

## 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4月27日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360134

研究課題名（和文）省エネ加速のための高速知的デジタル制御スイッチング電源の開発研究とその応用

研究課題名（英文）Research and development of high-speed intelligent digitally controlled switching power supply for energy-saving

研究代表者

黒川 不二雄（KUROKAWA FUJIO）

長崎大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20140808

研究成果の概要（和文）：省エネルギー普及の加速を目的とする高速知的デジタル制御スイッチング電源の開発を行う。高速かつ知的なデジタル制御の実現のため、FPGAを用いた試作回路を作成し、基本動作の確認を行うとともに、その解析を行って有効性を確認した。その後、デジタル信号処理技術をさらに駆使して提案回路の改良を行い、制御性の向上を図った。

研究成果の概要（英文）：The high-speed and intelligent digitally controlled switching power supply is developed for accelerate the research, development and diffusion of energy saving technologies. The trial circuit was developed with FPGA to realize the high-speed and intelligent system. The validity of the developed system is confirmed by the experiments and analysis. Further, the system is improved by fully employment of digital signal processing technologies based on those results. As a result, the developed system has the remarkable performance compared to previous ones.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2011年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	13,300,000	3,990,000	17,290,000

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：省エネルギー、スイッチング電源、デジタル信号処理、高速制御、知的制御

## 1. 研究開始当初の背景

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最も新しい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。研究代表者の論文も、招待講演や招待論文になることも多い。これらの多くの発表論文では、出力平滑回路の後

段に位置するスイッチング周波数よりも2桁程度応答の遅い出力電圧のみを検出することで基本的に時間遅れを受け入れて、その範囲でデジタル制御により少しでも良い応答を引き出そうとしている。一部には、スイッチング電源の直流出力電流を検出したり、変化する回路内のインダクタ電流を平均化

してなんとか 1～2 周期遅れで検出して用いるデジタル方式は報告されているが、直接、高周波で変化するインダクタ電流を検出してアナログ方式と同じに応答性を高めたデジタル制御方式は全く報告されていない。

## 2. 研究の目的

情報機器や産業用電子機器あるいは家電機器間で相互に情報を交換してエネルギーの制御をするためには、エネルギーを扱っている電源部を自由にコントロールすることが不可欠である。しかし、肝心のエネルギーを扱うスイッチング電源は扱い難いアナログ制御方式のままである。この電源部の制御を急いでデジタルに置き換えることは、以下の経済産業省「技術戦略マップ2008」にも解決すべき重要な研究課題として取り上げられている。そのためには、アナログ方式よりも高い制御性で、高いコストを跳ね返す性能を出せる「電源内の変化するインダクタ電流を瞬時に検出し、電流のピーク値を制御」する高い技術が不可欠である。

本研究では、そのための新しい方式を提案し、試作回路を作り、動作特性、解析手法および設計指針を明らかにすることが目的である。また、常に最適な電力効率を得る制御方式とパワーマネジメントも併せて検討する。それにより高性能な知的デジタル制御電源を一般技術者が容易に設計できるようになり、「技術戦略マップ2008」の目標の電源のパワーマネジメント技術の実用化が一気に加速され、消費電力の1%を削減し、62億 kWh 以上の省エネが可能になる。これまでに、JSTより特許をPCT出願し、さらにシミュレーションで検討を加えてきている。その結果、瞬時に変化する電流を検出でき、実用化可能な優れた過渡応答特

性がシミュレーション上で得られている。

そこで、まず FPGA(Field Programmable Gate Array, 回路を簡単に書き込める LSI)により試作回路を作成し、基本動作の確認を行い、その解析を行って有効性を確認する。その後、デジタル信号処理技術をさらに駆使して提案回路の改良を行い、制御性の向上を図る。デジタル回路では、その宿命として、高精度化を図ればクロック周波数が増加し、回路自体の消費電力が増す。そこで、クロック周波数と消費電力の関係を明らかにする。

さらに、パワーデバイスのモデル化等により電力変換部の電力効率を1%以上改善するために常に最適な電力効率を追尾する方式を確立する。そのために電気機器や輸送機への応用を考慮した電源シミュレータを製作し、パワーマネジメントの評価試験を行う。デジタル制御電源が数多くの機関で研究されている。しかし、現状のデジタル制御電源は、デジタル回路の宿命である時間遅れを解決することなく研究開発が進められており、コストの面の制限もあり、一部の実用化しか期待できない。本研究で提案するシステムは、高価な A/D 変換器を用いることなく、電源回路の電力変換器(DC-DC コンバータ)内部のインダクタ電流を瞬時に検出できる回路技術を実現する他に例を見ない独創的なものであり、優れた応答性を備えている。これからの高性能なデジタル制御電源のキー技術となるものである。常に出力電圧を一定にするように働電力変換回路(DC-DC コンバータ)で、平滑回路の後の応答の悪い出力電圧や1～2 スwitchング周期遅れの平滑したインダクタ電流を用いることなく、しかも高価な A/D 変換器も使用せず、回路の工夫で瞬時にインダクタ電流を検出することで高性能なデジタル制御電源を実現でき

る。

### 3. 研究の方法

#### (概要)

まず、FPGAにより試作回路を作成し、基本動作の確認を行い、その解析を行って有効性を確認した。その後、デジタル信号処理技術をさらに駆使して提案回路の改良を行い、制御性の向上を図った(平成21年度)。

さらに、提案方式に盛り込んだ新しい知的なデジタル制御アルゴリズムを設計・作成し、アルゴリズムを実現する高速知的デジタル制御を実装した。また、パワーデバイスのモデル化により電力変換部について、最適な電力効率を追尾する方式を確立した。そのために電気機器や輸送機への応用を考慮した電源シミュレータを製作し、パワーマネジメントの評価試験を行った(平成22-23年度)。

#### (平成21年度)

IEEE(米国電気電子学会)の最も権威ある国際会議PESC(Power Electronics Specialists Conference)に採録され、平成20年6月にスイッチング電源の主要部分のDC-DCコンバータのインダクタ電流のピーク値を瞬時に検出する方式のシミュレーションをさらに進め、特性を詳細に明らかにし、動作アルゴリズムを明確にした。

具体的には、以下のように研究開発を進めた。まず、本提案のデジタル制御回路をFPGAにより設計し、製作・評価を行った。次に、試作したFPGAを用いてDC-DCコンバータを製作し、動作アルゴリズムを明確にするとともに動作解析を行い、提案手法の有効性を確認した。本試作により得られた知見をもとにさらに動作アルゴリズムの改良を

行った。具体的には、デジタル信号処理技術をさらに駆使して制御アルゴリズムの改善を図り、それを基に提案回路の改良を行い、制御性の向上を図った。

改良したデジタル制御回路で、再度、DC-DCコンバータを動作させ、特性評価を行い、新アルゴリズムの有効性を明らかにした。提案アルゴリズムの実装および評価に加え、パワーマネジメント評価のためのパワーデバイスや電池、回路のモデル化および電源シミュレータの基本設計を始め、回路方式を基にシミュレーションを行った。

#### (平成22-23年度)

上記平成21年度の成果を基に、パワーデバイスのモデル化によりスイッチ素子を流れる電流が変化した場合でも常に最適な電力効率を得られる条件を明らかにした。また、その条件を基に素子のモデル化が困難な場合は、簡易モデルを考えることで対応した。

さらに、提案方式に盛り込んだ新しい知的なデジタル制御アルゴリズムを設計・作成し、アルゴリズムを実現する高速知的デジタル制御回路をFPGAにより設計・製作し、動作を確認した。これにより、高速なデータ認識機能や異なった制御動作を同時に行うことが可能となり、高速かつ知的なデジタル制御を実現したといえる。

また、製作したFPGAを用いてDC-DCコンバータを製作し、動作アルゴリズムを明確にするとともに、動作解析を行い、その有効性を確認した。また、DC-DCコンバータが発生するスイッチングノイズの影響を最小限に抑える対策を確立した

最後に、ここまでの成果に基づき、パワーマネジメント評価のためのパワーデバイスや電池、回路のモデル化および電源シミュレータを完成させ、回路方式を基に電源シミ

シミュレータを設計・製作し、実験評価を行った。

#### 4. 研究成果

本提案に基づいた高速知的デジタル制御スイッチング電源について、FPGAにより高速かつ知的な制御を実現可能な回路を作成した。またその基本動作の確認を行い、その解析を行って有効性を確認した。その後、デジタル信号処理技術をさらに駆使して提案回路の改良を行い、制御性の向上を図った。

具体的には以下の通りである。

- 提案者による先行研究に基づき、スイッチング電源の主要部分のDC-DCコンバータのインダクタ電流のピーク値を瞬時に検出する方式のシミュレーションをさらに進め、特性を詳細に明らかにし、動作アルゴリズムを明確にした。その成果をもとに、高速かつ知的な制御が可能なデジタル制御アルゴリズムを実現した。
- 提案アルゴリズムによるデジタル制御回路をFPGAにより設計し、製作・評価した。また、これにより、動作の確認を行った。
- 試作したFPGAを用いてDC-DCコンバータを製作し、動作アルゴリズムを明確にした。また、動作解析を行い、その有効性を確認した。DC-DCコンバータが発生するスイッチングノイズの影響を最小限に抑える対策を確立した。
- デジタル信号処理技術をさらに駆使して制御アルゴリズムの改善を図り、それを基に提案回路の改良を行い、制御性の向上を図った。
- 国内外の学会の会議、研究機関等を調査し、他方式との比較検討を行い、提案方式の有効性を確認した。

#### 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5件)

- ① Y. Yamabe, K. Nakashima, K. Dohi, K. Kajiwara, F. Kurokawa, Y. Shibata, Application of SerDes for FPGA-based digital DC-DC Converters, Proc. IEEE Symposium on Low-Power and High-Speed Chips (COOL Chips) 査読有 (掲載決定済), 2012
- ② 山邊芳彦, 中島華菜子, 浜脇一馬, 山下健太郎, 梶原一宏, 黒川不二雄, 柴田裕一郎, 小栗 清, FPGAを用いたDC-DCコンバータのデジタル制御における遅延制御法の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無 (掲載決定済) 2012
- ③ 浜脇一馬, 前田雄輝, 副島政人, 柴田裕一郎, 小栗 清, 黒川不二雄, FPGAを用いたDC-DCコンバータ向け高速比例デジタルPID制御方式の実装, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol. 110, No. 32, RECONF2010-1, 2010, pp. 1-6
- ④ 副島 政人, 酒見 隼也, 柴田 裕一郎, 黒川 不二雄, 濱田 剛, 正田 備也, 小栗 清, FPGAによる電源電圧制御回路の実装及び制御精度の評価, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol. 109, No. 198, RECONF2009-22, 2009, pp. 19-24
- ⑤ M. Soejima, S. Sukita, Y. Shibata, F. Kurokawa, T. Hamada, T. Masada, K. Oguri, Evaluation of Arithmetic Precision for an FPGA-based Reconfigurable DC-DC Converter, IEEE Symposium on Low-Power and High-Speed Chips (COOL Chips), 査読有, 2009, p. 169-169

[学会発表] (計11件)

- ① M. Aihara, S. Akiyama, T. Yachi, Air Supply Conditions for Increasing Output Power in the Semi-Active Zigzag-Type DMFC, Fuel Cell Seminar&Exposition, Walt Disney World Swanand Dolphin Resort, 2011. 10. 31-11. 3
- ② T. Imai, T. Yachi, Study of Fuel Supply Method in Flexible Type Direct

- Methanol Fuel Cell by the Half-Cell Simulation, Fuel Cell Seminar & Exposition, Walt Disney World Swan and Dolphin Resort, 2011.10.31-11.3
- ③ 谷内利明, 低炭素社会実現に貢献する太陽光発電技術, 電気学会半導体電力変換研究会, 神戸ユニティー, 2011.1.21-22
- ④ H. Takeuchi, T. Yachi, CO<sub>2</sub> Reduction by Introducing the Small-Size EV and the FCV in Car-Sharing, Fuel Cell Seminar & Exposition, Henry B. Gonzales Convention Center, 2010.10.18-21
- ⑤ H. Takeuchi, T. Yachi, CO<sub>2</sub> Reduction by Introducing a Small-Size EV in Car-Sharing, Renewable Energy Pacifico Yokohama, 2010, 2010.6.27-7.2
- ⑥ T. Suto, T. Yachi, Comparison of Energy Transportation Methods in a Hydrogen Supply System by Floating Wind Power Generation, Renewable Energy Pacifico Yokohama, 2010, 2010.6.27-7.2
- ⑦ R. Suzuki, T. Yachi, The Reduction of Greenhouse Gases by a Dual Mode Vehicle with a Fuel Cell, Fuel Cell Seminar & Exposition, Palm Springs Convention Center, Palm Springs, 2009.11.16-20
- ⑧ Y. Shibata, FPGA Implementation of an Efficient Digital Control Mechanism for DC-DC Converters, DC Building Power Asia, 東京コンファレンスセンター品川 2010.12.13
- ⑨ 浜脇一馬, 前田雄輝, 副島政人, 柴田裕一郎, 小栗清, 黒川不二雄, FPGAを用いたDC-DCコンバータ向け高速比例デジタルPID制御方式の実装, 電子情報通信学会リコンフィギャラブルシステム研究会, 長崎温泉やすらぎ伊王島(長崎市), 2010.5.13
- ⑩ 副島政人, 酒見隼也, 柴田裕一郎, 黒川不二雄, 濱田剛, 正田備也, 小栗清, FPGAによる電源電圧制御回路の実装及び制御精度の評価, 電子情報通信学会リコンフィギャラブルシステム研究会, 宇都宮大学, 2009.9.17
- ⑪ M. Soejima, S. Sukita, Y. Shibata, F.

Kurokawa, T. Hamada, T. Masada, K. Oguri, Evaluation of Arithmetic Precision for an FPGA-based Reconfigurable DC-DC Converter, IEEE Symposium on Low-Power and High-Speed Chips (COOL Chips), Yokohama Joho Bunka Center, 2009.4.16

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

黒川 不二雄 (KUROKAWA FUJIO)

長崎大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90140808

### (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 (SIBATA YUICHIROU)

長崎大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10336183

横山 智紀 (YOKOYAMA TOMOKI)

東京電機大学・未来科学部・准教授

研究者番号：60307668

丸田 英徳 (MARUTA HIDENORI)

長崎大学・大学院工学研究科・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