

電気車両へのベクトル制御の適用

Application of Vector Control to Electric Motor Units

長谷部 寿郎
T. Hasebe

中沢 洋介
Y. Nakazawa

戸田 伸一
S. Toda

一般産業用の誘導電動機制御方式はベクトル制御が一般的であるが、鉄道車両の駆動制御は、可変電圧可変周波数制御の低速域から電圧一定制御（180度通電：通称1パルス制御）の高速域まで、すべり周波数制御により行われてきた。

当社は、1パルス領域でのベクトル制御方法（以下、1パルスベクトル制御と呼ぶ）を開発し全速度領域にわたる高速なトルク応答を可能とした。ベクトル制御はすべり周波数制御に比べて誘導電動機のトルクをより速く目的の値に制御できる方式であり、空転滑走制御などの過渡現象に対する即応性が向上する。この制御方式を適用した車両はすでに営業運転に使用され始めており、今後の通勤、近郊電車をはじめ新幹線電車、電気機関車の誘導電動機制御方式として幅広く適用されていく予定である。

Slip frequency control has been widely applied to the control of induction motors in rolling stock. Vector control, commonly used in general industrial fields, was not applied because of the difficulty of its use in 1-pulse mode.

We have developed a new vector control system in 1-pulse mode that can be applied to motors in all speed ranges. This new control system enables the desired torque to be reached more rapidly compared to slip frequency control, and improves the transient response time against skidding, etc. This system has already been adapted for practical use in several electric motor units including commuter trains, Shinkansen trains, and electric locomotives, as our standard system for induction control.

1 まえがき

鉄道車両への誘導電動機駆動方式の適用は1980年代初めから始まり、新造される車両のほぼすべてが誘導電動機駆動となって久しい。

鉄道車両、特に電車の場合、床下の限られたスペースに各種機器を設置する必要があるが、一般産業用インバータとはやや異なるくふうをしながら発達している。その一つは、1台のインバータで複数台の誘導電動機を制御する方式であり、大容量GTO（Gate Turn Off thyristor）の発達に合わせて1インバータ8誘導電動機制御なども実用化されている。もう一つの特長は素子の利用率をなるべく多くとりインバータの小型・軽量化を図るため、全速度制御範囲の1/2以上を占める弱め界磁制御と、ほぼ同じ範囲の1パルス制御を行っていることがあげられる。

このような鉄道車両特有の1インバータ複数台電動機制御や電圧制御のできない1パルス制御領域の存在により、一般産業用ではすでに一般的となっているベクトル制御がなかなか適用されず、誘導電動機の最適設計と合わせた電圧周波数比一定制御をベースとしたすべり周波数制御が使用され続けた背景がある。

では鉄道車両ではベクトル制御が不要かという決してそのようなことはない。より速く（高加減速）、快適に（乗りごち良く）、安定した（過渡現象にも容易に追従する）制

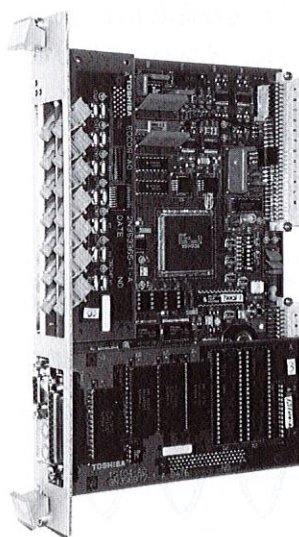


図1. ベクトル制御基板 ベクトル制御をつかさどる基板で、電力変換装置用に開発された32ビットプロセッサを使用している。

Printed circuit board for vector control using 32-bit CPU

御の実現のため、最近のIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）応用1インバータ1誘導電動機制御（鉄道車両ではこれを特に個別制御方式と呼ぶ）システムに、電力変換装置用として特に開発された32ビットプロセッサ（PP7）を使用したベクトル制御の適用が開始された（図1）。

2 ベクトル制御の原理

誘導電動機のベクトル制御は、誘導電動機のトルクを良好な過渡特性で高速に制御する方式である。このようなモータとしては、他励直流電動機が知られているが、誘導電動機でこれと同等以上のトルク制御性能を得られるのがベクトル制御である。

誘導電動機のベクトル制御には、大きく分けて二通りの方式（すべり周波数型と磁界オリエンテッド型）があるが、ここでは、当社が採用するすべり周波数型ベクトル制御について説明する。

すべり周波数型ベクトル制御は、従来から車両駆動用誘導電動機の制御方式として用いられている“すべり周波数制御”と同様に、トルク指令（ノッチ指令）の変化に応じて、すべり周波数とインバータ電圧の大きさを変化させると同時に、位相を瞬時に変化させる。これにより、従来制御に比べて格段に速いトルク応答を得るのがベクトル制御の特長である。

2.1 従来のすべり周波数制御との違い

誘導電動機トルクを1/2に変化させる場合のインバータ電圧、インバータ電流と誘導電動機誘起電圧のそれぞれの関係を図2に示す。どちらの制御でも最終的にはトルクが1/2となるすべり周波数にインバータ周波数を決定するのは同じであるが、ベクトル制御では、インバータ電圧の大きさと同時に位相を変化させるところに特長がある。

インバータから誘導電動機に流れ込む電流 I_1 は、図3の誘導電動機の等価回路に示すように、インバータ出力電圧 V_1 に対して、一次インピーダンス Z_1 の両端電圧 V_{L1} と誘起電圧 E_0 のベクトル関係で決定される。

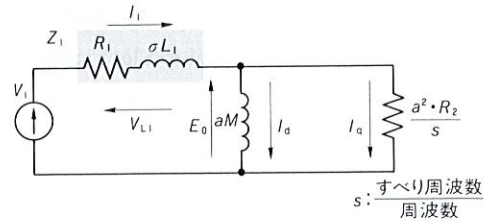


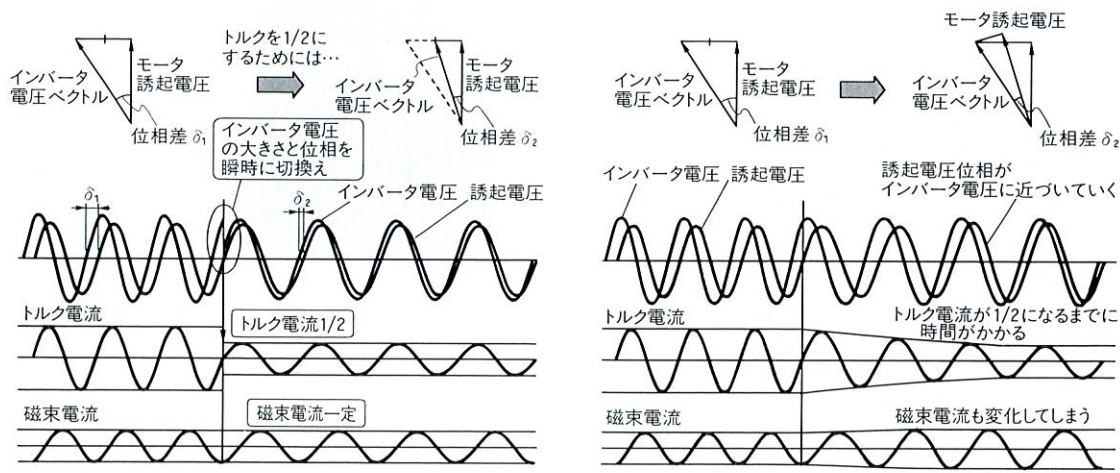
図3. 誘導電動機等価回路 一次インピーダンスによる位相遅れ、電圧降下を補償するのがベクトル制御である。
Equivalent circuit of induction motor

ベクトル制御の場合は図2に示すようにインバータ電圧の大きさと位相を瞬時に変化させて E_0 が変化しないように制御することで、磁束電流 I_d 一定でトルク電流 I_q だけを高速に1/2にすることができる。

誘導電動機出力トルクは磁束電流 I_d とトルク電流 I_q の積に比例するため、磁束電流 I_d が一定であればトルク電流 I_q の変化に応じて出力トルクも高速に変化する。

一方、従来のすべり周波数制御では、インバータ電圧の大きさ、位相は変化させずにすべり周波数、すなわち周波数そのものを変化させる。その結果、誘起電圧 E_0 が変化し、その変化により初めてインバータから流れ込む電流 I_1 が変化する。誘起電圧 E_0 の変化は誘導電動機の主磁束の変化によるものであるために応答は非常に遅く、結果的に電流制御応答速度も速くできないのである。

言いかえると、ベクトル制御は図3の一次インピーダンス σL_1 に対応する時定数で、すべり周波数制御は相互インダクタンス aM に対応する時定数で電流が変化する。この時定数の差を一般的な電車駆動用誘導電動機の定数と比較す



(a) ベクトル制御の場合

(b) 従来制御(すべり周波数制御)の場合

図2. すべり周波数制御とベクトル制御の違い すべり周波数制御では周波数が連続的に変化するのに対して、ベクトル制御では瞬時に位相を変化させる。

Difference between slip frequency control and vector control

ると、ベクトル制御の 10 ms 程度に対してすべり周波数制御では 100 ms 以上となり、応答速度に 10 倍以上の差が出る。

2.2 1パルス領域での制御

車両用インバータは床下の限られた空間の中に車両を駆動するのに必要な容量のインバータを搭載するために、小型・軽量化が特に求められる。小型・軽量化のために、インバータはスイッチング損失の最小化、出力電圧の最大化が可能な、いわゆる“1パルス制御”が用いられる。1パルス制御モードは、インバータの各アームが 180 度ずつオン-オフを繰り返すため、出力電圧としては入力電圧に対する理論最大電圧が出せるが、電圧調整能力はなくなる。

このような 1パルス制御では、厳密な意味でのベクトル制御は不可能である。誘導電動機のベクトル制御では、インバータ電圧の大きさと位相を瞬時に変化させることにより、高速なトルク制御を実現するが、1パルス制御では電圧の大きさ（振幅）を変えることができないためである。

しかし 1パルス制御モードにおいて、電圧の大きさを可変とすることはできないが、位相を瞬時に変化させることは可能である。この位相の高速変化を利用して、図 2(a)に示すようにモータ電流を瞬時に変化させることが可能になる。このとき、本来可変でなければならない電圧の大きさが固定されているため、出力トルクがトルク指令値からずれる。このずれ分を予測して出力トルクが指令値に一致するように電流の大きさを補正するのが、図 4 に示す制御システム構成中の磁束補正值演算部分である。

この制御により、トルク指令の急変に対しても実用的に十分に高速な制御応答（応答時定数 10 ms 程度）が得られるトルク制御方式（1パルスベクトル制御）を開発した。

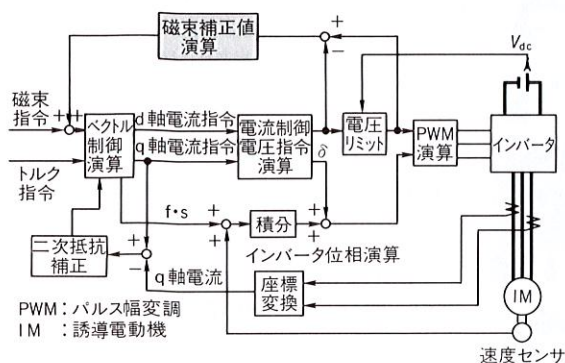


図 4. 1パルスベクトル制御システム構成 一般的なベクトル制御に対して、磁束補正值演算により電圧不足分のトルク電流を補正する。
Configuration of 1-pulse vector control system

3 ベクトル制御により実現する新機能

一般産業用、たとえばサーボモータのような高加減速を

必要とする用途に比べれば、車両の加減速はかなりゆっくりとしたものである。しかし、車両特有の現象である空転、滑走や、電源電圧急変を含む回生負荷急変など、制御応答速度の速いベクトル制御を適用することで実現する機能がある。

3.1 再粘着制御への適用

鉄の車輪が鉄のレールの上を回転して推進力を伝達する一般の鉄道車両では、レールと車輪間の摩擦力（これを粘着力と呼ぶ）を電動機出力トルクが上回ると空転や滑走が発生する。一般に空転速度が大きくなると、その空転を抑えるためには大きなトルク引下げが必要となり、加速力が大きく低下する。空転速度が小さいうちに、すばやく必要最小限のトルク引下げを行うと、加速力の低下を最小限に抑えることができる。

図 5 は空転速度と粘着力の関係を示している。通常、レールと車輪の間にはわずかな空転が存在し、乾燥状態から湿潤状態に変化しても最大粘着力は低下するが、わずかな空転速度で最大値となることは変わらない。この粘着力が最大となる空転速度につねに制御できれば、レールと車輪の間の粘着力をもっとも有効に使うことになる。この空転速度は通常 0.5 km/h 以下の小さな値であることが実験により確かめられており、誘導電動機のトルクと車輪の慣性係数からこの範囲内に制御するためには 10 ms 程度の制御応答速度が必要であることがわかる。制御応答速度が 100 ms を超える従来のすべり周波数制御でこの範囲に制御することは困難で、ベクトル制御の高速応答性を活用して新たな空転滑走制御を開発した。

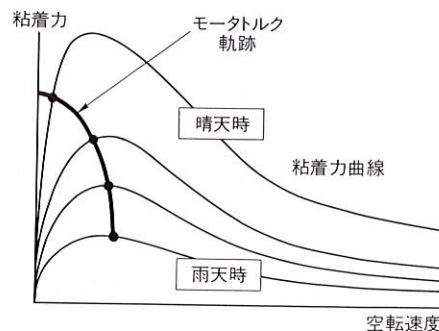


図 5. 空転速度に対するモータトルク軌跡 空転速度に対して、レールと車輪間の粘着力変化を考慮しモータトルクを制御する。
Motor torque locus to slip velocity

制御システム構成を図 6 に、実車両でレールに散水しながら行った試験時のチャートを図 7 に示す。

3.2 過渡現象に対する安定性の向上

車両特有の現象として、架線電圧変動が激しいことも制

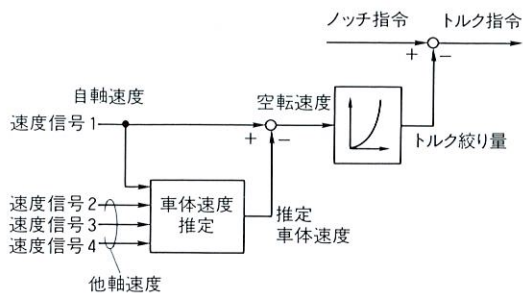


図6. 再粘着制御システム構成 複数の速度信号から車体速度を推定し、空転速度から最適なトルク絞り量を決定する。

Configuration of slip skid control system

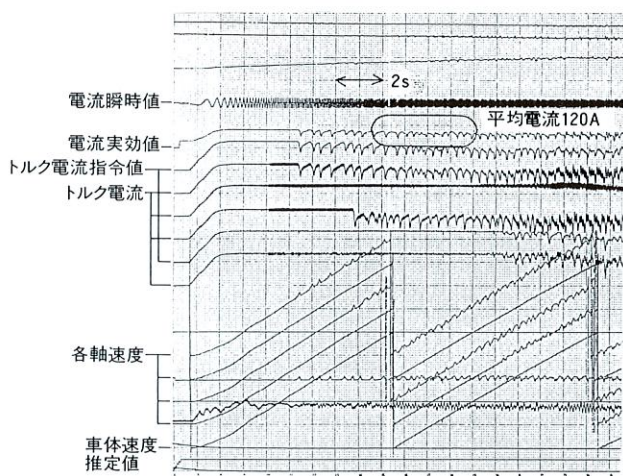


図7. 再粘着制御現車試験結果 実際の車両でレールに散水しながら空転を発生させた。

Test results for slip skid control

御を困難にしている要因の一つである。例えば、通常の通勤電車に使われている架線電圧は定格1,500Vであるが、時には1,200Vから1,800Vの間を変動することもある。また、回生ブレーキを使用している、違う場所で力行して回生負荷を消費していた車両が急にノッチオフして回生負荷が一瞬にしてなくなる、などといったことも多い。

このような場合、従来のすべり周波数制御では回生電力を急激に絞れないため電圧が急上昇し、過電圧検知などの保護でインバータが停止することがあった。しかしベクトル制御にすることで、回生電力制御、すなわち電動機のブレーキトルク制御を高速に行うことで、保護検知にかかることなく安定に制御できることも確認した。

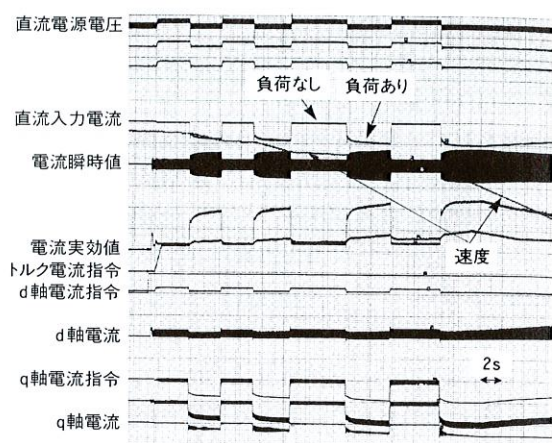


図8. 回生負荷急変試験結果 回生負荷を100%から0まで変化させた場合でも、過電圧などの保護動作は発生しない。

Test results for regenerative load transient

図8に社内での回生負荷急変試験結果チャートを示す。

4 あとがき

鉄道車両用誘導電動機の制御方式にもベクトル制御の時代が訪れた。電圧固定の1パルス領域におけるベクトル制御の開発は、全速度域における再粘着制御や過渡変動に対する安定性など、従来の制御に比べて格段に優れた能力のあることが実証されつつある。

今後は、1インバータ複数台並列駆動方式への適用も含めて、幅広く適用していく予定である。



長谷部 寿郎 Toshio Hasebe

府中工場 交通システム部副参事。
車両用電気システムの技術業務に従事。電気学会会員。
Fuchu Works



中沢 洋介 Yousuke Nakazawa

重電技術研究所 エレクトロニクス技術開発部。
パワーエレクトロニクスシステムの研究開発に従事。電気学会会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.



戸田 伸一 Sin'ichi Toda

府中工場 ドライブシステム部。
車両用制御装置の開発に従事。電気学会会員。
Fuchu Works