

連系リアクトルインプット形マトリックスコンバータを用いた 無効電力補償装置の検討

玉田 俊介* 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

An Investigation of a Reactive Power Compensator Using a Matrix Converter with Boost Inductor

Shunsuke Tamada*, student member, Jun-ichi Itoh, member (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a power distortion and reactive power compensator using a matrix converter connected through a boost inductor (voltage type compensator). Matrix converter, which does not have a large electrolytic capacitor, can be used to achieve downsizing and long life time, compared to a conventional PWM rectifier and inverter. The voltage controls on the filter capacitor of realize voltage type compensator using matrix converter is constrained by the value of filter capacitor and active power. This paper investigates the advantages of the voltage type compensation and the condition of the voltage control. In addition, the active filter operations were demonstrated on experimental results.

キーワード: マトリックスコンバータ, 無効電力補償, アクティブフィルタ

(Keywords, Matrix converter, Reactive power compensation, Active power filter)

1. はじめに

近年, 電力需要の増加, 多様化に伴い電力品質や信頼性の向上が求められている。システムの不安定化を招く要因として, 電力需要の多様化に伴う高調波の増加などが挙げられる。また, 効率的な電力運用の観点からも適切に無効電力を制御することが求められており, 高調波補償や無効電力補償など, システムの安定化技術は益々盛んになることが予想される⁽¹⁾。

さらに, 送配電損失の低減やリスク分散, 信頼性の観点から, 電力需要家近傍に設置が可能な系統連系分散型電源システムの導入が検討されている。分散型電源にはマイクロガスタービンや風力発電設備などの, 交流電源と太陽電池や燃料電池などの直流電源があり, これらの利点を生し上手に運用することが重要である。

一方, それらの電源を系統連系するインターフェースコンバータや, アクティブフィルタのような, 系統に接続する装置は, 信頼性が高く, 小型, 高効率のものが望まれる。しかし, これまで数多く提案されてきた装置には, インバータや PWM 整流器が使われ, 直流部に大型のエネルギーバッファを有している。そのため信頼性の低下, 大型化などの問題を抱えている。

一方, 交流から交流へ直接変換するマトリックスコンバータの研究が盛んに行われておりモータドライブの分野で

実用化が進められている。マトリックスコンバータは, 交流を直接, 他の周波数の電力に変換できるため, 高効率であり, 直流部に大型の電解コンデンサが不要などの特徴を持っている。そのため従来のシステムに比べ小形で長寿命, 高効率化が期待できる。

マトリックスコンバータの利点に着目し, 瞬停補償装置やループコントローラ, アクティブフィルタへの適用検討もいくつか行われている^{(2)~(4)}。瞬停補償装置ではフライホイールと組み合わせることによって, 電力補償を行い, ループコントローラでは異なる位相のフィードに対し, 有効電力を融通し, 無効電力の調整を行っている。一方, 筆者らは, アクティブフィルタとして, マトリックスコンバータを動作させるシステムを提案し, シミュレーションおよび実験により基本的な動作を確認している⁽³⁾。マトリックスコンバータを用いた電力障害補償装置の構成法として2つのパターンが考えられる。一つ目は, 入力フィルタを介して系統に接続し, 電流形の補償器として動作させる構成, 二つ目は昇圧リアクトルを介して系統に接続し, 電圧形として動作させる構成である。これまで著者らは電流形補償装置を主に検討してきた。

本論文では, 電圧形の補償器としてマトリックスコンバータを動作させるシステム構成および制御法を提案する。まず, 電流形補償装置に対し, 電圧形補償装置の特徴を述べる。次に入力フィルタキャパシタの電圧制御条件につい

て検討を行う。キャパシタ電圧を制御することで、系統連系に必要な電圧を確保すると同時に、接続する発電機電流の制御ができる。さらに無効電力補償範囲を明確にする。加えて、シミュレーションおよび実験により、高調波補償動作を確認し、基本的な動作の確認を行ったので報告する。

2. マトリックスコンバータの性質

図 1 にマトリックスコンバータの主回路図を示す。マトリックスコンバータは、主回路に大型のエネルギーバッファを持たない。従って、マトリックスコンバータの入出力には電流源(リアクトル等の誘導性負荷)もしくは電圧源(キャパシタ)の組み合わせとなる。電流源の電流をチョッピング電圧源の電流を得るので、マトリックスコンバータの動作は電圧源側からみると、電流形変換器と等価な動作となる。一方、電圧源をチョッピングして電流源側の電圧を得るので、電流源側から見ると電圧形動作となる。

マトリックスコンバータを制御するには入力電流と出力電圧を同時に制御しなくてはならない。筆者らが提案する電力障害補償装置は、マトリックスコンバータを系統と発電機のインバータフェースコンバータとして使用しているため、電力障害補償と発電機の制御を同時にする必要があり、制御が非常に複雑化する。そこで、本論文では、入力側と出力側を個別に検討しやすい仮想 AC/DC/AC 方式を適用する⁽⁶⁾。

図 2 は仮想 AC/DC/AC 方式の仮想 PWM 整流器/インバータモデルである。仮想 AC/DC/AC 方式は「あるスイッチング状態における変換器の入出力の接続状態が同一であれば、変換器の構成にかかわらず入出力波形は同一である」ことに着目し、マトリックスコンバータのスイッチングパターンを生成する。仮想モデルの入力電圧を $[v_r, v_s, v_t]$ とし、出力電圧を $[v_u, v_v, v_w]$ とした場合、入出力の電圧関係はスイッチング関数行列で表すと、(1)式となる。スイッチング関数はスイッチ S_n のスイッチング関数を s_n とし、スイッチオンで $s_n=1$ 、スイッチオフで $s_n=0$ と定義する。

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{up} & s_{un} \\ s_{vp} & s_{vn} \\ s_{wp} & s_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{rp} & s_{sp} & s_{tp} \\ s_{rn} & s_{sn} & s_{tn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_s \\ v_t \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

仮想モデルと同様に図 1 からマトリックスコンバータの入出力関係は(2)式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{ru} & s_{su} & s_{tu} \\ s_{rv} & s_{sv} & s_{tv} \\ s_{rw} & s_{sw} & s_{tw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_s \\ v_t \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

すなわち、マトリックスコンバータのスイッチング行列と、AC/DC/AC 変換器のスイッチング行列が等しくなれば入出力特性は同一となる。例えば、図 2 で示した AC/DC/AC 変換器において s_{rp} 、 s_{tn} および s_{up} 、 s_{vp} 、 s_{wn} がオンした場合、r 相と u・v 相、t 相と w 相が接続される。仮想 AC/DC/AC 変換方式で制御を行った場合、マトリックスコンバータの

スイッチ状態は S_{ru} 、 S_{rv} 、 S_{tw} がオンとなり r 相と u・v 相、t 相と w 相が同様に接続され、AC/DC/AC 変換器と入出力接続状態は全く同一となる。つまり、(1)式の右辺を展開し、(2)式と対応させることでマトリックスコンバータのスイッチングパターンが得られる。以上から、マトリックスコンバータの入出力特性は電流形変換器と電圧形インバータからなる仮想変換器で検討できる。

3. システム構成

〈3・1〉電流源側で補償する構成⁽⁸⁾

マトリックスコンバータで電力障害補償装置を構成する場合、電流源側と電圧源側、どちらを系統に接続するかで 2 種類の構成法が考えられる。

図 3(a)にマトリックスコンバータの電流源側を系統に接続した場合のシステム構成図を示す。この構成は、マトリックスコンバータの電流源側で系統の電力障害補償を行い、電圧源側で発電機の制御を行う。電流源側は電流形整流器と見なせるため、オープンループで高速に電流制御でき、比較的容易に障害補償が可能である。

しかし、入力電流は、電圧源側の電流をスイッチングすることにより得られる点に注意が必要である。言い換えれば、仮想整流器の直流リンク電流をスイッチングして波形を得ることになる。つまり、入力側の電流を生成するには直流リンク電流が必要であり、直流リンク電流の大きさは、有効電力に比例する。よって、電圧源側に接続された発電

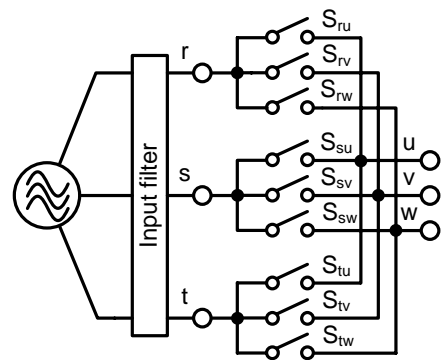


Fig.1. Main circuit of the matrix converter.

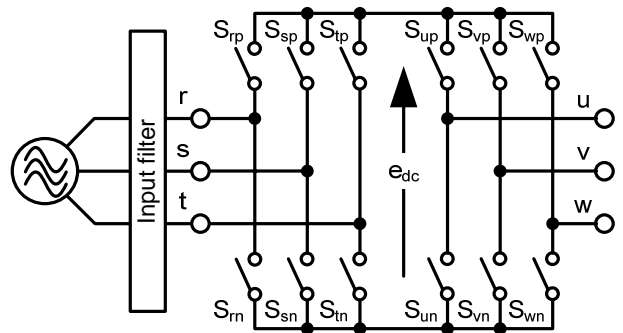


Fig.2. Main circuit of the AC/DC/AC converter.

機を力行，もしくは回生を行い有効電力の授受を行わなければ仮想直流リンク電流ゼロとなる，電力障害補償が行うことができない。

図 3(b)に電流源側を接続した場合の等価回路を示す。等価回路は，系統の電圧源，入力フィルタである LC フィルタ，そして仮想電流形整流器によって制御される電流源で表せる。電流源側の電流は，PWM 波形となるため，系統へ高調波の流入を防ぐため入力フィルタが必要となる。電圧源側を用いて補償した場合の欠点は，入力フィルタにより，マトリクスコンバータの電流源側の電流に遅れが生じ，補償電流指令と実際に注入する電流に遅れが生じること，また LC フィルタにより入力電流が共振し，不安定になることが挙げられる。だが上記のような問題は，フィードフォワード制御，ダンピング制御⁶⁾により抑制可能である。

一方，この構成の場合の利点は，発電機の電圧を昇圧できるため，発電機から系統へ，比較的容易に電力回生可能であることである。従ってマイクロガスタービンや，エンジン発電機などの補助電源などと組み合わせ，常に有効電力をやりとりしながら，電力障害補償を行うシステムには適した構成であると言える。

〈3・2〉電圧源側で補償する構成

図 4(a)にマトリクスコンバータの電圧源側を系統に接続した場合のシステム構成を示す。図 4(a)は前節の構成とは逆に，マトリクスコンバータの電圧源側で系統の電力障害補償を行い，電流源側で発電機の制御を行う。

図 4(c)に電圧源側を接続した構成の等価回路を示す。等価回路は，系統の電圧源，連系リアクトル，そして仮想電圧形インバータを意味する電圧源で表せる。系統側の電流は，連系リアクトルの両端の電位差に依存するため，マトリッ

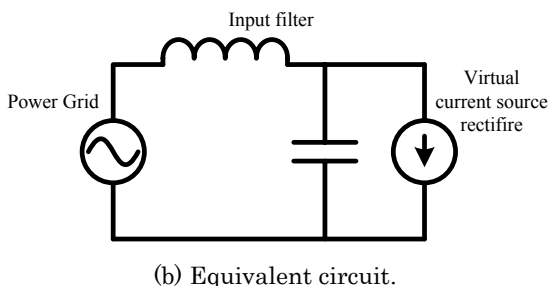
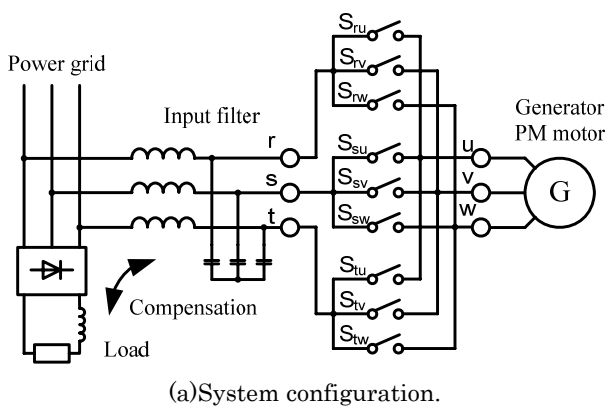


Fig.3. System configuration of the current source type.

クスコンバータの電圧源側の電流を制御するには，フィードバック制御が必要となり，前述の構成と比べ，制御が複雑化する。だが，フィードバック制御を適用することによって，外乱に強くなり補償能力が向上する利点もある。

系統側の電流制御を行うには，仮想直流リンク電圧は系統線間電圧最大値よりも高くなくてはならない。図 4(a)では，発電機側は電流形変換器になるので，キャパシタ電圧により仮想直流リンク電圧が決定される。そのため系統より高い電圧が発電機側のキャパシタに必要となり，キャパシタ電圧の維持が課題となる。

4. キャパシタ電圧制御条件

電圧源側で補償を行う構成では，発電機側キャパシタ電圧制御を行い，系統連系に必要な電圧を確保すると同時に，接続する発電機電流の制御を行う。前述のようにマトリクスコンバータは，電流形変換器と電圧形インバータからなる仮想変換器に置き換えることができるため，図 4(a)の補償装置は，図 4(b)の回路で検討できる。

提案する構成では，電流源側に交流発電機を接続するた

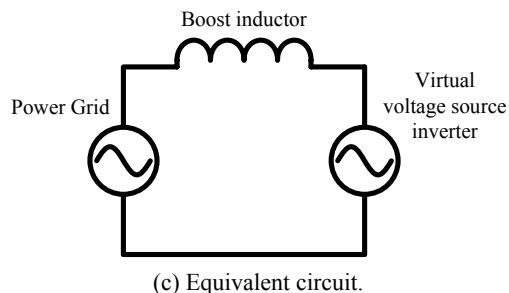
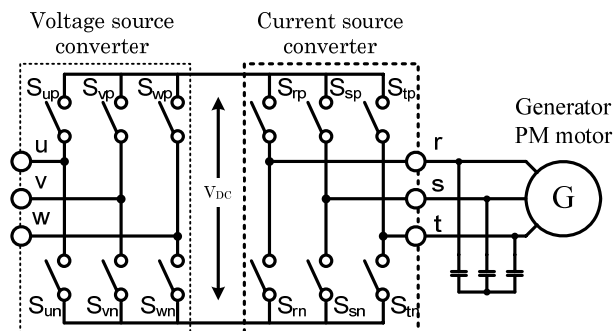
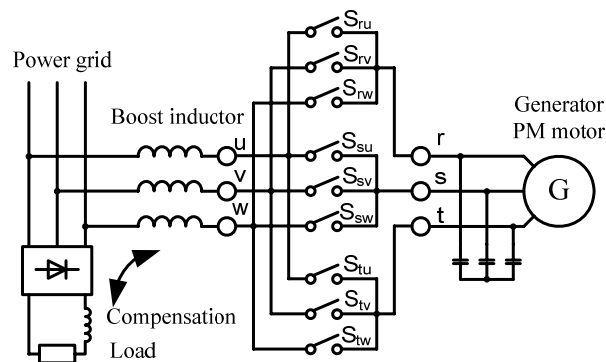


Fig.4. System configuration of the voltage source type.

め、キャパシタ電圧を所望の周波数の電圧に制御する必要がある。キャパシタ電圧を交流指令に追従させるためには、有効電力に相当する電流に加え、キャパシタ電流を供給する必要がある。このとき、キャパシタ電流は(3)式で求められる。

$$i_c = jv_{uref} \omega C \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 v_{uref} はキャパシタ電圧指令、 C はフィルタキャパシタの静電容量である。

キャパシタ電流を流すことで、指令通りの電圧を得ることが可能となるが、キャパシタ電流のみしか供給しないと、有効電力がゼロとなり、仮想インバータの直流電圧はゼロとなる。だが、Fig.4(b)のシステムでは、電圧形整流器により系統連系を行うために、系統電圧以上の直流電圧が必要となる。よって、本システムでは、電流形インバータから無効電力だけでなく、直流電圧を維持するために、有効電力を流さなくてはならない。なお、発電機の起電力等があり、コンデンサの電圧維持を制御だけで行わない場合は、有効電力は不要である。

そこで、図 5(a)に示す電流形インバータを用いて必要最低限の有効電力について考察をする。まず、電流形インバータにおいてキャパシタ電圧と直流電圧の関係は(4)式で与えられる。

$$V_{dc_min} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{uvref_max} \cos \theta_{out} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 V_{dc_min} は仮想直流リンク電圧最小値、 V_{uvref_max} はキャパシタ線間電圧最大値、 $\cos \theta_{out}$ は電流形インバータ出力力率である。

直流電圧 V_{dc_min} は系統電圧以上であることから決定できるため、キャパシタ電圧指令の大きさが決定すれば、整流器の入力力率、即ち、負荷力率の条件が決まる。図 5(b)にインバータに接続した RC 並列負荷のベクトル図を示す。ベクトル図より電流形インバータ出力電流最大値は次式で与えられる。

$$I_{out_max} = \frac{I_{c_max}}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_{out}}} \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 I_{out_max} はインバータ出力電流最大値、 I_{c_max} はキャパシタ電流最大値である。

(3)、(4)式を(5)式に代入し、最終的な出力電流最大値は(6)式にて求められる。

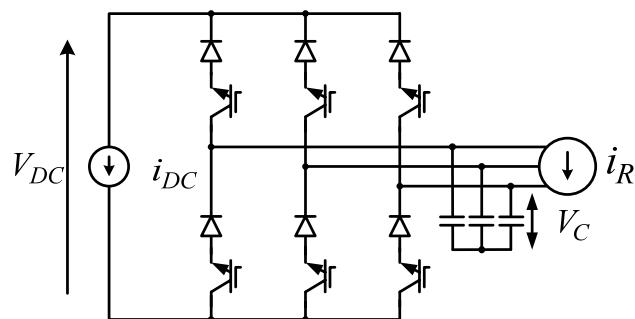
$$I_{out_max} = \frac{V_{u_max} \omega C}{\sqrt{1 - \left(\frac{2V_{dc_min}}{3V_{u_max}}\right)^2}} \dots\dots\dots(6)$$

電流形インバータなので、出力電流最大値と直流電流最大値が等しくなるため、電流形インバータの有効電力 P_{c_inv} は次式となる。

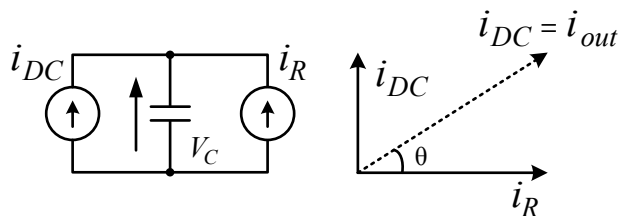
$$P_{c_inv} = V_{dc_min} \cdot I_{dc_max} = V_{dc_min} \frac{V_{u_max} \omega C}{\sqrt{1 - \left(\frac{2V_{dc_min}}{3V_{u_max}}\right)^2}} \quad (7)$$

よって、直流電圧を系統電圧以上に維持するには、(7)式に示す有効電力が必要であることがわかる。この有効電力は、キャパシタ電圧指令の大きさ、周波数、直流電圧、キャパシタ電圧周波数、静電容量に依存する。

図 6 にキャパシタ容量 13uF、直流電圧 346(=200sqrt(2)×sqrt(3)/2)、そしてキャパシタ電圧周波数を 20Hz、40Hz、60Hz としたときのキャパシタ電圧振幅(最大値)と有効電力の関係を示す。仮想直流リンク電圧とキャパシタ電圧の比が 1 に近いほど、力率を改善するために大きな有効電力が必要になる。



(a) A current source converter



(b) Equivalent circuit of the current source converter

Fig.5. Current source converter.

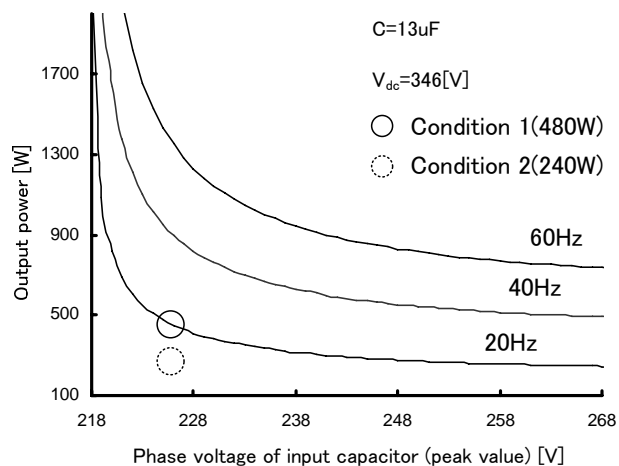


Fig.6 Relation between the output power and the phase voltage.

5. 無効電力補償範囲

本構成では、無効電力補償を行う際、連系リアクトルの両端の電位差によって電流制御を行うため、無効電力補償範囲は、マトリックスコンバータ出力電圧に依存する。

無効電力補償時には、系統側から流入する有効電力は変換器の損失分のみであることから、系統電圧 V_s と変換器電圧 V_{conv} は同相とみなせる。よって連系リアクトルのインダクタンスを L とすると、リアクトル電流の虚数成分 I_q は次式で与えられる。

$$I_q = \frac{V_{conv} - V_s}{\omega L} \dots\dots\dots(8)$$

一方、マトリックスコンバータの電圧利用率は $\sqrt{3}/2$ であるためマトリックスコンバータから出力できる最大電圧 V_{conv} は、(4)式で求まる仮想直流リンク電圧となる。

無効電力補償時の、マトリックスコンバータの系統側の無効電力量を無効電力補償量 Q_{load} とすると、出力電圧と無効電力補償量の関係は次式で与えられる。

$$|Q_{load}| = \sqrt{3}V_s \frac{\sqrt{\frac{3}{4}V_{out}^2 \cos^2 \theta_{out} - V_s^2}}{\omega L} \dots\dots\dots(9)$$

ただし、 L は連系インダクタンス、 $V_s < \frac{\sqrt{3}}{2}V_{out}$

図 7 に(9)式で求められる無効電力補償範囲を示す。実際には、リアクトルや主回路の電流容量に制限を受けるが、出力電圧が高いほど、入力電流の制御範囲が広がるため、補償範囲も広がる。

6. シミュレーション結果

電圧源側を系統に接続した、図 4(b)のインダイレクトマトリックスコンバータ構成について、シミュレーションにて動作検証した。系統電圧 200V, 50Hz, 連系リアクトル 3mH, 静電容量 13 μ F, 電圧指令 270V, 20Hz の条件でシミュレーションを行った。

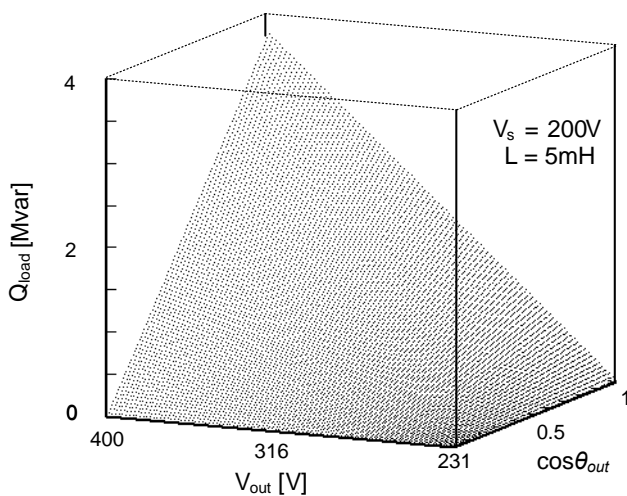


Fig.7 Compensation range of reactive power (Voltage source type)

図 8 は、系統に負荷として RL 負荷($R=25 \Omega$, $L=50mH$, $\cos \phi=0.85$)を接続したときのシミュレーション結果である。なお、図 6 で示した Condition1 の条件となるように 150 Ω の抵抗をキャパシタに並列に接続した。キャパシタ電圧が良好に制御でき、また電源力率が 1 に改善されている。よって、キャパシタ電圧制御と、無効電力補償を同時に実現しているため、(7) 式の妥当性が確認できる。

図 9 は、図 6 に示す Condition2 の条件となるように 600 Ω の抵抗を接続した場合のシミュレーションである。この条件では、電流を制御するために必要な仮想直流リンク電圧を確保できないため、マトリックスコンバータの系統側の電流が大きく歪んでいる。

7. 実験結果

本論文では、電圧源側を系統に接続した構成について高調波補償の実験を行い検証した。系統電圧を 100V, 系統に負荷としてダイオード整流器(75 Ω , 200mH)を接続した。また、発電機を接続した状態を仮定し、キャパシタの代わりに 200V の変圧器を接続した。

図 10 に、有効電力を系統からマトリックスコンバータに流した(100W)場合の高調波補償の実験結果を示す。系統電流歪率は、23.7%から 7.84%に改善し、良好に高調波補償が行われている。

図 11 に、マトリックスコンバータから系統に電力を流した場合(-100W)の高調波補償の実験結果を示す。パワーフローを反転させた場合にも図 10 同様高調波補償が行われている。

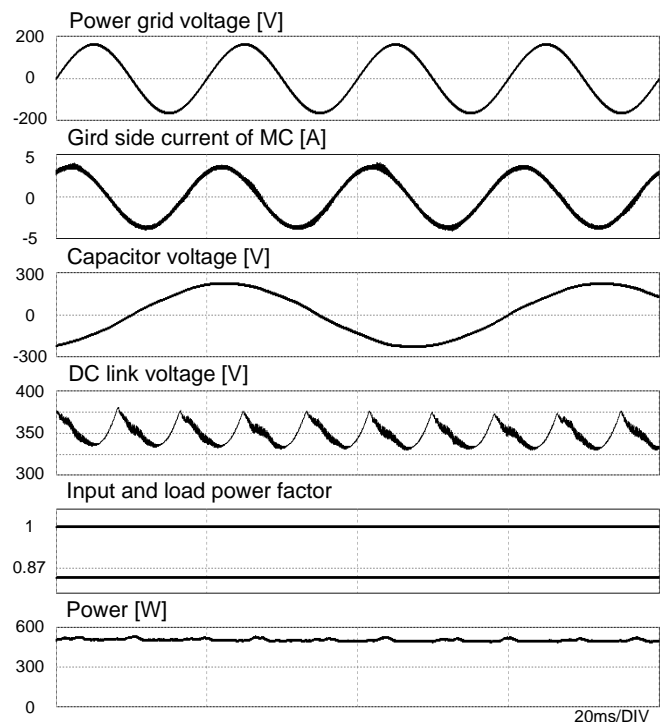


Fig.8 Simulation results of reactive power compensation (Condition 1)

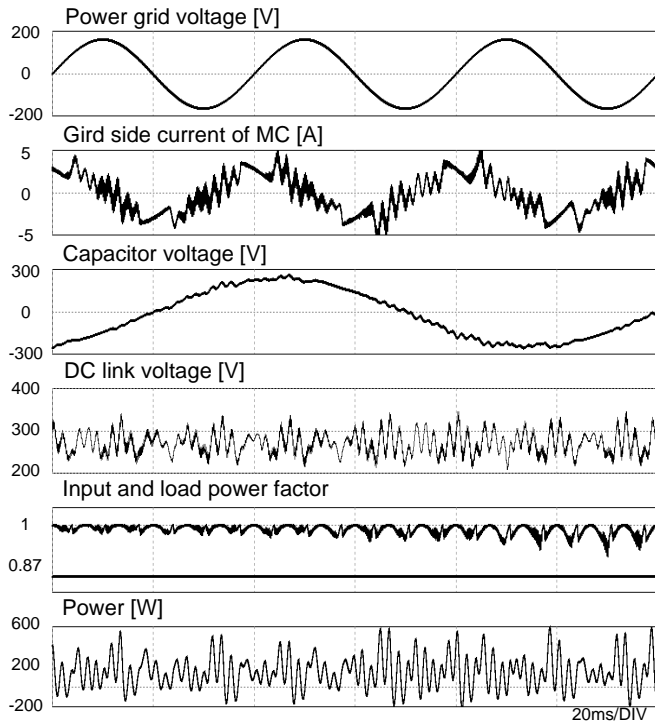


Fig.9 Simulation results of the reactive power compensation (Condition 2)

8. まとめ

本論文では、マトリックスコンバータの電圧源側を系統に接続する構成の電力障害補償装置のシステム構成を提案し、シミュレーションおよび実験で基本的な動作を確認した。また、無効電力補償範囲および、系統連系の電圧維持と発電機連系を行うために、電流源側に接続するキャパシタの電圧制御条件について検証を行った。キャパシタ電圧制御条件と無効電力補償範囲について検証を行った。以下にその結論を示す。

- (1) 電圧源を系統に接続する構成においても、無効電力補償が行える。
- (2) 本論文で示した条件下で、電流源側キャパシタの電圧制御と電圧源側の無効電力補償を同時に実現できる。

本提案装置は、マトリックスコンバータの利点を活かし、従来の PWM 整流器とインバータを用いた系統バックアップシステムと比較し、高効率、長寿命、小形化を実現できる可能性がある。

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) Yasuhiro Tamai, Sunt Srianthumrong, Hirofumi Akagi: "Comparisons Between a Hybrid Shunt Active Filter and a Pure Shunt Active Filter", IEEJ Trans. IA, Vol.124, No.5, 2004
玉井 康寛, Sunt Srianthumrong, 赤木 泰文: "ハイブリッドフィルタとアクティブフィルタの比較 検討", 電学論D, Vol. 124, No. 5, pp.494-502 (2004-5)

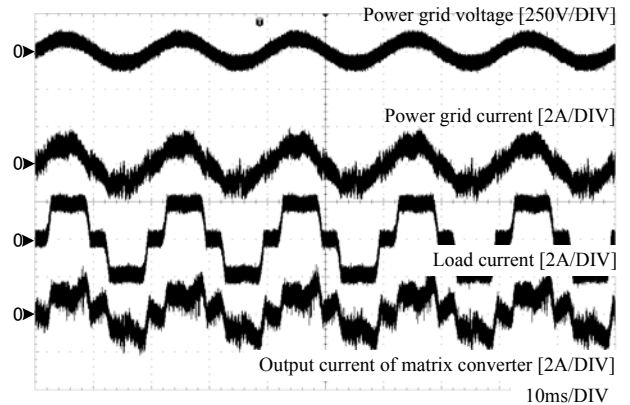


Fig.10 Experimental results with the harmonics current compensation (Power flow : MC to power grid)

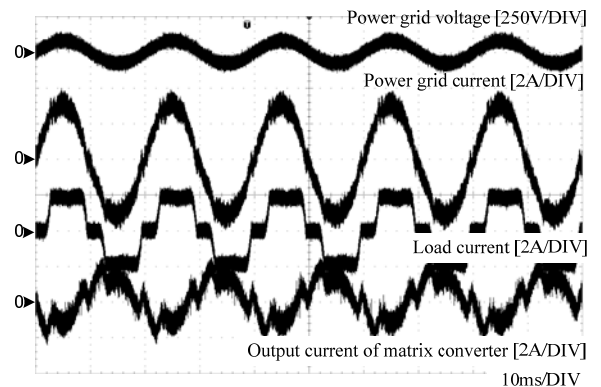


Fig.11 Experimental result with the harmonics current compensation (Power flow : Power grid to MC)

- (2) Bingsen Wang, Giri Venkataramanan : "Dynamic Voltage Restorer Utilizing a Matrix Converter and Flywheel Energy Storage", IAS Annual Meeting, 2007
- (3) Shunsuke Tamada, Jun-ichi Itoh: "A Proposal of a Power Distortion Compensator using a Matrix Converter", IEEJ Trans. IA, Vol.128, No7, 2008
玉田 俊介, 伊東 淳一: 「マトリックスコンバータによる電力障害補償の提案」, 電学論 D, 128 7, pp.933-939(2008-7)
- (4) Yousuke Maki, Toshifumi Ise, Yu-shi Miura: "Control Method of Loop Power Flow Controller Using Matrix Converter", Annual Conference of IEEJ, 4-054, 2005
牧洋祐, 伊勢敏史, 三浦友史: 「マトリックスコンバータを用いたループコントローラの制御法」平成 17 年電気学会全国大会, 4-054
- (5) Jun-ichi Itoh, Ikuya Sato, Hideki Ohguchi, Kazuhisa Sato, Akihiro Odaka, Naoya Eguchi: "A Control Method for the Matrix Converter Based on Virtual AC/DC/AC Conversion Using Carrier Comparison Method" IEEJ Trans. IA, Vol.124, No.5 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 AC/DC/AC 変換方式によるマトリックスコンバータの制御法」, 電学論 D, 124 巻 5 号, 457-463
- (6) Ikuya Satou, Jun-ichi Itoh, Hideki Ohguchi, Akihiro Odaka, Hironori Mine : "An Improvement Method of Matrix Converter Drives Under Input Voltage Disturbances" IPEC Niigata, 546-551, 2005