

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

◎青木 渉・中島 雄希・伊東 淳一（長岡技術科学大学）・鳥羽 章夫（富士電機株式会社）

1. はじめに

電気自動車では、小形化の観点から直流コンデンサを極力小さくしたい要求がある一方、保護動作時にバッテリーと直流コンデンサ間をリレーで切り離し、インバータを緊急停止するモードがある。このとき回生電力が発生すると、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、スイッチング素子が破壊する恐れがある。

これまでに筆者らは、問題解決のため異常時のリレーを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、電流を遮断する方法を提案した⁽¹⁾。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。

そこで本論文では、q 軸電流 i_q を零にすることで短絡電流と直流コンデンサの電圧上昇を抑制するインバータ電流遮断制御法を提案し、従来法と比較し有効性を検証する。

2. 電流遮断法

図 1 にシステム構成図を示す。本システムでは、モータに内部磁石形永久磁石同期電動機(IPMSM)を使用する。提案法は、直流コンデンサを充放電するフェーズ 1 と、その後モータを短絡するフェーズ 2 からなる。

図 2 にフェーズ 1 の動作モードを示す。フェーズ 1 はリレーを切り離した直後に使用する直流コンデンサ電圧が設定上限電圧を上回った時はインバータを図 2(a)に示す放電モードで、設定下限電圧を下回った時は図 2(b)に示す充電モードでそれぞれ動作する。この動作により直流コンデンサを充放電する期間が発生し、その期間に負の方向に流れていた i_q は減少しゼロになる。IPMSM のトルクは(1)式で求められる⁽²⁾。

$$T = P_n i_q \left\{ \sqrt{3} \Psi_e + (L_d - L_q) i_d \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 L_d 、 L_q は d 軸、q 軸の固定子インダクタンス、 P_n は極対数、 Ψ_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 q 軸電流がゼロになればトルクもゼロになるため、 $i_q=0$ の時はモータからエネルギーがインバータに回生しない。

$i_q=0$ 後はフェーズ 2 に移行する。フェーズ 2 ではインバータの上アームもしくは下アームをすべてオンにしてモータを短絡状態にし、電流がゼロクロスした相からスイッチをオフにする⁽¹⁾。以上を行うことにより短絡電流と直流コンデンサの電圧上昇を抑制し、電流遮断が可能になる。

3. シミュレーション結果

図 3 に、モータを定格での回生状態時に、リレーを開放し、従来法⁽¹⁾を用いて電流遮断を行った時の動作波形を示す。従来法はフェーズ 1 を介さずにフェーズ 2 を切り離し直後から行う方式である。図 3 より、従来法を用いた場合は直流コンデンサ電圧の上昇は生じないが、出力電流は最大で 8.0 p.u. 生じる。その結果、スイッチング素子の破壊や IPMSM を不可逆減磁させる恐れがある。

図 4 に提案法を用いて電流遮断を行った時の動作波形を示す。図 4 より、提案法を用いた場合出力電流は 2.6 p.u. に抑えられている。従来法はリレーを遮断した後に i_q が上昇し、回生エネルギーが増加する。それに対し、提案法は q 軸電流を零にした後短絡状態にするため、送られる回生エネルギーを抑制することができ、短絡電流が抑えられる。

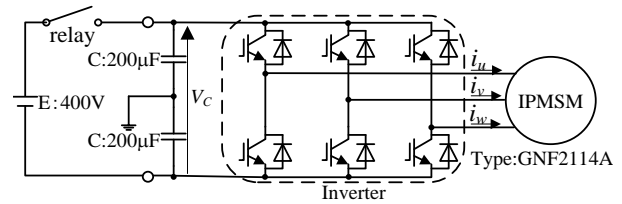


Fig.1 System configuration diagram.

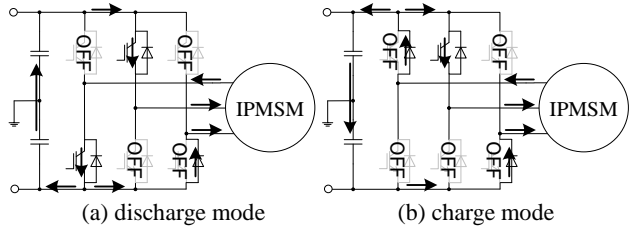


Fig.2 Operational modes of mode 1.

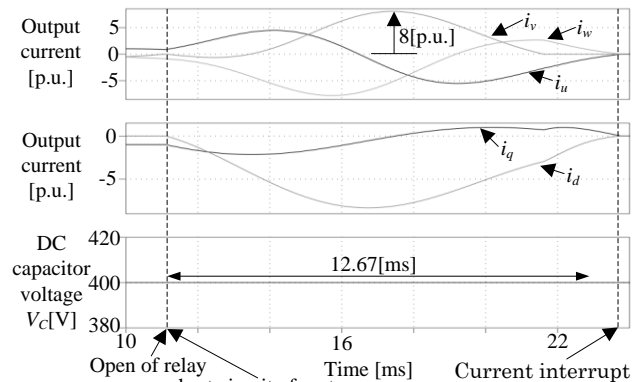


Fig.3 Output current and DC capacitor voltage waveform with the conventional method.

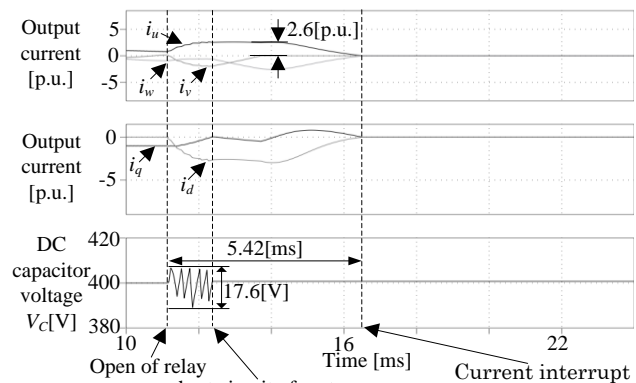


Fig.4 Output current and DC capacitor voltage waveform with the proposed method.

以上の結果から、提案法は短絡電流と電圧上昇の抑制が可能であることを確認した。今後は実機による評価を行う。

参考文献

1. 青木 渉, 中島 雄希, 伊東 淳一, 鳥羽 章夫 「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)
2. 武田 洋次, 松井 信行, 森本 茂雄, 本田 幸夫 「埋込磁石同期モータの設計と制御」 オーム社