

# 電気自動車用モータ回生中のインバータ停止に伴う 直流電圧上昇抑制法の実機検証

学生員 青木 渉\* 正員 ゴーテックチャン 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)  
正員 鳥羽 章夫 (富士電機株式会社)

## Experimental verification of suppression method for the rise of DC voltage during the stop of inverter while in the motor regeneration for Electric Vehicle

Wataru Aoki\*, Student Member, Goh Teck Chiang, Member, Jun-ichi Itoh, Member (Nagaoka University of Technology)  
Akio Toba, Member (Fuji Electric Co., Ltd.)

In the power conversion system of electric vehicles, the inverter is shut down when the system failure is detected in the cause of a drastic load change or protection reasons. However, in the case if the inverter is shut down during regeneration mode, the DC link capacitor voltage is increased dramatically, which will potentially break the inverter. In this paper, the authors propose a halt sequence to overcome the over voltage and over current problems in the case of system failure. The proposed method consists of two phases, in the phase I, the DC link capacitor voltage is controlled in charging and discharging modes on space vector modulation of the inverter. Then, the phase II performs a short circuit operation in order to avoid the regenerating current from the motor flows into DC link capacitor. The experimental results demonstrate that the DC link capacitor voltage can be suppressed to less than 80% of that comparing to conventional method.

キーワード：内部永久磁石同期電動機，電気自動車，短絡電流，直流リンク電圧変動  
(IPMSM, Electric vehicle, Short circuit current, DC-link voltage fluctuation)

### 1. はじめに

近年、CO<sub>2</sub>排出などの環境問題を背景にハイブリット自動車や電気自動車に注目が集まっている。電気自動車では、長寿命化の観点から、平滑コンデンサとして、電解コンデンサの代わりにフィルムコンデンサの採用が増えてきている。しかし、フィルムコンデンサでは静電容量が小さいことからインバータトリップ時に直流電圧が急激に増加する可能性がある。特にモータが回生中に緊急停止をすると、インバータを通じて直流コンデンサに回生電流が流れる。そのため、直流コンデンサ電圧が急激に上昇し、スイッチにかかる電圧が素子耐圧を超え、スイッチング素子を破壊する恐れがある。なお、トリップ時はバッテリーをインバータからリレーにより開裂するので、この電圧上昇を、バッテリーで吸収できない。また、接続していたとしても、内部インピーダンスが高いことや、過充電が問題となる。

この問題に対する従来の解決手段として、直流コンデンサにチョップ回路を並列に接続する方法がある<sup>(1)</sup>。これはダイナミックブレーキと呼ばれ、本手法は、直流コンデンサ電圧が閾値電圧を超えた際に、同装置内のスイッチをオン

にすることで、回生電力を装置内の抵抗で消費させる。しかしながら、回生電力をすべて消費させるためには大きな電力容量の抵抗を必要とすることから、ダイナミックブレーキ装置を電気自動車で用いることは、電力変換システムの大型化やコスト増大を招く。

そのため、ダイナミックブレーキ装置を小型化する手法として、制動抵抗と共通化する手法<sup>(2)</sup>や、直流電源の配線上に半導体スイッチを設けることで複数台インバータを使用する際、ダイナミックブレーキ装置を共通化する手法<sup>(3)</sup>が提案されている。しかしながら、いずれの手法も追加の素子を必要とするため、大幅な設置体積の減少には至っていない。

そこで本論文では、緊急停止時のインバータのトリップシーケンスを提案する。提案手法では、モータ電流と直交方向電圧を出力することにより、回生エネルギーを抑制する制御と、その後モータを短絡状態にし、電流がゼロクロスした相から順次遮断することで回生電力の発生を防ぎ、電流をゼロにする計二段階の制御を行う。この提案手法を用いることにより、インバータの制御のみで、直流コンデンサ電圧  $V_C$  の上昇と短絡電流を抑制しつつ、インバータを

緊急停止できるため、直流コンデンサとスイッチング素子の保護もできる。また、電力変換システムの小型化も可能である。

以上の提案手法の効果を実機実験により検証し、提案手法の有用性を確認したので報告する。

## 2. 提案手法

### 〈2・1〉 基本原理

図1に電気自動車のシステム構成図を示す<sup>(4)</sup>。本システムでは、モータに内部永久磁石同期電動機(IPMSM)を、電力変換器には2レベルインバータを使用する。また、インバータの直流側には小容量の直流コンデンサが接続され、さらにリレーを介してバッテリーが接続されている。

これまでに筆者らは、電圧上昇の問題解決のため、異常時のリレー切り離しと同時にモータを短絡状態にし、電流がゼロクロスした相から順次遮断することで回生電力の発生を防ぎ、電流をゼロにする方法を提案した<sup>(5)</sup>。しかし、この方法は短絡期間にモータに大きな電流が流れる問題がある。一般的にEV用モータは定格電流に対し最大電流が2.5~3.7 p.u.となるよう設計される<sup>(6-7)</sup>。そこで、短絡電流を約3.0 p.u.以下に抑制しつつ直流コンデンサ電圧上昇抑制を実現する手法を検討する。

図1に示すシステムにおいて、モータの回転運動で与えられる回生エネルギーの変化は(1)式にて表すことができる。

$$\Delta W_\theta = -\int T \frac{d\theta}{dt} dt \dots\dots\dots(1)$$

ここで $\theta$ はモータの回転角、 $T$ はIPMSMのトルクである。また、IPMSMの発生トルクは(2)式にて求められる。

$$T = P_n i_q \left\{ \sqrt{3} \Psi_e + (L_d - L_q) i_d \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $L_d$ 、 $L_q$ はd軸、q軸の固定子インダクタンス、 $i_d$ 、 $i_q$ はd軸、q軸電流、 $P_n$ は極対数、 $\Psi_e$ は永久磁石による電機子鎖交磁束の実効値である。

(1)式よりトルクがゼロなら回生エネルギーは変化しないことがわかる。また、(2)式よりq軸電流がゼロであれば発生トルクはゼロになる。以上より、q軸電流をできるだけ早くゼロにすることで回生エネルギーの増加を防ぎ、短絡電流を抑制することが可能である。

### 〈2・2〉 q軸電流ゼロ制御

本論文で提案する手法は、リレー開放後q軸電流をゼロに制御するフェーズ1と、q軸電流がゼロクロスした直後にモータを短絡するフェーズ2からなる。以下にその詳細を示す。

図2に提案手法フェーズ1でのモータ電流ベクトルと電圧指令ベクトルの関係を示す。フェーズ1ではq軸電流をゼロにし無効電流のみの状態にするために、電圧指令ベクトルをモータ電流ベクトルに対し90°進みにする必要がある。しかし、インバータの電圧指令ベクトルは60°刻みで変位するのに対し、モータ電流ベクトルは連続で変位する。

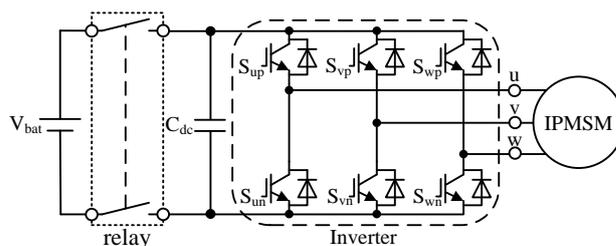


Fig.1 System configuration of adjustable speed drives with small capacitor in DC Link for EVs.

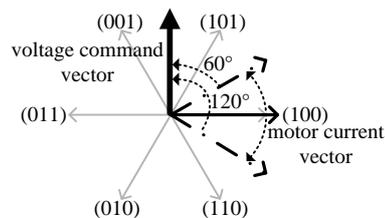


Fig.2 Relation between voltage command vector and vector of the motor current in phase I.

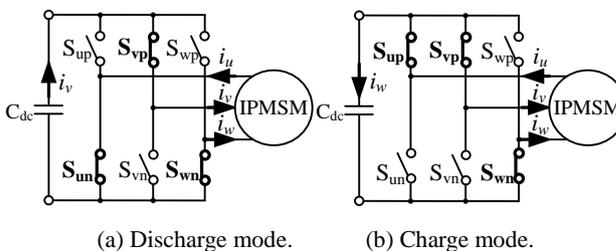


Fig.3 Operational modes in phase I.

そこで、電流位相を60°刻みに分割し、電圧指令ベクトルをモータ電流ベクトルに対し60°~120°進みになるよう制御する。その結果、90°進みに近い指令ベクトルとなり、電流を無効電流成分に変化させることで、q軸電流をゼロにすることが可能である。

しかし、瞬時にq軸電流をゼロにできるわけではない。そこで、無効電流を流しながら、DCリンクコンデンサを充電および放電するスイッチングパターンを交互に用いて、DCリンクコンデンサの電圧を制御する。

図3に提案手法フェーズ1でのインバータ等価回路を示す。図3(a)では正の方向で流れている相にコンデンサが接続され、V相電流 $i_v$ がコンデンサを放電する。一方図3(b)では負の方向で流れている相にコンデンサが接続され、W相電流 $i_w$ がコンデンサを充電する。以上2つのスイッチングパターンを交互に用い、直流コンデンサ電圧 $V_c$ の変化を抑制する。

表1にフェーズ1での電流ベクトルの領域に応じたスイッチングテーブルを示す。この時、表1に基づいてスイッチをオンおよびオフすることで、放電モードの指令ベクトルは電流ベクトルに対し30°~90°進みに、充電モードの指令ベクトルは電流ベクトルに対し90°~150°進みのベクトルになる。この二つの指令ベクトルを直流コンデンサ電圧 $V_c$ に応じて交互に切り替えることで、インバータ出力電圧ベクトルが電流ベクトルに対し60°~120°進みとなるよう制御

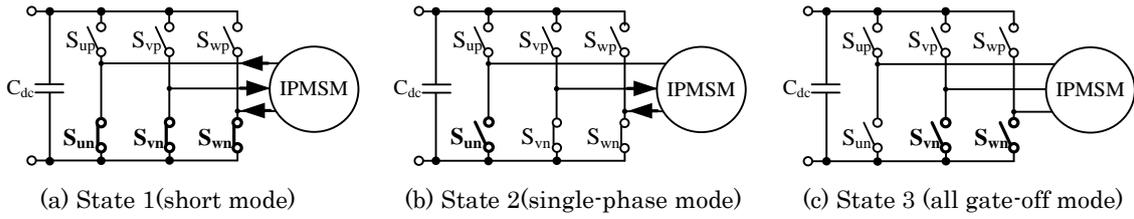


Fig.4 Operational modes in phase II of the proposed halt sequence control method

Table.1 Switching pattern at phase 1.

		Direction of current			State of switch of inverter					
		$i_u$	$i_v$	$i_w$	$S_{pu}$	$S_{pv}$	$S_{pw}$	$S_{nu}$	$S_{nv}$	$S_{nw}$
discharge time	+	-	-	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF
	+	-	+	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON
	-	-	+	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
	-	+	+	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON
	-	+	-	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF
	+	+	-	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF
charge time	+	-	-	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF
	+	-	+	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF
	-	-	+	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON
	-	+	+	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
	-	+	-	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON
	+	+	-	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF

する。

以上の動作により、短絡電流と直流コンデンサ電圧上昇をそれぞれ抑制することが可能である。

### (2.3) モータ短絡制御

図4に提案手法フェーズ2の動作モードを示す。まず、q軸電流が負から正へゼロクロスした際に、上アームもしくは下アームをすべてオンにする(図4(a))。その結果、モータは短絡状態になり、直流コンデンサにモータ電流は流入しない。次に、三相のうち一相の電流がゼロクロスした時に、同相のスイッチをオフにする(図4(b))。これにより、単相動作となり、固定子の磁界は回転磁界ではなく交番磁界となるので、回転方向のトルクは発生しない。最後に、残り二相の電流もゼロクロスした瞬間にそれぞれスイッチをオフにする(図4(c))。

以上の動作により、直流コンデンサの電圧を上昇させずにインバータを停止させることが可能となる。

## 3. 実験結果

提案手法の妥当性を確認するため、実機により検証する。

図5に実験システムの構成図を示す。また、表2に使用するIPMSMのパラメータを示す。本章で示す実験結果はいずれも、モータが回転速度 0.5 p.u.および定格電流で再生している状態で、トリップさせ、バッテリー-インバータ間のリレーを開放したときの動作波形である。また、直流コンデンサ  $C_{dc}$  は 100 $\mu$ F を用いている。

図6に電圧上昇抑制法を用いずにインバータ停止を行った時の各部の動作波形を示す。この実験ではリレーの開放と同時に q 軸電流指令値  $i_q^*=0$  を与えることでインバータに流れる電流をゼロにする。図6(a)より、直流コンデンサ電圧  $V_c$  はリレーを解放した瞬間に 110 V 以上上昇し、その後ダイナミックブレーキ装置が働き電圧上昇を抑えることが

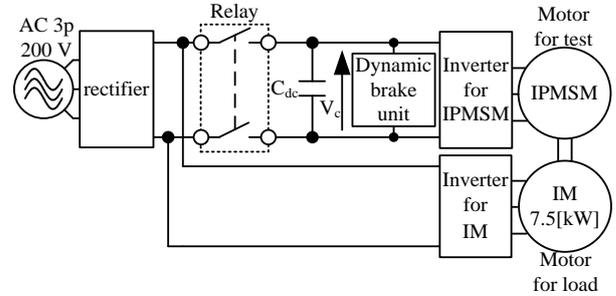
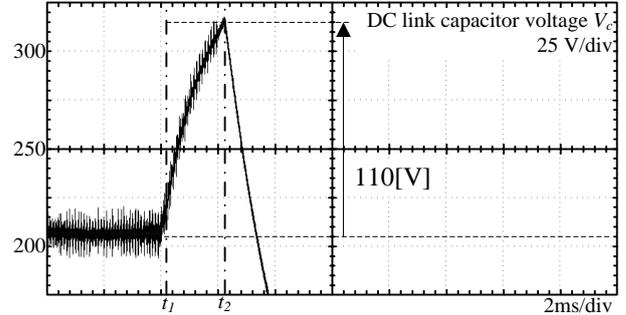


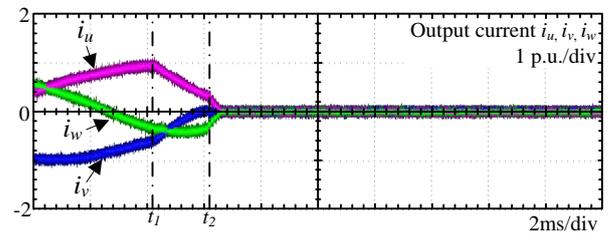
Fig.5 Configuration of the experimental system.

Table.2 Motor parameters used in the experimental.

Rated Motor Power	5.5kW
Rated Voltage	400V <sub>rms</sub>
Rated Current	10A <sub>rms</sub>
Rated Speed	1500rpm
Number of Poles	6poles
Winding Resistance	0.215 $\Omega$
d-axis Inductance	4.3mH
q-axis Inductance	10.2mH



(a) DC link capacitor voltage waveform.



(b) Output current waveforms.

Fig.6 Experimental result without the halt sequence control method.

確認できる。このように電圧上昇抑制法を用いずにインバータ停止を行った場合は直流コンデンサ電圧  $V_c$  の急上昇が免れないため、ダイナミックブレーキ装置は必須であることがわかる。

図7にモータ短絡による電圧上昇抑制法を用いてインバ

ータ停止を行った時の各部の動作波形を示す。本実験システムの短絡電流の最大値は、dq 軸等価回路<sup>(8)</sup>から導出した計算により 4.6 p.u.となる。しかしながら、本実験システムでは 3.0 p.u.以上の出力電流を流した場合、モータの損傷や不可逆減磁を起こす恐れがある。そのため、図 7(b)より、U 相出力電流  $i_u$  が 3.0 p.u.が流れた時点で過電流保護が働き、制御が中断されている。また、この時に直流コンデンサ電圧  $V_c$  が急上昇することから、この手法は実用的でないことがわかる。これは、モータ短絡による電圧上昇抑制法では短絡電流の増大が回生トルクの増大を招き、回転運動で与えられる回生エネルギーの変化が大きくなるため、多大な出力電流が流れるからである。

図 8 に提案手法を用いてインバータ停止を行った時の各部の動作波形を示す。図 8(a)より直流コンデンサ電圧  $V_c$  は  $t_1$  から  $t_2$  の間では変動し、 $t_2$  以降は電圧変動がないことが確認できる。また、電圧変動が起こる期間では最大 22 V の電圧上昇が確認できる。これは、フェーズ 1 中では直流コンデンサの充電と放電を繰り返すため、直流コンデンサ電圧  $V_c$  が振動するからである。

また、図 8(b)より出力電流は 2.5 p.u.に抑えられて、46% 低減できている。これは、フェーズ 1 での制御によって一度回生トルクをゼロにし、 $t_2$  の時点で無効電流のみの状態にしているためである。その結果、モータ短絡を行い短絡電流が流れても回生トルクは増加せず、回転運動で与えられる回生エネルギーの変化は小さくなる。

以上より、提案手法を用いることで、短絡電流を 46% 抑制しつつインバータ停止時の直流コンデンサ電圧上昇が抑制できる。この結果、ダイナミックブレーキ装置を用いなくても、モータ焼損や不可逆減磁を招くことなくインバータを停止できる。

#### 4. まとめ

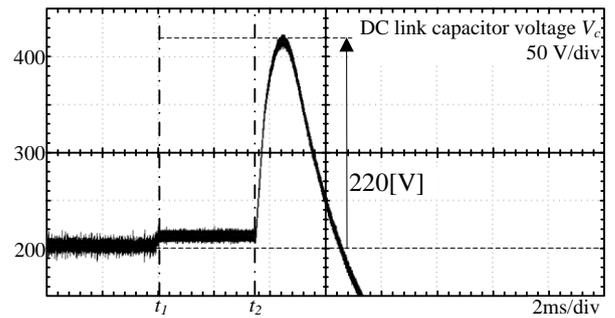
本論文では、モータ回生中のインバータの停止に伴う直流電圧上昇の抑制法を提案し、その妥当性を確認した。

実験結果から、以下のような結論を得た。

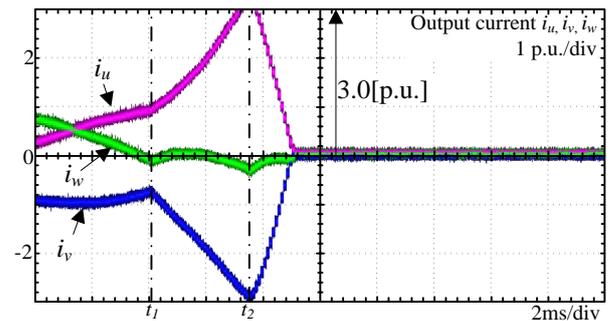
- (1) 提案手法は、追加の素子を設置することなくインバータの制御のみでインバータの停止が可能である。このことから電気自動車用駆動システムの小型化が可能である。
- (2) モータ短絡を行う前に回生トルクをゼロになるよう制御することにより、短絡電流を 46% に抑えつつ、直流コンデンサ電圧  $V_c$  の上昇が十分に許容できる範囲内に抑えられることを確認した。

#### 文 献

- (1) 磯田：「ダイナミックブレーキの過負荷検出装置」、公開特許公報(A)，特開 2007-74871(2007)特許庁
- (2) 山中：「モータ制御装置」、公開特許公報(A)，特開 2012-196443(2012)特許庁
- (3) 宮田，竹内：「モータ制御装置」、公開特許公報(A)，特開 2000-188897(2000)特許庁
- (4) Jorge O. Estima and Antonio J. Marques Cardoso: "Efficiency Analysis of

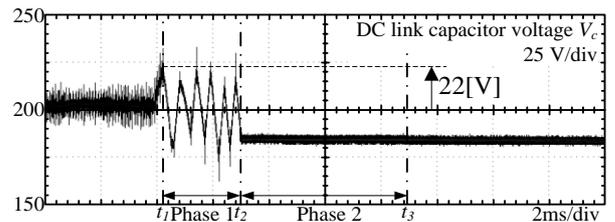


(a) DC link capacitor voltage waveform.

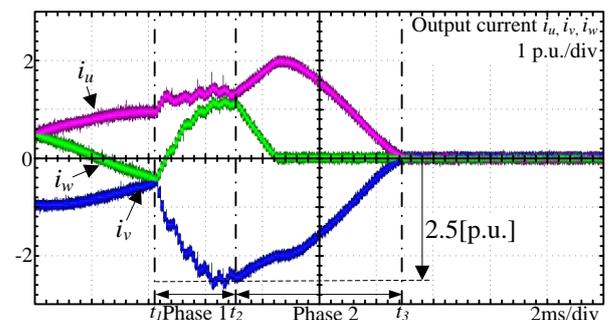


(b) Output current waveforms.

Fig.7 experimental result with the short circuit control method.



(a) DC link capacitor voltage waveform.



(b) Output current waveforms.

Fig.8 experimental result with the halt sequence control method.

Drive Train Topologies Applied to Electric/Hybrid Vehicles", IEEE Transactions on Vehicular Technology Vol. 61, No. 3, pp 1021-1031, (2012)

- (5) 青木，中島，伊東，鳥羽：「インバータ緊急停止時における直流コンデンサの電圧上昇抑制法」平成 24 年電気学会北陸支部連合大会 A-72 (2012)
- (6) 吉田：「電気自動車の最新制御技術」株式会社エヌ・ティー・エヌ(2011)
- (7) 寺嶋，足利，水野，山本，名取，藤原：「4 輪駆動高性能電気自動車用 AC ドライブシステム」電学論 D, Vol. 114, No.4 (1994)
- (8) 童，森本 純司，森本 茂雄，武田，平紗：「ブラシレス DC モータの省エネルギー高効率運転法」電学論 D, Vol. 112, No.4 (1992)