

新しい電動機制御 — SCR の応用 —

日立製作所* 日立研究所 前川 敏 明

1. 緒 言

シリコン制御整流素子 (Thyristor, 本文では以下 SCR と呼ぶ。) は, 250A, 1300V級の素子まで量産されるようになり, 米国では12,000馬力の厚板圧延機が9,600kWのSCR装置(素子数約1900個)で運転されている。わが国でもSCRが最も早く本格的に採用されたのは, 直流電動機の制御で, すでに数百kWの静止レオナード設備が運転され, 数千kW機級が製作されるのも日時の問題である。一方誘導電動機にSCRを結合して広範な制御機能をもたせることは, 今後開拓されるべき分野である。1次電圧調整法や静止セルビウス方式など数十kWまで実用化されつつあるが, さらに可変周波インバータ方式がここ2~3年来各方面で盛んに研究されている。以上のような直流電動機ならびに誘導電動機の工業的な応用制御に関し, ここに概況を紹介する。

2. SCR 応用装置の概要

2.1 各種電動機制御方式と内外の状況

表1にSCRを利用した各種の方式を示す。家電品関係や小さなコントロールモータの駆動にもSCRを利用するものが多いが, 本文では省略する。

電動力応用設備において自動制御の対象となるものは, 直流電動機と誘導電動機が大半である。直流電動機のワードレオナード方式におけるSCRの応用は, レオナード発電機と電動機の励磁回路に用いられ, 従来の回転励磁機に代るものである。SCR励磁器はほとんど出力容量に関係なく小さな制御入力と高速応性があるから, 従来回転励磁機においてとられていた磁気増幅器, 回転増幅器などの制御増幅装置が, 一率に小形高速のトランジスタ増幅器などにおきかえられ, 制御系の飛躍的な特性向上が可能になった。この種の応用は内外に多数の実用例がみられ, わが国でも, 数千kW級の圧延機用イルグナ設備などに数百kWのSCR励磁装置が用いられており, 広く一般化しつつある。

* 東京都千代田区大手町2の8 (第三大手町ビル)

表1 各種電動機制御へのSCRの応用

直 流 電 動 機	ワードレオナード イルグナ方式	(励磁回路へのSCR応用)
	静止レオナード 方式	単一方向駆動 可逆駆動 <ul style="list-style-type: none"> ◦ チェンジオーバスイ ッチ方式 ◦ 逆並列または交叉接 続方式 ◦ 電動機界磁反転方式
	(車 両 用)	無電弧タップ切換方式 SCR式全電圧制御 チョッパ方式
誘 導 電 動 機	電圧調整方式	1次制御方式 2次制御方式 <ul style="list-style-type: none"> ◦ SCR式2次抵抗調整 ◦ 静止セルビウス方式
	周波数調整方式	サイクロコンバータ方式 可変周波インバータ方式

SCR モータ

SCRを電機子電源に用いた静止レオナード方式は, 基礎的研究段階を出て, 実用化期に入り, 容量記録が更新されつつある。基本的な主回路方式は, かつての水銀整流器を用いた静止レオナードと類似しているが, SCRの身軽さを生かし数十~数百kWの中小容量機では, 水銀整流器の進出しにくかった分野にも活用されている。圧延機のスクリュウダウンモータ, 抄紙機駆動用等はこの分野に入る。ヨーロッパ方面の文献では主回路水銀整流器, 界磁SCR方式のものがまだ多いが, GE社では1万kW級の厚板ミル駆動設備の完成を報じている。従来の水銀整流器式静止レオナードはM-G方式に十分対抗しうるまでに至らなかったが, SCR方式は今後大幅に進出するものと思われる。

車両方面では交流化, 軽量化の点でSCRの長所が発揮され意欲的な開発研究が行なわれ, 交流車両に対するタップ切換器(ED 75), 全電圧連続制御(ED 93)あるいは直流車両に対するチョッパ制御方式など特異な技術が開発されている。

古くから確固たる一大応用分野を占めながら, 従来制

表2 SCR 応用 制御 関連 器具

ゲート制御回路	一般的回路構成は（移相回路—パルス成形—パルス増幅—パルストランス—SCR）よりなる。		
	磁気式 APPS *	小形磁気増幅器の飽和位相の変化を利用	絶縁多入力
	ユニジャンクショントランジスタ式	R-C の充電特性を利用し、UJT 弛張発振器を用いる	回路簡単
	トランジスタ式	正弦波（鋸歯状波）電圧と直流制御電圧の交点でスイッチング	瞬時応答
	ツェーロン回路	CR.ツェーロン回路(可変R部をTRSにして自動移相可)	固定移相器に適す
制御用増幅器	一般に演算増幅器が用いられ、P.I.D 等の演算機能を活用する		
	磁気式演算増幅器	小形高ゲイン磁気増幅器を用いた演算増幅器	絶縁多入力
	TRS 式演算増幅器	TRS 直結平衡形演算増幅器	高速応答
論理要素	制御量の比較、判断、開閉等に用いる無接点スイッチ要素		
	TRS 式論理要素		高速、高精度
	IC 応用素子	今後の方向	小形化

* Automatic Pulse Phase Shifter

御調整の対象になりにくかった誘導電動機も、SCR と結合することによって新規な制御対象として盛んにとり上げられるようになってきた。極端に言えば、構造簡単、堅牢な誘導電動機に広範な速度制御機能が与えられれば、電動機応用設備における直流機の地位を危うくする可能性をもつものと思う。しかしまだ誘導電動機の制御は研究開発段階であり、原理的検討からようやく一步を踏み出し、制約ある機能ながら適当な中小容量機に適用されようとしているところである。

1次電圧調整方式は一步先んじて実用化されているリアクタ制御方式にとり代るべきもので、クレーンなどで実用例がでている。2次調整法として代表的なものにセルビウス方式があるが、これはすでにSR（シリコン整流器）—MG（電動発電機）方式や水銀インバータ方式によって相当大容量のポンプ駆動などに使われていた。これをSR—SCRインバータとすることは方式的に余り問題のないところであるが、大容量化に伴い高調波、歪波形などに関する検討が続けられている。

可変周波インバータ方式は直流機におけるワードレオナード方式に擬せられる方式と考える。この方面の研究は水銀インバータでも行なわれたが、近年SCRの特色を生すべく内外各方面から盛んに発表されており、すでに数十kW級の設備は容易に製作される。

2.2 SCR 応用に共通した関連機器の概要

電動力応用に限らないが、SCR 応用に不可欠の関連機器としてゲート制御回路がある。また SCR 制御の機能を遺憾なく発揮させるためには、制御用増幅器、静止スイッチ要素なども必要で、これらにはトランジスタを

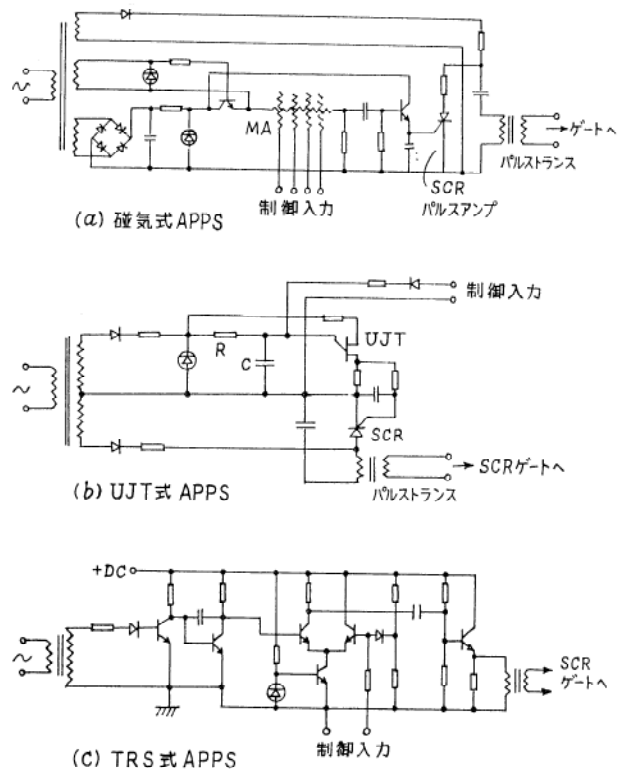


図1 各種ゲート制御回路の例

主体とする好適な装置が開発されている。これらをまとめて表2に示した。

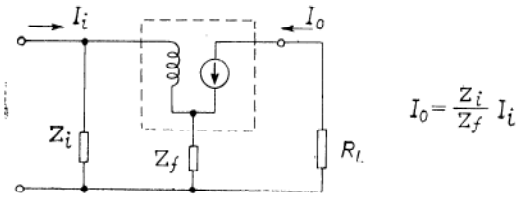
ゲート制御回路は通常（自動移相回路）→（パルス成形）→（パルス増幅）→（パルストランス）→（SCRゲート）のように構成され、実際には二、三の機能を兼ねる部分もある。多種多様な回路が考えられているが、表2のように大別され、それぞれの特長をもち、また同一形式のものでも移相角範囲、移相特性の変動、パルス

キなどに応じて回路に繁簡があるので、経済的な適用を考えるべきである。図1に代表的な回路例を示す。

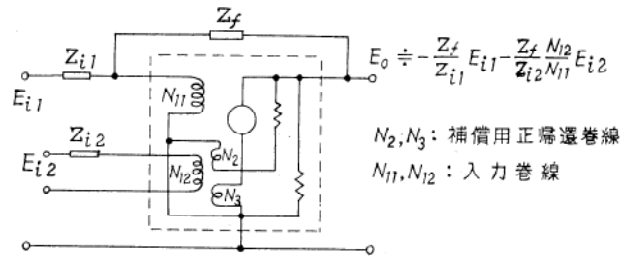
制御用増幅器としては演算増幅器形式のものが最適で、磁気増幅器式演算増幅器 (MOA) とトランジスタ式演算増幅器 (TOA) をそれぞれの特長をもって活用することができる。演算増幅器の微分、積分、比例、代数和等の演算機能と任意関数発生機能とは制御系構成にきわめて大きな自由度をもたらすものである。図2は代表的な制御用演算増幅器の略図である。

論理判断機能も今後の自動制御系ではますます需要のふえてくるもので、これにはすでにトランジスタ等を使った静止スイッチ素子があるが、今後これらには薄膜集積回路も用いられてくるであろう。

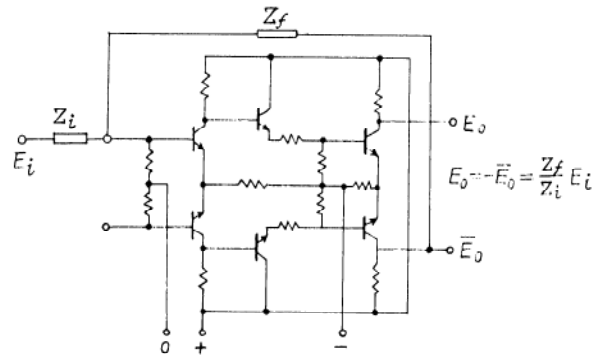
以上ゲート移相回路、制御用増幅器、論理要素のいずれも十数ミリVA程度の小さなパワーレベルで数百kW以上のSCRをも自由に制御できるところが、SCR以前の電磁機器にくらべて制御系構成上著るしい利点となっている。



(a) 電流相似形磁気演算増幅器



(b) 電圧相似形磁気演算増幅器



(c) トランジスタ式演算増幅器

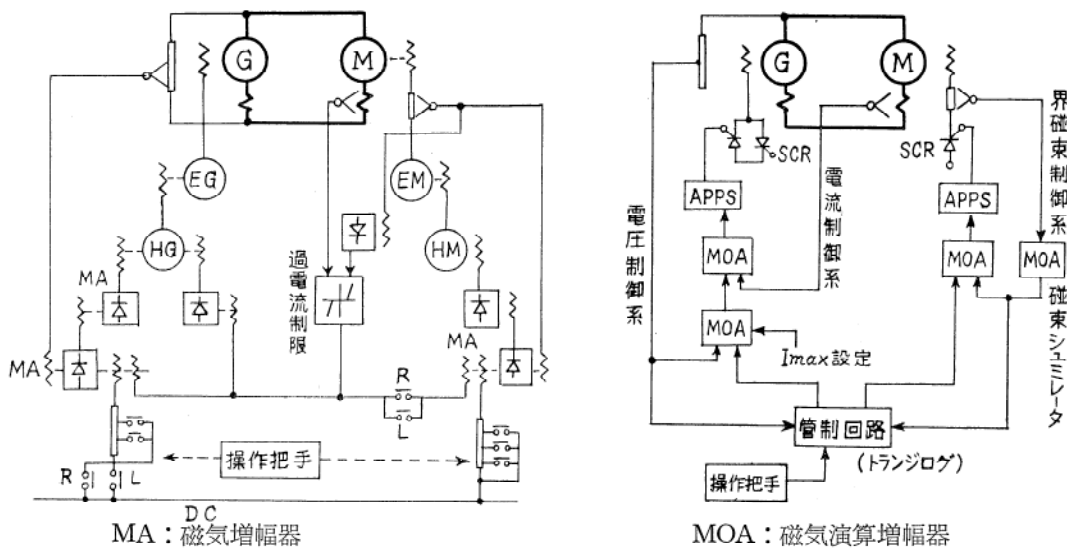
図2 各種制御用演算増幅器

3. 直流電動機の制御

3.1 ワードレオナード方式へのSCRの適用

ワードレオナード方式は逆転式ミル、タンデムコールドミルや巻上機など非常に多くの分野に使われているが、従来の制御装置は回転励磁機、回転増幅機、2~3段の磁気増幅器といったような構成が多い。これがSCRと制御増幅器におきかえられて、制御系の単純化と飛躍的な性能向上がもたらされた。

図3にこの種の代表的な例として分塊圧延機用イルグ



MA: 磁気増幅器

MOA: 磁気演算増幅器

APPS: ゲート制御回路

(a) 回転励磁機、磁気増幅器等による制御

(b) SCR, MOA 等による制御

図3 ワードレオナード式速度制御装置

ナ設備の急速加減速制御装置の回路図を示す。(b)図のような新方式の著るしい特長は電流制御系が有効に活用されていることで、これによって理想的な電流制限制御が可能になりひいては高能率加減速がきわめて容易に達成されるようになった。図4は制御結果の満一例であるが、イルグナ制御における長年の目標をほぼ満足するものと言えると思う。

イルグナ方式は次節に述べる静止レオナード方式に漸次道をゆずる運命にあるかもしれない。しかし、急激な負荷変化に伴う電源攪乱を緩和するフライホイールをもつイルグナ方式の特長は他におきかえられない存在価値があるものと思う。

3.2 SCR 式静止レオナード装置

3.2.1 各種駆動方式

静止レオナード方式には単一方向駆動と可逆駆動法があり、後者には3種の方式がある。図5に各種方式の概略図を示す。単一方向駆動の場合は(a)に示すような簡単な回路でよいが、この回路では加速機能だけしかなく、減速トルクを出すことはできない。強制減速トルクが必要な場合は抵抗制動か、もしくは(b)以下の可逆回路方式をとらねばならぬ。

(b)はSCR逆並列式の可逆駆動回路で、正負の負荷電流がそれぞれ別個のSCRを通る。2組のSCRを常時順ならびに逆変換器とし、直流電圧が等しいようにゲート制御角を調整する。この場合正逆SCR間の瞬時起電力の差やゲート角の変動により負荷を通らない循環

電流が流れるから、これを適当な量におさえておくため、それぞれの分路に直流リアクトルを入れ、さらにゲート制御回路に循環電流制御信号を加える必要がある。上記の循環電流対策を省くため大形機では(b')のような無循環電流方式がとられる。これは負荷電流の方向に応じて使用されない方のSCRのゲート信号を消して循環電流を全く流さないようにするものである。方向選択と切換え動作のための回路を要するが、直流リアクトルの節減が大きな経済的評価をもたらす。

さらに(c)はSCRを一組だけにして、方向切換えに極変換器(チェンジオーバスイッチ)を使うものである。方向選択、切換えの原理はほぼ(b')と同じ手法であるが、機械的動作による極変換器に問題がある。(d)は主回路電流方向を一方方向のみにしておき、電動機界磁

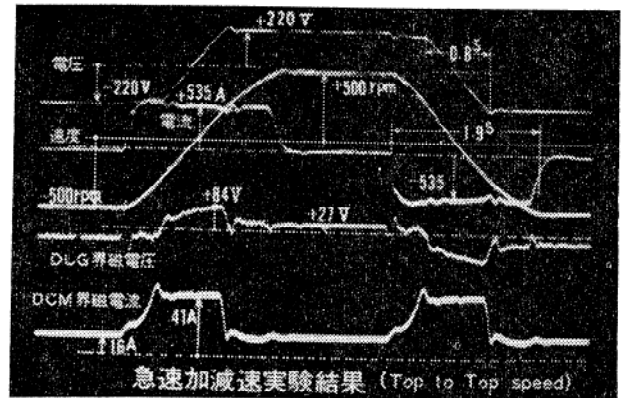


図4 急速加減速制御実験結果

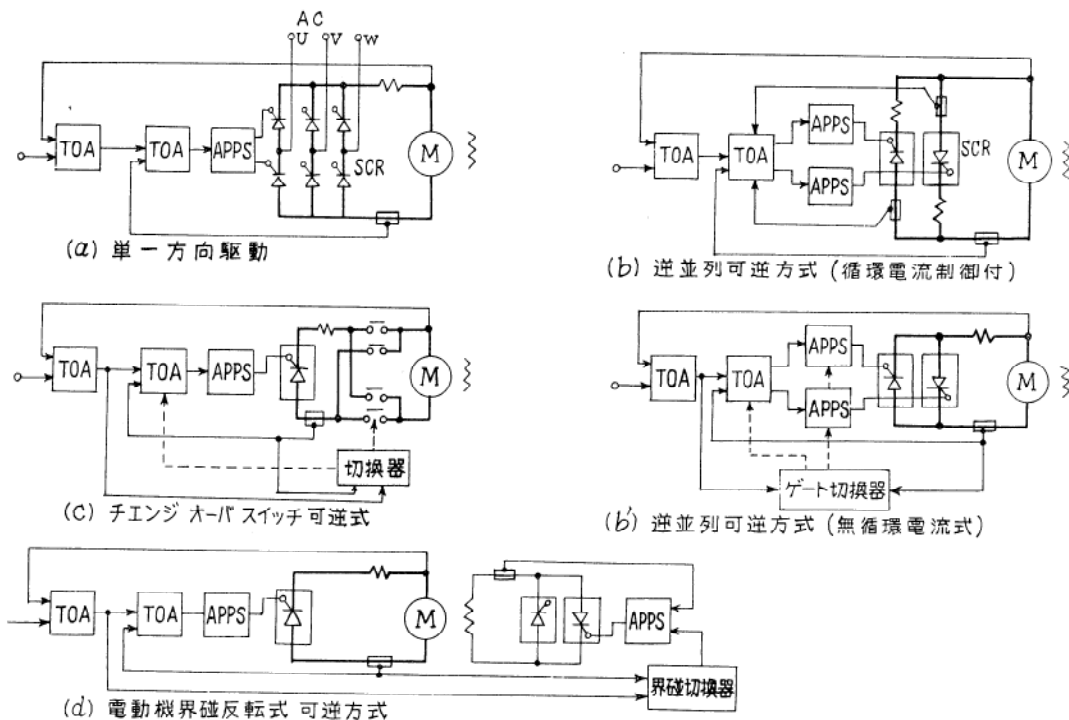


図5 各種の静止レオナード方式

磁束の方向を反転させることによって逆トルクを出すものである。電動機界磁反転に多少の時間を要する点が問題で、界磁回路には最高速の制御装置を使うべきであるが、総括して経済的な方式と考えられている。

3.2.2 無循環電流式逆並列可逆静止レオナードの制御装置

図6は制御系の概略図である。これは図5(b')の逆並列無循環電流式制御方式であるが、さらに大容量のため電源側の力率改善を目的とした制御を取り入れている。正および逆それぞれに2組のSCR装置を用い、双電機子形の電動機とサンドイッチ接続してあるが、このSCR1とSCR2のゲート角を同一とせず、図7(a)に示すように出力電圧零のときSCR1を正の最大、SCR2を負の最大とし、正方向運転はSCR2のみのゲートを開いて行き、負方向運転ではSCR1のゲートのみを閉じて行くように制御する。普通制御角90°の出力電圧零付近は力率0%となるが、上のようなシーケンシャル制御により、図7(b)のように力率が改善される。

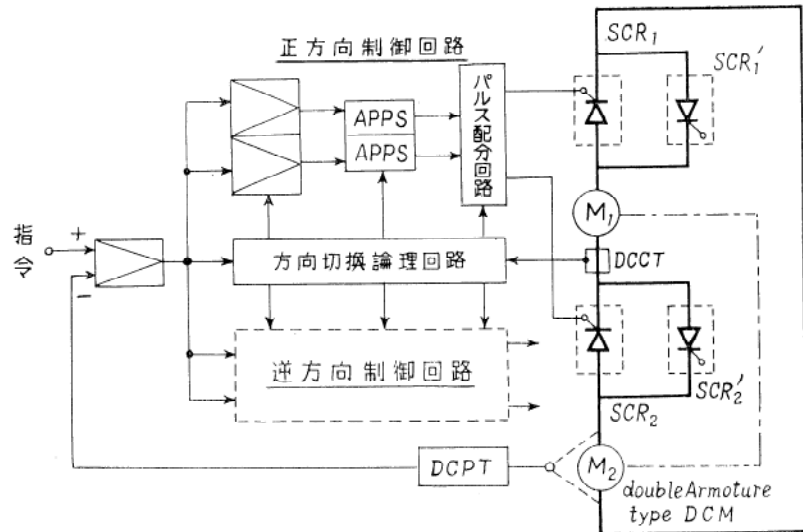
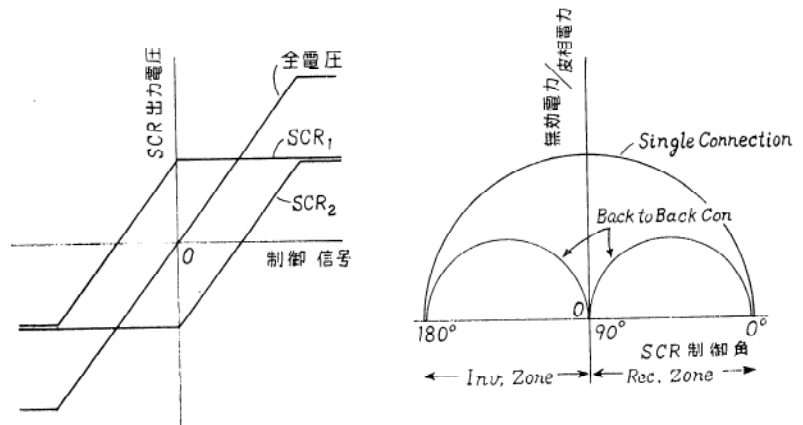


図6 大容量静止レオナード設備の制御装置



(a) 制御信号とSCR端子電圧 (b) 無効電力特性

図7 力率改善制御特性説明図

4. 誘導電動機の制御

誘導電動機は速度は (a) 電圧, (b) 2次抵抗, (c) 2次電圧, (d) 周波数などによって調整される。各要因による速度-トルク特性の変化は概念的に図8のようになる。電圧および2次抵抗調整方式はこの特性と負荷トルクとのバランスによって速度がきまるが、2次電圧および周波数調整方式は固有の定常速度をもち直流機のレオナード式調整と似ている。(a)(d)はかご形誘導機にも適用できるが、(b)(c)は巻線形のみが対象である。いずれにもSCRが有効に適用される。

4.1 1次電圧調整方式

図9(a)は電圧調整式の可逆制御回路で、2次抵抗調整を併用したものである。1次の2相間に正逆転用のSCRを入れて、所要トルク方向に応じていずれか一群のSCRを選び、ゲート制御によって電動機印加電圧を調整する。2次抵抗は、SCRによって3段階に分割、速度に応じて所定の抵抗値を選ぶ。加減速制御の例を図

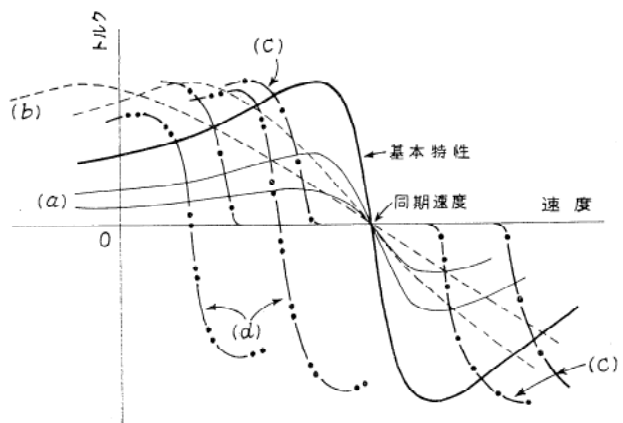


図8 誘導電動機の各種速度調整特性概念図

- (a) — : 1次電圧変化
- (b) : 2次抵抗変化
- (c) - · - : セルピウス調整
- (d) - - - : 周波数変化

10に示す。

図9(a)から、2次抵抗調整を除きさらに1次SCRを1群のみとするなど要求機能に応じて簡略化できる。この方式はクレーンなどに好適である。

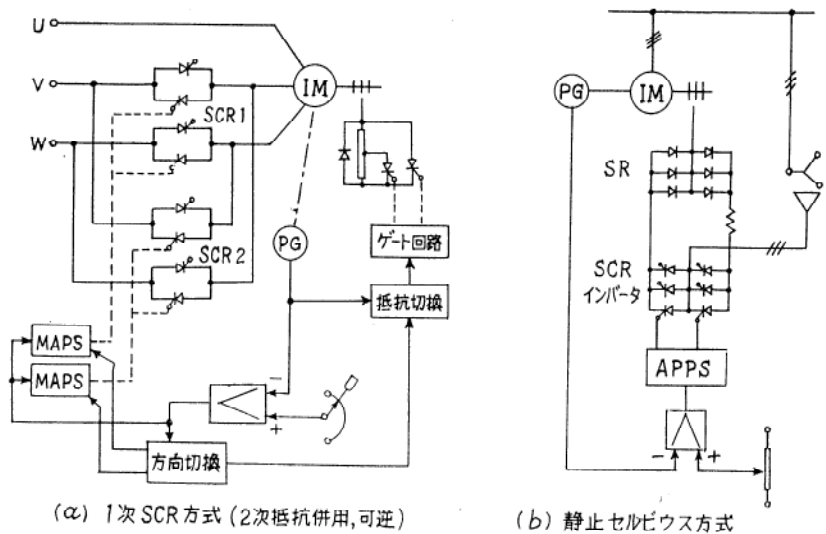
4.2 セルビウス方式

図9(b)は2次電圧を調整するセルビウス方式で、2次電圧をSRで直流にし、これをSCRインバータを用いて電源に結合するようになっている。インバータのゲート角調整によって直流電圧がきまり、それに対応する2次滑り電圧になるような速度が得られる。この方式は電力損失を伴わず、安定な速度調整が可能で、大容量機にも容易に適用される。セルビウス方式はインバータにMGを用いた形式、水銀整流器を用いたもの、そして最近ではSCRインバータを用いる方式などで水道用ポンプ駆動設備としてよく用いられている。

4.3 周波数調整方式

4.3.1 サイクロコンバータ方式

誘導電動機の変速のために印加電圧の周波数を変えるのはもっとも順当な手段であろう。周波数を変えるにサイクロコンバータといわれる回路がある。図11はその基本原理を説明する図である。(a)のような回路で点弧される



(a) 1次SCR方式(2次抵抗併用,可逆)

(b) 静止セルビウス方式

図9 誘導電動機の電圧調整式速度制御装置

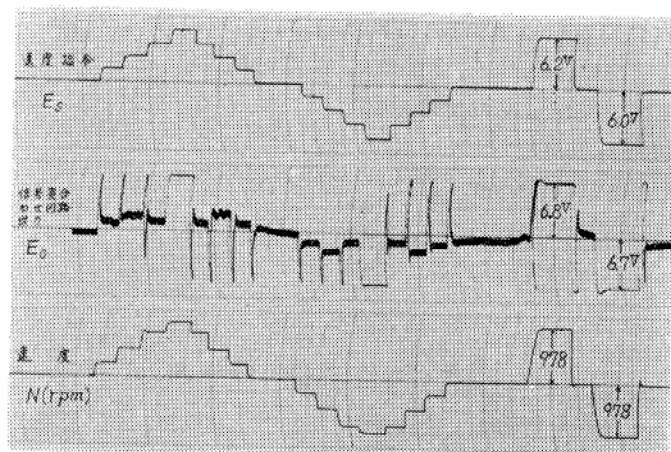
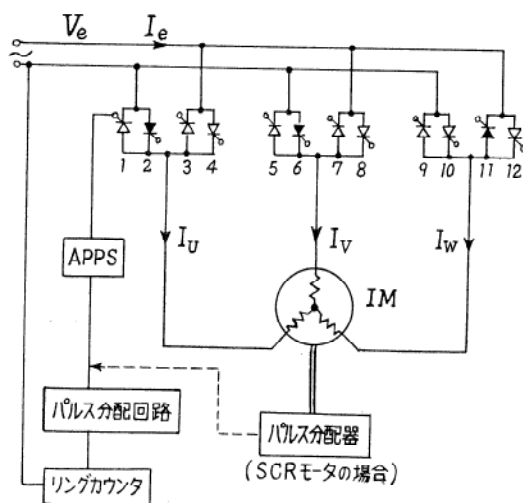
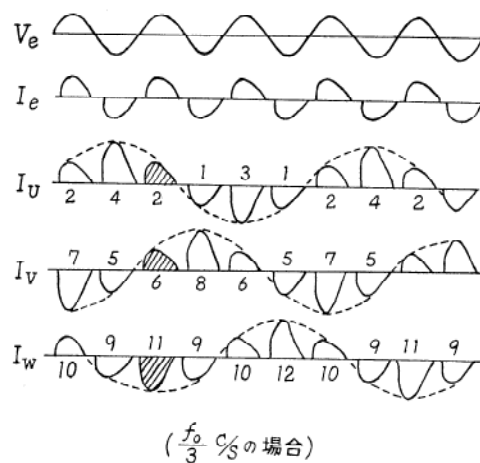


図10 IMの1次SCR可逆制御



(a) サイクロコンバータ回路図



(b) サイクロコンバータ出力波形

図11 サイクロコンバータ説明図

SCR を適当に選択すれば、(b) 図のように $f_0/3$ サイクル毎秒の 3 相交流電圧をうることができる。点弧順序をかえれば一般に $f_0/3n$ ($n:1, 2, 3, \dots$) の低周波が得られ、これで誘導電動機の低速駆動ができる。点弧角調整によって電圧調整も可能であり、自然転流によるため回路は簡単、安定であるが、連続的に周波数を変えることができない。強制転流回路を使って、連続的な周波数調整を行なうようにすることも考えられるが技術的に後述のインバータと同じ問題がでてきて、むしろ回路は複雑となり、SCR 素子の利用率がわるい。交流巻上機に低周波制御方式というのがあるが、この低周波電源として、上記の単純なサイクロコンバータを適用することが考えられる。

4.3.2 可変周波インバータ方式

現在用いられるインバータの基本回路はほとんど Mc Murray の転流改良形インバータ (図12) で、これをもとにして種々の改良考案がなされている。転流回路を主回路から独立させて、直流電源電圧を大幅に変えても安定な転流を保ち、転流リアクトルによる損失を電源へバックさせて効率を上げ、転流用 L, C を小形化するなどの改良進歩がみられるが、この技術が今後誘導機用としても基礎技術となる重要なところである。外部転流回路付インバータには、転流損失、転流用 L, C 等が小さく、また転流電源として、主電源と独立した補助電源を設けると、主直流電源を数%まで下げても安定な動作を保つことができるものなどが開発されている。

電動機駆動用インバータにおいて他にない特殊な事情は、周波数にほぼ比例して出力電圧を変えなければならぬところである。このためいろいろな方法が考えられるが代表的な方法とその出力波形を図13に示す。

(a) は 2 台の 3 相インバータの位相を互いにずらせることによって、合成出力電圧を変化させるもので、位相差を一定時間のまま周波数を調整すれば (相差角は周波数に比例する。) 周波数と出力電圧がほぼ比例する。

この回路は簡単であるが、低周波部分で波形率が著るしく悪化するので、周波数変化範囲が余り大きくとれないところが欠点である、標準かご形誘導電動機にこのイン

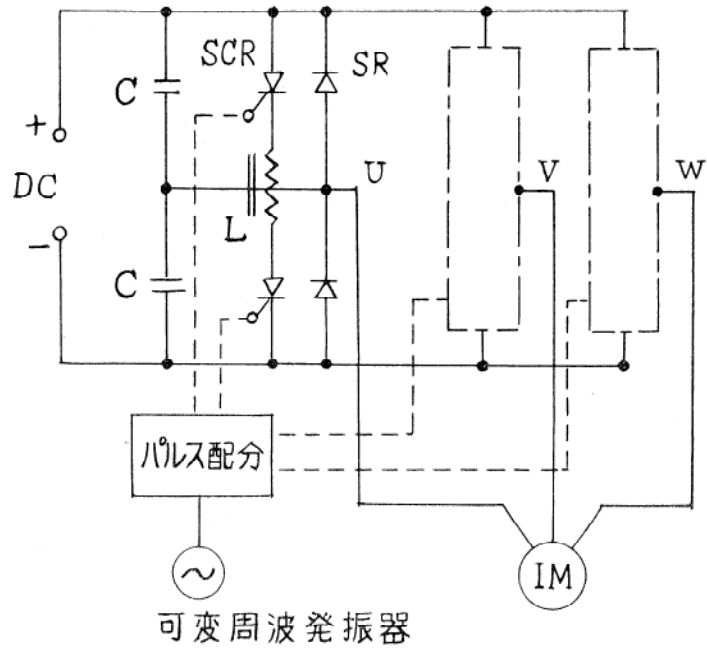


図12 誘導電動機駆動用 3 相インバータ

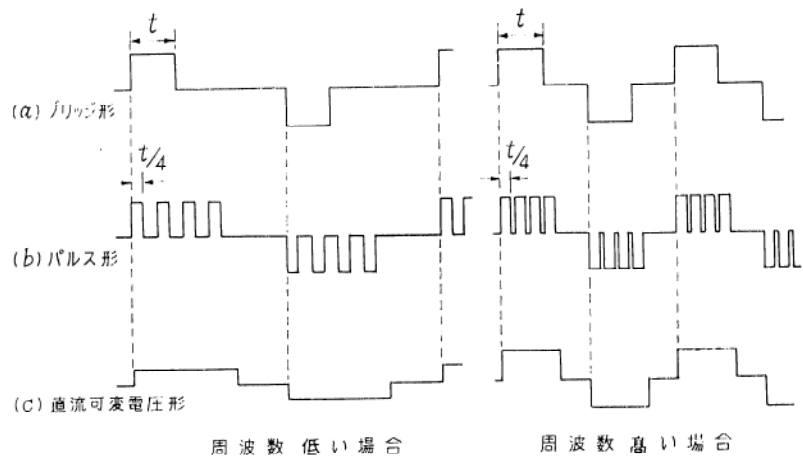


図13 誘導電動機駆動用各種インバータの出力電圧波形

バータを適用すると、周波数変化範囲は1:2前後である。インバータと IM の間に結合トランスを入れて1:5程度まで広げることがもできるが、IM と同容量のトランスが余分にいる点不経済である。

(b) はゲート信号を工夫することによって、図のように出力電圧をパルス列とする方法で単位パルスの幅を一定時間にしておけば、周波数と出力電圧実効値はほぼ比例して変る。この波形は (a) にくらべて IM に都合のわるい低次高調波が非常に小さくなるから、使用周波数範囲が広がる。

(c) は出力波形を変えずに、電圧調整を直流電源電圧変化によって行なうものである。IM にとっては最も都合のよい方法で、実験結果によると周波数範囲は 1:

(以下22頁へ続く)

(8頁より続く)

15程度まで使用可能である。低電圧でも安定に動作するインバータとするため、転流補助電源付の外部転流形インバータとすることと、直流可変電圧を設けることが必要である。

インバータ方式は、発振器の周波数調整、ゲートパルスの相回転切かえなどによって、可逆、制動領域にわたって速度制御が可能であり、ワードレオナードに匹敵する調整ができるので、堅牢、廉価なかご形誘導電動機に万能性を与えるものとして現在研究が続けられている。

5. 結 言

電動力応用設備において本格的な制御装置の用いられるものは、ワードレオナード、イルグナ、静止レオナー

ドなど直流機を対象とするものが大半である。これらの制御用機器は従来、磁気増幅器、水銀整流器などであったが、本文にも述べてきたように、これらは全面的にSCRとトランジスタにおきかえられ、飛躍的な性能向上をもたらしつつある。

誘導電動機関係のSCR制御は、目下各方面で盛んに研究中で、数十kW級の製作例が散見される程度であるが、今後堅牢廉価な誘導電動機に新しい応用分野を提供するものとして有望である。

この方面の技術は今後もなお、SCRエレメント自体の進歩はもちろん、制御用器具としても薄膜集積回路の応用など目まぐるしい発展をみせるであろうが、一面歴史の浅い点に十分慎重な配慮をくばって、新しい適用分野の開拓と確立がなされるべきであろう。