

家電用パワーエレクトロニクス応用

—インバータエアコン振動抑制制御—

Power Electronics Application to Home Appliance

パワーエレクトロニクスを家電品の中で身近なものとしたひとつにインバータエアコンがある。圧縮機を可変速運転することによって、暖房能力の増強、省電力化、快適性の向上が図られてきた。これらをいっそう押し進めるためには、更に広範囲な可変速運転が必要である。

しかし、低速側への速度の拡大に対して、これまで圧縮機を含めた機械系が大きく振動する現象が生じ、この解決が望まれていた。

振動発生の原因が、圧縮機のカム圧縮トルクと電動機出力トルクとの差トルクであることを明らかにし、これをなくす方法として速度脈動低減法について検討した。そして、センサレス速度検出及び繰返し制御による電動機トルク制御を開発し、圧縮機共振域での連続運転を可能とし、実用化した。

遠藤常博* *Tsunehiro Endō*
飯塚健一** *Ken'ichi Iizuka*
中村 満*** *Mitsuru Nakamura*

1 緒 言

パワーエレクトロニクスの一分野である電動機制御の面からみて、家電品は次の二つに分けることができる。その一つは、高精度の位置・速度制御が中心となるAV(Audio Visual)機器でのヘッド送りやスピンドルなどの各種アクチュエータ制御であり、また他の一つは動力源としてサイリスタ位相制御やインバータによる速度制御である。また他の分野では、小形・高性能化を目指した調理器具や照明でのインバータ電源がある。

本論文では、まず家電品でのインバータ応用を中心として、その全般について述べ、次に家電品の中でも最大の電力消費量を持つインバータエアコンについて最近の技術を報告する。

2 インバータ応用家電品

これまで産業分野を中心に発達してきたインバータは、現在、家電品にも広く利用されるようになってきている。これは、パワーエレクトロニクス及びマイクロコンピュータの進歩によって実現できたインバータの低価格化、小形化及び高い信頼性によるところが大きい。

家電品でのインバータ化の流れは、ヒートポンプ式ルームエアコンに始まっている。圧縮機の回転速度をインバータによって制御することで温度を細かく調整できるようになり、また高速回転によって暖房能力が大幅に高められた。そして、これらの利点は一般家庭にも広く認識され、年々インバータタイプの比率を増しつつある。

他の家電品にあっても、インバータ化によりそれぞれ特徴

ある利点が見いだされ製品化されてきた。例えば、電気冷凍冷蔵庫では冷凍時間短縮による味覚保存、蛍光灯ではインバータ電源によるちらつきの解消と即時点灯の実現などである。インバータ応用家電品とその特徴を、表1にまとめて示す。

今後、パワーエレクトロニクスの進展によるインバータの低価格化、高性能化とともに新しいインバータ製品が期待され、これまでにない特徴を持った家電品が現れるものと予想される。

3 ルームエアコンの振動抑制制御

インバータエアコンでは省電力化、低騒音化及び高機能化を図るため、圧縮機の可変速運転範囲をいっそう拡大していく必要がある。特に低速域への拡大は快適性の向上、低騒音化の点で必ず(須)であるが、圧縮機のカム圧縮トルクが脈動性であるため、配管などを含む機械系が共振しやすく、逆に騒音が増大する問題が生じていた。

本章では、まず振動の発生原因とその対策の基本的考え方について述べ、次に具体的対策法として圧縮機駆動用ブラシレス直流電動機の色度制御法について述べる。

3.1 圧縮機チャンバ回転振動

(1) 振動発生原因

ロータリ圧縮機でのチャンバの回転方向振動の発生原因を、模式的に示すための概略図を図1に示す。圧縮機は電動要素と圧縮要素及びこれらを収納するチャンバから成っており、これらはまた、回転系(電動要素のロータ、圧縮要素のローラ

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所栃木工場 *** 日立製作所機械研究所

表1 インバータ応用家電品 インバータによる電動機可変速運転やインバータ電源の適用によって、これまでにない新しい特徴を持った家電品が現れてきた。

家電品	主な特徴
ルームエアコン	●冷・暖房能力の連続可変(省電力・静音)
	●きめ細かい温度制御(快適性向上)
	●高い暖房能力(速い暖房立上り)
電気冷凍冷蔵庫	●冷凍能力の連続可変(省電力・静音)
	●高い冷凍能力(冷凍時間短縮・味覚保存)
蛍光灯	●ちらつき解消
	●即時点灯
電子レンジ	●小形・軽量
	●能力可変(調理機能大幅向上)
電磁調理器	●省エネルギー
	●高出力
石油ファンヒーター	●きめ細かい温度制御(快適性向上)
	●速い暖房立上り
シェーバー	●高速回転(深ぞり, 早ぞり)

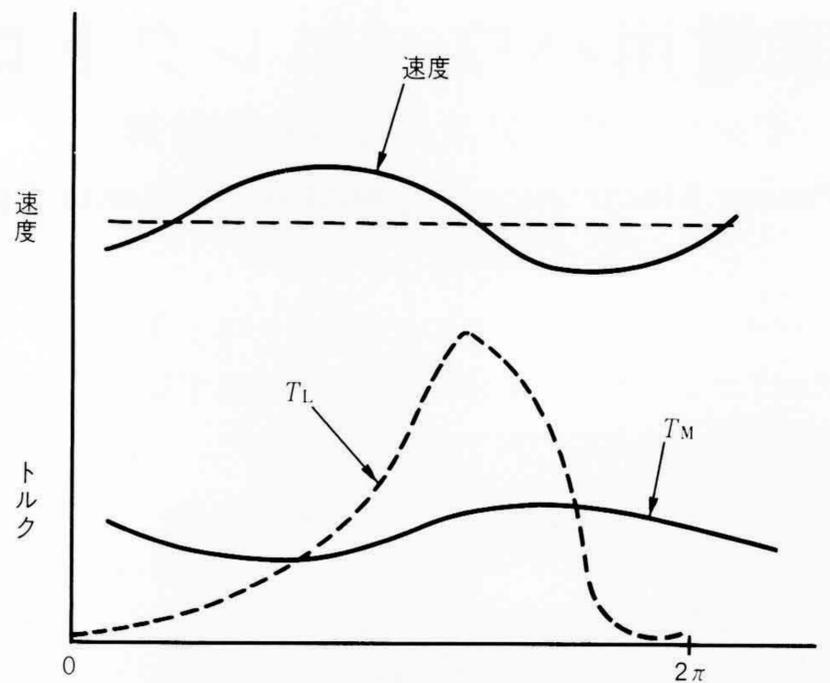


図2 ガス圧縮トルクと電動機出力トルク 電動機出力トルクがガス圧縮トルクよりも大きいと加速, また逆の場合は減速となって速度は変動する。

示すように、回転系と固定系とで逆方向に作用する。ここで回転系に注目して、上記の二つのトルク T_M と T_L の関係について考える。

圧縮要素の電動機に及ぼす負荷トルク T_L は、図2に示すような1回転を周期とした脈動負荷である。これに対して電動機出力トルク T_M がほぼ一定であると、回転する各位置で差トルク ($T_L - T_M$) が生じ、 $T_L > T_M$ の領域では減速、また $T_L < T_M$ の領域では加速となり、速度は一定とならず大きく変動する。

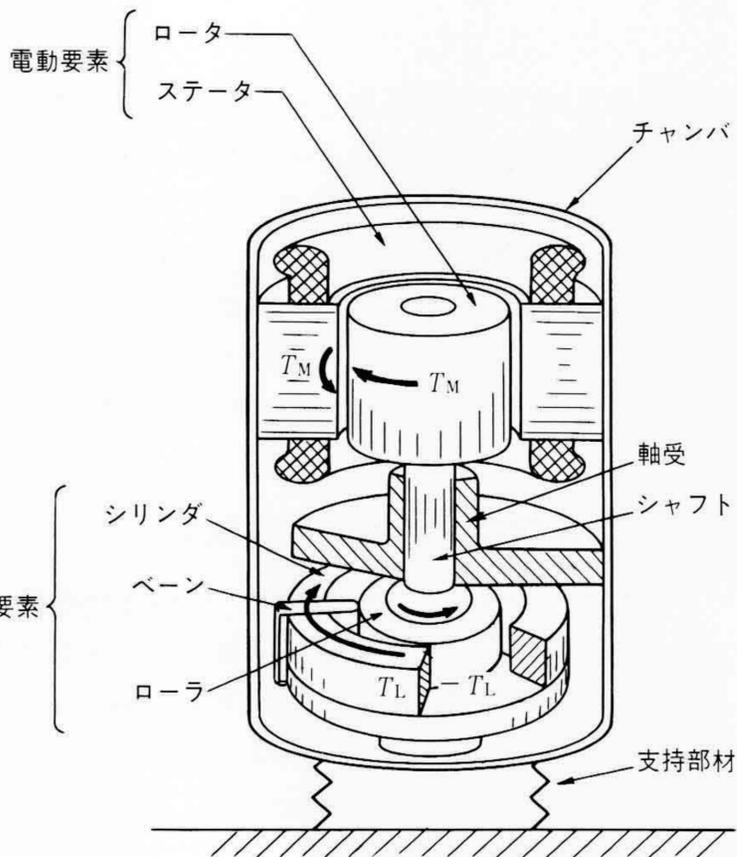
以上の差トルク存在のために生じる回転系の速度変動が、固定系ではチャンバ全体の回転方向振動の発生となって現れる。すなわち、差トルクがチャンバに対する加振力となって作用する。特に低速領域では機械系の共振領域存在のため、振動は激しくなる。

したがって、もしすべての回転角度で $T_M = T_L$ となるように電動機出力トルク T_M を制御すれば、回転系の速度変動が0となると同時に、チャンバに対する加振力がなくなり、回転振動を抑制することが可能となる。

(2) 振動抑制の考え方

電動機出力トルク T_M を負荷トルク T_L に一致させて機械系の振動を抑制するには(以下、トルク制御と呼ぶ)、まず負荷トルクの脈動形状、大きさ及び回転位置との関係を知らねばならない。このためには、なんらかのトルクセンサや位置センサが必要となるが、センサ取付け位置が、高温・高圧のチャンバ内部となることを考えると、信頼性など実用面で難点がある。今回、トルク制御を行うに当たってセンサレスを基本方針とし、以下に述べる方法を開発した。

振動発生の原因とその抑制の考え方を、図3にまとめて示す。回転系での速度変動と固定系での振動発生とは、既に述べたように、差トルク ($T_L - T_M$) の存在という一つの要因に基づいている。したがって、一つの現象を解決すれば、他の現象は自然と解決されることになる。すなわち、速度変動を極力少なくすることによって、差トルクをなくし、その結果と



注：略語説明 T_M (電動機出力トルク), T_L (ガス圧縮トルク(電動機負荷トルク))

図1 ロータリ圧縮機の回転振動発生原因 電動機の出カトルク T_M とガス圧縮トルク(電動機負荷トルク) T_L が一致しないと、回転系では速度変動、固定系では圧縮機チャンバの振動が現れる。

及びこれらを連結するシャフト)と、固定系(電動要素のステータ、圧縮要素のシリンダ及びチャンバ)を構成している。

いま、チャンバ上部から見て、回転系が時計方向に回転しているとき、電動要素側の電動機出力トルク T_M と圧縮要素側のガス圧縮トルク(電動機負荷トルク) T_L は、それぞれ同図に

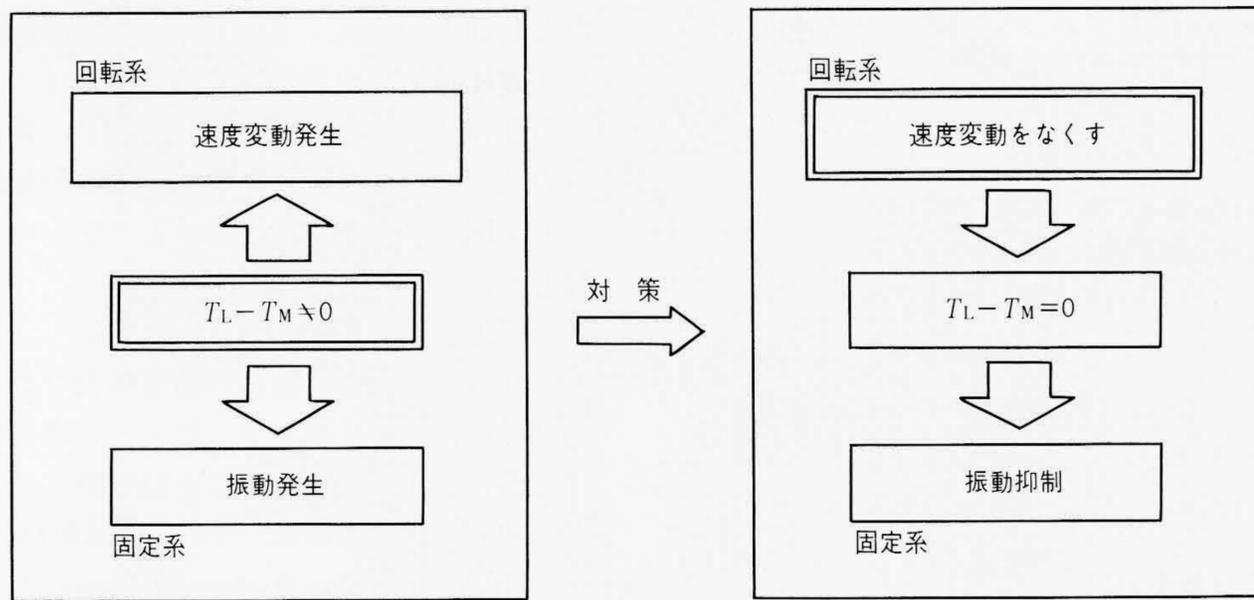


図3 振動抑制の考え方 回転系の速度変動と固定系の振動発生は、一つの原因(電動機出力トルクキガス圧縮トルク)から生じる。これより、速度変動をなくして振動抑制を行う。

して振動抑制を図ることができる。

以上の考え方に従うことによって、振動抑制の課題は、いかに速度変動をなくすかという問題に帰着することができる。次章以下に、圧縮機駆動用のブラシレス直流電動機に関して脈動負荷駆動に適した速度制御法について述べる。

3.2 制御方式

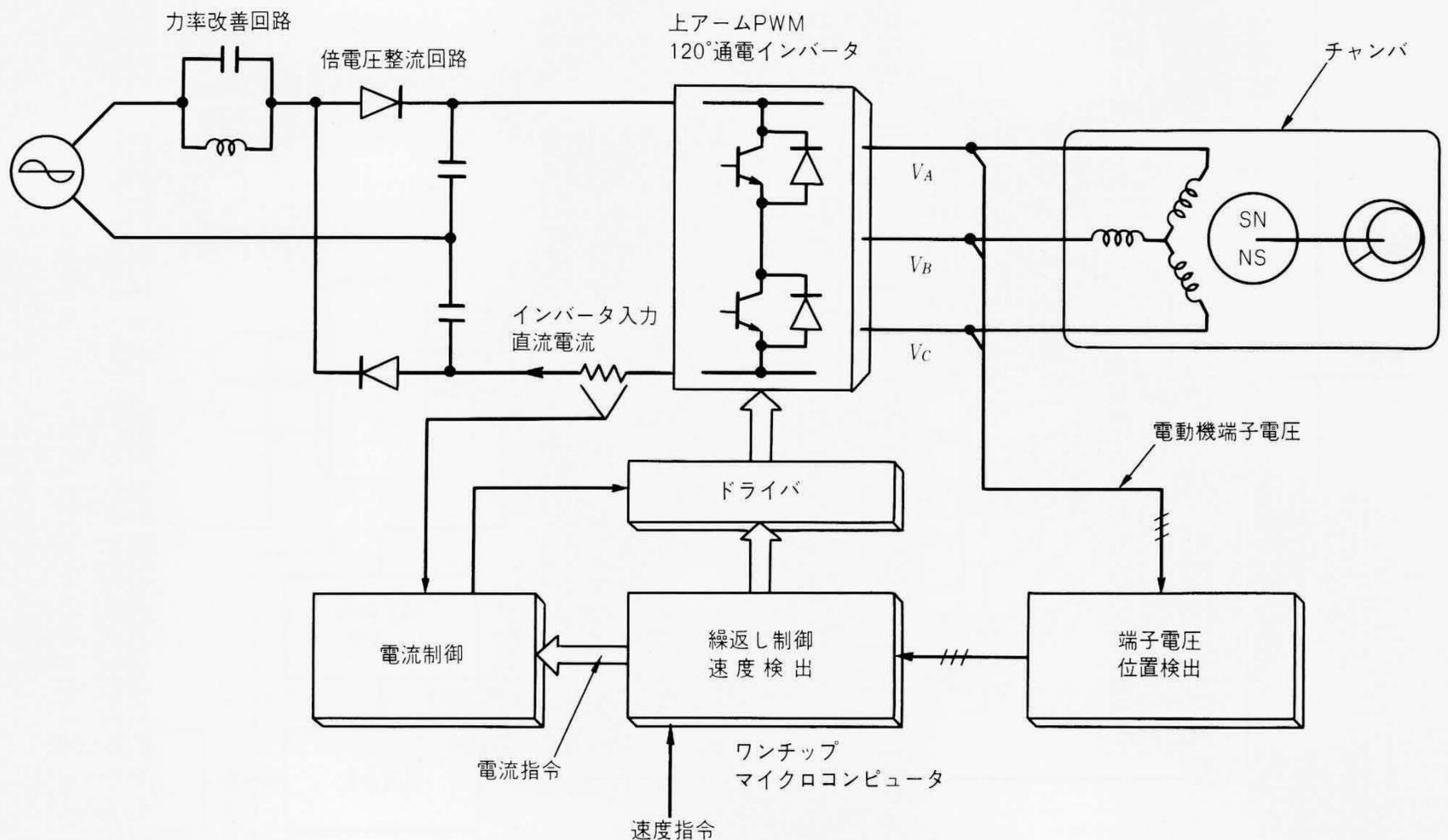
(1) ブラシレス直流電動機の制御構成

日立製作所の直流インバータエアコンに搭載している圧縮機用電動機は、永久磁石を界磁としたブラシレス直流電動機

であり、磁極の位置検出をセンサレスで行う端子電圧位置検出法³⁾を特徴の一つとしている。

トルク制御を可能としたブラシレス直流電動機の全体構成を図4に示す。インバータは120度通電形で上アーム側のPWM(パルス幅変調)制御による電流制御形である。制御回路はワンチップマイクロコンピュータを中心として、その入力側に端子電圧位置検出回路、出力側に電流制御回路とドライバがある。

トルク制御を行うのに特徴となる点は、インバータが電流



注：略語説明 PWM (Pulse Width Modulation)

図4 圧縮機駆動用ブラシレス直流電動機の全体構成 圧縮機チャンバの振動を抑制するために、インバータを電流制御形とした。また、マイクロコンピュータでは繰返し制御を行う。

圧縮機チャンバの振動を抑制するために、インバータを電流制御形とした。

制御形であること、及びマイクロコンピュータの速度制御処理と速度検出処理である。ブラシレス直流電動機の場合、電動機巻線電流が、そのトルクの大きさに比例することから、トルク制御を行うには巻線電流を制御すればよい。このためには、電動機側になんらかの電流センサが必要となるが、小形化の点で好ましくない。このためインバータ入力直流電流を利用し、これより巻線電流波形を作成し、マイクロコンピュータから出力される電流指令と一致するようインバータのPWM制御を行う構成とした。

一方、速度脈動低減によるトルク制御では、負荷の脈動周期1回転中に、何点かの速度を検出する必要がある。これに対して、センサレスの基本方針に従い、前述の端子電圧位置検出信号を利用し、そのパルス間隔時間を測定して速度を算出することにした。これにより、エンコーダなどの位置検出センサを省略することができる。

このとき、電動機が3相4極に対して、端子電圧位置検出信号は1回転、12パルスの速度情報信号であり、30度ごとの速度検出となる。しかし、大きく脈動する負荷に対して速度脈動を低減するには、1回転12パルスの分解能では速度検出遅れが大きすぎることも、また端子電圧位置検出信号のパルス間隔は回路構成部品のばらつきなどによって定常誤差が存在し、更には巻線電流の過渡的変化の影響を強く受け、正しい速度を反映しないという二つの問題が生じる。

これらに対し、まず1回転12パルスの速度情報だけで回転脈動を低減するため、圧縮機脈動負荷の周期性に着目して繰

返し制御²⁾を適用し、速度検出遅れの問題を解決した。また、端子電圧位置検出信号に対して、マイクロコンピュータで端子電圧位置検出回路の動作を模擬し、電流指令値を用いて巻線電流の過渡的変化によって生じる位相誤差を算出し、そのパルス間隔に補正を加えることで正しい速度検出を行うようにした。

(2) 繰返し制御

トルク制御を行うための速度制御ブロックを図5に示す。同図破線内がマイクロコンピュータの処理内容である。

特徴は、1回転を30度ごと12分割して考え、各分割単位ごとに独立して巻線電流、すなわち電動機出力トルク T_L に対応したRAM(Random Access Memory)を設けトルクデータとしたことである。そして、30度をサンプリング周期として、その時点の位置に応じたRAMを選び、比例項との組合せで電流指令(トルク指令)を作成し、マイクロコンピュータから出力する。更に、その時点直前の補正後の位置検出信号のパルス間隔時間から演算して速度を求め、偏差速度が0となるようにトルクデータを修正しておく。そして、1回転近く回転後にそのトルクデータを、速度検出位置と対応した位置に出力する。

以上のトルクデータの動きを表したのが図6である。12個のトルクデータを一つのトルクパターンとして、各位置での偏差速度を速度変動として扱い、第 n 回転目の速度変動情報から第 $(n+1)$ 回転目のトルクパターンを求める。このようにして、何回転か繰り返すことによって、各位置での偏差速度は

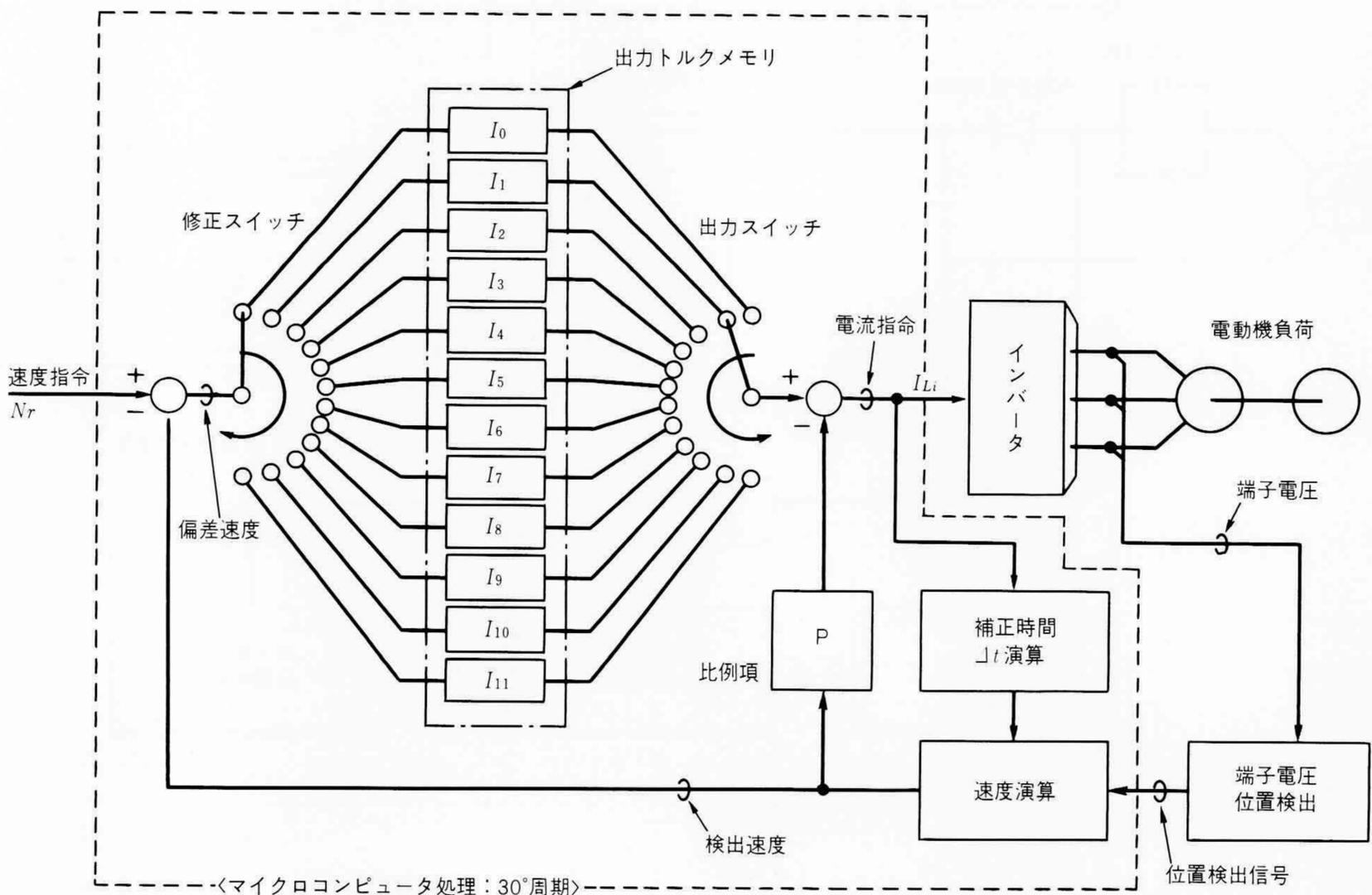


図5 速度制御ブロック図 圧縮機チャンバの振動を抑制するため、30度ごとの各位置に対応して電動機出力トルクデータをメモリに割り付け、偏差速度が0となるようにデータを修正していく。

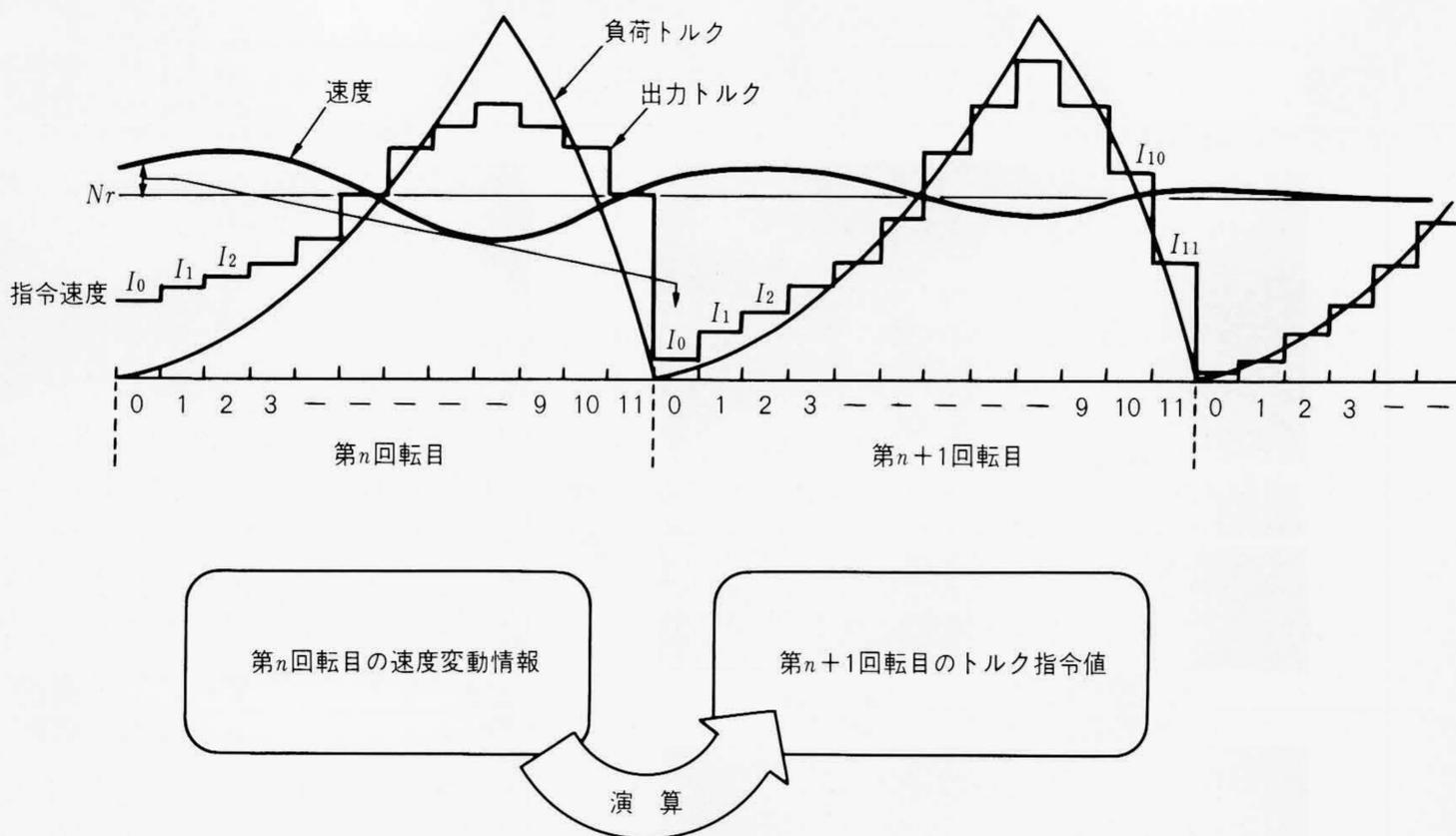


図6 繰返し制御によるトルク指令の作成法 電動機出力トルクを1回転ごとに偏差速度が0となるように修正していくことによって、電動機出力トルクは負荷トルクと一致してくる。

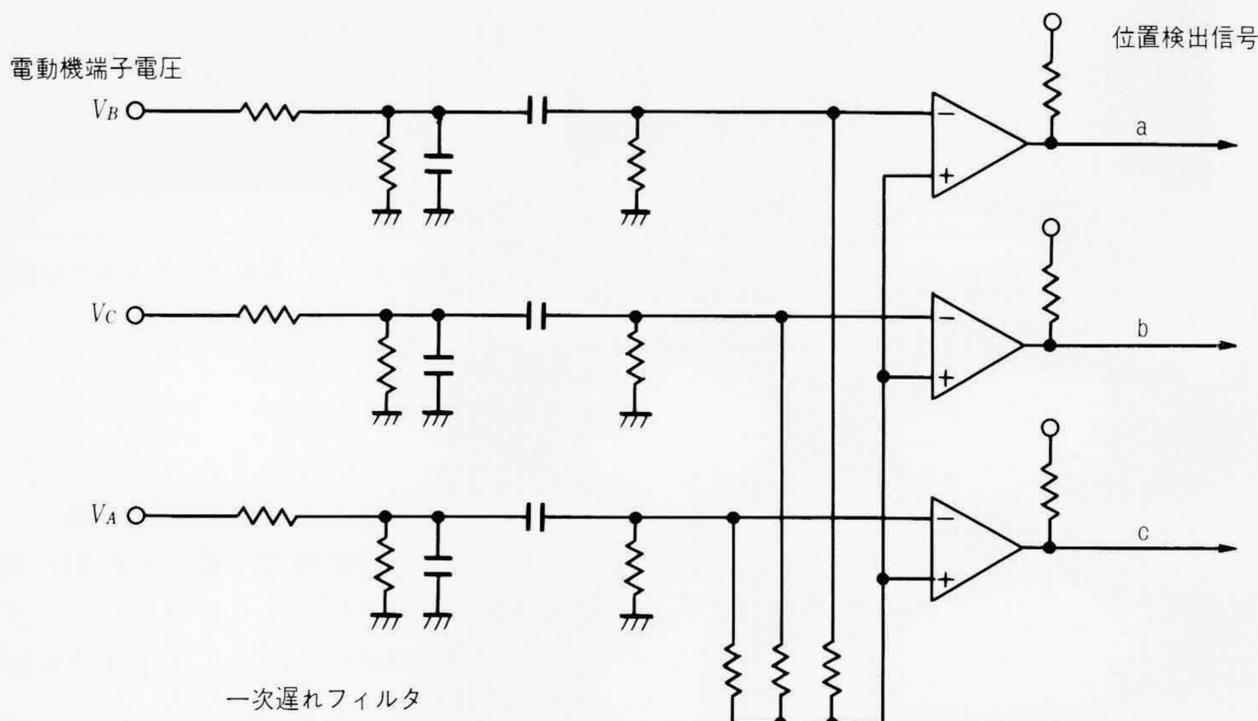


図7 端子電圧位置検出回路 電動機端子電圧を一次遅れフィルタを通過させて、90度位相シフトすることによりロータの磁極位置検出信号を作成する。

0に近づき、その結果として、電動機出力トルクは脈動する負荷トルクに一致してくる。

(3) 位置検出信号補正法

端子電圧位置検出回路を図7に示す。3相の電動機端子電圧を入力として、端子電圧位置検出信号を得る。既に述べたように、この位置検出信号のパルス間隔時間は、速度情報に巻線電流情報が加わったものとなっている。したがって、速度検出を正しく行うためには、パルス間隔時間から巻線電流に基づく成分を除外する必要がある。このためのマイクロコンピュータの処理が、図5に示した補正時間 Δt 演算部であり、上記の巻線電流に基づく成分を誤差として扱い、これを端子

電圧位置検出信号に対する補正時間 Δt として算出する処理である。

3.3 振動抑制効果

図8は、インバータの入力直流電流(電動機出力トルクに対応)及び圧縮機チャンバの振動加速度実測波形であり、トルク制御のない場合とある場合を $1,300 \text{ min}^{-1}$ 運転時について比較したものである。

図8から分かるように、トルク制御によって振動加速度は約 $\frac{1}{5}$ に低減できた。そして最低速度を従来の $1,600 \text{ min}^{-1}$ から $1,300 \text{ min}^{-1}$ に拡大し、機械系共振領域での連続運転を可能とした。本トルク制御を昭和62年10月発売のワイドインバータ

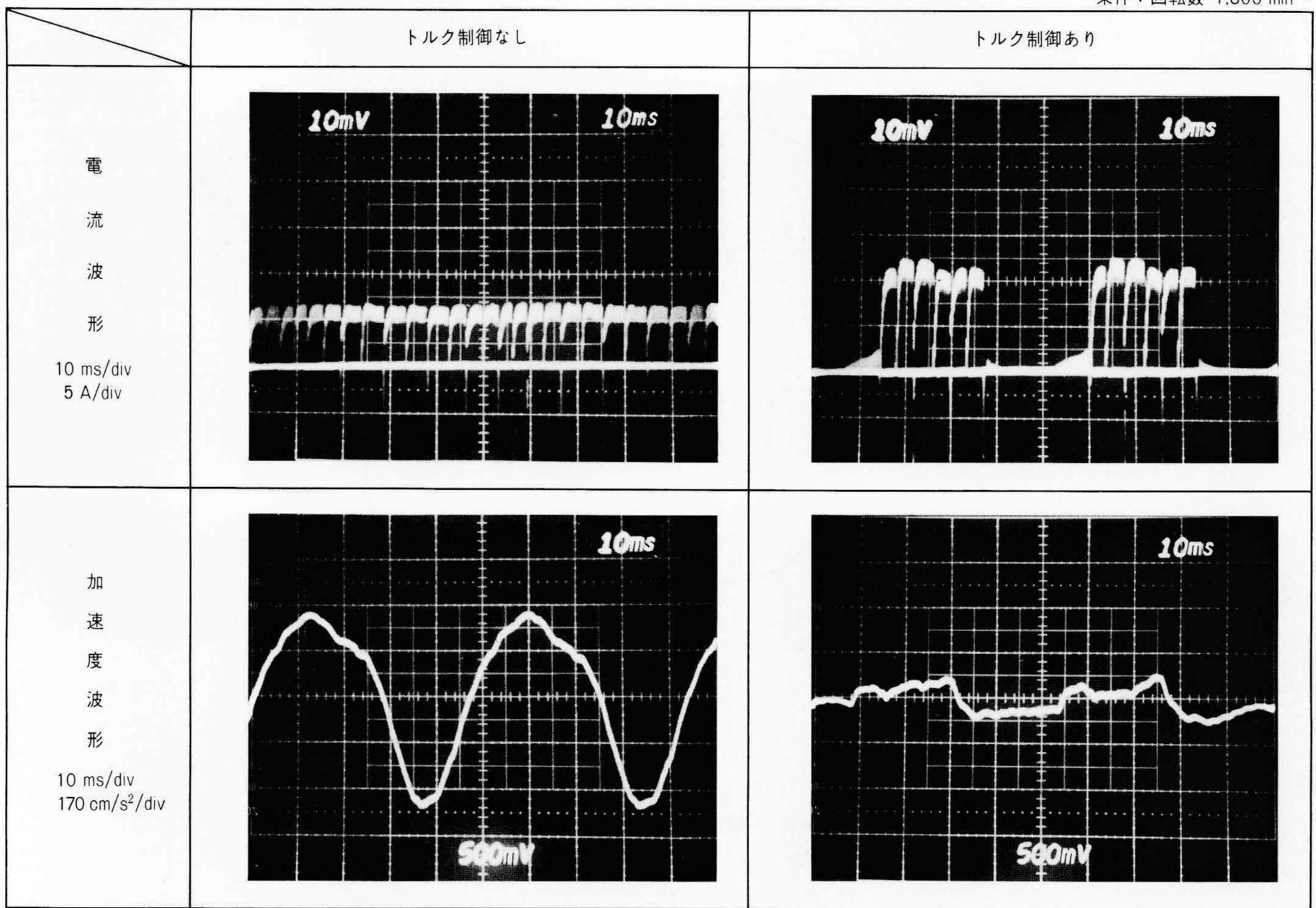


図8 インバータ入力直流電流と圧縮機チャンバ振動加速度 トルク制御を行うことによって、電動機出力トルクは負荷トルクであるガス圧縮トルクに近づき、圧縮機の振動加速度は低減する。

RAS-2558Wに初めて適用し、従来機種1,279 W(1,100 kcal/h)に対して、1,047 W(900 kcal/h)の最小能力を実現している。

4 結 言

インバータエアコンの能力制御範囲を拡大し、低騒音化、省電力、快適性向上を図るため、圧縮機の低速運転化について検討した。そして、これまで低速運転時に生じていた機械系の振動現象を明らかにし、この振動を抑制する技術を開発し、実用化した。その特徴は、

(1) 回転系の速度変動を0に近づけることによって、加振源となる電動機出力トルクと負荷トルクとの差トルクを減少させる振動抑制法

(2) 繰返し制御による速度変動低減法

(3) 速度検出に電動機端子電圧を利用したセンサレス方式である。今後、更にマイクロコンピュータの処理速度の向上及び検出速度の精度を向上し、トルク制御適用速度範囲を拡大していく考えである。

参考文献

- 1) T.Endo, et al.: Brushless Motor without a Shaft-Mounted Position Sensor, Trans.IEE of Japan, Sec.E, 105, 1/2, 6~13(Jan./Feb., 1985)
- 2) 井上, 外: プレイバックサーボ系の高精度制御, 電気学会誌C, 101, 4, 89~96(昭56-4)