

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

町屋 孟*, 芳賀 仁, 近藤 正示 (長岡技術科学大学)

High efficiency control method of an open-windings induction machine Driven by a constant voltage source and capacitor

Hajime Machiya, Hitoshi Haga, Seiji Kondo (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a control method for high efficiency drive of an open-windings induction machine system that consists of constant voltage source and capacitor. In the proposed method, the capacitor voltage is changed according to rotation speed of the open-windings induction machine. Through the experiment, the proposed method proves that the efficiency of induction machine is increased at high speed conditions by changing the capacitor voltage.

キーワード：誘導機，オープン巻線モータ，高効率駆動

Keywords : Induction machine, Open-windings machine, High-efficiency drive

1. はじめに

近年、バッテリーを電圧源とするモータ駆動システムに関する研究が盛んに行われ、広く普及されるようになった。モータ構造として、主に三相巻線の一端を結線して中性点とするものが対象であるが⁽¹⁾、最近では巻線の一端を結線しないオープン巻線モータについても検討が行われるようになった⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

本稿では一定電圧源とキャパシタで構成するオープン巻線誘導機の高効率化を目的に、回転速度に応じてキャパシタ電圧を可変する制御法を提案する。実験により提案する制御法の基本動作を確認するとともに、モータの運転状態に応じてキャパシタ電圧を可変することにより、高速駆動時に誘導機効率を改善したので報告する。

2. 回路構成

〈2・1〉 Y 結線誘導機駆動回路 図 1 にバッテリーを電圧源とする Y 結線誘導機の従来の駆動回路を示す⁽¹⁾。この

$$v_x = \left(v_{x1} - \frac{v_{u1} + v_{v1} + v_{w1}}{3} \right) \quad (1)$$

回路において、誘導機の相電圧は(1)式で示される。

ここで、x は U, V, W の添え字を示す。

この回路は、前段の双方向チョップにより PAM 制御が可能である。しかし、昇圧リアクトルを回路に追加する必要があり、システム全体の小型・軽量化が困難となる。

〈2・2〉 従来のオープン巻線誘導機駆動回路 図 2 に従

来のオープン巻線誘導機の駆動回路を示す⁽²⁾⁽³⁾。ここで、 $v_{u1} \sim v_{w1}$ 、 $v_{u2} \sim v_{w2}$ はそれぞれのインバータの直流中点を基準とした電圧、 $i_u \sim i_w$ は相電流を示す。

2 台のインバータと 2 つの直流電圧源で構成するオープン巻線誘導機を対象にした駆動回路では、 $v_{u1} \sim v_{w1}$ はそれぞれ $\pm 2E_{dc1}/3$ 、 $\pm E_{dc1}/3$ 、 $0[V]$ 、 $v_{u2} \sim v_{w2}$ は $\pm 2E_{dc2}/3$ 、 $\pm E_{dc2}/3$ 、 $0[V]$ の 5 レベル波形となる。また、図 3 に示す等価回路図によると、それぞれのインバータの出力電圧の差が誘導機に入力される。そのため、オープン巻線誘導機の相電圧は(2)式で表すことができる。

ただし、x は U, V, W の添え字を示す。

$$v_x = \left(v_{x1} - \frac{v_{u1} + v_{v1} + v_{w1}}{3} \right) - \left(v_{x2} - \frac{v_{u2} + v_{v2} + v_{w2}}{3} \right) \quad (2)$$

図 2 に示す回路は、よりレベル数の多い相電圧を誘導機に印加できるため、電圧波形改善に有効である。図 2 において $E_{dc1} + E_{dc2} = E_{dc}$ とすると、誘導機の相電圧波形は $\pm 2E_{dc}/3$ 、 $\pm E_{dc}/2$ 、 $\pm E_{dc}/3$ 、 $\pm E_{dc}/6$ 、 $0[V]$ の 9 レベル波形となる。誘導機の端子数は 6 つになるが、Y 結線誘導機駆動回路のような昇圧リアクトルを追加せずに高圧を印加できる。ただし、直流電圧源の接地電位を共通にすることはできない。そのため、直流電圧源は絶縁して構成する必要があり、システム全体の小型・軽量化が困難となる。また、インバータを 2 台必要とする。このため図 1 のような Y 結線誘導機駆動回路と比べて、変換器の損失は増加する。

〈2・3〉 提案するオープン巻線誘導機駆動回路 図 4 に本稿で提案するオープン巻線誘導機駆動回路を示す⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

ただし、 $v_{u1} \sim v_{w1}$ 、 $v_{u2} \sim v_{w2}$ はそれぞれのインバータの直流中点を基準とした電圧、 $i_u \sim i_w$ は相電流を示す。

この回路は従来のオープン巻線誘導機駆動回路の直流電圧源の 1 つをキャパシタに置き換えることで、直流電圧源を複数台必要としない。そのため、従来のオープン巻線誘導機駆動回路で必要とされる直流電圧源を絶縁する回路が不要となる。また、誘導機に印加される電圧は図 2 の回路と同様であるため、図 4 に示す回路でオープン巻線誘導機を駆動した場合も電圧波形改善が期待できる。

本稿では、直流電圧源の 1 つをキャパシタに置き換えることで、キャパシタ電圧を可変に制御でき、Inv.2 から出力される電圧の波高値を可変に制御することが可能となる。従来のオープン巻線誘導機駆動回路ではそれぞれの変換器の直流電圧は固定として動作させていたが、提案法では Inv.2 の直流電圧を制御可変とすることで、誘導機の回転速度に応じた電圧を入力することも可能となり、変換器損失

の低減も期待できる。また、直流電圧源とキャパシタ電圧により誘導機を駆動するため、変換器 1 台に加わる電圧を低減することができる。そのため、図 4 のスイッチの耐圧は図 1 と比べて小さくできる。

3. 提案するインバータ制御法

〈3・1〉 変換器のスイッチ状態と相電圧の関係 表 1 にそれぞれの変換器のスイッチ状態と誘導機の相電圧の関係を示す。ただしキャパシタの電圧は E_{dc2} 固定、それぞれの変換器の変調度は同じである。表 1 より、各変換器が逆位相の電圧指令値で動作する時、誘導機相電圧が最大となる。しかし、各変換器の電圧位相差を逆位相固定とした場合、誘導機相電圧は $\pm 2E_{dc}/3$ 、 $\pm E_{dc}/3$ 、 $0[V]$ の 5 レベル波形となる。そこで提案法では各変換器の電圧指令値に固定位相差を持たせたくて、位相差を制御することによりこれを実現し、誘導機相電圧の波形改善を行う。

〈3・2〉 制御ブロック図 図 5 に提案する制御ブロック図を示す。Inv.1 の制御には、すべり周波数ベクトル制御を用いる。提案法では、誘導機の回転速度に応じて Inv.2 のキャパシタ電圧 E_{dc2} を制御するため、Inv.2 の制御系にはキャパシタ電圧の制御系と Inv.1 の dq 軸電流を指令値とする電流制御系がある。

誘導機の鎖交磁束数をすべり周波数ベクトル制御系で制御することより、出力トルクは q 軸電流に比例する。また、キャパシタ電圧は誘導機に入力される有効電力により制御される。そのため、誘導機の出力トルクが電圧制御器の出力により変動し、誘導機に負荷が加わる時、誘導機に流れる電流が変化することでキャパシタ電圧も変動する。そこで提案法ではこれらの干渉を無くすために、Inv.1 の d 軸電流と Inv.2 の q 軸電流に電圧制御器の出力を加え、さらに Inv.1 の q 軸電流と Inv.2 の d 軸電流から電圧制御器の出力を引いている。これより、キャパシタ電圧制御による誘導機の出力トルク変動及び負荷トルク入力によるキャパシタ電圧の変動を抑制し、誘導機速度に応じてキャパシタ電圧を可変に制御できる。

本稿では、Inv.2 のキャパシタ電圧の指令値は、誘導機始動時および低速領域では 0V を与え、定格速度の 50% に達し

表 1 スイッチング状態と相電圧の関係

Table 1. Relation of switch state and phase voltage of open-windings induction machine.

(u_1, v_1, w_1) (u_2, v_2, w_2)	(000)	(100)	(110)	(010)
(000)	0	$E_{dc}/3$	$E_{dc}/6$	$-E_{dc}/6$
(100)	$-E_{dc}/3$	0	$-E_{dc}/6$	$-E_{dc}/2$
(110)	$-E_{dc}/6$	$E_{dc}/6$	0	$-E_{dc}/3$
(010)	$E_{dc}/6$	$E_{dc}/2$	$E_{dc}/3$	0
(011)	$E_{dc}/3$	$2E_{dc}/3$	$E_{dc}/2$	$E_{dc}/6$
(001)	$E_{dc}/6$	$E_{dc}/2$	$E_{dc}/3$	0
(101)	$-E_{dc}/6$	$E_{dc}/6$	0	$-E_{dc}/3$
(111)	0	$E_{dc}/3$	$E_{dc}/6$	$-E_{dc}/6$

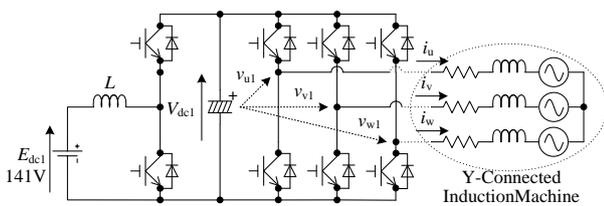


図 1 Y 結線誘導機駆動回路

Fig.1 Drive circuit of Y-connected induction machine.

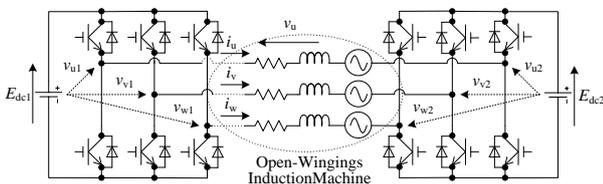


図 2 従来のオープン巻線誘導機駆動回路

Fig.2 Conventional circuit of open-windings induction machine.

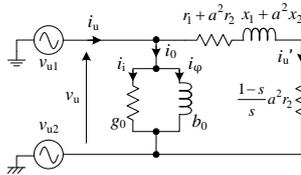


図 3 オープン巻線誘導機の等価回路図

Fig.3 Equivalent circuit of open-windings induction machine.

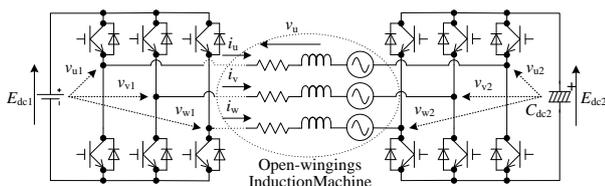


図 4 検討するオープン巻線誘導機駆動回路

Fig.4 Open-windings induction machine.

	(011)	(001)	(101)	(111)
(000)	$-E_{dc}/3$	$-E_{dc}/6$	$E_{dc}/6$	0
(100)	$-2E_{dc}/3$	$-E_{dc}/2$	$-E_{dc}/6$	$-E_{dc}/3$
(110)	$-E_{dc}/2$	$-E_{dc}/3$	0	$-E_{dc}/6$
(010)	$-E_{dc}/6$	0	$E_{dc}/3$	$E_{dc}/6$
(011)	0	$E_{dc}/6$	$E_{dc}/2$	$E_{dc}/3$
(001)	$-E_{dc}/6$	0	$E_{dc}/3$	$E_{dc}/6$
(101)	$-E_{dc}/2$	$-E_{dc}/3$	0	$-E_{dc}/6$
(111)	$-E_{dc}/3$	$-E_{dc}/6$	$E_{dc}/6$	0

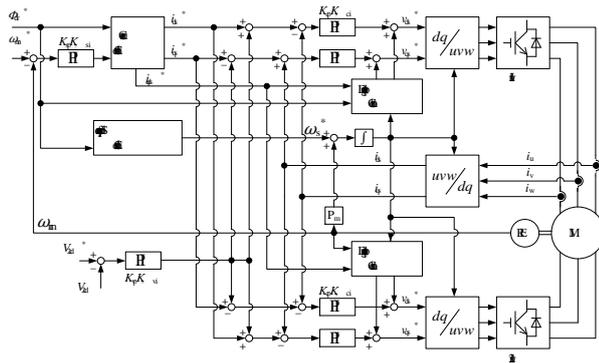


図5 提案する制御ブロック図
Fig.5 Proposed control block diagram.

た時点から、速度に比例して定格電圧まで増加させている。誘導機始動時および低速領域ではキャパシタ電圧を 0V に制御することで、Inv.2 のスイッチング損失はほぼ 0 となる。

検討する回路では誘導機に入力する電圧を Inv.1 および Inv.2 に分担できる。そのため、それぞれのインバータの直流電圧は、誘導機定格電圧に対して半分でよい。したがって、Y 結線誘導機駆動回路と比べて誘導機始動時および低速時の損失低減が期待できる。また、キャパシタ電圧が誘導機に入力される高速領域では、変換器損失の増加が懸念されるが、電圧波形改善による誘導機損失の低減が期待できる。

4. 実験結果

〈4・1〉 実機構成 表 2 に供試誘導機の定格と実験条件を示す。Inv.1 と Inv.2 のパワーデバイスには PS21767 (600[V], 30[A]) と CM100RX-12A (600[V], 100[A]) の IGBT モジュールをそれぞれ用いて構成した。

〈4・2〉 実験結果 図 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、実験は無負荷で行い、キャパシタ電圧の指令値は誘導機始動時および低速領域では 0V を与え、定格速度の 50% に達した時点から回転速度に比例して定格電圧まで増加させた。また、相電圧および相電流波形は定格速度時の波形である。

図 6(a) より、キャパシタ電圧が速度に応じて可変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制御することが可能となり、また始動時および低速時の損失の低減が期待できる。また図 6(b) より、供試誘導機に入力される電圧が多レベルな波形となること分かる。したがって、提案法を用いることにより電圧波形改善が可能となり、誘導機損失の低減が期待できる。図 7 に Y 結線誘導機駆動回路と提案法を用いたオープン巻線誘導機駆動回路の効率比較検討を行った結果を示す。なお、Y 結線誘導機駆動回路の直流電圧は誘導機に定格電圧を入力できる電圧(282V)とした。PAM による電圧可変時の評価は、直流電圧源を可変で与え図 1 の回路を模擬した。

図 7(a) より、誘導機始動時および低速時では提案法による波形改善効果が得られないため、Y 結線誘導機駆動回路とオープン巻線誘導機駆動回路の誘導機効率を比べても差異はないが、高速時において、提案法による電圧波形改善結果が得られるため、Y 結線誘導機駆動回路と比べて誘導機効率が 5.4% 改善することを確認した。また図 7(b) より、誘導機始動時および低速時にキャパシタ電圧を 0 と制御することにより、直流電圧固定とした場合の Y 結線誘導機駆動回路と比較して変換器効率が 7.4% 改善することも確認した。しかし、直流電圧を可変とした場合の Y 結線誘導機駆動回路と比較すると、変換器効率は悪化していることが分かる。提案法は誘導機始動時および低速時にキャパシタ電圧を 0 に制御するが、実際には微小な電圧が Inv.2 直流側に発生しており、これにより損失が発生し変換器効率が低下したと考えられる。最後に図 7(c) より、提案法を用いてオープン巻線誘導機を駆動した場合、Y 結線誘導機駆動回路と比べてシステム全体の効率が 3.9% 改善することを確認した。なお、今回試作したインバータは Y 結線誘導機駆動回路の電圧定格に仕様を合わせているため、オープン巻線誘導機駆動回路の Inv.2 に電圧を発生させる高速領域での変換器効率が著しく低くなる。そのため高速駆動時の効率が Y 結線誘導機駆動回路と同等になる。

5. おわりに

本稿では一定電圧源とキャパシタで構成するオープン巻線誘導機システムについて、回転速度に応じてキャパシタ電圧を可変する制御法を提案し、実験により提案する制御法の有効性を確認した。提案法によりキャパシタ電圧を可変することにより、始動時および低速時の変換器効率が 7.4% 増加、高速時には誘導機効率が 5.4% 増加し、システム全体の効率が最大で 3.9% 増加することを確認した。引き続き、それぞれの駆動方式に適応した回路を試作し、定格負荷も含めた効率の比較を行う予定である。

文 献

- (1) 電気学会産業応用部門自動車技術委員会, 「自動車用パワーエレクトロニクスの現状」, 電気学会技術報告 Vol. 1182, (2010)
- (2) Yoshitaka Kawabata, Motoshi Nasu, and Takao Kawabata : "High Efficiency and Low Acoustic Noise Drive System Using Open-Winding A.C. Motor and Two Space Vector Modulated Inverters", IEEJ Trans.,

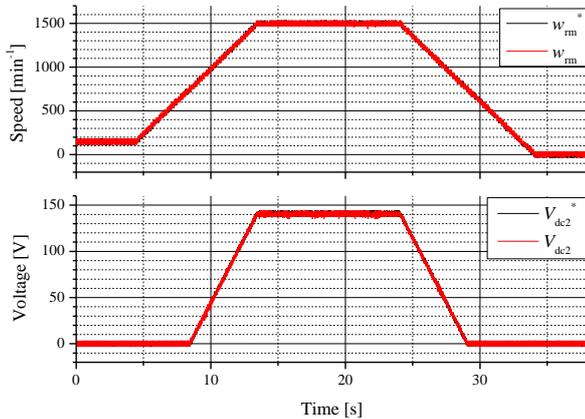
Vol.122, No.5, p.430-438 (2002) (in Japanese)

- (3) 川畑隆夫:「大容量インバータの主回路構成に関する考察」, 電気学会 半導体電力変換研究会資料, Vol.SPC94-8, pp.75-83 (1994)
- (4) Jeffrey Ewanchuk, John Salmon, and Chris Chapelsky: “A Method for Supply Voltage Boosting in an Open-Ended Induction Machine Using a Dual Inverter System With a Floating Capacitor Bridge”, IEEE Trans I.E., Vol.28, No.3 pp.1348-1357 (2013)
- (5) Junha Kim, Jinhwan Jung, and Kwanghee Nam: “Dual-Inverter Control Strategy for High-Speed Operation of EV Induction Motors”, IEEE Trans I.E., Vol.51, No.2 pp.163-168 (2004)

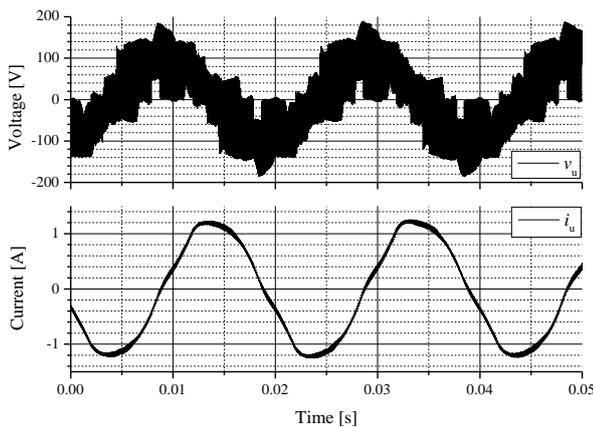
表 2 実験条件

Table 2. Experiment condition.

Inverter 1 DC voltage	141[V]
Inverter 2 DC voltage reference	0~141[V]
Inverter 2 capacitor	220[uF]
Carrier frequency	10.0[kHz]
Rated voltage	200[V]
Rated power	0.750[kW]
Poles	4



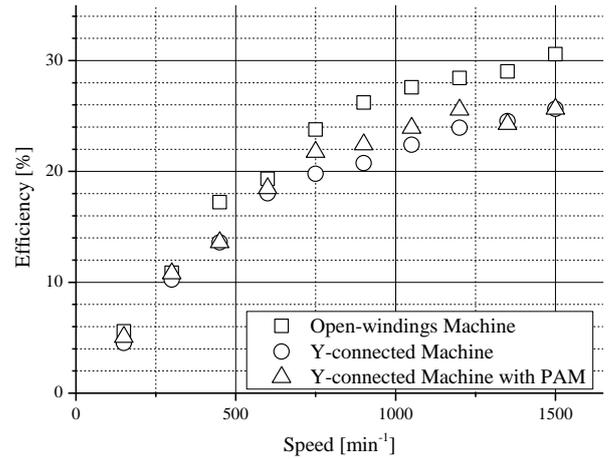
(a) 誘導機速度・キャパシタ電圧
(a) Rotation speed and voltage of capacitor.



(b) 相電圧と相電流 (1500min⁻¹)
(b) Phase voltage and current.

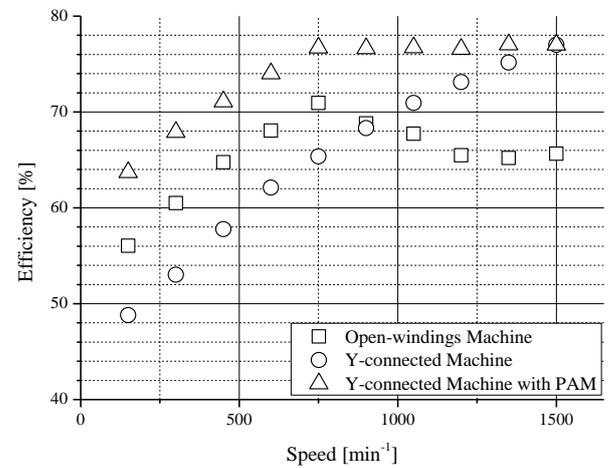
図 6 実験結果

Fig.6 Experimental result.



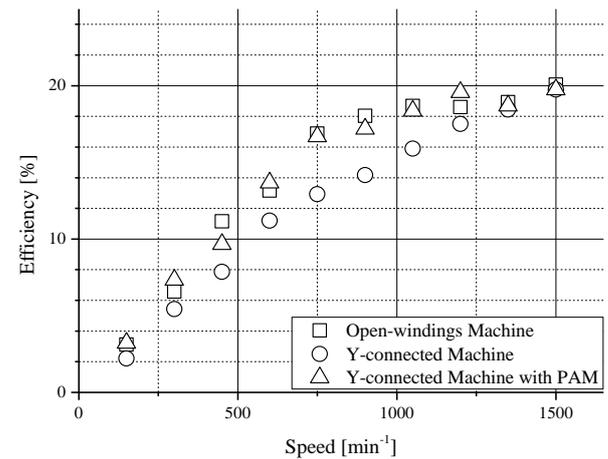
(a) 誘導機効率 (無負荷時)

(a) Efficiency of induction machine (no load).



(b) 変換器効率 (無負荷時)

(b) Efficiency of converter (no load).



(c) 総合効率 (無負荷時)

(c) Total efficiency (no load).

図 7 Y 結線誘導機駆動回路とオープン巻線誘導機駆動回路の効率

Fig.7 Efficiency of Y-connected induction motor system and open-windings induction machine system.