

コアキシャル形永久磁石同期機の低床式 LRV の車輪直接駆動への応用の可能性

-弱め界磁を用いず速度制御範囲を広げる方法-

The possibility of the disk rotor type permanent magnet synchronous motor applied to direct drive of a low-floor light rail vehicle

-A possible solution of control in wide speed range without field weakening-

中村太一 佐藤功一 古関隆章(東京大学) 青山康明(日立研究所)

Taichi Nakamura, Koichi Sato, Takafumi Koseki (the University of Tokyo)

Yasuaki Aoyama(Hitachi Research Laboratory)

Abstract : Low-floor light rail vehicles have been developed as passenger-friendly urban public transport. Since it is impossible to place traction motors below the floor, motors with large torque are requested to be directly mounted to wheels. Transverse flux type permanent magnet synchronous motors can produce substantially large torque at low speed, so this capability may be suitable to direct drives for such low floor LRV's. However, field weakening in high speed is inherently difficult in the proposed motor configurations. Therefore another method to suppress the armature voltage in high speed shall be introduced. The authors propose a control method in wide speed range without field weakening by changing connections of multiple armature coils. By introducing such variable armature winding connections, the authors study technical feasibility of the application of such special PMSM's to LR-vehicle traction with large torque.

Keywords : traction control, wide speed range, change of armature winding connection, transverse-flux permanent magnet synchronous motor, field-weakening

## 1. はじめに

低床式のライトレールはお年寄りなどに優しい構造であるが、床下にモータを配置することが困難なため、車輪を直接駆動できる大きなトルクのモータを用いる技術的必要が生ずる。現在筆者らが研究している横磁束形永久磁石同期モータは、低速で大トルクを得ることができるので、このような低床式の LRV の車輪を直接駆動できるモータとして応用できる可能性がある。しかし、その磁気回路の構成上弱め界磁制御が難しいため、現在の仕様では、車両に通常用いられる駆動用モータのようなトルク-速度特性を実現することができない。

Fig.1(a),(b)に示すモータは、多数の独立した電機子コアをもち、それぞれに電機子に独立な巻線を巻くこともできる。これを利用すると、電機子巻線の結線方法の切り替えにより、コイルのインピーダンスを四段階に変化させることができるので、回転数の上昇による電圧上限に達したときに、適切な手段で結線方法の切替えを行えば、例えば自動車のギアチェンジのように速度-トルク特性を変化させることで、有限の能力しかない電源を用いて広い速度範囲での運転制御が可能となる。本論文では、提案する自由度の大きなモータに、この巻線結線切り替えという古典的手法を用いることで、大トルク永久磁石同期モータを用いた低床式 LRV の直接駆動を広い速度範囲で行う技術的可能性と問題点を検討する。

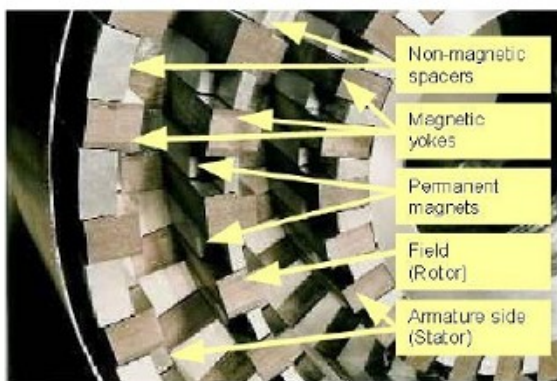


Fig.1(a) Original TFM by Weh[1]

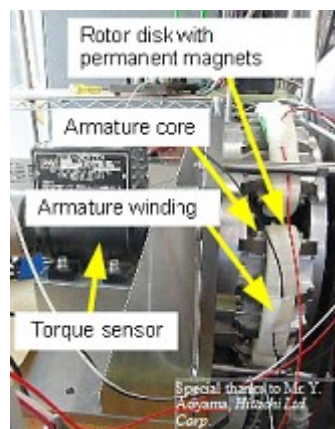


Fig.1(b) Disk rotor type TFM in the University of Tokyo

## 2. 横磁束形永久磁石形同期モータの特徴とその利用

横磁束形永久磁石同期モータは、図1で示すような構造をとっている。横磁束形永久磁石同期モータの特徴

として、従来のモータに比べ磁石の数を増やす、もしくは極間の距離を減らすことができ、低速領域において大トルクを得ることができ、大トルクを必要とする直接駆動に応用することができる[1]。また電機子がそれぞれ独立した構造を持つため、それぞれに独立な巻線を巻くこともできる。本稿で示すこのモータの広い速度領域での直接駆動の応用可能性は、Fig.1(b)のよう独立した電機子巻線を持つこのモータの仕様を利用した。

### 3. 電機子巻線の結線切り替え

#### 3.1 結線切り替えによる擬似的弱め界磁の概念

1相あたりのそれぞれの電機子巻線を直列から並列に切り替えることで、最大四段階まで回路全体のインダクタンスの変更が可能であり、擬似的な弱め界磁を実現できる。その概念を Fig.2(a),(b)に示す[2]。

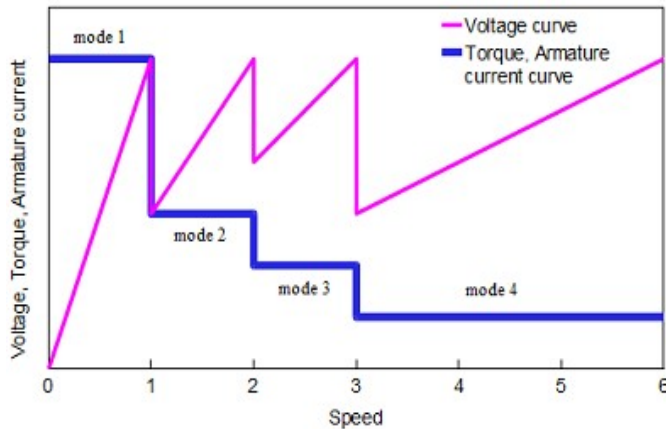


Fig.2(a) Speed vs Voltage, Torque, or Armature current

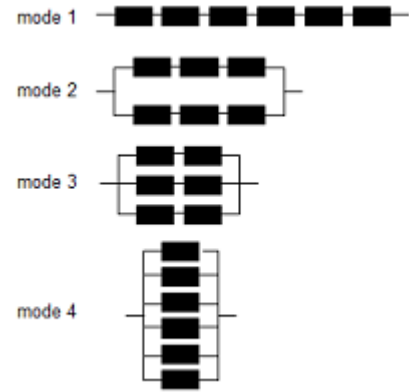


Fig.2(b) 4 different types of connections

#### 3.2 結線切り替えの問題点

結線切り替えをスイッチにより行えば、理論的には広い速度範囲での駆動が可能である。しかし実際にスイッチで切り替える場合、そのときに電機子電圧の振幅と位相を逆起電力と同一に制御することで、電機子電流を0に落とすように制御する必要がある。そして、巻線を結線しなおした後に、新たな誘導起電力の振幅と位相を検出し、最終結線後の電機子電圧初期値として、その電圧を与え、電流を連続的に立ち上げるという制御が必要となる。このために、回転子の位置および速度情報に基づく変換器側の電圧制御を連続的に行いつつ、結線を機械的に切り替えるシーケンスやタイミングを具体的に設計することが必要なので、本稿ではその基本的考え方を具体化する。また理論的には四段階の切り替えが可能であるが、実際に四段階切り替えを行う場合、回路構成が複雑になる。そこで結線切り替えのほかに、他の直接駆動用モータとの組み合わせを考えて、段階的切り替えを行うことを併用することも、実用に向けての一つの可能性として挙げられる。

### 4. まとめ

本論文では、大トルク横磁束形永久磁石同期モータを用いることによる低床式 LRV の直接駆動を広い速度範囲で行うことの可能性を提案し、そのために必要な技術的要件を整理した。モータの磁気回路の構成上弱め界磁ができなくても、電機子側の結線を適切に切り替えることができれば、車両駆動に適した広い速度範囲での駆動は可能である。しかし、動いている限り常に大きな逆起電力を生ずる永久磁石形同期モータにおいては、結線切り替えの前後で電流をゼロに抑えるための制御を着実に行わねばならないという技術的問題点がある。本稿では、結線切り替えによるモータの電圧、電機子電流、トルク、電力の基本的な特性を算定するとともに、安全な結線切り替えを行うために必要なシーケンスと制御の方法を整理した。今後は、その具体的実装方法やプロトタイプ機を用いた原理の実証を行う必要がある。

### 5. 参考文献

- [1]H. Weh, H. Homann, and J. Landrath, "New permanent magnet excited synchronous machine with high efficiency at low speeds," in Proc. Int. Conf. Elec. Machines, Pisa, Italy, pp. 35-40, 1988.
- [2]持永芳文：電気鉄道技術入門、オーム社、p.53 - p.87、2008年