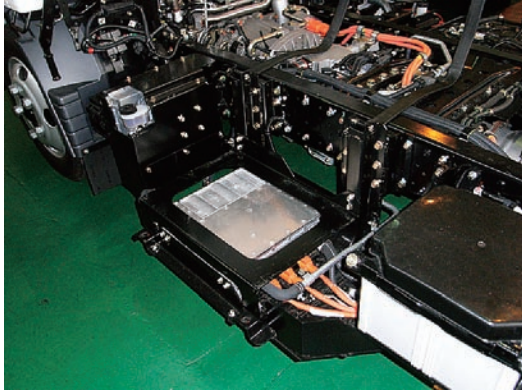


特 集 論 文

EV モータ用低損失インバータの開発

Development of the Inverter to Decrease Loss for Electric Vehicle (EV) Motor



大久保 光一^{*1}
Koichi Okubo

桒田 真喜夫^{*2}
Makio Masuda

加藤 義樹^{*2}
Yoshiki Kato

中谷 豊^{*3}
Yutaka Nakatani

近年地球温暖化防止に与える影響が大きい CO₂ の排出抑制対策が急務の課題である。自動車に対しては燃費向上の要求、排気規制が強化され、環境へのニーズが高まりつつある。当社では、2006 年 5 月より、ハイブリッド小型トラック用モータ・インバータの量産を開始し、排気ガス規制に対応した環境車に寄与してきた。今回新たに、スイッチング周波数を切り換えることでパワー素子損失を抑え、モータを効率よく運転するための制御方式を用いたインバータを開発したので報告する。

1. はじめに

近年、地球温暖化防止に与える影響が大きい CO₂ の排出抑制対策が急務の課題である。特に、CO₂ 総排出量における自動車の比率は高く、自動車業界においては、CO₂ 排出量抑制のため、ハイブリッド車や電気自動車の普及に注力している。

当社では、2006 年 5 月より、ハイブリッド小型トラック用モータ・インバータの量産を開始し、排気ガス規制に対応した環境車に寄与してきた。今後更に、トラックのハイブリッド化が進む傾向であり、当社としても、効率よくモータを駆動させて、燃費を向上し、環境への貢献を行っていく必要がある。

本稿では、モータの運転効率を高める一手法として、インバータ損失を抑えるための制御方式を新たに開発

したので紹介する。

2. インバータ基本制御システム

EV モータとしては埋込永久磁石同期モータ (IPM モータ) が一般的である。IPM モータは、トルク指令に応じて電流制御を行う。その制御ブロック図を図 1 に示す。

3 相の電流センサ検出値を 3 相から 2 相 (d・q 軸) に座標変換し、d・q 軸座標系で電流フィードバック制御を行う。d・q 軸座標系は回転座標系のため、電流をトルク成分と弱め界磁成分に分けて電流ベクトル制御を行っている。

高速域では誘起電圧が電源電圧より高くなり、電流が流せなくなる。これを防ぐため、負の d 軸電流を流すことで d 軸方向の磁束を減少させ誘起電圧を低

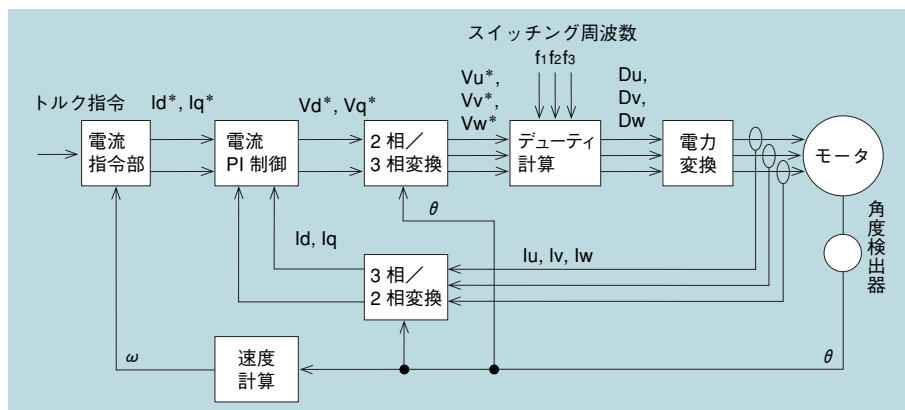


図 1 モータ・インバータ制御ブロック図

トルク指令に応じて電流制御を実施し、スイッチング周波数に応じて制御する。

^{*1} 神戸造船所先端製品・機械システム部 EV モータ技術課長

^{*2} 神戸造船所先端製品・機械システム部 EV モータ技術課主席

^{*3} 神戸造船所先端製品・機械システム部 EV モータ技術課

く抑える弱め界磁制御が一般に行われている。

IPM モータシステムの基本ハードウェア構成を図2に示す。インバータは車載の観点から、小型化・高効率化が要求される。しかし、EV モータ駆動のためには大電流が必要であり、インバータ内のパワー素子である IGBT モジュールの発熱が小型化・高効率化の妨げとなっていた。IGBT モジュール発熱（全損失）は図3に示す要因に分類される。

このうち、IGBT スイッチング損失と FWD 逆回復損失はスイッチング周波数に比例して増大し、また、いずれの損失も電流が増加するに従って大きくなる。つまり、スイッチング周波数や電流が増加するほど、パワー素子の損失・発熱が増大する。発熱増加に対応しようとする、パワー素子や冷却系の大型化、もしくは、電流抑制の必要から性能が制限される。この問題に対応するため、当社では、スイッチング周波数切り換え制御を用いた。

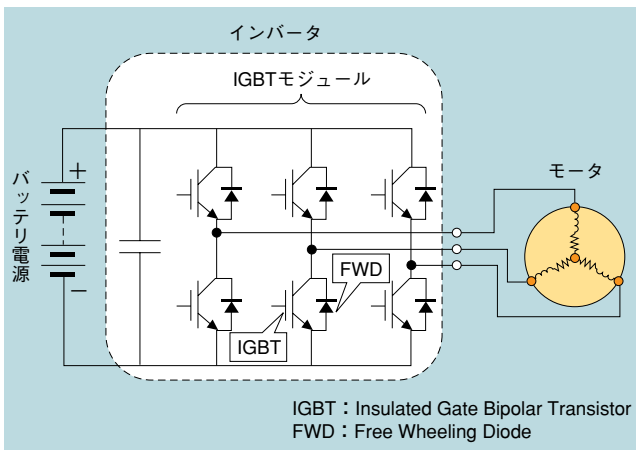


図2 基本ハードウェア構成
IGBT を PWM 制御し、モータを運転する。



図3 パワー素子の全損失
パワー素子損失の要因は4種類に分けられる。

3. 低損失モータ制御方式

PWM 制御方式では、モータを高速回転させる場合、制御性を確保するため、モータ電流の正弦波周波数が高くなるのに対応して、スイッチング周波数を高く設定する必要がある。しかし、大電流が流れる低速域では、高いスイッチング周波数は必要ない。EV モータ

の運転では、一般に高速域での運転時間は少ないにもかかわらず、スイッチング周波数を常に高速域に合わせる必要があるため、無駄なスイッチング損失が多くなり効率が低下する。そこで、インバータの制御では、モータ回転数に応じ、図4のように、スイッチング周波数を低速域・中速域・高速域の三段階に切り換えることを考えた。

このようなスイッチング周波数の切り換えを行うことで、低速域の発熱・損失を図4のように最小限に抑制できる。特に、発熱や損失が大きくなるに従って、パワー素子や冷却系が大型化するが、この発熱・損失が大幅に低減されることによりインバータ小型化が可能となる。

しかし、スイッチング周波数の切り換え時においては、トルク変動や異音が発生するという問題がある。これは、スイッチング周波数が異なることにより、電流制御システムに遅れが生じ、モータ電圧やモータ電流が変動することにより、トルク変動や異音が発生するためである。

当社では、上記の遅れを考慮した電流制御ソフトウェアを開発し、スイッチング周波数切り換え時のトルク変動や異音の発生を抑制している。

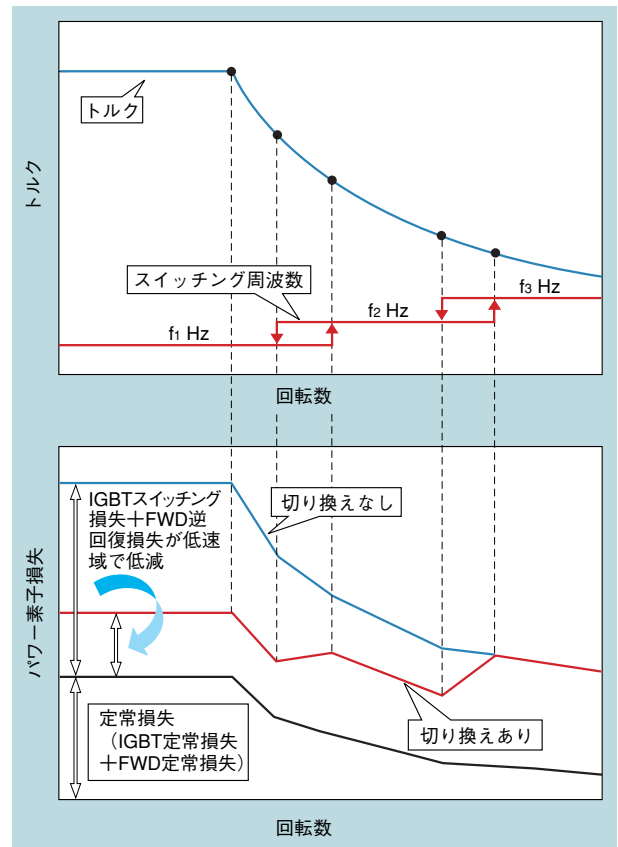


図4 スイッチング周波数の切り換えとパワー素子損失
上図は、N-T線図とスイッチング周波数の切り換え、
下図は、パワー素子損失の低減効果を示す。

4. 信頼性向上への取組み

4. 1 信頼性評価

インバータの製品信頼性の評価は、主要構成部品（パワー素子）について、部品毎に性能、温度、振動の各条件に対して、車載要求を満足するための評価を実施している。インバータ製品として、性能試験に加え、電気、温度環境、機械的負荷（振動、衝撃）、電磁妨害・電磁耐性（EMC）の車載に必要な試験を実施し、クリアしている。

また、2008年3月に、当社のEVモータ、インバータ製品に対して品質マネジメントシステム ISO/TS16949 を取得した。現在、その規格に準拠した品質マニュアルに基づき、製品設計、製造現場へ QMS を展開し、品質の維持に努めている。

4. 2 ソフトウェアの信頼性向上

これまで制御を司るインバータソフトウェアは、車載する車ごとにソフトウェアの設計を行ってきたが、これらのソフトウェアについて、部品化再利用の観点から、機能による再編を行った。

インバータソフトウェアは、コアソフトウェア（制御演算の中核ソフトウェア）、ハードウェア依存ソフトウェア、車載別対応ソフトウェア（I/O 関連対応）に大別され、このうち、ソフトウェア全体の 40 % 近くを占めるコアソフトウェアについては、これまでのプログラム内容と実績からプログラムを選別し、共通化した。

また、インバータハードウェアのラインアップ化により、ラインアップに応じたプログラムを整備し、当

社標準 I/O 以外の指定がされた場合にのみ、追加設計を行うことで、ソフトウェア設計時間低減と信頼性向上を図っている。

5. おわりに

当社 EV モータ用低損失インバータの開発及び製品信頼性向上の取組みについて概要を紹介した。

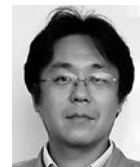
環境にやさしい自動車として、全世界でハイブリッド車、電気自動車など、様々な自動車の開発が加速されており、今後ますます、自動車の動力源としてモータが注目されてくる。当社は継続して EV モータの高効率化に取り組んできており、今後、更にモータによる回生エネルギーの回生率向上などを考慮し、低コスト、高性能モータシステムの開発を推進していく。

参考文献

- (1) 武田洋次ほか、埋込磁石同期モータの設計と制御、オーム社、第1版（2001）



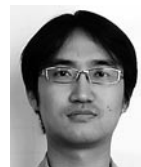
大久保光一



樹田真喜夫



加藤義樹



中谷豊