

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 19 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289077

研究課題名(和文) パワーデカップリング機能を持つ高効率・長寿命パワーコンディショナの開発

研究課題名(英文) Development of High-Efficiency and Long Life-Time Power Conditioner Equipped with a Power Decoupling Circuit

研究代表者

清水 敏久 (SHIMIZU, TOSHIHISA)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：30254155

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：家庭用太陽光発電装置の大量導入時代を見据えて、発電装置に不可欠なパワーコンディショナの保守・維持費用を低減するための基盤技術の開発を行った。その成果として、(1)装置寿命の低下要因の電解コンデンサ等を使用しない長寿命パワーコンディショナの開発、(2)長寿命化に適したコンデンサの評価・適用技術の開発、(3)小型低損失化に不可欠なインダクタの最適設計技術の開発、を行った。これらの成果は、パワーコンディショナの小型、低価格化、および超長寿命化を実現するための基盤技術として活用されるものとする。

研究成果の概要(英文)：In anticipation of the mass introduction era of household solar power generation system, we developed a fundamental technology for reducing the maintenance costs and for extending the service cycle time of the power conditioner which is essential for high-reliable power generation systems. Following outcomes was obtained; (1) the development of long-life power conditioner that does not use an electrolytic capacitor of reduced factor of the system life. (2) evaluation method and application technology of the power capacitors that is suitable for long life of the system, (3) optimal inductor design method essential for small and low loss of the power conditioner system. These achievements is expected to be used as key technology for realizing low-cost, small volume, and ultra-long lifetime of the power conditioner systems.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：新エネルギー 太陽光発電 パワーコンディショナ 高効率化 長寿命化

1. 研究開始当初の背景

エネルギーの安定確保と地球温暖化対策に加えて、2011年の東日本大震災と原発事故が重なった結果、これまでのエネルギー社会の在り方の抜本的な見直し（「革新的エネルギー・環境戦略」における自然エネルギーの開発と活用、電気エネルギーの効率的運用など）が強く求められている。なかでも、太陽光発電システムは、設置自由度が高い自然エネルギー源として、家庭用から大規模発電まで幅広い市場が期待できる。そのため、多くの企業が市場に参入し、世界的な販売競争が繰り広げられる中で、設備コストの低減の為の開発が進められてきた。一方で、近年は設備の長寿命化による総合的な発電コスト低減の重要性が注目され、太陽電池パネルでは20年以上の期待寿命が確保されるようになった。しかし、パワーコンディショナは多数の電力用電気部品を使用するため20年以上の長期運転を行う場合には定期保守と部品交換が必要である。大容量パワーコンディショナの場合には定期保守契約の締結によりこの問題を解消できるが、家庭用パワーコンディショナでは定期保守コストが相対的に高くなるため困難な状況にある。その結果、近い将来、家庭用パワーコンディショナの寿命故障に伴う追加コストの発生や、無保守に起因する重大事故が社会問題化することが懸念される。

研究代表者らは、パワーコンディショナの大量導入時代を見据え、小型・高効率化・低価格化と同時に、太陽電池寿命に見合う長期寿命性能を備えたパワーコンディショナ技術の重要性にいち早く着目し、基本的な研究を進めてきた。パワーコンディショナの高効率・低価格化や寿命を制約する要素には、(1)家庭用の単相インバータの場合、太陽電池発電効率の維持のために直流入力電圧を安定化させる大容量電解コンデンサが使用されてきたが、その寿命がインバータ寿命を制約する要因となっている、(2)インバータ回路に使用するフィルタインダクタや変圧器の損失は装置の効率や小型化に影響を与えると共に、その温度上昇が周辺の電子部品の寿命に影響を与える、(3)装置内部の温度変化に伴って、ハンダなどの接着部が機械的疲労を起こして装置寿命に影響を与える、などが指摘されている。

2. 研究の目的

本研究では、これらの研究成果を踏まえつつ、(1)効率低下を最小に抑制できるパワーデカップリング方式の回路構成と制御方式を開発する、(2)インダクタの小型・低損失化に不可欠な最適設計技術の開発、(3)長寿命化に適したコンデンサの評価・適用技術の開

発を行い、これらを統合して小型・低価格化と超長寿命化を両立する太陽光発電用パワーコンディショナの基盤技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、下記の4課題を設定し、各分担者が連携して効率的に研究を行う。

課題1：高効率パワーデカップリング技術の開発

単相インバータの直流入力側には交流電圧の2倍の周波数成分を持つ電力脈動が発生する。インバータの直流入力側に脈動電力に伴う電圧脈動が生じると期待する発電電力が得られない等の問題が生じる。従来は静電容量の大きな電解コンデンサ C_{DC} を接続して直流電圧を安定化したが、コンデンサの寿命が相対的に短い問題点がある。研究代表者は、コンデンサの蓄積エネルギー Q は $Q = CV^2/2$ で与えられることから、脈動電力成分を直流入力部以外の少容量コンデンサ C_X に大きな電圧振幅で蓄積すれば、長寿命の小容量コンデンサ（従来の $1/100$ 程度）が使用できることに着目し、上記原理（「パワーデカップリング」と呼ぶ）に基づく長寿命電力変換方式の研究を先駆的に進めてきた。しかし、脈動電力を蓄積コンデンサに転送する電力転送回路の電力損失の影響で、電力変換効率が数%程度低下する問題があった。そこで、電力損失を極小化できる脈動電力直送方式を考案し、基本原理の妥当性を確認している。本研究では、パワーコンディショナの代表的な方式である絶縁形と非絶縁形のインバータについて、考案した脈動電力直送方式のパワーコンディショナを製作し、パワーデカップリングに伴う効率低下を1%以下に抑制出来ることを実証する。

課題2：インダクタの小型・低損失設計技術の開発

2-1)インダクタの鉄損と銅損の分離計測技術:従来はインダクタの平均損失しか計測できなかったが、研究代表者らは、これまでの研究により（例えば科研費基盤研究(B)H21~24)PWM運転時のスイッチング期間(20~50 μ sec程度)毎のインダクタ鉄損(以下、瞬時鉄損と呼ぶ)の精密な計測法、および損失特性を記述するロスマップ法を開発した。しかし、インダクタ巻線抵抗に起因する銅損(「瞬時銅損」と呼ぶ)の精密計測法は開発課題として残されていた。磁性材料に巻いた電線に生じる銅損は、電線形状、巻線方法、材料透磁率等などの影響を受けるので、電線単独では正確な銅損を計測できない。そこで、先行研究で開発した鉄損計測装置を改良し、瞬時鉄損と同時に、インダクター一次巻線電圧を用いて瞬時全損失を計測し、その差分から瞬時銅損を求める手法を開発する。原理は単純であるが、一次巻線検出電圧に含有する多量のノイズと高電圧検出回路特有の大きな位相・振幅誤差により、高精度な損失計

測が困難である。本研究では、効果的なノイズ除去と、新しい位相・振幅誤差補正法を用いた計測装置を開発する。

2-2) インダクタの最適設計技術：パワーコンディショナに適したインダクタの最適設計手法を確立する。具体的には、各種磁性材料のロスマップデータと、材料形状、巻線方法による銅損特性を併用した最適設計計算アルゴリズムを開発する。特に、銅損は表皮効果や近接効果により多様に変化するので一般化は困難であるが、パワーコンディショナなどのインバータ用途のインダクタに限定することにより、実用的な計算方法を開発する。

課題3：コンデンサの損失計測装置の開発と長寿命コンデンサの選定

脈動電力を蓄積するコンデンサに流れる大きなパルス電流は、コンデンサの損失増加や寿命低下の要因になる。コンデンサの損失は種類や構造で異なることは知られているが、パルス電流通流時に特有な損失の定量的分析は示されていない。そこで、インダクタの瞬時鉄損計測法を拡張して、パルス電流通電時のコンデンサ瞬時損失計測装置を開発する。本装置の特長は、瞬時損失値に加えてヒステリシス曲線を計測できるので、曲線形状からコンデンサ寿命低下要因を分析する手法に発展させる。

課題4：小型・長寿命パワーコンディショナの開発と実証

新たに考案した脈動電力直送方式パワーコンディショナ（絶縁型および非絶縁型）を製作し、パワーデカップリング機能を含む諸性能の検証を行うと共に、パワーデカップリング時でも現行最高効率に迫る変換効率を実現することを検証する。また、高温動作環境試験装置を製作して加速寿命試験を行い、長期寿命性能の検証を行う。

4. 研究成果

課題1：高効率パワーデカップリング技術の開発

図1-1は新たに開発した、絶縁型パワーコンディショナにパワーデカップリング技術を適用した主回路構成図である。このパワーデカップリング方式の特長は、脈動電力をデカップリングコンデンサ (C_X) に蓄積するときはチョップ回路を経由するが、蓄積電力を交流電力系統に放出するときはインバータスイッチ $SX1/SX2$ から直接に転送するので、電力転送損失が低減し、パワーコンディショナの電力変換効率を高く維持できることである。図1-2は各部動作波形の例であり、パワーデカップリングによって直流入力電流がほぼ一定に維持できていることがわかる。図1-3は新たに開発した、非絶縁型パワーコンディショナにパワーデカップリング技術を適用した主回路構成図である。この方式の特長は、パワーデカップリング回路に昇降圧チョップ回路を使用したことである。これに

より、PWM インバータの直流部の最大電圧の増加を抑制できるので、PWM インバータに使用するパワーデバイスの損失を低減できる。図1-4はプロトタイプ機の変換効率の測定結果である。パワーデカップリング回路の動作に伴う変換効率の低下は僅かに1.7%であり、本研究の目的を達成できた。

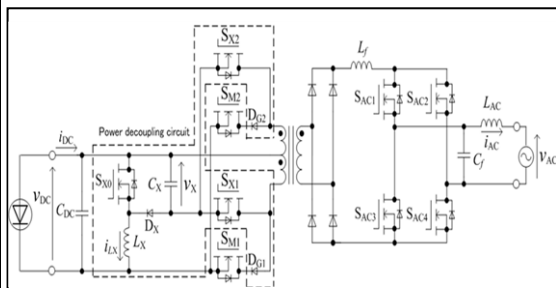
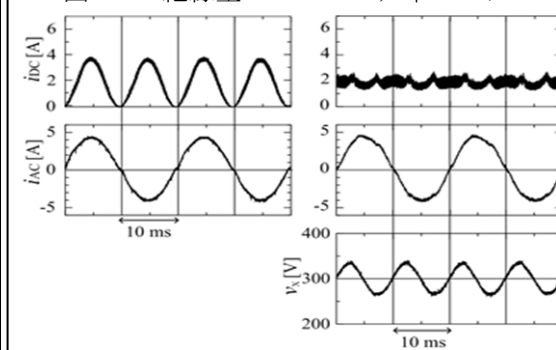


図 1-1 絶縁型パワーコンディショナ



(a)パワーデカップリングなし (b)パワーデカップリングあり

図 1-2 動作波形

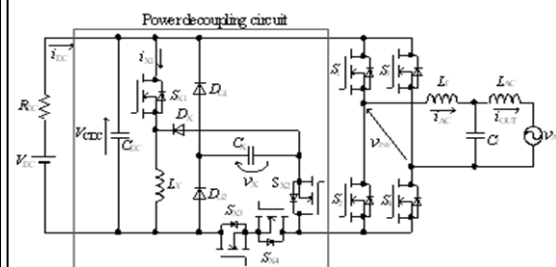


図 1-3 非絶縁型パワーコンディショナ

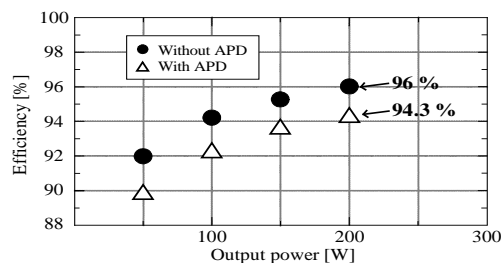


図 1-4 効率測定結果

課題2：インダクタの小型・低損失設計技術の開発

2-1) インダクタの鉄損と銅損の分離計測技術の開発

鉄系パウダーを磁性材料とするトロイダルコアを用いたインダクタを降圧チョップ回路に使用した場合のインダクタの鉄損と銅

損の分離計測手法を開発した。具体的には、研究者らが既に開発した BH アナライザを応用して鉄損計測値を計測し、また高精度電力計を用いて全損失を計測し、その差分から銅損を算出する。これを用いて、スイッチング周波数 20kHz、リップル率 10% 程度の動作条件の場合、巻線抵抗値には表皮効果や近接効果の影響が殆ど現れず、巻線導体の直流抵抗値から銅損が計算できることが明らかとなった。

2-2) インダクタの最適設計技術の開発

筆者らが既に開発した鉄損測定装置を用いて各種磁性体のロスマップを取得し、その特長分析を行った。その代表例を図 2-1 に示す。特に注目すべきは、フェライトは直流バイアス磁界の増加に伴って急速に鉄損値が増加するが、一方でセンダストは鉄損が若干低減することである。両磁性体の鉄損の絶対値はフェライトのほうが圧倒的に小さいが、直流バイアス重畳時のインダクタ鉄損としてどちらが優れているかは一見してわからない。そこで、鉄粉、センダスト、フェライトを用いて同一スペックのチョップ用インダクタを設計したときの全損失と外形の比較計算を行った。その結果を図 2-2 に示す。この結果から、損失と外形寸法の両面で、センダストはフェライトと遜色ない性能を持つことがわかる。これらの優劣比較はインダクタの電気的スペックに依って大きく変化するが、本研究で開発したインダクタ設計法を用いれば、それぞれのスペックに対応した最適設計が行える。

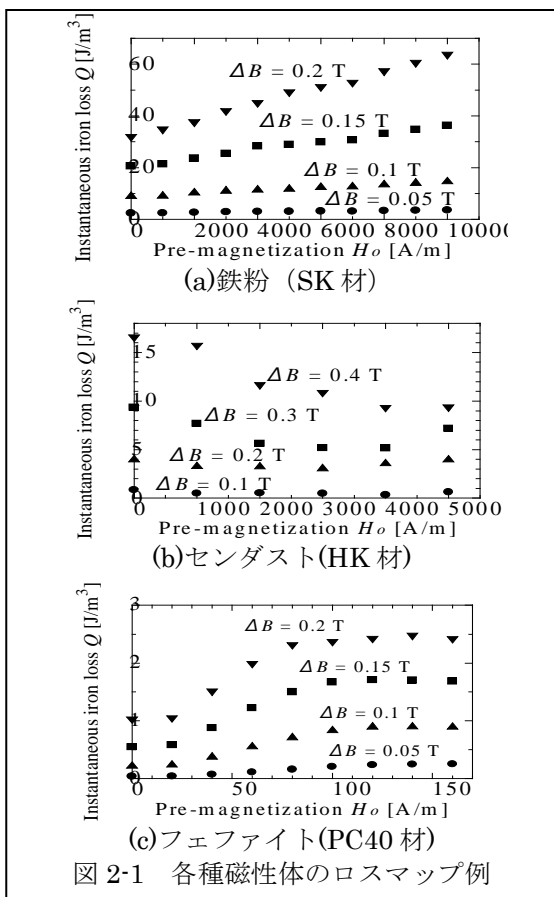


図 2-1 各種磁性体のロスマップ例

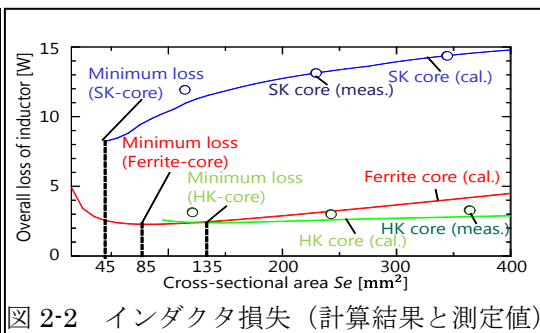


図 2-2 インダクタ損失 (計算結果と測定値)

課題 3 : コンデンサの損失計測装置の開発と長寿命コンデンサの選定

B-H アナライザを改造して、大電流を流通した条件での電力用コンデンサの損失と静電容量を高精度に計測する装置を開発した。装置の構成図を図 3-1 に示す。電解コンデンサ、ポリプロピレンコンデンサ、セラミックコンデンサの大電流通流時 (3 A) の損失特性の計測結果を図 3-2 に示す。これらから、以下の新たな知見が得られた。(1) 電解コンデンサでは大電流通流時の ESR が大幅に低下する、(2) セラミックコンデンサでは特定の周波数帯域で ESR が低下する、(3) ポリプロピレンフィルムコンデンサでは ESR の周波数依存性および電流値依存性が低く、その値も小さい。すなわち、フィルムコンデンサを用いたパワーデカップリング回路はパワーコンディショナの長寿命化に有益である。

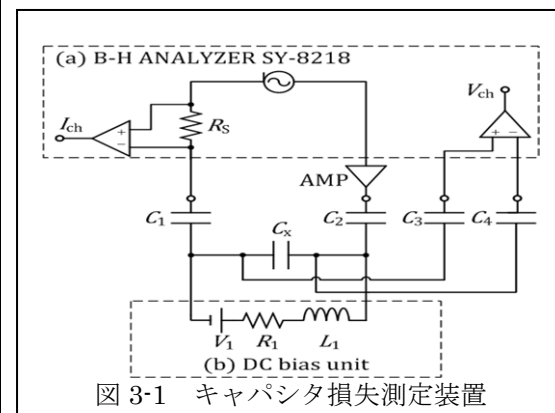


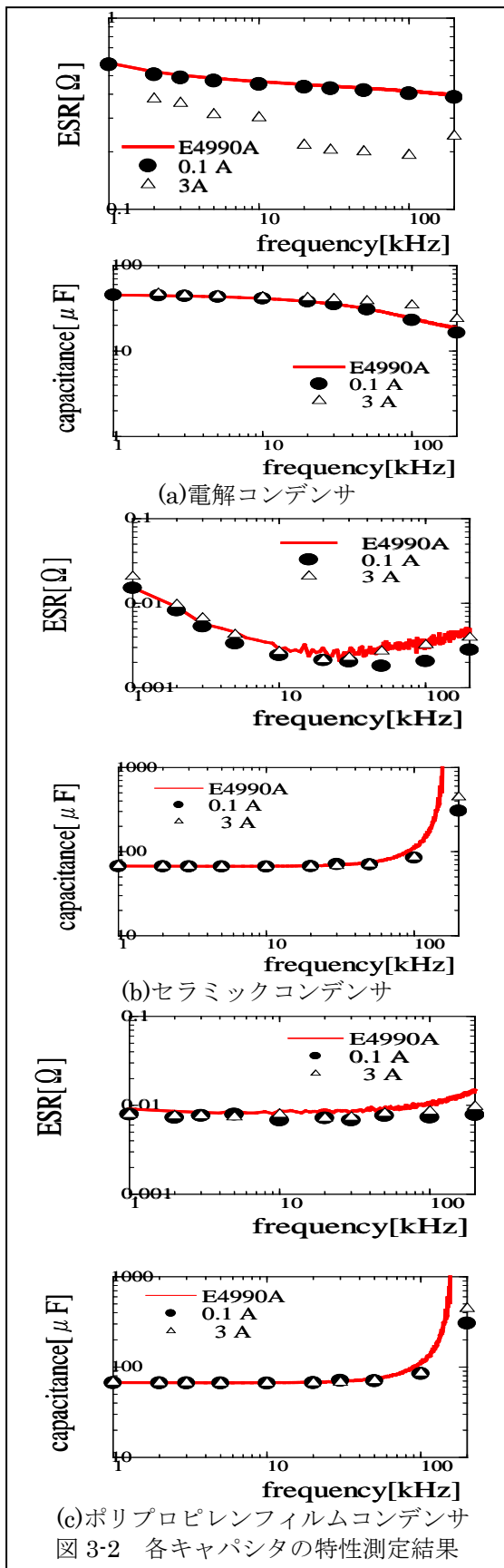
図 3-1 キャパシタ損失測定装置

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 8 件)

- (1) S. Yamaguchi, T. Shimizu, "Single-phase Power Conditioner with a Buck-boost-type Power Decoupling Circuit", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.5, No.3, pp.1-8, 2016 (Peer Review)
- (2) Hiroaki Matsumori, Toshihisa Shimizu, "Iron Loss Calculation of AC Filter Inductor for Three-Phase PWM Inverters," *Electrical Engineering in Japan*, Vol.190, No.2, pp.57-71, 2015 (Peer Review)



- (3)小俣 晋平, 清水 敏久, “家庭用太陽光発電用パワーコンディショナの入出力 EMI フィルタ設計手法”, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 12, pp. 1207-1216, 2015 (査読あり)
- (4)外山佳祐, 清水敏久, “パワーデカップリング機能を持つ高効率単相系統連系インバ

- ータとその制御法”, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 2, pp. 147-154, 2015 (査読あり)
- (5)吉田秀人, 和田圭二, 清水敏久, “単相アクティブフィルタの容量低減を目的とした周波数制限手法”, 電気学会論文誌 D, Vol.134, No.2, pp.202-208, 2014 (査読あり)
- (6)芳賀浩之, 清水敏久, “小型・高効率を実現する LLC 型直列共振コンバータ”, 電気学会論文誌 D, Vol.133, No.6, pp.652-658, 2013 (査読あり)
- (7)橋野哲, 清水敏久, “TDR 法を用いた規制インダクタンスと浮遊キャパシタンスの分離計測”, 電気学会論文誌 D, Vol. 133, No.4, pp.443-449, 2013 (査読あり)
- (8)松盛裕明, 清水敏久, 高野耕至, 石井仁 “三相 PWM インバータ用 AC フィルタインダクタ鉄損の算定”, 電気学会論文誌 D, Vol.133, No.10, pp510-517, 2013 (査読あり)

[学会発表] (計 26 件)

- (1)瀬田雄介, 清水敏久, “パワーデカップリング形パワーコンディショナの低力率における動作特性”, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, pp.I-43~I-44, 2015 年 9 月 2 日, 大分大学 (大分県・大分市)
- (2)丸山貴靖, 清水敏久, “電力変換回路における伝導ノイズの分析”, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, pp.I-447~I-448, 2015 年 9 月 2 日, 大分大学 (大分県・大分市)
- (3)長崎仁徳, 清水敏久, “パワーコンバータ用キャパシタの損失評価”, 平成 27 年電気学会産業応用部門大会, pp.I-469~I-472, 2015 年 9 月 2 日, 大分大学 (大分県・大分市)
- (4)長崎仁徳, 清水敏久 “キャパシタ損失測定装置を用いた各種キャパシタの損失比較”, 電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会, SPC-16-029, 2016 年 1 月 22 日, 立命館大学 (滋賀県・草津市)
- (5)瀬田雄介, 清水敏久 “パワーデカップリング形パワーコンディショナの低力率における動作特性”, 電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会, SPC-16-010, 2016 年 1 月 22 日, 立命館大学 (滋賀県・草津市)
- (6)H. Sato, and T. Shimizu, “Study on an accurate iron loss calculation method considering the non-uniformity of the magnetic flux density”, *IEEE ECCE*, pp.3032-3039, 2015 年 9 月 20 日, カナダ・モントリオール (Peer Review)
- (7)Y. Miwa, and T. Shimizu, “Loss Comparison of Inductors Used for Buck-chopper Circuit”, *ICPE-ECCE Asia*, pp.2098-2103, 2015 年 6 月 2 日, 韓国・ソウル市 (Peer Review)
- (8)H. Matsumori, and T. Shimizu, “Iron Loss Calculation of AC Filter Inductor for Three-Phase PWM Inverter”, *IEEE ECCE*, pp.3049-3056, 2015, カナダ・モントリオール

(Peer Review)

(9)T. Mori, K. Igarashi, K. Kanagawa, N. Yamashita, T. Shimizu, and Y. Bizen” Iron loss evaluation of iron powder core suitable for inductor used in power converters,” *IPEC Hiroshima*, 21P4-8, pp. 2983-2987, 2014年5月18日,広島国際会議場(広島県・広島市) (Peer Review)

(10)S. Yamaguchi, T. Shimizu, “A Single-phase Power Conditioner with a Buck-Boost-type Power Decoupling Circuit,” *IPEC Hiroshima*, 21E4-1, pp. 3771-3777, 2014年5月18日,広島国際会議場(広島県・広島市) (Peer Review)

(11)T. Tera, H. Taki, T. Shimizu, “Loss Reduction of Laminated Core Inductor Used in On-Board Charger for EVs,” *IPEC Hiroshima*, 19E1-2, pp. 876-882, 2014年5月18日,広島国際会議場(広島県・広島市) (Peer Review)

(12)佐藤弘明, 清水敏久, “トロイダルコア磁束密度不均一性による鉄損計算誤差に関する考察”, 平成26年電気学会産業応用部門大会, 1-39, pp. 197-198, 2014年8月26日,東京電機大学(東京都・足立区)

(13)三輪明寛, 清水敏久, “降圧チョップ用インダクタの最適設計のための基礎研究”, 平成26年電気学会産業応用部門大会, 1-41, pp. 201-202, 2014年8月26日,東京電機大学(東京都・足立区)

(14)三輪明寛, 清水敏久, “大容量鉄損評価装置の評価と測定”, 平成26年電気学会全国大会, 第4分冊, p. 120, 2014年3月18日,愛媛大学(愛媛県・松山市)

(15)長崎仁徳, 清水敏久, “パワーコンバータ用キャパシタの損失評価”, 平成27年電気学会全国大会, 第4分冊, p. 20, 2015年3月24日,東京都市大学(東京都・世田谷区)

(16)石井海吏, 清水敏久, “大容量インダクタの損失測定における電流検出方法の検討”, 平成27年電気学会全国大会, 第4分冊, p. 21, 2015年3月24日,東京都市大学(東京都・世田谷区)

(17)丸山貴靖, 清水敏久, “GaN-FETとSi-MOSFETのEMIの比較”, 平成27年電気学会全国大会, 第4分冊, p. 169, 2015年3月24日,東京都市大学(東京都・世田谷区)

(18)瀬田雄介, 清水敏久, “パワーデカップリング形パワーコンディショナの低力率における動作特性”, 平成27年電気学会全国大会, 第4分冊, p. 224, 2015年3月24日,東京都市大学(東京都・世田谷区)

(19)佐藤弘明, 清水敏久, “トロイダルコアの磁束密度不均一性による鉄損計算誤差に関する考察”, 平成26年電気学会全国大会, 第4分冊, p. 117, 2014年3月18日,愛媛大学(愛媛県・松山市)

(20)三輪明寛, 清水敏久, “大容量鉄損評価装置の評価と測定”, 平成26年電気学会全国大

会, 第4分冊, p. 120, 2014年3月18日,愛媛大学(愛媛県・松山市)

(21)山口翔太, 清水敏久, “昇降圧形パワーデカップリング回路を有するパワーコンディショナ” 平成25年電気学会産業応用部門大会, Y-9, 2013年8月28日,山口大学(山口県・山口市)

(22)江守教人, 清水敏久, 備前良雄, “インダクタ損失最適設計の検討”, 平成25年電気学会産業応用部門大会, 2013年8月28日,山口大学(山口県・山口市)

(23)松盛裕明, 森谷明弘, 清水敏久, 高野耕治, 石井仁, “PWMインバータにおけるACフィルタインダクタ鉄損評価”, 平成25年電気学会全国大会, 第4分冊, pp. 148-149, 2013年8月28日,山口大学(山口県・山口市)

(24)K. Toyama, T. Shimizu, “Study on a Control Method of a Single-phase Utility Interactive Inverter with a Power Decoupling Function,” *IEEE ECCE USA*, pp. 4740 - 4746, 2013年9月15日,米国・デンバー市(Peer Review)

(25)K. Emori, T. Shimizu, and Y. Bizen, “Discussion on Design Optimization of Inductor Loss Focused on Copper Loss and Iron Loss,” *IFEEC*, pp. 241-245, 2013年11月3日,台湾・台南市(Peer Review)

(26)S. Yamaguchi, T. Shimizu, “A Single-phase Power Conditioner with a Buck-Boost-type Power Decoupling Circuit,” *KJTWS SPC*, 2013年10月11日,台湾・台北市

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称:リアクトル

発明者:寺貴広、瀧浩志、清水敏久

権利者:首都大学東京、デンソー

種類:特許

番号:特願2014-100747

出願年月日:平成26年5月14日

国内外の別:国内

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

清水 敏久 (SHIMIZU TOSHIHISA)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号:30254155

(2)研究分担者

和田圭二 (WADA KEIJI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号:00326018

(3)連携研究者

なし