

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18016

研究課題名(和文)マトリックスコンバータ技術によるハイブリッド自動車の高効率化

研究課題名(英文)High Efficiency Control for Hybrid EV with Matrix Converter

研究代表者

春名 順之介 (HARUNA, Junnosuke)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40609369

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は入力電流ひずみの低減を目的としている。マトリックスコンバータは発電機を接続した場合、出力インピーダンスに起因して不安定になることから、入力電流ひずみを低減することが発電機の制御に有効であると考えられる。また、発電機はその運転状況に応じて最適な力率に制御することが必要となるが、入力電流ひずみの低減と同時に、入力力率の制御範囲拡大も考える必要がある。マトリックスコンバータは制御方式によって入力力率の制御範囲に制限が発生する可能性があるため、入力電流ひずみを低減することと同時に入力力率も考慮する必要がある。本研究は以上の2点に着目して制御を開発した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to reduce the input current distortion. When a generator is connected to the input side of the matrix converter, the operation of the matrix converter becomes unstable due to the generator's output impedance. In order to avoid this unstable operation, we proposed a new control method which can reduce the input current distortion. The matrix converter has to control the input power factor when the generator is connected to the input side. Because the operation of the generator depends on the input power factor of the matrix converter. Therefore, the matrix converter has to control both of input current distortion and input power factor.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：マトリックスコンバータ 入力電流ひずみ 空間ベクトル変調 スイッチングパターン

1. 研究開始当初の背景

低炭素社会実現の一手法として、日本ではハイブリッド電気自動車(以下、HEV)が普及している。HEVはエンジンを持つため、電気自動車と比較して、(1)蓄電要素の容量が小さくてもエンジンを使用した車両駆動が可能、(2)燃料と蓄電池のエネルギー密度の差から、一充電走行距離が長い、(3)エンジンの出力効率が火力発電その他の発電設備と比較して低い。以上の理由から、一般車両のみならず、バスや重機などの大型車両に関しても、HEVの利点が高いといえる。しかし、HEVは従来の自動車と比較すると、エンジンの他に車両駆動用モータや、エンジン発電機とモータの間に接続される電力変換器(以下、インバータシステム)などを設置する必要があり、車両に占める駆動部の容積が増大する。さらに、車両の運動エネルギーを改正するためのバッテリーを搭載する必要がある。また、(3)の理由により、環境性能は電気自動車と比較すると悪いといえる。さらに、HEVはガソリンエンジンのみの車両と比較すると価格が上昇するため、「より低燃費」、「より低価格」のHEVが求められている。

一方、近年、交流電力を生成するために用いられてきたインバータに変わり、マトリクスコンバータが盛んに研究されている。マトリクスコンバータは交流から交流に電力を直接変換できる新しい回路方式であり、従来のインバータに対して、損失1/2以下、容積1/2以下、装置寿命3倍以上を実現できる(図1)。マトリクスコンバータの適用例はモータ駆動が一般的であるが、自動車のパワートレインに応用された例はない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マトリクスコンバータをハイブリッドEVへの接続を想定した、入力電流ひずみの低減を目的としている。図2に発電機をマトリクスコンバータに接続した場合の入出力電圧電流波形を示す。マトリクスコンバータは発電機を接続した場合、出力インピーダンスに起因して不安定になることから、入力電流ひずみを低減することが発電機の制御に有効であると考えられる。また、発電機はその運転状況に応じて最適な力率に制御することが必要となるが、入力電流ひずみの低減と同時に、入力力率の制御範囲拡大も考える必要がある。マトリクスコンバータは制御方式によって入力力率の制御範囲に制限が発生する場合があるため、入力電流ひずみを低減することと同時に入力力率も考慮する必要がある。本研究は以上の2点に着目して制御を開発した。

3. 研究の方法

本研究で主眼に置くことは、(1)マトリクスコンバータの入力電流ひずみを最小とする制御を開発すること、(2)マトリクス

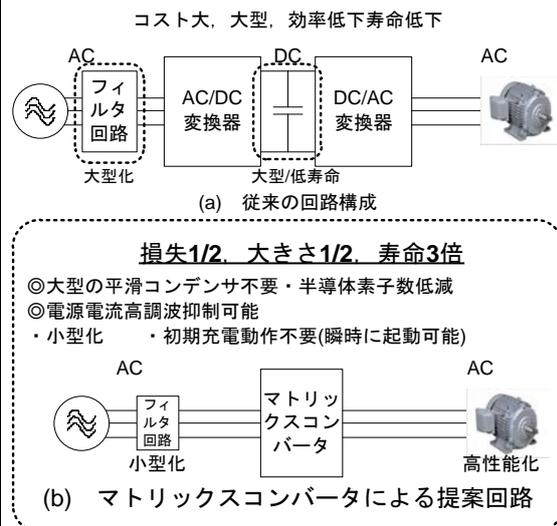


図1 マトリクスコンバータの特徴

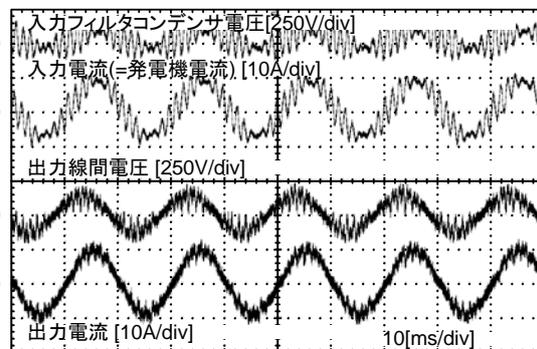


図2 発電機を接続した場合の電圧電流波形

コンバータの入力電流歪を最小とする方式として、空間ベクトル変調を用いること、以上の2点である。マトリクスコンバータの制御として一般的なものは、出力側に接続するモータ制御に適した出力電圧を得ることであり、本研究で目標とする入力電流ひずみに着目した例はそれほど多くない。また、入力力率と制御方式の関係についても、制御が成立して入出力に三相正弦波が得られることを検討しなければならない。(1)に挙げた入力電流ひずみを最小にする点と、入力力率の関係同時に、マトリクスコンバータの動作を可視化した上で検討できる方式が(2)に述べた空間ベクトル変調である。したがって、本研究では空間ベクトル変調によって、マトリクスコンバータの入力電流ひずみを最小にできる制御を模索する。

4. 研究成果

図3に空間ベクトル変調に用いる瞬時空間ベクトル図を示す。マトリクスコンバータは入力電流と出力電圧を同時に制御する必要があるから、インバータなどの従来の電力変換器と比較して2つの瞬時空間ベクトル図について同時制御が成立するかどうかを検討しなければならないことから、制御が複雑

である。マトリックスコンバータはスイッチングパターンが全部で 27 種類あり、そのすべてのスイッチングパターンに瞬時の電圧・電流を代入して実際に出力されるすべての入力電流、出力電圧を計算した上で、マトリックスコンバータの動作が可視化されるように図示したものが瞬時空間ベクトル図である。これをもとに、本研究では、図 3(a)の I_{in}^* に対して周辺にある ● ■ ▲ の選択可能なスイッチングパターン中から、入力電流歪が一番小さくできる点を 4 点選択する。すると、(b)の出力電圧の方でも(a)で選択されたスイッチングパターンに対応したパターンが自動的に選択され、(b)の方で選択されたパターンが V_{out}^* をベクトル合成で出力できるかどうかを判断し、出力可能となればマトリックスコンバータのスイッチング信号を決定する。その流れを表したのが図 4 である。図 4 の流れに沿って計算し、(a)、(b)の療法で使用されるスイッチングパターンが制御の可否を判定するデューティ計算をクリアできなければ最初から選び直す必要がある。

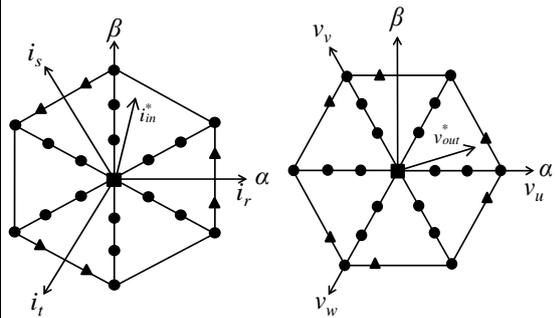
次に、提案する入力電流ひずみを低減する空間ベクトル変調のアルゴリズムについて詳細を述べる。

図 5 に瞬時入力電流ベクトル図の場合分けを示す。瞬時空間ベクトル図では、図 5 で分けた 6 つの三角形で覆われた領域において、瞬時空間ベクトルで示した ● ■ ▲ の選択可能なスイッチングパターンの分布が等しく分布することから、制御の簡単化のために図 5 中の 1 の領域において制御を検討する。

図 6 に図 5 の 1 の領域におけるマトリックスコンバータが選択可能なパターンの呼称を示す。提案方式では、この中から入力電流と出力電圧の制御が成立するパターンをすべて検索した。このとき、図 7 で示す、矢印で示したスイッチング回数が 1 回となるベクトルの移動経路を選択することで、入力電流を最小にできつつ、スイッチング回数の低減、すなわち、マトリックスコンバータの特徴であるスイッチング損失の低減を達成できることがわかった。これを考慮して入力電流と出力電圧の同時制御が達成できるパターンをすべて検索した結果、138 パターン存在することがわかった。

本研究では 138 パターン存在する同時制御可能なパターンから、さらに入力電流ひずみが最小となるパターンを検討した。この検討に当たり、入力電流指令ベクトルの大きさ (=ベクトルの長さ) に対する場合分けを行い、パターンを絞る検討を行っている。

図 8、図 9 にパターンを絞るためにおこなった場合分けの例を示す。提案する空間ベクトル変調では、138 パターンから最小の入力電流ひずみを得るために、入力電流指令の大きさを 0.5p. u. 前後で場合分けを行う(基準量は出力電流振幅である)。図 8



(a) 入力電流 (b) 出力電圧

図 3 空間ベクトル変調に用いる瞬時空間ベクトル図

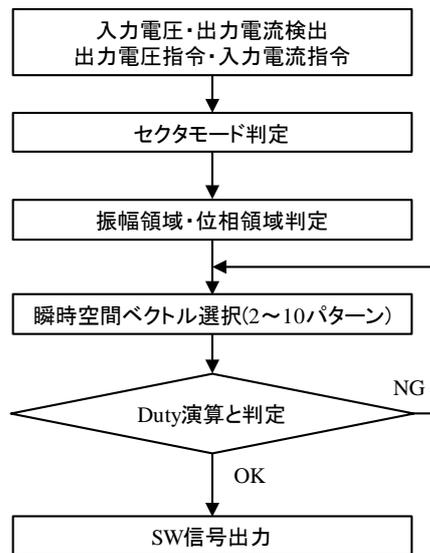


図 4 制御のフローチャート

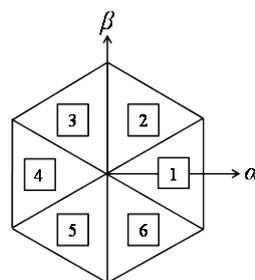


図 5 瞬時入力電流ベクトル図の場合分け

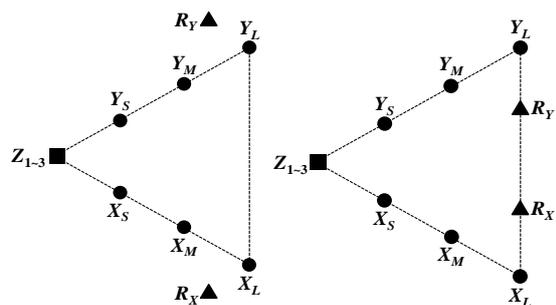


図 6 瞬時空間ベクトルのパターンの呼称

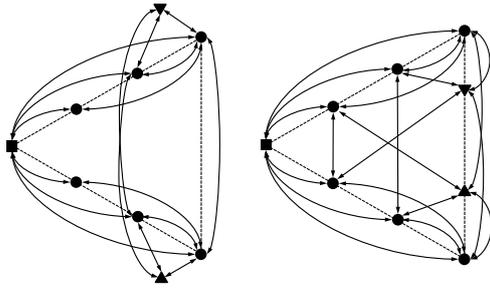


図7 スwitching回数が最小となる各ベクトルの移動経路

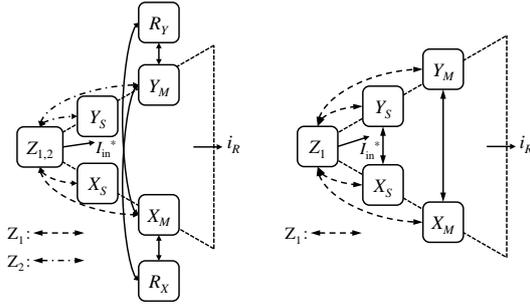


図8 入力電流指令が小さい場合の選択パターンの例

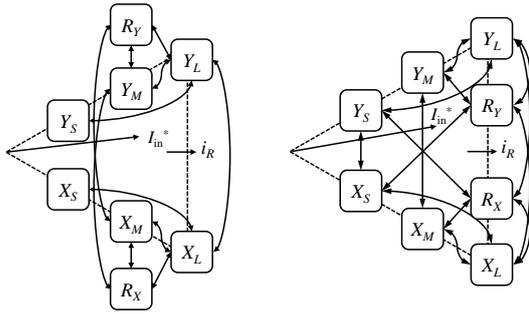


図9 入力電流指令が大きい場合の選択パターン

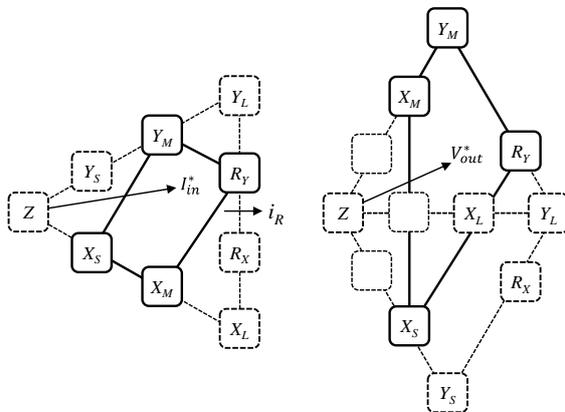


図10 出力電圧ベクトルとの同時制御性を考慮したパターンの選択法

は入力電流指令が小さい場合、図9は大きい場合の一例である。提案する空間ベクトル変調では、先述した場合分けの状態に対して、「指令値から一番遠くなる選択可能パターン」のベクトルを選択しない」という考え方をもとに、パターンを絞る。図8では、図6の Y_L, X_L がそれに該当する。一方、図9では図6の $Z_{1\sim3}$ がそれに該当する。これらのパターンを選択しないことで、パターンを大幅に低減できることがわかった。さらに、入力電流指令が大きい場合、出力電圧の同時制御の可否を考慮してパターンを検討した結果、図10に示すようなパターンの選択を行うことによって、入力電流ひずみの低減と出力電圧の同時制御性が成立することがわかった。これにより、入力電流ひずみを最小となるパターンが2~10パターンまでに低減できた。表1、表2それぞれに入力電流指令が小さい場合のパターン一覧と、入力電流指令が大きい場合のパターン一覧を示す。

本研究では、入力力率角 $\theta_{in}=0deg$ においてシミュレーションを行い、入力力率と変調率に応じて入力電流ひずみが最適化されているかを確認する。また今回のシミュレーションは、出力電流ひずみによる入力電流ひずみへの影響を除き、入力力率と変調率に対しての制御性能を確認するため、出力に電流源を接続して出力力率角 $\theta_{out}=0deg$ としてシミュレーションを行う。その他のシミュレーションの条件を表3に示す。

図11に文献(1)によるシミュレーション波形を、図12に本研究で提案した方式によるシミュレーション波形を示す。ただし、波形は上から入力相電圧、入力線電流(PWM)、ローパスフィルタ(LPF)通過後の入力線電流、出力線間電圧(PWM)、出力線電流を示す。まず、図12の入力線電流(LPF)の波形は変調率の大きさに関係なく入力力率角 $\theta_{in}=0deg$ に制

表1 入力電流指令が小さい場合のパターン

Selection pattern	4 vectors				Selection Pattern	4 vectors			
	V1	V2	V3	V4		V1	V2	V3	V4
1	Y_S	Z_2	Y_M	R_X	1	Y_S	X_S	Z_1	Y_M
2	Y_S	Y_L	R_Y	X_M	2	Y_S	Z_1	X_M	Y_M
3	Y_S	Y_L	Y_M	R_X	3	Y_S	Y_L	R_Y	Y_M
4	Y_S	Y_L	X_L	X_M	4	Y_S	X_S	R_Y	Y_M
5	X_S	X_L	Y_L	Y_M	5	Y_M	Y_L	Y_S	R_X
					6	Y_S	R_X	X_M	Y_M
					7	X_S	R_Y	Y_M	X_M
					8	Y_S	Y_L	R_X	X_M
					9	X_S	X_L	R_Y	Y_M

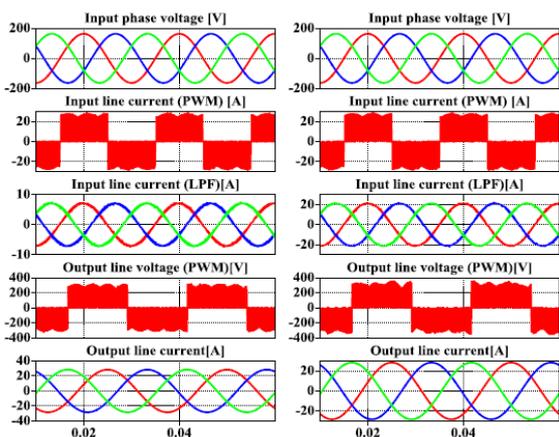
表2 入力電流指令が大きい場合のパターン

Selection pattern	4 vectors				Selection Pattern	4 vectors			
	V1	V2	V3	V4		V1	V2	V3	V4
1	X_S	Z_1	X_M	R_Y	1	X_S	Y_S	Z_1	X_M
2	X_S	X_L	R_X	Y_M	2	X_S	Z_1	Y_M	X_M
3	X_S	X_L	X_M	R_Y	3	X_S	X_L	R_X	X_M
4	Y_S	Y_L	X_L	X_M	4	X_S	Y_S	R_X	X_M
5	X_S	X_L	Y_L	Y_M	5	X_M	X_L	X_S	R_Y
					6	Y_S	R_X	X_M	Y_M
					7	X_S	R_Y	Y_M	X_M
					8	Y_S	Y_L	R_X	X_M
					9	X_S	X_L	R_Y	Y_M

御され、かつ、ひずみのない正弦波に制御されていることが確認できる。また、図 11 と図 12 を比較すると、提案法の入力線電流 (PWM) の波形がピーク付近での瞬時変化量が小さくなっていることから、従来法よりも入力電流ひずみが低減できると考えられる。そ

表 3 シミュレーション条件

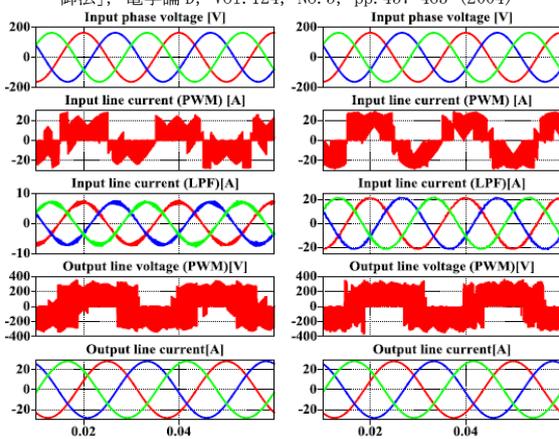
入力線間電圧	200Vrms / 50Hz
出力線電流	20Arms / 40Hz
出力力率	$\cos\theta_{out}=1.0$
入力電流指令	Low region:5.0Arms
	High region:15.0Arms
入力フィルタ	Lf:2mH / Cf:6.6 μ F / Rd:47 Ω
キャリア周波数	10kHz
転流方式	Ideal 1-step commutation



(a) Vout=50V (b) Vout=150V

図 11 シミュレーション結果⁽¹⁾

(1) 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, Vol.124, No. 5, pp.457-463 (2004)



(a) Vout=50V (b) Vout=150V

図 12 提案法のシミュレーション結果

こで、入力電流の総合ひずみ率(THD)を計算して定量的な評価を行う。本論文では、純粹に制御法の違いによるひずみの評価を行うため、入力フィルタによる影響を無視し、入力線電流の PWM 波形において THD を比較する。

表 4 に従来法と提案法の入力電流 THD の比較結果を示す。表 4 より従来法と提案法の入力線電流 THD を比較すると、変調率の大きさに関係なく提案法の入力線電流 THD の方が低いことが確認できる。以上より、提案法において導出した全選択ベクトルが入力電流ひずみを最適に制御可能だと言える。一方、表 4 より出力線間電圧 THD の結果を比較すると、変調率に関係なく従来法に比べて提案法の出力線間電圧 THD の方が高くなっている。これは、マトリックスコンバータにおける入力電流ひずみと出力電圧の制御にトレードオフあり、一方の波形改善を行うともう一方のひずみが悪化するためである

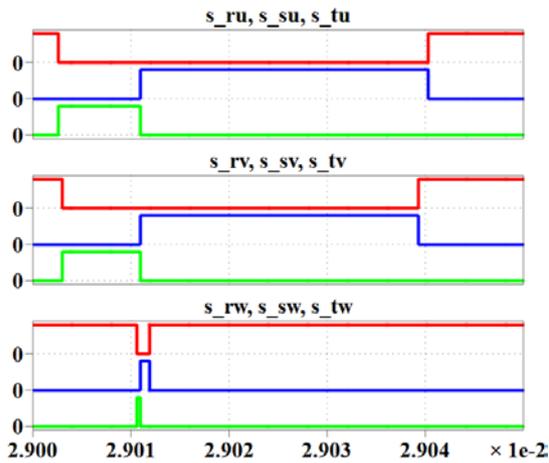
次に、マトリックスコンバータの特徴であるスイッチング回数について、提案法がスイッチング回数の低減が達成できているかどうかを検討する。

図 13 に文献(1)とのスイッチング回数の比較結果を示す。図 13(a), (b)を比較すると、従来法ではマトリックスコンバータのすべてのスイッチで、1 制御周期中に必ず 1 回スイッチングを行うことで制御が達成されている。一方、(b)の提案法では、スイッチング回数が低減しており、図 7 で示したパターンの移動を考慮してスイッチング回数が 3 回となるように制御していることが確認できる。これより、従来法と比較して、提案法はスイッチング回数を 1/3 に低減できていることがわかり、スイッチング損失低減に寄与することがわかる。

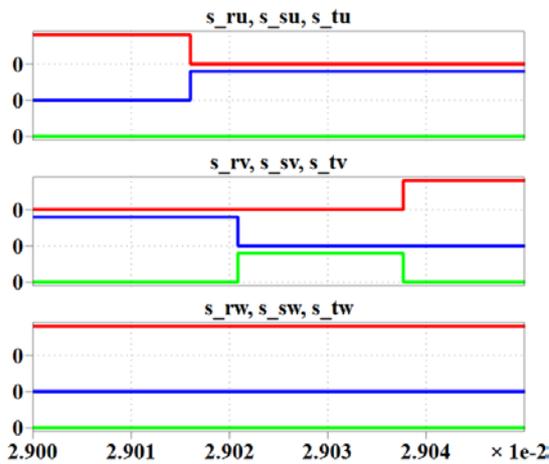
最後に、提案法の入力力率制御範囲について検討した。図 14 に入力力率の理論制御範囲と提案制御の力率制御範囲の比較結果を示す。図 14 より、提案したパターンを用いた入力力率の制御範囲は、理論的な入力力率の絵師魚範囲に対して、ほぼ制御範囲を満たしているものの、わずかに制御範囲が狭くなっていることがわかった。これについては、今後の課題とする。

表 4 入力電流, 出力電圧ひずみの比較

制御方式	従来法(1)		提案法	
出力電圧	50V	150V	50V	150V
入力電流 (PWM) THD	192 %	74.6%	152%	54.1 %
出力電圧 (PWM) THD	192 %	76.3%	272%	97.9 %



(a) 従来法⁽¹⁾



(b) 提案する空間ベクトル変調

図 13 スイッチング回数の比較結果

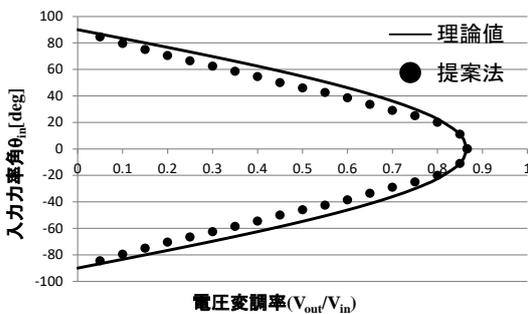


図 14 入力力率の理論制御範囲と提案制御の力率制御範囲の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. 吉村仁志・春名順之介・星伸一：「マトリックスコンバータの入力電流ひずみを低減可能なスイッチングパターンの可視化と特性検証」, 電気学会論文誌 D, Vol.138, No. 3, pp.234-241 (2018)

[学会発表] (計 4 件)

1. Junnosuke Haruna, Jumpei Tsuchiya,

Hiroshi Ueda, Hirohito Funato : "An optimized switching pattern for reducing input current distortion of matrix converter using space vector modulation", 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFECC 2017 - ECCE Asia), pp.68-74 (2017)

2. Junnosuke Haruna, Jumpei Tsuchiya, Hirohito Funato : "A Basic Consideration of Space Vector Modulation Method for Matrix Converter to Optimize Input Current Distortion", Symposium on Semiconductor Power Conversion (S2PC), JP16, pp.135-136 (2015)
3. 土屋純平・船渡寛人・春名順之介 : 「空間ベクトル変調法を用いたマトリックスコンバータの入力電流ひずみ低減を目的としたスイッチングパターン解析」, 電気学会産業応用部門半導体電力変換研究会, SPC-15-203/HCA-15-072/VT-15-043 (2015)
4. 土屋純平・船渡寛人・春名順之介 : 「マトリックスコンバータの空間ベクトル変調法における演算量低減の基礎検討」, 第 5 回電気学会東京支部群馬・栃木支所合同研究発表会, ETG-15-4/ETT-15-4, pp.11-14 (2015)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

春名 順之介 (HARUNA, Junnosuke)

宇都宮大学・工学研究科・助教

研究者番号：40609369

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()