

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560291
 研究課題名 (和文) デジタル制御スイッチング電源システムにおける低ノイズ化技術に関する研究
 研究課題名 (英文) Noise Reduction Technique in Digitally Controlled Switching Power Supply Systems
 研究代表者
 庄山 正仁 (SHOYAMA MASAHIRO)
 九州大学・大学院システム情報科学研究院・准教授
 研究者番号：40187513

研究成果の概要： 電子機器用電源として広く使われているスイッチング電源は、小形・軽量・高効率という特徴を持つが、高速なスイッチング動作によりノイズが発生するため、低ノイズ化が必要である。本研究において、世界で初めて、FPGAによるデジタル制御方式によるランダムスイッチングを提案・実現し、低ノイズ化に有効であることを示した。また、各種の制御方式を比較・検討することにより、最も低ノイズ化に効果がある方式を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：パワーエレクトロニクス

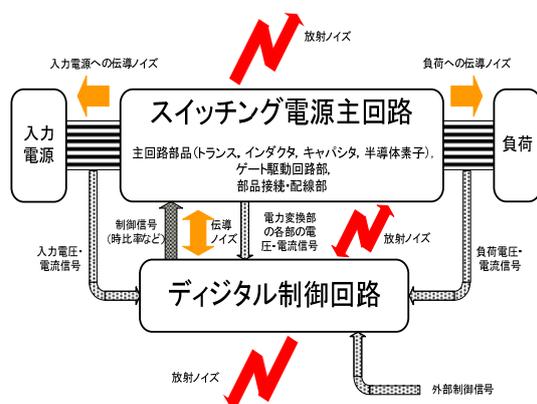
科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電気機器工学

キーワード：スイッチング電源，ランダムスイッチング，ノイズ低減，デジタル制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 電子機器用電源として広く使われているスイッチング電源は、その構成要素である半導体スイッチを高速にスイッチングさせることで電力変換を行っており、これにより、小形・軽量・高効率という特徴を実現している。しかし、スイッチング素子が高周波でオン・オフ動作するため、それ自身がスイッチングノイズの発生源となり、伝導・放射ノイズ

図1(右欄) スwitchング電源におけるノイズの概念。一般に、制御回路にはアナログ制御とデジタル制御回路の2通りがあるが、この図は、本研究で対象としたデジタル制御回路を用いた場合を示している。



ズとして周囲にノイズをまき散らす恐れがある。また、スイッチング電源の制御回路等にスイッチングノイズが影響し、スイッチング電源自体の誤動作を招く恐れもある。このため、スイッチング電源を低ノイズ化することが重要な課題となっている（図1参照）。

(2) このノイズの問題に対して、回路的なアプローチであるスナバ回路や、電磁気的アプローチであるシールドなど、さまざまな手法が試みられてきた。これに対し、制御的な対策として、図2に示すような、ノイズスペクトルのピーク値を低減するランダムスイッチングという手法が提案されており、これまで、ランダムスイッチングの詳細な理論解析とアナログ回路を用いた実験的な確認が行われてきた。ランダムスイッチングのノイズスペクトル低減効果に関するこれまでの解析や実験結果によると、スイッチング周期（周波数）の標準偏差または分散が重要なパラメータであり、その値が大きいほどノイズスペクトルの低減効果が大きいことが分かっている。

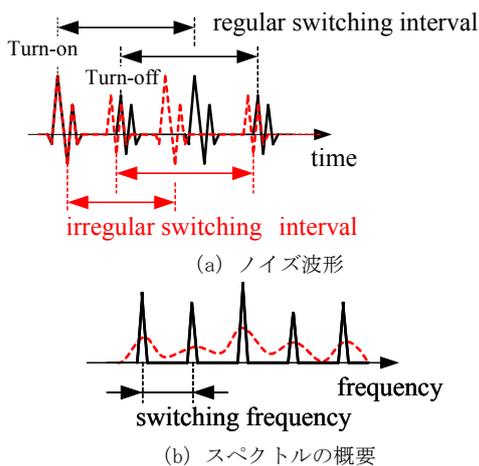


図2 ランダムスイッチングによるノイズ低減の原理 (赤点線)

(3) 本研究以前では、このランダムスイッチングは、図3に示すようなアナログ回路で実現されてきた。しかし、最近、スイッチング電源の制御をデジタル回路で行うことが各所で検討され始めてきている。デジタル制御を用いれば、別途特別なハードウェアを追加しなくても、ソフトウェアのみでランダムスイッチングが実現でき、更に、ランダム化するアルゴリズムを工夫すれば、アナログ回路では実現できない効果が得られると考えられる。

(4) スwitchング電源の制御をデジタル回路で行うことの一般的利点としては、制御性・柔軟性に富む、温度変化・経年変化に強

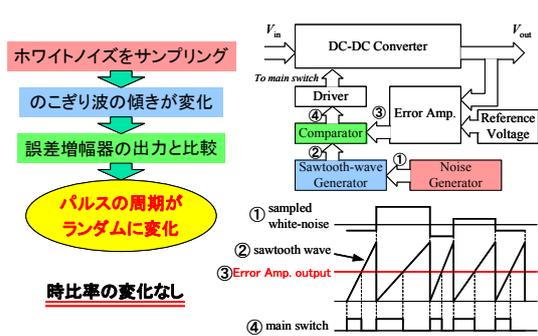


図3 アナログ回路によるランダムスイッチング (従来方式)

い、監視・故障診断が容易、等が挙げられる。パワーエレクトロニクス分野におけるデジタル制御の具体的な実現方法としては、既にモーター駆動用インバータの制御用として用いられている DSP (Digital Signal Processor) があるが、近年までスイッチング電源の制御には処理速度が不十分であった。しかし、最近の技術的進歩により高速処理が可能な DSP が出現し、スイッチング電源の制御も可能になり、一挙にその適用範囲が拡大しつつある。このような状況を踏まえ、デジタル制御電源に適したノイズ低減技術を開発する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、ランダムスイッチングを FPGA (Field Programmable Gate Array) や DSP を用いてデジタル制御により実現することを提案する。ランダムスイッチングのデジタル制御化によって、ランダムスイッチングに関するさまざまなパラメータをプログラムによって変化させることが可能となる。

(2) 本研究では、ランダムスイッチングによるノイズスペクトルの低減効果に大きな影響を与えるパラメータを実験によって調べる。さらに、各種の制御方式を比較・検討することにより、最も低ノイズ化に有効な方式を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、主として、スイッチング電源から入力側へ流れ出す伝導ノイズ（雑音端子電圧）について検討を行った。これは、伝導ノイズの国際規格 CISPR 22 に準じたもので、図4のような測定装置を用いた。

(2) まず、FPGA を用いたデジタル制御による、図5に示すような構成のランダムスイッチング方式のスイッチングコンバータ（出力

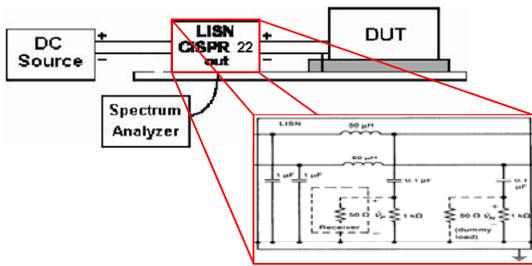
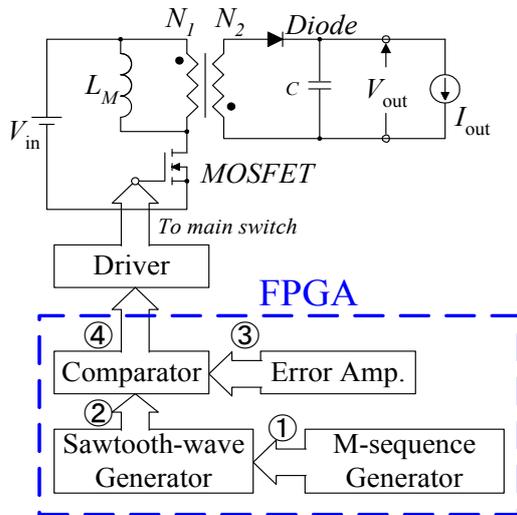


図4 伝導ノイズの測定法

電圧非帰還形)を試作した。ランダムスイッチングのパラメタとして、スイッチング周波数の分布幅と刻み幅の2つを変化させて実験を行った。



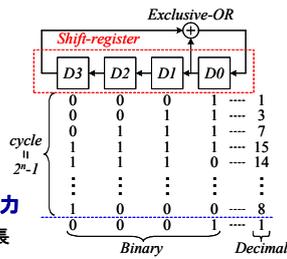
(a) 回路構成

デジタル回路でのランダム性の発生

M系列を使用

特徴

- 1~ 2^n-1 までの乱数を出力
n:シフトレジスタのビット長
- 乱数が周期性を持つ



(b) M系列の乱数発生法

M系列からの乱数

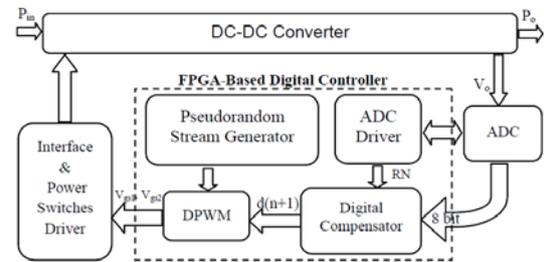
のこぎり波のピーク値
誤差増幅器の参照信号

決定
ランダムパルス出力

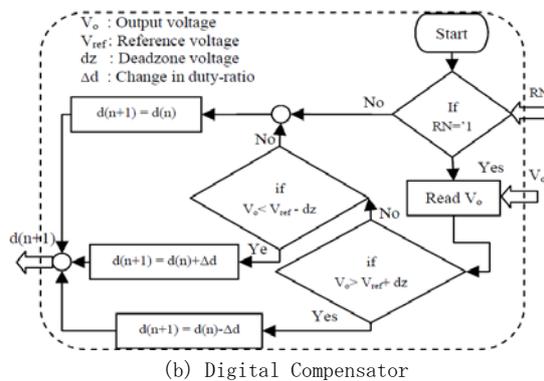
(c) ランダムパルスの生成法

図5 FPGAを用いたランダムスイッチングコンバータ (出力電圧非帰還形)

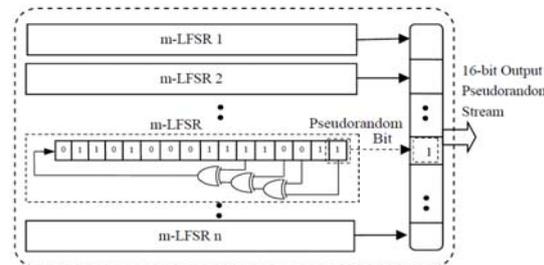
(3) 次に、図6に示すような、繰り返し周期が著しく長く、より均一なランダム性を持つことを特徴とする疑似ランダム系列発生器を提案し、種々のランダム化の手法について、出力電圧帰還形スイッチングコンバータを対象にしてノイズの低減効果を調べた。



(a) 回路構成



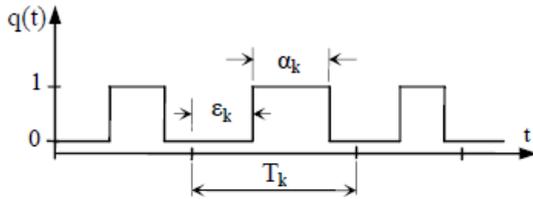
(b) Digital Compensator



(c) Pseudorandom stream generator

図6 FPGAを用いたランダムスイッチングコンバータ (出力電圧帰還形、繰り返し周期が著しく長く、より均一なランダム性を持つ)

(4) 更に、図7に示すように、ランダム化が可能なパラメタとして、スイッチング周期、時比率、遅れ時間の3つがあることに着目し、どの組み合わせを採用するかで、全部で8 (= 2の3乗) 通りの方式があることを明確に示した。その内1つはランダムスイッチングしない基本形なので、ランダム化の方式としては全部で7通りある。このうちの4つは既にアナログ制御において提案されている方式であるが、残りの3つは本研究で見出された新しい方式である。そこで我々は、図8に示すような、3つのパラメタを同時にラン



(a) ランダム化が可能な3つのパラメータ

Case	Scheme	Randomization Parameters			α_k	Remarks
		F_k	d_k	ϵ_k		
(a)	PWM	Const.	Const.	Const.	Const.	Basic
(b)	RPPM	Const.	Const.	Rand.	Const.	Ad.*
(c)	RPWM	Const.	Rand.	Const.	Rand.	Ad.*
(d)	RDRPPMFCF	Const.	Rand.	Rand.	Rand.	New
(e)	RCFMFD	Rand.	Const.	Const.	Rand.; Synch.	Ad.*
(f)	RCFRPPMFD	Rand.	Const.	Rand.	Rand.; Synch.	New
(g)	RCFMVD	Rand.	Rand.	Const.	Rand.	Ad.*
(h)	RRRM	Rand.	Rand.	Rand.	Rand.	New

Ad.*: Addressed before in power electronics publications.

但し $F_k=1/T_k$ and $d_k=\alpha_k/T_k$

(b) ランダム化の組み合わせ (全部で8通りある)

図7 スイッチの駆動波形 (スイッチング関数) とランダム化の手法

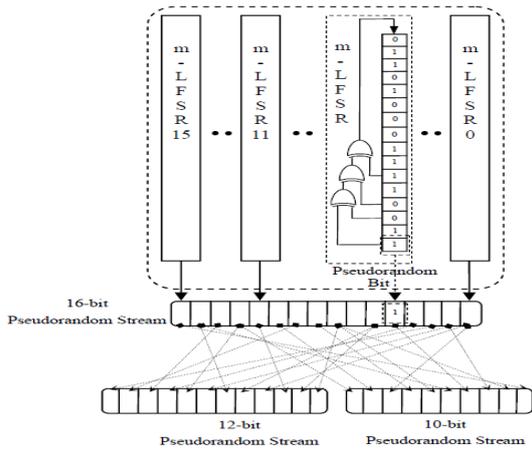


図8 3つのパラメータを同時にランダム化する方法

ランダム化する方法を提案し、これを用いてノイズの低減効果を調べた。

4. 研究成果

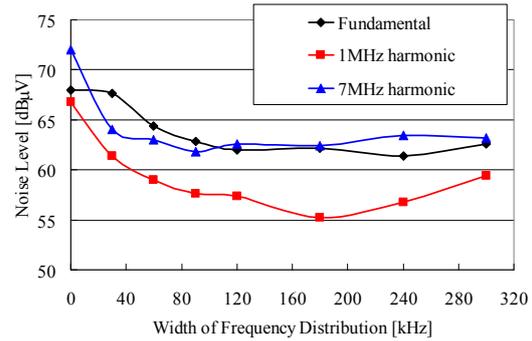
(1) 世界で初めて、FPGAによるデジタル制御方式によるランダムスイッチングを提案・実現し、スイッチング電源の低ノイズ化に有効であることを示した。以下に、具体的な結果を示す。

(2) 3. (2)の方法による実験の結果を図9～図10に示す。これらの図より、スイッチング周波数の刻み幅はノイズスペクトルの

Ratio	Center Frequency=300kHz	
	Frequency Distribution	Width of Frequency Distribution [kHz]
±5%	285~315	30
±10%	270~330	60
±15%	255~345	90
±20%	240~360	120
±30%	210~390	180
±40%	180~420	240
±50%	150~450	300

$\Delta f=2\text{kHz}$

(a) 実験条件

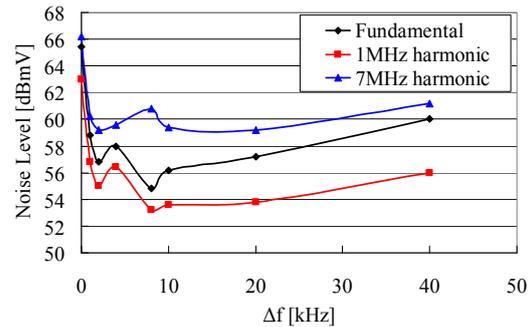


(b) 実験結果

図9 スイッチング周波数の分布幅を変えた時のノイズ低減効果の変化

Δf [kHz]	1, 2, 4, 8, 10, 20, 40
Center Frequency	=200kHz
Frequency Distribution	= 100 ~ 300 [kHz]

(a) 実験条件



(b) 実験結果

図10 スイッチング周波数の刻み幅を変えた時のノイズ低減効果の変化

低減効果にあまり影響を与えず、周波数の分布幅によって低減効果が変化することが分かった。

(3) 3. (3)の方法による実験の結果を図11～図12に示す。これらの図より、FPGAのクロック周波数が高いほど、ノイズ低減効果が大きいこと、スイッチング周波数の分布幅率は大きすぎても逆効果で、最適値が存在することが分かった。これらを踏まえ、最もノイズ低減効果が大きい条件におけるノイズスペクトラムの実験結果を図13に示す。

(4) 3. (4)の方法による実験の結果を図14～図15に示す。これより、新しいランダム化の方式のうちのRRRMと名付けた方式(h)

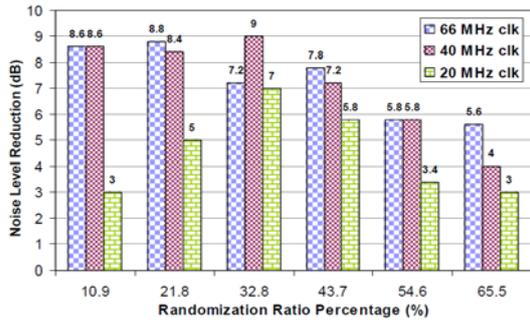


図11 FPGAのクロック周波数を変えた時のノイズ低減効果の変化 (横軸はスイッチング周波数の分布幅率)

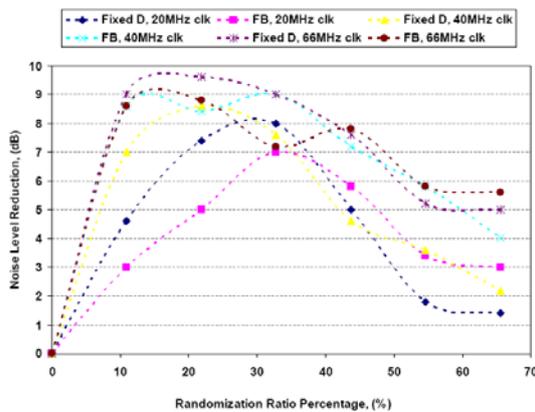
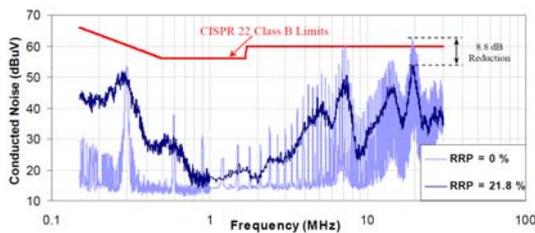


図12 諸条件を変えたときのノイズ低減効果の変化 (横軸はスイッチング周波数の分布幅率)



Comparison between the spectrum of the conducted-noise of the buck converter with fixed switching frequency (0% RRP) and that with randomized switching frequency (21.8% RRP), (at $f_{ik} = 66$ MHz, using the FPGA feedback controller).

図13 最もノイズ低減効果が大きい条件におけるノイズスペクトラム (濃い線)

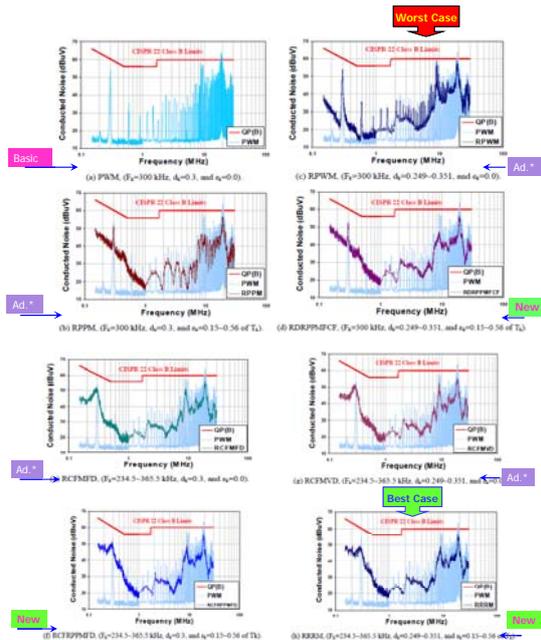


図14 8通りのランダム化手法のそれぞれにおけるノイズスペクトラム

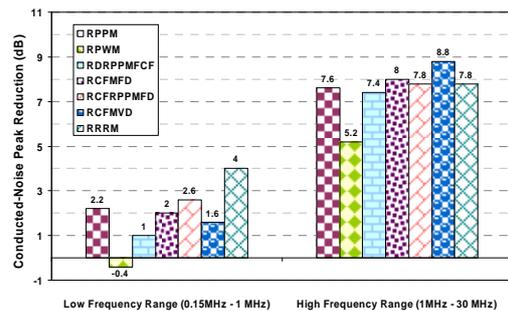


図15 8通りのランダム化手法のそれぞれにおけるノイズ低減効果

が、最もノイズ低減に効果があることが分かった。また、別の実験で、時比率をランダムに制御する手法は出力電圧にリップルを発生させる恐れがあるので、注意を要することが分かった。更に、出力電圧を安定化するため、帰還を施すと、ノイズ低減効果が若干損なわれることが分かった。

(5) 今後の課題として、次の項目が挙げられる。

- ① 伝導ノイズ低減の理論的解析
- ② DSPによるランダムスイッチングの検討
- ③ 更なるノイズ低減法の立案
- ④ 放射ノイズの低減についての検討

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 G. M. Dousoky, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "FPGA-Based Design and Implementation of Spread-Spectrum Schemes for Conducted-Noise Reduction in DC-DC Converters", IEEE International Conference on Industrial Technology, *iee-icit'09*, Melbourne, AUS, Feb, (2009), 査読有
- ② G. M. Dousoky, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "A Novel Implementation of an FPGA-Based Controller for Conducted-Noise Reduction in Randomly Switched DC-DC Converters", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'09, Washington DC, USA, pp. 65-69, Feb, (2009), 査読有
- ③ G. M. Dousoky, and M. Shoyama, "FPGA-Based Techniques for Conducted-Noise Mitigation in DC-DC Power Converters", Proceedings of 2009 Korea-Japan Joint Conference on AP/EMC/EMT, KJJC'09, Incheon, Korea, May, (2009), 査読有
- ④ G. M. Dousoky, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "Studying the Design and Performance of Conducted-Noise Spectrum Spreading in DC-DC Converters with an FPGA-Based Controller", 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC'09/Kyoto, Kyoto, JAPAN, July, (2009), 査読有
- ⑤ G. M. Dousoky, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "Triple-Hybrid Spread-Spectrum Technique for Conducted-Noise Reduction in DC-DC Converters with an FPGA-Based Implementation", 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2009, Barcelona, Spain, Sept, (2009), 査読有

[学会発表] (計 7 件)

- ① 末川大介, 庄山正仁, 安部征哉, 二宮保, FPGAを用いたランダム・スイッチング方式DC-DCコンバータのノイズ低減について, 第60回電気関係学会九州支部連合大会, 06-2A-15, (2007)
- ② 末川大介, 庄山正仁, G. M. Dousoky, 安部征哉, 二宮保, デジタル制御方式に

よるランダムスイッチングDC-DCコンバータの低ノイズ化について, 電気学会電子回路研究会, ECT-07-92, (2007)

- ③ 末川大介, 庄山正仁, G. M. Dousoky, 安部征哉, 二宮保, 電子情報通信学会, 信学技報 Vol.107, No.430, EE2007-45, pp.7-12, (2008)
- ④ G. M. Dousoky, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "Conducted-Noise Reduction of Randomly Switched Buck Converter Using FPGA", 電子情報通信学会信学技報, Vol. 108, No. 25, EE2008-9, pp 45-50, JAPAN, May, (2008)
- ⑤ G. M. Dousoky, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "Noise Reduction of Randomly Switched DC-DC Converters by Digital Controller", EJISST2008 International Symposium on Science and Technology, WASEDA University, Tokyo, JAPAN, proc. p.42, June, (2008)
- ⑥ G. M. Dousoky, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "Digital Controller for Conducted-Noise Reduction in Buck Converters", 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 明治大学, 川崎市, Vol.2008 3, p. S67-S68, Sept, (2008)
- ⑦ G. M. Dousoky, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "FPGA-Based Design and Implementation of Spread-Spectrum Schemes for Conducted-Noise Reduction in DC-DC Converters", 第61回電気関係学会九州支部連合大会, 大分大学, 大分市, Sept, (2008)

[その他]

ホームページ等

<http://ckt.ees.kyushu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

庄山 正仁 (SHOYAMA MASAHIRO)

九州大学・大学院システム情報科学研究院・
准教授

研究者番号：40187513

(2) 研究分担者

安部 征哉 (ABE SEIYA)

九州大学・大学院システム情報科学研究院・
助教

研究者番号：40423488

二宮 保 (NINOMIYA TAMOTSU)

九州大学・大学院システム情報科学研究院・
教授 (2007年度のみ参画)

研究者番号：10037939