

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 25 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420248

研究課題名(和文)1電源デュアルインバータを用いた高効率モータドライブシステムの開発

研究課題名(英文) Development of high efficiency motor drive system using dual inverter with single voltage source

研究代表者

芳賀 仁 (Haga, Hitoshi)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10469570

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、モータドライブシステムの高効率化を目的に、デュアルインバータ駆動オープン巻線誘導電動機の制御法を研究した。提案システムは1つの直流電源とキャパシタをそれぞれのインバータの直流部に設けて、モータ速度制御とキャパシタ電圧制御を両立する制御法をもつ。モータ速度の状態に応じた印加電圧の波高値制御(PAM)とマルチレベル化が可能になり、低速度領域の高効率化が可能になった。実験検証の結果、提案システムは従来システムと比較して、誘導機損失を52.6[W]から48.2[W]へ最大8.4[%]低減でき、また総合損失を66.1[W]から58.4[W]へ最大11[%]低減できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This program studied the control method of the dual inverter drive opening winding induction motor for the purpose of high efficiency of motor Drive System used for electric cars. The proposed system establishes one DC power supply and capacitor in the DC link of each inverter and has the control method to balance capacitor voltage control with motor speed control. Peak voltage level control (PAM) of the applied voltage depending on a state of the impossible motor speed and multilevel inverter operation became available for high efficiency operation of the low speed area. The proposed system achieves motor loss from 52.6[W] to 48.2[W] in comparison with the conventional system. Furthermore, the proposed system achieves total loss from 66.1[W] to 58.4[W] in comparison with the conventional system.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：モータドライブ

1. 研究開始当初の背景

近年、省エネルギー問題と地球温暖化問題から、自動車主機と補機の電動化が進み、電気自動車(EV)またはプラグインハイブリッド電気自動車(PHV)が普及するようになった。EVの主機モータはインバータを用いた可変速ドライブが一般的であるが、更なる燃費改善のためにモータ駆動システムの省エネルギー化が課題となっている。さらに、低速から高速まで広範囲に効率の良いモータ駆動システムが求められている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、EV主機用モータを想定した可変速駆動システム全体の省エネルギー化と広範囲速度制御の実現のために、図1に示す1つの直流電源を用いてマルチレベル波形を出力でき、かつ昇圧可変電圧機能を有する電力変換器を開発する。

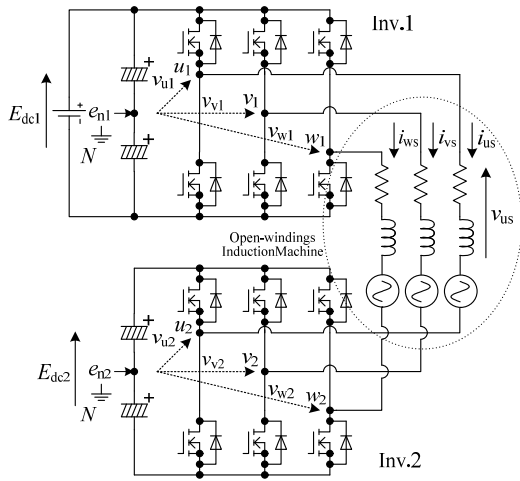


図1

3. 研究の方法

本課題では、従来のインバータシステムと比較して10%の損失低減を実現するモータ駆動システムを開発する。研究代表者らは専攻研究として、図1に示す新しいモータ駆動システムの制御法を提案している。本研究では、研究代表者らによる先行研究の成果を基にして、以下の項目について遂行する。

- (1) 提案システムの出力波形制御法の開発
- (2) 提案システムの広範囲速度制御と効率改善に向けたキャパシタ電圧指令値の設定法
- (3) 提案回路を用いたオープン巻線モータの速度とキャパシタ電圧の可変制御法の開発
- (4) 提案システムの出力波形の静特性および変換効率の実機評価

引用文献: 町屋, 芳賀, 近藤:「直流電源とキャパシタを用いたオープン巻線モータ駆動回路の基本特性」,平成24年度電気関係学会北陸支部連合大会, A-69

4. 研究成果

(1) 提案システムの出力波形制御法の開発

図2に提案する制御ブロック図を示す。本システムは巻線の両端に電力変換器が接続されているため、INV.1とINV.2で相電流を制御し、誘導機速度とキャパシタ電圧を制御する。INV.1が誘導機速度制御、INV.2がキャパシタ電圧制御を担い、INV.1の制御軸をd1q1軸、INV.2の制御軸をd2q2軸とそれぞれ想定して、誘導機の回転子鎖交磁束数をベクトル制御して、出力トルクはq1軸電流に比例する。また、キャパシタ電圧はキャパシタに入出力する有効電力により制御される。提案法ではINV.1とINV.2の回転座標角に $-\pi/2$ [rad]の初期位相差を設けている。そのため、初期状態ではd1軸とq2軸が同じ軸上に位置しており、q1軸とd2軸は対向している。このため、INV.1が誘導機速度、INV.2がキャパシタ電圧をそれぞれ単独で制御しようとする時、干渉の影響が生じる。例えば、誘導機出力トルクが変動してq1軸電流が変動すると、d2軸電流も変化してキャパシタ電圧が変動する。この変動によりd2軸電流を変化させるとq1軸電流も変動して不安定になる。そこで、本研究ではこの干渉の影響を減らすために、d1軸とq2軸にキャパシタ電圧制御器の出力を加算し、さらにq1軸とd2軸から減算している。これにより、キャパシタ電圧制御による誘導機出力トルク変動および負荷トルク入力によるキャパシタ電圧変動を抑制し、任意の負荷条件、誘導機速度によってもキャパシタ電圧を制御することができる。

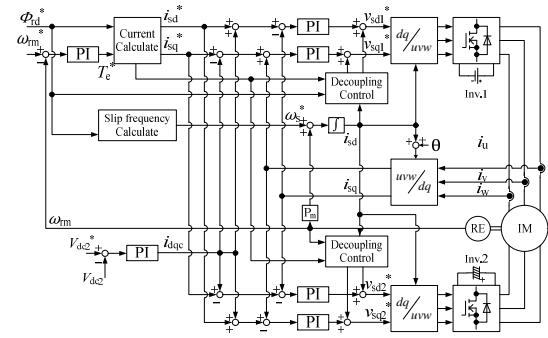


図2

(2) 広範囲速度制御と効率改善に向けたキャパシタ電圧指令値の設定法

図3に提案するオープン巻線モータの駆動方法を示す。なお、 $V_{upeak}$ は直流電圧で決まるモータu相電圧の波高値を示す。

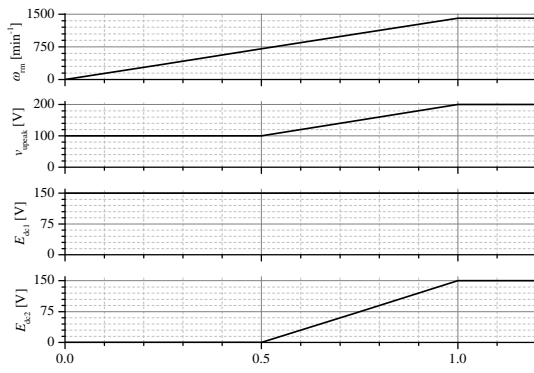


図 3

オープン巻線誘導機はベクトル制御により制御され、誘起起電力は誘導機の回転速度に比例する。キャパシタ電圧を制御することでINV.2の出力電圧を制御でき、誘導機相電圧の波高値を抑制することが可能となる。図3に示すように誘導機始動時および低速時から定格速度の半分までの領域でキャパシタ電圧を0[V]に制御することにより、巻線電圧波高値を抑制し、誘導機損失低減を狙う。キャパシタ電圧を0[V]に制御することでINV.2のスイッチング損失も大幅に低減できる。次に、誘導機が定格速度の半分以上の速度で運転しているときは誘導機回転速度に比例してキャパシタ電圧を増加させることで、歪みの少ない電圧を巻線に入力することが可能となり、モータ損失の低減が期待できる。

**(3) 提案回路を用いたオープン巻線モータの速度とキャパシタ電圧の可変制御法の開発**

図4に実験システムの外観図を示す。供試モータの回転子はカップリング、トルク検出器を介して発電機モータへ接続している。発電機出力はインバータと接続してトルク制御を用いて負荷を背負わせている。表1に試作した誘導機の定格と実験条件を示す。本研究ではY結線誘導機とオープン巻線誘導機の2種類で比較評価している。それぞれのモータは同一の試作機を用いて試作機の中性点の結線を変えて実験している。なお、試作した電力変換器はMOSFET(2SK2995, 250[V], 30[A], オン抵抗 48[mΩ])を用いて構成した。



図 4

**(4) 提案システムの実験結果の静特性および変換効率の実験評価**

図5,6に提案法を用いてオープン巻線誘導機を運転させた時の実験結果を示す。なお、

図5の相電圧波形は定格速度時の波形である。図5より、キャパシタ電圧がモータ速度に応じて制御可能であることが分かる。したがって、提案法を用いることにより誘導機相電圧の波高値を抑制することが可能となる。また、誘導機始動時および低速時の損失の低減が期待できる。

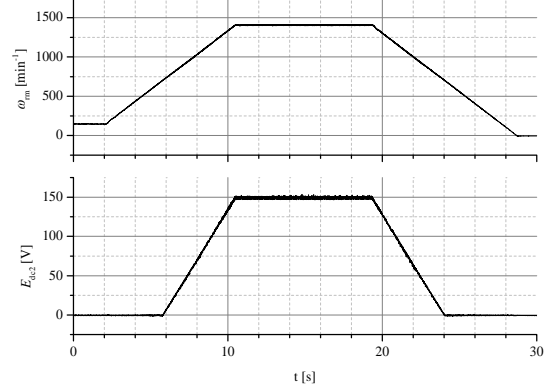
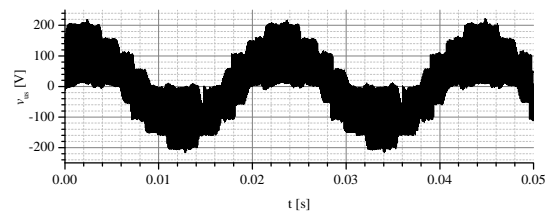
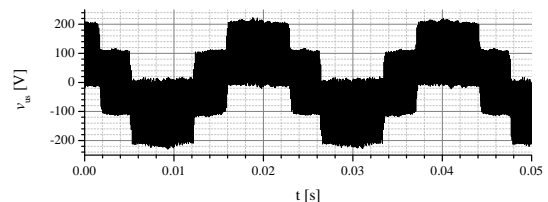


図 5

図6より、相電圧がY結線誘導機と比べてより多レベルな波形となることが分かる。また、基本波周波数からキャリア周波数までを測定範囲とした出力電圧の総合ひずみ率は従来のYM回路では76.6[%]、検討するOM回路では47.8[%]であった。したがって、提案法を用いてINV.2のキャパシタ電圧をモータ速度に応じて制御することで、誘導機始動時および低速時は巻線に低圧を印加することが可能であり、中高速領域では従来のYM駆動回路と比べて相電圧波形改善が可能となり、誘導機損失の低減ができる。なお、従来に比べて提案法による波形が歪む要因として、各インバータの電圧位相差が減少することが考えられる。キャパシタ電圧を一定に制御するために誘導機の力率に応じて位相差が減少するため波形歪みが発生する。



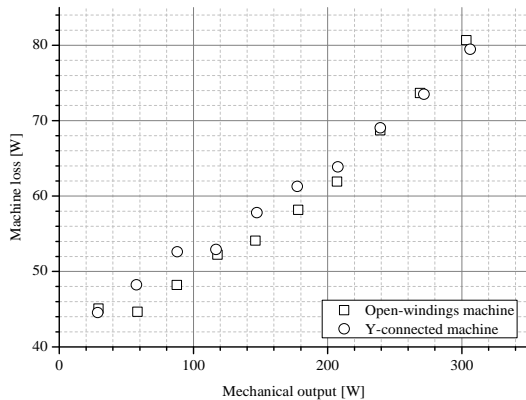
(a)



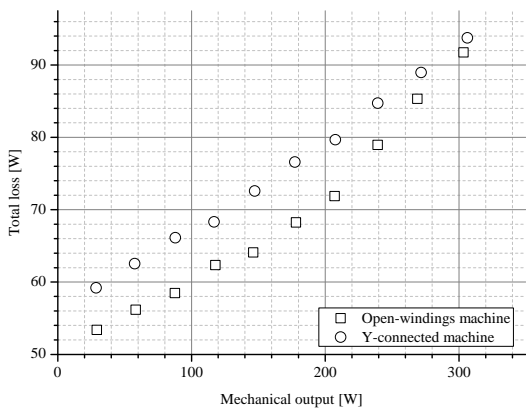
(b)

図 6

図7に従来のYM回路と、提案法を用いた検討するOM回路(以下 提案するOM回路)の損失比較結果を示す。なお、実験は誘導機に一定負荷を印加して行い、YM回路の直流電圧は300[V]、提案するOM回路の直流電圧は150[V]に設定した。また、YM回路はIGBTモジュール(PS21767,600[V],30[A],オン電圧1.7[V])を用いて構成した。実験環境は、空調機で室温を20度に管理して、暖機運転を約20分行ってから、同一のモータを用いて、モータ結線を変えて測定した。(□)は提案するOM回路の損失、(○)は従来のYM回路の損失を示す。



(a)



(b)

図7

図7より、提案するOM回路はYM回路より低圧の電圧源を用いて駆動できるため、始動時および低速時の誘導機損失を低減できることが分かる。しかし、中高速時では提案するOM回路と従来のYM回路の誘導機損失は、ほぼ同じ損失となることが分かる。これは、INV.2のキャパシタ電圧がINV.1とINV.2の出力電圧位相差と誘導機の力率により決定されることに要因があり、誘導機の負荷を増加させることで誘導機力率が向上すると、キャパシタ電圧を制御するため、電圧位相差が減少する。電圧位相差が減少すると、出力

電圧総合歪み率が増加し、誘導機損失が増加する。この時の出力電圧の総合ひずみ率は、提案するOM回路では57.8[%]と図6の結果に比べて増加している。全体的には、従来のYM回路と提案するOM回路の誘導機損失を比べると低損失にできており、提案するOM駆動は従来のYM回路と比べて誘導機損失を52.6[W]から48.2[W]へ最大8.4[%]低減できることを確認した。図8はモータ損失の損失分離結果を示す。YM回路に比べてOM回路は波形改善効果により高調波鉄損15.2[W]から10.5[W]へ最大30.9[%]低減できていることが分かる。

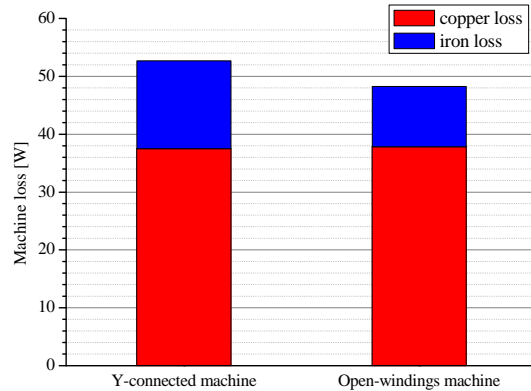


図8

電力変換器も含めた総合損失を比べると、提案するOM回路は誘導機始動時および低速時の誘導機損失、変換器損失が低減できている。提案するOM回路は従来のYM回路に比べて総合損失を66.1[W]から58.4[W]へ最大11[%]低減できることを確認した。

次に、オープン巻線モータを対象としたデュアルインバータの電圧波形改善を目的に、空間電圧ベクトルを基にした波形改善および低損失駆動する変調方式を検討して、その基本特性を実証する

図9に提案するPWM法を適用したオープン巻線モータのすべり周波数制御ブロック図を示す。本提案法は、一般的な誘導電動機

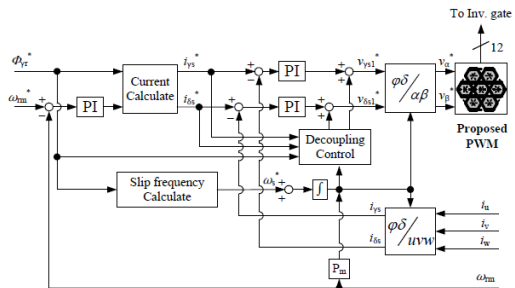


図9

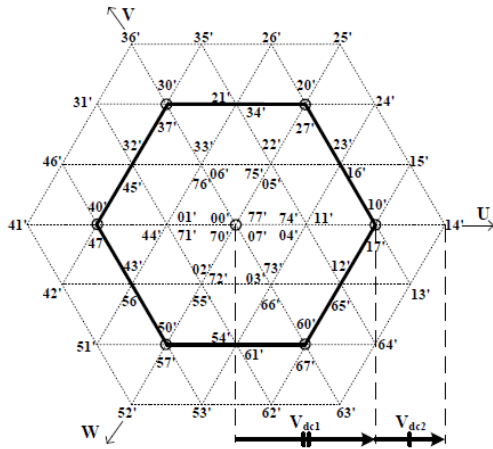


図 10

と同様の制御系で動作が可能であり  $\gamma$ - $\delta$ 軸から  $\alpha$ - $\beta$ 軸への回転座標変換後の電圧指令値を入力とする PWM 法である。INV-1 と INV-2 の各電圧ベクトルを合成したデュアルインバータの電圧ベクトルを図 10 に示す。ここで、 $V_{dc1}$ 、 $V_{dc2}$  はそれぞれ INV-1、INV2 の直流電圧、 $V_{dc}$  はそれらの和であり、 $(V_{dc1} : V_{dc2}) = (2 : 1)$  としている。また、太線は INV-1、点線は INV-2 の空間ベクトルに対応しており、 $0 \sim 7$  および  $0' \sim 7'$  はデュアルインバータのスイッチング状態の組み合わせを表している。本研究では、任意の電圧指令ベクトル  $v_r$  を INV-1 と INV2 のそれぞれの電圧指定ベクトルで分担して出力する。提案する PWM 法では、図 13 の合成電圧ベクトルを 19 の領域に分割してパターンを構築する。

デュアルインバータの出力の合成方法を図 11 に示す。電圧指令ベクトル  $v_r(x, y)$  は、 $v_a(x_a, y_a)$  と  $v_b(x-x_a, y-y_a)$  の合成で表される。また、 $k < 1/3$  の領域に関しては、INV-1 は 0 または 7 を出力するため、 $v_a(0, 0)$ 、 $v_b(x, y)$  となる。INV-2 の出力は、 $' \sim '$  のそれぞれの小三角形領域を形成する 3 つの電圧ベクトルを、周期  $T$  の間で平均値的に出力する空間ベクトル変調としている。本提案方式では、スイッチング回数が少なく出力電圧の高い INV-1 と、スイッチング回数が多く出力電圧の低い INV-2 を組み合わせた方式であるため、優れたインバータ効率を得られる。

提案する PWM 法の有効性を確認するために実験による検証を行った。各変換器の直流電圧比 ( $V_{dc1} : V_{dc2}$ ) はそれぞれ、 $(2 : 1)$  としており、従来法として各インバータの位相差を  $180^\circ$  設けた PWM 法を比較対象とする。また、直流電圧源は絶縁する必要がある。図 12 に無負荷定格速度における実験結果を示す。(a) 従来法と比較して、(b) 提案法では  $0[V]$  を経由しない波形生成が可能となり波形改善が期待される。

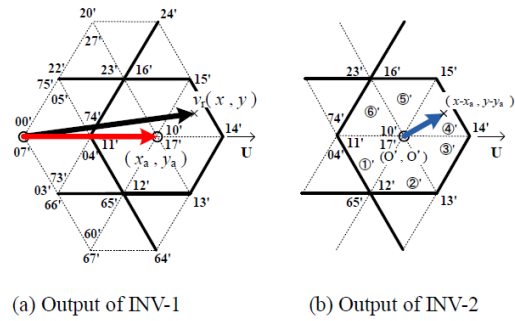


図 11

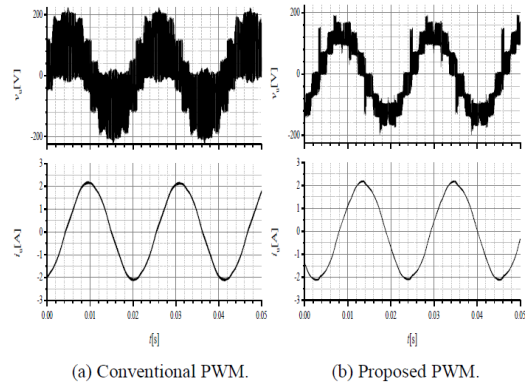


図 12

また、本提案法のシステム損失測定結果を図 13 に示す。このときの条件は、負荷一定 ( $2.0[N \cdot m]$ )、速度可変 ( $0.1 \sim 1.0[p.u.]$ ) としており、供試機は Fig.2 のすべり周波数速度制御、負荷機はトルク制御としている。図 13 より低速域と高速域にてシステム損失が低減できたことが確認できる。中速域では、INV-1 のスイッチング回数が増加するため、従来法と同等の損失となった。

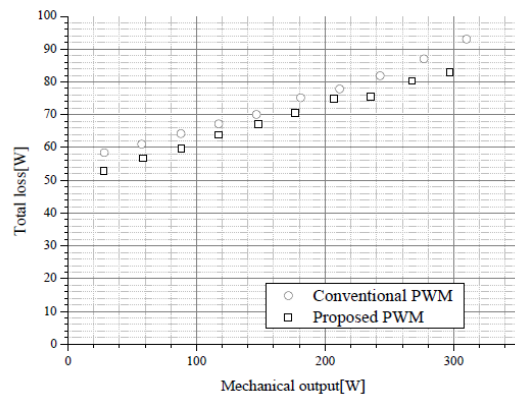


図 13

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計1件)

町屋 孟, 芳賀 仁, 近藤 正示:「キャパシタを直流部に用いたデュアルインバータ駆動オープン巻線誘導機の高効率駆動法」, 電気学会論文誌 D, 135 巻, 1月号, pp.10-18 (2015年)

### 〔学会発表〕(計6件)

満留 健星, 芳賀 仁, 近藤 正示:「異なる直流電圧を有するデュアルインバータの出力電圧波形改善法」, 電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会, SPC-15-042, pp.77-82 (2015年)

満留 健星, 芳賀 仁, 近藤 正示:「デュアルインバータの空間ベクトル変調法に基づく出力波形改善の検討」平成 26 年電気学会産業応用部門大会, Vol.1, No.65, pp.289-292 (2014年)

満留 健星, 芳賀 仁, 近藤 正示:「デュアルインバータの出力電圧歪みを低減する空間ベクトル変調法の実験検証」平成 26 年電気学会全国大会, Vol.4, No.4, pp.6-7 (2014年)

町屋 孟, 芳賀 仁, 近藤 正示:「一定電圧源とキャパシタで駆動するオープン巻線誘導機の高効率制御法」, 電気学会半導体電力変換モータドライブ合同研究会, No. SPC-14-047, pp.121-126 (2014年)

満留 健星, 芳賀 仁, 近藤 正示:「デュアルインバータの空間ベクトル変調法に関する検討」, 第 23 回電気学会東京支部新潟支所研究発表会, No. -09, p. 43 (2013年)

町屋 孟, 芳賀 仁, 近藤 正示:「キャパシタと一定電圧源で駆動するオープン巻線誘導機の高効率駆動法」, 平成 25 年電気学会産業応用部門大会, Vol.1, No.1-43 (2013年)

### 〔図書〕(計0件)

### 〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

芳賀 仁 (HAGA, Hitoshi)  
長岡技術科学大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 10469570