

東武鉄道 10000 系電車更新用主回路システム

東武鉄道(株) 薄 賀 則
東武鉄道(株) 西木 勉

(株)日立製作所 村上 忠光
(株)日立製作所 鈴木 啓太
(株)日立製作所 鈴木 啓史

1. はじめに

10000 系電車は 8000 系の次世代通勤電車として 1983 年に登場した。主回路システムに界磁チョップ装置を採用し、現在も東武鉄道の主力車両として各路線で活躍している。図 1 に 10000 系電車の外観を示す。

1 次車の運用開始後既に 30 年が経過していることから、今後の予防保全を計画するにあたり界磁チョップ装置の延命化更新のための予備品を確保することを目的として、2013 年度から VVVF インバータ装置への主回路システム更新を実施することとした。

10000 系更新車の主回路システムには 2013 年 6 月より運用を開始した 60000 系主回路システムと同様、50000 系車に対して小型・軽量化を図った IGBT モジュール応用 2 レベルスナパレスインバータ装置を採用し、省エネルギー化に寄与している。

さらに、更新に伴い最新の制御技術を適用することにより、通勤車両としての運用により適した車両性能向上と機能追加を実現した。

本稿では、10000 系更新車主回路システムの概要について報告する。



図 1 10000 系電車の外観

2. 主回路システムの構成

更新を実施した編成は 5M5T の 10 両編成であり、Tc1-M1-M2-T1-M4-TM1-T2-M1-M2-Tc2 の組成となっている。

図 2 に M1 車・M2 車の主回路ツナギを示す。電車線は直流 1500V で、パンタグラフによる集電方式である。主回

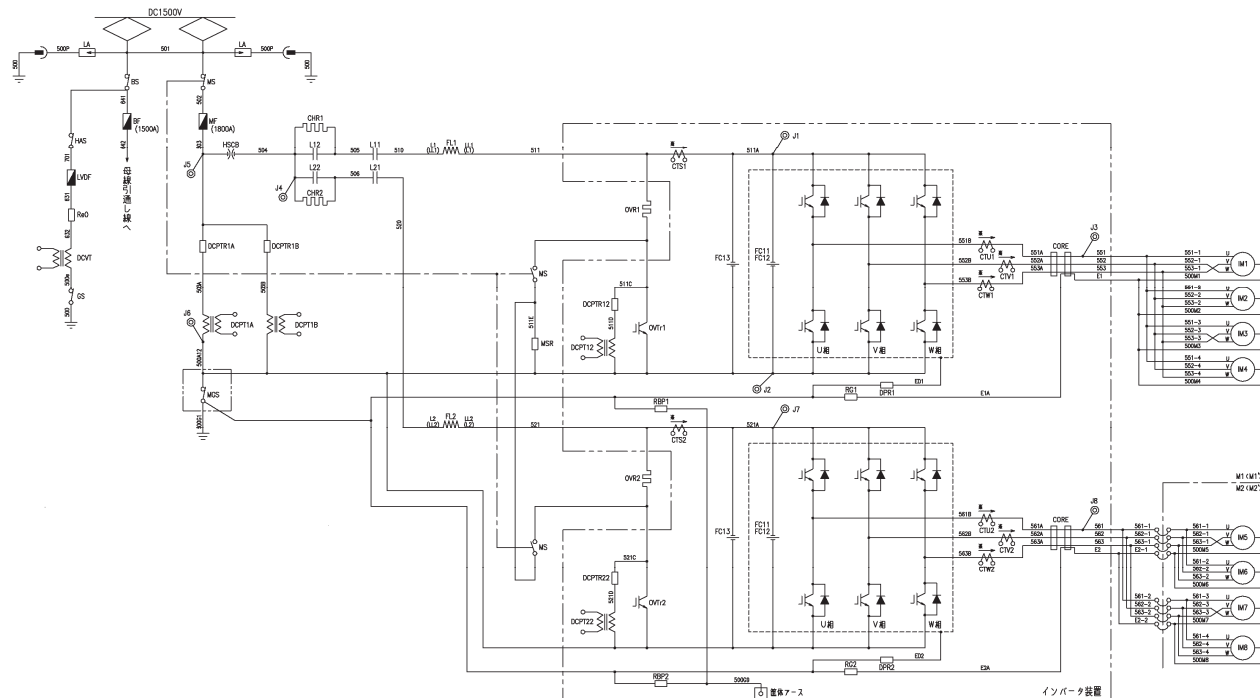


図 2 主回路ツナギ(M1車・M2車)

路ヒューズ MF、主断路器 MS、高速度遮断器 HSCB、電磁接触器 L12(L22)、L11(L21)を経由して 2 回路(2 群)分のインバータが接続される（これに対して、M4 車は 1 回路(1 群)分のインバータが接続される）。

インバータは 1 回路あたり 165kW の主電動機を 4 台一括制御可能な容量を有している。表 1 に主回路システムの主な仕様を示す。

表 1 主な仕様

項 目	仕 様
主回路構成	4 個モータ制御×1 群／2 群
制御容量	1722kVA×1 群／2 群
定格出力電圧	三相交流 1100V
インバータ出力周波数	0～169Hz
主電動機容量	165kW

表 1 に示す主回路システムへの更新とともに駆動装置の歯車比を 5.44→6.53 に変更したことにより、起動加速度を 2.5km/h/s→3.3km/h/s にアップさせることが可能となり、加速性能向上を実現した。

3. 主回路システムの概要

3. 1 大容量 IGBT の採用

図 3 に 10000 系更新車インバータパワーユニットの外観を示す。

10000 系更新車においては 3300V 1500A 定格の大容量 IGBT を採用し、50000 系車の 3300V 600A 定格 IGBT を 3 並列接続した 2 レベルインバータ装置に対して単位素子あたりの電流量をアップさせた。これにより 165kW 主電動機 4 台を一括制御する性能を有しつつ実装する素子数を低減し、装置の小型化を図った。

また、大容量 IGBT は従来よりも導通損失を低くすることにより素子自体の発熱量を低減させ、冷却器の小型化に寄与している。

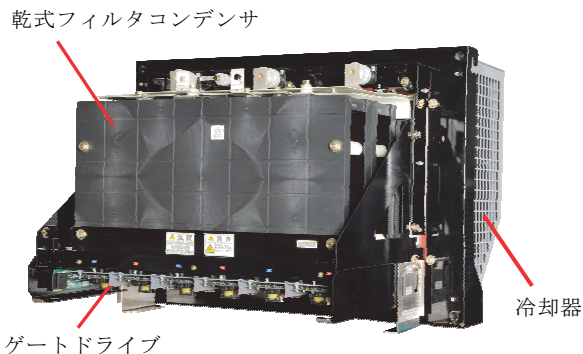


図 3. パワーユニットの外観

3. 2 冷却構造の高効率化

冷却器については熱流体解析により冷却効率が最大となるようヒートパイプの形状・配置を決定するとともにフ

イン材質をアルミ化した。これにより冷却器の小型・軽量化を実現した。

3. 3 主回路構造のシンプル化

50000 系車と同様スナバレス主回路を採用したことに加え、乾式タイプの軽量フィルタコンデンサを採用しパワーユニットとの一体構造とすることにより、更なる部品点数の削減による小型化・軽量化・高信頼化を図った。

また、従来パワーユニット中央部に配置していたゲートドライブをパワーユニット下部に配置して IGBT より発生する熱の影響を受けにくくすることで冷却ファンを不要として省保守化を図った。

4. 制御系の構成

4. 1 カスケードベクトル制御の採用

電流制御系においては高精度のトルク制御を実現すべくカスケードベクトル制御を採用した。

カスケードベクトル制御概略ブロックを図 4 に示す。電流制御系のモータ数式モデルと実モータとの挙動差を考慮し、電流制御部と電圧指令演算部の間にモータ数式モデルと実モータとの挙動差を補正する補正制御部を設けた。これによりトルク電流と励磁電流を独立して制御できるようになり、従来型ベクトル制御に対して高いトルク応答を実現し、粘着制御や回生負荷変動に対する性能向上を図った。

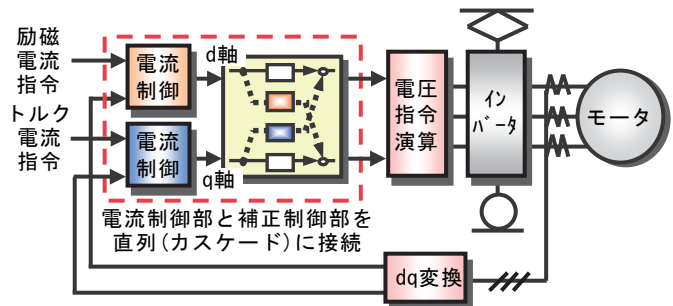


図 4 カスケードベクトル制御概略ブロック

4. 2 速度センサレス制御の採用

ベクトル制御技術を応用し、モータ電流を用いてロータ周波数の推定演算を行う速度センサレス制御を採用した。具体的にはトルク電流指令と励磁電流指令を用いて車両加速度を演算し、この演算値に対してトルク電流指令と実トルク電流の偏差を用いて常に補正演算を行うことにより正確なロータ周波数の推定を行う。

速度センサレス制御の採用により速度センサが不要となり省保守化を図ったほか、台車への主電動機取付スペースの確保を可能とした。

4. 3 新空転検知方式を用いた粘着制御の採用

速度センサレス制御は主電動機 4 台分の電流よりロータ周波数の推定演算を行うが、推定したロータ周波数の時間変化により空転加速度 dfr/dt を計算すると速度センサを使

用する場合よりも空転変化を捉えにくくなるため、空転変化をいかに早期に検知するかが課題として挙げられる。

10000系更新車においては、トルク電流指令と実トルク電流の偏差によるロータ周波数推定演算補正量がロータ周波数の変化量に相当することを利用して、トルク電流指令と実トルク電流の偏差より空転加速度 dfr/dt を演算して空転検知を行う粘着制御を導入し、空転検知の高速化を図った。

4.5 定速運転機能の追加

インバータ装置への更新に伴い、抑速運転機能を不要化するとともに定速運転機能を追加した。速度 20 km/h 以上において主幹制御器力行ハンドルを一旦 3N にセットした後、2N に戻して約 1 秒経過すると、その時点の速度を目標速度として定速運転モードに移行する。

10000系更新車では速度センサレス制御を採用しており、また外部から速度情報を得ることができない。そこで、定速運転中は力行動作・回生動作により常にロータ周波数の推定を行い、目標速度近辺では最小限のモータ電流を流すことで惰行に相当する制御動作を可能とした。

また、既存の引き通し回路を活用し、運転操作時に編成内の制御群が必ず全群同時に定速運転への移行・解除を行うようにする回路を追加した。

4.6 限流値増機能の追加

編成内に開放群が存在する場合、開放群が存在することを健全群にアナウンスする回路を追加するとともに、健全

群は自動的に限流値増動作に移行できる機能を追加した。万が一編成内で故障が発生しても極力加速性能を落とさずに走行することを可能とするとともに、勾配路線を容易に登坂可能とした。

4.7 その他制御技術

ベクトル制御技術の応用として、極低速域での高精度な速度推定演算が可能となったことにより、速度 0km/h まで電気制動を可能とする全電気ブレーキ制御を適用した。PWM 制御は、V/F 一定制御領域において素子損失低減と信号機器への誘導障害回避の両立を図るべく、非同期制御と同期制御を組み合わせた独自の設定を施した。さらに、低騒音化のための PWM 制御技術としてスペクトル拡散制御を適用した。キャリア周波数の整数倍まわりに集中する電磁騒音を、当該スペクトルを拡散することにより、耳障りな電磁騒音の低減を図った。

5. 装置の構造

本装置は VVVF インバータ制御装置と断流器箱にて構成しており、それぞれ M1 車用の「8 個モータ制御箱」と M3 車用の「4 個モータ制御箱」の 2 種類の箱が存在する。図 5 に 8 個モータ制御箱の外観を示す。

VVVF インバータ制御装置にはパワーユニット・フィルタコンデンサなどの主回路用機器と、ゲート論理部・電源部などの制御回路用機器を収納した。3 項にて述べたようにパワーユニットの小型・軽量化を図るとともに、収納機

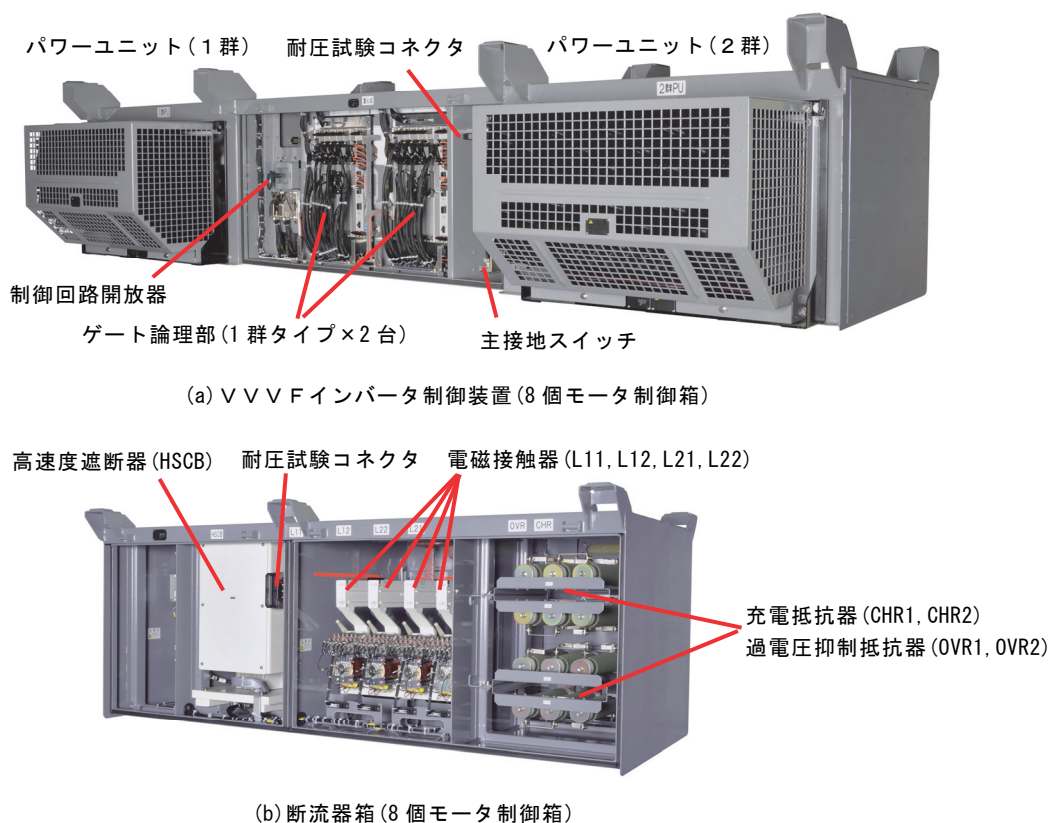


図5 VVVFインバータ制御装置・断流器箱の外観

収納機器については大部分を同時期に製作した 60000 系車と共通化し、さらに遮断器類については 50000 系車とも共通化することで、現場の予備品を管理し易くするよう配慮した。

力行 3 ノッチ、回生ブレーキ 7 ステップ時のそれぞれの測定結果を示したもので、安定して制御されており、目標加減速度についても設計値通りであることを確認した。

散水条件による粘着制御、軽負荷時の回生ブレーキ、定速運転制御、全電気停止ブレーキ制御の評価を行い、所望の性能が得られていることを確認した。

最後に、本装置の製作にご協力いただいた関係各位に
 し、厚くお礼申し上げる次第である。

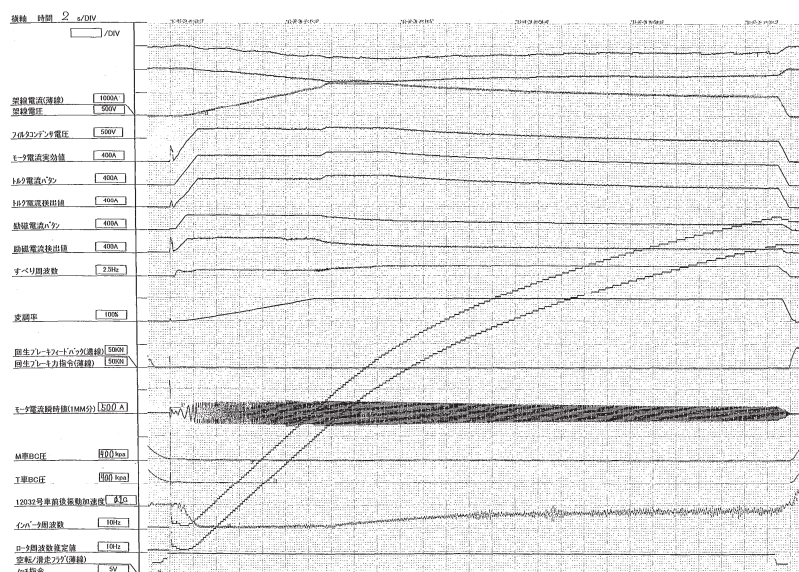


Figure 1 displays a series of 15 horizontal plots showing power spectrum (dB/Hz) versus frequency (Hz) on a logarithmic scale from 10 to 1000. The plots are labeled on the left with various test conditions and parameters. The top plot is labeled "100V" and "1000A". The second plot is labeled "1000V" and "1000A". The third plot is labeled "1000V" and "1000A". The fourth plot is labeled "1000V" and "1000A". The fifth plot is labeled "1000V" and "1000A". The sixth plot is labeled "1000V" and "1000A". The seventh plot is labeled "1000V" and "1000A". The eighth plot is labeled "1000V" and "1000A". The ninth plot is labeled "1000V" and "1000A". The tenth plot is labeled "1000V" and "1000A". The eleventh plot is labeled "1000V" and "1000A". The twelfth plot is labeled "1000V" and "1000A". The thirteenth plot is labeled "1000V" and "1000A". The fourteenth plot is labeled "1000V" and "1000A". The fifteenth plot is labeled "1000V" and "1000A". The plots show a general trend of decreasing power with increasing frequency, with some variations in the noise floor and peak levels.

(b) 回生ブレーキ 7 ステップ

図6 現車性能試験時のオシログラム