

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18061

研究課題名(和文) パワーエレクトロニクス回路の信頼性向上に資するキャパシタ評価技術の確立

研究課題名(英文) Establishment of methodology for evaluating capacitors toward highly reliable power electronic converters

研究代表者

長谷川 一徳 (Hasegawa, Kazunori)

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・助教

研究者番号：80712637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000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信頼性向上に資するキャパシタ評価技術の確立を目的に、まず実際の回路が発生するリップル電流波形とバイアス電圧を正確に再現するキャパシタ評価に特化した小型インバータの開発を行い、フルスケール試験に比べ1/10の電力でのキャパシタ評価を実現した。この小型インバータを活用し、キャパシタ損失を発熱量から測定する環境を整備し、損失を1 W程度の分解能での測定できることを実証した。これに加え、キャパシタの劣化試験を行い、キャパシタ寿命診断には等価直列抵抗(ESR)・キャパシタンス値の双方のモニタリングが必要であることを突き止めた。

研究成果の概要(英文)：This study presented methodologies for evaluating capacitors toward highly reliable power electronic converters. A special small-power inverter was designed, constructed, and tested for evaluating capacitors, which provides equivalent voltage and current waveforms to a full-scale inverter although its power rating is less than 1/10 of the full-scale inverter. This study also developed a calorimetric power-loss measurement method with the small-power inverter, which achieved power-loss measurement that is of the order of 1 W. In addition, ageing test of capacitors was carried out to estimate the lifetime of the capacitors. The test revealed that attention should be paid both to the equivalent-series resistance (ESR) and to the capacitance when one monitors health condition of capacitors.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：直流リンクコンデンサ 信頼性 パワーエレクトロニクス回路 インバータ 損失測定 寿命診断

1. 研究開始当初の背景

低炭素社会の実現には電力エネルギーの利用拡大が必要であり、このためにはパワーエレクトロニクス機器の普及拡大が必要不可欠である。パワーエレクトロニクス回路の出荷数の増加とともに、信頼性向上が急務となっている。パワーエレクトロニクス回路はパワー半導体デバイス、インダクタ、キャパシタから構成されているが、キャパシタ(コンデンサ)は経年劣化が大きく低寿命であるため、キャパシタ寿命がパワーエレクトロニクス回路自身の寿命を決定している。キャパシタの劣化は温度だけでなく電圧・電流波形に大きく依存する。さらに、キャパシタ劣化メカニズムは非線形性を有するためスケールアップモデルが成り立たない危険性がある。従来、キャパシタは実際の電流波形・電圧波形と大きく異なるサイン波形を用いて評価が行われていた。パワーエレクトロニクス回路の信頼性向上を目的として、キャパシタの高精度な評価を実現するには実際の機器が発生する電圧・電流波形を再現することが必須条件である。

2. 研究の目的

本研究では、パワーエレクトロニクス回路の信頼性向上に資するキャパシタ評価技術の確立を目的としている。具体的には、キャパシタの評価に特化した小型インバータを開発し、1/10以下の電力定格で実際の回路が発生するリップル電流波形とバイアス電圧を正確に再現可能な評価環境を構築する。

次に、キャパシタ損失の測定環境を整備し、実際のインバータの動作環境下におけるキャパシタ損失と電流・電圧波形の関係を解明する。

さらに、キャパシタの高精度な寿命診断を目指し、加速劣化試験によるキャパシタ寿命予測を行うことで信頼性志向のキャパシタ評価技術を確立する。

3. 研究の方法

本研究では、パワーエレクトロニクス回路の信頼性向上を目指し、キャパシタの高精度な発熱測定と劣化試験を行う評価環境の構築を目的とし、下記の項目に取り組む。

(1)キャパシタ評価に適した小型インバータの開発

キャパシタ評価に特化した小型なインバータの開発を行う。これはバイアス電圧供給用の小容量直流電源と組み合わせることで、電流はフルスケールであるが、電圧定格を1/10以下に低減できる特長がある。キャパシタへ流入するリップル電流波形とバイアス電圧を独立に制御できるため、損失のデータベース化に活用できる。

理論解析と回路シミュレーションにより小型インバータの動作を確認するとともに、所望のリップル電流波形とバイアス電圧がキャパシタに印加されるように回路パラメー

タを設計する。この際モータ駆動などインバータの実アプリケーションを想定した条件で回路定数の設計を行う。

上記で得られた回路パラメータをもとに小型インバータの製作を行う。小型インバータの定格は $\sim 200\text{ V}$ 、 $\sim 100\text{ A}$ とする。バイアス電圧供給用の高電圧直流電源($\sim 3\text{ kV}$)と組み合わせることで、 $1\sim 3\text{ kV}$ クラスの高耐圧・大容量フィルムキャパシタの評価を可能とする。小型インバータの実験結果とフルスケールインバータのシミュレーション結果を比較して、フルスケールインバータと等価なリップル電流波形・バイアス電圧をキャパシタに供給できることを確認する。また、リップル電流波形とバイアス電圧を独立に制御できることを確認する。

(2)キャパシタ発熱測定環境の構築

上記で開発した小型インバータを活用して、実リップル電流波形流入時におけるキャパシタ発熱損失の測定環境を整備する。キャパシタの実リップル電流・電圧は高周波成分を含む複雑な波形であり、電気的な損失測定が困難である。そこで、キャパシタ損失を発熱量から推定する手法を具体化し、高周波のリップル電流が流入する場合でも高精度な損失測定を実現する。この際、インバータの出力電流、出力周波数、スイッチング周波数等が変化した場合の発熱を測定し、インバータ動作条件がキャパシタ発熱に与える影響を分析可能とする。

以上の結果から、電流・電圧波形に対する発熱のデータベース化を図ることで、信頼性志向のキャパシタ選定の設計指針に活用する。

(3)キャパシタの加速劣化試験

キャパシタの寿命診断を実現するため、高温環境下での加速劣化試験を行い、キャパシタ寿命と電圧・電流波形との関係を明らかにする。劣化の判断はキャパシタの等価直列抵抗(ESR)の増加率とキャパシタンスの低下率を測定することで実現する。これにより、実際のインバータの動作環境下での寿命診断を実現する。

4. 研究成果

(1)キャパシタ評価に適した小型インバータの開発

図1に設計・製作した小型インバータを示す。小型インバータの定格は 200 V 、 100 A であり、バイアス電圧供給用の 3 kV 直流電源と組み合わせることで、最大で 3 kV 100 A のフルスケールインバータと等価なキャパシタ評価環境を整備した。図2に小型インバータを用いてキャパシタ試験を行った実験波形を示す。被測定キャパシタには 1200 V 耐圧のフィルムキャパシタを用いている。キャパシタのバイアスは 1200 V である一方、小型インバータの動作電圧は 80 V であり、1/10

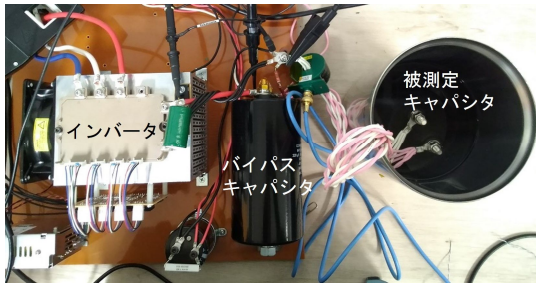


図 1 小型インバータを用いたキャパシタ評価環境

以下の電力定格でフルスケール試験を達成した。また、フルスケールインバータのシミュレーション結果と比較し、フルスケールインバータと等価なリプル電流波形を供給することを確認した。

さらに、モジュラーマルチレベル変換器などの大容量機器に用いられる単相インバータの直流リンクコンデンサへの応用も実験的に検討し、小型インバータが単相フルスケールインバータと等価な動作を実現することを確認した。

(2) キャパシタ発熱測定環境の構築

被測定キャパシタを絶縁性の溶液で満たした断熱容器に浸し、溶液の温度上昇からキャパシタ損失を高精度に測定する手法を提案した。キャパシタ損失と溶液温度の関係を理論的に解明し、リプル電流波形を含め電気的条件下には依存せずキャパシタ損失を測定可能であることを確認した。

この手法と小型インバータを組み合わせ、高耐圧・大容量のフィルムキャパシタを実リプル電流条件下で損失測定可能な環境を整備した。1200 V 耐圧フィルムキャパシタを用いた実験により、キャパシタ損失を 1 W の精度で測定できることを実証した。キャパシタ損失とインバータの動作条件の関係を実験的に分析し、キャパシタ損失はインバータ出力電流の実効値だけでなく、キャリア周波数にも依存性を有することを明らかにした。

(3) キャパシタの加速劣化試験

電解コンデンサを対象に高温条件下での劣化の直流バイアス電圧依存性の試験を行った。室温と高温条件下での劣化試験を比較することで、キャパシタ劣化の温度依存性を確認した。キャパシタ劣化の指標である ESR の増加率キャパシタンスの低下率を測定し、図 3 に示すように ESR とキャパシタンス値では直流バイアス電圧に対して異なる傾向を示すことを明らかにした。ESR 増加率とキャパシタンス低下率から見積もったキャパシタ寿命の大小関係は直流バイアス電圧に依存するため、キャパシタの寿命診断には ESR・キャパシタンス双方のモニタリングが必要であることを突き止めた。

以上の検討を(2)キャパシタ発熱測定環境の構築で得られた損失とインバータ動作条

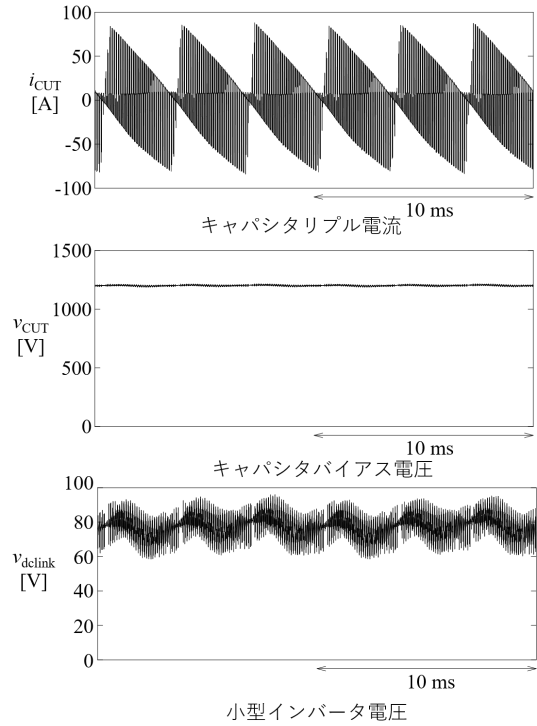


図 2 小型インバータの実験波形

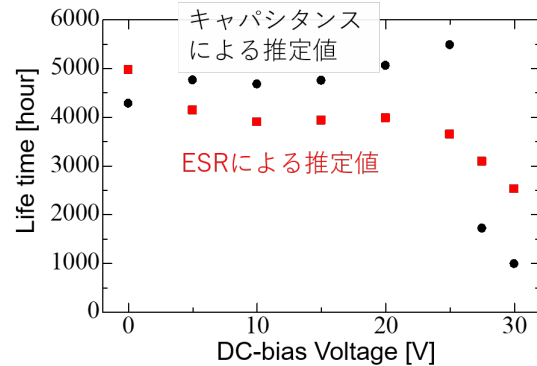


図 3 キャパシタ劣化試験

件の関係の分析と組み合わせることで、実際のインバータの動作環境下でのキャパシタ寿命診断に貢献できる。

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 3 件)

K. Hasegawa, K. Tsuzaki, S. Nishizawa, “DC-bias-voltage dependence of degradation of aluminum electrolytic capacitors,” *Microelectron. Rel.*, vol. 83, pp. 115-118, 2018. 査読有り
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.02.012>

K. Hasegawa, K. Kozuma, K. Tsuzaki, I.

Omura, S. Nishizawa, "Temperature rise measurement for power-loss comparison of an aluminum electrolytic capacitor between sinusoidal and square-wave current injections," *Microelectron. Rel.*, vol. 64, pp. 98-100, Sep. 2016. 査読有り

<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.07.049>

K. Hasegawa, I. Omura, and S. Nishizawa, "Design and Analysis of a New Evaluation Circuit for Capacitors Used in a High-Power Three-Phase Inverter," *IEEE Trans Ind. Electron.*, Vol. 63, No. 5, pp. 2679-2687, May 2016. 査読有り

<https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2511097>

〔学会発表〕(計 5 件)

長谷川一徳, 大村一郎, 西澤伸一, 「三相インバータ用直流リンクコンデンサに適した評価回路のコンディションモニタリングへの応用」, 電気学会産業応用部門大会, 1-110, pp. 495-500, 2017年8月, 査読無し

K. Hasegawa, I. Omura, and S. Nishizawa, "An Evaluation Circuit for DC-Link Capacitors Used in a Single-Phase PWM Inverter," PCIM Europe (International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management), May 2017. 査読有り

長谷川一徳, 上妻健太郎, 津崎孝典, 大村一郎, 西澤伸一, 「アルミ電解コンデンサ損失の矩形波電流流入時の損失推定」, 電気学会 半導体電力変換/モータドライブ合同研究会, SPC-16-117, MD-16-081, 2016年9月 査読無し

津崎孝典, 上妻健太郎, 長谷川一徳, 西澤伸一, 「アルミ電解コンデンサ損失の直流バイアス電圧依存性の一検討」, 電気学会産業応用部門大会, Y-24, pp. Y-24, 2016年8月, 査読無し

長谷川一徳, 大村一郎, 西澤伸一, 「直流リンクコンデンサに適した評価回路の実験検証: 三相・単相電圧形 PWM インバータへの応用と比較」, 電気学会産業応用部門大会, 1-74, pp. I-247-252, 2016年8月, 査読無し

〔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〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川一徳 (HASEGAWA, Kazunori)
九州工業大学・大学院生命体工学研究科・
助教
研究者番号: 80712637

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

大村一郎 (Omura, Ichiro)
九州工業大学・大学院生命体工学研究科・
教授

西澤伸一 (Shin-ichi Nishizawa)
九州大学・応用力学研究所・教授