

デュアルインバータモータドライブにおける 直流バスバッテリー解列時のフェールセーフ動作

大音 慶明*, Melinda Badriatul Fauziah, 野口 季彦 (静岡大学)

Fault Tolerant Operation on Disconnection of DC-Bus Power Source in Dual Inverter Motor Drive

Yoshiaki Oto*, Melinda Badriatul Fauziah, and Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

The dual inverter motor drive feeding an open-end winding PM motor has been studied for mileage improvement and autopilot technologies of hybrid and electric vehicles. Fault tolerant functions are required for the autopilot operations, which can achieve to keep driving the motor even if some failure occurs in the autopilot systems. The authors have studied the dual inverter drive system, where the both inverters have a battery and a capacitor in parallel across each DC-bus, and its fault tolerant function of the DC-bus power source. The dual inverter drive system can achieve ceaseless drive of the motor, even if one of the DC-bus battery power sources is failed, by controlling the capacitor voltage of the failure-side inverter constantly with the space vector modulation (SVM). In this paper, the switching over technique to the fault tolerant function of the DC-bus battery in the dual inverter drive system is proposed, and the proposed technique is examined through several computer simulations.

キーワード : フェールセーフ動作, デュアルインバータモータドライブ, オープン巻線モータ, キャパシタ電圧制御, 空間ベクトル変調

Keywords : fault tolerant operation, dual inverter motor drive, open-end winding motor, capacitor voltage control, space vector modulation

1. はじめに

近年, ハイブリッド車の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パによってバッテリー電圧を昇圧し, 2 レベルインバータを動作させ高電圧モータを駆動する構成のため, システムの効率向上やフェールセーフ動作の点で課題がある。そこで, オープン巻線をもつモータを 2 台のインバータで駆動するデュアルインバータモータドライブが研究されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。デュアルインバータモータドライブでは, 必要なインバータや直流バス電源の数が増える一方で, 2 台のインバータの出力電圧の和をモータ巻線に印加できるので昇圧回路が必要なく, また, マルチレベルの電圧波形を巻線両端に形成できるためシステムの効率向上を期待できる。さらに, 片側のインバータのスイッチング素子や直流バス電源が故障した場合でも, 他方の正常なインバータによってモータを継続運転できるのでフェールセーフの点でも有利である。

これまで, デュアルインバータモータドライブにおけるスイッチング素子の故障に対するフェールセーフ動作は研

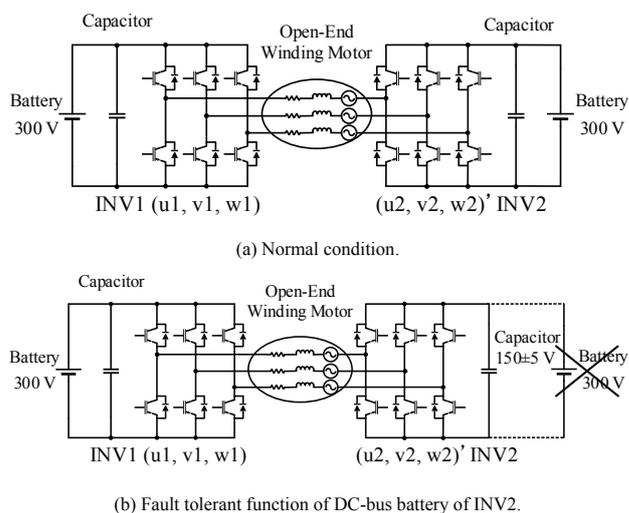


Fig. 1. Circuit configuration of studied dual inverter motor drive.

究されてきたが⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 直流バス電源の故障に対するフェールセーフ動作の検討はされていない。そこで筆者らは, これまでデュアルインバータの片側直流バスバッテリーが解列した際のフェールセーフ動作について検討してきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。本論文では, デュアルインバータモータドライブにおいて片

側直流バスバッテリーが解列したときに、フェールセーフ動作へスムーズに移行する手法を提案する。また、提案法の動作をシミュレーションにより確認したので報告する。

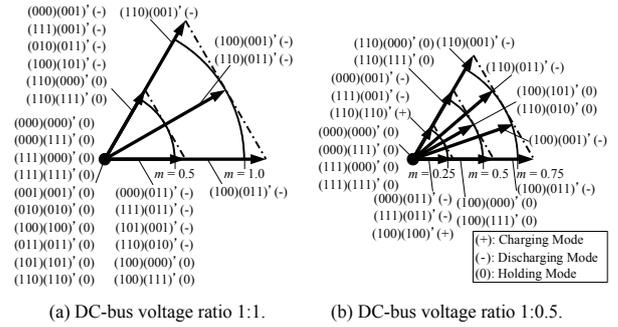
2. 回路構成

本論文で検討するデュアルインバータモータドライブの回路構成を Fig. 1 (a)に示す。本論文では、Fig. 1 (a)に示すように左側のインバータを INV1, 右側のインバータを INV2 と呼び、両インバータの直流バスにはバッテリーとキャパシタが並列に接続されている。そして、インバータの各レグは相補的にスイッチングされ、スイッチング状態は $(u1,v1,w1) (u2,v2,w2)'$ と表す。また、本論文では Fig. 1 (b) に示すように INV2 の直流バスバッテリーが解列した際のフェールセーフ動作を検討する。検討するフェールセーフ回路では、INV2 は解列したバッテリーの代わりにキャパシタによって動作する。ただし、このときデュアルインバータモータドライブは、モータ巻線にマルチレベルの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必要がある。

デュアルインバータモータドライブでは、2 台のインバータの出力電圧の和をモータの巻線両端に印加できる。ここで、デュアルインバータが出力可能な電圧ベクトルのうち 0 度から 60 度を抜き出したものを Fig. 2 に示す。Fig. 2 に示すようにデュアルインバータモータドライブのスイッチング状態は冗長性をもつので、特定の電圧ベクトルを複数の異なるスイッチング状態で出力できる。また、冗長なスイッチング状態毎にキャパシタを流れる電流方向が変化するためキャパシタの充放電を制御できる。ただし、Fig. 2 に示すように、両インバータの直流バス電圧比が 1 : 1 の場合は、ある電圧ベクトルを出力する冗長なスイッチング状態の中でキャパシタ充電モードと放電モードを冗長に切り換えることができないため、直流バス電圧比は 1 : 0.5 を採用している。また、図中には変調率の定義を示しており、本論文では検討するデュアルインバータモータドライブが正常動作時に出力する回転ベクトルの振幅が最大となる場合を変調率 $m = 1.0$ と定義している。

3. キャパシタ電圧一定制御法

検討するデュアルインバータモータドライブのフェールセーフ回路では、直流バスバッテリーが解列したインバータはキャパシタだけで動作するため、そのキャパシタ電圧を一定に制御しつつモータ巻線にマルチレベルの電圧波形を形成しなければならない。前述のようにデュアルインバータモータドライブのスイッチング状態には冗長性があるので、故障側のインバータのキャパシタ電圧をもう一方の正常なインバータのバッテリー電圧の半分に制御することで、特定の電圧ベクトルを出力する冗長なスイッチング状態の中でキャパシタ充電モードと放電モードを冗長に切り換えることができる。したがって、フェールセーフ回路の制御にはスイッチングシーケンスを自由に決定可能な空間



(a) DC-bus voltage ratio 1:1. (b) DC-bus voltage ratio 1:0.5.

Fig. 2. Relationship between capacitor charging or discharging modes and switching states enlarged from 0 to 60 degree.

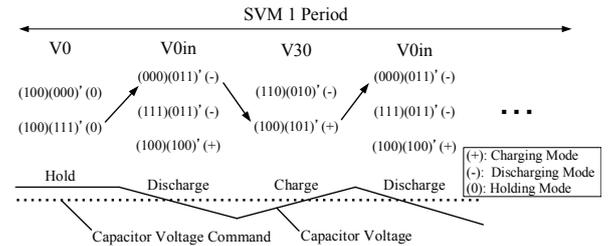


Fig. 3. Simultaneous control of multilevel voltage waveform generation and capacitor voltage of failure-side inverter.

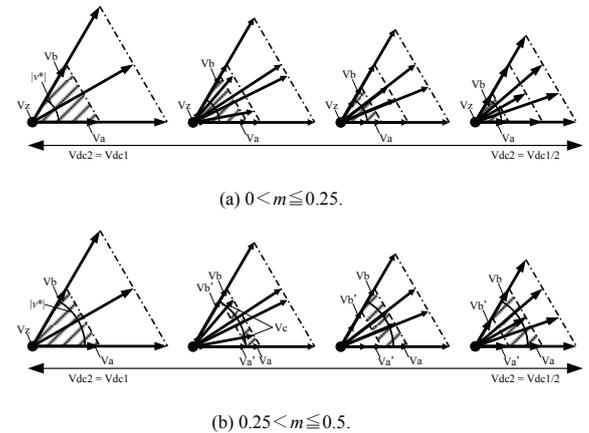


Fig. 4. Proposed switching over technique to fault tolerant operation.

ベクトル変調法 (SVM) を採用し、Fig. 3 に示すように特定の電圧ベクトルを出力する際、冗長なスイッチング状態の中から適切にキャパシタを充放電するものを選択することで、マルチレベル電圧波形形成とキャパシタ電圧一定制御を両立している。ただし、スイッチング状態とキャパシタの充放電モードの関係はモータの瞬時力率によっても変化するため、モータの瞬時力率を考慮してスイッチング状態を選択しなければならない⁽⁷⁾。

4. フェールセーフ動作への移行法

検討するデュアルインバータモータドライブは、正常動作時はより振幅の大きな電圧ベクトルをモータに出力するために 2 台のインバータが直流バス電圧比 1:1 で動作する。一方でフェールセーフ動作では、バッテリーが解列した側

のインバータキャパシタ電圧を、他方の正常なインバータのバッテリー電圧の半分に制御する。したがってバッテリー一解列後には、モータへの電圧波形形成を継続しつつ故障側のキャパシタの電圧を非故障側のバッテリー電圧の半分まで放電させスムーズにフェールセーフ動作に移行する必要がある。

本論文では、Fig. 4 に示すように2通りの変調率(a) $0 < m \leq 0.25$, (b) $0.25 < m \leq 0.5$ についてフェールセーフ動作への移行法を検討する。デュアルインバータモータドライブが変調率 $0 < m \leq 0.25$ で駆動時にフェールセーフ動作に移行する場合は、振幅がゼロのゼロベクトル V_z と INV2 のキャパシタ電圧によって振幅が変化する電圧ベクトル V_a, V_b を用いて SVM することでフェールセーフ動作に移行することができる。また、変調率 $0.25 < m \leq 0.5$ ではゼロベクトル V_z を用いず、キャパシタ電圧によって振幅が変化する電圧ベクトル V_a, V_a', V_b, V_b' と振幅と位相が変化する電圧ベクトル V_c を用いて SVM を行う。このように SVM に用いる電圧ベクトルを選択することで、マルチレベルの電圧波形形成をしつつキャパシタ電圧を目標値まで放電しスムーズにフェールセーフ動作に移行できる。

5. シミュレーション条件

提案法によってデュアルインバータモータドライブを正

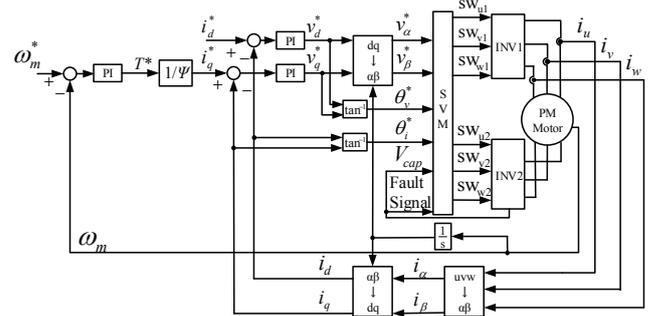
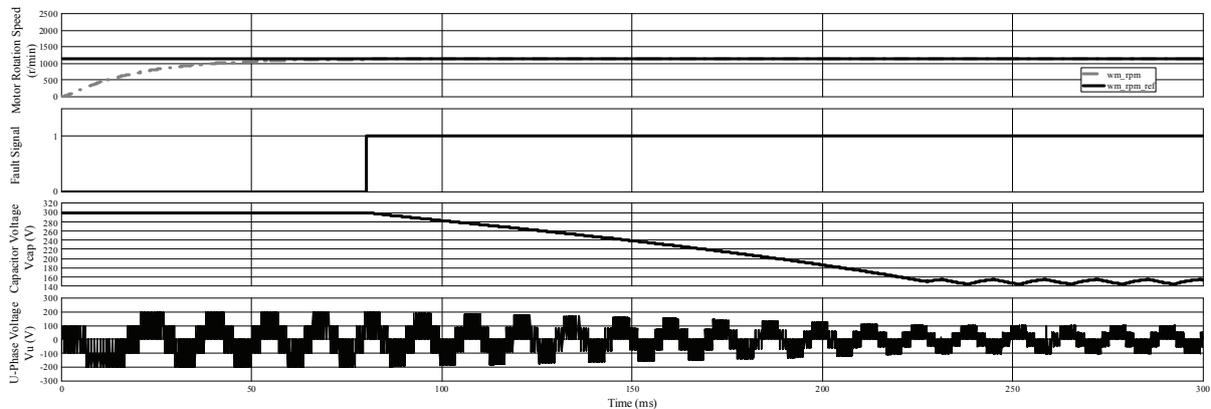


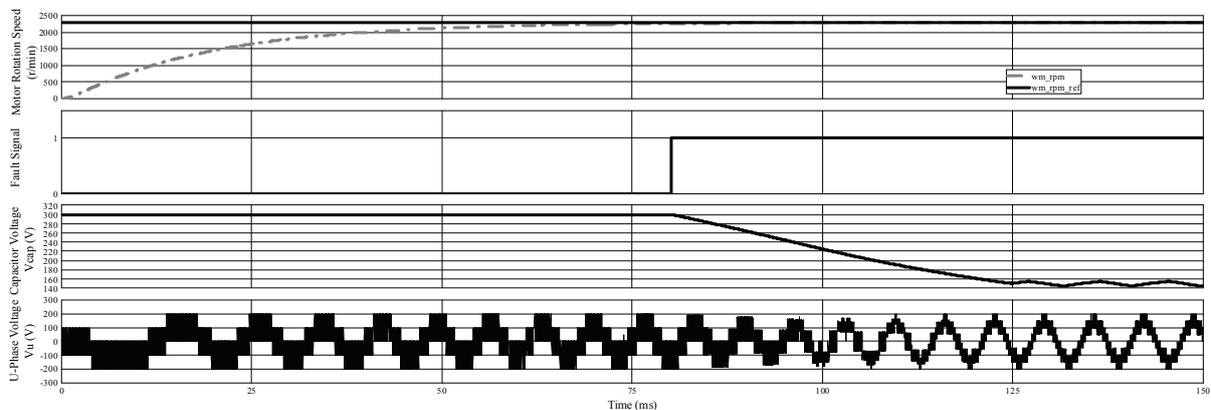
Fig. 5. Control block diagram.

Table 1. Computer simulation conditions.

Switching frequency		10 kHz
Voltage of battery		300 V
Voltage command of capacitor (INV2)		150 ± 5 V
Capacitance of capacitor (INV2)		330 μF
Motor speed command value		1150, 2300 r/min
Dead time		0 μs
Motor parameters	Number of poles	8
	Number of flux linkage	0.174 Wb
	Moment of inertia	0.00173 kgm ²
	Damping coefficient	0.005 N/rad/s
	Phase resistance	1.1 Ω
Phase inductance		5 mH



(a) $m = 0.2$ (1150 r/min).



(b) $m = 0.4$ (2300 r/min).

Fig. 6. Simulation results.

常動作からフェールセーフ動作に移行させるシミュレーションを行った。制御ブロック図を Fig. 5, シミュレーション条件を Table 1 に示す。シミュレーションでは, オープン巻線をもつモータをモデル化したものをデュアルインバータモータドライブによって速度制御および電流制御する。正常動作時は両インバータは 300 V のバッテリーによって駆動されている。そして, INV2 の直流バスバッテリー解列信号 Fault Signal を検出後, INV2 は解列したバッテリーの代わりにキャパシタで駆動し, キャパシタ電圧が INV1 のバッテリー電圧の半分の 150 V になるまで提案法によって放電する。キャパシタ電圧を 150 V まで放電した後は, キャパシタの充放電を制御することでキャパシタ電圧を一定に制御する。このとき, モータの瞬時力率は dq 座標上の電圧ベクトルと電流ベクトルの位相差から計算し, INV2 のキャパシタ電圧のフィードバック値とともに SVM に用い, モータへの電圧波形形成とキャパシタ電圧一定制御を同時に行う。

6. シミュレーション結果

変調率 $m = 0.2$ および $m = 0.4$ の条件でシミュレーションを行った結果を Fig. 6 (a) と (b) にそれぞれ示す。両図ともに, 上からモータ回転数, INV2 のバッテリー解列信号, キャパシタ電圧, U 相巻線両端電圧を表しており, 正常運転時はデュアルインバータモータドライブによってモータの巻線両端に 5 レベルの電圧波形が形成される。フェールセーフ動作時には, $m = 0.2$ の場合は 5 レベル, $m = 0.4$ の場合は 9 レベルの電圧波形がモータ巻線に形成される。また, フェールセーフ動作への移行期間は, Fig. 4 (a) に示したように, $m = 0.2$ のときは INV2 のキャパシタ電圧によって振幅が変化する電圧ベクトルとゼロベクトルを使用して INV2 のキャパシタを INV1 のバッテリー電圧の半分まで放電するため, Fig. 6 (a) に示したように U 相巻線両端電圧の振幅が徐々に小さくなる。一方で, Fig. 4 (b) に示したように, $m = 0.4$ のときは INV2 のキャパシタ電圧によって振幅と位相が変化する電圧ベクトルを使用して INV2 のキャパシタ電圧を INV1 のバッテリー電圧の半分まで放電する。Fig. 6 を見ると, どちらの変調率においても, 提案法によってモータの巻線両端にマルチレベル電圧波形を形成しつつキャパシタ電圧を目標値まで放電し, スムーズにフェールセーフ動作に移行できていることがわかる。

7. まとめ

本論文では, それぞれの直流バスにバッテリーとキャパシタをもつデュアルインバータモータドライブにおいて, 片側の直流バスバッテリーが解列した場合のフェールセーフ動作を検討した。フェールセーフ回路では, 故障側のインバータは解列したバッテリーの代わりにキャパシタで動作する。また, このとき故障側のインバータのキャパシタ電圧は他方の正常なインバータのバッテリー電圧の半分に制御する必要がある。本論文では, 片側直流バスバッテリーの解列からフェールセーフ動作へスムーズに移行する手

法を提案した。また, 提案法をシミュレーションした結果, 直流バスバッテリーが解列後, 提案法によってモータに電圧波形を形成しつつキャパシタ電圧を目標値まで放電し, フェールセーフ動作にスムーズに移行できることを確認した。今後は, デュアルインバータの直流バスバッテリー解列時のフェールセーフ動作への移行を実機検証する予定である。

文 献

- (1) K. Mitsudome, H. Haga, and S. Kondo, "Improvement of Output Voltage Waveform in Dual Inverter Having a Different DC Power Supply," IEEJ Technical Meeting on Rotating Machinery, Semiconductor Power Converter and Motor Drive, 2015, pp. 77-82.
- (2) H. Machiya, H. Haga, and S. Kondo, "High Efficiency Drive Method of an Open-Winding Induction Machine Driven by Dual Inverter using Capacitor Across DC Bus," IEEJ Transactions on Industry Applications, vol. 135, no. 1, 2015, pp. 10-18.
- (3) A. Mizukoshi, and H. Haga, "Control Method of Open-Winding Induction Machine for Improvement of Output Voltage at Low-Modulation Ratio," IEEJ Industry Applications Society Conference, 2017, 257-260.
- (4) K. K. Nallamekala, and K. Sivakumar, "A Fault-Tolerant Dual Three-Level Inverter Configuration for Multipole Induction Motor Drive With Reduced Torque Ripple," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 3, 2016, pp. 1450-1457.
- (5) W. Zhao, B. Wu, Q. Chen, and J. Zhu, "Fault-Tolerant Direct Thrust Force Control for a Dual Inverter Fed Open-End Winding Linear Vernier Permanent-Magnet Motor Using Improved SVPWM," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 9, 2018, pp. 7458-7467.
- (6) Y. Oto, T. Noguchi, T. Sasaya, T. Yamada, and R. Kazaoka, "Space Vector Modulation of Dual Inverter System Focusing on Improvement of Multilevel Voltage Waveforms," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Early Access.
- (7) Y. Ohto, T. Noguchi, and T. Sasaya, "Space Vector Modulation of Dual Inverter Taking Power Factor of Open-End Winding Motor," IEEJ Annual National Conference, 2016, 71-72.