

# 3 レベル V 結線整流器・インバータシステムの雑音端子電圧に関する 実験検討

HUYNH DANG MINH\* 荒木 隆宏 佐藤 大介

野下 裕市 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Experimental Verification about the Conduction Noise of a Three-level V-connection Rectifier-inverter System

Huynh Dang Minh\*, Takahiro Araki, Daisuke Sato, Yuichi Noge, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

This paper discusses the conduction noise of a transformer-less three-level V-connection Back-to-Back(BTB) system. Comparing to conventional three-phase-connection BTB system, the V-connection BTB system has not only a higher efficiency, but also smaller size. In this paper, the conduction noise of three-phase-connection BTB system and V-connection BTB system are measured. As a result, the conduction noise of V-connection system is the same of that of three-phase-connection system. In addition, the leakage current of each system is also analyzed. Based on the leakage current analysis result, the magnitude of the leakage currents of V-connection BTB system is higher than that of three-phase-connection BTB system. It is because the impedance of the S-phase's ground line is lower than the Y capacitor's impedance.

キーワード：マルチレベル変換器，V 結線整流器・インバータ，雑音端子電圧，漏れ電流

(Keywords: Multilevel converter, V-connection rectifier-inverter, Conduction noise, Leakage current)

## 1. はじめに

近年，情報化社会の発展に伴い，常時インバータ給電方式を用いた無停電電源装置 (UPS) の需要が高まっている<sup>(1)</sup>。電源の安定性を確保することができ，瞬時停電によるデータ損失を回避することができるため，多くのサーバールームに採用されている。一般的に常時インバータ給電方式を用いた場合は，出力側に絶縁トランスが必要となる。しかし，絶縁トランスは装置重量の 4 割程度を占めるため，回路が大型化する<sup>(2)</sup>。また，トランスによって常時損失が発生するため，UPS の効率を低下させる<sup>(2)</sup>。また，システムの誤動作やデータ損失を回避するため，ノイズをさらに低減することが求められる。

これらの問題を解決するために，トランスレス 2 レベル V 結線整流器・インバータから構成される Back-to-Back(BTB) システムが提案されている<sup>(2)</sup>。本システムでは，共通相を接地することで，絶縁トランスを除去できる。従って，小型化および高効率期待できる。しかしながら，直流中間電圧は三相結線方式の 2 倍となるので，高耐圧のスイッチング素子が必要となる。

この問題に対し，3 レベル V 結線 BTB システムが提案されている<sup>(2)</sup>。この回路方式では 2 レベル方式と比較して素子の数が増加するが，マルチレベル回路では一般的にスイッ

チング素子に印加される電圧が直流中間電圧の  $1/(n-1)$  倍 ( $n$  はレベル数) になるため，耐圧の低い素子を使用できる。また，従来方式に対して効率は 7.9% 改善できることが確認されている<sup>(3)</sup>。さらに，V 結線方式では直流電位がスイッチングにより変動しないため，大地への浮遊容量に流れるコモンモード電流を低減できる可能性がある<sup>(2)</sup>。これにより，伝導ノイズを低減できると考えられる。なお，伝導ノイズは電源ラインを伝播する雑音端子電圧により評価され，電力変換器の雑音端子電圧の解析や評価は盛んに研究されている<sup>(4)~(10)</sup>。しかしながら，ほとんどの場合が三相結線方式の電力変換器を対象としており，V 結線方式の電力変換器に関する知見は得られていない。そのため，三相結線方式に対して，V 結線方式により低減できる雑音端子電圧の大きさの定量的な評価はなされていない。なお，シミュレーションによる雑音端子電圧の解析方法も提案されているが，実際に発生する雑音端子電圧との誤差が大きい<sup>(5)</sup>。

そこで，本論文では 3 レベル V 結線 BTB システムによる雑音端子電圧について，三相結線方式との比較検討を実験的に行い，雑音端子電圧の発生原因について実験結果から考察する。

本論文の構成は以下のようになっている。はじめに，3 レベル V 結線 BTB システムの回路構成を述べ，各システムにおける雑音端子電圧の測定結果を示す。次に，三相結線 BTB

システムと V 結線 BTB システムの雑音端子電圧を比較し、伝導ノイズの低減効果の評価を行う。最後に、雑音端子電圧の発生原因を解明するため、浮遊容量に流れる漏れ電流の高調波解析を行い、雑音端子電圧の発生と漏れ電流の関係性を述べる。

## 2. 回路構成

**(2・1) 主回路構成** 図 1(a)に 3 レベル三相結線 BTB システム、図 1(b)に 3 レベル V 結線 BTB システムの回路図を示す。なお、三相結線方式では正弦波変調を用いるため、出力電圧を同一とするために V 結線方式の直流電圧を 1.73 倍に設定する。したがって主回路に使用するスイッチング素子にも 2 倍近い耐圧が要求される。本論文においては V 結線 BTB システムを基準として素子を選定し、三相結線 BTB システムにも同様の素子を使用する。また、スイッチング速度は結線方式に依らず等しく設定する。

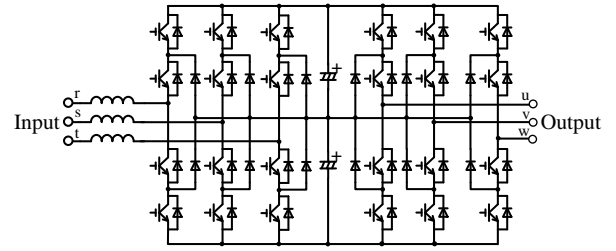
**(2・2) 制御方法** 図 2 に V 結線 BTB システムにおける、整流器の制御ブロック図を示す。整流器は直流中間電圧制御 (AVR) と入力電流制御 (ACR) により制御する。なお、入力力率を 1 とするため、ACR の指令値は入力電圧と同位相となるように演算している。また、インバータはオープンループで制御し、変調方式はユニポーラ変調を用いる。三相結線 BTB システムの場合、整流器部の制御系は V 結線 BTB システムと同様であるが、S 相の電流指令値は R 相と T 相の電流指令値から (1) 式によって導出する。

$$i_s^* = -(i_r^* + i_t^*) \dots\dots\dots (1)$$

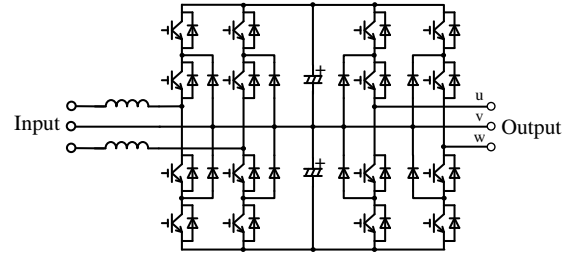
## 3. 雑音端子電圧の測定

**(3・1) 実験装置** 図 3 に雑音端子電圧を測定する際の三相結線 BTB システムを示す。今回は雑音端子電圧の発生原因を調査するため、RL 負荷と大地の間に浮遊容量を模擬した接地コンデンサ 1.5 nF を接続する。また、負荷側の浮遊容量や主回路のヒートシンクから流れる漏れ電流の経路として入力側に 20 nF の Y コンデンサを接続する。ここで、整流器とインバータに取り付けられたヒートシンクを主回路の筐体と仮定し、Y コンデンサの中性点はヒートシンクに接続する。

図 4 に V 結線 BTB システムを示す。図 4(a)では共通相を接地せず、図 4(b)では共通相を接地する。図 4(b)から、V 結線 BTB システムでは V 相の接地線がコモンモード電流の経路となる。しかし、図 3(a)に示すように、三相結線 BTB システムでは V 結線の接地線に相当する経路がない。各システムにおいて漏れ電流の発生経路を同一の条件として、雑音端子電圧を評価するため、三相結線の入力に Y コンデンサを挿入して、V 結線の接地線に相当する経路を作成する。なお、結線方式を変更する際は V 相をコンデンサ中性点に接続する配線を追加し、V 相のスイッチング素子は常にオフする。これによりスイッチング素子とヒートシンク間の



(a) Three-level three-phase-connection BTB system



(b) Three-level V-connection BTB system

Fig.1. Main circuit configuration

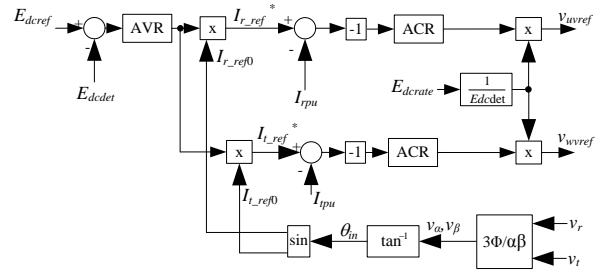


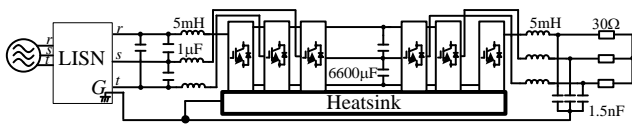
Fig.2. Control block diagram for three-level V-connection rectifier-inverter

浮遊容量が結線方式に依らず等しくなる。また、安全性を確保するため、三相結線と V 結線ともにヒートシンクを接地する。

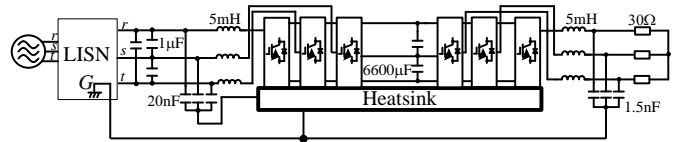
図 5 に雑音端子電圧を測定する際の装置配置を示す。図 5(a)では測定システムを含めた構成、図 5(b)では測定対象の V 結線 / 三相結線 BTB システムの回路部分を示す。なお、表 1 に実験条件を示す。雑音端子電圧の測定は、擬似電源回路網 (Line Impedance Stabilization Network, LISN) とスペクトラムアナライザ R3131A (アドバンテスト) を使用し、簡易シールドルーム内で測定する。ここで、LISN は系統インピーダンスを一定に保つとともに、スペクトラムアナライザへ電圧を出力する役割を持つ<sup>(4)</sup>。

### (3・2) BTB システムにおける交流—交流変換の動作

図 6(a)、図 6(b)にはそれぞれ雑音端子電圧測定時における、三相結線および V 結線 BTB システムの動作確認波形を示す。インバータの変調率は 0.9 としており、V 結線方式、三相結線方式ともに指令通りの出力電圧が得られていることを確認した。

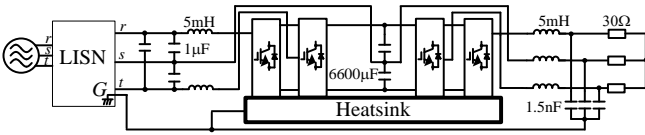


(a) Three-level three-phase connection BTB system, without Y-capacitor

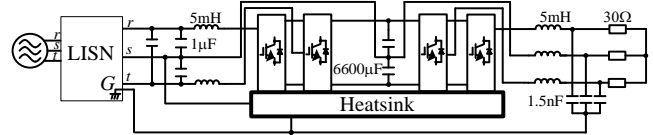


(b) Three-level three-phase connection BTB system, with Y-capacitor

Fig.3. Circuit diagram of a three-phase connection rectifier- inverter system for conduction noise measurement

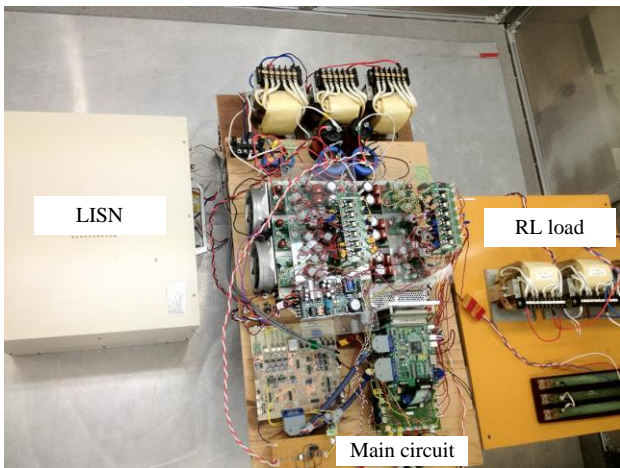


(a) Three-level V-connection BTB system (phase S is not grounded)

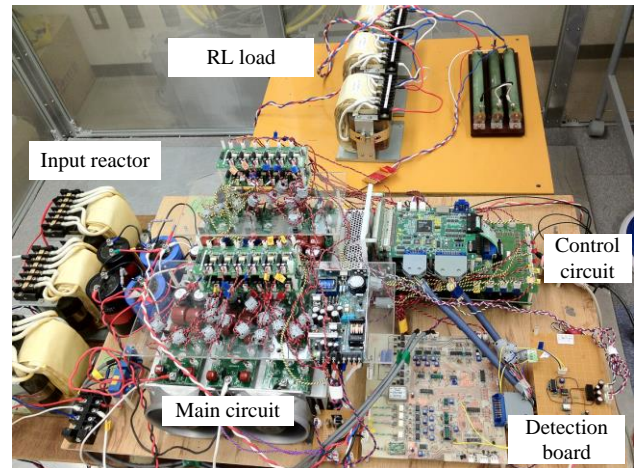


(b) Three-level V-connection BTB system (phase S is grounded)

Fig.4. Circuit diagram of a V-connection rectifier- inverter system for conduction noise measurement



(a) Main circuit with noise measurement system



(b) Experimental configuration of the main circuit

Fig.5. Experimental configuration

〈3・3〉 雑音端子電圧測定結果 図7に三相結線 BTB システムの雑音端子電圧測定結果を示す。なお、三相結線方式と V 結線方式ともに R 相の雑音端子電圧を評価する。図 7(a)と図 7(b)を比較すると、Y コンデンサを接続することで、300 kHz から 1 MHz の雑音端子電圧が低減されている。これは、連係リアクトルと Y コンデンサの LC フィルタの影響のためである。

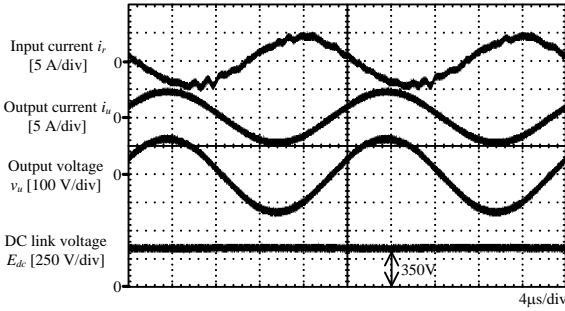
また、図 8 に V 結線 BTB システムの雑音端子電圧測定結果を示す。図 8(a)と図 8(b)を比較すると、S 相を接地することによって 1 MHz 以下の領域で雑音端子電圧が低減されている。一方、1.5 MHz では大きなピークが観測された。

次に三相結線 BTB システムと V 結線 BTB システムの雑音端子電圧を比較する。Y コンデンサや S 相接地線といった共通モード電流経路が存在しない図 7(a)と図 8(a)を比べると、周波数全領域において V 結線方式の雑音端子電圧は三相結線よりも最大 21.1 dB 高い。これは、直流中間電圧が三相結線 BTB システムより高く、スイッチングに伴う電位変動幅が大きいためである。

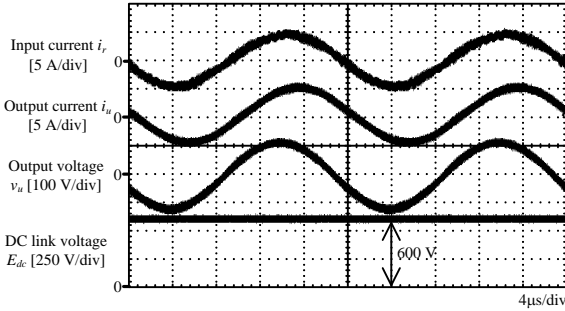
Table 1. Experimental conditions

	V-connection	Three-phase
Input AC Voltage (line - to-line) & phase current	200V , 3.5A	
DC-link voltage	600V	350V
Power supply frequency	50Hz	
Switching frequency	16kHz	
Load	RL load (30Ω, 5mH)	
IGBT module	SK150MLI066T (Semikron)	

一方で V 結線 BTB システムは S 相を共通相として接地することが可能である。S 相を接地した場合の図 8(b)と図 7(a)を比較すると、150 kHz から 1.5 MHz までの領域における、雑音端子電圧が低い。これは、S 相が接地されることにより対地電位変動が抑制され、さらにヒートシンクからの漏れ電流をバイパスさせる経路となるためである。しかし、2 MHz 以上の高周波領域の雑音端子電圧は、結線方式に依らず同等である。これは、周波数の上昇にともない、S 相接地線のインピーダンスが上昇し、共通モード電流が抑制されるためである。



(a) Three-phase connection BTB system



(b) V-connection BTB system

Fig.6. Operation waveform of the BTB system

最後に三相結線 BTB システムにコモンモード電流の経路として Y コンデンサを追加した場合の雑音端子電圧である図 7(b)と図 8(b)を比較する。結果より、V 結線 BTB システムの雑音端子電圧には 1.5 MHz と 2.1 MHz にピークが存在するものの、他の周波数においてはほぼ同等である。

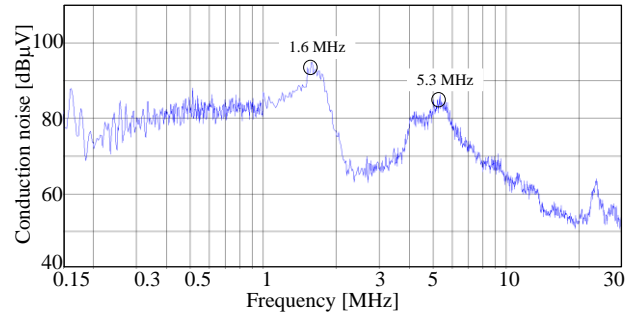
#### 4. 漏れ電流の比較による雑音端子電圧発生原因の検討

本節では三相結線 BTB システムおよび V 結線 BTB システムの雑音端子電圧発生原因を検討するため、漏れ電流の解析を行う。漏れ電流は電流プローブにより測定し、スペクトラムアナライザにより高調波解析を行う。

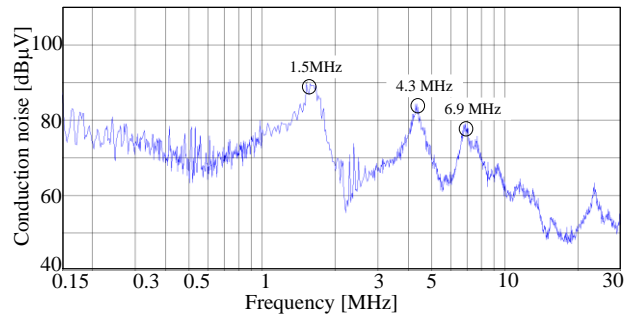
図 9 に三相結線 BTB システムにおける漏れ電流の観測点を示す。Y コンデンサに流れる漏れ電流は、コンデンサ中性点とヒートシンクの間で測定する。

図 10 に V 結線 BTB システムにおける漏れ電流観測点を示す。V 結線 BTB システムの場合は S 相接地線がコモンモード電流経路となる。

図 11 に三相結線 BTB システムの漏れ電流の高調波解析結果を示す。図 11(a)より、ヒートシンクからの漏れ電流  $i_{CM\_heatsink}$  と負荷の浮遊容量からの漏れ電流  $i_{CM\_load}$  は 1.6 MHz と 4.1 MHz にピークが存在する。図 7(a)の雑音端子電圧と比較すると、漏れ電流と雑音端子電圧のピークが存在する周波数が一致している。さらに、周波数に対する漏れ電流の傾向も雑音端子電圧と一致する。したがって、三相結線 BTB システムにおいて Y コンデンサを接続しない場合、雑音端子電圧の発生原因はヒートシンクおよび負荷の

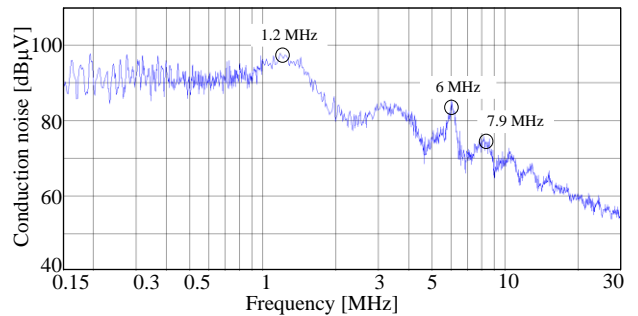


(a) Without Y-capacitor

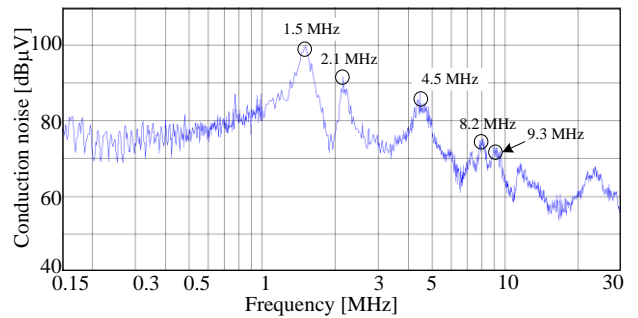


(b) With Y-capacitor

Fig.7. Conduction noise of the three-phase connection BTB system



(a) Phase S is not grounded



(b) Phase S is grounded

Fig.8. Conduction noise of a V-connection BTB system

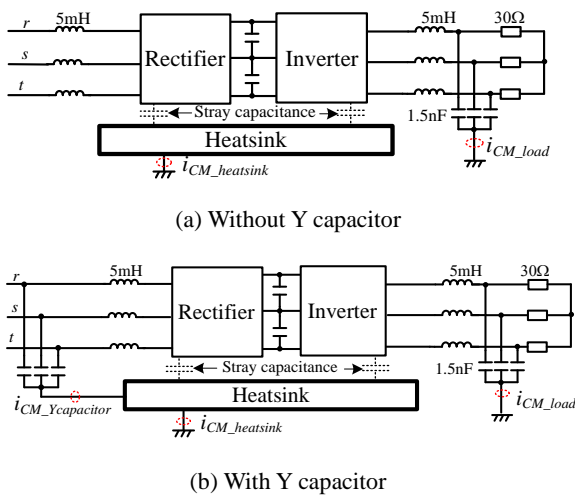


Fig.9. Measurement point of leakage currents of the three-phase connection BTB system

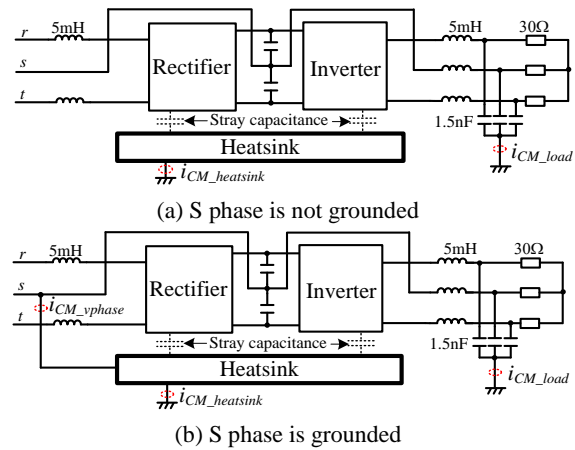


Fig.10. Measurement point of leakage currents of the V-connection BTB system

浮遊容量からの漏れ電流であることが分かる。  
 また、図 11(b)に Y コンデンサを接地した場合の漏れ電流の高調波解析結果を示す。ここで、 $i_{CM\_heatsink}$  : ヒートシンクからの漏れ電流、 $i_{CM\_load}$  : 負荷浮遊容量を模擬した接地コンデンサからの漏れ電流、 $i_{CM\_Ycapacitor}$  : Y コンデンサからの漏れ電流である。結果より、漏れ電流は 1.2 MHz、4.2 MHz、6.8 MHz にピークが存在する。また、図 7(b)の雑音端子電圧と比較して、ピークの存在する周波数が一致している。特に 6.8 MHz のピークは Y コンデンサを接続したために発生しており、Y コンデンサを流れる漏れ電流が原因であることがわかる。一方、150 kHz から 1 MHz の領域では、Y コンデンサにより漏れ電流がバイパスされており、雑音端子電圧も低減されている。  
 図 12 に V 結線 BTB システムの漏れ電流の高調波解析結果を示す。図 12(a)より、V 結線 BTB システムの漏れ電流は 1.6 MHz、4.3 MHz、6 MHz にピークが存在する。図 8(a)の雑音端子電圧と比較して、漏れ電流のピークが存在する周波数は雑音端子電圧とほぼ一致する。したがって、共通相を

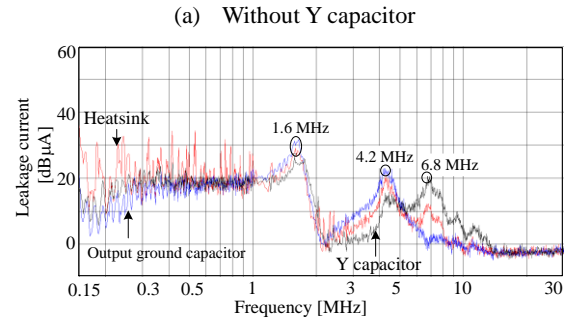
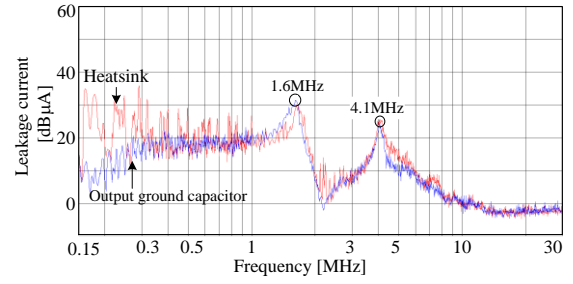


Fig.11. Harmonic analysis of leakage current of three-phase connection BTB system

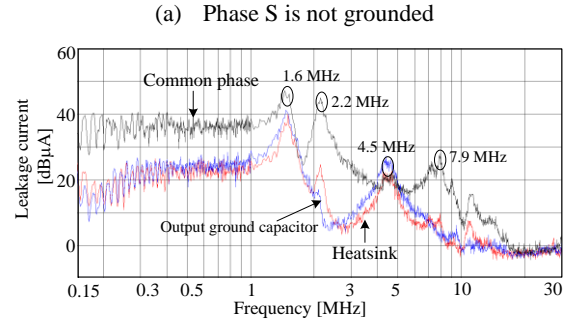
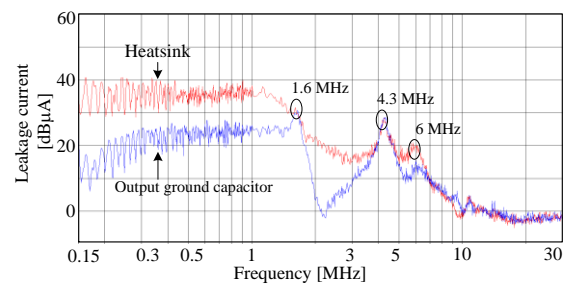


Fig.12. Harmonic analysis of leakage current of V-connection BTB system

接地しない場合、4.3 MHz 以下の周波数領域では、特にヒートシンクから流れる漏れ電流が雑音端子電圧に影響を及ぼしている。  
 また、図 12(b)より、1.6 MHz、2.2 MHz、4.5 MHz にピークが存在し、図 8(b)の雑音端子電圧と同様の傾向を示す。図 12(a)と図 12(b)を比較すると、S 相接地の有無に関わらず、負荷側の接地コンデンサを流れる漏れ電流は変化しない。一方、1 MHz 以下の領域において S 相を接地しない場合は

ヒートシンクからの漏れ電流が最も大きいものに対して、S相を接地した場合は接地線を通る漏れ電流が最も大きい。これはS相を接地したことによりヒートシンクから流れ出した漏れ電流がよりインピーダンスの低い接地線へと流れ込んだためである。そのためS相の接地により1MHz以下の領域における雑音端子電圧も低減されている。

次に三相結線方式とV結線方式の漏れ電流を比較する。コモンモード電流経路が存在しない図11(a)と図12(a)を比較すると、負荷側の接地コンデンサを通る漏れ電流は変化しない。しかし、ヒートシンクを通る漏れ電流は周波数全領域においてV結線方式の方が大きい。これは、直流中間電圧が三相結線方式より高く、スイッチングに伴う電位変動幅が大きいためである。

また、三相結線方式にYコンデンサを接続した図11(b)とV結線方式のS相を接地した図12(b)を比較すると、V結線方式のほうが流れる漏れ電流が大きい。一方で図7(b)と図8(b)より、雑音端子電圧に大きな違いはない。これはYコンデンサよりもS相接地線のインピーダンスが低く、より多くの漏れ電流がS相接地線にバイパスされるためである。

## 5. まとめ

本論文では、3レベル三相結線BTBシステムと3レベルV結線BTBシステムの雑音端子電圧の比較と考察を行った。実験結果より、三相結線方式の入力側にYコンデンサが無い場合、共通相を接地したV結線方式の雑音端子電圧は150kHzから1.5MHzまでの周波数領域において、最大18.8dB低いことが分かった。また、Yコンデンサを接続した三相結線方式と共通相を接地したV結線方式を比較した場合、V結線方式の方が漏れ電流は大きい、1.5MHzと2.2MHzのピークを除き、雑音端子電圧は同等であることが分かった。したがって、絶縁トランスが不要となる利点から、V結線BTBシステムは三相結線BTBシステムよりも小形化の見込みがある。

今後の課題として変調方式の改善によるV結線BTBシステムの雑音端子電圧低減およびEMCフィルタ体積を含めたシステム体積の評価が挙げられる。

## 文 献

- (1) J. G. Tracy and H. E. Pfitzer, "Achieving High Efficiency in a Double Conversion Transformerless UPS", IECON 2005, pp.942-945 (2005)
- (2) 佐藤明・佐藤伸二・中島洋一郎:「V結線方式と3レベルV結線方式電力変換器における三角波キャリア比較方式の検討」, SPC-10-93, IEA-10-20, MD10-25 (2010)
- (3) 佐藤明・中島洋一郎・伊東洋一:「3レベルV結線方式PWM整流器・インバータの運転特性」, 平成23年電気学会全国大会, 4-078 (2011)
- (4) 玉手道雄・鳥羽章夫・和田圭二・清水敏久:「電力変換装置を並列接続するシステムにおける雑音端子電圧低減に適したキャリア位相制御法」, 平成21年電気学会産業応用部門大会, 1-33 (2009)
- (5) H. Zhu, J.S. Lai, Y. Tang, A.R. Hefner and C. Chen: "Analysis of Conducted EMI Emissions from PWM Inverter Based on Empirical Models and Comparative Experiments", Power Electronics Specialists Conference 1999, Vol.2, pp. 861 - 867 (1999)
- (6) 小笠原悟司・張松・赤木泰文:「PWMインバータのコモンモード電圧を抑制するアクティブ補償回路の構成と特性」, 電気学会論文誌D, Vol.120, No.5, pp.658-665 (2000)
- (7) 小笠原悟司・藤田英明・赤木泰文:「電圧形PWMインバータが発生する高周波漏れ電流のモデリングと理論解析」, 電気学会論文誌D, Vol.115, No.1, pp.77-83 (1995)
- (8) H. Bishnoi, A.C. Baisden, P. Mattavelli and D. Boroyevich: "Analysis of EMI Terminal Modeling of Switched Power Converters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.27, No.9, pp.3924-3933 (2012)
- (9) S. Kaboli, J. Mahdavi, and A. Agah, "Application of Random PWM Technique for Reducing the Conducted Electromagnetic Emissions in Active Filters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.54, No.4, pp.2333-2343 (2007)
- (10) 平木英治・中岡睦雄:「最新の小容量高周波スイッチング半導体電力変換器におけるパワーエレクトロニクス」, 電気学会論文誌.D, Vol.125, No.11, pp. 955-963 (2006)