

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360112

研究課題名(和文) 超低損失電力変換器の不安定回避・高速過渡応答収束デジタル制御回路の開発研究

研究課題名(英文) Development of Digital Control Circuit for High stable and Fast Transient Response of Ultra Low Loss Power Converter

研究代表者

黒川 不二雄 (KUROKAWA, Fujio)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：20140808

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：家電・照明機器あるいは太陽電池やバッテリーなどのエネルギーマネージメント機器等に用いられる小中容量の電力変換器においては、スイッチングデバイスやリアクトル、キャパシタの開発が進み、今後、極端な低損失化が期待できる。本課題では、省エネのために、静特性の性能を維持しつつ、待機と能動モードの切換えを高速で頻繁に行うためのフィードバックゲインなどの制御パラメータの動的な変更、機械学習の導入などにより、高速かつ安定な過渡特性の大幅な改善を実現する制御手法を開発した。この実現により、超低損失かつ高速過渡応答性能を満たす電力変換器が実現でき、電気機器類の省エネルギーマネージメントへの適用が可能となった。

研究成果の概要(英文)：This research developed new and highly efficient control methods for fast and stable transient characteristics of digitally controlled dc-dc converters, which are employed in low energy oriented electrical equipment. In such equipment, it is required that dc-dc converters used in the equipment frequently are operated both in stand-by mode and active mode. Such operation causes the system unstable especially in the transient state. In the developed methods, control parameters, such as gain parameters, are changed dynamically. Additionally, the machine learning approach is also employed and combined. Those methods are adopted to obtain fast convergence to satisfy stable control and low energy consumption of dc-dc converters in the transient state. From evaluation results, developed methods can obtain superior transient characteristics compared to the conventional method and they contribute to the low energy management function to provide the fast and stable control.

研究分野：電子デバイス・電子機器

キーワード：デジタル制御 電力変換器 低損失 高速応答 DC-DCコンバータ

1. 研究開始当初の背景

CO2 削減あるいは今回の東日本大震災のような災害時への対応として、省エネが緊急の課題として閣議決定の科学技術基本計画、科学技術重要施策アクションプラン、経済産業省・技術戦略マップ等で挙がってきている。その場合、産業部門の電力は省エネ化がかなり進んでいるが、家庭部門の電力は 1973 年に較べて逆に 2 倍以上に増えている。家庭においても省エネを飛躍的に実施するためには、各家電機器、照明機器あるいは今後増えるであろう太陽電池やバッテリーのエネルギー管理機器等に用いられる電源や電力変換器を構成する DC-DC コンバータの電力効率の向上が極めて重要である。

この電力効率に関しては、SiC 等の新しいパワーデバイスや固体電解キャパシタ等の新素材の開発により低損失化が進み、現在、次々世代のパワーデバイスとしての GaN 素子の開発もかなり進んでおり、今後、この低損失化の傾向は益々顕著になる。一方で、これら DC-DC コンバータには、必要な時だけ動作するアクティブマネジメントによる省エネ化技術が求められている。特に、電子機器の主体である半導体 IC の省エネを進める場合、低電圧大電流で動作する LSI の待機状態であるスリープモードから能動状態であるアクティブモードの切り替えを円滑に行うために、急峻に大電流を流せる高性能過渡応答技術を要することで、出来るだけ待機時間を増やして無駄な電力を使わないエネルギー管理、さらにはその効率を向上させるスマート化は極めて重要である。

2. 研究の目的

家電機器や照明機器の省エネ化のためには、そこで用いられている電力変換器での電力効率が極めて重要である。それらに用いられる小容量の電力変換器においては、スイッチングデバイスやリアクトル(インダクタ)、キャパシタの開発が進み、今後、極端な低損失化が期待できる。低損失化が進むことは、電力変換器の効率向上、エネルギーシステムの省エネの立場からは歓迎することであるが、制御の立場からは、制御ゲインをかけた場合に系が不安定になりやすく、発振したり、また過渡時になかなか収束しなくなるため大問題となる。また、CPU に代表される低電圧大電流で動作する LSI では、省エネのために待機と能動モードの切り替えを高速で頻繁に行う必要があり、ゲインを大きくして制御性を高める必要が増してくる。

本研究は、このような矛盾する問題を一気に解決するための制御手法を提案し、グリーンイノベーションのための新しいデジタル制御回路を研究開発するものである。最近、スイッチング電源のデジタル制御に関する研究発表は重要なトピックスとして扱わ

れ、国際会議での発表件数の数十%に及ぶことも多い。これは、開発が進んでいる SiC などの新しいパワー半導体の駆動、さらに EV やスマートグリッドに用いられる多くの電源や電力変換器の遠隔操作や自律運転によるエネルギー管理のスマート化にも不可欠でもあり、あらゆる場面の省エネ化になくなくてはならない研究であると認識されているからである。本研究では、デジタル制御電源の本質的な効果を明らかにし、その基礎技術を構築する。情報家電機器のエネルギー消費効率技術の向上を図るために今後の低損失化が進んだ折には、本研究で明らかにされたデジタル制御方式を、既存の小容量のスイッチング電源の制御方式に置き換えることで、グリーンイノベーションに多大な貢献ができる。

3. 研究の方法

従来の DC-DC コンバータの制御では、フィードバック制御が主流である。その際、フィードバック制御ゲインは、静特性と過渡特性を同時に満たすような安全な値が選ばれるため、結果として、過渡特性を最大限改善するパラメータは選べないことになる。本研究では、デジタル制御の特徴を最大限生かすため、これまで固定値とされていたフィードバックゲインやそのほかの制御パラメータを動的に変更し、過渡特性を大幅に改善する手法を開発する。具体的には、

- フィードバック制御ゲインを必要とされる過渡応答時のみに増大し、不安定状態あるいはその臨界で動作する方式
- フィードバック制御ゲインの増大に頼らず、過渡時は機械学習により得られた制御則により高速応答と収束を図る方式

などの開発により、今までにない独創的な研究を行い、次世代のデジタル制御電源の形を示す。

デジタル制御電源は多くの機関で研究されているが、現状のデジタル制御電源は、アナログ制御時代の考え方に囚われ、常に安定に動作し、その範囲内で最も優れたかと応答を得るためのゲインを探するというフィードバックの呪縛から抜け出せないでいる。本研究では、そういう従来の概念を覆し、過渡状態も含めた全ての動作毎に、その場の安定性ではなく全体の振る舞いにとって最適な制御パラメータを設定することを求め、さらには機械学習によりそれを自動的に行うことを目指す独創的な発想に基づく。また、制御対象は出力電圧だけでなくリアクトル(インダクタ)電流も含んでいるが、そのためにリアクトル電流を直接検出すれば、低損失電力変換器では微少な値のシャント検出抵抗での電力損失すら大きな問題となる。そこで、ここでは検出抵抗を用いずにリアクトルの両端の電圧等の情報を用いて大きなリプル

を持つリアクトル電流を検出する方式も併せて検討した。

4. 研究成果

本研究計画に基づき、以下の項目について成果を得た。

(1) フィードバックゲインの切り替えによる過渡特性の改善

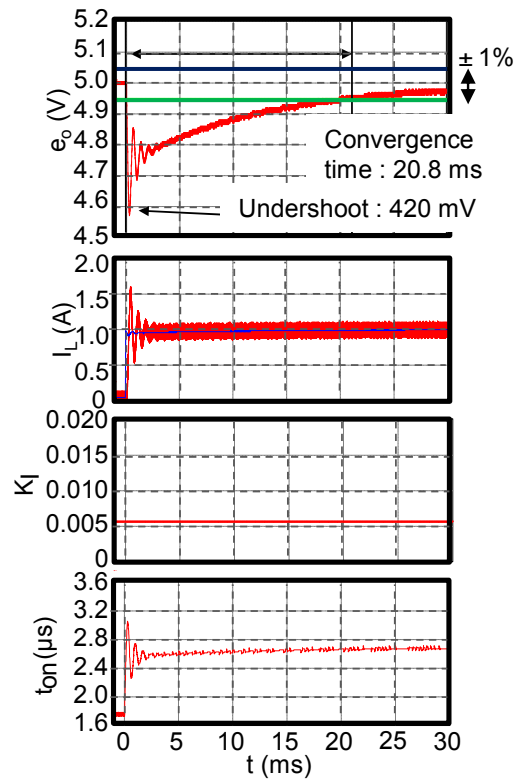
従来のデジタル制御 DC-DC コンバータにおいては、PID 制御が主流である。このとき PID 制御のフィードバックゲインは静特性と動特性の両方を同時に満たすように決定される。そのため、過渡応答時におけるゲインパラメータは最適なものとはならない。ここでは、PID 制御のなかでも積分ゲインに注目し、静特性時の性能を満たしつつ、過渡時のみ積分ゲインを切り替えることで、過渡応答の大幅な改善を行う手法を提案し、実証した。図 1 に過渡特性の改善例を示す。積分ゲインは、過渡時のみその値を大幅に変更し、静特性時への悪影響なしに、過渡特性の改善を行っていることがわかる。このようなダイナミックなゲインの変更は、従来のアナログ制御や、アナログを置き換えただけのデジタル制御では考えられないような発想であり、また、デジタル特有の柔軟な制御のきわめてわかりやすい例でもある。この手法により、極めて広い入出力範囲でも安定した制御手段の提供が可能となった。

(2) 電流非検出による低損失化

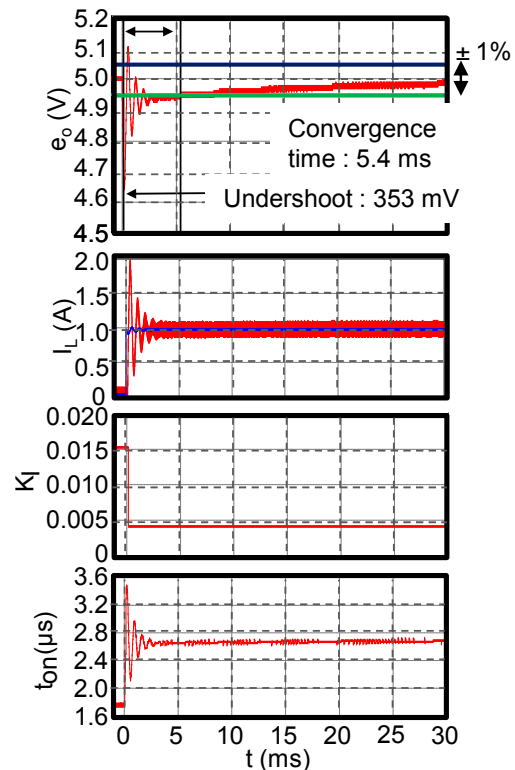
DC-DC コンバータの制御において、出力電圧とリアクトル電流を検出して制御を行うが、その際、電流検出のための検出回路での損失は、低損失化のうえで大きな問題となる。そこで、リアクトル電流の検出を行わずに、演算式より推定する手法を開発した。この手法では、リアクトル電流は、直接検出されるのではなく、制御演算結果である時比率などの情報から推定値として計算される。その結果、これまでと同等のリアクトル電流の値をセンサーレスで得ることできるようになった。大電流化がすすむコンバータにおいて、検出抵抗を用いないことは、低損失化においてきわめて有効な手法であり、様々なコンバータでの適用が期待できる。

(3) 機械学習による過渡特性の改善

フィードバックゲインの切り替えによる過渡特性の改善は極めて有効であるが、一方で、負荷状況に応じてゲインを設定する設計コストや、経年劣化などの回路パラメータの



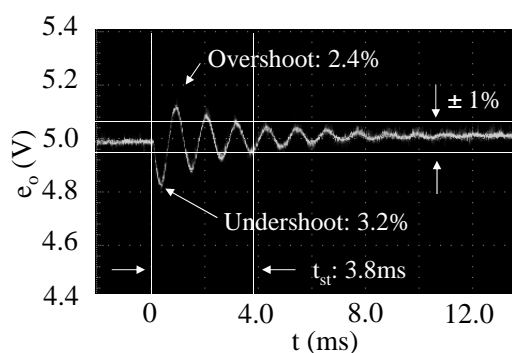
(a) 固定フィードバックゲイン制御



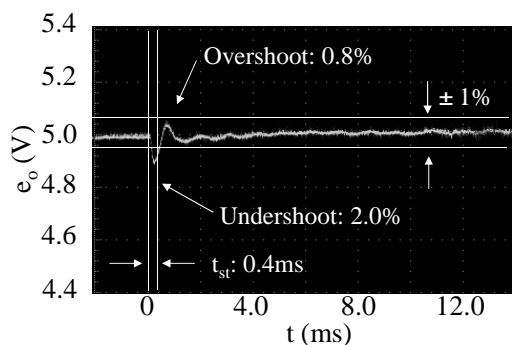
(a) 提案のフィードバックゲイン切り替え制御方式

図 1 フィードバックゲイン切り替えによるデジタル制御方式の過渡特性の改善例 (E_i=20V, E_o=5V, 定格 1A, 負荷変動 0.05A 1A の場合)

変化への対応などに懸念がある。そこで、コンバータの出力電圧などのデータを蓄積し、機械学習を用いてそれらのデータから、制御パラメータを随時変更することで大幅な過渡特性を改善する手法を開発した。この手法においては、従来手法では固定された値である、目標値を、ニューラルネットワークで柔軟に変更し、過渡特性を大きく改善している。図2に、ニューラルネットワークを援用した、過渡特性の改善例を示す。機械学習を用いた手法では、一旦データを取得すれば、そのデータに応じた制御パラメータを柔軟に変更することが可能となるため、ゲインの設計や回路パラメータの変更などへも自動的に対応することが可能となるため、その適用範囲が広いといえる。



(a) 従来のPID制御方式での過渡特性



(b) ニューラルネットワークを援用した新しい制御方式での過渡特性

図3 機械学習によるデジタル制御方式の過渡特性の改善例($E_i=20V$, $E_o=5V$, 定格 1A, 負荷変動 0.2A 1A の場合)

以上のような手法を開発し、アナログやデジタル制御の枠にとらわれない低損失化や高速過渡応答のための新しいデジタル制御についての確立を行い、十分な成果を得た。

得られた成果より新しいデジタル制御電源の性能が明らかになり、デジタル化の本質的な効果がどのようなものかという点で、大きな成果を得た。今後、本研究で得た

成果をもとに、情報家電機器のエネルギー消費効率技術の向上を図るために様々な分野での行動情報化积淀における電力変換器への応用を目指す。今後の低損失化が進んだ折には、世界中の小中容量のスイッチング電源の制御方式を全てデジタル制御方式に置き換えることが可能となりグリーンイノベーションに多大な貢献ができる。

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 31 件)

1. Yudai Furukawa, Fujio Kurokawa, Design Consideration of High Performance Digital Control DC-DC Converter Based on Frequency Characteristics, in Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology, 査読有, 2015, pp. 2080-2084.
2. 柏木瞬, 光武大貴, 谷口弘展, 柴田裕一郎, 小栗清, 丸田英徳, 黒川不二雄, PWM 制御向け高時間分解能信号生成回路の FPGA 実装, 信学技報 RECONF2014-58, 査読無 2014,85-90.
3. Hidenori Maruta, Daiki Mitsutake, Fujio Kurokawa, Transient Characteristics of DC-DC Converter with PID Parameters Selection and Neural Network Control, in Proc. IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, 査読有, 2014, pp. 447-452.
4. Mio Iijima, Toshiyuki Ishikake, Toshiaki Yachi, Semi-Activate Supplies of Zigzag-Type DMFCs with the Channel Paths, Proc. IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, 査読有, 2014, pp. 75-79.
5. Fujio Kurokawa, Yudai Furukawa, Tsuyoshi Higuchi, Akihiko Katsuki, Ilhami Colak, A Novel Two-Compensation Digital Control DC-DC Converter, in Proc. IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 査読有, 2014, 732 - 736.
6. Fujio Kurokawa, Tsuyoshi Kume, Improvement of Transient Response of Switching Power Supply in Light Load Region, in Proc. IEEE International Communications Energy Conference, 査読有, 2014, CD-ROM 6 pages.
7. Fujio Kurokawa, Shota Hirota, A New High Performance DC-DC Converter with Sensorless Model Reference Modification, in Proc. IEEE International Communications Energy Conference, 査読有, 2014, CD-ROM 5 pages.
8. Fujio Kurokawa, Yudai Furukawa, High

- Performance Digital Control Switching Power Supply, in Proc. IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, 査読有, 2014, pp. 1378-1383.
9. Masaki Shimoda, Shuhei Tachikawa, Toshiaki Yachi, Economic Evaluation of Heat Pump and Photovoltaic Cooperation System under Real-Time Pricing, in Proc. Grand Renewable Energy, 査読有, 2014, 4pages.
 10. Kazuhiro Kajiwara, Fujio Kurokawa, Yuichiro Shibata, Static and Dynamic Analyses of Digital Peak Current Mode DC-DC Converter, in Proc. IEEE International Power Electronics Conference, 査読有, 2014, pp. 3950-3954.
 11. Shinichi Kawaguchi, Toshiaki Yachi, Adaptive Power Efficiency Control by Computer Power Consumption Prediction Using Performance Counters, in Proc. IEEE International Power Electronics Conference, 査読有, 2014, pp. 3959-3965.
 12. Shinichi Kawaguchi, Toshiaki Yachi, Computer Power Supply Efficiency Improvement by Power Consumption Prediction Procedure Using Performance Counters, IEICE Trans. Commun., Vol. E97-B, 査読有, 2014, pp. 408-415.
 13. 飯島澗, 石掛純徹, 谷内利明, シグザグ型 DMFC におけるセミアクティブ化, 信学技報 EE2014-10, 査読無, 2014, . 29-34.
 14. 下田真幹, 谷内利明, 立川修平, リアルタイムプライシングを適用した太陽光発電・ヒートポンプ給湯器連携システムの経済性評価, 電気学会家電・民生研究会資料 HCA-14-22, 査読無, 2014, 51-54.
 15. Hidenori Maruta, Masashi Motomura, Fujio Kurokawa, An Evaluation Study on Circuit Parameter Conditions of Neural Network Controlled DC-DC Converter, in Proc. IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, 査読有, 2013, CD-ROM 6 pages.
 16. Fujio Kurokawa, Yudai Furukawa, 1MHz Sampled Quick Response Digital Control DC-DC Converter, in Proc. IEEE Industrial Electronics Society, 査読有, 2013, pp. 126-131.
 17. Fujio Kurokawa, Shota Hirotaki, Wide Transient Response Digital Control DC-DC Converter, in Proc. IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 査読有, 2013, CD-ROM 6 pages.
 18. Shinichi Kawaguchi, Toshiaki Yachi, New Power Consumption Prediction Procedure Using Performance Counters to Increase Computer Power Supply Efficiency, in Proc. of International Telecommunication Energy Conference, 査読有, 2013, pp. 710-715.
 19. Fujio Kurokawa, Kazuhiro Kajiwara, Yuichiro Shibata, Kentaro Yamashita, Haruhi Eto, A New Digital Peak Current Control for DC-DC Converter with Fast P Control and IIR Filter, in Proc. IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 査読有, 2013, 1717-1722.
 20. Fujio Kurokawa, Kazuhiro Kajiwara, Yuichiro Shibata, Yoshihiko Yamabe, Toru Tanaka, Keiichi Hirose, Control Characteristics of Novel Digital Peak Current Mode DC-DC Converter, in Proc. IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 査読有, 2013, 125-129.
 21. Fujio Kurokawa, Shun Higuchi, Digital Controlled Integral Gain Switchover Method DC-DC Converter, in Proc. IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 査読有, 2012, CD-ROM 5 pages.
 22. Kohei Kawabuchi, Toshiaki Yachi, Analysis of the Heat Transfer Characteristics in a Thermoelectric Conversion Device, in Proc. IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 査読有, 2012, CD-ROM 5pages.
 23. Yasuyuki Nishida, Hiromichi Ohyama, Predrag Pejovic, Johann W. Kolar, Three-Phase Harmonic Reducing Diode Rectifier, in Proc. 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2012 ECCE Europe) , 査読有, 2012, LS3e.3-1 - LS3e.3-6.
 24. M. Jankovic, M. Darijevic, P. Pejovic, J. W. Kolar, Y. Nishida, "Hybrid Three-Phase Rectifier with Switched Current Injection Device, in Proc. 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2012 ECCE Europe) , 査読有, 2012 LS3e.2-1 - LS3e.2-7.
 25. Fujio Kurokawa, Kazuhiro Kajiwara, Digital Controlled Fast Average Current Mode DC-DC Converter Using VCO and FIR Filter, in Proc. IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, 査読有, 2012, CD-ROM 4 pages.
 26. Fujio Kurokawa, Shun Higuchi, A Novel Digital Variable Integral Gain Control for

- DC-DC Converter, in Proc. IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, 査読有, 2012, CD-ROM 5 pages.
27. Fujio Kurokawa, Shun Higuchi, Improved Characteristics of DC-DC Converter with Digital Variable Gain Switchover Function, in Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 査読有, 2012, pp. 508-512.
 28. Fujio Kurokawa, Kazuhiro Kajiwara, Performance Characteristics of Quick Response Average Current Mode DC-DC Converter Using Digital Filter, in Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 査読有, 2012, pp. 720-723.
 29. Toshiyuki Ishikake, Masanori Aihara, Toshiaki Yachi, in Proc. IEEE International Telecommunications Energy Conference, 査読有, 2012, 1-6.
 30. 石掛純徹, 相原匡紀, 谷内利明, ジグザグ型 DMFC における空気供給法の検討, 信学技報 EE2012-2, 査読無, 2012, 29-34.
 31. 茂木 進一, 西田 保幸, 各種 DC-DC コンバータにおけるスイッチング損失の比較, パワーエレクトロニクス学会誌, 査読有, 2012, 203-209.

〔学会発表〕(計 12 件)

1. 廣滝翔太, 黒川不二雄, 電流非検出によるモデルを用いた DC-DC コンバータの基本特性について, 電子情報通信学会九州支部学生会講演会, 2014.9.20, 鹿児島大学工学部郡元キャンパス.
2. 元村正志, 丸田英徳, 黒川不二雄, 学習機能により基準値修正方式 DC-DC コンバータの過渡特性改善について, 電子情報通信学会研究会技術報告, 2014.1.23-24, 宮崎観光ホテル.
3. 飯島滯, 谷内利明, ジグザグ型 DMFC の流路を用いた燃料供給法, 平成 26 年電気学会全国大会, 2014, 愛媛大学城北キャンパス.
4. 元村正志, 丸田英徳, 黒川不二雄, ニューラルネットワークを用いた DC-DC コンバータの基準値多段階逐次修正における基本特性, 電気関係学会九州支部連合大会講演, 2013.9.25-26, 熊本大学黒髪南地区.
5. 久米剛志, 梶原一宏, 黒川不二雄, 積分ゲイン切替機能を持つデジタル制御方式 DC-DC コンバータの過渡特性について, 電気関係学会九州支部連合大会講演, 2013.9.25-26, 熊本大学黒髪南地区.
6. 元村正志, 丸田英徳, 黒川不二雄, ニューラルネットワーク制御を加えた基準値修正方式 DC-DC コンバータについて, 電子情報通信学会九州支部学生会講演会, 2013.9.24, 熊本大学黒髪南地区.

7. 久米剛志, 黒川不二雄, 出力電圧安定化のためのゲイン切替機能を用いたデジタル制御方式 DC-DC コンバータ, 電子情報通信学会九州支部学生会講演会, 2013.9.24, 熊本大学黒髪南地区.
8. 高橋秀和, 谷内利明, 燃料電池共同利用時におけるアダプティブマネジメントの検討, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2013, pp.20-9-20-10, 2013, 朱鷺メッセ 新潟コンベンションセンター.
9. 樋口駿, 黒川不二雄, DC-DC コンバータのリアクトル電流不連続領域における切り替えゲインについて, 電気関係学会九州支部連合大会, 2012.9.24-25, 長崎大学文教キャンパス.
10. 元村正志, 丸田英徳, 黒川不二雄, ニューラルネットワークを用いた降圧型 DC-DC コンバータの過渡特性改善について, 電気関係学会九州支部連合大会, 2012.9.24-25, 長崎大学文教キャンパス.
11. 山西研洋, 黒川不二雄, モデルを用いた DC-DC コンバータに対する過渡特性の一考察, 電気関係学会九州支部連合大会, 2012.9.24-25, 長崎大学文教キャンパス.
12. 樋口駿, 黒川不二雄, DC-DC コンバータのリアクトル電流不連続領域における切り替えゲインについて, 電気関係学会九州支部連合大会, 2012.9.24-25, 長崎大学文教キャンパス.

〔図書〕(計 件)

- なし
〔産業財産権〕
なし
〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒川 不二雄 (KUROKAWA, Fujio)
長崎大学・工学研究科・教授
研究者番号: 20140808

(2) 研究分担者

谷内 利明 (YACHI, Toshiaki)
東京理科大学・工学部・教授
研究者番号: 90349845
柴田 裕一郎 (SHIBATA, Yuichirou)
長崎大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 10336183
丸田 英徳 (MARUTA, Hidenori)
長崎大学・工学研究科・助教授
研究者番号: 00363474
西田 保幸 (NISHIDA, Yasuyuki)
千葉工業大学・工学部・教授
研究者番号: 70237709

(3) 連携研究者

なし