

非接触給電を応用した高圧インバータ向け ゲート駆動用絶縁システムの動作検証

日下 佳祐[†] 加藤 尚和[†] 折川 幸司[†] 伊東 淳一[†] 森田 一徳[‡] 近藤 猛[‡]

[†] 長岡技術科学大学 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1

[‡] 株式会社明電舎 研究開発本部 〒410-8588 静岡県沼津市東間門字上中溝 515 番地

E-mail: [†] {kusaka@stn, katom@stn, orikawa@vos, itoh@vos}@nagaokaut.ac.jp

[‡] {morita-k, kondou-tak}@mb.meidensha.co.jp

あらまし 本論文では三相高圧インバータのゲート駆動回路へ電力を供給する絶縁システムを提案する。本システムは、プリント基板上に構成した伝送コイルを用いて伝送距離 50 mm の電力伝送を行う。さらに、複数台非接触給電を応用することで 1 枚の送電側基板から 6 枚の受電側基板に同時に電力供給が可能である。これにより、従来のトランスを用いたシステムと比較して低コスト化が可能である。本論文では特に、提案システムの筐体が効率に与える影響について検討を行うため、アルミニウム製とアクリル製の二種類の筐体を作成し、効率の比較を行なった。その結果、筐体をアルミニウム製からアクリル製へ変えることで最高効率を 29.4% から 46.9% に改善できることを明らかにした。また、提案システムを三相インバータのゲート駆動用絶縁システムとして適用し、実際に三相インバータを駆動可能であることを実験により確認した。

キーワード 非接触給電, 絶縁, ゲート駆動回路, 高圧インバータ

Experimental Verification of the Isolation System with Wireless Power Transfer for Multiple Gate Driver Supplies of a Medium Voltage Inverter

Keisuke KUSAKA[†] Masakazu KATO[†] Koji ORIKAWA[‡] Jun-ichi ITOH[‡]

Kazunori MORITA[‡] and Takeshi KONDO[‡]

[†] Nagaoka University of Technology 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188 Japan

[‡] R&D Group, Meidensha Corporation 515 Higashimakado Nakamizo, Numazu, Shizuoka, 410-8588 Japan

E-mail: [†] {kusaka@stn, katom@stn, orikawa@vos, itoh@vos}@nagaokaut.ac.jp,

[‡] {morita-k, kondou-tak}@mb.meidensha.co.jp

Abstract An isolation system for gate drivers of a three-phase medium-voltage inverter is proposed in this paper. The power consumption in gate drivers are supplied beyond an air-gap of 50 mm from the one transmitting board to the six receiving boards using transmission coils on the printed circuit boards. It contributes a cost reduction of an isolation system. In this paper, the proposed system is experimentally demonstrated. In order to evaluate the effect of the materials of the chassis, especially, two types of the chassis made from aluminum and acrylic are tested. As a result, the maximum efficiency is improved from 29.4% to 46.9% by changing the materials from aluminum to acrylic.

Moreover, a three-phase inverter is operated with the proposed isolation system in order to clarify the utility of the system.

Keyword Wireless Power Transfer, Isolation, Gate Driver, Medium-voltage Inverter

1. はじめに

近年、産業用モータの駆動システムにおいて、高圧マルチレベルインバータの適用が検討されている[1-2]。産業用モータドライブシステムの入出力電圧は高圧化が進んでおり、現在では 3.3 kV や 6.6 kV 系が多く採用されている[3]。これらの高圧インバータに使

用されている IGBT 等のスイッチングデバイスを駆動するため、ゲート駆動回路に電力を供給する絶縁電源が必要となる。絶縁規格の 1 つである、IEC (International Electrotechnical Commission) の規格を満足するためには、インバータの入出力電圧が 6.6 kV、使用環境の汚染度 2、絶縁材料グループ III の場合にお

いて、空間距離で 14 mm, 沿面距離で 81 mm の絶縁距離を確保する必要がある[4]. 従来, この規格を満足するため, トランスを用いた絶縁型 DC/DC コンバータが一般的に使用されてきた. しかしながら, これらのトランスは特殊形状であるため, 一般に特注品として製造されており高コストである.

また, 近年損失を低減する目的で Silicon Carbide (SiC) MOSFET を高圧インバータに適用することが検討されている. SiC-MOSFET を用いた場合, 高速スイッチングに伴うコモンモード電流が増大し, 制御回路の誤動作を招く恐れがある. コモンモード電流を抑制するためには, 絶縁部の 1 次側と 2 次側間の寄生容量を低減する必要があるが, それに伴うコアの大型化及び重量化が避けられない[5].

上記の問題を解決するため, マイクロ波技術を用いた集積回路に寄る絶縁システムが提案されている[6-7].

本方式はサファイア基板の表面から裏面にマイクロ波を用いて電力伝送を行う点に特徴があり, サファイア自体の耐圧により絶縁を確保する. しかしながら, 高圧インバータに適用するためには, 絶縁距離が不足する. 一方, J. W. Kolar らが磁気結合を用いた絶縁システムを提案している[8]. 本方式では, プリント基板上に構成したコアレストランスを用いて電力伝送及び絶縁を確保する. これにより, 従来のコアを用いたトランスと比較して大幅な低コスト化が実現可能である. しかしながら, 1 つのゲート駆動回路につき 1 台の絶縁システムが必要となるため, 低コスト化が十分でない.

本論文では, 複数台非接触給電を応用したゲート駆動回路の電力供給用絶縁システムを開発し, その有用性を実験により確認したので報告する. 提案システムは, 1 枚の送電側基板から 6 枚の受電側基板へ磁気結合を用いて電力を供給する. これらの基板間は 50 mm のエアギャップを介して配置されており, このエアギャップが絶縁距離となる. 本システムは 7 枚のプリント基板で 6 台のゲート駆動回路へ電力を供給できるため, 大幅な低コスト化が可能である. 本論文では提案システムの動作検証と, システムの筐体が動作に与える影響について実験的に評価を行なったので報告する. さらに, 実際に提案システムを適用したインバータによりモータを駆動可能であることを明らかにした.

2. 提案する絶縁システム

2.1. 絶縁システムの構成

図 1 に提案するゲート駆動回路用絶縁システムのコンセプト図を示す. 本システムでは, 送電側基板上に実装した送電コイルと, 6 枚の受電側基板間に実装し

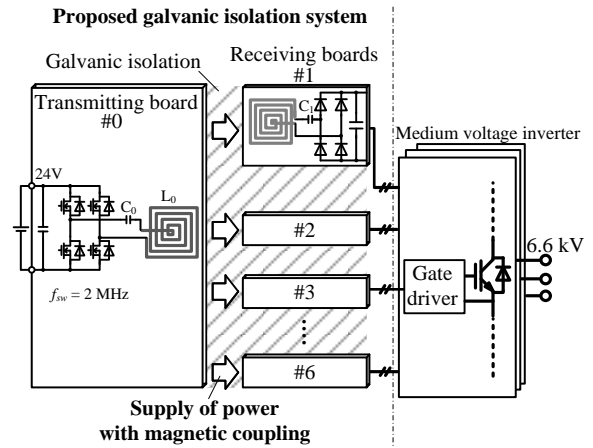


Fig. 1. Concept of the proposed isolation system for gate driver supplies.

た受電コイル間の磁気結合を利用して電力を伝送する.

図 2 に送電側基板の外形図を示す. 送電側基板には, 高圧インバータの補機用電源である 24 V を入力として動作する方形波インバータと, 送電側直列共振コンデンサ C_0 , 自己インダクタンス L_0 の送電コイルを実装する. 送電側直列共振コンデンサは, (1)に示す通り, インバータの出力周波数において自己インダクタンス L_0 と共振するよう設計する.

$$C_0 = \frac{1}{\omega^2 L_0} \dots\dots\dots (1)$$

図 3 に受電側基板の外形図を示す. 受電側基板には, 自己インダクタンス L_{1-6} の受電コイルと受電側直列共振コンデンサ C_{1-6} , ダイオードブリッジ整流器を実装する. 送電側と同様に, 自己インダクタンス L_{1-6} と共振するよう, (2)式に従って受電側直列共振コンデンサを設計する. 従って, 本システムは 1 次側直列-2 次側直列共振コンデンサ方式による複数台非接触給電と等価である[9].

$$C_{1-6} = \frac{1}{\omega^2 L_{1-6}} \dots\dots\dots (2)$$

図 4 に基板のシステムの概略図を示す. 受電側基板は, 送電側基板の上下を挟むよう 50 mm のエアギャップを介して計 6 枚配置する. 本構成を取ることにより, 特注のトランスを用いることなく 7 枚のプリント基板で 6 台のゲート駆動回路に電力を供給するため, 絶縁システムの低コスト化が可能となる.

2.2. 等価回路

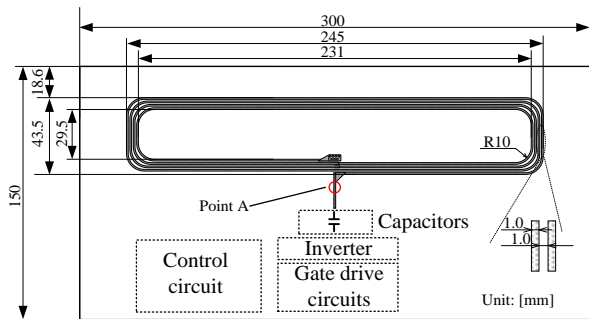
図 5 に提案システムの等価回路を示す. 提案システムの等価回路は, トランスの等価回路のモデルを拡張子, 励磁インダクタンス L_{m1-6} を送電側に直列に接続したモデルで表される[10]. なお, プリント基板上に平面コイルを構成しているため, 伝送コイルの巻線の一部が誘起電圧の発生に寄与しない. これにより, 巻数

比により決定される受電側に誘起される電圧と、実際に受電側に誘起される電圧が異なる。そこで、等価回路上の理想トランスの巻数比に補正係数 α_{1-6} を乗算することで、提案システムの特性を模擬する必要がある[10].

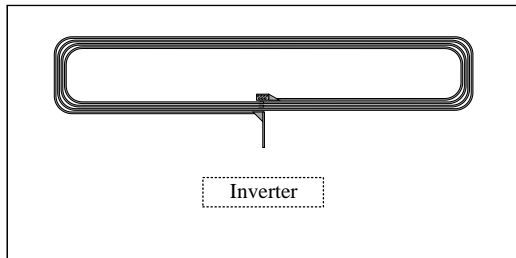
3. 実機検証

3.1. 絶縁システム単体の動作試験

図6に試作した実験システムの外観図を示す。本節では、筐体が絶縁システムに与える影響を評価するため、(a)アルミニウム製の筐体、(b)アクリル製の筐体の2種類を作成し、両者を用いて試験を行なった。それぞれの筐体の寸法は同一である。それぞれ、送電側基

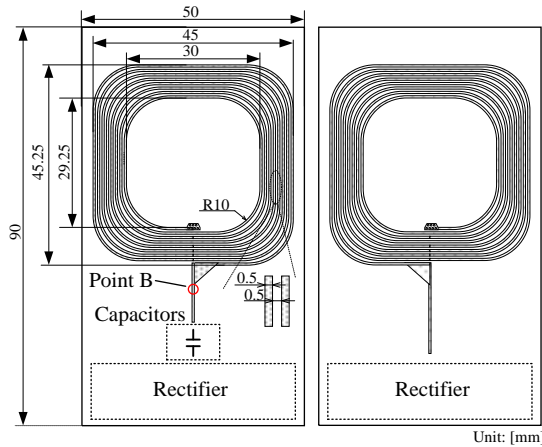


(a) Top layer.



(b) Bottom layer.

Fig. 2. Schematics of the transmitting board. Both of the figures are top view.



(a) Top layer. (b) Bottom layer.

Fig. 3. Schematics of the receiving boards. Both of the figures are top view.

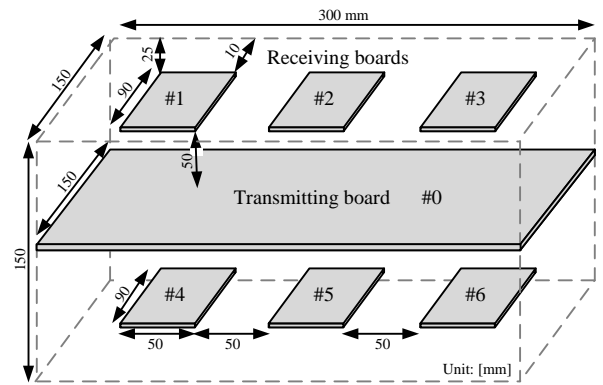


Fig. 4. Placement of relationship between the transmitting board and the receiving boards. Each board is placed across an air-gap of 50 mm.

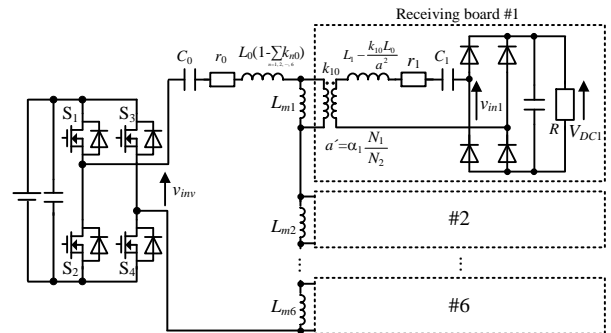
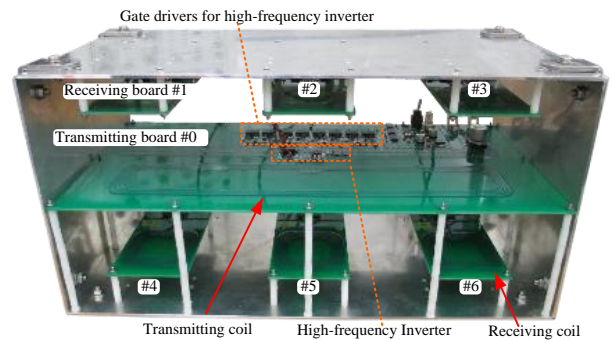
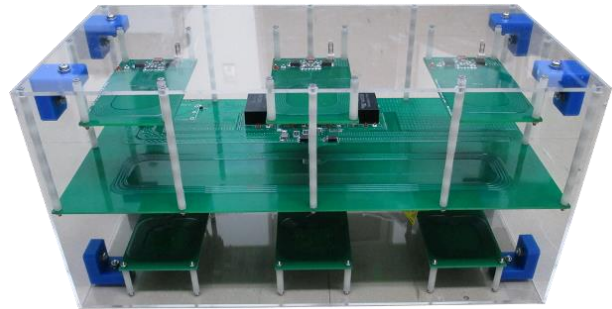


Fig. 5. Equivalent circuit of the proposed isolation system.



(a) Chassis made from aluminum.



(b) Chassis made from acrylic.

Fig. 6 Photographs of the prototypes with two types of chassis.

板と受電側基板は、図 4 に示した通り配置する。

表 1 に実験システムの仕様を示す。ただし、結合係数が極めて低く、精度よく測定することが困難であるため、結合係数は 3 次元の電磁界解析により導出した値である。他のパラメータは実測値である。

なお、送電側及び受電側の共振コンデンサは両者とも積層セラミックコンデンサとし、送電側は 14 並列、受電側は 9 個並列接続して構成する。

図 7 に負荷として 38 Ω の抵抗を接続した場合の絶縁システムの動作波形を示す。なお、本節ではゲート駆動回路の代わりとして抵抗を直接接続し、試験を行なった。また、図 6(b) に示したアクリル管体を用いた。実験波形より、正常に受電側基板 #1 の出力として直流電圧が得られることを確認した。同様に、他の受電側基板 #2-6 でも直流出力が得られることを確認しているが、紙面の都合により省略する。

図 8、図 9 に負荷抵抗値を増加させた場合の各整流器の出力電圧及び出力電力特性を示す。負荷抵抗の増加に伴い、整流器出力電圧は徐々に増加する。ただし、受電側基板の配置場所の違いにより、出力電圧にばらつきが生じる。特に、中央に配置される受電側基板 #2 と #5 は、他の受電側基板と比較して結合係数が約 2 倍大きい。これにより、受電側基板 #2 と #5 には他よりも高い電圧が誘起されることとなる。これに伴い、図 9 に示す通り、出力電力も基板によってばらつきが生じることとなる。しかしながら、各基板においてゲート駆動に十分な電力を供給できているため、回路動作には影響しない。

3.2. 管体が絶縁システムの特性に与える影響

図 10 に提案システムの効率特性を示す。管体が効率特性に与える影響を調査するため、二種類の管体に

ついて試験を行なった。なお、ここで効率は(3)式で定義され、直流入力電力と、各基板の直流出力電力の和の比率である。

$$\eta = \frac{\sum_{n=1,2,\dots,6} P_{out}(n)}{P_{in}} \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

実験結果より、アルミニウム製の管体を用いた場合には最高効率は 29.4% に留まる。一方、管体をアルミニウム製からアクリル製に変更した場合、伝送効率を

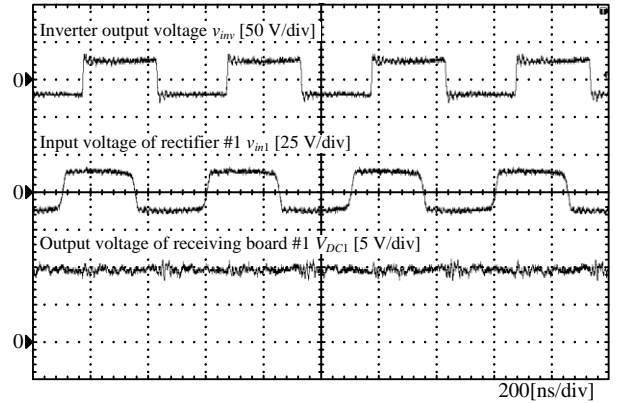


Fig. 7. Operation waveforms of the prototype with resistance loads of 38 Ω.

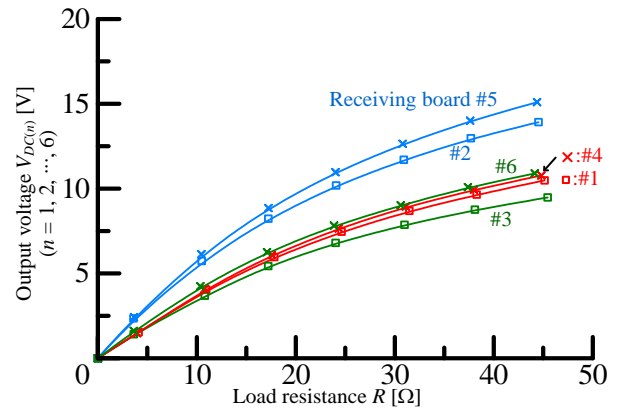


Fig. 8. Output voltage characteristics of the prototype.

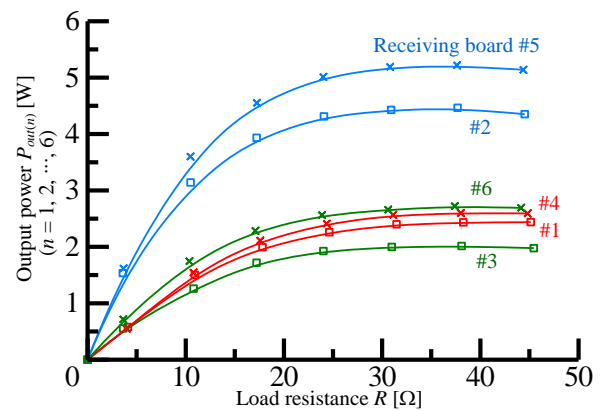


Fig. 9. Output power characteristics of the prototype.

Table. I. Specifications of the prototype.

Input voltage (DC)		V_{DC}	24 V
Switching frequency		f_{sw}	2.00 MHz
Self-inductances	Transmitting coil	L_0	20.3 μH
	Receiving coils	L_{1-6}	14.8 μH
Equivalent series resistances	Transmitting coil	R_0	790 mΩ
	Receiving coils	R_{1-6}	690 mΩ
capacitances	Transmitting board #0	C_0	310 pF
	Receiving boards #1-6	C_{1-6}	430 pF
Coupling coefficients (between the receiving coils and transmitting coil)	Receiving board #1	k_{01}	0.017
	Receiving board #2	k_{02}	0.025
	Receiving board #3	k_{03}	0.018
	Receiving board #4	k_{04}	0.017
	Receiving board #5	k_{05}	0.025
	Receiving board #6	k_{06}	0.017

46.9%まで改善できることが明らかになった。これは、伝送コイルにより生じる交番磁束がアルミニウムに鎖交し、渦電流が生じることが原因である。本実験から、提案システムには絶縁体製の筐体を用いることが効率の観点から望ましいことを実験的に明らかにした。そのため、以降の試験はアクリル製筐体を用いる。

3.3. 連続運転時の温度試験

提案システムの連続運転時の温度上昇試験を行った。

図 11 に熱電対にて測定した連続運転時の伝送コイルの温度測定結果を示す。なお、本システムは自然空冷とし、実験時の室温は 22°C である。測定点は図 2 及び図 3 内に示した点 A, B の 2 点と、MOSFET S_1 のパッケージの 3 点とし、負荷は $R = 18 \Omega$ とした。時間の経過とともに、各測定点の温度は徐々に上昇し約 30 分で飽和する。飽和時の温度上昇 ΔT はそれぞれ送電側コイルが 56°C 、受電側コイルが 23°C 、MOSFET のパッケージ温度が 59°C である。実験結果より温度上昇が設計温度内となっており、室温 22°C では自然空冷にて連続運転が可能であることを確認した。しかしながら、プリント基板は約 80°C にて基板の変色を起こすため、室温が 22°C 以上の場合、環境温度に応じて冷却が必要となる。

3.4. 三相インバータの駆動試験

提案システムの有用性を確認するため、実際に三相インバータの絶縁電源として提案システムを適用し、動作検証を行なった。本来、本提案システムは高圧の 5 レベルインバータへの適用を想定したものであるが、本検証では簡単のため入力電圧 200 V の 2 レベルインバータを用いて検証を行う。

図 12 に試験機器の構成を示す。三相インバータの直流中間電圧 283 V 、キャリア周波数 10 kHz にて三相インバータを駆動する。ここで、IGBT のゲートエミッタ間電圧は $\pm 15 \text{ V}$ とするため、ゲート駆動回路内において、絶縁システムの出力電圧を $\pm 15 \text{ V}$ にレギュレートする。しかしながら、図 8 より明らかな通り、負荷が開放に近づくに連れて絶縁システムの出力電圧が上昇する。これにより、ゲート駆動回路における消費電力が小さくなった場合、ゲート駆動回路内の DC-DC コンバータの定格入力電圧を超過するため、DC-DC コンバータの破損をまねく。例えば、適用対象のインバータ側において過電流もしくは過電圧によりゲートを遮断した場合や、変調方式によってゲートオフ期間が連続して発生するような場合が該当する。そこで、DC-DC コンバータを保護するため DC-DC コンバータの入力に並列に抵抗 28Ω を接続し、ゲート遮断時にも常に一定の電力が抵抗において消費されるようにする。本抵抗は、ゲート駆動回路において常に一定以上の消

費電力が発生する場合には不要である。

本試験では、ゲートエミッタ間電圧 $+15 \text{ V}$ における全ゲート電荷量 Q_g が 200 nC の IGBT ($V_{CES} = 600 \text{ V}$, $I_C = 50 \text{ A}$) をキャリア周波数 10 kHz にて駆動した。したがって、スイッチングに伴って消費される電力は(4)式より 120 mW となる。これは実際の高圧インバータで使

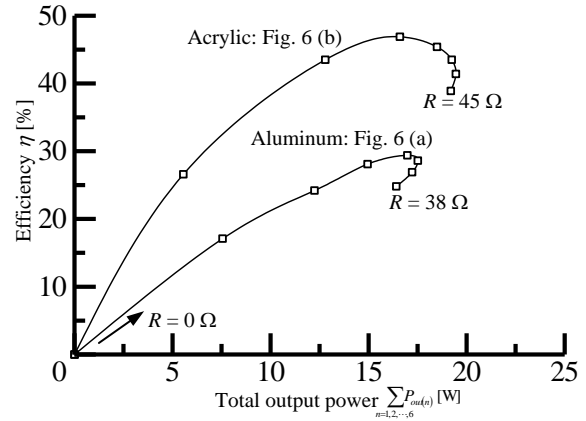


Fig. 10. Comparison on the efficiency between the chassis made from acrylic and chassis made from aluminum.

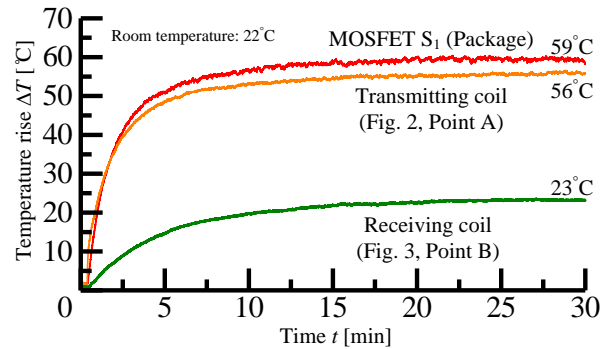


Fig. 11. Temperature rise with continuous operation of the proposed isolation system.

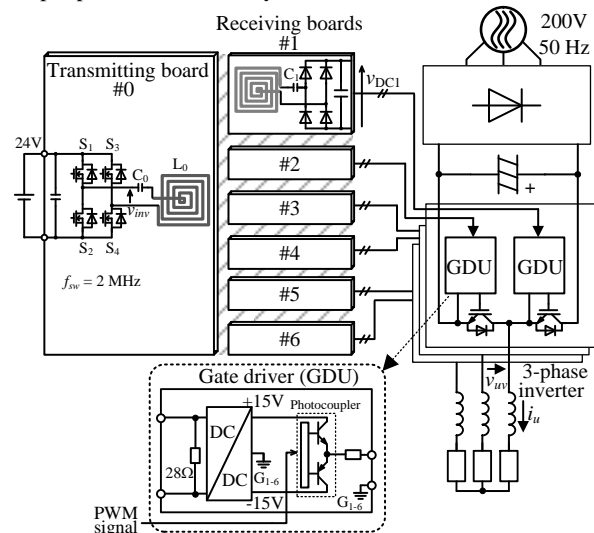


Fig. 12. System configurations for the experiments with three-phase inverter.

用を想定している $V_{CES} = 1700V$, $I_C = 150 A$, $Q_g = 1000$ nC の IGBT をキャリア周波数 2 kHz で駆動した場合の消費電力と等しい。

$$P_G = f_c \left(| +Q_g | + | -Q_g | \right) \left(| +V_{GE} | + | -V_{GE} | \right) \dots\dots\dots (4)$$

図 13 に三相インバータ駆動時の動作波形を示す。図 13(a)が三相インバータの出力電圧及び電流波形、図 13(b)は(a)の波形の拡大図であり、絶縁システムの高周波インバータの出力電圧及び、受電側基板#1の入力電圧である。実験波形より、正常にインバータ出力電流が得られることから、提案システムによりゲート駆動回路へ電力が供給されていることを確認した。

4. まとめ

本論文では、高圧インバータのゲート駆動回路用絶縁システムを提案した。提案システムはプリント基板のみを用いて絶縁を確保しつつ電力供給可能であるため、従来のトランスを用いた方式と比較して低コスト化が可能である。本論文では試作機を作成し、その動作検証を行ない、正常に電力供給が可能であることを確認した。また、筐体が効率特性に与える影響について実験的に検証を行い、アクリル製筐体を用いることで、アルミニウム製筐体を用いる場合と比較して効率を 17.5 ポイント改善可能であることを確認した。また、試作機を三相インバータのゲート駆動回路に適用し、三相インバータの駆動が可能であることを確認した。

以上より、提案する絶縁システムの有用性を確認した。

文 献

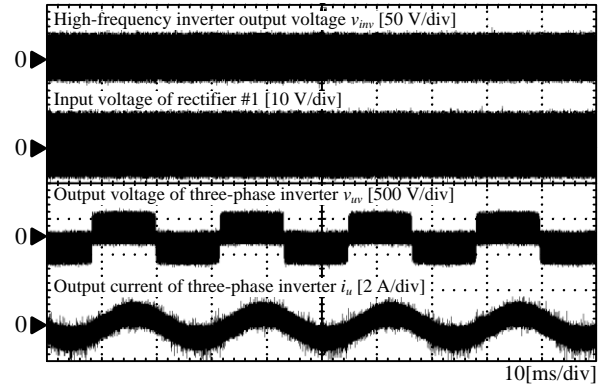
[1] N. Hatti, Y. Kondo and H. Akagi, "Five-Level Diode-Clamped PWM Converters Connected Back-to-Back for Motor Drives," *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol. 44, No. 4, pp. 1268-1276, July 2008

[2] N. Hatti, K. Hasegawa and H. Akagi, "A 6.6-kV Transformerless Motor Drive Using a Five-Level Diode-Clamped PWM Inverter for Energy Savings of Pumps and Blowers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 3, pp. 796-803, March 2009

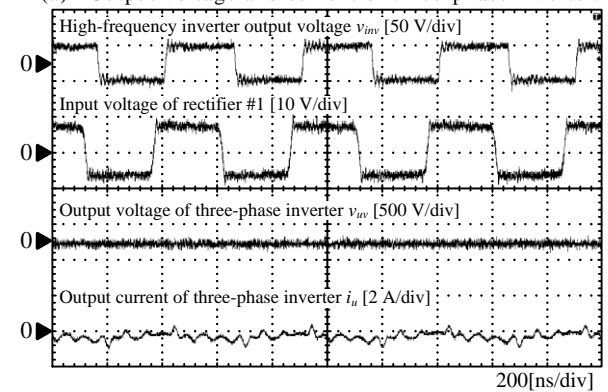
[3] I. Shigenori and H. Akagi, "A Bidirectional Isolated DC-DC Converter as a Core Circuit of the Next-Generation Medium-Voltage Power Conversion System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22, No. 2, pp. 535-803, March 2009

[4] International Electrotechnical Commission (IEC): "Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-1: safety requirements – Electrical, thermal and energy," *IEC 61800-5*, 2007

[5] Christoph Marxgut, jurgen Biela, Johann W. Kolar, Reto Steiner and Peter K. Steimer, "DC-DC Converter for Gate Power Supplies with an Optimal Air Transformer," in *Proc. Applied Power Electronics Conference and Exposition 2010*, pp. 1865-1870, Palm Springs, US, Feb. 2010



(a) Output voltage and current of three-phase inverter.



(b) Expanded waveforms of (a).

Fig. 13. Operation waveforms of the prototype with three-phase inverter.

[6] S. Nagai, N. Negoro, T. Fukuda, N. Otsuka, H. Sakai, T. Ueda, T. Tanaka and D. Ueda, "A DC-isolated gate drive IC with drive-by-microwave technology for power switching devices," in *Proc. International Solid-State Circuits Conference 2012*, pp. 404-406, San Francisco, US, Feb. 2012

[7] S. Nagai, T. Fukuda, N. Otsuka, D. Ueda, N. Negoro, H. Sakai, T. Ueda and T. Tanaka, "A one-chip isolated gate driver with an electromagnetic resonant coupler using a SPDT switch," in *Proc. 24th IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs 2012*, pp. 73-76, Bruges, Belgium, June 2012

[8] R. Steiner, P. K. Steimer, F. Krismer and J. W. Kolar, "Contactless Energy transmission for an Isolated 100W Gate Driver Supply of a Medium Voltage Converter," in *Proc. Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society 2009*, pp. 302-307, Port, Portugal, Nov. 2009

[9] S. Y. R. Hui, Y. X. Zhong and C. K. Lee, "A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer," *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol. 29, No. 9, pp. 4500-4511, Sep. 2012

[10] 日下佳祐, 折川幸司, 伊東淳一, 森田一徳, 近藤猛, "非接触給電を応用した高圧インバータ向けゲート駆動用絶縁システムの等価回路モデルの検討," *電気学会産業応用部門大会 2014*, No. 1-85, May 2014