

# 発電機電源における マトリックスコンバータの入力制御の最適化

学生員 春名 順之介 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

## An Optimum Control of an Input Side for a Matrix Converter with a Generator Power Supply

Junnosuke Haruna, Student Member, Jun-ichi Itoh, Member (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a stabilization control for an input current reference and the optimum input power factor control using a generator as a power supply. This paper discusses the control characteristics based on experimental results as follows; (1) fundamental operation of an RL load with the generator power supply, (2) a relationship among an input current phase, an input terminal voltage and an output voltage, (3) an acceleration characteristics of the generator. The results of the experiment confirmed the validity of the proposed system.

キーワード：マトリックスコンバータ，発電機，同期リアクタンス，ダンピング制御，最適入力力率制御

Keywords : Matrix converter, Generator, Synchronous reactance, Damping control and Optimum input power factor control

### 1. はじめに

近年，直流リンクを介さずに，交流電源から任意の電圧，周波数の交流に直接変換可能なマトリックスコンバータが注目を浴び，盛んに研究されている<sup>(1-7)(9-15)</sup>。その背景にはマトリックスコンバータが従来の PWM コンバータ-インバータシステムと比較し，小型，軽量，長寿命，高効率化の点で優れていることに加え，逆耐圧を持つ IGBT が開発されていることが挙げられる。

一方，マトリックスコンバータの用途は，現在用いられているエレベータ等の他にも多数検討されており，一例として風力発電やハイブリッド EV への適用が考えられる。こうした用途では，入力部への発電機の接続が想定される。

マトリックスコンバータの制御方法の課題として，出力電圧と入力電流の同時制御が挙げられる。また，入力電圧を直接変換し，出力電圧を制御していることから，入力電圧の変動によって，出力電圧や入力電流に影響が生じる。入力部に発電機を接続すると，発電機の運転状況により逆起電力の振幅と周波数が常に変動するため，マトリックスコンバータの出力範囲に影響を与える。

発電機は出力インピーダンスが大きく，特にマトリックスコンバータと 1:1 の容量の同期発電機が接続された場合では，同期リアクタンスは 40~60[%]となり，システム不安定化の原因となる。これに対して筆者らはこれまでに，回転座標上における入力電流指令のダンピング制御を用いたシステムの安定化制御を提案した<sup>(1)</sup>。また，入力電圧と出力電圧の関係を入力電流位相角に着目して解析し，発電機接

続時における最適入力力率制御<sup>(2)</sup>を提案している。

本論文では，発電機電源におけるマトリックスコンバータの入力制御の最適化を提案する。これまで提案してきた安定化制御と最適入力力率制御を，発電機模擬電源および発電機に適用し，定格回転時における RL 負荷特性，および発電機の加速特性を実機にて検証し，提案法の有用性を明確にしたので報告する。

### 2. 入力側の最適化制御

#### 〈2・1〉 入力電流のダンピング制御

図 1 に発電機を電源とするマトリックスコンバータの回

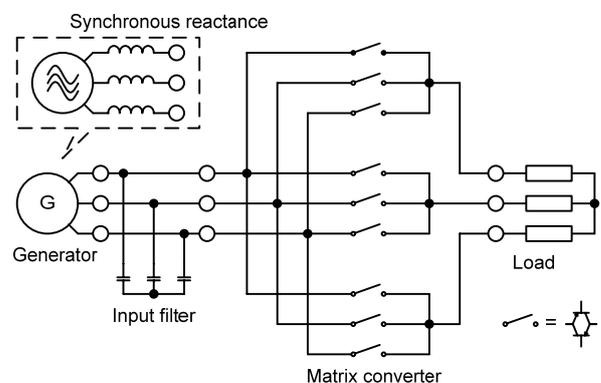


図 1 発電機入力時のマトリックスコンバータの回路図

Fig. 1. Circuit diagram of the matrix converter with the generator for the power supply.

路構成を示す。入力フィルタは同期リアクタンスで代用できる。図 1 において、マトリックスコンバータの入力電圧はフィルタコンデンサの端子電圧と一致するが、同期リアクタンスの影響を受けるため変動が大きく、歪みが発生する。また、マトリックスコンバータの入力電流指令は入力電圧より生成するため、歪みの大きい入力電圧から生成した場合、入力電流も歪み、システムが不安定化する。

図 2 に dq 座標上における入力電流指令のダンピング制御のブロック図を示す。通常のダンピング制御では、高調波成分抽出用のバンドパスフィルタ(BPF)が必要であるが、発電機電源の場合、入力周波数が変動するので、カットオフ周波数が一定にできない。そこで、dq 座標変換し、基本波周波数成分を直流とすることで、高調波成分を時定数の低いローパスフィルタ(LPF)で抽出できる。また、図 2 において、回転座標-三相変換時に位相角  $\theta_{pic}$  を重畳することで、任意の入力力率に変化させることができる。

〈2・2〉 最適入力力率制御

マトリックスコンバータは入力力率を自由に設定できるが、直接形 AC/AC 電力変換器では、出力電圧は入力力率に依存するため、通常は力率を 1 に制御する。

発電機電源において従来の力率 1 制御を行った場合、入力電流位相は入力端子電圧  $v_c$  の位相に一致するが、逆起電力  $E_0$  の位相とは異なる。発電機電源における出力電圧  $v_{out}$  は(1)式で表される。ただし、 $\lambda$ は変調率( $0 \leq \lambda \leq 0.866$ )、 $i_p$ は有効電流、 $i_q$ は無効電流である。

$$V_{out} = \lambda v_c \cos \theta = \frac{i_p}{\sqrt{i_p^2 + i_q^2}} \lambda E_0 \dots\dots\dots (1)$$

(1)式において、 $i_q=0$  の時、出力電圧は逆起電力と変調率の積となる。従って、発電機電源では、入力端子電圧の振幅と位相に関係なく、逆起電力によって電圧が出力される。

入力電流位相を発電機の逆起電力の位相と一致させるには、逆起電力の位相情報が必要である。しかし、発電機は逆起電力成分と同期リアクタンスを分離することができないので、逆起電力のみを検出するのは不可能である。そこで、本論文では、磁極位置センサを用いて逆起電力の位相を推定する。

図 3 に発電機電源における入力側の最適制御をブロック図に示す。逆起電力は磁極位置センサによって検出され、PLL と位相計算によって位相情報化される。その後、図 2 の入力電流指令計算によって逆起電力と同位相の入力電流指令が生成され、マトリックスコンバータが制御される。

3. 実験結果

本論文では、提案法の有用性を検証するために、同期発電機、および同期発電機と同等の同期インピーダンスをリアクトルで模擬し、系統電源に接続した発電機模擬電源にて実験を行っている。以下にその詳細を示す。

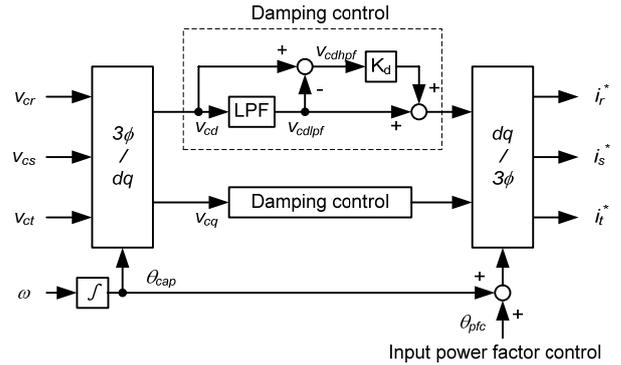


図 2 入力電流指令のダンピング制御ブロック図  
Fig. 2. Damping control block diagram of the input current reference.

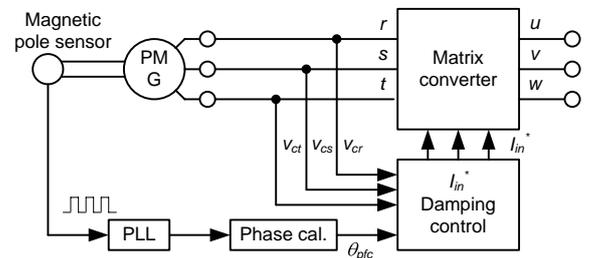


図 3 入力側の最適制御ブロック図  
Fig. 3. Block diagram of Optimum control method for input side.

表 1 実験条件

Table 1. Experimental conditions.

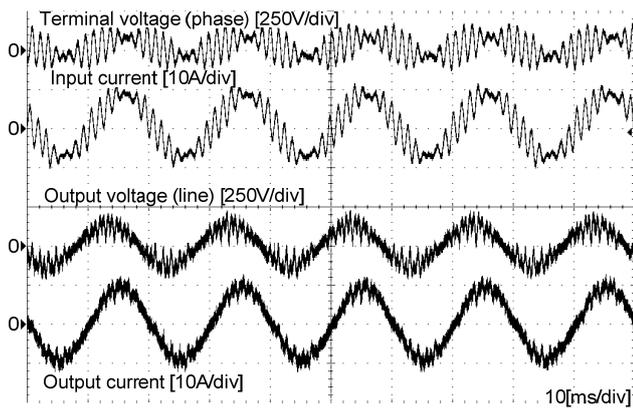
PM Generator			
Back e.m.f. (line)	151[V]	Rated output	3.7[kW]
Rated turns	1800[rpm]	Number of pole	6
Large impedance power supply			
V <sub>in</sub> (line)	151[V]	Input frequency	50[Hz]
Sync. Reactance	12[mH]		
Filter capacitor	6.6[μF]	Output reference	120[V]50[Hz]
Load		7.8[Ω]	5[mH]

〈3・1〉 発電機模擬電源による RL 負荷実験

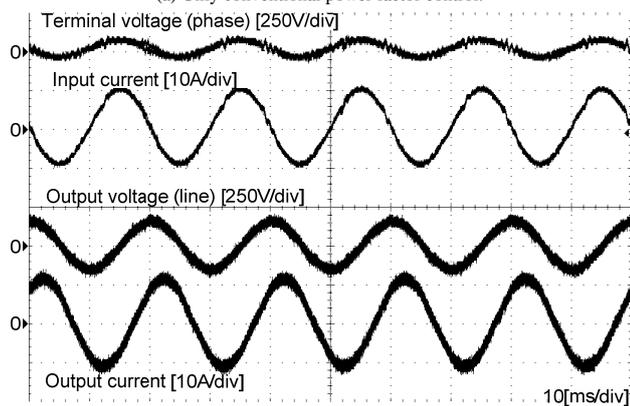
図 4 に表 1 の条件を用いた発電機模擬電源による RL 負荷の実験結果を示す。(a)に安定化制御および最適力率制御を導入しない場合、(b)に安定化制御を導入した場合、(c)には(b)に加え最適入力力率制御を導入した場合の結果を示す。

図 4(a)では、入力端子電圧、入力電流に共振が発生している。入力端子電圧の瞬時値は 300[V]を越え、また、入力電流歪み率は 13.8[%]となり、不安定になっているのが確認できる。さらに、出力波形も入力側の影響を受け歪んでいる。

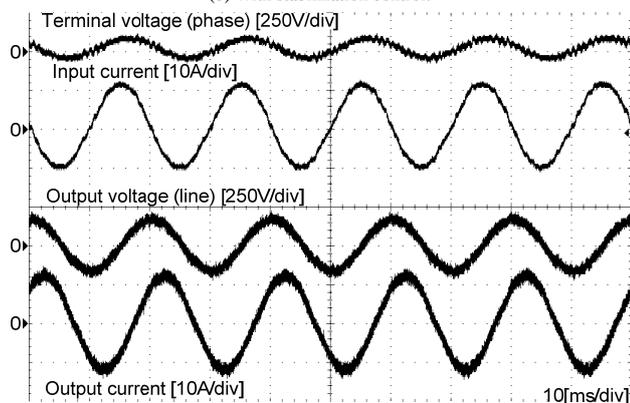
図 4(b)は(a)と比較して、安定化制御によってフィルタ共振が抑制されている。入力端子電圧は 200[V]以下に、入力電流歪み率は 4.57[%]となり、約 9 ポイント改善され、安定化制御の有効性が確認できる。さらに、出力波形も入力側



(a) Only conventional power factor control.



(b) With stabilization control.



(c) With optimum input power factor control.

図 4 発電機模擬電源による RL 負荷実験結果

Fig. 4. Experimental results of RL load with the large impedance power supply.

の発振が改善したため歪みが小さくなっている。しかし、出力線間電圧は 108[V]となり、指令通りの出力が得られているわけではない。

図 4(c)では(b)と比較し、最適入力力率制御によって入力電流位相が入力端子電圧に対して進んでいるのが確認できる。また、入力力率を進めた場合でも入出力波形は正弦波に制御されており、制御性能が悪化していないことが確認できる。出力線間電圧は約 11[V]上昇し 119[V]となり、出力電圧指令通りの電圧が得られている。これらの結果から、発電機のような出力インピーダンスの大きい電源にお

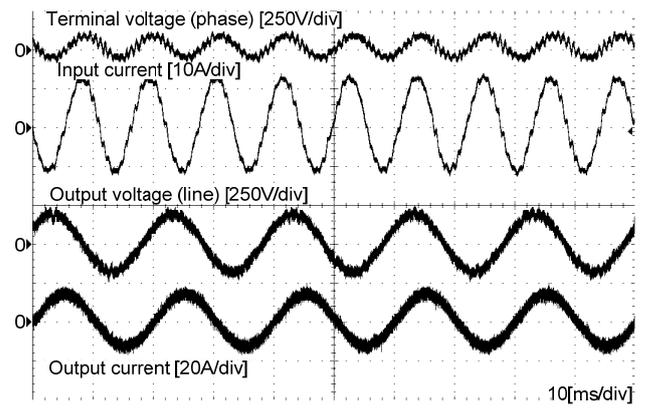


図 5 発電機による RL 負荷実験結果

Fig. 5. Experimental result with the generator power supply.

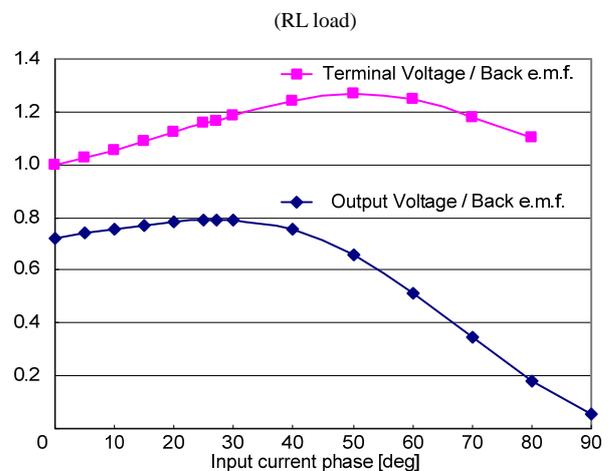


図 6 入力電流位相、端子電圧、出力電圧の関係

Fig. 6. Relationship among the input current phase, the input terminal voltage and the output voltage.

る、入力電流指令のダンピング制御と入力電流位相の最適化が有効であることが確認できる。

### 〈3・2〉 発電機による RL 負荷実験

図 5 に表 1 の条件を用いた同期発電機の定格運転時における RL 負荷の実験結果を示す。同期発電機の逆起電力は正弦波ではなく台形波であるため、発電機模擬電源と比較すると制御性能が悪化すると考えられるが、入力電流安定化制御によって入力電流は正弦波に制御されている。また、最適入力力率制御を適用することで出力電圧は 120[V]で正弦波に制御されており、出力指令通りの値が得られている。これより、入出力共に良好な結果であることが確認できる。

### 〈3・3〉 入力電流位相と端子電圧、出力電圧の関係

図 6 に発電機電源における、端子電圧を基準として入力電流位相の変化させた場合の端子電圧、出力電圧の関係を示す。入力電流位相を進めることで、発電機の逆起電力を基準とした入出力電圧比は最大となり、さらに進めると入出力電圧比が小さくなっていくのが確認できる。しかし、入力端子電圧と逆起電力の比は、出力電圧が減少する位相

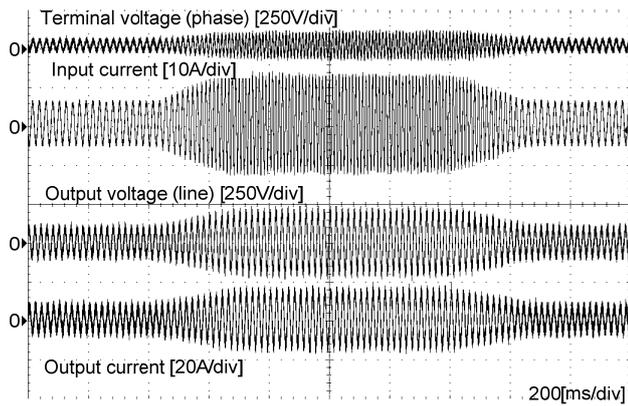


図 7 発電機の加速試験結果(RL 負荷)

Fig. 7. Acceleration result of the generator power supply with RL load.

においても上昇し、最大で 1.3 倍となっている。従って、入力電圧検出やフィルタコンデンサの耐圧には注意しなければならない。

### 〈3・4〉 発電機の加速特性実験

図 7 に表 1 の条件における発電機の加速実験結果を示す。発電機は 900[r/m]から 1800[r/m]まで加速し、その後 900[r/m]まで減速している。加減速の時間はそれぞれ 0.5[s]である。加速開始時、加速中、加速終了時共に、入出力の波形に急峻な変動は見られず良好に制御されている。また、定格回転中は図 6 と同様の結果となっている。減速時においても各波形の急峻な変動は起こらず、良好な結果が確認できる。これより、入力電流の安定化制御および最適入力力率制御が発電機の加減速運転に対しても有用であることが確認できる。なお、本実験は変調率を固定としているが、先に筆者らが提案したように<sup>(1)</sup>、入力電圧が低下した場合に変調率を上昇させることで、出力電圧を一定にできる。

## 4. 結論

本論文では、発電機を電源とするマトリックスコンバータにおいて、入力電流指令のダンピング制御と入力力率の制御を用いた、入力側の最適化制御を提案した。提案法の有用性を検証するために、発電機、および、発電機模擬電源にて以下の項目について実験を行い、検証した。

1. 発電機模擬電源による RL 負荷特性
2. 発電機電源における RL 負荷特性
3. 発電機電源における入力力率位相、逆起電力、入力端子電圧、出力電圧の関係
4. 発電機の加速試験特性

今後は、制御特性のさらなる高性能化、および発電機電源における電動機負荷特性などを検証していく予定である。なお、本研究は平成 17 年度産業技術研究助成事業の支援を受けており、関係各位に感謝の意を表します。

## 文 献

- (1) J. Haruna and J. Itoh: "Control Methods of a Matrix Converter with a Generator", SPC-06-161, IEA-06-56, (2006)  
春名順之介・伊東淳一:「マトリックスコンバータによる発電機の制御特性の検討」, SPC-06-161, IEA-06-56 (2006)
- (2) J. Haruna and J. Itoh: "A Consideration about the Voltage Utilization Ratio of the Matrix Converter Connected a Generator to the Input Side", Annual meeting of IEEJ, p161, (2007)  
春名順之介・伊東淳一:「発電機を電源とするマトリックスコンバータの電圧利用率に関する一考察」, 平成 19 年全国大会, p161 (2006)
- (3) J. Itoh, H. Kodachi, A. Odaka, I. Sato, H. Ohguchi and H. Umida: "A High Performance Control Method for the Matrix Converter Based on PWM generation of Virtual AC/DC/AC Conversion", JIASC IEEJ, pp. I-303 - I-308 (2004)  
伊東淳一・小太刀博和・小高章弘・佐藤以久也・大口英樹・海田英俊:「パルスパターンに着目した仮想 AC/DC/AC 変換方式によるマトリックスコンバータの高性能化」, 平成 16 年電気学会産業応用部門大会, pp. I-303 - I-308 (2004)
- (4) A. Odaka, I. Sato, H. Ohguchi, Y. Tamai, H. Mine and J. Itoh: "A PAM Control Method for the Matrix Converter Based on Virtual AC/DC/AC Conversion Method", Trans. IEEJ, Vol.126-D, No.9 p1185 (2006)  
小高章弘・佐藤以久也・大口英樹・玉井康寛・美根宏則・伊東淳一:「仮想 AC/DC/AC 変換方式に基づいたマトリックスコンバータの PAM 制御法」, 電学論 D, Vol.126, No.9, p.1185 (2006)
- (5) J. Oyama, X. Xia, T. Higuchi, K. Kuroki, E. Yamada and T. Koga: "VVVF On-line Control of Matrix Converter", Trans. IEEJ, Vol.116-D, No.6, p644 (1996)  
小山純・夏曉戒・樋口剛・黒木恒二・山田英二・古賀高志:「PWM サイクロコンバータの VVVF オンライン制御」, 電学論 D, Vol.116, No.6, p.644 (1996)
- (6) T. Takeshita and H. Shimada: "Matrix Converter Control Using Direct AC/AC Conversion Approach to Reduce Output Voltage Harmonics", Trans. IEEJ, Vol.126-D, No.6 p778 (2006)  
竹下降晴・島田大志:「出力電圧高調波を低減する AC/AC 直接変換方式マトリックスコンバータ制御」, 電学論 D, Vol.126, No.6 p.778 (2006)
- (7) Y. Tadano, S. Urushibata, M. Nomura, and T. Ashikaga: "A Study of Space Vector Modulation Method for Three-Phase Matrix Converter", JIASC IEEJ, pp. I-481 - I-484 (2006)  
只野裕吾・漆畑正太・野村昌克・足利正:「マトリックスコンバータの空間ベクトル変調法の検討」, 平成 18 年電気学会産業応用部門大会, pp.I-481-I-484 (2006)
- (8) J. Itoh, J. Toyosaki, and H. Ohsawa: "High performance V/f control method for PM Motor", Trans. IEEJ, Vol.122-D, No.3 p253 (2002)  
伊東淳一・豊崎次郎・大沢博:「永久磁石同期電動機の V/f 制御の高性能化」, 電学論 D, Vol.122, No.3 p.253 (2002)
- (9) I. Sato, J. Itoh, H. Ohguchi, A. Odaka, and H. Mine: "An Improvement Method of Matrix Converter Drives Under Input Voltage Disturbances", IPEC-Niigata, pp. 546 -551 (2005)
- (10) H. Nikkhajoei and M. Reza Iravani: "A Matrix Converter Based Mivro-Turbine Distributed Generation System", IEEE Trans., Vol.20, No.3 p2182 (2005)
- (11) E. Wiechmann, P. Burgos and J. Rodriguez: "Continuously Motor-Synchronized Ride-Through Capability for Matrix-Converter Adjustable-Speed Drives", IEEE Trans., Vol.49, No.2 p390 (2002)
- (12) J. Lettl: "Matrix Converter Induction Motor Drive", EPE-PEMC, pp.787-792 (2006)
- (13) F. Blaabjerg, D. Casadei, Christian Klumpner and M. Matteini: "Comparison of Two Current Modulation Strategies for Matrix Converters Under Unbalanced Input Voltage Conditions", IEEE Trans. Vol.49, No.2, p289, April 2002
- (14) P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham: "Matrix Converters: A Technology Review" IEEE Transactions on Industry Electronics Vol. 49, No. 2, pp274-288, 2002.
- (15) P. W. Wheeler, J. C. Clare and P. Zanchetta: "A Three-Phase Utility Power Supply Based on the Matrix Converter" IAS, pp. 1447-1451, 2004