

マトリックスコンバータを用いた 無効電力および高調波補償

学生員 玉田 俊介* 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Reactive Power and Harmonics Compensator using a Matrix Converter

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

This paper proposes a static var compensator and active filter with a matrix converter. A conventional system is AC/DC/AC converter used system. The problems in conventional system are large volume and low efficiency. This proposed system can compensate an interruption of a power line, harmonics current and reactive power by controlling input current of the matrix converter. The effectiveness of this proposed system was confirmed by the simulation 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 filter

1. はじめに

近年, 新しい電力供給源として電力需要地近傍に設置が可能な系統連係分散型電源システムの導入が検討されている。分散電源に加え系統には様々な機器が接続され, 無効電力や高調波電流を系統に流入させており, 系統の安定化技術はますます盛んになることが予想される。

またコンピュータなどの OA 機器の増加によって, 高調波障害が問題になっている。そのため, 電力供給と高調波補償を同時に実現する電源装置が求められている。

従来の系統補償装置には 6 アームを用いたブリッジ回路が使用されるが, 直流部を有するため, 初期充電回路, 電解コンデンサ, メンテナンスなどが必要となり, 大型化, 高コスト化の一因となっている。

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が盛んに研究が行われており実用化が進められている⁽¹⁾⁽⁴⁾。マトリックスコンバータは直流部に大型の平滑コンデンサがないため小型で長寿命・高効率化をはかることができる。

本論文ではマトリックスコンバータを電力障害に応用し, 有効性を確認する。本論文で提案するシステムを, 分散型電源と組み合わせればマトリックスコンバータの特徴である小型・長寿命・高効率化を実現することが可能となる。現在マトリックスコンバータについて様々な研究が行われているが, 多くの研究では入力電流を正弦波状に制御することに主眼を置いており, 入力電流を積極的に制御し利用しようという試みは著書らの知る限りない。ここではマトリックスコンバータの入力電流を積

極的に制御することで, 無効電力補償, 高調波補償および瞬断補償が行えることをシミュレーションにより検証を行ったので報告する。

2. システム構成とその特徴

図 1 に今回提案する電力障害補償装置の構成図を示す。システムは発電機, 電力系統との整合を行う AC/AC 直接変換器であるマトリックスコンバータで構成される。AC/AC 直接変換器を用いることにより交流を一旦, 直流に変換することなく電力系統と電力貯蔵装置の間でエネルギー授受が行われる。

マトリックスコンバータは系統に分散電源のインタフェースコンバータとして接続されており, 系統に接続されている機器が発生する無効電力や高調波をマトリックスコンバータにより補償する。このとき, 有効電力は系統とマトリックスコンバータを介して接続されている電源の両方から供給される。

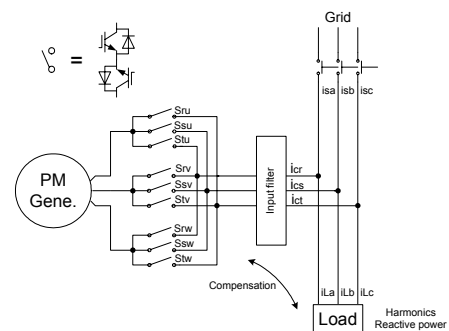


図 1 提案するシステム
Fig.1. Proposed system.

3. 制御方式

〈3・1〉 仮想AC/DC/AC方式

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流を同時に制御する必要がある。しかし出力側で発電機の制御を、入力で電力障害補償を行うため制御が非常に複雑化する。そこで、本論文では、仮想の整流器/インバータシステムを考え、入力側と出力側を独立に制御する仮想AC/DC/AC方式⁽¹⁾を採用する。またこの方式を用いることで、従来のPWM整流器とインバータを用いたシステムに提案されていた様々な制御法がマトリックスコンバータに適用できる。

仮想 AC/DC/AC 方式では「あるスイッチング状態における変換器の入出力の接続関係が同一であれば、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。

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。図2の入出力関係をスイッチング関数を $S=1$ でオン、 $S=0$ でオフと定義すると(1)式のように表せる。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)式で表される。マトリックスコンバータのスイッチング行列は、AC/DC/AC 変換器のスイッチング行列の積で表せるため(1)、(2)式が等しくなれば入出力特性は同一となる。

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

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

〈3・2〉 無効電力補償

仮想 AC/DC/AC 方式を採用することにより、従来のアクティブフィルタや STATCOM の制御を適用することができる。本論文では(3)、(4)式を用いて回転座標変換を行い、瞬時有効電力と瞬时无効電力に分離し、無効電力の制御と電源高調波の補償を行う。

$$\begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \dots\dots (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

図3に制御ブロック図を示す。電源角周波数 ω で回転座標変換を行うことにより基本波成分は直流となり、その他の周波数成分は交流量として現れる。この性質を利用し、電流高調波を抽出する。まず、d軸成分の基本波有

効成分をハイパスフィルタ(HPF)を用いて取り除き、高調波成分のみを抽出する。q軸成分では無効成分が現れるためd軸とは異なり基本波成分も無効電力補償に利用する。また無効電力補償と電力供給を同時に実現するために、本装置から出力する基本波有効成分 i_{ap}^* をd軸成分に加える。次に、上記で求めた電流指令を、無効電力補償の電流指令としてマトリックスコンバータに与える。なお、マトリックスコンバータの入力電流制御部分は電流形変換器の動作となるため、オープンループで制御可能である。

マトリックスコンバータで無効電力補償を行う際の問題のひとつに、補償電流の振動が挙げられる。入力フィルタと系統インピーダンスとの間で並列共振が生じ、マトリックスコンバータの入力電流に共振周波数付近の成分が含まれていた場合、電力系統で拡大され逆作用する恐れがある。その振動を抑制するために、本論文では制御的に振動を抑制するダンピング制御⁽³⁾を採用する。

補償電流波形が振動し、不安定になる原因はシステムの利得が高周波帯域で大きいためである。そのため振動を抑制するには高周波での利得を下げればよい。そこでダンピング制御では入力フィルタの電圧から高周波成分を抜き出し、電流指令から減算することで、高周波領域でドループ特性を持たせる。具体的には、図3に示すように、入力フィルタのキャパシタ電圧を回転座標変換しハイパスフィルタ(HPF)により高調波成分を抜き出している。その値にゲイン K_d を乗じて、入力電流指令から差し引くことでダンピング制御を行っている。補償前の電流指令を i_c^{**} 、キャパシタ電圧の高調波成分を \tilde{v}_{cf} とするとダンピング補償後の電流指令は次の式で与えられる。

$$i_c^* = i_c^{**} - K_d \tilde{v}_{cf} \dots\dots\dots (5)$$

なお、仮想 AC/DC/AC 方式ではキャリア比較によりスイッチングパターンを生成しているため、上記の方法で求めた電流指令を規格化する必要がある。そこで、入力電流指令を発電機の出力電流の最大値で除算することで規格化を行う。

〈3・3〉 瞬断補償

図4に制御ブロック図を示す。本提案回路では、制御回路内部で生成した補償電圧指令と系統電圧の絶対値を

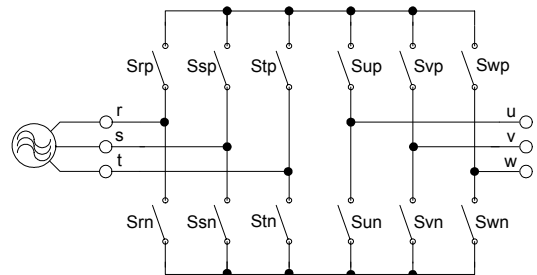


図2 AC/DC/AC方式
Fig.2. AC/DC/AC Converter.

演算し、それらの差を設定した基準値と比較して瞬断検出を行っている。次に瞬断検出と同時に電源側をスイッチ S により、マトリックスコンバータと切り離し、マトリックスコンバータの入力電流指令を無効電力補償から電圧補償に切り替えている。電圧制御には PI 制御を用いている。

4. シミュレーション結果

本論文では提案方式の有効性をシミュレーションにて検証を行った。シミュレーションは入力フィルタのカットオフ周波数 2[kHz]、制動係数 0.03、マトリックスコンバータのキャリア周波数 20[kHz]の条件で行っている。また負荷の電力の約 3 割を発電機から供給している。シミュレーションにおいては、永久磁石同期発電機を用いた。

図 5 に無効電力補償のシミュレーション結果を示す。図 5(a)は、RL 負荷時 ($R=5\Omega$, $L=20\text{mH}$) の系統相電圧, 系統電流, 負荷電流, 系統力率, 系統有効電力である。0.011 秒で補償を開始させている。補償開始の後, 力率がほぼ 1 に改善されていることがわかる。図 5(b)は, 負荷を RC 負荷 ($R=10\Omega$, $C=350\mu\text{F}$) としたときのシミュレーション結果である。RL 負荷時と同様に力率がほぼ 1 に改善されていることが分かる。これらの結果から進み・遅れ負荷ともに無効電力補償が可能であることが確認できる。

図 6 はダイオード整流器を負荷としたときの, 系統相電圧, 系統電流, 負荷電流, マトリックスコンバータ入力電流, 系統有効電力である。フィルタなどの遅れのため, 系統電流に若干振動が残っているが, ほぼ正弦波状の系統電流が得られており, 負荷電流の高調波を補償することが可能である。またマトリックスコンバータにより出力される補償電流はダンピング制御により振動が抑えられることが確認できる。

図 7 に瞬断補償のシミュレーション結果を示す。この図は, 系統線間電圧, 負荷線間電圧, 系統電流, 負荷電流, 負荷有効電力を示している。瞬断時でも瞬断発生前と同じ電力が供給されていることが分かる。

5. まとめ

本論文ではシミュレーションにおいてマトリックスコンバータを電力障害補償 (無効電力補償・アクティブフィルタ・瞬時停電補償) に適用し基本的な動作の検証を行った。その結果以下に示すように, 従来のインバータと同等に電力障害補償が行えることを示した。

- (1) マトリックスコンバータの入力電流制御により, 遅れ・進み負荷に対して無効電力補償が行える。
- (2) 非線形負荷においても高調波電流補償が行える。
- (3) 瞬断補償時にも良好な電圧波形が得られる。

今後は提案した電力障害補償装置の実機を製作し, 効率や小型化について検証・提案したシステムの有効性を確認する。

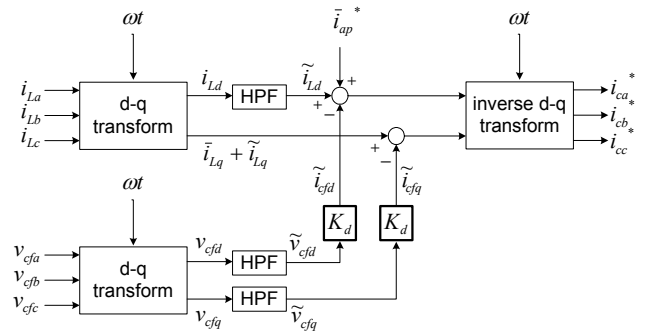


図 3 高調波検出とダンピング制御のブロック図

Fig.3. Block diagram of harmonic detection and damping control.

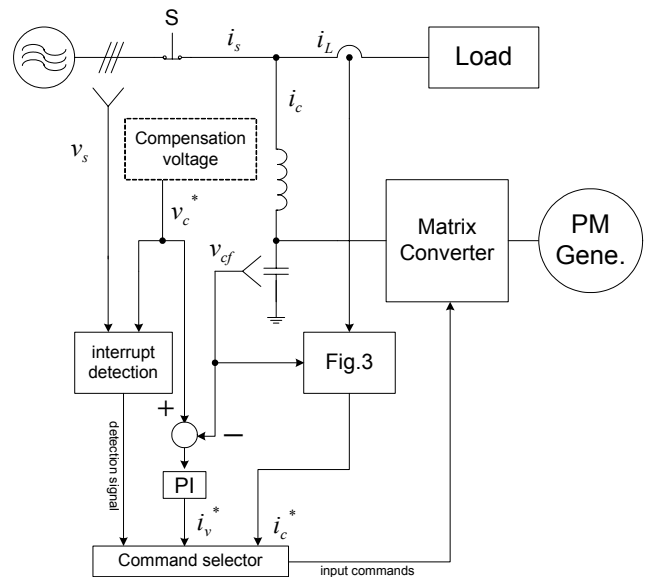
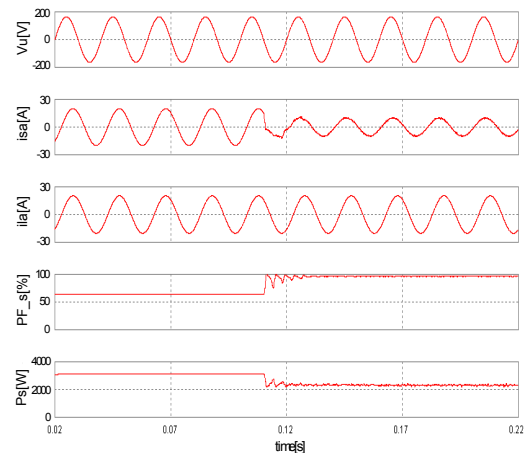


図 4 制御ブロック

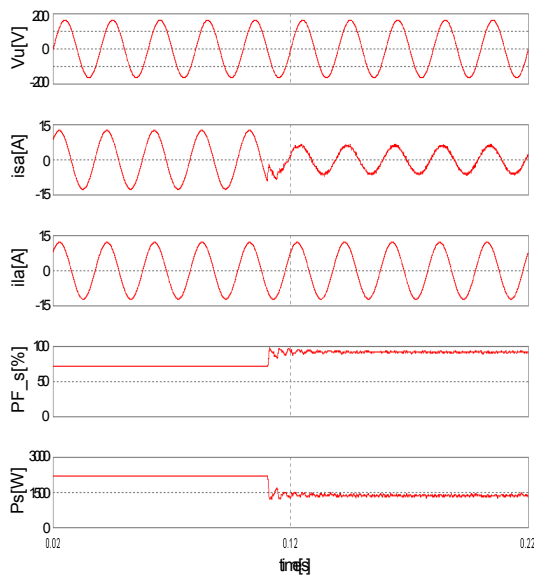
Fig.4. Control block diagram.



(a) In RL load($R=5\Omega$, $L=20\text{mH}$).

図 5 無効電力補償のシミュレーション結果

Fig.5. Simulation results of compensation reactive power.



(b) In RC load($R=10\Omega, C=350\mu F$).

図5 無効電力補償のシミュレーション結果
Fig.5. Simulation results of reactive power compensation.

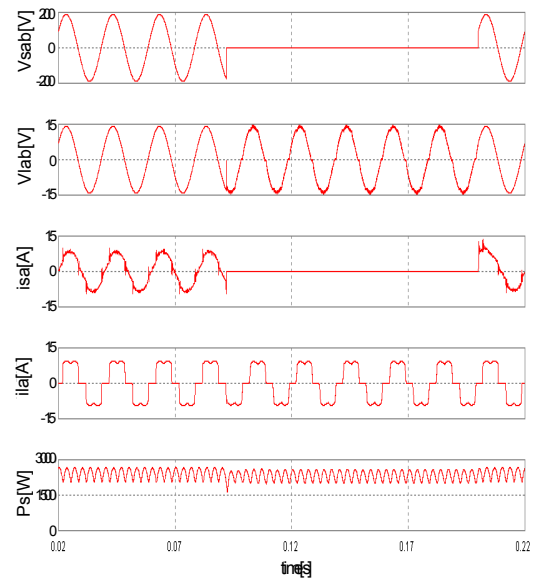


図7 瞬断補償のシミュレーション結果
Fig.7. Simulation results of interruption.

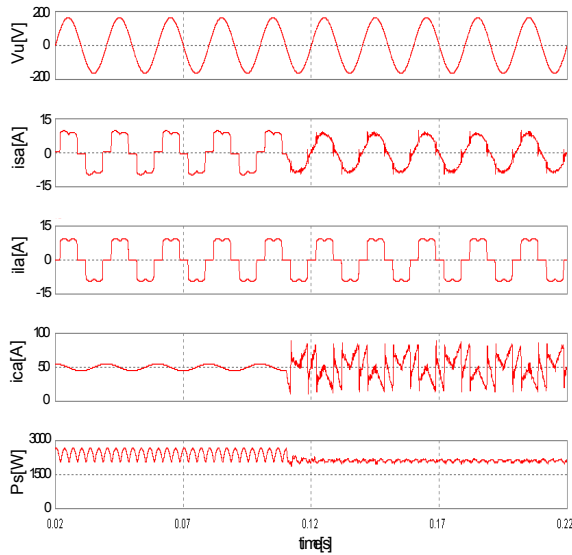


図6 高調波補償のシミュレーション結果
Fig.6. Simulation results of harmonics current compensation.

文 献

- (1) Jun-ichi Itoh, Hirokazu Kodachi, Akihiro Odaka, Ikuya Sato, Hideki Ohguchi, Hidetoshi Umida: "A High Performance Control Method for the Matrix Converter Based on PWM generation of Virtual AC/DC/AC Conversion" Japan Industry Applications Society Conference I-303 2004(in Japanese)
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大会, 1-306
- (2) Pichai Jintakosonwit, Hideaki Fujita, Yasufumi Akagi: "Considerations of a Fully-Digital-controlled Active Filter for Installation on Power Distribution Systems" T.IEE Japan, Vol.121-D, No.3 2001 (in Japanese)
Pichai Jintakosonwit, 藤田英明, 赤木泰文: 「配電系統用アクティブフィルタの全デジタル制御システムとその留意点」, 電学論 D, 119 巻 5 号 316-324(平成 13 年)
- (3) 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
- (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