2207 直接駆動主電動機主回路システムの開発

Development of Main Circuit System using Direct Drive Motor(DDM)

吉田 耕治(東日本旅客鉄道株式会社) 清水 康吉(東日本旅客鉄道株式会社)

Koji YOSHIDA, East Japan Railway Company, Nissincho2-0 Kita-ku Saitama-shi Saitama-ken

Kokichi SIMIZU, East Japan Railway Company, Nissincho2-0 Kita-ku Saitama-shi Saitama-ken

We have developed a main circuit system using the DDM(Direct Drive Motor)as a new drive system for maintenance-free, improvement of motor efficiency and noise reduction. We have conducted a running test on A C Train(Advanced Commuter Train) . In this paper, we report the development outline and test results of DDM.

Key word: Direct drive Motor system, Synchronous motor, Totally closed self-cooling, permanent magnet

1 はじめに

現在、電車の駆動システムは、誘導電動機を使用したVVVFインバータ制御方式が主流となっている。しかし外気をモータ内部に取り入れて冷却する構造となっているため、モータ内部の清掃作業や、軸受・グリスの保守という定期的なメンテナンスが必要である。また、モータの駆動力をカルダン駆動装置（歯車減速装置）で減速して伝達するため、歯車の点検や潤滑用オイル交換等のメンテナンスが必要であり、動力伝達ロスの要因にもなっている。

省メンテナンス・省エネルギー・騒音低減等のニーズは社内外ともにますます高まっているが、従来のシステムは成熟の域に達しており、現状以上の改善効果が得にくい。そこで、カルダン装置を廃止し、モータと車軸を直結する直接駆動主電動機（DDM:Direct Drive Motor）主回路システムの開発に取り組んだ。

Fig1.External view comparison between DDM system and Caldan drive system

2 開発の目標

DDMでは、カルダン装置を廃止することができる。また永久磁石同期電動機であるDDMはエネルギー効率が高く、発熱が少ない。そのため、全閉自冷方式が可能であることから、モータ内部の清掃メンテナンスを解消できる。そこで次の目標を掲げて開発を行った。

- ・ 13年以上(240万km相当)ノーメンテナンス
- ・ 付随台車並みの低騒音化
- ・ 従来方式に対し5%以上の省エネルギー化

一方、モータは輪軸と直結となるため、バネ下質量増加による走行安全性やレールへの衝撃力の影響を抑えることが必要であった。

Fig.2 Structure comparison between DDM system and Caldan drive Systems

3 開発の経緯

1995年度～1998年度にかけて、基礎評価用の試作を行ない、鉄道車両への適用性について評価した。その結果を踏まえ、次世代通勤電車のプロトタイプとして開発を進めていたAC Trainへの搭載に向け、1999年度からAC Train用のDDMシステムの開発に取り組んだ。また、2000年度から、単体試験・軌条輪試験による走行試験にあたっての事前検証を行った。またAC Trainの走行試験と並行して、耐久性の早期評価を行なうため、2002年度以降に、走行距離の確保が容易な103系電車に同システムを搭載しての走り込み、台車試験装置を使用した力行・回生ブレーキの繰り返し運転を行った。試験後にDDMの解体調査等により耐久性の評価を実施した。

Year	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Functional test	Fundamental test			Running test	Development for AC Train		Running test on AC Train		
Durability test					Parts test	Bench test	Running test (103 EMU)		

Fig3. History of DDM system development

4 AC Trainに向けたDDMの開発

4.1 AC Trainの概要

AC Trainの編成図を図4に示す。最高速度、起動加速度、減速度はJR東日本の通勤形電車の標準となっている

E231系に合わせた。中央線等の勾配がある線区を考慮し、モータ出力は1時間定格200kWとした。

Fig4. AC Train

4.2 DDMの構造等

(1) DDM本体

内部清掃解消のため全閉構造とし、弾性支持構造が構成可能なように回転子軸を中空構造としている。小形・大出力化のため、高磁束密度で耐減磁性（耐熱性）に優れるネオジウム系の磁石を使用した。また、固定子鉄心の外被を直接外気で冷却可能な軽量かつ冷却性に優れたフレームレス構造とした。また、機内で温まった空気を冷却するための循環ダクト、モータ表面からの放熱効果を高めるための冷却フィンを採用した。（図5、図6）

Fig5 External view of DDM

Fig6 Cross Section of DDM

(2) 車軸・台車との接続

弾性支持構造を図7に示す。また継ぎ手構造を図8に、継ぎ手及び緩衝ゴムの外観を図9に示す。モータは、反力受け棒で台車と接続されることで、固定子の回転を支え、回転力を車軸に伝える構造である。

Fig7. Structure of DDM

また、DDMは13年(240万km)以上のノーメンテナンスを目標としているが、緩衝ゴムを交換する必要がある場合を想定し、DDMを分解することなく交換可能な構造とした。緩衝ゴム押さえを外すことで、緩衝ゴムを個

Fig8. Coupling structure

Fig9 Coupling and Cushion rubber

別に交換することができる。

万が一ゴムが全破損した場合でも、車軸側継ぎ手の腕がDDM側継ぎ手のボス面を支えることにより、DDM中空軸が直接車軸に当たらない構造としている。（図10）

Fig10. Coupling Cross View

(3) 緩衝ゴムのバネ定数

緩衝ゴムのバネ定数の選定では、経年によるゴムの硬化を考慮した。使用目標とした13年間にわたって、レール継ぎ目通過時等におけるレールへの衝撃がカルダン方式と同等以下になるように、運動シミュレーションにより比較して、ばね定数を決定した。図11にバネシミュレーションモデルを示す。

Fig11. Motion simulation

4.3 DDMの制御

(1) 制御単位

永久磁石式同期電動機であるDDMは、1台のモータを1台のインバータ装置で制御する個別制御とする必要がある。図12に主回路接続の例を示す。

Fig12. Structure of main circuit

(2) 誘起電圧に対する保護

永久磁石同期電動機であるDDMは、惰行時に誘起電圧を発生するため、インバータ装置故障時に機器を焼損する可能性がある。そこでインバータ装置とモータを切り放すためのモータ開放用の遮断器を設けた。

5 定置試験

現車への取付前に、定置試験で緩衝継ぎ手の効果、緩衝ゴムの耐久性等の確認を実施した。また現車による走行と並行して台車試験装置による試験を行った。

5.1 継ぎ手の圧縮・衝撃・耐候性・出力特性試験

(1) 緩衝ゴム繰返し圧縮試験

継ぎ手を簡略化した治具に緩衝ゴムを4個組込み、回転・上下・左右方向の繰返し圧縮試験を実施し、亀裂・破損等の異常がないことを確認した。荷重条件を表1に、試験状況を図13に示す。

Fig13. The tests of cushion rubber

Table 1. Test conditions

Direction	Load	Note
Revolving	$\pm 1.7\text{kN}$	Max torque $\times$ safe rate (1.3)
Vertical	$\pm 8.99\text{kN}$	Point and crossing
Horizontal	$\pm 3.6\text{kN}$	Curve rail joint

Repeat count : 3.3×10^6

$550\text{km}(\text{日車中})/2.5\text{km}(\text{駅間}) \times 2(\text{加減速各1}) \times 365\text{日} \times 13\text{年} \times 1.5(\text{安全率}) = 330\text{万回}$

(2) 繰返し衝撃試験

レールからの衝撃に対するDDMの耐久性を検証するため、軌条輪に段差キーを付けた衝撃試験装置を使用して100万回の繰返し衝撃試験を行った。衝撃の大きさは過去の走行試験結果を参考に上下振動加速度20~30Gとし、モータの電気特性、ベアリング、グリス、継ぎ手、緩衝ゴムに異常のないことを確認した。(図14)

Fig14. The shock test

(3) 緩衝ゴム耐候性試験

緩衝ゴムの耐候性評価として、熱・紫外線・オゾンによる13年相当の加速劣化試験をそれぞれ実施した。いずれも、ゴムの寸法・バネ定数は計画した使用限度値に対して余裕があり、亀裂等の発生もないことから、13年以上の使用に耐え得るものであることを確認した。

(4) モータの出力特性試験

定置試験において、E231系等に使用されている誘導電動機に対して、効率の約3.5%向上が確認できた。通勤路線を想定した走行パターンでシミュレーションすると約10%程度以上の省エネルギー効果があると試算できた。

5.2 台車試験装置による試験

主電動機を台車に取付けた状態で試験を行うことの出来る台車試験装置を使用し、AC Trainの最大荷重時(250%乗車)を模擬した状態での最大加減速度による力行・回生ブレーキの繰返し試験を実施した。

図15、16に試験状況と試験パターンを示す。103系DDM車の約2倍の走行距離となる20万km走行相当の力行・回生ブレーキの繰返し運転を行ない、継ぎ手等に掛かる応力の確認や耐久試験後のDDM各部の状態を確認した。

(1) 運転中の応力確認

運転中の継ぎ手にかかる応力の評価として、平均応力と変動応力から疲労強度線図に対する安全率の確認を行った。平均応力は試験中の最大トルク時の応力測定値を使用し、変動応力は、AC Trainによるレール継ぎ目通過時の応力測定値で評価した。その結果、疲労強度線図に対し3倍以上の安全率を有しており、強度的に問題のないことを確認した。

(2) 耐久運転後の状態

外観検査、磁石特性・電気特性、モータ内部の汚損、ベアリング・グリス、緩衝ゴム、いずれも異常なく良好であった。

Fig15. The bench test

Fig16. Test pattern

6. 走行試験

6.1 ACトレインによる走行試験

(1) 力行性能

走行試験において計画起動加速度を満足できることを確認した。(表2)

Table2. Tests result of starting acceleration

Slope	Condition	Result (m/s ²)	Specifications (m/s ²) (Wheel diameter 860mm equivalent)
Level	4 motor drive	0.667	0.661
+34‰	3 motor drive	0.231	0.169

(2) 走行安全性

曲線通過における基本速度+15km/hまでの走行試験結果、Q(横圧)/P(輪重)(脱線係数:車両が曲線を安全に通過できるかを判定する値)は目安値を下回っており、走行安全性に問題がないことを確認した。

(3) レールへの衝撃緩和効果

レール継ぎ目通過時の輪重増加率は、DDMとの比較評価として、AC Trainに、カルダン方式の駆動装置を取付た試験結果とほぼ同等であり、継ぎ手構造により十分な衝撃緩和効果が得られることを確認した。(表3、図17)

Table3. Max Wheel load on rail joint

	DDM	Caldan system
Static wheel load	5.2 t	4.4 t
Max wheel load on rail joint (increase rate)	9.5 t (183%)	8.3 t (188%)

Fig17. Change of Wheel load

(4) 騒音

図18に実走行時の室内騒音(モータ直上床上1.2m)の比較を示す。E231系に対し10dB以上低くなることを確認した。また、この騒音はACトレインの付随台車直上床上1.2mの室内騒音と同レベルであり、体感上もDDMの音は感じられない程度である。

また、図19に、中央線(武蔵境～東小金井間)での沿線騒音の比較を示す。E231系に対し約5dBの騒音低減効果があることを確認した。

Fig18. Comparison of noise level
Between AC train and E231

Fig19. Wayside noise level

6.2 103系電車による耐久走行

AC Trainは試験電車のため、営業車両のような走行距離の確保が難しい。耐久性の確認のためより長い走行を行うことが必要である。そこで1日の平均走行距離が長く、走行距離の累積が容易な京葉線103系電車を使用した。

車両改造によりACトレインと同一のDDMシステムを搭載し、2003年5月から営業運転に投入して約12万kmの走行を行った。走行終了後にDDMの解体調査を実施し、耐久性の評価を行った。(図20)

Fig20. The train set for the durability test

(1) 試験結果

① 外観

破損、損傷、油漏れ等の異常はなく良好であった。冷却フィンの塵埃による目詰まりも無く、冷却性能に問題ない状態であった。

② 磁石特性・電気特性

永久磁石の減磁は発生せず、固定子コイルの絶縁状態の劣化や、DDMの制御に必要なレゾルバ(回転角度センサ)の巻線抵抗の変化もなかった。また固定子、回転子に汚れや鉄粉の付着は認められず、全閉化の効果が確認できた。

Fig21. External view of decomposed DDM

③ ベ어링・グリス

ベ어링に電食や摩耗の兆候は無く、良好な状態であった。グリスについても、ちょう度・酸化・鉄分・銅分の変化も良好な状態が維持できていたことが確認できた。

⑤ 緩衝ゴム

ゴム寸法・バネ定数の変化は、ゴム単体での加速劣化試験結果と同様の劣化傾向を示しており、実際に使用される環境において、13年以上の使用に耐え得るものであるという結果を得た。

7. まとめ

DDMシステムの開発を行ない、AC Train等でその評価を行った結果、次の点を確認した。

- ・ モータの全閉化と各種耐久試験により13年以上ノーマンテナンスが可能と判断できるデータを得た。
- ・ 緩衝継ぎ手により、従来の駆動方式と同等の走行安全性やレールへの衝撃緩和が可能であることを確認した。
- ・ 車内騒音は付随台車並みに低減でき、沿線騒音も約5dBの低減が確認できた。
- ・ モータのエネルギー効率向上と動力伝達ロス解消により、カルダン駆動方式に対し10%以上の省エネルギー化が可能とのシミュレーション結果が得られた。

これらの成果から、計画した目標を達成することができた。今後は本開発で構築した技術を基に、営業車への適用を行っていく予定である。

文 献

- 1) 畑 正, 松岡孝一他; 次世代通勤電車用直接駆動式主電動機システムの開発; 平成9年「日本機械学会交通・物流部門大会」論文
- 2) 神孫子博, 吉田耕治, 畑正他; 直接駆動式主電動機システムの開発; 平成11年「電気学会産業応用部門大会」論文
- 3) 吉田耕治, 永山孝他; 直接駆動主電動機主回路システムの開発; 平成13年「鉄道サイバネ・シンポジウム」論文
- 4) 神孫子博, 吉田耕治, 古賀猛, 指宿克彦他; 直接駆動式インナーロータ主電動機用ゴム継ぎ手の評価; 平成14年「鉄道サイバネ・シンポジウム」論文
- 5) 神孫子博, 清水康吉, 清水秀幸他; ACトレイン(DDM)における停止までの電気ブレーキ; 平成14年「鉄道技術連合シンポジウム(J-rail)」論文
- 6) 吉田耕治, 清水康吉, 山本肇, 指宿克彦他; 直接駆動主電動機主回路システムの開発ー現車試験及び耐久性評価試験ー; 平成15年「鉄道サイバネ・シンポジウム」論文