

交流電動機の可変周波インバータ制御

Adjustable Speed Control of Inverter-fed AC Motor

可変周波インバータは、近年省電力機器として各種産業機械の回転数制御に適用が拡大されてきている。日立製作所ではこのような需要にこたえて、可変周波インバータを多数のシステムに適用し、累積容量は33MVAに達している。

可変周波インバータの適用に当たって、トルク脈動、インバータから商用電源への切換など、駆動系に対し考慮すべき点があり、インバータの制御方式及び電動機動作の両面から検討し、その結果を述べた。

また、可変周波インバータは省電力用としてはもとより、交流電気動力計、各種工作機械などにも適用されており、これらの応用例について紹介した。

岩田幸治* Iwata Kôji
川口敏雄* Kawaguchi Toshio
清水煌策* Shimizu Kôsaku
本部光幸** Honbu Mitsuyuki
石橋 耀*** Ishibashi Akira

1 緒 言

可変周波インバータは、誘導電動機の世界速度制御方式として圧延機テーブル駆動をはじめ、各種産業機械に採用されてきた。近年、この方式が誘導電動機の高効率運転方式として脚光を浴びており、可変周波インバータの大容量化、多重化などの技術進歩とあいまって、ファン、ポンプなど、従来、ダンパやバルブ制御を行っていた機器に対し、省電力はもとより、騒音や振動の低減、流量や圧力の高安定化を目的として適用拡大が図られてきている。その適用方法も、始動専用、低速連続運転など多岐にわたっている。日立製作所はこのような需要にこたえて、電流形AVAF(Adjustable Voltage and Adjustable Frequency:可変電圧可変周波)インバータを多数のシステムに適用し、好調に運転を行っており、図1は最近の製作実績を示したものである。

AVAFによる誘導電動機の可変速運転は、既設、新設を問わず実施されているが、適用に当たって、AVAFの性能及び駆動系に対し留意すべき点があり、この論文では、これらの問題について解説するとともに、幾つかの応用例の紹介を行った。

2 AVAFの性能及び動作

2.1 概 要

ファン、ポンプなど風水力機械を回転数制御を行なった場合、流量は回転数に比例し、軸動力は回転数の三乗に比例する。一方、ダンパ、バルブなどでは全閉状態でも、全開時の50~60%の軸動力が必要である。したがって、所要の流量を得るために回転数を調整することにより、大幅な運転効率の向上を図ることができる¹⁾。

図2は、AVAFの主回路及び制御ブロックを示したもので、電動機の電圧と周波数の比(V/f)を一定に保つ V/f 一定制御を基本とし、電源系統との同期化を図るための制御機能も加えている。

2.2 AVAFの多重化

AVAFの出力電流は方形波であり、高調波による脈動トルクが電動機から発生する。この脈動トルクが、機械系の共振周波数と一致した場合に、過大な過渡トルクを生ずることがある。この影響を避けるため、脈動トルク率を下げるのが望ましい。AVAFの多重化は、複数台のインバータの位相を

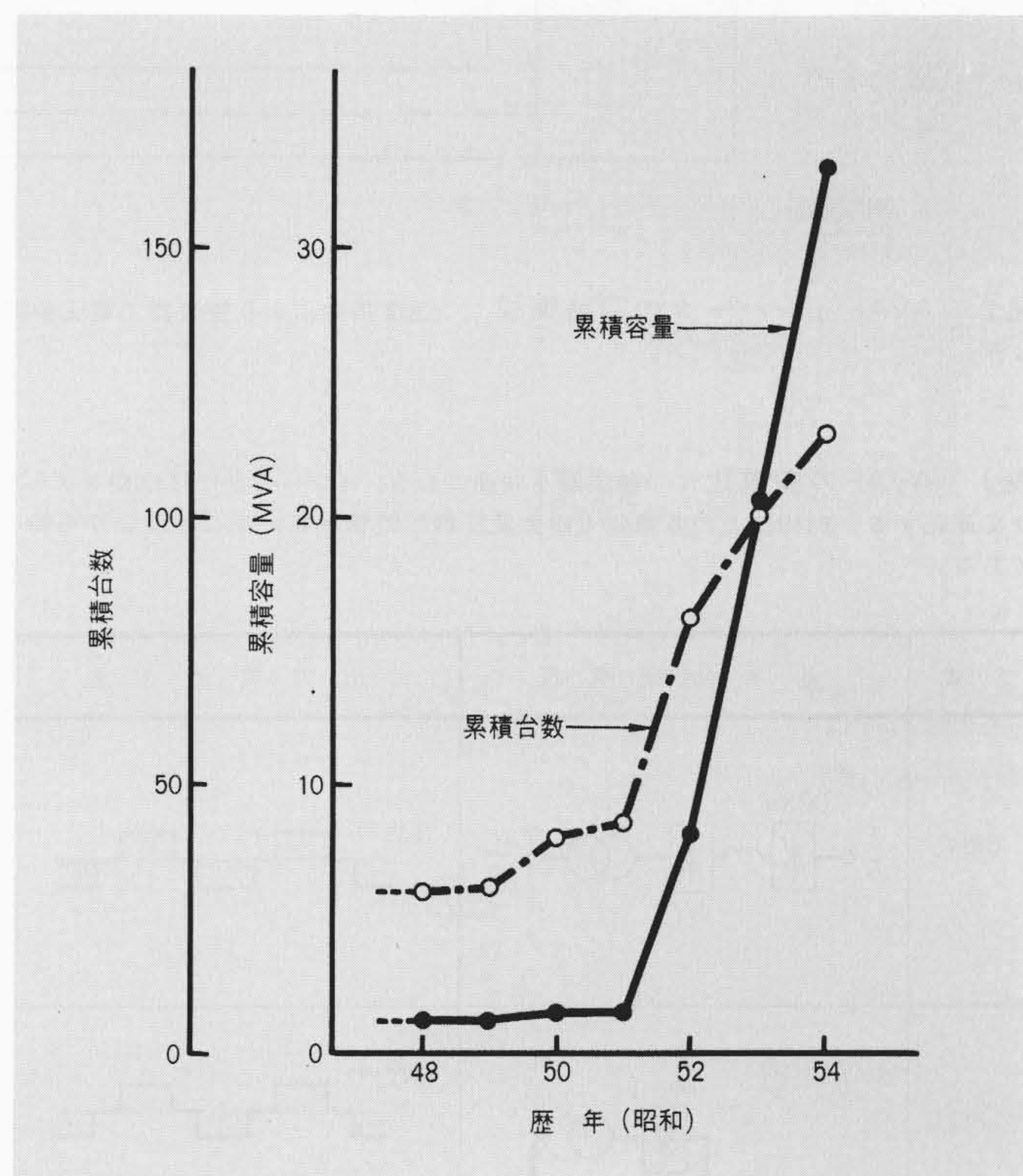


図1 AVAF(Adjustable Voltage and Adjustable Frequency)インバータの製作実績 累積容量は33MVAに達しており、60%が省電力を目的としたものである。

低次高調波成分を減少させるように設定し、並列運転を行なう方式で、表1に回路構成及び出力電流波形を示す。多重化の相数選定は、機械系の共振周波数、運転領域などを考慮して行なうことが経済的である。

2.3 商用電源への同期切換え運転

図2にAVAFの制御回路を示したが、この回路による電動機の始動から商用運転までの動作は次に述べるとおりである。

速度指令に従って、 V/f 比を一定に保ちながら加速する。AVAFの出力周波数と商用電源周波数との差が、所定の範囲

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所習志野工場

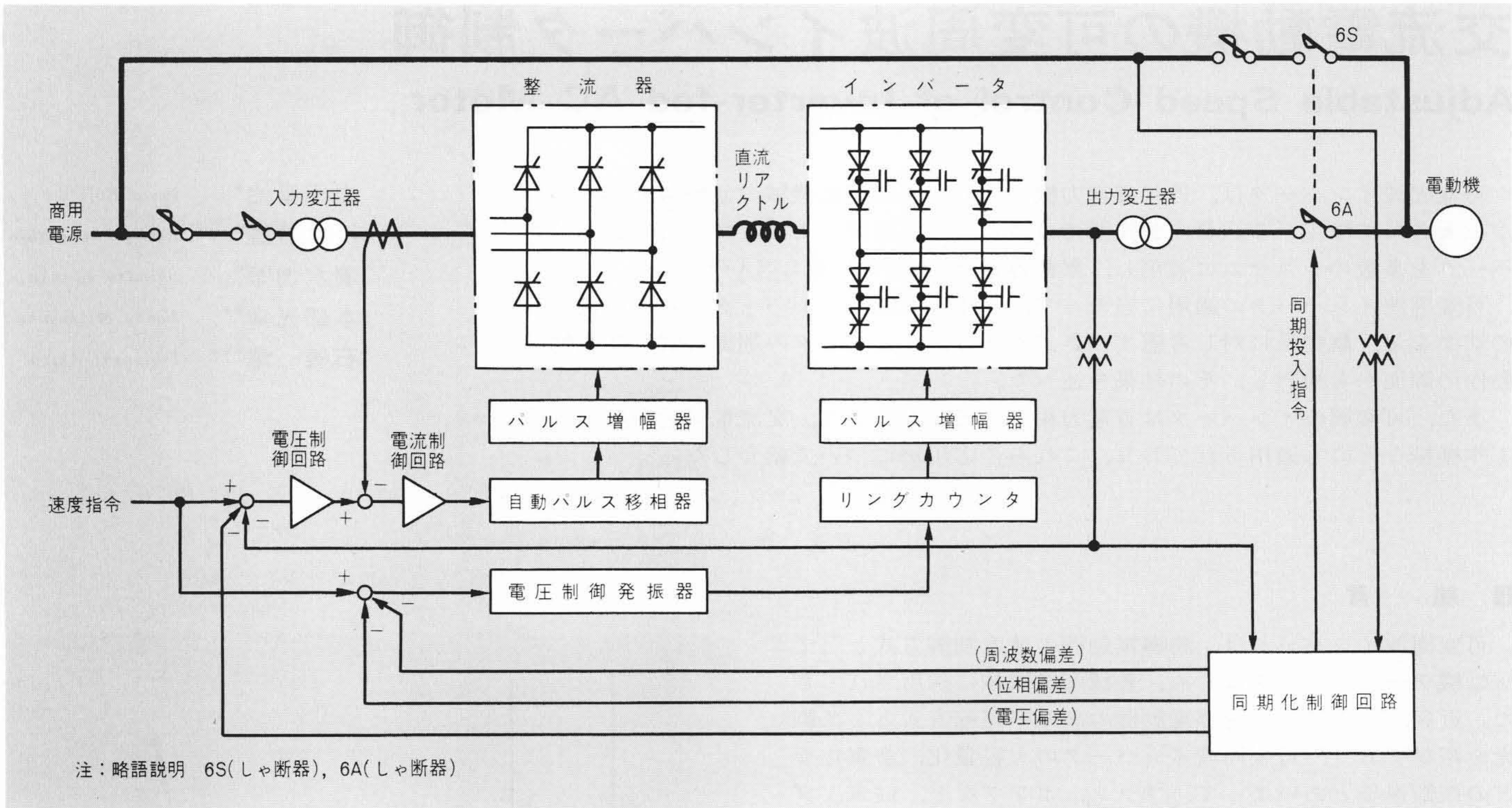


図2 AVAFインバータの回路構成 速度指令により整流器で電圧制御、インバータで周波数制御を行なう。

表1 AVAFの多重化 整流器を共通におき、インバータだけ位相をずらせて運転する。24相以上の多重化も出力変圧器の位相を変えることにより可能である。

方式	基本回路構成	出力電流波形
6相式		
12相式		
18相式		

注：略語説明
 CONV(整流器)
 INV(インバータ)
 Tr(出力変圧器)

に入った時点で同期化制御回路が動作し、AVAF出力と商用電源との周波数、電圧振幅及び位相を一致させる。一致したことを検出し、同期切換え用のしゃ断器6Sを投入し、その後6Aをしゃ断し、電動機をAVAF運転から商用電源運転に切り換える。

図3は、上述した制御方法により電動機を始動加速し、商用電源への同期切換えを行なったときのオシログラムを示すものである。切換え時の突入電流の大きさは電動機の定格値以下であり、ショックレスに切り換わっていることが分かる。

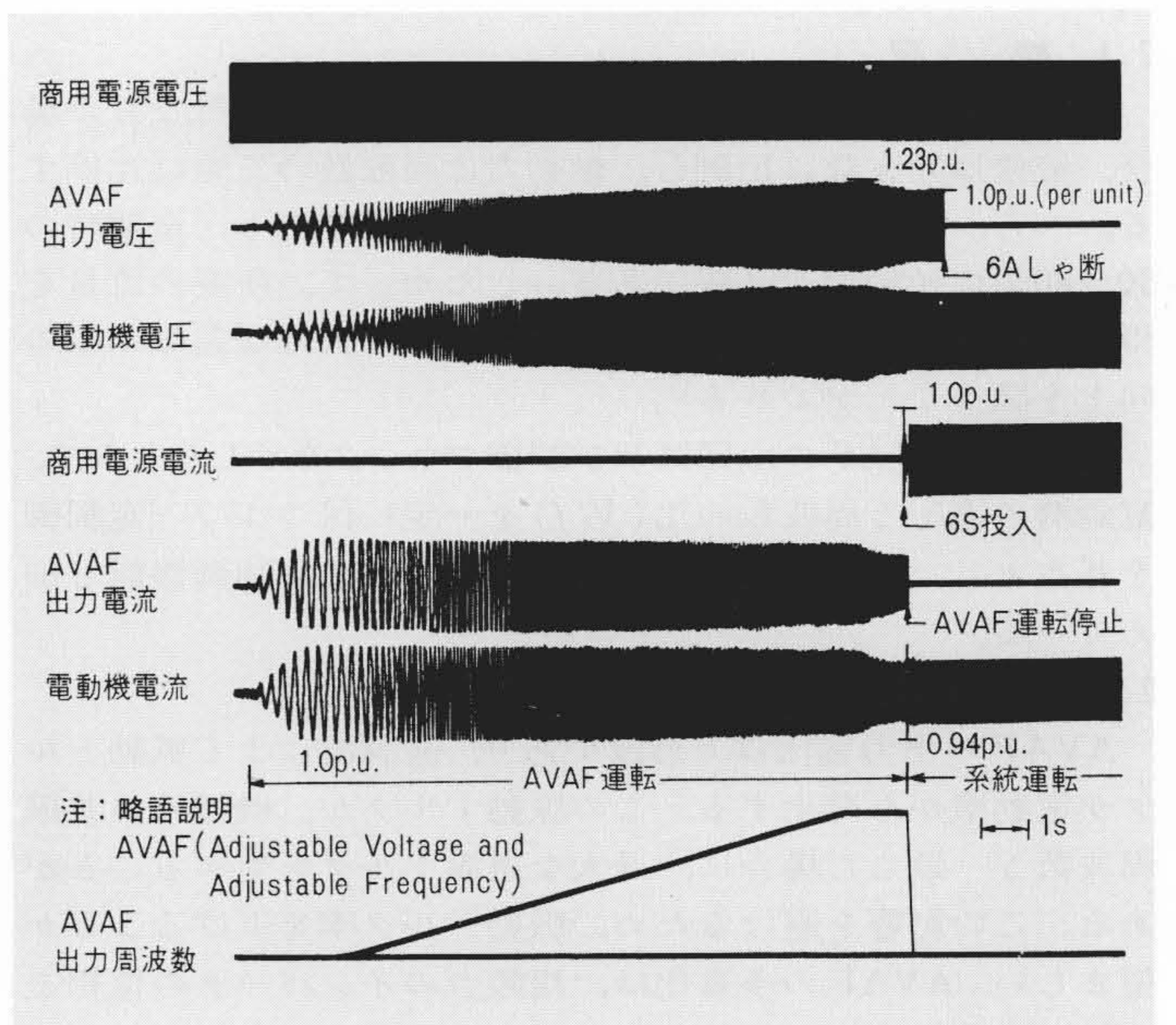


図3 始動、加速及び商用電源への同期切換え運転特性 加速終了後1秒程度で、AVAFから商用電源に切り換わっている。切換え時の電動機電流のピーク値は、定格値程度である。

2.4 瞬時停電及び対策

受電が停電したときに、転流失敗などの異常現象を防止するため、サイリスタのゲート信号をブロックしてAVAFを停止させている。しかし、設備によっては一定時限以内の瞬時停電に対しては自動再始動を要することがある。この場合、停電時の制御電圧の維持及び制御量の監視、電動機減速モードの把握、停電回復後の電源電圧の安定などを配慮した操作が必要になる。電動機速度の減衰は、負荷特性によりほぼ一定しており、停電時は減速特性に近似した内部速度指令で待機しておき、復電検出後、電動機速度より若干低い周波数からAVAFを再始動する。瞬時停電時間は1～2秒を考えている。図4に瞬時停電再始動の実測結果を示す。

電流形インバータでは、電流制限回路により電流抑制が確実に行なわれるので、電動機速度と周波数に差があっても全く問題にならない。

2.5 電動機の多数台運転

電流形インバータ動作の安定性に影響を及ぼす要因として、転流コンデンサ容量、電動機の運転台数など種々のものがある²⁾。したがって、電動機台数が変化するような負荷への適用は好ましくない。しかし、個々の電動機にAVAFを設けたり、ダミーリアクトルを設けることは不経済であり、電動機常数、運転範囲などを考慮して安定運転範囲の向上を図ることが望ましい。この方策として、周波数補正制御³⁾により電圧と周波数の比を平均的にも、瞬時的にも一定に保つこと、多重化により転流時の導通遅れ期間を短縮することが考えられる。図5は、ファン駆動用175kW巻線形誘導電動機の1台目をAVAFで一定速度で運転している状態に、2台目、3台目の電動機を投入したときのオシログラムを示したもので、電動機台数に関係なく安定に運転が行なわれていると同時に、2台目、3台目投入時の出力電圧のじょう乱も少なく、負荷に対する影響はほとんどないことが分かる。

3 電動機の動作及び留意点

3.1 トルク脈動

(1) 電気脈動トルク

商用電源で交流電動機を駆動した場合、磁束は正弦波状に変化するので電気脈動トルクを発生しない。しかし、AVAF

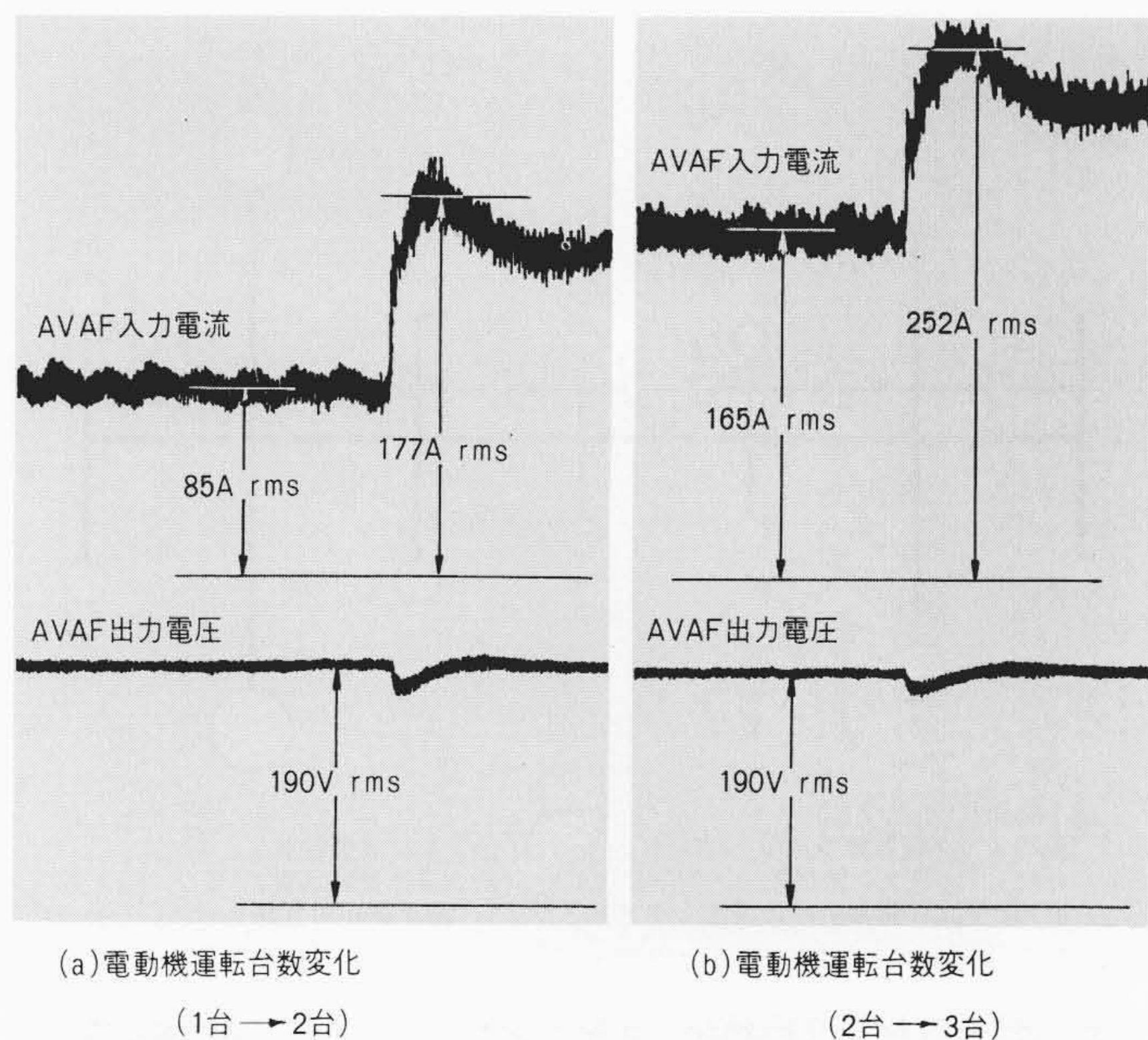


図5 電動機の順次投入 電動機1台～3台の変化に対して、安定に運転している。

ではサイリスタの転流時、磁束が段階的に変化するので電気脈動トルクを発生する。この電気脈動トルクの脈動周波数は、サイリスタ電源の相数によって異なり、電気脈動トルク周波数を f_p とすれば、次式のようにになる。

$$f_p = pf$$

ここに p : インバータ相数

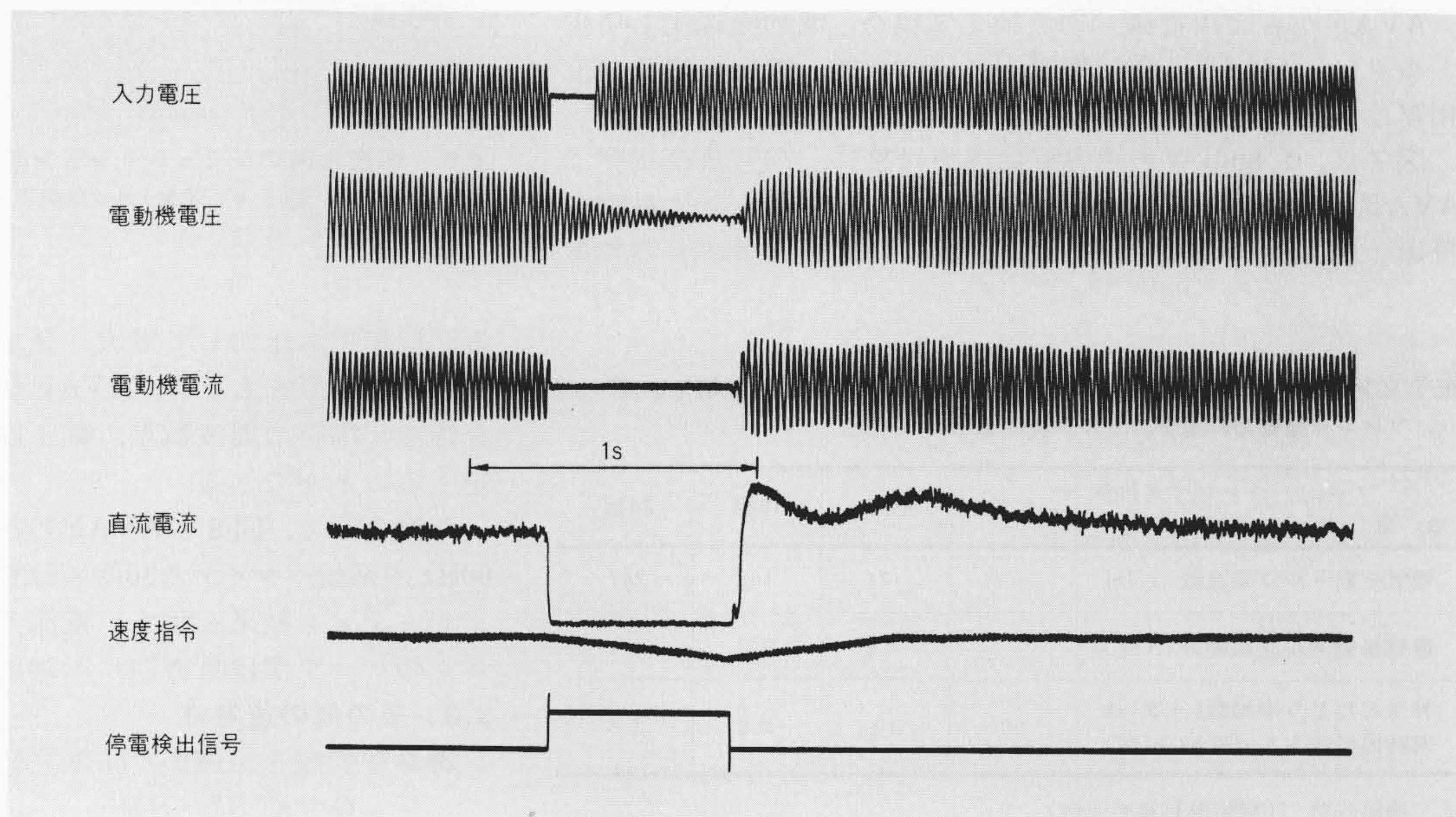
f : 電動機駆動周波数

(2) 機械系への影響

電気脈動トルクはのこぎり波状のトルク脈動のため、機械系はねじりトルクを受ける。電気脈動トルクの周波数と機械系のねじり固有振動数が一致すると、共振現象により軸に過大トルクが発生することがある。このため、軸系のねじり固有振動については十分検討を行なう必要がある。

ここで、電動機と機械の連結によく用いられる歯車継手を用いたシミュレーションモデルを考えると図6のようになる。相手機械をファンと仮定すれば、軸系の一次のねじり固有振

図4 AVAFの瞬時停電再始動 復電後もほとんどじょう乱なく再始動が行なわれている。



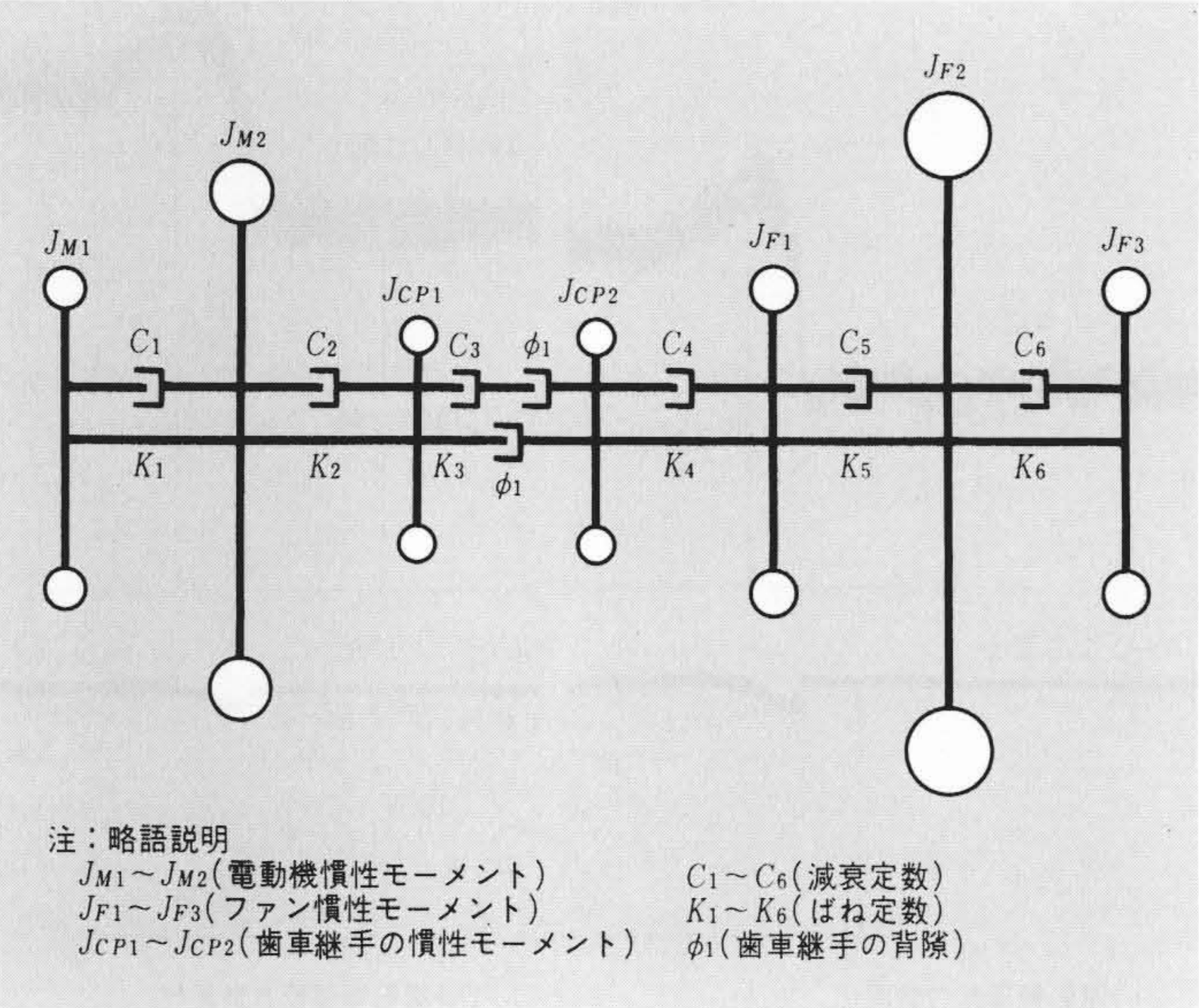


図6 軸系のねじり振動シミュレーションモデル 誘導電動機とファンを背隙のある歯車継手で連結した場合のねじり振動シミュレーションモデルを示す。

動数は概略15～20Hzに存在する。したがって、インバータ運転は電気脈動トルク $f_p > 15 \sim 20\text{Hz}$ とすべきである。また、二次、三次のねじり固有振動数は運転範囲内に入る可能性があるが、一般には応力が小さく、問題になることは少ない。

更に、軸のねじり振動以外では自己冷却ファン、あるいは各コンポーネントのねじり固有振動数の検討が必要である。

(3) 多重化の効果

前述したように、電気脈動トルクは機械系へ影響を与えるため、トルク変動成分を極力減らしたほうがよく、この目的を達成するには、インバータの多重化を行なうのがよい。

一例として、多重化を行なった場合に軸系のねじり固有振動数を通過する場合のトルク変動について、図6のモデルにより比較検討した結果を表2に示す。この結果から多重化を行なえば、伝達トルクでの電気脈動トルクの影響が少なくなることが分かる。

しかし、ポンプ、ファンが負荷であれば、一般には12相で十分と言える。

3.2 電源切換え時の過渡現象

AVAFから商用電源へ切り換える場合、電動機電流と発生トルクは、AVAFと商用電源との周波数差、電圧振幅及び位相差によって非常に大きくなり、問題となる。

図7は、1,800kWの誘導電動機を対象に、70%負荷状態でAVAFから商用電源への電源切換えを行なったときの電動機電流と発生トルクのピーク値を計算した結果を示すものであ

表2 インバータ多重化時のトルク特性 1,800kW 誘導電動機により、ファンを始動した場合のトルク特性を示した。

項目 \ インバータ相数	6相	12相	18相	24相
電気脈動トルク周波数 (Hz)	6f	12f	18f	24f
電気脈動トルク変動分 (%)	7	1.4	0.3	0.1
軸系のねじり振動数(一次)通過時の伝達トルク変動分(%)	50	13	2.9	0.6

注：略語説明 f(電動機駆動周波数)

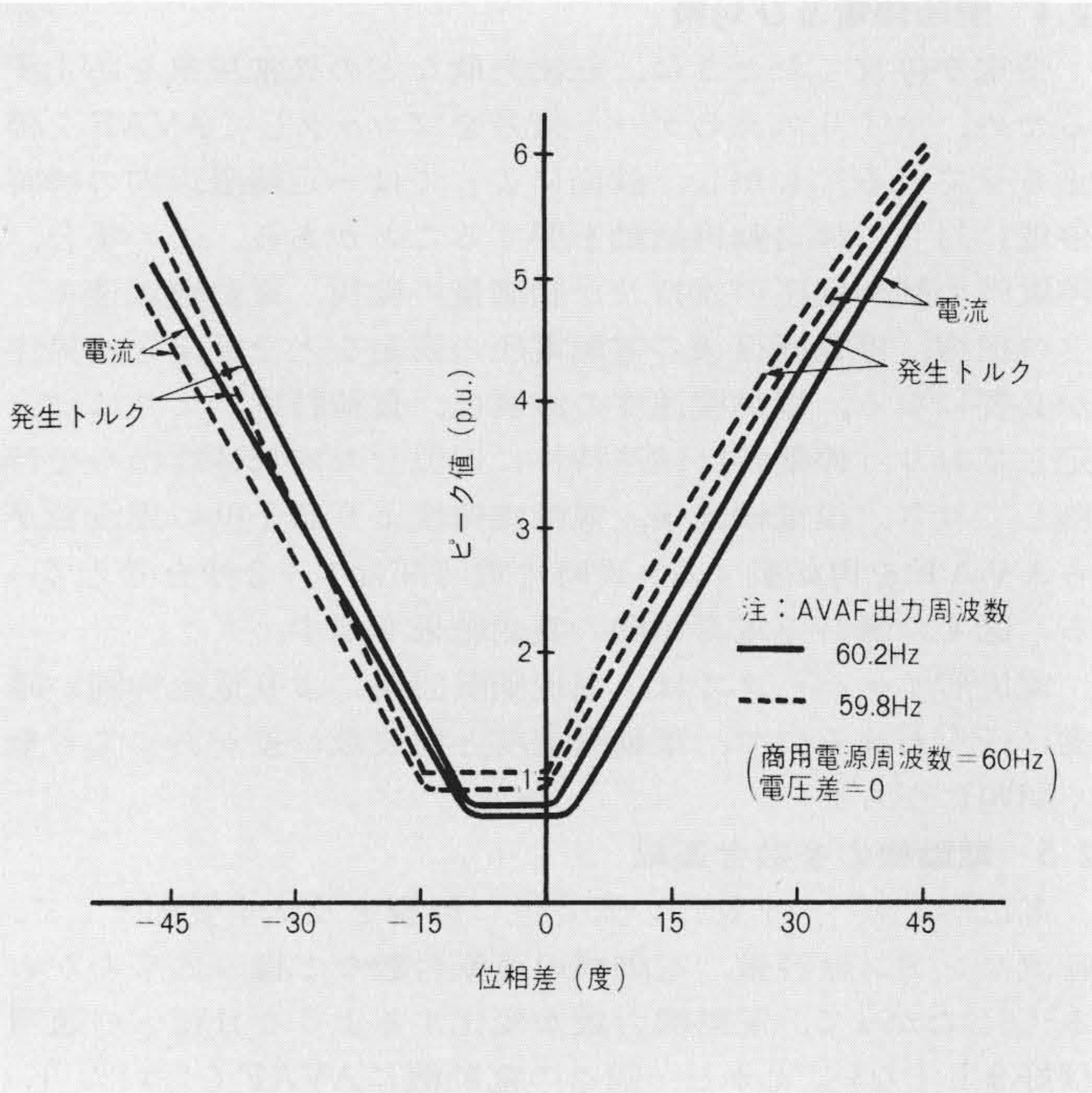


図7 切換え時の電流及び発生トルクのピーク値 位相差が正の領域では、AVAF周波数が商用電源周波数より低い場合のほうが高い場合に比べ、電流、発生トルク共に大きくなっている。負の領域ではその逆になっている。

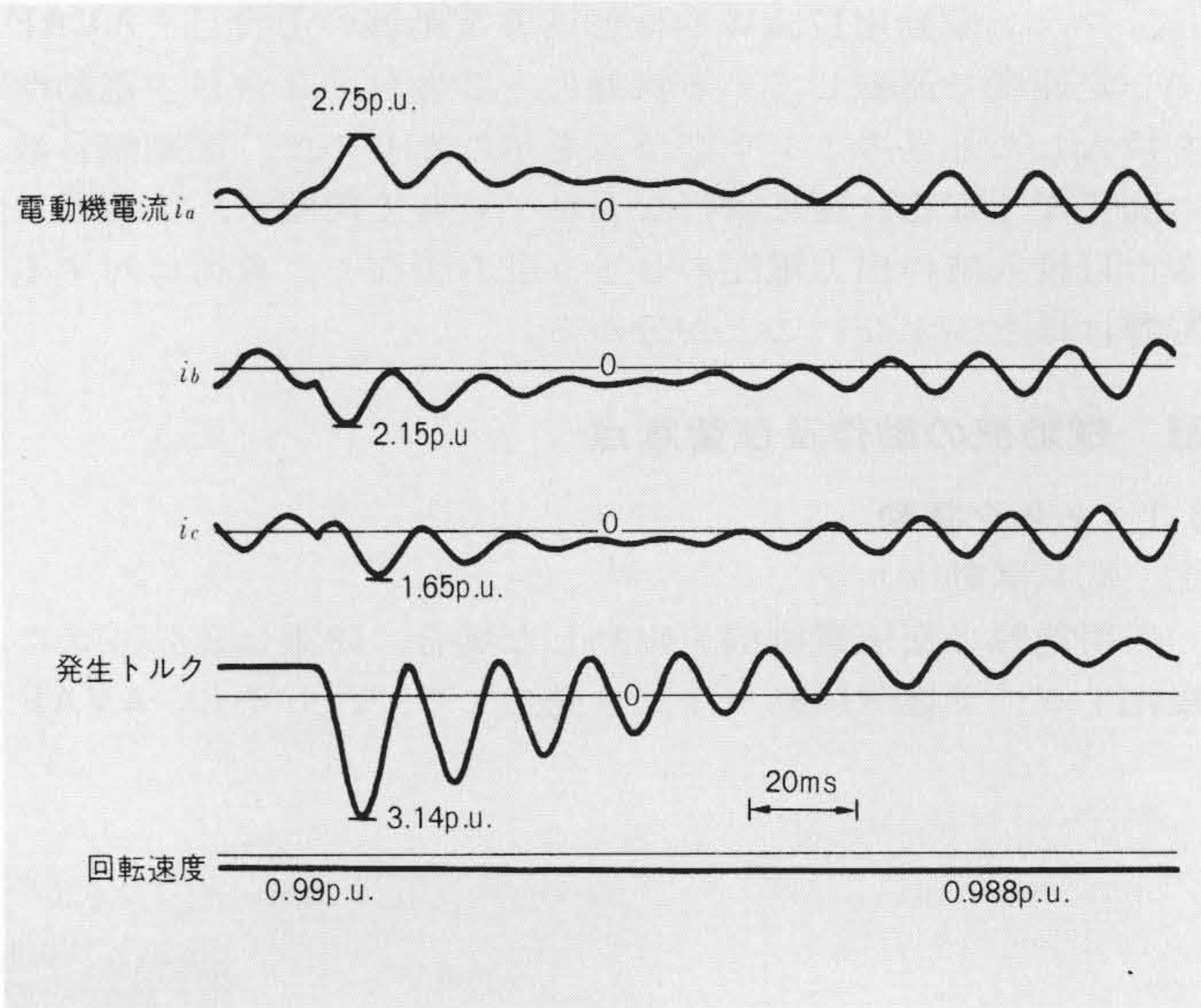


図8 切換え時のシミュレーション結果 切換え後の電流は、直流分が重畳した形となっている。発生トルクは負方向に大きなピーク値が現われている。

る。位相差に比例して電流、発生トルク共に大きくなっている。この結果をもとに、AVAFから商用電源への同期切換えを行なう場合の周波数差、電圧振幅及び位相差の許容値を決定することができる。

一例として、図8にAVAFの出力周波数が59.8Hzのとき、60Hzの系統へマイナス30度の位相差で切り換えたときのシミュレーション結果を示す。電流のピーク値は2.75倍、発生トルクのピーク値は負方向に3.14倍になっている。

3.3 その他の留意点

誘導電動機を定速まで加速する際の回転子側発生熱量Qは、 $Q = K(S_1^2 - S_2^2)$

K : 定数

S_1 : 始動時のすべり

S_2 : 定常時のすべり

となり、商用電源始動時は $S_1 = 1$ 、 $S_2 = 0.03$ とすれば、回転子の発生損失が大のため、多頻度始動は不可能である。

これに対しインバータ駆動時は、すべり周波数がほぼ一定で小さく、回転子の発生損失は商用電源による始動時の数パーセントぐらいとなり、多頻度始動が可能である。

また、電流形インバータの電流は120度通流となるため、この影響により力率が300kW程度の誘導電動機の実測例では3～4%低下する。したがって、この力率の影響により効率が約1%低下する。

以上のほかに、電動機では回転子中の磁束アンバランスにより、軸電圧を発生する可能性があり、特にインバータ駆動ではその傾向は強くなる。このため、小容量電動機を除いて軸電流の防止が必要である。

更に、低速運転時にはすべり軸受の油膜切れのおそれがあるため、特別な対策を施さない限り100rpm以上の速度で運転すべきである。この際、電動機の巻線温度に注意を要するが、ポンプ、ファンでは、軸出力 $\propto$ (回転数)³となるので巻線の温度は問題ない。

4 各種システムへの応用

4.1 可変速制御

可変速制御の対象例としては、単純な流量制御のほかに燃料ガス送風用やボイラ排風用などの定圧制御がある。図9は燃料ガスの吐出し圧を検出し、設定圧力との偏差値により電動機の回転数制御を行なって、一定圧としている例である。燃料ガス送風用のため受電の瞬時停電のたびごとに設備を停止させることは作業上の支障を来すので、2秒以内の停電に対しては、瞬時停電再始動ロジックにより速やかに自動再始動を行わせている。

4.2 高頻度始動制御

ファンやポンプの高頻度始動を行なう場合には、電動機の回転子損失を抑えるために商用周波数までAVAFで加速するとともに、商用電源への切換えは機械系に及ぼす過渡トルク

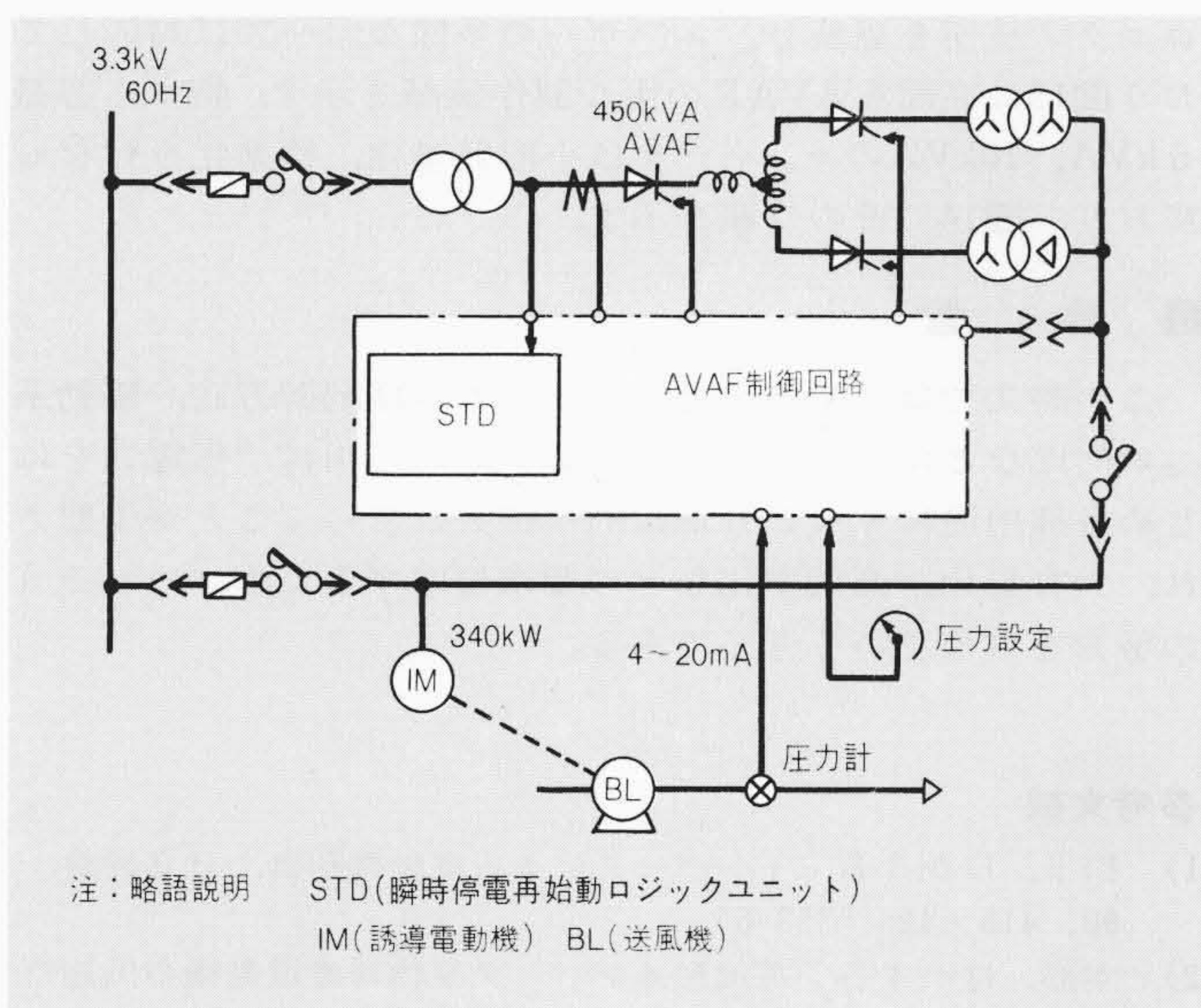


図9 AVAFによる送風機の定圧制御 自動定圧制御と瞬時停電再始動ユニットとの併用で、安定した燃料ガス制御を行なっている。

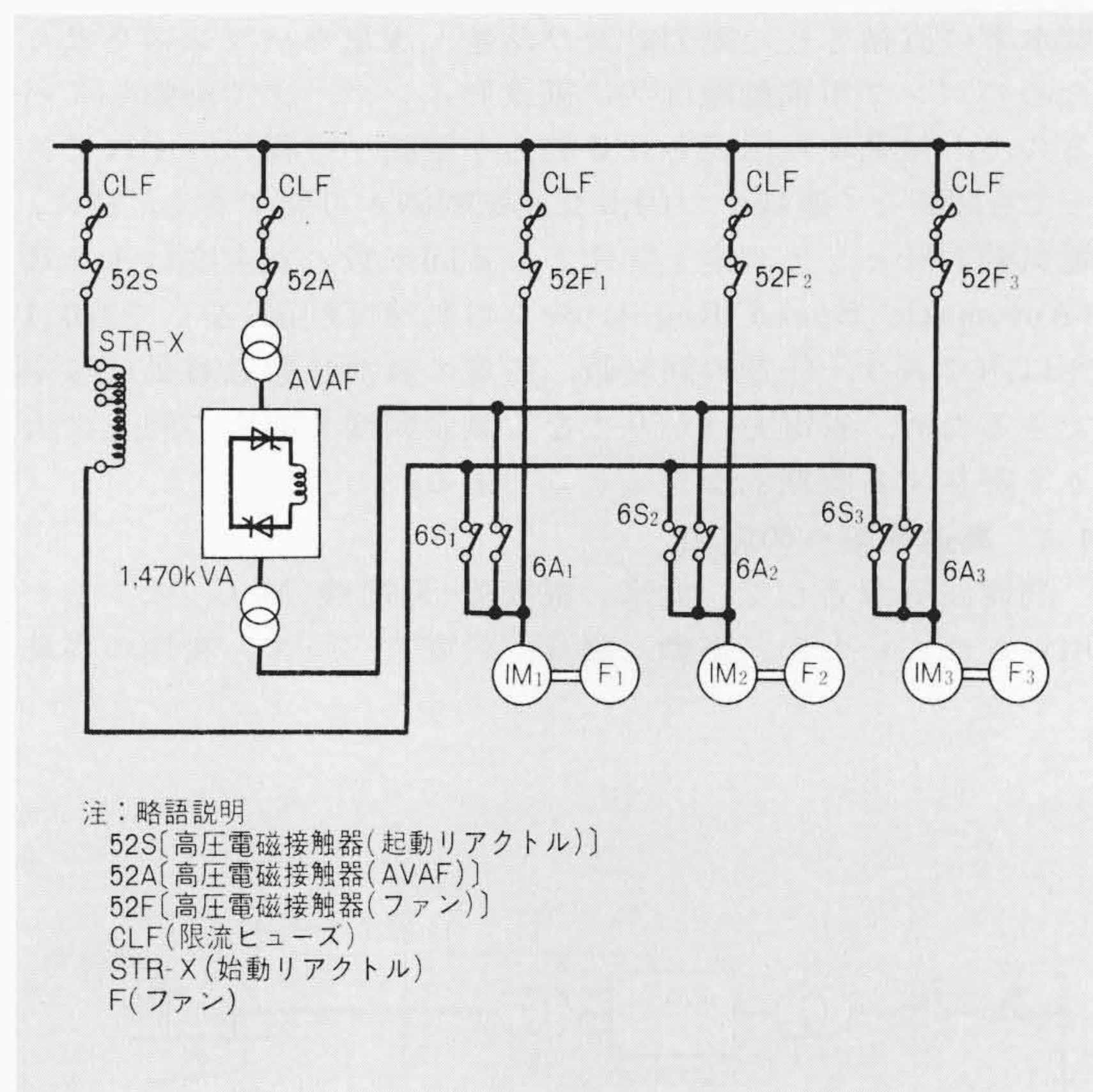


図10 ファン駆動システムの適用例 3台のファンを発塵パターンに合わせて順次AVAFで始動し、商用電源へは同期切換えを行なっている。

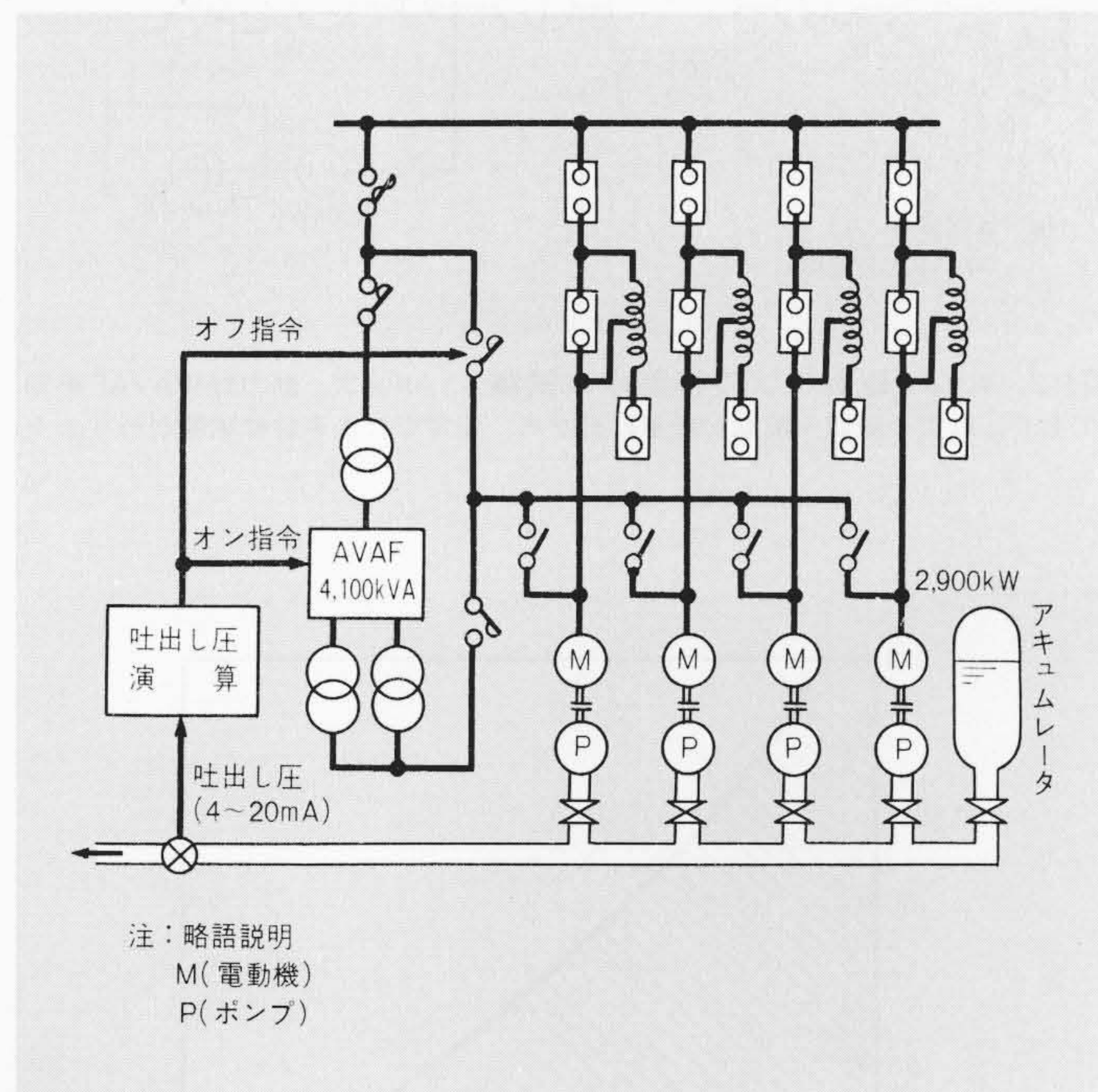


図11 AVAFによるポンプの台数制御システム 吐出し圧を常時監視演算し、圧力低下となるとAVAFで特定の駆動電動機を始動し、同期切換えを行なう。高頻度オン・オフのために切換えには電磁接触器を使っている。

抑制のために同期切換えを行なっている(図10)。

AVAFでの始動制御は、回転子損失や過渡トルクを低減できるので、ファンでは1日に数十回、ポンプでは数百回にわたる高頻度オン・オフ制御が可能となり、複数台設備の台数制御に対しても効果的である(図11)。

4.3 交流電気動力計

模型水車の性能試験用として、かご形誘導電動機を動力計とし、その制御電源にAVAFを採用した例を図12に示す。模

型水車に直結された動力計及び落差・流量をバランスさせるためのポンプ用電動機は共に電流形インバータで駆動しているので、軸系から伝達される動力が駆動・吸収のいずれであっても中断なく連続かつ円滑な運転制御が可能である。特に、電気動力計として測定上問題となる回転数の安定度はASR (Automatic Speed Regulator: 自動速度制御) なしでも0.1%以内であり、任意の回転数、任意の負荷状態を容易に設定できるため、省電力ばかりでなく測定精度や能率の向上に大きく寄与する画期的なシステムである。

4.4 高速運転への応用

高周波電源として、従来、電動機-発電機(M-G)セットが用いられていたが、振動、騒音、設置スペース、変速の容易

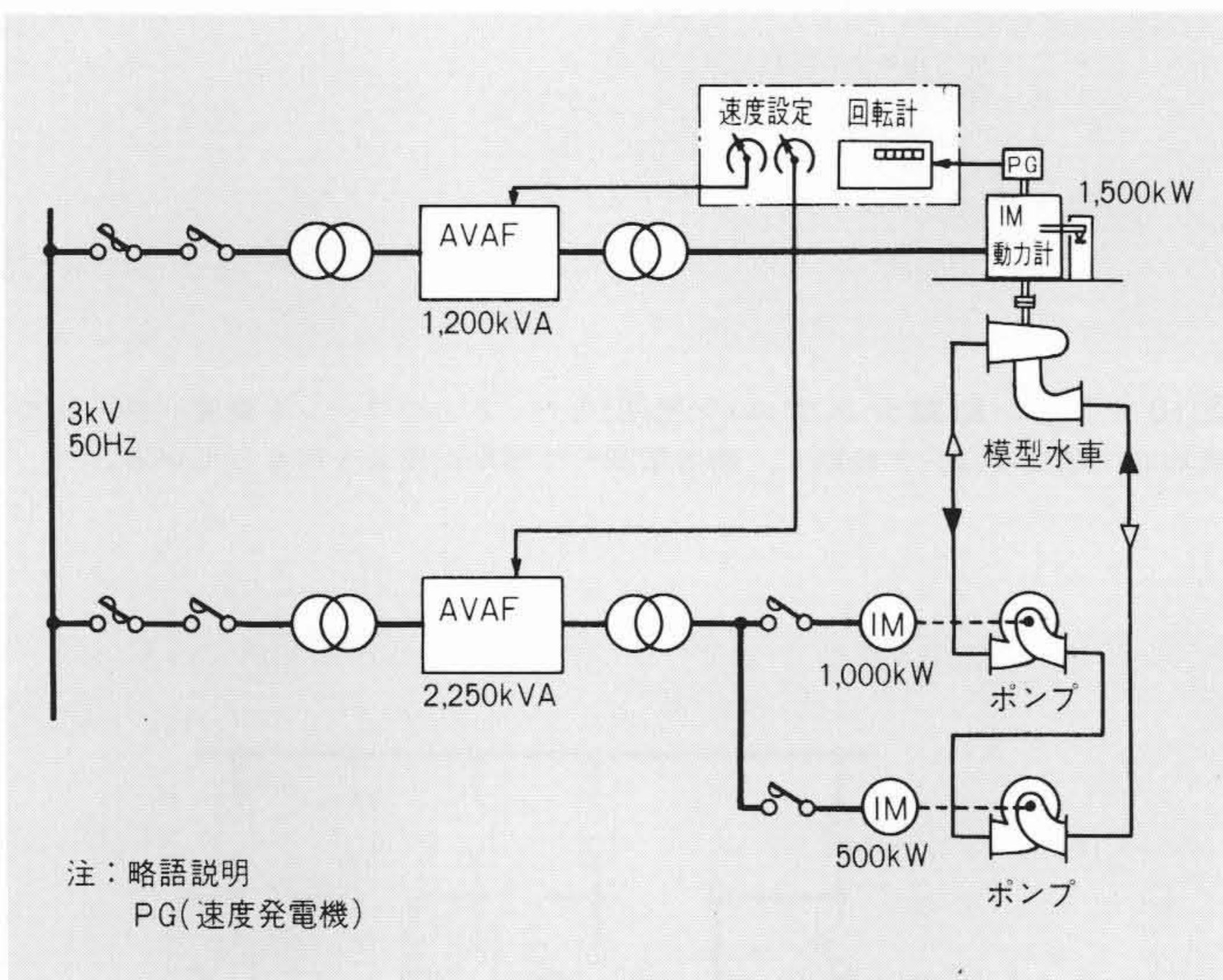


図12 AVAF駆動による模型水車試験 ポンプ、動力計共AVAF駆動であり、動力の吸収・駆動が任意に行なえ、安定した水車性能試験が行なえる。

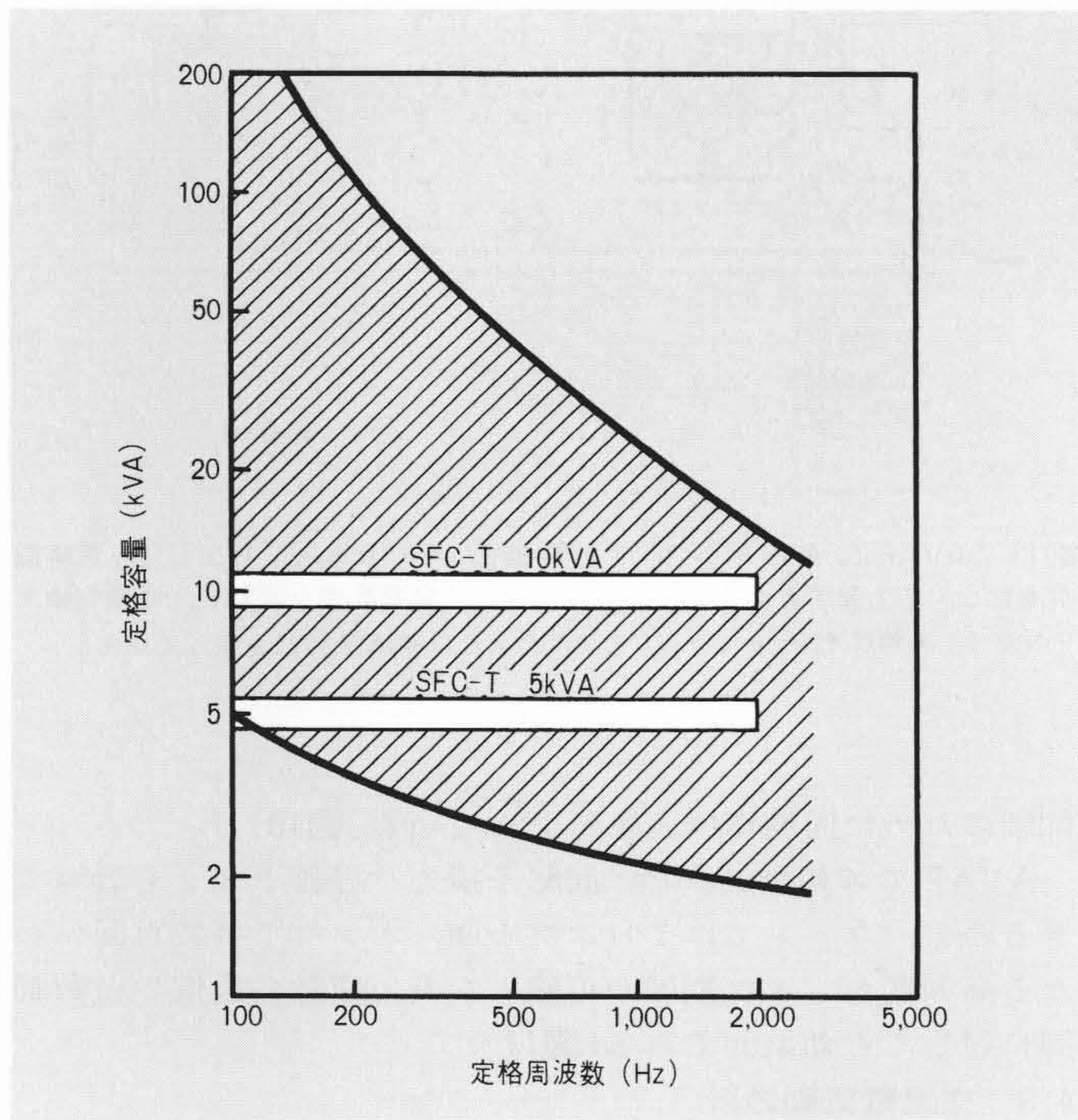


図13 高周波AVAFインバータの製作実績 斜線部は、高周波AVAFインバータの主要な製作実績を示している。

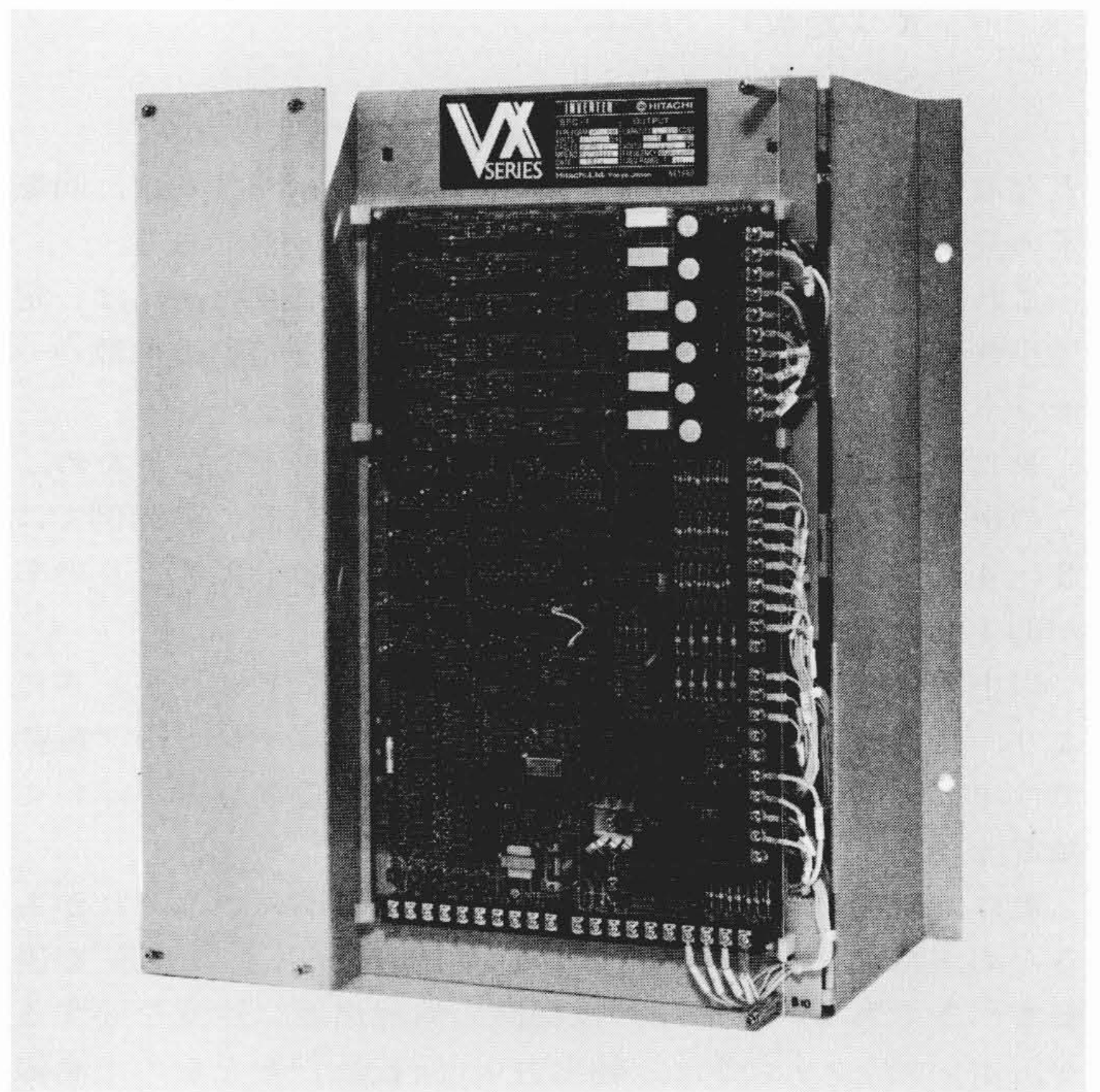


図14 SFC-T トランジスタインバータ 容量5kVA, MAX.2,000Hzの小形・軽量化された標準品である[寸法 高さ474×幅430×奥行235(mm)]。

さなどの利点により、現状ではほとんど高周波AVAFに移行している。通常は、特殊なかご形電動機を駆動するが、特定用途で同期電動機を使用することもある。以下に主な応用例について述べる。

(1) 研削盤

内面研削盤、治工具研削盤に採用され、電動機出力11kW以下、20~200k rpm(333~3,330Hz)が主体である。

(2) 高速フライス盤、木材加工機

木工機はルータマシン、ドリルなどで、電動機出力7.5kW以下、5~25k rpm(83~417Hz)が多い。

(3) その他の用途

繊維機械、各種試験機、加振機、真空ポンプ及びレーザブロー駆動に用いられるが、容量、周波数は用途により異なる。

以上に述べたように電動機技術に加え、最新のエレクトロニクス技術を駆使し、ユーザーの多様なニーズに対応しており図13に高周波AVAFの主要な製作実績を示す。特に、容量5kVA、10kVAのインバータは小形軽量化、標準化を行っており、図14にその外観を示す。

5 結 言

この論文では、AVAFインバータの各種制御方式、駆動系への対応などについて述べた。AVAFの応用は、省電力をはじめ各種用途に今後とも飛躍的に拡大していくことが予想され、大容量化、高効率化などの要求に応ずるため、いっその努力を重ねていく考えである。

参考文献

- 1) 松平、ほか3名：インバータによる電動機制御、日立評論、60、415~420(昭53-6)
- 2) 本部、ほか4名：電流形インバータ駆動誘導電動機の伝達特性と安定性向上、電気学会研究会資料、PCC-79-15、69~78
- 3) 本部、ほか4名：電動機のインバータ駆動時における安定性、日立評論、60、421~426(昭53-6)