

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14009

研究課題名(和文)ポストシリコン時代に向けたフィードバックスイッチング制御法の開発

研究課題名(英文)Switching feedback control systems design for post silicon era

研究代表者

中村 文一(Nakamura, Hisakazu)

東京理科大学・理工学部電気電子情報工学科・准教授

研究者番号：70362837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、炭化珪素(SiC) MOSFETを用いた超音波モータ駆動用2相インバータを開発した。シリコンMOSFETを用いたインバータと比較して、制御性能が高く、消費電力が少なく、素子冷却装置も必要がないことが分かった。また、埋込永久磁石同期電動機制御のための不連続制御法を開発した。提案法は、SiC MOSFETを用いた3相インバータを使った実験結果により従来法と比較してエネルギー効率が高いことがわかった。

研究成果の概要(英文)：In this research, an SiC-MOSFET inverter has been developed. The developed inverter illustrated superior performance from the viewpoint of control performance and energy efficiency. Moreover, we have proposed a discontinuous feedback controller for an interior permanent magnet synchronous motor. The proposed control method demonstrated good energy efficiency by experiments.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 電気機器

### 1. 研究開始当初の背景

現代社会はシリコン(Si)半導体に支えられているが、近年量産が始まっている炭化珪素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)のような次世代半導体デバイスは従来のシリコン(Si)と比較してオン抵抗が小さく、スイッチング速度が大幅に向上する。これにより電力損失が大幅に削減されることが期待されており、風力発電機では Si IGBT を SiC MOSFET に置き換えることにより 5%以上発電エネルギー効率が向上したことが報告されている。

現在、これらの次世代デバイスは旧世代のデバイスを前提に開発された PWM (Pulse-Width Modulation) によって制御されている。PWM 制御は制御性能や電磁的両立性(EMC)対策の面から問題となることが多く、次世代制御法の開発は急務である。

一方制御理論的にスイッチング制御を考えると、非線形制御系に対する不連続制御に他ならない。制御性能の高い不連続制御法として、研究代表者らはこれまでに制御 Lyapunov 関数を用いた逆最適不連続制御則を提案している。

### 2. 研究の目的

本研究では、モータ駆動用に SiC MOSFET を用いたインバータを開発し、従来の Si デバイスを利用したインバータとモータ制御性能の面から比較を行う。また、これまでに研究代表者らが提案した不連続制御則の考え方を利用し、インバータを想定した非線形システムに対する不連続フィードバック制御則を開発する。さらに、開発した制御則を SiC デバイスにより構成されたインバータに実装し、実機実験により制御則の有効性を確認するを目的とする。

### 3. 研究の方法

研究の方法としては大きく実験機器開発と、制御法開発に分けて行った。

#### (1) 実機開発

##### SiC MOSFET の素子特性評価

最も基本的な電力変換回路は降圧チョップ回路である。研究代表者はまず SiC MOSFET を用いた降圧チョップ回路を製作し、その特性を把握した。

##### 超音波モータ駆動用 2 相インバータの開発

超音波モータの駆動回路として、これまで Si MOSFET を利用した 2 相インバータ回路が用いられてきた。ところが、超音波モータを駆動するために必要な高周波域でのスイッチングを実現するために、ヒートシンク等の冷却器を FET に搭載する必要があった。本

項目では、SiC MOSFET を用いた超音波モータ駆動用 2 相インバータを開発し、性能評価を行った。また、同一回路でスイッチング素子を Si MOSFET にしたインバータを製作し、比較を行った。さらに、直接スイッチング制御であるスライディングモード制御を用いて制御を行い、制御性能の評価を行った。

#### (2) 制御法開発

研究代表者らはこれまでに制御 Lyapunov 関数を用いた不連続逆最適制御法を提案しているが、本項では、制御 Lyapunov 関数を用いた 3 相交流電動機のための制御法を開発する。

### 4. 研究成果

#### (1) SiC MOSFET の特性評価

SiC MOSFET を用いた降圧チョップによるデバイス特性に関して以下の知見を得た。

SiC MOSFET は Si MOSFET と異なり、効率の良い MOSFET のオンオフ動作を行うためには、大きな電圧を印加する必要があることが把握できた。

SiC MOSFET は寄生容量が比較的大きいものが多く、またゲートを高電圧駆動するため、ゲートドライブ回路の素子特性が降圧チョップ回路の特性に大きな影響を及ぼすことが分かった。特に抵抗器のインダクタンス成分の影響が無視できないことが確認できた。

#### (2) 超音波モータ駆動用 2 相インバータの開発

本研究課題では、これまでに開発されていなかった SiC MOSFET を用いた位相差駆動型超音波モータ駆動用 2 相インバータを開発した(図 1、図 2)。開発したインバータを用いて実験を行った結果以下の成果を得た。

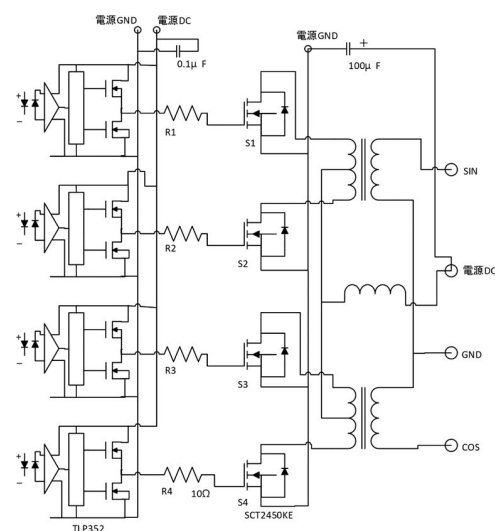


図 1 : 超音波モータドライバ回路

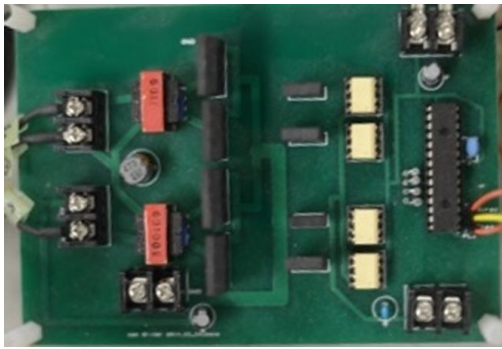


図 2 : SiC MOSFET 超音波モータドライバ

### 動作特性の評価

動作特性として SiC MOSFET のドレイン-ソース間電圧の評価を行った。図 3 に示すように、期待したとおりの良好な波形が得られた。また、300 秒間連続動作を行ったときの温度変化を図 4 に示す。おおむね 80 度程度で収束しており、SiC MOSFET が持つ高温でも動作可能である特徴を考慮すると冷却器がなくとも実用可能であることが示された。



図 3 : SiC MOSFET ドレイン-ソース間電圧

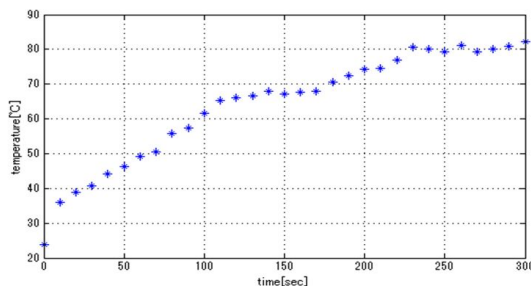
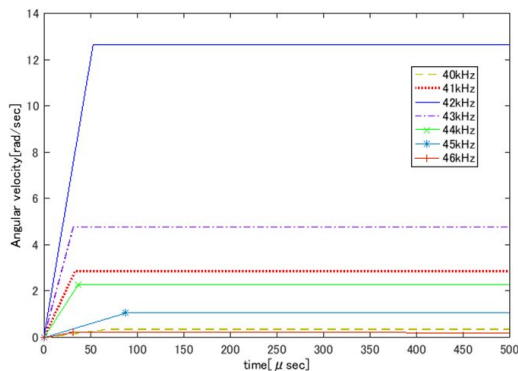


図 4 : SiC MOSFET 温度変化

ドライバに印加する駆動周波数を変化させたときのステップ応答を図 5 に示す。図より 100 マイクロ秒未満で定常回転速度に整定す



ることを確認できた。

図 5 : ステップ応答

### Si MOSFET との比較

同一回路を用い、スイッチング素子を Si MOSFET に変更したインバータを用いて比較実験を行った。図 6 に Si MOSFET のドレイン-ソース間電圧を示す。SiC と異なり、大きなスパイクが確認できる。この比較により、超音波モータドライバとして SiC MOSFET を用いることに大きな利点があることが確認できた。

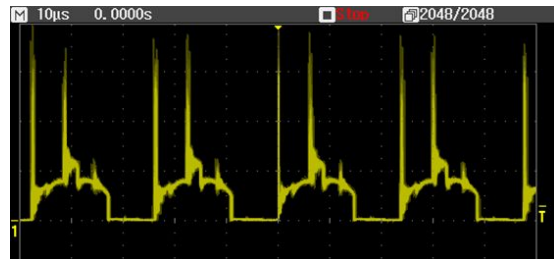
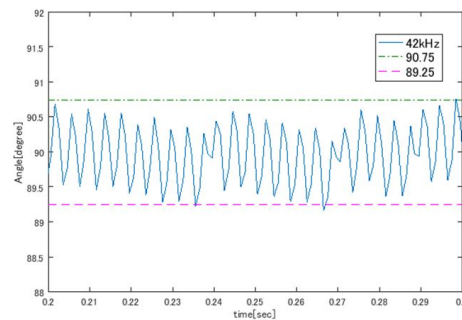


図 6 : SiC MOSFET ドレイン-ソース間電圧

### スライディングモード制御を用いた性能評価

スライディングモード制御は、フィードバックにより高速スイッチング動作を行う制御法であり、制御素子に大きな負荷を与える本項では、SiC と Si 両方のインバータを用いた制御性能の比較結果を示す。図 7 に SiC、図 8 に Si MOSFET のインバータを用いた、超音波モータの回転角度を 90 度に安定化する制御実験結果を示す。図 8 の Si MOSFET を用いた実験結果では応答波形が乱れているのに対し、図 7 の SiC MOSFET を用いた実験結果では再現性の高い角度応答が得られている。これより、特に制御器に大きな負荷を加える制御法を利用する際には、インバータの素子性能の違いが制御性能に大きな影響を



与えることが確認できた。

図 7 SiC MOSFET 制御実験結果

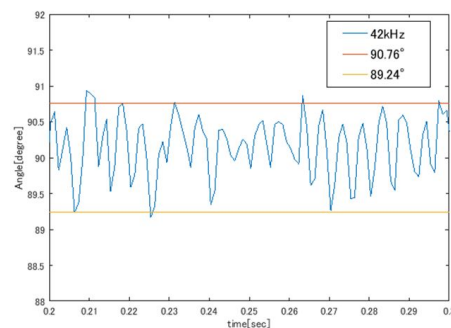


図 8 Si MOSFET 制御実験結果

(3) 制御法開発：埋込永久磁石同期電動機に対する動的銅損最小化制御則の開発

研究代表者らがこれまでに提案した制御 Lyapunov 関数を用いた動的銅損最小化制御法は、安定化可能領域に制限がある局所制御法であった。本研究課題では、複数の制御 Lyapunov 関数を、最小射影法によって合成することにより微分不可能な大域的制御 Lyapunov 関数の設計に成功した。また、設計した制御 Lyapunov 関数を用いた、不連続適応制御則を提案した。

(4) 予備実験の結果

(3)で開発した不連続制御則を、Si IGBT を用いた 3 相インバータを用いた埋込永久磁石同期電動機実験装置に実装した結果を表 1 に示す。表 1 において、平均瞬時銅損は、低回転速度域においてエネルギー消費の大半を占める、電動機の巻線抵抗により失われるエネルギーを示し、標準偏差は目標トルクと電動機出力トルクの差の標準偏差を示す。表 1 より、無負荷時における限定された実験結果ではあるものの、これまで実用的に利用されている Newton-Raphson 法と PI カスケード制御による制御法による実験結果と比較して大幅な銅損の減少が確認された。その一方、標準偏差は従来法と比較して提案法は悪化していることが確認できた。提案法は、エネルギー効率を改善するものの制御性能は良くないことがわかった。

表 1 同期電動機実験結果

	平均瞬時銅損 [W]	標準偏差 [Nm]
提案法	0.0819	0.0464
従来法	0.1649	0.0265

未だ予備実験の結果を出ないものであるが、提案法を SiC MOSFET を用いた 3 相インバータに実装して実験を行った。この結果、誤差標準偏差が大幅に改善することがわかった。これは、SiC MOSFET の持つ高速スイッチング性能により、制御性能の低い制御法を用いても良好な実験結果が得られることを示しているものである。

(5) 総括

以上の結果を総括すると、SiC MOSFET を用いた制御装置は、従来の Si デバイスを用いた制御装置と比較して大きな制御性能の改善をもたらす可能性を示している。これまで SiC デバイスは消費エネルギーの低減に着目されているが、制御性能という面でも大きな改善が見込めることが分かった。この特性より、今後の展望として、制御性能を低下させることなく、エネルギー効率に特化した制御法を利用することが可能ではないかと考えられる。これは電気機器制御における大きな知見だと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Natsuki Hamano, Hisakazu Nakamura, Global dynamic maximum torque per ampere control of interior permanent magnet synchronous motor by using nonsmooth control Lyapunov function, IFAC-PapersOnLine, 査読有, 印刷中, 2017.

〔学会発表〕(計 4 件)

石川 裕太郎, 濱野 夏輝, 中村 文一, 動的銅損最小化制御と id=0 制御の制御融合を用いた埋込型永久磁石同期電動機の適応制御, 第 59 回自動制御連合講演会, 2016 年 11 月 10 日~2016 年 11 月 12 日, 北九州国際会議場(福岡県北九州市)

Hiroshi Mano, Hisakazu Nakamura, Sliding mode control of ultrasonic motor with SiC-MOSFET inverter, SICE Annual Conference 2016, 2016 年 9 月 20 日~2016 年 9 月 23 日, つくば国際会議場(茨城県つくば市)

真野 宙, 中村 文一, SiC-MOSFET を用いた超音波モータのスライディングモード制御による位置制御, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015 年 11 月 14 日~2015 年 11 月 15 日, 神戸大学(兵庫県神戸市)

長谷川 貴史, 真野 宙, 中村 文一, 制御回路が超音波モータの制御性能に与える影響, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015 年 11 月 14 日~2015 年 11 月 15 日, 神戸大学(兵庫県神戸市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rs.tus.ac.jp/nakamura/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 文一 (NAKAMURA, Hisakazu)

東京理科大学・理工学部電気電子情報工学科・准教授

研究者番号: 70362837

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者