超高速・高揚程エレベータの速度制御 の動向と課題

正員 渡辺 英 紀 (三菱電機(株) 稲沢製作所)

1. はじめに

昭和38年に建築基準法が改正され、我が国の建築の高層化が始まった。本格的な高層ビルは昭和43年に完成した霞が関ビル(東京)が最初で、その後、図1に示すように数年ごとに高層ビルの高さ記録が書き換えられた。エレベータの走行速度もビルの高さの記録と共に速くなり、霞が関ビルでは300 m/minであったが、19年後のサンシャイン60ビル(東京)では2倍の600 m/minとなった。これは現在でも世界最高

速である。その後は、図1の高層率(3階以上のビルに占める16階以上の高層ビルの比率)の推移のごとく、石油ショック以降建築の高層化のう勢が鈍り、エレベータの高速化への挑戦も一応の終息を見た。

しかし近年の東京など大都市への人口集中により、再び超高層ビルブームを迎えようとしており、ビルの高さもサンシャイン60ビルの226 mが永らく一位であったが、近く完成する東京都庁新庁舎の242 mにその座を譲ることになる。

一方、ここ10年のエレクトロニクスの進歩は素晴

図1 エレベータの高速化の推移

Recent Trends and Future Theme of Super-High Speed and High Rise Elevators. By Eiki Watanabe, Member (Mitsubishi Electric Corporation).

らしく、アナログ制御からデジタル制御へと、また MG を使用したワードレオナードからサイリスタレオナード方式、更には VVVF 方式へと制御の分野は大きく進歩した。

そこで本解説では、最近のエレクトロニクスの進歩がエレベータの制御をどのように改革したかについて述べ、更に今後一層超高速・高揚程化が要求されるであろうエレベータの課題について言及してみたい。

2. 超高速エレベータの制御目標

エレベータは階床間を走行する運転時間が短く、乗り心地が良く、しかも着床誤差（乗りかごとホール床面との差）が小さくなるように制御しなければならない。乗り心地良く、最短時間で走行するための運転曲線については種々の研究^{(1)~(4)}があるが、ここではその理想形の一つと考えられる正弦波運転曲線（加減速度の変化部分が正弦波曲線となっているもの）を図 2 に示す。エレベータの速度制御系はこの運転曲線を精密に実現する必要がある。

運転時間は加減速時間が大きなウェイトを占めており走行時間の長短は加減速度の大小と反比例している。加減速度および加加速度（加速度の時間変化率）が小さいほど乗り心地は良いが走行時間は長くなる。

一方、エレベータの着床誤差は $\pm 5 \text{ mm}$ 以下が要求される。これが大きくなると乗り降りがスムーズにできなくなるばかりでなく、時には転倒事故が発生する心配もある。速度制御系はかご負荷（かご内乗客数）、温度、電源電圧などの各種パラメータの変動や外乱に対しても十分耐えて、これらの制御目標を達成するものでなければならない。

なお、乗り心地を良くするためには上記のほかに加加速度脈動や、起動・停止ショックを小さくする必要があり、一例として超高速エレベータの制御目標を表 1 に示す。

表 1 速度制御の目標値の一例

要 因	項 目	目 標 値
乗り心地	最大加（減）速度	0.9 m/s^2
	最大加々速度	1.3 m/s^3
	起 動ショック	0.1 m/s^2 以下
	停 止ショック	0.1 m/s^2 以下
	加速度脈動	$P-P \ 0.1 \text{ m/s}^2$ 以下
運転時間	一階床運転時間 (階床間隔 $3,400 \text{ mm}$)	4.8 s
着床誤差	負荷変化、ドリフト等	$\pm 5 \text{ mm}$ 以下

図 2 高速エレベータの運転曲線

3. 超高速エレベータの速度制御方式

3.1 速度制御系の構成

超高速乗用エレベータの速度制御系の一例を図 3 に示す。かつては制御性能の良い直流電動機をワードレオナードやサイリスタレオナードで制御する方式が用いられた。しかし、近年のパワーエレクトロニクスの進歩が交流電動機でも直流電動機と同等の制御性能が出せる VVVF 方式を出現させた。VVVF 化によって堅ろうな交流電動機が採用でき、整流子やブラシの保守から解放されることに加え、サイリスタレオナード方式に比べ力率が良く、VVVF 装置への入力電流波形を正弦波にし、低次高調波も 5 % 程度以下にできるコンバータの実現などのメリットがあるためである^{(5)~(7)}。16 ビットのマイクロコンピュータあるいはデジタルシグナルプロセッサ (DSP) が十分この

図 3 速度制御系の構成 (例)

要求に応えた。

エレベータはつるべ式になっていて、ロープの一端はかごで、通常定員の40～50%の乗客がかごに乗ったときにバランスするように他端に釣合錘がある。巻上げ電動機の回転速度は、マイクロコンピュータからの速度指令により制御される。

3.2 起動時の制御

エレベータの運転効率を大きく左右するのは、床から床までの走行時間であって、その効率を高めるためには極力むだな時間がないようにしなければならない。エレベータは停止時には機械式ブレーキで綱車を保持しており、起動時には機械式ブレーキを開放してから電動機を運転する。ところが満員で上昇するとき、機械式ブレーキを開くとかごのほう重いので、いったんかごは下方に動き、しかるのちに上昇を開始することになる。これは乗り心地を害するうえに、むだ時間が発生するので効率が下がる。そこで機械式ブレーキを開放する前にかご内乗客の重量を負荷検出装置によって秤量し、巻上げ電動機にあらかじめこれとバランスするトルクを発生する電流を流しておく。

3.3 加減速時の制御

図2に示す速度曲線に沿った運転により、迅速性と快適性がバランス良く満たされるが、図中に示すごとく、1階床運転、2階床運転、…全速運転（図では36階以上ノンストップで初めて全速が出る）、それぞれによって速度曲線が異なる。更にビルによって階床間隔が異なるので、同じ1階床運転でも常に一定とは限らない。従って、無数の組合せが発生できる速度指令発生方式が用いられる。

このような速度指令値を発生する装置として、従来は機械式セレクト⁽⁶⁾というものが用いられた。これは1/100～1/150のスケールモデルともいうべきものであって、この中にかごと同期して動く同期移動台、かごが走行を開始すると同時にかごより速く前進し、停止すべき階床がどこにあるかを探索する前進移動台、および前進移動台と同期移動台の距離差を演算する差動移動台の三つの移動台をもっていた。

この機械式セレクトは仮に1/100モデルとしても、かごの移動量1mmはセレクトではわずかに0.01mmの移動量であるので極めて精密に製作する必要がある、また仮に揚程250mのエレベータでは高さが約3mものセレクト装置が必要になり、機械室でのセレクト装置の配置や据え付け、保守にも大変手間が掛かるものであった。

しかし、近年のマイクロコンピュータの進歩はこの問題を解決した。図3の移動量検出装置はかごの動き

を0.1mm単位のパルスに変えて極めて精密に検出し、マイクロコンピュータは速度指令値の演算を電氣的に行う。これによって超高速・高揚程になっても機械室に機械式セレクトを設置する必要がなくなり、機械室寸法が大幅に縮小できた。

3.4 着床時の制御

着床精密の目標はあらゆる負荷に対して±5mmと非常に厳しいので、従来は着床時には直接昇降路にインダクタ⁽⁷⁾と称するものを設置し、機械式セレクトを介さずかごの位置を検出していた。しかし、これもマイクロコンピュータのおかげで不要となり、昇降路の平面スペースの縮減に寄与している。

4. 超高速・高揚程エレベータ速度制御上の問題点

高揚程エレベータでは、制御対象が長いロープで吊された共振周波数の低い制御系であるので、速度制御系と位置制御系の安定化対策が必要になる。

図4(a)は、エレベータ機械系のモデルである⁽⁹⁾。この機械系の振動モードを解析するとロープ、防振ゴムなどにより多数の振動モードが存在するが、優勢なものは最低次の振動数（通常1～3Hz）のかご上下振動モードと、第三次の固有振動数（5～10Hz）の綱車回転モードである。かご上下振動モードはかご位置が下方または上方にあるとき優勢な振動モードであって、かごまたは釣合錘が上下に動くモードである。綱車回転モードはかごが主として上方位置にあるときに優勢なモードであって、綱車が回転するモードである。綱車のトルク T と綱車の角速度 ω の比 ω/T のゲイン特性は、機械系を剛体負荷と考えると $1/s$ （ J はかご、釣合錘、ロープなどを綱車軸に換算した慣性モーメント、 s はラプラス演算子）、すなわち20dB/decの傾斜をもつが、実際には最低次のかご上下振動モードでは共振点において約20dB、第三次の振動モードでは40～50dBのゲイン上昇がある。この周波数特性は共振点より低い周波数に必ず反共振が現われるので、共振点においても位相は遅れることがない。

一方、速度制御系のカットオフ周波数 ω_c は通常5rad/s近辺に選定され、仮にロープ系のゲイン上昇があってもロープ系の固有振動数において一巡ゲインが0dB以上になったとしても、前述のとおり位相回転がないので不安定現象は発生しないはずである。しかし速度制御系には高周波では高次遅れを多数含むので、 ω_c 以上の周波数でゲインが図4(b)のように0dB以上になることは系が不安定になることになる。従って、何らかの手段でロープ系の固有振動数のところで

図4 エレベータ機械系のモデルと制御系安定化手法(例)

速度制御系の一巡ゲインが0 dB以上にならないようにする必要がある。

本来、このゲイン上昇はロープのバネ特性に起因するのであるから、ロープ自身にダンピングを与えるのが最も望ましい。しかしロープ自身に直接ダンピングを与えることは難しいので、張り車の上下動にダンピングを与えたり、ロープ端を固定するスプリングにダンピングを与えたりする間接的な方法がある。ここでは、電気的にダンピングを与える方法について紹介する。図4(c)はその原理図であって、 G_y は電力増幅器およびロープを含む機械系の伝達関数であり、 ω_1 は共振周波数、 ω_2 は反共振周波数である。 H_y はバンドパスフィルタであって、網車軸に取付けたエンコードから共振周波数 ω_1 の成分の信号を制御系にフィードバックする、言うならば選択性の加速度フィードバックである。電流基準信号から ω をみた伝達特性 G は

$$F = G_y / (1 + G_y \cdot H_y)$$

従って

$$G_y \cdot H_y \gg 1 \text{ のとき } G = 1/H_y$$

$$G_y \cdot H_y \ll 1 \text{ のとき } G = G_y$$

となって、図4(d)のように ω_1 でのゲインの上昇がなくなり電気的にダンピングを掛けたことになる。速度制御系が安定化できれば位置制御系についても問題はほぼ解決する。

5. 今後の課題

5.1 揚程の限界

エレベータの昇降に伴い、かご内の気圧が変化する。この気圧変化に対して、普通の人間が耐えられる点が揚程の一つの限界となろう。

図5は、この限界を見極めるために行ったシミュレーションの結果であって、航空自衛隊の瞬間減圧装置を用いてエレベータの昇降と同じ気圧変化をかご内の被験者に与えて⁽⁴⁾、耳痛の影響を調査したものである。この結果から揚程400 mでは耳痛とエレベータ

図5 気圧変化の人体に及ぼす実験

速度の相関は薄く、かなりゆっくりと走行させても下降時に耳痛を訴える人が若干いる。さすがに揚程1,500 mを一気に走行すると、大多数の人が下降時に耳痛を訴えているので、もしこのようなビルが計画されるときには例えば気圧調整など何らかの対策が要らう。

なお、実際のエレベータで速度を変えて耳づまりの影響を調査した例⁽¹⁰⁾もあり、このときも同様に最高速度の違いによる差異はほとんど見られないという報告がなされている。

次にエレベータが現在のようにロープで吊された構造を採用する限り、ロープの破断強度が揚程の限界を与える。すなわち、ロープの自重によって自身の重みを支えきれなくなる。特にエレベータの場合には、ロープに対して10倍以上というような十分な安全率が法規によって要求されるので、通常の構造および材料を採用する限り1,000 m程度が一つの目安とならう。なお揚程が高くなるにつれて第4章で述べた機械系の固有振動数が低下して、制御系の不安定現象が発生しやすくなるが、600 m程度なら図4の方法で十分制御可能であろう。

5.2 速度の限界

我が国でも更に超高層のビルが幾つか計画されている。これに伴いエレベータの速度もサンシャイン60ビルの600 m/minを超えるものが要求されるのも必至であろう。揚程400 mを一気に走行するとすれば最高速度は1,000 m/minが出せることになるが、前述の耳痛との関係で一般用としては速度750 m/min

程度ではないかと推定される。

6. 終りに

以上超高速・高揚程エレベータの速度制御の動向と課題について述べた。将来、更に超高層のビルが出現したときには、一つの昇降路（シャフト）内に数台のエレベータを走行させる、いわゆるワンシャフトマルチカーが有効になってくると考えられる⁽¹¹⁾。この実現のためにはロープを使わない駆動方式が必要であり、必然的にリニアモータ駆動とならう。しかし安全性とのかかわりあいや、経済性の問題など解決すべき点が多々あり、電気設備学会統計調査委員会の予測⁽¹²⁾では2005年ごろとなっている。

このようなロープのないエレベータでは当然制御ケーブルも用いられず、かごの制御には無線あるいは光が用いられよう。また高温超電導を利用したりリニアモータやかご用のエネルギー蓄勢装置が実用化されれば、現在のエレベータシステムの構造も相当変革されよう。

最後に執筆に際し、種々資料を提供いただいた(株)日立製作所および(株)東芝の方々に本誌を借りてお礼申し上げます。

(平成元年7月18日受付)

文 献

- (1) 早瀬：「最近のエレベータの速度制御」，電学誌，95，217（昭50-3）
- (2) 遠藤，他：「高速ギヤレスエレベータ」，東芝レビュー，29，678（昭49-8）
- (3) 高村，他：「三菱新ASP-A方式シンクログライドエレベータ」，三菱電機技報，41，929（昭42-7）
- (4) 高村，他：「超高速化の進む三菱シンクログライドエレベータ」，同上，44，1005（昭45-8）
- (5) 杉本，他：「エレベータに於る実用化の現状と動向」，昭60電気学会全大，S-8-17
- (6) 本部，他：「入出力正弦波電流形インバータとその応用」，日立評論，68，29（昭61-8）
- (7) 北川，他：「インバータ制御エレベータ」，東芝レビュー，39，757（昭59-9）
- (8) 渡辺，他：「高速エレベータの速度制御と群管理」，システムと制御，22，316（昭53-6）
- (9) 重田，他：「高速エレベータ縦振動系の解析」，日立評論，50，62（昭43-9）
- (10) 後藤，他：「高速エレベータの乗心地に関する研究」，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），p.753（昭53-9）
- (11) 山村：「電気学会100年の回顧と展望」，電学誌，108，740（昭63-8）
- (12) 「電気設備の技術動向調査報告書」，電気設備学会誌，p.89（昭62-2）