

機関番号：13801

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560262

研究課題名（和文） 次世代超高速スイッチング形電力変換器の  
新トポロジーと実装に関する研究研究課題名（英文） Study on Novel Topologies and Their Implementation of Next-Generation  
Ultra High-Speed Switching Power Converters

研究代表者

野口 敏彦 (NOGUCHI TOSHIHIKO)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：10237828

研究成果の概要（和文）：本研究では、SiC-MOSFETのような次世代超高速スイッチング素子を使用することを想定し、高  $dv/dt$  スwitching動作に対応できる電力変換器を開発するとともに、その周辺回路技術を確認した。その結果、全てのスイッチング素子が同電位で駆動される新規トポロジー提案し、ゲートドライブ回路におけるコモンモードノイズ電流を1/5に低減するマルチコアトランス絶縁電源を開発した。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on development of a power converter capable of high- $dv/dt$  switching operation and its peripheral circuit technology, assuming next-generation ultra high-speed switching devices such as SiC-MOSFETs. As a result, a novel topology that drives all switching devices on a common potential level was proposed, and a multi-core transformer based isolated power supply was developed, which reduces common mode noise current through the gate drive circuit down to 1/5.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究代表者の専門分野：パワーエレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：スイッチング，電力変換器，トポロジー

## 1. 研究開始当初の背景

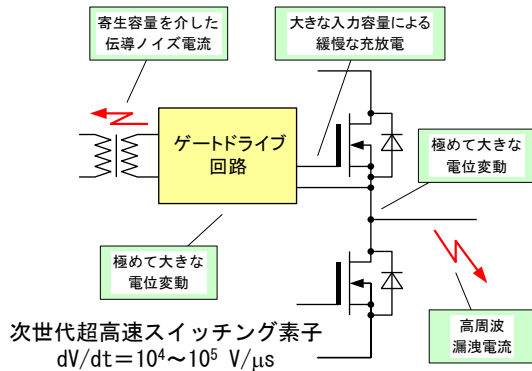
SiCを用いた次世代スイッチング素子は、超高速（超高周波）、超高耐圧、超高効率、超高温動作が可能であるため、将来、電力変換器が  $50 \text{ W/cm}^3$  以上のパワー密度を達成するために不可欠な要素であると言われている。特に超高速（超高周波）という利点を活かして、MHz級のインバータも実現できるため、真空管を採用せざるを得なかった装置のソリッドステート化や、絶縁送電に必要なトランスの小型軽量化など、従来の素子で

は不可能であった技術を実現することができる。しかし、超高速動作であるが故にスイッチング時の  $dv/dt$  は  $10^4 \sim 10^5 \text{ V}/\mu\text{s}$  にも達し、インバータ上下アーム間の電位変動や、浮遊容量を介した漏れ電流の問題が顕著になる。また、スイッチング素子を駆動するゲートドライブ回路についても、絶縁電源の寄生容量を通じて高  $dv/dt$  スwitching動作に起因する伝導ノイズ電流が流れ、誤動作の危険をはらんでいる。さらに、ゲートの静電容量を高速に充放電できるゲート駆動回路でなければ

ば、折角の次世代スイッチング素子の利点を十分引き出すことはできない。

現在、最も広く使われている電圧形インバータにおいて、上下アーム間の電位変動はNチャンネルのスイッチング素子が直列接続されているために生じる本質的なトポロジー上の問題である。このようなトポロジーであるが故に、上アームの素子を駆動するために絶縁型ゲートドライブ回路も必要となり、超高速スイッチング素子の場合には前述の問題が更に顕著となる。そこで、本研究では次の方針で従来技術の抜本的な問題解決を図る。

- (a) 従来とはまったく異なるトポロジーや動作原理に基づく電力変換器を創出する。
- (b) 絶縁電源の寄生容量を本質的に低減し、高速にゲートを駆動するゲートドライブ回路を開発する。



## 2. 研究の目的

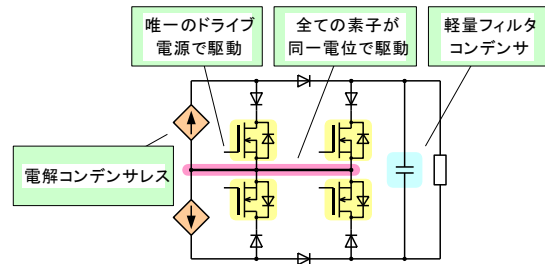
本研究では SiC-MOSFET に代表される次世代超高速スイッチング素子を適用した将来の電力変換器を検討対象とし、超高速スイッチング動作（高  $dv/dt$ 、高  $di/dt$ ）に伴う電位変動や伝導ノイズの問題を解決する技術を創出する。この目的を達成するため、次に掲げる2つの技術を確認し、試作機を用いてそれらの効果を実験的に検証する。

- (a) 全てのスイッチング素子が同一電位で駆動される新規トポロジーをもつ電力変換器を提案し、本質的に超高速スイッチング動作が問題とならない技術を確認する。さらに、発展的研究として新規トポロジーをもつ電力変換器のマルチレベル化技術も検討する。
- (b) 超高速スイッチング素子を駆動するためのゲートドライブ回路について、高  $dv/dt$  動作に伴い電源トランスの寄生容量を介して伝導するノイズ電流を低減する技術と、スイッチング素子のゲートを高速に充放電する技術を確認する。

## 3. 研究の方法

本研究では以下のような特色をもつ独創的な電力変換器を開発した。

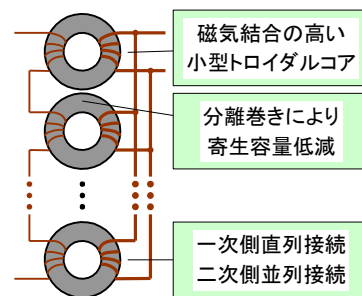
- (a) 全てのスイッチング素子が同一電位で駆動される新規トポロジーをもつ電力変換器  
本研究で創出した新規トポロジーの一例として3レベルインバータを下図に示し、その特長を列挙する。



- ・ 全てのスイッチング素子は同一電位で駆動されるため、素子の  $dv/dt$  がどれだけ大きくなろうとも電位変動問題は抜本的に解決される。このため、MHz 級の超高周波インバータでも容易に安定した動作を実現できる。
- ・ 全てのスイッチング素子は同一電位で駆動されるため、唯一のゲートドライブ電源で全ての素子を駆動することができる。したがって、複数の絶縁電源を必要とせず、電源の寄生容量を通じて流れる伝導ノイズの対策が容易となる。
- ・ 電流源形インバータであるため、負荷には重量の大きなリアクトルではなく小さなフィルムコンデンサを並列に接続するだけでよい。
- ・ 電解コンデンサを使用しないため装置の長寿命化を図ることができる。

- (b) 絶縁電源の寄生容量を低減する高速ゲートドライブ回路

本研究では高  $dv/dt$  スwitching動作に伴うコモンモードノイズ電流に注目し、ゲートドライブ回路の絶縁電源部における寄生容量の低減にも取り組んだ。一般に、ゲートドライブ回路の電源には DC/DC コンバータが採用され、一次二次間の絶縁のためスイッチングトランスが用いられる。このスイッチングトランスは磁気結合を良くするため重ね巻が採用されるが、このために一次二次間の寄生容量が増大する。結果的に高  $dv/dt$  スwitching動作に起因するコモンモードのイス電流がこの絶縁部を容易に貫通して問題



となる。これに対して、本研究では従来のように単一のコアではなく、マルチコア化して絶縁電源トランスを構成する。

- ・マルチコアに小型のトロイダルコアを利用することで磁気結合を高く保てる。
- ・一次と二次巻線を重ねず分離して巻くことで、両者間の寄生容量を大幅に低減できる。
- ・一次側を直列接続、二次側を並列接続することにより、入力の高電圧と出力の大電流に対応することができる。

本研究は平成20年度～平成22年度の3年間にわたり実施されたものであり、各年度における当初計画は以下のものであった。

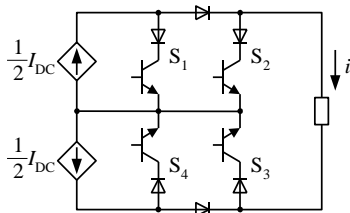
- ・2008年度 超高速スイッチング形電力変換器の新トポロジー検討、計算機シミュレーションによる基本動作の検証と予備実験
- ・2009年度 種々の具体的な回路構成とその実装方法の検討、実機システムの構築と回路動作、運転特性の検証評価
- ・2010年度 基本回路構成をもとにした発展的研究と適用範囲拡大に関する検討

#### 4. 研究成果

本研究では以下のような成果を得た。

- (1) 全てのスイッチング素子が同電位で駆動される新規トポロジーをもつ電力変換器を提案し、シミュレーションや実験を通じてその基本的な運転特性を確認した。また、同様の特長をもちながら出力波形をマルチレベル化する新規トポロジーを基本回路から派生的に導出した。

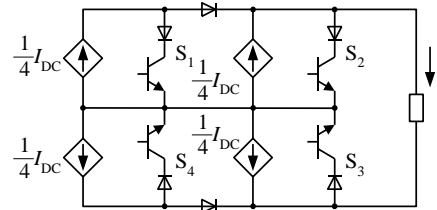
下図は本研究で創出された3レベル電流形インバータの基本回路とスイッチングモードである。この回路図からわかるように全てのスイッチング素子と電源は共通の枝路に接続されている。特に、各スイッチング素子の電流責務は $I_{DC}/2$ であり、素子の電流定格を軽減できるという特長をもっている。



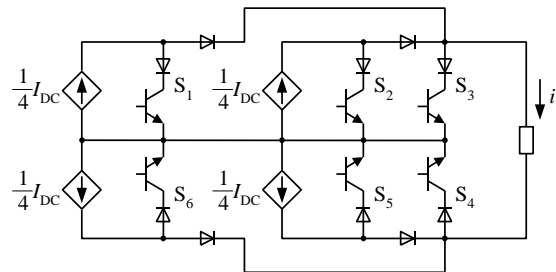
$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	状態
0	0	1	1	$i = +I_{DC}/2$
1	0	0	1	$i = 0$
1	1	0	0	$i = -I_{DC}/2$
他の組合せ				無効

更にこの回路をもとに同様の考え方で4レベル化した電流形インバータを下図に示す。この回路は2レベル電流形インバータを並列

多重化したような構成となっており、 $+I_{DC}/2$ 、 $+I_{DC}/4$ 、 $-I_{DC}/4$ 、 $-I_{DC}/2$ といった4レベルの電流を出力することができる。多重化の度合に関わらず一切絶縁電源を必要とせず、すべての直流電流源が同一電位に接続される。また、スイッチング素子についても同様であるため、複数の素子を駆動するために絶縁された駆動回路は不要である。



一方、前出の3レベル電流形インバータと2レベル電流形インバータを並列多重化すると下図のような5レベル電流形インバータが得られる。

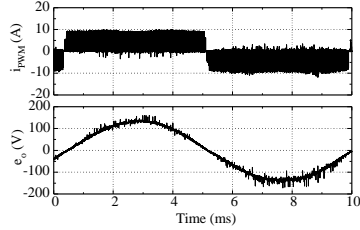


$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	状態
0	0	0	1	1	1	$i = +I_{DC}/2$
1	0	0	1	1	1	$i = +I_{DC}/4$
1	1	0	0	1	1	$i = 0$
1	1	1	0	0	1	$i = -I_{DC}/4$
1	1	1	0	0	0	$i = -I_{DC}/2$
他の組合せ						無効

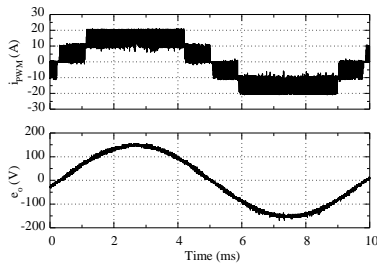
全てのスイッチング素子と直流電流源が共通枝路に接続され、このような構造をもつ新しいマルチレベル電流源インバータは、出力レベル数を更に増加させても、その共通枝路上に同一電位で並列多重化するだけで良いという利点がある。以上のように本研究で創出された新しいトポロジーを有する電力変換器は主回路の構成が、ちょうど魚の骨のように見えることから代表研究者らはこれをフィッシュボーン構造と命名した。

3レベル電流形インバータの出力電流とフィルタ後の負荷電圧波形を下図に示す。150Vの電圧源と300 $\mu$ Hのインダクタから構成された降圧チョップを制御電流源として用い、電源電流振幅を10A一定に保持した。一方、コンバータの出力電流指令値は100Hzの正弦波とし、100kHzのキャリアでパルス幅変調している。同図に示されているように出力電流は3レベルのPWM波形となっており、その振幅は電流源と一致している。また、負

荷には僅か  $5 \mu\text{F}$  のフィルタキャパシタが並列に接続されており、これによってリップルの少ない良好な正弦波電圧が得られていることがわかる。

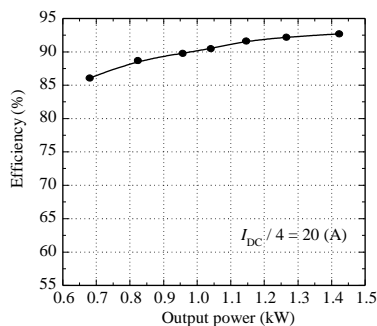


次に、5 レベル電流形インバータの動作波形を下図に示す。この実験では正負それぞれの電流源として上記と同様の降圧チョップパを採用しているが、 $200 \mu\text{H}$  の二巻線リアクトルを用いて更に分流し 4 個の平衡電流源 (いずれも  $10 \text{ A}$ ) を得ている。出力電流に関しては所望の 5 レベル PWM 波形となっており、中位のほか 0 レベルも良好に出力されている。負荷電圧については  $2 \mu\text{F}$  のフィルタキャパシタを並列接続しているだけであるが、総合歪率が  $1.52\%$  の正弦波が得られている。



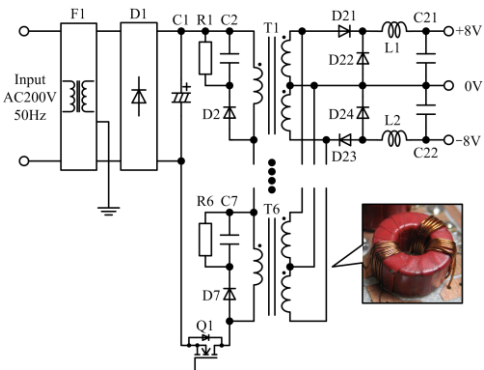
フィッシュボーン構造をもつ新しい電力変換器は、すべてのスイッチング素子と直流電流源が共通枝路に接続されるため、本質的にスイッチング素子間の電位変動を伴わない運転を行うことができる。したがって、以上のような実験においても数百 kHz から数 MHz のスイッチング周波数で電力変換器を容易にかつ安定に動作させることが可能である。

下図は上記 5 レベル電流形インバータの効率特性を示したものである。これより、 $1 \text{ kW}$  以上の負荷で  $90\%$  を超える効率を達成していることがわかる。

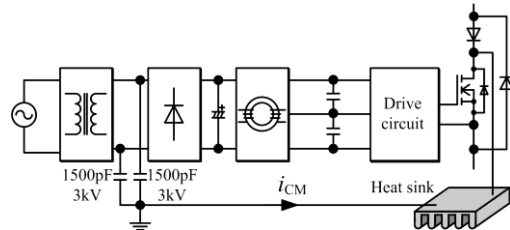


- (2) マルチコアトランスに基づく絶縁電源を新たに提案し、それを超高速スイッチング素子のゲートドライブ回路に適用した。その結果、絶縁部の寄生容量を大幅に低減し、高  $dv/dt$  スwitching動作に起因する伝導ノイズ電流を低減することができた。

下図は本研究で開発したマルチコアトランスに基づく絶縁電源である。高速・高周波スイッチング動作環境下においても、コモンモードノイズ電流の伝播を抑制し、十分な回路絶縁を確保することがゲート駆動回路に求められる。この要求を満たすために、a) ゲート駆動回路の絶縁電源にはトロイダルマルチコアトランスを用いて一次、二次間の磁氣的結合を高く維持しながら両巻線を分離巻きして寄生容量を極力低減、b) ゲート駆動回路の出力部近傍には周波数特性の良いセラミックコンデンサを多数配置して超高速スイッチング動作時のゲート電流ピーク値に対応、c) ゲート駆動回路と制御回路間の信号絶縁には光ファイバを用いて寄生容量を排除、d) 両面プリント基板の電流経路パターンを対称とするなどの方策を講じた。



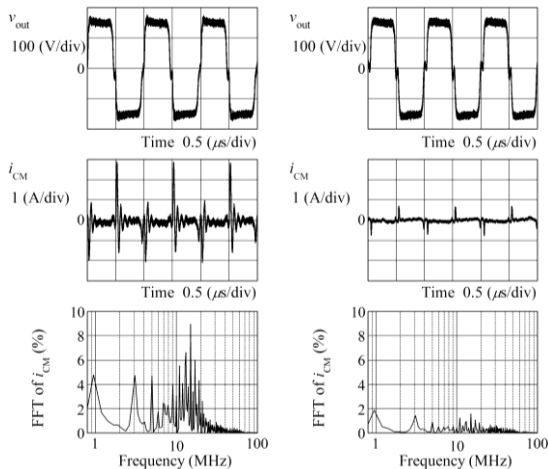
この絶縁電源回路を実装した MOSFET のゲートドライブ回路全体と高  $dv/dt$  スwitching動作に起因して流れるコモンモードノイズ電流の測定実験回路を下図に示す。



以上のゲート駆動回路を用いて、標準的な電圧源ハーフブリッジ高周波インバータを運転した。インバータの運転条件は、直流バス電圧  $280 \text{ V}$ 、スイッチング周波数  $1 \text{ MHz}$ 、デューティサイクル  $50\%$ 、デッドタイム  $70 \text{ ns}$ 、無誘導負荷  $37.5 \Omega$  である。インバータの各アームでは、主素子のドレインが熱伝導性

絶縁シートを介してヒートシンクに密着されており、ヒートシンクは筐体とともにアースに接地されている。そこで、ヒートシンクと筐体を同電位とし、ゲート駆動回路を含めて高周波成分に対してのみ閉ループを形成する回路を設けてコモンモードノイズ電流  $i_{CM}$  を観測した。

下図に商用電源トランスを用いたゲート駆動回路の出力電圧  $v_{out}$ 、下アームについて観測したコモンモードノイズ電流  $i_{CM}$  の波形、 $i_{CM}$  の FFT 解析結果を示す。FFT 解析結果は 1 MHz の基本波電流振幅で規格化したものである。 $i_{CM}$  は上アーム、下アームのターンオン時にピーク値を示しており、そのピーク値は約 2.9 A である。FFT 解析結果から、15 MHz の周波数成分を最大振幅として、それ以外に 11 MHz, 13 MHz, 17 MHz の高周波成分がそれぞれ 5.53 %, 5.71 %, 6.02 % 含まれていることがわかる。一方、トロイダルマルチコアトランスを用いたゲート駆動回路の出力電圧  $v_{out}$ 、下アームについて観測したコモンモードノイズ電流  $i_{CM}$ 、 $i_{CM}$  の FFT 解析結果を示す。 $i_{CM}$  のピーク値は 0.7 A と商用電源トランスの 1/4 以下に低減されており、FFT 解析結果から 3 MHz, 11 MHz, 15 MHz の高周波成分が観測されるが、それぞれ 1.44 %, 1.26 %, 1.59 % に留まることがわかる。



商用電源トランス      マルチコアトランス

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Suroso, and Toshihiko Noguchi, “A New Three-Level Current-Source PWM Inverter and Its Application for Grid Connected Power Conditioner,” *Elsevier B. V. Energy Conversion and Management*, 査読有, vol. 51, no.7, 2010, p.p.1491-1499
- ② Suroso, and Toshihiko Noguchi, “Three-Level Current-Source PWM Inverter with No Isolated Switching Devices

for Photovoltaic Conditioner,” *IEE-J Transactions on Industry Applications*, 査読有, vol. 129-D, no. 5, 2009, p.p. 505-510

- ③ 野口季彦 (敏彦)・矢島哲志・小松宏禎, 「次世代超高速スイッチング素子ゲート駆動回路の開発」電気学会論文誌, 査読有, vol. 129-D, no. 5, 2009, p.p. 46-52 [学会発表] (計 6 件)

- ① Suroso, and Toshihiko Noguchi, “New H-Bridge Multilevel Current-Source PWM Inverter with Reduced Switching Device Count,” *IEEJ International Power Electronics Conference 2010-Sapporo (IPEC2010-Sapporo)*, 査読有, 2010

- ② Toshihiko Noguchi, and Suroso, “Review of Novel Multilevel Current-Source Inverters with H-Bridge and Common-Emitter Based Topologies,” *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2010)*, 査読有, 2010

- ③ Suroso, and Toshihiko Noguchi, “New Generalized Multilevel Current-Source PWM Inverter with No-Isolated Switching Devices,” *IEEE The Eighth International Conference on Power Electronics and Drive System (PEDS2009)*, 査読有, 2009

- ④ Toshihiko Noguchi, and Suroso, “New Topologies of Multi-Level Power Converters for Use of Next-Generation Ultra High-Speed Switching Devices,” *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2009)*, 査読有, 2009

- ⑤ Suroso, and Toshihiko Noguchi, “Three-Level Current-Source PWM Inverter with No Isolated Switching Devices for Photovoltaic Conditioner,” *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, 査読有, 2008

- ⑥ Suroso, and Toshihiko Noguchi, “Novel Single Phase Grid Connected Current-source PWM Inverter with Harmonic Suppression,” *The Second IEEE International Power and Energy Conference (PECon 2008)*, 査読有, 2008

[その他]

ホームページ等

<http://pelab.nagaokaut.ac.jp/omomlab/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

野口敏彦 (NOGUCHI TOSHIHIKO)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：10237828

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし