

平成21年 5月29日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560277

研究課題名（和文） 2輪独立駆動電気自動車用低コストインバータの開発

研究課題名（英文）

Development of a novel low-cost inverter for two wheel drive electric vehicles

研究代表者

星 伸一 (HOSHI NOBUKAZU)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：70292480

研究成果の概要：永久磁石同期電動機(PMSM)を用いた 2 輪独立駆動電気自動車(EV)用では、従来 2 台の三相インバータ（合計 12 個のスイッチングデバイス）が必要であった。これに対し、本研究では、従来のインバータ一台分（6 個）のスイッチングデバイスで 2 台の同期電動機の制御が可能なインバータの提案を行い、その有効性を実験及びシミュレーションにより検証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電気機器工学

キーワード：インバータ，電気自動車，永久磁石同期電動機，独立駆動，電力変換回路，電動機制御

1. 研究開始当初の背景

以下に示す社会的な要求が研究開始当初あり、本研究を実施した。

(1) 地球温暖化が原因と思われるゲリラ豪雨などの被害の増加から、温室効果ガス低減に対する要求

(2) エネルギー資源の枯渇問題に対する更なる省エネ化への要求

※開始当初に調べた 2004 年の資源エネルギー庁の統計によると、我が国のエネルギー消費量の約 24%は運輸部門で占められており、更にその中の 85%は乗用車が占めていた。

上記 2 つの要求に対する解決策として、安全かつ低コストな電気自動車開発への要求が高まっている。

電気自動車の駆動用モータとして 2 台、若しくは 4 台の永久磁石同期電動機を車輪に埋め込み使用するインホイールモータ方式を採用することで、車体空間の有効利用、左右の車輪を独立制御による車両の安全性の向上が期待できる。その一方で、複数台の永久磁石同期電動機を駆動するには、モータの台数分の三相インバータが必要であり、コストの増加が問題となっていた。この問題に対し

て、2 台の永久磁石同期電動機を、従来の三相インバータ一台分のスイッチング素子数で構成できる新たな回路方式を提案し、基本特性を検証するために本研究を実施した。

2. 研究の目的

提案インバータについて、以下の項目の実施し、提案回路の基本特性を検証することが、本研究の目的である。

- (1) 実験装置の製作と制御装置の開発
- (2) 基本制御性能・効率等の実証試験
- (3) キャパシタ電圧の変動を考慮した制御法、電圧低下を補償する制御法の検討

3. 研究の方法

本研究の提案回路を、図 1 に示す。

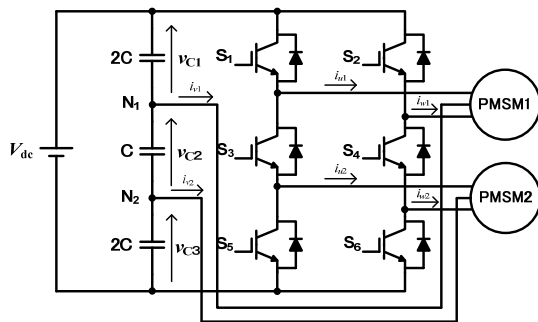


図 1 提案インバータ回路

まず、研究実施前の事前準備として、基礎シミュレーションにより二つの負荷に周波数、振幅の異なる電圧を出力できるか検証した結果、出力可能であることを確認した。このことから、以下の手順により研究を実施した。

(1) 実験装置の製作と制御装置の開発

図 1 に示す提案回路では、従来の三相インバータと構成が異なるため、汎用の制御装置が使用できない。そのため、主回路を製作するとともに、制御装置についても独自に開発した。

(2) 実験による有効性の検証

(1) で製作した実験装置に、R-L 負荷を接続して、動作確認のための基礎実験を行った。

(3) キャパシタ電圧の変動を考慮した制御法、電圧低下を補償する制御法の検討

図 1 に示す提案回路では(2)の実験では、直流電源電圧を 3つのキャパシタにより分圧して利用する。そのため、負荷のアンバランスなどで、キャパシタの電圧比が理想状態から外れると、所望の出力が得られなくなってしまふ。このため、キャパシタ電圧補償法を提案し、シミュレーションにより検証した。

(4) 電圧利用率の検討

申請当初はこの項目は含まれていなかったが、学会等での研究発表などで、質問が多かったため、理論およびシミュレーションにより検証した。

(5) 瞬時電流制御法の提案とシミュレーション・実験による検証

この項目も申請当初に含まれていなかったが、提案回路では中段のスイッチ(図 1 の S₂, S₄)のスイッチング周波数が、他のものの 2 倍となることから、新たな制御法を提案し、シミュレーション及び実験で検証した。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果を以下に示す。

(1) 実験装置の製作と制御装置の開発

製作した実験装置の外観を図 2 に示す。

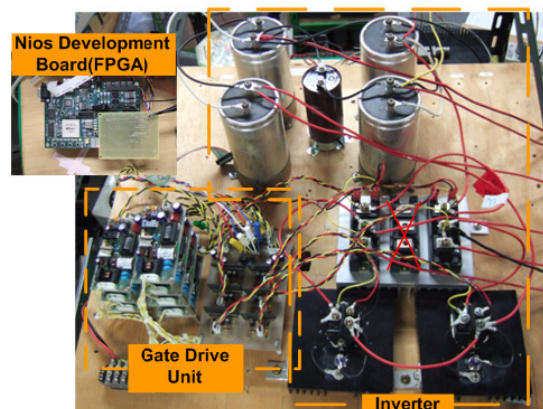


図 2 実験装置の外観

図 2 の Gate Drive Unit は、6つの主回路スイッチ用のゲート駆動回路及びその電源であり、Inverter 部分が、提案主回路である。提案主回路は、2 in 1 モジュールの IGBT と単体の IGBT 及び逆並列ダイオードを用いて構成した。

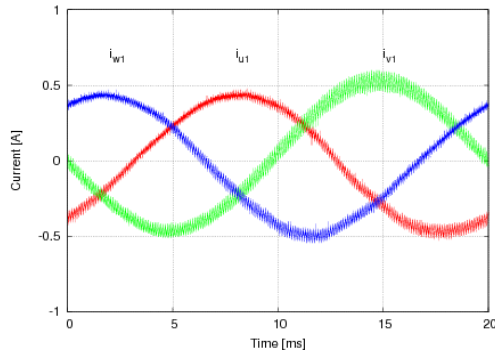
制御装置は、写真左上に示した Nios Development Board 上の FPGA に、ソフトウェア CPU (Nios II) と VHDL で記述した提案回路用の PWM コントローラ、デッドタイム生成器などを書き込むことにより構築した。後述の瞬時電流制御法では、電流センサとのインターフェース回路を製作し、4ch の A/D 変換器を通してこの装置に接続することで制御装置を構成した。

(2) 実験による有効性の検証。

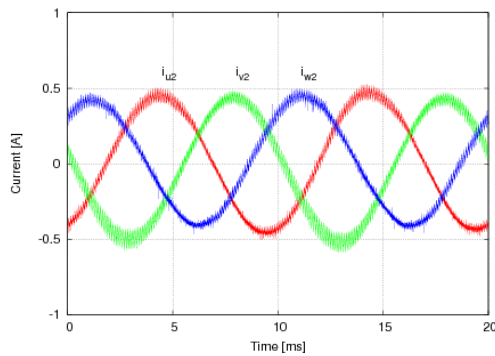
(1) で製作した実験装置に R-L 負荷を接続して行った実験で得られた出力電流波形を図 3 に示す。

図は、負荷 1 に対して 50Hz、負荷 2 に対して 100Hz の電圧を出力するように制御した場合の出力電流波形である。これより、2つの負荷に独立した指令値に基づき、電圧を

出力できていることが分かる。



(a) R-L 負荷 1

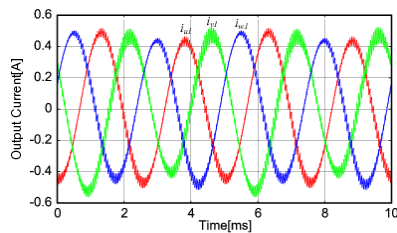


(b) R-L 負荷 2

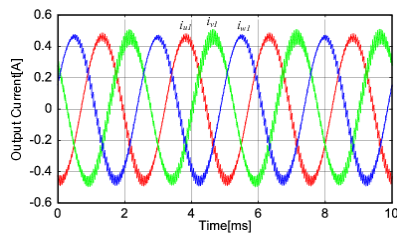
図3 出力電流波形(実験)

(3) キャパシタ電圧の変動を考慮した制御法，電圧低下を補償する制御法の検討

キャパシタ電圧補償法として，瞬時値補償法と平均値補償法を提案し，シミュレーションにより有効性を検証した。図4に，瞬時値補償法と平均値補償法を行った場合の R-L 負荷 1 に流れる電流の波形を示す。



(a) 瞬時値制御法



(b) 平均値制御法

図4 キャパシタ電圧補償法の比較

図4を見ると，瞬時値補償法では，低周波の脈動が生じてしまっていることが分かる。これに対し，平均値補償法の方が良好な出力を得ることができた。

(4) 電圧利用率の検討

各種インバータ回路と提案回路の電圧利用率と使用デバイス数を比較した結果を表1に示す。

なお，電圧利用率は入力電源電圧に対する出力線間電圧の実効値の割合を表わしており，5レグ，9スイッチ，提案回路は，2つの負荷に対して，同一周波数，同一位相の電圧を出力した場合の値である。

表1 電圧利用率と使用デバイス数の比較

種類	電圧利用率	デバイス数
従来：3レグ	61.2%	6×2個
V結線	35.4%	4×2個
5レグ	61.2%	10個
9スイッチ	30.6%	9個
提案回路	17.7%	6個

表1を見ると，提案回路は，従来の3レグインバータに比べて3割程度の出力電圧しか得られないことがわかる。したがって，提案回路では，昇圧チョッパで入力電圧を高くし，定格電圧の高いパワーデバイスを使用する必要があるが，その一方で使用するデバイス数が6個で済む。

(5) 瞬時電流制御法の提案とシミュレーション・実験による検証

瞬時電流制御法では，各負荷に流れる電流をそれぞれ2相分ずつ電流センサで検出し，この値を指令値と比較して，その大小関係より，回路の動作モードを選択し，スイッチング信号を生成する制御法である。

図5を見ると，図3の結果に比べて脈動が大きくなってしまっていることが分かる。しかし，指令通りの周波数の電流値が得られていることが分かる。電流に脈動が多くなってしまった原因としては，以下のことが挙げられる。

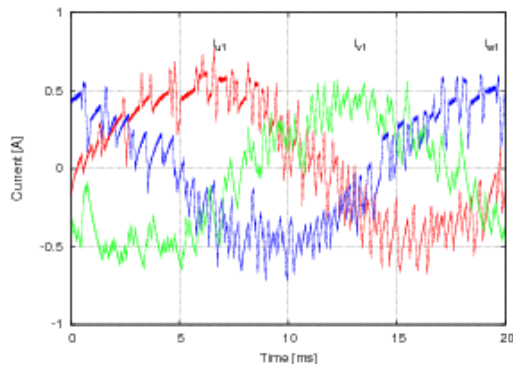
① スイッチング周波数の違い

図3では，PWM制御法を用いており，前述の通り中段のスイッチング周波数が，他段のスイッチと比べて2倍高くなっている。

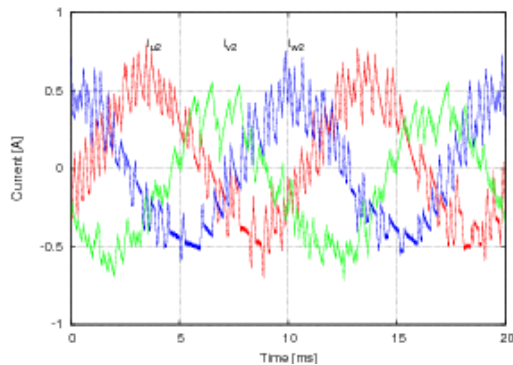
② 最適なモード選択になっていない

提案回路では，有効な動作モードが9つある。一方，出力電流の検出値と指令値との大小比較の結果は， $2^4=16$ 通りある。この16通りの大小比較の結果のうち， $16-9=7$ 通りについては，一意にモードを選択することができない。このため，今回の瞬時電

流制御法では、電流の偏差が小さくなると思われる動作モードを、一意にモードを選択することができないモードに割り当てた。



(a) R-L 負荷 1



(b) R-L 負荷 2

図 5 瞬時電流制御時の出力電流波形
(実験)

次に、得られた成果の国内外における位置づけとインパクトについて述べる。

提案回路は、申請当初から 2 台の三相負荷に周波数、位相、振幅の異なる電圧を出力可能なインバータとしては、最小のスイッチングデバイス数で済む構成であったが、現在もこれは変わっていない。このため、国内外の研究者・技術者からユニークであるとの評価を得ている。その一方で、提案回路のデメリットである電圧利用率が低下してしまうことも指摘された。そのため、2 輪駆動の電気自動車のように 2 つの負荷に同程度の電圧を供給する用途よりも、間欠駆動で交互にモータを動かすような用途の方が適しているのでは無いかとのコメントも寄せられている。

今後の展望であるが、提案回路は、電圧利用率は低下するが、少ないパワーデバイス数で 2 つの三相負荷を独立に駆動できるメリットを生かしたアプリケーションを検討することが望まれる。また、ソフトスイッチング化を図ることなども検討課題である。

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 5 件)

- ① SHIBATA Minoru, HOSHI Nobukazu: “Novel Inverter Topologies for Two-Wheel Drive Electric Vehicles with Two Permanent Magnet Synchronous Motors”, Conference Proceedings on European Power Electronics, CD-ROM, pp. 1—10, 2007, 査読有
- ② 柴田穰, 星伸一: 「2 輪独立駆動用インバータの提案」, 電気学会研究会資料, VT-07-02, 2007, 査読無
- ③ 星伸一, 柴田穰: 「2 台の同期電動機一括制御用インバータのコンデンサ電圧補償法に関する一考察」, 平成 20 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol. I, pp.357—358, 2008, 査読無
- ④ 朝日規博, 星伸一: 「2 台の同期電動機を独立制御可能なインバータのスイッチ信号生成法に関する検討」, 電気学会研究会資料, VT-09-10~25, pp. 53—58, 2009, 査読無
- ⑤ HOSHI Nobukazu, ASAHI Norihiro: “Control Strategies for a Novel Inverter which can Independently Control Two Permanent Magnet Synchronous Motors”, Conference Proceedings on European Power Electronics, 2009 年 9 月発表予定, 査読有

[学会発表] (計 2 件)

- ① 柴田穰, 星伸一: 「2 輪独立駆動可能な電力変換回路の基礎実験」, 第 15 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2007 年 12 月 1 日, シビックセンター (日立市)
- ② 朝日規博, 星伸一: 「2 台の同期電動機を独立制御可能なインバータの電圧利用率に関する一考察」, 第 16 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2008 年 12 月 6 日, シビックセンター (日立市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

星 伸一 (HOSHI NOBUKAZU)
東京理科大学・理工学部・准教授
研究者番号: 70292480

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし