

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560339

研究課題名(和文)次世代車載用スイッチング電源の開発

研究課題名(英文)Development of Switching Power Supply for Automobile in Next Generation

研究代表者

鍋島 隆(Nabeshima, Takashi)

大分大学・工学部・教授

研究者番号：00117201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は低燃費、低公害車を目指した次世代自動車の車載電源開発を目的としたものである。特に燃費改善のためのエネルギー回生を利用した電源システムにおいては、厳しい電圧や負荷の変動等に対して高い電力変換効率と優れた応答特性を有する電力変換器が必要とされる。これを実現させるために適したHブリッジコンバータと、フィードバック制御とフィードフォワード制御方式の適用について研究を行い、幅広い入力電圧変動と負荷の急峻な変動に対して優れた性能を有するスイッチング電源を開発した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the research is to develop the switching power supply with high efficiency and fast transient response for automobile application in next generation. In order to save fuel or to achieve a low-emission vehicle, energy management system together with power conversion equipment is required. To provide such a power supply with high efficiency and with excellent dynamic performance, an H-bridge converter controlled not only by the voltage feedback to regulate the output voltage but also by double feedforward controls to deal with wide input voltage range and to reduce the transient voltage for load variation was developed. These methods were also implemented by digital control for ease of design.

研究分野：電子工学

キーワード：車載用電源 DC-DCコンバータ ヒステリシス制御 フィードフォワード制御 Hブリッジコンバータ

1. 研究開始当初の背景

近年のHV、PHV、EVに代表されるように、世界の自動車は最先端の電子機器へと変化しつつある。また従来のエンジンを用いた自動車においてもアイドリングストップ機能等に代表されるように、ガソリン車の低燃費化を実現するために電子機器を用いた様々な取り組みがなされてきている。省エネルギー、環境負荷の低減が叫ばれる今日、このような先端の技術を取り込んだ自動車は今後、世界的規模で急速に普及してくることは自明である。

車載用電子機器は基本的に一般の電子機器と大きく変わることはないが、その電力供給源が車載のバッテリーであることから使用環境や動作状況による供給電力の大きな変動により供給電圧も大きく変化しうるものである。そのため、車載用電子機器に供給する電源システムの中核であるスイッチング電源に対しても単に効率が高いだけでなく、一般の電子機器以上に優れた過渡特性が要求されると同時に、電力回生や充電等に対する双方向の電力変換も必要となっている。

現在、スイッチング電源の研究、開発は米国が中心であり、また生産は台湾、中国等が担っている。この分野の国内産業を活発にするためには、日本発の低コストで優れた特徴を持つ電源の開発が急務である。

2. 研究の目的

本研究は、バッテリーを搭載する車載用電子機器に対応した次世代スイッチング電源の開発を目的とするものである。ここでは特にスイッチング電源の入力及び負荷急変に対する過渡特性改善と双方向電力変換に着目し、コンバータの回路方式の検討とその制御方式について研究開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 電力変換回路

通常、車における電力源はバッテリーが中心となるが、省エネルギー化を図る上では減速時の運動エネルギーを有効に利用する回生システムの導入も有効な手段の1つである。近年、運転状況により一時的に回生エネルギーを蓄える受動素子として電気二重層キャパシタが注目されており、実用化が始まっている。

この場合、電気二重層キャパシタとバッテリー、及び車載電子機器との間にはコンバータ回路が必要となるが、キャパシタの端子電圧は充放電の状況により大きく変動するため、コンバータには降圧、昇圧の機能が必要となる。

本研究では、簡単な回路構成で昇降圧機能を有する非絶縁型Hブリッジコンバータに着目し、高効率な動作を行うための条件について検討を行う。

(2) 制御方式

スイッチング電源の性能は電力変換部のコンバータ回路だけでなく、その制御法によっても大きく変わるため、本研究では以下の2点について検討を行う。

- (a) 低電圧・大電流用降圧形コンバータの小形化、高速応答性に着目したヒステリシス制御によるスイッチング周波数の高周波化を図る。
- (b) 2つの制御変数を有するHブリッジコンバータを高効率で安定に動作させるため、通常のフィードバック制御に加えて、入力電圧および負荷電流のフィードフォワード制御を導入し、入力電圧範囲の拡大と負荷変動に対する過渡応答特性の改善を図る。

4. 研究成果

(1) 電力変換回路について

本研究で検討した同期整流形Hブリッジコンバータは、図1に示すように2組のスイッチとインダクタ、キャパシタから構成される。

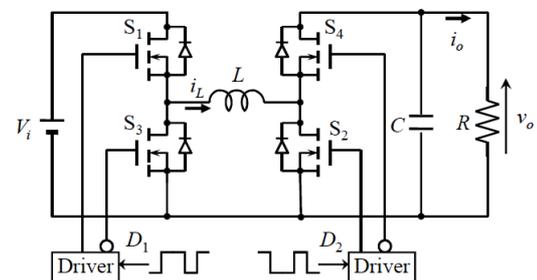


図1 Hブリッジコンバータの基本回路

入力電圧を V_i とする場合、スイッチ S_1 、 S_3 が降圧ブロック、 S_2 、 S_4 が昇圧ブロックの動作となる。出力電圧 V_o は内部抵抗を無視すると S_1 、 S_2 の時比率 D_1 、 D_2 により以下の式で決まる。

$$V_o = \frac{D_1}{1 - D_2} V_i$$

入力電圧 V_i が出力電圧 V_o と等しいか低い場合には D_1 、 D_2 の組合せは無数にあるが、電力変換効率を考えた場合には、図2に示されるように D_2 はできるだけ小さな値に設定する方がよいことが解析と実験により明らかとなった。

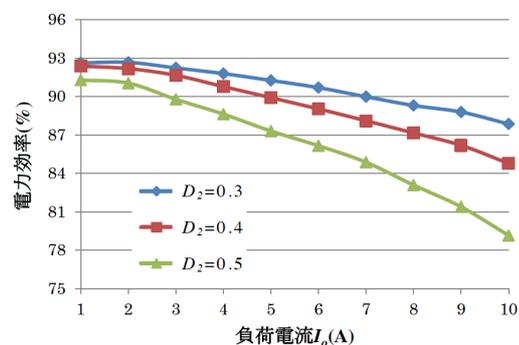


図2 Hブリッジコンバータの変換効率
($V_i=V_o=12V$)

(2) 制御法について

(a) ヒステリシスPWM制御はコンバータの高速応答性、安定性の面で優れた制御法であるが、良好な応答特性を損なわずに高周波化を実現することは困難である。ここでは図2に示すように、2つのヒステリシスPWM回路とOR回路を用いて2倍のスイッチング周波数を簡単に実現する手法を提案した。

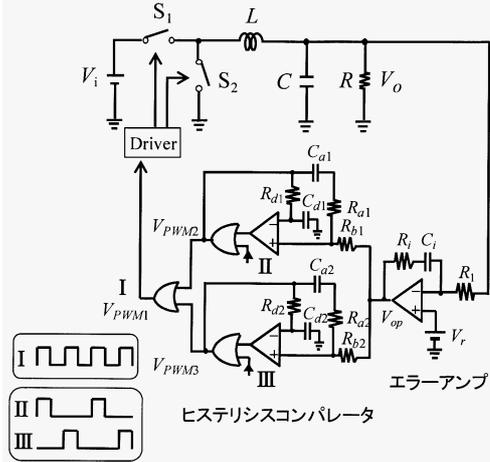


図3 2倍周波ヒステリシスPWM制御回路

OR回路の入力、に180度位相をずらしたクロックトリガ信号を入力することにより、出力には同期されたPWM信号が出力される。これにより従来困難であったMHz帯のスイッチング動作が可能となった。図4は負荷が0Aから10Aにステップ変化した場合の出力電圧過渡応答波形を示している。上の波形はクロック信号がない場合であり、フリーランの動作となっている。クロック信号を用いた下の波形では2MHzの動作となっており、過渡応答特性を犠牲にすることなくリップ電圧も小さく抑えられている。

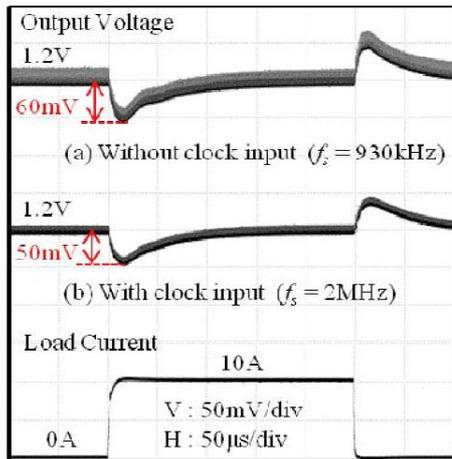


図4 過渡応答波形の比較

(b) 降圧ブロックと昇圧ブロックより構成されるHブリッジコンバータにおいては、安定性の観点から、降圧ブロックに帰還の方が設計も容易であり応答特性も優れている

ため、出力電圧調整は降圧ブロックのみを帰還制御して行う。また昇圧ブロックに関しては図5のブロック図に示すように、広範囲な入力電圧への対応と負荷変動時の過渡電圧抑制のため、電圧と電流のフィードフォワード制御を行うことを試みた。

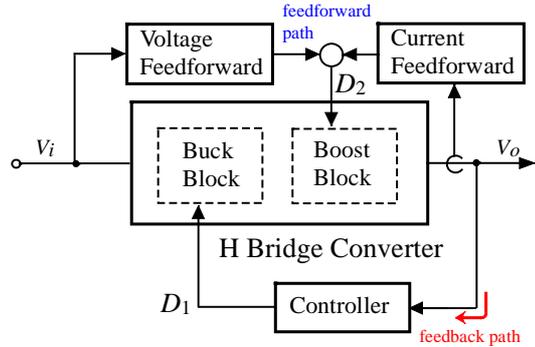


図5 Hブリッジコンバータの制御ブロック図

入力電圧のフィードフォワード制御は、効率の観点から昇圧ブロックの時比率 D_2 を

$$D_2 = 1 - \frac{V_i}{V_o} D_{1m}$$

なる関係式で決定する。ここで D_{1m} は降圧ブロックの最大時比率を表しており、通常0.9程度に設定する。この D_2 はオペアンプ1個を用いて実現できる。

(c) DC-DCコンバータにデジタル制御を適用することは、その制御則の柔軟性、小形化という観点から、今後も大いに普及していくと考えられる。本研究においても、1つのフィードバック制御、2つのフィードフォワード制御を同時に行うため、制御ルールの具現化と制御回路の簡単化という点で有効である。ここではスイッチング電源用として市販されているDSPを用いて、図5の制御機構と同等の機能を有するデジタル制御システムを開発し、その有用性について実験による検討を行った。

図6は、昇降圧動作における負荷電流フィードフォワード制御を行った場合の負荷電流ステップ変化(0A-10A)に対する出力電圧の過渡応答を示している。この図ではフィードフォワードゲインと、電流検出回路の時定数をパラメータとして比較している。

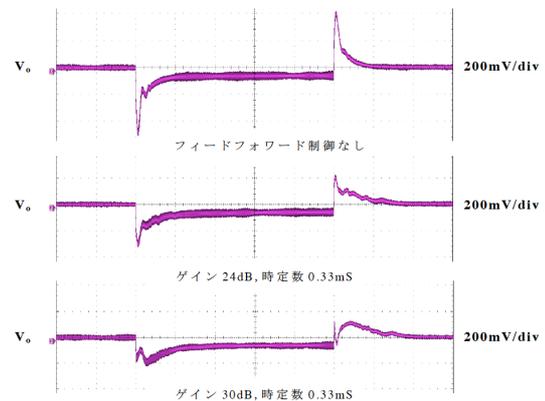


図6 負荷変動時の過渡応答
($V_{in}=9V$, $V_o=12V$, $f_s=250kHz$)

この結果からもわかるように、適正なゲインと時定数を設定することにより、過渡電圧のピーク値が1/2以下に抑えられており、本手法の有用性が明らかにされた。

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 0件)

〔学会発表〕(計 5件)

S. Goto, T. Sato, T. Nabeshima, K. Nishijima, Power Efficiency Improvement at Light Load for POL Power Supply Employing Two Stage Coupled Inductor Converter, ICRELA 2012, 12 Nov. 2012, The Best Western Premier Hotel Nagasaki, Japan

T. Urabe, T. Sato, T. Nabeshima, K. Nishijima, A Novel Tapped-Inductor Buck Converter for Home DC Power Supply System, ICRELA 2012, 12 Nov. 2012, The Best Western Premier Hotel Nagasaki, Japan

H. Tomita, T. Sato, T. Nabeshima, K. Nishijima, Improved Transient Response of Digitally Controlled Buck Converter Employing Predictive PID Control, ICRELA 2012, 12 Nov. 2012, The Best Western Premier Hotel Nagasaki, Japan

T. Morotomi, T. Sato, T. Nabeshima, K. Nishijima, A Hysteretic PWM Control Operated in Double Switching Frequency of Clock Signal, PEDS 2013, 25 April 2013, Kitakyushu International Conference Center, Japan

T. Morotomi, T. Sato, T. Nabeshima, K. Nishijima, Dynamic Characteristics of Hysteretic PWM Control Operated in Double Switching Frequency of Clock Signal, EPE'13 ECCE Europe Conference, 4 Sept. 2013, Lille, France

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

鍋島 隆 (NABESHIMA TAKASHI)

大分大学・工学部・教授
研究者番号：00117201

(2)研究分担者

佐藤 輝被 (SATO TERUKAZU)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：10187213

(3)連携研究者

なし