

次世代型交流モータ駆動制御用ソフトスイッチングインバータの開発

吉次淳二 (システム工学専攻) 井上堅治 (神鋼電機 (株)) 安藤正之 (電気電子工学専攻)
Serugei Moissev (電気電子工学専攻) 平木英治 (電気電子工学科) 中岡睦雄 (電気電子工学科)

Advanced Development of Soft Switching Inverter for AC Motor Electrical Drive Systems

Junji YOSHITUSUGU (Division of System Engineering) Kenji INOUE (Shinko Electric Co., Ltd.)
Masayuki ANDO (Division of Electrical and Electronics Engineering) Serugei Moissev (Division of
Electrical and Electronics Engineering) Eiji HIRAKI (Department of Electrical and Electronics Engineering)
Mutsuo NAKAOKA (Department of Electrical and Electronics Engineering)

Abstract-This paper presents a simple circuit topology of the auxiliary active resonant DC link snubber (ARDCL) which is used for the instantaneous space voltage vector modulation ARDCL assisted three phase voltage source soft-switching inverter suitable for small scale PM motor drive applications. The specific related pulse processing drive circuit interface of the auxiliary resonant DC link snubber circuit and its soft-switching operation are discussed from an experimental point of view. In addition to these, the conductive magnetic noise of quasi-resonant snubber-assisted three phase zero voltage soft-switching inverter in the case of PM motor drive in its open loop scheme is actually measured and evaluated by using experimental setup as compared with the general purpose three phase hard switching inverter.

Key Words: Voltage source inverter, Space voltage vector modulation, Active auxiliary resonant DC link, Soft switching commutation, DC brushless servo motor, Conductive noise reduction.

1. はじめに

近年, MOSFET, IGBT, MCT などの MOS ゲート制御パワー半導体デバイス又はパワーモジュールを用いた電力変換回路トポロジー技術やそれに関連した制御技術の飛躍的な発展に伴い, 制御性能の向上, 低騒音化かつダウンサイジング化に対して, インバータ・コンバータのスイッチング周波数の高周波化スイッチングパルス変調導入技術が不可欠となっている。しかし, 従来からのハードスイッチング PWM 方式半導体電力変換回路システム (インバータ・コンバータ) ではアクティブパワー半導体デバイスのターンオン・ターンオフ電圧・電流のスイッチングが急峻に行われスイッチングパワーデバイスの電圧・電流の重なりによる干渉化が現れることから, パワー半導体デバイスのスイッチング損失の増大, 放熱系の大形化が問題と

なっている。また, パワー半導体デバイスの電圧あるいは電流の急激な変化いわゆる dv/dt , di/dt に起因するスイッチング電流サージ・電圧サージによる伝導性と放射性の電磁ノイズが生じ, 電磁環境問題が生じる。さらに, AC モータの可変速制御応用やサーボ応用分野に適用されるインバータ・コンバータにおいては, 高い dv/dt によって起こるモータ固定子巻線とフレーム間の浮遊容量を通して接地線に流れる高周波漏れ電流また AC モータの軸電圧とベアリング電流の問題が現れてきている¹⁾⁻²⁾。さらに, 高い di/dt によるモータ固定子巻線, トランス, リアクトルの電氣的絶縁破壊の問題も見逃せない。このため, IGBT, MOSFET などの高速パワー半導体デバイスを用いたインバータ AC サーボドライブ機器は, インバータのスイッチング周波数が増大するにつれて, これらの問題がますます顕在化する傾向にある。これらの

根本的な解決手段として、スイッチングモード半導体電力変換装置内すべてのパワー半導体デバイスをアクティブ部分共振スナバ効果を利用してゼロ電圧またはゼロ電流のモード遷移状態で、ターンオン・ターンオフさせるソフトスイッチング電力変換回路技術とこれに関連した独自の制御技術の導入が不可欠であり、目下のところアクティブ共振スナバ回路やそれを用いたインバータ・コンバータの実証的性能評価・検討が強く望まれている。

三相電圧形ソフトスイッチングインバータやコンバータの回路トポロジーには共振 DC リンク、共振 AC リンク、共振補助転流アーム (共振ポール) リンクといった共振スナバによる回路トポロジーの諸形式が提案されている³⁾⁻¹⁴⁾。

本論文では、小容量 PM モータ駆動用ソフトスイッチング三相電圧形インバータとして有効と考えられる簡単な一括型補助アクティブ共振 DC リンクスナバ回路ファミリーの 1 方式を取りあげ、共振スナバ回路のソフトスイッチング動作について実証的評価を行っている。次に本共振スナバを用いた三相電圧形インバータをとりあげ、これを PM モータ駆動系に適用した場合における伝導性ノイズを従来のハードスイッチング方式インバータのそれとの比較を行った結果について述べている。

2. 補助並列共振 DC リンクスナバ方式三相電圧形インバータ

<2.1> 回路構成

図 1 に補助アクティブ部分共振 DC リンク一括スナバ方式三相電圧形ソフトスイッチングインバータを用いた小容量 PM-AC モータ駆動制

御システムの構成を示す。PM-AC モータの固定子巻線が三相電圧形インバータのローパスフィルタとなる。

補助アクティブ共振 DC リンク一括スナバ回路の動作を説明するために、図 2 に示す U 相アーム等価回路を用いる。この回路は直流電圧源 V_s にパワー半導体デバイスをクランプする補助回路主スイッチ S_c 、部分共振を行うための補助アクティブ共振スナバ回路内の補助スイッチ S_{a1} , S_{a2} 、インバータ動作と等価な働きをするインバータ主回路主スイッチ S_{INV} に並列に接続された主回路内の主共振キャパシタ C_r 、スイッチ S_{a2} に並列に接続された補助共振キャパシタ C_a 、及び補助共振インダクタ L_r から構成されている。この回路トポロジーは、インバータ回路主スイッチのスイッチング時に直流電源電圧クランプスイッチ S_c と補助スイッチ S_{a1} , S_{a2} の動作による LC の部分共振現象を用いたロスレススナバ効果にもとづいている。この効果を利用して主共振キャパシタ C_r の電圧いわゆる DC バスライン電圧をゼロ電圧にする DC 電圧切込 (ノッチ) モードを設けることにより、電圧形インバータアーム内のすべての主スイッチを ZVS/ZCS ターンオン並びに ZVS ターンオフを実現している。なお、直流電源部は三相アクティブ整流ソフトスイッチングコンバータにより今後作製する予定である。

<2.2> 回路動作

電圧形インバータのソフトスイッチングを行うための補助アクティブ共振 DC リンクスナバ回路の動作を電流源負荷モデル (三相電圧形インバータの出力段にチョーク入力型ローパスフィルタを持つ場合は 1 サンプル周期

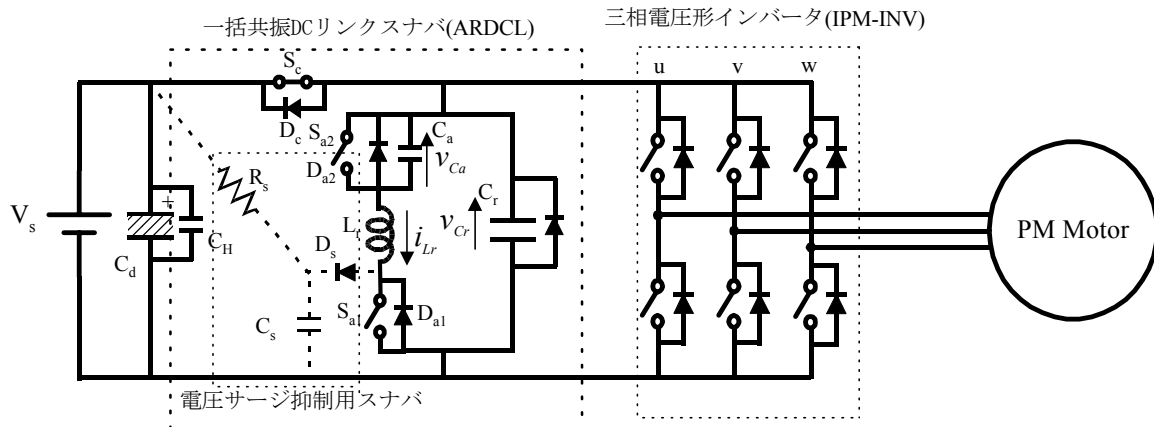


Figure 1 Advanced Soft Switching Inverter System with Auxiliary Resonant DC-link Snubber

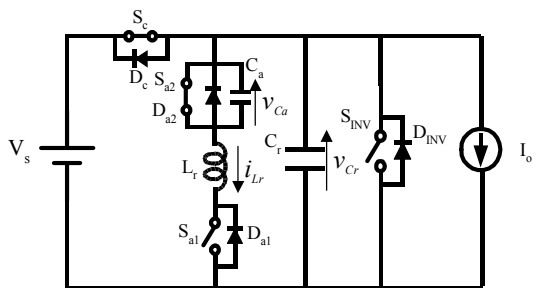


Figure 2 Fundamental Equivalent Circuit of the Auxiliary Resonant DC-link Snubber

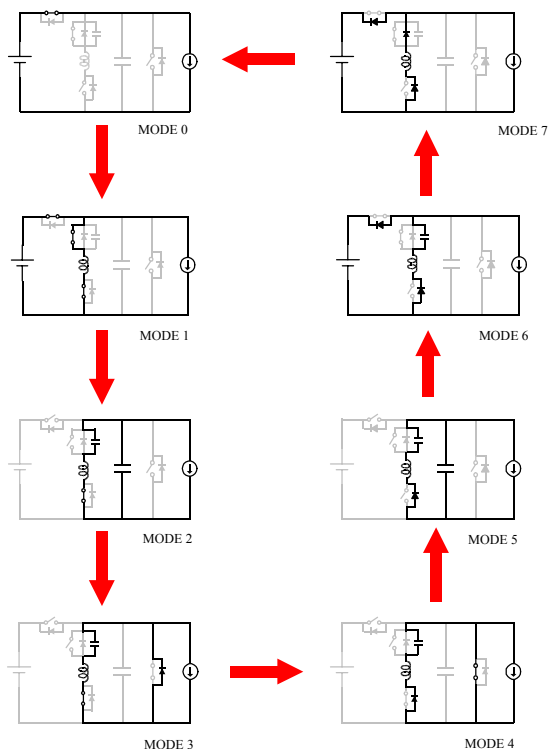


Figure 3 Mode Transitions and Its Equivalent Circuit Configuration

内における等価負荷モデル) として回路に対して各モードごとに説明する。各モードは図3のように遷移する。その等価回路を図3に示す。

また、各パワー半導体デバイスのスイッチングパターンと部分共振スナバ回路の代表的な電圧波形・電流波形を図4に示す。以下、本回路動作を各モードの等価回路と対応させて説明する。すなわち

<Mode0 (定常モード) > : 電圧クランプスイッチ S_c 及び補助スイッチ S_{a2} がオン状態で、負荷電流が流れている。

<Mode1 (共振初期電流蓄積モード) > : インバータ主スイッチの切り替え指令が到来する時、 S_{a1} を ZCS でターンオンする。部分共振イ

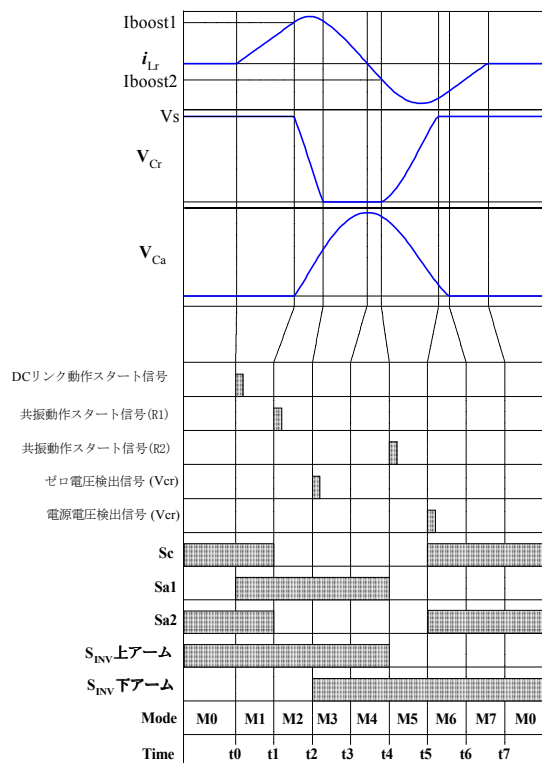


Figure 4 Switching Patterns and Operation Waveforms of Resonant DC-link Snubber

ンダクタ L_r に流れる電流が主共振キャパシタの電圧 V_{cr} をゼロ電圧まで降圧するのに十分な電流まで増加 (ブースト) させる。

<Mode2 (共振モード) > : 共振インダクタ L_r に流れる電流が共振初期電流 I_{boost1} に達すると、 S_c と S_{a2} を同時に ZVS でターンオフして L_r , C_r と C_a の共振がスタートする。

<Mode3 (ゼロ電圧ホールドモード) > : 主共振キャパシタ C_r の電圧が降圧されゼロ電圧になると、主スイッチ S_{INV} に逆並列にあるダイオードが導通し、 S_{INV} を ZVS/ZCS ターンオンする。

<Mode4 (ゼロ電圧ホールドモード) > : 共振インダクタ L_r に流れる電流は負の方向に増加し始め、主共振キャパシタの電圧を直流電源電圧 V_s まで昇圧するのに必要な電流まで増加させる。このとき S_{a1} を ZVS/ZCS でターンオフする。

<Mode5 (共振モード) > : 共振インダクタ L_r に流れる電流が共振初期電流 I_{boost2} に達すると、 S_{INV} を ZVS でターンオフして L_r , C_r と C_a の共振がスタートする。

<Mode6 (共振モード) > : 主共振キャパシタの電圧 V_{cr} が直流電源電圧 V_s まで達すると、電圧クランプスイッチの逆並列ダイオード D_c 。

が導通する。S_cをダイオード D_c導通期間中に ZVS/ZCS でターンオンする。

<Mode7 (回生モード)> : 共振インダクタ L_r に流れている電流は、DC を通って直流電源入力側 V_s に回生される。

<2. 3> 瞬時空間ベクトル変調方式ベクトルパターン

図5に三相電圧形インバータの瞬時空間電圧ベクトルのエリアと指令電圧ベクトル \tilde{v}_A^* を示す。補助アクティブ共振 DC リンク回路を用いた場合、共振動作時間より短い指令電圧ベクトルが入力されると、共振動作中に次の共振動作

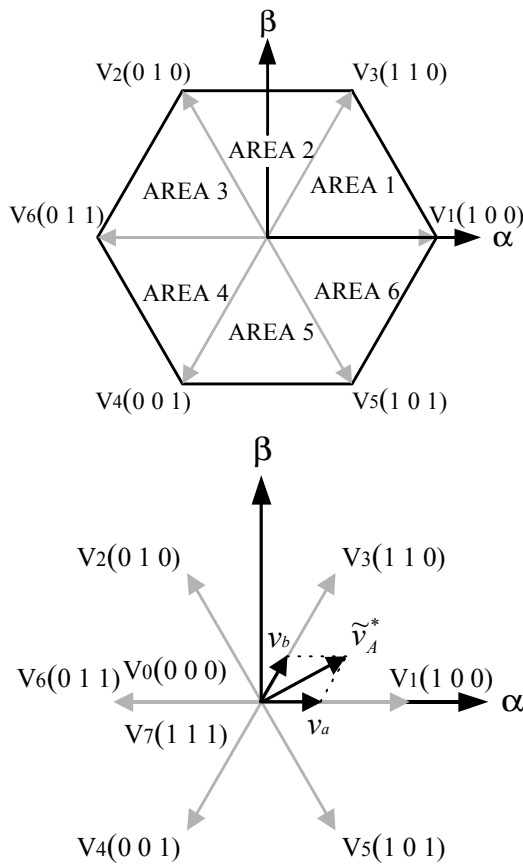


Figure 5 Vector Area and Reference Voltage Vector of Instantaneous Space Voltage Vector

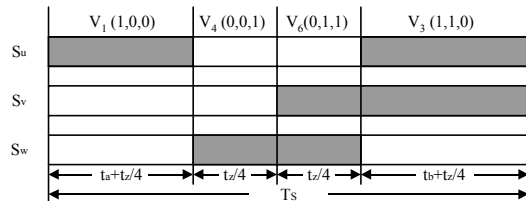


Figure 6 Time-Sharing Switching Pulse Sequences

を開始することになる。そのため、ソフトスイッチングを達成することができないだけでなく、di/dtによる電圧サージとdv/dtによる電流サージが発生し、パワー半導体デバイスを破損することがある。従来のベクトルパターンでは変調率Mが低い場合やエリアの切り替わりで短いベクトルが出力される。従って、ACサーボドライブ系へ適用した場合、ゼロ速運転ができないということも考えられる。そこで、本文では変調率Mの低い場合やエリアの切り替わり時に短い電圧ベクトルを出力しなくて良いベクトルパターンを与えている。

指令電圧ベクトルがエリア1内にあるとき、近傍の2つのスイッチング空間ベクトルはベクトルをそれぞれ v_a, v_b, サンプル時間を T_s, バスライン部の直流電源電圧を V_s とすると、v_aベクトル出力時間 t_a, v_bベクトル出力時間 t_b, ゼロベクトル出力時間 t_z は以下の式で表される。

$$t_a = \frac{|v_a|}{V_1} T_s = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{|v_a|}{V_s} T_s \quad (1)$$

$$t_b = \frac{|v_b|}{V_3} T_s = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{|v_b|}{V_s} T_s \quad (2)$$

$$t_z = T_s - t_a - t_b \quad (3)$$

ここで、図6に示すように、V₁を t_aと t_zの4分の1期間(t_a+t_z/4)出力し、次にV₄を t_bの4分の1期間出力し、V₆を t_zの4分の1期間出力する。そしてV₃を t_bと t_zの4分の1期間(t_b+t_z/4)出力すれば、1サンプル時間で平均すると、短い指令電圧ベクトルやエリア切り替わり時の指令電圧ベクトルを実現していることになる。表1に指令電圧ベクトルが各エリア内に位置する場合の各エリアでの v_a方向のスイッチング空間電圧ベクトルと v_aの大きさ、

Table 1 Divided Vector Components for Each Area

エリア	AREA 1	AREA 2	AREA 3
v _a 方向ベクトル	V ₁	V ₃	V ₂
v _a の大きさ	$\hat{v}_{A\alpha}^* - \hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$	$\hat{v}_{A\alpha}^* + \hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$	$2\hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$
v _b 方向ベクトル	V ₃	V ₂	V ₆
v _b の大きさ	$2\hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$	$-\hat{v}_{A\alpha}^* + \hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$	$-\hat{v}_{A\alpha}^* - \hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$
v _c ベクトル	V ₆ , V ₄	V ₄ , V ₅	V ₅ , V ₁

エリア	AREA 4	AREA 5	AREA 6
v _a 方向ベクトル	V ₆	V ₄	V ₅
v _a の大きさ	$-\hat{v}_{A\alpha}^* + \hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$	$-\hat{v}_{A\alpha}^* - \hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$	$-2\hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$
v _b 方向ベクトル	V ₄	V ₅	V ₁
v _b の大きさ	$-2\hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$	$\hat{v}_{A\alpha}^* - \hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$	$\hat{v}_{A\alpha}^* + \hat{v}_{AB}^* / \sqrt{3}$
v _c ベクトル	V ₁ , V ₃	V ₃ , V ₂	V ₂ , V ₆

V_b 方向のスイッチング空間電圧ベクトルと V_b の大きさ,そして V_a と V_b ベクトルを打ち消し,ゼロ電圧ベクトルを出力する代わりとなる V_c ベクトルを示している。

3. 試作実験機と実験結果

<3. 1> 実験システムの構成

図7に試作システム構成を示す。このシステムで補助アクティブ部分共振 DC リンク一括スナバ方式三相電圧形インバータの動作確認及び伝導性ノイズの測定を行うことにする。本実験では,インバータ主回路に IPM (PM50RSA060)を使用したため,オン時間・オフ時間共に 2msec 程度の遅れを生じるため,図4で示したアクティブ共振スナバ回路のスイッチングパターンでは主回路のスイッチングタイミングが遅れる。そこで,共振動作スタート信号(R1)で主回路上下アームオンの信号を発生させ,74LS123 で 2msec 後に上下アームの片方をオフする信号を発生している。また,本実験では電流ループ及び速度ループは構成しておらず,d 軸電圧指令値をゼロ,q 軸電圧指令値を一定値としたベクトル制御運転をしている。また,伝導性ノイズ測定においては負荷電流の最大値を合わせてソフトスイッチングとハードスイッチングの比較を行っている。なお,伝導性ノイズ測定においては疑似電源回路網 LISN (協立電子工業(株))及び EMC アナライ

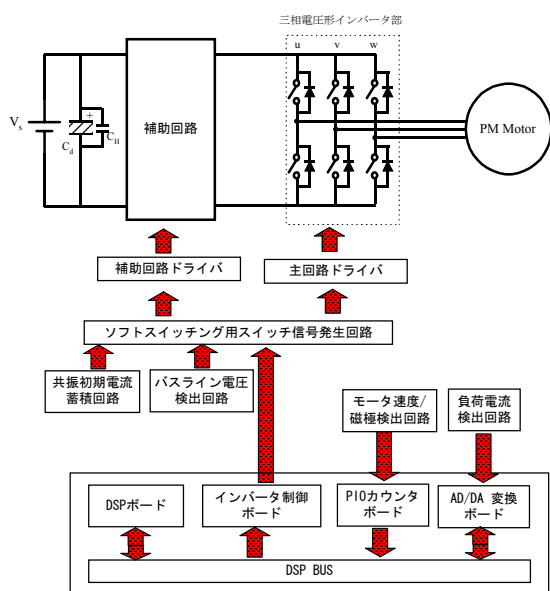


Figure 7 Experimental Setup Configuration

ザ (アジレントテクノロジー:E7401A) を使用している。

<3. 2> 実験結果と検討

(a) アクティブ共振 DC リンクスナバ

図8にアクティブ補助共振スナバ回路部の各部動作波形を示す。この図より,インバータ主スイッチに並列に接続されている主共振キャパシタ C_r の電圧が確実にゼロ電圧まで降圧され,直流電源電圧 V_s まで昇圧されている。また,この間に直流バスライン電圧に切込(ノッチ)モードが発生している。その期間内でインバータ内の全ての主スイッチがゼロ電圧ソフトスイッチング(ZVS)されていることがわかる。

(b) 共振 DC リンクスナバを用いた三相電圧形インバータ

図9に q 軸電圧指令値を 0.2, d 軸電圧指令値を 0 とした場合の U 相負荷電流波形を示す。ただし,d-q 軸上での値は直流電源電圧 V_s で正規化されている。q 軸電圧指令値が 0.2 と小さいが,ゼロ電圧ベクトルを用いず,打ち消しベクトルを出力しているため,共振スナバ回路は部分共振によるソフトスイッチング動作の失敗をせず,ほぼ正弦波の負荷電流を得ている。また,このとき,PM-AC モータは約 1500rpm で回転している。

図10に伝導性ノイズの測定結果を示す。ハードスイッチングと本方式のソフトスイッチングの比較をするため,両者とも負荷電流 (PM-AC モータ固定子巻線電流)の最大振幅が 0.8A という条件下でノイズ測定を行っている。測定

Table 2 Experimental Specifications

直流電源電圧		V_s	280[V]
補助共振スナバ回路	主共振キャパシタ	C_r	10[nF]
	補助共振キャパシタ	C_a	10[nF]
	共振インダクタ	L_r	101[μH]
電圧サージ抑制用スナバ回路	パワースイッチングデバイス (IGBT: CM75DY-12H)	S_c, S_{a1}, S_{a2}	最大定格 $I_c=75[A], V_{CES}=600[V]$
	電圧クランプキャパシタ	C_s	0.22[μF]
PM モータ (BM0230)	スナバダイオード	D_s	USR30P12
	スナバ抵抗	R_s	20[Ω]
	漏れインダクタンス	L_{load}	10[mH]
主回路	電機子抵抗	R_{load}	7.5[Ω]
	極数	P	8
	定格電流	I_{max}	1.4[Arms]
パワースイッチングデバイス (IPM: PM50RSA060)	スイッチングデバイス	S_{INV}	最大定格 $I_c=50[A], V_{CES}=600[V]$
	サンプリング周波数	T_s	10[kHz]

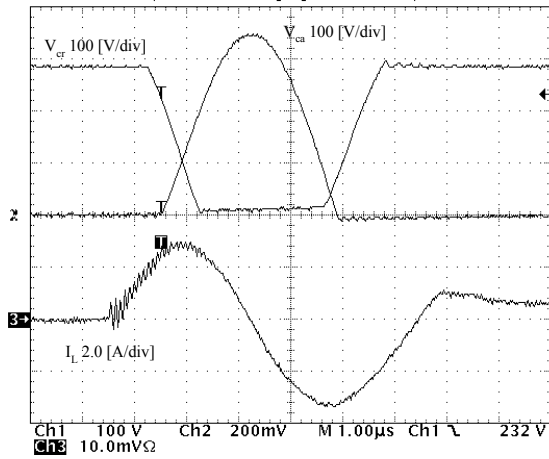


Figure 8 Operation Waveforms of the Resonant DC-link Circuit

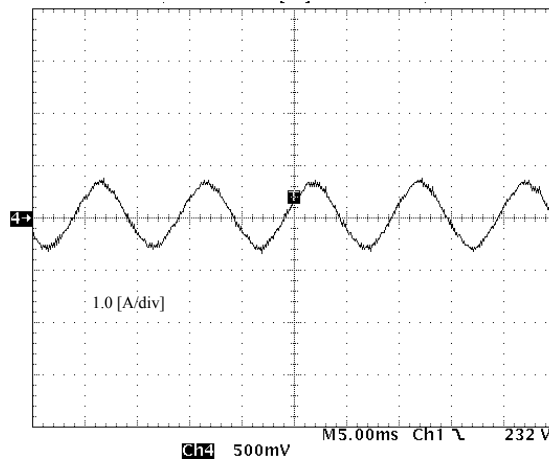


Figure 9 U-phase Load Current

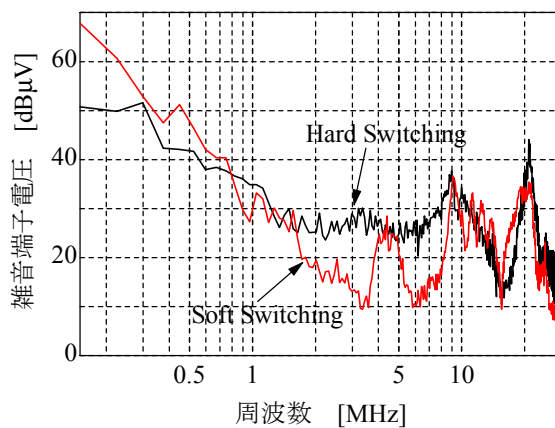


Figure 10 Conductive Noise Measurements

周波数帯は 150kHz から 30MHz で測定した。
1. 6MHz~4MHz 及び 5MHz~9MHz の周波数帯にお

いて、本回路のソフトスイッチング方式インバータではハードスイッチング方式インバータに比べ、最大で約 20dB 低減することができている。しかし、8MHz 以下の周波数帯では逆にノイズレベルが上がってしまっているの、さらなる改善が必要である。補助スイッチ S_{a1} の電圧サージを抑制するために、スナバ回路を付加したことにより、共振インダクタ電流の立ち上がりに 11MHz のサージが発生しているが、これも改善によりノイズレベルが低減できると考えられる。

(c) RC-D スナバレス共振 DC リンク回路の新提案回路トポロジ

本実験では補助スイッチ S_{a1} の電圧振動サージを抑制するために電圧クランプスナバを用いている。著者らは電圧クランプスナバを用いずに補助スイッチ S_{a1} の寄生容量と共振インダクタの共振による電圧サージを電圧クランプスナバ回路を用いずに抑制する方法として図 11 に示すような電圧クランプダイオードを挿入する回路方式を提案している。図 12(a)で発生していた補助スイッチ S_{a1} の電圧サージ v_{sa1} を図 12(b)のように抑制することができている。今後、

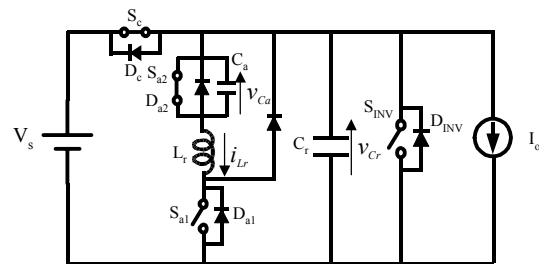
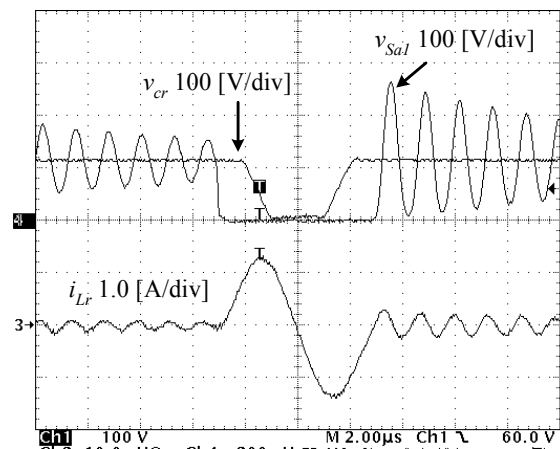


Figure 11 Auxiliary Resonant DC-link Snubber Circuit with a Voltage Clamp Diode



(a) without Voltage Clamp Snubber and Voltage Clamp Diode

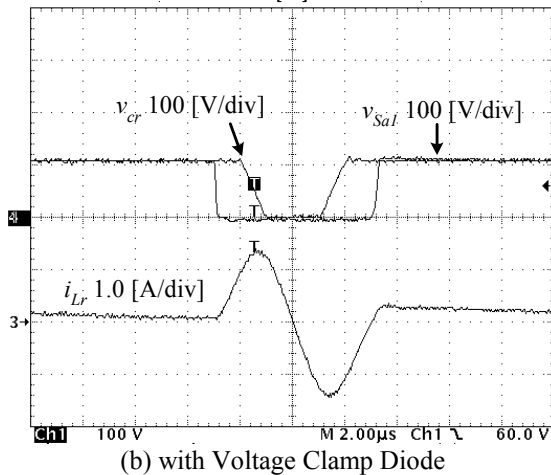


Figure12 Voltage clamp diode effect.

この改善形回路による雑音端子電圧の測定と比較を早急に行う必要がある。

4. まとめ

小容量 PM モータ駆動用ソフトスイッチング三相電圧形インバータの共振スナバとして補助アクティブ共振 DC リンクスナバ回路方式の一例を取り上げ、回路動作を試作実験結果について述べた。この共振 DC リンクスナバ回路を三相電圧形インバータに組み込んだときの補助アクティブ共振スナバ回路のソフトスイッチング動作確認及び三相電圧形インバータのハードスイッチングとソフトスイッチングでの伝導性ノイズの測定比較を行い、ソフトスイッチングにより電磁ノイズ低減が可能であることが検証できた。

今後の課題としてさらなる伝導性ノイズ(EMC)及び放射性ノイズ(RFI)の低減と瞬時空間ベクトルパターンの検討、共振初期電流の制御、電流ループ、速度ループの導入、アクティブ共振 DC リンクスナバの諸形式の相互比較、改良形共振 DC リンクスナバの見直し、アクティブ共振スナバを含む電圧形ソフトスイッチングインバータの電力損失分析などが挙げられる。本アクティブ共振 DC リンクスナバとは異なった他の共振 DC リンクスナバとの検討も必要となる。また、AC サーボモータ、EV 駆動モータ、エアコンコンプレッサモータなどに用いられ始めている DC ブラシレスモータのソフトスイッチングインバータの実証的評価検討が早急に望まれる。

謝辞

この研究成果の一部は文部省科学研究費補助金による成果であり、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Busse, J. Erdman, R. J. Kerkman, D. Schlegel, and G. Skibinski, "Bearing Currents and Their Relationship to PWM Drives", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.12, No.2, pp.243-252, 1997.
- 2) 小笠原, "可変速 AC ドライブの漏れ電流・サージ電圧・軸電圧とその抑制法", 電学論 D, 118 巻 9 号, pp.975-980, 1998.
- 3) M.D. Bellar, T.S. Wu, A. Tchamdjou, J. Mahdavi, and M. Ehsani, "A Review of Soft-Switched DC-AC Converters", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.34, No.4, pp.847-860, 1998.
- 4) 青木, 野崎, 鋹田, "ゼロ電圧スイッチング PWM インバータの動作解析", 電子情報通信学会技報, PE92-9, 1992.
- 5) 青木, 野崎, 鋹田, 小島, "10kW ゼロ電圧スイッチング PWM インバータ", 電子情報通信学会秋季大会予稿集, SB-7-3, 1994.
- 6) 小島, 青木, 鋹田, "ゼロ電圧スイッチング PWM インバータに用いる電圧ゼロ化回路の電流・電圧特性について", 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会予稿集, B-602, 1995.
- 7) T. Aoki, Y. Nozaki, Y. Kuwata, and T. Koyashiki, "A Quasi-Resonant DC Link PWM Inverter", Proceedings of IPEC Yokohama, pp.1203-1208, 1995.
- 8) 長井, 佐藤, 伊東, 森田, "高効率・低ノイズ DC リンク共振三相インバータと転流制御", 電学論 D, 120 巻 3 号, pp.417-422, 2000.
- 9) T. Shimizu, M. Kurokawa, Y. Nishida, M. Nakaoka, "Utility-Interactive Instantaneous Sinewave Space Vector Modulated Bidirectional Three Phase Power Conditioner Using Resonant DC Link", Proc. of IEEE Industry Application Society Annual Meeting, pp.1681-1688, 1997.
- 10) 吉田, 吉次, 井上, 平木, 中岡, "一括共振スナバを用いたソフトスイッチングインバータの回路方式", 電気学会研究会資料, SPC-99-101(IEA-99-31), 1999.
- 11) 中岡, 平木, "高周波共振形電力変換関連技術—共振形電力変換器の応用—", 電気学会論文誌 D 分冊(産業応用部門誌),

- 12) Vol.117-D, No.2, pp.129-132, 1997.
- 13) 中岡, 平木, “電力変換器の高性能スイッチング技術 - 最新のスイッチング技術 -”, 電気学会・全国大会シンポジウム講演論文集, No.S-17-1, pp.17-(1)~17-(4), 1997.
- 14) 吉次, 井上, 安藤, 平木, 中岡, “小容量PM モータ駆動制御用三相空間電圧ベクトル変調形ソフトスイッチングインバータの性能評価(その1)”, 電子情報通信学会技報, EE2000-13, 2000.
- 15) Jianwen Shao, Ray L. Lin, and Fred C. Lee, “A Novel DC Link Soft-Switched Inverter with a Coupled Inductor”, Proceedings of International Power Electronics and Motion Control Conference, Vol.1, pp.318-323, 2000.

(平成12年8月31日受理)