

学位被授与者氏名	ド ワンロク (Wanglok Do)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第 5 3 号
学位授与年月日	平成 3 1 年 3 月 2 0 日
論文題目	The Development of a New Fibonacci Switched-Capacitor DC-DC Converter and its Analysis Method
論文題目 (英訳または和訳)	新しいフィボナッチ型スイッチト・キャパシタ DC-DC 電源回路の開発とその解析
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 江口 啓 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 大山 和宏 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 高原 健爾 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 渡辺 仰基
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>DC-DC 電源回路はコイルや変換器のような磁性部品の使用の有無によって、コイルあり電源回路とコイルなし電源回路に区分される。スイッチト・キャパシタ電源回路は、コイルなし電源回路の代表的な例である。スイッチト・キャパシタ電源回路は磁性部品がないため、EMI (電磁干渉) と EMC (電磁環境両立性) の影響を低減できるだけでなく、回路の大きさも小型にできるという特徴をもつ。これらの特徴は、ウェアラブル機器、スマートカード、IoT (Internet of Things) などのモバイル製品に適している。これらの応用分野のうち、本研究ではエネルギーハーベスティングシステムへの応用に着目する。</p> <p>現在までに、多様なスイッチト・キャパシタ電源回路が提案開発されてきた。例えば、対称ディクソン型トポロジーは、従来のディクソン型トポロジーから効率を向上させ、出力リップ電圧を減少させたが、回路規模が約 2 倍に増大した。対称接続フィボナッチ型トポロジーも同様の欠点をもっている。この理由から、本研究ではエネルギーハーベスティングシステムに適した新たなスイッチキャパシタの電源回路を設計する。</p> <p>本論文は全 6 章から構成される。</p> <p>まず第 1 章は序論であり、本研究の背景・動機ならびに目的について述べている。</p> <p>次に、第 2 章では新しいスイッチト・キャパシタ電源回路の設計のための理論解析方法について述べている。本論文では、定常状態でのスイッチト・キャパシタ電源回路が、4 ポート等価回路モデルに基づいて分析される。このモデルの妥当性は、基本的なスイッチト・キャパシタ電源回路の利得関数を利用した解析を通じて検証されている。</p> <p>第 3 章では、スイッチト・キャパシタ電源回路のトポロジーの組み合わせによって構成できることを明らかにしている。また、従来のスイッチト・キャパシタ電源回路のトポロジーを、4 ポート等価回路モデルを利用してモデリングし、電力効率と出力リップ電圧について比較している。ここでは、電力変換比率が 2 から 20 までの範囲において、スイッチト・キャパシタ電源回路のトポロジーのコア回路、また、各トポロジーのグループに関して比較している。</p> <p>第 4 章と第 5 章では、2 つの新しいスイッチト・キャパシタ電源回路のトポロジーが提案される。2 つのトポロジーはそれぞれ交差接続ディクソン型トポロジーと交差接続フィボナッチ型トポロジーと名づけられる。これらの提案トポロジーに関する理論解析とシミュレーションを行うことで提案回路の有効性を明らかにしている。また、ブレッドボード上でこれらの回路を実装することにより、これらの電源回路の実現可能性も検証している。</p> <p>第 6 章では、本研究を要約し、今後の課題を論じている。</p>
論文内容の要旨 (英文)	DC-DC power converters are sorted into inductor-based and inductor-less converters according to whether they consist of magnetic components such as inductors or transformers. Switched capacitor (SC) DC-DC converters are one of the representative examples in the category of inductor-less converters. SC DC-DC converters can reduce EMC (electromagnetic compatibility) and EMI (electromagnetic interference) problems and

minimize their size because they have no magnetic components. These characteristics fit in mobile products industries including wearable devices, smart cards, IoT and so on. Among them, this work focuses on energy harvesting systems.

Up to now, many different types of SC DC-DC converters have been proposed and modified. Taking symmetric Dickson topologies for example, their power efficiency and output ripple voltage improved but their circuit size became bigger than a normal Dickson topology. Cross-connected Fibonacci topologies have the same flaws. For these reasons, the goal of this research is to design a novel SC DC-DC converter for the energy harvesting systems.

In order to suggest a new SC DC-DC converter, this work starts from selecting an analysis way in Chapter 2. In this thesis, all SC DC-DC converter topologies in steady state are analyzed by the four-terminal equivalent (FE) circuit model. The suitability of the FE model is verified through an analysis of the gain function of a trivial SC DC-DC converter.

In Chapter 3, we categorize SC DC-DC converter topologies as core or modified topologies by the number of their outermost mesh including input and output ports. These topologies are modeled by the FE model and simulated to measure their power efficiencies and output ripple voltages. Then, we compare the topologies according to the core topologies and their family group at different conversion ratios from 2 to 20.

In Chapters 4 and 5, we suggest two new SC DC-DC converter topologies that are named cross-connected Dickson topology and enhanced cross-connected Fibonacci topology. Each of the new topologies is based on the Dickson topology and Fibonacci topology, respectively. We analyze and simulate two proposed topologies. Then, the suggested topologies are compared with their family group, respectively. Moreover, the feasibility of two new topologies are verified by building them on a breadboard.

Chapter 6 summarize this work and discuss the future works.

論文審査結果

博士後期課程 物質生産システム専攻 3年の「ド ワンロク」氏が提出した学位論文を審査し、また最終試験を行ったので、その結果について報告する。

(学位論文審査の結果)：スイッチト・キャパシタ (Switched Capacitor:SC) 電源回路は、インダクタなどの磁性部品を用いない電源回路である。SC 電源回路は磁性部品を利用しないために、一般的な電源回路とは異なり、小型・軽量化を実現できるという利点がある。このため、エナジーハーベスティング技術を利用したモバイル機器などの電源回路として注目を集めているが、入力デバイスからの供給電圧が低いために、それらの電源回路においては高い昇圧比が望まれる。しかしながら、SC 電源回路において高い昇圧比を実現するためには、1. 多くの回路素子が必要となる、2. 回路素子の増加に伴って電源回路の変換効率が低下するという問題が生じるため、これらの問題を解決する新しい回路トポロジーを開発する必要がある。本論文では、高昇圧比を少ない回路素子数で実現できる SC 電源回路トポロジーを提案し、その有効性についての検証を行っている。提案回路は、1) 相互接続構造を利用することで従来回路よりも高い昇圧比を実現できる、2) すべての位相において負荷にエネルギーを供給できるので低リプルノイズを実現できる、3) 大きな出力コンデンサを必要としないために体積を小さくできる、という特徴をもつ。提案回路の有効性に関しては、回路シミュレーションならびに理論解析を用いた従来回路との比較によって明らかにしている。このように本研究は、次世代のモバイル機器用の電源回路に対する新しい知見を与えており、学位論文としての十分な価値があると認められる。

本論文は、次の特色と独創性を有しており、高く評価できる。1) 新しい SC 電源回路のトポロジーを発明した。2) 回路特性を導出する理論解析手法において、支配的となる回路パラメータの導出に成功した。3) 回路シミュレーションと理論解析によって、従来電源回路との特性比較を行うことで、提案回路の優位性を明らかにした。4) 本研究の結果から、次世代のモバイル機器用電源回路開発のための指針を与えた。

学位論文の構成は、以下の通りである。第1章では、研究背景と目的、ならびに、論文の構成を述べている。第2章では、一般的な SC 電源回路のトポロジーとその特

	<p>性について説明し、定常状態解析において重要となるパラメータを導出している。第3章では、従来電源回路のトポロジーとその特性を比較している。第4章では、提案の回路トポロジーを示し、その回路動作について述べている。第5章では、シミュレーションと理論解析によって、提案回路と従来回路との特性比較を行うことで、提案回路の優位性を明らかにしている。最後に第6章では、結論と当該分野における今後の課題について述べ、論文をまとめている。</p> <p>本研究の成果は、氏の博士後期課程在学期間において、学術論文 8 編（第1 著者 2 編）、国際会議 11 編（第1 著者 5 編）となっている。また、2016 年の産業応用工学会の全国大会においては、“産業応用工学会賞”を共同受賞しており、本研究の新規性と有用性が高く評価できる研究であることが分かる。</p> <p>以上の理由により、審査委員会は本論文が学位論文の内容として適合すると判定した。</p> <p>学位論文公聴会においては、論文内容に関連する種々の工学的及び技術的な質問があったが、いずれも適切な回答を行うことができた。また公聴会後の最終試験においては、学位論文に関連する分野の学識を有し、今後研究を進めていくための研究能力を備えていることが判明した。</p> <p>以上の結果から、学位審査委員会はこの論文が博士（工学）の学位に適格であると判定した。</p>
<p>主な研究業績</p>	<p>参考論文 19 編 1 冊</p> <p>査読付き学術論文：第一著者 2 編</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. “A cross-connected charge pump for energy harvesting applications”, Int. J. of Innovative Computing, Information and Control (採録決定). Authors : <u>W. Do</u>, H. Fujisaki, F. Asadi and K. Eguchi</li> <li>2. “A new analysis way of three-phase switched capacitor converter”, J. of Circuits, Systems, and Computers, Vol. 28, Issue 8, July 2019 (採録決定). Authors : <u>W. Do</u>, F. Asadi and K. Eguchi</li> </ol> <p>査読付き学術論文：6 編</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. “A Fibonacci-type DC-AC inverter designed by switched capacitor technique” Int. J. of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 12, No. 4, pp. 1197-1207, Aug 2016. Authors : K. Abe, W. Do, S. Kittipanyangam, I. Oota, K. Eguchi</li> <li>2. “Design of a three-phase switched-capacitor ac-ac converter with symmetrical topology”, Int. J. of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 12, No. 5, pp. 1411-1421 Set 2016. Authors : K. Eguchi, W. Do, S. Kittipanyangam, K. Abe, I. Oota</li> <li>3. “Design of a simple inductor-less AC-AC converter realizing high input power factor”, Indian J. of Science and Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 1-6 Jan 2017. Authors : K. Eguchi, W. Do, K. Abe, K. Smerpitak, S. Pongswatd</li> <li>4. “Design of a high-voltage multiplier combined with Cockcroft-Walton voltage multipliers and switched-capacitor AC-AC converters” Int. J. of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 13, No 3, pp. 1007-1019, Jun 2017. Authors : K. Eguchi, A. Wongjan, A. Julsereewong, W. Do, I. Oota</li> <li>5. “Design of a nesting-type switched-capacitor AC/DC converter using voltage equalizers”, Int. J. of Innovative Computing, Information and Control, Vol 13, No 4, pp. 1369-384, Aug 2017.</li> </ol>

Authors : K. Eguchi, T. Junsing, A. Julsereewong, W. Do, I. Oota

6. "A multistage AC-AC converter designed by using switched capacitor techniques", Int. J. of Advanced and Applied Sciences, Vol 4, No 12, pp. 73-78, Dec 2017.

Authors : K. Eguchi, W. Do, S. Kittipanyangam, K. Abe, I. Oota

国際会議論文 : 第一著者 5 編

1. "Analysis of Switched Capacitor Converter by Fibonacci Sequence for Generating a Staircase Sinusoidal Wave",  
Proceedings of the 5th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2017, pp. 206-213, Kitakyushu, Japan, Mar 2017.  
Authors : W. Do, S. Kittipanyangam, K. Abe, K. Eguchi
2. "Comparative analysis on three types of switched-capacitor DC-DC converters",  
Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 2017 (ECTI-CON2017), pp. 310-313, Phuket, Thailand, Jun 2017.  
Authors : W. Do, S. Kittipanyangam, K. Eguchi
3. "A switched-capacitor AC-AC converter using nested voltage equalizers",  
Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 2017 (ECTI-CON2017), pp. 314-317, Phuket, Thailand, Jun 2017.  
Authors : W. Do, I. Oota and K. Eguchi
4. "Parallel-connected type of Fibonacci Sequence Switched Capacitor DC-DC Converter",  
Proceedings of the 5th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2017, pp. 364-370, Waikiki, Hawaii, USA, Sep 2017.  
Authors : W. Do and K. Eguchi
5. "A Control Way of a Fibonacci Sequence Switched Capacitor DC-DC Converter for Higher Power Efficiency",  
ICIC Express Letters, Vol 12, No. 1, pp. 55-60, Jan 2018.  
Authors : W. Do and K. Eguchi

国際会議論文 : 6 編

1. "Synthesis of a high step-up bipolar voltage multiplier using level shift drivers",  
Proceedings of 2016 6th International Workshop on Computer Science and Engineering, pp. 305-309, Jun 2016.  
Authors : K. Abe, I. Oota, W. Do, K. Eguchi
2. "Synthesis and analysis of a simple inductor-less DC-AC inverter",  
Proceedings of 2016 6th International Workshop on Computer Science and Engineering, pp. 315-319, Tokyo, Japan, Jun 2016.  
Authors : K. Eguchi, K. Abe, W. Do
3. Design of an inductor-less DC-AC inverter using a step-down Fibonacci sequence generator",  
ICIC Express Letters, Vol. 10, Np. 8, pp. 1951-1956, Aug 2016.  
Authors : K. Eguchi, K. Abe, W. Do, H. Sasaki
4. "Design of a step-down switched-capacitor AC/DC converter with

	<p>series-connected converter blocks”, ICIC Express Letters, Vol 10, No. 8, pp. 2045-050, Aug 2016. Authors : K. Abe, I. Oota, W. Do, S. Kittipanyangam, K. Eguchi</p> <p>5. “Design of a step-down switched-capacitor AC/DC converter using nested voltage equalizers”, International Conference on Recent Trends in Engineering and Technology (RTET-17), pp. 218-221, Bangkok, Thailand, May 2017. Authors : K. Eguchi, W. Do, I. Oota</p> <p>6. “Design of a Step-Up Inductor-Less AC-AC Converter Using Nesting Conversion”, ICIC Express Letters, Part B: Applications, Vol 8, No. 8, pp. 1191-1198, Aug 2017. Authors : K. Eguchi, W. Do, I. Oota, H. Sasaki</p>
--	---