

S1-2-2

高効率な駆動システムの開発

(在来線用全閉永久磁石同期電動機と回転角センサレス制御の開発)

○ 蒲 浩志 (西日本旅客鉄道株式会社)

[電] 白石 茂智 八木 信行 [電] 恩田 昇治 (株式会社東芝)

Development of a High-Efficiency Traction System
(Development of a Totally-Enclosed Type Traction Motor Using Permanent Magnet Synchronous Motor for Narrow-gauge Train and Speed-sensorless Control System)

Hiroshi KABA (West Japan Railway Company)

Shigetomo SHIRAISHI Nobuyuki YAGI Syouji ONDA (TOSHIBA Corporation)

A high-efficient permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive system without any rotational sensor has been developed for railway vehicle traction. The use of high efficient PMSM can reduce the energy cost which occupies 90 % of the total life cycle cost (LCC) about a traction motor. Besides, the low heat generation in PMSM enables totally enclosed structure, which can reduce acoustic noise and maintenance works, although outputting the large power that equals to a self-ventilated conventional motor. The use of the sensor-less control also improves the reliability and reduces the initial cost and maintenance work.

The performance tests will be carried out on a test train (U@Tech), and the effectiveness of the system will be verified through these tests.

キーワード：永久磁石同期電動機、回転角センサレス制御

Keyword: Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), Speed Sensorless Control System

1. はじめに

現在、鉄道車両用駆動システムの主流は誘導電動機を使用したVVVFインバータ制御方式であり、短編成化やコストダウン面から、小型・軽量で大出力が要求されるため十分な冷却を確保するため機内の自己通風ファンにより外気を取り込み冷却する自己通風方式を主に採用している。しかしこの開放通風方式では、塵埃が機内に侵入・堆積し冷却性能を低下させるとともに機内の清掃や軸受・グリースの定期的なメンテナンスが必要となり、また高速回転時にファン騒音が大きくなる問題がある。

JR西日本では在来線技術試験車「U@tech」を製作し、より安全・快適で信頼性が高く、また地球環境にも適合した次世代鉄道へのシステムチェンジを目指して技術開発を進めている。駆動システムにおいてもメンテナンス低減や更なる省エネルギー化、低騒音化を目指し、大出力・全閉永久磁石同期電動機の開発を進めてきた。

永久磁石同期電動機は、高効率で電力消費量を低減させることでLCCの約9割である動力費の低減が可能であり、また低損失で発熱量が少ないことから、従来の誘導電動機と同程度の性能を確保しながら主電動機を全閉構造とすることができ、騒音低減、メンテナンス低減が可能である。また大出力化にあたり、今回我々は、鉄道ではこれまで導入実績のない回転角センサレス制御を採用した。これにより、大出力化のほか、信頼性の向上、保守・コスト低減もあわせて期待できる。

今回、我々は大出力な全閉式永久磁石同期電動機を試作し、定置による基本性能試験、およびセンサレス制御試験を行い良好な結果を得たので、その概要を報告する。

2. 前提とする設計諸元

開発の前提とした車両諸元を表1に、またそれに基づいて設定した主電動機の開発諸元を表2に示す。

表1. 車両諸元

編成	JR西日本在来線試験電車(U@Tech)
MT比	1M2T
車輪径	φ860mm (計算: φ820mm)
駆動方式	平行カルダン駆動方式
編成質量	空車108ton、満車: 156ton
起動加速度	2.5km/h/s
最高速度	130km/h
減速度	4.3km/h/s (常用最大)
期待粘着係数	力行: 21.5%、回生ブレーキ: 17%
架線電圧	DC1500V

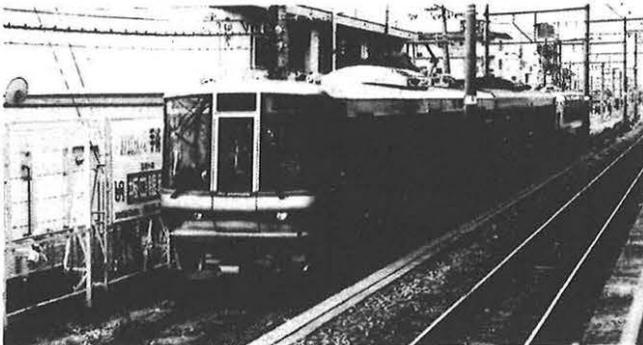


図1. 在来線技術試験車 "U@tech"

表2. 主電動機諸元

主電動機方式	永久磁石同期電動機方式 (センサレス)		
冷却方式	全閉自冷方式		
定 格	時間	連続	一時間
	出力	235kW	270kW
	線間電圧	950V	950V
	相電流	163A	186A
	回転数	2960rpm	2960rpm
	効率	96.5%	97.0%
質 量	625kg 以下		

表2に示すように、主電動機については連続 235kW、一時間 270kW の大出力を、狭軌台車かつ全閉自冷方式で構成することを目標とした。これは、従来の開放自己通風形誘導電動機で既に実現している最大レベルの大出力を同一体格・質量以下で構成することを目標としたものである。

3. 全閉永久磁石同期電動機の構造

2項の諸元に基づき設計、製作した主電動機の外観写真を図2にしめす。

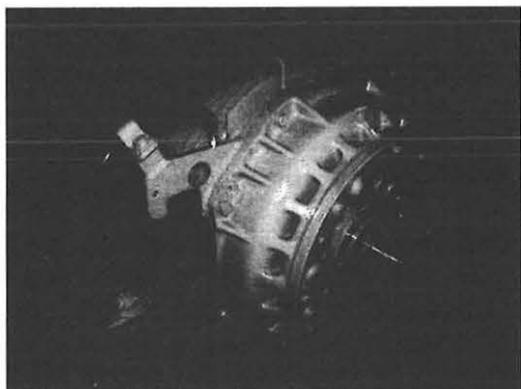


図2. 今回開発した全閉永久磁石同期電動機の外観

以下に主な特徴を述べる。

①全閉構造

PMSM では回転子の発熱が誘導電動機と比較して大幅に低減される特徴とセンサレスの特徴を活かし、シンプルな全閉自冷構造とした。軸受周りの回転部は、従来の誘導電動機と同様のラビンスで密封し、塵埃や水に対する密閉度を確保する構造とした。

②冷却構造

全閉構造では、発熱源である機内を直接冷却できないため、温度上昇が均一化する傾向があり、温度上昇限度が比較的高い固定子と比較的低いロータ（磁石）及び軸受部の冷却の扱いがポイントとなる。

そこで固定子の冷却として外径表面上下に冷却フィンを構成するとともに、軸受け周りの冷却については特に配慮し、冷却性能の確保と冷却構造のシンプル化、発生音の低減を両立するため、試行錯誤による試験と確認を繰り返した。

③軸受構造

軸受構造については従来の誘導電動機で実績のあるグリス潤滑構造とした。全閉構造では機内清掃が不要とな

ることから、軸受についても中間給油方式を採用し、解体を伴う検査修繕の回帰延伸を狙うこととした。

4. 単体定置試験結果

単体での評価試験の結果、当初期待通りの性能が得られることを確認した。以下、主な試験結果を記す。

(1) 特性試験結果

定格負荷特性試験結果（熱時、インバータ駆動）を表3に示す。

表3. 定格負荷試験結果（熱時、インバータ駆動）

定格	連続		一時間	
	設計	実測	設計	実測
電圧 (V)	950	948	950	925
電流 (A)	163	156	186	181
回転数 (rpm)	2960	2960	2960	2960
入力 (kW)	243.5	243.6	278.4	278.4
出力 (kW)	235	235	270	270
効率 (%)	96.5	96.9	97.0	97.0
力率 (%)	91.0	90.5	91.0	90.5

(※1) 効率は実測から算出の規約効率を示す。(出力はトルクメータ読み値、力率はパワーメータ読み値を示す。)

(※2) 電圧・電流は基本波実効値を示す。

表3より、設計電流以下で所定の出力が得られ、また期待通りの高効率を実現可能であることが確認できる。尚、既存の誘導電動機の公称効率は93.5%(270kW時)であり、これと比較すると+3.5%の高効率化となる。

(2) 温度上昇試験結果

定格での温度上昇試験結果（インバータ駆動、模擬走行風 2m/s 想定）を表4に示す。

表4. 温度上昇試験結果（インバータ駆動）

定格	連続 235kW		一時間 270kW		
	平均 2m/s		平均 2m/s		
設計/実測	設計	実測	設計	実測	
温 度 上 昇	固定子(抵抗法)	156 K	139 K	122 K	109 K
	永久磁石 Max	144 K	126 K	80 K	77 K
	駆動側軸受	34 K	20 K	14 K	10 K
	反駆動側軸受	41 K	35 K	16 K	21 K
周囲温度	—	30°C	—	28°C	

(※) 温度上昇限度は、固定子(抵抗法)：210K、永久磁石：150K、軸受：55Kである。

表4より、各部の温度上昇がいずれも限度内（かつ設計値と同等以下）であり、連続 235kW という大出力を全閉自冷で実現することを確認した。なお、開発した主電動機の実測質量は615kgであり、全閉自冷で同出力ながら、既存の誘導電動機（約630kg）からの軽量化をあわせて実現した。

(3) 騒音試験結果

単体での騒音測定結果（既存の自己通風誘導電動機との比較）を表5に示す。

表5より、全閉自冷とすることで特に高速での通風音が大幅に低減され、5000rpmで従来形比-12dB(A)程度の静粛性を実現可能であることを確認した。

6. 回転角センサレス制御定置試験結果

(1) 試験条件

図6に示す定置試験構成によりセンサレス制御試験を実施した(1C・1M構成)。

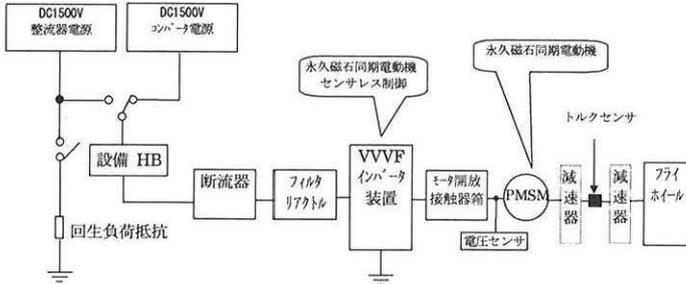


図6. 定置試験構成

(2) 力行・回生試験

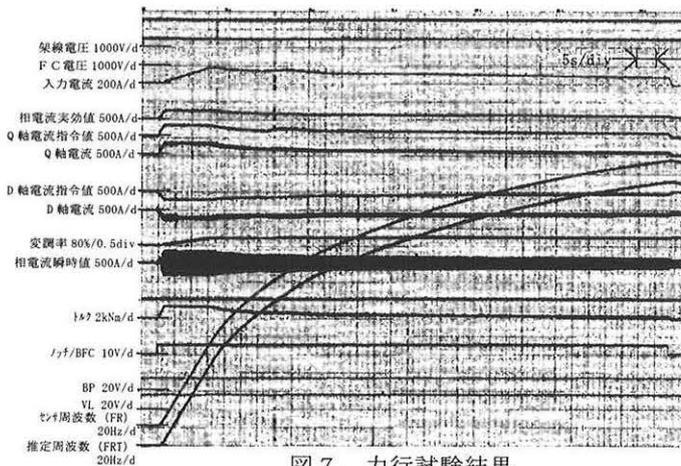


図7. 力行試験結果

図7に力行、図8に回生試験結果を示す。

最大電流パターンにて最高速度(300Hz、140km/h相当)まで力行/回生を行った。センサレス制御による推定周波数(FRT)と速度センサによる周波数(FR)は、同一の値でありゼロ速度からの起動0Hzから最高周波数300Hzまで安定に制御されていることが確認できた。

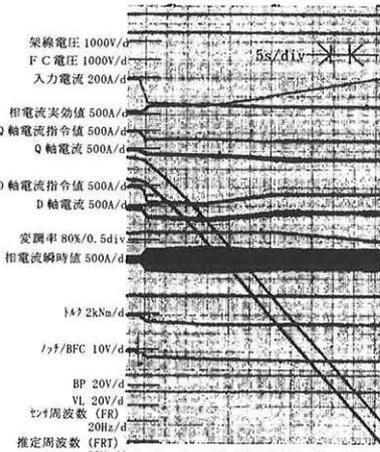


図8. 回生試験結果

(3) 惰行再起動

図9に惰行再起動試験結果を示す。

最大電流パターンにて最高速度(300Hz、140km/h相当)まで惰行再起動を繰り返した。再起動時は、負荷接触器のモータ側に取り付けられた電圧センサ(PT)より、モータ周波数・位相を演算し、この値を初期値として再起動を行う。高速での再起動の際も、PTによりモータ位相を把握しているため安定に再起動している。高速域(225Hz、107km/h以上)では、誘起電圧を抑える目的で弱め磁束電流を流し続ける必要があるため(惰行制御)、惰行中もゲートオフせず周波数推定を行っている。

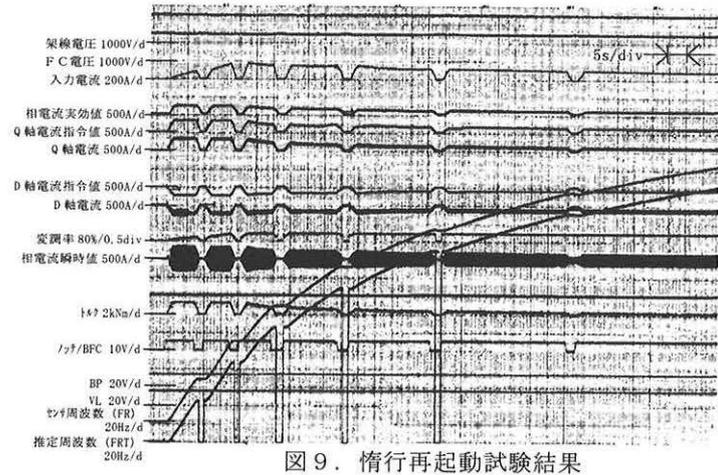


図9. 惰行再起動試験結果

(4) 後退起動

図10に後退起動試験結果を示す。

後退領域(-6Hz、-3km/h相当)から起動試験を行った。低速域では、高周波重畳による位相検出を行っており、後退起動時においても常時位相検出が可能となるため、安定して起動することができた。

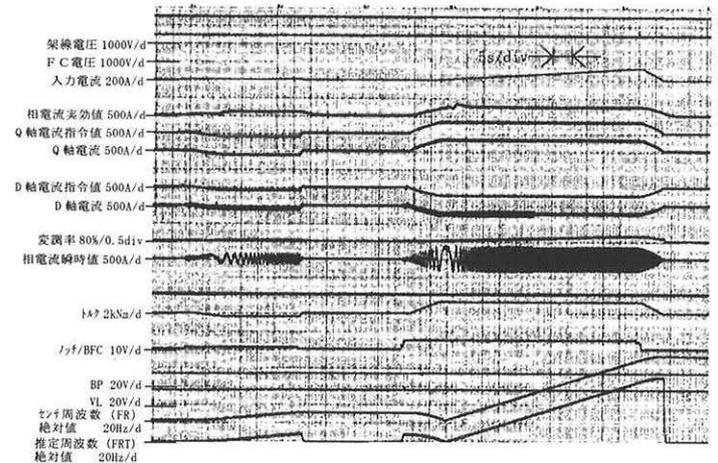


図10. 後退起動試験結果

7. 今後の展開

以上、「大出力・全閉永久磁石同期電動機」及び「回転角センサレス制御」の概要と定置試験の結果について述べてきた。この結果をもとに、今後、この開発主電動機を在来線技術試験電車(U@tech)に搭載し、構内走行試験(JR西日本吹田工場試運転線)及び本線走行試験(JR京都線、JR湖西線、JR神戸線などアーバン線区)で各種試験を行う予定である。

走行試験では、実走行における主電動機性能や各種性能評価、鉄道固有の使用環境における回転角センサレス制御の有効性評価など、永久磁石同期電動機の鉄道車両への導入に向け必要とされる基本設計上のノウハウや技術的知見を得たいと考えている。

またメンテナンス性の評価についても今後の課題であり検討を進めるつもりである。