

デュアルインバータ駆動オープン巻線誘導機の 低速度領域におけるモータ損失改善

◎水越 彰仁, 芳賀 仁 (長岡技術科学大学)

Motor Loss Reduction of Open-Winding Induction Motor at Low-Speed Area Akihito Mizukoshi, Hitoshi Haga (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes control method of the dual inverter fed open-winding induction motor for improvement of winding voltage at low-modulation ratio. In the proposed control method, a differential voltage between each inverter output supplies to the motor to reduce a peak value of the output voltage at low speed condition. The previous report has not mentioned to the condition of that reduces the motor loss using the proposed control method. In this paper, the experimental results show the motor loss can be reduced when the dual inverter operates in over-modulation.

キーワード：オープン巻線モータ，電圧波形改善，低変調率，低速度領域

Keywords : Open-winding motor, voltage waveform improvement, low-modulation ratio, low speed area

1. はじめに

近年，電気自動車や空調機など，低速度から高速度までモータを広くに可変速駆動する応用が拡大普及されるようになってきている。現在，このようなモータドライブシステムの高効率化の研究が様々な視点で行われている。

一般に，インバータ駆動モータシステムの高効率化にはインバータのマルチレベル化が波形改善の点で有効とされている⁽¹⁾。また，インバータの直流電圧を下げてPWMの電圧波高値を低くすることも，モータ鉄損，インバータのスイッチング損失の点で有効である⁽²⁾⁽³⁾。

このような趨勢から，モータの固定子巻線を開放して，両端それぞれにインバータを接続するデュアルインバータ駆動オープン巻線モータの研究が進められており，デュアルインバータの直流電圧を固定とした場合のマルチレベル化⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾や，片方のインバータの直流電圧の可変方法などが検討されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

一方，これまで著者らは，絶縁された直流電源をそれぞれの2レベルインバータの直流リンクに持つオープン巻線モータ駆動システムに対して，低負荷運転時における固定子巻線電圧波形改善方法を提案している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。文献(9)では，異なる直流電圧を持つ二つのインバータを同相でスイッチングさせるスイッチングパターンを提案し，相電圧波高値を低減できることをシミュレーションにより確認している。文献(10)及び(11)では，(9)で示した相電圧波高値低減方法の実験検証を行っており，相電圧波形に含まれるスイッチング周波数成分の高調波低減を確認している。また，直流

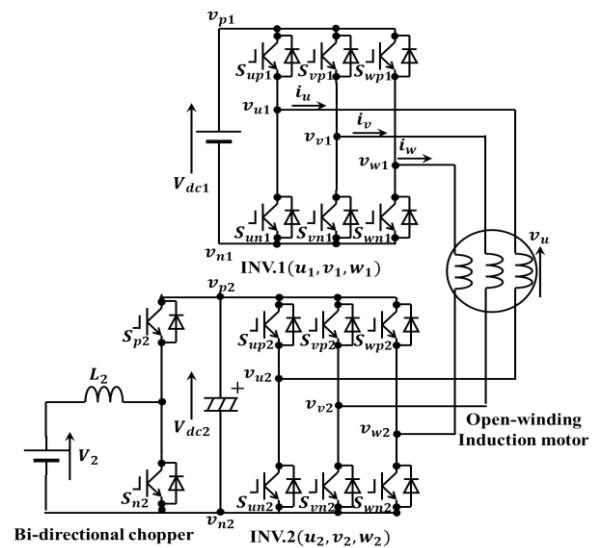


Fig. 1. The configuration of dual inverter fed open-winding induction motor drive.

電圧を一定としたシングルインバータを低変調率で駆動した場合と比較して，モータ損失の低減を確認している。しかし，最もモータ損失を低減できる条件(直流電圧，負荷等)については明らかにしていない。

そこで本稿では，インバータの過変調領域も含めた場合のモータ損失の低減効果について検討する。直流リンク電圧 90V のシングルインバータと比較して，提案するデュアルインバータ制御法によってモータ損失が低減できることを示す。

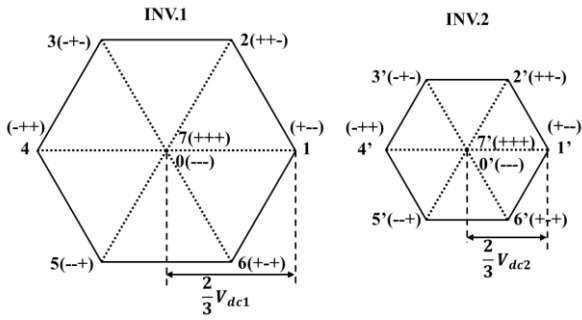


Fig. 2 Space voltage vectors of INV.1 and INV.2

2. デュアルインバータの波形改善法

〈2.1〉 オープン巻線誘導機の回路構成 Fig. 1 に 2 レベルインバータ 2 つ(INV.1, INV.2)を用いたオープン巻線誘導機駆動回路を示す。 $v_{u1} \sim v_{w1}$, $v_{u2} \sim v_{w2}$ はそれぞれのインバータの出力相電圧を示し、 $i_u \sim i_w$ は巻線の相電流を示す。デュアルインバータでは、二つのインバータの出力電圧の差が巻線に印加される。本提案法において、INV.1 の直流リンク電圧 V_{dc1} は固定、INV.2 の直流リンク電圧 V_{dc2} は可変できる構成として検討する。

〈2.2〉 提案する空間ベクトル変調法 Fig. 2 に $V_{dc1} > V_{dc2}$ の場合の INV.1, INV.2 の個々の空間ベクトルを示す。本稿において INV.1 と INV.2 のそれぞれのスイッチングパターンは 0, 1, 2, ..., 7 及び 0', 1', 2', ..., 7' と表記して、括弧内は U, V, W 相のスイッチング状態を示す。「+」は上アームスイッチが ON, 「-」は下アームスイッチが ON である状態を示す。デュアルインバータの場合、出力可能な合成空間ベクトルは、INV.1 の空間ベクトルの各頂点を中心として INV.2 の空間ベクトルを重ねた形となる。直流リンク電圧比 $V_{dc1}:V_{dc2} = 2:1$ の場合、デュアルインバータの合成空間ベクトルは Fig. 3 のようになり、出力可能なベクトル数が増え、スイッチングパターンの自由度が増加する⁽⁴⁾。

提案法は低変調時について検討しており、電圧ベクトルは(00', 11', 22', 33', 44', 55', 66', 77')を使用する。これより、モータ固定子巻線に印加される電圧の波高値は $2(V_{dc1} - V_{dc2})/3[V]$ と低くできる。すなわち、提案法では $V_{dc1} - V_{dc2}[V]$ の直流リンク電圧を持つシングルインバータと同等の電圧を出力可能である。 V_{dc2} はモータ動作に応じて制御できるため、モータが低負荷領域で動作するとき、 V_{dc2} を適宜変化させることで、巻線に印加する電圧の波高値を低くできる。

〈2.3〉 提案法におけるスイッチングパターン Fig. 5 にデュアルインバータの 1 相分の簡易等価回路を示す。提案法では各相のスイッチを同相でスイッチングさせるため、4 つのスイッチング素子($S_{p1}, S_{n1}, S_{p2}, S_{n2}$)が OFF となるデッドタイムは電圧誤差の原因となり好ましくない⁽⁹⁾。そこで、各相電流の向きを検出して Fig. 6 に示す INV.1 と INV.2 の各レグのデッドタイムが入るタイミングをずらすことで、デッドタイム中においても差の電圧を出力できる⁽¹²⁾。

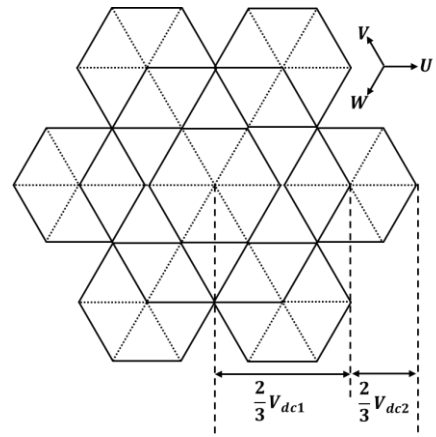


Fig. 3 Space vector combinations of the dual inverter.

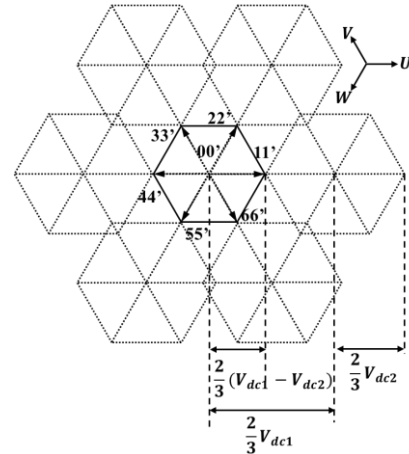


Fig. 4 Output voltage vectors of the proposed method.

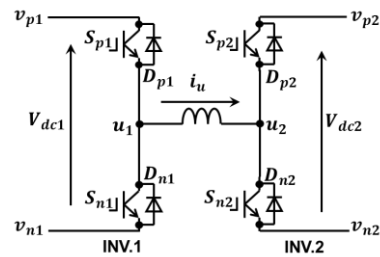


Fig. 5 Simplified U-phase circuit of the dual inverter.

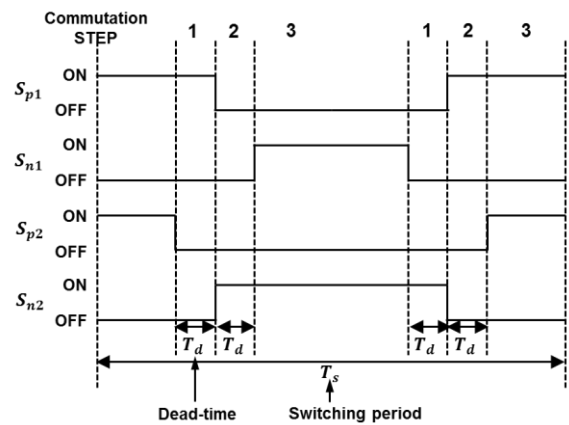


Fig. 6 An example of switching sequence when the current direction is positive.

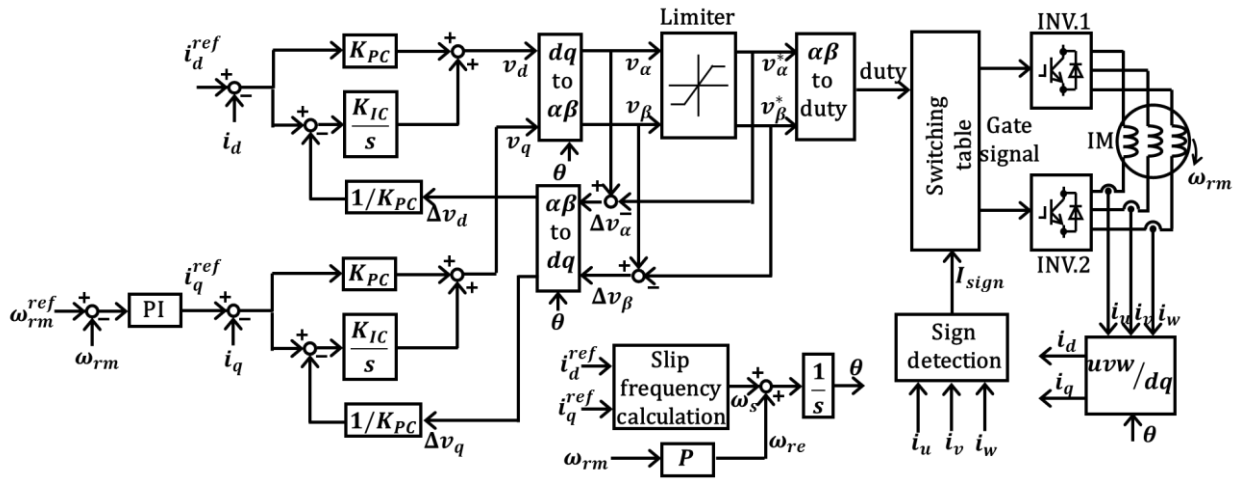


Fig. 7 Control diagram of the dual inverter based on slip frequency type vector control.

3. 実機検証

〈3・1〉 実験条件及び制御ブロック Fig. 7 に制御ブロック図を示す。速度制御及び電流制御はすべり周波数ベクトル制御を用いている。本稿では、インバータの過変調領域も含めた検証を行うため、電圧飽和量をフィードバックし、電流制御の積分演算の不安定化の対策⁽¹³⁾を行っている。Table 1 に実験条件、Table 2 にオープン巻線誘導機のモータパラメータを示す。本提案法を適用することにより、どのような条件でモータ損失を低減できるのか確認する。INV.1 の直流電圧 $V_{dc1} = 180V$ 、負荷トルク $T_L = 0.48Nm$ 固定として INV.2 直流電圧 V_{dc2} を変化させてモータ損失の測定を行った。このとき、速度は 300rpm, 200rpm, 100rpm の 3 つの条件で一定速度制御させ、キャリア周波数は 10kHz、デットタイムは 2us とした。

〈3・2〉 実験結果 Fig. 8 に、上記の条件で、INV.2 直流電圧 V_{dc2} を変化させて測定した、モータ損失と直流電圧差 ($V_{dc1} - V_{dc2}$) の特性を示す。直流電圧差が小さくなるほどモータ損失は減少し、300rpm の場合は 45V, 200rpm は 40V, 100rpm は 38V で最小となるのがわかる。また、直流電圧 90V のシングルインバータと比較し、300rpm 時は約 0.3W, 100rpm 時は約 0.2W 改善できることを確認した。Fig. 9 に、直流電圧 90V でシングルインバータを駆動した場合、直流電圧差 35V でデュアルインバータを駆動した場合の相電圧波形を示す。Fig. 10 に、Fig. 9 で示した相電圧波形の高調波解析結果を示す。Fig. 10 から、キャリア周波数 10kHz 成分が 8.38V から 3.42V に低減できており、このことから Fig. 8 でモータ損失が低減できていると考える。また、直流電圧差をより小さくした場合に損失が増加するのは、インバータの過変調動作により低次高調波が増加し、キャリア周波数成分の低減より低次高調波の影響が大きくなるためであると考えられる。

Table 1 Experimental condition.

| Drive Method | Dual inverter |
|-----------------------------|------------------------|
| INV.1 DC Voltage: V_{dc1} | 180V |
| INV.2 DC Voltage: V_{dc2} | 90V~27.5V |
| Rotor speed: N | 300rpm, 200rpm, 100rpm |
| Torque: T | 0.48Nm |
| Frequency: f | 50Hz |
| Carrier Frequency: f_c | 10kHz |
| Dead time: T_d | 2us |

Table 2 Parameters of the open-winding induction motor.

| | | | |
|-------------------|-------|--------------------|-----------------------|
| Rated power | 750W | Poles | 4 |
| Rated voltage | 200V | Rated frequency | 50Hz |
| Rated current | 3.5A | Rated speed | 1410min ⁻¹ |
| Stator resistance | 2.74Ω | Leakage inductance | 10.5mH |
| Rotor resistance | 2.08Ω | Mutual inductance | 0.195H |

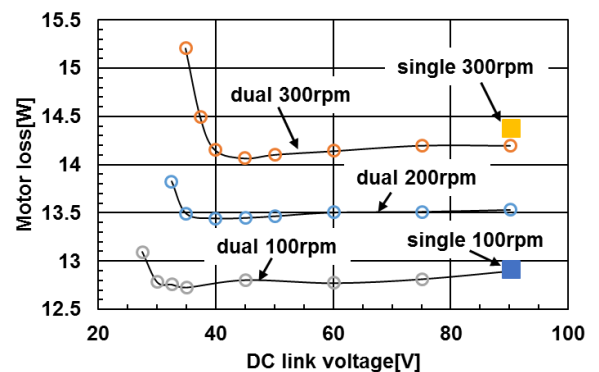


Fig. 8 Motor loss – DC link voltage characteristic.

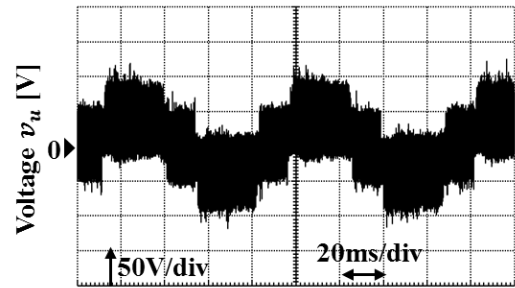
4. おわりに

これまで著者らが提案しているオープン巻線誘導機における低速運転時の巻線電圧波形改善法について、モータ損失を低減できる条件(直流電圧, 負荷等)を明らかにするため、負荷トルクを一定とし、直流電圧差を変化させた実験を行った。実験結果より、高変調率でのモータ損失が低減できることを確認し 300rpm 回転時に約 0.3W モータ損失が低減できることを確認した。また、キャリア周波数成分の高調波低減を確認し、スイッチング周波数の 10kHz 成分が 8.38V から 3.42V に低減できることを確認した。

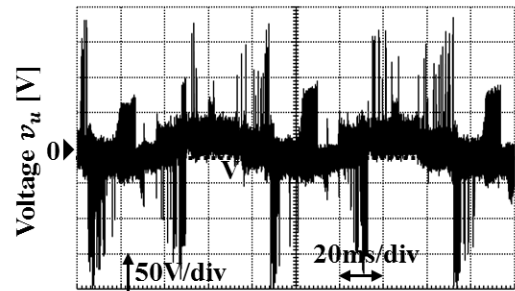
今後は、提案法のスイッチングの際に発生する誤差電圧を低減する検討及び、変調率とモータ損失の関係について検証を行う。

文 献

- (1) Akira Nabae, Isao Takahashi, and Hirofumi Akagi, "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter", IEEE Trans I.A., Vol.17, No.5 pp.518-523, 1981
- (2) M. Morimoto, K. Sumito, S. Sato, K. Oshitani, M. Ishida, S. Okuma, "High efficiency, unity power factor VVVF drive system of an induction motor," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 6, no. 3, pp. 498-503, 1991
- (3) 森本雅之, 押谷克己, 佐藤進司, 角藤清隆:「磁束制御形 PWM における電圧制御率と出力電圧」, 電気学会論文誌 D, Vol.110, No.12, pp.1266-1272 (1990)
- (4) K.A. Corzine, S.D. Sudhoff and C.A. Whitcomb, "Performance Characteristics of a Cascaded Two-Level Converter", IEEE Trans. E.C., Vol.14, No.3, pp.433-439 (1999)
- (5) Yoshitaka Kawabata, Motoshi Nasu, Takuya Nomoto, Emenike C.Ejiogu, and Takao Kawabata, "High-Efficiency and Low Acoustic Noise Drive System Using Open-Winding AC Motor and Two Space-Vector-Modulated Inverters", IEEE Trans. I.E., Vol.49, No.4, pp.783-789 (2002)
- (6) 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 半導体電力変換研究会資料, Vol.SPC-15-042 (2015)
- (7) 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)
- (8) 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, Vol.135, No.1, pp.10-18 (2015)
- (9) 水越彰仁, 芳賀仁:「デュアルインバータ駆動オープン巻線誘導機の低変調率時における電圧波形改善法」, 電気学会産業応用部門大会, 3-51 (2017)
- (10) 水越彰仁, 芳賀仁:「デュアルインバータ駆動オープン巻線誘導機の低変調率時における電圧波形改善と実験検証」, 電気学会全国大会, 5-103 (2018)
- (11) 水越彰仁, 芳賀仁:「デュアルインバータの低変調率時における出力電圧波形改善法」平成 29 年電気学会東京支部新潟支所大会,NGT-17-410, (2017)
- (12) Shajjad Chowdhury, Patrick W. Wheeler, Chintan Patel, and Chris Gerada, "A Multilevel Converter With a Floating Bridge for Open-End Winding Motor Drive Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 9, pp. 5366-5375, 2016
- (13) 江頭洋一, 大石潔:「電圧飽和を考慮した PM モータの速度制御の一手法」, 電気学会論文誌 D, Vol. 126, No. 2, pp. 206-207 (2006).

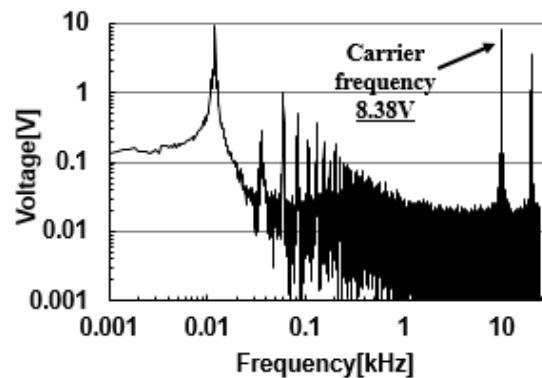


(a)

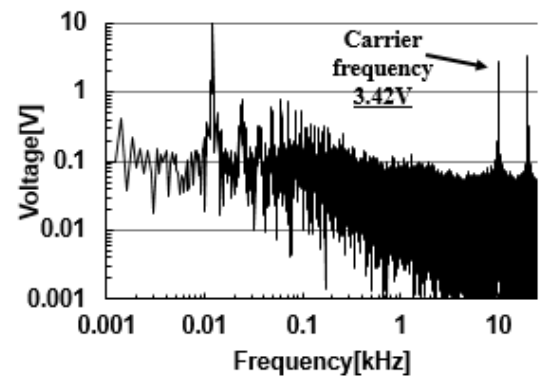


(b)

Fig. 9 Waveforms of phase voltage (a) single inverter with 90V at DC link, (b) dual inverter with 35V at DC link.



(a)



(b)

Fig. 10 Harmonics analysis of phase voltage (a) single inverter with 90V at DC link, (b) dual inverter with 35V at DC link.