

外 97-2

早稲田大学大学院理工学研究科

## 博士論文概要

### 論文題目

エレベータの高速化における  
振動制御技術  
の開発に関する研究

申請者

山崎 芳昭

Yoshiaki Yamazaki

1997年 5月

安全装置付きの近代エレベータが世の中に出て約100年を経た今日、エレベータはビル内の縦の交通機関として必要不可欠な存在になっている。エレベータは建物の中に設置されるため、他の乗り物に比べ格段に静かで滑らかな走行性能が要求される。近年は都市空間の有効活用の観点から超高層ビルの建設が活発化し、超高速のエレベータが設置されるようになり、速度制御と振動抑制についての性能向上が今まで以上に重要な技術課題になっている。

これまでにエレベータに関する数多くの研究と開発がなされてきた。しかし、従来の速度制御と振動抑制に関する研究を整理してみると油圧式エレベータの速度制御とかご縦振動抑制の性能向上、巻上式超高速エレベータの受動的減衰機器の最適調整に対する検討とロープ張力の容易な調整法の実現、かご横振動への振動制御技術の適用などに関する研究がまだ十分になされていないようである。そこで、本研究では振動問題を主な研究対象として、高速化・高揚程化にも対応でき、速度制御と振動抑制性能をより一層向上した乗り心地の良いエレベータを実現するために、次の5点を具体的な目的とした。

- (1) 機械系との連成を考慮できる形での誘導電動機ベクトル制御の動特性の解明
- (2) 誘導電動機の交流可変電圧可変周波数(VVVF)制御による新しい方式の油圧式エレベータの開発

- (3) コンペニシーブダンパの最適調整とローラガイド用オイルダンパの開発
- (4) ロープ張力調整法の確立によるエレベータの長期信頼性の向上と保守作業の簡素化

- (5) 振動制御技術を活用したかご横振動制御装置の開発

本論文では、これらの目的を達成するために、その振動制御法に関する理論的および実験的検討を行った。そして、実際のエレベータに活用できる振動制御法を開発するとともに、これらの技術を実装置へ適用し、その有効性を検討した。

本論文は全文8章から構成されている。各章の概要は次の通りである。

第1章は、本研究の工業上の背景としてエレベータの技術の変遷を示すことで、走行速度とかご振動の関係および振動発生原因を明確にした。さらに、主電動機のVVVF制御、巻上式と油圧式エレベータのダイナミクス、振動制御について、従来の研究を整理する中で問題点を指摘し、本研究の位置付けと目的を示した。

第2章では、エレベータの主電動機として用いられる誘導電動機のすべり周波数形ベクトル制御の原理を概説するとともにモデル化と定式化を行った。すべり周波数形ベクトル制御した誘導電動機は、定常特性は直流電動機と同等の特性を持つものの、過渡特性は誘導電動機自体に起因したトルクリップルを生じる。まず、この過渡的な特性を明らかにするため、誘導電動機の電圧方程式とベクトル制御則を示すとともに、ベクトル制御した誘導電動機の非線形な関係式をトルク指令値から誘導電動機の発生トルクまでの特性として求めた。さらに、定常状態の関係式を求め、定常解回りで線形化した伝達関数を導出して次章以降のVVVF

制御した誘導電動機を用いた新しい方式の油圧エレベータのモデル化の検討に備えた。

第3章と第4章では、ベクトル制御で誘導電動機を可変速運転した新しい方式の油圧式エレベータについて検討した。

まず第3章では、油圧式エレベータの機械系をモデル化し、そのダイナミクスを記述する基礎式を示すとともに、その線形化した伝達関数を導き、第2章のベクトル制御した誘導電動機と結合したシミュレーション法を示した。そして、誘導電動機のベクトル制御とは、極零消去であり、誘導電動機の極付近の周波数域を除けば、その伝達関数は誘導電動機2次巻線の抵抗値 $R_2$ とその推定値 $R_2^*$ との比 $R_2/R_2^*$ で近似できることを示した。また、この比が0.8~1.2の範囲で変化しても、かごの速度制御性能には大きな影響を与えないことを確認するとともに機械系連成時の制御性能を明らかにした。さらに、油圧式エレベータのポンプの漏れ流量に対する圧力、回転速度、油の温度の依存性を実験で明らかにして、逆止弁の開閉や回転速度によらず、ポンプ回転速度と発生圧力の関係は連続でかご速度制御に用いることができること、ポンプ理論流量と実際にシリンドラに供給される流量の差すなわち漏れ流量が存在し、これが運転状態で変化するため、誘導電動機可変速運転方式ではポンプ漏れ流量補償が必要であることを明らかにした。また、油圧式エレベータの振動モードを求め、ポンプ軸から見たときの1次モードのかごの位相が反転することを示し、かご速度をフィードバックするときはこれを考慮する必要があることを明らかにした。そして、油圧式エレベータの動特性は、開発したモデル化技術で実用上十分な精度で解析できることを示し、第4章での誘導電動機可変速運転油圧式エレベータの制御則を考える上で必要な項目を明確にした。

第4章では、第3章の検討結果を基にして誘導電動機可変速運転油圧式エレベータを提案し、ポンプ漏れ流量補償とかご振動抑制ができる制御系を設計した。ポンプ漏れ流量を補償するために非コロケイトなかご速度帰還を採用したが、これにより機械系の極は不安定化する危険性がある。このため、これにより不安定化する機械系1次モードを圧力、かごと電動機の相対速度帰還で系の安定化を図るとともに、かごの縦振動を大幅に抑制できる制御法を開発した。また、第2章と第3章で開発したモデルを用い、制御系の有効性をシミュレーションで確認した。そして、本研究の一連の検討結果を用いて誘導電動機可変速運転油圧式エレベータが新たに開発された。従来の流量制御弁方式と比較して、かご縦振動を抑制して乗り心地を大幅に改善するとともに、階間走行時間を20%短縮し、消費電力を20%低減できたことが実機で実証されている。

第5章から第7章までは、高速・高揚程な巻上式エレベータのかご縦振動と横振動についての一連の制御技術を検討した。

第5章では、高速巻上式エレベータのかご縦振動と横振動の受動的抑制法を示

した。高速巻上式エレベータの縦振動モデルを述べるとともにコンペニシープダンパの最適化を図ることで、主電動機の速度制御系では減衰が付加できないモードの減衰比を高められることを明らかにした。また、かご横振動の実験検討を効率的に行うために、走行時のかご横振動を4台の油圧加振機で模擬できる実物大のかご加振装置を開発した。この実物大かご加振装置によるモデル実験によりかごの振動特性を明らかにし、現場で減衰定数が容易に可変できるローラガイド用ダンパを開発するとともに、かご横振動が2/3に小さくできることを確認した。

エレベータの良好な乗り心地を長い期間に渡って保つには、主ロープの張力を一定に管理する必要がある。第6章では、このために主ロープ張力の点検・調整法を検討した。まず、ロープ加振により生じる振動波形の特徴を複数の信号処理法で検討し、加速度波形を基本とした検出アルゴリズムの採用が適正であることを示すとともに、実験でその有効性を実証した。つぎに、エレベータのロープ張力とシャックルばね部調整量の関係を定式化して、少ないロープ本数での調整法を提案した。さらに、実験による検証を行い、最大往復時間と最小往復時間の差を最小往復時間で除した評価値を指標に約±2%以内の張力調整精度が得られることを実証した。そして、これらの基礎検討を基に小型のロープ張力点検装置が開発され、十分実用に耐えることが確認されている。

第7章では、本研究の一連の研究成果を反映させた世界最高速750m/minの超高速エレベータの走行試験結果について述べるとともに、より一層かご横振動を抑制するために開発した振動制御装置について検討した。まず、ACサーボモータとボールねじからなる振動制御装置とかご室の速度と位置およびモータ速度のフィードバックを基本とする制御則を提案し、これらの機構と制御系を設計した。この振動制御装置を第5章で示した実物大のかご加振装置に取り付けて予備実験を行い、かごの1次と2次モードともに非制御時の1/2以下まで抑制できることを示すとともに、制御力やストロークが設計仕様値におさまることを確認した。そして、モータ制御則に外乱オブザーバによる外乱相殺制御を加えることで摩擦力によるモータ速度の変動が小さくなり、摩擦の急変により生じる高調波が軽減できることを解析と実験で明らかにした。さらに、本研究の一連の振動抑制法の検討結果をふまえて開発されたランドマークタワー向け超高速エレベータのかご室加速度を実測し、良好な振動特性が得られたことを確認した。また、このエレベータのかごを用いて走行速度750m/minにおける振動制御装置の制御実験を行い、非制御時と比べて加速度のピーク値で2/3の0.09m/s<sup>2</sup>以下に走行時のかご横振動が抑制できることを実証した。

第8章は、第2章から第7章まで得られた主要な成果についてまとめを行い、本研究の目的が達成されたことを示すとともに総括を行った。