

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月28日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560314

研究課題名（和文） 共振現象による新しい回路トポロジーを用いた高性能PFCコンバータの研究

研究課題名（英文） A Study of High Performance PFC Converter by LC Resonant Circuit Topology

研究代表者

松井景樹（MATSUI KEIJU）

中部大学・工学部・教授

研究者番号：70131167

研究成果の概要（和文）：電力系統において高性能・高機能の電力機器が用いられるにつれ、線路に高調波が発生しこれを防ぐ努力が盛んになされている。一般に電気機器には整流回路がよく用いられている。このようなことから、高力率形コンバータが盛んに研究されている。我々の研究グループでは従来よりアクティブ方式の研究に取り組み多くの成果を上げてきた。しかしながら、同時に多くの検討すべき問題点も有している。一方パッシブ方式において素子は多少大型化する欠点はあるが、EMC（電磁的両立性）対策の問題がなく、また設計が容易で取り扱い易いこともわかった。このようなことからパッシブ素子のみで高調波を低減させる方法の着想に至った。数多くの構想の中で、従来外国の研究者が基本回路を提案しこれを修正したパッシブ素子による新規なトポロジーを有するPFC回路を考案することとなった。更にはこの研究過程で回路構成から双方向の昇降圧チョッパの構想にいたりこの回路の実現を検証しシミュレーション手法及び実験的手法で確認した。本年度は実験的方法で推進するまでに至らなかったが多くの利点が分かり実用化のめどが付いた。これまで商用周波のLC共振現象を利用し、パッシブ素子を用いた方式と比べ回路はコンパクト化されよう。研究過程で二次電池などの制御に応用できる回路の発案にいたり、これらの検証も同時に行った。このように入力電流を正弦波化する新規な回路トポロジーの研究を行い多くの派生回路が得られた。一部報告したがこれらも実験で検証してゆき実用化に結びつけたい。

提案回路は高調波規制ガイドライン限度値-JIS規格値をクリアすることができる。様々な展開が考えられるが、その具体的応用の一例としての更なる展開として直流高電圧発生装置に応用した方式の検討など幅広い検討を行い、種々のパワーエレクトロニクスに関連した技術発展に結びつけるべく多くの発表を行った。

研究成果の概要（英文）：

In the power system, as various high performance electrical equipments are used in wide applications, much harmonics are generated in the power line. Thus, many study to reduce such harmonics are investigated. In general, rectifier circuits are used in many areas of the power system. From such reasons, various PFC circuits are investigated and discussed. However, a lot of problem to be improved is included in such areas. On the other hand, for some PFC circuit using merely passive elements, the equipment size becomes fairly large, but there is little EMC noise and circuit configuration is very simple and concise. In such way, the study to employ the simple passive element has brought an idea to reduce such harmonic. Additionally, on the way of study, novel bilateral choppers and their similar original circuits are invented, which are confirmed by simulation method and experimental results. In comparison to the LC resonant PFC using commercial frequency, the circuit becomes very simple and compact. This circuit topology would be developed to high voltage generator. In such way, this method would be widely used various PFC circuit.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000円	510,000円	2,210,000円
2010年度	900,000円	270,000円	1,170,000円
2011年度	900,000円	270,000円	1,170,000円
年度			
年度			
総計	3,550,000円	1,050,000円	4,550,000円

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：高効率、PFC コンバータ、正弦波、高調波、ガイドライン

1. 研究開始当初の背景

(1) 電力系統において高性能・高機能の電力機器が用いられるにつれ、線路に高調波が発生しこれを防ぐ努力が盛んになされている。一般に電気機器には整流回路がよく用いられている。このようなことから、高力率形コンバータが盛んに研究されている。

(2) 我々の研究グループでは従来よりアクティブ方式の研究に取り組み多くの成果を上げてきた。しかしながら、同時に多くの検討すべき問題点も有している。一方パッシブ方式において素子は多少大型化する欠点はあるが、EMC(電磁的両立性)対策の問題がなく、また設計が容易で取り扱い易いこともわかった。このようなことからアクティブ素子は最小とし、パッシブ素子を主として高調波を低減させる方法の着想に至った。

(3) 数多くの構想の中で、従来外国の研究者が基本回路を提案しこれを修正してパッシブ素子を主とする新規なトポロジーを有するPFC回路を考案することとなった。更にはこの研究過程で共振の回路構成から双方向の昇降圧チョッパの構想にいたった。この回路の実現を検証しシミュレーション手法及び実験的手法で確認した。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、パッシブ素子による新規なトポロジーを有する(一部LC共振現象を利用する)PFC回路を実現することである。すなわち、新しい原理を用いた手法でこれを実現することである。多くの利点に分かり実用化のめどが付いた。

(2) これまで商用周波のLC共振現象を利用し、パッシブ素子を用いて方式と比べ回

路はコンパクト化されよう。これらを実用的見地から実現する方向で研究を推進することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 研究過程で二次電池などの制御に応用できる回路の発案にいたり、これらの検証も同時に行った。このように入力電流を正弦波化する新規な回路トポロジーの研究を行い多くの派生回路が得られたのでこれらも実験で検証してゆき実用化に結びつけたい。提案回路はPFC回路の目的である高調波規制ガイドライン限度値-JIS規格値をクリアすることができ、これら関連する派生回路についてもLC共振回路手法で多くの検討を加えた。

(2) 本PFC回路手法の検証では様々な展開が考えられ、検討を加えていった。その具体的応用の一例として更なる展開として直流高電圧発生装置に応用した方式の検討を行い、PFC回路への展開も検討するなど多岐にわたってシミュレーション手法を中心に種々のパワーエレクトロニクスに関連した技術発展に結びつけることで滝にわたって研究遂行した。

4. 研究成果

(1) 半導体電力変換回路に用いられるデバイスは、電力損失を低減化することが重要であり、低オン電圧化と高速スイッチング化であり、素子の発明以来たゆまぬ努力で開発がなされてきた。各種の変換回路の応用においても、開発された機器の素子そのものの高性能化、電磁騒音の低減や高速制御性の向上などのために用いられる素子のスイッチング周波数の高周波化がたゆまない努力で進められてきた。

(2) しかしながら、スイッチング損失はス

スイッチング周波数に比例して増加するなどの問題も抱えている。高機能素子の開発と並行して、回路的に電磁騒音や更なる高周波化を図る技術方式も開発がなされ多くの成果も得られようとしている。その一つの主流が素子のソフトスイッチング化である。このようにソフトスイッチング技術を用いて、スイッチング過渡期間にデバイスに加わる電圧・電流を軽減してスイッチング損失を低減させる研究が多くの技術者により行われている。

(3) 多くのパワーエレクトロニクス技術の展開の中で特徴ある技術として開発がなされてきた応用の一つに、チョッパを用いたフォークリフトや電車等の乗り物における駆動用電源が過去盛んに新しい技術として開発がなされてきた。最近これらは下火の傾向にある。しかしながら、電気自動車のバッテリーや太陽電池の昇圧電源として主流になっており、ここしばらくの技術として適用や改善の努力がなされるであろう。なかでも電気自動車のバッテリー用昇圧回路はエネルギー放出と蓄電の両方向機能を必要とされ、双方向チョッパが主流となる。ほぼ完成された技術といわれているが、厳しい環境改善を考えるとこれからも1%でも効率改善や機能改善にしのぎを削る状況が続くであろうことを鑑みると、研究者・技術者もその改善努力を成すべき状況にある。

(4) 特に電気自動車では交流のいわゆる商用電力系統での家庭での充電方式が検討されていて、この場合PFC回路が必然的に重要視される。このような時代の要求する状況のもと、我々はソフトスイッチ技術を用いた電気自動車のバッテリー用双方向チョッパを工夫し、種々の提案と解析を行った。この技術は基本的にPFC技術が要求される。これまで実行し発表してきた方式は電流共振スイッチを用いた方式であった。一方、共振方式の他の方式に電圧共振スイッチがありそれぞれの特長を生かして用いられる。電圧・電流共振スイッチを用いた二石双方向チョッパについて回路構成方式を提案し両者を比較して、その回路特性の解析を行った。

(5) 従来より我々が提案している共振形チョッパは、従来の電流共振形降圧・昇圧チョッパを電圧形に置き換え、工夫して組み合わせたものである。降圧チョッパは汎用性があるため多くのテキストでも紹介され解析がなされている。しかしながら、昇圧形については汎用性が小さいためか具体的例はあまりみられず、従って解析例まで紹介されたもの見当たらず、提案の基本回路として解析結果を提示したが、本研究では電圧共振形と電

流共振型を比較しつつこれをPFC回路に利用するため、電圧共振形、電流共振形の特質についてもその結果を提示し、両者を比較するなど行った。

(6) 電圧・電流共振形昇圧チョッパとその時の各部の動作波形を詳細に検討を行った。デバイスのオン・オフで精密に計算され明白に分けて考えることができる。すなわち、これらの動作は共通して考えることができ回路解析に役立つことなどが解明された。

(7) 両者の比較において電圧共振形ではターンオフ時に共振が発生し、電流共振形ではターンオフ時に共振が発生する。式および図などによりスイッチに流れる電流が共振する電流形、スイッチに印加する電圧が共振する電圧形の式およびそれらの比較より最大電圧および最大電流の明白な解析結果が得られた。これらの結果はPFC回路に適用され今後の展開に利用されることが分かった。これらの特徴は明快な結果として示され定量的に与えることができた。得られた表を参照するとスイッチが負担する電圧・電流の最大値は、電圧形又は電流形によって異なり、電圧形では電圧耐量に、電流形では電流耐量に耐する責務に対する使用が設定されるであろう。これらの使用に対し両者を比較すると、例えばスイッチング素子の導通損において電流形では電流の増加は素子の導通や回路のジュール損など電流増加に基づく損失が電圧形に対して増加するであろう。一方電圧形では共振電圧上昇時の電流増加は無視できるため、損失増加も少ないが耐圧に対する素子の耐量に対する増加などの問題があるが、電流形の電流耐量の対策を考えると同様の結論で得られる。即ち、電圧形では電圧耐量の増加、電流形では電流耐量の増加に対処することになる。

(8) 以上スイッチ素子に加わる最大電圧と電流の各値が明快な結果として示された。表で示した一石形と比べ昇圧動作回路で追加のLCによる共振回路が加わること、共振経路が若干異なることなどのため、最大電流の方で値の差異が見られた。これらの結果は学会や国際会議で発表された。

(9) 電圧形共振コンバータに於いて、ソフトスイッチ形昇・降圧チョッパを組み合わせ、環流および共振用ダイオードを兼用して半減させることで、単純化構成を実現することができた。先に提案の電流形コンバータと比べ、電流形では耐電流責務の検討が重要であり、電圧形では耐電圧責務の検討が重要になることなどが分かった。

今研究では昇圧動作と低圧動作について多

くの動作解析を行ったが、低圧動作も類似した手法で展開できよう。バッテリー駆動の電気自動車などではこれらの技術が適用され双方向チョッパなどが必要となろうが、充電動作は家庭用での使用が重要視されこれらのPFCへの展開が重要な手段として検討対象になろう。これらにおいて研究成果がソフトスイッチ対策として応用されることを期待したい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計18件)

- ① Keiju Matsui, Takanori Asaba, Masaru Hasegawa, 「Proposal and Analyses of Resonant Bilateral Converter Employing Simple Zero Voltage Switches」 The 9th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Singapore, Proceedings of IEEE-PEDS-2011, 査読有, no. 21, pp. 587-592 (2011-12)
- ② Keiju MATSUI, Takumi NAKASHIMA and Masaru HASEGAWA 「A Novel Voltage Balancer for EDLCs by Cockcroft-Walton Circuit Having Zeta Converter」 The 33th International Telecommunications Energy Conference, 査読有, Amsterdam, Netherlands, Proceedings of IEEE-Intelec-2011, pp. PES-4. 1-4. 6 (2011-10)
- ③ Takafumi Gemma, Masaru Hasegawa, Keiju Matsui, 「Robust Decoupling Current Control to Magnetic Saturation for SynRM Using Flux Observer」 ISIEA 2011, IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, 査読有, Langkawi, Malaysia, Sep. 25-28, (2011-9)
- ④ Takanori Asaba, Keiju Matsui, Masaru Hasegawa, 「Proposal and Analyses of Resonant Bilateral Converter Employing Simple Zero Voltage Switches」 ICEE 2011, 17th International Conference on Electrical Engineering, 査読有, pp. A534-1-6 (2011-7)
- ⑤ Kouji Iida, Hiroaki Nakashima, Keiju Matsui, Masaru Hasegawa, Fukashi Ueda, 「Discussion on Various Measurement Techniques for Distribution Line Impedance」 ICEE 2011, 17th International Conference on Electrical Engineering, 査読有, pp. A533-1-6 (2011-7)
- ⑥ Keiju Matsui, Toshiaki Tsuji, Hiroto, Masaru Hasegawa, 「A Novel Voltage Equalizer for Supercapacitors in Multiple-Connection」 The 8th International Conference on Power Electronics and Drive Systems Taipei, Taiwan, Proceedings of IEEE-PEDS-2009, pp. 252. 1-6 (2009-11-4)
- ⑦ K. Matsui, M. Hasegawa, Fukashi Ueda, Hideki Mori 「Improved PFC Buck Chopper for Single-Phase with Single Switching Device」 Yoshihiro Mori, 「The International Conference on Electrical Machines and Systems, Tower Hall Funabori Tokyo, Proceedings of ICEMS-2009, pp. DS1G4-5-1~6 (2009-11)
- ⑧ Keiju Matsui, Takayoshi Suzuki, Hiroto Shimada, Masaru Hasegawa, Kenji Ando 「Further Development on Voltage Balancer for EDLCs Employing Cockcroft-Walton Circuit」, The 31th International Telecommunications Energy Conference, Incheon, Korea, Proceedings of IEEE-Intelec-2009, pp. PES-4. 1-4. 6 (2009-10)
- ⑨ Keiju Matsui, Takayoshi Suzuki, Hiroto Shimada, Masaru Hasegawa 「Analysis and Improvements of Novel Voltage Balancer for an Electric Double Layer Capacitor Employing a CW circuit」 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, Proceedings of EPE 2009, Topic17, p. DS2. 12-1~10 (2009-9)
- ⑩ Masaru Hasegawa, Satoshi Yoshioka, Keiju Matsui, 「Robustness Analyses and Improvement for Position Sensorless Control of IPMSMs to Inductance Variation due to Magnetic Saturation」 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, Proceedings of EPE 2009, Topic12, p. DS3. 4-1~10 (2009-9)
- ⑪ 長谷川 勝, 吉岡 諭, 松井 景樹, 「未知入力オブザーバを用いたインダクタンス変動にロバストなIPMSMの位置センサレス制御」 電気学会 産業応用部門誌 Vol. 129, No. 9, pp. 890-898, 2009年9月
- ⑫ Keiju Matsui, Hiroto Shimada, Masaru Hasegawa 「Novel Voltage Balancer for an Electric Double Layer Capacitor employing a CW circuit」, The International Conference on Electrical Engineering 2009, Proceedings of ICEE 2009, 査読有, pp. PT1-02-01-06 (2009-7)
- ⑬ Keiju Matsui, Susumu Tanaka, Masaru Hasegawa 「Analysis and Improvement of Bilateral Chopper Having Current Resonant Soft-switch」 The International Conference on Electrical Engineering 2009, Proceedings of ICEE 2009, 査読有, pp. PT2-04-01-06, (2009-7)

- ⑭ Atsushi Shinke, Masaru Hasegawa, Keiju Matsui 「Torque Estimation for Synchronous Reluctance Motors Using Robust Flux Observer to Magnetic Saturation」, International Symposium on Industrial Electronics, Proceeding of IEEE-ISIE-2009, TPP14, pp. 1569-1574, (2009-7)
- ⑮ Masaru Hasegawa, Satoshi Yoshioka, and Keiju Matsui 「Position Sensorless Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Unknown Input Observer for High-Speed Drives」 __IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 査読有、VOL. 45, NO. 3, pp. 938-946, MAY/JUNE, 2009
- ⑯ Masaru Hasegawa, Keiju Matsui, 「Position sensorless control for interior permanent magnet synchronous motor using adaptive flux observer with inductance identification」 IET Electr. Power Appl., 2009, 査読有, Vol. 3, Iss. 3, pp. 209-217, (2009-5)
- ⑰ K. Matsui, M. Hasegawa, 「Improved PFC Circuit for three Phase Single Switch Having Auxiliary Capacitors」 The 4th International Telecommunication Energy Special onference, Proceedings of IEEE-telecon-2009, 査読有, I. 4-2, pp. 1-6 (2009-5)
- ⑱ K. Matsui, Hiroto Shimada, M. Hasegawa 「Novel Voltage Balancer for an Electric Double Layer Capacitor by using Forward Converter」 The 4th International Telecommunication Energy Special Conference, Proceedings of IEEE-telecon-2009, 査読有, II. 3-1, pp. 1-6 (2009-5)

〔学会発表〕 (計 1 件)

- ① 山北晃平・中嶋巧・松井景樹・長谷川勝, 「充放電に適応するCW回路を用いたEDLC用均等電圧化システム」平成23年電気学会産業応用部門大会講演論文集、1-9、pp. 487-488, 琉球大学 (2011年9月)

〔図書〕 (計 1 件)

- ① K. Matsui & M. Hasegawa, 「A Novel PFC Circuit for Three-phase utilizing Single Switching Device」 Telecommunications, IN-TECH, pp. 921-925 (2009-11)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井景樹 (MATSUI KEIJU)
中部大学・工学部・教授
研究者番号：7 0 1 3 1 1 6 7

(2) 研究分担者

長谷川 勝 (HASEGAWA MASARU)
中部大学・工学部・准教授
研究者番号：7 0 3 4 0 1 9 8

(3) 連携研究者

無