

デュアルインバータシステムにおける 同相同時スイッチング動作の補償法

大音 慶明*, 野口 季彦 (静岡大学), 笹谷 卓也 (株式会社デンソー)

Compensation of Simultaneous Same Phase Switching Operation in Dual Inverter System

Yoshiaki Ohto, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University), Takanari Sasaya (Denso Corporation)

1. はじめに

近年、ハイブリッド車の二酸化炭素排出量低減を目的とした燃費向上や自動運転技術に注目が集まっている。しかし、現行のハイブリッド車の多くは双方向チョップによりバッテリー電圧を昇圧して2レベルインバータを動作させ、高電圧 PM モータを駆動する構成である。そのため、モータの巻線間に形成される電圧波形は3レベルになりマルチレベルに対して dv/dt が大きく、THD や伝導ノイズ・放射ノイズの点で不利である。また、昇圧チョップとインバータのうち一方でも故障すると、モータが駆動できなくなりフェールセーフの点でも問題がある。そこで、筆者らはバッテリーとキャパシタを直流バスにもつデュアルインバータ方式を検討してきた。

本方式では、巻線間にマルチレベルの電圧波形を形成でき、またフェールセーフの点でも有利である。ただし、直流バスのキャパシタ電圧を一定に制御しながら、モータの巻線間にマルチレベル波形を形成しなければならない。また、キャパシタを充電するスイッチングシーケンスには左右のインバータの同相を同時オン、同時オフするシーケンスが含まれる。これまでの検討により、キャパシタ充電シーケンスのデッドタイム期間中に誤差電圧ベクトルが発生しマルチレベル波形形成に悪影響を及ぼすことがわかった⁽¹⁾。この対策として両インバータのデッドタイムを同時ではなく順番に挿入する方法が紹介されている⁽²⁾。しかし、この方法では IGBT のターンオン、ターンオフ時間の差やダイオードのリカバリー回復時間が考慮されておらず、依然として誤差電圧が発生する可能性がある⁽³⁾。そこで本稿では、ある相電流の範囲において同時スイッチング時のスイッチング時間の差を測定し、この誤差を補償したときの効果を実機検証によって確認したので報告する。

2. 回路構成

Fig. 1 にオープンエンド巻線モータを駆動するデュアルインバータ方式を示す。検討回路では、左側のインバータを INV1、右側のインバータを INV2 と呼び、INV2 の直流バスのバッテリーをキャパシタに置き換えている。デュアルインバータが出力可能な電圧ベクトルには冗長性があり、

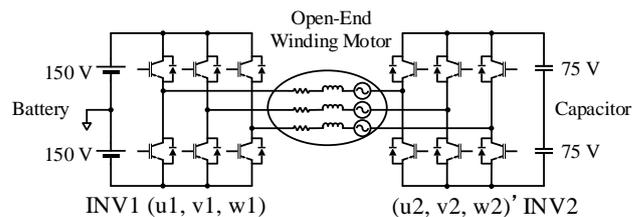


Fig. 1. Open-end winding motor drive with dual inverter.

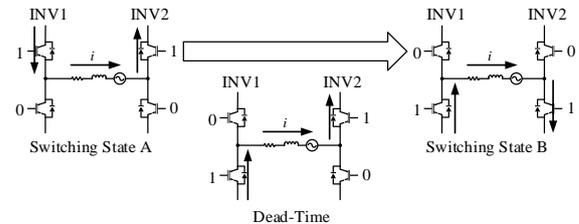


Fig. 2. Error voltage vector generated during dead time in simultaneous switching of same phase.

Table 1. Generation of dead time eliminating error vectors.

| State | INV1 | | INV2 | | Phase Voltage |
|-------|------|----|------|----|-------------------|
| | Up | Un | Up | Un | |
| #1 | 1 | 0 | 1 | 0 | $V_{dc1}-V_{dc2}$ |
| #2 | 1 | 0 | 0 | 0 | $V_{dc1}-V_{dc2}$ |
| #3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| #4 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |

特定の電圧ベクトルを異なる複数のスイッチングモードで出力できる。したがって、INV2 のキャパシタを適切に充放電するモードを選択することで、モータにマルチレベル電圧波形を形成しつつ INV2 のキャパシタ電圧を一定に制御することが可能になる。本論文では、スイッチング状態を $(u1, v1, w1)$ $(u2, v2, w2)$ と表し、各legを相補的にスイッチングさせる。このとき、各相の上アームが ON している状態を 1、OFF している状態を 0 と表す。

3. デッドタイム期間中の誤差電圧ベクトル

キャパシタ充電シーケンスでは、両方のインバータの同相を同時オン、オフするシーケンスが含まれる。例えば、Fig. 2 に示すように両インバータの上アームがオンしている状態 A から両インバータの下アームがオンしている状態 B へスイッチングする場合を考える。このとき、デッドタイム期間中のスイッチングモードは電流方向によって決定されるため、一方のインバータは「1」、他方のインバータ

は「0」となり意図しない誤差電圧ベクトルが発生する。この対策として、Table 1 に示すように両インバータのデッドタイムを順番に挿入する方法がある。Table 1 では、両インバータの上アームがオンしている状態#1 の後、電流が流れ込む側のインバータにデッドタイムを生成する(状態#2)。このとき、デッドタイム期間中のレグは上アームのダイオードによってオンするためインバータは「1」を維持する。そして、状態#2 のデッドタイム終了と同時に他方のインバータのデッドタイムを開始する(状態#3)。このとき、先にデッドタイムを終えたレグは「0」になっており、デッドタイム期間中のレグは下アームのダイオードでオンするためインバータは「0」になる。このようにして左右のインバータのデッドタイムを順に生成することで、デッドタイム期間中に誤差電圧を発生させることなくデュアルインバータの同時スイッチングが可能になる(状態#4)。しかし、Fig. 3 に示すように状態#2 から状態#3 へ切り換わる際に生じるわずかなスイッチング素子の切り換え時間差によって誤差電圧はなお生じる。

4. 実機検証結果

実機検証では、1 kW のテストモータを 300 r/min で回転させ、これを 5 kW のインバータ 2 台で制御する。INV1 のバッテリー電圧を 300 V、INV2 のキャパシタ電圧指令値を 150 ± 5 V とし、同時スイッチングが頻繁に行われる低変調率時のキャパシタ充電モードに注目し、U 相電流が $-2 \sim 2$ A の範囲で U 相のスイッチングの切り換え時間差を測定した結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 は両インバータの同相が同時オン、同時オフする場合の INV1 に対する INV2 のスイッチングの遅れを縦軸にとり、相電流を横軸としている。また、相電流は INV1 から INV2 へ向かう方向を正としている。

例えば、Table 1 に示した同時スイッチングは、Fig. 4 中の相電流が正のときの同時オフにあたる。ここで、Table 1 の状態#2 と状態#3 の切り換えを考えると、INV1 の IGBT のターンオフ時間を toff1 、INV2 の IGBT のターンオン時間を ton2 、リカバリー回復時間を trr2 とおく。INV1 では IGBT がオフした後にダイオードがオンし、INV2 ではダイオードがオフした後に IGBT がオンする。したがって、相電流ノルムが大きいときはダイオードのリカバリー回復時間も長くなるため、 $\text{toff1} < \text{trr2} + \text{ton2}$ となり INV1 のスイッチング時間は INV2 より短くなる。また、相電流ノルムが小さいときはリカバリー回復時間が短いため $\text{toff1} > \text{trr2} + \text{ton2}$ となり、INV1 のスイッチング時間が INV2 よりも長くなると考えられる。

従来法と補償を施した提案法について、モータ巻線間に形成される電圧波形を Fig. 5 に示す。同時スイッチングが頻繁に行われるキャパシタ充電モードを見ると、提案法ではデッドタイム期間中の誤差電圧ベクトルを回避することができており、巻線間に形成される電圧波形の dV/dt を約

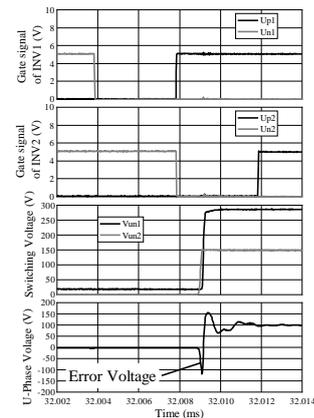


Fig. 3. Error voltage vector during dead time with conventional method.

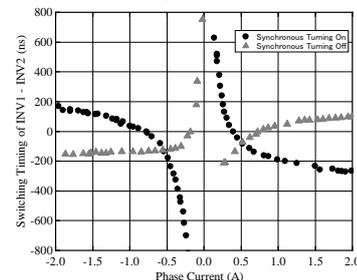
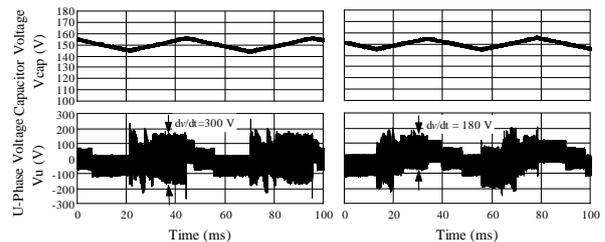


Fig. 4. Current dependency of switching timing.



(a) Conventional method. (b) Proposed method.

Fig. 5. Experimental results.

60%低減することができた。しかし、依然として電圧波形形成には問題があり、これは共振によるものだと考えている。

5. まとめ

デュアルインバータの同時スイッチング時に必要なデッドタイム挿入法に対して補償が必要であることを示し、本補償法によってモータ巻線間に形成される電圧波形の dV/dt が約 60%低減することを実験的に明らかにした。

文献

- (1) 大音・野口・笹谷:「オープンエンド巻線 PM モータを駆動するデュアルインバータの空間ベクトル変調」電気学会研究会資料 MG/MD/LD 合同研究会, pp. 23-28 (2017)
- (2) 水越・芳賀:「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」平成 29 年電気学会産業応用部門大会論文集, no. 3-51, pp. 257-260 (2017)
- (3) 陳・飯嶋・磯部・只野・川波・寺園:「Dual Active Bridge コンバータのデッドタイム最適化に関する実験的検討」電気学会全国大会論文集, no. 4-107 (2016)