マトリックスコンバータを用いた三相ワイヤレス給電システム

学生員 山ノ口 皓喜 学生員 宅間 春介 正員 日下 佳祐 上級会員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Three-Phase Wireless Power Supply System Using Matrix Converter Koki Yamanokuchi, Student Member, Shunsuke Takuma, Student Member, Keisuke Kusaka, Member, Jun-ichi Itoh, Senior Member (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes the three-phase wireless power transfer (WPT) system with three-phase to three-phase matrix converter. The proposed system directly converts the power from AC grid to high-frequency AC for WPT. The three-phase WPT system with the matrix converter is effective to expand the lifetime of the WPT system. New hybrid commutation method, which is suitable for the WPT system with a resonant characteristic is proposed to avoid the commutation failure of the matrix converter. The strategy of the proposed hybrid commutation is based on an estimation of the current direction considering to the resonant characteristic and elimination of the commutation in the critical area. The proposed commutation method achieves AC input-current THD of 3.7% with the resonant three-phase load without a current sensor on the high-frequency side. Furthermore, the proposed WPT system achieves an system efficiency of 88.5% at 1-kW load.

キーワード:マトリックスコンバータ,転流方式,ワイヤレス電力伝送システム Keywords: Matrix converter, Commutation method, Wireless power transfer system,

1. はじめに

近年,車載バッテリへの充電方法として,共振を用いたワイヤレス電力伝送(WPT)システムが盛んに研究されている (1-2)。電気自動車の走行可能距離を延長するため,車載バッテリ容量は増加傾向にあり,充電時間短縮を目的に充電器の高出力化が進められている。しかし,充電電力の増加は伝送コイルの銅損や漏えい磁界の増加原因となる。

上記の課題の解決法として、12 個のコイルを用いた三相 WPT システムが提案されている(3)。 文献(3)では高周波交流 部を三相にすることで、1 巻線当たりの電流実効値が単相 に対して低減でき、銅損を抑制できることが示されている。また、本方式ではコイルを対向配置することで漏えい磁界の抑制も実現できる。しかし、伝送コイルの損失で発生する 熱による平滑の電解コンデンサの寿命低下を避ける目的で、伝送コイルと電力変換器を個別に設置する必要があるため、システムの大型化を招く問題がある。

一方,交流から異なる振幅,周波数の交流へ直接変換する電力変換器としてマトリックスコンバータが知られている(4)。マトリックスコンバータは平滑の電解コンデンサを持たないため,インバータを用いたシステムより高温下での駆動に適し,伝送コイル近傍への回路配置が可能である。

一方,高周波出力の電源にマトリックスコンバータを適用するにはいくつかの課題があり、その1つが転流である。従来の転流方式として電流転流や電圧転流があるが、転流シーケンスの決定や転流誤差補償のために、出力電流方向の検出が必要になる⁽⁵⁾。しかし、WPT のように出力側が高周波となるアプリケーションでは、位相遅れなしに電流方向を検出することは難しい。

本論文では、三相一三相マトリックスコンバータを用いた WPT システムと転流方法を提案する。提案法は、共振負荷を持つマトリックスコンバータの出力力率が共振周波数付近でおよそ 1 となる特徴を利用して出力電流方向を推定する。実機試験により、提案する WPT システムは転流失敗なく低周波交流から高周波交流へ直接変換可能であることを確認した。また、1 kW 出力時に 88.5%のシステム効率を達成することを確認したので報告する。

2. 提案する三相 WPT システムの回路構成

図1にマトリックスコンバータを用いた三相WPTシステムを示す。マトリックスコンバータは低周波三相交流から高周波三相交流に電力を直接変換する。そのため、PWM整流器とインバータによる構成で必要となる平滑の電解コンデンサが不要なため、高温下での動作に適する。なお、マト

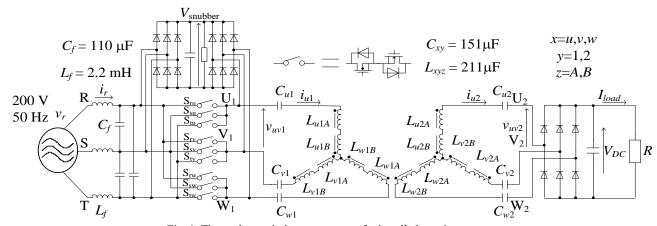


Fig. 1. Three-phase wireless power transfer installed matrix converter

リックスコンバータの入出力をクランプしているスナバ回 路は電流源開放による過電圧を抑制する役割を果たす。

図2に三相 WPT システムの伝送コイルの配置と結合を示す。ワイヤレス伝送部として、論文(3)で提案されている 12 個のソレノイドコイルを用いた三相 WPT システムを用いる。三相 12 コイル WPT システムを用いると、単相 WPT システムに比べて 1 巻線あたりの通流電流が減るため、銅損を低減できる。さらに、差動磁気結合された 2 つのソレノイドコイルを対向配置することで漏えい磁界がキャンセルされる。本特徴から、12 個のソレノイドコイルを持つ三相 PWTシステムは大電力 WPT に適している。

本論文では、WPT コイルの 1 次側と 2 次側にそれぞれ直列に共振コンデンサを挿入する S/S 方式を用いる。これらの共振コンデンサと各コイルの自己インダクタンスを伝送周波数で共振するよう設計することで、電源からみた力率を改善し、伝送コイルで生じる銅損と電力変換器の導通損失を低減する。なお本論文では、システムの大容量化を見据えて WPT システムの伝送周波数を 20 kHz とする。伝送周波数と共振周波数が等しいとき、マトリックスコンバータの出力力率がおよそ 1 となる。この特性を利用し、提案転流方式では転流失敗を抑制する。

3. マトリックスコンバータの制御

〈3·1〉 仮想 AC/DC/AC 変換方式

本論文では、マトリックスコンバータの制御として仮想 AC/DC/AC 変換方式を用いる⁽⁶⁾。 仮想 AC/DC/AC 変換方式 ではマトリックスコンバータの入出力関係が直接型と間接型で共通であることを利用して、制御を仮想電流型整流器と仮想電圧型インバータに分離して考える。

仮想電流型整流器は空間ベクトル変調によって操作するの。このとき、仮想電圧型インバータは1パルス駆動を行う。PWM 整流器とインバータの制御によって生成されたスイッチングパルスを合成することで、マトリックスコンバータのスイッチングパルスを生成する。ただし、スイッチング回数低減のために、電流型整流器のゼロベクトルと電圧型インバータのベクトル変更のタイミングを同期させる。

図 3 に電流型整流器のベクトル図とスイッチングパター

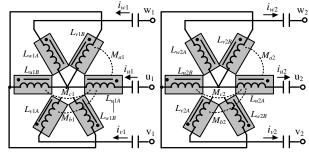


Fig. 2. Connection and placement of transmission coils in Fig. 1.

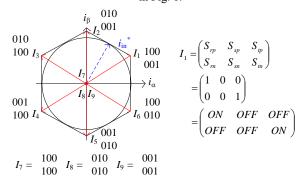


Fig. 3. Space vector for virtual current source PWM rectifier.

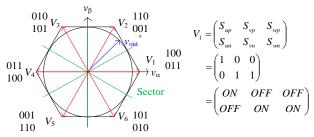


Fig. 4. Space vector for voltage source inverter.

ンを示す。電流指令値はゼロベクトル(I₇, I₈, I₉)と入力電流指令値ベクトルから最も近い 2 つのベクトルで表現する。ただし,3つのゼロベクトルはスイッチング回数低減のために入力相電圧の絶対値が最大の相のオン状態が保持されるように選定される。さらに、ゼロベクトルはキャリアのピークとボトムに分けて配置する。

図 4 に電圧型インバータのベクトル図とスイッチングパターンを示す。電圧型インバータの1パルス駆動は、スイッ

チング損失低減のために電圧指令ベクトルに隣接するベクトルが使用される。1 パルス駆動を用いると PWM と比べてスイッチング回数が低減される。さらに、共振周波数以外の帯域では WPT システムの入力インピーダンスが高いため、電圧型インバータに 1 パルス駆動を用いても、低出力電流ひずみ率(THD)を維持できる。

〈3·2〉 転流方式

(1) 従来の転流方式 マトリックスコンバータは電圧 源短絡や電流源開放のような転流失敗を防止するために電 圧転流や電流転流のような転流シーケンスが必要になる。電圧転流は入力電圧検出情報に基づいて転流シーケンスを決定する。しかし、相電圧が互いに交差するとき、電圧検出 の遅れや誤差により電圧源が短絡する恐れがある。さらに、電圧源短絡によって悪化する入力電流ひずみ率を 5%以内に抑えるために、出力電流方向検出を用いた転流誤差補償が必要になる。一方、電流転流は出力電流検出情報に基づいて転流シーケンスを決定する。しかし、出力電流検出に誤差や遅れが生じると電流源が開放する恐れがある。そのため、電流転流失敗はサージ電圧の原因となる。

WPT システムのようなマトリックスコンバータの出力が 10kHz を超える高周波となるアプリケーションでは、遅延な しに電流方向を検出することは難しい。そのため、従来の出力電流方向検出が必要な転流方式は WPT システムに適して いない。そこで共振特性を利用し、出力電流を推定する新しい転流手法を提案する。

(2) 提案転流方式 提案する複合転流方式について説明する。提案転流方式は共振コンデンサを有する WPT システムの共振特性を考慮した 4step の転流方式である。

図 5 に R 相と S 相の入力電圧大小関係が切り替わるときの U 相のスイッチングパターンと電圧転流適用期間 T_V を示す。 T_V は式(1)で設定する。

$$\left| \frac{\cos^{-1}(PF_{out})}{2\pi f_{p}} - \frac{d_{z}}{4f} \right| \le T_{V} \le \frac{1}{12 f_{p}} - 3T_{d}$$
 (1)

ここで、PFoutはマトリックスコンバータの出力力率、fikは 伝送コイルの共振周波数、fc はキャリア周波数、dc は1キャリア周期中のゼロベクトルのデューティ比、Ta は転流のステップ時間である。ただし、入力電圧リプルは十分小さいとして無視している。共振周波数とマトリックスコンバータの出力周波数が等しい時、マトリックスコンバータの出力力率はおよそ1となり、出力電圧指令と出力電流が同相となる。そのため、出力電流方向は出力電圧指令から推定可能となる。この特性を考慮して提案転流方式では、電流転流を推定した電流ゼロクロス領域以外の領域、電圧転流を電流ゼロクロスが予想される領域で使用する。例えば、図5に示すように出力電圧指令がセクタ5からセクタ6に変わるとき、U相が電圧転流となる。

まず、式(1)の左辺の条件に付いて説明する。電流ゼロクロスが予想される $\pm T_V$ の期間において電圧転流を適用することで、出力側の電流センサなしに転流失敗を抑制することができる。ただし、WPT コイルの位置ずれがある場合には、

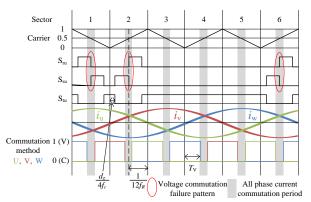


Fig. 5. Suppression of commutation failure at input voltage change from R to S.

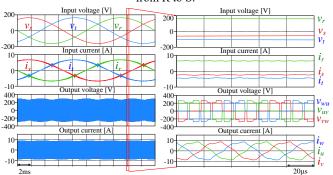


Fig. 6. Simulation of voltage commutation.

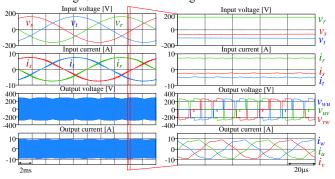


Fig. 7. Simulation of proposed commutation.

共振周波数が変化するため、マトリックスコンバータの出力力率が低下する可能性がある。したがって、 T_V は出力電圧指令と出力電流の間の想定されうる最大の出力位相ずれより、大きくする必要がある。

次に、式(1)の右辺の条件について説明する。マトリックスコンバータでは入力力率が1となるように入力電流を制御する。そのため、ゼロベクトルをキャリアのピークとボトムに分けて配置した場合は、図5で示すように電圧転流の転流失敗パターンがキャリアの中央に発生する。したがって、キャリアの中心付近ですべての相を電流転流にすることで電圧転流の転流失敗を抑制できる。

図 6 に常に電圧転流を適用した場合,図 7 に提案転流を適用した場合の入出力電圧電流波形を示す。なお、図 6、図 7 において右側は左側の赤四角内の拡大波形である。図 6 では入力電圧大小関係切り替わり付近で電圧転流の転流失敗が発生し入力電流がひずむ。このとき、入力電流 THD が 2.3%となる。一方、提案する転流法(図 7)では電圧転流によ

る転流失敗が防止され,入力電流 THD が 1.4%に減少している。さらに、出力電流ゼロクロス時にサージが発生していないことから、電流転流による転流失敗が防止されていることが確認できる。

4. 実験結果

図 1 の回路図を用いて提案した転流手法を持つマトリックスコンバータを用いた WPT システムの実機検証を行った。図 8(a)にマトリックスコンバータの入出力波形を示す。図 8(b)に図 8(a)の中央付近の拡大波形を示す。このとき,入力電流 THD3.9%を達成した。また,図 6 と比較して入力電圧大小関係切り替わり時の入力電流ひずみが発生していないため,電圧転流の転流失敗を抑制できている。図 8(b)の出力電流ゼロクロス時,マトリックスコンバータの出力電圧にサージが発生していないため,電流転流の転流失敗を抑制できている。なお,図 7 のシミュレーション波形と比較して入力電流 THD が悪くなっている。入力電圧大小関係切り替わり時の入力電流ひずみは改善したが,制御器の遅延やスイッチング素子の特性により指令パルスと実パルスに差が生じ,THD が悪くなったと考えられる。

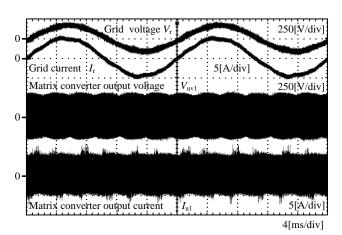
図9にWPTシステムの2次側の波形を示す。VDC, Iloadが共に正であることから、WPTシステムで受電側に電力が伝送されていること示している。また、実験システムの効率評価を行い、1kW出力時にシステム効率88.5%(三相交流ー直流負荷間)、マトリックスコンバータ効率95.3%を達成することを確認した。これはISOの標準化において要求されている「システム効率85%以上」を満足する(8)。

5. まとめ

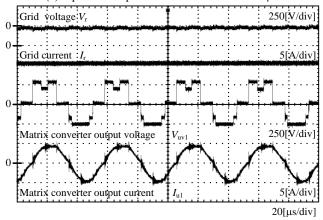
本論文では高温動作に適した大電力 WPT システムを実現するため、マトリックスコンバータを用いた三相 WPT システムと、共振特性を有する WPT に適したマトリックスコンバータの制御法を提案した。提案手法では WPT システムのインピーダンス特性を用いて出力電圧指令から出力電流を推定し、出力電流ゼロクロス付近では電圧転流を適用する。実験結果から、提案転流手法を用いたマトリックスコンバータで高周波側の電流センサなしに三相 WPT システムを駆動できることを確認した。また、1kW においてシステム効率88.5%(三相交流ー直流負荷間)を達成した。

文 献

- (1) N. X. Bac, D. M. Vilathgamuwa and U. K. Madawala: "A SiC-Based Matrix Converter Topology for Inductive Power Transfer System," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 8, pp. 4029–5038, Aug. 2014.
- (2) T. Shijo, K. Ogawa, S. Obayashi, Y. Nakamura and M. Takeuchi: "Development of Transmit and Receive Pads for Wireless Rapid Charging System for Electric Bus," 2016 IEE-Japan Industry Applications Society Conference, Vol. 4, No. 10, pp. 105-108 (2016).
- (3) K. Kusaka and J. Itoh: "Three-phase Inductive Power Transfer System with 12 coils for Radiation Noise Radiation," International Power Electronics Conference 2018, No.21A1-1 (2018).
- (4) Y. Hayashi, H. Motoyama and T. Takeshita: "Wireless Power Transfer System Using Three-phase to Single-phase Matrix Converter," 2018



(a) Input and output waveforms with $T_V = 1.6 \mu s$



(b) Enlarged waveforms near the center in Fig.8 (a).Fig. 8 . Waveforms of the matrix converter with the proposed commutation method.

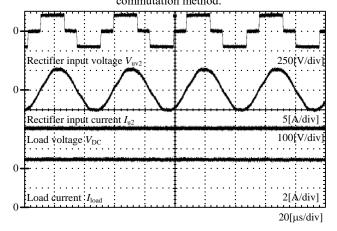


Fig. 9. Input waveforms of the rectifier on the secondary side of WPT system.

- International Power Electronics Conference, pp.356-362.
- (5) K. Kato and J. Itoh: "Improvement of Input Current Waveforms for a Matrix Converter Using a Novel Hybrid Commutation Method," PCC, pp.763-768, 2007.
- (6) J. Itoh, T. Mura and H. Takahashi: "Investigation of switching loss reduction for the matrix converter based on virtual AC/DC/AC conversion using space vector modulation," IEEE COMPEL 2012, PS-01-23 (2012).
- (7) K. Yamamoto, K. Shinohara and T. Mori: "Improvement of Pulse Pattern for Space Vector Modulated Matrix Converters," 2008 IEE-Japan, 128(3), pp. 176-183 (2008). pp. 709-714 (2017)
- (8) ISO: Electrically propelled road vehicles -- Magnetic field wireless power transfer -- Safety and interoperability requirements, ISO/PAS 19363,2017-01