

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02134

研究課題名(和文) デバイス劣化診断技術を内蔵した超高信頼パワーエレクトロニクスシステム

研究課題名(英文) Ultra-reliable power electronics system with built-in power device degradation diagnosis technology

研究代表者

和田 圭二 (Wada, Keiji)

東京都立大学・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：00326018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではパワーエレクトロニクス回路の高信頼・長寿命化を実現することを目的に研究を行った。以下が主な成果である。(1)SiC-MOSFETの状態監視では、温度に左右されにくく、長期利用によるゲート酸化膜劣化に伴う電気的特性の変化を検出することが有効であることを示した。(2)MOSFETの入力容量を測定可能な新規パワーエレクトロニクス機器用のゲート駆動回路の開発を行った。(3)提案した新型回路を直流電圧500Vのパワーエレクトロニクス回路に適用し、デバイスの劣化を検出可能であることを実験で確認した。以上により、オンラインモニタリング機能を持つ回路の基礎技術を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、パワーエレクトロニクス回路の信頼性と長寿命化の向上を追求し、重要な成果を得た。学術的には、SiC-MOSFETの状態監視の適切な方法を明らかにし、新たなモニタリング回路の開発を達成した。また、提案した新型回路をパワーエレクトロニクス回路に適用し、その有用性を実証した。これらの成果は、次世代パワーエレクトロニクス設計のための重要な知見を提供するものである。社会的には、本研究はパワーエレクトロニクス技術の信頼性向上に寄与する。新しい回路設計と劣化検出方法は、これらのシステムの寿命を延ばし、予知保全を可能にすることができるために、その結果として経済的な利益と持続可能性の向上につながる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was to achieve high reliability and long life of power electronic circuits. The main results are as follows. (1) This study showed that SiC-MOSFET condition monitoring is effective in detecting changes in electrical characteristics associated with gate oxide film degradation due to long-term use, because SiC-MOSFETs are not easily affected by temperature. (2) This study developed a gate drive circuit for novel power electronics devices that can measure the input capacitance of MOSFETs. (3) The proposed new circuit was applied to a power electronics circuit with a DC voltage of 500 V, and experiments confirmed that it is capable of detecting device degradation. Through the above, this study have established the basic technology for circuits with on-line monitoring function.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーエレクトロニクス パワーデバイス オンラインモニタリング 信頼性

1. 研究開始当初の背景

これまで、パワーエレクトロニクス分野では電力変換回路の小型化と高効率化の実現に向け多くの研究開発が行われてきた。近年では、新たな応用先の一つとして航空機電動化が注目を集めている。航空機電動化の議論の背景には、二酸化炭素(CO₂) 排出規制が世界的な潮流であることに関連して、大型旅客機を含む航空機にもその要求がなされたためである。航空機の旅客数は今後 15 年で 2 倍に増加するとの予測も報告されており、航空機電動化の実現に向けて急速に進められようとしている。2019 年 10 月には空飛ぶタクシーの実証試験がシンガポールで行われることが発表された。また、2030 年にはジェットエンジンとモータを併用したハイブリッド航空機、2050 年には大型旅客機のオール電動化に関する提案も行われており、パワーエレクトロニクス分野において航空機応用を目指した「超高信頼パワーエレクトロニクスシステム」を必ず実現しなくてはならない。図 1 は、電動飛行機のイメージ図である。飛行機内部に搭載された発電機から、電力変換回路(インバータ)を介して任意の電圧振幅・周波数の三相交流に電力変換され、推進力を担うモータに電気エネルギーが送られる。図 2 は、実際の DC-AC 変換回路の実装図をイメージした図である。このように、パワーモジュール(パワーデバイス)を中心として、デジタル制御回路・コンデンサ・冷却器などの多数の部品から構成される。

古くから使われている電気機器の代表例である変圧器や誘導電動機、さらにはリアクトルなどの装置は寿命が 20~30 年以上であるものが数多く存在しており、現在でも電力設備を中心として数多く利用されている。その一方で、近年のパワーエレクトロニクス機器(DC-AC インバータ回路や DC-DC コンバータ)は家電・自動車・産業機器などに多数使用されているが、装置寿命が 10 年程度であると一般に認識されている。しかも、その装置故障は突発的に起こることが多々あるために、故障が許されない応用の場合には部品の定期交換による予防保全が必要となる。この方法は、壊れない回路の実現としては有効な方法の一つではあるが保守・点検に伴う人件費・部品交換による過大な費用が発生するという課題がある。パワーエレクトロニクスシステムは、電化製品・自動車・産業機器などの電源装置として幅広く利用されており社会基盤の一つであることから、さらなる高信頼化を追求する必要がある。パワーエレクトロニクス回路の長寿命化・高信頼化に関する議論は現時点では十分ではなく、未だ大きな課題として残っている。例えば、パワーエレクトロニクス回路の故障要因はパワーデバイスを含むモジュールとその近傍に接続するコンデンサが支配的であるとのデータが示されている。

現在、実際に使用中のシステム内部の局所的な温度計測のみによる故障判断技術は行われているが、パワーデバイスの電圧・電流をはじめとするオンライン情報は現時点では把握できておらず、故障要因や装置寿命を正確に予測するための内部情報が得られていないのが現実である。

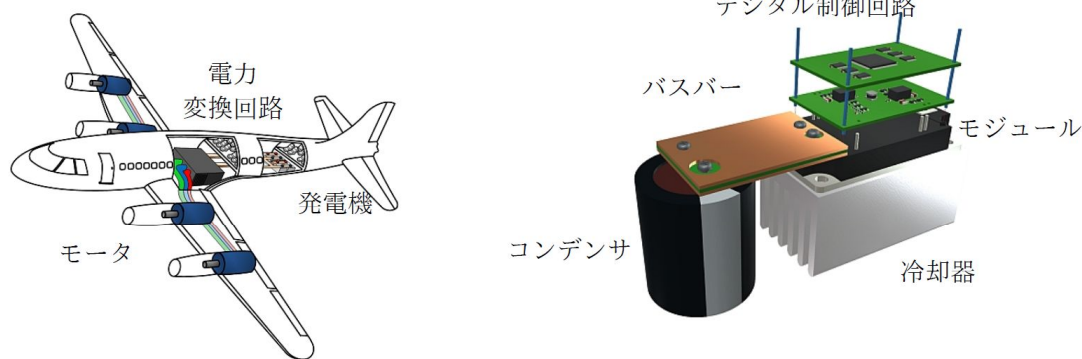


図 1: 電動飛行機のイメージ図

図 2: 現在の電力変換回路 (DC-AC 変換回路) のイメージ図

2. 研究の目的

本研究の目的は、高信頼パワーエレクトロニクスシステムの実現を目指して、運用中のシステムからパワーデバイスの劣化を検出する技術を確認し、突発的な故障停止を未然に防止することを目的とする。

この技術を確認させることによって、パワーエレクトロニクス回路の実動作環境下において内部情報から予知保全を実現できる。従来、パワーデバイスやコンデンサの劣化診断は実際の回路ではなく部品単体で行われていたが、当研究は実回路動作中の劣化診断を行おうとするものである。そのために、回路内部の電圧・電流波形検出の技術確認とそれらの波形からの劣化診断手法の開発を行う。本研究では、パワーエレクトロニクス回路を設計・製作し、当該研究の劣化診断術の妥当性を実験により検証する。

最終年度には、SiC パワーデバイスを用いたパワーエレクトロニクス回路の実装を行い、直流電圧 500 V の電力変換回路を対象にして本研究の妥当性を実験により立証する。

3. 研究の方法

(1) パワーデバイスの劣化診断技術の確認

パワーデバイスの劣化を検出するためには、劣化により変動する特性、すなわち劣化特性を得る必要がある。特に、動作中のパワーデバイスの劣化を検出するためには、実際に動作している中でどのような劣化が発生するかを評価する必要がある。

一般的に、パワーデバイスの劣化特性を得るためには、加速劣化試験が用いられる。従来の加速劣化試験は、単一のストレス条件でデバイスの劣化を加速させることに特徴を有する。単一のストレス条件は、特定の劣化原因を明らかにするには有効であるが、パワーデバイスの実動作条件である連続スイッチング条件下で発生する複合的なストレスの評価には適していない。

本研究では、パワーデバイスの実動作条件における劣化特性を得るために、連続スイッチング条件下において加速劣化試験を実施可能な装置を開発した。開発した加速劣化試験装置を用いて、パワーデバイスの劣化診断技術を確認し、オンラインで特性をモニタリングする「オンラインモニタリング回路」の開発をする。

(2) オンライン診断技術を実装したパワーエレクトロニクス回路実証

(1)で明らかにしたパワーデバイスの劣化特性のうち、パワーデバイスの容量-電圧特性の変動に着目した。容量-電圧特性の変動からパワーデバイスの劣化を検出することを目標にオンラインモニタリング回路を開発した。容量-電圧特性の測定方法は、デバイス分野においてすでに多くの手法が確認されている。その手法の中から、測定に必要な回路がパワーエレクトロニクス装置内への実装可能性を考慮してオンラインモニタリング回路の構成を決定する。

1.2 kV 耐圧の SiC-MOSFET を用いた電力変換回路を実装し、さらに MOSFET のゲート駆動回路に本研究課題で開発したオンラインモニタリング回路を実装し実験を行い、本研究の提案手法の妥当性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) パワーデバイスの劣化診断技術の確認

図 3 は、開発した加速劣化試験装置の回路図を示している。電圧を降圧する降圧チョップ回路と電圧を昇圧する昇圧チョップ回路を従属接続した回路構成となっている。被試験パワーデバイス (DUT) は、昇圧チョップ回路のトランジスタとして実装されており、実際に動作させることで連続スイッチング条件を達成している。また、本回路構成では電力を再生することが可能である。したがって、変換容量の大きなパワーデバイスの試験においても省エネルギーで試験を実施できることに特長を有している。また、図 4 は開発した加速劣化試験装置の外観を示している。

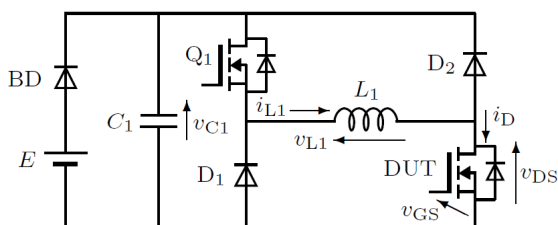


図 3. 開発した加速劣化試験装置の回路図

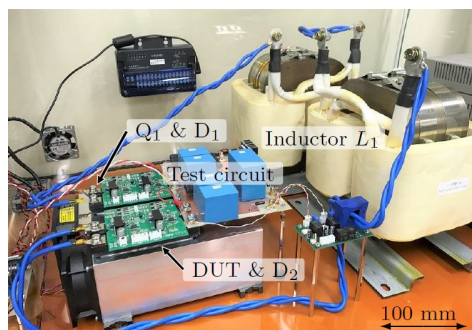


図 4. 開発した加速劣化試験装置の外観

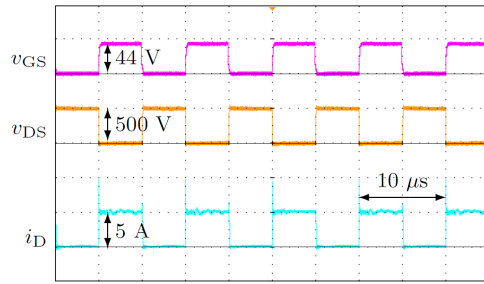


図 5. 加速劣化試験時の波形

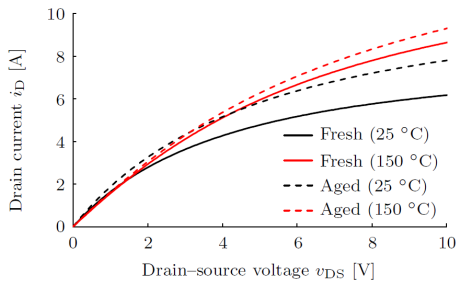


図 6. 劣化前後の電圧-電流特性

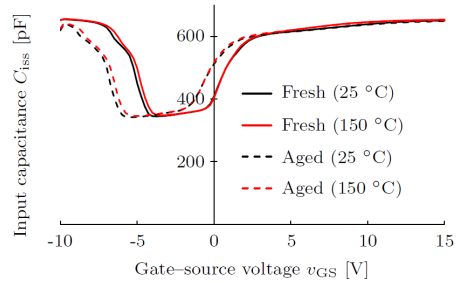


図 7. 劣化前後の容量-電圧特性

図 5 は、開発した加速劣化試験装置による試験中のパワーデバイスの電圧・電流波形を示している。連続スイッチング条件下において、定格以上のゲート・ソース間電圧 v_{GS} を印加することで寿命を加速している。図 6, 7 は、加速劣化試験前後のパワーデバイスの特性として電圧-電流特性と容量-電圧特性をそれぞれ示している。両特性の測定結果より、パワーデバイスが劣化することで両特性とも変動が発生することが明らかとなった。一方、パワーデバイスの電気的特性の多くは、温度依存性を有している。図 6 に示す通り、電圧-電流特性は室温 (25 °C) と高温 (150 °C) において特性が変動している。したがって、劣化による特性変動と温度による特性変動を切り分ける必要がある。しかしながら、パワーデバイスの正確な温度を測定する技術は、いまだ研究段階であり実用化には高いハードルがある。一方、図 7 に示す通り、容量-電圧特性は温度による特性変動がほとんど見られない。したがって、容量-電圧特性を測定することでパワーデバイスが劣化していることを特定することが可能である。

以上より、本研究では、パワーデバイスの劣化検出を目的としたオンラインモニタリングにおいて、容量-電圧特性を測定することが適していることを成果として挙げた。

(2) オンライン診断技術を実装したパワーエレクトロニクス回路実証

容量-電圧特性をパワーエレクトロニクス装置内で測定するための回路として、オンラインモニタリング機能を有するゲート駆動回路を開発した。ゲート駆動回路は、パワーデバイスを駆動するための電圧波形を出力する回路である。図 8 は、開発したゲート駆動回路を含むシステムの概略図を示している。直流電圧 500 V の降圧チョップパ回路に実装されたパワーデバイスを対象にゲート駆動及び容量-電圧特性のオンラインモニタリングが可能なシステムとなっている。開発したゲート駆動回路の特長として、信号絶縁にアナログアイソレータを用いることでパワーデバイスの駆動に必要な矩形波状電圧と、オンラインモニタリングに必要な階段状電圧の両方を出力できる点が挙げられる。

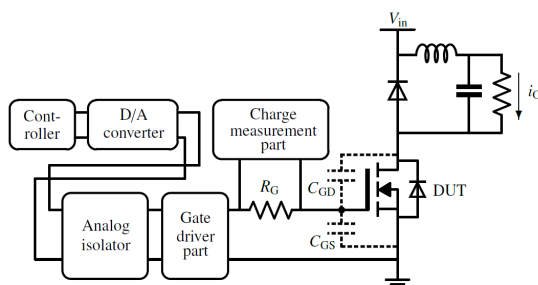


図 8. オンラインモニタリングシステムの概略図

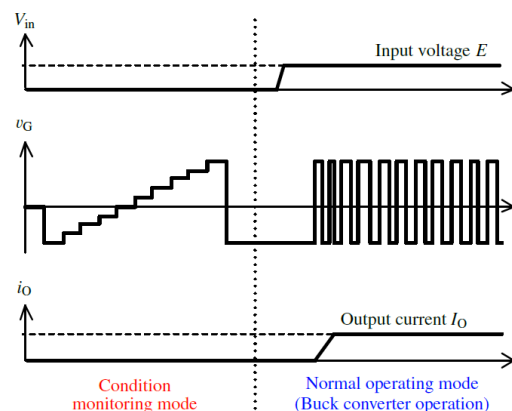


図 9. オンラインモニタリングシステム動作時の理論波形

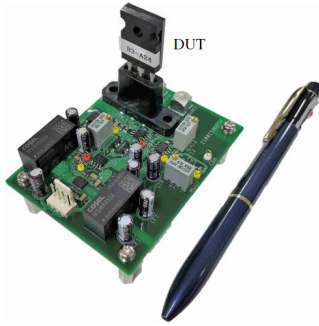


図 10. 製作したオンラインモニタリング機能を有するゲート駆動回路

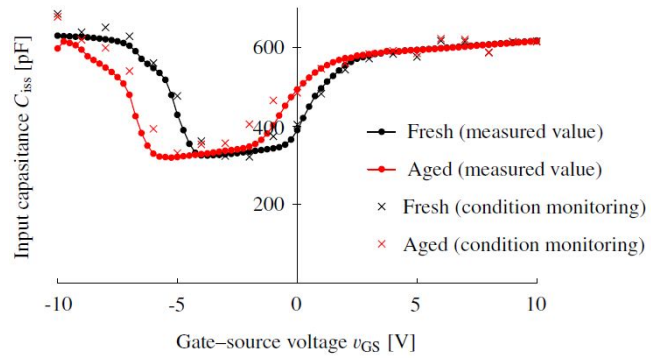


図 11. オンラインモニタリング回路によるパワーデバイスの劣化特性測定結果

図 9 は、オンラインモニタリングシステム動作時の理論波形を示している。開発したオンラインモニタリングシステムは、パワーエレクトロニクス装置の起動前に容量-電圧特性の測定を実施し、その後一般的なゲート駆動回路と同様に矩形波電圧を出力することでパワーデバイスを駆動する。

図 10 は、製作したオンラインモニタリング機能を有するゲート駆動回路を示している。製作した回路を用いて、実際にパワーデバイスの容量-電圧特性をオンラインモニタリングした。図 11 は、オンラインモニタリング回路によるパワーデバイスの劣化特性測定結果を示している。図 11 より、事前に測定器で測定した容量-電圧特性とオンラインモニタリングした容量-電圧特性は良好に一致していることが確認できた。

以上より、パワーデバイスの劣化検出を目的としたオンラインモニタリング機能を有するゲート駆動回路の開発とその実験検証結果により、パワーエレクトロニクス回路の実動作環境下において回路の内部情報から予知保全をするための基盤技術を確立することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shin-Ichiro Hayashi, Keiji Wada	4. 巻 126
2. 論文標題 Accelerated aging for gate oxide of SiC MOSFETs under continuous switching conditions by applying advanced HTGB test	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Microelectronics Reliability	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.microrel.2021.114213	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shin-Ichiro Hayashi, Keiji Wada	4. 巻 11
2. 論文標題 Design a Continuous Switching Test Circuit for Power Devices to Evaluate Reliability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 108-116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.21004267	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 三井晃司, 和田圭二	4. 巻 140
2. 論文標題 スイッチング波形最適化を目的としたバスバー配線構造設計	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 817-825
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.140.817	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshikazu Kuwabara, Keiji Wada, Jean-Michel Guichon, Jean-Luc Schanen, James Roudet	4. 巻 8
2. 論文標題 Design of an Integrated Air Coil for Current Sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS	6. 最初と最後の頁 4122-4129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JESTPE.2020.2977102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shin-Ichiro Hayashi, Keiji Wada	4. 巻 114
2. 論文標題 Accelerated aging test for gate-oxide degradation in SiC MOSFETs for condition monitoring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microelectronics Reliability	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.microrel.2020.113777	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Shin-Ichiro Hayashi, Keiji Wada
2. 発表標題 Gate oxide degradation characteristics of SiC MOSFETs under continuous switching conditions
3. 学会等名 The 32nd European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shin-Ichiro Hayashi, Keiji Wada
2. 発表標題 Gate Drive Circuit Having In Situ Condition Monitoring System for Detecting Gate Oxide Degradation of SiC MOSFETs
3. 学会等名 The IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 20 22 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林真一郎, 和田圭二
2. 発表標題 パワー半導体デバイスの状態監視を目的とした入力容量 C _{iss} v GS 特性の測定 機能を有するゲート駆動回路の動作検証
3. 学会等名 電気学会電子デバイス・半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤崎勇生, 和田圭二
2. 発表標題 ミラープラトール電圧に着目したパワーデバイスの状態監視回路
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林真一郎, 和田圭二
2. 発表標題 パワーデバイスを対象とした電力回生型連続スイッチング試験装置
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shin-ichiro Hayashi, Keiji Wada
2. 発表標題 Gate Oxide TDDB Evaluation System for SiC Power Devices under Switching Operation Conditions
3. 学会等名 International Power Electronics and Motion Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------