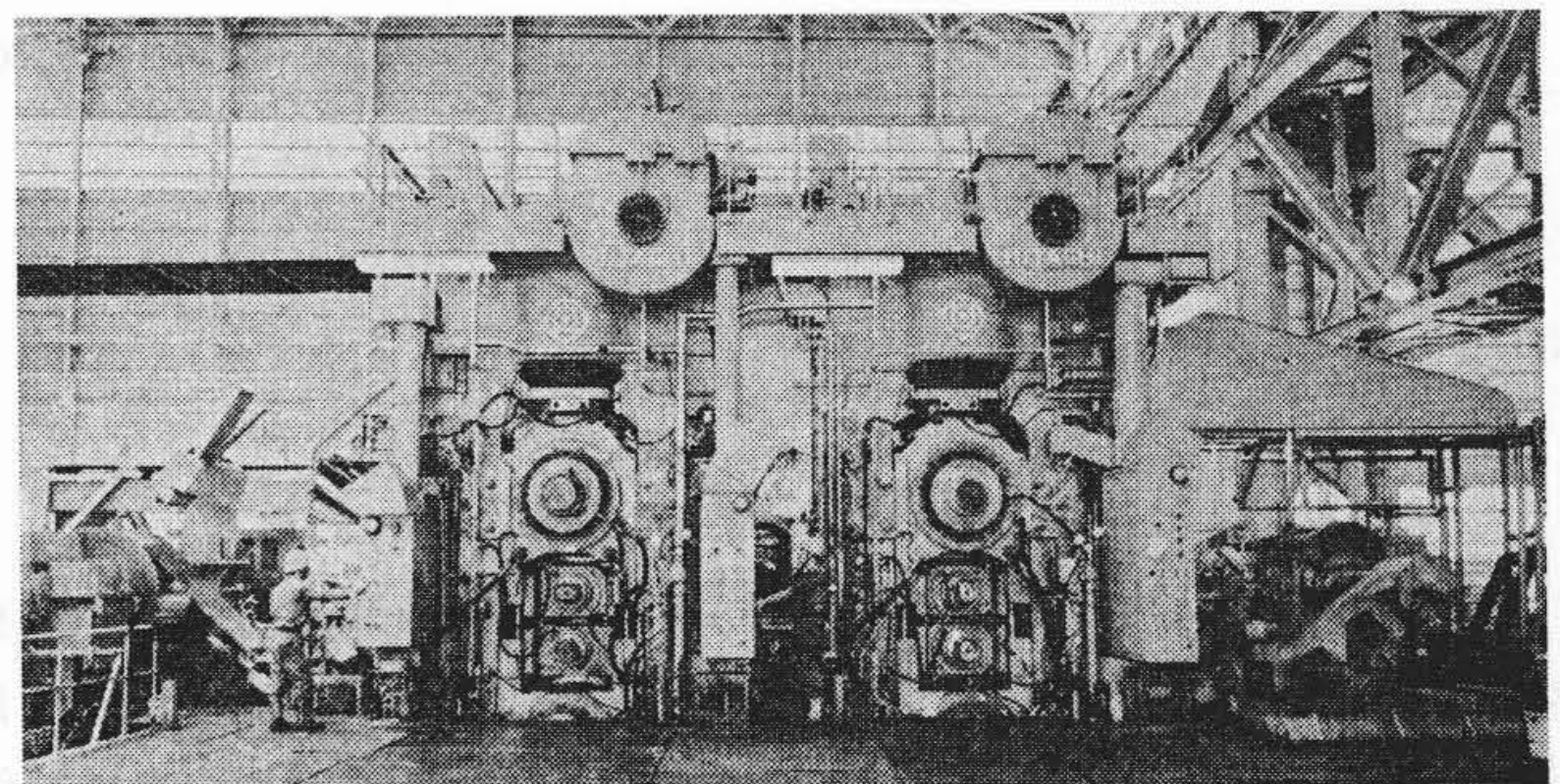


図1 東海製鉄株式会社納2タンデムミルの機械部

のコールドタンデム圧延設備による研究実験結果と、さきに納入した川崎製鉄株式会社千葉工場の6タンデムコールドミルの実績⁽³⁾とから考案されたものである。

まず第一に本設備にはシリコン制御素子(SCR)を全面的に採用した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。すなわち従来発電機、電動機の界磁として回転式励磁機を採用していたが、これらをすべてSCRにおきかえたのでSCRの特長が十分生かされた高度の制御性能が得られ、円滑な運転がなされた。調質圧延においてもまたDCR圧延においてもスタンド間張力を一定に保つ張力制御が必要である。すなわち調質圧延においてはミル自身の摩擦損失は比較的大きなパーセンテージを示し、この損失が不規則に変動するため板張力が変動する。調質圧延においてはスタンドにおける圧下率がせいぜい5%以内であるため、わずかな速度差が大きなスタンド間張力となり、ストリップを破断させることになる。このためにもスタンド間張力制御が必要となる。またDCRの圧延の特殊性から入側および出側にも張力計を設置して、張力制御を行なっている。これらの張力制御は磁気演算増幅器により各主電動機のSCR制御とあいまって高い性能が得られた。

コールドミルにおいては圧延材とロールの摩擦係数の変化、バックアップロールの油膜速度による変化などのため板厚が速度に逆比例して変化する。この板厚変動を意識的に補正して、低速度からオンゲージのストリップが生産できるよう加減速圧下補正回路を採用した。またコールドミルのスタンド電動機の制御は定電圧制御+IR補償制御が採用されているが、これはあくまでも電動機の手特性が理論的に直線関係にあることを条件として行なわれているが、実際には刷子の経年変化、刷子の非直線性、電機子反作用などのため理論値とはかけはなれ、直線関係が保たれないのが通常である。本設備ではこれらの非直線性を補正して理想的定電圧制御+IR補償制御を可能ならしめるための磁束一定制御を採用した。その

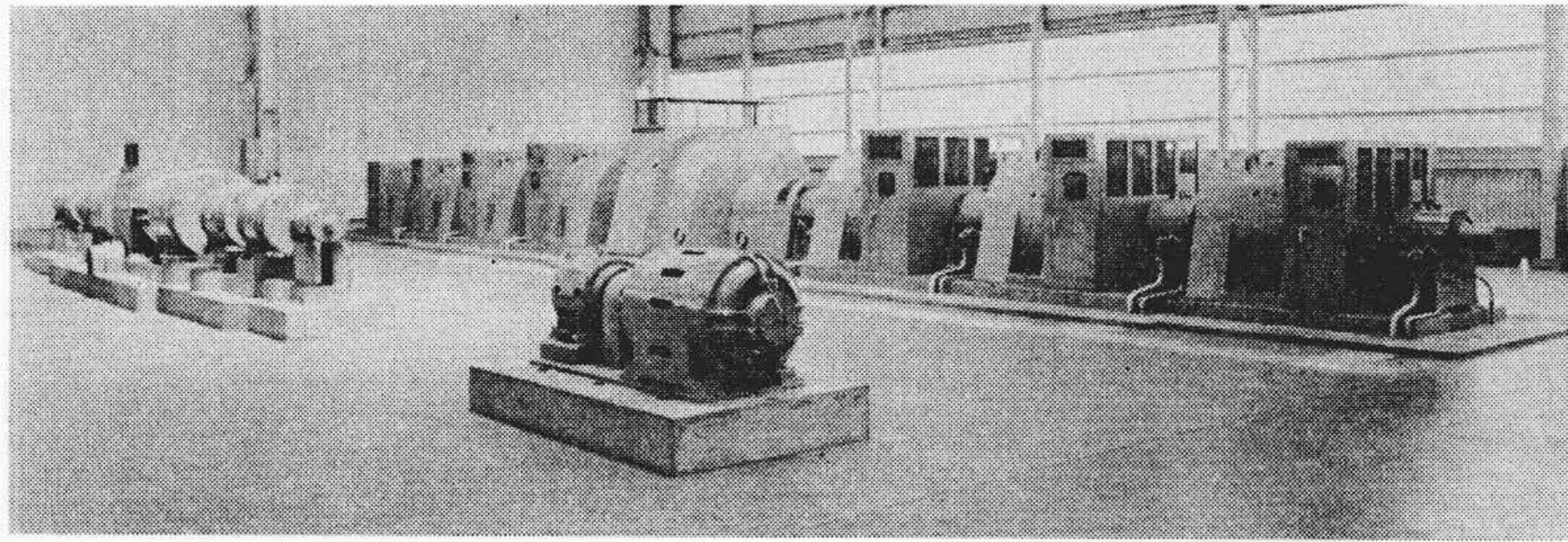


図2 M-G セット

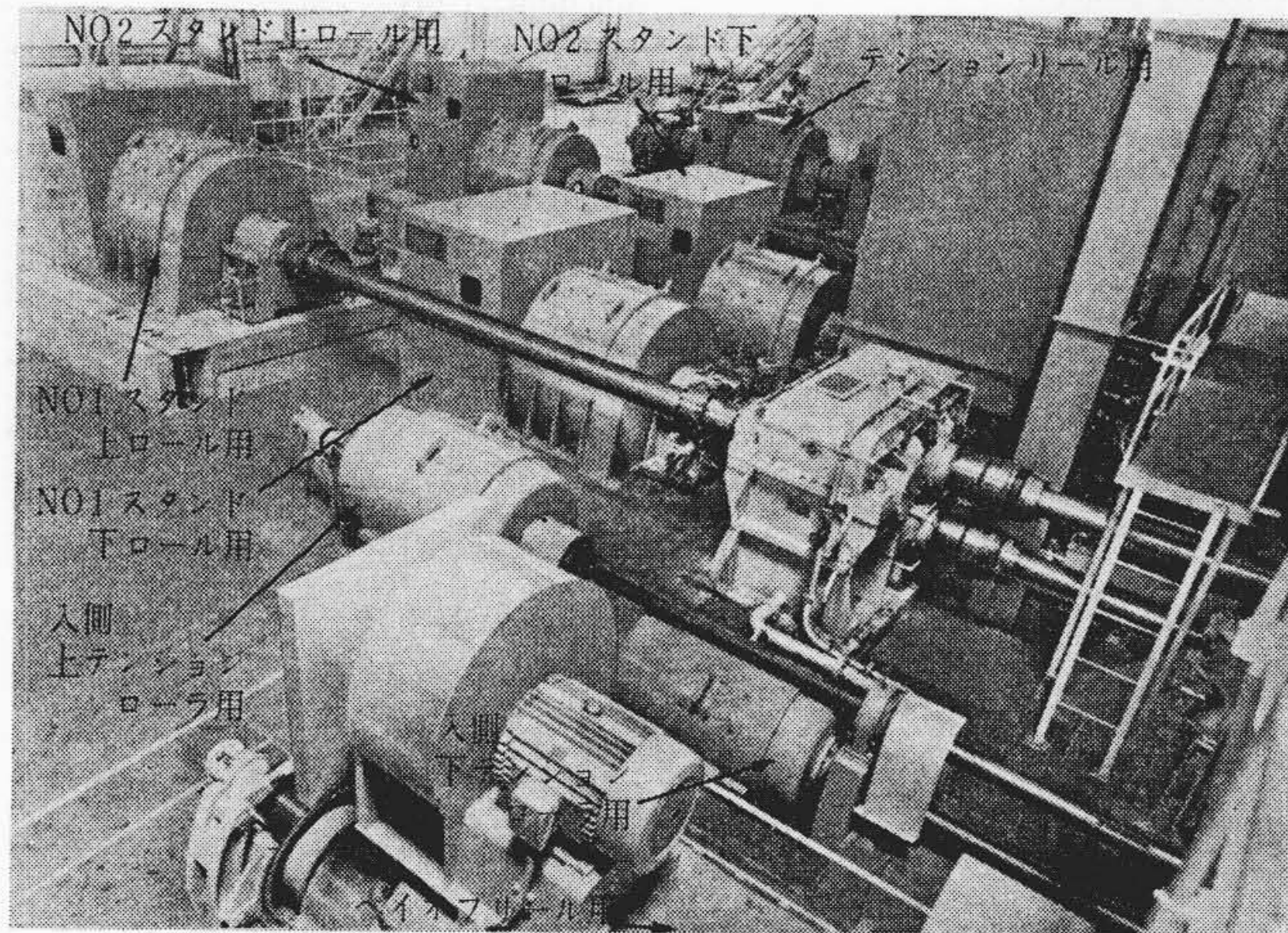


図3 主直流電動機群

ほか、無接点制御など各種の新しい制御を採用しているが、試運転開始後きわめて短期間に営業運転にはいり、現在好調に運転中である。本稿ではこれらの特長に主眼をおき以下説明を加える。

3. 回 転 機

回転機については前にも述べたように SCR で励磁するため、特にこの点には十分な配慮を払ったが、以下その特長について列記する。図2は主 M-G セット、図3は駆動電動機群を示す。また本設備の回転機仕様は表1に示すとおりである。

(1) GD² の 減 少

加速時間の短縮および制御性能の向上のため、各 DCM の電機子外径を極力きりつめ、1枚のリング状に打抜いたケイ素鋼板を用い、シャフトに羽根状に溶接されたアームの上に、積層する方式を採用した。このため No.1 スタンド DCM 用としては特大幅ケイ素鋼帯を使用した。

(2) SCR 励磁に対する考慮

スタンドおよびリール関係の DCM, DCG, テンションローラおよび圧下用 DCG は SCR 励磁とした。

励磁電圧は数倍のフォーシングにより速応性を高めているが、そのため定常状態においては、格子率が低く脈動電圧が大きいので、

(a) 電機子コイルに誘起する変圧器電圧の影響

(b) 主極コイルの温度上昇

(c) 主極コイルに発生するサージ電圧

などにつき十分検討して設計し、純直流による励磁に比して遜色ない性能および信頼性を有するようにした。

(3) 起動時のテンション変動を極小にするため各 DCM 軸受はすべてオイルリフト付とした。

さらに運転中のトルク脈動をなくするため電機子鉄心をスキューした。

(4) 上下ロール間およびスタンド間の速度ならびに負荷トルクの平衡制御を容易にするため電動機の負荷特性を合わせるよう特に考慮をはらった。

(5) ペイオフリール用 DCM はスライドベース上に設置されるため、スラストメタル付とし、軸受のシールには特に考慮を払った。

(6) DCM 据付には新たにソールプレート方式を採用し、基礎まわりをコンパクトにまとめた。

4. シリコン制御整流器 (SCR)

さきにも述べたように本圧延設備用電気品の特長の一つは主要直流発電機および電動機の界磁制御 SCR を採用したことである。次に本界磁用 SCR の仕様と問題点について述べる。

4.1 仕 様

本設備に使用された SCR の仕様は次のとおりである。フォーシング比を大きくとっているため SCR 容量は DCG, DCM の実界磁容量に比べ数倍になっている。

	対象直流機	SCR 容量
ペイオフリール	800 kW DCG	30 kW 220V 136A
ペイオフリール	350 kW DCM×2	50 kW 220V 227A
テンションローラ	450 kW DCG	20 kW 220V 91A
No. 1 スタンド	1,050 kW DCG×2	70 kW 220V 318A
No. 1 スタンド	940 kW DCM×2	25 kW 220V 114A×2
No. 2 スタンド	620 kW DCG×2	50 kW 220V 227A
No. 2 スタンド	560 kW DCM×2	20 kW 220V 91A×2
テンションリール	800 kW DCG	30 kW 220V 136A
テンションリール	2×350 kW DCM	50 kW 220V 227A
定電圧電源		60 kW 220V 273A
その他 SCR 共通仕様		
定 格	100% 連続	
定格周波数	60 c/s	
結 線 方 式	DCG 用 三相ブリッジ全波制御 DCM 用 三相ブリッジ半波制御	
冷 却 方 式	風 冷 式	
整 流 素 子	SCR ZCSM11G 150A 600 V _p SR DJ15J 200A 800 V _p	
構 成	DCG 用 SCR 1 ^s ×2 ^p ×6 ^A DCM 用 SCR 1 ^s ×2 ^p ×3 ^A SR 1 ^s ×2 ^p ×3 ^A	

表1 回 転 機 仕 様 一 覧 表

	用 途	kW	VOLT	rpm	形 式	員数	過 負 荷
電 動 機	ペイオフリール	350	375	235/1,160	EFBL-SPKK	2	125% 2 hr, 200% 1 min
	No. 1 スタンド	940	750	360/ 900	EFBL-SPKK	2	125% 2 hr, 200% 1 min
	No. 2 スタンド	560	750	360/ 900	EFBL-SPKK	2	125% 2 hr, 200% 1 min
	テンションリール	2×350	2×375	235/1,160	EFB ₃ L-SPKK	1	125% 2 hr, 200% 1 min
	上テンションローラ	225	440	475/ 950	EFCO-SP	2	125% 2 hr, 200% 1 min
	下テンションローラ	150	440	475/ 950	EFCO-SP	2	125% 2 hr, 200% 1 min
主 M-G セット	No. 1 スタンド用 DCG	1,050	750	900	EFB ₁ L-SPKK	2	125% 2 hr, 200% 1 min
	No. 2 スタンド用 DCG	620	750	900	EFB ₁ L-SPKK	2	125% 2 hr, 200% 1 min
	ペイオフリールおよびテンションリール用 DCG	800	750	900	EFB ₁ L-SPKK	2	125% 2 hr, 200% 1 min
	テンションローラ用 DCG	450	440	900	EFB ₁ L-SPKK	1	125% 2 hr, 200% 1 min
	Sy M	4,800	6,600	900	EFBDL-RD	1	125% 2 hr, 200% 1 min

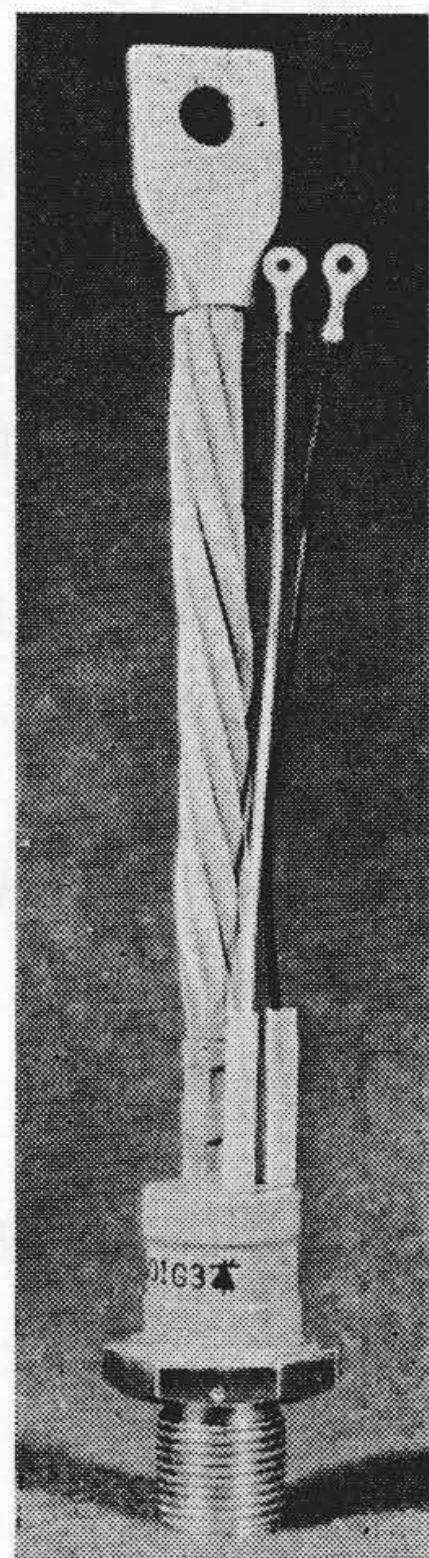


図4 ZCSM形SCR素子

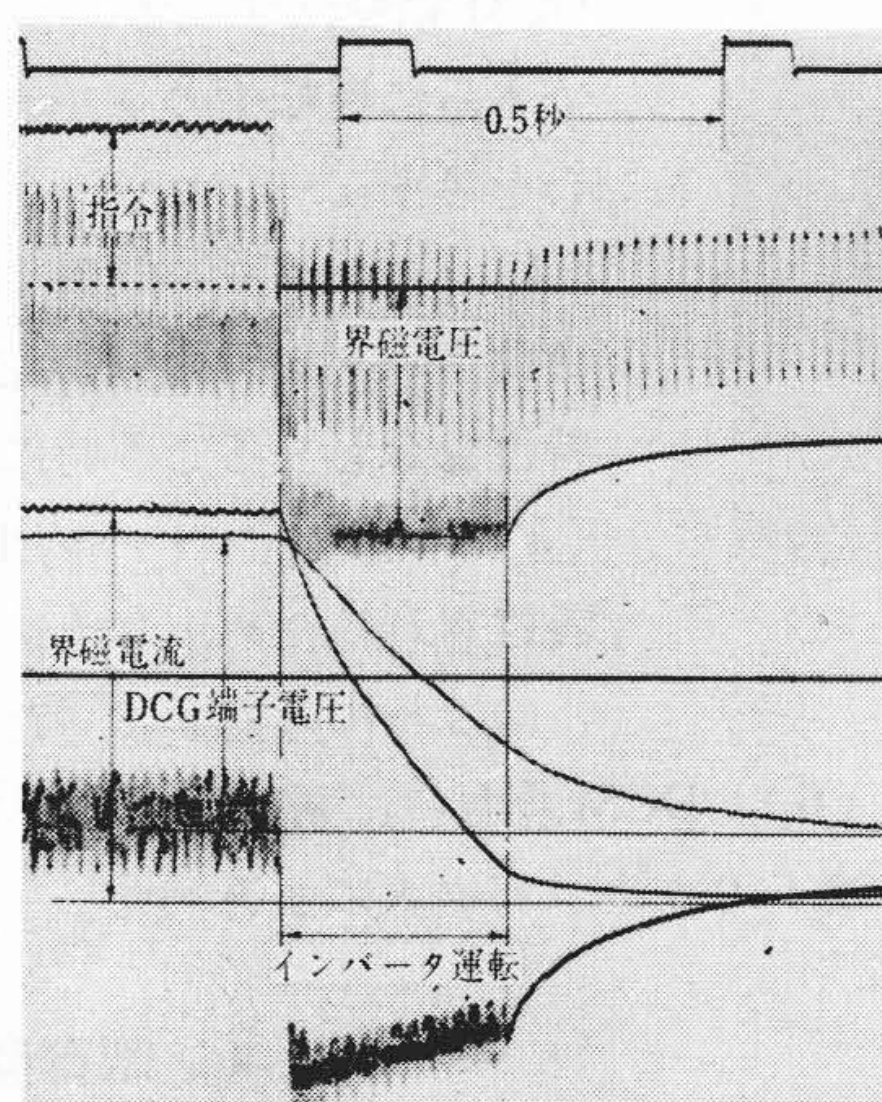


図5 DCG・急速減磁時のオシログラム

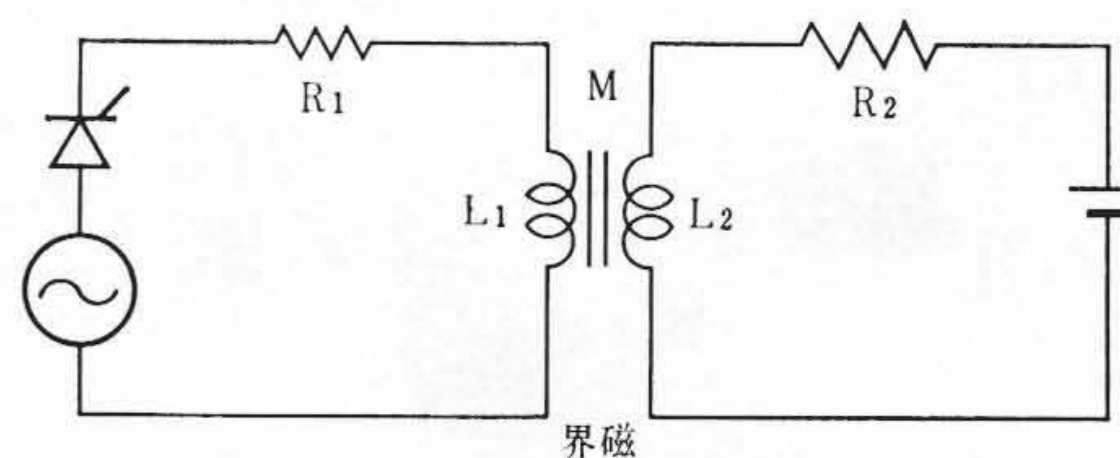


図6 2巻線界磁回路

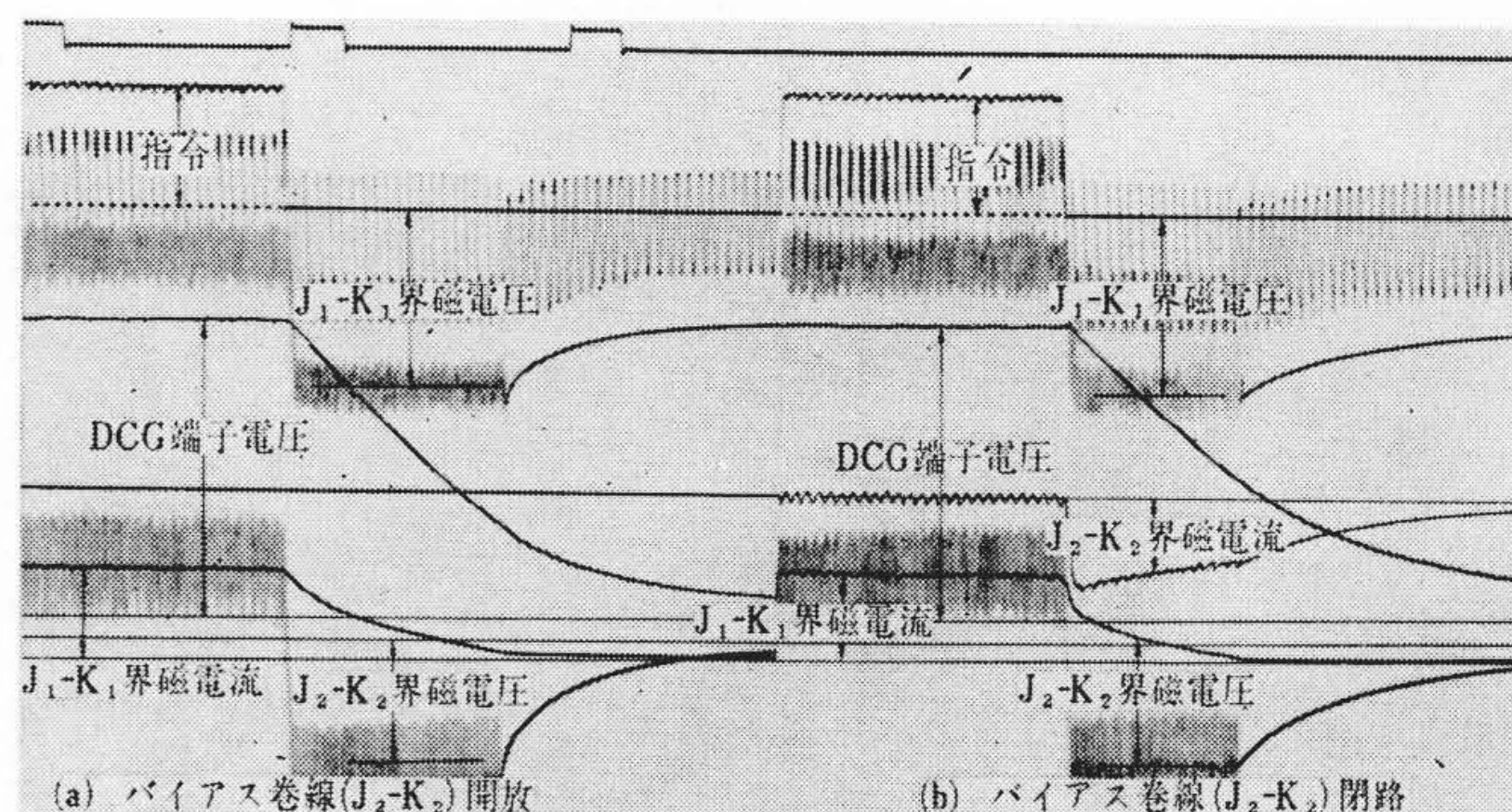


図7 界磁電圧および界磁電流

表2 三相ブリッジ全波制御方式と半波制御方式の比較

結線方式	三相ブリッジ全波制御	三相ブリッジ半波制御
結線		
α に対する制御利得	2	1
出力が零となる α	誘導負荷 (L無限大) 90° 抵抗負荷 120°	180°
インバータ運転	可	不可
ゲートによる遮断	可	不可
所要SCR数	6	3
出力電圧のリップル	小	大
値格	高	安

4.2 SCR素子

本SCRに使用した素子はZCSM11形で電力用大容量素子ではわが国で最初に量産化された素子で、多くの納入実績を有している。図4に本素子を示す。

圧延機用に使われる素子は間欠負荷による熱疲労に対する耐量が強く要求される。直流機の界磁用では主回路用ほどの間欠負荷とはならないが、DCG用では素子のベース部の温度変化はかなり大きな値となる。ZCSM形素子はすでにベース温度変化 50°C で10万回以上の等価間欠負荷試験に耐えており、十分熱疲労に対する強度をもつことが実証されている。そのほか電力用SCR素子の詳細については別文献を参照されたい⁽⁶⁾。

4.3 SCRの結線方式

界磁用SCRの結線方式はDCG用では三相ブリッジ全波制御方式、DCM用では三相ブリッジ半波制御方式を採用した。それは次の理由によるものである。なお表2は三相ブリッジ全波制御方式と三相ブリッジ半波制御方式の比較を示したものである。

まずDCGは急速界磁変化が要求されるため数倍のフォーシング比がとられているが、さらに整流器としても利得の高いほうが望ましい。また急速減磁の場合は整流器をインバータ運転して界磁に蓄積されたエネルギーを交流電源へ返還しながら減磁することが有効

である。図5にインバータ運転による急速減磁の試験結果を示す。SCRインバータ運転している場合と放電回路がダミー抵抗DRのみとなった場合とではDCGの端子電圧の変化度合に差が認められ、これは計算値とも一致する。

次にDCGは界磁巻線を2巻線として主界磁巻線の電流を最小とし他の巻線に定電圧電源より逆バイアス電流を流すことによって逆にインテグレーションの逆方向電圧を出しているが、この場合主界磁巻線の電流を小さくするほど逆バイアス巻線の電流も小さくてよいことになる。一方SCR用自動パルス移相器(APPS)は完全に 180° 移相することはできないため表2からもわかるように電流を完全に零にするためには三相ブリッジ全波制御方式にする必要がある。

なお界磁巻線が2巻線以上ある場合には次の注意が必要である。

まず二つの界磁巻線は図6に示すように結合しており、この結合が十分密であり外部回路の誘導分が少ない場合には、磁化補償過渡電流により界磁巻線は見かけ上抵抗負荷のようにになる。したがってSCRの移相制御による場合には電流リップルも無視できない値となる。図7に試験結果を示す。(a)はバイアス巻線を開放した場合で(b)は閉路した場合である。その他の条件はまったく同一であるが界磁電流のリップルには明らかに差が認められる。一方界磁の磁束は両回路の時定数の和で変化しほとんど脈動しない。図7の(a)、(b)についてDCGの端子電圧の脈動は認められない。また直流機の継鉄の過電流あるいは電機子回路もわずかながら並列界磁巻線と同様の効果を示す。

次に通常の整流器の制御特性は誘導負荷と抵抗負荷で異なる。たとえば単相ブリッジ全波制御回路では完全な誘導負荷と抵抗負荷では制御利得が2倍異なるうえに電圧が零になり制御遅れ角 α が純誘導負荷では 90° であるのに対し抵抗負荷では 180° となる。したがって他の界磁巻線がある場合とない場合で大きく制御特性が異なる。また前者では界磁電流を零にすることができなくなって逆バイアス電流が不足する場合もでてくる。このようなときにはいずれかの巻線に直流リアクトルをそう入して制御特性を誘導負荷に近づけることも行なわれる。なおこの直流リアクトルにより整流器の特性は改善するが回路の時定数はのびるので回路によってある最良値が存在する。

バイアス巻線に生ずる磁化補償過渡電流はバイアスの電源にじょ

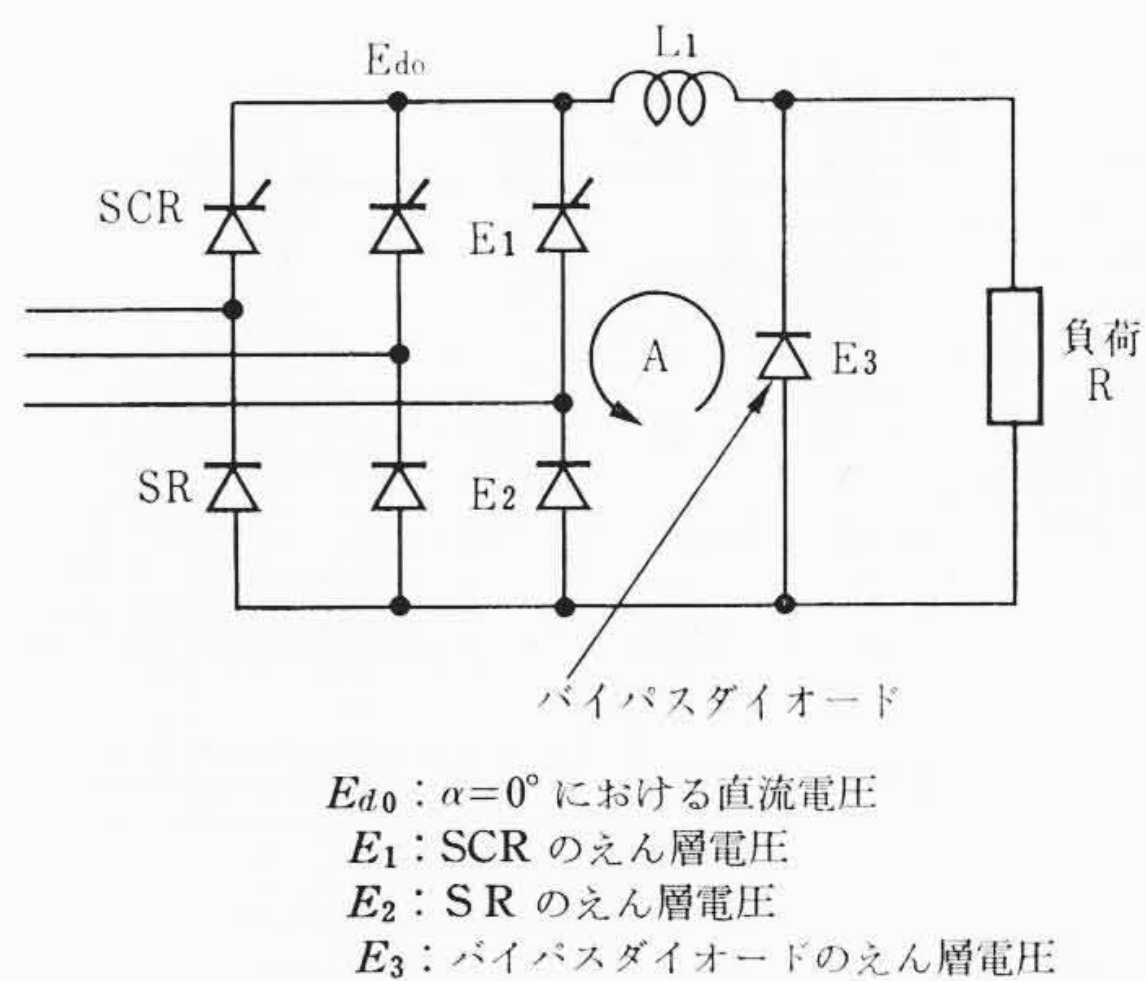


図8 三相ブリッジ半波制御回路

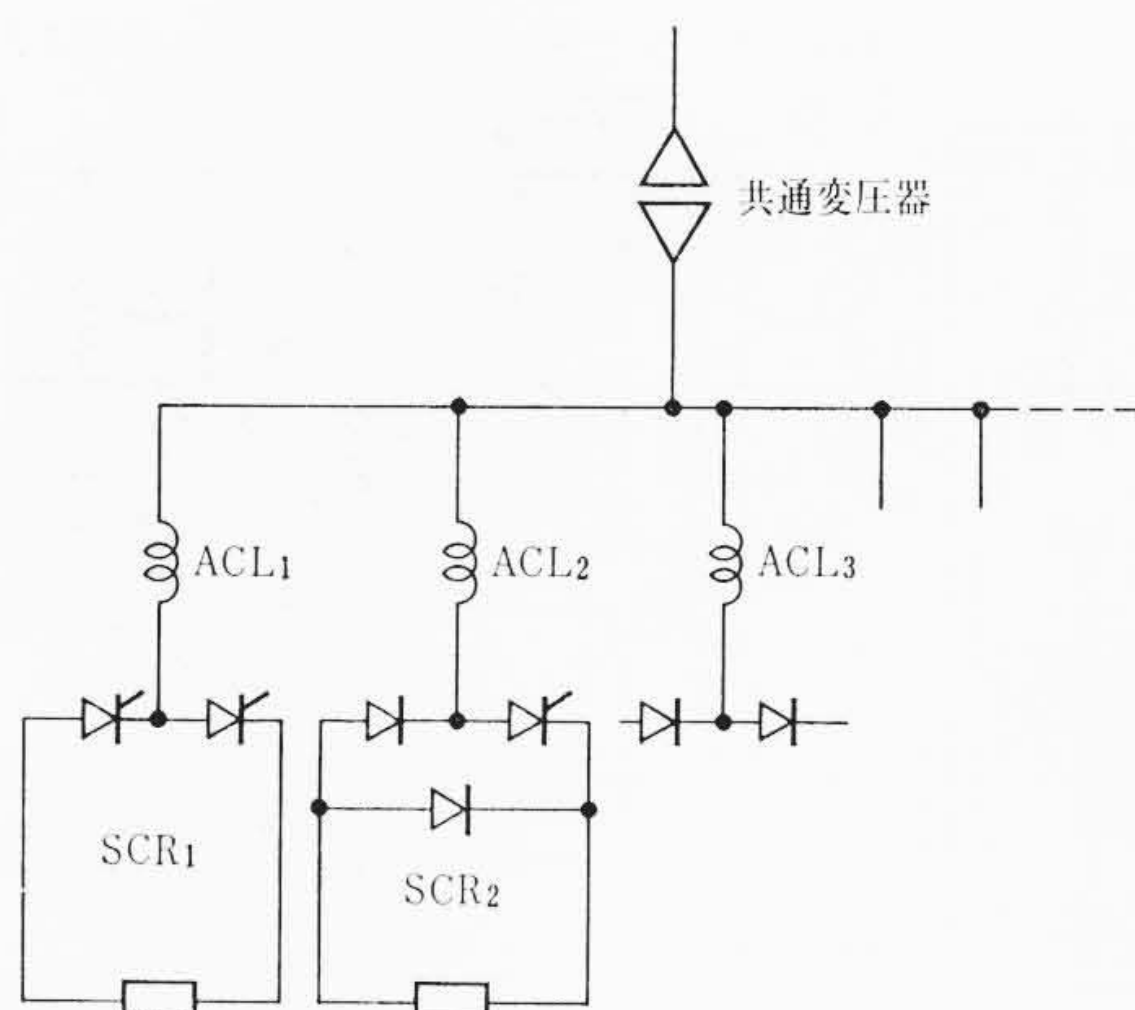


図9 共通変圧器方式

表3 SCR の 保 護 装 置

異 状 現 象	保 護 装 置
交流側開閉サージおよびその他の交流側外来サージ	交流側サージアブソーバ セレンアレスタ
素 子 短 絡 直 流 側 短 絡	ハイラップヒューズ
過 負 荷 冷 却 停 止 そ の 他 素 子 温 度 過 上 昇	素子冷却片のサーマルリレー
誘 導 防 止 dn/at 対 策	ゲート回路配線をすべてシールド線とするなど ゲート回路への誘導防止対策 ゲート-陰極間にコンデンサをそう入 アノードリアクトル

う乱を与えて他の並列回路に悪影響を及ぼすことがある。

DCM用ではコスト的な有利さから三相ブリッジ半波制御方式が採用された。

三相ブリッジ半波制御方式の問題点は誘導負荷において動作中にゲート信号が消失した場合その時点に通流していたSCRが転流できなくなって通弧状態となり α が90度のときと同一平均値の直流電圧を出して制御不能となることである。この現象は制御系のオーバーシュートにより制御入力にAPPSの移相範囲外にはみだした場合にも起こり得る。したがってこの現象を防止するため図8に示すようにバイパスダイオードをそう入して通弧状態のSCRの電流をこのダイオードに転流させて整流器をOFF状態にすることが行なわれる。この場合最も注意すべき点は図8のAの開回路のインダクタンス L_1 をできるだけ小さくすることでバイパスダイオードは整流器と密接して配置する必要がある。次に $(E_1+E_2-E_3)$ をできるだけ大きくすることが望ましい。なお抵抗負荷におけるバイパスダイオードの最大電流容量は約 $0.14 E_{d0}/R$ となる。

4.4 SCR の電源回路方式

SCRの出力電圧がすべて同一のため各SCR装置個々に電源変圧器をおくことを避け図9に示すように共通変圧器をおき交流リアクトル(ACL)で各SCR装置に給電する方式とした。このACLは次の目的をもっている。

- (1) 整流器の転流時の電源電圧降下を分担させ共通電源変圧器の電圧波形のひずみを少なくして他のSCRへの影響を阻止している。
- (2) 外来サージ電圧に対しサージインピーダンスの作用を持たせる。
- (3) 整流器の転流時のステップ電圧の立ち上がり(dv/dt)を抑える。
- (4) 素子の破壊など短絡事故時の事故電流を制限する。
- (5) 主回路電流の転流時の立ち上がり(di/dt)を抑制する。

4.5 SCR の 保 護

SCR装置の保護装置を表3に示す。直流負荷側には開閉器は必

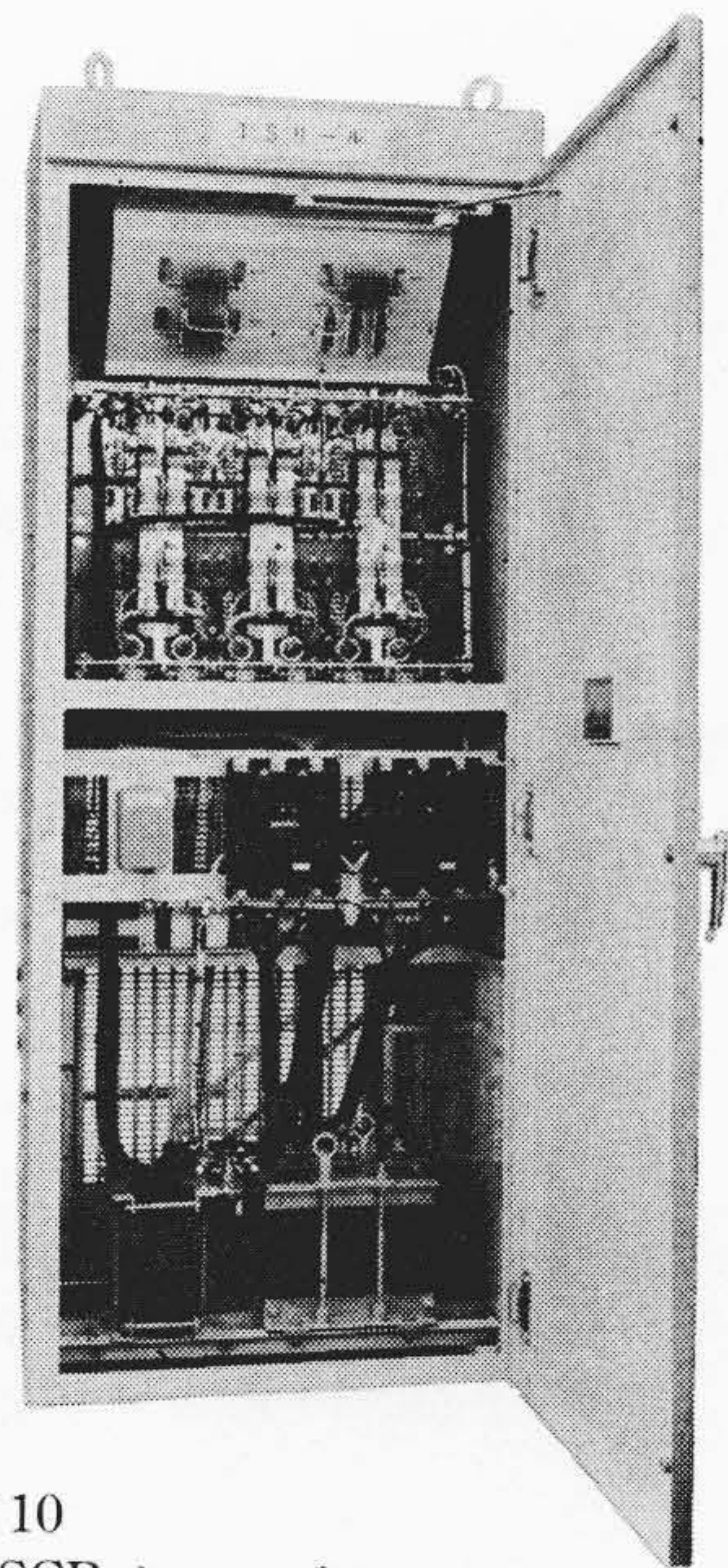


図10 SCR キュービクル

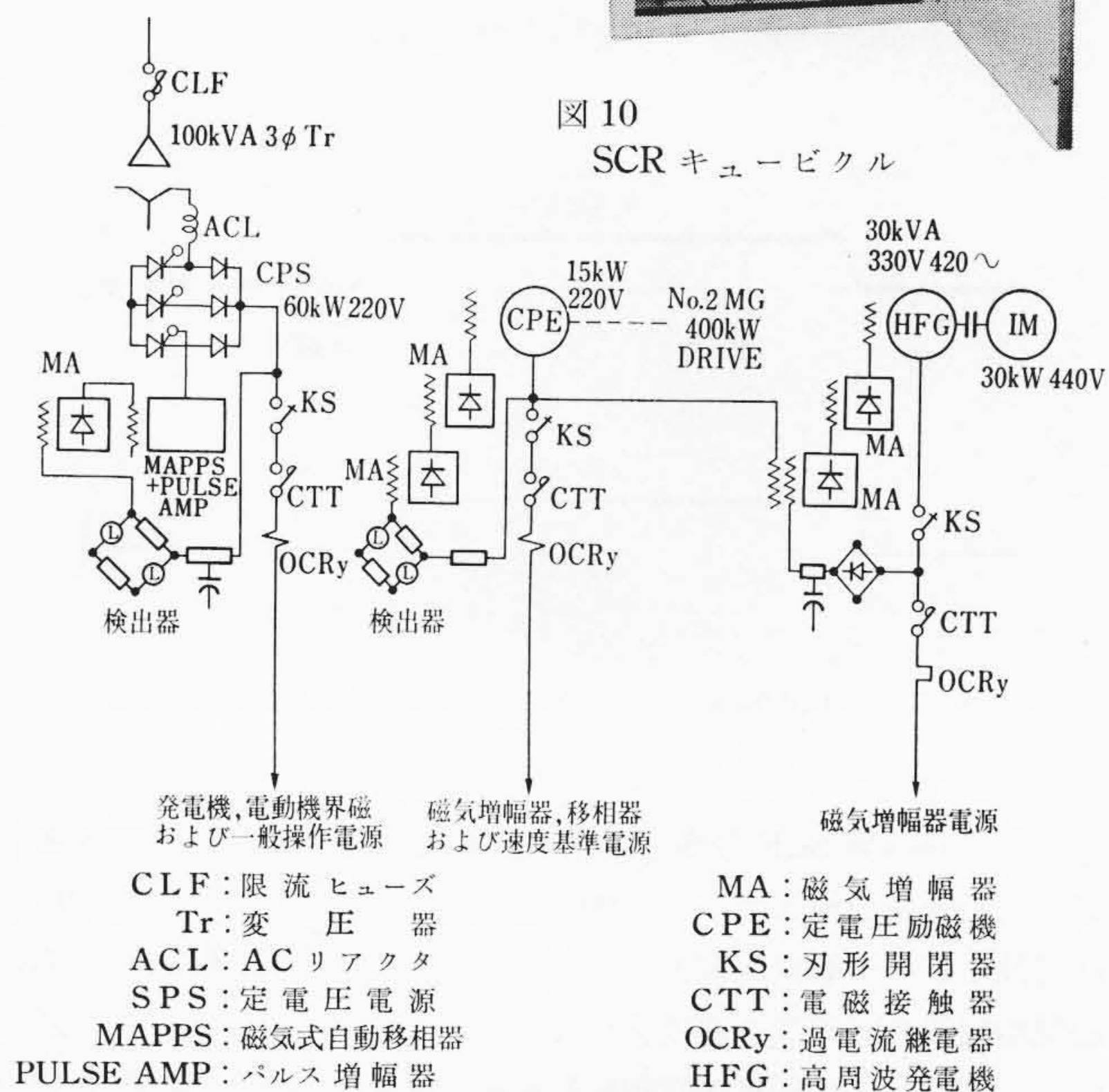


図11 基準電源部制御概略結線図

要ないので開閉サージはなく、また直流機の主回路の開閉に伴うサージ電圧の界磁回路への移行は試験の結果問題ないことが確認されているので直流側のサージアブソーバを省略した。ただし電流が断続を始めるときサージ電圧が発生するが、断続開始時の電流値が小さいのでダミー抵抗でサージ電圧は吸収できる。SCR素子のターンオン時のスイッチングパワーは動作電圧が低くまた並列素子数が少ないためアノードリアクトルをそう入することなく規定の値に押えることができた。素子の陽極-陰極間電圧の dv/dt および雑音電圧に対しては特に素子のゲート-陰極間にコンデンサをそう入して誤点弧を防止した。

本SCR装置は上記のように十分な保護が行なわれているがさらに素子の並列数は1Pで十分であるにもかかわらずすべて2Pとし、素子1個の万一の故障に対しては警報を発するのみでそのまま運転を続行し圧延機の運転を停止しない方式としてある。

4.6 SCR キュービクル

図10に本SCR装置の一例を示す。素子をはじめ器具類はすべて平面取付とし点検、保守を容易にした。

5. 制 御

5.1 基準電源部の制御とSCRの電源系統

本設備の基準電源部の概略結線を図11に示した。定電圧直流電

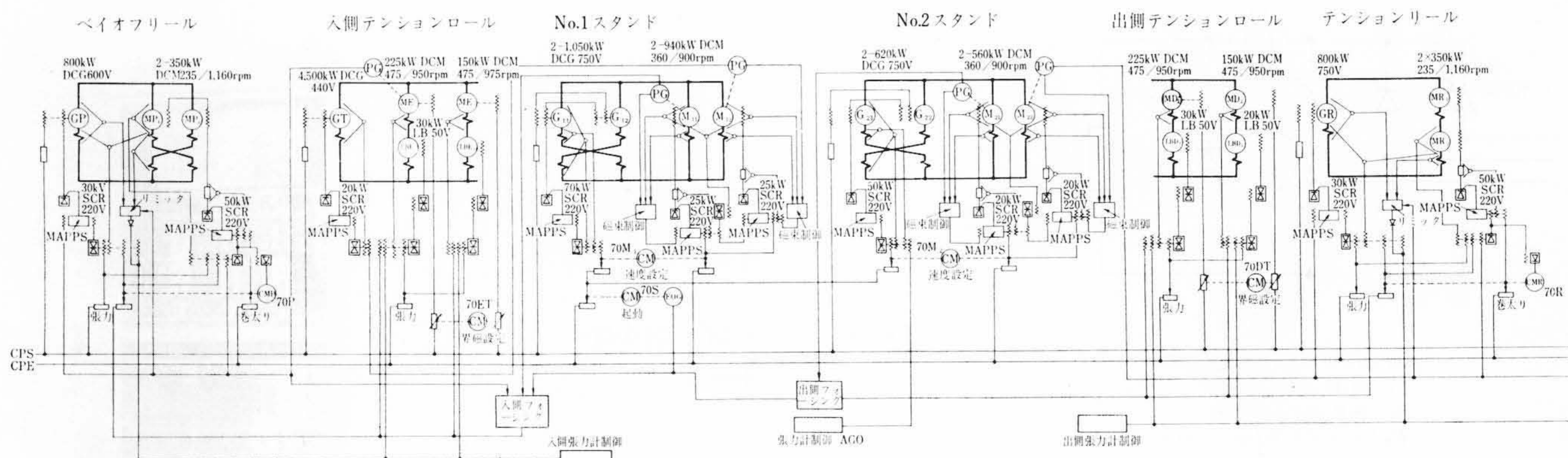


図12 全ライン制御諸元略結線図

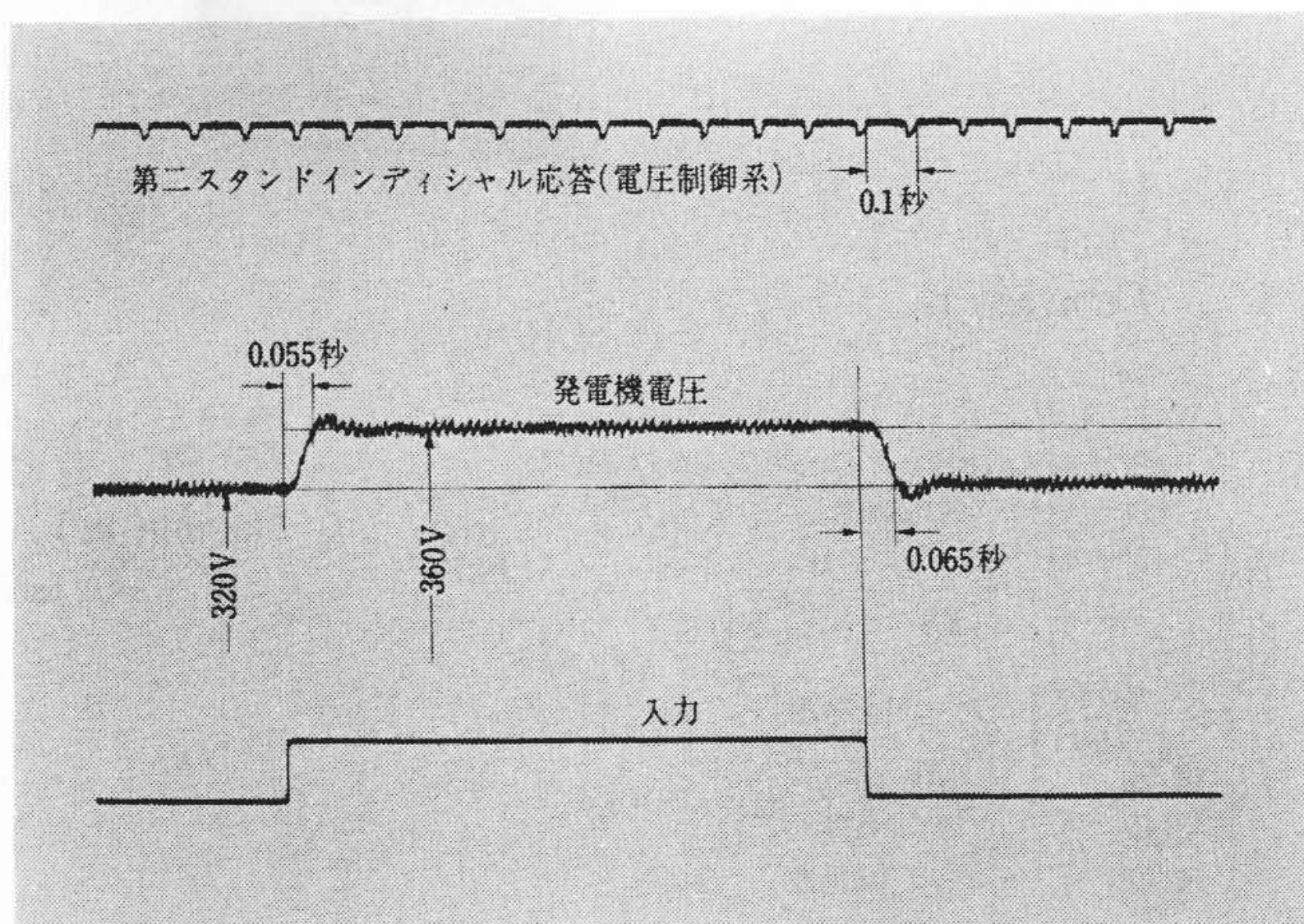


図13 AVR制御系インデクシャル応答オシログラム

源として 60 kW SCR 設備と、精密定電圧直流電源として 15 kW 定電圧励磁機を設備している。60 kW はテンションローラの界磁、操作電源などの一般直流電源として用いられ、15 kW 定電圧励磁機は磁気増幅器のバイアス速度指令などに用いられている。そのほか、磁気増幅器および磁気演算増幅器用電源として 420 V、30 kVA 高周波発電機が用いられている。60 kW SCR は三相全波整流半波制御でランプ式検出回路を用い定電圧制御を行なっている。スタンドの速度基準は電動可変抵抗器により指令を与えている。

次に SCR の電源系統であるが、SCR 電源は 2 系統に分かれ 100 kVA CPS (Constant Potential Source) と 500 kVA の界磁 SCR 電源の 2 つのトランスを通じて給電されている。各 SCR の交流側には交流リアクタをそう入して、各 SCR の転流時における電源変動を通しての相互干渉を防止している。また SCR のゲート電源には 1 kVA×3 の別電源を設備しており、電源波形ひずみによる SCR の変動を防止するためフィルタ回路を設け、過渡的波形ひずみに対しても考慮されている。

5.2 主スタンド電動機の制御

タンデムコールドミル用電動機の制御は一般に定電圧制御 (AVR) + IR 降下補償制御方式が採用されており、タンデム調質圧延機においても同様の制御がなされている。ただタンデム調質圧延機においてはスタンド間張力を一定に保つことが重要な制御とされているので、スタンド間にテンションメータを設置し、これによりスタンド間張力を一定に保つ制御が示されている。DCR 圧延においては調質圧延とは違った意味において張力制御が必要であり、本設備では入側出側およびスタンド間にテンションメータを設置し、張力制御を行なわしめている。

主発電機および電動機界磁には SCR を使用したので、SCR の高

速応性が十分発揮され、さらに磁束一定制御により理想的な AVR + IR 降下補償制御が行なわれた。

本スタンドは作業ロール駆動のいわゆる双駆動であるが、上下電動機を共通母線に接続し、電動機界磁による負荷平衡制御を行なわしめている。以下これらの制御について順次説明し、試験結果を報告する。

図 12 は本設備の全ライン制御概略結線図である。

図 12 において 70 S なる電動調整抵抗器で No. 1 および No. 2 スタンドに速度指令を与えており、このパターンにより 70 M 1 および 70 M 2 をへて、各スタンドに電圧指令を与えている。この指令電圧で発電機の出力電圧と電動機の IR 降下量との和が等しくなるよう制御系を構成している。初段増幅器には 420 V 磁気増幅器を用い、その出力を磁気式自動パルス移相器 (MAPPS) に加えて、SCR を制御している。本設備はタンデムミルであるため逆方向の運転は寸動運転以外必要ないため、発電機界磁を 2 巻線とし、一方を SCR より他方を定電圧励磁装置より逆方向にバイアスするようにしている。この逆方向のバイアス量は発電機の残留電圧、急停止の場合の回生電流による IR 降下分、逆寸動分を考慮して決定してある。

SCR の構成はさきにも述べたように発電機界磁用としては三相全波整流全波制御を、また電動機界磁においては急速な制御を特に必要としないため 3 相全波整流半波制御を採用している。全波制御と半波制御の差は半波制御においては逆方向電圧が発生し得ないことである。しかしながら SCR の使用数が少なくゲート回路も半分ですみ経済的なので広く使用されているが、ただこの回路では移相角度が広く零電圧まで制御するには 180 度の広い移相角度が必要となり、また直流電圧の脈動率、断続限界が大きく直流電圧波形中第 3 高調波を含むので注意を要する。半波制御においてはなんらかの原因でパルスが消失すると、電流が 1 サイクルで断続しない場合には無制御状態となるので、特に電動機界磁においては注意を要する。本設備では前述のようにバイパスダイオードをそう入し無制御状態になることを防止している。

スタンド発電機の制御系の性能比較には発電機電圧の 1/2 で入力信号を 4% 相当変化させたときの応答時間をもってその性能比較を行なっているが、この応答時間は現在、文献⁽⁷⁾⁽⁸⁾には回転増幅器で 0.35~0.70 秒、磁気増幅器+回転増幅器式で 0.09~0.38 秒、全磁気増幅器式で 0.07~0.15 秒という数値が発表されているが、本設備においては 0.055 秒というきわめてすぐれたデータを得ている。図 13 はそのオシログラムを示す。

タンデムコールドミルにおける最も重要な特性は加減速特性である。すなわち加減速を円滑にしオフゲージを少なくするには各スタンドの加速おくれを一定にする必要がある。特に調質圧延においてはわずかな速度差により大きな張力変動を生じ、ストリップを破断

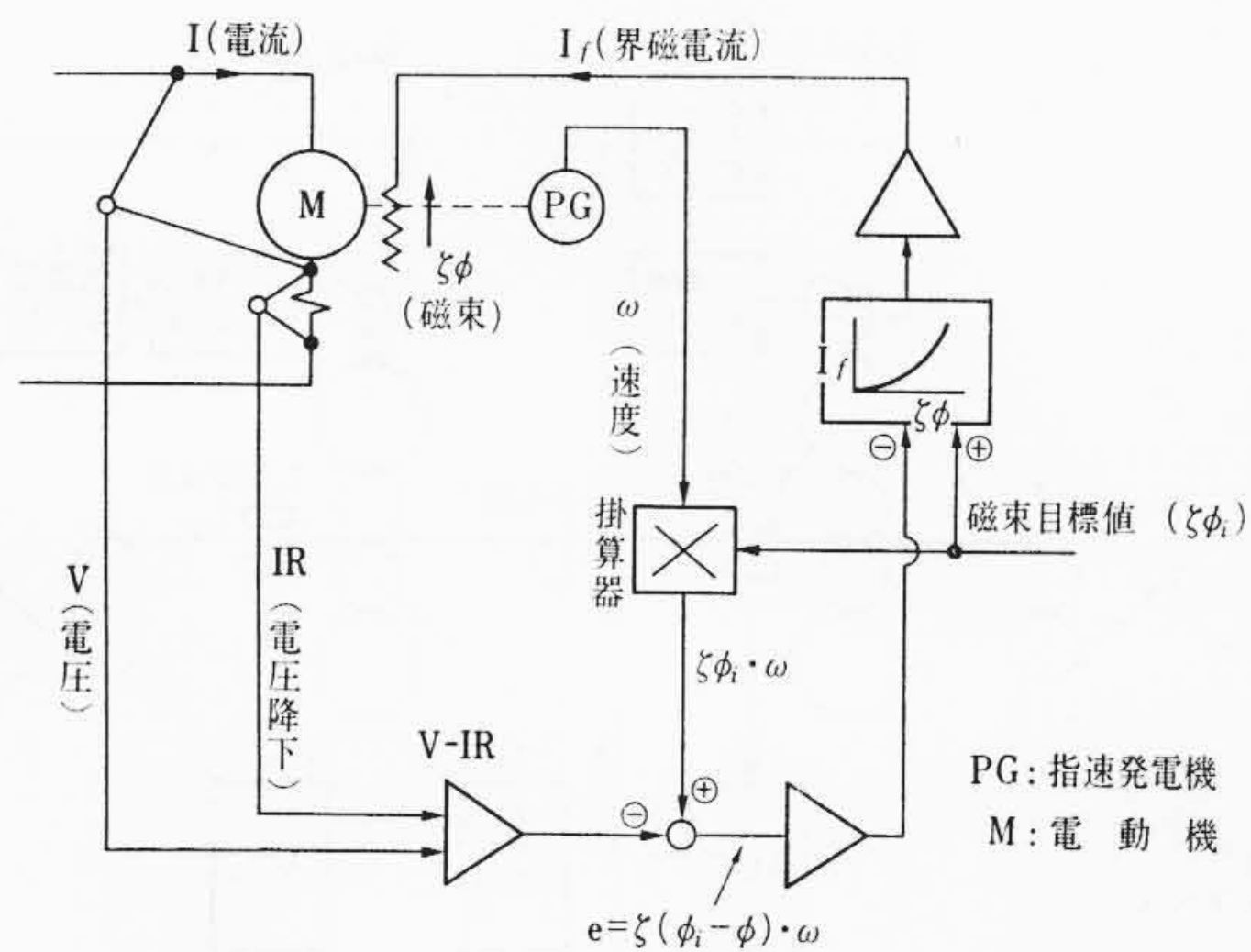


図 14 磁束制御のブロック線図

する事故となりかねない。したがってできる限り理想的な $AVR+IR$ 降下補償制御ができるようにする必要がある。一般に分巻電動機の特性は理論的に

$$\omega = \frac{V_G - IR}{\zeta\phi_0} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ω : 電動機の回転数 (rad/s)

V_G : 発電機の電圧 (V)

I : 電動機電流 (A)

R : レギュレーション (Ω)

$\zeta\phi_0$: 1 回転あたりの逆起電力 (V·sec)

であらわされるが、実際の電動機では電機子反作用による磁束の変化、刷子の経年変化および非直線性などによるレギュレーションのほか磁束が変動する。そのため(1)式は

$$\omega = \frac{V_G - I(R + \Delta R)}{\zeta\phi_0 + \Delta\zeta\phi} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ΔR : レギュレーションの変動分

$\Delta\zeta\phi$: 磁束の変動分

となる。このままでは ΔR , $\Delta\zeta\phi$ のため $AVR+IR$ 降下補償しても実際の速度は変動することになり、これがタンデムミルにおいて速度協調の欠点となっていた。従来このような影響を補償するため各スタンド電動機に分路回路を設けて、インターポールおよび補償巻線電流を界磁電流の設定に応じて変化させていたが、本設備ではこれを自動的に制御する方法を採用した。これが磁束一定制御である。すなわち(2)式より

$$\omega\zeta\phi_0 - (V_G - IR) = -\omega\Delta\zeta\phi - I\Delta R \dots\dots\dots (3)$$

であるから $-\omega\Delta\zeta\phi - I\Delta R$ を零にするよう $\zeta\phi_0$ を補正すれば理想的特性が電動機に与えられることになる。各スタンド電動機に永久磁石の界磁を有するパイロット発電機を設けて速度 ω を検出し、この ω に磁束の基準値 $\zeta\phi_0$ をかけ合わせて $\omega\zeta\phi_0$ とする。この $\omega\zeta\phi_0$ と電動機の逆起電力 $E - IR$ とを比較して両者の差がなくなるように電動機界磁を制御して、上述の磁束の乱れ、 IR 降下の非直線を補正しようとするもので、図 14 がその説明ブロック線図である。

本スタンドは上下ロールを別個に駆動する双駆動方式であるが、上下ロール電動機の飽和曲線の差、上下ロールの径の差によって生ずる負荷のアンバランスは電動機の界磁によって補正する方法を採用している。本方式は遮断器の遮断容量が大となる欠点はあるが、発電機の電圧差、線路のレギュレーション差によりかえって負荷のアンバランスを発生させる原因がまったくなく、またコールドミルにおいては圧延中の圧延油、ストリップの材質などによって発生するアンバランスはきわめて少ないので本方式を採用した。すなわち上下ロール電動機のインターポール巻線の電圧降下を比較して、そ

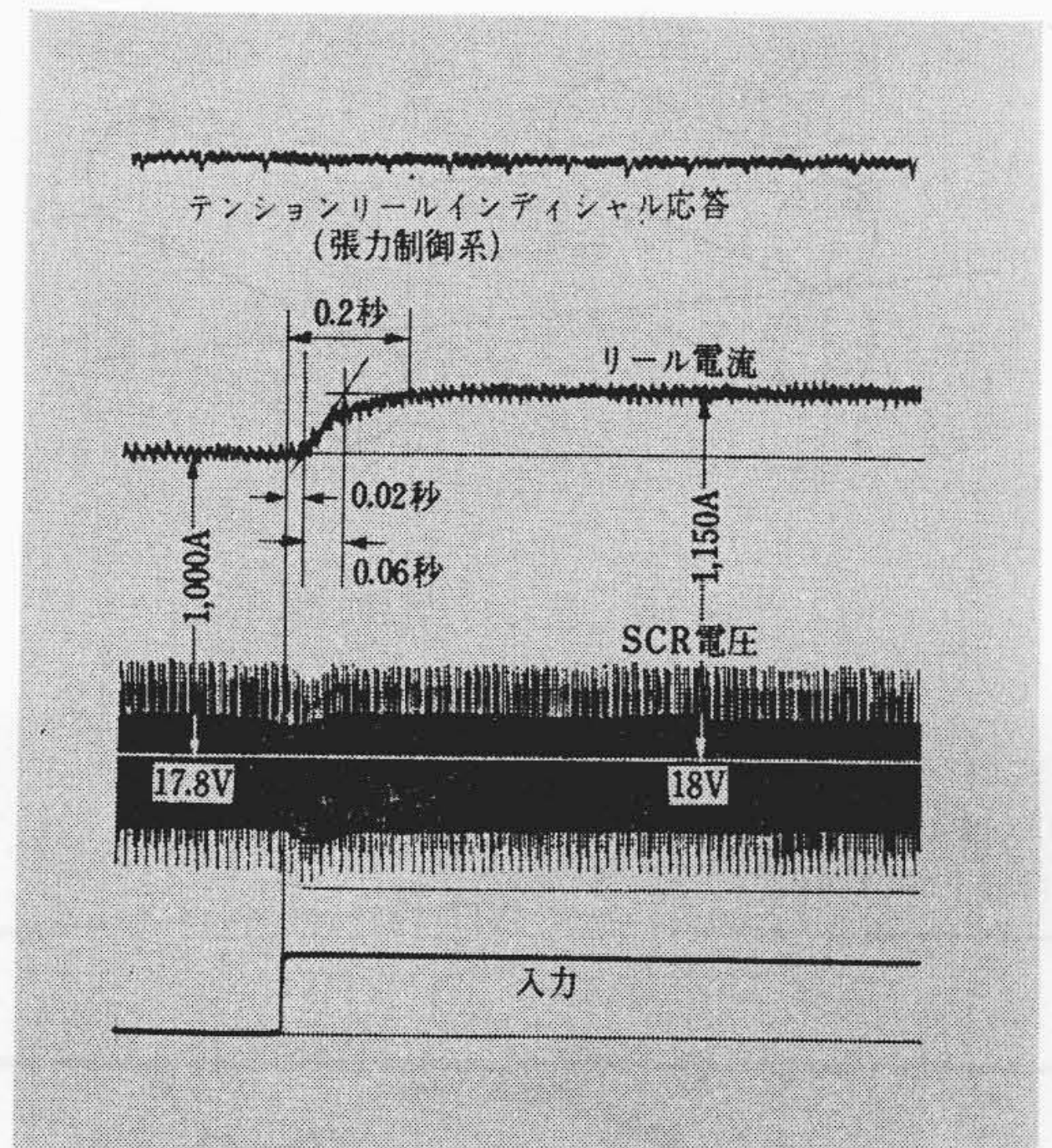


図 15 定電流制御系インディシャル応答

の偏差を MA にて増幅したのち、上下電動機の界磁電流制御のパターンを補正するようにしている。

5.3 リールおよびテンションローラの制御

調質圧延においては鋼板に大きな張力を与えて圧延するのが特長であり、ミルスタンドの前後にテンションローラが設置されている。テンションローラは上下別々に駆動する方式で、入側および出側テンションローラは一つの発電機に接続されて、入側においてはドラグゼネレータとして、出側においては電動機として動作する。テンションローラの制御は馬力相当の張力値をストリップに与えるため並列に接続された電動機の変動率を合わせるため、各電動機ごとに主回路昇圧機を設置して、電流一定制御を行なわしめている。発電機電圧はライン速度相当の発電機電圧になるよう制御されており、この場合もスタンド電動機と同様 SCR を使用して高い精度の制御が行なわれている。

本設備中、調質圧延では伸率がたかだか 4~5% であるが DCR 圧延においては最高 40% の圧下率に加わるため入側および出側のテンションローラを速度を大幅に変える必要があり、これは界磁セッティングにより行なわれている。

リールの張力制御も主ロールの速度協調と相まって重要な制御であるが、ここでは従来から行なわれている定出力制御を用いたが、制御要素として SCR を採用している点が異なっている。すなわち発電機側は三相全波整流全波制御を、電動機側は 3 相全波半波制御の SCR を採用している。電動機の定電圧制御には界磁電流の定電流制御をマイナーループとして加えているので従来よりさらに高速応性の定電圧制御すなわち巻太り制御が可能となっている。図 15 は定張力制御において、張力指令をインディシャルに変化した場合の電流の応答を示したもので、時定数は 0.05 秒である。定電流制御においてはその応答がクリティカル応答を示すのが最も圧延材に対して良好であるが、本オシログラムは若干オーバーダンピングのため最終値までの応答時間は 0.2 秒であった。

リールの張力制御は電動機の出力一定制御であって、板張力までには電動機および機械自身の損失があり、この損失分を引いた出力が板張力となって働く。この電動機の損失および機械側の損失は一定でなく、運転の時間経過、速度などにより変わるためこの変化分以内の制御は電動機の定出力制御による張力制御では不可能であるとされていた。本設備には前述のように電動機にはオイルリフト装置を具備し、静止摩擦トルクから動摩擦トルクへの変動を少なくするよう考慮しているので、実測結果では定出力制御でも板張力変

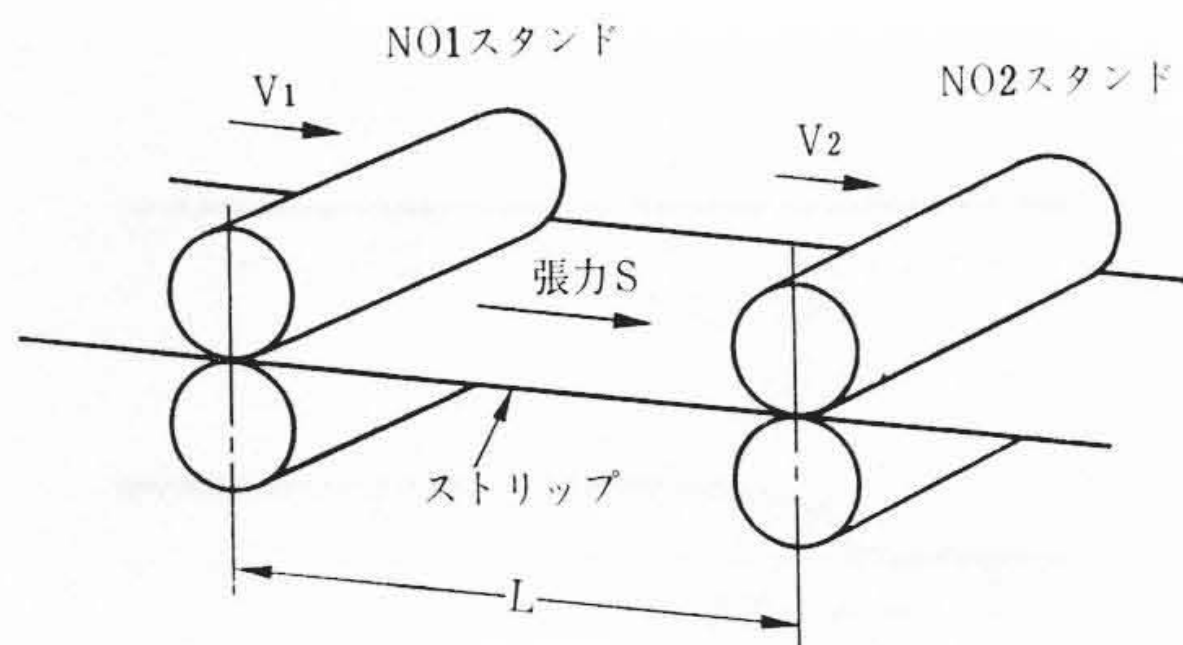


図 16 張力説明図

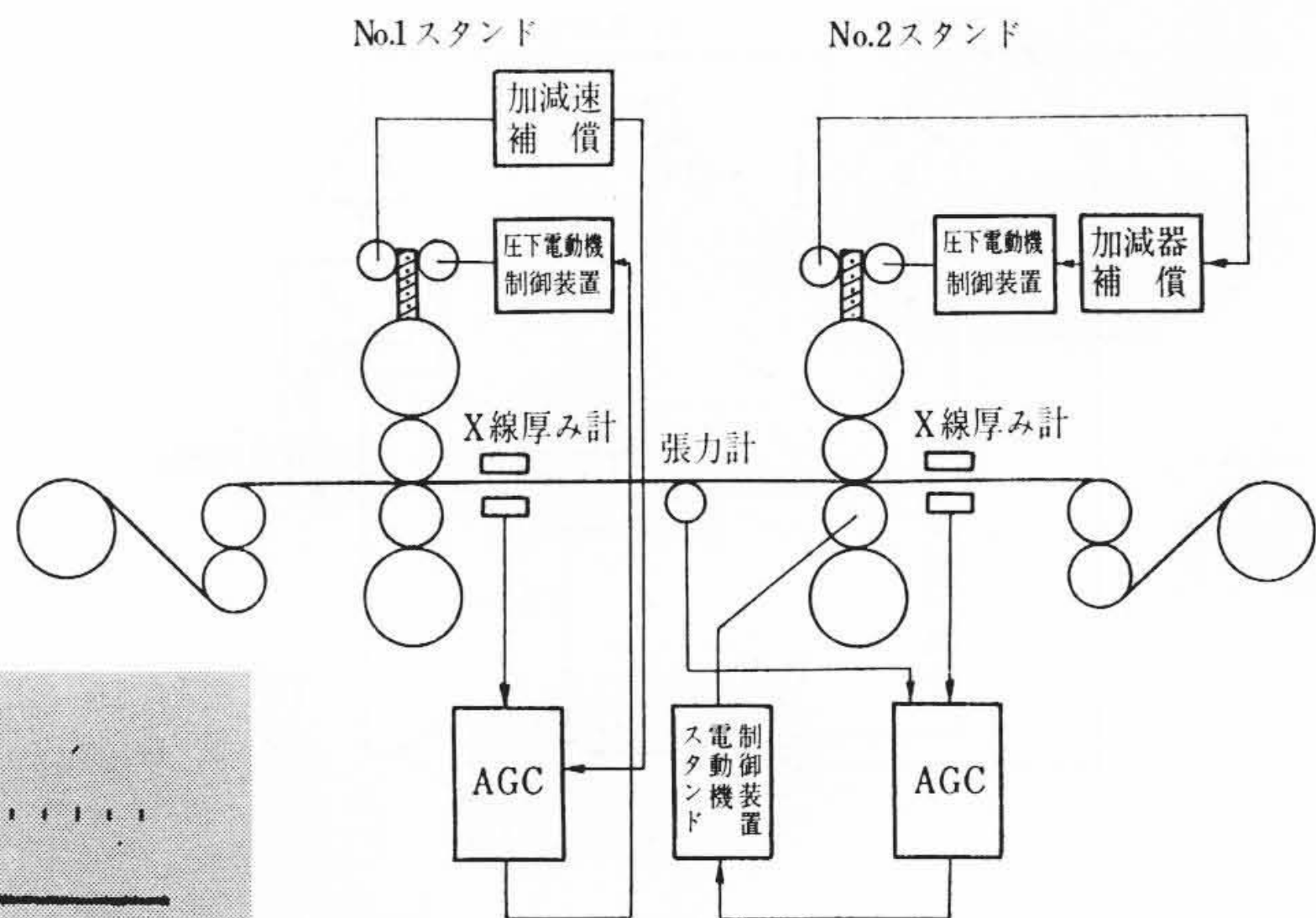
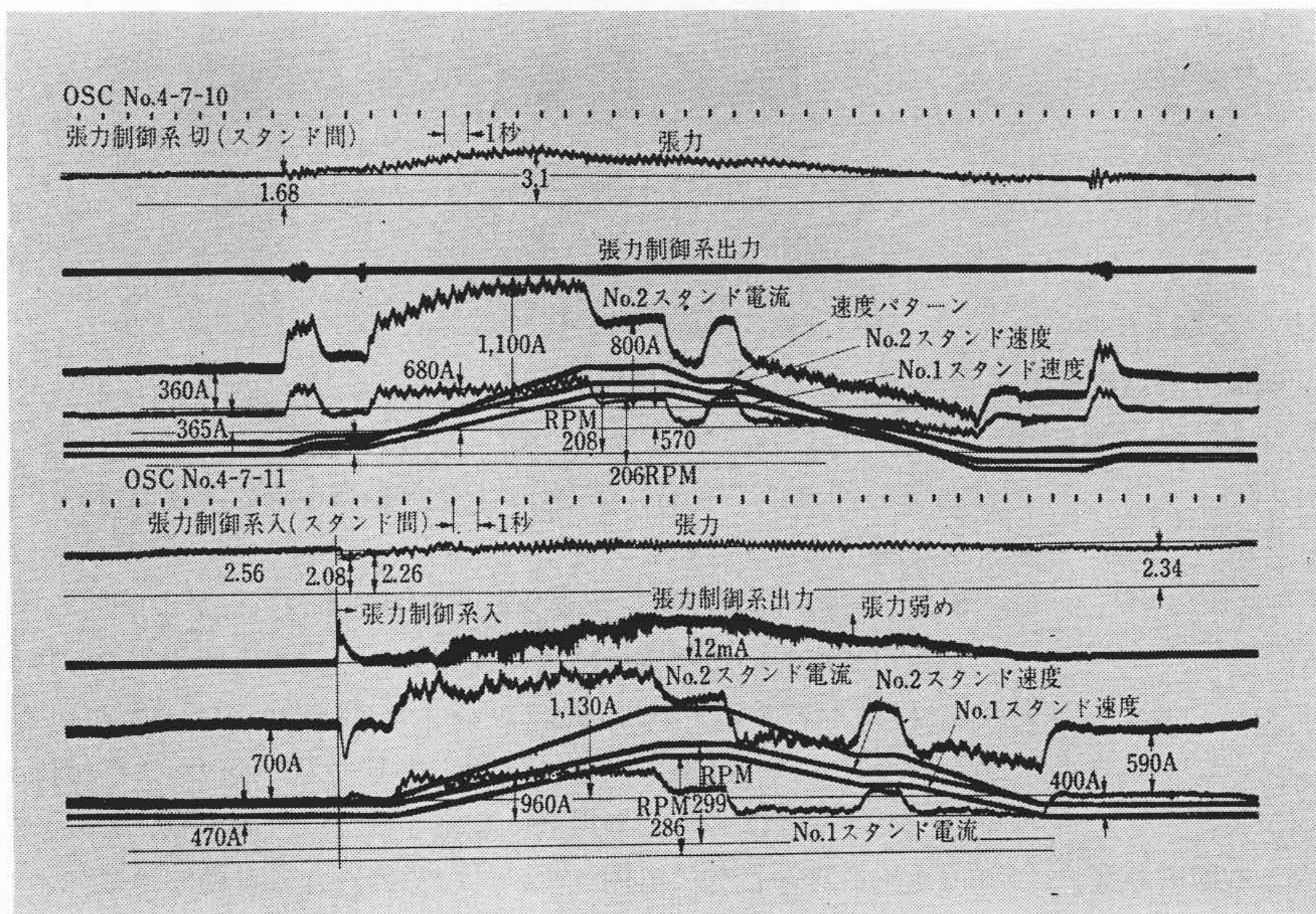


図 18 AGC の説明図



上部オシロ：張力計制御切の場合 下部オシロ：張力計制御入の場合

図 17 スタンド間張力計制御のオシログラム

動はきわめて少なく良好な値を得たが、DCR 圧延では高い張力圧延と、板形状の問題から張力計を設置し、張力一定制御を加えている。そのためスタンド間に張力計を設置して、ストリップの張力を直接検出し、スタンド間張力が常に一定値になるよう電動機速度を制御している。通常 2 タンデム調質圧延においては No. 2 スタンドをキースタンドとして、張力計制御は No. 1 スタンドに加えているのが一般の制御方式であるが、本設備では DCR ミルとしての張力計制御、自動板厚一定制御 (AGC) との関連を考慮して No. 1 スタンドをキースタンドとして No. 2 スタンドに張力計制御を加えている。

5.4 張力計制御

本設備では前述のようにスタンド間、入、出側の 3 個所に張力計を設置し、これにより適正な張力になるよう制御を加えている。この張力計制御は調質圧延を目的としたスタンド (No. 2 スタンド) においてはミル自身の摩擦係数損失が入力に対して比較的大きなパーセンテージを占めこの損失が速度に対して直線的には変化せず、速度とともに急速に増大する。それゆえストリップにあらわれる張力の電動機の出力に対するパーセンテージは通板時と高速運転時には変動し小さくなっていく。さらに複雑なことは低速では I^2R 損失が加わって運転者は張力に対してはまったくのめくら運転になることである。この張力変動は板の形状に悪い影響を及ぼす。調質圧延においてはその圧下率が少ないためスタンドの速度協調がわずかに変動すると板張力に大きな変動となってあらわれてくる。その度合いが大きい場合にはしぼり込み、もしくはストリップの破断という結果を生ずることになり、好ましくない。

いま図 16 に示すような関係位置に No. 1 スタンドと No. 2 スタンドがある場合に No. 2 スタンドの速度変動に対するスタンド間張力の関係を求めてみると次のようになる⁽⁹⁾。ただし

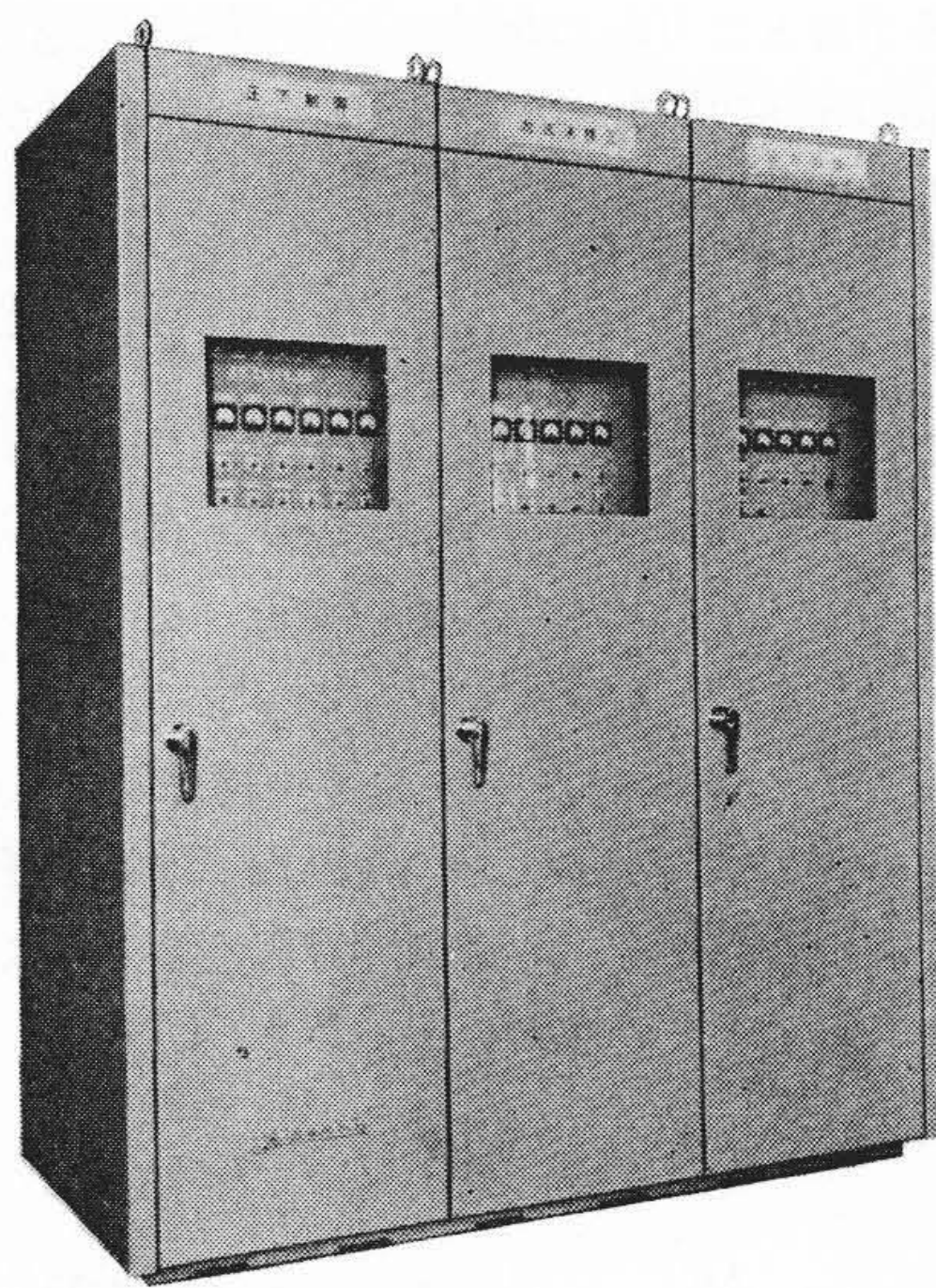


図 19 AGC および加減速圧下補正装置

- (1) 圧延材の応力とひずみに対してはフックの法則が適用される。
 - (2) 圧延材は完全な弾性体で板のあらゆる部分でひずみは一樣である。
 - (3) No. 1, 2 スタンドともピンチロールとして働く。
- の仮定をおくものとする。

$$\frac{\Delta S}{\Delta V_2} = \frac{AE}{V_1(1+a)} \left\{ \frac{1+T_M p}{\left(\frac{T_M \cdot T}{1+a} \right) p^2 + \left(\frac{T+T_M}{1+a} \right) p + 1} \right\} \quad \dots \dots \dots (14)$$

ここに、 S : ストリップ張力 (kg/m^2)
 V_2 : No. 2 スタンド速度 (m/s)
 T_M : No. 1 スタンドの機械的定数 (s)
 A : ストリップの断面積 (m^2)
 E : ヤング率 (kg/m^2)
 $T = L/V_2$ (s)
 $a = \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{T_M K_1 K_2}{\theta V_1}$
 $(K_1 \text{ は板のひずみの電動機トルクに対する係数})$
 $(K_2 \text{ は電動機回転数の板速度に対する係数})$

この式において、この $a=0$ すなわち No. 1 スタンドの負荷—速度特性がまったく垂下特性をもたない場合にはわずかな速度差で張力は大きく変化する。垂下特性の度合いに応じて速度差に対する張力変

動は変化することになる。いまここで $T_M=0$ 、すなわち No. 1 スタンドの速度制御系が理想的で遅れがないものとする(4)は次のようになる。

$$\frac{\Delta S}{\Delta V_2} = \frac{AE/V_1}{1+TP} \dots\dots\dots (5)$$

ここにおいて速度差に対する張力の利得は速度に反比例して大となり、また時定数も同じく大となる。このことはスタンド間張力計制御を行なう場合に注意せねばならないことである。

図 17 はスキンプス圧延時における張力計制御を切の場合と入の場合のオシログラムである。すなわち張力計制御を切の場合に約 85% の張力変動が生ずるようにセットした場合にこれに張力計制御を加えると、張力計制御入の過渡状態で 25% 程度の変動が生ずるが加減速中圧延中においてもまったく張力は一様に制御されていることがわかる。

5.5 自動板厚制御 (AGC)

DCR 圧延においては AGC により一様な板厚の製品を得ることができる。図 18 は AGC のブロック線図を示したもので No. 1 スタンドにおいては No. 1 スタンド出側設置の X 線厚み計より板厚偏差を検出し、圧下をサンプリング制御している。また No. 2 スタンド出側に設置の X 線厚み計により最終仕上り厚みを検出し No. 1, 2 スタンド間の張力制御によって板厚を制御している。図 19 は本装置を示す外観である。本圧延機はタンデムミルであるため AGC にて補正された圧下の補正分を次のストリップに対してリセットする必要があるのでこの装置も具備している。

コールドミルにおいてはバックアップロールベアリングの油膜の変動、ワークロールと圧延材と間の μ の変化により、低速において

板厚が大となる現象があるが、本設備ではこの低速における板厚偏差を意識的に補正し AGC に対する負担を軽減し、低速からオンゲージの板が生産できるよう、またこの圧下補正制御と AGC との関連にも特に考慮がはらわれている。

6. 結 言

東海製鉄株式会社に設備されたわが国最初の 2 タンデムコールドミル用電気品は、圧延特性の理論的解析を基とし、日立製作所日立研究所内の実験用 3 タンデムミルによる実験研究と、多くの可逆冷間ミル、ゼンジマーミル、タンデムコールドミルなどの経験から生れた、新しい制御器具を大幅にとり入れたもので、短期間の製作期間にもかかわらず優秀な結果を得ることができた。

終わりに本設備の製作にあたって終始ご指導ご協力を賜った富士製鉄株式会社および東海製鉄株式会社の関係各位に対して深謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) Alonzo, F. Kenyon: Iron & Steel Engineer, Feb. 1964 p. 69~79
- (2) 山本, 梶原ほか: 日立評論 47, 1598 (昭 40-9)
- (3) 西, 立石, 岩城, 斎藤: 日立評論 45, 1416 (昭 38-9)
- (4) 斎藤, 斎藤, 川上: 日立評論 46, 531 (昭 39-3)
- (5) 野上: OHM "SCR 活用ガイドブック" p. 135~138 (昭 39-9)
- (6) 守田, 松平, 和島: 日立評論 47, 1034 (昭 40-6)
- (7) R. G. Beadle: Iron & Steel Engineer, May 1955 p. 97~103
- (8) J. C. Peth & J. W. Brinks: Iron & Steel Engineer, June 1955 p. 69~77
- (9) W. C. Carter: Control Engineering March 1965 p. 84~87

Vol. 48

日 立 評 論

No. 11

目 次

■ 論 文

- ・無可動形流体論理素子と小形ボール盤制御への応用
- ・J P D R におけるボイド測定
- ・ベネズエラ・グリ PS297,000rpm (218,500 kW) フランシス水車
- ・日立酸素株式会社水戸製作所納 500 Nm³/h 全量液酸取り空気分離装置運転実績
- ・日立ユニットパネル形酸電盤
- ・深さ 500m の立坑における石炭の水力輸送用自動化ハイドロホイスト
- ・エレベータ制御の無接点化

- ・台湾電視公司納テレビジョン中継装置
- ・日立防爆形冷蔵庫の構造
- ・UHF-TV 送信用コーナレフレクタアンテナの特性
- 電力ケーブル特集
- ・トラフ砂埋布設ケーブルの熱伸縮実験
- ・33 kV 系統への OF ケーブルの適用
- ・アメリカ・ロサンゼルス水道電気局納 230 kV・1,000 McM 高油圧パイプケーブル
- ・超高圧 OF ケーブル用アルキベンゼン油の諸特性
- ・アルミ被コルゲート形状に関する一考察
- ・エポキシ樹脂製品のケーブル付属品への応用

発行所 日立評論社

取次店 株式会社 オーム社書店

東京都千代田区丸の内1丁目4番地
振替口座 東京 71824 番
東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
振替口座 東京 20018 番