

超高速エレベーターの駆動制御システム

加藤 覚* 平林一文*
小松孝教*
宮本浩成*

Driving Control System of Super High-speed Elevators

Satoru Kato, Takanori Komatsu, Kosei Miyamoto, Kazufumi Hirabayashi

要 旨

都市部での建物の高層化に伴い、縦の交通手段であるエレベーターの超高速化が求められている。三菱電機では、これに対応する高速で安全かつ快適に走行する超高速エレベーター技術を開発した。

本稿では、超高速エレベーターの駆動制御システム技術について述べる。

(1) 大容量巻上機と並列駆動制御装置

大容量巻上機のモータには、省エネルギー性に優れた永久磁石 (Permanent Magnet : PM) モータで、2つの三相巻線を持つ二重三相モータを採用し、低騒音・低振動・高効率な運転を実現した。また、2台の制御盤による並列駆

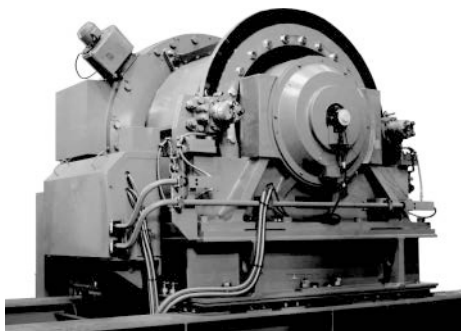
動システムを構築し、機械室レイアウトの自由度を向上させた。

(2) 巻上機ブレーキ装置

巻上機の安全装置であるブレーキには、ダブルブレーキ構造、油圧開放方式のクランプ式ディスクブレーキを採用し、安定した制動能力を確保した。

(3) 評価試験結果

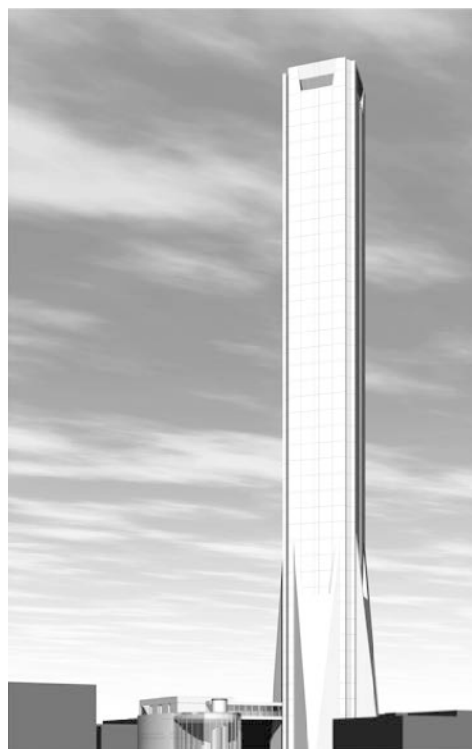
当社の高さ173mのエレベーター試験塔SOLAÉと、地上負荷試験装置を用いて試験を行い、エレベーター速度1,080m/minでの良好な走行性能を確認した。



大容量巻上機



並列駆動制御盤



エレベーター試験塔 SOLAÉ

超高速エレベーターを支える駆動制御システム技術

速度1,080m/minの超高速エレベーターの駆動制御システムは、二重三相巻線方式の永久磁石 (PM) モータを採用した大容量巻上機と、並列駆動制御盤の組合せによって構成している。また、巻上機の安全装置であるブレーキには、ダブルブレーキ構造、油圧開放方式のクランプ式ディスクブレーキを採用し、安定した制動能力を確保した。

1. ま え が き

当社は、1978年に当時世界最高速度となる600m/minのエレベーターを開発、納入した。1993年には速度750m/minのエレベーターを開発、納入することによって世界最高速エレベーターの記録を塗り替えてきた。

近年、中国や中東地区等で、300mを超える超高層ビルの建築が盛んとなり、更なる超高速のエレベーターや、ダブルデッキエレベーター等の大容量エレベーターの需要が増加している。このような状況の下、当社では速度1,000m/min級の超高速エレベーターの技術開発を進めてきた⁽¹⁾。

そして、今回、現在ギネス世界記録となっている速度1,010m/minを超える1,080m/minの超高速エレベーターの製品化開発を完了した。

また、一般的に超高層ビルでは、ダブルデッキエレベーターや、昇降行程が極めて長いエレベーター等、大容量、高揚程のエレベーターが設置され、これらを実現するため様々な技術も必要である。主な技術とその概要は次のとおりである。

(1) 駆動・制御システム

巻上機には省エネルギー性に優れた永久磁石(PM)モータを採用し、低騒音・低振動な運転を実現、ブレーキはダブルブレーキ構造で、油圧開放方式を利用したクランプ式ディスクブレーキを採用し、超高速・大容量エレベーターに相応(ふさわ)しい安定した制動能力を確保した。

また、モータ1台に2つの三相巻線を持つ二重三相モータ、及び2台の制御盤による並列駆動システムを採用した。

(2) 安全装置

高速化に伴うかごの運動エネルギーの飛躍的増大に対し、万が一のロープ切れの際にも安全にかごを制動停止させる非常止め装置や、昇降路最下部でかごを受け止める緩衝器を新規に開発した。

かご速度を機械的に監視する調速機は、超高速・高揚程に対応するため新機構を開発し、高負担荷重に耐え、安定した速度検出が行えるようにした。

(3) 乗り心地(快適性)

高速走行に伴って増大するレールからの加振力や風加振力に対して、良好な乗り心地を実現するために、超高速走行に対応した新しい制振装置を開発した。

かご内騒音を低減させるため、走行時のかご周りの気流の整流を図ることによって、かご周りで発生する風音そのものを低減させる流線型整風カバーと、かご室内への風音の伝播(でんぱ)を抑える高遮音かご室構造を開発した。

さらに、高度差に伴う気圧差によって生じる耳閉感を緩和する気圧制御装置を開発した。

(4) 超高揚程対応

長周期地震動、強風等によるビルの長周期振動に起因するロープ類の揺れ対策として、昇降路に配置したセンサによる直接的なロープ揺れ検出装置を用いて、ロープ類の昇降路機器への引っ掛かりなどの発生防止を図る管制運転システムを開発した。

また、かごへ電力と制御信号を伝送する制御ケーブルは、材質改善によって軽量化と動作特性の安定化を実現した。

さらに、1台あたりの輸送人員数を倍増させたダブルデッキエレベーターに適した群管理を適用することで輸送効率を向上させた。

このような様々な技術の中で、本稿では、駆動制御システムについて述べる。

2. 巻 上 機

2.1 構 造

今回、エレベーターの走行速度は1,000m/minを超え、かつ昇降行程も500m以上を想定したエレベーターシステムに対応できる超高速エレベーター用巻上機を開発した(図1)。

想定しているエレベーターシステムの仕様から巻上機は、軸荷重が1,000kNを超えても対応可能な設計としており、かつエレベーターの速度が1,000m/minを超えた領域での適用を考えていることから、次の対応を行った。

- ・重荷重、高速回転に対応可能な大型軸受の採用
- ・安定かつ大きな制動力の発生が可能な油圧開放式のクランプ式ディスクブレーキの採用
- ・大出力を得られる二重三相モータの採用

2.2 ブレーキ

通常、エレベーターを高速走行している状況から緊急停止させた場合、制動時に発生する摩擦熱によってブレーキディスク及びブレーキパッドの温度は急激に上昇する。近年建築が盛んな超高層ビルでは、エレベーターの昇降行程が長くなることから主ロープやその他ケーブル類の質量が大きくなり、かごやおもりの質量も大きいことから、シス

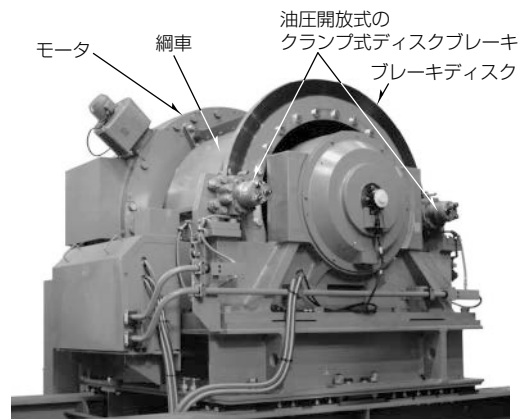


図1. 巻上機の外観

テム全体の慣性モーメントは膨大なものとなる。また、ビルの超高層化に伴うエレベーターの超高速化によって巻上機制動時の回転速度も上がり、緊急停止時のブレーキディスクの温度は更に上昇し、ブレーキの制動能力へも影響を与える可能性がある。今回、想定されるエレベーターシステム相当の慣性量を大容量負荷試験装置で模擬し、緊急停止時のブレーキディスク及びブレーキパッドの温度上昇と制動能力の相関を検討、検証した。その結果からブレーキディスクの温度上昇を抑えるブレーキディスクの形状を設計し、安定した制動能力を得られることを実機試験で確認した。

2.3 二重三相モータ

超高速エレベーターに適した二重三相モータを実現するために、設計に当たっては次の条件に配慮した。

(1) 単純三相モータと同等のサイズであること

二重三相のためにサイズアップすると、機械室レイアウトが悪化するためである。

(2) 制御性が良いこと

特殊な制御を必要とすると、試験設備の新設によるコストアップ、現地での運転方法の制約増加が懸念されるためである。

代表的な二重三相方式の構造を図2に示す。

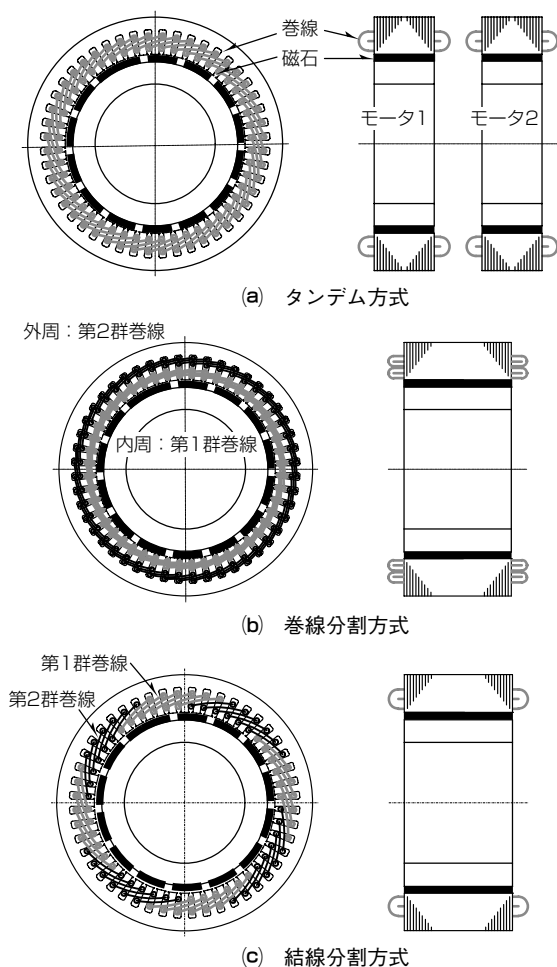


図2. 代表的な二重三相方式の構造

タンデム方式は同軸にモータを直列接続する方式である。モジュール化可能なため、設計省力化、量産時の生産性向上等の利点があるが、大幅な質量及びサイズの増加となるため、今回の条件では不適である。

巻線分割方式は単純三相とほぼ同サイズとなり、片群のみで単純三相として制御可能である。しかし一方、巻線数は単純三相の2倍でコスト増加となり、2群運転時には群間の相互干渉によって制御性が悪化する問題がある。

結線分割方式は結線のみで二重三相を実現するため、単純三相との違いが少なく製造が容易で、コスト増加が最も少ない。さらに、結線方法を工夫すれば、第1群と第2群の群間での電流アンバランスによる振動を抑えることができる。

したがって、最も利点の多い結線分割方式を適用することにした。

結線分割方式の中でも扱いやすさを考慮し、両群の電気角位相をそろえるようにした。その結果、両群の誘起電圧が同じ波形となり、同じ電流に制御すれば単純三相モータと同じ特性が得られる。副次的な効果として、両群の各相を並列接続すれば完全な単純三相モータとして使用することもできる。

このモータは、大電流のため内部結線は多くの並列回路で構成している。したがって、結線の分け方に自由度がある。そこで制御性と群間の電流アンバランスによる振動を考慮して結線分割方法を検討した。

群間の相互インダクタンス、つまり相互干渉が最も小さくなるのは、各群を半円ずつに分ける場合である。しかしこの場合は群間の電流アンバランスによる振動が発生しやすい。そのため、群間の電流アンバランスがあってもそれによる振動が抑えられ、しかも群間相互インダクタンスが小さく制御性の良い適切な結線分割方法を選定した。

この二重三相モータの結線分割方法を図3に示す。同群の巻線を円周上に分散配置することによって、振動の発生を防いでいる。図ではU相の第1群(U1)、第2群(U2)とも円周方向等ピッチに各4個の巻線を配置している。

誘起電圧の実測波形を図4に示す。先に述べたとおり第1群(U1, V1, W1)と第2群(U2, V2, W2)には同じ波

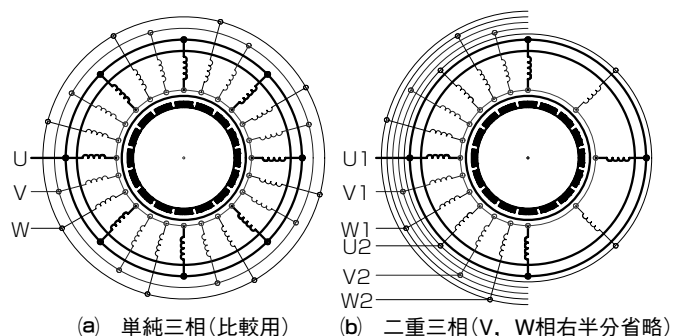


図3. 今回開発した二重三相モータの結線分割方法

形が得られている。また、表面磁石型のPMモータとして巻線設計を工夫することで、ひずみのない波形となっている。このことから脈動のない滑らかなトルクを出力できることが分かる。

3. 並列駆動制御盤

3.1 全体構成

超高速エレベーターの駆動制御システム構成を図5に示す。独立したコンバータ・インバータを持つ駆動制御装置を2台用いる並列駆動制御方式を採用し、二重三相モータを駆動する。

駆動制御装置を内蔵した並列駆動制御盤の外観を図6に示す。

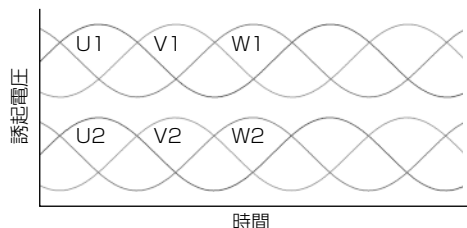


図4. 誘起電圧の実測波形

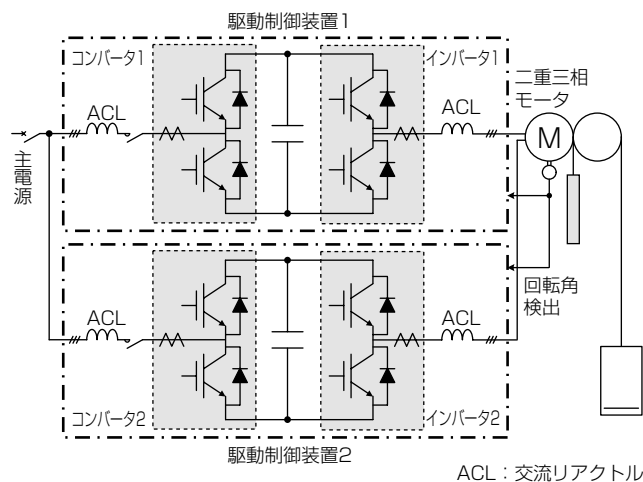


図5. 超高速エレベーターの駆動制御システム構成



図6. 並列駆動制御盤の外観

駆動制御盤を組み合わせる構成によって、次に示すメリットを持たせながら、大出力化を実現した。

- ・機械室内レイアウト設計の自由度向上
- ・製作作業性や、輸送・搬入、据付作業性の向上
- ・主要機器を量産機種と共通化し、部品入手性の安定性向上

電力変換装置には、定格電流600AのIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールを6個並列接続して使用した。この駆動制御装置単体で、定格速度540m/min、積載量4,000kgのエレベーターを動かす能力を持っている。

3.2 制御系の構成

超高速エレベーターの駆動制御系の構成を図7に示す。

規範モデル型⁽²⁾の2自由度制御で速度制御を行い、算出されたトルク指令値をトルク分配器によって各電流制御器に分配し、独立に電流制御を行うことで、モータ速度とトルクを高精度に制御し、快適な乗り心地を実現した。

超高速エレベーターでは、昇降行程の高揚程化によるロープ質量の増加や、かご質量の増加等によって、システム全体の慣性モーメント(システムイナーシャ)が大きくなる。その結果、かごの微小動作の制御にも従来より大きなトルクが必要になり、微速運転(例：乗客乗降時のかご床レベルずれを補正する再床合わせ運転)時に、巻上機がかご振動を励起する現象が懸念される。そこで、巻上機速度制御系の詳細解析に基づき、巻上機振動の振幅を低減しながら位相遅れを小さく保つ最適化を行い、さらに、条件に応じて特性を可変にする制御系を構成することで、大慣性システムを安定かつ高精度に制御する方式を開発した。

また、速度規範モデル演算や速度制御ゲイン演算等の速度制御性能の向上に重要な役割を果たす、システムイナーシャの学習機能も充実させた。システムイナーシャ学習機能は据付調整時に学習運転を行うことで、エレベーター仕様ごとのシステムイナーシャを同定する機能である。今回、現地での据付調整時間を短縮可能、かつ同定精度を向上させたシステムイナーシャ高速学習機能を開発した。システムイナーシャ学習時の学習推移の結果を図8に示す。エレベーターを特殊走行パターンで運転することによって、数十秒間でシステムイナーシャ学習値を真値の±5%以下に学習できるアルゴリズムを構築し、乗り心地の向上を実現した。

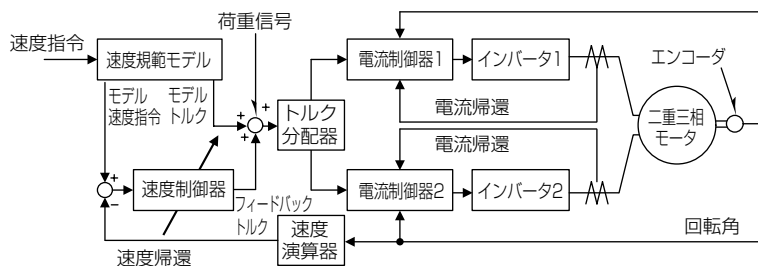


図7. 超高速エレベーターの駆動制御系の構成

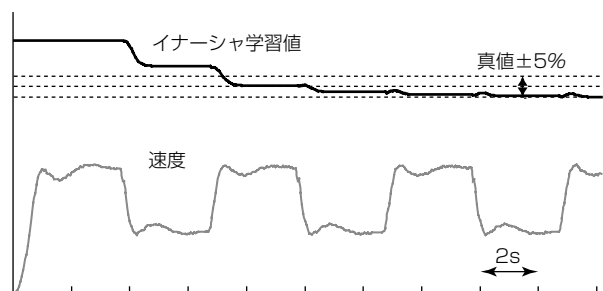


図8. システムイナーシャの学習波形

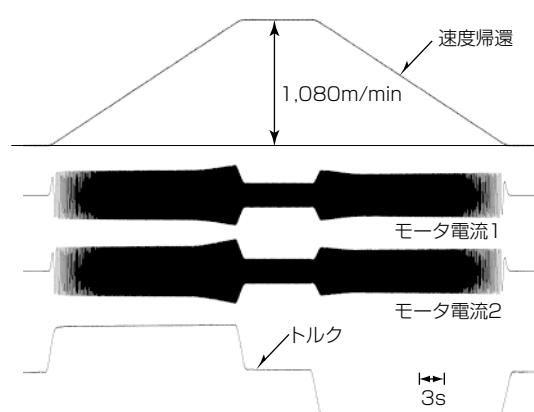


図10. 走行波形(最高速度1,080m/min)

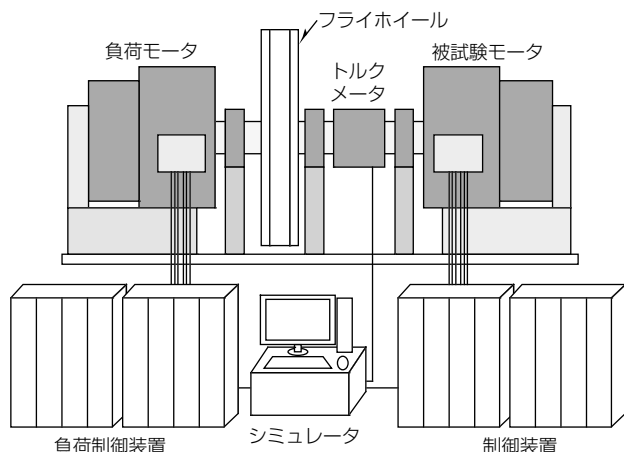


図9. 地上負荷試験装置の構成

そのほかに、二重三相モータの群間巻線の相互干渉を無視できるほど小さく設計したことで、電流制御器の制御性能を従来の三相モータと同等にすることができた。

コンバータ制御は、各駆動制御装置の直流母線電圧を一定値に制御し、かつ電源電圧の位相を検出して入力電流の力率を力行運転時には1にすることで電源電流を必要最小限に抑え、回生運転時には-1に制御することで回生電力を有効活用し、省エネルギーを実現した。

4. 評価試験結果

4.1 試験環境

超高速エレベーターの駆動制御装置を評価する試験サイトと評価内容について述べる。

評価試験は、当社の高さ173mのエレベーター試験塔 SOLAÉと、図9に示す地上負荷試験装置で行った。エレベーター試験塔 SOLAÉでは実際にかごを走行させて、駆動・制御性や乗心地の評価を行った。一方、地上負荷試験装置では、実負荷試験やモータのトルクリプルの評価を行った。

地上負荷試験装置のシステム構成は、昇降行程500m超のエレベーター慣性を模擬したフライホイールを介して被試験モータと負荷モータを直結しており、その間にはトルクメータを挿入している。各モータには実際のエレベーターに使われる並列駆動制御装置を接続し、被試験モータに

は、制御盤からエレベーターの速度指令に応じた電圧・電流を供給する。一方、負荷モータは、かご内乗客に応じた負荷トルクを発生させるように制御する。このような構成によって、実際のビルのエレベーター仕様(昇降行程、かご質量等)に応じた条件での試験を可能にした。

今回は、想定される超高速エレベーター仕様を模擬し、各種試験を実施した。

4.2 走行試験

地上負荷試験装置によって、並列駆動制御装置を用いたシステムでエレベーター速度1,080m/minで走行させた際の走行波形を図10に示す。トルク波形に脈動がなく、各モータ電流も指令通り制御されており、良好な走行性能を確認した。

4.3 ブレーキ制動試験

大慣性モーメントかつ、超高速回転時におけるブレーキ制動能力を確認するため、地上負荷試験装置で、エレベーター速度1,080m/minからのブレーキ制動能力試験を実施した。その結果、エレベーター緊急停止時でも安定かつ良好なブレーキ制動能力が得られることを確認した。

5. むすび

超高速エレベーターの駆動制御システム技術について述べた。今後も、安全でかつ優れた乗り心地を可能にするために、当社のこれまでの高速エレベーター開発によって得られた技術の蓄積と、世界最高速エレベーター開発で培った技術を活用して、高層化の進むビル需要に対応する超高速エレベーターの実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 加藤 覚, ほか: 世界最高速エレベーター, 三菱電機技報, **75**, No.12, 791~795 (2001)
- (2) 小山正人: サーボモータの適応制御, 計測と制御, **32**, No.12, 1010~1013 (1993)