

リアクトルレス昇圧チョップを用いたインダイレクトマトリックスコンバータの IPMSM による DB-DTFC 制御の動作検証

ゴーテックチャン, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)
Robert. D. Lorenz (ウィスコンシン大学)

Performance Evaluation of an Indirect Matrix Converter with Reactor Less Boost Converter on an IPMSM driven by Deadbeat-Direct Torque Flux Control (DB-DTFC)
Goh Teck Chiang, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)
Robert. D. Lorenz (University of Wisconsin-Madison)

1. はじめに

近年, ハイブリッド自動車や EV 自動車, 新エネルギー発電の要求が高まっており, 小型化の電力変換システムと電気モータの制御技術が広く研究されている。

著者らは, これまでに小型で高効率のインダイレクトマトリックスコンバータ (以下, IMC) とリアクトルレス昇圧チョップを搭載した連系システムを提案している⁽¹⁾。しかし, ハイブリッド自動車に適用する場合, モータの速度が大きく変化するため, さらなるトルクの高応答化を実現するモータ制御法が必要となる。IMC のインバータは可変スイッチング周波数を使用しており, 従来の DTC を利用する場合にトルクのリップルが大きくなる問題がある。

本論文では, IPMSM に提案回路を適用し, トルクの高応答化の達成を目的とし, Deadbeat-Direct Torque Flux Control (DB-DTFC) を適用することを提案する⁽²⁾⁽³⁾。DB-DTFC は dq 電圧を利用し, トルクを 1 スwitching 周波数で制御することができ, さらにリップルが最小限に抑えることが可能。

2. 回路構成及制御方法

図 1 に提案回路の構成を示す。IMC には大きな電解コンデンサが不要な利点がある。加えて, 提案回路では昇圧チョップを IMC の DC リンクに接続し, バッテリーを昇圧チョップとモータの中性点の間に接続した構成である。チョップには昇圧に利用するリアクトルが不要であり, 小型化と高効率を実現することが可能となる。

図 2 に提案回路に DB-DTFC を適用した際の制御ブロックを示す。まず, IPMSM のトルクは(1)式で表される。

$$T_{em} = \frac{3}{4} P [\lambda_{pm} i_q - (L_q - L_d) i_d i_d] \quad (1)$$

これを DB-DTFC に適用し, トルクを離散時間で表すと(2)式となる。

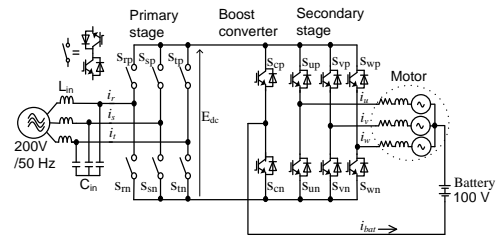


Fig. 1. Proposed circuit configuration.

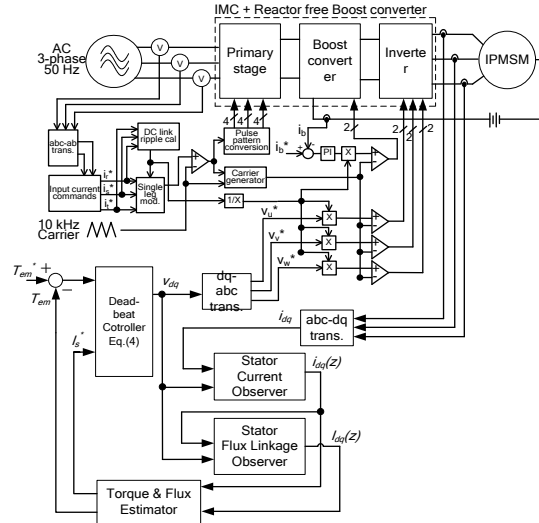


Fig. 2. DB-DTFC control block diagram.

$$\begin{aligned} \frac{T_{em}(k+1) - T_{em}(k)}{T_s} = & \frac{3}{4} P [v_d(k) \lambda_q(k) \left(\frac{L_d - L_q}{L_d L_q} \right) + v_q(k) \frac{(L_d - L_q) \lambda_d(k) + \lambda_{pm} L_q}{L_d L_q} \\ & + \frac{\omega_r(k)}{L_d L_q} ((L_q - L_d) (\lambda_d^2(k^2) - \lambda_q^2(k^2)) - L_q \lambda_d(k) \lambda_{pm}) \\ & + \frac{R \lambda_q(k)}{L_d^2 L_q} ((L_q^2 - L_d^2) \lambda_d(k) - L_d^2 \lambda_{pm})] \end{aligned} \quad (2)$$

T_s はスイッチング周期, P は極数, v_d は d 軸電圧, v_q は q 軸電圧, L_d は d 軸インダクタンス, L_q は q 軸インダクタンス, λ_d は d 軸磁束鎖交, λ_q は q 軸磁束鎖交, λ_{pm} は永久磁石

の磁束, R_s は固定子抵抗, ω_r は角速度である。

時間領域におけるトルクの変化は(3)式になる, dq 電圧を用いて表すと(4)式となる。

$$\Delta T_{em}(k) = T_{em}(k+1) - T_{em}(k) \quad (3)$$

$$v_q(k)T_s = Mv_d(k)T_s + B \quad (4)$$

$$M = \left(\frac{(L_q - L_d)\lambda_q(k)}{(L_d - L_q)\lambda_q(k) + L_q\lambda_{pm}} \right)$$

$$B = \left(\frac{L_d L_q}{(L_d - L_q)\lambda_q(k) + \lambda_{pm} L_q} \right) \left[\frac{4\Delta T_{em}}{3} - \frac{\omega_r T_s}{L_d L_q} ((L_q - L_d) \right.$$

$$\left. (\lambda_d^2(k^2) - \lambda_q^2(k^2)) - L_q \lambda_d(k) \lambda_{pm} \right]$$

$$- \frac{R_s T_s \lambda_q(k)}{L_d^2 L_q^2} ((L_q^2 - L_d^2) \lambda_d(k) - L_q^2 \lambda_{pm})$$

図2ではデットビートブロックで(4)式からdq電圧を計算する。そして, 提案回路のスイッチングパルスはdq電圧から3相電圧へ変換し, キャリヤ比較方式により生成する。さらに, 磁束は測定が不可能であるため, 時間領域で磁束を推定することのできるオブザーバを追加する⁽³⁾。加えて, 磁束の推定精度を改善するために, サンプル遅れを削減できる電流オブザーバを追加する⁽³⁾。

3. シミュレーション結果

図3に提案方式のシミュレーション結果を示し, 表1にシミュレーション条件を示す。トルクは0 N.mから2 N.mまでの間に制御ができることを確認した。さらに, 磁束オブザーバを利用しトルク指令によって磁束が推定できることを確認した。一方, 出力電流がバッテリー電流を含むので, バッテリー電流の変化に伴って出力電流のオフセットが変動することを確認した。さらに, バッテリーが放電と充電の動作をする場合, バッテリーの電力によって入力電流の振幅が同時に変わるが, トルクの制御に振動がないことを確認した。

図4にモータ電流オブザーバによって推定したdq軸成分電流のシミュレーション結果を示す。出力電流はバッテリー電流を含むため, オブザーバの入力信号にはリップルが発生する。しかし, 出力電流のオフセットが変化してもd軸, q軸それぞれの電流が変動しないことを確認した。さらに, オブザーバで推定される出力信号はほぼ入力信号と一致することを確認した。

4. まとめ

本論文では, IMC と昇圧チョップを組み合わせた提案回路にDB-DTFCを適用して, その動作を検討した。結果から, バッテリー電流によって出力電流にオフセットが発生する場合でも, トルクに影響なく制御できることを確認した。さらに, 入力電力がバッテリー電力と切り替わる場合でも, トルクには変動がないことを確認した。また, モータ電流オブザーバの出力信号は入力信号を常に追跡することを確認

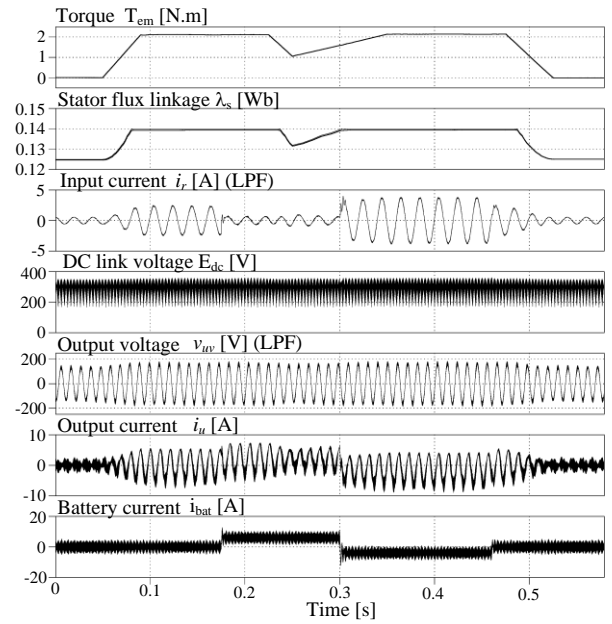


Fig. 3. Simulation results (Motor speed = 600 RPM).

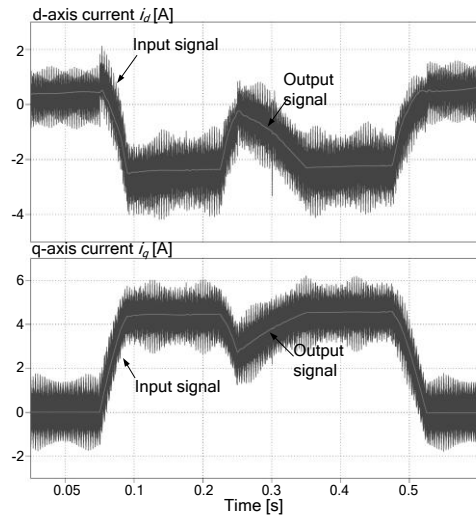


Fig. 4. Input and output signals from current observer.

Table 1. Simulation parameters.

Input voltage	200 V / 50 Hz	Switching frequency	10 kHz
Motor rated speed	1280 RPM	Stator resistance	1.5 Ohm
d-axis inductance	8 mH	q-axis inductance	22 mH
Poles	4	Rated torque	2.3 N.m

した。

文献

- (1) Goh T.C, J Itoh: *IEEE Trans. on PE*, pp. 1599-1607, Oct. 2011
- (2) Jae S.L, Lorenz, R.D: *IEEE Trans. on IE*, pp. 1749-1758, 2011
- (3) West N.T, Lorenz, R.D: *IEEE Trans. on IE*, pp. 729-736, 2009