

研究種別 基盤研究 (B)

研究期間 : 2007~2008

課題番号 : 19360128

研究課題名 (和文) 瞬時実効値理論とマトリックスコンバータ制御への応用

研究課題名 (英文) Instantaneous Root-Mean-Square Theory and Its Applications to Matrix Converter

研究代表者

竹下 隆晴 (TAKESHITA TAKAHARU)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 : 70171634

研究成果の概要: モータ駆動装置の省エネルギーが地球環境問題からも重要になってきている。本研究では、商用電源を可変電圧、可変周波数の交流に電力変換し、損失を従来の電力変換器に比較して約1/2にできる三相/三相マトリックスコンバータの制御法に関する研究である。マトリックスコンバータのスイッチングパターン評価のための瞬時実効値理論を提案し、制御目的に応じたリアルタイムスイッチングパターン制御を実現した。

交付額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2008年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野: 工学

科研費の分科・細目: 電気電子工学, 電力工学・電気機器工学

キーワード: パワーエレクトロニクス、瞬時実効値理論、マトリックスコンバータ、スイッチングパターン、省エネルギー、高効率、出力電圧高調波抑制、入力電流高調波抑制

## 1. 研究開始当初の背景

工場などの産業分野では、電力の約7割が機械等を駆動するためのモータで消費されており、モータ駆動装置における省エネルギー、高効率化、小型化が、地球規模での環境問題からも重要になってきている。交流モータの可変速駆動装置は、一般的に、商用交流電源を直流に変換する整流回路と、直流を任意の振幅と周波数の交流に再変換するインバータの組み合わせで実現される。この場合、整流回路とインバータの2台の電力変換器が必要になり、2回の電力変換により損失も増える。また、直流部の大容量電解コンデン

サが装置体積の約4割を占めるので装置が大型になると共に、電解コンデンサの耐用年数が他の部品に比較して短い信頼性が低下する。

このような状況の中で、商用三相交流電源を可変電圧、可変周波数の三相交流に直接変換すると同時に、入力電源電流を力率1の正弦波波形に制御できる三相/三相マトリックスコンバータの研究が世界的に注目されている。マトリックスコンバータは、電解コンデンサ等のエネルギー蓄積素子を用いないので小型化が実現でき、さらに、逆阻止スイッチング素子を使用することで、電源から

負荷までの電流通過素子数が1個となり、変換器損失を低減できる等の特徴があり、パワーエレクトロニクス関係の国際会議では必ずセッションが生まれ、学術的に重要なテーマになっている。

## 2. 研究の目的

マトリックスコンバータでは、出力電圧と入力力率の同時制御において、9個の双方向スイッチを制御するのでスイッチングパターン制御の自由度が高く、さまざまな制御法が考えられ、決定的な制御法が確立していない。このような中で、スイッチングパターン制御として、一般的に制御周期間に三相全体のスイッチング回数を6回とする方式が使用されている。変換器効率改善の面からスイッチング回数低減が重要であり、申請者は、マトリックスコンバータの制御を、4回のスイッチング回数で実現すると同時に、モータ効率改善およびノイズ抑制の観点から出力電圧高調波を抑制する方式を3件の論文と特許で提案し、その有効性を確認している。

さらに、出力電流情報をスイッチング時間の計算に使用することで、制御周期間の三相全体のスイッチング回数を3回に低減する方式へと発展させている。この3回のスイッチング回数による方式は、過去に例を見ない独創的なものである。

このスイッチングパターンには複数のパターンが存在し、その選択アルゴリズムを考える上で、今回の着想に至っている。すなわち、制御周期間で定義される瞬時実効値という新しい概念を導入して制御目的に応じたスイッチングパターンの評価基準を明らかにし、リアルタイムでマトリックスコンバータのスイッチングパターンの評価と選択を実現することを目的とする。瞬時実効値は、マトリックスコンバータのスイッチングパターン決定のみにとどまらず、インバータなどを含めたスイッチングパターン制御法や三相不平衡回路の評価などに応用でき、新たなPWM制御法の開発にも期待できる。

本研究では、具体的に以下の3項目を実施する。

- (1) スwitchングパターン評価のための瞬時実効値理論を確立する。
- (2) 出力電圧高調波を抑制するスイッチングパターン制御を確立する。
- (3) 入力電流高調波を抑制するスイッチングパターン制御を確立する。

## 3. 研究の方法

(1) スwitchングパターン評価のための瞬時実効値理論を確立する。マトリックスコンバータのスイッチングパターン制御法の評価は、一般的に出力電圧の高調波分布で行われているが、スイッチングパターン制御法ごと

に特徴ある高調波分布をそれぞれ持ち、制御法の良否を明確にできない状況にある。本研究で導出する瞬時実効値理論は、制御周期間におけるスイッチングパターンにより得られる三相全体の電圧または電流の実効値であり、制御周期間ごとの電圧または電流波形の良否を直接評価できる特徴があり、マトリックスコンバータのスイッチングパターン制御等を前提に具体的に以下を実施する。

①制御周期ごとの瞬時実効値と、電圧または電流波形の基本波および高調波の関係を導出し、波形の評価基準を明確にする。

②リアルタイム処理に適した制御周期ごとの瞬時実効値の計算アルゴリズムを開発する。

(2) 出力電圧高調波を抑制するスイッチングパターン制御を確立する。マトリックスコンバータ制御において、制御周期間の三相全体のスイッチング回数は、一般的に6回であるが、それを3回に低減する独創的なスイッチングパターン制御法を申請者は既に提案済みである。本制御法はスイッチング回数を低減できるのみではなく、出力電圧高調波を従来法の約70%に低減できることも確認済みである。しかしながら、複数のパターンが存在し、どのパターンが最適であるかが明確になっていない。そこで、出力電圧高調波を抑制する最適なパターン選択アルゴリズムを以下の通り開発する。

①制御周期間の三相全体のスイッチング回数が3回で、出力電圧高調波が低い基本パターンを4種類導出済みであるが、それら以外の同様な基本パターンを導出する。

②複数パターン存在時に、制御周期ごとにそれぞれのパターンの出力電圧瞬時実効値を計算し、出力電圧高調波を最小とするリアルタイムパターン選択アルゴリズムを開発する。

(3) 入力電流高調波を抑制するスイッチングパターン制御を確立する。マトリックスコンバータ制御では、出力電圧制御と共に入力電流制御が実現でき、分散電源などの系統連系システムでは、入力電流波形の高調波抑制が重要になる。入力電流波形の高調波低減を実現するマトリックスコンバータのスイッチングパターン制御法を以下の通り開発する。

①計算アルゴリズムが簡単である制御周期間の三相全体のスイッチング回数が4回の入力電流高調波を抑制するスイッチングパターンを開発する。

②入力電圧と出力電流情報を用いて、制御周期間の三相全体のスイッチング回数が3回となる入力電流高調波が低い複数の基本パターンを導出する。

③スイッチング回数3回のパターンにおい

て、制御周期ごとにそれぞれのパターンの入力電流瞬時実効値を計算し、入力電流高調波を最小とするリアルタイムパターン選択アルゴリズムを開発する。

#### 4. 研究成果

図1は三相/三相マトリックスコンバータの構成である。入力相  $r, s, t$  と出力相  $u, v, w$  を接続する9個の双方向スイッチと、スイッチングに伴う高調波電流の電源への流出を抑制するLCフィルタで構成されている。入力側は三相電源に接続され、電源電流が力率1になるように、マトリックスコンバータの入力電流指令値を決め、出力側は線間電圧指令値を与える。これらの入力電流指令値と出力電圧指令値が、それぞれ実現されるようにマトリックスコンバータのスイッチングパターンを制御する。スイッチングパターン制御においてそのリアルタイム評価のために瞬時実効値理論を導出し、マトリックスコンバータの出力電圧高調波の低いパターンと入力電流高調波を低減するパターンをそれぞれ導出する。

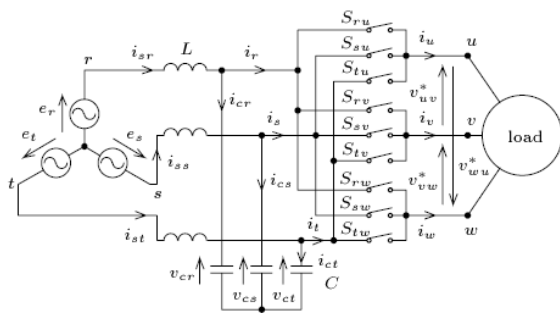


図1 マトリックスコンバータの構成

(1) マトリックスコンバータのスイッチングパターン評価のための瞬時実効値理論を導出した。瞬時実効値理論を用いて複数PWMパターンに対するリアルタイムパターン選択法を提案する。まず、制御周期間の波形評価法として、瞬時実効値という従来の実効値を制御周期間や瞬時値に拡張した新しい理論を提案し、PWM波形と指令値との誤差波形の評価法を明確にした。提案した瞬時実効値理論により制御周期間の出力電圧高調波と入力電流高調波の評価ができ、評価基準に従って瞬時実効値の低いPWMパターンを選ぶことによって出力損失の低い制御を実現できる。

(2) 出力電圧高調波を抑制するスイッチングパターン制御を確立する。マトリックスコンバータ制御において、制御周期間の三相全体のスイッチング回数を3回に低減するスイッチングパターン制御法において、瞬時実効

値を用いて、出力高調波電圧最小制御を実現した波形を図2に示す。出力電圧波形の総合歪み率(THD)の三相の平均値は、従来の選択法を用いた場合は49.4%、提案選択法を用いた場合は47.0%と、2.4%低減されており、出力電圧の高調波を低減できている。

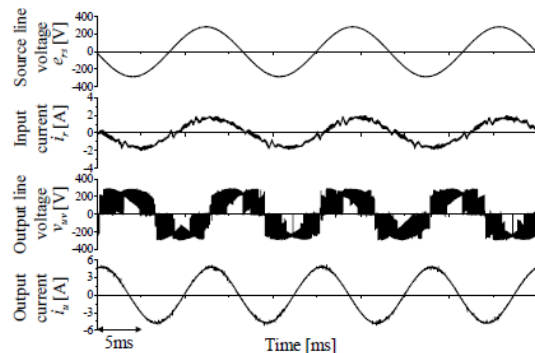


図2 出力電圧高調波最小制御時の波形

(3) 入力電流高調波を抑制するスイッチングパターン制御を確立する。制御周期間の三相全体のスイッチング回数を3回に低減するスイッチングパターン制御法において、瞬時実効値を用いて、入力高調波電流最小制御を実現した波形を図3に示す。電流波形の総合歪み率(THD)の三相の平均値は、従来の選択法を用いた場合は97.64%、提案選択法を用いた場合は67.20%と低減されており、入力電流の高調波を低減できている。

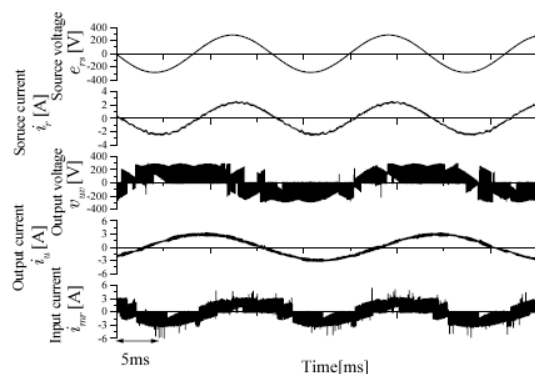


図3 入力電流高調波最小制御時の波形

(4) 出力電圧高調波抑制と入力電流高調波抑制はトレードオフの関係にあり、双方を同時に低減するには限界がある。これに対して、制御目的に適した出力電圧高調波と入力電流高調波を実現するための協調制御法を提案している。本項目は、当初申請時には計画をしていなかったものであるが、研究を進めていく上で、当初計画を全て終了した後の発展項目である。図4に、出力電圧と入力電流の波形のTHDと出力電圧制御の優先率  $K_v$  の関係を示す。本協調制御により、出力電圧高調波と入力電流高調波の割合を調整できることがわかる。

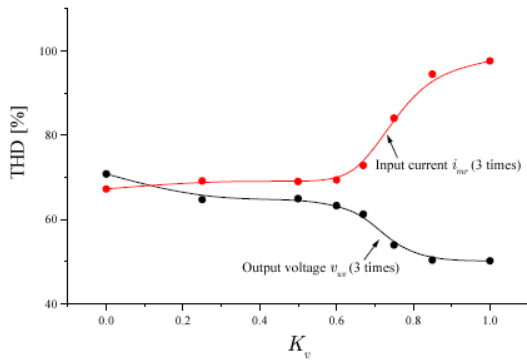


図4 協調制御による入出力 THD の変化

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕 (計3件)

- ① 石川秀太, 竹下隆晴: 「三相/三相マトリックスコンバータの入力力率制御法」, 電気学会論文誌D, Vol. 129, No. 3, pp. 258-266 (2009), 査読有
- ② 竹下隆晴: 「電力変換器の高密度・省エネルギー技術」, 電気学会誌, Vol. 128, No. 6, pp. 368-368, (2008), 査読無
- ③ 竹下隆晴, 安藤雄介: 「三相/三相マトリックスコンバータの転流回数低減PWM制御」, 電気学会論文誌D, Vol. 127, No. 8, pp. 805-812, (2007), 査読有

### 〔学会発表〕 (計16件)

- ① 長谷川高之, 石川秀太, 竹下隆晴: 「マトリックスコンバータの出力電圧高調波を低減するPWM制御法」, 電気学会全国大会, 2009年3月18日, 札幌市北海道大学
- ② 田中伸太郎, 竹下隆晴: 「転流回数低減マトリックスコンバータにおける限定スイッチングパターンによる全入力力率制御」, 電気学会電力技術・電力系統技術・半導体電力変換技術・合同研究会資料, 2009年3月3日, 沖縄県琉球大学
- ③ 石川秀太, 竹下隆晴: 「三相/三相マトリックスコンバータの転流回数を低減した協調制御」, 電気学会半導体電力変換研究会資料, 2009年1月24日, 大阪市大阪工業大学
- ④ 中本慎二, 竹下隆晴: 「三相/三相マトリックスコンバータのIGBT制御信号生成法」, 高速信号処理応用技術学会研究会資料, 2008年10月18日, 名古屋市名古屋工業大学
- ⑤ 長谷川高之, 石川秀太, 田中伸太郎, 竹下隆晴: 「転流回数減マトリックスコンバータにおける制御範囲の実機検証」, 電気関係学会東海支部連合大会, 2008年9月19日, 愛知県愛知県立大学
- ⑥ 石川秀太, 竹下隆晴: 「三相/三相マトリックスコンバータの入力電流・出力電圧

高調波の協調制御法」, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2008年8月28日, 高知市文化プラザ「かるぽーと」

- ⑦ 谷川友春, 竹下隆晴: 「瞬時実効値評価を用いたマトリックスコンバータの入力電流高調波低減法」, 電気学会半導体電力変換研究会資料, 2008年7月25日, 釧路市生涯学習センター
- ⑧ 田中伸太郎, 竹下隆晴: 「転流回数低減マトリックスコンバータの入力力率制御範囲拡大」, 電気学会半導体電力変換・産業電力電気応用合同研究会資料, 2008年6月7日, 札幌市北海道大学
- ⑨ 安藤雄介, 竹下隆晴: 「マトリックスコンバータの転流回数低減PWM制御法の特性解析」, 電気学会全国大会, 2008年3月19日, 福岡市福岡工業大学
- ⑩ 竹下隆晴, 石川秀太, 安藤雄介: 「瞬時実効値理論とマトリックスコンバータへの応用」, 電気学会半導体電力変換研究会, 2008年3月6日, 長崎市長崎大学
- ⑪ 菊川祐一郎, 石川秀太, 竹下隆晴: 「マトリックスコンバータの入力電流高調波を低減するスイッチングパターン選択法」, 電気学会半導体電力変換研究会, 2008年1月25日, 神戸市神戸大学
- ⑫ 石川秀太, 菊川祐一郎, 竹下隆晴: 「三相/三相マトリックスコンバータの入力電流高調波を低減するPWM制御法」, 電気学会半導体電力変換/リアドライブ合同研究会, 2007年12月6日, 宮古島市教育委員会中央公民館
- ⑬ 竹下隆晴: 「マトリックスコンバータのPWM制御法」, 電気関係学会東海支部連合大会, 2007年9月28日, 長野市信州大学
- ⑭ 安藤雄介, 竹下隆晴: 「マトリックスコンバータの転流回数と出力電圧高調波を低減するPWMパターン選択法」, 電気学会産業応用部門大会, 2007年8月21日, 大阪市大阪工業大学
- ⑮ 石川秀太, 竹下隆晴: 「三相/三相マトリックスコンバータの全入力力率を実現するPWM制御」, 電気学会半導体電力変換研究会, 2007年7月19日, 山口市山口大学
- ⑯ 谷川友春, 山本崇広, 竹下隆晴: 「入力電流高調波の低減に着目した三相/三相マトリックスコンバータのPWM制御法」, 電気学会半導体電力変換・産業電力電気応用合同研究会, 2007年6月7日, 千葉県富津市新日本製鐵株式会社

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

竹下 隆晴 (TAKESHITA TAKAHARU)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70171634