

電気機関車用大容量PWM方式インバータ

High Power PWM Inverters for Electric Locomotive Drive

相沢英俊* Hidetoshi Aizawa
野崎吉雄** Yoshio Nozaki
田村 薫* Kaoru Tamura
久保 宏* Hiroshi Kubo
川又賢治** Kenji Kawamata

従来、車両用電動機としては直流電動機が使用されてきたが、保守性、車両性能などの向上を目的としてインバータ制御による誘導電動機駆動方式が注目されるようになってきた。日本国有鉄道はこの誘導電動機駆動方式を電気機関車を対象として研究開発を進めている。日立製作所はその制御の中心となる大容量インバータを製作・納入した。インバータとしては、等価妨害電流、トルク脈動が小さい電圧形インバータ方式を採用した。

トルク脈動を小さくするため、周波数に応じてパルス数を増減させる方式を、更に起動時及びパルス切換時にはトルクの急変を低減するために特殊パルス切換方式を採用した。また、電流制御は基本波電流検出によるすべり周波数制御を採用し、微小なすべり周波数を精度高く制御するのにマイクロコンピュータを使用した。

これらの制御により、安定したトルク制御が行なわれることを確認した。

1 緒言

現在、車両駆動用電動機として直流電動機が広く用いられている。直流電動機は速度制御方式は、抵抗制御又はタップチェンジャ方式、サイリスタ制御方式、チョップ制御方式へと発展してきた。

一方、最近の動向としてフラッシュオーバの心配がなくメンテナンスフリー化が図れ、粘着性能が優れているインバータによる誘導電動機駆動方式の開発が国内外で行なわれている。

本稿では、電気機関車を対象とした日本国有鉄道納めの誘導電動機駆動用大容量可変電圧・可変周波数インバータについて述べる。

2 インバータ方式の比較・評価

表1に電圧形インバータと電流形インバータの基本特性、及び誘導電動機を駆動した場合の特性についての比較・評価を示す。

電圧形インバータ方式では、インバータの直流入力電圧がコンバータにより定電圧制御されており、インバータにより誘導電動機の電圧、及び周波数が制御される。これに対し、電流形インバータ方式では、誘導電動機の電流はコンバータによって制御され、周波数だけがインバータによって制御される。両方式とも回生制動が可能である。

両方式ともそれぞれ特徴があるが、等価妨害電流 J_p 、トルク脈動が小さく安定な制御ができるという点で、電圧形インバータが車両用に適しているといえる。

3 インバータ装置の概要

3.1 仕様及び外観

インバータ装置の仕様を表2に、外観を図1に示す。

3.2 主回路

図2にインバータの主回路構成を示す。

インバータの主回路は、次の点を考慮し設計した。

(1) 補助インパルス転流インバータ回路は、遅れ力率負荷に対しては負荷電流が増大すると転流能力も増大するという特

表1 インバータ方式比較表 電圧形インバータは、電流形インバータに対し交流側高調波電流、トルク脈動が小さく車両用に適している。

方式 項目	電圧形インバータ	電流形インバータ
基本構成		
出力電圧		
出力電流		
素子	高速サイリスタ	中速サイリスタ
交流側高調波	ダイオード制御方式と同じ 	交流位相制御方式と同じ
力率	常に高力率	位相制御により力率低下
トルク脈動	小	やや大

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所水戸工場

表2 インバータ装置仕様 定格出力電圧800V, 定格出力周波数66.8Hzで電圧と周波数の比が一定となるように制御される。

項目	仕様
定格容量	1,540kVA
最大容量	2,156kVA(140%)
出力電圧	AC 0~800V
出力周波数	2~113Hz
入力電圧	DC1,040V
出力電圧制御方式	電圧形パルス幅変調方式
冷却方式	フロン沸騰冷却風冷式
負荷	650kW 三相誘導電動機 2台

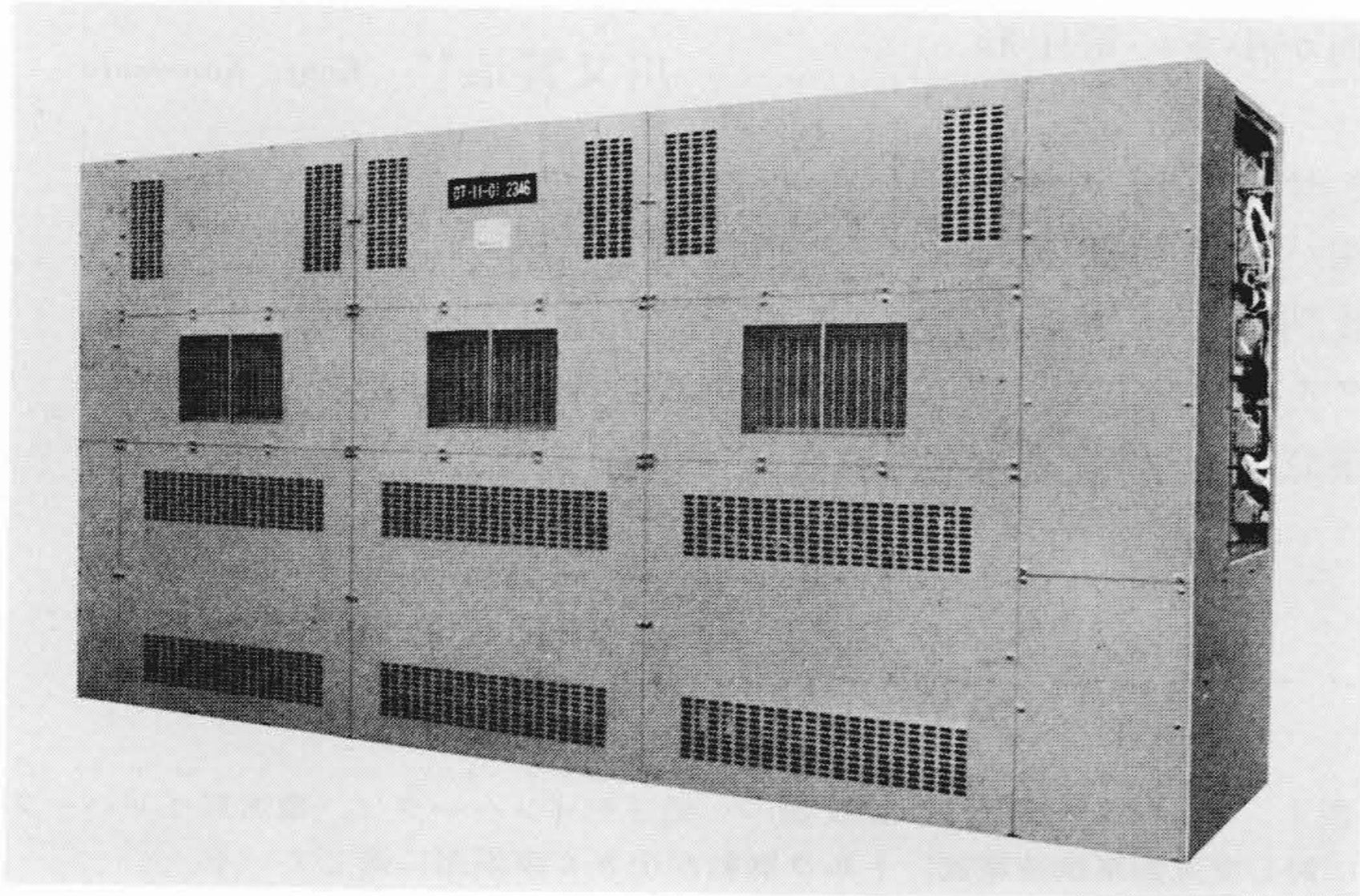


図1 インバータ装置の外観 前・後面に3ユニットずつ計6ユニットで構成されている。

徴をもっている¹⁾。この回路をPWM(Pulse Width Modulation: パルス幅変調)インバータにそのまま適用すると、この特徴が生かされないばかりか、サイリスタのパルス電流耐量の増大及び高耐圧化を必要とするものになる¹⁾。このため、常に転流時の転流コンデンサ電圧が一定となるように過充電されたエネルギーは抵抗を通して電源へ帰還する方式とした²⁾。

(2) 3パルスモードでは、パルス幅が最小スリット幅のとき出力電圧が最大となる。3パルスから1パルスへ切換時の電圧変化量は、最小スリット幅に比例して大きくなる。このため、切換時の電圧変化量を小さくするのに、サイリスタのパルス電流耐量限界まで電流を流し、転流パルス電流幅を狭くできるようにした。

(3) 大容量素子の利用率向上のため、冷却はフロン沸騰冷却方式とした。

3.3 制御回路

3.3.1 PWM制御方式の概要

誘導電動機の制御は、加速中の磁束を一定とするため $V/f=$ 一定制御が必要である。 $V/f=$ 一定制御を行なうための電圧制御方式としてPWM制御方式を採用した。

図3にPWM制御ブロック図を示す。

PWM制御回路は、次の点を特に考慮し設計した。

(1) トルク脈動の低減

駆動周波数範囲が2Hzから100Hz以上にも変わるので、低周波時でのトルク脈動を低減するため、図4に示すように低

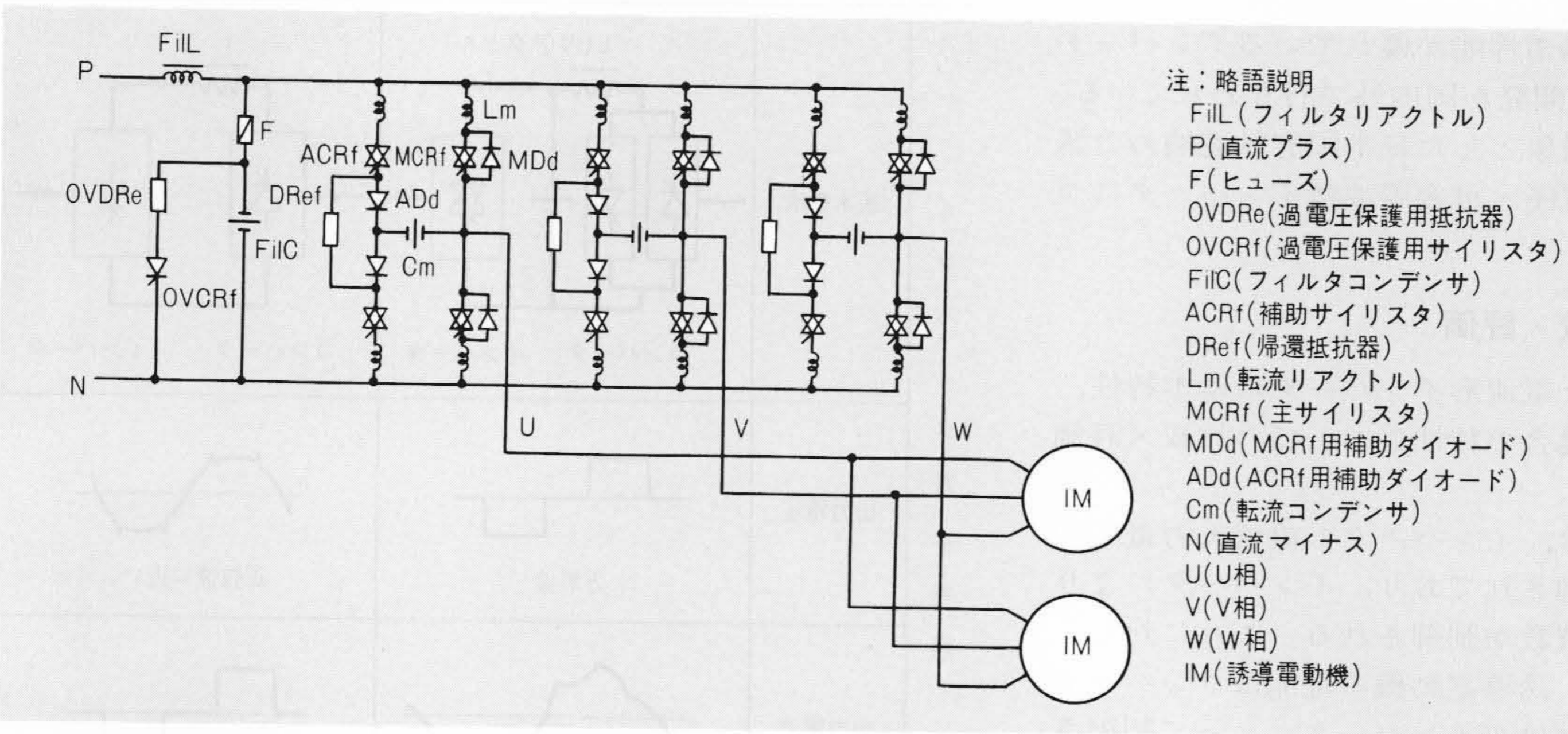


図2 インバータ主回路構成 1台のインバータで2台の誘導電動機を駆動する方式で、インバータの入力電圧はコンバータにより定電圧制御されている。

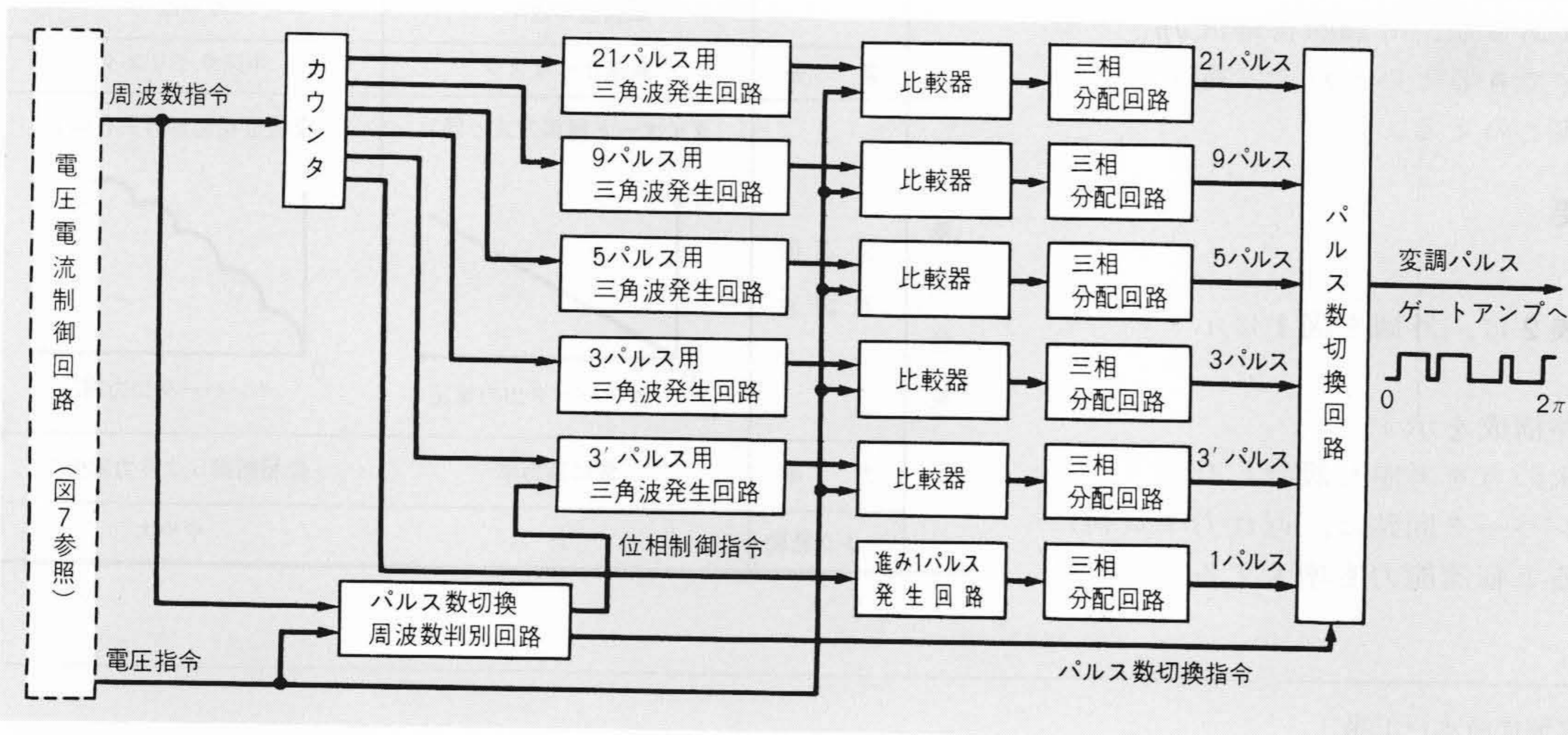


図3 PWM制御ブロック図 図7の電圧電流制御回路からの周波数と電圧の指令に従い、21パルスから1パルスの間で運転される。図の波形は、3パルスの場合を示している。

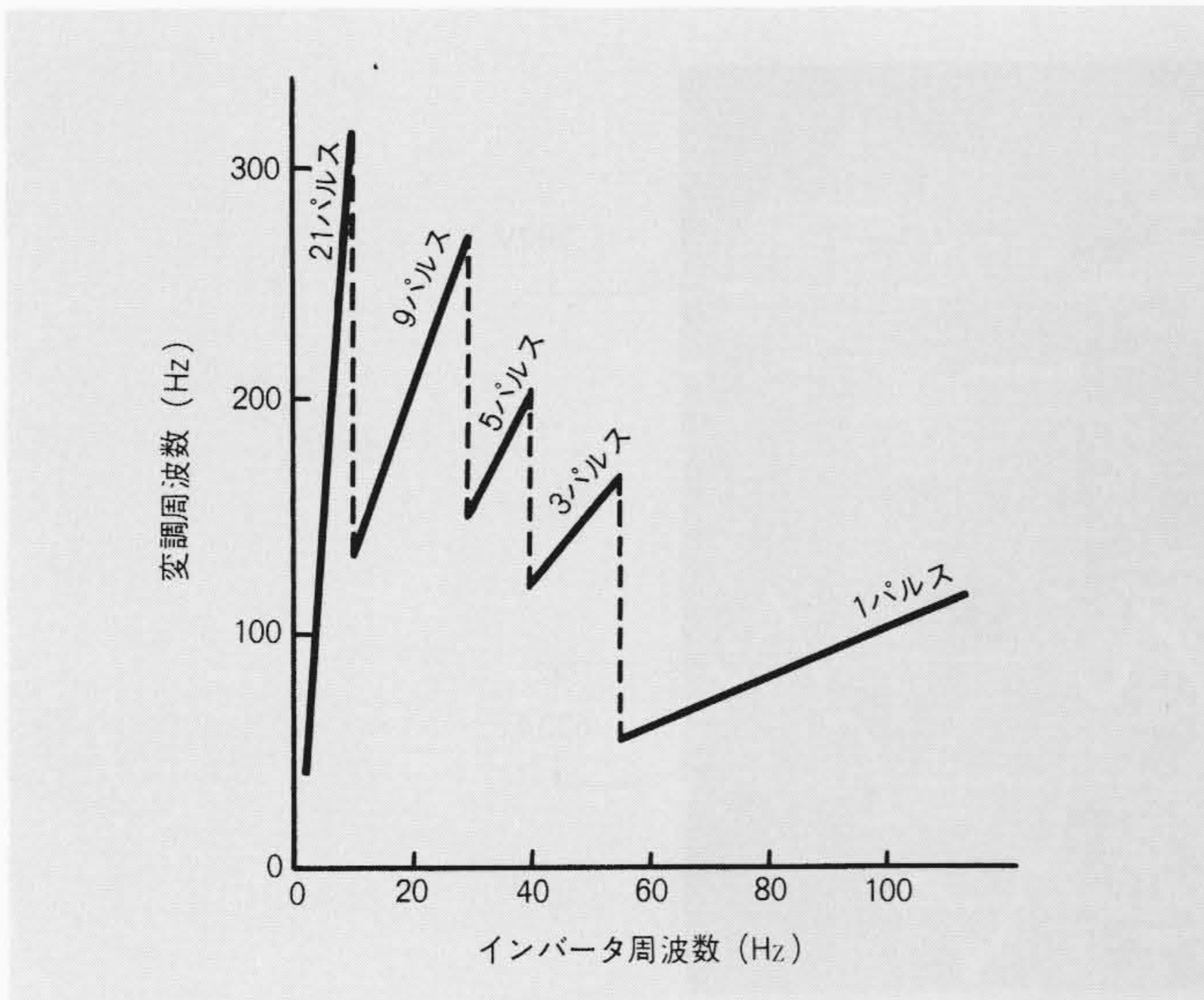


図4 インバータ周波数～変調周波数 インバータ周波数に応じて、パルス数を増減させる方式を採用した。

周波時でパルス数を多く、高周波になるにつれてパルス数を減らす方式を採用した。

(2) 3パルスから1パルス切替時のトルク急変の抑制

大容量インバータでは、3パルスモードの最小スリット幅が大きくなる。このため、3パルスから1パルスへ切替時の電圧変化量が大いので、3パルスと1パルスの間に中間の電圧を出力できる3'パルスモード制御方式を採用した。

この制御方式は、3パルスから1パルスに移る前に3パルスのスリットをシフトして電圧を滑らかに上昇させ、切替時の電圧変化量を小さくする方式である。

3パルスのスリットシフト中の位相制御角と出力電圧基本波実効値の関係を図5に示す。

(3) 起動時のトルク急変の抑制

起動時は電動機へのトルクショックを小さくするため、電圧を徐々に増加させるソフトスタート方式を採用した。特に、停止状態からの起動では三角波との比較レベルが低く限界にあるため、比較レベルが同一で出力電圧を絞り込む特殊パルス起動方式を採用した。起動時の出力電圧波形を図6に示す。

3.3.2 電圧電流制御方式の概要

図7に電圧電流制御ブロック図を示す。

電圧電流制御方式の主な特徴は次に述べるとおりである。

(1) すべり周波数の制御精度向上

電動機のロータ周波数を精度高く検出し、この周波数に微小なすべり周波数を加減算(演算)して、インバータの出力周波数(電動機のステータ周波数)とするためにマイクロコンピュータ(6800シリーズ)を使用した。

(2) 定トルク制御の向上

電動機の軸トルクは基本波電流の実効値に比例する。このため、可変周波のバンドパスフィルタを使用して、速度とともに変化するステータ周波数の基本波電流を常に検出して、定トルク制御を行なうようにした。

(3) 再粘着制御性能の向上

- (a) 各電動機のパルス発生器の出力回路に優先回路を設け、力行時は低位優先、回生ブレーキ時は高位優先とした。
- (b) 各電動機電流の検出回路は出力を高位優先とし、空転時に粘着軸側の電流で制御するようにした。

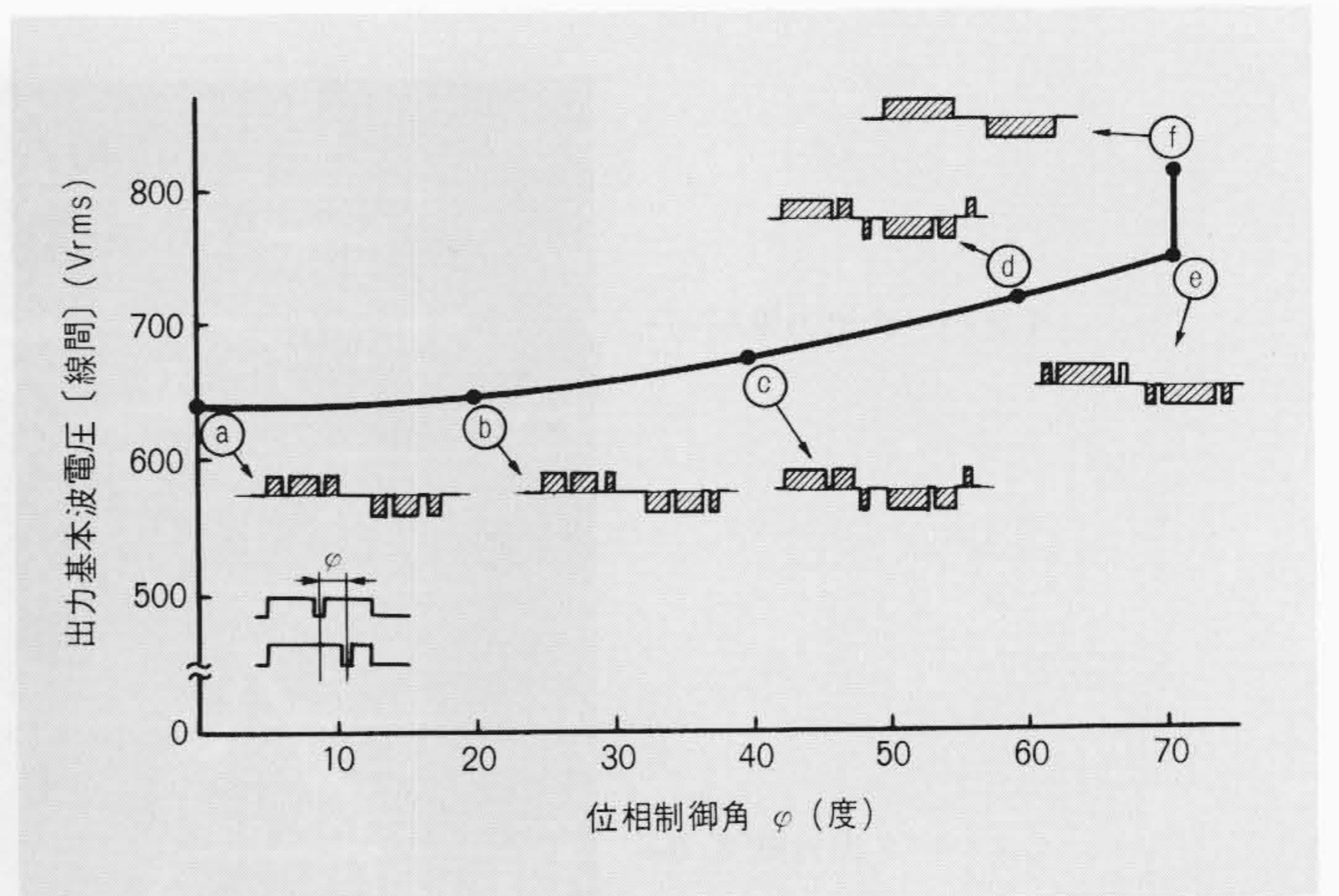


図5 3'パルスの位相制御角～出力電圧特性 インバータ周波数53 Hzでの特性を示したもので、位相制御角をシフトすることにより、出力電圧を滑らかに上昇させることができる。

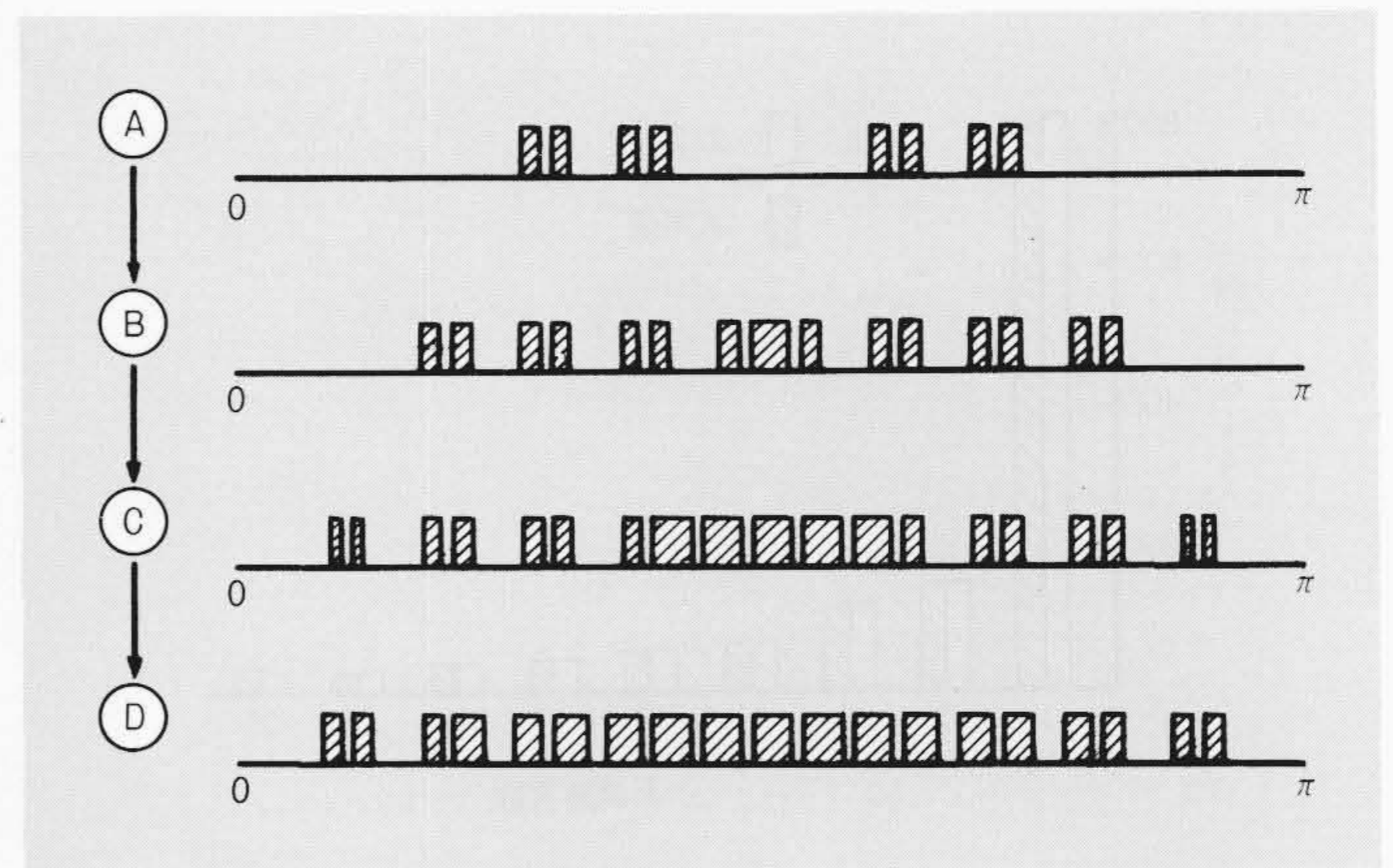


図6 起動時の出力電圧波形(半サイクル) A→B→C→Dと1サイクルずつ電圧を徐々に増加させる方式により、ソフトスタート特性をもたせている。

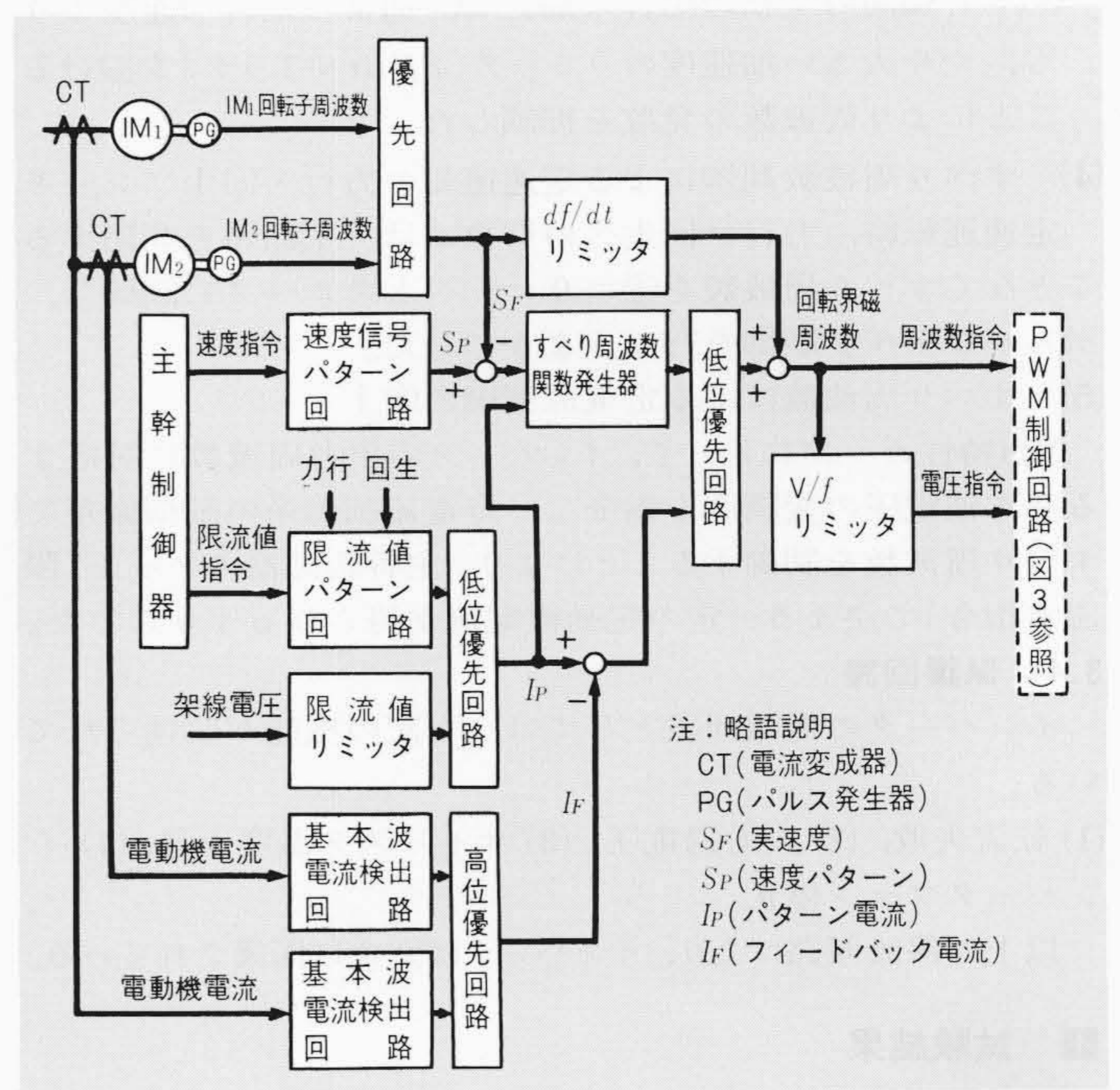


図7 電圧電流制御ブロック図 各電動機の基本波電流を検出し、限流値指令との偏差ですべり周波数を制御する方式により、良好な電圧電流特性を得ている。

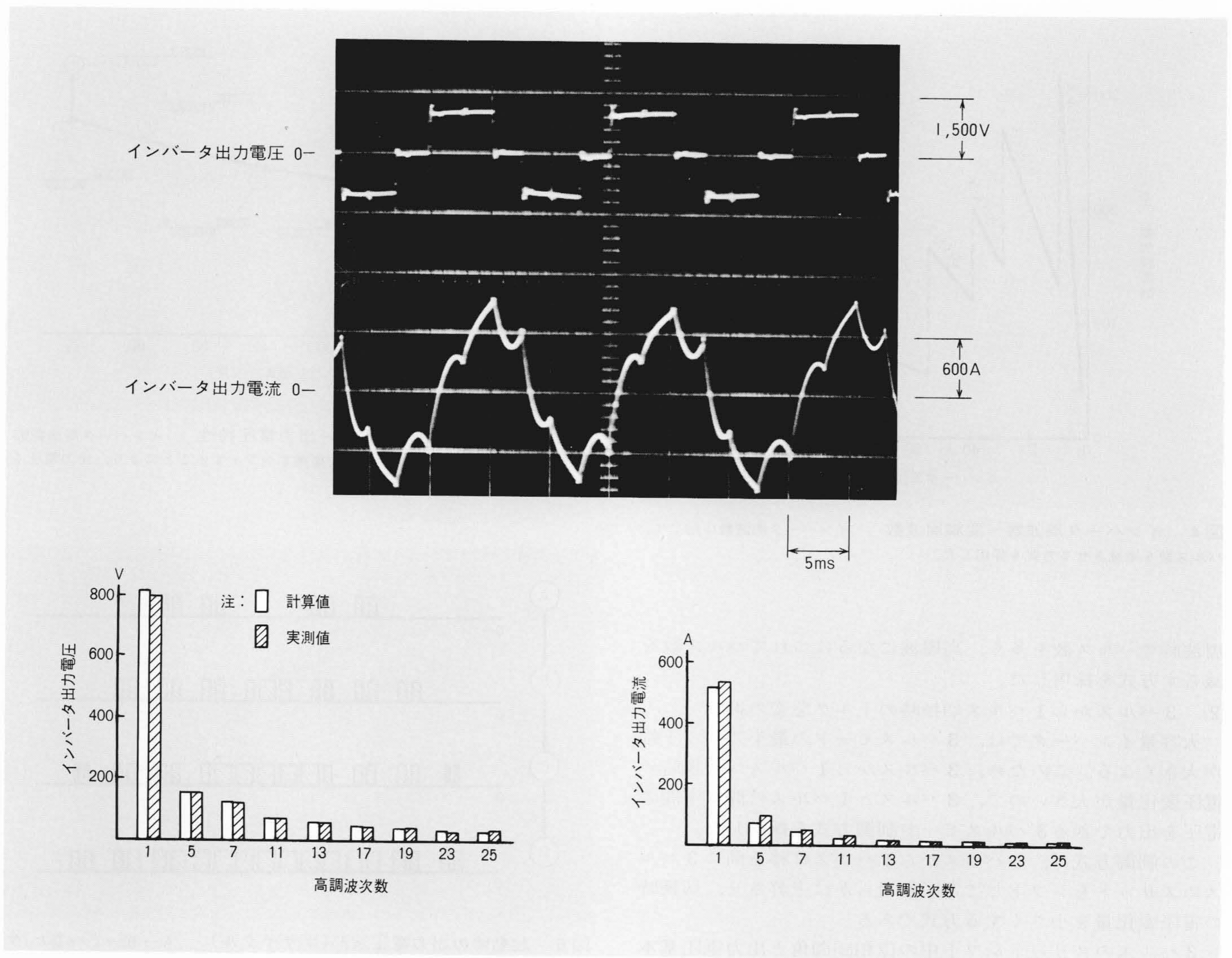


図8 定格時の出力電圧・電流波形及び高調波分析結果 リアクトルと抵抗の等価負荷により、試験を実施した。

(c) 各軸同時空転の場合に備えて、通常の走行加速度よりも、やや大きい加速度のリミッタ (df/dt リミッタ) を設けることにより周波数の発散を抑制した。

(4) すべり周波数制御による定速運転の力行・回生ブレーキ定速運転時、力行⇄回生への切換えは、主回路を開閉することなくすべり周波数を $\oplus \Rightarrow 0 \Rightarrow \ominus$ へとスムーズに制御し、滑らかなトルク制御を行なうようにした。

(5) すべり周波数による定電流制御の向上

V/f特性カーブに沿って、インバータの出力周波数に対応する基本波電圧の変調度を指令し、定電流制御系の制御偏差ですべり周波数を制御することにより、主幹制御器のノッチ(限流値指令)で決まる一定の電動機電流が得られるようにした。

3.4 保護回路

インバータの保護回路としては、下記の機能が設けられている。

- (1) 転流失敗, (2) 入力過電圧, (3) サイリスタ温度上昇, (4) インバータファン停止

以上の保護回路により、インバータは完全に保護されている。

4 試験結果

図8は定格時の出力電圧・電流波形、及び高調波分析結果を示すものである。他のパルスモードでも高調波分析した結果、当初予定したように高調波が抑制されている。

5 結 言

車両用電動機の制御方式は、ダイオード整流器方式からサイリスタ整流器方式へと発展実用化され、更にインバータ制御方式が開発された。インバータによる誘導電動機駆動方式は、メンテナンスフリー化、省エネルギー化、粘着性能の向上など将来性が期待できる。

車両性能的にも総合組合せ試験で確認され、大容量誘導電動機を駆動するインバータの基礎技術が確立され、電気機関車の実現に大きく前進した。

なお本開発に当たり、日本国有鉄道車両設計事務所及び鉄道技術研究所の関係各位から御指導をいただいた。ここに深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) W. McMurray, et al.: A Silicon-Controlled Rectifier Inverter with Improved Commutation. AIEE Transactions, Volume 80, Part 1, 1961, pp. 531-42.
- 2) A. B. Plunkett, et al.: Inverter Induction Motor Drive for Transit Cars. IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. IA-13, No. 1, JAN/FEB 1977.