

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 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360126

研究課題名（和文）スイッチング損失・ノイズを低減した
高効率ソーラーパワーコンディショナの開発研究課題名（英文）High-efficiency Solar Power Conditioner Capable of
Reducing the Switching Power losses and Electromagnetic Noises

研究代表者

藤田 英明（FUJITA HIDEAKI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：40238580

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、太陽光発電用ソーラーパワーコンディショナの高効率化と低騒音化の相反する要求に対して、一相 PWM 制御を適用したインバータの適用を提案した。その結果、スイッチング周波数を 1/3 に低減しても、従来の PWM 制御インバータと同等の高調波抑制効果が得られることを明らかにし、スイッチング損失を 1/7 に、交流インダクタ鉄損失を 60% に低減して、高効率化が実現できることを理論と実験の両面から明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This research project discusses the application of a single-phase PWM control method to solar power conditioners to satisfy both low-loss and low-noise demands. The theoretical and experimental discussions in this project reveal that the proposed method can suppress the harmonic current even when the switching frequency is decreased to 1/3. The proposed method also makes it possible to reduce the switching power losses to 1/7 and the core losses in the ac inductor to 60%.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	9,700,000	2,910,000	12,610,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：太陽光発電・系統連系インバータ・スイッチング損失・電源高調波・電磁ノイズ

1. 研究開始当初の背景

近年、ビルや住宅用の太陽光発電システムが開発されており、普及に向けて導入促進が進められている。太陽光発電システムでは、太陽電池が発生した直流電力を交流系統に接続するためにソーラーパワーコンディショナを必要とする。住宅用ソーラーパワーコンディショナの容量は 3~5 kW であり、単相 200 V の系統連系用インバータが使用さ

れている。このとき、インバータのスイッチング周波数を 20 kHz 程度に設定することにより、可聴周波数帯の騒音を低減している。

一方、ビルなどの太陽光発電システムは 30~300 kW の容量となるため、三相 200 V の系統連系用インバータが用いられる。数十 kW クラスの系統連系用インバータでは、スイッチング周波数を高周波化することが難しく、一般には 10 kHz 以下のスイッチン

グを行う。この場合、可聴周波数帯の騒音が問題となるため、このクラスのソーラーパワーコンディショナは設置場所に制約が生じる。特に、小学校や病院、オフィスなどの静音な環境では、騒音低減のために 20 kHz 以上にスイッチング周波数を高周波化することが望ましいが、スイッチング損失の増加による変換効率の低下と高周波スイッチングによる電磁ノイズの増加が問題となる。これは、機器コストの増加やシステムの大規模化、信頼性の低下を招き、太陽光発電システムの普及のためには、解決すべき重要課題である。

スイッチング損失の低減には、ソフトスイッチング技術（参考文献 1）の適用と高速スイッチングデバイスの採用の 2 種類のアプローチがある。しかし、ソフトスイッチング技術は小容量のスイッチング電源には適用されているが、比較的容量の大きな変換器では、導通損失とコストの増加により適用が難しい。一方、高速スイッチングデバイスとして SiC や GaN などのワイドバンドギャップ半導体に期待が集まっているが、当時は製品に適用可能なレベルのデバイスは供給の見込みが立っていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、系統連系用三相インバータの一相 PWM 制御法を開発することにある。これは、系統連系用三相インバータの三相の内、二相分のパワー半導体デバイスを導通状態に固定し、一相分のパワー半導体デバイスだけをスイッチング (PWM 制御) する制御方式に特長がある。PWM 制御を行う一相分のパワー半導体デバイスにはスイッチング損失が発生するが、他の二相分のパワー半導体デバイスにはスイッチング損失を生じない。このため、従来の系統連系用インバータに比べて、PWM 制御に伴うスイッチング損失を少なくとも 1/3 に低減することができる。したがって、スイッチング周波数 (キャリア周波数) を可聴周波数以上の 21 kHz まで増加しても、平均スイッチング周波数は 7 kHz であり、従来の系統連系用インバータと同程度の損失に低減することができる。

これまでの基礎研究では、三相の内一相だけを PWM 制御すればよいことを理論および回路シミュレーションにより明らかにした。これは、三相の内一相だけを PWM 制御すれば、無効電力の制御が可能になることも明らかにしたもので、三相インバータに供給する有効電力が一定であれば、インバータは無効電力を零に制御するだけで、交流電源の電流を平衡三相正弦波にできることを理論的に導出した。また、有効電力を一定とするためには、直流コンデンサの静電容量を大幅に低減する必要があることを報告した。

本研究課題では、これまでの基礎研究を踏

まえて一相 PWM 制御法を適用したソーラーパワーコンディショナを開発する。

- (1) 一相 PWM 制御法を適用した系統連系用インバータの制御法を確立し、系統電圧の変動や高調波を含んだ場合の動作特性を明らかにする。
 - (2) 一相 PWM 制御法を適用した場合のスイッチング損失と交流インダクタの損失の低減効果および高調波電流の抑制効果を実験により確認する。
 - (3) 一相 PWM 制御法を適用した系統連系用インバータの過電圧保護方式の開発と直流コンデンサ容量の設計方法を確立する。
- これらの検討により、可聴周波数帯の騒音を低減可能なソーラーパワーコンディショナを開発する。

3. 研究の方法

本研究課題のソーラーパワーコンディショナを開発では、一相 PWM 制御を適用した系統連系用インバータの試作を行い、実験と理論の両面から、動作原理の検証と動作特性を明らかにする必要がある。

まず、コンピュータシミュレーションにより、一相 PWM 制御を適用した系統連系用インバータの回路定数と動作特性の関係を理論的に検討し、実験システムの設計を行う。図 1 は、実験システムの構成である。本研究で使用する実験装置の主回路は、太陽光発電システムの一般的なソーラーパワーコンディショナの回路構成を採用する。すなわち、系統連系用三相ブリッジ電圧形インバータと太陽電池からの電力調整用 DC-DC コンバータを模擬するための昇圧チョップ回路を接続して構成する。

一般のソーラーパワーコンディショナでは、パワー半導体デバイスとして IGBT を用いるが、本研究の実験装置ではパワー半導体デバイスとして IGBT に比べて導通損失を低減可能な Super Junction MOSFET を用いる。これは、本研究課題では、スイッチング損失の低減効果の評価が重要であり、また SiC や GaN などの次世代ワイドバンドギャップパワー半導体デバイスでは、1200V 程度のデバイスでは MOSFET 構造が主流となると考えられており、パワーコンディショナへの応用を考えた場合には MOSFET を用いて検討を行うことにメリットがある。

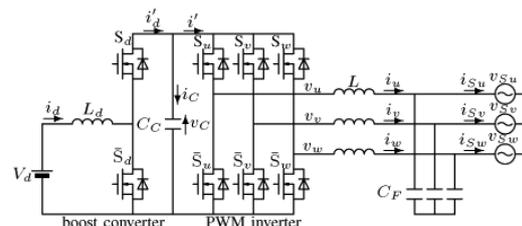


図 1 実験システムの回路構成

試作した実験システムに高速電流制御回路を接続して動作を確認する。実験に使用する高速電流制御回路は、DSP (digital signal processor) と FPGA (field programmable gate array) で構成する。DSP には系統連系用三相インバータの無効電力フィードバックアルゴリズムと昇圧チョッパ回路の有効電力一定制御アルゴリズムを実装し、実験システム全体を一括して制御する。

試作実験システムを用いて、電流制御特性や高調波電流抑制効果、スイッチング損失の抑制効果、交流インダクタの鉄損低減効果を評価するとともに、先に開発したシミュレーションとの比較を行い理論的に考察を行う。

4. 研究成果

(1) 電流制御特性・高調波抑制効果

図2は従来のPWM制御を敵将した場合の実験波形である。従来の制御法では、三相インバータのすべてのスイッチング素子がPWM制御を行うため、インバータの端子電圧はすべての期間でパルス状となっている。この時の系統電流のひずみ率は約4.9%であった。

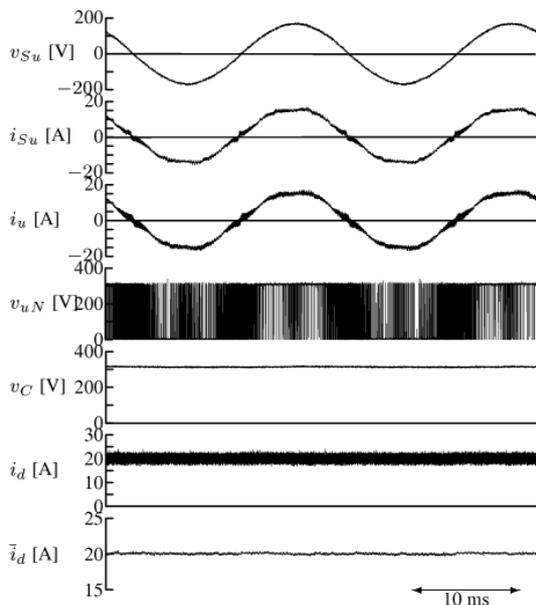


図2 従来PWM制御を適用した場合の実験波形

図3は本研究課題の一相PWM制御を適用した場合の実験波形である。一相PWM制御を適用した場合には、インバータ出力電圧は一周期のうち1/3期間のみPWM制御を行っており、その他の期間では、直流リンク電圧の上側電圧もしくは下側電圧が出力されており、スイッチング損失を生じていない。しかも、PWM制御を行っている期間の系統電流は零電流の付近であり、大幅なスイッチング損失の低減が見込まれる。この時の系統電流の総合ひずみ率は4.1%であり、従来のPWM制御と同等に高調波電流が抑制されており、十分な電流制御性能を有している。

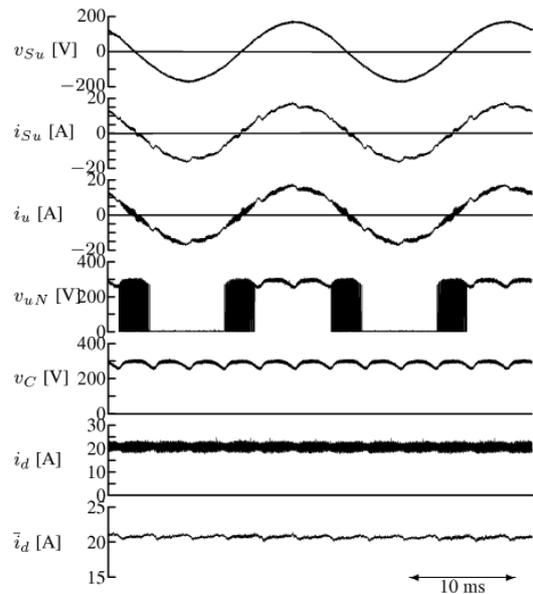


図3 一相PWM制御を適用した場合の実験波形

(2) スwitching損失低減効果

図4に回路損失の実測結果と理論解析の結果を示す。(a)は従来のPWM制御を適用した場合であり、4kW出力時の損失は150Wに達している。このとき、約110W (80%) がスイッチング損失であり、スイッチング損失の低減がシステム全体の効率改善に対して効果的である。(b)は一相PWM制御を適用した場合の損失であり、全損失は約42Wに低減している。特にスイッチング損失は、わずか14Wであり、従来のPWM制御に比べて、1/7 (14%) に低減している。

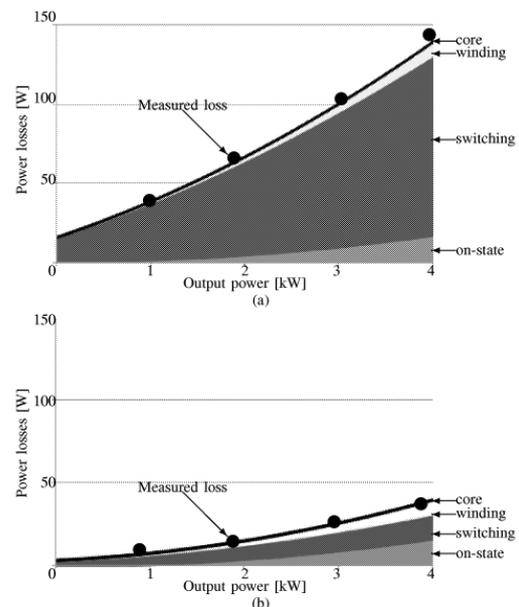


図4 損失の実測および計算結果

(3) スwitching素子の最適化

図4の損失の実測値を詳細に解析すると、出力電力(電流)に対して、回路損失は

およそ二次式で近似できることを明らかにした。さらに、スイッチング時の MOSFET のドレイン-ソース間電圧とドレイン電流波形から di/dt に伴う損失、電流上昇・効果期間に伴う損失、ミラー期間に伴う損失、リカバリ電荷に伴う損失に分けることができる。これらの総和と実測から求めたスイッチング損失はよく一致しており、スイッチング素子のデータシートに記載されている電気的特性からスイッチング損失を算出することを可能にした。これにより、回路損失、すなわちスイッチング損失と回路損失の和を最小とするようなスイッチングデバイスの選定方法を明らかにした。

図5は出力電力に対する電力変換効率の特性であり、従来のPWM制御を用いた場合の最大効率は96.7%程度であるが、一相PWM制御を適用した場合には最大変換効率は99.2%に達している。したがって、SiC等のワイドバンドギャップスイッチング素子を用いなくても、スイッチング素子の電圧・電流定格を最適化することにより、99%以上の変換効率を得られることを明らかにした。

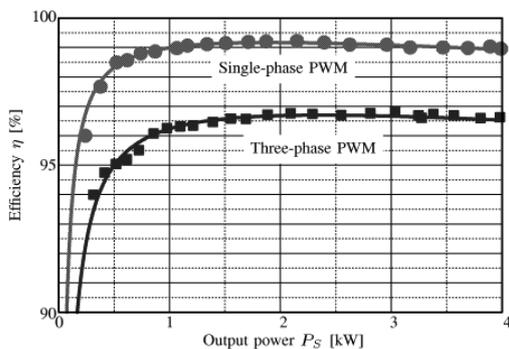


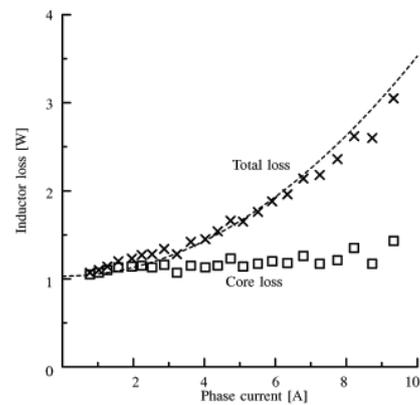
図5 電力変換効率

(4) 交流インダクタ損失

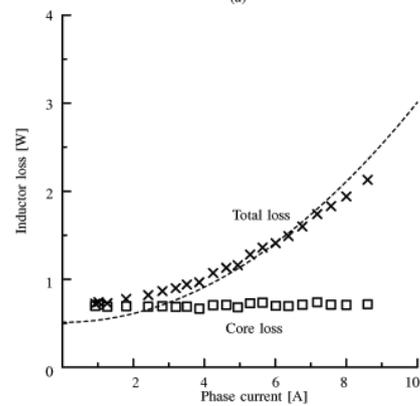
図6は交流インダクタ損失の実測結果と計算結果である。(a)は従来のPWM制御を用いた場合、(b)は一相PWM制御を用いた場合である。測定では、系統電流が流れる主巻線と電流を流さない起電力測定用巻線を巻いた測定用インダクタを用意してそれぞれの電力損失を求め、鉄損と銅損を分離した。

従来のPWM制御を用いた場合、定格10Aにおける銅損と鉄損はほぼ等しく、定格電流付近で損失が最小となるように交流インダクタが設計されている。一方、一相PWM制御を用いた場合の鉄損は、従来PWM制御の約60%に低下しており、一相PWM制御の方が鉄損を低減できること。このとき、定格付近では鉄損に比べ、約二倍の銅損が生じており、従来PWM制御を前提に設計されたインダクタをそのまま一相PWM制御に適用しても最適ではないことがわかる。したがって、磁束密度の増加や鉄心体積の増加などにより、鉄損が増加したとしても、巻数を減じて銅損を

低減することにより、交流インダクタの全損失を最小とするように設計することができる。



(a)



(b)

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)

- ① 藤田 英明, 鈴木 亮, 「一相PWM制御法を用いた三相ソーラーパワーコンディショナ」, 電気学会論文誌 D, 査読有, Vol. 130, No. 2, pp. 173-180, 2010

[学会発表] (計7件)

- ① Hideaki Fujita, Core-loss analysis in ac inductors for a single-phase pulse-width modulated solar power conditioner, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 2050-2057, 2011-9-21, Phoenix, USA.
- ② 菊池 剛介, 藤田 英明, 一相PWM制御法を用いた三相系統連系変換器: 交流インダクタの鉄損解析, 電気学会研究会資料. 半導体電力変換研究会 pp. 41-46, 2010-11-25, 長野.
- ③ Hideaki Fujita, Switching loss analysis of a three-phase solar power conditioner using a single-phase PWM control method, IEEE Energy Conversion

- Congress and Exposition (ECCE), pp.618-623, 2010-9-14, Atlanta, USA.
- ④ 菊池剛介, 藤田英明. 一相 PWM 制御法を用いた三相 PWM 整流器の共振現象, 電気学会全国大会講演論文集, Vol.4, No.36, pp.59-60, 2010-3-19, 東京.
 - ⑤ 藤田英明. 一相 PWM 制御三相インバータのスイッチング損失解析, 電気学会全国大会講演論文集, Vol.4, No.7, pp.9-10, 2010-3-17, 東京.
 - ⑥ Hideaki Fujita, A Three-Phase Voltage-Source Solar Power Conditioner Using a Single-Phase PWM Control Method, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp.3748-3754, 2009-9-21, San Jose, USA.
 - ⑦ 藤田英明, 菊池 剛介. 一相 PWM 制御法を用いた三相無効電力補償装置, 電気学会 産業応用部門大会, Vol.1, pp.547-550, 2009-9-2, 三重

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 英明 (FUJITA HIDEAKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号 : 40238580