

マトリックスコンバータを使った電力障害補償装置の システム構成の比較

玉田 俊介* 伊東 淳一（長岡技術科学大学）

A Comparison of a System Configuration of a Power Distortion Compensator using a Matrix Converter.

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

Recently, power quality compensators are noticed with increase of electricity demand. However, conventional power quality compensators require a large electrolytic capacitor in the dc link part of the equipment. The use of a large capacitor hinders downsizing efforts and the lowering of equipment costs.

This paper proposes a power distortion compensator using a matrix converter. This compensator using a matrix converter can have two constructions to be connected through an input filter(current type) or boost inductor(voltage type). Simulation and experimental results compare these two construction's advantages and disadvantages. As a result, the voltage type shines in the harmonics compensation, and the current type shines in the power interruption compensation.

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・信頼性に対する要求が高まっている。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があり，環境問題の観点から新エネルギーとして注目されている。

アクティブフィルタや分散型電源のように，システムの電力や高調波を補償する装置は，高い信頼性を持ち，メンテナンスフリーであることが望ましい。また，前述のような発電機を主体とするバックアップ電源を接続する際には，系統連系用に電力変換器が必要である。これまで数多く提案されてきた系統補償装置の多くは，インバータや PWM 整流器の様な 6 アームのブリッジ回路が使われている。従来のシステムでは，初期充電回路，電解コンデンサが必要となり，信頼性の低下，大型化，高コストなどの問題を抱え

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直流部に大型の電解コンデンサが不要なため，従来の直流部を有するシステムに比べ小形で長寿命，高効率化をはかることができる。

マトリックスコンバータの利点に着目し，瞬停補償装置やアクティブフィルタ，STATCOM などの電力障害補償装置への適用検討もいくつか行われている^{(2)~(3)}。マトリックスコンバータを使った電力障害補償装置の構成法には 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。筆者らは，電流形として，マトリックスコンバータを動作させる電力障害補償装置を提案し，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⁾。

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方法を提案する。また，2 つの構成について解析と比較を行い，電力障害補償を行う上での得失を明らかにする。加えて，シミュレーションおよび実験により，それぞれの構成について無効電力および高調波補償の動作

を確認し、検証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、主回路にエネルギーバッファが不要な変換器であるため、入力短絡、出力端子が開放しないようにスイッチングを行う必要がある。そのためマトリックスコンバータは、高い入力インピーダンスと低い出力インピーダンスという特徴を持ち、入力側は電流源、出力側は電圧源とみなせる。なお、本論文ではマトリックスコンバータの入力側(入力フィルタ側)を電流源側、出力側(誘導性負荷側)を電圧源側と定義する。

AC/AC 直接変換器であ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する必要がある。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⁽⁴⁾。

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

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、電流形整流器の入力電流は、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という点に注意が必要である。仮想 PWM 整流器/インバータは電流形整流器と電圧形インバータで構成されるため、仮想直流リンク電流は仮想電圧形インバータの有効電力に比例する。すなわち、電圧源側に接続された発電機を力行、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は維持できないため、電力障害補償が行えない。

図 3(b)に電流源側を接続した場合の等価回路を示す。等

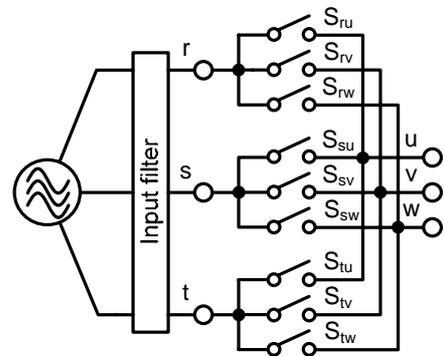


Fig.1. A matrix converter.

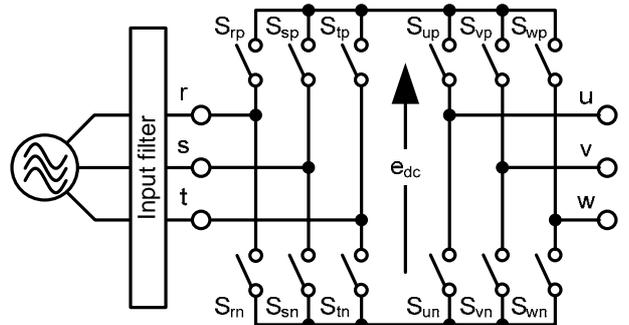


Fig.2. An AC/DC/AC converter.

価回路は、系統の電圧源、入力フィルタであるLCフィルタ、そしてマトリクスコンバータの仮想電流形整流器の電流源で表せる。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、発電機がある電圧源側から系統の電流源側へ、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。

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(b)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、そしてマトリクスコンバータの仮想電圧形インバータの電圧源で表せる。系統側に流れ込む電流は、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。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しなくてはならない。図4(a)では、発電機側は電流形変換器になるので、発電機の電圧により仮想直流リンク電圧が決定され、力行または回生することなく電圧を確保できる。そのためマトリクスコンバータの入出力間で有効電力の授受なしで無効電力および高調波補償が可能となる。しかし、常に系統より高い電圧が発電機側に必要となるため、限られた速度範囲でしか発電機を制御できない。

4. 補償範囲

4・1 電流源側で補償する場合の補償範囲

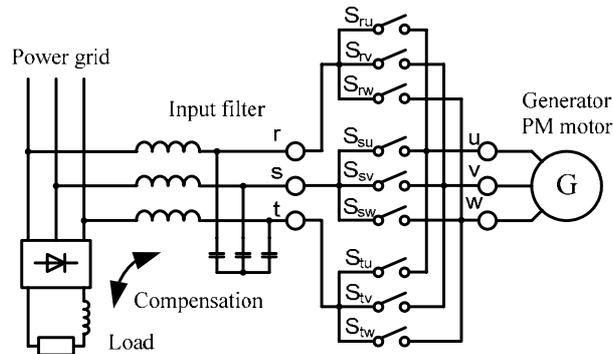
本構成では、無効電力補償を行う際、マトリクスコンバータから有効電力、そして、逆相の無効電力を出力するため、マトリクスコンバータの入力力率が悪化し、仮想直流リンク電圧が低下するため電圧利用率が低下する。その結果、出力電圧が低下し、出力側に接続された発電機を制御できなくなる⁶⁾。よって無効電力補償を行う際、補償する負荷の容量と出力電圧(発電機の回転数)を適切に選択す

る必要がある。

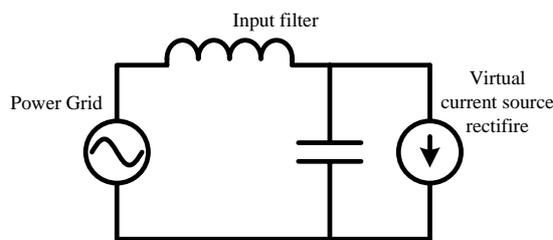
系統電圧 V_s 、マトリクスコンバータの入力力率を $\cos \theta_{in}$ とすると最大出力電圧の実効値 V_{out} は次式で与えられる。

$$V_{out} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_s \cdot \cos \theta_{in} \dots \dots \dots (3)$$

マトリクスコンバータの入力電流は仮想直流リンク電流に支配されるため、出力電流の大きさと力率に依存する。

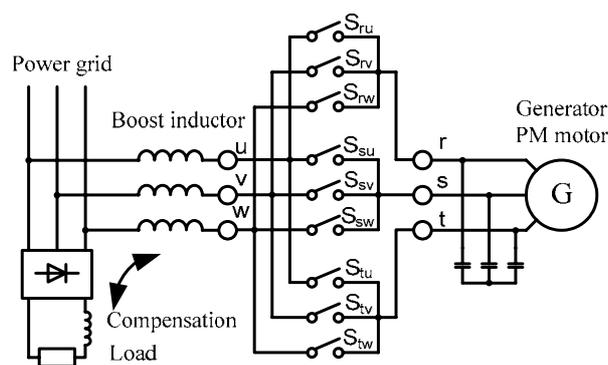


(a) A system configuration.

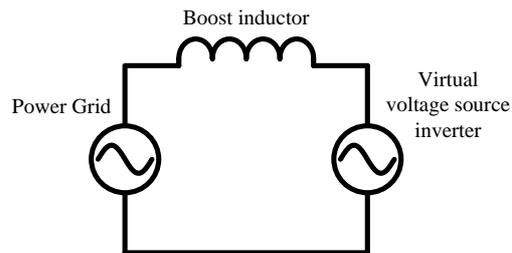


(b) Equivalent circuit.

Fig.3. System configuration of current source type.



(a) System configuration.



(b) Equivalent circuit.

Fig.4. System configuration of voltage source type.

よって無効電力補償時の最大入力皮相電力は、系統電圧 V_s 、マトリックスコンバータの出力電流 I_{out} 、出力力率 $\cos \theta_{out}$ を用いて次式で表せる。

$$S_{in} = \frac{3}{2} \cdot V_s \cdot I_{out} \cdot \cos \theta_{out} \dots\dots\dots (4)$$

従って、マトリックスコンバータの入力力率は(4)式で与えられる皮相電力と、補償対象の無効電力量 Q_{load} から、次式で与えられる。

$$\cos \theta_{in} = \frac{\sqrt{S_{in}^2 - Q_{load}^2}}{S_{in}}$$

$$= \frac{\sqrt{(\frac{3}{2} \cdot V_s \cdot I_{out} \cdot \cos \theta_{out})^2 - Q_{load}^2}}{\frac{3}{2} \cdot V_s \cdot I_{out} \cdot \cos \theta_{out}} \dots\dots\dots (5)$$

すなわち(3)、(5)式より出力電圧と補償する無効電力量の関係は次式で与えられる。

$$|Q_{load}| = \sqrt{3} \cdot I_{out} \cdot \cos \theta_{out} \cdot \sqrt{(\frac{\sqrt{3}}{2} V_s + V_{out})(\frac{\sqrt{3}}{2} V_s - V_{out})} \dots\dots\dots (6)$$

図 5 に(6)式で求められる無効電力補償範囲を示す。本システム構成の無効電力補償能力は、出力電圧（発電機）が低く、かつ出力力率が高い領域で高くなることわかる。

4.2 電流源側で補償する場合の補償範囲

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、先ほどの構成とは異なり、発電機側の有効電力を必要しない。

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。

$$I_q = \frac{V_{conv} - V_s}{\omega L} \dots\dots\dots (7)$$

一方、マトリックスコンバータの電圧利用率は $3/2$ であ

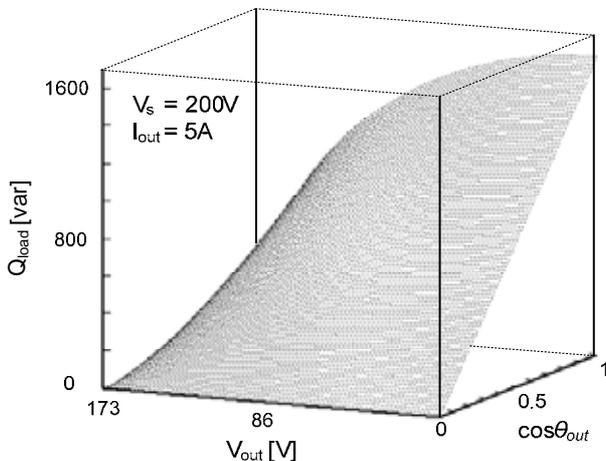


Fig. 5. Compensation range of reactive power (current source type).

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、発電機電圧を V_{out} とし、発電機の力率を $\cos \theta_{out}$ とすれば、次式となる。

$$V_{conv} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_{out} \cos \theta_{out} \dots\dots\dots (8)$$

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、 $V_s < \frac{\sqrt{3}}{2} V_{out}$ 。

図 6 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。

5. シミュレーション結果

2つの構成について高調波補償のシミュレーションにて

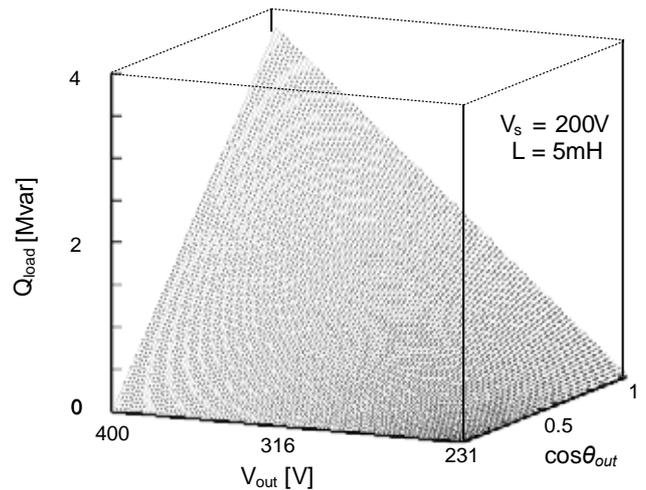


Fig. 6. Compensation range of reactive power (voltage source type).

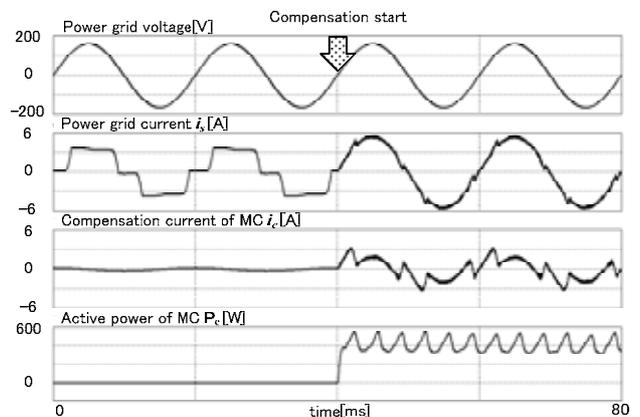


Fig. 7. Simulation results of reactive power compensation.

検証した。系統電圧 200V, 周波数 50Hz, 入力フィルタのカットオフ周波数 1.4kHz, 制動係数 0.2, キャリア周波数 10kHz, ダイオード整流器負荷(R=75, L=200mH)の条件でシミュレーションを行った。

図 7 に電流源側を系統に接続する構成における高調波補償のシミュレーション結果を示す。負荷の電力の約 3 割を発電機から供給している。系統電流はほぼ正弦波となっており, 高調波補償の効果が確認できるが, フィルタの遅れ

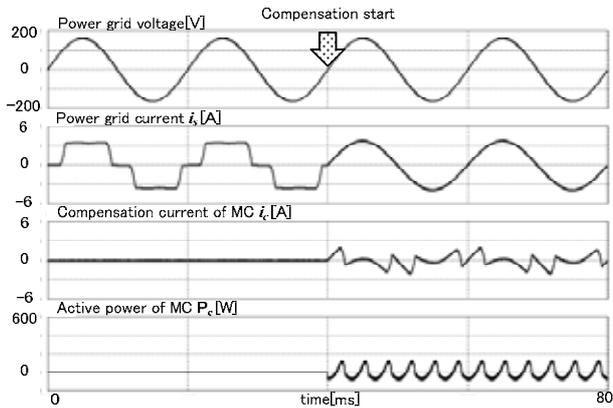
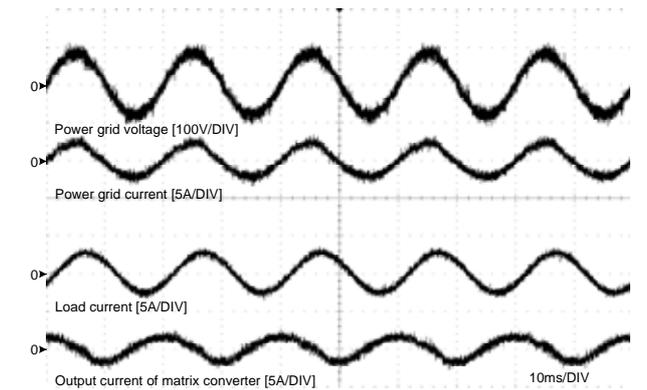
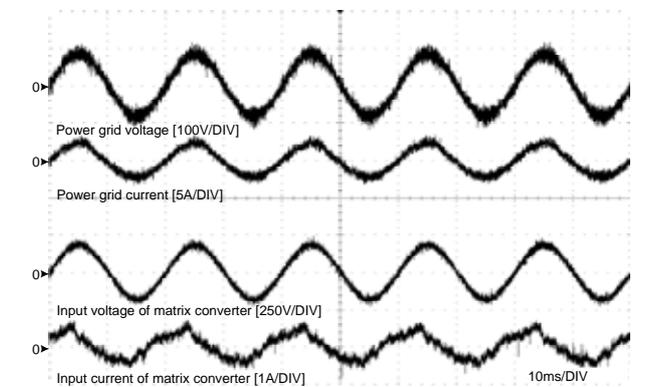


Fig. 8. Simulation results of harmonic current compensation.



(a) Waveform of power grid voltage and current with load current and MC output current.



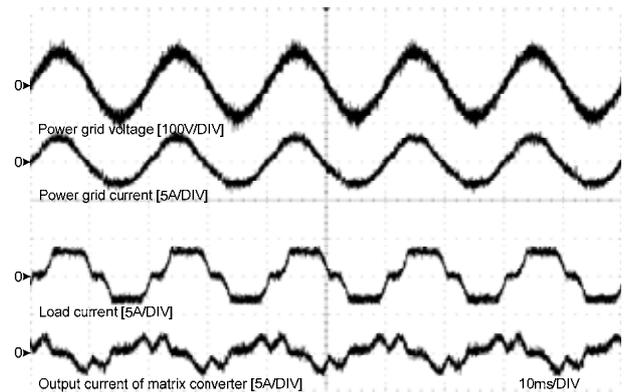
(b) Waveform of power grid voltage and current with MC input voltage and current
Fig. 9. Experimental result with reactive power compensation

により系統電流に歪みが現れている。

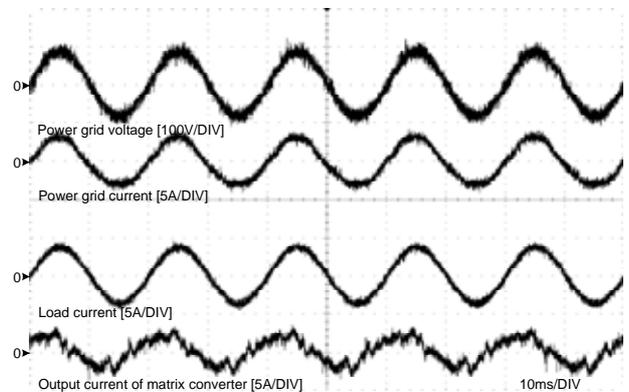
図 8 に電圧源側を系統に接続する構成における高調波補償のシミュレーション結果を示す。系統電流は, 正弦波となっており, 良好な補償結果が得られている。またマトリックスコンバータからは, 高調波有効電力分のみが系統に授受されていることが確認できる。

6. 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無効電力及び高調波補償の実験を行い検証した。系統電圧 100V, 50Hz, 連系リアクトル 3mH, 発電機を絶縁トランスで模擬し (200V, 50Hz), 入力フィルタのカットオフ周波



(a) Waveform of power grid voltage and current with load current and MC output current.



(b) Waveform of power grid voltage and current with MC input voltage and current.

Fig. 10. Experimental result with harmonics compensation

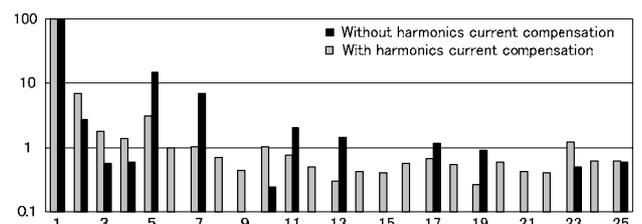


Fig. 11. Harmonics analysis result of power grid current.

数 1.6kHz, 制動係数 0.2 の条件で実験を行った。

図 9(a)は,系統に負荷として RL 負荷($R=25 \Omega, L=50\text{mH}$, $\cos \phi=0.72$)を接続したときの,系統電圧,系統電流,負荷電流,マトリックスコンバータの出力電流波形である。系統力率は 0.98 に改善し,無効電力補償が行われていることが確認できる。図 9(b)は,系統電圧,系統電流,マトリックスコンバータの入力電圧,入力電流を示したものである。無効電力補償時のマトリックスコンバータの入力電圧と入力電流を見ると,位相が 90 度ずれており,ほとんど有効電力が流れ込んでいないことわかる。よって本構成の特徴である,有効電力なしで無効電力成分を補償できることが確認できた。なお,若干の有効電力は変換器の損失成分である。

図 10(a)に,系統に負荷としてダイオード整流器負荷($R=75 \Omega, L=200\text{mH}$)を接続したときの,系統電圧,系統電流,負荷電流,マトリックスコンバータの出力電流波形を示す。負荷電流は大きく歪んでいるが,系統電流では,歪みは大幅に減少し,正弦波状になっている。THD は 17.0% から 8.94% に改善できた。また図 10(b)の波形を見るとマトリックスコンバータに有効電力がほとんど流入していないことが確認できる。

図 11 に,補償前と補償後の系統電流の高調波解析結果を示す。特に 5 次,7 次成分で補償後に振幅が下がっており,アクティブフィルタとして効果が出ていることがわかる。

7. 両構成の得失比較

表 1 にマトリックスコンバータを用いた電力障害補償装置の各システム構成別の無効電力補償,瞬断補償特性について示す。

電流源側を系統に接続する構成を電流形,電圧源側を系統に接続する構成を電圧形とした。またマトリックスコンバータは,スイッチングパルスを入れ替えることで,容易に電流源側と電圧源側を切り替えることが可能であるため,主回路構成を工夫することで,系統に接続する側を状況に応じて電流源や電圧源に切り替える複合形も構成することが可能である。

電流形は,発電機電圧を昇圧することが可能なため,瞬断補償能力にはすぐれているが,補償範囲や補償能力の点から無効電力補償能力は劣る。一方電圧形は,リアクトルの電位差により電流制御を行うため,良好な無効電力補償結果が得られた。だが,系統より高い発電機電圧が必要であるため,瞬断補償には不向きである。よって,状況により電圧源,電流源を切り替え,両方式の利点を生かした複合型電力障害補償装置が,最良の構成であると言える。

Table1. Feature of each system configuration.

	制御性	補償範囲	無効電力補償	瞬断補償
電流形				○
電圧形	○	○	○	

8. まとめ

本論文では,マトリックスコンバータを用いた電力障害補償装置(無効電力補償・高調波補償・瞬断補償)の 2 つのシステム構成について,シミュレーションおよび実験で基本的な動作を確認し,検証を行った。また検証結果から電力障害補償能力について特性比較を行った。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,高調波および無効電力補償が行える。
- (2)電流源を系統に接続する構成は,瞬断補償に優れる。
- (3)電圧源を系統に接続する構成は,無効電力補償に優れる。

以上のことから,異なる特性をもつ 2 つの方式において電力障害補償が行えることが確認できた。よって両者の利点を生かす複合システムを構築することが可能であるといえる。

複合型は,従来の補償装置と比較し,高効率,長寿命,小形化が可能になるマトリックスコンバータを用いた電力障害補償装置の,より広い範囲での運用を可能とし,また補償能力の向上も期待できる。

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)
- (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: "Power Distortion Compensator using a Matrix Converter", JIASC2007 1-04-1
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」,平成 17 年電気学会産業応用大会, 1-04-1
- (4) 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
- (5) 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
- (6) Junnosuke Haruna, Jun-ichi Itoh "A Consideration about the Voltage Utilization Ratio of the Matrix Converter Connected a Generator to the Input Side", Annual Conference of IEEJ, No.4-102, 2007(in Japanese)
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 年電気学会全国大会, 4-102