

駆動電動機の革新

(直接駆動式主電動機システムの開発まとめ)



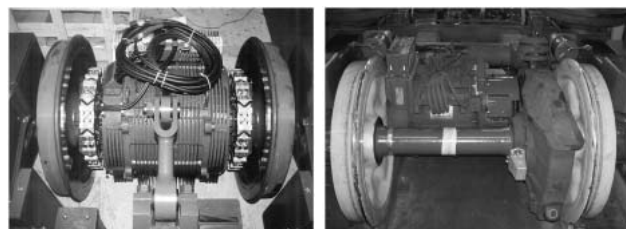
吉田 耕治* 清水 康吉*

電車駆動用の主回路システムは抵抗制御による直流電動機方式に始まり、その後、パワーエレクトロニクスと制御技術の発展により、チョッパ制御方式を経て、VVVFインバータ制御による誘導電動機方式へと進展してきた。JR東日本では、更なる省メンテナンス・省エネルギー・騒音低減を目的とし、駆動電動機の革新に取り組みDDM方式の開発を進めてきたが、今回、AC Trainに適用して評価を行い、良好な結果を得た。本論文では、DDMの仕組みと開発経過を述べ、AC Trainによる各種走行試験、103系営業電車での耐久走行等の概要について報告する。

●キーワード：直接駆動方式、同期電動機、全閉自冷、永久磁石、緩衝継手

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。この方式は、従来の直流電動機方式に対し、力行・ブレーキ・前後進切替えのための物理的スイッチやモータのブラシ・整流子等が不要であり小形・軽量化が図れることからここ数十年で飛躍的に進歩してきたシステムである。しかし、この誘導電動機は、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、モータの駆動力を車輪へ伝達する方法は、直流電動機時代と同様、カルダン駆動装置（歯車減速装置）で減速して伝達する方式を踏襲しているため、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る他、動力伝達ロス of の要因にもなっている。



直接駆動方式 (AC Train) カルダン駆動方式 (E231系)

図1：駆動方式の外観比較

近年、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きたが、従来のシステムで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状況となっている。そこで、カルダン駆動装置を廃止し、モータと車軸を直結する直接駆動式主電動機（DDM：Direct Drive Motor）という駆動電動機の革新に取り組んだ。

2 DDM採用のメリット

DDMでは、一層のメンテナンスフリー化、エネルギー効率の向上、騒音低減を目指し、メンテナンスと動力伝達ロス of の発生源となっているカルダン駆動装置を廃止することとした。これによりモータの回転数は約7分の1となるため、軸受の負担やモータの回転騒音の低減も可能となる。一方、モータは約7倍のトルクが必要となり、従来の誘導電動機では、このトルクを確保するには外形が大形化し車軸に組込むことが困難となるため、小形でより大きなトルクが得られる永久磁石同期電動機を適用した。このモータは発熱が少ないため、エネルギー効率が向上するとともに、全閉自冷方式とすることで、モータ内部の清掃メンテナンスの解消も可能となる。具体的には次の目標をかかげて開発を行った。

・13年以上のノーメンテナンス

- ・従来方式に対し5%以上の省エネルギー化
- ・付随台車並みの低騒音化

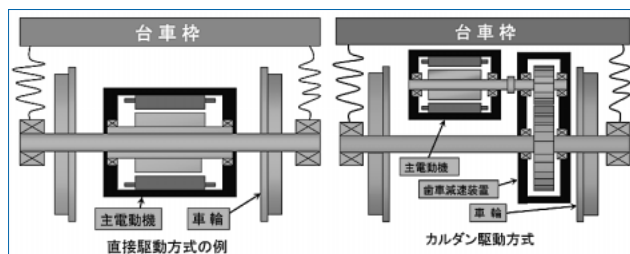


図2：駆動方式の構造比較

一方、カルダン駆動装置廃止に伴いモータは輪軸と直結となるため、バネ下質量が増加する。このため、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本システムを実現する上での課題であった。

3 これまでの開発の流れ

1995年度～1998年度にかけて、基礎評価としてDDMの方式を選定するための試作を行い、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、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うとともに、耐久性の早期評価を目的として、2002年度以降には、AC Trainの走行試験と並行し103系電車に同システムを搭載しての走り込み、ならびに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い、その後、DDMの解体調査等により耐久性の評価を実施した。

年度	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
機能評価	基礎評価 (モータ構造・モータ方式の検討) ⇄ 廃車予定車での走行試験				AC Train用 DDMシステム開発		AC Train走行試験		
耐久性評価					単体試験	軌条輪試験	103系電車		
								台車試験装置	

図3：DDMシステムの開発経過

3.1 DDMの種類

モータは、永久磁石同期電動機と従来のシステムで実績のある誘導電動機の2方式についての比較評価を行っ

た。モータと輪軸を接続する構造としては、内側が回転するインナーロータ構造と外側が回転するアウトロータ構造があり、両方式の比較評価を行った。バネ下質量増加による走行安全性や軌道への影響を抑制するため、インナーロータ構造については、車軸とモータ間に弾性体（緩衝ゴム）を介在させ、動的なバネ下質量の増加を抑制することができる構造とした。

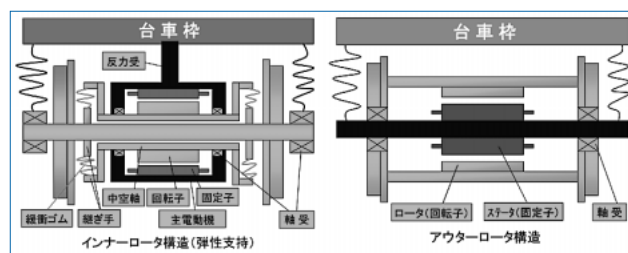


図4：モータ構造比較

3.2 種別毎の評価

各方式とも計画した性能を満足できること、ならびに従来のカルダン駆動構造のモータに対し最大約15dBの騒音低減が可能であることを確認したが、モータ方式は、誘導電動機の試作品に対し約3%の高効率化と約3割の軽量化ができたことや水冷装置等の付帯機器を持たずに密閉化が達成できたことから、永久磁石同期電動機に絞ることとした。

1996年度に廃車予定車両に仮設して実施した走行試験の結果、インナーロータ弾性支持構造が横圧に対して有利であったこと、レール継目通過時等のレールへの衝撃緩和効果が得られたこと、ならびに約6～7年で発生する車輪交換の際にモータを分解することなく交換可能であることを考慮し、モータ構造はインナーロータ弾性支持構造に絞ることとした。

4 AC Trainに向けたDDMの開発

AC Trainでの評価を行うにあたり、弾性支持構造による衝撃緩和効果の定量的な検討、ならびに永久磁石同期電動機の特性を活かした制御方法や小型化の検討を行った。

4.1 AC Train用DDMの構造

(1) モータ

モータは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・大出力化を実現するため、磁石は、高磁束密度で耐減磁性（耐熱性）に優れたネオジウム系の磁石を使用するとともに、熱発生源である固定子鉄心の外被を直接外気で冷却可能なフレームレス構造、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、冷却性能の向上を図っている（図5、図6）。



図5：DDM外観

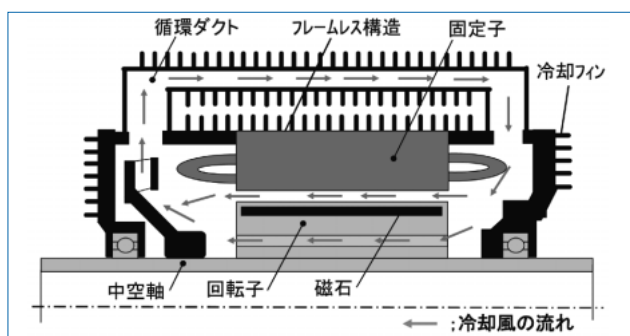


図6：DDM断面

(2) 車軸・台車との接続

インナーロータ弾性支持構造（図4）の継ぎ手構造を図7に、継ぎ手及び緩衝ゴムの外観を図8に示す。回転子軸（中空軸）と車軸の双方に、放射上に6本のアームを有する継ぎ手をはめ合わせて、一方のアームの中央部に他方のアームが入る位置関係で、双方のアーム間に金属でサンドイッチした緩衝ゴムを挟む構造である。モータは、反力受け棒で台車と接続することで固定子の回転を

止め、回転力を車軸に伝える構造である。

また、DDMは13年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生じた場合を想定し、在姿で交換可能な構造とした。緩衝ゴム押さえを外すことで、緩衝ゴムを個別に交換することができる。

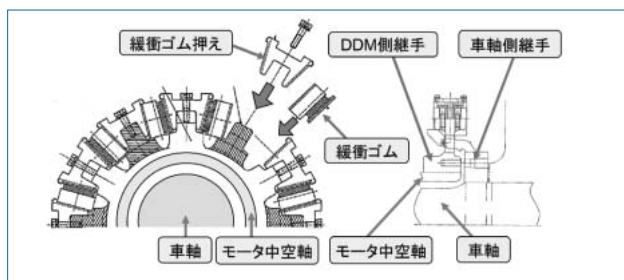


図7：継ぎ手構造



図8：継手及び緩衝ゴム外観

また、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9）。

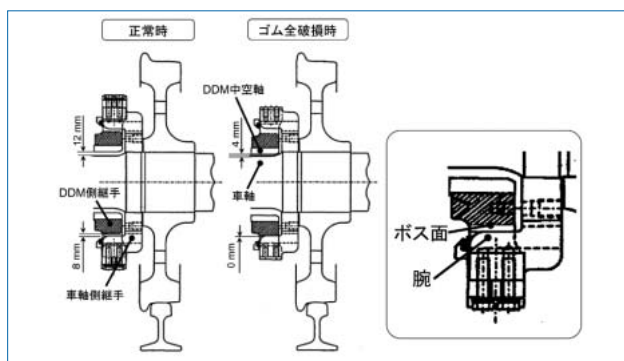


図9：DDM落下防止機構

(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に入れ、使用目標とした13年間に亘り、レール継ぎ目通過時等のレールへの衝撃緩和効果がカルダン方式と同等になることを条件とした。なお、レールに与え

る衝撃力は、図10のバネモデルに示す車両が、それぞれレール継ぎ目を通過した際の運動シミュレーションにより比較した。また、インナーロータ弾性支持方式では、モータ枠は、重力により車軸中心に対して僅かであるが下位に位置するため、モータ枠の振れまわりによる振動が車輪回転に共振して増幅する現象を回避することも併せて考慮した。

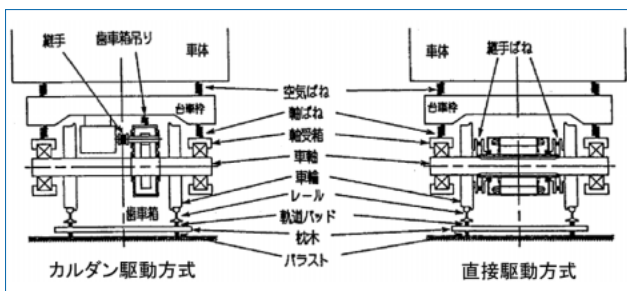


図10：バネモデル

4.2 永久磁石同期電動機の制御

(1) 制御単位

誘導電動機方式では、1台のインバータ装置で複数のモータを制御可能であるが、DDMに使用した永久磁石同期電動機は、個々のモータの回転子の位置（磁石の位置）に応じた電流をモータに流す必要があるため、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なる。この方法では、図11のように、インバータやモータが故障しても、モータを1台ずつ切り放すことにより走行を続けることができ、輸送の安定性向上を図ることができる。

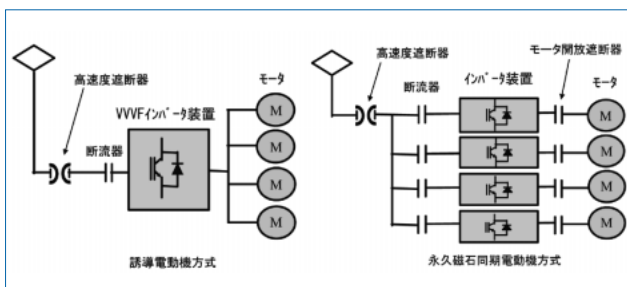


図11：システム構成の比較

(2) トルク制御

モータは、埋込み磁石構造とすることで得られるリラクタンストルクを有効に活用する方式とした。リラクタンストルクとは、回転子の磁気的な突極性によって生じ

る磁気エネルギーの変化（固定子の電磁石で回転子の鉄心を引きつける）を利用して得るトルクである。回転原理を図12に示す。

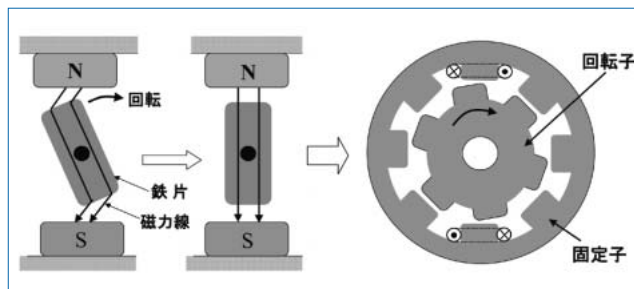


図12：回転原理

今回のモータにおけるリラクタンストルク発生原理を図13に示す。モータのトルクは(1)式で表され、磁束分電流（d軸電流 I_d ）とトルク分電流（q軸電流 I_q ）により制御される。

磁石を鉄心に埋め込み磁石外周に鉄心を有する構造とすることにより、q軸電流 I_q による磁束 ϕ_q とこれに直交するd軸電流成分 I_d との電磁作用によりリラクタンストルクを発生する。

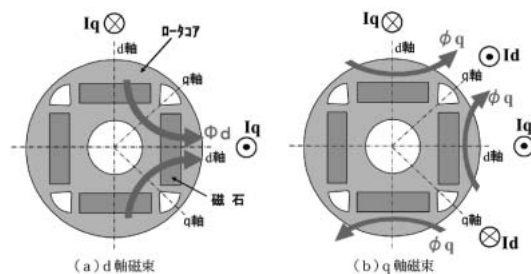


図13：リラクタンストルク発生原理

$$T_q = k \left\{ \phi_f \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q \right\} \cdots \cdots (1)$$

磁石トルク リラクタンストルク

T_q ：モータトルク(Nm) ϕ_f ：磁石有効磁束(Wb)

I_q ：q軸電流(A)、 I_d ：d軸電流(A)

L_q ：q軸インダクタンス(H) L_d ：d軸インダクタンス(H)

k ：定数

(3) 弱め磁束制御

モータが回転すると、磁石の磁束が固定子コイルと鎖交し、コイルに誘起電圧が発生する。この誘起電圧は回転数に比例するため、高速域では、インバータ装置が制御し得る電圧を超過する現象が発生する。同じく、だ行

の場合は、誘起電圧が架線電圧を超過し回生ブレーキが作用する現象が発生する。この現象を解消するため、高速時には永久磁石の磁束を打ち消すための電流を固定子コイルに流すことで、誘起電圧を抑制する「弱め磁束制御」を行うこととした。弱め磁束制御の概念を図14に、制御モードを表1に示す。

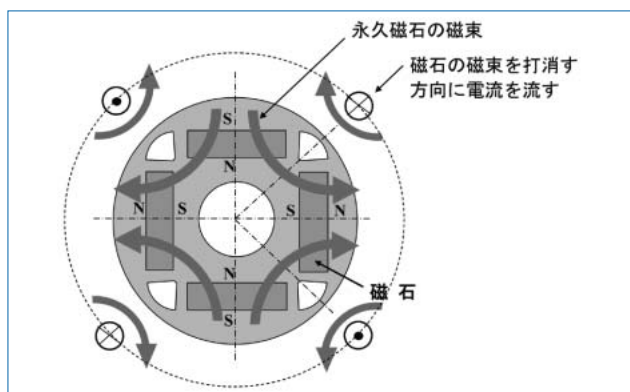


図14：弱め磁束制御の概念

表1：制御モード

モード	速度域	制御モード
力行	中速	トルク電流制御
回生	高速	弱め磁束制御
惰行	中即	ゲートオフ
	高速	弱め磁束制御（だ行制御）

(4)誘起電圧に対する保護

走行中にインバータ装置内の半導体素子に短絡故障が発生した場合に、モータから発生する誘起電圧によりインバータ装置内が焼損する等の影響を抑制するため、図11(右)のようにインバータ装置とモータを切り放すことのできる遮断器を設けた。

4.3 AC Train用DDMシステムの諸元

(1)想定した車両の仕様

モータの性能を決めるためのAC Trainの諸元を表2、編成を図15に示す。最高速度、起動加速度、減速度は通勤近郊形電車の標準となっているE231系に合わせた。駆動軸数は、連節台車方式により1軸当たりの軸重を大きくとれることから、E231系の3/4としており、5車体（約80m編成）に対しては4軸駆動とした。

表2：AC Trainの諸元

項目	仕様
車両編成	5両
編成長	74m
編成質量(最大荷重時)	85t (165t)
駆動軸数	4軸
最高速度	120km/h
起動加速度	0.694m/s ² (2.5km/h/s)
常用最大減速度	1.17m/s ² (4.2 km/h/s)

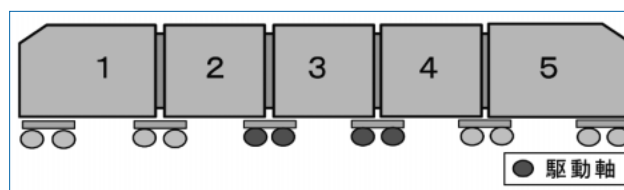


図15：AC Trainの編成図

(2)DDM、インバータ装置の諸元

想定した走行線区は、中央線（東京～大月）、中央・青梅線（東京～青梅）、京浜東北線（大宮～大船）とし、モータ出力は1時間定格200kWとした。表3にDDMの主要諸元を、表4にインバータ装置の主要諸元をそれぞれ示す。

表3：DDM主要諸元

項目	仕様	参考(E231系MT73)
方式	永久磁石同期電動機 (埋込み磁石構造)	三相かご型 誘導電動機
磁石	ネオジム系	—
支持構造	イオロ-弾性支持	—
冷却方式	全閉自冷	自己通風
定格出力	160kW（連続） 200kW（1時間）	80kW（連続） 95kW（1時間）
回転数 (120km/h時)	824rpm	5,820rpm
トルク (起動時)	11,800Nm	1,300Nm
効率	95%	92%
質量	1140kg(モータ) 185kg(継手)	495kg(モータ) 336kg(駆動装置)

表4：インバータ装置主要諸元

項目	仕様
制御単位	1インバータ1モータ個別制御
方式	2レベル3相電圧形PWM
素子	IGBT3300V—1200A（モジュール構造）

5 AC TrainでのDDMの試験

5.1 定置試験

走行試験の事前検証として、定置試験でモータの特性、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。

(1) モータの特性試験

無負荷特性試験の結果を表5に示す。試験結果から、ほぼ設計どおりの特性であることを確認した。効率は、MT73形誘導電動機の92.5%に対し、約3.5%向上することができた。

表5：モータ特性試験結果

	設計値	実測値
電圧(V)/電流(A)	730/140	733/140
回転数	360	360
出力(kW)	160	164.9
磁石トルク(Nm)	3872	3869
リカダンストルク(Nm)	372	505
トータルトルク(Nm)	4244	4374
効率(%)	95.0	96.0
力率(%)	95.0	96.6

(2) モータの温度上昇試験

連続運転による温度上昇試験結果を表6に示す。実走行では走行風による冷却効果が期待できるが、低速で長時間走行する場合を考慮し、定置試験では走行風0m/sでの試験を行い、設計値内に納まることを確認した。

表6：モータ温度上昇試験結果（走行風0m/s）

	設計値 (限度値)	実測値 (インバータ駆動)
固定子コイル	163K(190K)	139K
永久磁石	130K(130K)	129K
軸受	65K(65K)	59K
ロータ位置検出器(レゾルバ)	(90K)	58K
継手緩衝ゴム	(40K)	19K
反力受け棒の球面軸受	(80K)	60K

(3) 電力消費量の試算

モータ特性の試験結果を基に、誘導電動機に対する効率向上、カルダン駆動装置廃止による動力伝達ロス解消を加味した消費電力量シミュレーションを行い算出した

結果、従来のカルダン駆動誘導電動機方式に対し10%以上の低減効果があることがわかった。また、前提条件として車両質量は同一で試算しているが、編成全体の軽量化によりその差はさらに大きくなることが期待できる。シミュレーション条件を表7、シミュレーションランカーブを図16に示す。また、電力消費量の試算結果の例を表8に示す。

表7：シミュレーション条件

項目	内容
編成質量	387t(200%荷重想定)
最高速度	95 km/h
想定走行パターン	駅間1.5km、2.0km、2.5kmの3区間を1パターンとし、7パターンを繰返し約50分間運転（駅停車25秒、オフブレーキ走行）
勾配、曲線	平坦、直線想定

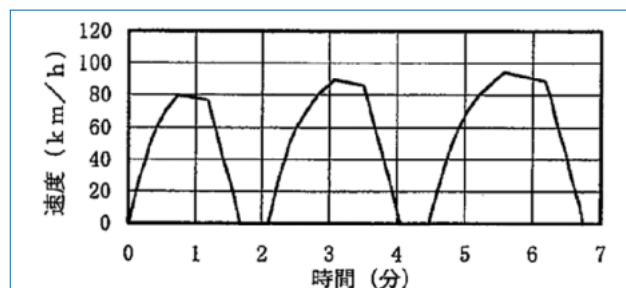


図16：シミュレーションランカーブ

表8：電力消費量試算結果例

	DDM方式	従来IM方式
走行時間	49分43秒	
走行距離	42km	
表定速度	50.7km/h	
力行電力量	815.0kW	875.2kW
回生電力量	372.5kW	355.2kW
総消費電力量	442.5kW	520.0kW
比率	85%	100%

(4) 層間短絡試験

回転子に永久磁石を使用しているため、固定子コイルに層間短絡が発生すると、短絡部でループ回路が構成されモータが回転している限り短絡電流が流れ続ける。この影響を評価するため、故意に短絡した試験を行った結果、当該箇所が焼損するのみで重大な故障に至ることがないことを確認した。

(5) 緩衝ゴム繰返し圧縮試験

継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9に、試験状況を図17に示す。

表9：繰返し荷重条件

	負荷	備考
回転方向	±1.7kN	非常トルク×安全率(1.3倍)
上下方向	±8.99kN	分岐器継ぎ目通過想定
左右方向	±3.6kN	曲線部継ぎ目通過想定

試験回数：330万回

550km(日車中)/2.5km(駅間)×2(加減速各1)×365日

×13年×1.5(安全率)=330万回



図17：緩衝ゴム繰返し圧縮試験状況

(6) 繰返し衝撃試験

レールからの衝撃に対する主電動機の機械的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回転試験を行った。通常、金属部品については100万回の衝撃で異常が無ければ破壊は進展しないことから100万回の繰返し衝撃試験(過去の現車試験のデータを参考に軸箱部の振動加速度20~30G)を実施し、モータの電気特性、ベアリング、グリス、継ぎ手、緩衝ゴムともに異常のないことを確認した(図18)。



図18：繰返し衝撃試験

(7) 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実施した。いずれの試験においても、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ること、ゴム本体にはクラック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。

(8) 騒音

図19に、今回試作したDDMとMT73形主電動機のモータ単体での騒音測定結果(無負荷運転、モータの周囲1m5点平均)を示す。DDMの騒音は、MT73形誘導電動機に対し回転数が約7分の1になること、密閉構造により冷却ファンや回転子の風切音の漏れが抑えられることから、最大で約15dB低減することを確認した。

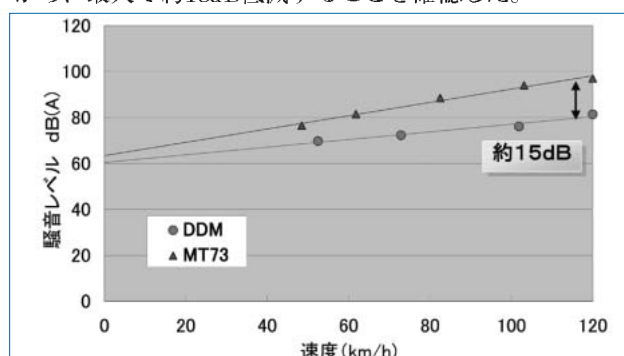


図19：モータ単体騒音(周囲1m5点平均)

5.2 走行試験

走行試験では、埼京線・川越線を中心に基本性能を確認した。また、中央線(東京~甲府)では勾配走行時の評価、東北線(大宮~黒磯)では空転再粘着制御性の評価、常磐線(我孫子~取手)では130km/h走行時の評価を行った。

5.2.1 試験結果(電気的特性)

(1) 力行性能試験

走行試験では、平坦線、34%上り勾配ともに、計画起動加速度を満足することを確認した(表10)。

表10：起動加速度

		条件	起動加速度(m/s ²)	
勾配	モータ開放	限流値	試験結果	計画値 (車輪径860mm換算)
平坦	健全	—	0.667	0.661
34% 上り	健全	—	0.353	0.336
	健全	増	0.461	0.458
	1軸開放	—	0.231	0.169
	2軸開放	増	0.114	0.078

(2) 弱め磁束制御

図20に速度120km/hまでの力行・だ行時のチャートを示す。速度67km/hで弱め磁束制御が開始されること、また、高速域でのだ行時には、磁束電流を約160(A)流してトルク電流を0(A)に抑え、だ行制御が良好に行われていることを確認した。また、図21に、速度80km/hまでの力行・だ行時のチャートを示す。弱め磁束制御を必要としない速度域では、トルク電流・磁束電流ともに0(A)に制御されていることを確認した。図22は、だ行制御中の減速度と開放遮断器オフによる自然だ行の減速度を比較したチャートである。いずれの場合も減速度は約0.08km/h/sで差はなく、惰行制御中の回生トルクが0に制御されていることを確認した。

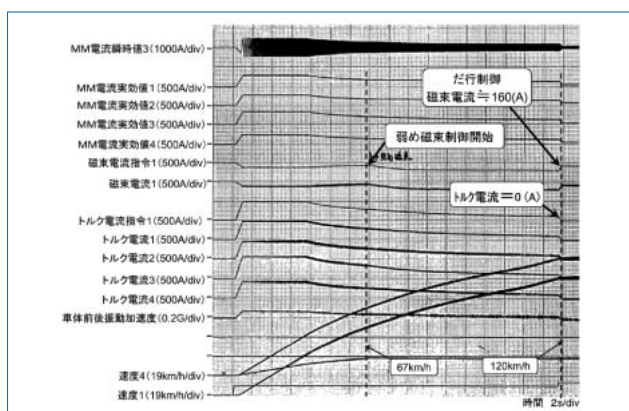


図20：力行チャート（高速）

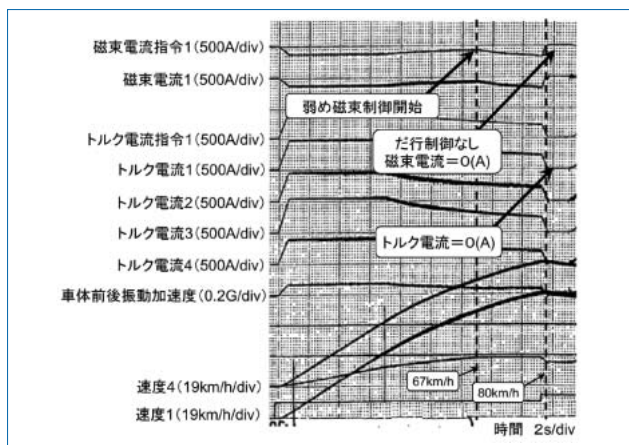


図21：力行チャート（中速）

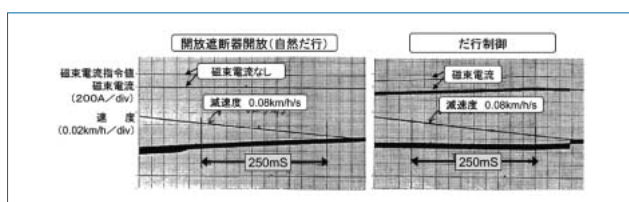


圖22：減速度比較

(3) 空転再粘着制御試験

空転再粘着制御試験では、従来の「空転検知時に予め決めたパターンでトルクを絞る」方式(図23)と、機関車で使用される「空転速度に比例してトルクを絞る」方式(図24)の2方式の試験を実施した。両方式とも力行中の加速度に大きな変動はなく安定した加速性能を得ることができたが、平均加速度は前者の約1.2km/h/sに対し後者は約1.6km/h/sであり、連続的にきめ細かく制御することで必要以上のトルク低減を抑制可能である後者の方式がより加速性能に優れることを確認した。

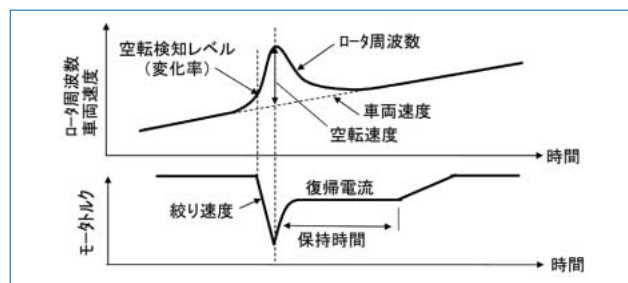


図23：トルク一定絞り制御

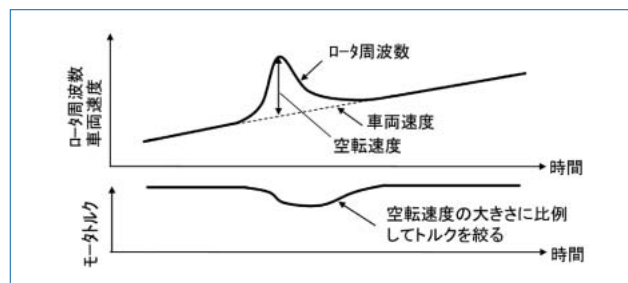


図24：空転速度に応じたトルク絞り制御

(4) 停止までの電気ブレーキ

誘導電動機の速度検出器（PG：パルスジェネレータ）は低速域での精度が低く、6～7 km/h以下の領域で電気ブレーキから空気ブレーキに切替えて停車する方式が主流である。このため、電空切替え時の前後動やブレーキシューのきしり音が発生する要因となっていたが、交流電動機は回転数が低くてもトルクを発生することが可能であるため、最近では、誘導電動機方式でも演算により速度を推定することで「停止までの電気ブレーキ制御」が実用化されている。一方、DDMは回転子の位置を正確に検知して制御する必要があり、分解能の高い「回転子位置検出器（レゾルバ）」を使用しているため、それを最大限活用した制御の試験を実施した。

制御方式の検討にあたっては、安全・確実にその機能を発揮させるため、

①停止後の逆走を防止する

②勾配区間でも安定した転動防止を図る

ことを基本とし、停車中は空気ブレーキを作用させる方式とした。図25に制御シーケンスを示す。制御の順は以下のとおりである。

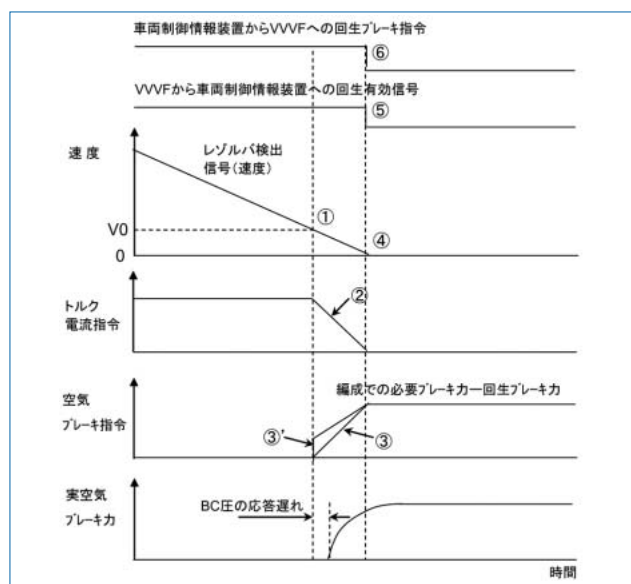


図25：制御シーケンス

- ① 速度が低速まで低下し、レゾルバ速度信号によりトルク電流指令の絞込み開始速度(V_0)を検出する。
- ② ①と同時に電流指令の絞込みを開始する。
- ③ ②と同時に空気ブレーキ指令を立ち上げる。
- ④ レゾルバ速度信号により0km/hを検出する。
- ⑤ ④と同時にVVVFインバータの回生有効信号をオフとする。
- ⑥ ⑤と同時に回生ブレーキ指令もオフとする。

なお、実際に作用する空気ブレーキには応答遅れがあるため、通常の空気ブレーキ力（編成での必要ブレーキ力－回生ブレーキ力）に対し強制的にブレーキ力を補足し（③'）、応答性の向上を図っている。

停車時の前後動や勾配での安定した制御を考慮し、 V_0 の値を切換えて試験を行い、最適値として0.5km/hを選定した。図26は各ブレーキノッチで停止した際の車体

前後振動の加速度を比較したものであり、停止までの電気ブレーキの方が乗り心地を改善できることを示している。

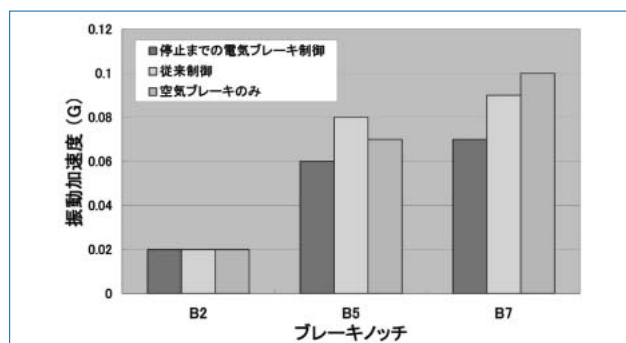


図26：停車時の車体前後振動加速度比較

5.2.2 試験結果(機械的特性)

(1) 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。

(2) 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実施したカルダン駆動方式の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（図27、表11）。

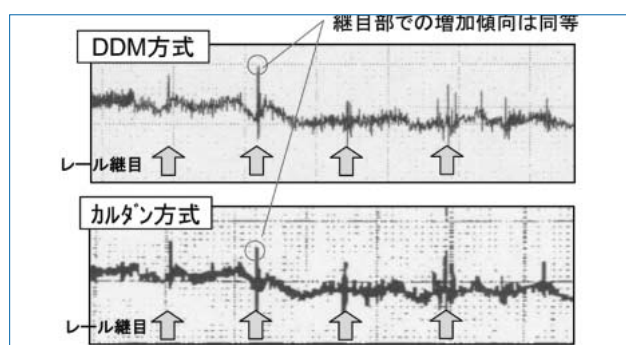


図27：輪重波形の例

表11：輪重増加率の比較

	DDM方式	カルダン方式
静止輪重	5.2t	4.4t
レール継ぎ目での 輪重ピーク値 （増加率）	9.5t (183%)	8.3t (188%)

(3) 騒音

図28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。実走行では車輪の転動音等が含まれるため、騒音低減効果はモータ単体での結果より小さくなるが、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 Trainの付随台車直上床上1.2mの室内騒音と同等レベルであり、実質的にはDDMの音は感じられないレベルである。

また、図29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。

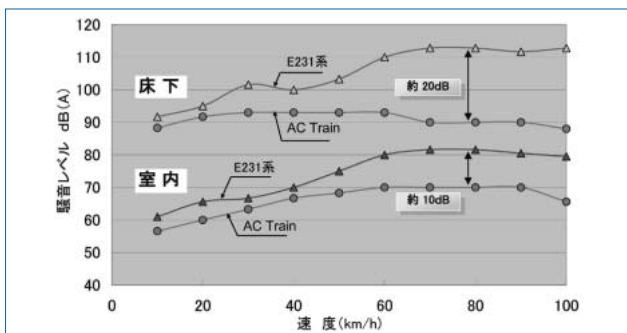


図28：車内騒音・床下騒音比較

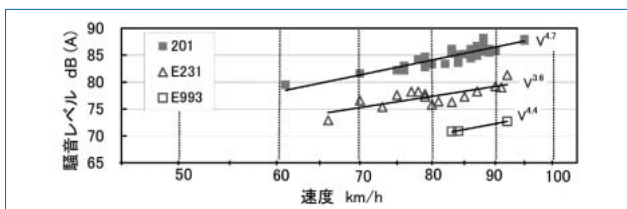


図29：沿線騒音の比較

6 その他の試験

AC Trainは試験電車であり、営業車両のような走行距離の確保が難いため、103系の営業電車にAC Trainと同一のDDMシステムを搭載した走り込みを行うとともに、台車試験装置により103系での走行距離を上回る距離に相当する加減速繰り返し運転を行い、それぞれ解体調査を実施して、耐久性の確認を行った。

6.1 103系電車による試験

(1) 試験の概要

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系電車を使用することとし、車両改造によりAC Trainと同一のDDMシステムを搭載した。走り込み距離は、過去の新形式車両の営業投入までの走行距離を参考に、10万kmを目処にできる限り走行を行うこととした。2002年3月から7月にかけて、DDM主回路搭載改造を行い、2002年7月から京葉線(東京～蘇我間)で走行安全性、乗心地(抵抗制御車との協調運転)、主回路制御性の確認を行なったうえで、2003年5月から営業運転に投入した。そして、2003年10月に約12万kmの走行を終え、DDMの解体調査を実施して耐久性評価を行った。

(2) 改造の概要

通常の6M4T編成から付随車1両を外し、代わりにDDM改造車を挿入し、7M3T編成とした(図30)。主回路機器は既存の機器を取り外し、DDM用主回路に取替えた。ブレーキは既設のブレーキ制御装置を一部改造し、電空ブレンディング用の直通ブレーキ制御装置を追加した(図31)。DDMシステムはAC Trainと同じものであるが、乗り心地への影響を考慮し、モータの引張力特性は103系に合わせている。

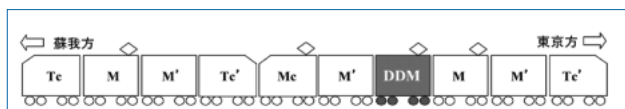


図30：103系DDM編成

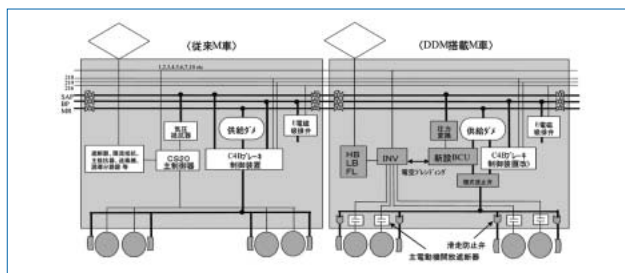


図31：103系DDMシステム構成

6.2 台車試験装置による試験

(1) 試験の概要

103系電車による営業運転では、力行・回生ブレーキ開始時の車体前後振動により乗り心地を損ねないようDDMのトルクを103系に合わせて抑えているため、最大トルクでの耐久運転はできない。そこで、台車試験装置を

使用し、AC Trainの最大荷重時(250%乗車)を模擬した状態で最大加減速度による力行・回生ブレーキの繰り返し試験(図32,33)を実施した。103系DDM車の約2倍の走行距離に匹敵する20万km走行に相当する力行・回生ブレーキの繰り返し運転を行い、その後DDMの解体調査を実施した。

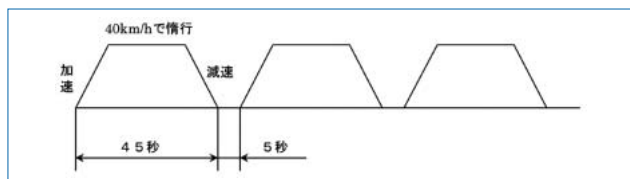


図32：運転パターン

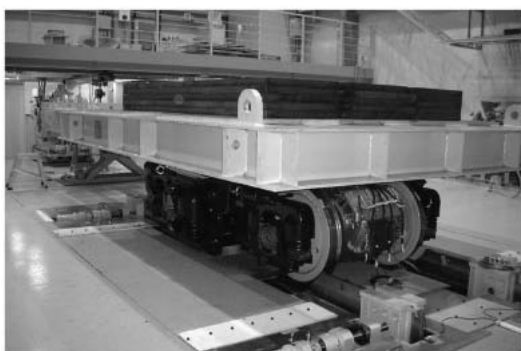


図33：台車試験装置による試験

6.3 試験結果

6.3.1 103系電車による試験結果

(1) 試験後の状態確認

① 外観検査

破損、損傷、油漏れ等の異常はなく良好であった。また、冷却フィンの塵埃による目詰まりも無く冷却性能には影響がない状態であった。継手については、全数磁粉探傷を実施し、キズ



図34：走行後のDDM

等の発生はなく異常がないことを確認した(図34)。同じく、反力受け棒についても全数カラーチェックを実施し、キズの発生がなく異常がないことを確認した。

② 磁石特性・電気特性

外部からの動力でモータを回転させ誘起電圧を測定し、

永久磁石の減磁が発生していないことを確認した。また、固定子コイルの絶縁状態の劣化やレゾルバの巻線抵抗の変化もなく良好であることを確認した。

③ モータ内部の汚損等

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。また、ワニスの剥がれや熱的な変色もなく良好な状態であった(図35)。

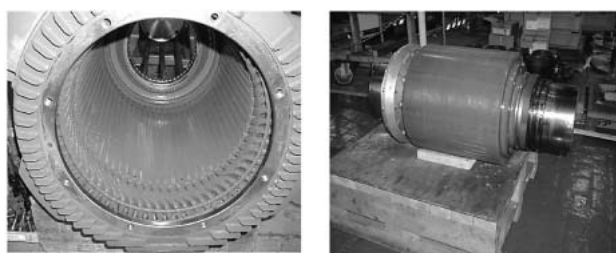


図35：DDM内部の状態

④ 軸受・グリス

軸受については解体検査を行い、電食や摩耗もなく良好な状態であることを確認した。グリスについては成分分析を行い、ちょう度・酸化ともに新製時と同等であること、鉄分・銅分変化も僅かであり良好な状態であることを確認した。

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、現車環境においても13年以上の使用に耐え得るものであるというデータを得た。

6.3.2 台車試験装置による試験結果

(1) 運転中の応力確認

運転中の継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、各種試験中最大となる値として台車試験装置によるDDM最大トルク運転時の応力測定値で、また、変動応力は、同じく各種試験の中で最大となる値として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、強度的には問題のないことを確認した。

継手と同様、反力受け棒についても台車試験装置と A C Trainでの応力測定値から評価した結果、疲労強度線図に対する安全率は約10倍であり、十分な強度を有することを確認した。

(2) 耐久運転後の確認

103系電車のDDMと同じく、外観検査、磁石特性・電気特性、モータ内部の汚損、軸受・グリス、緩衝ゴムの確認を行い、いずれの項目も異常がなく良好であることを確認した。

7 まとめ

駆動電動機の革新に取り組み、A C Train等でその評価を行った結果、

- ・ 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、従来方式に対し10%以上の省エネルギー化が図ることが可能となる。また、編成質量の軽量化によりその差は更に大きくなる。
- ・ モータの全閉化と各種耐久試験により13年以上ノーメンテナンスが可能と判断できるデータを得た。
- ・ 車内騒音は付随台車並みに低減可能なことを確認した。沿線騒音は約5dB低減した。
- ・ 緩衝継ぎ手方式により、従来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。

という成果を得、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、実用に向けて更なる検証を続けていく計画である。

参考文献

- 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 1 1 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