

# チョッパ制御を適用した誘導電動機の可変速制御装置

## The Speed Control Equipment for Induction Motor Drive by Rotor Chopper Control

誘導電動機を簡単に調整する方法に、二次抵抗制御方式がある。この方式を用いたコントローラは、安価であるので、一般産業の中・小容量機に多く用いられているが、速度を調整する場合、二次抵抗を接触器により段階的に調整するため、速度精度、速応性及び保守性に難点をもっている。

そこで、日立製作所はチョッパ技術を適用し、二次抵抗を無接触、且つ無段階に調整することにより、二次抵抗制御方式の欠点をもたない、比較的安価な可変速制御装置「IMサイリスタコントローラ」を開発し、既に多くの納入実績をもっている。本稿は、IMサイリスタコントローラが開発された背景、特長、動作原理及び構成などについて述べ、最後に代表的な適用例について紹介する。

神山 健三\* *Kamiyama Kenzô*  
 小西 務\*\* *Konishi Tsutomu*  
 依田 幹雄\* *Yoda Mikio*  
 大和田武義\*\*\* *Ôwada Takeyoshi*  
 綿引光夫\*\*\*\* *Watahiki Mitsuo*

### 1 緒言

従来、各種産業の分野において、可変速度が要求される電動機応用には、主として直流電動機が用いられていた。ところが最近、大容量、且つ高速のサイリスタ素子の製造技術、チョッパ、インバータなどのサイリスタ変換器に関する回路技術など、パワーエレクトロニクスの発達、特に集積回路を用いた制御素子、制御技術などエレクトロニクス及び制御技術の発達とが相まって、交流電動機を用いた可変速度制御が各種産業の分野に用いられつつある<sup>(1)</sup>。

日立製作所は、産業用の比較的大容量機を対象としたアシンクロ形及びシンクロ形サイリスタモータ<sup>(2)</sup>、カスケードセルビウス<sup>(3)</sup>、無整流子クレーマ<sup>(4)</sup>などの新製品を開発し、実用化を進めてきたが、これに加え、今回中・小容量機を対象として巻線形誘導電動機の二次回路に車両用に実績のあるサイリスタチョッパ<sup>(5)</sup>を用いて速度制御する、IMサイリスタコントローラを開発し、数セットの納入実績をもっている。

ここでは、IMサイリスタコントローラの他の速度制御装置に対する位置づけ、特長、動作原理、構成などについて述べ、その適用例を紹介する。

### 2 チョッパ制御を適用した可変速制御装置

#### 2.1 巻線形誘導電動機速度制御へのチョッパ技術の適用

ポンプ、ファン、ブロワ及び攪拌機のように駆動装置として主に誘導電動機が用いられ、電氣的、あるいは機械的に定速運転が行なわれたり、又は段階的に可変速運転が行なわれている一般産業の分野において、経済性、生産性、操作性及び製品の品質向上の観点から、速度調整が多少でき、制御性能及び保守性が良好で、比較的安価な可変速制御装置が要請されている。

一方、一般産業に用いられる誘導電動機速度制御法には、可変周波数制御による方法と電圧制御による方法とがある。前者は速度調整範囲が広く、精度を必要とする用途に適用され<sup>(6)</sup>、後者は速度調整範囲が比較的狭く、精度をあまり必要としない用途に適用されることが多い。電圧制御法には、一次制御法と二次制御法とがある。一次制御法は低速度域にお

いて得られるトルクが小さく、速度調整範囲は高速度域に限定されるため、普通数十キロワット以下の小容量機に適用される。それに対し、二次制御法は速度トルク特性が比例推移で変化し、低速度域においても比較的大きなトルクが得られるため、数十～数千キロワットの小容量機から大容量機に広く適用されている。二次制御法の例としては、二次励磁制御法として静止セルビウス方式、クレーマ方式、及び二次抵抗制御方式がある。

ここで、静止セルビウス方式、クレーマ方式は、速度調整が連続的に行なわれ、且つ低速度域に至るまで効率が比較的良好で、また最近では半導体化された、保守性の比較的良好な装置が製作可能となっている。しかし、いずれの方式も電力逆変換回路を必要とするため、装置が複雑で、且つ高価であるのでこれらは比較的大容量機に適用されることが多い。

一方、二次抵抗制御方式は装置が簡単で、且つ安価であるため、中・小容量機に多く用いられているが、速度を調整する場合、二次抵抗を接触器により段階的に変化させるため、速度精度、速応性及び保守性に難点がある。

そこで、巻線形誘導電動機の二次側にサイリスタチョッパ回路を用いて、二次抵抗を連続的に変化させ、それによって速度調整を行なうチョッパ制御方式を開発した。本方式と他方式とを比較して表1<sup>(7)</sup>に示す。同表よりチョッパ制御方式は回路構成、速度-トルク特性、機能などに関し、一般産業に用いられる中・小容量巻線形誘導電動機速度制御法として適していることが分かる。

チョッパ制御方式を用い、経済性、制御性、及び保守性に主眼をおいて、新しく開発された巻線形誘導電動機の可変速制御装置IMサイリスタコントローラの特長について以下に述べる。

#### 2.2 IMサイリスタコントローラ“RC-CTR”(Resistance Chopper Controller)の特長

IMサイリスタコントローラは、RC-CTRと呼ばれる。図1にRC-CTRの外観を、表2に標準仕様を示す。RC-CTRには電動機の容量、及び二次仕様に応じRC-CTR-100、

\* 日立製作所大みか工場 \*\* 日立製作所大みか工場 工学博士 \*\*\* 日立製作所習志野工場 \*\*\*\* 日立製作所日立工場

表1 巻線形誘導電動機の制御方式 この表から、チョップ制御方式の他の方式に対する特長を知ることができる。

No.	制御方式 項目	チョップ制御	二次抵抗制御	二次励磁制御		備考
				静止セルビウス	クレーマ	
1	回路構成					—
2	速度-トルク特性					Ns: 同期速度
3	可変速範囲(%)	65~100	65~100	65~100	70~100	実用上の容量
4	容量(kW)	300以下	750以下	50以上	100以上	—
5	用途	ポンプ、ファン、ブロワ、攪拌機	ポンプ、ファン、ブロワ、巻上機、クレーン	ポンプ、ファン、ブロワ、コンプレッサ、押出機	ポンプ、押出機、巻取機、圧延機、セメントキルン	—
6	特長	(1) 速度精度、速応性、保守性が良い。 (2) 制御装置は簡単、比較的安価である。 (3) 可変速範囲の比較的狭い中、小容量機に適する。	(1) 速度精度、速応性、及び保守性に難がある。 (2) 制御装置が簡単、安価である。	(1) 速度精度、速応性が良い。 (2) 可変速範囲で効率が良い。 (3) 価格、保守性に難がある。 (4) 可変速範囲の比較的狭い大容量機に適する。	(1) 速度精度が良い。 (2) 可変速範囲で効率が良い。 (3) 価格、保守性に難がある。但し、無整流子クレーマは保守が容易。 (4) 可変速度範囲の比較的狭い大容量機に適する。	—

表2 RC-CTRの標準仕様 この表からRC-CTRは、中・小容量機の色度調整用に必要な仕様をもっていることが分かる。

項目		標準仕様	備考
使用環境	使用場所	屋内	—
	周囲温度	-5~40°C	—
制御盤	制御電源	3φ AC, 200/220V 50/60Hz, +10%, -15%	— 標準モータ定格速度に対して、約約60~95%となる。
	冷却方式	強制風冷	—
	制御方式	速度制御	—
	速度精度	±1% (負荷変動50%, 定格速度に対し)	**抵抗始動後、可変速度範囲(65~100%)でチョップ制御
	可変速度範囲	65~100%*	
電動機	運転方向	一方向	
	始動方式	抵抗始動**	
電動機	適用電動機容量	巻線形誘導電動機 55~315kW	低圧機にも、高圧機にも適用可能
その他	付属器具	速度設定器 速度指示計 電源表示燈	速度設定器は手動設定

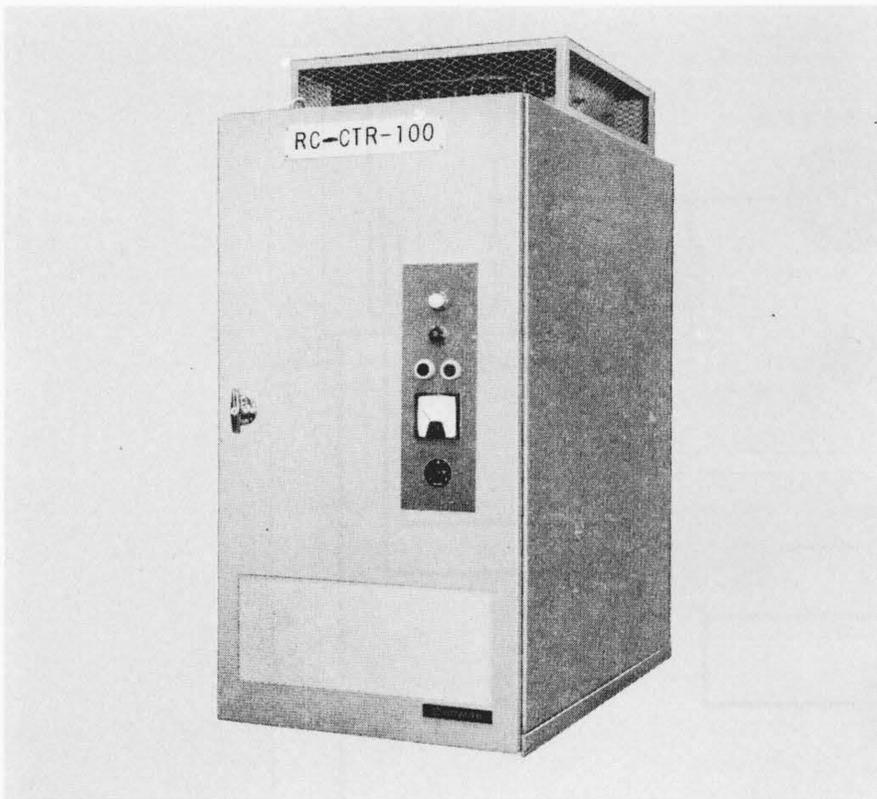


図1 RC-CTRの外観 RC-CTRは、Resistance Chopper Controllerの略称で、コンパクトな構造となっている。

RC-CTR-200及びRC-CTR-300の三つのシリーズがある。表2より、RC-CTRは一般産業に用いられる中・小容量機の変速調整用に適した仕様をもっていることが分かる。

(1) 経済性

制御性能は静止セルビウスに、価格は二次抵抗制御方式に近づけたものとなっている。

装置はコンパクトにできているため、据付工事が容易であり、また二次抵抗制御方式に比べ、外部配線が少なく配線工事が容易であるため、装置を早く稼働させることができる。

(2) 保守性及び信頼性

回路構成が簡単で、主回路はサイリスタチョッパを用いて無接点化されており、制御回路にはエイジングされた高信頼性部品が用いられているため、保守性が良く、長寿命が期待できる。また、主回路及び制御回路は機能別にユニット化、あるいはプリント基板ごとに標準化されているため、互換性があり、且つ調整箇所は必要最小限となっているため、万一故障が生じた場合でもユニット、あるいはプリント基板ごと迅速に交換できるので、故障時間を短縮することができる。

(3) 力率

巻線形誘導電動機の二次側において、交流電圧を直流電圧に変換し、その直流電圧を電源周波数に対し十分高い周波数でチョッパ制御を行なっているため、一次電圧を移相制御する方式に比べ、低速度域に至るまで力率を悪化させることがない。

(4) 異常時における運転

チョッパ回路は巻線形誘導電動機の二次側にあり、且つ電力逆変換回路をもっていないため、異常過大電流が流れることがない。また、瞬時停電時にはサイリスタのゲートパルスをサプレスをして制御装置を停止し、電源回復後主回路が閉路されている場合は再加速運転をして、そのまま運転を継続することができるので、サービスの向上が期待できる。

(5) 適用電動機

巻線形誘導電動機の二次制御方式のため、一次電圧の大きさに関係なく使用することができ、高圧機(3/3.3kV)にも低圧機(400/440V)にも適用可能である。

3 RC-CTRの動作及び性能

3.1 RC-CTRの動作原理及び構成

巻線形誘導電動機の二次側に抵抗器を接続して、その値を変化させると、電動機の変速特性は図2(a)中の(b), (c), (d)のように比例推移して、速度調整ができることはよく知られている<sup>(8)</sup>。次に、同図(b)に示すように、巻線形誘導電動機(IM)の二次側に整流回路(SR)、直流回路に二次抵抗器(R<sub>1</sub>)及び開閉器(SW)より成る等価回路を用いてチョッパ制御の動作原理を説明する。ここでSWは開閉周期Tに対し、ON期間T<sub>1</sub>が変えられる。この場合、周期Tに対するT<sub>1</sub>の割合(T<sub>1</sub>/T)を通流率αと称する。αが0の時の二次抵抗は、IMの二次巻線抵抗R<sub>2</sub>とR<sub>1</sub>の和で、この時流れる電流はI<sub>1</sub>となる。従って、αを0から1まで変化させると、平均電流I<sub>0</sub>は同図(c)に示すように変化し、等価的に二次抵抗の値が変化することになる。

図2(b)でSWをサイリスタに置き換え、二次抵抗を無接触、

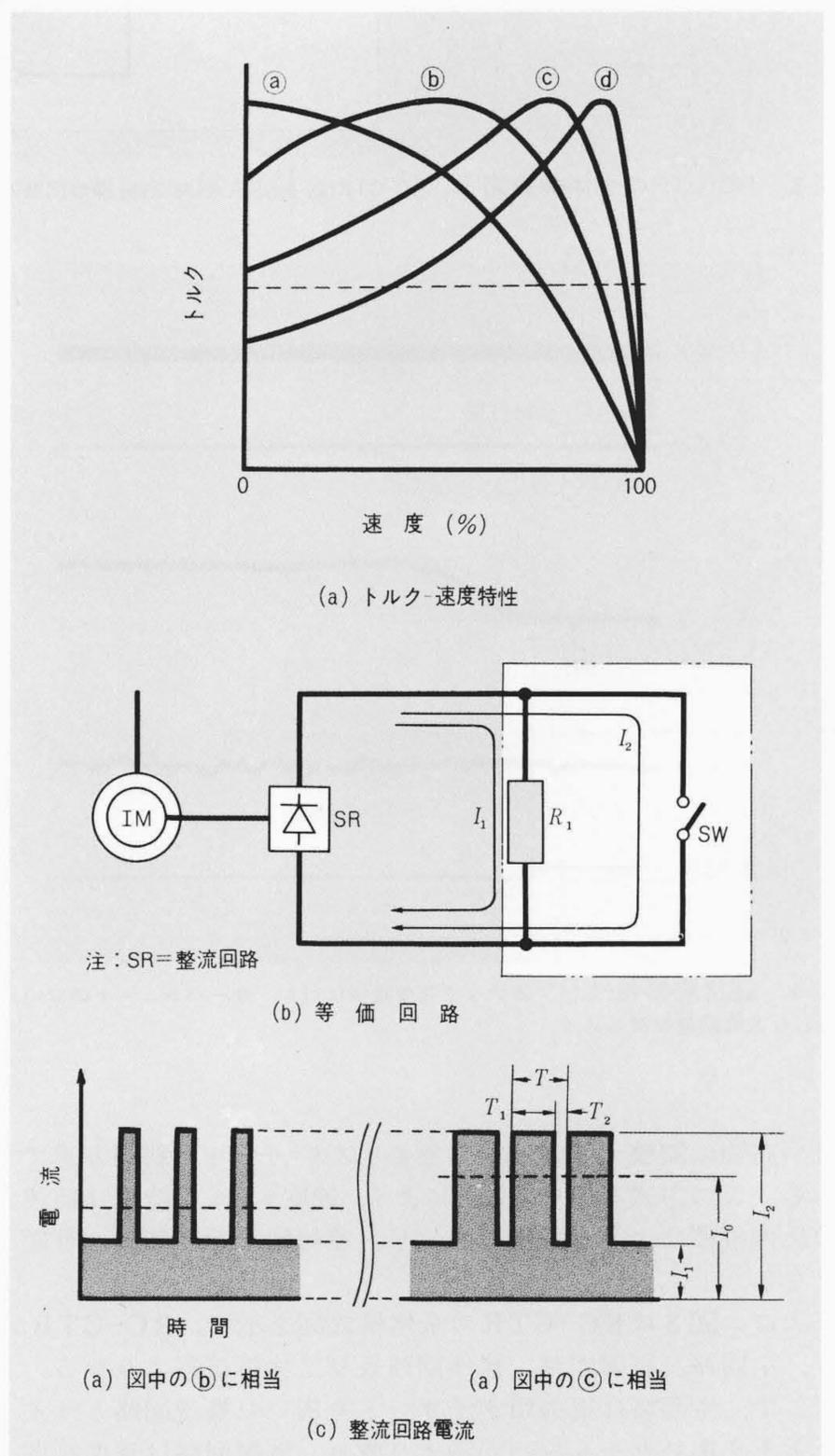


図2 チョッパ制御による速度制御 巻線形誘導電動機の二次抵抗はチョッパ回路において、チョッパ周期を一定にしてON時間を変えることにより調整され、それによって連続的な速度制御が可能となる。

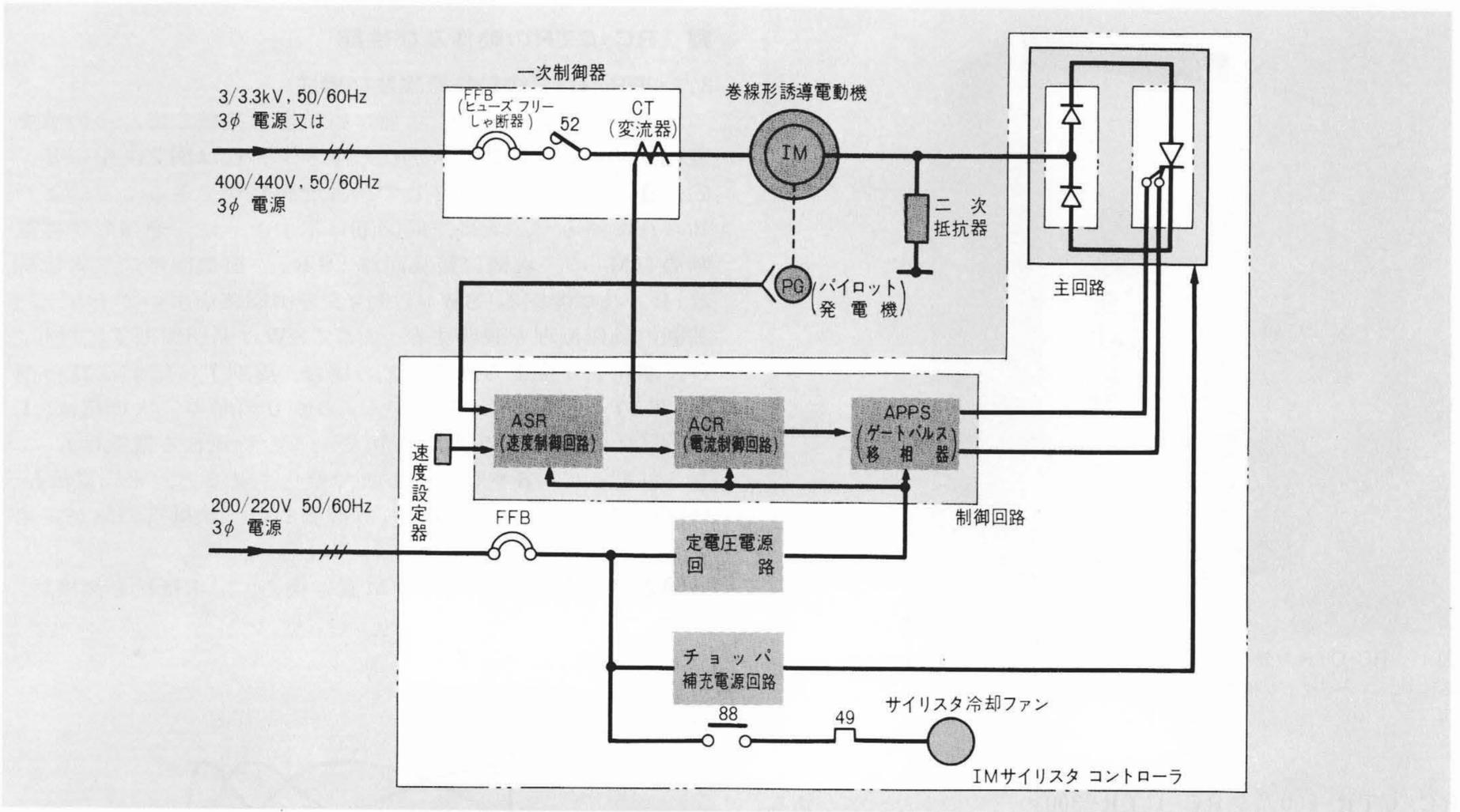


図3 RC-CTRの全体構成図 RC-CTRは、主回路、制御回路、操作回路及び二次抵抗器より成る。

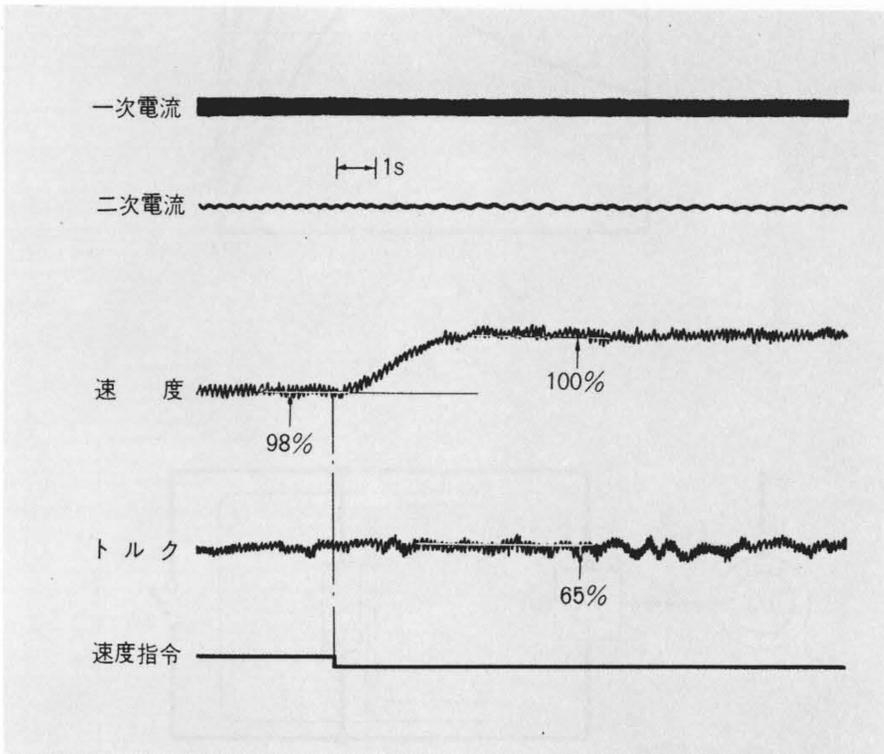


図4 速度応答特性 ステップ速度指令に対し、オーバシュートのない良好な速度応答が得られる。

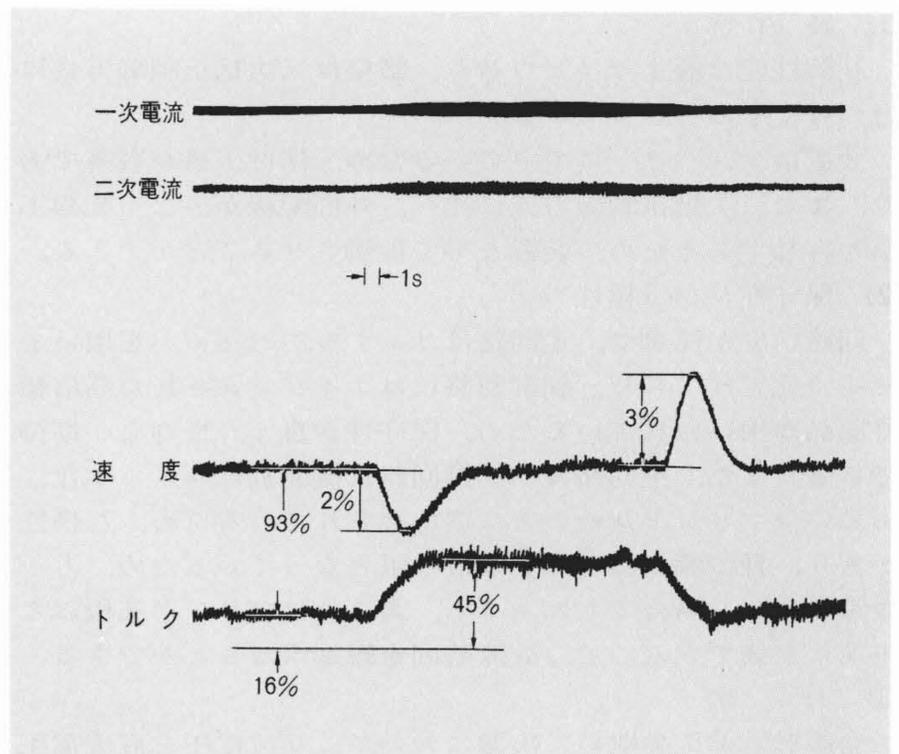


図5 負荷変動特性 負荷が印加、あるいは開放された後、速度は偏差なく迅速に設定値に回復する。

且つ高速に調整する方法が、サイリスタチョップ制御方式である。この方式を用いることにより、速度-トルク特性は前述の比例推移により無段階に変化し、連続的な速度制御が可能となる。

次に、図3にRC-CTRの全体構成図を示す。RC-CTRは、主回路、制御回路、操作回路及び二次抵抗器よりなる。ここで、主回路は電力用ダイオードを用いた整流回路とサイリスタを用いたチョップ回路より成り、制御回路は速度制御回路(ASR)、電流制御回路(ACR)及びゲートパルス移相器(APPS)より成る。また操作回路は、定電圧電源、チョップパ補充電源回路、ファン駆動回路などより成る。

### 3.2 RC-CTRの特性

代表的な負荷として、自乗負荷を対象とした場合のRC-CTRの特性のうち、速度応答特性、負荷変動特性及び瞬時停電時の動作特性について説明する。

図4はRC-CTRの速度応答特性であり、ステップ速度指令に対し、オーバシュートのない良好な速度応答が得られる。ここで、応答時間は用途に適した値に設定される。

図5はRC-CTRの負荷変動特性であり、負荷が印加、あるいは開放された後、速度は偏差なく迅速に設定値に回復していることが分かる。また、図6は電動機の電源が瞬時停電して、電源が回復した場合の各部の動作波形であり、電源回

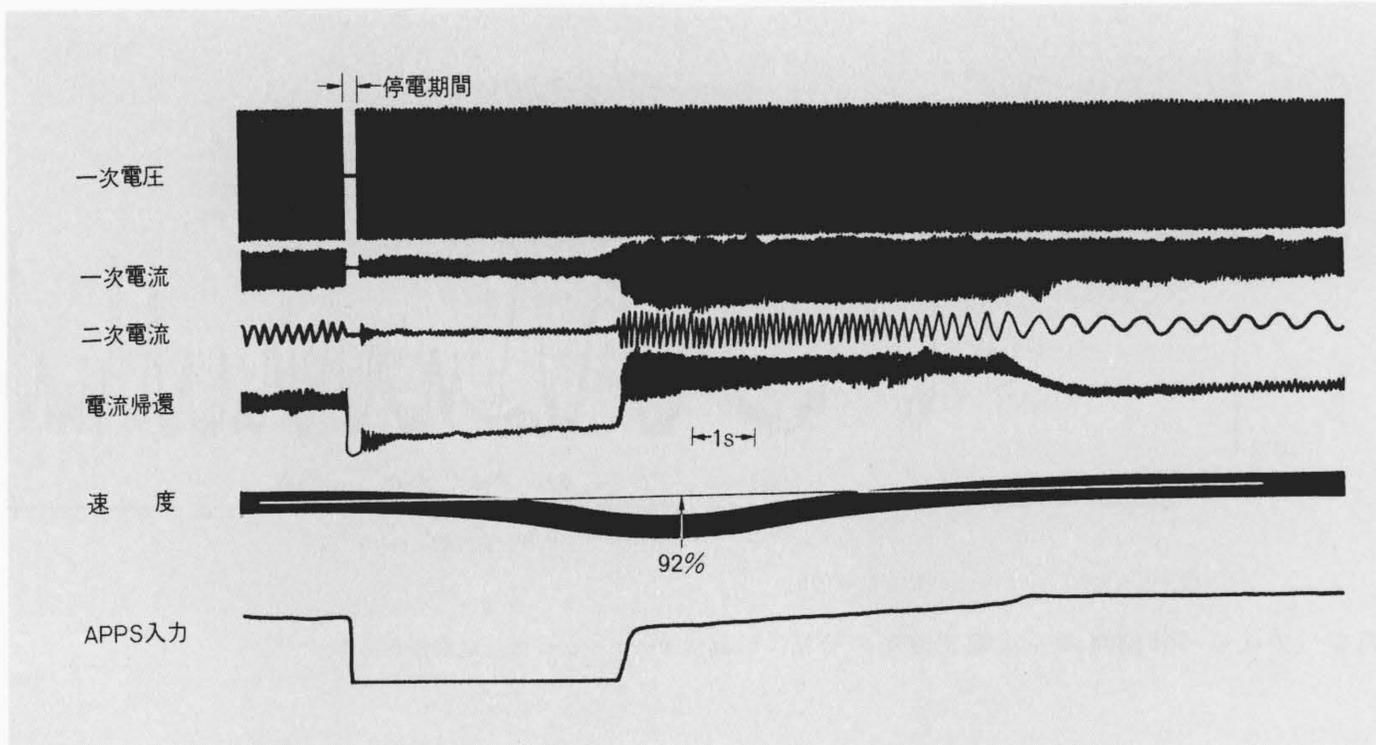


図6 電源停電回復時の動作波形 電源回復後速度は加速され、運転はそのまま安定に継続される。

復後は速度が加速されて、そのまま運転が安定に継続されていることが分かる。

#### 4 RC-CTRの応用

##### 4.1 適用上の検討事項

サイリスタを用いたパワー エレクトロニクスによる電動機制御システムにおいては、所定の機能を満足することはもちろんのこと、環境保全の観点から電源からみた力率の低下、サイリスタ変換回路から発生する高調波、騒音などが問題になり、パワーエレクトロニクス応用制御装置の適用に当たっては、これらに対し十分な事前検討を行なうことが必要である。

##### (1) 力率改善に対する検討

RC-CTRを用いた電動機制御システムは、前述のとおり低速度域に至るまで比較的良好な力率が得られる。そのため、二次抵抗制御方式の場合に接続される進相コンデンサにより、実用上十分な力率改善を行なうことができる。この場合、進相コンデンサには高調波電流が流れるが、直列リアクトルを接続することにより、その値を制限することができる。

##### (2) 高調波に対する検討

RC-CTRは、前述のとおり電動機の二次側にチョップ回路があるため、二次電圧、電流にチョップ周波数に関するひずみ波交流が含まれ、これにより一次電圧、電流にも高調波が含まれる。従って、RC-CTRの適用に当たっては、これら高調波の同一電源系統中にある他の機器への影響、通信回路への誘導障害などに対し、十分検討する必要がある。

RC-CTRのチョップ回路には高速のサイリスタが用いられ、チョップ周波数は電源周波数に対し十分高く選定されている。その結果、一次電圧、電流波形のひずみ率は電動機の変圧器作用による減衰効果と相まって、図7に示すとおり小さな値となっており、特に一次電圧に含まれるひずみ波交流は実用上ほとんど無視できる値となっている。また、図8は一次電流の波形分析の一例であり、同図で分かるとおり発生する高調波の周波数は、 $nf_{CH} \pm f$  ( $f_{CH}$ : チョップ周波数,  $f$ : 電源周波数,  $n$ : 整数) で規則性がある。これら高調波の対策としては、中・小容量機の場合は、力率改善用として一般に使用される進相コンデンサにより十分吸収できるが、用途により専用の交流フィルタを設置して対策を講ずること

もできる。これら高調波の電源への影響、他機器への影響などは、電源系統、負荷条件、及び回路定数を明確にして、電子計算機による高調波解析計算プログラムを用いて、速やかに定量化することができる。また、本電動機制御システムには、これら高調波に対し、諸特性に影響が出ない電動機が使用される。

##### (3) 騒音に対する検討

RC-CTRは、前述のとおり電動機の二次側においてチョップ制御を行なっているため、チョップ回路に流れる断続電流によって発生するチョップ音と、チョップ回路を冷却している冷却ファンの音とを合成した騒音が発生する。チョップ音は主にチョップ回路を構成しているダイオード、サイリスタ、転流リアクトル、転流コンデンサなどに流れる振動電流により発生するが、これらに対しては器具に使用する材料、構造、締付などに考慮を払うことにより、騒音の大きさを低騒音形電動機とほぼ同程度に抑えている。特に用途によって

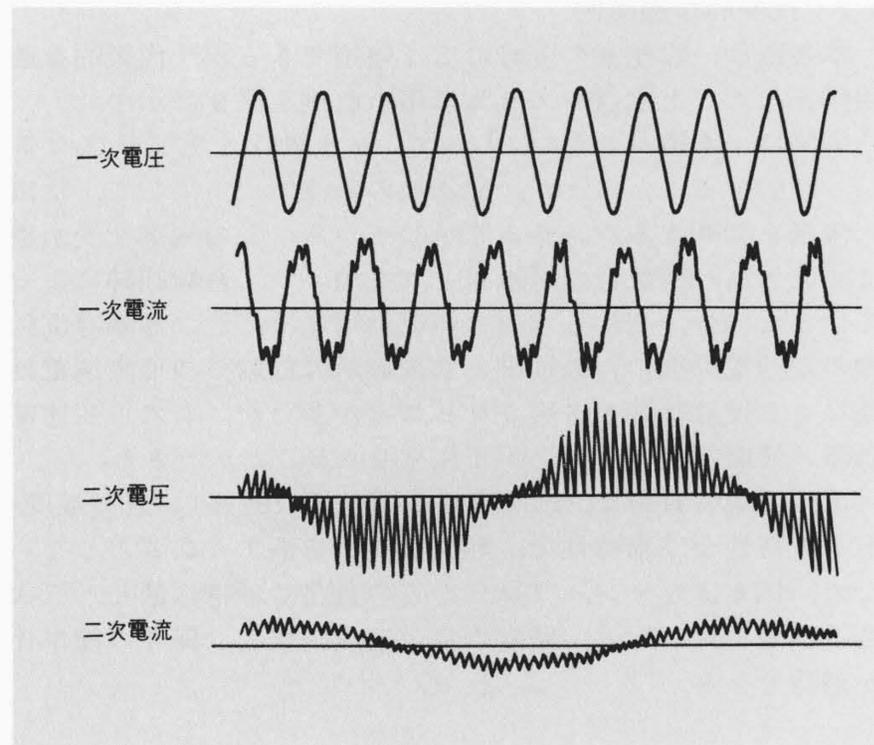


図7 チョップ制御時の電動機の電圧、電流波形(80%トルク, 90%速度時) 一次電圧、電流波形のひずみ率は、小さな値となっており、特に一次電圧のひずみ波交流は実用上無視できる値となる。

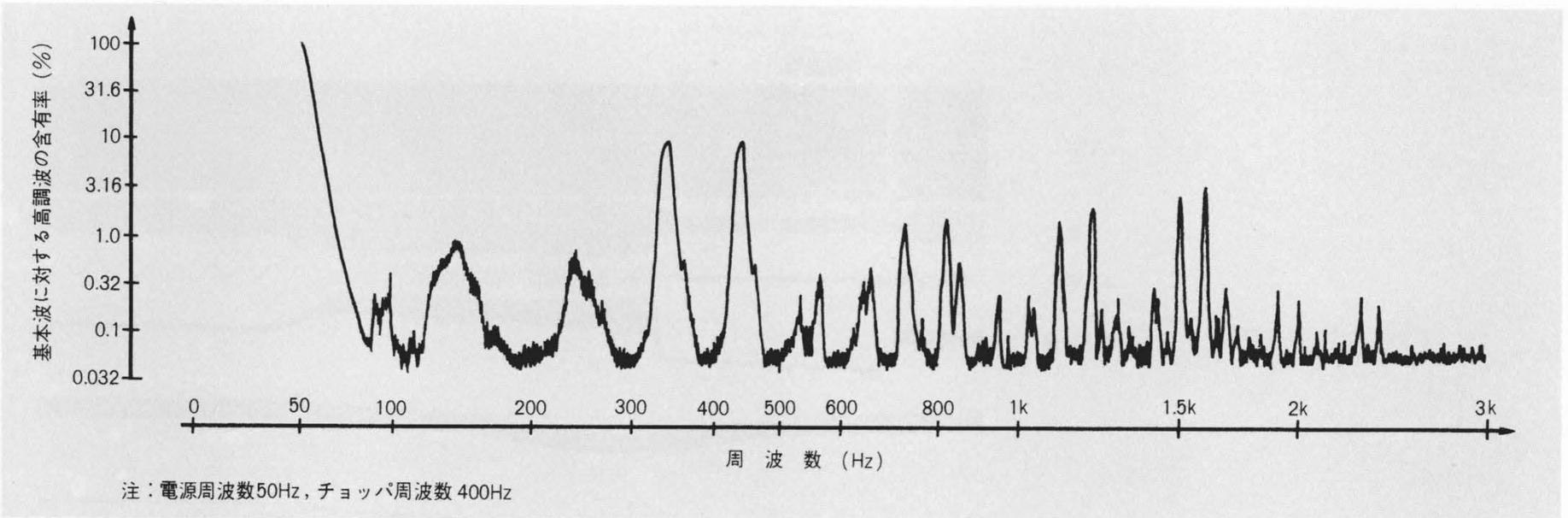


図8 チョップ制御時の一次電流波形の分析 高調波の周波数には、規則性がある。

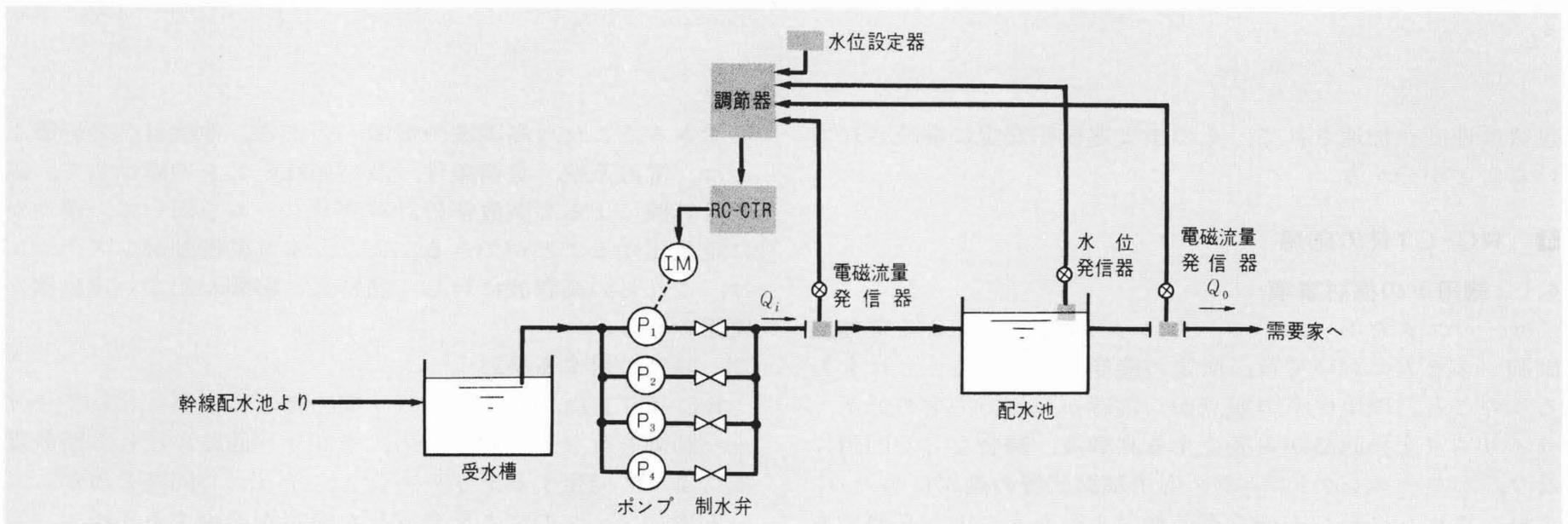


図9 RC-CTRの上水道システムへの適用 受水槽に設置された複数台のポンプを台数制御し、配水池の水位を一定にして、吐出し流量を制御する場合、RC-CTRは台数制御されるポンプの可変速制御装置として用いられる。

は、低騒音形の冷却ファン、並びに電動機を使用することにより、更に低騒音の電動機制御システムを実現することが可能となる。

#### 4.2 代表的な適用例

本装置は一般産業の分野に広く適用できるが、代表的な適用例として、上水道システムに用いた例を図9に示す。

同図は上水道システムにおいて、送水量 $Q_i$ を需要量 $Q_o$ に等しく制御することにより、配水池の水位を一定にして、吐出し流量を制御するシステムを示している。この制御を受水槽に設置された複数台の送水ポンプを用いて、台数制御によって行なう場合、それらポンプの駆動用には、かご形誘導電動機の定速電動機の台数制御と巻線形誘導電動機の可変速電動機による連続制御が併用されることが多いが、この可変速電動機による速度調整に、RC-CTRを用いることができる。

流体工業の負荷は、速度調整範囲が比較的狭く、且つ速度-トルク特性が二乗特性で、起動トルクをあまり必要としないため、例えばファン、ブロワなどの負荷には特に適し、二次抵抗制御方式に比べ、精度の良い速度調整と、保守の簡単化が期待できる。

### 5 結 言

最近の産業用電動機の世界速度制御においては、交流電動機制御が着目され実用化されつつあるが、日立製作所で実用化し

た中・小容量の誘導電動機を対象とした速度制御装置として、特に制御性能、保守性など、優れた特長をもつIMサイリスタコントローラについて、主回路及び制御回路の構成、動作原理及び特性について明らかにし、その適用例を紹介した。

現在、上・下水道ポンプ駆動用に実用化されているが、本稿に述べた特長以外に、誘導電動機の一次制御に比べ高調波が少なく、且つ比較的良い力率が期待できるので、今後広く一般産業の分野にも適用されるものと思われる。

#### 参考文献

- (1) 立川ほか：「パワー エレクトロニクスによるモータ制御の動向」、日立評論 55, 613 (昭48-6)
- (2) 小西ほか：「産業用サイリスタモータ」、日立評論 55, 618 (昭48-6)
- (3) 野田ほか：「誘導電動機のブラシレスセルビウス制御」、日立評論 55, 640 (昭48-6)
- (4) 若林ほか：「無整流子クレーマ方式による誘導電動機の世界速度制御」、昭50年電気学会全国大会, No.767 (昭50-4)
- (5) 和田ほか：「高速度サイリスタとその応用」、日立評論 57, 387 (昭50-5)
- (6) 齊藤ほか：「可変周波インバータによるモートル制御」、日立評論, 55, 632 (昭48-6)
- (7) 後條：「下水道システムにおける機械設備および電動機の制御」、日立評論, 57, 35 (昭50-2)
- (8) 大隅菊次郎：「電気機械(I)」, p.149, 共立出版 (昭36-3)