

中性点電位変動とマルチコアトランスを用いた 周波数増幅法の基礎検証

学生員 西山 秀人 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

An Experimental Evaluation of a Frequency Amplifying Method Using a Neutral Point Voltage variation and Toroidal Multiple Cores

Hideto Nishiyama, Student Member, Jun-ichi Itoh, Member (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a frequency multiplying method, which consists of a voltage-source inverter based on front end and a multiple toroidal core based on output stage. If a voltage-source inverter is fed by a square wave, a neutral point voltage fluctuation is occurred. The proposed method applies the neutral point voltage fluctuation to a frequency amplifying method. The valid of the proposed method is confirmed with experiments and simulations.

キーワード：高周波電源，中性点電位，マルチコアトランス，トロイダルコア

Keywords：high-frequency power supply, neutral point voltage, multiple core transformer, toroidal core

1. はじめに

近年，高周波電源を用いた低温プラズマ発生装置が半導体プロセスや表面改良プロセスにおいて使用されている。高周波電源装置の多くは，真空管やパワーMOSFETなどの半導体素子を用いたリニアアンプ方式で構成されているため，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，装置が大型となる。また，真空管方式では素子の寿命が短くなるなどの問題がある。そこで，効率と信頼性の点で優れた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，性能の向上や回路構成の進歩により，高効率化，大容量化，高周波化が進んでいる。それに伴い，高周波インバータが誘導加熱や放電処理装置に応用されている。しかし，半導体素子のスイッチング速度の制約から，高周波動作が限界であり，高周波化はデバイスの性能に頼っているため，非常に高価になる。

本論文では，多相インバータの負荷中性点変動することに着目し回路構成で周波数を増幅する方法を提案する⁽⁶⁾。ここでは，基礎的な原理検証として提案法を五相インバータに適用し，中性点電位変動を利用することで，スイッチング周波数の5倍の出力周波数を得る。従って，従来の半導体素子を用いても高周波出力が可能である。本稿では提案法の周波数増幅効果をシミュレーションおよび実機実験により確認したので報告する。

2. 周波数増幅法の原理

N相インバータを方形波駆動すると，直流リンク電圧の中点Oを基準とした負荷の中性点電位 v_{no} は(1)式にて変動し，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} は中点Oを基準した各相の出力電圧

しかし，振幅が $1/N$ になるため，マルチコアトランスにより昇圧する。

図1に提案する方式を5相インバータに適用した場合の回路構成を示す。五相電圧形インバータの制御方式には，各相の電圧指令がそれぞれ72度ずつ位相の遅れた方形波で構成される72度通電方式を適用する。提案法では72度通電方式による中性点電位の変動を利用し，出力周波数をスイッチング周波数の5倍に制御する。

図2にコアの数が5個の場合のマルチコアトランスの構

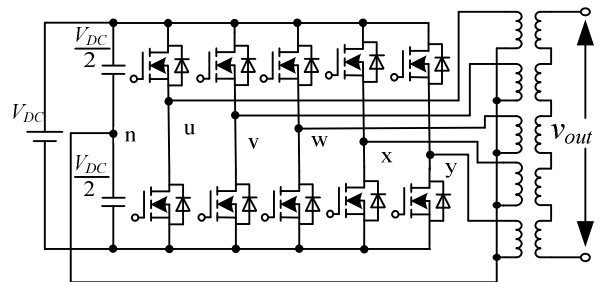


Fig. 1. 5phase voltage-source inverter.

成例を示す。マルチコアトランスはトロイダルコアを N 個用いて、トランスの一次側はそれぞれコアに集中巻し、中性点を直流コンデンサの midpoint に接続し、トランスの二次側は全てのコアに貫通巻し接続する。この結果、一次側を並列に、二次側を直列に接続されて、マルチコアトランスの入出力比は N 倍となり、振幅低下を補正できる。特にここでは高周波電源にもちいるため、1 ターンで設計できれば非常に簡単化、小型化できる。また、マルチコアトランスは、磁氣的結合性が高まり、漏れインダクタンスの低減が期待できる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。なお、本方式は相数を増やすことで周波数増幅が行えるが、電圧変動を打ち消さないようにするため相数は素数でなくてはならない。

図 3 に 5 相周波数増幅法の原理を示す。負荷中性点電位は(1)式より各相電圧の波形の総和をなすため、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、直流リンクの中性点とトランスの 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(2)式の 5 倍になる。従って、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。なお、提案方式をインバータの相数が奇数となるように構成することで、相数倍の出力周波数が得られると考えられる。

3. 提案式の動作検証

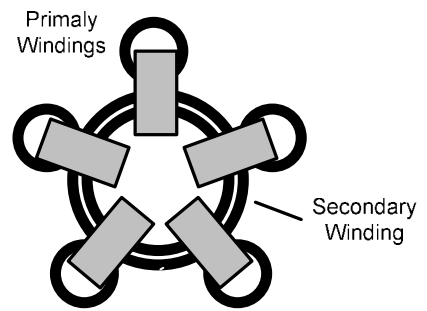
図 4 に提案方式の実験結果を示す。半導体素子には従来の低速 MOSFET(富士電機デバイステクノロジー, 2SK3598-01)を使用している。直流電圧は 50V であり、負荷には 47Ω の無誘導抵抗を使用している。また、マルチコアの巻き数比は 2T:4T にて設計した。図 4 から明らかなように、各相を 300kHz でスイッチングすることで、出力に 1.5MHz の高周波が得られている。なお、振幅が一定の方形波にはなっていない。この原因は、トランスの漏れインダクタンスや配線インダクタンスによる波形の立ち上がり遅れであると考えられる。これらは、実験回路の配線構造を工夫し、配線長を短く設計することで解決可能である。

5. まとめ

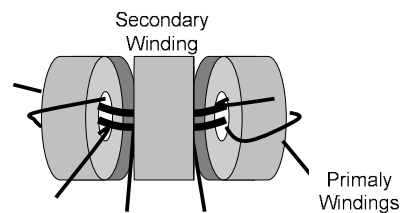
本論文では、5 相電圧形インバータによる周波数増幅方式を提案し、実験にて、スイッチング周波数の 5 倍の周波数の出力波形が得られることを確認した。今回は基礎実験のため、定格電圧が低く、周波数も十分でないが、今後は実際のプラズマ電源などの用途に合わせ、高周波化、大容量化する予定である。

文 献

- (1) 赤木, 上面: 「パワー-MOSFET を用いた電圧形インバータ・直列共振回路方式の 1kW450kHz 誘導加熱装置」, 電学論 D, Vol.110, No.11, pp.1177-1183 (1990)
- (2) 鈴木, 池田, 吉田: 「2.5MHz で出力 1kW のフルブリッジ形 MOS-FET



(a) top view



(b) side view

Fig.2. Toroidal multiple cores.

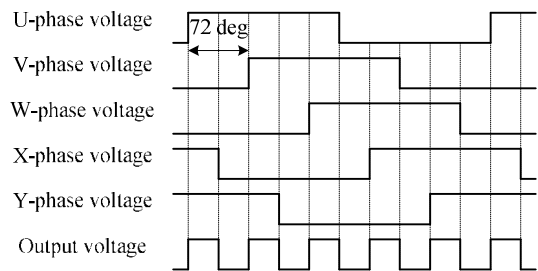


Fig.3. Proposed multiplying method.

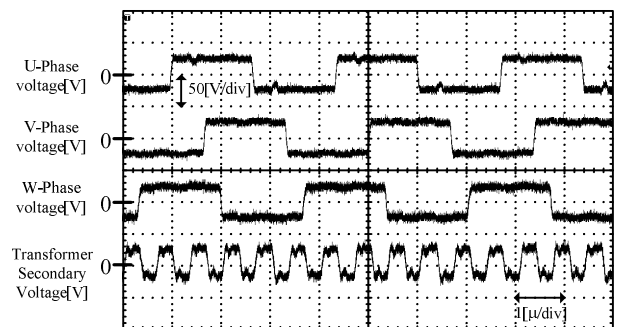


Fig.4. Experimental results with proposed multiplying method.

式電カ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) 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) 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) 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)