U.D.C. 621. 876. 114-185. 4-183. 2:621. 314. 572. 072. 6:681. 323-181. 48

# 正弦波インバータ制御高速エレベーター

# **High-speed Elevators Controlled by Sinusoidal Current Source Inverters**

インバータ制御エレベーターは優れた制御性をもっているため、中・低速機種を 中心として急速に普及しつつあり,更に速度150m/min以上の比較的容量の大きい高 速直流エレベーター分野への応用ニーズが高まっている。高速エレベーターは高階 床で比較的規模の大きいビルに設置される傾向にあり, 電力回生, 低騒音, 低電源 ノイズなど, 高次のニーズにこたえる必要がある。

そこで、電力回生機能をもち、マイクロコンピュータでPWMのタイミングと幅を 正確に制御して、入出力の電圧電流をすべて正弦波状に制御する新しいインバータ 技術と、これによる高速エレベーターの開発を行なった。新方式のエレベーターは 240m/min, 1,600kgの実機モデルで性能実証を行ない高調波含有率5%以下, エレ ベーター電源設備容量30%低減(当社比)の優れた制御性能が確認でき、クリーンで 高効率なインバータ制御エレベーターとして、昭和61年4月に発売した。

三井宣夫*	Nobuo Mitsui
中里真朗*	Masao Nakazato
坂井吉男*	Yoshio Sakai
島 清哉**	Seiya Shima
本部光幸**	Mitsuyuki Hombu
池田瑛司***	Eiji Ikeda

#### 緒 言 1

日立製作所は、これまで中・低速機から速度540m/minの超 高速エレベーターまで幅広い市場ニーズにこたえ、多数の納

540

入実績と独自の制御技術の開発を継続してきた<sup>1)~5)</sup>(図1)。電 カ用サイリスタの導入や、マイクロコンピュータの応用はエ レベーターの制御に大きな変化をもたらしたが、最近のトラ ンジスタ応用のインバータ制御は、ベクトル制御理論とマイ クロコンピュータ技術に支えられて,誘導電動機を直流電動 機のように制御できる点で画期的な技術である。

既に発売した中・低速エレベーター向けインバータ制御(VF 制御)は、これまでの交流帰還制御に比べて良好な制御性能と 大きな省エネルギー効果により市場で高い評価を博している。 しかし、サイリスタレオナード制御(CV制御)を用いている 速度150m/min以上の高速エレベーターでは、速度の増大とと もに大きくなる運動エネルギーの処置, 適正で短い加減速時 間, 高調波による電源側への影響低減など, 中・低速エレベ ーターと異なったニーズにこたえた新しいインバータ制御が 必要である。

そこで今回は、従来のインバータと異なった特長をもつ電 流形インバータをベースに、入出力の電圧、電流のすべてを 正弦波状に制御できるインバータ制御を開発した。

本論文では,別記報告6)の低騒音高効率歯車減速機及び軽量 化の極限を追及したかご構造と組み合わせて実施した速度240 m/min, 1,600kgエレベーターの諸特性を含めて報告する。

#### 2 高速エレベーターのインバータ制御

一般に速度150~240m/minの範囲は高速エレベーターと呼 えると, 高調波ノイズの低減も重要なテーマとなってきてい ばれ、制御性の優れたサイリスタレオナード制御直流ギヤレ る。 ス方式が採用されている。これは、円滑で安定した乗り心地 今回, インバータ制御化を前提に, これらのニーズとそれ でありながら輸送能力から要求される高加減速制御,運動エ ネルギーの増大に伴う電力回生機能など、高度なニーズに対 応しなければならないからである。しかし、直流ギャレスマ シンは低速度・高出力のため、電動機の容量の割に形状が大 ール)以下などの性能をもつ正弦波入出力インバータ制御エレ きいことや, 整流子やブラシ保守が必要になるなど技術的に ベーターの開発を行なうことにした。



日立エレベーターの制御方式の変遷 × I 1972年以降主回路制御に 半導体素子が導入され、制御方式は急ピッチで高性能化された。1980年以降は、 制御装置にマイクロコンピュータが採用されている。

改善の余地もある。

更に、医療機械やOA(Office Automation)機器など高度エ レクトロニクス機器の普及したビル内に設置されることを考

 $\mathbf{59}$ 

に対する技術課題を整理して得た図2に示すような相関図を もとに、(1)電力回生可能、(2)電源高調波5%以下、(3)力率95 %以上,(4)加減速度0.7m/s<sup>2</sup>以上,(5)電動機騒音75dB(Aスケ

\* 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

496 日立評論 VOL. 68 No. 6(1986-6)



図2 インバータ制御エレベーターの市場ニーズと技術課題 高 速エレベーターの市場は、高階床で比較的大規模なビルが主体となるため、エ レベーターの性能も高度なニーズにこたえる必要がある。

3 正弦波入出力インバータ

#### 3.1 電流形インバータ

電力回生が可能で,入出力を正弦波化できる正弦波電流形

御回路は安定性の良い高信頼度のものが要求されるので,当 初は実績のあるアナログパルス制御方式を検討した。これは 図4に示すように,一定周波数の搬送波と直線で構成された 台形波状の変調波を発生し,アナログ回路による比較を行な い,高周波の安定したPWM制御パルスを発生する方式である。 (2) コンバータ

コンバータ部は、直流回路電流 $I_a$ が負荷に応じた電流指令 に一致するように出力電圧 $E_a$ を制御する。出力電圧 $E_a$ は、通 流率 $\gamma$ と位相角 $\alpha$ によって定まり、電源線間電圧実効値を $E_a$ とするとPWM制御時は次式のようになる。

 $E_d = \sqrt{3/2} E_a \gamma \cos \alpha$ 

cos αは電源の力率であり、力行時には1、回生時には-1 になるよう制御する。しかし、低出力時にはトランジスタの 特性から、γを零まで十分小さくすることは困難であるので、 γを0.1程度で止めて、あとはαを制御することによって直流 出力電圧をスムーズに制御している<sup>3</sup>。その他、コンバータは 力行・回生のいずれの場合も電源位相に同期してパルス制御 を行なう必要があり、インバータよりもパルス制御は難しく なるが、その後の処理はインバータと同様の手法でパルスを 発生している。

#### 3.3 波形の検討

エレベーター系の固有振動数は数ヘルツであるので、制御 に伴いこの周波数成分のトルクリップルがあると共振により 著しくエレベーター性能を損なう。そこで、電流形インバー タ制御のもとでの電流波形とトルクリップルについて、コン ピュータによるシミュレーションを行なった。図5(a)はその 結果を示すもので、図4のアナログパルス制御方式では60度 ごとに発生する切換点での変動が無視できず、電流波形が乱 れそれに起因してインバータ出力周波数の6倍のトルクリッ プルが発生している。図5(b)はパルス制御方式を正弦波変調 とした場合の結果を示すもので、電流脈動とトルクリップル が少ない良好な結果が得られる。そこで、このシミュレーシ ョンの結果をもとに、パルス制御方式の抜本的な改善を行な うことにした。

インバータの主回路<sup>7)</sup>を図3に示す。

コンバータ部は負荷に応じた電流の制御を行ない,インバ ータ部は単にPWM(パルス幅変調)制御による周波数変換だ けを行なう方式である。出力端のコンデンサC<sub>2</sub>は,脈動電圧 に対し極めて有効なフィルタ効果を発揮するため,インバー タ出力電圧のチョッピング周波数の脈動成分は十分小さくな り,電動機騒音を小さくできる。

また, 直流回路の電圧が力行, 回生に応じて, 正, 負両方 に制御され逆電圧が印加されるので, 主回路素子にはトラン ジスタとダイオードを直列に接続した逆阻止トランジスタモ ジュールを採用した。

3.2 パルス制御方式

(1) インバータ

60

電流形インバータでは, 直流回路にインダクタンス(L<sub>2</sub>)が 挿入されているので, 電流が途切れると高電圧が発生してト ランジスタを破壊する可能性がある。したがって, パルス制

#### 3.4 正弦波化技術

前述のシミュレーション結果に基づき,正弦波変調を行な うディジタルパルス制御方式を検討した。

図6に、新たに開発した正弦波変調のできるディジタルパルス制御方式の発生原理を示す。同図(a)は基準となる正弦波





平滑後の電流波形 PWM電流波形 注:略語説明 PWM(パルス幅変調)

図3 正弦波電流形インバータ 基本的に電力回生機能をもっている。 自弧消弧素子を使用することにより、キャリア周波数を高くできるので正弦波入 出力特性が得られ、同時にリアクトルやフィルタコンデンサ容量を大幅に低減で きる。

図 4 アナログパルス制御方式 搬送波Aと変調波Bをアナログ回路で 比較して、B≧Aでトランジスタを点弧することにより、インバータ出力電流のパ ルス幅変調を行なう。特性が安定しており、実績も多い方式である。



3相交流の1周期分であり、各相の大きさだけに注目すると 60度ごとにモードM1とM2が交互に繰り返されている。更に, M<sub>1</sub>とM<sub>2</sub>は対称であるから結局3相交流はモードM<sub>1</sub>の各相の 値によりすべて制御できる。

そこで、図6(b)のモードM<sub>1</sub>の各相の大きさを電気角 $\theta(0 \leq$ θ≤60°)に対してあらかじめ求めておき、これに対応してキ ャリア周期Tの中を分割するパルス幅をそれぞれT<sub>1</sub>=T sin  $\theta$ ,  $T_2 = T \sin(\theta - 240^\circ)$ ,  $T_3 = T_1 + T_2$ となるように各相の トランジスタをスイッチングさせればよい〔同図(c)〕。

このようにして制御した1周期分のインバータ出力のパル ス列を示すと図6(d)のようになり、この平均値は正弦波であ る。

ところで図6(c)のパルス分配によれば、T<sub>4</sub>の区間はどの相 にも電流が流れない。しかし, 直流回路電流を零とすると高 電圧を発生するので、この時間はV相の正負両極のトランジス タを点弧して直流回路を短絡する。これにより出力電流は零 としながら, 直流回路の電流を連続させることができるので これを短絡パルス制御と呼ぶ。この方式の導入により、良好 な正弦波出力電流を得ることができた。

図7(a)は、このパルス分配方式のアルゴリズムの処理フロ ーを示す。角度θからパルス幅を算出し、トランジスタを選択 する。次に実際のパルスを発生するスケジュール処理を行な い、これをキャリア周期ごとに繰り返す。

#### 3.5 ワンチップマイクロコンピュータ制御技術

ディジタル式正弦波パルス制御方式に要求される位相の算 出,その位相でのパルス幅計算と設定,そして,適正な点弧 御結果の一例を図8に示す。同図(a), (b)は交流出力40Hz, 80 A出力時の入出力電圧,電流波形を示すもので,いずれも良好 すべきトランジスタの選択などの機能はすべてマイクロコン ピュータで処理する方式とした。このとき,正確なパルス幅 な正弦波電圧, 電流波形が得られている。特に出力電流の波 を発生する周辺回路を内蔵するワンチップマイクロコンピュ 形が円滑で2Hz, 100A運転でも電動機出力に含まれるトルク ータを採用した結果、これらすべての機能を1個のLSIにまと リップルは3%以下と十分小さいことが確認でき、エレベー めることができ、ディジタルパルス制御回路は、部品点数の ターの低速域でも制御性能上問題のないレベルを達成してい 極めて少ない高信頼度の回路とすることができた〔図7(b)〕。 る。

図6 正弦波パルス制御方式の原理 3相正弦波交流は、基本モード M1の繰返しにより構成されている。基本モードをもとにθに対する各相のパル ス幅を求め、キャリア周期TをT1、T2、T3に分配制御すると、正弦波PWM出力 が得られる。



図7 ディジタル式正弦波パルス制御方式 (a)図にディジタルパル ス分配方式の処理フローを, (b)図にそのプリント板外観を示す。

また、ディジタル方式であるので正確で調整誤差や経年変 化がなく,安定した性能が保証できる。

61

このワンチップマイクロコンピュータで正弦波変調した制

498 日立評論 VOL. 68 No. 6(1986-6)

#### 4 インバータ制御高速エレベーター

#### 4.1 エレベーター制御システム

正弦波電流形インバータを使用した高速エレベーターのシ ステム構成を図9に示す。主回路素子として,逆阻止機能を もつトランジスタモジュールを使用したので,電力回生機能 を備えているにもかかわらず,回路構成は簡素で信頼性の高 い実装とすることができた。

主回路部トランジスタのPWM制御回路は, コンバータ部, インバータ部ともワンチップマイクロコンピュータを使用し て,入出力電圧電流の正弦波化を可能とした。また, ワンチ ップマイクロコンピュータの採用で使用部品点数も大幅に低 減し,実装スペースの低減,信頼性の向上に大きく寄与できた。

ベクトル演算を含めた速度制御回路は,高性能の16ビット マイクロコンピュータで構成し,その高速,高精度の演算機 能によって従来の直流機並みの速度制御性能を可能にしてい る<sup>5)</sup>。また,運転制御用として,もう1台の16ビットマイクロ コンピュータを設け,前記のマイクロコンピュータと相互監 視を行なう機能分散二重系マイクロコンピュータシズテムを 構成し,信頼性の向上を図っている。

以上述べたように、インバータ制御高速エレベーターの制 御システムは、最新のパワーエレクトロニクス技術とマイク ロコンピュータ技術により、プリント板の小形・高密度設計







図8 正弦波パルス制御方式による性能 (a)図及び(b)図は,正弦 波パルス制御方式での入出力の電圧,電流波形を示す。

図10 制御盤の外観 制御回路のエレクトロニクス化を徹底して,幅1,250
 ×奥行630×高さ1,900(mm)の中に制御装置を収納し,据付面積を従来対比約
 50%低減した。



図9 インバータ制御高速エレベーターのシステム構成 主回路部は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ハード的にシンプルな構成としている。

62

正弦波インバータ制御高速エレベーター 499



図|| ヘリカル減速機の外観 |段減速ヘリカル歯車を使用して小形化 を図った。歯形形状の研究と精密加工技術により、低騒音・高効率を実現した。

を行なったので、制御盤サイズは、図10に示すように小形にすることができた(当社比で据付面積を約50%低減)。

#### 4.2 高効率・低騒音マシン

今回,歯形形状と振動騒音低減研究の成果をベースとした 歯車設計技術,精密歯車加工技術の確立により,振動・騒音 とも,これまでのギヤレスマシンに匹敵する高効率へリカル 歯車減速機を開発した(別掲載論文参照)<sup>6)</sup>。これにより,従来 はギヤレスの範囲である240m/minまでを,インバータ制御ギ ヤードエレベーターでシリーズ化することができた。その外 観を図11に示す。ギヤード化したことによって,電動機は4 極の誘導電動機を使用して高速回転小形化し,従来のギヤレ スマシンに対し,重量で約40%(240m/min級で)の低減を図る ことができた。

## 5 エレベーター実機による性能確認

開発技術の成果を確認するため、工場内の研究塔で前章で 述べた制御装置とマシンを設置し、速度240m/min積載量 1,600kgの仕様で実機試験を行なった。正弦波電流形インバー タは騒音低減用リアクトルが不要なので、主電動機には400V の標準電圧仕様のものを使用している。

エレベーターの運転特性を図12に示す。加速度は平均0.9m/ s<sup>2</sup>,加速時間4.5秒の安定した加減速が得られ,高速エレベー ター用としての輸送能力も高く,円滑で乗り心地の良い特性 が得られている。特に,乗り心地上重要な起動直後及び停止 直前の低速運転時でも,ワンチップマイクロコンピュータを 使用した正弦波化技術により,トルク脈動のない滑らかな運 転特性を得ることができた。コンバータ出力電流については, 全負荷上昇の加速時(このときに最大電流が流れる。)でも定格 電流の2.2倍以内に収まっており,機械構造品の軽量化,低慣 性化の効果が表われている。このことは、主トランジスタの 定格に対しても十分余裕をもった運転を保証するものである。 建屋電源設備に関係する電源電流は,速度の上昇に従って

建産電源設備に関係する電源電流は, 速及の工弁に促って 増加している。換言すれば, エレベーターの機械的仕事量に 正比例して変化している。これは, コンバータ入力の力率が

ほぼ1に維持できるため,有効電流分しか流入しないからで ある。このように,加減速時の実効電流(rms値)の減少は主回 路機器各部の電力損失と皮相電力の大幅な低減を意味し,電 源設備容量は従来比で30%低減することができた。図12(b)は 全負荷下降時の電源電流のオシログラムの一部であるが,同

63



#### 図12 エレベーターの運転特性 高速エレベーターにふさわしく、高加速度で円滑な乗り心地特性が得られている。

500 日立評論 VOL. 68 No. 6 (1986-6)

図中A~B間は電力回生状態を示しており、力率がほぼ1.0の 正弦波電流が回生されることが確認できた。

マシンの騒音については、図13(a)に示すように、オーバオ ールで75dB(Aスケール)以下で、目標仕様を満足しており、 キャリア周波数に基づく電動機の耳障りな騒音成分もなく、 正弦波出力の特長が遺憾なく発揮されている。また、電源電 流の波形は、力行時、回生時ともほぼ正弦波となり、周波数 分析を行なった結果、高調波成分は非常に少なく、基本波に 対して5%以下にできた〔同図(b)〕。これは、従来のサイリス タレオナード制御に比べて約 $\frac{1}{5}$ の水準である。

そのほか,高速誘導電動機採用による効率の向上,エレベ ーター慣性能率の低減,前記無効電流の抑制などにより,電 力消費量を約10%(当社従来比)低減することができた。

以上,本電流形インバータ制御高速エレベーターの効果を まとめると**表1**に示すようになる。

表 | 正弦波インバータ制御方式の効果 電源設備容量や高調波含有率の大幅低減を中心に、高速エレベーターの性能向上ができた。

項目	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)
制御盤据付面積	1	0.5
巻 上 機 重 量	- 1	0.6

### 6 安全システム

#### 6.1 インバータ制御回路の保護協調

電流形インバータでは一瞬であってもすべてのトランジス タがオフになると、直流回路の直流リアクトルや電源リアク 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 ーにより大きな過電圧が発生する。正常時の電流連続条件は 制御により維持されているが、停電や非常遮断時には必ずし も満足しない。このため、すべてのトランジスタと並列に、 また直流リアクトルの両端にサージアブソーバを挿入し、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して いる。

また,負帰還用電流検出器,電流制御回路などの故障で過 電流が生じた場合や,電源の欠相や異常電圧降下,瞬時停電 なども異常として検出しており,これらの安全装置は実機エ レベーターで各種条件が組み合わされた場合でも問題のない 保護機能をもっていることを確認した。

#### 6.2 エレベーターシステムの安全性

異常検出,過負荷検出など従来から実績のある異常検出装置 はすべて採用して,信頼性の高い安全システムとした。安全 システムは基本的にマイクロコンピュータそのものの信頼性 に依存している。そこで,日立エレベーター特有の機能分散 二重系制御システムを16ビットマイクロコンピュータ2台に より構成し,マイクロコンピュータは常時相互診断して自ら の正常性確認のもとにエレベーターの安全を保証するシステ ム<sup>4),8)</sup>とした。



## 7 結 言

インバータ制御高速エレベーターの分野に新しい方向を見いだした正弦波入出力インバータは、電力回生、低高調波、高力率など「クリーンエレベーター」と呼ばれるのにふさわしく、市場ニーズにこたえたものであることを述べた。

当然この新しいインバータ技術は,300m/min以上の超高速 エレベーターにも適用できるばかりでなく,更に電力回生を 必要とする分野にも広く応用できる。

近い将来,より高いスイッチング周波数をもつトランジス タ素子の出現が予想されているが,この新素子を応用すれば フィルタコンデンサ容量,直流リアクトルの容量をいっそう 小さくでき全体として更に経済的な高集約実装ができるもの と期待される。

#### 参考文献

- 1) 三井,外:規格形エレベーターの単一サイリスタユニットによる加減速制御,日立評論,58,11,939~943(昭51-11)
- 2) 坂井,外:サイリスタレオナード制御方式直流エレベーター, 日立評論, 62, 7,509~514(昭55-7)
- 3) 黒沢,外:GTOサイリスタコンバータを用いた省電力形直流 エレベーター,日立評論,66,6,419~424(昭59-6)
- 4) 弓仲,外:マイクロコンピュータ制御による規格形エレベータ 一の開発,日立評論,**61**,11,821~826(昭54-11)
- 5) 高橋,外:マイクロコンピュータ利用インバータ駆動省電力規 格形エレベーターの開発,日立評論,66,6,425~428(昭59-6)
  6) 奈良,外:インバータ制御高速エレベーターにおける軽量化技 術,日立評論,68,6,501~506(昭61-6)
  7) M.Honbu et al.: A Current Source GTO Inverter with Sinusoidal Input and Output, IEE IAS Annual Meeting Transac.(Tronto 1985)

図13 正弦波化の効果 正弦波出力により,電動機騒音は商用電源時と同レベルであり,正弦波入力電流に含まれる高調波含有率は従来の号以下にできた。

64

8) 中里,外:マイクロコンピュータによる全静止形直流エレベー ターの開発,日立評論,63,10,675~678(昭56-10)