

インバータにおける伝導性ノイズの解析

谷澤 之彦*, 山村 直紀**, 堀 孝正**

Analysis of Conductive Electromagnetic Interference Noise for Inverters.

by Yukihiro TANIZAWA, Naoki YAMAMURA and Takamasa HORI

EMC standards for electronic equipments is being arranged in the each country, and it becomes similarly a pending issue on the power electric applications such as inverters and UPS. Then, we carried out comparison and examination on the conductive EMI noise (noise on the terminal voltage) of the inverters on the generation rate and source. In this paper, we considered Conventional hard switching inverters (HSW) and soft switching inverter (SSW) that it is effective for noise reduction.

As the results, by comparing the SSW type with the HSW type, the noise in which the main switch arises can be reduced. But it was being generated by converter (the diode bridge) and auxiliary switch by experiments and simulations.

Key words : EMC, noise, soft switch, ARCP

1. はじめに

電子機器に対するEMC規格が各国でまとめられつつあり、我が国でもJIS化の動きもある。インバータやUPSをはじめとする電力用機器についても、EMC問題が今後ますます注目されてくるものと考えられる。

そこで、本稿ではインバータの伝導性EMIノイズ(雑音端子電圧)について、その発生量と発生源および伝播経路について明らかにすることを目的とした。対象として、従来のハードスイッチング(HSW)インバータ回路と、低ノイズ化に有効であるとされるソフトスイッチング(SSW)インバータ(ARCP¹⁾²⁾³⁾)を取り上げた。

実機により、ノイズの周波数領域波形と時間領域波形の測定結果から、ノイズの発生源および伝播経路を推定して、それをシミュレーションにより確認した。

2. 実験方法

伝導性ノイズ(雑音端子電圧)について、試作装置による測定と、コンピュータによるシミュレーションを行った。

2.1 測定方法

雑音端子電圧の測定はFCC規格の疑似電源回路網(LISN)とEMIレシーバを用いて行った(図1,2)。なお、本稿での測定結果は尖頭値を示している。

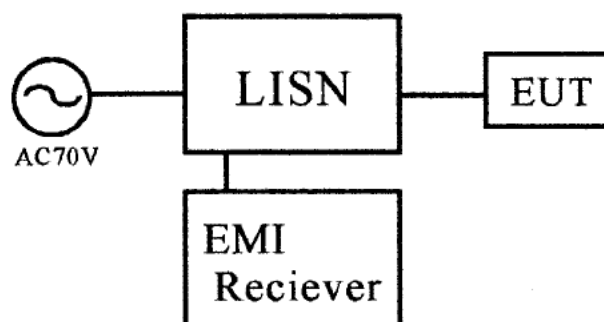


図1 雑音端子電圧測定法

* 機械電子グループ

** 三重大学工学部

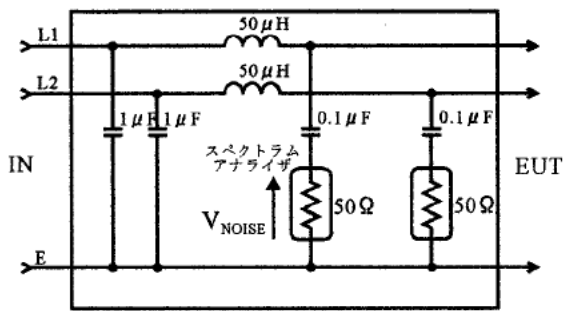


図2 疑似電源回路網 (LISN)

2. 2 シミュレーション方法

シミュレーションは、インバータ回路等の電力変換器の解析用シミュレータを開発して行った。SpiceやEMTP等の汎用シミュレータでは、半導体素子の近似を高度に行っているため計算に多大な時間を必要とすること、また、制御系の表現も困難であることから電圧・電流フィードバック制御の必要なインバータ回路のシミュレーションは容易でない。

そこで、下記の特徴のあるシミュレータを開発して用いた。

- ・ IGBT・ダイオード等の半導体をRON, ROFFの2種類の抵抗値を持つスイッチとすることで、収束演算の必要が無く高速にシミュレーションが行える。

- ・ 半導体の制御を、Fortran言語で記述でき、また、回路の電流電圧もフィードバックできるので複雑な制御系も容易に表すことができる。

- ・ 回路はSpiceと似たネットリストを作成して、シミュレーションするため、回路変更も容易である。

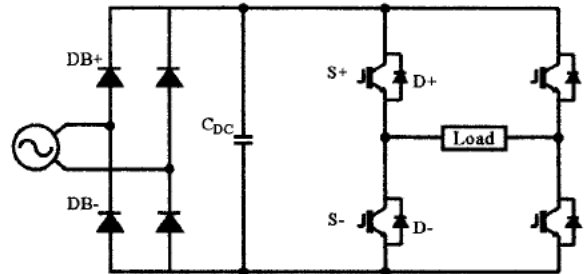
また、シミュレーションは簡単のために主回路のみについて行い、制御からのノイズは発生量が少ないため考慮していない。雑音端子電圧は、過渡解析により得られた電圧波形をフーリエ変換処理することで、周波数分布を求めている。

3. 実験およびシミュレーション結果

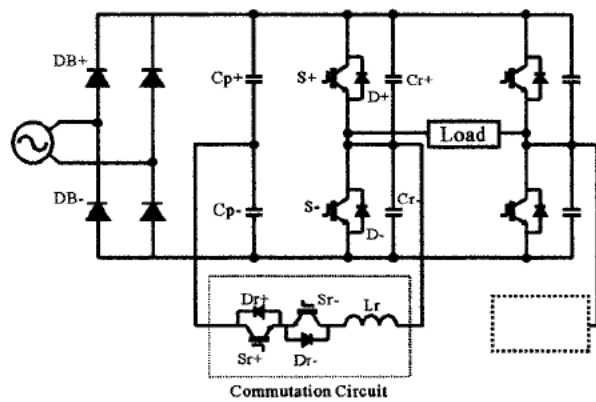
HSWインバータ (図3 (a))とARCPインバータ (図3 (b))についてノイズの発生源を検討した。

ARCPインバータの回路構成は、HSWインバータに対して、転流回路を付加したものとなっている。インダクタLrとコンデンサCrとの共振によりSSWを行うことができ、高効率化と低ノイズ化が期待できるインバータである。

それぞれの雑音端子電圧測定の結果を図4 (a),(b)に示す。以下、発生するノイズの発生源と周波数成分について、コンバータ部とインバータ部とに分けて検討した。

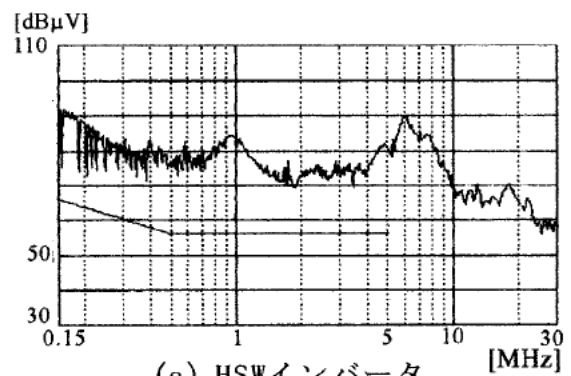


(a) HSWインバータ

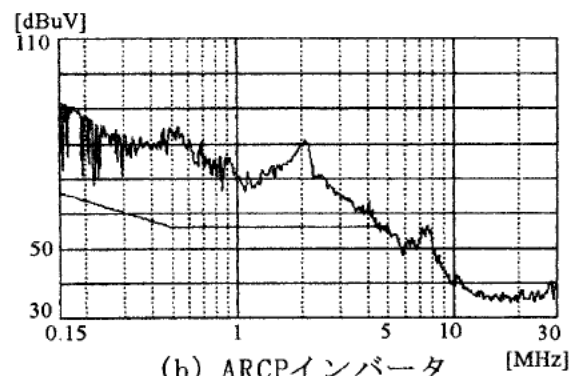


(b) ARCPインバータ

図3 インバータ主回路



(a) HSWインバータ



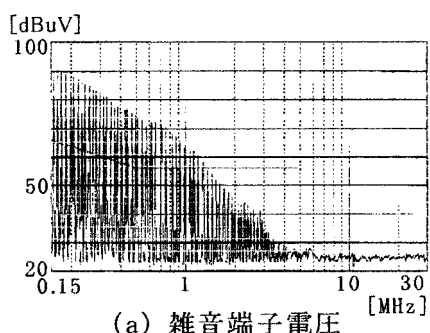
(b) ARCPインバータ

図4 雑音端子電圧

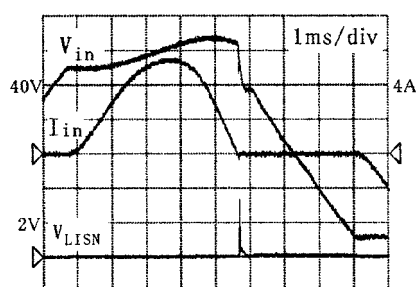
3. 1 コンバータ回路のノイズ

ダイオードブリッジ(DB)から発生するノイズについて調べるために、DBの負荷を抵抗として実験を行った。図5(a)に雑音端子電圧、(b)にDBの入力電圧波形、電流およびLISNの出力電圧(ノイズ)を示す。

ダイオードのオン時に電圧波形がLISN内部のインダクタンス(300 μ H)とコンデンサ(CS=1100 μ F)とが、共振している。この共振によりターンオフ時に大きな電圧歪みを生じて、同時に雑音端

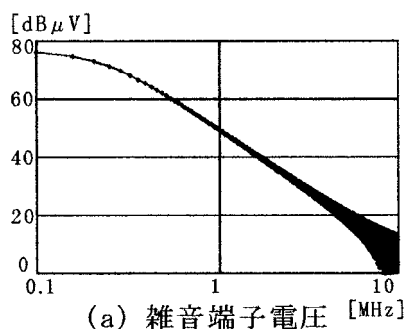


(a) 雑音端子電圧

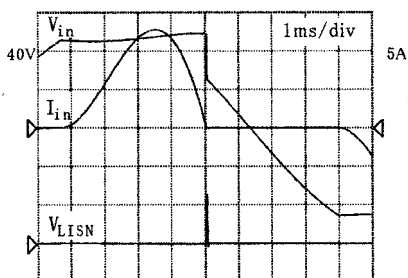


(b) 電圧電流波形

図5 実験結果



(a) 雑音端子電圧 [MHz]



(b) 電圧電流波形

図6 シミュレーション結果

子電圧 V_{LISN} にもノイズを生じている。

簡単にリカバリー現象を模擬するために理想ダイオードと並列に接合容量分のコンデンサを挿入したシミュレーションを行い、実験波形と同様な波形が得られた。(図6) これらのことから、コンバータ入力電圧の急峻な変化と、ダイオードのリカバリー電流が、発生要因であることが分かった。

3. 2 HSWインバータ回路のノイズ

次に、HSWインバータでのノイズについて述べる。ここでは簡単のために、Duty一定で負荷電流を直流($I_{LOAD}=2[A]$)とした。雑音端子電圧(図4(a))より、ダイオードブリッジでのノイズの他に1MHzと6MHz付近にピークを持つノイズを生じている。

図7に主回路を、スイッチング時の各部の波形を図8に示す。図8(a)はD-からS+へ、(b)はS-からD+へのスイッチング時の、各素子の端子間および配線の電圧波形である。

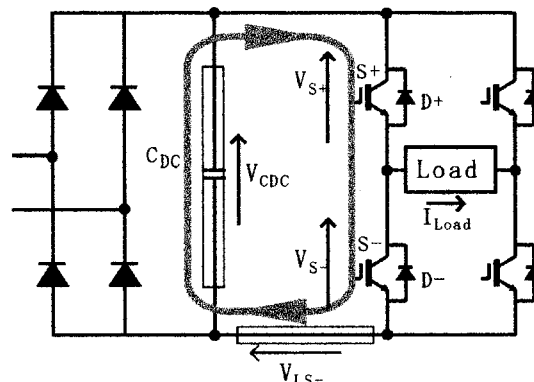
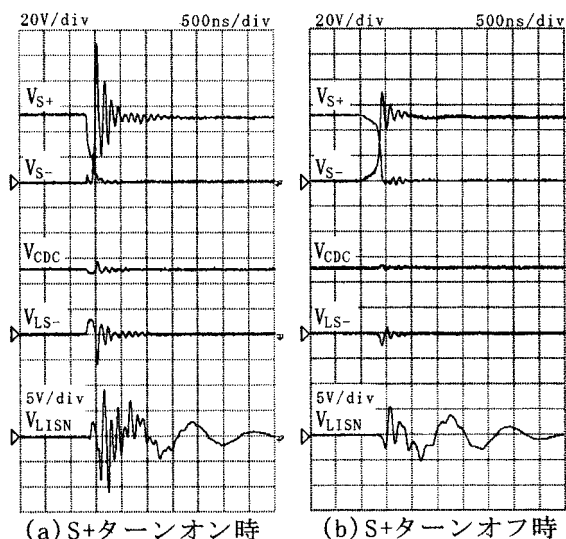


図7 インバータ主回路



(a) S+ターンオン時

(b) S+ターンオフ時

図8 スイッチング時の各部の波形

6MHzのノイズは、S-のターンオフ時、つまりDからS+に流路の切り替わり時に生じている。図7 (a)より、配線LとIGBT S+間および直流コンデンサ(C_{DC})間に振動電圧が生じており、これは図7中の太矢印に示すループで、配線インダクタンスL_lとS+の接合容量(1000pF)および直流コンデンサの内部インピーダンスによる共振であると考えられる。

これら影響を考慮するために、図9に示す等価回路を用いてシミュレーションを行った。各部の電圧を図10(a)に示す。実験波形図8 (a)に比べて、素子間の電圧は良く合っているものの、ノイズ電圧V_{LISN}が1/2程度と小さくなっている。

この原因は、シミュレーションでは制御回路を考慮していないが、実験ではこれを通してIGBT素子間で発生した高周波電圧がコモンモードノイズとして伝播するためと考えられる。

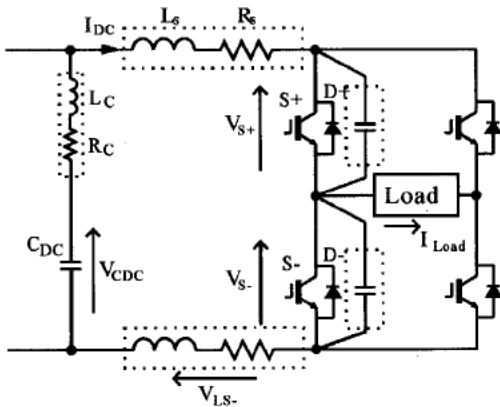
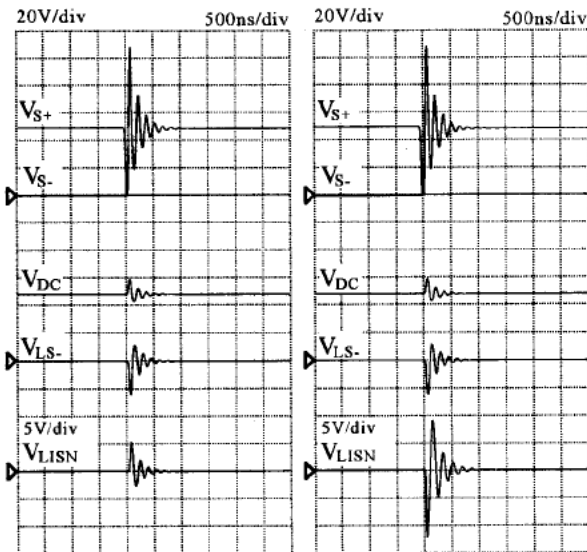


図9 等価モデル



(a) 容量接地なし (b) 容量接地あり

図10 シミュレーション結果

そこで、この影響を簡易に模擬するため、各IGBTのドレイン端子を図11に示すように、容量接地をして、解析を行った。その結果を図10(b)および図12に示す。6MHzに生じるノイズは実験と同様である。

図5(a)には、1MHz付近にもピークを持つノイズも観測されている、負荷から発生しているものと考えられるが、これについては、今後の検討とする。

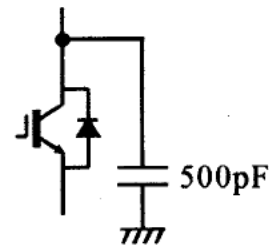


図11 制御回路を考慮した等価回路

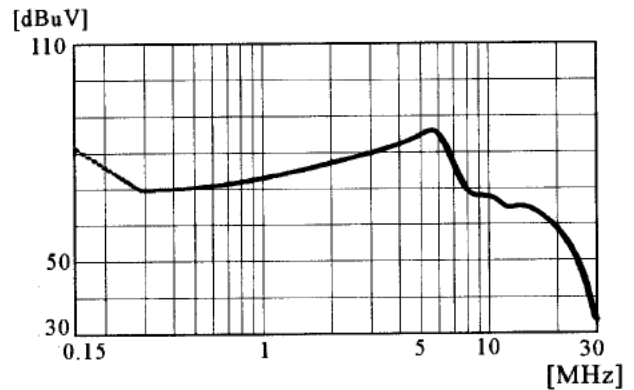


図12 シミュレーション結果

3. 3 ARCPインバータ回路のノイズ

図13は、ARCPインバータの主回路1アーム分である。このインバータは、主スイッチのスイッチングの際に、転流回路のスイッチS_rを動作させることにより、SSWを行うことができる。

図14(a)は、DからS+にスイッチングするときの各部の電圧・電流波形である。主スイッチの電圧波形は図14(a)V_{S+}のようになり、ZVSにより図8に比べ、高周波振動電圧を抑制できている。また、雑音端子電圧(図4 (b))からも、HSWインバータに生じていた、6MHz付近のノイズを20dB以上低減できていることがわかる。

しかし、逆に2MHzを中心にノイズが生じている。これは、HSWインバータでは生じていないことから、新たに付加した転流回路で発生し

ていると考えられる。

このとき、転流は S_{r+} を用いて行っており、転流回路はZCSでオン・オフを行うが、そのためターンオフ時に共振インダクタ L_r ($13\mu\text{H}$)の電圧がピークとなる。この電圧を初期値として L_r と S_{r-} , D_r の接合容量と共振が、図13中の太矢印に示す回路ループで生じている。

この現象をシミュレーションにより確認する。先と同様に、配線インピーダンス、IGBTの接合容量および容量接地を考慮した等価回路を用いて行った。このシミュレーション結果を図14(b)および図15に示す。共振周波数に差はあるもの、周波数特性は実験結果と同じである。

このことより、ARCPインバータでは、補助スイッチで消弧時に振動電圧が発生する。これが、制御回路を通して接地に伝播してノイズとなることが分かった。

4. まとめ

HSWインバータとARCPインバータの雑音端子電圧について、その発生源と発生周波数を実験と、シミュレーションにより解析を行った。また、シミュレーションは、簡単な等価回路を用いて行った。

その結果、ノイズの発生源について以下の知見を得た。

- (1) HSWインバータでは、IGBTの接合容量と回路のインダクタンス成分により振動電圧を生じ、制御回路の容量成分によりコモンモードノイズが生じる。
- (2) ARCPインバータは、SSWにより主スイッチのノイズは低減できるが、転流回路でノイズが発生する。

参考文献

- 1) Doncker: IAS Con. Proc. 1990, 1228~1235 (1990)
- 2) 清水敏久, 鳥羽章夫・木村軍司: 電学論D 118巻3号,385~392(平成10年)
- 3) 金宏信, 深沢勝美: SPC-97-64,65~70(1997)

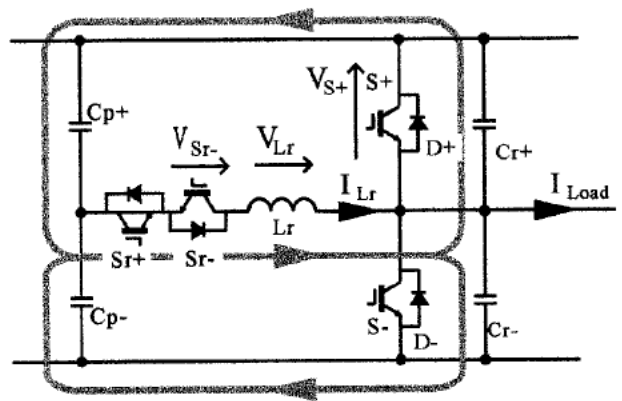
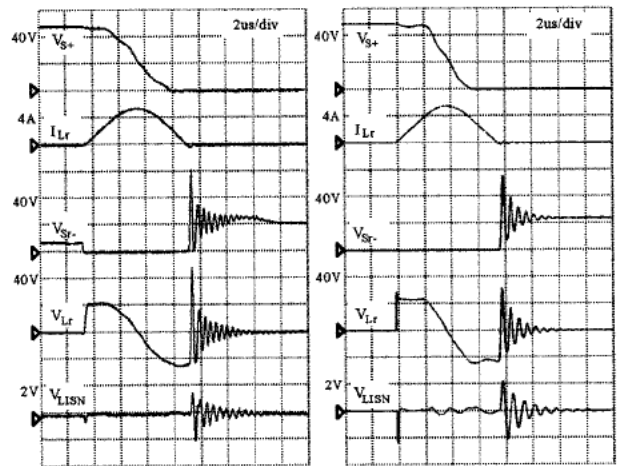


図13 ARCPインバータ主回路(1アーム)



(a) 実験結果 (b) シミュレーション

図14 各部の電圧・電流波形

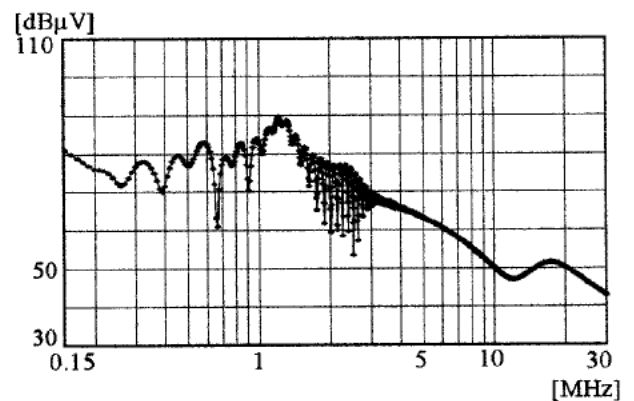


図15 雑音端子電圧(シミュレーション)