

# インバータ制御超高速エレベーターの開発

## High-speed Elevators Controlled by Inverters

インバータ制御エレベーターは優れた制御特性を持っていることから、中・低速機種をはじめとして高速機種まで適用拡大され、中規模・大規模ビルで稼働している。また、超高層ビル向けとして、300 m/min以上の超高速エレベーターにもインバータ制御が実用化されつつある。

日立製作所は、超高速エレベーターで必要となる超精密制御インバータ制御装置用として、正弦波入出力をほぼ理想的に実現できる正弦波PWM/PFM制御を採用した低トルクリプル制御方式と、定格800 Aパワートランジスタモジュールを使用した大容量・高速スイッチング電力変換器を開発した。この新制御装置を適用して、新川崎三井ビルディングに速度300 m/minインバータギヤレスエレベーター12台を納入した。また、これらの開発技術によって速度600 m/minインバータエレベーターまで製品化できる見通しを得た。

坂井吉男\* *Yoshio Sakai*  
高橋秀明\* *Hideaki Takahashi*  
中村 清\*\* *Kiyoshi Nakamura*  
木下広志\*\*\* *Hiroshi Kinoshita*

### 1 緒 言

一般に速度150~240 m/minの範囲を高速エレベーターと称し、制御特性の優れている直流電動機を使用したサイリスタレオナード制御方式が採用されてきた。近年ベクトル制御やPWM(Pulse Width Modulation:パルス幅変調)制御の特徴を生かし、交流電動機を使用したインバータ制御方式が実用化され、中低速エレベーターをはじめ高速エレベーターにも採用されるようになった。日立製作所は、このインバータ制御を適用したエレベーターを速度240 m/minまで製品化し<sup>1)</sup>、多数の納入実績を得ている。

国内での超高層ビルの建築は、昭和50年代初頭に新宿地区を中心として多数の実績ができたが、近年、都市機能のいっそうの集中に対応して、超高層ビルの建築計画が再び活発化している。これらのビルは、インテリジェントビルと総称され、より効率的で経済性の高い形態を持って実現される気運にある。ビル内の主要設備であるエレベーターは、速度300~600 m/minのいわゆる超高速エレベーターであり、新時代にふさわしい機能の高度化と経済性・信頼性の向上が求められている。インバータ制御により実現できる省エネルギー化、保守性向上などは、これらのニーズに適合する特徴であり、日立製作所はこれを超高速エレベーター分野に適用拡大するための開発を進めてきた。

超高速エレベーターでは、大容量の電力制御と広範囲の速度制御が要求されることから、解決すべき多くの課題がある。この分野へのインバータ制御の実用化に当たっては、特に、1 Hz以下の低周波数領域を含むすべての電動機トルク領域で低リプル制御できることが、乗り心地及び正確な着床性能の面から重要な課題となる。また、電動機などに発生する電磁

騒音及び電源に含まれる高調波ノイズの比率を、従来以上に低減することが必要である。電源ノイズの低減については、先に報告した高速エレベーター用正弦波入出力電流制御インバータ技術<sup>2)</sup>の採用によって、他の設備に影響を与えないレベルにすることが十分可能である。

### 2 超高速インバータエレベーターの技術課題

速度300 m/min以上の超高速インバータエレベーターの速度制御には、従来の高速エレベーターの単なる技術延長にとどまらず、次のような高度の技術課題がある。これらの課題と対応する開発技術をまとめて表1に示す。

- (1) エレベーター起動時のゼロ速度から最高速度(定格速度)、更に目的階への停止直前の極低速まで、速度制御範囲が著しく拡大する。この広範囲の速度領域で、良好な乗り心地と正確な着床を満足するために超精密PWM制御技術を確立する。
- (2) 大容量化され、かつ制御周波数変化範囲が拡大された電動機の電磁騒音を低減するため、高周波搬送波制御が可能な電力変換器を実現する。
- (3) 大容量電力変換器の構成の簡素化・小形化を図り、高信頼性を確保する。また、電源の欠相、瞬時停電や過負荷などの異常条件に対し、エレベーターの安全を確保し、制御装置の損傷を防止する保護システムを確立する。

#### 2.1 超精密PWM制御

正弦波電流形インバータエレベーターのシステム構成を図1に示す。高速エレベーター以下では、電動機トルクを高効率減速機を介して綱車に伝達する構成としているが、超高速エレベーターでは、より高効率・低騒音とし、かつ減速機の脈

\* 日立製作所水戸工場 \*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\* 日立製作所機電事業本部

表1 超高速インバータエレベーターの技術課題 超高速エレベーターへのインバータ制御の適用には、高速エレベーターでの技術延長にとどまらず、新たに解決しなければならない技術課題があり、その解決策も併せて示した。

技術課題	解決策
速度制御範囲の拡大及び電動機直結駆動に伴う低トルクリプル制御	正弦波PWM/PFM制御方式の開発、及びインバータ出力端フィルタコンデンサの最適化
電動機電磁騒音を低減するための高周波搬送波制御を実現する大容量電力変換器	大容量パワートランジスタモジュール(800A)による高周波(3kHz)スイッチング形インバータ、及びコンバータの制御と実装
電流連続条件を阻害する異常条件時での過電圧の抑制	従来のバリスタ方式に代わるコンデンサクランプ方式による過電圧抑制方式の開発

注：略語説明 PWM(Pulse Width Modulation：パルス幅変調)  
PFM(Pulse Frequency Modulation：パルス間隔変調)

動に起因するかご内振動問題を除去する観点から、電動機直結駆動いわゆるギヤレス巻上機で構成することにした。PWM制御回路、ASR(速度制御回路)及びベクトル制御回路には、高性能マイクロコンピュータを適用し、制御論理をソフトプログラム処理とすることによって、高度の制御アルゴリズムを高速かつ精密に実現できるようにしている。

先に、高速インバータエレベーター用としてトルクリプルが小さい正弦波PWM制御方式を開発したが、今回超高速エレベーター用として、更にトルクリプルを半減以下とすることが必要であるとの検討結果に基づいて、次に述べる高精度の新PWM制御方式(以下、正弦波PWM/PFM制御と言う。)を開発した。

正弦波PWM/PFM制御方式は、パルス幅制御とパルス間隔制御を併用することにより理想的な正弦波を得るものであり、パルスパターンを構成原理を図2に示す。マイクロコンピュータを用いて、正弦波変調アルゴリズムを実現するプログラムで、正弦波パルスパターンを計算する。インバータを構成するトランジスタの最小パルス幅の制約があるために、パルス幅が微小になるモードではこの理論的アルゴリズムで計算したパルスパターンをそのままトランジスタ駆動信号として使用できない。このため従来方式は、パルスパターンが10μs未満となる場合でも最小幅(10μs)のパルスを駆動信号として出力していた。これに対し、計算したパルス幅の積分値が、所定値以上になる時点で最小幅のパルスを駆動信号として出力する。すなわちパルス間隔を調整する正弦波アルゴリズムを開発し、より理想的な正弦波出力電流を得ることができた。

また、インバータと誘導電動機間に接続される出力端コンデンサの容量とトルクリプルの関係を、インバータ出力電圧と電流の変化値の積で定義したパワー脈動指数により評価し、出力端コンデンサの容量を最適値とする手法を確立した<sup>2)</sup>。

速度360 m/minエレベーターの等価試験装置を用い、エレベ

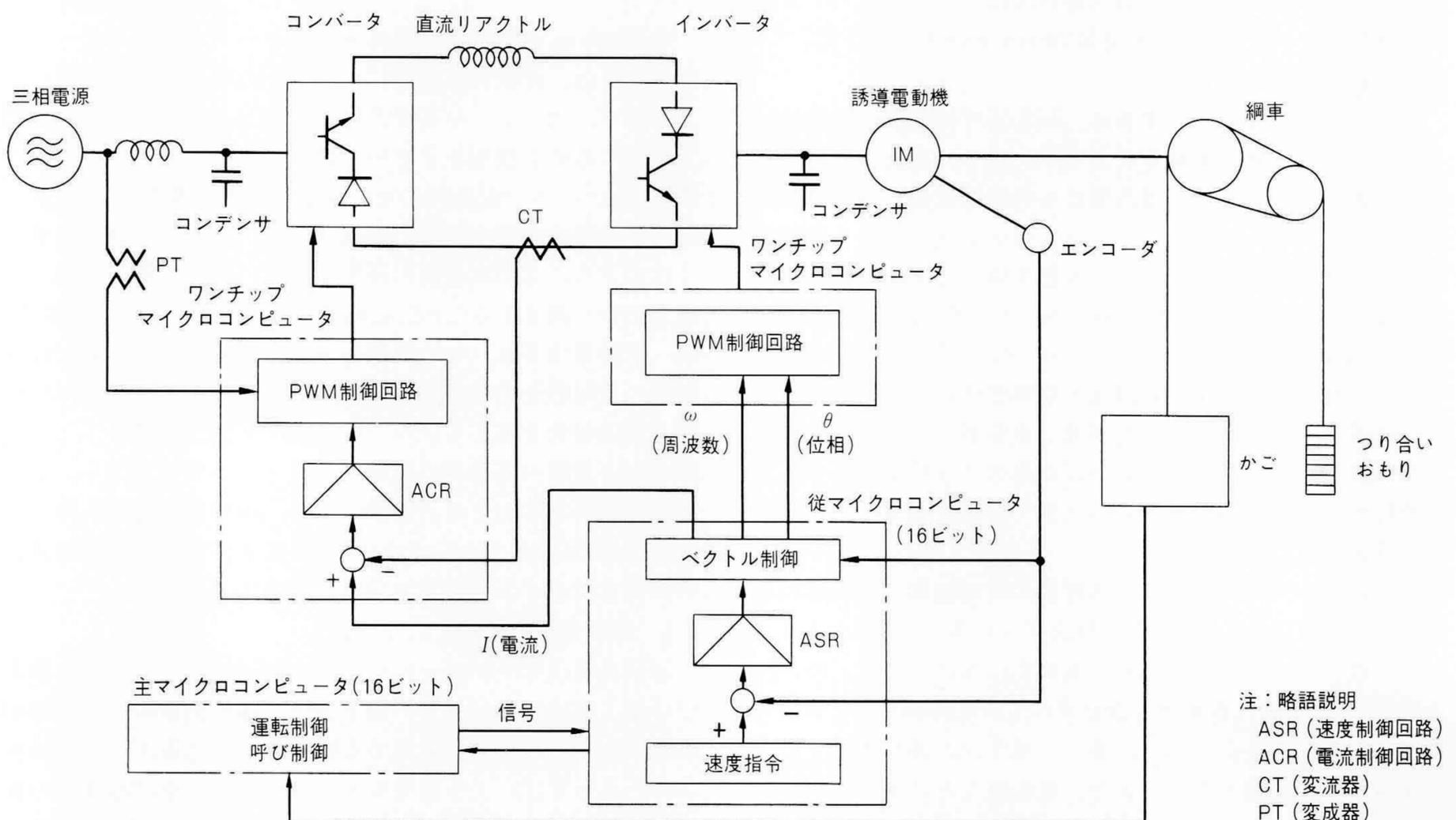


図1 正弦波電流形インバータエレベーターのシステム構成 超高速エレベーターは減速機を使用しない電動機直結駆動とし、主回路部は正弦波電流形インバータで構成し、PWM制御回路、ASR・ベクトル制御回路には高性能マイクロコンピュータを適用して、低トルクリプルの精密速度制御を可能としている。

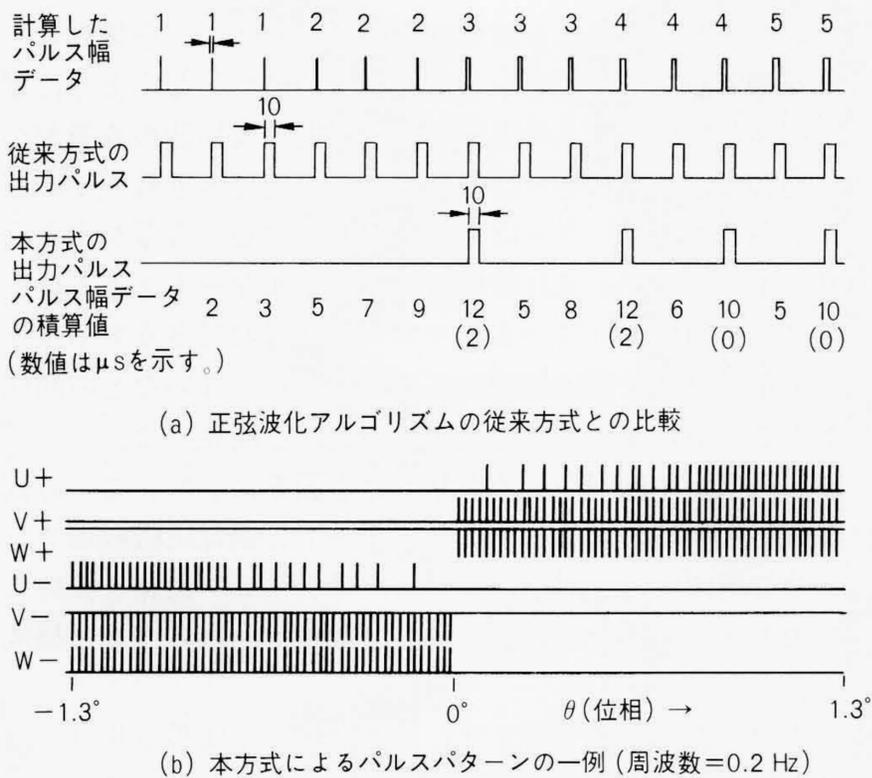


図2 正弦波PWM/PFM制御の概要 パルス幅制御とパルス間隔制御を併用することによって、出力電圧が微小になる部分を含めて、よりいっそうの正弦波化ができた。

ーターのかご内負荷をパラメーターとしてトルクリプルを測定した結果を図3に示す。正弦波PWM/PFM制御方式及び出力端コンデンサの容量の最適値設定の効果によって、乗り心地に大きな影響を与える周波数帯域で、トルクリプルの最大値を従来方式に比べ $\frac{1}{3}$ に低減できることが確認できた。改善後のトルクリプル値は、電動機出力軸上で定格トルクの0.5%以下であり、速度300 m/min以上のギヤレスエレベーターの乗り心地を十分満足するレベルである。

## 2.2 大容量電力変換器

電力変換器、すなわち三相商用電源を直流に変換するコンバータ、及び変換された直流を可変周波数の交流に変換し誘導電動機に給電するインバータの容量は、超高速エレベーターの場合数百キロボルトアンペアとなる。従来は、このクラスの電力変換器を構成する場合、300~400 Aのパワートランジスタモジュールを多数並列接続する方法を採っていた。しかし、この方法は、並列接続された多数のパワートランジスタモジュール間の電流の分担及びオン、オフ時の過渡電流のばらつきが信頼性の点で問題になるために、

- (1) スイッチング周波数を約1 kHz以下に低くする。
- (2) トランジスタの増幅率を測定して、一定範囲内で選定し組み合わせて使用する。
- (3) トランジスタの電流分担率を考慮に入れて、電流マージンを大きくとる。

などの手法で対応していた。しかし、電動機騒音の低減、コンバータ入力端及びインバータ出力端に設置するフィルタコンデンサの小容量化のためには、スイッチング周波数を高くすることが有効である。また信頼性の観点からも回路の簡素化が重要である。

このため、図4に示す800 A、1,200 Vのパワートランジスタモジュールを使用して並列接続数を著しく減少し、上記の

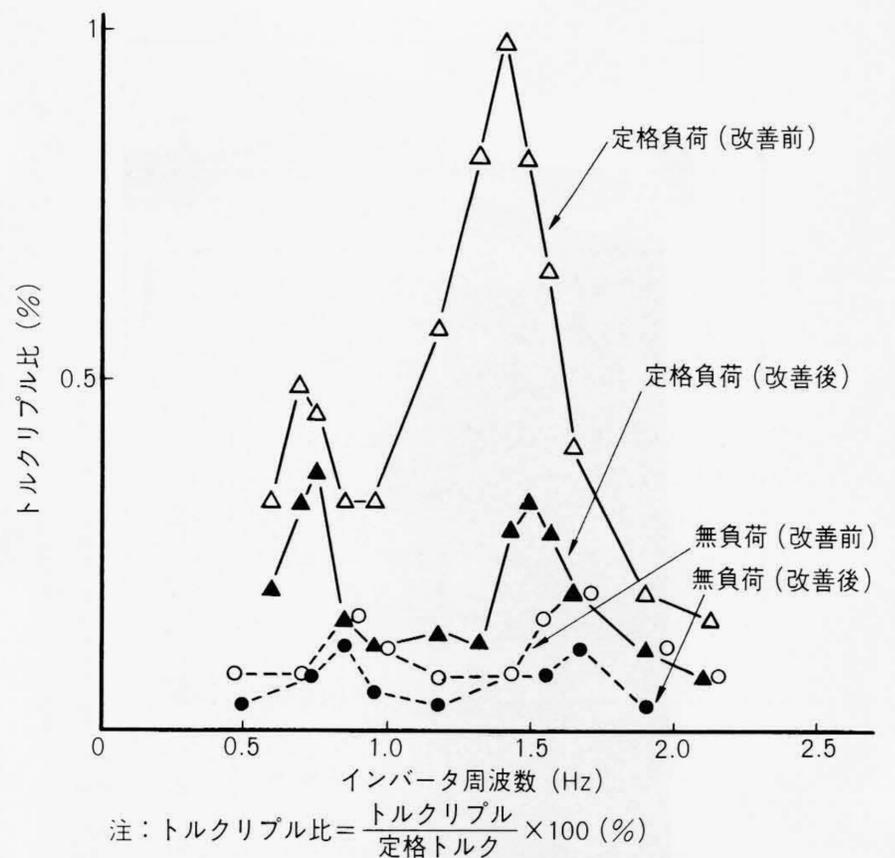


図3 トルクリプルの総合特性 平均値正弦波PWM制御と出力端コンデンサ容量の適正化によって、トルクリプルの最大値は従来方式の $\frac{1}{3}$ 以下にできた。

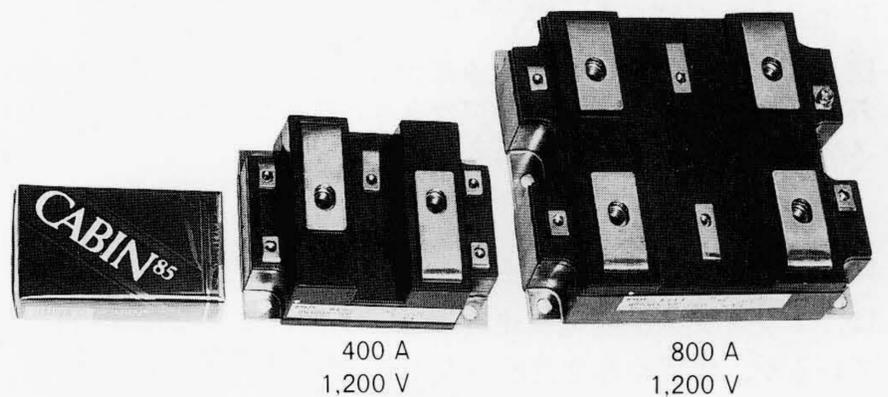


図4 パワートランジスタモジュール 多数モジュールの並列に伴う問題を解消するため、大容量パワートランジスタモジュールを使用した。400 Aパワートランジスタモジュールは高速エレベーターに、800 Aパワートランジスタモジュールは超高速エレベーターに使用する。

問題点を一挙に解決した。360 m/minエレベーターは、このパワートランジスタモジュールを各アームに1個ずつ、600 m/minエレベーターでは、各アームに2個並列に接続して、電力変換器を構成した。これにより、3 kHzの高速スイッチングを行う大容量電力変換器を製品化できた。図5は、変換器(容量500 kVA)の1相分の外観を示したもので、1アームを800 Aパワートランジスタモジュールの2並列で構成したものである。

## 2.3 電力変換器に対する過電圧保護

電流形インバータの保護機能で重要な点は、電源の欠相や異常電圧降下、瞬時停電などの異常条件時に発生する過電圧を確実に抑制し、電力変換器(インバータ及びコンバータ)の損傷を防止することである。図1に示した主回路のトランジスタが一瞬でもオフになると、DCL(直流リアクトル)やACL(交流リアクトル)及び誘導電動機のインダクタンスに蓄えられたエネルギーによって、トランジスタ両端に大きな電圧が

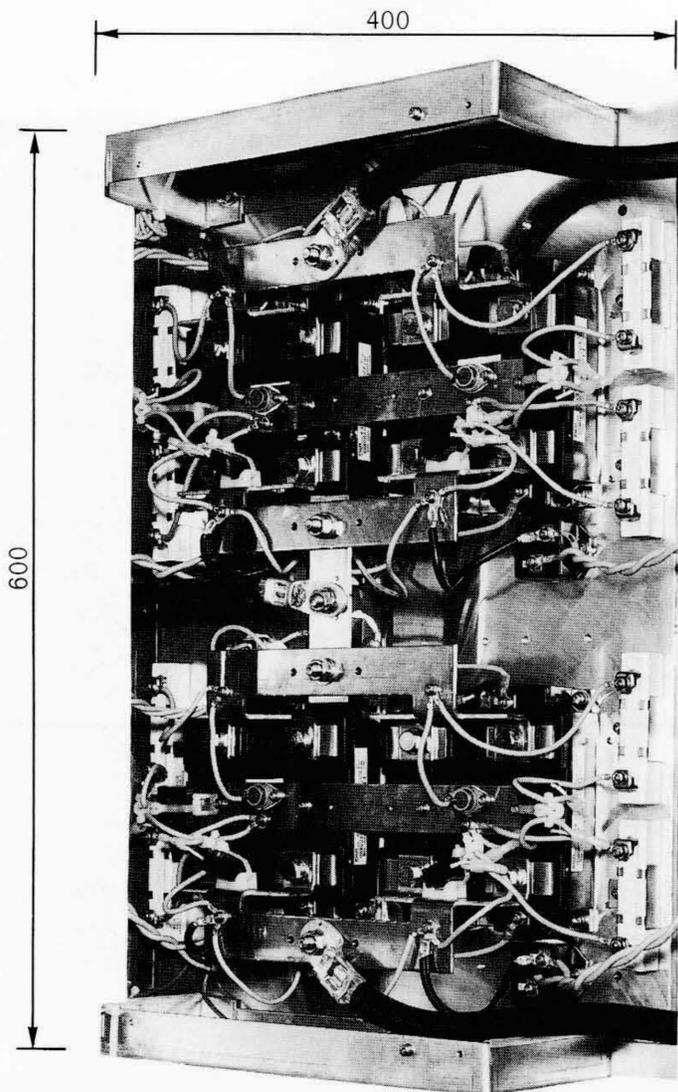


図5 正弦波電流形インバータ用大容量電力変換器 (500 kVA) の外観 1アームを800 A×2並列として、簡素な構成の高速 (3 kHz) スイッチング大容量電力変換器を製品化した。

印加され素子の電圧耐量を超過する可能性がある。正常時には、トランジスタの電流連続条件が制御により常に維持されているが、停電や非常遮断時などでは必ずしも維持されない。

このため、高速インバータエレベーターでは、異常時に直流リアクトルの両端を短絡するサイリスタ回路を設けるほかに、すべてのトランジスタと並列に、またコンバータ出力端

とインバータ入力端に非線形抵抗素子(バリスタ)を挿入し、万一過電圧が発生してもトランジスタが破壊しないように電圧を抑制していた。この保護方式は、電力変換器の容量が小さい場合にはコンパクトに保護回路を構成できる長所があるが、超高速エレベーターになると電力変換器の容量が大きくなり、インダクタンスに蓄積されるエネルギーも大きくなるために、実用化されているバリスタでは吸収できるエネルギーが不足したり、電圧抑制特性が急しゅんでないなどの問題があることから、新しい過電圧抑制方式を開発した。

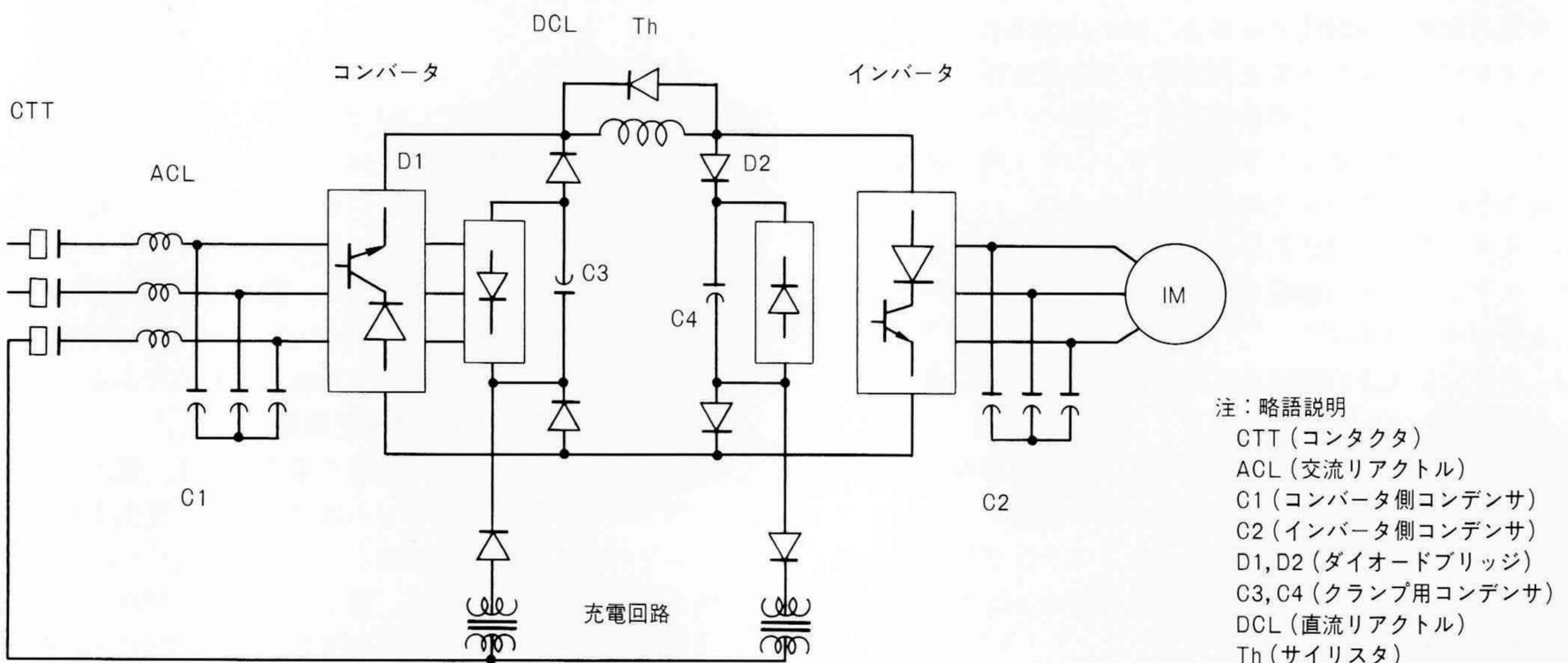
新しい過電圧抑制方式の概略回路を図6に示す。この方式は、電力変換器の入出力端にダイオードと過電圧吸収用コンデンサで構成する二組みのコンデンサクランプ回路を接続したものである。コンデンサクランプ回路は、次のように機能する。

- (1) トランジスタが一瞬オフした場合、過電圧吸収用コンデンサを経由して電流が流れる回路を作り、トランジスタに印加される電圧を許容最大電圧以下に抑制する。
- (2) 過電圧吸収用コンデンサの電圧を検出し、所定値以上になると直流リアクトルの両端に接続されているサイリスタ(Th)を点弧し、直流リアクトルに蓄積されたエネルギーを放電して過電圧の発生をなくす。

この方式は、電力変換器の容量が大きくなった場合、単にコンデンサ(C3, C4)の容量を大きくすることで過電圧の抑制効果を高めることができる。また、回路構成がダイオードとコンデンサ及び充電用トランスだけの極めて簡素な回路であり、信頼性が高い。

### 3 360 m/min超高速インバータエレベーター

以上述べた超高速エレベーター用に開発した新技術を適用して、360 m/min超高速インバータエレベーターの製品化を行った。ギヤレス巻上機及び800 Aパワートランジスタモジュールを使用した大容量電力変換器とマイクロコンピュータを使



注：略語説明  
 CTT (コンタクタ)  
 ACL (交流リアクトル)  
 C1 (コンバータ側コンデンサ)  
 C2 (インバータ側コンデンサ)  
 D1, D2 (ダイオードブリッジ)  
 C3, C4 (クランプ用コンデンサ)  
 DCL (直流リアクトル)  
 Th (サイリスタ)

図6 コンデンサクランプ方式過電圧抑制回路 電力変換器の容量が大きくなった場合は、クランプコンデンサ(C3, C4)の容量を大きくするだけで過電圧を抑制できる。

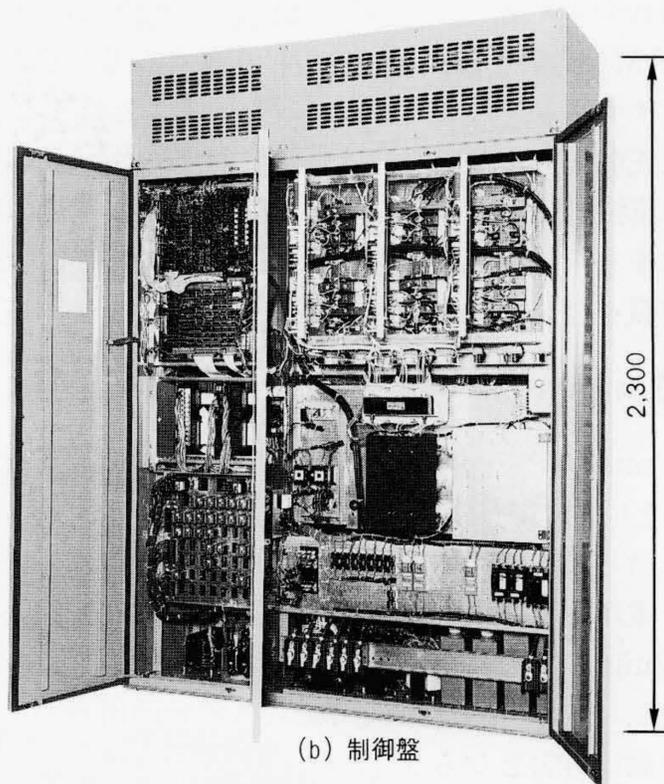
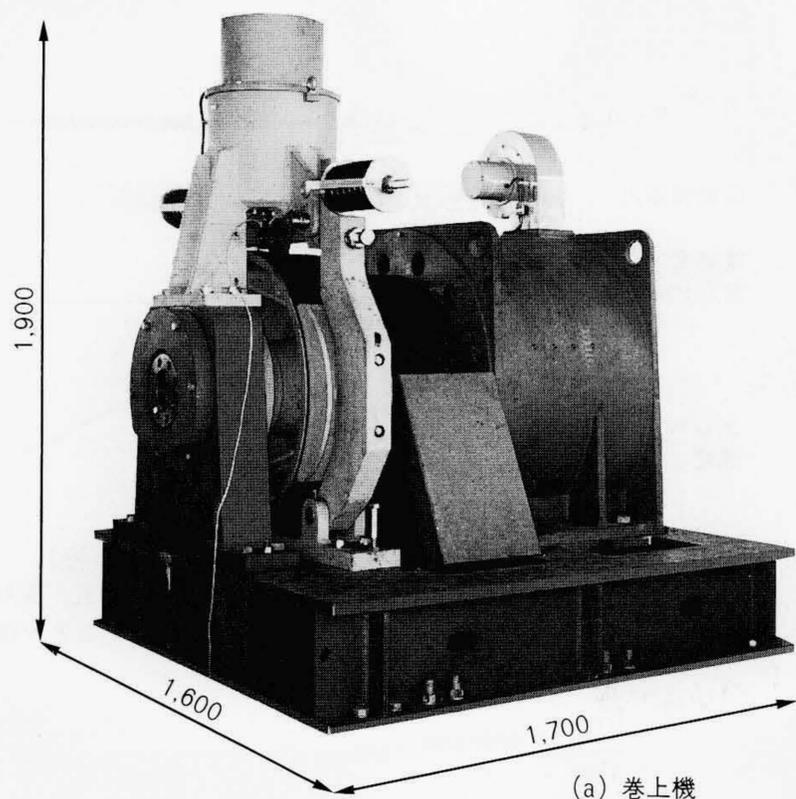


図7 360 m/minエレベーター用の巻上機と制御盤の外観 制御盤は、800 Aパワートランジスタモジュールによる大電力変換器，及びマイクロコンピュータ化制御装置によって簡素に実装できた。

用した制御装置により簡素に実装できた制御盤の外観を図7に示す。

図8は、エレベーター研究塔での運転特性の一例を示したオシログラムであり、電源電流の特性から力率が非常に高いこと及びかご内加速度曲線から良好な乗り心地であることが分かる。表2に電源設備に対する効果を従来のサイリスタレオナード方式との比較で示したが、正弦波電流形インバータは、高力率の効果により電源設備容量を30%低減でき、高調波含有率は5%以下と大幅に低減できた。

運転速度をパラメータとして、力率を従来方式と対比したものを図9に示す。超高速エレベーターは、運転回数のほぼ70%が1階床運転(最高運転速度90 m/min)であり、平均した運転速度は定格速度のほぼ $\frac{1}{2}$ 程度になっている。このような中間速度での運転条件での力率をみると、サイリスタレオナード方式では運転速度にほぼ比例して低下するために、平均的には力率0.5程度と評価される。インバータ方式であっても、

表2 正弦波インバータの電源設備に対する効果 電源設備容量や高調波含有率を大幅に低減できる。

制御方式	サイリスタレオナード方式	正弦波インバータ方式
電力消費量	1	0.9
電源設備容量	1	0.7
高調波含有率	20% (基本波対比)	5%以下 (基本波対比)

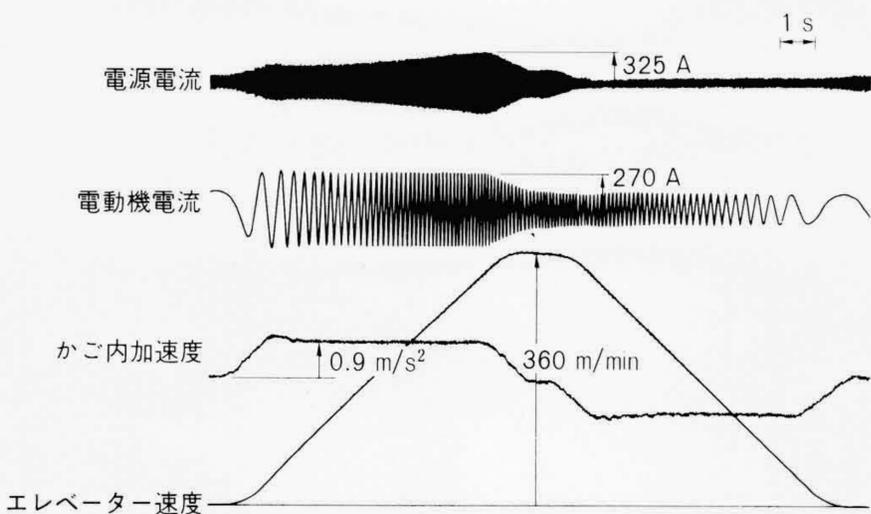
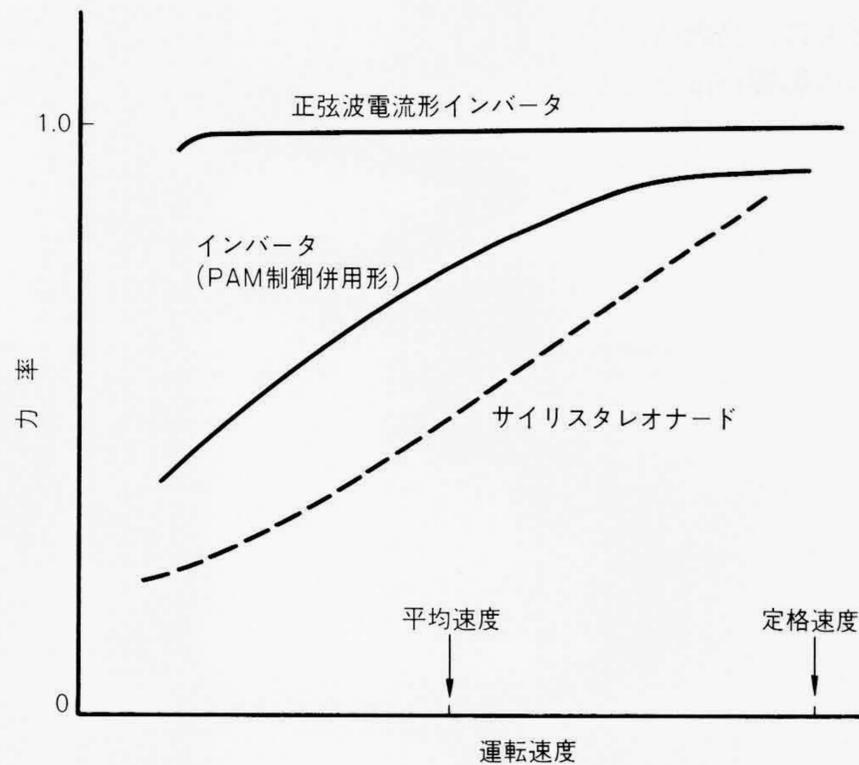


図8 360 m/minエレベーターの制御特性(全負荷上昇運転時) 超高速エレベーターにふさわしい高加速で円滑な乗り心地特性が得られている。電源電流は加速時の出力にほぼ比例しており、力率が常に高いことを示している。



注：略語説明 PAM(Pulse Amplitude Modulation)

図9 インバータ方式とサイリスタレオナード方式の電源力率の比較 正弦波電流形インバータは、速度に関係なく常に高い力率を維持できる。これによって、サイリスタレオナード方式に比較し大幅な電源設備容量の低減ができる。

電動機騒音やトルクリプルの低減の解決策として、コンバータ部にPAM(振幅変調)制御を併用する方式の場合では、サイリスタレオナード方式と同様な傾向を示すことになる。今回開発した正弦波入出力電流形インバータは、コンバータ部の制御でも正弦波PWM/PFM制御を適用し、運転速度のほぼ全領域で力率を1に近づけることが可能になっているため、電源設備容量を著しく低減できる効果を持っている。

#### 4 600 m/minインバータエレベーターの開発

360 m/minエレベーターで確立した技術を更に高速・大容量化することによって、速度600 m/minインバータエレベーターの試験を行った。図10は試験結果の一例を示すオシログラムであり、電源電流及び電動機電流の特性から、速度がゼロから600 m/minまで加減速制御が円滑に行われていることが分かる。更に、乗り心地の評価基準となる電動機出力トルクも、かご内振動に有害となるリップルをほとんど含まない理想的な特性であることが確認できた。

#### 5 結 言

300 m/min以上の超高速エレベーターにインバータ制御を適用して円滑かつ静粛な運転特性を実現するためには、低周波数領域での低トルクリプル制御、及び電動機騒音を低減するための高周波大容量変換器とその信頼性確保が必要であった。これらの課題を解決するために、先に開発した正弦波電流形インバータ方式に加えて、正弦波電流制御をより精密に可能とする正弦波PWM/PFM制御方式と、800 Aパワートランジスタモジュールを使用した3 kHzスイッチング電力変換器を開発するとともに、異常条件下での過電圧抑制制御回路を考案した。

本方式は、定格速度走行時だけでなく中間速度でも力率をほぼ1に維持でき、電源設備容量低減に大きな効果があるとともに、高調波含有率も5%以下とすることができ、他設備への影響がほとんどないクリーンな設備であることなど、市

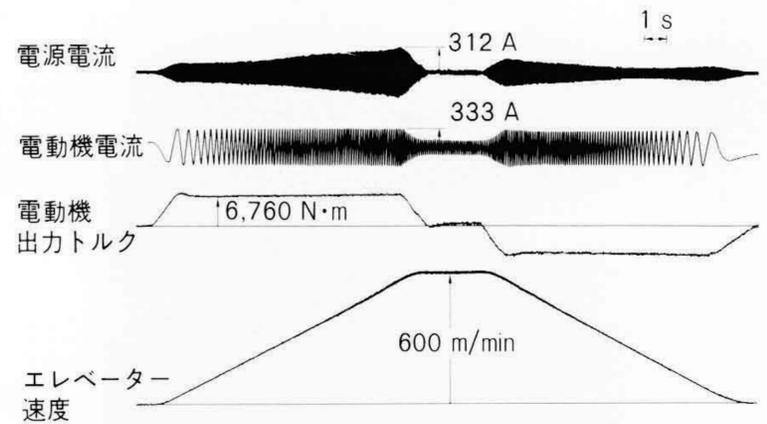


図10 600 m/minエレベーターの制御特性(平衡負荷運転) 大容量にもかかわらず電動機電流が低速領域まで円滑に制御され、乗り心地及び運転効率の評価基準となるトルクも、理想特性に近いことが確認できた。

場のニーズに適合する優れた特長を持っている。

今回開発した技術は、新川崎三井ビルディングに納入した速度300 m/minギヤレスエレベーター12台に採用したほか、600 m/minエレベーターまで適用できることも確認している。

今後も都市機能のよりいっそうの効率化を実現する多くの超高層インテリジェントビルへの設置が期待できるほか、エレベーター以外の産業機器分野にも応用可能なものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 三井, 外: 正弦波インバータ制御高速エレベーター, 日立評論, 68, 6, 495~500(昭61-6)
- 2) 稲葉, 外: 電流形インバータシステムによる超高速エレベーター, 昭和63年電気学会産業応用部門全国大会