

修士学位論文要約（令和 4 年 3 月）

GaN on Si パワーデバイスを用いた EV 用モータの高周波 PWM 駆動方式に関する研究

小西 瑞生

指導教員：遠藤哲郎

Study on High-Frequency PWM Drive Technique with GaN on Si Power Devices for EV Motor

Mizuki KONISHI

Supervisor: Tetsuo ENDOH

In recent years, electric vehicles (xEVs) are expected to become widespread from the viewpoint of reducing CO₂ emissions, and as the technology trend for motors for xEVs is toward higher rotation speeds and more poles, inverters that can operate at higher frequencies are expected to meet this trend. The higher the carrier frequency of the inverter, the greater the distortion of the waveform due to dead time, which causes vibration and noise in the motor.

In this study, dead-time compensation was applied to an inverter driven at a high carrier frequency of 1.5MHz using GaN on Si power devices. The compensation of the error voltage was evaluated using oscilloscope waveforms and current distortion factor (THD). The waveform improvement effect of the dead-time compensation was confirmed from the research results. The results of this research will contribute to the improvement of the performance of motor drive systems for xEVs.

1. はじめに

CO₂ が地球環境に与える影響が問題視されており、電源構成の脱炭素化（再生可能エネルギーの主電源化）と CO₂ 排出量の少ない xEV の普及がセットとなり、脱炭素化社会への貢献が世界的に期待されている。xEV はモータを用いて車輪の駆動もしくはエンジンの補助および発電を行う。そのためバッテリーとモータ、直流電力を三相交流に変換し、モータの回転数とトルクを制御するインバータなどから構成されるモータ駆動システム（図 1 参照）が搭載されている。xEV 普及における課題として航続距離の短さや車両価格の高さが挙げられ、これらの課題を解決する高性能な車載モータ駆動システムが要求されている。また、xEV 向けモータの技術動向として出力密度向上のため、高回転化・多極化が進んでおり、高いキャリア周波数で駆動可能なインバータが期待されている。

キャリア周波数を高周波化する場合、スイッチングの回数が増加するため、スイッチング損失が増加しエネルギー変換効率が低下する。そのため、高周波駆動時でも損失増加幅が小さいパワーデバイスが必要となる。また、課題としてデッドタイム誤差電圧の増加がある。キャリア周波数を高周波化した場合、パルス幅が短くなり、スイッチング周期におけるデッドタイムの割合が大き

なるためデッドタイム誤差電圧が増加する。デッドタイム誤差電圧により、歪んだ電圧波形がインバータから出力される。その結果、モータ逆起電圧との間で歪んだ電流が流れるため、トルクや入力電流の脈動の原因となる。そこで、デッドタイム誤差電圧を補償するための制御則としてデッドタイム補償が研究されている。

本研究では高キャリア周波数でも低損失な GaN on Si パワーデバイスを適用したインバータを用いて、キャリア周波数 1.5 MHz 時にデッドタイム補償を適用した場合の動作評価を行った。

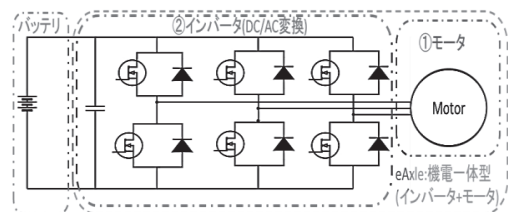


図 1: xEV 向けモータ駆動システムの例

2. デッドタイム誤差電圧

インバータの上下のパワーデバイスが同時にオンした場合、短絡電流が流れデバイス破損に至る。これを防ぐため、上下アームのパワーデバイスが同時にオフとなるデッドタイムと呼ばれるゲートオフ時間が存在する。PWM インバータではデバイスのオン時間とオフ時間の比であ

るデューティ比を変化させることで任意の電圧の出力を可能にしている。そのためデッドタイムの挿入によりオフ時間が変化した場合、出力電圧に誤差が発生する。

デッドタイムによる出力電圧の誤差は出力電圧の歪みにつながるため、モータ電流の歪みや直流入力電流の脈動の増加、トルク脈動の増加などの悪影響を及ぼす。

GaN on Si パワーデバイスは高速スイッチング動作が可能のため、デッドタイムを非常に 50 [ns] 以上と短く設定することができる。一方でキャリア周波数を高周波化していくに伴い、スイッチングの回数が増加するため、デッドタイム挿入の回数が増加する。このためデッドタイム誤差は高キャリア周波数化による波形改善を行う際に顕在化する問題と考えられる。

3. デッドタイム補償の実装

研究されているデッドタイム補償法は補償量の決定方法などから大きくフィードフォワード法とフィードバック法の2つに大別される。フィードフォワード法は補償量を予め計算し、電圧指令値に加算することで補償を実現している。実現が容易で計算時間が短いため高周波動作時でも追従が容易な一方で、補償量と実際の電圧誤差が異なる場合は誤差が残留するという問題がある[2]。フィードバック法はインバータの出力電圧および出力電流からデッドタイム誤差電圧を検出し、補償量を決定する。正確な補償が可能一方で、インバータの高周波電圧パルスの検出は難しく、演算負荷が大きいため、高周波動作のインバータへの追従は困難と考えられる[3]。

デッドタイム誤差電圧の大きさは理想的にはデバイスの電圧や電流に関連がなく予め計算できる点、同期モータを駆動するためには電流センサが必須であり、ハードウェアの追加を行うことなく実装可能等の理由から、本研究ではデッドタイム補償を高周波動作するインバータに適用するにあたり、フィードフォワード法を適用することとした。

4. デッドタイム補償実装時の電流波形

フィードフォワード型デッドタイム補償を実装し、モータ駆動の動作検証を行った。具体的にはデッドタイム補償の有無に対してオシロスコープで取得した電流波形と電力計で算出した電流歪み率 (THD : Total Harmonic Distortion) を用いて評価を行った。

図2にオシロスコープで観測したU相電流波形を示す。デッドタイム補償を実装することで電圧電流共に0付近の歪みが低減されていることが分かる。これはデッドタイム挿入によって消失していたデューティ比が小さい領域での電圧パルスが

補償により出力されたためと考えられる。また、図3にキャリア周波数に対する電流歪み率の変化を示す。デッドタイム補償を行うことによって、キャリア周波数の増加に伴う歪み率の増加を抑制できていることが分かる。

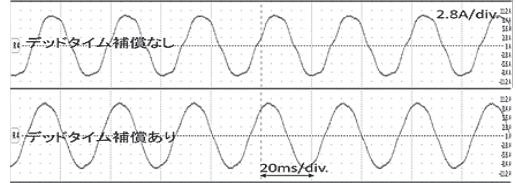


図2: U相電流波形

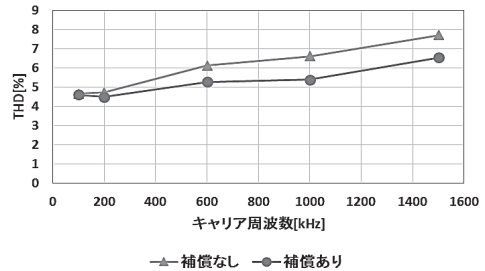


図3: キャリア周波数に対する THD の関係

5. まとめ

xEV 向けモータの技術動向として高回転化・多極化進行し、それに対応した高周波動作可能なインバータが期待されている。インバータのキャリア周波数を高周波化すると、デッドタイムによる波形の歪みが大きくなり、モータの振動及び騒音の原因となる。

本研究では GaN on Si パワーデバイスを適用した 1.5 MHz という極めて高いキャリア周波数で駆動するインバータに対し、デッドタイム補償を行い、誤差電圧の補償について検証を行った。研究結果よりフィードフォワード型デッドタイム補償での波形改善効果を確認した。本研究成果より自動車の電動化に貢献するものとする。

文献

- 1) 森本雅之 (2011) 入門インバータ工学 しくみから理解するインバータの技術 森北出版
- 2) J. Itoh and T. Hoshino: "Analysis of Dead-time Error Correction Properties for V/f Control with Disturbance Observer", Proc. of IEEJapan IAS 2006, Vol. 1, pp. 179-182 (2006)
- 3) 小川将司、小笠原悟司、竹本真紹: 「低ひずみと高い電圧利用率を有する高周波 PWM インバータのフィードバック型デッドタイム補償法」, 電気学会論文誌 D, Vol.133, No. 10, pp. 970-977, 2013 年 10 月