

# 高周波 AC リンク三相 AC/AC コンバータの簡単な制御法

松村大祐\*，伊東淳一，近藤正示（長岡技術科学大学）

A Simple Control Method for High-Frequency AC Link Three-Phase AC/AC Converter

Daisuke Matsumura\*, student member, Jun-ichi Itoh, member, and Seiji Kondo, member (Nagaoka University of Technology)

## Abstract

This paper proposes a simple control method for a high-frequency AC link three-phase AC/AC converter. There are three topics in this paper. First, the control strategy of the AC/AC converter is proposed based on a conventional rectifier and inverter system. Thus, the proposed method realizes wide control range and the high performance as same as the conventional PWM rectifier and inverter system. Second, the twist winding method is proposed in order to decrease the leakage inductance of the high frequency transformer. The leakage inductance decreases of 2/3 to the conventional winding by the proposed winding method. Third, the loss suppression method is proposed. The snubber loss by the leakage inductance is suppressed by using the zero current mode of the PWM rectifier and two phase modulation of the inverter. In this result, the snubber loss decrease of 1/3. The unity power factor and THD of the input current are less than 1% by the simulation results, respectively. Finally, The efficiency of those proposed methods are confirmed through the experimental results.

キーワード：仮想AC/DC/AC変換，高周波リンクコンバータ

keyword：Virtual AC/DC/AC conversion，High-frequency link converter

## 1. はじめに

近年，地球環境温暖化等環境対策の観点から電力需要地近傍への設置が可能な新しい電力供給源として系統連係分散型電源システムの導入が検討されている。これら分散型電源は大きく分けて太陽光発電，燃料電池などに代表される直流電力を発生するものと，風力発電，マイクロガスタービンなどに代表される交流電力を発生するものがありクリーンな新エネルギーを用いるシステムとして注目されている。分散型電源が発電した電力を有効活用するには，バッテリーなどの電力貯蔵装置に貯蔵するか系統連係し系統へ電力を送る方法がある。いずれにせよ，発電機と電力貯蔵装置もしくは系統は，発電機の故障や地絡，ノイズ等の面から，トランスによる絶縁を有したシステムが有利と思われる。絶縁形の電力変換装置として，高周波リン

ク形電力変換器<sup>(6)(7)</sup>がある。高周波リンク形は商用トランスで絶縁する方式と比べ，トランスを小型化できる。一方，トランスの2次側の電力変換器として，直接形電力変換器を用いると，トランスの漏れインダクタンスによるエネルギー処理法及び制御法が難しいという問題がある。漏れインダクタンスによるエネルギー処理法としては，スナバによりエネルギーを吸収する方式，自然転流による制御法<sup>(3)</sup>2次側位相シフトを用いたソフトスイッチング方式<sup>(4)</sup>共振回路による方式<sup>(5)</sup>提案されているがそれぞれ動作範囲に制約がある場合や制御法が複雑と思われる。また，入出力両方で直接形電力変換器を用いた場合の制御法については，あまり議論されていない。

本論文では三角波キャリア比較方式に基づく仮想AC/DC/AC方式を応用し，高周波ACリンク三相AC/ACコ

ンバータの制御法<sup>(1)</sup>に適用する。その結果、単純なキャリア比較方式に基づく簡単な制御法が可能となり、加えて特にPWMに制約を設けることなく、広い動作範囲が実現できる。またトランスの漏れインダクタンスのエネルギー処理には、2次側の変換器に二相変調を適用することに加え、トランスの1次側と2次側の変換器でスイッチングを連係することにより、交流スナバに流れ込むエネルギーを低減する。加えて、トランスの巻き方を工夫する事により、漏れインダクタンスを低減できる事を示す。提案した手法についてシミュレーションと実験による動作確認を行い原理の妥当性を確認し入出力波形に良好な正弦波が得られたので報告する。

## 2. 回路構成とその特徴

図1に高周波リンク形コンバータのブロック図を示す。分散型電源の保護のため商用トランスのかわりに高周波トランスを設置し入出力の電氣的な絶縁を行う。また、高周波トランスの両端に配置してある直接形電力変換器は、分散型電源の起動及び、発電したエネルギーを回生するため双方向のエネルギーフローを必要とする。

図2は図1のシステムを従来の直流部を有する回路で実現した場合の回路である。図2のシステムではPWM整流器、DCDCコンバータ、インバータを組み合わせた複合システムとなる。この結果、電力変換段数の増加に伴い効率の低下や昇圧リアクトルや電解コンデンサによる装置の大型化という問題が生じる。

図3に本論文で用いる高周波ACリンク三相AC/ACコンバータの主回路構成を示す。主回路の全スイッチを双方向性スイッチで構成し、エネルギーバッファを必要としない。また、電源から任意の周波数と大きさを持つ交流への変換は直流を介さずすべて交流で行う。この方式では電源から負荷まで2回の変換で行えるため他の高周波リンク方式に比べ効率の向上が期待できる。しかし、本回路は入力と出力波形を同時に制御するため、制御が複雑化することや、高周波トランスの漏れインダクタンスに蓄えられたエネルギー処理法など多くの課題がある。そこで、本論文では、これらの問題に対し、簡単な解決方法を提案する。

## 3. 仮想AC/DC/AC変換を応用した制御法

図4に提案する制御法のブロック図を示す。ここで提案する制御方式はマトリクスコンバータの制御法の一つであるキャリア比較を用いた仮想AC/DC/AC方式<sup>(2)</sup>を高周波リンクAC/ACコンバータに応用したものである。高周波リンクAC/ACコンバータもマトリクスコンバータと同様に、エネルギーバッファを持たないため入出力の波形制御が干渉する問題がある。そこで1次側コンバータにPWM整流器の制御法を2次側コンバータにインバータ制御法をそれぞれ適用する。

図5は本方式におけるPWMパルス発生の様子を示している。極性信号は図5のように三角波キャリアの頂点に同期して作成し極性信号が1の場合PWM整流器のパルスをその

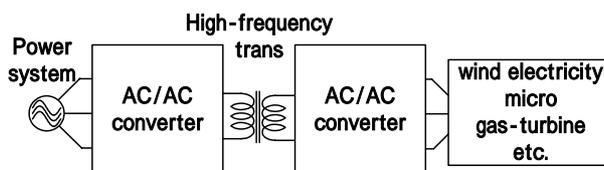


図1.高周波ACリンクコンバータのブロック図

Fig.1 High-frequency AC link converter block diagrams.

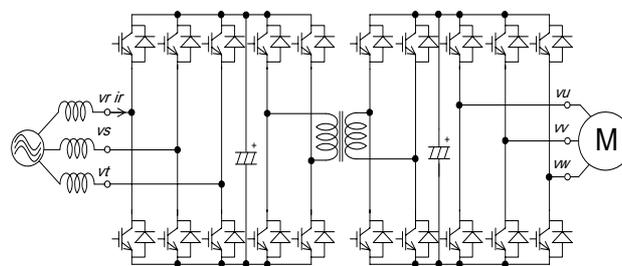


図2.直流部を有する高周波ACリンク

### 三相AC/ACコンバータ

Fig.2 Conventional circuit.

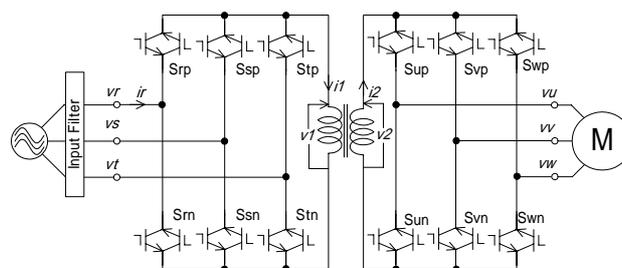


図3. 提案する高周波ACリンク三相AC/ACコンバータ

Fig.3 Proposed circuit.

ままで出力し、0の場合PWM整流器のパルスを反転させて出力する事により交流リンク電圧を発生させる。提案する制御法の利点は、三角波キャリアの頂点すなわち、ゼロ電圧ベクトルを発生しているときに極性反転を行っているため、極性反転に伴うスイッチング損失を伴わない点にある。

#### 4. 漏れインダクタンスのエネルギー処理方法

本論文の回路方式の場合、自己消弧素子により構成された2次側コンバータは、高周波トランスと直接接続されているため、スイッチングの際にはトランスの漏れインダクタンスのエネルギー処理が重要となる。エネルギー処理法としては、スナバを用いる方法や共振を用いる方法がある。しかし、直接形電力変換器では、交流スナバになるため、複雑化する。また、共振回路を用いてもPWMパルスに制約があるため制御が難しくなる。そこで本論文では、(1)二相変調により2次側変換器のスイッチング回数を低減する、(2)ゼロ電圧発生時に1次側のスイッチでトランスの1次側電圧をゼロにすることにより、スイッチング時の制約を設けずにスイッチングによりスナバに流入するエネルギーを極力抑える手法を提案する。

図6、図7は2次側の三角波キャリア、指令値と1次側コン

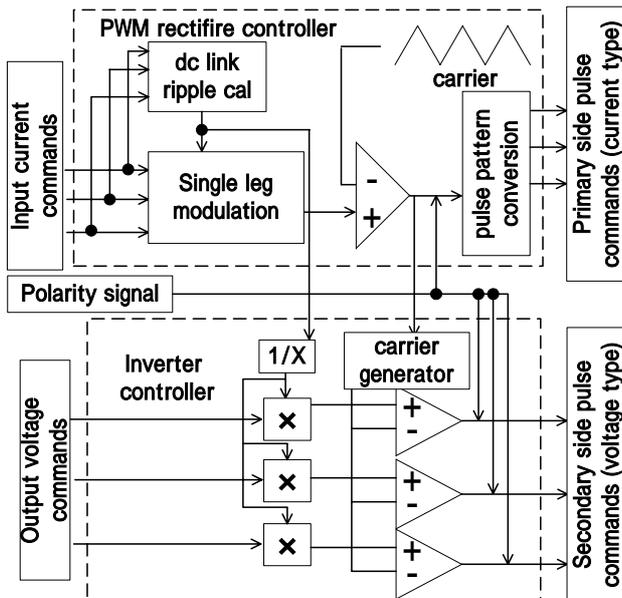


図4 提案制御法のブロック図

Fig.4 Proposed method block diagrams.

バータに印加されるパルスを示したものである。上からインバータ側三角波キャリア、1次側R相スイッチsrp, sm, 2次側上アームスイッチsup, svp, swp, トランス2次側電圧

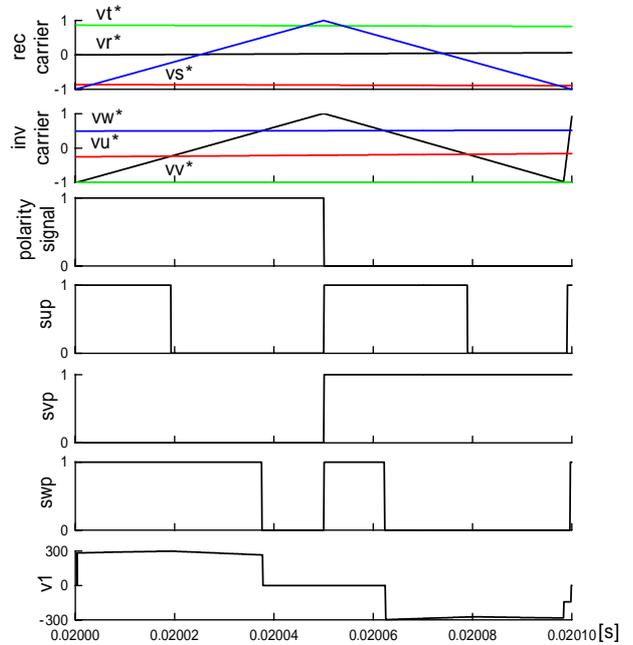


図5. 交流リンク発生法

Fig.5 AC link voltage generation method

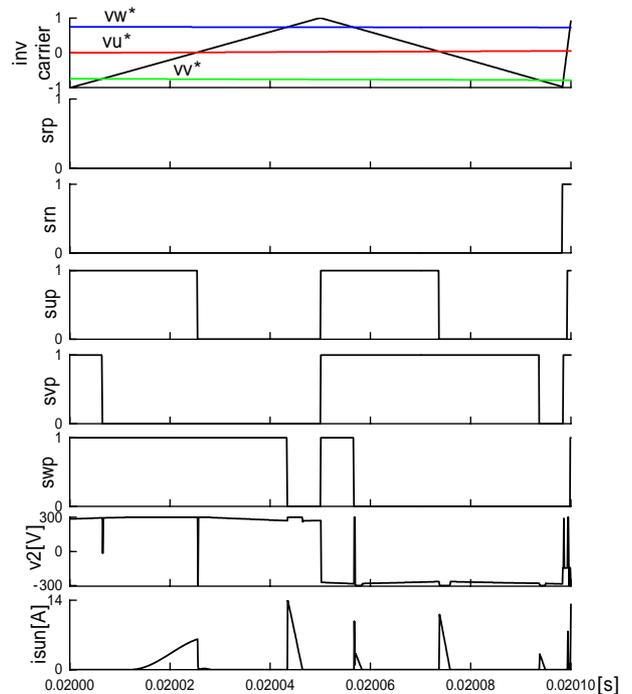


図6. 従来法

Fig.6 Conventional method

波形 $v_2$ 、スナバに流入する電流 $i_{sun}$ である。図6は従来の三相変調方式で制御を行った場合、図7は提案する制御法として二相変調及び2次側コンバータがゼロ電圧を発生した際に1次側の1アームを短絡させた場合について示している。この図よりスナバ流入する $i_{sun}$ が低減されスナバによる損失を抑えている。この結果従来法に比べてスナバにエネルギーが流入する回数を1/3にしていることから、スナバによる損失をおおむね1/3に低下させることができる。

### 5. 高周波トランスの作成法

トランスを作成する場合結合度1、静電容量0の理想状態が望ましいが、実際にトランスを作成する場合には、結合度と静電容量の関係はトレードオフの関係にある。一般的なトランスの巻き方として、1次巻線を巻いた上に2次巻線を巻く同心二重巻という手法があるが、この場合、静電容量は小さく出来るが、結合度が低く漏れインダクタンスが増加する。直接形電力変換器に用いる高周波トランスは前述のように漏れインダクタンスを低減させることが重要である。そこで本論文では1次側巻線と2次側巻線をツイスト巻にすることによって結合度を高くすることを提案する。この手法により1次巻線と2次巻線の結合度を増加させることが可能となり漏れインダクタンスを減少させることが可能となる。表1にツイスト巻と同心二重巻でトランスを作成した場合についての比較表を図8に実際に作成したトランスを示す。実測した結果、ツイスト巻にすることで、従来の同心二重巻に比べ漏れインダクタンスを1/4にできる。4章で提案したスイッチングによるエネルギー処理方法とあわせることで、漏れインダクタンスに伴うスナバ損失による電力変換器の効率低下は0.3%以下に抑える事ができる。

### 6. シミュレーション

図9にシミュレーション回路を表2にシミュレーションパラメータを図10、図11に本論文で提案する制御法を用いたシミュレーション結果を示す。波形は力行、回生時共に上から入力R相電圧 $v_r$ 、入力R相電流 $i_r$ 、入力線間電圧 $v_{rs}$ 、出力U相電圧 $v_u$ 、出力U相電流 $i_u$ 、トランスの1次側電圧 $v_1$ 、 $i_r$ の高調波解析結果 $i_{r\_FFT}$ 、 $v_u$ の高調波解析結果 $v_{u\_FFT}$

ある。 $v_r$ と $i_r$ は力行、回生時共に力率1が確認できる。1kHz以下の総合歪み率は力行、回生時の入力電流、出力電圧共に1%以下であり、本制御法を用いた場合入力電流および出力電圧波形に原理的に大きな低次高調波を発生せず、良好な制御を行える事が確認できる。

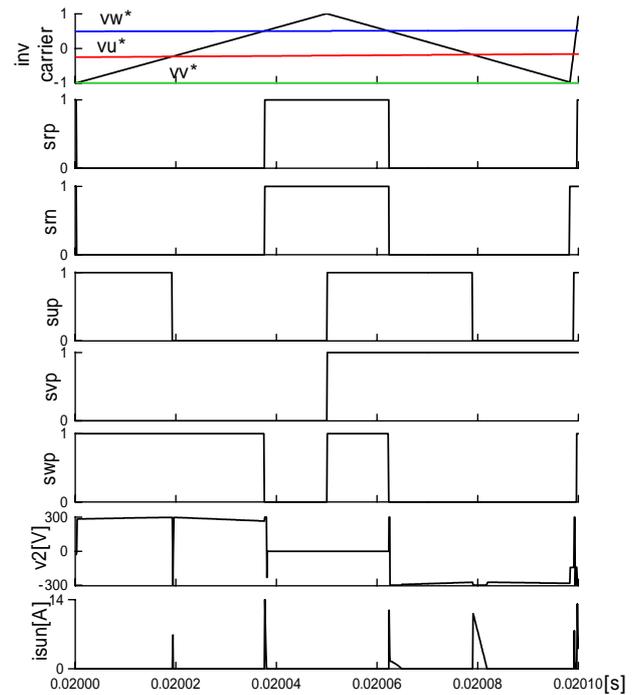


図7. 提案制御法

Fig.7 Proposed method

表1 トランスの仕様

Table.1 Trans specification

|              | ツイスト巻          | 同心二重巻          |
|--------------|----------------|----------------|
| 装置容量         | 1[kw]          | 1[kw]          |
| 1次巻数         | 31[回]          | 31[回]          |
| 2次巻数         | 31[回]          | 31[回]          |
| 1次インダクタンス    | 3.54[mH]       | 2.93[mH]       |
| 1次漏れインダクタンス  | 3.13[ $\mu$ H] | 13.1[ $\mu$ H] |
| 2次インダクタンス    | 3.53[mH]       | 2.93[mH]       |
| 2次漏れインダクタンス  | 3.52[ $\mu$ H] | 12.9[ $\mu$ H] |
| 漏れインダクタンスの割合 | 0.1[%]         | 0.43[%]        |
| 静電容量         | 453[pF]        | 387[pF]        |

## 7. 実験

本論文で提案する制御法の基本的な動作を確認するため、負荷をRLとして実験を行った。図12に実機の外観、図13に測定波形、表3に実験パラメータを示す。測定波形は入力R相電圧 $v_r$ ,入力R相電流 $i_r$ ,出力U相電流 $i_u$ である。また、本実験は、仮想AC/DC/AC方式の高周波リンク回路への適用を検証するため、スナバロス低減法は適用していない。入力電流と入力相電圧の位相はほぼ一致しており、力率1で動作していることが確認できる。また出力電流も正弦波を得られていることが確認できる。



図8. トランスの外観

Fig.8 Transformer exterior

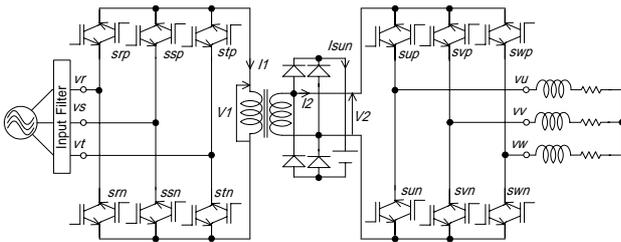


図9 シミュレーション回路図

Fig.9 Simulation circuit.

表2 シミュレーションパラメータ

Table.2 Simulation parameter

|          |         |          |               |
|----------|---------|----------|---------------|
| 入力線間電圧   | 200[V]  | LCフィルタ   | 2[mH]         |
| 入力周波数    | 50[Hz]  |          | 3.3[ $\mu$ F] |
| 交流リンク周波数 | 10[kHz] | カットオフ周波数 | 1.1[kHz]      |
| 出力周波数    | 100[Hz] | 誘導性負荷    | 10[mH]        |
| キャリア周波数  | 10[kHz] |          | 5[ ]          |

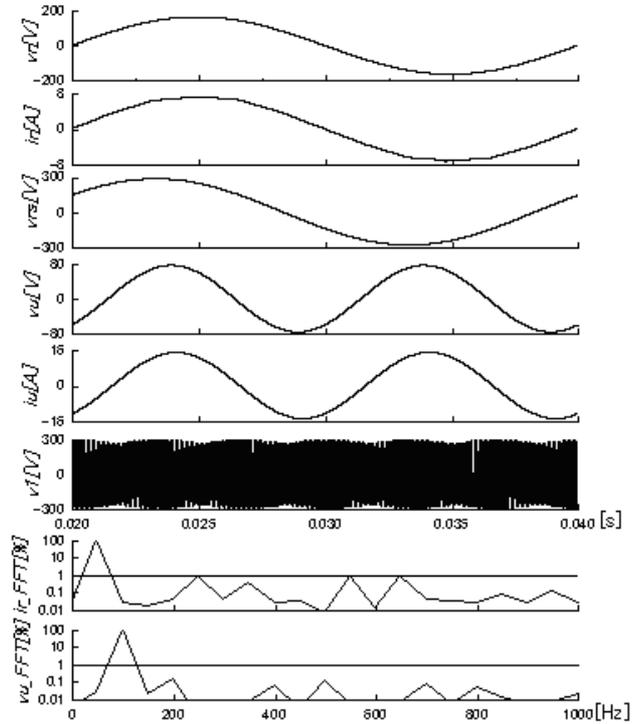


図10. 力行時のシミュレーション結果

Fig.10 Simulation waveforms for power flow

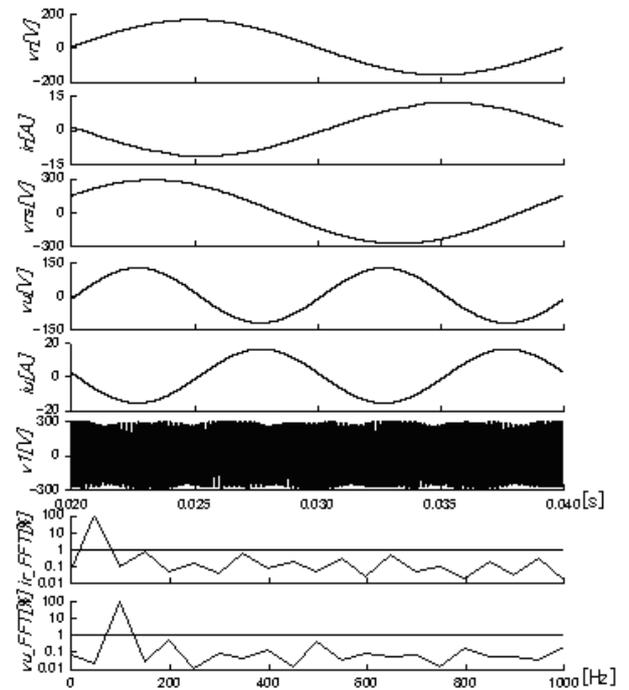


図11. 回生時のシミュレーション結果

Fig.11 Simulation waveforms for regenerative.

## 8. まとめ

本論文では三角波キャリア比較方式に基づいた仮想AC/DC/AC変換方式を応用し高周波ACリンク三相AC/ACコンバータの制御法に適用し、PWMパルス幅等に制約がない簡単なPWM方法を提案した。加えて、高周波トランスの漏れインダクタンス伴うスナバ損失を低減するため、

- (1) 2次側コンバータに二相変調を導入する
- (2) 2次側スイッチがゼロ電圧ベクトルを発生する際に1次側を短絡する
- (3) 1次巻線と2次巻線をツイストする事により、漏れインダクタンスを低減する

方法を提案した、シミュレーションによりその効果を確認し、その結果入力力率1、力行、回生時共にTHD1%以下と良好な入力電流波形、出力電圧波形を得ることが出来た。また実験結果より入力力率1及び正弦波出力電流を得た。提案する手法は、パルス幅の制約や部品点数の大幅な増加がないことから、実用的な絶縁形AC/ACコンバータを実現できる。



図12. 実機の外観

Fig.12 equipment exterior

表3. 実験パラメータ

Table.3 Experimental parameter

|          |         |          |               |
|----------|---------|----------|---------------|
| 入力線間電圧   | 200[V]  | LC フィルタ  | 2[mH]         |
| 入力周波数    | 50[Hz]  |          | 3.3[ $\mu$ F] |
| 交流リンク周波数 | 10[kHz] | カットオフ周波数 | 1.1[kHz]      |
| 出力周波数    | 33[Hz]  | 誘導性負荷    | 5[mH]         |
| キャリア周波数  | 10[kHz] |          | 37.5[ ]       |

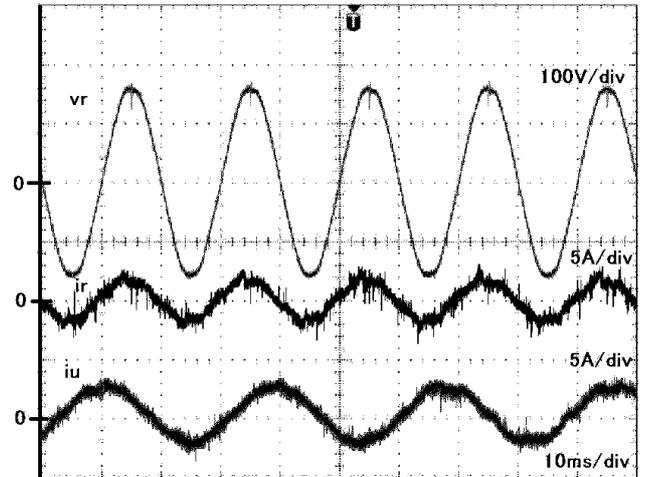


図13.実験結果

Fig.13 Experimental results.

## 文 献

- (1) D.Matsumura, J.Itoh, S.Kondo: 「A Control Method for High-Frequency AC Link Three Phase AC/AC Converter Applying Virtual AC/DC/AC Conversion」 Japan Industry Applications Society Conference 1-45 2004(in Japanese)  
松村・伊東・近藤:「仮想 AC/DC/AC 方式を応用した高周波リンク三相 AC/AC コンバータの制御法」産業応用部門, 1-45 (平成16年)
- (2) J.Itoh, I.Sato, H.ohguchi, K.Sato, A.Odaka, N.Eguchi: 「A Control Method for the Matrix Converter Based on Virtual AC/DC/AC Conversion Using Carrier Comparison Method」 IEEJ Vol.124-D No.5,2004(in Japanese)  
伊東・佐藤・大口・佐藤・小高・江口:「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クスコンバータの制御法」電学論D, 124巻5号, 457-463 (平成16)
- (3) M.Matsui, N.Motizuki, T.Ishizaki: 「Sunber less method for high-frequency link DC/AC converter」 SPC-93-10,1993(in Japanese)  
松井・望月・石崎:「高周波リンク DC/AC コンバータのスナバレス化-自己消弧素子の自然転流 ZCS 運転-」 SPC-93-10,(平成5)
- (4) M.Michihira, T.Ota, M.Park, T.Funaki, Z.kawasaki, K.Matsu-ura: 「Operation analysis of high-frequency AC link three-phase DC-AC converter applying phase-shift PWM control in secondary side」 IEEJ Vol.119-D No.5,1999(in Japanese)  
道平・大田・朴・舟木・河崎・松浦:「2次側位相シフトPWM制御を適用した高周波 AC リンク DC-AC コンバータの動作解析」電学論D, 119巻5号, 659-669 (平成11)
- (5) J.Wei, M.Ishida, T.Hori, 「Improved Realtime Output Voltage Control of Series-Resonant High-Frequency AC-Linked DC-AC Converter」 IEEJ Vol.119-D No.5,1999(in Japanese)  
魏・石田・堀:「直列共振形高周波 AC リンク DC-AC コンバータの改良形出力電圧リアルタイム制御」電学論 D.119巻5号,690-698 (平成11年)
- (6) Y.Okuma, S.Igarashi, K.Kuroki: 「Novel Three-phase SMR Converter」 IEEJ Vol.114-D No.5,1994(in Japanese)  
大熊・五十嵐・黒木:「新方式三相 SMR コンバータ」電学論 D, 114巻5号, 544-550 (平成6年)
- (7) K.Inagaki, S.Okuma: 「High Frequency Link DC/AC Converter using a Three-Phase Output PWM Controlled Cycloconverter」 IEEJ Vol.112-D No.6, 1992(in Japanese)  
稲垣,大熊:「三相出力PWM制御サイクロコンバータを用いた高周波リンク DC/AC コンバータ」電学論D, 112巻6号(平成4年)