

リバーシブルインダイレクトマトリックスコンバータの 出力電流制御法

松岡 健太* 芳賀 仁 (長岡技術科学大学)

Output Current Control Method for Reversible Indirect Matrix Converter (R-IMC)
Kenta Matsuoka*, Hitoshi Haga, (Nagaoka University of Technology)

The reversible indirect matrix converter (R-IMC) can expand the voltage transfer ratio. However, the output current control method which is required for motor drive has not been established. This paper proposes a method to control the output current in buck and boost modes and a mode transition method. In the buck mode, damping control is used to control the output current as in the general IMC control method. In the boost mode, the output current is controlled by making an input current command from the output current command based on the relationship between the input and output power. A protection circuit is used to mode transition in order to prevent surge generation when the reactor is released. The simulation results show that the output current can be controlled in both modes and that mode transition is also possible.

キーワード: リバーシブルインダイレクトマトリックスコンバータ, マトリックスコンバータ, 出力電流制御, モータ切り替え

(Reversible indirect matrix converter, matrix converter, output current control, mode transition)

1. はじめに

マトリックスコンバータ(MC)は大容量のエネルギー蓄積要素を持たず, 交流-交流直接変換を実現するため, Back to back(BTB)システムと比較して小型, 長寿命, 軽量化の点で有利である他, モータドライブおよび再生動作も可能であることが示されている⁽¹⁾. しかし, MCは整流器とインバータそれぞれの出力の関係から, 電圧利用率が 0.866 に制限される. これにより, MCのモータドライブ用途では, BTBシステムと同等の出力電力を得る場合, 出力電流を増加させて対応する必要があり, スイッチング素子を通過する際の導通損や, モータ銅損が増加する.

これらの解決法として, Zソースマトリックスコンバータ(ZMC)やリバースマトリックスコンバータ(RMC)などの昇圧形のMCが提案されている⁽²⁾⁽³⁾. ZMCは主にインダクタ, コンデンサ, スイッチから構成されるZソースネットワークを有している. これにより, 大容量化, 短寿命化が欠点となる. インダイレクトマトリックスコンバータ(IMC)は整流器段とインバータ段で構成され, それぞれ電流形整流器(CSR)と電圧形インバータ(VSD)で制御する. 一方でRMCはIMCのトポロジを入れ替えて昇圧動作を実現する. 従って整流器段は電圧形整流器(VSR), インバータ段は電流形インバータ(CSI)で制御する. これにより, 昇圧動作を実現でき

る. しかしIMCとは逆に1.155未満の電圧を出力できない. よって, 発電機等の可変入力電圧源がない限り, モータ始動や, 低速度運転に対応できないと考えられる.

著者らはこれまでにIMCとRMCの両方の動作を実現する, リバーシブルインダイレクトマトリックスコンバータ(R-IMC)を提案している⁽⁴⁾. R-IMCは入力リアクトルを昇圧リアクトルとして利用するため, ZMCと比較してリアクトル数を減少できる. また, IMCの動作が可能であるため, モータ始動および低速度駆動も可能である. R-IMCでモータドライブを達成するには出力電流制御が必要であるが, 今までに, 検討は行われていない. よって本論文では降圧モード, 昇圧モードにおける出力電流制御を主目的に検討を行う. また, 両動作のモード切り替え法についてもサージ抑制を念頭に検討を行い, シミュレーション結果を確認したため, 報告する.

2. 提案回路構成

図1および図2に提案回路構成を示す. R-IMCは従来のインダイレクトマトリックスコンバータ(IMC)とリバーシブルマトリックスコンバータ(RMC)を組み合わせた構成となる. 電圧形と電流形の動作を両段で実現するため, 双方

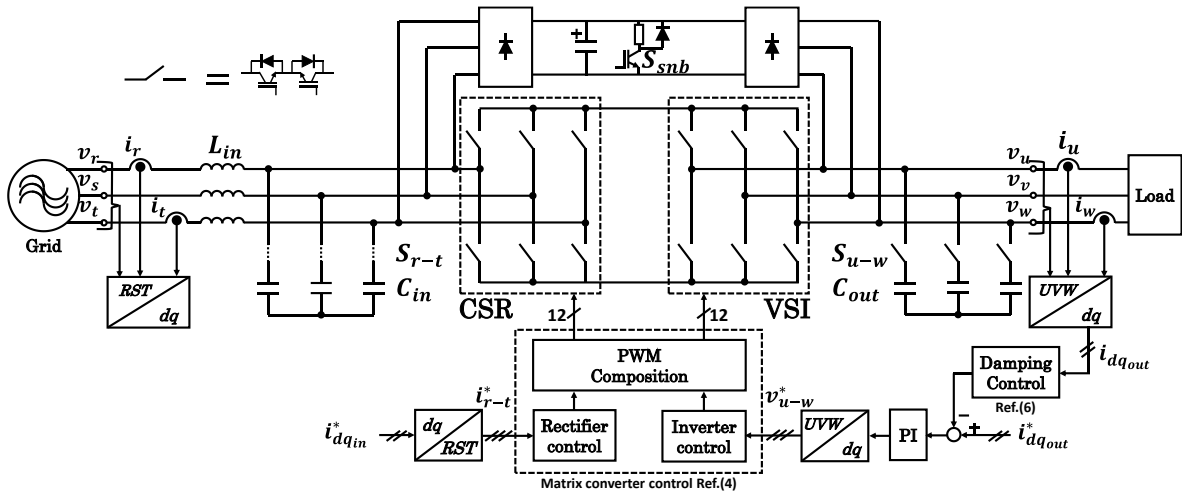


図1 降圧モード時の出力電流制御ブロック図
Fig.1 Circuit and block diagram at buck mode

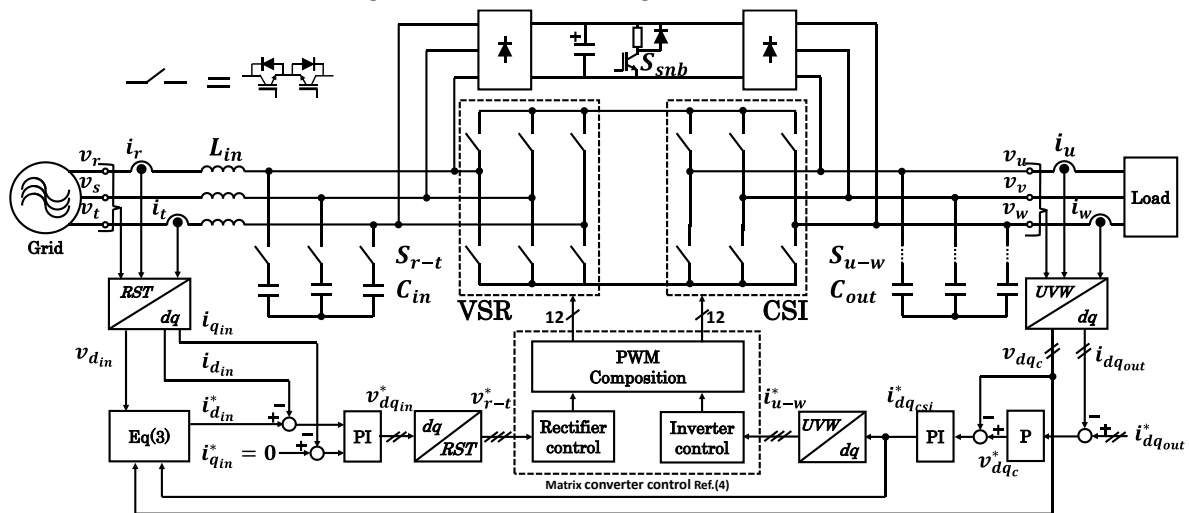


図2 昇圧モード時の出力電流制御ブロック図
Fig.2 Circuit and block diagram at boost mode

向スイッチを用いる。両段の入力端と出力端には、放電回路用の3相ダイオードブリッジと電解コンデンサ、保護回路を接続する。この回路は降圧モードと昇圧モードの切り替え時に発生するサージ吸収に用いる。内部の変換回路の構造に干渉しないため、ダイレクトマトリクスコンバータなどの直接電力変換器への転用も期待できる。入力フィルタコンデンサと出力フィルタコンデンサには入力段と出力段と同様に双方向スイッチを構成する。これは、降圧モード時、昇圧モード時で回路構成を切り替えるためである。

3. 出力電流制御法

R-IMCには降圧モードと昇圧モードの2種類があるため、それぞれに出力電流制御法を用意する必要がある。

<3-1> マトリクスコンバータの制御

提案回路はマトリクスコンバータの仮想AC/DC/AC方式をもとに、制御を行う⁽⁶⁾。式(1),(2)にIMCのスイッチングパターンを示す。電源中性点電位を基準とした直流リン

ク電圧を e_{dcp} , e_{dcn} とすると、入力電圧と直流リンク電圧の関係式は式(1)、直流リンクと出力電圧の関係式は式(2)で求まる。

$$\begin{bmatrix} e_{dcp} \\ e_{dcn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{rp} & S_{sp} & S_{tp} \\ S_{rn} & S_{sn} & S_{tn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_s \\ v_t \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{up} & S_{un} \\ S_{vp} & S_{vn} \\ S_{wp} & S_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{dcp} \\ e_{dcn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

<3-2> 降圧モードの出力電流制御法

降圧モードの制御ブロック図を図1に示す。出力電流制御は通常のIMCの出力電流制御と同様に考えるため主動作は、電流形整流器(CSR)と電圧形インバータ(VSI)となる。それぞれの最大出力電圧より、電圧利用率は0.866に制限される。通常、IMCの回路構成では入力LCフィルタのLC共振を抑制するため、ダンピング抵抗を用いることが多い。しかし、R-IMCにおいては昇圧モードの動作に影響を与え

るため、ダンピング抵抗を用いることはできない。よって、出力電流フィードバックに統合するダンピング制御を用いる⁶⁾。このとき、入力側コンデンサをオン、出力側コンデンサはオフとなる。制御ブロック図を図 1 に示す。出力電流指令に PI 制御ブロックを通じて出力電圧指令値を作成する。入力の LC フィルタ共振抑制のため、出力電流の応答値にダンピング制御を加える。

<3・3> 昇圧モードの出力電流制御法

昇圧モードは電圧形整流器(VSR)および、電流形インバータ(CSI)で構成される。それぞれで出力可能な最小電圧より、電圧利用率は 1.155 以上に制限される。昇圧モード時、入力側コンデンサをオフ、出力側コンデンサをオンする。これにより、入力側リアクトルは昇圧リアクトルとして、出力側コンデンサは出力フィルタとして動作する。電流形インバータを制御し出力電流制御しようとする場合、R-IMC においては直流リンク部にリアクトルがなく、直流電流源とみなせない。従って CSI 単体での独立した出力電流制御は難しい。そこで、R-IMC の昇圧モードでは電圧形整流器(VSR)で入力電流制御を行い、CSI に供給する電流値を制御する。CSI は位相角のみを制御する。昇圧モードの制御ブロック図を図 2 に示す。VSR には入力電圧指令、CSI には出力電流指令が必要である。よって PI 制御は入力段の入力電流制御、出力段の出力相電圧制御、出力電流制御の 3 重のループで構成する。式(3)に出力電流指令、入力電流指令の関係式を示す。マトリックスコンバータは直流リンクに電解コンデンサなどのエネルギー蓄積要素を持たないため、入出力の電力の関係は一定に保たれる。これにより電圧制御の CSI 電流指令 i_{csi}^* と出力相電圧 v_c 、入力相電圧 v_{in} から、VSR の入力電流指令 i_{in}^* を生成できる。以上より、出力電流制御と入力電流制御の両立が可能である。

$$i_{d,in}^* = \frac{v_{d,c} * i_{d,csi}^* + v_{q,c} * i_{q,csi}^*}{v_{d,in}} \dots\dots\dots (3)$$

<3・4> 放電回路を用いたモード切り替え

従来法ではモード切り替えを行う際、入力コンデンサ S_{r-t} と出力コンデンサ S_{u-w} の同時オンを避けるため、対応策として、両モードへの切り替え時にデットタイム t_d を挿入し入出力コンデンサが両方オフとなる区間を生成する⁷⁾。しかし、両モードオフ期間において、降圧モード時は CSR、昇圧モード時は CSI の動作時にゼロベクトル区間が相当する場合、入力インダクタおよび出力インダクタにおいて開放状態が発生し、サージが生じる。よって、3 相ダイオードブリッジと電解コンデンサ、保護回路で構成される放電回路を設ける。この放電回路を用いることで、切り替え時のリアクトル開放状態発生による放電経路を確保する。図 3 にモード切り替え手順を示す。閾値 i_{th} に到達する時、降圧モードから昇圧モードに切り替える場合の動作切り替え手順は以下の通りである。

- ① 保護回路の S_{snb} をオンにする。
- ② 入力コンデンサスイッチ S_{r-t} をオフする。
- ③ デットタイム区間後、出力コンデンサスイッチ S_{u-w}

をオンにする。

- ④ S_{snb} をオフにする。

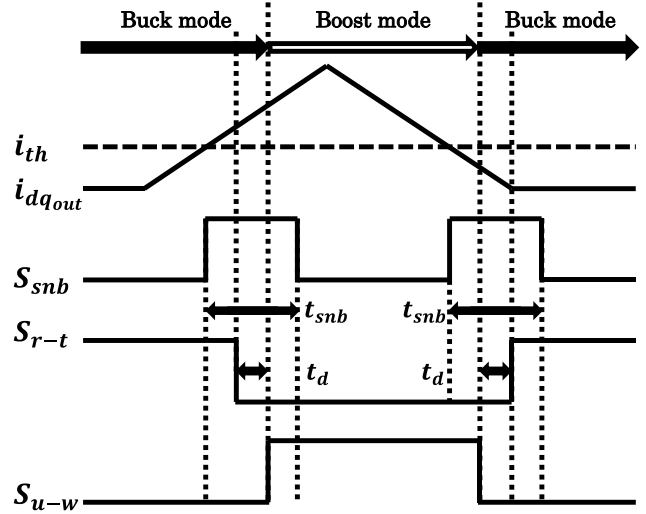


図 3 モード切り替え手順

Fig.3 Mode transition from buck to boost mode.

4. シミュレーション結果

シミュレーション条件を表 1 に示す。負荷は RL 負荷としている。降圧モードのシミュレーション結果を図 4 に示す。指令値は 2A である。出力電流は指令値に追従していることが確認できる。昇圧モードのシミュレーション結果を図 5 に示す。指令値は 7A である。同様に出力電流が指令値に追従していることが確認できる。降圧モードから昇圧モード、昇圧モードから降圧モードへのモード切り替えシミュレーション結果を図 6 に示す。切り替えの閾値は降圧モードと昇圧モードそれぞれで出力できない電圧利用率 1.0 の値としている。それぞれ 2A から 6A、その後、6A から 2A へ指令値をステップ状に変化させている。切り替わり時のサージ電圧はおよそ 0.5 kV に抑制可能であることをのほか、どちらのモードへの遷移も可能であることを確認した。

表 1 シミュレーションパラメータ

Table 1 Simulation parameters			
Input voltage v_{grid}	200 V	Output capacitor C_{out}	10 μ F
Input frequency f_{in}	50 Hz	Output frequency f_{out}	40 Hz
Carrier frequency f_c	20 kHz	Load resistance R_{load}	37.5 Ω
Input inductance L_{in}	2 mH	Load inductance L_{load}	5 mH
Input capacitor C_{in}	20 μ F	Threshold current i_{th}	5.3 A
Proportional gain for input current control at boost mode K_{pcc_csr}	125.66	Integration gain for input current control at boost mode K_{icc_vsr}	394784
Proportional gain for output voltage control at boost mode K_{pvc_csi}	0.026	Proportional gain and Integration gain for output current control at buck mode K_{pcc_vsi}, K_{icc_vsi}	25.33, 197392
Proportional gain for output voltage control at boost mode K_{pcc_csi}	6.28	Integration gain for output voltage control at boost mode K_{icc_vsr}	235.62

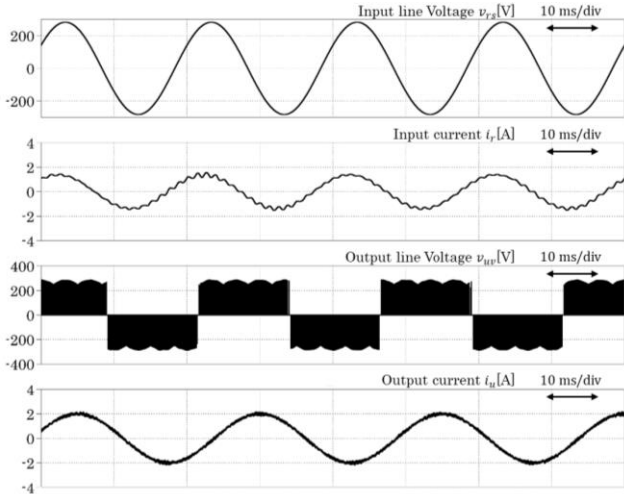


図4 出力電流指令 2A 時の降圧モード動作

Fig.4 Output current command 2A at buck mode

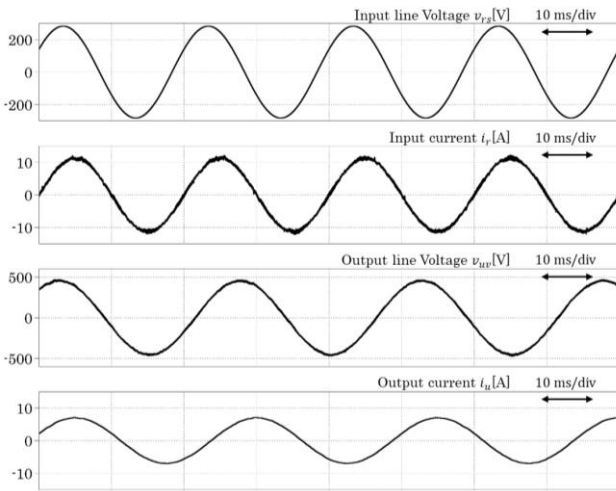


図5 出力電流指令 7A 時の昇圧モード動作

Fig.5 Output current command 7A at boost mode

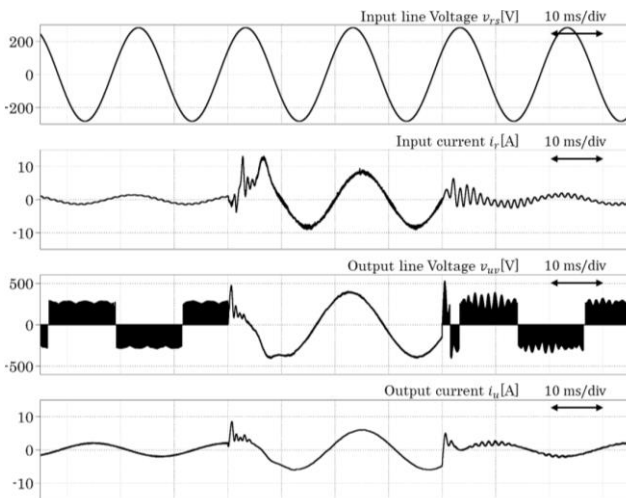


図6 モード切り替え動作

Fig.6 Mode transition buck to boost mode and boost to buck mode

5. まとめ

本論文では R-IMC の出力電流制御法及び、モード切り替え法を提案した。降圧モード時、ダンピング抵抗の使用を避けるため、ダンピング制御を用いて、出力電流制御を行った。昇圧モード時、マトリックスコンバータの入出力電力一定の関係より、出力電流指令値から入力電流指令を生成し、出力電流を制御する手法を提案した。モード切り替え法では、インダクタ開放時のサージ抑制をする、放電回路を用いたモード切り替え法を提案した。両モードにおける出力電流制御は可能であり、モード切り替え時のサージ抑制も可能であることをシミュレーションで確認した。

文 献

- (1) Patrick W. Wheeler, José Rodriguez, Jon C. Clare, Lee Empringham, and Alejandro Weinstein: "Matrix Converters: A Technology Review", IEEE Trans, Vol.49, No.2 pp.276-288 (2002)
- (2) Kiwoo Park, Kyo-Beum Lee and Frede Blaabjerg: "Improving Output Performance of Z-Source Sparse Matrix Converter Under Unbalanced Input-Voltage Conditions", IEEE Trans. Power Electron, Vol.27, No.4, pp. 2043-2054 (2012)
- (3) Yeongsu Bak and Kyo-Beum Lee: "Constant Speed Control of a Permanent-Magnet Synchronous Motor Using a Reverse Matrix Converter Under Variable Generator Input Conditions", IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron, Vol.6, No.1 pp.315-326 (2018)
- (4) Kodai Okuzono and Hitoshi Haga: "Extend Output Voltage Range of AC/AC Converters using a Reversible Indirect Matrix Converter" IEEJ Trans IA, Vol.140, No.2 pp56-62 (2020) (in Japanese)
奥園広大・芳賀仁:「広範囲な電圧出力を実現するリバーシブルインダイレクトマトリックスコンバータ」, 電気学会論文誌 D, Vol.140, No.2 pp.56-62 (2020)
- (5) Junich Itoh, Ikuya Sato, Hideki Ohguchi, Kazuhisa Sato, Akihiro Odaka and Naoya Eguchi: "Control Method for the Matrix Converter Based on Virtual AC/DC/AC Conversion Using Carrier Comparison Method", IEEJ Trans IA, Vol.124, No.5 pp457-463 (2004) (in Japanese)
伊東淳一・佐藤以久也・大口英樹・佐藤和久・小高章弘・江口直也:「キャリア比較方式を用いた仮想 ACDCAC 変換方式によるマトリックスコンバータの制御法」, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), Vol.124, No.5, pp.457-463 (2004)
- (6) Hiroki Takahashi and Jun-ichi Itoh: "Control Method for a Matrix Converter to Ensure Compatibility between Filter Resonance Suppression and Output Current Control Performance", IEEJ Trans IA, Vol.135, No.7 pp802-815 (2015) (in Japanese)
高橋広樹・伊東淳一:「フィルタ共振抑制と電流制御性能改善を両立するマトリックスコンバータの制御法」, 電気学会論文誌 D, Vol.135, No.7 pp.802-815 (2020)
- (7) 奥園広大・芳賀仁:「昇降圧切り替え可能なリバーシブルインダイレクトマトリックスコンバータの動作切り替えアルゴリズムの検討」, 新潟支所大会 NGT-18-202, pp.15 (2018)
- (8) Hak-Jun Lee, Sungho Jung, and Seung-Ki Sul: "A Current Controller Design for Current Source Inverter-Fed AC Machine Drive System", IEEE Trans. Power Electron, Vol.28, No.3, pp.1366-1381 (2013)
- (9) 高橋広樹・伊東淳一:「マトリックスコンバータの出力側に適用したダンピング制御のパラメータ設計と過渡特性評価」, 平成 25 年度電気学会産業応用部門大会, 1-36, (2013)
- (10) Yeongsu Bak, Yongsoo Cho and Kyo-Beum Lee: "Reverse matrix converter for permanent magnet synchronous motor drives using a direct power control" in Proc. ECCE Conf., pp.6832-6837 (2015)