

高周波 AC リンクコンバータにおける逆阻止 IGBT の効果

飯田貴志* , 伊東淳一 (長岡技術科学大学)

Effects of High-Frequency AC Link Converter by Using Reverse Blocking IGBT

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

Abstract

This paper describes effect of high-frequency AC link converter by using reverse blocking IGBT(RB-IGBT) for bidirectional switches. There are three steps to confirm the effects of the RB-IGBT for converter loss in this paper. At first, a calculation method by DLL function of PSIM is adopted to clear the improvement loss by the RB-IGBT. This method calculates switching and conduction loss from V_{ce} and I_c with device characteristics which are obtained by switching test. As a result, this method can apply to various converter circuit topology.

Next, the experiential results using RB-IGBT for the only primary converter in 1.5kVA system are shown. The total efficiency of 92.8% is obtained and this result improved of 0.5%.

At last, the efficiency using RB-IGBT for both converter are prospected based on the loss simulation result. Those result are confirmed that the RB-IGBT 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，逆阻止IGBT

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

1. はじめに

近年，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ためには，発電した余剰電力を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送る方法がある。これらのシステムで要求される電力変換器は，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⁽¹⁾⁽²⁾が有力である。一方，近年，逆阻止IGBT

が開発されている⁽⁹⁾ことから，直接形電力変換器が注目されている。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，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，トランスの漏れインダクタンスのエネルギー処理法が重要であり，様々な手法が提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾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⁽⁶⁾。

一方，逆阻止IGBTの効果はマトリックスコンバータではいくつか議論されているが，逆阻止IGBTを系統連係用電力変換器に適用した場合の効果について十分に議論された論文は著者らの知る限りではないと思われる。

本論文では，総合損失の低減が期待できる逆阻止IGBTに着目し，直接形電力変換器を系統連係用電力変換器とし

て使用した場合の効果について損失シミュレーションと実験により検討する。まず、PSIMのDLLリンク機能を用いた損失シミュレーションを導入し、理想的な逆阻止IGBTの効果を検討する。本手法は、各スイッチング素子に対する損失演算手法なので、回路構成、制御法に依存せず、発生損失のシミュレーションを行える。次に、損失シミュレーションより計算された損失の妥当性を確認するため、逆阻止IGBTを一次側コンバータに使用し、実験により損失評価を行う。最後に、一次側と二次側に逆阻止IGBTを使用した場合についてシミュレーションを基に検討する。これらの検討の結果、シミュレーションと実験はよく一致し、総合効率は93.6[%]と1.3[%]の改善が可能であることがわかり、提案するシミュレーション手法の妥当性と、逆阻止IGBTの有効性を検証したので報告する。

2. 回路構成

図1.2に単方向素子のみで構成出来る従来型回路と直接形電力変換器を用いた高周波ACリンクコンバータをそれぞれ示す。図1の回路では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による大型のエネルギーバッファが必要であることから、小型化、長寿命化などが困難になる。これに対し、図2の回路では直接形電力変換器を高周波トランスの両端に適用し、電力変換段数が2回にすることで、前述の問題点をクリアする。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ため、小型化、高効率化、長寿命化が期待できる。しかし、この回路では制御の複雑化、トランス二次側の漏れインダクタンスによるエネルギー処理など問題がある。これら問題に対し、仮想AC/DC/AC変換を応用した方式も用いることで解決することができる⁽⁶⁾。

3. 仮想AC/DC/AC変換を応用した制御法⁽⁷⁾

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」⁽⁸⁾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)を等しくすれば入出力特性は同一となる。

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

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

図3に(1)のスイッチング行列を適用した制御ブロック図を示す。DC/DCコンバータのスイッチング行列により、交流リンクでのスイッチングパターンが増える。これにより、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をスイッチングにより減少させることができる。

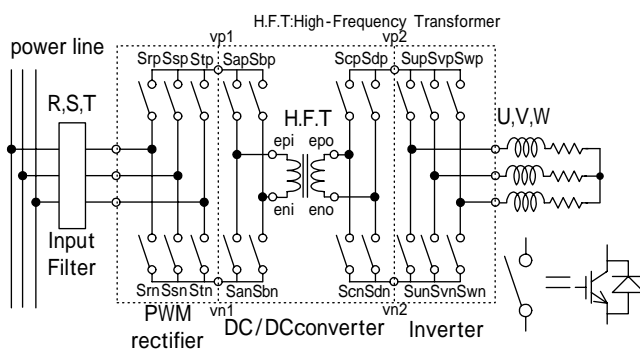


図1 単方向素子のみで構成した高周波ACリンクコンバータ

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

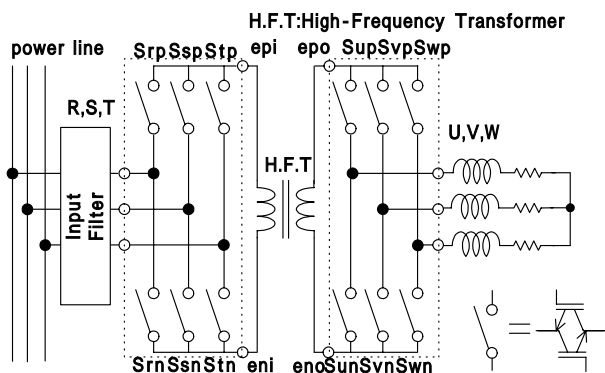


図2 双方向素子のみで構成した
高周波ACリンクコンバータ

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

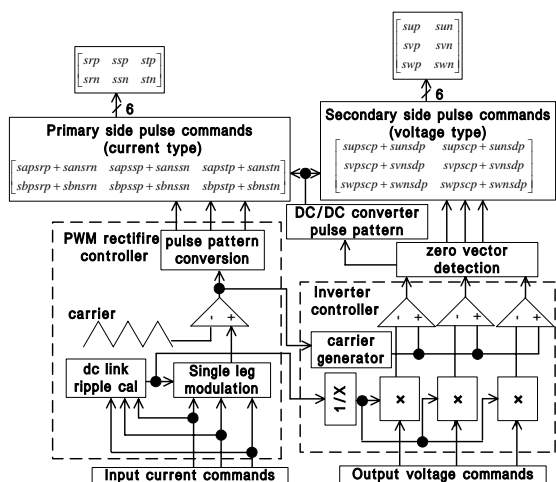


図3 制御ブロック図

Fig. 3 Control block diagrams

4. 損失シミュレーション

電力変換器の損失評価はデバイスそのものの性能のほか
にさまざまな要素が起因する。そこで、本論文では逆阻止
IGBTの効果のみについて損失低減効果を検討するため、損
失シミュレーションを導入する。

従来のフルブリッジ形インバータでのシミュレーショ
ン手法は確立されているが、直接形電力変換器のようなさ
まざま回路構成では、従来と同様に損失計算をすることは
難しい。そこで、本手法では、スイッチの両端にDLLブロ
ックを設け、スイッチの両端電圧、スイッチ電流をDLL
ブロックへ入力し、C言語によるDLLファイルにより、ス

イッチに発生する損失を演算する。図4に損失計算回路を
示す。本手法では、各スイッチの横にDLLブロックを設け
るので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。

直接電力変換器はAC/AC変換を行うためスイッチング
電圧は一定ではない。スイッチング損失特性の近似式を得
るにはスイッチング電圧とスイッチング電流を変化させ
た損失特性を近似する必要がある。

表1に測定条件を示す。ここで測定された値から、直接
電力変換器用のスイッチング損失は次のプロセスで求め
られる。

測定値から各々のスイッチング電圧におけるスイッ
チング損失特性の近似式を求める。

近似式の傾きをグラフにし、スイッチング電圧に対す
る傾き特性の近似式を求める。

近似式とスイッチング電圧とスイッチング電流より
スイッチング損失が求められる。

導通損失は、コレクタ電流に対する飽和電圧特性を取得
し、近似式を導出し、DLLブロックに入力する。

図5に発生損失を計算した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それぞれ示す。

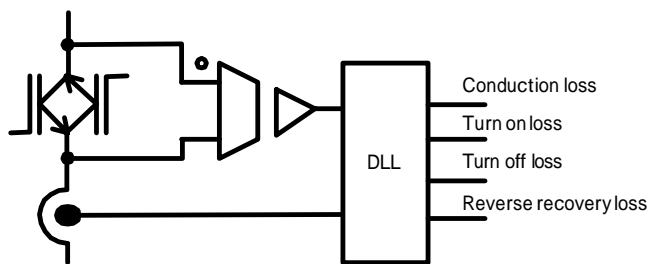


図4 損失計算回路

Fig. 4 Calculation method

表1 測定条件

Table. 1 Measurement condition

Switching Voltage	100V, 200V, 300V
Switching Current	2A, 4A, 6A, 8A, 10A

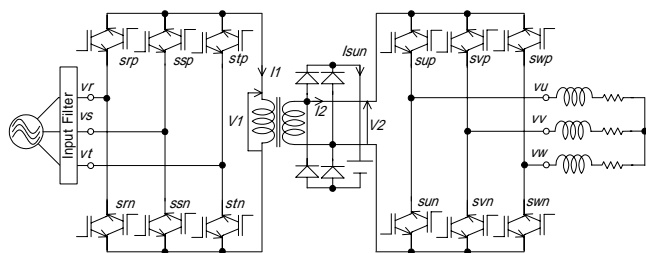


図5 シミュレーション回路

Fig. 5 Simulation circuit

表2 測定条件

Table. 2 Simulation parameter

Input voltage	200[V]	LC filter	2[mH]
Input frequency	50[Hz]		3.3[μ F]
AC link frequency	10[kHz]	Cut-off frequency	1.1[kHz]
Output frequency	100[Hz]	Load	5[mH]
Carrier frequency	10[kHz]		18.5[]

5. 逆阻止IGBT

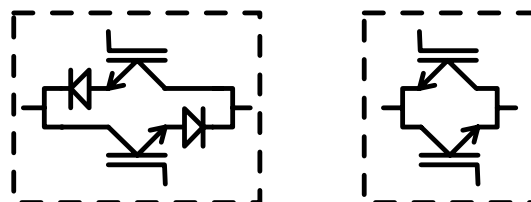
逆阻止IGBTは、従来のIGBTが持ち得なかった逆耐圧を有するまったく新しいデバイスである⁽⁹⁾。図6(a)に従来型IGBT、図6(b)に逆阻止IGBTを用いた双方向スイッチを示す。逆阻止IGBTを直接形電力変換器の双方向スイッチに適用すると、従来型IGBTでは必要不可欠な逆耐圧保護用のダイオードを用いずに双方向のモジュールを構成することができる。これにより、

- (1) ダイオード分のオン電圧が低減するため導通損失の低減および、損失低減に伴い、冷却フィンなどの小型化の達成
- (2) ダイオード分のチップ数削減によるコストダウンおよびパッケージのサイズダウン

などが期待できる。

表3に従来型IGBTとの特性比較を示す。オン電圧特性が従来型IGBTに比べ約1/2になっている。このことから、導通損失は従来型IGBTの約1/2に低減でき、システムの小型化、効率化が期待できる。スイッチング損失特性(ターンオン損失特性、ターンオフ損失特性、逆回復特性)に関しては、

それぞれ、若干の差はあるがオン電圧ほどの差がないため、ほとんど、変わらないものと思われる。



(a)従来型IGBTモジュール (b)逆阻止IGBTモジュール

図6 双方向スイッチ

Fig. 6 Bidirectional switches

6. 実験結果

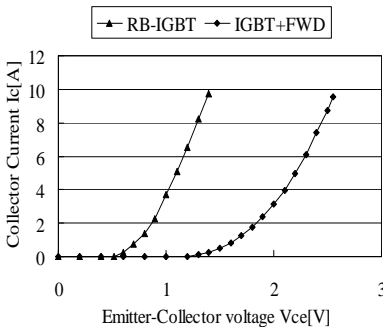
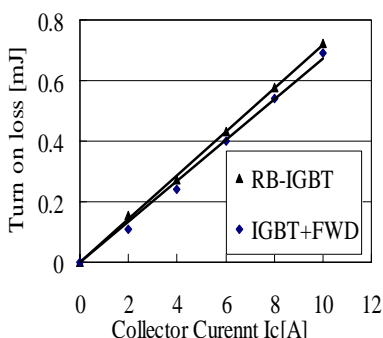
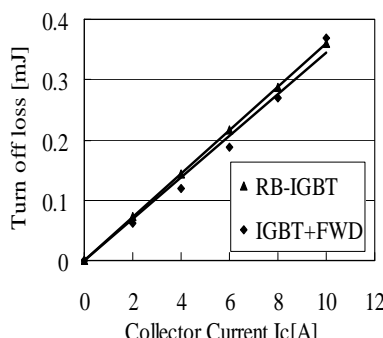
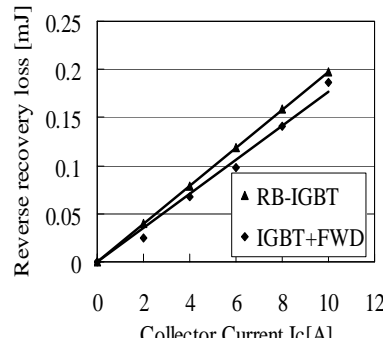
本論文では、逆阻止IGBTの効果を検証するため、損失シミュレーションを行うとともに、RL負荷による実験を行った。今回は一次側でのみ逆阻止IGBTを用いている。図7に総合効率を示す。逆阻止IGBTを用いることにより従来素子と比べて総合効率は92.8[%]で約0.5[%]の効率が改善できる。

図8、図9に損失シミュレーションによる総合損失と一次側コンバータの損失解析の結果をそれぞれ示す。一次側コンバータでは、導通損失が約1/2なったことにより従来素子に比べ一次側コンバータの全損失が約22[%]低減できる。また、シミュレーションでは効率改善効果は0.7[%]に対し、実験では0.5[%]であることから、配線インダクタンスやデバイスの温度の相違などを考慮するとシミュレーションと実験結果はよく一致し、損失シミュレーション結果は妥当であるものといえる。

図10は二次側にも逆阻止IGBTを適用した場合の発生損失予測をシミュレーションにより行った結果を示している。その結果、従来型IGBTに比べ逆阻止IGBTを用いることにより約18[%]の損失低減となる。総合効率は93.6[%]と従来素子に比べて約1.3[%]の効率改善が見込まれる。この結果、放熱フィンの体積を減らすことができ、加えてモジュールサイズも小さくすることから、高効率化だけでなく、大幅な小型化も実現できる。更なる高効率化のためには、高周波トランスの鉄損を低減する必要がある。

表3 従来素子との比較

Table. 3 Comparison with heretofore device

<p>Conduction Loss</p>	
<p>Turn on characteristic Vce=300V</p>	
<p>Turn off characteristic Vce=300V</p>	
<p>Reverse recovery characteristic Vce=300V</p>	

◆ Reverse blocking IGBT ▲ Conventional IGBT

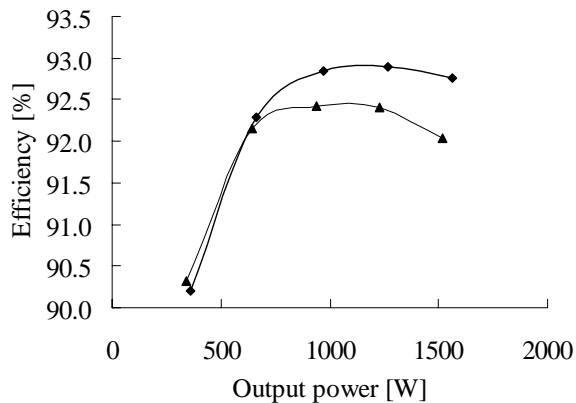


図7 総合効率

Fig. 7 Combined efficiency

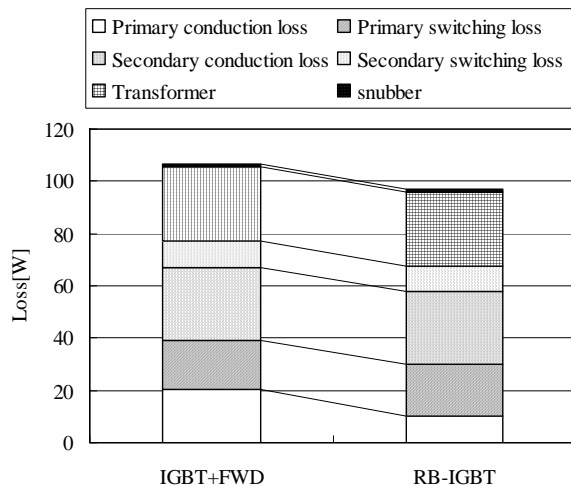


図8 総合損失分離

Fig. 8 Separation of total loss

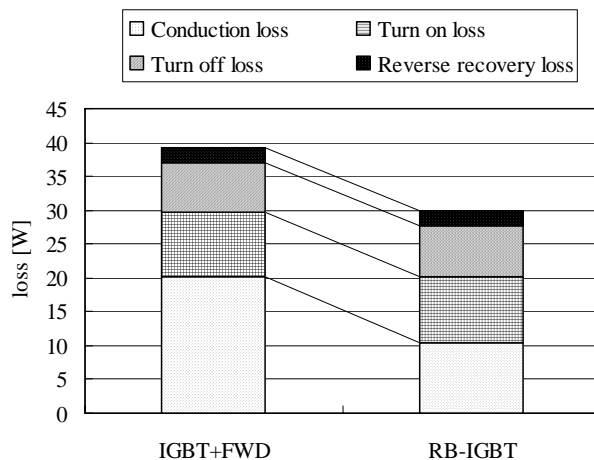


図9 一次側コンバータの損失分離

Fig. 9 Separation of primary converter

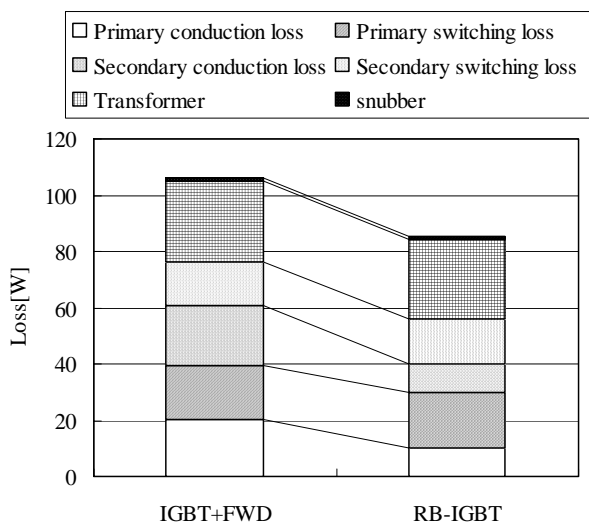


図10 全ての素子を逆阻止IGBTに変更した場合の損失予想

Fig. 10 Simulation result

7. まとめ

本論文では高周波ACリンクコンバータに逆阻止IGBTを適用した効果について、損失シミュレーションと実験により検証した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 最高総合効率率は92.8[%]であり、従来素子より0.5[%]改善できる。
- (2) 一次側コンバータに逆阻止IGBTを用いた場合の効果について実験とシミュレーションを用いて検討し、発生損失の割合は約22[%]低減できる。
- (3) 二次側コンバータに逆阻止IGBTを用いた場合の有効性をシミュレーションにより検証し、総合効率を1.3[%]改善でき、損失を18[%]低減できる。
- (4) 一次、二次側の逆阻止IGBTを用いた結果、高周波トランスの全損失に占める割合は34.3[%]になり、さらなる高効率化にはトランスの高効率化が必要である。

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、逆阻止IGBTを使うことにより、さらにその有用性が向上し広い普及が期待できる。今後は高周波トランスの設計の最適化などを行い、更なる高効率化をめざしたい。

文 献

- (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