

循環電流抑制式逆並列接続SCR静止レオナード装置

Antiparallel Connected SCR Static Leonard System with Cross Current Suppression

小 西 務*
Tsutomu Konishi

要 旨

分塊圧延機用電動機、冷間圧延機用電動機などでは加減速時間が短いこと、順逆変換の切換時間が短いことが特に要求される。従来の単基切換方式では順逆変換の切換時間が比較的長く、また交差接続の循環電流制御方式では切換時間は短い装置がやや大形となり、経済上の不利をとらなう。

これらの問題を解決するため、きわめて速応性のよい電流制御系をマイナ・ループにもつ逆並列接続の循環電流抑制形SCR静止レオナード装置を開発した。ここでは、本装置の特長、動作原理、構成、実験結果などについて報告する。

1. 緒 言

分塊圧延機用電動機、冷間あるいは熱間仕上用圧延機などでは、加減速時間が短いこと、順逆変換の切換時間が短いことが特に要求される。これに対し、従来のSCR単基切換方式では順逆変換の切り換えに比較的時間を要するので、交差接続あるいは逆並列接続の循環電流方式が用いられる。この方式では順逆変換の切り換えが円滑で切換時間が短い、循環電流を流す必要があるためSCR、直流リアクタ、電源トランスなどの容量が増加し、経済上不利であった⁽¹⁾⁽²⁾。

筆者らは以上の欠点を改良し性能の向上をはかるため、きわめて速応性のよい電流制御をマイナ・ループにもつ循環電流抑制形の逆並列接続SCR静止レオナードについて検討を行なった。この方式を用いて制御装置を試作し、実験した結果、逆転指令が与えられて逆変換電流が最大値になるまでの時間が、約20msという値で、従来の循環電流制御方式でも得られなかった結果を得ている。また、速度制御と電流制御の協調が保たれ、その他の特性も圧延機用として十分満足できる結果を得ている⁽³⁾。ここに筆者らが検討した制御方式、動作原理、特長、実験結果などを取りまとめ報告する。

2. 制御装置の特長

本制御装置は加減速特性、順逆変換切換特性、外乱に対する応答特性などの性能を良好にするために必要な、制御方式および制御素子を開発した。おもな特長は次のとおりである。

(1) 電流制御マイナ・ループ方式

きわめて速応性のよい(ms程度)、精度の高い(一巡利得≒100以上)電流制御にマイナ・ループに用いている。これによって、循環電流の抑制ならびに比較的完全な過電流制限が行なわれる。すなわち、従来の制御方式によれば、加減速時の電機子電流波形が図1(a)あるいは(b)のようであるが、本制御方式によると同図(c)のような電流波形が得られる。そのため、SCRの容量利用率が従来の方式よりも良くなり、かつ加減速時間が短縮できる。なお、制御系の一巡利得が大で、速応性がすぐれているので、外乱たとえば電源変動、負荷変動に対する定常誤差および過渡誤差を比較的小さくできる。

(2) 速度制御系と電流制御系の協調

図2(a)に示すような速度制御方式では過負荷になると電流制限器より信号が出て過電流制御マイナ・ループが動作するが、電動機速度が減少すると速度偏差信号が大となるので、過電流制御系の突き合わせ点A₂で両信号が対抗する。したがって、過渡的に

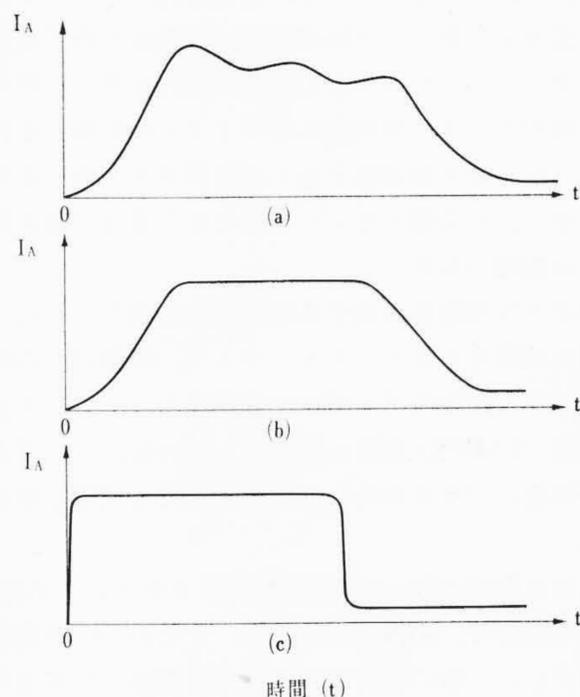


図1 加減速電流波形

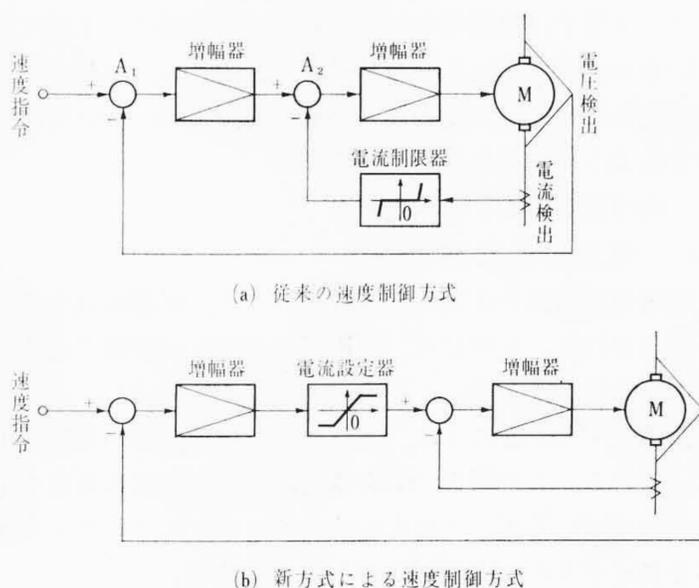


図2 速度制御方式の比較

も定常的にも過電流時に過電流制御マイナ・ループが速度制御系に打ち勝つよう一巡利得、応答速度を細工する必要がある。

筆者が立案した同図(b)の制御方式では前述の(a)の後ろ向き回路にある不感帯要素を、前向き回路の飽和要素に置換したものである。この場合、飽和要素の飽和値は制限すべき電機子電流の基準値となる。速度基準値と電動機速度帰還値の差が過大な場合、たとえば加減速度印加時、過負荷印加時などでは、電機子電流は一定の電流基準値に制御される。すなわち、このような場合には速度偏差の大小は電流基準値には無関係となる。これは、電

* 日立製作所日立研究所工博

動機軸が機械的に拘束された場合にも当然満足される。

電動機速度が速度基準値近傍になると、飽和要素の動作点は未飽和範囲に移り、速度制御系は閉回路動作をするようになる。この場合には負荷に応じた電機子電流を供給するのに必要な電流基準値となり、速度制御系と電流制御系が落ち着く。

以上のように、定常時にも過渡時にも速度制御系と電流制御系が協調して動作し、制御が円滑に行なわれる。

(3) 瞬時応答形トランジスタ式自動パルス移相器

従来の自動パルス移相器は電源の交流電圧の周期を単位として動作するように設計されていて、動作遅れをもつものが多い。たとえば、磁気式自動パルス移相器⁽⁴⁾では電圧の時間積分動作をするので、半サイクルを基準とした遅れ動作をする。特に磁気式自動パルス移相器では、原理的に半サイクルの死時間を持つ。したがって、これを電流制御素子として使用すると系が不安定になりやすい。また、不安定になった場合には、普通の進み回路によって安定化は困難である。

以上のような問題を解決するには死時間動作をしない自動パルス移相器を使用することである。そこで、制御信号の変化に対しその半サイクル期間内でも瞬時に動作するトランジスタ式自動パルス移相器 (TAPPS) を開発し使用している。この TAPPS は温度変化、雑音など外部条件の変化に対しても安定な移相特性を有している。

(4) 性能係数の大きい制御用増幅器(トランジスタ演算増幅器)

制御用増幅器は、利得/応答時間、すなわち性能係数の大きいことが望ましい。特に電流制御回路では前述した理由により、応答時間が主回路の時定数に比べ比較的小さいことが望まれる。そのため、トランジスタ演算増幅器を試作し使用している。

アナログ電子計算機用の演算増幅器では精度第一主義で設計されているが、試作したものは制御用を目的とし、回路が簡単で周囲温度変化、電源電圧変動など過酷な周囲条件においても安定に動作するよう考慮が払われている。

(5) 検出速度の大きい帰還回路

(a) 電流帰還回路

電流帰還回路では特に応答の速いこと、脈動率の小さいことが要求される。そのため、SCR 回路の交流回路側で各相に変流器 (A. C. C. T.) を用い、その出力を電圧で検出し、それを三相全波整流することにより、遅れのない精度の高い電流検出を行なっている。この場合、SCR 電流は特有の周波数成分をもつ脈動を含んでいるが、これをろ波するとともにインディシャル応答をよくするために並列 T 形ろ波器を使用している。

(b) 電圧帰還回路

速度制御系では速応性よりも、むしろ精度の高いことが要求される。そのため速度制御系の一巡利得が非常に大きくとられるが、そのため帰還回路の脈動率を比較的小さくしなければならない。この脈動も電流と同様に特有の周波数成分をもっているため、ここにも並列 T 形ろ波器を使用している。

以上総合すると、性能係数のすぐれた種々の制御素子を開発し、これにより応答の速い電流制御マイナ・ループを実現して、順逆変換の切換時間の短い循環電流抑制式としていたるところに、本制御装置の特長があるといえよう。

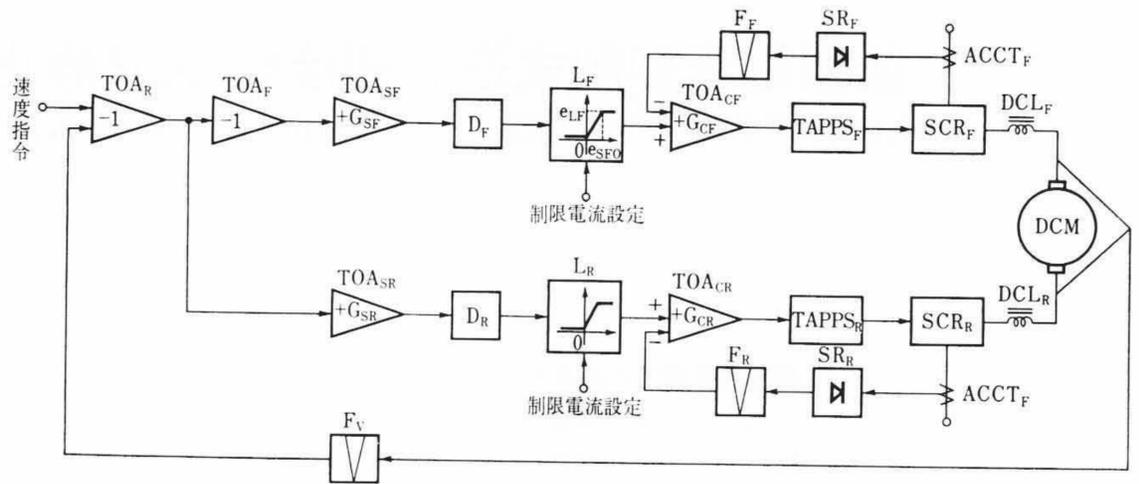


図3 循環電流抑制、電流制御式 SCR 静止レオナード制御装置構成図

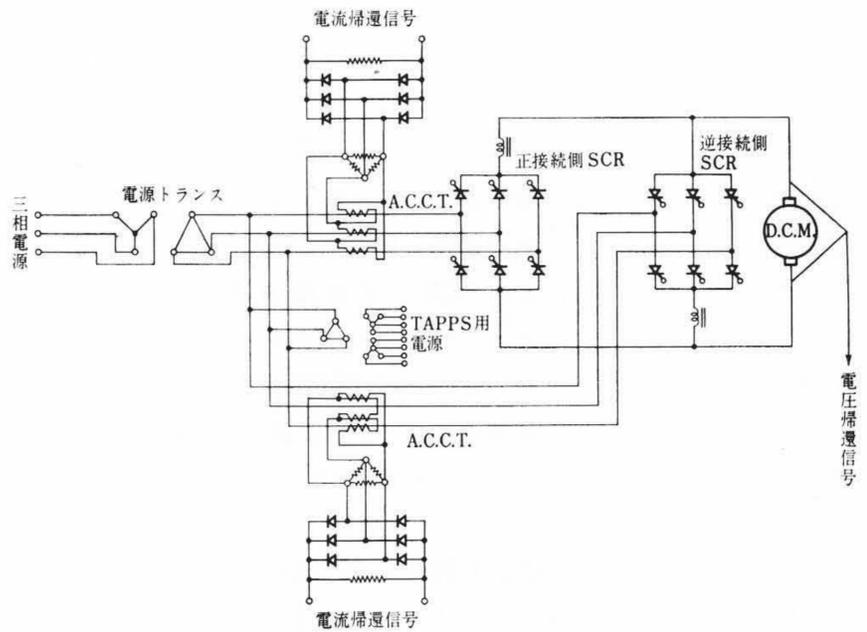


図4 主回路接続と帰還信号回路

3. 構成および動作原理

前述したように、分塊圧延機の主電動機、圧下電動機、エツジヤ電動機、切断用電動機などのように正逆転時間の短い、あるいは負荷変動に対し急速でかつ円滑な順逆変換動作が要求されるような制御対象を目的に制御系を構成している。以上のような制御対象には、普通電動機電圧制御と電機子降下補償制御が併用されるので、本構成もそれに準じている。ただし、本報では電機子降下補償制御は行なわない。

3.1 構成

制御系全体の構成を図3に示す。同図において、三角形のブロックはトランジスタ演算増幅器で、このうち TOA_R、TOA_F は符号変換器、TOA_{SF}、TOA_{SR} は速度制御用増幅器、TOA_{CF}、TOA_{CR} は電流制御用加算器である。

電動機主回路および帰還信号の検出回路は図4のようになっている。三相全波制御 SCR 回路が2組逆並列接続されていて、各 SCR 回路に直列に直流リアクタがそう入され、循環電流を平滑している。同図の構成から明らかなように、電圧および電流の検出には遅れがない。

3.2 動作原理

動作は基本的には SCR が順変換器として動作する場合と、順変換状態から急に逆接続側の SCR に切り換わり逆変換動作をする場合の二つに大別できる。

3.2.1 順変換動作

順変換動作の一例として、速度指令が急に印加された場合について考える。このとき、速度基準値 (速度指令) と速度帰還量の差、すなわち速度偏差量が図4の TOA_R あるいは TOA_F により検

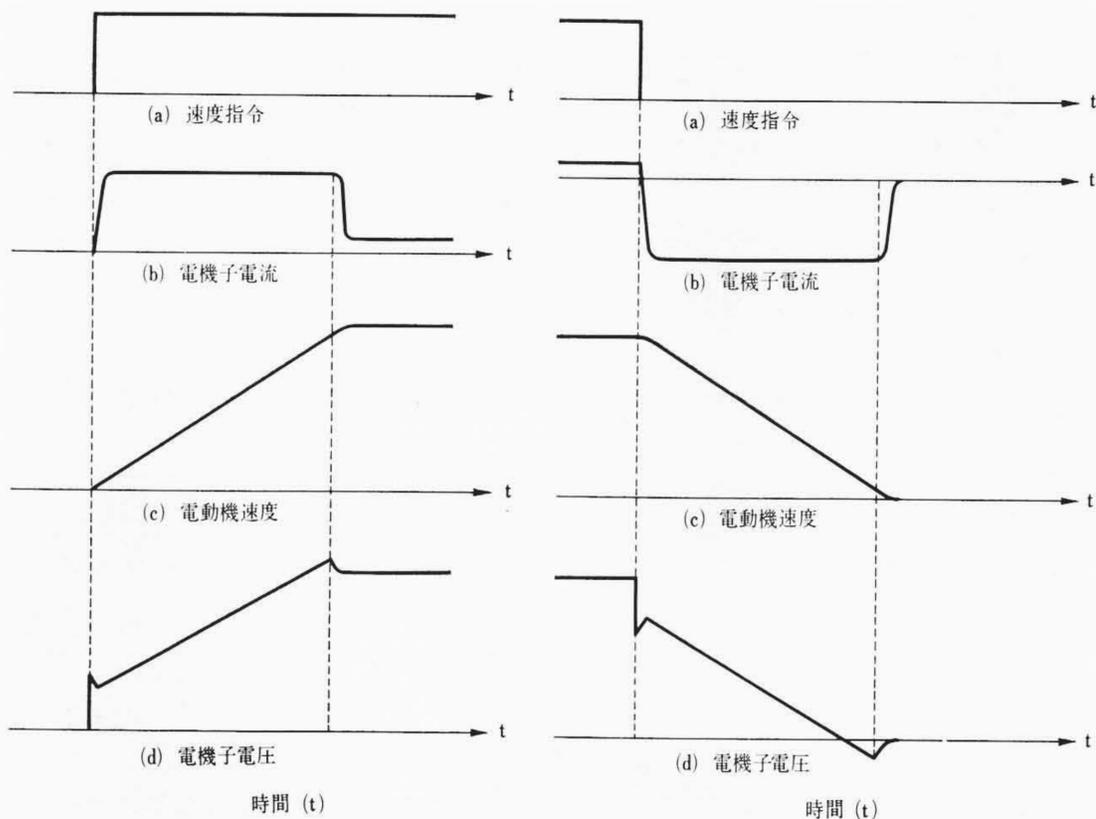


図5 順変換動作波形

図6 逆変換動作波形

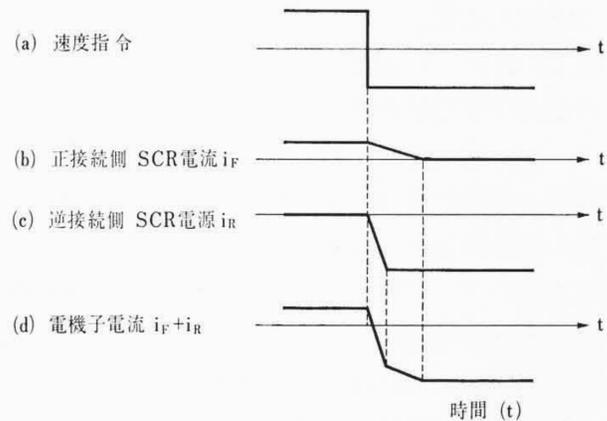


図7 順逆変換切替時の動作波形

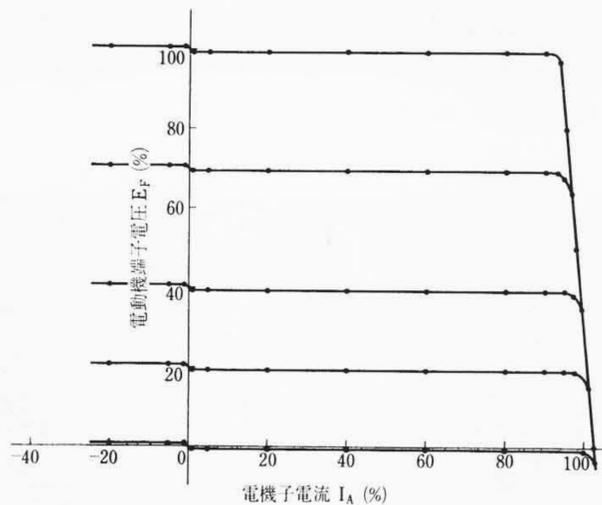


図9 電機子電流対端子電圧特性

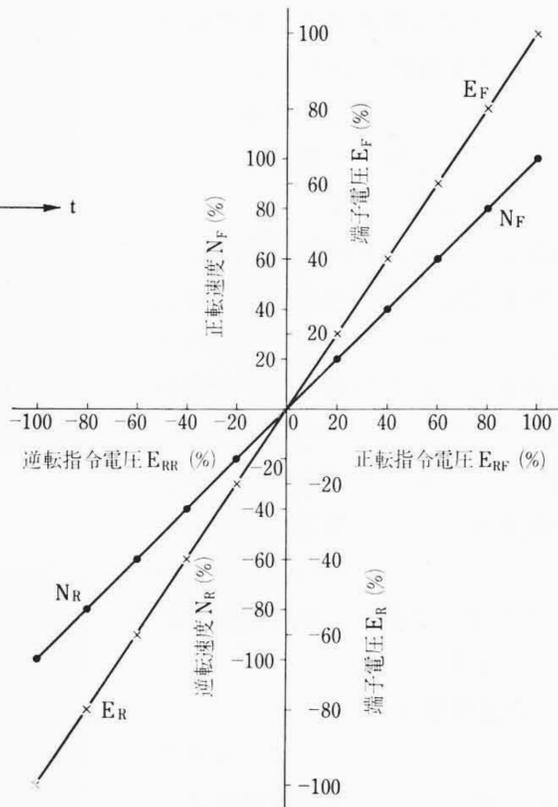


図8 速度指令電圧対電動機端子電圧および電動機速度特性

出される。この偏差量が正の場合には TOA_{SF} から、また負の場合には TOA_{SR} から正の出力が得られる。

いま、この偏差量が正であるとすると、それが TOA_{SF} により増幅され、その出力信号 e_{SF} が飽和要素 L_F に与えられる。飽和要素は入力 e_{SFO} 以上で飽和する。このときの飽和値 e_{LF} は電流制限値(電流基準値)を与える。もし、

$$e_{SF} \geq e_{SFO} \dots \dots \dots (1)$$

であると、この電流制限値と電流帰還値の差がトランジスタ式自動パルス移相器 $TAPPS_F$ に与えられる。その入力電圧に応じ移相されたパルスが SCR_F の各ゲートに加えられ、 SCR_F は順変換動作をし、電機子回路に電流を流す。この電流は直流リアクタ DCL_F と電機子回路によって決まる時定数で増加する。この変化状態は変流器 $DCCT_F$ 、整流回路 SR_F 、ろ波器 F_F により検出され、電流帰還量となって電流制限値と突き合わされる。したがって、電機子電流は飽和要素 L_F で決められた電流制限値に、一定に自動制御される。ただし、電流制御マイナ・ループの電流基準値、すなわち飽和要素出力が急に階段状に印加されると、電機子回路に突入電流が流れる傾向を生ずるので、 TOA_{SF} と L_F の間に信号の増加時だけほぼ一次遅れ動作をする遅れ要素 D_F を使用している。

速度偏差が生じて、上述のようなほぼ一定の電機子電流が流れると、その時間積分値に比例して電動機速度が増加する。この場

合、電流はほぼ一定に制御されるので、電動機速度は時間に関しほぼ直線となり、直線加速を行なう。この電動機速度は普通電機子電圧と電機子降下の差に比例した量として帰還される。この帰還量が速度基準値に近づくと速度偏差が小さくなり、 TOA_{SF} の出力が減少する。そして、

$$e_{SF} < e_{SFO} \dots \dots \dots (2)$$

となると、電流設定値は e_{LF} より小さくなるので、電機子電流が減少し、したがってそれに依りて加速度が小さくなる。ついに、負荷の要求するトルクと電動機が発生するトルクが平衡した状態に電流帰還値が落ちつき、その電流帰還値に応じた電流基準値になって速度制御系が定常状態となる。したがって、この状態では、電動機が速度基準値で定められた一定の速度で運転される。

以上のような制御動作を行なうので、電機子電流、電動機速度、電機子電圧の時間的变化は図5に示すようになり、直線加速理論に近い比較的理想的な波形が得られる。なお、順変換動作は速度指令の増加、負荷の増加などのときにも行なわれる。

3.2.2 逆変換動作

逆変換動作の一例として、ある速度で正転している電動機に停止指令を与えた場合について考える。前項で説明したように、正転速度指令が与えられて定常状態になった後に、停止指令(零指令)に急変したとする。すると、速度偏差は負となり、 TOA_R の出力が正、 TOA_F の出力が負となる。したがって、 TOA_{SF} の出力

はただちに零となり、電流指令が零となるので、 SCR_F のゲートは閉じられる。このとき、 SCR_F の電流は主回路の条件に応じ減少し、零となる。

一方、速度指令が零となると同時に、 TOA_R 以降の回路に動作が切り換えられる。 TOA_R 以降の動作は前項で説明した順変換の場合と同様に進むので、正転している電動機に対し逆接続側の SCR が動作する。したがって、電流は電機子回路を逆方向に流れ、電動機の回転エネルギーは電源へ逆変換される。この場合、逆変換電流値は飽和要素 L_R で決められる電流制限値に制御されるので、この一定の逆変換電流により、電動機は一定の減速度で減速する。電動機速度が零に近づくと、速度偏差が小さくなり、 L_A の動作点が飽和値より小さくなっていく。したがって、電機子電流は一定値より減少し、速度が零となってこの電流も零となる。

以上のような動作状態における電機子電流、電動機速度、電動機端子電圧の波形は概略図6のようになる。逆変換動作は以上の例のほか、速度指令の減少、負荷の減少などの場合にも行なわれる。

なお、速度指令が正転あるいは停止の場合には、それぞれ順変換あるいは逆変換動作が独立して行なわれるが、正転指令から逆転指令が与えられる場合には逆変換動作と順変換動作が組み合わされて行なわれる。

3.2.3 制御上の循環電流

いままでの説明からわかるように、正逆接続 SCR 回路には制御上必要な循環電流は流していない。しかしながら、順変換から逆変換に切り換えられたときに、順変換電流は回路条件に応じ減少するが、この期間に逆変換動作が始まると、その差分だけ循環電流が発生する。この場合、逆接続側の SCR 回路電流が一定の電流基準値に制御されるので、図7に示すように、順変換電流の存続する期間、順変換電流量だけ電機子回路に流れる逆変換電流が減少する。この期間は普通 10~100 ms 程度で、問題にはならない。

以上の考察の意味するところは図3において、 TOA_{CF} および TOA_{CR} に別に一定の電流指令を常に与えておいても動作することを意味しており、このような状態では循環電流制御として動作できることを意味している。

4. 実験結果

制御装置を試作し、実験した。その結果は次のようなものである。

4.1 定常特性

4.1.1 速度指令値と電動機速度の関係

無負荷状態における速度指令と電動機端子電圧および電動機速度の関係を測定した結果を図8に示す。この結果、速度指令電圧に対し、両者は非常にすぐれた線形性を有している。

4.1.2 負荷特性

定常運転時における、電機子電流に対する電動機端子電圧の関

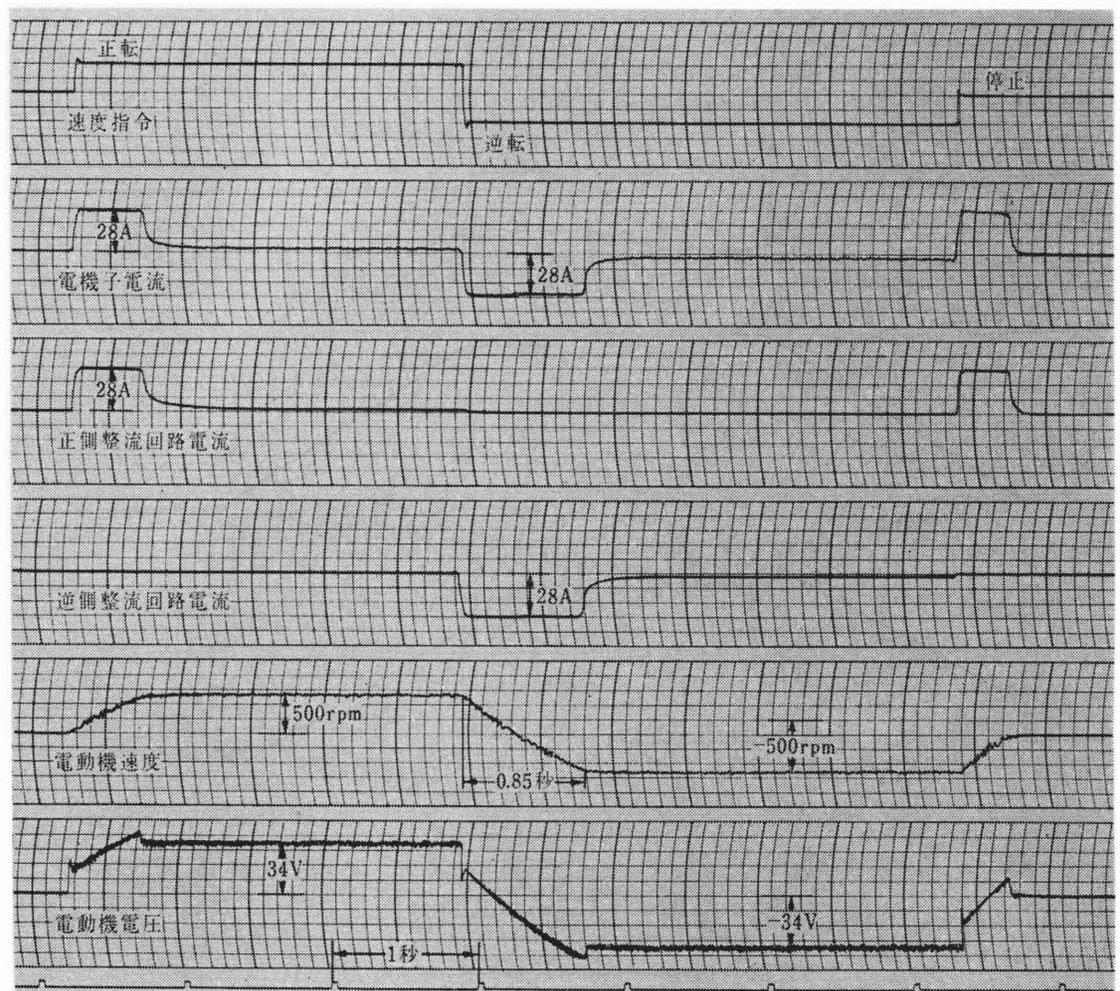


図10 速度指令に対する応答

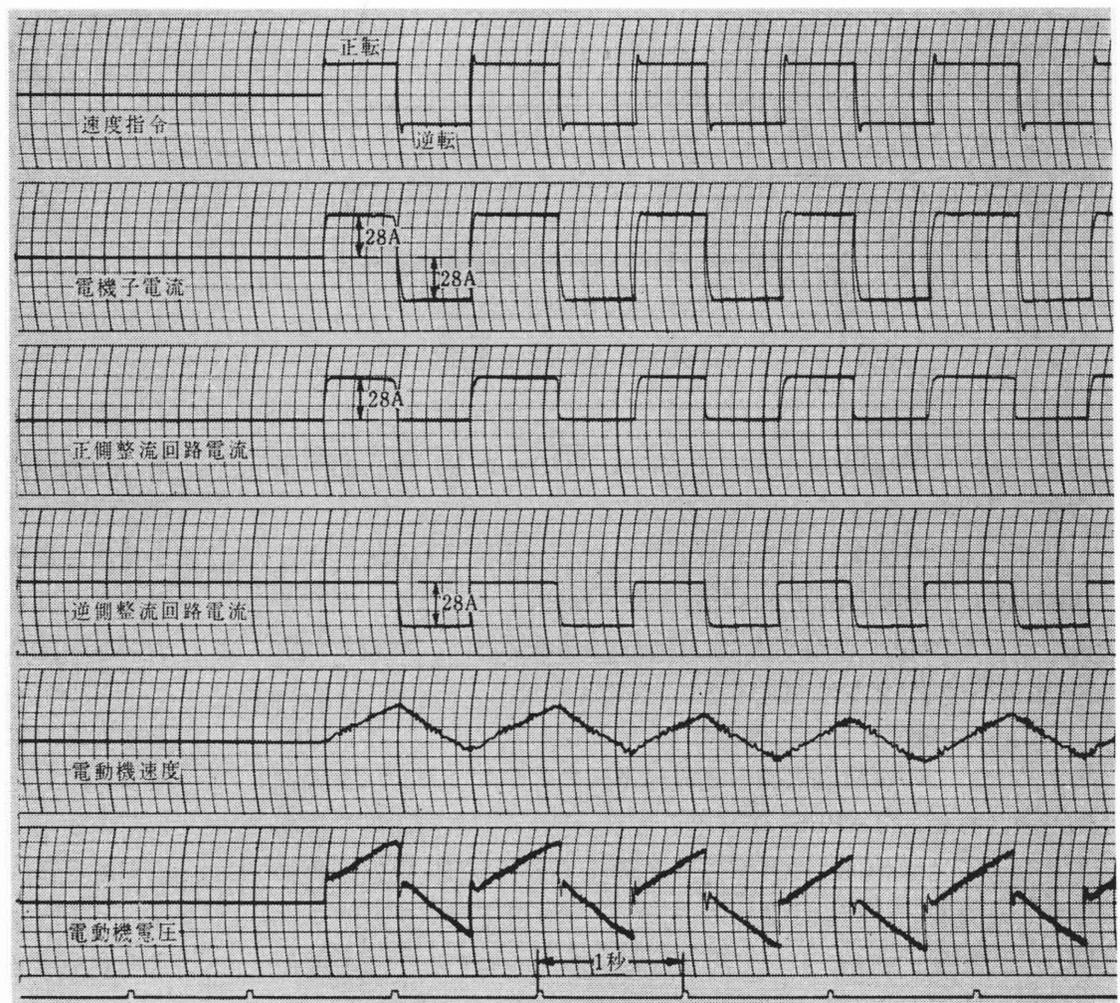


図11 繰り返し速度指令変化に対する応答

係を測定した結果を図9に示す。同図には、電動機速度指令値および制限電流設定値をパラメータにした場合について表わされている。この結果、電圧制御の性能はよく、また電流制限制御もほぼ満足できる。

4.2 過渡特性

4.2.1 加減速応答特性

電動機速度指令を正転、逆転および停止に変化した場合の制御

回路各部の応答を図10に示す。同図のオシログラムは上から速度指令、電機子電流、正接続側SCR出力電流、逆接続側SCR出力電流、電動機速度および電動機端子電圧を示している。この結果、循環電流制御方式による順逆変換の切り換えは動作遅れは問題なくきわめて円滑に行なわれている。また、正逆転時の電機子電流の波形は方形波に近いため、理論的な正逆転時間に対する実際の時間の割合は約1.06で、従来最もよいと認められていた値1.25よりも小さい。

4.2.2 繰り返し速度指令応答特性

いままでの順逆変換特性は、制御系がいったん定常状態になった後の場合について取り扱ったが、実際には速度偏差の符号がひん繁に入れ替わることが考えられる。そこで、速度指令値を正逆に、無造作にひん繁に入れ替えた場合、制御系が安定に動作し、円滑に順逆変換を行なうかどうかを確認するための実験を行なった。その結果は図11のオシログラムに示すとおりである。この図から、転流失敗もなく、正確に順逆変換動作が行なわれていることがわかる。

4.2.3 過負荷応答特性

定常状態においては、電動機を拘束するような超過負荷がかかっても制御系は速応性よく電流制限動作をし、異常のないことを図9の実験結果が示している。同様に、過渡状態においても定格の数倍の過負荷が印加されることが考えられる。

過負荷が印加される時期として、加速期間、定速期間、正逆転期間、停止期間のおのおのが考えられる。これらの期間のおのおのについて、過負荷を印加および除去した場合の測定結果は図12に示すとおりである。この実験の結果も制御系が正常な動作を示している。

5. 結 言

以上、高い速応性をもつ電流制御をマイナ・ループにもつ循環電流抑制方式のSCR静止レオナードについて検討した。

特に、電流制御系は電動機主回路の時定数に対し高い速応性が要求されるので、トランジスタ式自動パルス移相器をはじめ、トランジスタ演算増幅器、並列T形ろ波器などを開発し、使用している。

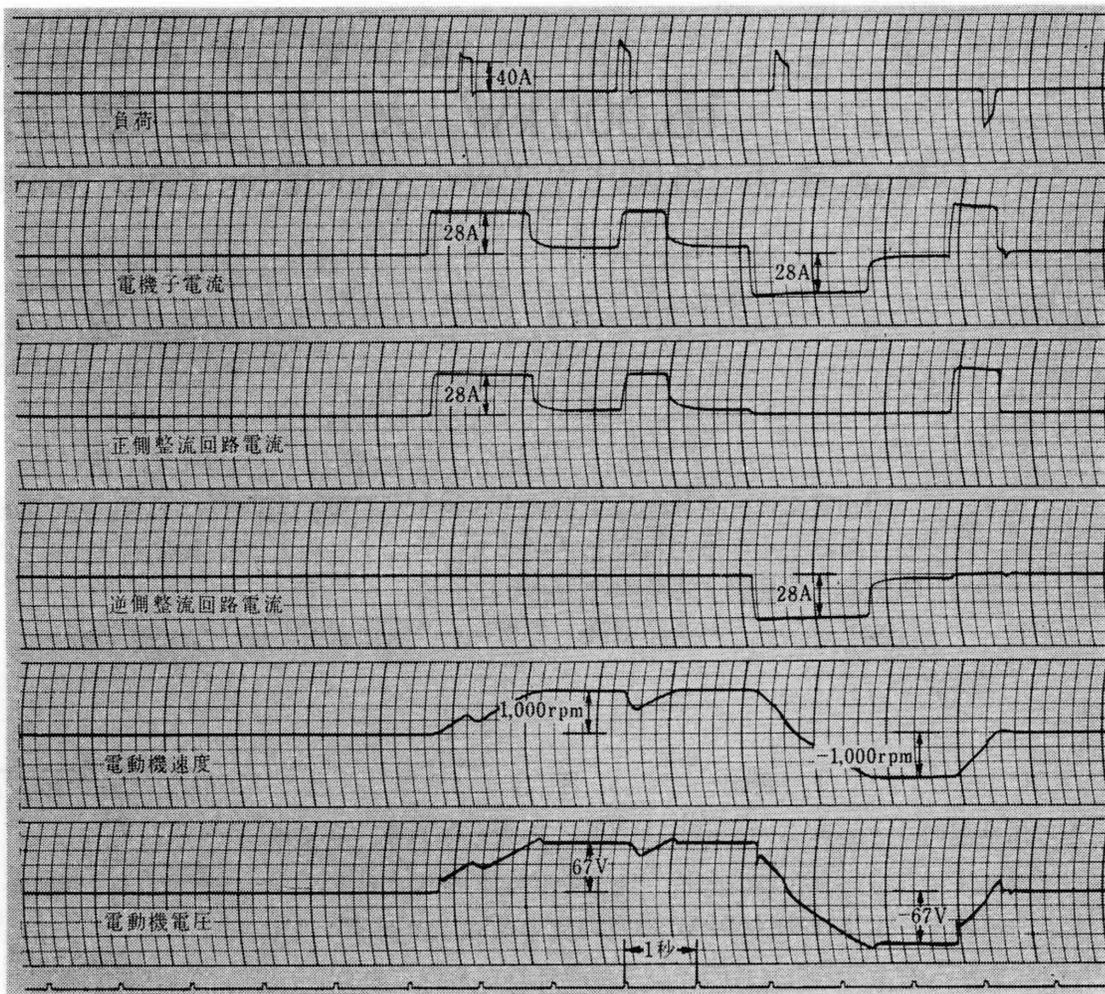


図12 過負荷 ON-OFF 時の応答

新しい制御方式を採用した制御装置について実験した結果、電流波形の方形性は非常によく、正逆転時間が理論値に対し約1.06という値で、普通の1.5~2.0に対しきわめてよい結果を得ている⁽⁵⁾。なお、定常試験では電動機を拘束しても規定の電機子電流に電流制限をすること、過渡試験では繰り返し正逆速度指令変化に対する応答、数倍の過負荷に対する応答、電源電圧15%変化に対する応答など、過酷な試験を行なった結果も正常な動作をした。

以上検討の結果、SCR静止レオナードに関する基本的な技術をほぼ確立することができた。

参 考 文 献

- (1) W. Ostendorf: E. T. Z. (A) 71, H. 6 (1950)
- (2) G. Hakansson: A. S. E. A. J. 36, 111 (1963) など
- (3) 小西: 電気4学会連合大会 No. 1926 (昭 41-4)
- (4) たとえば, F. W. Gutzwiller: Electro-Technology 73, 119 (昭 39-4)
- (5) 前川, 小野田: 日立評論 38, 1131 (昭 31-9)