

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14638

研究課題名(和文)マトリックスコンバータと2出力インバータによるDCマイクログリッド用連系変換器

研究課題名(英文) Multi-Port Six-Switch Single-Phase Inverter using Matrix Converters for DC microgrid

研究代表者

春名 順之介 (Haruna, Junnosuke)

宇都宮大学・工学部・助教

研究者番号：40609369

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：近年、スマートグリッドの周辺技術である、V2HやV2Gの研究が盛んである。これらには、他出力可能で様々な電力形態を一括に扱える変換器が必要となり、小型化および省電力化、商用系統の保護のため絶縁性などが要求される。そこで本研究では2出力インバータとマトリックスコンバータ(MC)を用いたマルチポート変換器を提案する。MCは、直流を介さず直接AC/AC変換可能なため、平滑用コンデンサ不要化および変換段数が低減できる。また、2出力インバータはスイッチ数を低減できる。一方で、MCにより制御が複雑化するなど課題は存在する。本研究は提案するマルチポート電力変換器について、その制御方式などを検討する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マルチポート電力変換器は電力変換器の小型化に寄与する方式の一つである。特に、2出力インバータはスイッチ数を低減できることから、近年パワーエレクトロニクス関連の研究で盛んに行われているパッケージング技術に対して、スイッチ数の低減と複数の電力変換器をまとめて一つのモジュールにまとめられるからである。また、マトリックスコンバータも直流を持たないため、大型電解コンデンサが不要となり、小型化に貢献できる。また、得られた研究成果を元に、従来のインバータよりも高効率にできる条件を提示することができたことから、小型化、軽量化、高効率化に対する貢献が十分にあるといえる。

研究成果の概要(英文)：Recently, V2H and V2G are actively researched. These topologies require the multi-port power converter which can output several DC or AC power with isolation.

In this research, a novel multiport converter with 2-output inverter and matrix converter is proposed. Matrix converter can convert AC power directly without any energy strages. On the other hand, 2-output inverter can convert two AC power with independently amplifiers and frequencies. In addition, 2-output inverter can reduce the number of the semiconductor switches in compared with the conventional inverter. Generally, the control method of the matrix converter is complicated, however, this paper applies simple control method to the matrix converter side. At the same time, the control method for the 2-output inverter has to be simplified. This research proposes control strategy for multiport converter with 2-output inverter and matrix converter.

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 2出力インバータ マルチポート電力変換器 空間ベクトル変調

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、マイクログリッドの周辺技術が盛んに研究されており、重要な周辺技術の1つであるマイクログリッド用の連系用電力変換器は、交流、直流、高電圧、低電圧などのいくつかのタイプの電圧を提供する必要がある。さらに、特にDCマイクログリッドの場合、安全のために絶縁が必要となる。一方、マイクログリッド向け電力制御技術として、Vehicle-to-Grid (V2G) は、電気自動車 (EV) と商用系統の間のキーテクノロジーの1つである。これらのアプリケーションには、複数の出力ポートを備えた電力変換器が必要となる。ただし、電力変換器に複数の出力ポートがある場合、出力電圧を個別に制御するためにスイッチの総数が増加する。

2. 研究の目的

この問題を解決するために、本研究では、マトリクスコンバータを使用したマルチポート6スイッチ単相インバータを提案する。提案された変換器は、出力電圧を個別に制御できる2つの出力ポートを備えた2出力インバータを適用する。さらに、提案された変換器は、単相マトリクスコンバータを使用してAC/DCパワーステージを削減する。さらに、提案された変換器は、従来のAC/DC/AC変換器と比較して2つのスイッチを削減できる。一方、提案されている変換器は、9スイッチインバータトポロジを使用しているため、従来の回路と比較してスイッチング数が増加する。本研究ではこれらの課題を解決するための制御方式を検討する。

3. 研究の方法

図1に単相マトリクスコンバータを用いた絶縁型マルチポート電力変換器を示す。絶縁部は高周波トランスを用いて小型化を行う。直流電源から高周波トランスに印加する電圧を生成するインバータは2出力インバータを適用し、2つの出力を6つのスイッチで構成することで、従来のインバータ2台と比較してスイッチ数を低減でき、さらに、2つの独立した直流または交流(VVVF動作)の出力を得ることができる。しかし、2出力インバータは2つのインバータ出力電圧振幅の合計値が直流電圧以下となるように制御しなければならないため、2つの出力電圧に差がない場合、電圧利用率は従来のインバータと比較すると1/2となる。この特性を考えると、提案回路は2つの出力電圧の差が大きい用途や、マイクログリッドのような母線電圧と負荷の単相交流電圧の差が大きい用途に適していると考えられる。あるいは、電源電圧と出力電圧の比が小さい場合には高周波トランスの巻数を調整することで対応することもできるため、全体の交換効率向上を考える場合は、提案回路の出力電圧に合わせて高周波トランスの巻数比を最適化することが有効である。一方、高周波トランスの二次側にはマトリクスコンバータ適用する。これにより、高周波トランスと交流電源の間をAC/AC直接変換できることとなり、従来のAC/DC/AC変換と比較して高効率化を達成できる。提案回路の制御に着目すると、特にマトリクスコンバータ適用しているためAC/AC変換を行わなければならないため、その制御が複雑化する。そこで本論文では、マトリクスコンバータの制御を単純化するための方式を提案する。

図2に提案回路のスイッチング信号の生成図を示す。提案回路ではマトリクスコンバータ側の制御を単純化するために、インバータ側の制御と統合し、インバータ側のみでマトリクスコンバータの制御も行えるようにスイッチング信号を生成する。まずは、トランスを介さずに2出力インバータのみで2つの負荷電圧を出力することを考えてスイッチング信号を生成する。2出力インバータでは2系統の独立した出力を達成するために、2つの出力電圧指令それぞれにオフセット重畳した上で三角波比較を行う。一方、トランスの動作を無視して2出力インバータ側を動作すると実際のトランスには基本波成分が印加されてしまうので、2出力インバータそれぞれの出力を高周波とするために、2出力インバータの出力電圧符号の正負にかかわらず、正負の電圧が交互に出力されるようにパルスを分配する。

ここで、正負に分配してトランスを介して二次側に現れる電圧はもとの信号に戻せば所望の出力電圧を得られることから、マトリクスコンバータ側の信号は、2出力インバータ側で正負に分配した信号に合わせれば良い。よって、マトリクスコンバータは2出力側の正負に合うようにHブリッジの対角のスイッチをオンオフする単純な動作とし、その信号と2出力インバータの信号のANDを取って正負両方の信号を生成する。その後、マトリクスコ

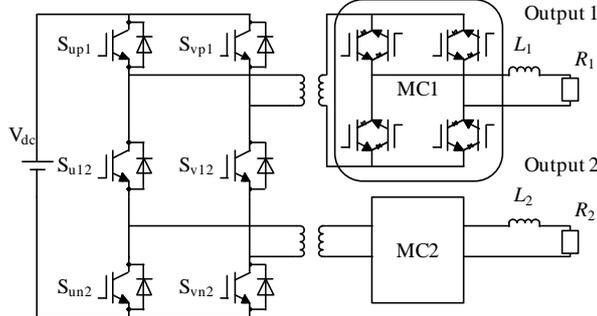


図1 提案回路

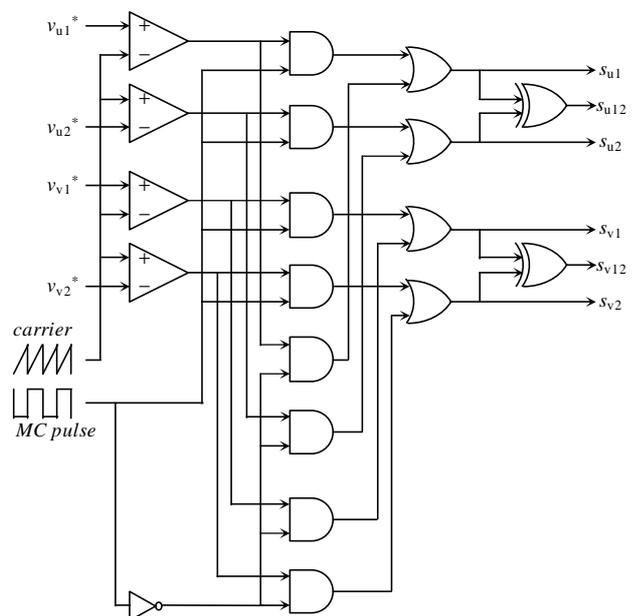


図2 スwitching信号生成ブロック線図

ンバータの信号との OR を取り，正負どちらの信号を使用するか決定する。最終的に，2 出力インバータの上下スイッチの信号の XOR をとって中間スイッチの信号を生成する。これにより，マトリクスコンバータ側の制御が簡単化される。

4. 研究成果

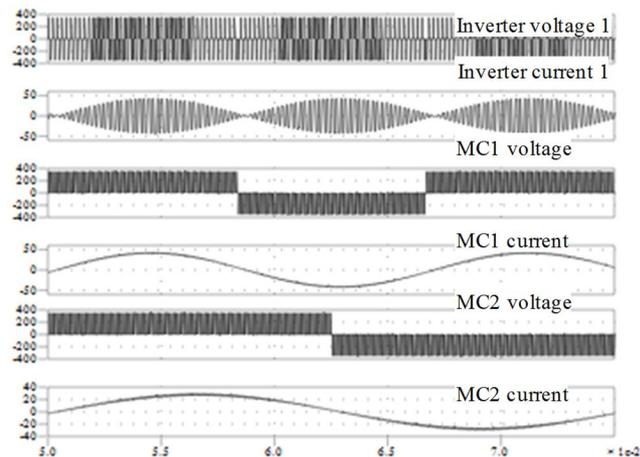
図 3 に表 1 の条件によるシミュレーション結果を示す。提案回路の出力は直流と交流のどちらも出力可能であるが，本稿ではマトリクスコンバータ回路の適用効果も合わせて検討するために，動作条件が一番厳しいと考えられる独立した VVVF 交流出力時について動作検証している。図 3(a)の入出力電圧/電流波形の結果より，出力 1 と 2 において，異なる振幅，周波数の出力電圧が出力していることから，提案制御によって 2 つの独立した VVVF 動作が可能であることが確認できる。

次に，オフセットが乗った指令値の影響を調べるため，図 3(b)の FFT 波形結果(基本波振幅で基準化している)より，提案回路で高周波トランスに直流が印加されるかどうかを確認したところ，極めて微量の直流成分しか乗っておらず，直流偏磁の心配がないことが確認できる。なお，この直流成分は，シミュレーションの分解能によって生じたと考えられる。また，基本波周波数成分も発生していないことが確認できる。一方，周波数分布を見ると，スイッチング周波数の 1/2 の成分でスペクトルが分散しているのが確認できる。これは，スイッチング信号を交互に正負に分配していることからである。以上より，高周波トランスの設計には注意する必要があることがわかる。

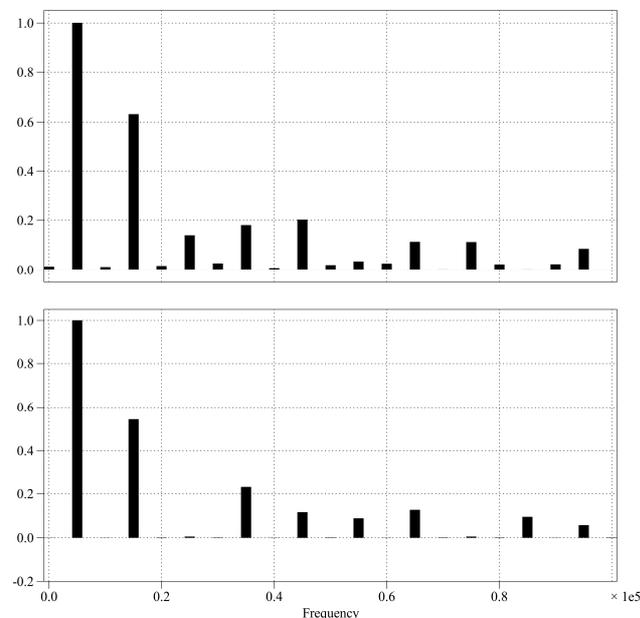
図 4 に本制御適用時の動作時における各スイッチのスイッチング回数を示す。図 4 より，図 1 に示す提案回路に対して図 2 の制御を適用すると，図 1 の中断スイッチのスイッチング回数が 4 回と，上下のスイッチのスイッチング回数の二倍となっていることが確認できる。これにより，本提案回路はスイッチング損失が従来のインバータと比較して増大すると考えられる。この問題は，2 出力インバータの構成で三角波比較 PWM 制御を適用した場合に起こる 2 出力インバータと乗生の減少であり，スイッチング損失の低減には空間ベクトル変調などの三角波比較 PWM 制御以外の方法が必要となる。そこで本研究では，このスイッチング回数が増大する問題に対して，スイッチング回数を低減するために提案回路のすべての動作状態を解析し，常に最適なスイッチングパターンを選択してスイッチング回数を低減する方式を新たに提案する。

表 1 検証条件

Switching frequency : 10kHz	Commutation : Ideal commutation
Load : 2mH, 5Ω RL load	DC link voltage V_{dc} : 350V
Output 1 : 150V 60Hz	Output 2 : 100V 40Hz



(a) 入出力波形



(b) FFT 解析結果

図 3 シミュレーションによる動作確認結果

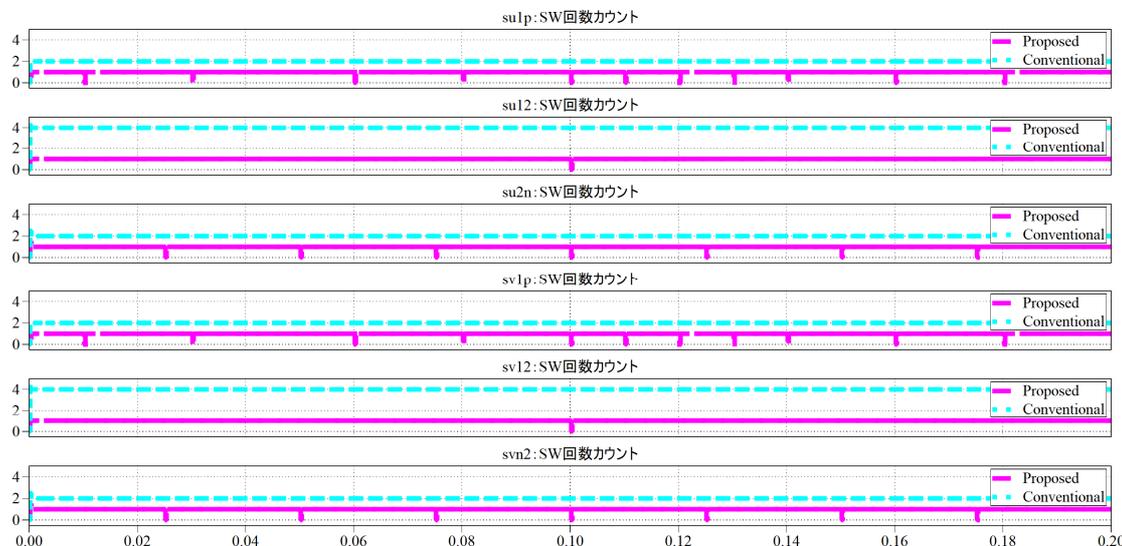


図 4 従来方式および提案方式のスイッチング数カウント

表2 三角波比較 PWM 制御適用時のスイッチング

グパターンの一例

MC		su1p	su12	su2n	sv1p	sv12	sv2n	vuv1	vuv2
正	8	0	1	1	0	1	1	0	0
	1	1	0	1	0	1	1	+	0
	9	1	0	1	1	0	1	0	0
	4	1	0	1	1	1	0	0	-
	7	1	1	0	1	1	0	0	0
	4	1	0	1	1	1	0	0	-
	9	1	0	1	1	0	1	0	0
	1	1	0	1	0	1	1	+	0
8	0	1	1	0	1	1	0	0	
MC		su1p	su12	su2n	sv1p	sv12	sv2n	vuv1	vuv2
負 (出力反転)	8	0	1	1	0	1	1	0	0
	2	0	1	1	1	0	1	-	0
	9	1	0	1	1	0	1	0	0
	3	1	1	0	1	0	1	0	+
	7	1	1	0	1	1	0	0	0
	3	1	1	0	1	0	1	0	+
	9	1	0	1	1	0	1	0	0
	2	0	1	1	1	0	1	-	0
8	0	1	1	0	1	1	0	0	

表3 スwitchング回数を低減可能な
Switchングパターンの一例

MC		su1p	su12	su2n	sv1p	sv12	sv2n	vuv1	vuv2
正	9	1	0	1	1	0	1	0	0
	1	1	0	1	0	1	1	+	0
	4	1	0	1	1	1	0	0	-
	9	1	0	1	1	0	1	0	0
MC		su1p	su12	su2n	sv1p	sv12	sv2n	vuv1	vuv2
負 (出力反転)	9	1	0	1	1	0	1	0	0
	2	0	1	1	1	0	1	-	0
	3	1	1	0	1	0	1	0	+
	9	1	0	1	1	0	1	0	0

表2に三角波比較 PWM 制御を適用した場合のスイッチングパターンの一例を示す。マトリックスコンバータ側の制御信号が正負で別れているが、これは符号を1制御周期ごとに反転しているためである。表2より、三角波比較 PWM 制御を適用する場合、正の場合は8 1 9 4 7 4 9 1 8 というパターンになっているが、このうち、7, 8, 9に関しては2つのインバータ両方で電圧を出力しないゼロベクトルを出力する期間である。つまり、三角波比較の場合は一つの電圧を出力するたびにゼロベクトルを挟んでおり、スイッチング回数画像貸地得ることがわかる。さらに、中断スイッチの状態に着目すると、中断スイッチは必ず2回スイッチングしていることがわかる。以上を踏まえ、本回路のスイッチング回数を低減するためには、

1. ゼロベクトルの使用回数を極力減らす

2. 中断スイッチのスイッチング回数を減らす
以上の2点を満足するスイッチングパターンを探索する必要がある。本研究では以上の課題を解決するために、提案回路が取りうるすべてのスイッチングパターンを導出した上で、上記2点の条件を満足するスイッチングパターンを導出した。

表3にスイッチング回数を低減可能なスイッチングパターンの一例を示す。表2と比較すると、提案制御は正の場合、9 1 4 9と、従来9パターン使用していたものを4パターンまで低減している。次に、各スイッチのスイッチング回数に着目すると、正の場合は、su1p, su12, su2nの3つは全くスイッチングせず、sv1p, sv12, sv2nの3つでスイッチングをしていることがわかる。これは、2出力インバータの独立したVVVF動作を実現するためにはこれまで両方のレグでスイッチングしなければならないと考えていたが、片方のみのスイッチングで2つの独立したVVVF動作を達成できることを表している。これにより、スイッチング回数を劇的に低減でき、両方のレグの中断スイッチにおいてもスイッチング回数が他のスイッチと同等になっていることが確認できる。これにより、スイッチング回数を大幅に低減できると考えられる。

図5にスイッチング回数低減 PWM 制御を適用した場合の電圧電流波形、および、各スイッチのスイッチング回数を示す。図5より、スイッチング回数を低減した場合においても、これまでの2出力インバータの機能である独立したVVVF動作ができることが確認できる。次に各Switchのスイッチング回数を見ると、従来の三角波比較 PWM 方式では中断スイッチが4回、他の上下のスイッチが2回で推移しているのに対し、提案制御ではすべてのスイッチがすべての領域で1回まで低減できることが確認できる。これにより、スイッチング回数を大幅に低減できると考えられる。

図6に提案回路の損失解析結果を示す。損失解析は従来のインバータ回路、三角波比較 PWM 制御、スイッチング回数低減 PWM 制御の3種類とし、提案回路にはIGBTを適用した場合を想定している。損失解析結果より、提案回路は従来回路より導通損失が大きくなることと、導通損失とスイッチング損失の割合を見たときに、導通損失の割合が大きくなることと、従来のインバータ回路と比較すると、提案回路は1つのレグに3つのスイッチを使用しており、電圧出力時は常に電流経路に2つのスイッチを通る構成となっているからである。よって、提案回路はスイッチング回数をできるだけ低減することが重要であることがわかる。以上を踏まえ、三角波比較 PWM 制御とスイッチング回数低減 PWM の損失比較を行うと、いずれのスイッチング周波数においても、スイッチング回数低減 PWM はスイッチング損失を1/2以下に低減できることがわかる。これにより、従来のインバータと比較してもいずれのスイッチング周波数においてもスイッチング回数低減 PWM を適用した提案回路の損失が一番低いことが確認できる。以上より、提案回路は従来のインバータよりも損失が低減でき、スイッチ数が低減できることから、従来のインバータよりも小型化、軽量化、マトリックスコンバータを適用することによる長寿命化が達成できるといえる。

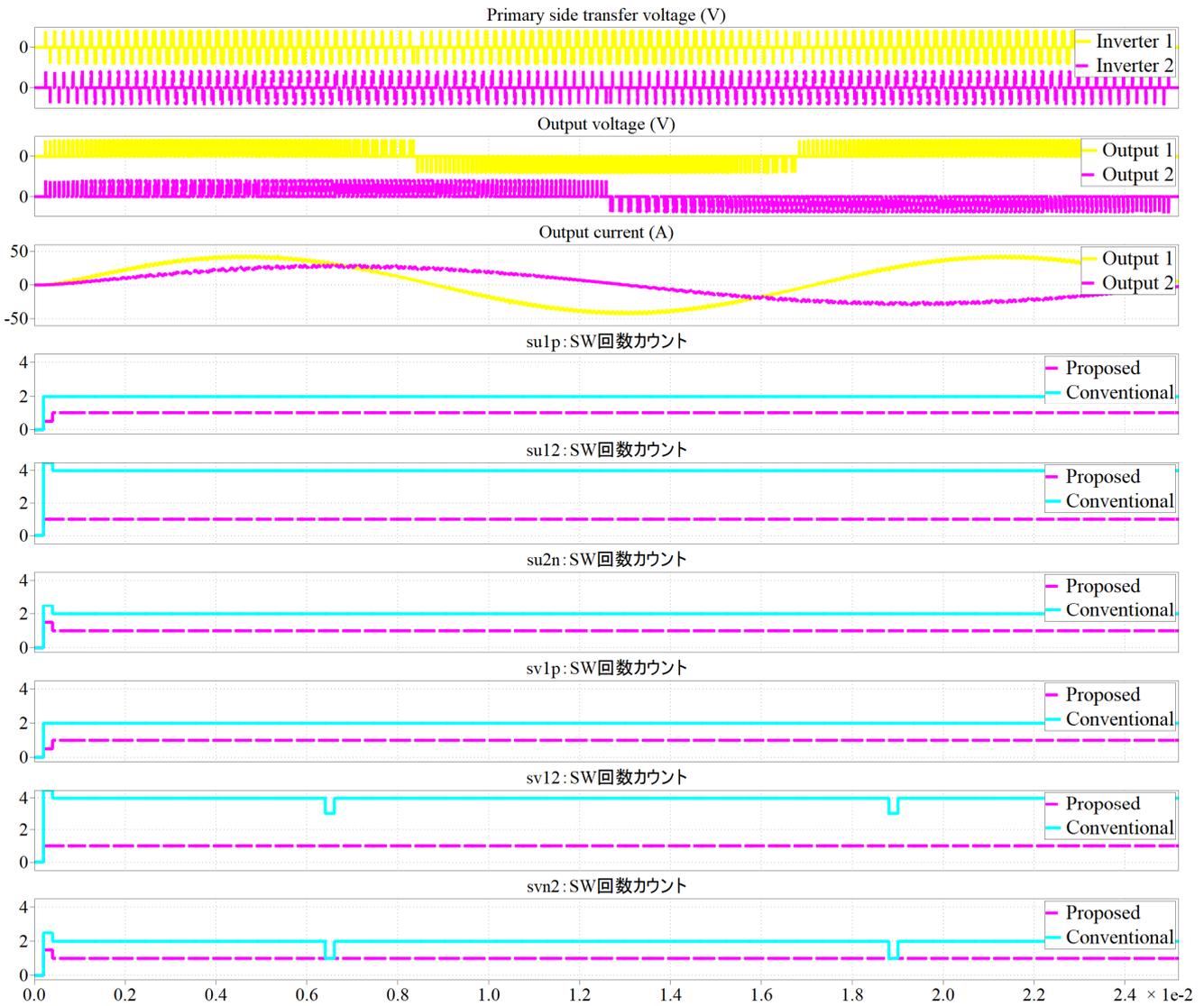


図5 提案するスイッチング回数低減 PWM 制御適用時の電圧電流波形と、各スイッチのスイッチング回数

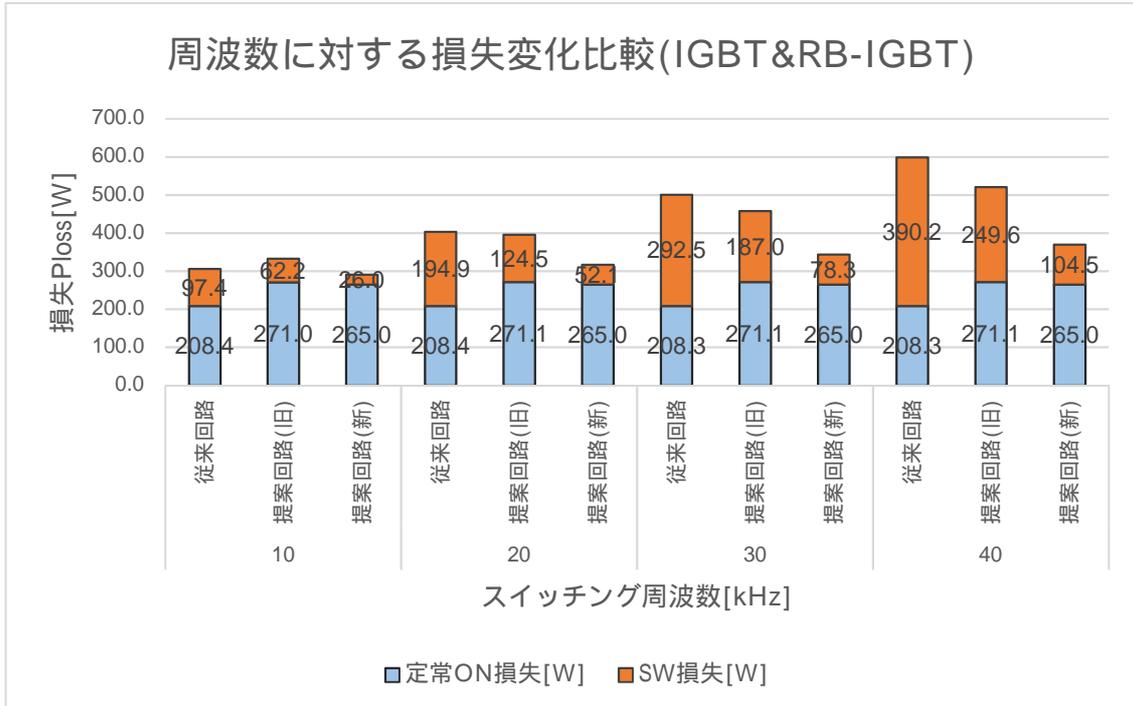


図6 三角波比較 PWM 制御とスイッチング回数低減 PWM 制御の損失比較結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 三浦 恭, 春名 順之介, 船渡 寛人
2. 発表標題 マトリックスコンバータと2出力インバータによる絶縁型マルチポート変換器のスイッチング回数低減法の検討
3. 学会等名 平成30年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 春名 順之介, 三浦 恭, 上田 浩史, 船渡 寛人
2. 発表標題 マトリックスコンバータと2出力インバータによる DCマイクログリッド用単相電力変換器の基礎検討
3. 学会等名 平成29年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 春名 順之介, 三浦 恭, 上田 浩史, 船渡 寛人
2. 発表標題 単相マトリックスコンバータを用いた 絶縁型マルチポート電力変換器の基礎検討
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 春名 順之介, 三浦 恭, 澤口 大
2. 発表標題 移動体エネルギーストレージとパワーサプライシステムにおけるパワーエレクトロニクスの応用展開
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junnosuke Haruna, Kyo Miura, Hirohito Funato
2. 発表標題 A Consideration of Multi-Port Six-Switch Single-Phase Inverter using Matrix Converters
3. 学会等名 4th IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----