

# 直接形電力変換器を用いた高周波 AC リンクコンバータの制御法

飯田 貴志\*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

A Control Method for High-Frequency AC link Converter Based on Direct type Power Converter

Takashi Iida\*, student member, Jun-ichi Itoh, member (Nagaoka University of Technology)

## Abstract

This paper proposes high-efficiency control method for high-frequency AC link converter based on a direct type power converter. The most important feature of the proposed method is that a switching loss can be reduced by the proposed commutation method using a voltage polarity. The commutation timing of the secondary converter synchronizes with generating zero voltage vector of secondary converter. Therefore the zero voltage period of secondary converter is made by short circuit of the transformer during the zero voltage vector of secondary converter. In addition, the switching loss is also reduced by the optimized two phase modulation of the zero voltage vector. Thus, the proposed method prevents commutation fail and reduces switching loss for ZVS. In this result, the proposed method can achieves unity power factor and THD of the input and output current are less than 6%. The total efficiency is 93.2%. Finally, the efficiency with the RB-IGBT for all switching device in the proposed converter are predict by the loss simulation result. Those results are confirmed that the proposed method realizes high efficiency for the high-frequency AC link converter.

キーワード：仮想AC/DC/AC変換，高周波リンクコンバータ，転流

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

## 1. はじめに

近年，新しい電力供給源として電力需要地近傍に設置が可能な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。これらの分散型電源で要求される系統連係用電力変換器は，発電機の故障や系統の地絡，ノイズなどの保護面から，トランスによる絶縁を有する構成が有利と思われる。

絶縁を有する系統連係用電力変換器として，高周波リンク形電力変換器<sup>(1)(2)</sup>がシステムの小型化の観点から有力である。一方，近年，逆阻止IGBT<sup>(9)</sup>が開発されていることが

ら，直接形電力変換器が注目されている。このような背景の下，高周波トランスの両端に直接形電力変換器を適用することで，システムのさらなる高効率化，小型化が期待できる。

しかし，直接形電力変換器では，高周波トランスの漏れインダクタンスによるエネルギー処理が重要な問題となってくる。漏れインダクタンスによるエネルギー処理法としては，共振回路による方式<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>，自然転流による制御方式<sup>(5)</sup>，が提案されているが，動作範囲の制約や追加回路が必要である。そこで，筆者らはこれまでに仮想AC/DC/AC方式を応用した追加回路や動作範囲の制約のない制御法を提案し，その有用性を実験により検証している<sup>(6)(7)</sup>。しかし，これまで，2次側のコンバータの転流を含めた制御方式に

については検討していない。

本論文では、高効率化のための2次側コンバータの制御法を提案する。具体的には、(1)高周波トランスの電圧極性反転を2次側コンバータのゼロ電圧ベクトル出力時に同期させて行う、(2)ゼロ電圧ベクトル出力時にはトランスの1次側を短絡させトランス電圧をゼロにする、手法を提案する。以上により転流失敗を防止し、ゼロ電圧スイッチング(ZVS)によりスイッチング損失を低減できる。提案法を実験により動作確認を行い、入力力率1の良好な入出力電流波形を得た。また、最高効率は93.2%を達成した。さらに、損失シミュレーション<sup>(10)</sup>から、逆阻止IGBTの適用効果を検討し、最高効率は93.9%と1.7ポイントの改善が可能である。以上の結果から提案法と本システムの有用性を確認したので報告する。

## 2. 主回路構成

図1に単方向素子のみで構成した回路を示す。図1の回路ではPWM整流器、DC/DCコンバータ、インバータの構成になり、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して変換する。そのため、電力変換回数が4回であること、電源側に昇圧リアクトル、直流リンク部には電解コンデンサが必要になり、回路の大型化や低寿命化の問題は避けられない。これに対し、図2の回路では双方向素子のみで構成した直接形電力変換器を高周波トランスの両端に適用することで電力変換回数が2回にできる。また、電源側に入力フィルタを持つが、電解コンデンサなどのエネルギーバッファが不要である。以上のことから電力変換回数減少や導通損失の低減による高効率化、電解コンデンサレスによる電力変換器の長寿命化が期待できる。しかし、この回路では2次側コンバータのスイッチングの際、トランスの漏れインダクタンスによるエネルギーによりサージ電圧が発生する問題を考慮する必要がある。

## 3. 高周波ACリンクコンバータの制御

直接形電力変換器の制御法は一般に複雑である。そこで、仮想AC/DC/AC方式では「変換器の三相入出力の関係をス

イッチング関数により三行三列の行列式で表したとき、変換器の構成にかかわらず同一のスイッチング行列になれば入出力電流の関係は同一である<sup>(8)</sup>ことに着目し、単純な構成の変換器に基づき入出力の波形制御を行う。

図1,2の回路より、スイッチング行列は下記のように求められる。本回路のスイッチング行列は従来回路のスイッチング行列の積として得られるので、(1)(2)式を等しくすれば入出力波形は同一となる。

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{up} & s_{un} \\ s_{vp} & s_{vn} \\ s_{wp} & s_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{cp} & s_{cn} \\ s_{dp} & s_{dn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{ap} & s_{an} \\ s_{bp} & s_{bn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{rp} & s_{sp} & s_{tp} \\ s_{rm} & s_{sm} & s_{tm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_s \\ v_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{up} & s_{un} \\ s_{vp} & s_{vn} \\ s_{wp} & s_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{rp} & s_{sp} & s_{tp} \\ s_{rm} & s_{sm} & s_{tm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_s \\ v_t \end{bmatrix} \quad (2)$$

図3に(1)式のスイッチング行列を適用した制御ブロック図を示す。交流リンクにおけるDC/DCコンバータのスイッチング行列により、トランスの漏れインダクタンスに蓄えられるエネルギー処理をスイッチングにより減少させることができる。漏れインダクタンスのエネルギー処理の対策として、(1)二相変調により2次側コンバータのスイッチング回数を減らす、(2)ゼロ電圧発生時に1次側コンバータのスイッチングにより短絡させトランスの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損失を減少させる<sup>(6)</sup>。

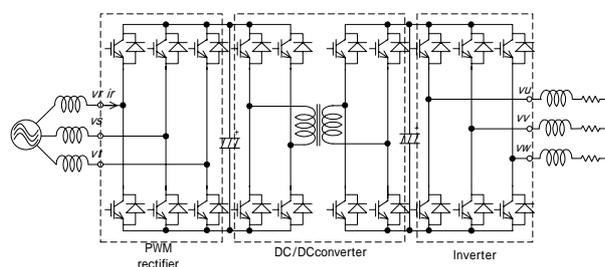


図1 単方向素子のみで構成した高周波ACリンクコンバータ

Fig. 1 Conventional PWM rectifier and inverter system with a high-frequency ac link

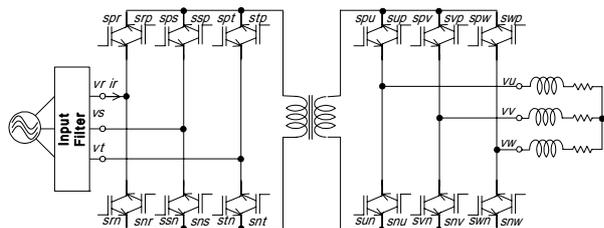


図2 双方向素子のみで構成した  
高周波ACリンクコンバータ

Fig. 2 AC/AC direct converter with high-frequency AC link

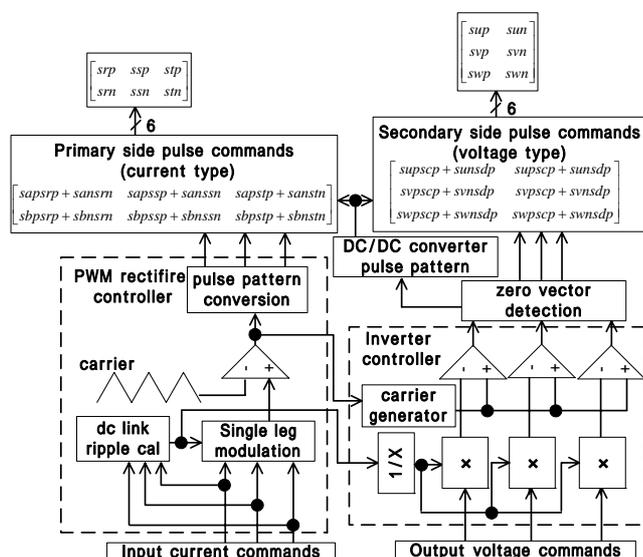


図3 制御ブロック図

Fig. 3 Control block diagrams

#### 4. 2次側コンバータの高効率制御法

直接形電力変換器では、電源短絡、負荷開放を生じないようにスイッチングしなければならない。各スイッチにおいて転流パターンは、負荷電流に依存して転流する方式と電源電圧に依存して転流する方式がある<sup>(9)</sup>。何れの方式においても検出する信号(負荷電流、電源電圧)のゼロクロス付近において検出誤差などによる転流失敗が生じ、サージ電流やサージ電圧の原因となり、最悪の場合素子を破壊する恐れがある。さらに高周波ACリンクコンバータではACリンク電圧が方形波であり、ゼロクロス付近の検出は困難である。そこで本論文では、上述したゼロ電圧ベクトル出力時における1次側コンバータの短絡によるトランス電圧の

ゼロ期間を利用した電圧転流方式を提案する。

図4に本手法のパルスパターン例を示す。トランス電圧極性が正ならば、*sup, sunu* を常時オンにして負荷開放を防止し、*spu, sun* にはデッドタイムを設けて短絡防止を行う。極性が負ならば、*spu, sun* を常時オンにし、*sup, sunu* にデッドタイムを設ける。トランス電圧の極性切り替えでは、キャリア周期に同期した極性信号によってパルスを反転させる。ゼロを経由してトランスの電圧極性を切り換えることにより、転流失敗を防止し、ゼロ電圧スイッチング(ZVS)も実現できる。また、負荷の還流経路を確保するため *sun, sunu* はゼロ電圧ベクトル出力中オンさせる。さらに、1次側コンバータの電源電圧による電圧転流<sup>(11)</sup>により、トランス電圧ゼロ期間が遅れてしまうので、パルスをその分シフトさせる。

2次側コンバータはスイッチング回数の均等化のため、電源電圧の大小関係に応じて、キャリアを反転させている。そのため、電圧極性切り替えにおけるトランス電圧ゼロ期間が短くなる場合がある。そこで、ゼロ電圧ベクトルを極性切り替え時に長く発生するように二相変調させる。

図5に本手法の二相変調の例を示す。入力電圧の中間相が正のとき、極性切り替え時のゼロ電圧ベクトルは(111)で出力するため、出力電圧指令値の最大相を1に固定する。入力相電圧の中間相が負のときは、極性切り替え時のゼロ電圧ベクトルは(000)で出力するため、出力電圧指令値の最小相を-1に固定する。図3より出力電圧指令値( $V_{uref}, V_{vref}, V_{wref}$ )に直流リンク電圧変動分  $rip$  を補償する。

$$\begin{cases} V_u^{**} = rip \times V_{uref} \\ V_v^{**} = rip \times V_{vref} \\ V_w^{**} = rip \times V_{wref} \end{cases} \quad (3)$$

入力相電圧の中間相  $VMID$  が正のときは出力電圧指令値の最大相  $V_{max}$  を1に、負のときは最小相  $V_{min}$  を-1に固定したいので、

$$\begin{cases} V_0 = 1 - V_{max} & (\text{when } VMID : \text{Positive}) \\ V_0 = -1 - V_{min} & (\text{when } VMID : \text{Negative}) \end{cases} \quad (4)$$

とし、 $V_0$ を全相に加えることにより線間電圧を変えることなく波形操作が可能となる。したがって、出力電圧指令値 $(V_u^*, V_v^*, V_w^*)$ は、

$$\begin{cases} V_u^* = V_u^{**} + V_0 \\ V_v^* = V_v^{**} + V_0 \\ V_w^* = V_w^{**} + V_0 \end{cases} \quad (5)$$

となる。以上の手法を用いることで、スイッチング損失を低減させ、転流失敗を防止できる。

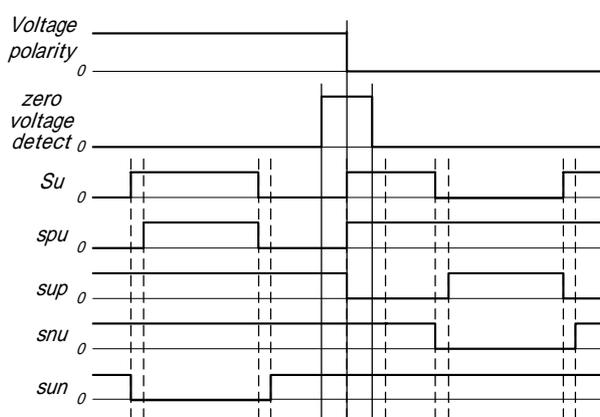


図4 パルスパターン例

Fig. 4 Pulse pattern

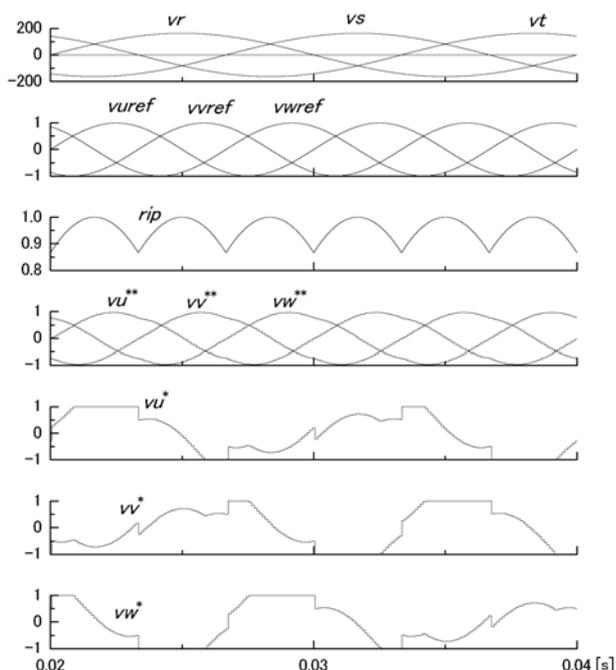


図5 提案する二相変調

Fig. 5 Proposed two phase modulation

## 5. 損失シミュレーション

本論文では、提案したACリンクコンバータの有用性を検証するため、各スイッチで生じる損失のシミュレーションを行う。従来のフルブリッジ形インバータは比較的シミュレーション方法が確立されているが、直接形電力変換器のような回路構成の場合、従来と同様に損失計算をすることは難しい。そこで、本論文ではPSIMのDLLリンク機能を用いた損失シミュレーションを用いる<sup>(10)</sup>。この損失シミュレーションは、各スイッチの横にDLLブロックを設けるため回路構成や制御法に依存せず、発生損失のシミュレーションが行えることに特徴がある。シミュレーション条件は、実験条件と同様に行い、実験結果と比較しその妥当性を確認した。

## 6. 実験結果

本論文では、提案した手法の有用性を実験により検証した。表1に実験条件を、図6に実験回路をそれぞれ示す。

図7に入出力波形、図8に入出力電流のT.H.D.測定の結果をそれぞれ示す。入力力率1動作の良好な入出力波形が得られ、入力電流と出力電流のT.H.D.はそれぞれ4.75%、5.12%以下である。提案法により、サージ電圧及び電流を抑えた結果、入力電流及び出力電流ともに歪みを抑えることができた。

図9に本手法における変換器効率の測定結果を示す。実験では、逆阻止IGBTを1次側コンバータに、従来素子を2次側コンバータにそれぞれ適用している。実験の結果、本システムの最高効率は93.2%を達成した。

図10は発生損失シミュレーションと実験との発生損失を比較したものである。配線インダクタンスや素子のデバイス温度の違い、シミュレーションの近似誤差を考慮すると、シミュレーションと実験結果は概ね一致しており、この損失シミュレーションが妥当であるものといえる。

図11は損失シミュレーションを用いた本システムの損失分離の結果である。左から、従来素子のみを用いた構成、実験と同様の構成、逆阻止IGBTのみを用いた構成である。図10により、損失シミュレーションの妥当性が示されたの

で、逆阻止IGBTの効果について推察する。逆阻止IGBTを適用することにより、従来素子よりも1次側コンバータで29%、2次側コンバータで34%損失低減効果があり、効率は93.9%と従来素子のみの構成よりも1.7ポイントの効率改善が見込まれる。この結果、放熱フィンの体積減少、モジュールサイズの小型化など、高効率化のみならず、システムの小型化できる。

表1 実験条件

Table. 1 Experimental parameter

Input voltage	200[V]	LC filter	2[mH]
Input frequency	50[Hz]		3.3[ $\mu$ F]
AC link frequency	10[kHz]	Cut-off frequency	1.1[kHz]
Output frequency	40[Hz]	Load	R L
Carrier frequency	10[kHz]		

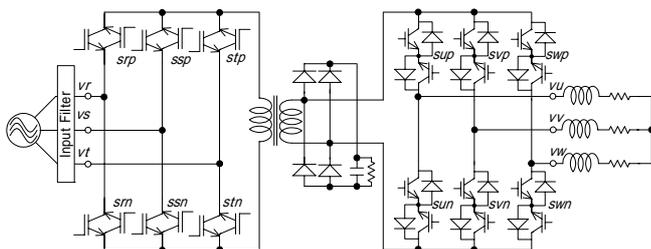


図6 実験回路

Fig. 6 Experimental circuit

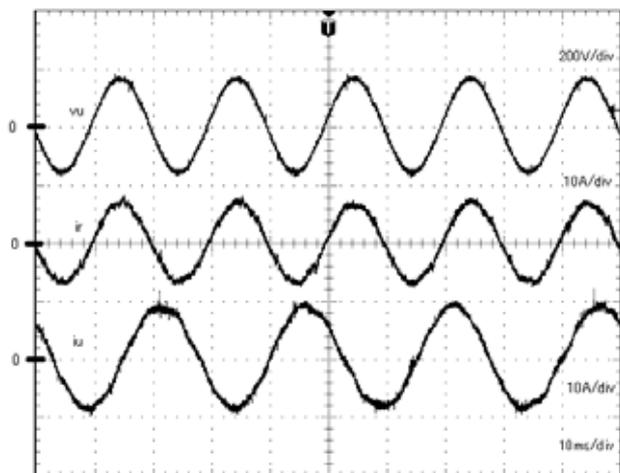


図7 実験結果

Fig. 7 Experimental result

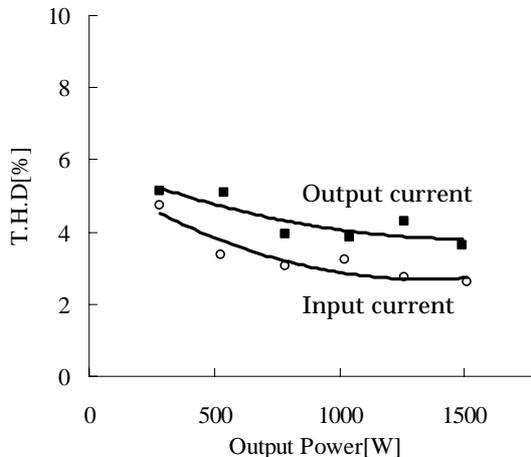


図8 入出力電流のT.H.D測定結果

Fig. 8 T.H.D of input and output current

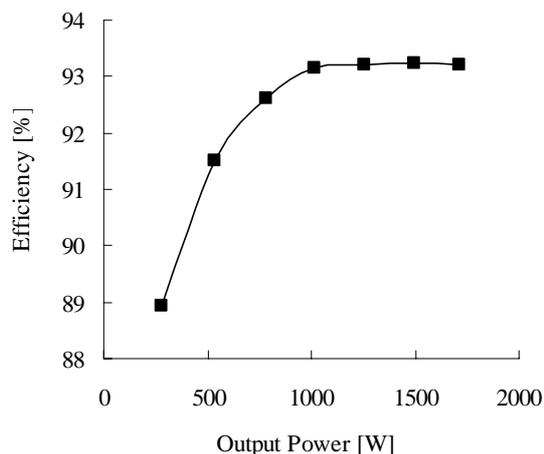


図9 効率測定結果

Fig. 9 Efficiency of the proposed converter

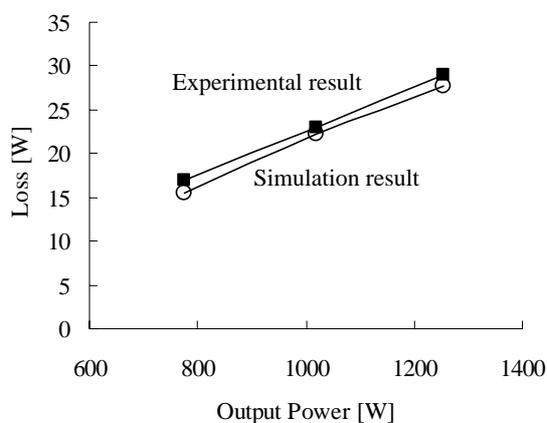


図10 発生損失シミュレーションの妥当性

Fig. 10 Comparison between simulation result and experimental result

文 献

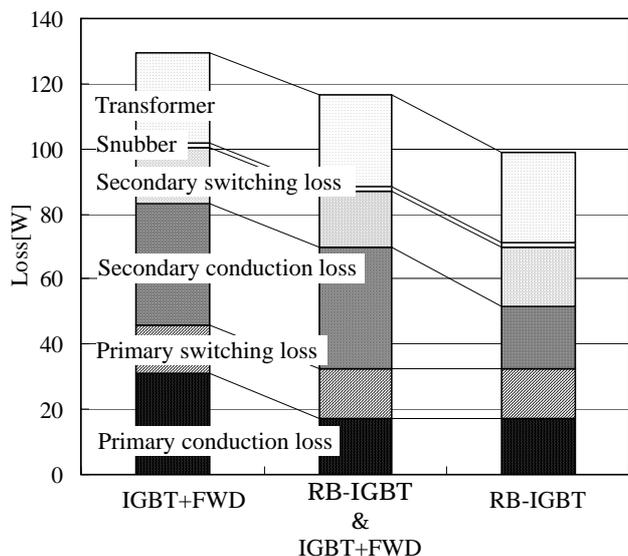


図11 損失分離結果

Fig. 11 Loss analysis of the proposed converter

7. まとめ

本論文では、高周波トランスの両端に直接形電力変換器を用いたACリンクコンバータに仮想AC/DC/AC変換を応用した制御法を基に、2次側コンバータの高効率制御法を提案し、シミュレーションと実験によりその制御特性と有効性を検証した。下記にその結果を示す。

- (1) 入力力率1の正弦波入出力電流波形である。
- (2) 入力電流及び出力電流のT.H.Dはそれぞれ4.75% , 5.12%以下である。
- (3) 最高効率は93.2%を達成した。
- (4) 発生損失シミュレーションより損失分離を行い、逆阻止IGBTを適用することにより、1次側コンバータで約29%、2次側コンバータで約34%の損失低減効果があり、最高変換器効率は93.9%の達成が見込まれる。

以上のことから、直接形電力変換器を用いたACリンクコンバータは絶縁形の電力変換器としては非常に高効率であり、実用的な分散型電源用の系統連係用電力変換器として期待できる。

- (1) 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 )
- (2) 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)
- (3) 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 )
- (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) 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)
- (6) D. Matsumura, J. Itoh, S. Kondo: 「 A Loss reduction method of High Frequency AC Link Converter Based on Direct Type Power Converter 」 Proc. IEE Conf. Japan 2005 (in Japanese)  
松村・伊東・近藤 : 「 直接形電力変換器を用いた高周波 AC リンクコンバータの損失低減法 」 電気学会全国大会 (平成 17)
- (7) 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 AC 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)
- (8) 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ックスコンバータの制御法 」 電学論 D , 124 巻 5 号 , 457-463 ( 平成 16 )
- (9) M.Takei, A.Odaka, H.Fujimoto: 「 Application technique of Reverse blocking IGBT 」 Fuji review Vol.75 No.8 445-448 2002(in Japanese)  
武井・小高・藤本 : 「 逆阻止 IGBT の適用技術 」 富士時報 Vol.75 No.8 445-448 2002
- (10) T.lida, J. Itoh.: 「 Effects of High-Frequency AC Link Converter by Using Reverse Blocking IGBT 」 SPC-05-47 IEA-05-2, 2005(in Japanese)  
飯田・伊東 : 「 高周波 AC リンクコンバータにおける逆阻止 IGBT の効果 」 SPC-5-47 IEA-05-2(平成 17)
- (11) P.W.Wheeler, J.Rodriguez, J.C.Clare, L.Empringham: 「 Matrix Converter: A Technology Review 」 IEEE Transactions on Industry Electronics Vol. 49, No.2, pp274-288, 2002