

方形波駆動時のインバータ中性点電位変動とマルチコアトランスを用いた周波数増幅電力変換器の一考察

西山 秀人* 折川 幸司 宮脇 慧 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Consideration of a Frequency Amplify Power Converter Using a Neutral Voltage Fluctuation of a Square-wave Inverter and a Multiple Core Transformer

Hideto Nishiyama*, Koji Orikiwa, Satoshi Miyawaki, Jun-ichi Itoh, (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a frequency multiplying method, which consists of a multi-phase voltage-source inverter and a multiple toroidal core. When a voltage-source inverter is controlled by a square wave (six-step modulation), a neutral point voltage of the load has fluctuation. The principle of the proposed circuit uses this phenomenon. A multi-core transformer is used for load of the inverter. This paper mentions the design of the transformer and loss analysis of the proposed circuit to clarify the validity of the proposed power converter.

キーワード：高周波電源，中性点電位変動，トロイダルコア，マルチコアトランス，漏れインダクタンス
(Keywords, high-frequency power supply, neutral voltage fluctuation, toroidal core, multiple core transformer, leakage inductance)

1. はじめに

近年，低温プラズマ発生装置や非接触給電の電源として，高周波電源が注目を集めている。従来の高周波電源装置は真空管やパワーMOSFETなどの半導体素子を用いたC級リニアアンプ方式で構成されることが多い。このため，原理的に効率が低く，ヒートシンクやファンなどの放熱機器を付加する必要があり，システムが大型となる。また，真空方式では素子の寿命が短くなり信頼性に問題がある。そこで，効率と信頼性の点で有利なスイッチング方式による高周波電源装置が盛んに研究されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

一方，IGBTやMOSFETなどの電力変換用半導体素子は，近年，性能が向上し低損失化，大容量化が進んでいる。しかしながら，半導体素子のスイッチング速度の制約から，高周波動作には限界があり，特に大容量における高周波化は困難とされている。そこで，これまでに筆者らは，多相インバータの負荷中性点の電位変動に注目し，マルチコアトランスを組み合わせた回路構成で周波数を増幅する方法を提案している⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。これまでに，提案法を5相インバータに適用し，中性点電位変動を利用して，スイッチング周波数300kHzの5倍の1.5MHz出力を得ることを確認している。したがって，1.5MHzの出力電圧を発生させるためにイ

ンバータを構成する素子に要求されるスイッチング周波数を出力周波数の1/5に低減することが可能である。

しかし，提案回路では1.5MHzの高周波を扱うため，トランスの漏れインダクタンスを低減するトランスの設計と実装方式が重要となる。そこで，これまでに筆者らは提案回路の設計指針および適用範囲を明確にすることを目的として，マルチコアトランスの設計法と提案回路の損失解析の机上検討を行った。

本論文ではまず，負荷中性点電位を利用した提案回路の基本原理について述べる。次に，トランスの漏れインダクタンスを低減するためのマルチコアトランスの設計法，および提案回路の実装法について述べる。さらに，試作機を作成し，提案方式の有用性を確認する。その結果，無負荷実験において，1.5MHzの出力電圧を得られることを確認した。しかし，定格試験においては，負荷抵抗のインダクタンスと漏れインダクタンスの影響が大きく，出力電圧が低下し，負荷力率が悪化する問題が発生した。そのため，高効率伝送を実現する方法としてトランス二次側と負荷の間に共振用コンデンサを接続する。共振用コンデンサと漏れインダクタンスおよび負荷のインダクタンスで直列共振をさせることで負荷力率を改善したので報告する。

2. 原理

提案方式では、電圧形インバータの負荷中性点の電圧変動に着目した。N 相インバータを方形波駆動すると、直流リンク電圧の midpoint O を基準とする負荷中性点電位は(1)式にて変動し、インバータのスイッチング周波数の N 倍の周波数が得られる。

$$v_{no} = \frac{1}{N} \sum v_{ko} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 v_{ko} は各相の直流リンク電圧の midpoint O を基準とした出力電圧である。提案回路では、この原理を利用して昇圧する。なお、提案法は中性点電位変動を利用するため、相数 N は奇数でなくてはならない。

図 1 に提案法を 5 相電圧形インバータに適用した場合の提案回路を示す。5 相電圧形インバータは、各相の電圧指令をそれぞれ 72 度ずつ位相シフトさせて方形波駆動する。

図 2 に、提案回路の周波数増幅の原理図を示す。負荷中性点電位は、(1)式より各相電圧の波形の総和となるため、負荷中性点電位の波形は 36 度ごとにオンオフを繰り返す方形波となる。その周波数は各相電圧の周波数の 5 倍となる。

負荷中性点電位の変動は、直流リンクの midpoint とトランスの midpoint を接続することでトランスの二次側に出力可能になる。トランスの二次側は直列接続であるため、二次側の電圧振幅は(1)式の 5 倍になる。したがって、二次側には、振幅が各相電圧と等しく、周波数が 5 倍の方形波が出力される。

3. トロイダルマルチコアトランス

提案回路においては高周波を扱うため、トランスの漏れインダクタンスの低減が重要となる。そこで、提案回路のトランスにトロイダルマルチコアトランスを採用し、二次側の配線構造を工夫することで、トランスの漏れインダクタンスを低減する狙いがある。なお、本論文では、トロイダルコアに、高周波において低損失であるフェライトコア (TDK 製, PC40, 型番を記入) を使用した。

表 1 に回路の設計指針を示す。出力電圧 $V_{out}=50V$, 出力周波数 $f_{out}=1.5MHz$ として設計を行う。マルチコアトランスでは、トランス二次側を直列接続するため、トランスの段数を n とすると(2)式の関係がある。

$$f_{out} = n \cdot f_1 \dots\dots\dots(2)$$

したがって、5 相 (n=5) で設計した場合、1 相のトランスにおける入出力比は 1:2, 動作周波数は $f_1=300kHz$ となる。各トランス 1 つあたりで設計を行い、それを n 段組み合わせ、マルチコアトランスとする。

トランス巻数の設計には(3)式を用いる。(3)式により、一次巻数 N_1 を決め、電圧比から二次巻数 N_2 を決定する。

$$N_1 = \frac{V_{in} D}{\Delta B \cdot S \cdot f_1} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 ΔB : 駆動磁束密度, S : トランスコアの実効断面積, D : 1 相あたりのデューティ比である。

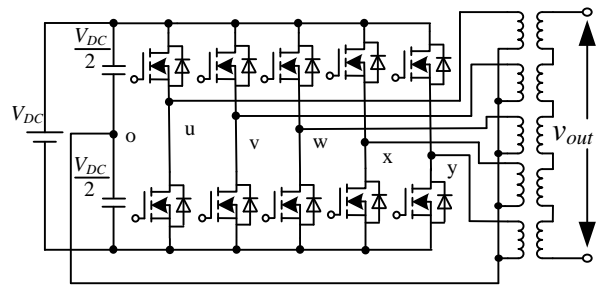


図 1 提案回路

Fig. 1. Proposed circuit.

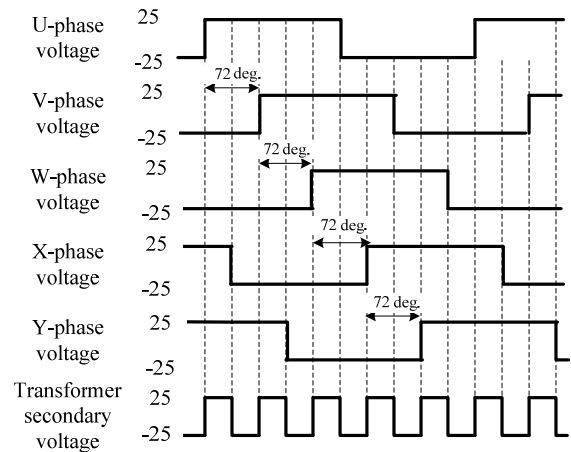


図 2 周波数増幅法の原理

Fig. 2. Principle of proposed circuit.

表 1 設計仕様

Table 1 Specification of transformer

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Primary Voltage	V_1	25	V
Secondary Voltage	V_2	50	V
Primary Number of Turn	N_1	2	turns
Secondary Number of Turn	N_2	4	turns
Primary Frequency	f_1	300	kHz
Primary Frequency	f_2	1.5	MHz
Duty cycle	D	0.5	
Flux density	B_m	0.3	T
Cross-sectional area	S	112×10^{-6}	m^2

表 1 の値を用いて、一次巻数 N_1 を計算すると $N_1=2$ となる。したがって、二次巻数 N_2 は(4)式より $N_2=4$ となる。

$$N_2 = \frac{V_{in}/2}{V_{out}} N_1 \dots\dots\dots(4)$$

4. 提案回路の実装

図 3 に、提案回路の素子およびマルチコアトランスの実装図を示す。回路の配線インダクタンスを低減するために、各相のトランスコアを 5 角形に配置する。そして、トランスの 1 次側はそれぞれのコアに集中巻し、中性点を直流コンデンサの midpoint に接続する。トランスの 2 次側は全てのコ

アに貫通巻きする。また、素子はコアの直近に配置し、両面基板を用いて電源ラインを表裏に配置した。図 3 の表面（紙面側）に、各アームの上側スイッチを、裏面に下側スイッチを実装する。これにより、高周波部の配線インダクタンス低減、そしてトランスの漏れインダクタンスを低減する狙いがある。また、1MHz 以上の高周波では、表皮効果の影響も大きくなるため、回路で発生する損失を低減する狙いもある。

5. 動作検証

提案回路の有用性を確認するため、試作機を作成して実験を行った。表 2 に実験条件を示す。主回路の素子は、MOSFET(IR 製, IRFR3911)を使用している。また、インバータの直流電圧を 50V, スイッチング周波数を 300kHz とした。なお、マルチコアトランスの巻数は 3 章で述べた設計に基づいて 5 相とし、一次巻線を 2T, 二次巻線を 4T としている。

〈5・1〉 無負荷運転時の特性

図 4 に、試作機を無負荷で運転した時の実験結果を示す。結果より、出力電圧には入力電圧の 50V をピークとし、1 次側スイッチング周波数 300kHz の 5 倍となる 1.5MHz を確認できる。また、U 相のトランス 2 次側出力電圧はトランス 1 次側電圧に対して巻数比の 2 倍であることを確認できる。ただし、提案回路ではトランスの 2 次側は貫通巻であり、各相のトランス 2 次側電圧を直接測定することができないため、ここではトランスの 2 次側電圧はトランスに 2 次巻線と同じターン数の補助巻線を巻き電圧を測定した。

〈5・2〉 負荷接続時の特性

図 5 に、抵抗 10Ωを接続した場合の実験結果を示す。結果より、無負荷運転時と比べて、出力電圧の立ち上がり立ち下り時に出力電圧波形が振動しており、出力電圧も設計値の 50V ではなく、25V 程度まで低下していることが確認できる。また、出力電流は三角波となっており、負荷率は 0.1 程度と非常に低くなっている。これは、今回負荷に用いた抵抗のインダクタンス成分は出力周波数 1.5MHz において約 8μH と大きいためである。

表 3 に作成したトロイダルマルチコアトランスのパラメータを測定した結果を示す。ただし、マルチコアトランスの漏れインダクタンスは一次側の他 4 相および 2 次側を短絡して測定した。また、励磁インダクタンスは 1 次側すべておよび 2 次側を開放して測定した。測定結果より、漏れインダクタンスが非常に大きいことが確認できる。また、励磁インダクタンスと漏れインダクタンスが同程度であり、提案回路のマルチコアトランスは漏れインダクタンスが大きく、結合率が低いことを確認した。

したがって、負荷率を改善するために、トランス 2 次側にコンデンサを直列に接続し、マルチコアトランスの漏れインダクタンスと負荷のインダクタンス、そして直列共振を利用して力率を改善する方法を試みた。なお、マルチコアトランスの漏れインダクタンスが大きいため、トラン

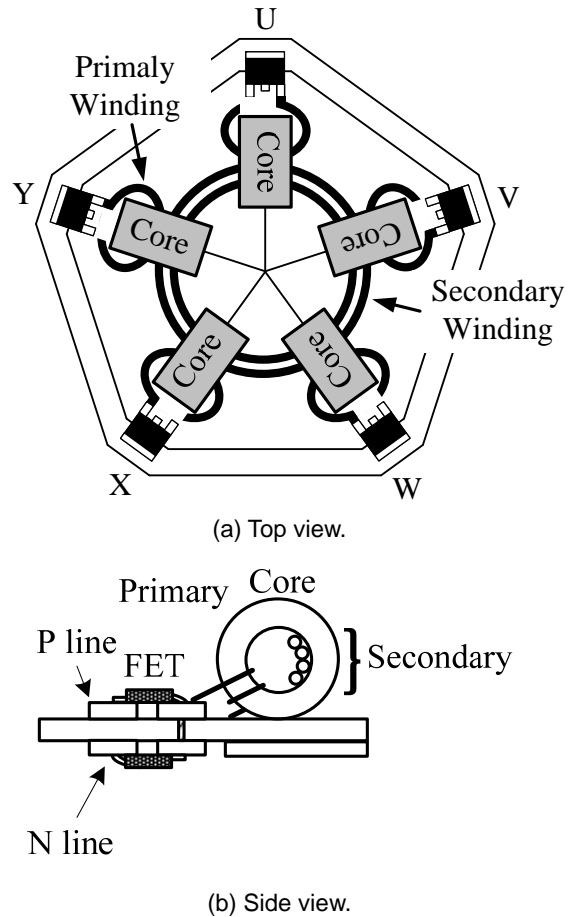


図 3 提案回路の実装図

Fig. 3. Packaging of the proposed circuit.

表 2 実験条件

Table 2. Experimental conditions.

Parameter	Value	Unit
Input voltage	50	V
Switching frequency	300	kHz
Dead time	100	ns
Load resistance	10	Ω
Load inductance	8.2	μH

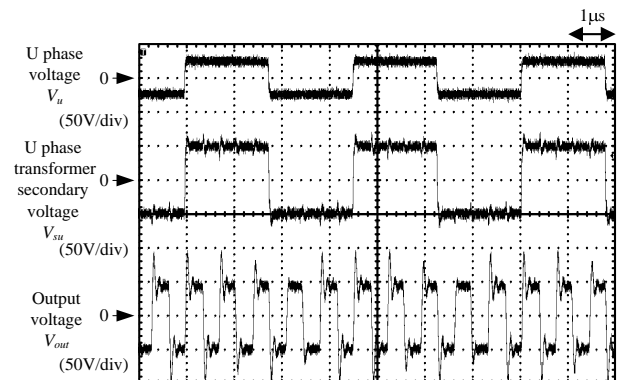


図 4 動作波形（無負荷時）

Fig. 4. Operation waveforms(no-load).

ス二次側に直接コンデンサを接続しても問題ない。

〈5・3〉 共振コンデンサ挿入時の特性

図 6 に、トランス 2 次側に直列共振を適用した場合の実験結果を示す。結果より、電流が正弦波となっていることが確認できる。また、負荷力率も共振コンデンサを挿入することで 0.2 程度に改善することができた。

6. まとめ

本論文では、方形波駆動時のインバータの中性点電位変動およびマルチコアトランスを用いた周波数増幅回路の高周波化および高効率化を目的とし、トランスの漏れインダクタンスの低減する回路実装法および回路の損失分離を提案した。

実機実験では、無負荷運転において 5 相インバータの中性点電位変動をマルチコアトランスにより昇圧し、各相のトランス二次側を直列接続した出力でインバータのスイッチング周波数 300kHz の 5 倍である 1.5MHz の方形波電圧が出力されることを確認した。しかし、負荷接続時にはトランスの漏れインダクタンスおよび負荷のインダクタンスの影響で負荷力率が低下し、高効率な電力伝送を行うことができなかった。そのため、負荷に共振コンデンサを挿入して負荷力率の改善を試みた。

今後の課題として、トランスの漏れインダクタンスを低減するトランスの設計、さらに高電圧に対応する実機の作成があげられる。

文 献

- (1) H. Fujita, C. Sato, S. Ogasawara and H. Akagi: "Pulse Density Modulated Power Control of a Voltage-Source Inverter with a Series-Resonant Circuit Suitable for Corona Discharge Treaters", IEEJ Trans., Vol.114-D, No.4, pp.459-465 (1994)
藤田, 佐藤, 小笠原, 赤木:「コロナ放電処理システムに適した電圧形インバータ・直列共振回路の PDM 電力制御」, 電学論 D, Vol.114, No.7, pp459-465 (1994)
- (2) T. Suzuki, H.Ikeda, and H. Yoshida: "Power loss and efficiency in full-bridged MOS-FET DC-to-RF Power Inverter with Output Power of 1kW at 2.5MHz", IEEJ Trans., Vol.117-D, No.1, pp.35-43 (1997)
鈴木, 池田, 吉田:「2.5MHz で出力 1kW のフルブリッジ形 MOS-FET 式電力インバータの電力損失と効率」, 電学論 D, Vol.117, No.1, pp35-43 (1997)
- (3) H. Fujita and H. Akagi: "A 2MHz, 2kW Voltage-Source Inverter for Low-Temperature Plasma Generators", IEEJ Trans., Vol.117-D, No.10, pp.1262-1268 (1994)
藤田, 赤木:「低温プラズマ発生装置用 2MHz, 2kW 電圧形インバータ三次共振回路を用いたスイッチングの高速化」, 電学論 D, Vol.117, No.10, pp1262-1268 (1994)
- (4) H. Maeoka and T. Noguchi: "High-Voltage Pulse Power Supply Using Multiple Transformers with Novel Winding Structure", Vehicle Technical Meeting, VT05-7, pp.37-42 (2004)
前岡, 野口:「新しい巻線方式に基づく多重トランスを用いた高電圧パルス電源の開発」, 電気学会自動車研究会, VT05-7, pp37-42 (2004)
- (5) R. Kitamoto and T. Noguchi: "10kV-50ns Pulse Power Supply Using Ultra High-Speed Switching Devices and Toroidal Multiple Cores", SPC-09-87 (2009)
北本, 野口:「超高速スイッチング素子とトロイダルマルチコアを用

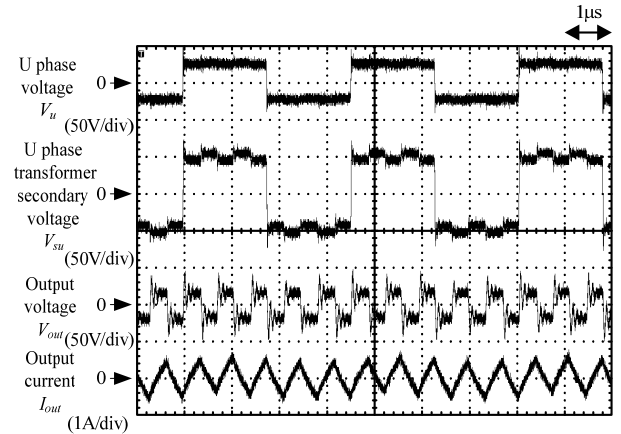


図 5 動作波形 (負荷接続時)

Fig. 5. Operation waveforms(with load)

表 3 マルチコアトランスのパラメータ

Table 3. Parameters of multi core transformer.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Leakage inductance	L_l	1.54	μH
Exciting inductance	L_m	13.47	μH

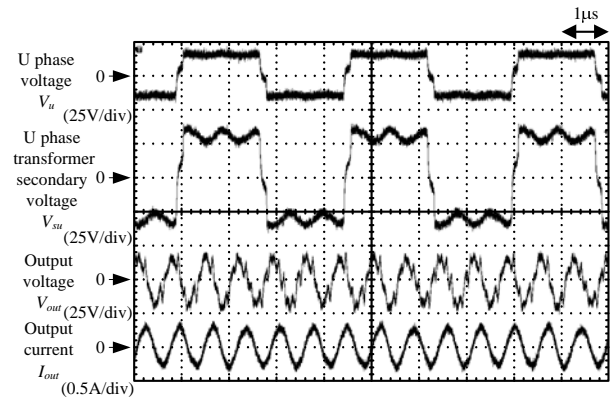


図 6 動作波形 (共振コンデンサ挿入時)

Fig. 6. Operation waveforms(With resonant capacitor)

いた 10kV-50ns パルス電源」, 平成 21 年度半導体電力合同研究会, SPC-09-87, pp.137-142 (2009)

- (6) 西山, 伊東:「方形波駆動によるインバータの中性点電位変動を用いた周波数増幅法の基礎実験」, 平成 20 年度電気学会北陸支部連合大会, A-63(2008)
- (7) 西山, 伊東:「中性点電位とマルチコアトランスを用いた周波数増幅法の基礎検証」, 平成 21 年度電気学会産業応用部門大会, 1-78(2009)