

機関番号：32660  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20560278  
 研究課題名(和文) デルタシグマ変調を用いた直列共振型ゼロ電流スイッチングDC/DCコンバータ  
 研究課題名(英文) Delta-sigma modulated Class D series resonant converter

研究代表者  
 小泉 裕孝 (KOIZUMI HIROTAKA)  
 東京理科大学・工学部・准教授  
 研究者番号：50334470

研究成果の概要(和文)：本研究はデルタシグマ変調と呼ばれる変調方式を用いて直流電圧を他の直流電圧に変換する回路の研究である。変換にはスイッチとして機能する素子を用い、一旦直流を交流に変換する。この時の電流波形を正弦波状に維持し、電流がゼロとなる時にスイッチを切り替えることで雑音や損失を抑制する。シミュレーションと回路実験で確認を行った。

研究成果の概要(英文)：This study proposes a dc/dc converter, which is driven by a controller called delta-sigma modulator. The dc voltage is converted to an ac voltage with switching devices. The ac current is maintained in sinusoidal waveform. The switching devices are turned on/off when the ac current becomes zero. As a result, the switching noise and loss are reduced. The proposed circuit has been tested with a simulation model and in circuit experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

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：パワーエレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

電子機器は小型軽量化が進み、利便性の向上と共に普及拡大が続いている。蓄電池と電力変換器より構成される電源は、質量、体積とも機器に占める割合が依然大きく、その小型軽量化を目指した研究は、デバイス、回路、蓄電池の各分野で盛んに行われている。

回路技術では、動作周波数の高周波化と変換効率の向上が追求される。高周波化はインダクタ等を小型化できる反面、スイッチング損失を増加させ、放熱装置や蓄電池の大型化を招く。

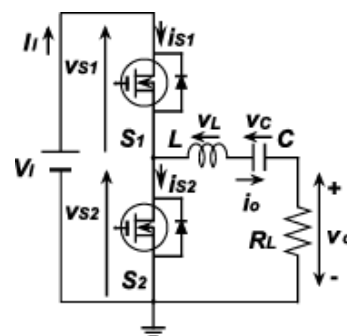


図1: 電圧スイッチング型D級インバータ

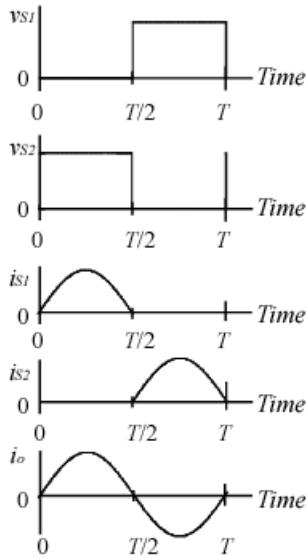


図 2: 各部波形

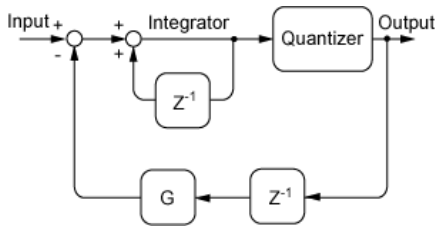


図 3: 1次  $\Delta \Sigma$  変調器

このため回路方式により零電圧/零電流スイッチングを実現する損失抑制手法が用いられる。

電圧スイッチング型 D 級インバータ(図 1)[1]-[11]は零電流スイッチングにより数百 kHz で 90% 台後半の効率を実現する。スイッチ  $S_1$  と  $S_2$  が交互に動作を繰り返す、直列共振回路を通して正弦波が出力される(図 2)。本来、送信機用同調電力増幅器[1][2]として提案され、DC/DC コンバータのインバータ部[3]-[5]、誘導加熱装置[6][7]、蛍光灯[8][9]等にも応用される。出力制御は、駆動周波数制御や、図 1 の回路をフルブリッジ型にした位相制御等を行うが、零電流スイッチングは維持できない。これに対し動作周波数を固定し、駆動パルスを消去/追加した駆動パターンを用いる方式(パルス密度変調:PDM)[5]-[7]が、提案されている。この方式では、零電流スイッチングを持続し損失を抑制できるが、駆動パターンにより発生する低周波が問題となり応用対象は限られる。

報告者らは、この低周波成分を逆に利用し、駆動パルスを生成する方法として、近年、A/D コンバータとして着目されている  $\Delta \Sigma$  変調を応用し、駆動周波数 200kHz の電圧スイッチング型 D 級インバータの出力波形から 50Hz の交流包絡

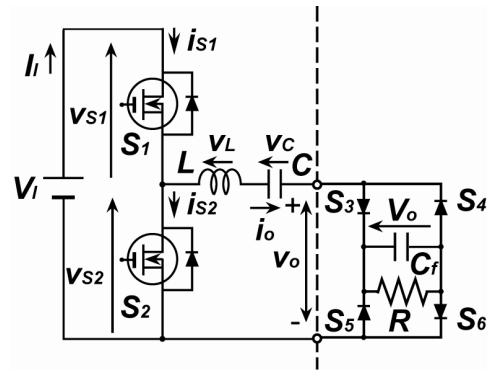


図 4: 主回路構成

線を出力する研究を既に実施した[10][11]。

$\Delta \Sigma$  変調器(図 3)は、入力信号の数十倍以上のサンプリング周波数で量子化を行い、入力波形を 2 値(1bit)に符号化できる。符号化された 1/0 のパルス列を PWM インバータの駆動波形として利用するオーディオ用 PWM アンプ[12]等は広く実用化されている。またハードスイッチング型のマトリクスコンバータ[13]や DC/DC コンバータ[14]等への応用が研究されている。

## 2. 研究の目的

本研究は、「 $\Delta \Sigma$  変調を用いた直列共振型ゼロ電流スイッチング DC/DC コンバータ」の作成を目的とした。先述の通り  $\Delta \Sigma$  変調器は、入力信号の数十倍以上のサンプリング周波数で量子化を行い、任意の入力波形を 2 値(1bit)に符号化できる。すなわち従来の PDM に見られるような駆動パターンを必要としない。また、任意の目標値に従って出力電圧を制御できる。さらに 1/0 の駆動波形は  $\Delta \Sigma$  変調器で逐次生成されるため特定の駆動パターンによる低周波雑音が発生しにくい。以上の特性を反映した「 $\Delta \Sigma$  変調を用いた直列共振型ゼロ電流スイッチング DC/DC コンバータ」の実現に向け主な研究項目を次の通り定めた。

- Matlab Simulink を用いたシミュレーション
- FPGA を用いた  $\Delta \Sigma$  コントロールの作成
- 主回路の作成と  $\Delta \Sigma$  コントロールとの組み合わせ
- 動作特性試験

以上を助成期間内 3 年間の必須到達目標とした。また、研究の進行状況により、発展項目として次項を挙げた。

- Q 値と過渡応答の関係
- 出力領域とフィルタ設計の最適化
- フィードバック制御

## 3. 研究の方法

図 1 の電圧スイッチング型 D 級インバータの負荷抵抗を全波整流回路に置き換え、図 4 の DC/DC コンバータを主回路の基本構成と定めた。

先行研究[10][11]の成果を踏まえ、図4の主回路に $\Delta\Sigma$ 変調器(図3)を接続したモデルをMatlab Simulinkにより構成し、シミュレーションを実施した。

$\Delta\Sigma$ コントローラは目標とする出力レベル信号(直流)を入力信号として、 $\Delta\Sigma$ 変調により生成される1/0のパルス列に従いD級インバータの駆動波形を間引きする。即ち「1」に対応して通常のスイッチング動作、「0」に対しては $v_{S2}$ を1周期の間0Vに維持する。インバータの出力電圧、即ち整流器の入力電圧は、これによって上下する。目標電圧の設定により広範囲の出力電圧が得られ、且つ、この間インバータの零電流スイッチングは維持され高効率電力変換が実現される。

精確な実験にはFPGAを用いた $\Delta\Sigma$ コントローラの作成が不可欠である。これは、市販の $\Delta\Sigma$ 変換ICが内部パラメータを非公開としており、入出力関係を明確にすることが不可能な為である。検証可能な駆動波形を生成する為、不可欠の要素としてFPGAを用いた $\Delta\Sigma$ コントローラの作成を行った。

同時に主回路を作成した。FPGAを用いた $\Delta\Sigma$ コントローラが完成するまでは、市販の $\Delta\Sigma$ 変換IC評価基板、PCM4202EVMを用いて主回路を駆動し、回路実験を行った。

FPGAを用いた $\Delta\Sigma$ コントローラは第二年度に完成し、主回路との組み合わせを行った。第三年度は各部パラメータを変更し特性を評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 初年度

###### ①Matlab Simulinkを用いたシミュレーション

コンデンサインプット型の全波整流器を接続して、主回路と $\Delta\Sigma$ 変調器の基本動作を確認した。さらに「 $\Delta\Sigma$ コントローラの指示電圧目標値と主回路の出力電圧の関係」、「 $\Delta\Sigma$ コントローラ内のフィードバックゲインと出力電圧の関係」をシミュレーションにより推定し、市販ICを用いた回路実験結果との比較を行った。

###### ②FPGAを用いた $\Delta\Sigma$ コントローラの作成

$\Delta\Sigma$ 変調はアナログ回路を含む構成であり、FPGAを使用する場合、完全なデジタル回路に置き換える必要が生じる。目標電圧を数値入力し、加算、減算、積分、帰還、出力の各構成要素をデジタル化し、ブロックとして構成する段階までを達成した。

###### ③主回路の作成と市販 $\Delta\Sigma$ コントローラとの組み合わせ

市販の $\Delta\Sigma$ 変換IC評価基板、PCM4202EVMを用いて主回路を駆動し、回路実験を行った。アナログ電圧信号として与えた目標値 $v_{ref}$ と、直流出力電圧 $V_o$ は、ほぼ比例する特性が確認さ

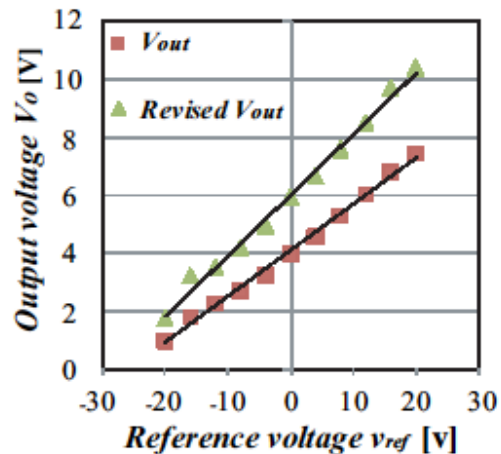


図5: PCM4202EVMを用いた試作基板における出力電圧特性(出典:学会発表②Fig.5)



図6: PCM4202EVMを用いた試作基板において観測された出力電圧の周波数特性(出典:学会発表②Fig.7C)

れた。(図5)

この際、周波数領域にて観測された出力電圧波形には、周期的な低周波雑音は顕著に現れず、雑音低減効果が示された。(図6)

##### (2) 第二年度

###### ①Matlab Simulinkを用いたシミュレーション

1bit $\Delta\Sigma$ コントローラをFPGAで構成する為、Matlab Simulink上のブロック図で構成したコントローラとMatlab言語で作成したプログラムの動作を一致させ、さらにこれを同等のVHDLに書き換えてFPGA用シミュレータで検証し $\Delta\Sigma$ コントローラの作成を進めた。

###### ②FPGAを用いた $\Delta\Sigma$ コントローラの作成

統合時の安定動作が課題であったが、クロックのタイミングを見直すことにより理論およびシミュレーションと一致した動作が確認された。また、これらに基づきフィードバックと目標値およびパルス間隔の関係を考察した。

### ③主回路の作成と FPGA を用いた $\Delta \Sigma$ コントローラの組み合わせ

FPGA の出力信号を、駆動用 IC に与え、主回路を動作させて回路実験を行った。固定された目標値をプログラム中で設定し各部電圧電流特性を確認した。これらは前年度作成した市販の  $\Delta \Sigma$  変換 IC 評価基板を用いた実験結果とよく一致した。出力電圧指示値を FPGA 内で数値として与え、出力電圧を変化させた時の実験結果を図 7 に示す。

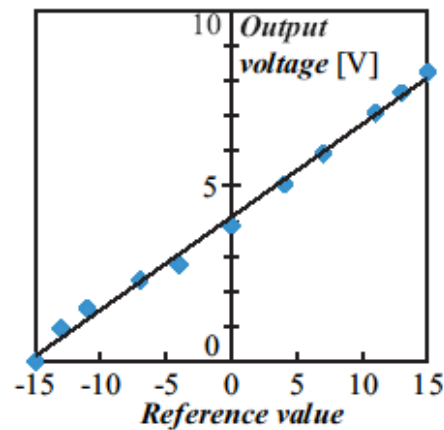


図 7: FPGA を用いた試作基板における出力電圧特性(出典:学会発表①Fig. 5)

### (3)最終年度

第二年度までに必須として挙げた到達目標を達成したため、最終年度は以下の発展項目に研究を進めた。

#### ①動作特性試験

作成した試作基板を用いて、直列共振回路の  $Q$  値とフィードバックの範囲を拡げ、実験とシミュレーションを実施した。

#### ② $Q$ 値と過渡応答の関係

$Q$  値 1 から 10 の範囲でシミュレーションによる過渡現象の比較を実施した。

#### ③ 出力領域とフィルタ設計の最適化

離散値による出力制御となるため、目標値が不連続となるが、フィードバックと目標値の相対的な設定により繊細な目標値の設定が可能となることが確認された。但し零電圧近傍の出力を行うにはパルス間隔が開き、低周波成分が増加した。フィルタ設計は要求される出力電圧の下限値と負荷に依存し、かつ  $Q$  値により交流電流の波高値および減衰特性が異なることが確認された。設計の最適化には課題を残した。

### (4)総括

本研究の目的である「 $\Delta \Sigma$  変調を用いた直列共振型ゼロ電流スイッチング DC/DC コンバータ」を完成した。

必須目標として挙げた

- Matlab Simulink を用いたシミュレーション
- FPGA を用いた  $\Delta \Sigma$  コントローラの作成
- 主回路の作成と  $\Delta \Sigma$  コントローラの組み合わせ
- 動作特性試験

を完了し、国際会議 2 件の発表と特許出願を行った。

発展項目の内

- $Q$  値と過渡応答の関係
  - 出力領域とフィルタ設計
- に研究を進めた。

以上の成果を取り纏め、国際誌への投稿を準備中である。

文中で引用した文献を以下に記す。

- [1] P. J. Baxandall, "Transistor sine-wave LC oscillators, some general considerations and new developments," Proc. IEE, vol. 106, pt. B, suppl. 16, pp. 748-758, May 1959.
- [2] H. Kobayashi, J. M. Hinrichs, and P. M. Asbeck, "Current-mode Class-D power amplifiers for high-efficiency RF applications," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 49, No. 12 pp. 2480-2485, Dec. 2001.
- [3] M. K. Kazimierczuk, W. Szaraniec, "Class D-E resonant DC/DC converter," IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol. 29, No. 3, pp. 963-976, July 1993.
- [4] M. K. Kazimierczuk, Chuyun Wu, "Frequency-controlled series-resonant converter with synchronous rectifier," IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol. 33, No. 3, pp. 939-948, July 1997.
- [5] H. Koizumi, K. Kurokawa, and S. Mori, "Analysis of Class D inverter with irregular driving patterns," IEEE Transactions on Circuit and Systems, Part-I: Regular Papers, vol. 53, no. 3, pp. 677-687, March 2006.
- [6] Nam-Ju Park; Dong-Yun Lee; Dong-Seok

Hyun , “A power-control scheme with constant switching frequency in Class-D inverter for induction-heating jar application,” IEEE Trans. Ind. Elec., vol. 54, No. 3 pp. 1252-1260, June 2007.

[7] H. Fujita, and H. Akagi, “Pulse-density-modulated power control of a 4 kW, 450kHz voltage-source inverter for induction melting application,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, No. 2 pp. 279-286, Mar./Apr. 1996.

[8] M. K. Kazimierczuk and W. Szaraniec, “Electronic ballast for fluorescent lamps,” IEEE Trans. Power Elec., vol. 8, No. 4 pp. 386-395, Oct. 1993.

[9] C. Branas, F. J. Azcondo, R. Casanueva, “Phase-controlled quadruple LCp resonant inverter to drive 600-W HPS lamps,” IEEE Trans. Power Elec., vol. 22, No. 3 pp. 831-838, May 2007.

[10] H. Koizumi, K. Kurokawa, and S. Mori, “Thinned-out controlled Class D inverter with delta-sigma modulated 1-bit driving pulses,” Proc. IEEE Int’l Symposium on Circuits and Systems 2005, pp. 1322-1325, May 2005.

[11] H. Koizumi, K. Kurokawa, and S. Mori, “A comparison of output envelope waveforms of the delta-sigma modulated Class D series resonant inverter,” Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems 2006, pp. 253-256, Kos, Greece, May 2006.

[12] K. Masuda, T. Hayase, S. Satoh, “1 bit audio,” Sharp Tech. Report, vol. 77, pp. 67-72, Aug. 2000 (in Japanese).

[13] A. Hirota, M. Nakaoka, “Low noise three-phase matrix converter introducing delta-sigma modulation scheme,” Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC ’06, pp. 1-6, June 2006.

[14] A. Hirota, S. Nagai, and M. Nakaoka, “A simple configured reducing noise peak DC-DC converter introducing delta-sigma modulation circuit,” Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 2005, vol. 3, pp. 1515-1519, March 2005.

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計2件)

① 小泉裕孝、Class D series resonant converter controlled with FPGA-based delta-sigma modulator、The 8th IEEE International Conference on Power

Electronics and Drive Systems 2009、2009年11月4日、台湾

② 小泉裕孝、Delta-sigma modulated Class D series resonant converter、39th IEEE Power Electronics Specialists Conference 2008、2008年6月16日、ギリシャ

[産業財産権]  
○出願状況 (計1件)

名称：インバータ及びDC/DCコンバータ

発明者：小泉 裕孝

権利者：学校法人東京理科大学

種類：特許

番号：特願 2008-155616

出願年月日：20年6月13日

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小泉 裕孝 (KOIZUMI HIROTAKA)

東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号：50334470

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：