パルス密度変調制御を用いた

高周波単相-三相インダイレクトマトリックスコンバータの効率評価

学生員 中田 祐樹 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Efficiency Evaluation of an Single-phase to Three-phase Indirect Matrix Converter for High-frequency Applications

Yuki Nakata, Student Member, Jun-ichi Itoh, Member (Nagaoka University of Technology)

This paper discusses the PDM (Pulse Density Modulation) control methods for a single-phase to three-phase indirect matrix converter (IMC) in the high-frequency application. The proposed circuit is used as an interface converter for a wireless power transfer system. This converter can input a several hundred kHz frequency and outputting a low frequency, i.e. 50 Hz, for commercial power grid. The proposed circuit achieves zero voltage switching (ZVS) operation by using the PDM control method and obtains high efficiency. In this paper, the PDM control strategies are using delta-sigma conversion and improving the PDM control method based on Space Vector Modulation (SVM), which is proposed. Also, the experimental results of the proposed system will be demonstrated and discussed. As a result, the maximum efficiency with delta-sigma conversion and PDM control based on SVM are 93.4 % and 97.3 % respectively. Validity of PDM control based on SVM has been confirmed for reduction of switching loss.

キーワード:単相-三相マトリックスコンバータ, PDM 制御, ゼロ電圧スイッチング, 空間ベクトル変調 **Keywords**: single-phase to three-phase matrix converter, PDM control, zero voltage switching, space vector modulation.

1. はじめに

近年,非接触での電力伝送が盛んに研究されている⁽¹⁾⁽²⁾。 非接触給電では,受信側コイルに生じる電圧の周波数は電 源周波数と同一であり,数十 kHz から数 MHz が使用される。 したがって,このシステムを負荷に接続するためには,受 信側において一度電力変換器を介して,受信した電力を利 用しやすい形に変換する必要がある。ここで,受信側コイ ルで受信した電力を商用系統に連系するシステムを想定す ると,受信側コイルと系統の間には 100kHz 以上の高周波を 入力し,商用周波数(50Hz または 60Hz)の低周波を出力する 交流-交流電力変換器が必要となる。交流-交流電力変換器と して,マトリックスコンバータは小型化,高効率化の観点 から有力である。

著者らは、非接触給電システムでは、出力周波数に対し て、入力周波数が十分高いことに着目し、パルス密度変調 (PDM)制御⁽³⁾を適用した高周波電源用単相-三相マトリック スコンバータを提案した⁽⁴⁾。PDM 制御を用いることでゼロ 電圧スイッチング(ZVS)が可能となるが、インダイレクト形 回路構成において、デルタ-シグマ変換を用いた PDM 制御 法を適用した場合、出力波形に逆電圧パルスとクランプ現 象が発生する。クランプ現象が発生した場合、ZVS を実現 できないため,スイッチング損失が増加する。このクラン プ現象は,出力の電流に対し電圧の位相が瞬時的に大きく 変化することに起因している。

そこで,出力波形の改善手法として空間ベクトル変調 (SVM)を基にした PDM 信号生成法を提案した⁽⁵⁾。SVM を基 にスイッチングパターンを生成することにより出力電流と 電圧の位相を最小にすることができ,出力波形にクランプ 現象をなくすことができる。これにより,クランプ現象に よるスイッチング損失をなくすことができる。

本論文では、入力を高周波、出力を低周波とする単相-三 相 IMC における PDM 制御法について、実験により動作検 証と効率評価を行った。これらの結果から、波形改善とス イッチング損失低減における、SVM を基にした PDM 制御 の有用性を確認したので報告する。

2. 回路構成と制御方式

<2.1> 回路構成

図1に今回検討を行った単相-三相インダイレクトマトリ ックスコンバータ(IMC)の回路構成を示す。これは、整流器 とインバータから構成される。本論文では、非接触給電の 受電端を模擬して、入力は高周波の正弦波電圧源とする。 この入力電圧の半周期を制御の最小単位(パルス)として扱 い,スイッチングを行うことで PDM 制御を適用できる。 PDM 制御では一定幅のパルスの密度およびその正負で波形 を形成する。また,入力の半周期毎に現れるゼロクロス点 でスイッチングを行うことで ZVS が可能となる。ZVS によ りスイッチング損失をほぼゼロにできる。なお,直流リン クには保護回路として,ダイオードとキャパシタ,放電抵 抗で構成されるクランプスナバを接続している。

<2.2> 制御方式

PDM (Pulse Density Modulation)制御は一定幅のパルスの 密度およびその正負で波形を形成する制御法である。一定 幅のパルスを出力の最小単位とし、このパルスの密度を調 整して出力を制御する。

図 2 にデルタ-シグマ変換を用いた PDM 制御ブロックを 示す。スイッチングに用いる PDM 信号は各相の指令値をデ ルタ-シグマ変換することで得られる。また、入力電圧のゼ ロクロス点と同期させることで ZVS を実現する。しかし、 この手法は図 1 のインダイレクト形の回路構成において、 出力電圧波形に逆電圧パルスとクランプ現象が発生する。 その結果、出力電圧のリプルとひずみの増加を招き、ZVS が得られないためスイッチング損失も増加する。

クランプ現象は、この制御法では出力電圧ベクトルと出 力電流ベクトルの位相が瞬時的に 30 度以上になるスイッチ ングパターンが存在することに起因する。この改善法とし て、SVM を基にした PDM 制御法を提案する。

図3にSVMを基にしたPDM制御ブロックを示す。SVM では、電圧ベクトルを出力する際に近接した基本ベクトル を選択し出力するため、出力電流ベクトルに対して出力電 圧ベクトルの位相の変化を最小にできる。これにより、出 力電圧のクランプ現象は発生しない。SVMの選択ベクトル 信号を D-FF に入力し、入力電圧のゼロクロス検出信号を CLK に入力することで、出力Qはゼロクロス検出信号のエ ッジで同期する。この信号からスイッチング信号を生成す ることによりZVSを実現する。

また,この制御法では,スイッチング回数がキャリア周 波数で決まるため,デルタ-シグマ変換を用いた制御法と比 べるとスイッチング回数を小さくでき,実機で発生するス イッチング損失を低減できる。

この制御法では,クランプ現象の解消とスイッチング周 波数の低減により,大幅なスイッチング損失の低減が期待 できる。

3. 動作検証

ここでは2つの制御法の検証を行うため、図1に示す実 験回路による動作確認を行った。なお、今回、コンバータ の入力として、特性インピーダンスが50Ωに整合された高 周波電源を使用した。そのため、整合回路として入力フィ ルタを挿入した。表1の実験条件により実験を行い、各制 御法の動作確認を行った。

<3.1> **デルタシグマ変換を用いた PDM 制御による実験** 図 4 にデルタ-シグマ変換を用いた PDM 信号生成法を適



図 1 単相-三相インダイレクトマトリックスコンバータ Fig. 1. Single-phase to three-phase indirect matrix



図 2 デルタ-シグマ変換を用いた PDM 制御ブロック Fig. 2. PDM control block diagram using delta-sigma conversion.



Fig. 3. PDM control block diagram based on SVM.

表1 実験パラメータ

Table 1. Experimental parameters.		
Input voltage	200 [V]	
Input frequency	100 [kHz]	
Output line-to-line voltage	100 [V]	
Output frequency	50 [Hz]	
Load	R	100 [Ω]
	L	10 [mH]

用した単相-三相インダイレクトマトリックスコンバータの 動作波形を示す。図4(a)より、出力には周波数50Hzの正弦 波電圧が出力されている。これより、単相-三相インダイレ クトマトリックスコンバータにおいて,デルタ-シグマ変換 を用いることで、PDM 制御が実現できていることを確認し た。また、図4(b)は図4(a)における区間Aの拡大図である。 図 4(a),図 4(b)より、周波数 100kHz の正弦波電圧が入力さ れており, インバータは入力電圧のゼロクロス付近でスイ ッチングできていることが確認できる。しかし、実際には ゼロクロス点から約 1µs 遅れてスイッチングしている。こ の遅れの主な原因は、ゼロクロス点を検出する回路とゲー トドライブ回路(GDU)の遅れと、インバータのデッドタイム である。検出回路と GDU での遅れは約 0.5µs であり,設定 したデッドタイムは 0.5µs である。しかし、この遅れは入力 電圧のゼロクロス点を検出する回路の改良や素子の特性か ら適切なデッドタイムの決定をすることで改善が可能であ る。また、多少のスイッチングの遅れがあったとしても、 ゼロクロス付近でスイッチングが行われていれば、ハード

スイッチングに比べてスイッチング損失とスイッチングに 伴うサージを軽減できる。

一方,出力電圧波形ではクランプ現象が発生している。 これは、2.2 節で述べたようにデルタ-シグマ変換を用いた PDM 制御のスイッチングパターンでは、直流リンク電流が 逆流するパターンが発生しているためである。このクラン プ現象は出力電圧波形のひずみの原因となる。

次に、図 5 に出力電圧と入力電流の高調波解析結果を示 す。図 5(a)より、出力電圧は出力周波数 50Hz に対して低次 高調波をほとんど含んでいないことがわかる。出力電圧の THD は 40 次までで 5.96%となった。また、高次では入力電 圧周波数 100kHz の 2 倍の周波数である 200kHz の整数倍高 調波を含んでいることがわかる。本回路ではダイオード整 流器により全波整流しているため、直流リンク電圧(インバ ータ入力)は入力電圧の 2 倍の周波数で変動する。そのため、 出力電圧波形も入力周波数の 2 倍の周波数の整数倍高調波 を含む。

また,図 5(b)より入力電流の高調波解析では、シミュレー ション結果同様、入力周波数 100kHz の整数倍高調波を多く 含んでいることがわかる。これは、図 4.5(c)からもわかるよ うに、入力電流は矩形波状であり、低次の整数倍高調波を 含んでいるためである。このとき、入力電流の THD は 10 次までで 79.7%となった。

以上の実験結果より,この方式ではクランプ現象と逆方 向電圧パルスが発生することを確認した。またこれらの問 題は出力波形のひずみに影響を与え,ひずみ率が高くなる ことを確認した。

<3.2> 空間ベクトル変調を基にした PDM 制御による実験 ここでは、提案した SVM を基にした PDM 制御の有用性 を確認するため、デルタ-シグマ変換を用いた PDM 制御の 実験と同様の回路を用いて実験を行った。入出力電圧、負 荷等の実験条件も表1に示すとおりである。

SVM に用いるキャリア周波数は 5kHz とし,スイッチン グに用いる PDM 信号を生成した。また,この信号は,入力 電圧の上り,下りのゼロクロス点で同期されている。

図 6 に SVM を基にした PDM 信号生成法を適用した単相-三相インダイレクトマトリックスコンバータの動作波形を 示す。図 6(a)より、出力には周波数 50Hz の正弦波電圧が出 力されている。これより、単相-三相インダイレクトマトリ ックスコンバータにおいて、SVM を基にした PDM 制御が 実現できていることを確認した。また、この制御法では、 スイッチングによるサージは発生しているが、デルタ-シグ マ変換を用いた方式で発生していた逆方向電圧パルスが発 生していない。これにより、提案手法を適用することで、 出力電圧波形の改善が確認できる。

図 6(b)に図 6(a)における区間 B の拡大図を示す。図 6(b) より、インバータは入力電圧のゼロクロス付近でスイッチ ングできていることが確認できる。また、デルタ-シグマ変 換を用いた方式同様に、約 1µs のゼロクロス点からのスイ ッチング遅れが存在する。



動作波形

Fig. 4. Operation waveforms of the proposed circuit in the experiment with PDM using delta-sigma conversion.





次に、図 7 に出力電圧と入力電流の高調波解析結果を示 す。図 7(a)より、出力電圧は出力周波数 50Hz に対して低次 高調波をほとんど含んでいない。出力電圧の THD は 40 次 までで 2.15%となった。また、SVM のキャリア周波数 5kHz と、入力電圧周波数 100kHz の 2 倍の周波数である 200kHz の整数倍高調波を多く含んでいることがわかる。スイッチ ング周波数がキャリア周波数と一致しているため、その整 数倍高調波を含む。そして、入力電圧周波数の 2 倍の周波 数の整数倍高調波を含む理由は、前節で述べたのと同じ理 由である。

また,図 7(b)より入力電流の高調波解析では、シミュレーション結果同様、入力周波数 100kHz の整数倍高調波を多く 含んでいる。これも前節で述べた理由と同様、図 6(b)からも わかるように、入力電流が矩形波状であるためである。こ のとき、入力電流の THD は 10 次までで 55.5%となった。 提案した SVM を基にした PDM 制御を適用することで, デルタ-シグマ変換を用いた PDM 制御適用時に発生してい たクランプ現象と逆方向電圧パルスの問題を解決し,出力 電圧ひずみ率を 1/2 以下に低減できた。以上の結果から,提 案した波形改善法の有用性を確認できる。

4. 効率測定

図8にデルタ-シグマ変換を用いた PDM 制御と SVM を基 にした PDM 制御を適用した際の高周波単相-三相マトリッ クスコンバータの効率特性を示す。入出力電圧は表 1 の実 験条件とし、負荷を変化させることで出力電力を変化させ て実験を行った。ただし、1µs 程度のスイッチング遅れが存 在している。

結果より,最高効率点は 75W 負荷において,それぞれ SVM を基にした PDM 制御適用時では 97.3%, デルタ-シグ マ変換を用いた PDM 制御適用時では 93.4%であった。

また、すべての測定点において SVM を基にした PDM 制 御適用時の効率がデルタ-シグマ変換を用いた PDM 制御適 用時の効率よりも高い。これは、SVM を基にした PDM 制 御適用することにより、クランプ現象が解消され、スイッ チング損失が減少したためである。この制御法では、スイ ッチング回数を低減することができ、スイッチング損失を 大幅に減少したことも、効率向上におおきく寄与している。 以上より、SVM を基にした PDM 制御は波形改善とスイ

ッチング損失低減に有効である。

5. まとめ

本論文では、入力を高周波、出力を低周波とする単相-三 相 IMC における PDM 制御法について、実験により動作検 証と効率評価を行った。入力電圧を 100kHz として、どちら の制御法も、出力には 50Hz の正弦波電圧を得られており、 入力電圧のゼロクロス付近でのスイッチングを確認した。 デルタ-シグマ変換を用いた方式では、出力電圧に逆電圧パ ルスを確認した。そして、SVM を基にした PDM 制御法で は、逆方向電圧パルスが発生していないことを確認した。

また,各制御法において効率評価を行った結果,デルタ-シグマ変換を用いた PDM 制御では 93.4%, SVM を基にした PDM 制御では 97.3%であった。これにより,SVM を基にし た PDM 制御のスイッチング損失低減効果を確認した。

文 献

- A.Kurs, A.Karalis, R.Moffatt, J.D.Joannopoulos, P.Fisher, M.Soljačić: Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science, Vol.317, pp.83-86 (2007)
- (2) 居村岳広・堀洋一:「電磁界共振結合による伝送技術」,電学誌, Vol.129, No.7 pp.414-417 (2009)
- (3) Abdelhalim Sandali, Ahmed Cheriti and Pierre Sicard : "Design Considerations for PDM Ac/ac Converter Implementation", APEC 2007, pp.1678-1683 (2007)
- (4) 中田祐樹,宮脇慧,伊東淳一:「PDM 制御法を用いた高周波単相/三 相マトリックスコンバータの動作検証」,半導体電力変換合同研究 会,SPC-11-020, pp.109-114 (2011)



(5) Yuki Nakata and Jun-ichi Itoh : "An Experimental Verification and Analysis of a Single-phase to Three-phase Matrix Converter using PDM Control Method for High-frequency Applications", IEEE PEDS 2011, No. 383, pp.1084-1089 (2011)