

インバータ緊急停止に伴う直流コンデンサ電圧上昇抑制法における短絡電流抑制に関する検討

◎長野 剛⁽¹⁾ 伊東 淳一⁽¹⁾ 鳥羽 章夫⁽²⁾

⁽¹⁾ 長岡技術科学大学 大学院工学研究科

⁽²⁾ 富士電機株式会社

{ngn244@stn|itoh@vos}.nagaokaut.ac.jp

1. はじめに

近年, CO₂ 排出などの環境問題を背景に注目されている電気自動車では, 電力変換器の長寿命化の観点から, 平滑コンデンサとしてフィルムコンデンサの採用が増えている⁽¹⁾⁻⁽²⁾。しかし, フィルムコンデンサでは単位体積あたりの静電容量が小さいことから, 特に回生中にインバータを緊急停止した場合, 直流コンデンサに回生電流が流れる。そのため, コンデンサ電圧が急激に上昇し, 素子耐圧を超え, 素子を破壊する恐れがある。著者らは, 上記の問題を解決するために, モータ短絡を用いた直流電圧上昇抑制シーケンスを提案している⁽³⁾。本手法ではモータ短絡時の電流も抑制できるが, そのメカニズムを明らかにしていない。本論文では, ベクトルの観点から, 短絡電流抑制のメカニズムを明らかにし, 提案手法の妥当性を検証し, 短絡電流抑制の指針を明らかにする。

2. 提案手法

図 1 に電気自動車のシステム構成図を示す。図 1 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。

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

ここで ω は回転角速度, T はトルクである。(1)式よりトルクがゼロ, すなわち, q 軸電流がゼロであれば, 回生エネルギーは変化しないことがわかる。したがって, 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, 直流コンデンサ電圧の上昇を抑制できる。

図 2 に提案手法のフローチャートを示す。提案手法は, リレー開放後, モータ短絡時の電流上昇を抑えるために q 軸電流をゼロにしてトルクをゼロにするフェーズ 1 と, q 軸電流のゼロクロス時にモータを短絡するフェーズ 2 で構成される。

3. 実験結果

図 3 に提案手法を用いてインバータ停止を行った時の動作波形を示す⁽³⁾。図 3(a)より, 電圧変動が起こる期間では最大 0.11 p.u. の電圧上昇が確

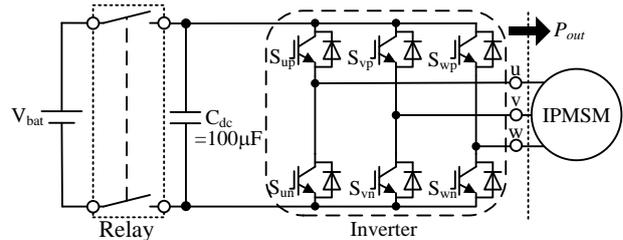


Fig. 1. System configuration of adjustable speed drives with small capacitor in DC Link for EVs.

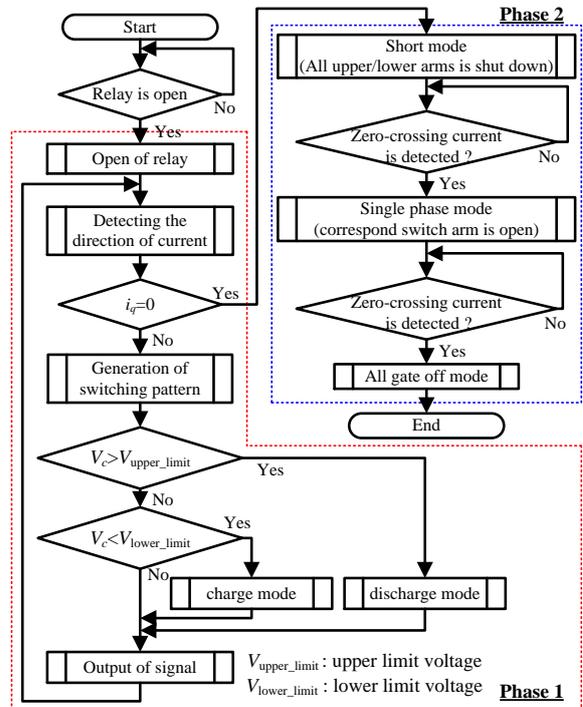


Fig. 2 Flowchart of the proposed halt sequence.

認できる。また図 3(b)より電流振幅の最大値は 2.5 p.u. となることが確認できる。この結果, 提案手法を適用することで, 追加装置なしでモータ焼損や不可逆減磁なしにインバータを停止できる。

4. 短絡電流抑制メカニズム

図 4(a)にモータ回生中にモータ短絡(フェーズ 2)のみによる直流電圧上昇抑制⁽³⁾を行った場合のモータ短絡前の電圧ベクトル図を, 図 4(b)にモータ短絡後の電圧ベクトル図を示す。回生中に短絡を行うと, モータ端子電圧が 0V になるため, そ

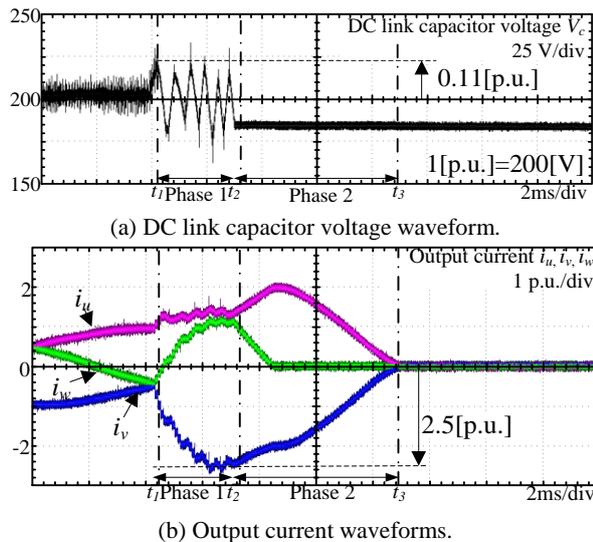


Fig. 3. Experimental result with the halt sequence control method and considered to suppress the q-axis current.

の瞬間に図 4(a)から図 4(b)のベクトル図になる。短絡後は出力電圧ベクトルがゼロになるが、電流は連続であるため、図 4(b)のように $pL_{di_d} + pL_{qi_q}$ が変化する。この $pL_{di_d} + pL_{qi_q}$ は d 軸および q 軸電流の傾きであり、大きいほどモータ短絡時に過大な電流が流れる。そこでフェーズ 1 ではモータ短絡時の電流上昇を起こさないために、 $pL_{di_d} + pL_{qi_q}$ が低減するような電圧ベクトルを出力すればよい。

図 5 に提案手法適用時のモータ短絡前後のベクトル図を示す。フェーズ 1 ではトルクをゼロにするために電流に対して遅れの電圧ベクトルを選択しているため、q 軸電流をゼロにすることで d 軸電流が負方向のみに流れる。フェーズ 2 開始時の図 5(b)には出力電圧ベクトルはゼロベクトルを出力するため、図 5(b)のフェーズ 1 終了時の誘起電圧ベクトル e と $R_{ai_d} + R_{ai_q}$ と $-\omega L_{di_d} + \omega L_{qi_q}$ のベクトル和がゼロに近いほど、 $pL_{di_d} + pL_{qi_q}$ は小さくなり、モータ短絡時の電流を抑制することができる。したがって、提案手法を用いることで、直流コンデンサ電圧の上昇と短絡電流の抑制が可能である。しかし、図 5(b)より、提案手法ではモータパラメータによっては、必ずしも誘起電圧ベクトル e と $R_{ai_d} + R_{ai_q}$ と $-\omega L_{di_d} + \omega L_{qi_q}$ のベクトル和がゼロにならない。よって、この点を改善できれば、さらに短絡電流を低減できる可能性がある。

以上、本論文では、モータ回生中のインバータ緊急停止に伴う直流コンデンサ電圧上昇抑制シーケンスにおけるモータ短絡電流抑制のメカニズムを明らかにし、提案手法の妥当性と短絡電流抑制の指針を明らかにした。また、メカニズムを明らかにすることにより、過渡項を考慮することで、さらに短絡電流抑制できる可能性を見出した。

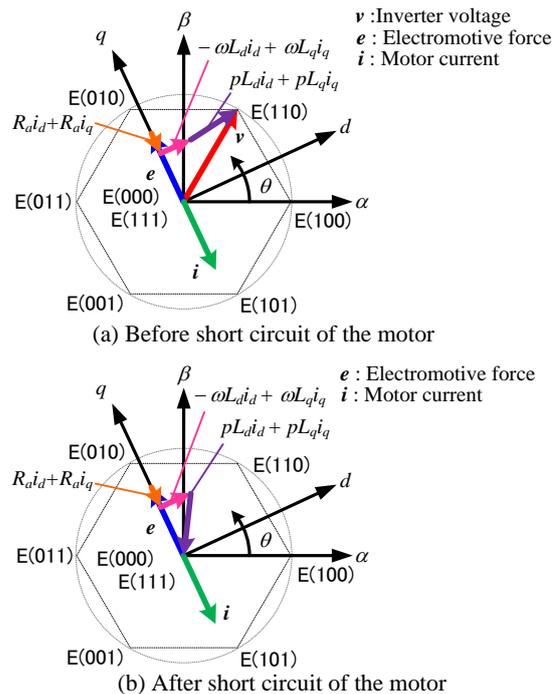


Fig. 4. Vector diagrams when the inverter short-circuits the motor

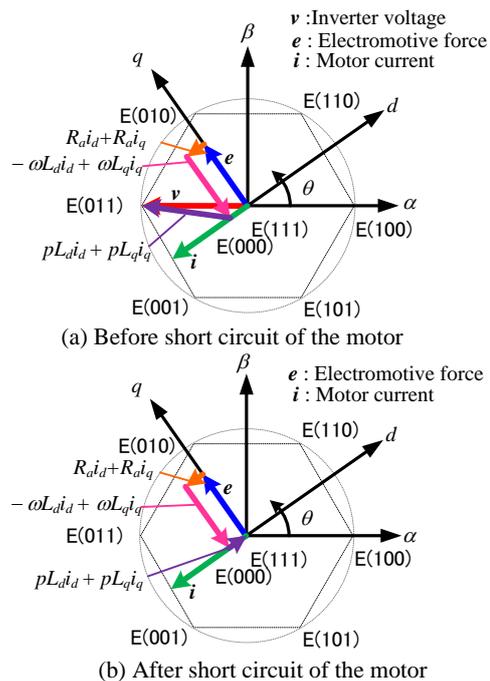


Fig. 5. Vector diagrams applying the proposed method when the inverter short-circuits the motor.

文 献

- (1) 劉, 稲葉: 「電気自動車導入に見る CO2 ガス排出量の動的な低減効果」, 電学論 D, Vol. 129, No.2, pp 232-233 (2009)
- (2) 神谷, 久保: 「ハイブリッド車における燃費向上技術の動向」, 電学論 D, Vol. 120, No.11, pp 1251-1256 (2000)
- (3) 青木他: 「電機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制御法の実機検証」, 平成 25 年電気学会産業応用部門大会, 4-2 (2013)