

直接駆動主電動機主回路システムの開発

吉田 耕治*

JR東日本では、21世紀にふさわしい通勤・近郊電車を目指してAC Train（Advanced Commuter Train）の開発を進めており、走行試験を行なっている。AC Trainでは抜本的なシステムチェンジによるコストダウンを開発コンセプトの一つに掲げており、その駆動システムについても、従来の方式にとらわれない新しいシステムとして直接駆動主電動機（DDM：Direct Drive Motor）主回路システムの開発を行い、現車走行試験を実施し基本性能等が良好であることを確認した。

キーワード：直接駆動方式、同期電動機、永久磁石、緩衝継手、粘着、空転・滑走制御

1 はじめに

パワーエレクトロニクスと高度な制御技術の発展により、鉄道車両の駆動電動機システムは、直流電動機方式から誘導電動機方式に変わり、小形・軽量化や省メンテナンスが図られてきたが、そのニーズは近年ますます高まってきている。しかし、従来の主回路システムはほぼ成熟の域に達しており、その改善効果が得にくくなっている現状にある。そこで、現状の駆動装置（歯車減速装置）を廃止し、主電動機で直接車輪を駆動するという抜本的なシステムチェンジによる技術革新に取り組んできた。

今回、この直接駆動式主電動機システムについて、インシャルコストを意識したうえでのトータルコストの低減及び13年間ノーメンテナンスをいう目標をかかげ、AC Train用の駆動システムの開発を行なった。

2 開発にあたっての考え方

駆動システムのライフサイクルコストの低減をねらい、

従来の歯車減速装置の廃止によるメンテナンス及び動力伝達ロスの解消

永久磁石同期電動機の適用による電動機効率の向上、全閉自冷化によるメンテナンスレス化、低騒音化、及び製作工数の低減

という2つの観点からの取り組みを行った。

また、AC Trainでは台車数の低減を目的とした連節台車方式の開発に取り組んでおり、DDMシステムについ

ては、この連節方式により得られる1軸当りのレール～車輪間の粘着力を有効に活用することにより、駆動軸数の低減を図ることとした。

3 性能設定の考え方

3.1 前提とした車両諸元

性能設定上の前提とした車両諸元を表1、編成図を図1に示す。最高速度、起動加速度、減速度はJR東日本の通勤・近郊電車の標準となっているE231系に合わせている。駆動軸数は、E231系10両編成（編成長200m）に換算すると、現行の16軸に対して12軸相当となり、25%の低減を図っている。

表1：前提とした車両諸元

項目	仕様
車両編成	5両
編成長	74m
編成質量(最大荷重時)	85ton (165ton)
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 (4.2km/h/s)

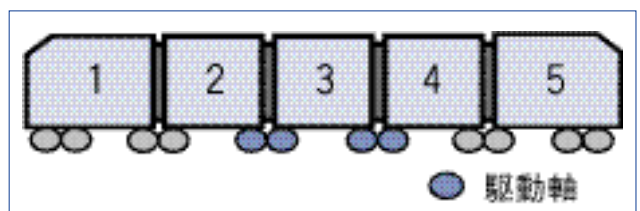


図1：試験車両（AC Train）編成図

3.2 冗長性

従来の誘導電動機方式では、1台のインバータ装置で複数の主電動機を制御可能であることから、主電動機の開放単位は4軸単位が標準となっているが、永久磁石同期電動機では1台のインバータ装置で1台の主電動機を駆動する個別制御方式となる。この特徴を活かし、主回路機器故障等の異常時における主電動機の開放単位を制御単位と同じ1個単位とすることで冗長性の向上を図っている。

4 システム

4.1 主電動機

4.1.1 主要諸元

主電動機の主要諸元を表2に示す。

表2：主電動機主要諸元

項目	仕様
方式	埋込磁石構造同期電動機
構造	インナーロータ弾性支持方式
冷却方式	全閉自冷
定格出力	160kW (連続) 200Kw (1時間)
定格回転数	360rpm
トルク	4244 Nm (定格回転時) 11800 Nm (起動時)
効率	95%

出力は、走行シミュレーションを行い、連続定格出力160kW、1時間定格出力200kWと設定した。冷却方式は、気吹き作業等のメンテナンス解消を目的とした全閉自冷方式である。

構造は、従来と同様な方法で車輪交換が可能であり、また走行性能や軌道への影響を考慮し、インナーロータ弾性支持構造とした。ロータの軸を中空とし、内部を貫通した車軸との間に緩衝ゴムを介在させることにより、車軸に対して弾性支持させている。弾性支持構造図を図2に、また、AC Trainへの搭載状況を図3に示す。

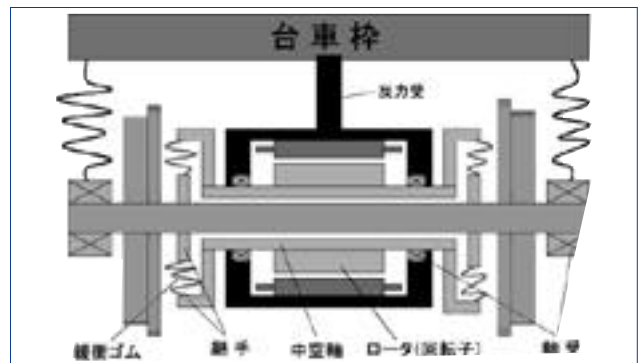


図2：インナーロータ弾性支持構造



図3：主電動機外観

4.1.2 小型化の検討

必要トルクはE231系で使用しているMT73形主電動機の約9倍となるため、目標とした全閉自冷方式で限られたスペースへ搭載するためには主電動機の冷却性能の向上等による小型化が開発のポイントとなる。開発にあたっては、主に、以下に示す内容を適用することにより、台車内への搭載を可能とした。

(1) 磁石

高磁束密度で耐減磁性が高く、かつ耐熱性に優れたネオジウム系磁石を適用した。

(2) リラクタンストルクの活用

限られた体格でより大きなトルクを発生させるため、ロータは埋込み磁石構造とすることでリラクタンストルクを得られる方式とした。ロータ構造を図4に、リラクタンストルク発生原理図を図5に、モータトルクを式(1)~(3)に示す。



図4：ロータ構造

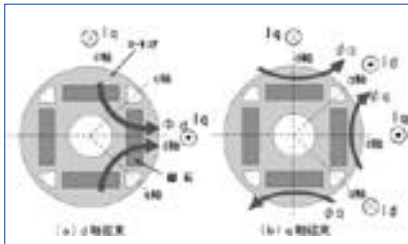


図5：リラクタンストルク発生原理

$$T = k \cdot f \cdot I_q \quad (1)$$

$$T_L = k \cdot (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q \quad (2)$$

$$T_q = T + T_L \quad (3)$$

T : 磁石トルク (Nm) T_L : リラクタンストルク (Nm)
 T_q : モータトルク (Nm) 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) 冷却性能の向上

熱発生源である固定子鉄心を直接冷却可能なフレームレス構造とするとともに、機内で温まった空気を冷却するための循環ダクト方式とした。また、モータ本体からの放熱効果を高めるため、外部には冷却フィンを設けている。冷却構造の概要図を図6に示す。

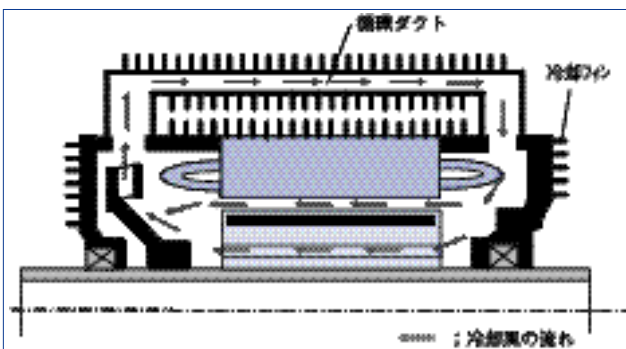


図6：冷却構造

(4) V/fの検討

起動時の加速度（モータトルク）を一定とするための、V/f〔V:電圧、f:周波数〕一定の終端速度を低速側に設定すると、弱め磁束制御を必要とする領域が増大し、無効電力の増加を招く。また、磁石量やコイル巻数の増加が必要となり主電動機質量は増加する。一方、高速側に設定すると、電圧が下がる分、トルクを出すための電流の増大を招くため、インバータ素子のランクアップや質量増加につながってくる。これらを総合的に考慮し、V/f一定の終端速度は従来の誘導電動機より高く設定した。

4.2 継ぎ手ゴム

(1) 緩衝の考え方

モータは、継ぎ手ゴムというバネによって車軸に吊り下げられているというモデル（図7参照）となるため、上下方向の振動変位を与えられた際の固有周期Tは、モータの質量と継ぎ手ゴムのバネ定数によって決まる振動の方程式（4）で表される。

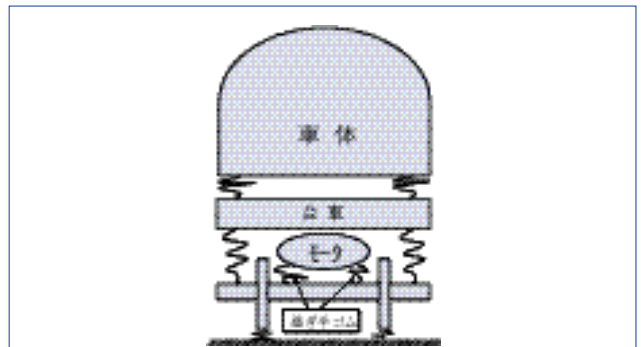


図7：バネモデル

$$T = 2 \sqrt{W / (G \cdot K)} \quad (4)$$

T : 固有周期 (s) W : モータ質量 (kg) s^2/m

G : 重力加速度 $9.8 (m/s^2)$ K : 継ぎ手ゴムバネ定数 (kg/m)

このモータ質量による荷重（振幅）変動は、徐々に減衰するため、最大荷重の発生時期は、図8に示すように、固有周期Tの4分の1となる。レール継目等通過時の輪軸による衝撃荷重の作用時間をtとした場合、 $t < T/4$ とすることで2つの荷重の重畳を回避することができる。

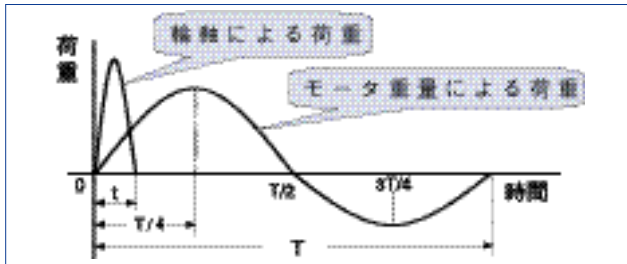


図8：振動荷重

(2) バネ定数の検討

継ぎ手ゴムバネ定数の設定にあたっては、台車・車体・軌道を含めたバネマスモデルを用いて、軌道への影響等をシミュレーションした。このシミュレーションの実施にあたっては、

従来の平行カルダン方式と同等の、レールへの衝撃緩和効果等をもつこと

レール継目等の連続通過においても、重畳現象が発生しないこと

主電動機の使用回転数範囲内において車体との共振、及び主電動機本体の振れ回り・ねじれ共振がないこと
 ゴムが経年劣化した場合においても、上記条件を満足すること

などの条件を考慮した。

4.3 インバータ装置

4.3.1 主要諸元

インバータ装置の主要諸元を表3に、外観を図9に示す。

表3：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
構成	(主電動機容量160kW×2)×2箱
方式	2レベル3相電圧形PWM
素子	IGBT3300V-1200A(モジュール)
冷却方式	ヒートパイプ自然冷却



図9：インバータ装置外観

4.3.2 主回路ツナギ

主回路ツナギ概略図を図10に示す。主電動機は同期電動機一種であるため、制御単位は同期電動機特有の1インバータ1モータ個別制御になる他、インバータアーム短絡時等に、主電動機内の永久磁石による誘起電圧からインバータを保護することを目的として、インバータ～主電動機間に開放遮断器を設けた。

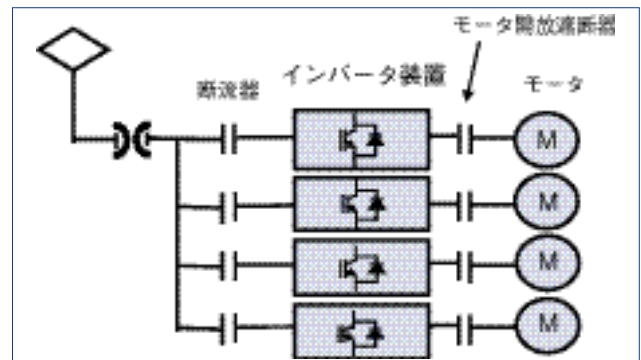


図10：主回路ツナギ概略図

4.3.3 制御

主電動機出力トルクを安定かつ精度よく制御するべくトルク制御を行う手段として、固定子に対する回転子位置(回転角)をレゾルバ(回転角度検出器)により検出することとした。

制御ブロックを図11に示す。主電動機出力トルク T_q は前述の式(1)から、電流実効値が同じであってもd軸電流とq軸電流の比率が異なると出力トルクが変化する

ことがわかる。制御ブロック図中のベクトル制御演算部においては、最も少ない電流実効値で、与えられたトルク指令パターンに追従するトルクを出力することが可能なd軸電流指令 I_d 、q軸電流指令 I_q を、設定していた関数に従って出力する。電圧指令演算部では電流のフィードバックにより、主電動機に流れる電流 i_d 、 i_q が電流指令値に追従するように出力電圧を操作し、電流瞬時値制御を行う。

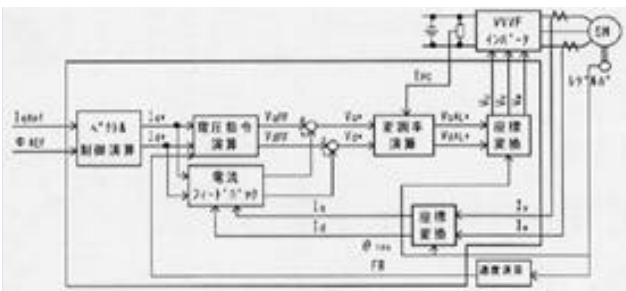


図11：制御ブロック図

また、永久磁石同期電動機では、永久磁石の磁束により主電動機には回転数に比例した誘起電圧が発生する。そのため、高速域においては弱め磁束電流を流すことで、力行時は誘起電圧をインバータの制御し得る電圧内に抑える制御、同様に惰行時は再生モードとなることを抑える制御を行うこととした。

表4：制御モード

モード	速度域	制御モード	電流制御
力行 回生	中速	トルク電流制御	q軸電流=トルク分 d軸電流=リアクタンストルク分
	高速	弱め磁束制御	q軸電流=トルク分 d軸電流=弱め磁束分
だ行	中速	ゲートオフ	—
	高速	弱め磁束制御 (だ行制御)	q軸電流=0 d軸電流=弱め磁束分

5 試験

5.1 定置試験

定置試験は、台車を模擬した試験台とモータを反力受け棒で接続し、インバータ装置と組み合わせての各種評価を実施した。試験状況を図12に示す。



図12：試験状況

5.1.1 主電動機

(1) 特性

定格負荷特性試験結果を表-5に示す。試験結果から、ほぼ設計値とおりの特性を得られたことがわかる。効率については、従来の誘導電動機の約92%に対し約4%向上することができた。歯車駆動装置の動力伝達ロスの解消と合わせると、消費電力で約5~6%の省エネが期待できる。

表5：負荷特性試験（熱時）

	設計値	実測値
電圧 (V) / 電流 (A)	730/140	733/140
回転数 (rpm)	360	360
出力 (kW)	160	164.9
トルク (Nm)	4244	4374.3
効率 (%)	95.0	96.0
力率 (%)	95.0	96.6

(2) 温度

温度上昇試験結果を表6に示す。

表6：温度上昇試験結果

		設計値	実測値
冷却方式		全閉自冷（走行風ナシ）	
時間定格/電源		連続定格/インバータ駆動	
電圧(V)/電流(A)		730/140	728/140
上昇 温度 (K)	一次巻線	163	139
	永久磁石	130	129
	軸受	65	59

各部の温度上昇については、いずれも設計値内におさまることが確認できた。特に、一次巻線については、損失が設計値を下回り、かつフレームレス構造で直接冷却する方式としたこと等から、設計値を15%下回る結果となった。

(3) 騒音

最高速度120km/h相当における主電動機の単体騒音（周囲1m、無負荷）は、従来のカルダン駆動式誘導電動機と比較すると約15dB(A)の低減となった。実走行においては、カルダン駆動装置の騒音が解消されることを合わせると更なる効果が期待できる。

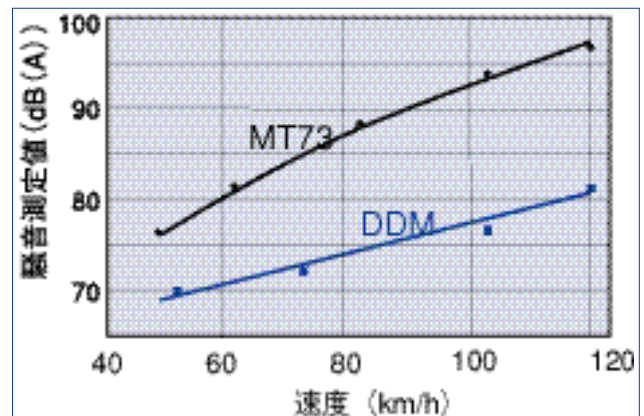


図13：モータ単体騒音

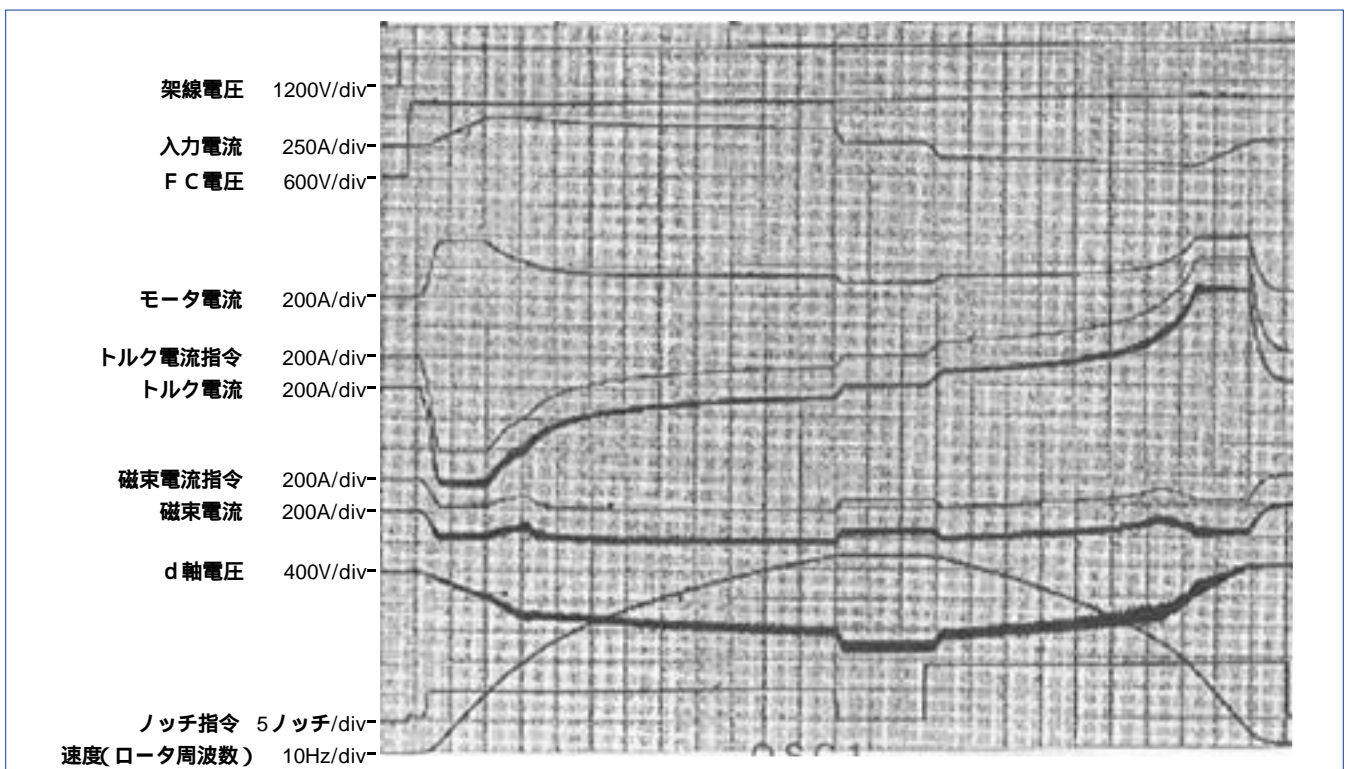


図14：試験チャート

5.1.2 制御

永久磁石の使用により主電動機には回転数に比例した誘起電圧が発生するため、弱め磁束制御等、誘導電動機には無い特有の制御を行っている。この特有の制御試験の結果について以下に説明する。

(1) 弱め磁束制御・だ行制御

力行・回生時共に高速域では架線電圧の高低に応じて弱め磁束制御が良好に動作することを確認した。例として、図14に120km/hまでの力行・惰行・回生の試験チャートを示す。80km/h以上でノッチオフした場合はゲートオンのまま弱め磁束電流を流し、トルクを発生させない惰行制御をおこなっているのが確認できる。

(2) 過渡応答試験

弱め磁束制御及び惰行制御中の回生負荷急変・回生負荷遮断においても、MMOCD（主電動機過電流）OVD（フィルタコンデンサ過電圧）動作に至らず良好にトルク制御を継続することを確認した。

力行・惰行・回生中の架線電圧急変においても、MMOCD、OVD動作に至らず良好に制御を継続することを確認した。

(3) 保護協調試験

インバータアーム短絡（CFD）試験、モータ過電流（MMOCD）試験、過電圧（OVD）試験において、いずれもゲートオフと同時に主電動機開放遮断器を開放することでインバータを保護することを確認した。

(4) 主電動機開放遮断器再投入試験

最高速度（120km/h）における主電動機開放遮断器再投入については、MMOCD等の保護動作することなく問題のないことを確認した。

5.2 走行試験

埼京線・川越線、中央線での走行試験で各種性能の評価を行なっている。以下に、これまでに確認できた概要

について説明する。

- (1) 永久磁石同期電動機特有の高速域における弱め磁束制御・だ行制御等の基本性能が良好であることを確認した。
- (2) 勾配起動・後退起動時の0km/h付近においてもモータ電流は安定しており良好に動作することを確認した。
- (3) 速度120km/hまでの走行における走行安全性を確認した。また、継ぎ手により主電動機振動が軽減されていることを確認した。
- (4) 散水による力行・ブレーキ試験において、空転・滑走に至ることなく良好に再粘着することを確認した。
- (5) 車外騒音（速度120km/h時）については、同区間を走行する205系電車（速度100km/h時）と比較して、約5dB（A）の低減効果があることを確認した。

6 まとめと今後の進め方

現在までの走行試験で、計画の機能・性能が良好であることを確認した。今後は、耐久性の評価を中心とした走り込みを行なうことで、本システムの総合評価を行なっていく計画である。

参考文献

- (1) 神孫子、古賀 他：次世代通気電車用直接駆動システム（全閉自冷IPM方式）の開発
平成11年電気学会産業応用部門全国大会
- (2) 吉田、神孫子 他：直接駆動主電動機主回路システムの開発
第38回鉄道サイバネシンポジウム