

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

前岡宏信* 野口季彦 (長岡技術科学大学)

Development of High-Voltage Pulse Power Supply Using Multiple Transformers with Novel Winding Structure
Hironobu Maeoka, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

In this paper, a high-voltage pulse power supply is developed to decompose NOx in engine exhaust gas. Multiple transformers are employed to generate 10-kV pulse, of which rise time is only 100 (ns). Toroidal ferrite cores and two types of the winding structures are applied to the transformers. Output characteristics of the pulse power supply are dependent on turn ratio of each transformer and multiple count of the transformers. Also, the winding structures affect the peak voltage and rise time of the high-voltage output pulse.

キーワード：高電圧パルス電源，多重トランス，巻線，トロイダルコア，排ガス処理

Keywords：High-voltage pulse power supply, multiple transformers, windings, toroidal core, exhaust gas treatment

1. はじめに

近年，環境汚染の深刻化に伴い様々な環境規制が課され，それに準拠するための研究開発が進められている。我が国における物流の中心である東京では自動車のディーゼルエンジンの排気ガス中に含まれる窒素酸化物（以下 NOx）による環境汚染が懸念され，排ガス浄化装置（DPF）の設置が義務付けられている。その理由として NOx は人体への長期的な影響として呼吸器に対する害があることや，眼やのどに痛みを引き起こす光化学スモッグの原因になることがあげられる。また，酸性雨の主因であることは周知のとおりであり，地球環境保全のため NOx 対策が急務となっている。

NOx を分解する手法として触媒に注目した炭化水素を還元剤とする NO の選択的接触還元法（selective catalytic reduction: SCR）^[1]や SCR 反応で副生する亜酸化窒素（N₂O）の分解法^[2]，またプラズマに注目した低温プラズマ分解法（コロナ放電を利用する分解法）などが知られている。

本稿では，プラズマ分解法に着目し NOx の分解率が 95 (%)以上となる立上り時間 100 (ns)以内，電圧波高値 10 (kV)以上，繰返し周期 1 (kHz)の高電圧パルスを要求仕様とする高電圧パルス電源について検討する。その主回路は一次巻線を並列接続し，二次巻線を直列接続した多重トランス構造をもち，トロイダルコアを利用して巻線構造を工夫することにより，配線インダクタンスを低減するとともに装置全体の小型化を実現した。本稿では，二次巻線の巻き方やトランスの段数を種々変化させ，それらを比較検討することにより筆者らが提案する新しい巻線構成をもつ多重トランス方式

の有効性を確認したので報告する。

2. 高電圧パルス電源の構成と制御法

Fig. 1 に高電圧パルス電源の主回路構成を示す。昇圧は 2 段階に分けて行っており，前段では 1 (kHz)で動作するプッシュプル DC-DC コンバータと昇圧とランスを用いて入力電圧を 50 倍にしている。後段では一次巻線を並列接続，二次巻線を直列接続した多重トランスと高速スイッチング素子 Q₁ (CM100DU-24F)を用いて高電圧パルスを発生させている。Q₁ は周期 1 (ms)，パルス幅 200 (ns)でスイッチングする。トランスの設計において一次側と二次側にそれぞれ (1)，(2)が適用される。

$$V_1 = \frac{2}{D} \cdot B_m \cdot S \cdot N_1 \cdot f \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_2 = \frac{2}{D} \cdot B_m \cdot S \cdot N_2 \cdot f \cdot n \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし，V₁ は一次電圧，V₂ は二次電圧，N₁ は一次側巻数，N₂ は二次側巻数，B_m は磁束密度，S はトランスコ

表 1 トランスの設計パラメータ

Table. 1 Design parameters of multiple transformers

Parameter	Symbol	Value
Primary voltage	V ₁	500 [V]
Secondary voltage	V ₂	10×10 ³ [V]
Primary number of turn	N ₁	4
Secondary number of turn	N ₂	8
Number of multiple transformers	n	10
Duty	D	0.001
Flux density	B _m	0.4 [T]
Cross-sectional area	S	150×10 ⁻⁶ [m ²]
Frequency	F	1×10 ³ [Hz]

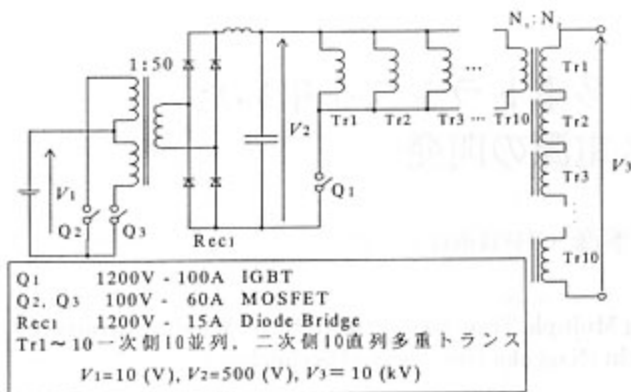


図1 主回路の構成
Fig. 1. Configuration of power circuit.

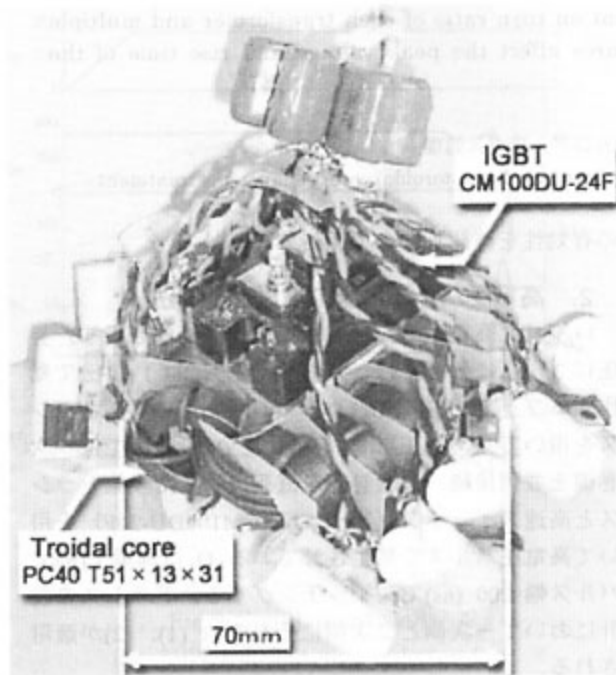


図2 主回路図
Fig. 2. Main circuit structure.

アの断面積, f は周波数, n はトランスの段数である。ここで, (2)に示したように二次側を直列接続しているためトランスの段数 n だけ高い電圧を得ることができる。プロトタイプ的设计パラメータを Table.1 に示す。高電圧パルスの波高値は各トランスの巻数比ならびに多重トランスの段数によって決定され, (1), (2)より次式のように簡単な関係式が導かれる。

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1} n \dots\dots\dots (3)$$

なお, 漏れインダクタンスの低減を図るため, 各トランスにはトロイダルフェライトコア (TDK 製 PC40 T51 x 13 x 31) を使用する。

Fig. 2 は主回路の実装状態を示したものである。提案

する手法ではこのようにトロイダルコアを二次巻線が貫通しており, 一次巻線は各コアに巻きつけられた特殊な実装法を採用している。この主回路は直径 70 (mm), 高さ 70 (mm)の円筒容器に収納することができる。また巻線の導体には LZ7/14/1BB-2UEW (Hitachi Cable) を使用している。これはリッツ線を複合撚り (数本のひとまとめに撚ったリッツ線の束をさらに数本まとめて撚ったもの) したものである。この導体を使用したのは高周波において問題となる表皮効果を避けるためである。導体の被覆にはスミチューブ B2 (住友電工ファインポリマ株式会社) を使用している。これは高耐圧の熱収縮チューブで絶縁耐力は 19.8 (kV/mm)以上である。

3. 実験結果

本稿では3種類の実験を行い, それらを比較することで Fig. 2 に示した二次巻線貫通形多重トランス方式の有効性を示す。次節にトランスの段数を5段, 10段

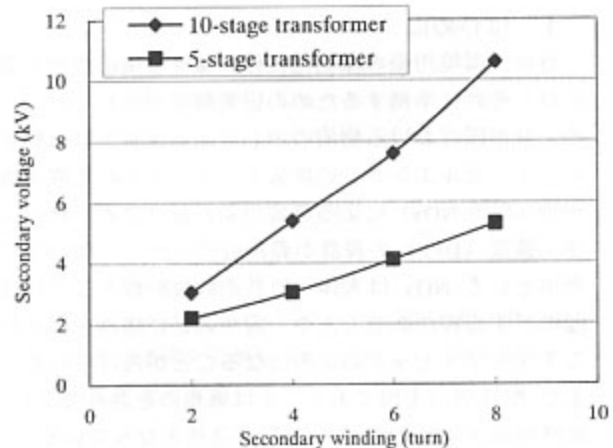


図3 二次電圧波高値の特性
Fig. 3. Peak secondary-voltage characteristics.

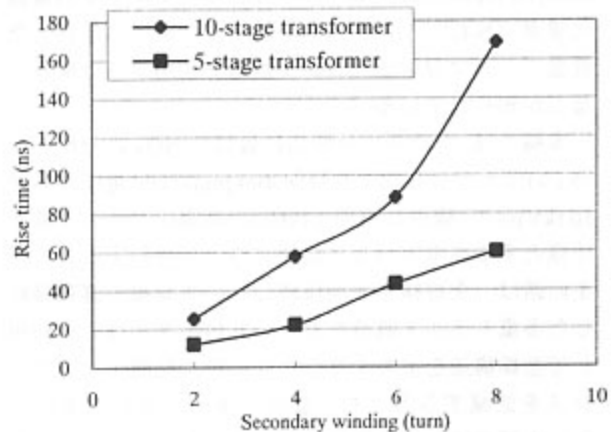


図4 二次電圧立上り時間の特性
Fig. 4. Rise time characteristics of secondary voltage.

とした場合の特性試験, 3.2 節では回路図としては同等であるが, 巻き線構造を変化させ, コアの中心を貫通させた場合と貫通させず各コアに巻いた場合の試験結果について述べる。さらに, 3.3 節では多重トランス方式の有効性を示すため, トランスの一次巻線と総断面積を一定として発生する総磁束を一定とし, トランスの段数と二次巻線の巻数を変化させることにより理論昇圧率を 10 倍に維持する試験を行った。

3.1 多重トランスの段数と巻数比に対する出力特性の比較

本方式を用いるとトランスの巻数比だけでなく多重段数によっても出力特性が変化する。(3)からわかるようにトランスの段数を多くするほど高い二次電圧を得られるが, 逆にパルスの立上り時間が長くなる。これは段数を多くすると漏れ磁束が大きくなると考えられ, その結果として出力パルスの立上りが時定数をもって遅くなるためである。また, トランスの二次側においては, 巻数の二乗に従い漏れインダクタンスが増加し, 段数を増やした場合でも漏れが増加する。実際の設計ではトランスの漏れインダクタンスを考慮することは困難であるが, トロイダルコアを使用する場合は巻き方が簡単であるため特性のばらつきが少なく, 巻数と段数を変えるだけで目標とするパルス波高値と立上り時間をもつ出力を容易に推測することができる。

トランスの一次電圧を 500 (V), 巻数を 4 一定として, トランスの段数を 5 段と 10 段, 二次側の巻数を 2, 4, 6, 8 とした。それぞれの場合に対する電圧波高値の特性を Fig. 3 に, 立上り時間特性を Fig. 4 に示す。Fig. 3 よりトランス 10 段の場合では一次側と二次側の巻数比が 1 となる二次側巻数 4 で理論通りに約 5 (kV) の電圧が発生している。また, トランス 5 段の場合では巻数比が 2 となる二次側巻数 8 で同様に 5 (kV) を出力している。全体的にトランスの段数が少なくなるほど理論通りの電圧波高値が得られる。また, Fig. 4 より出力パルスの立上り

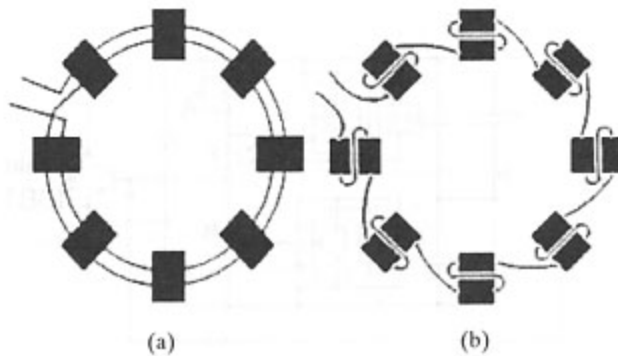


図 5 二次巻線の構成
Fig. 5. Secondary windings structure.

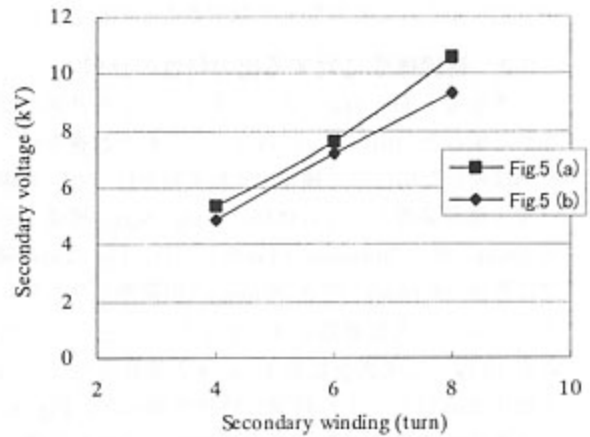


図 6 二次電圧波高値の特性
Fig. 6. Peak secondary-voltage characteristics.

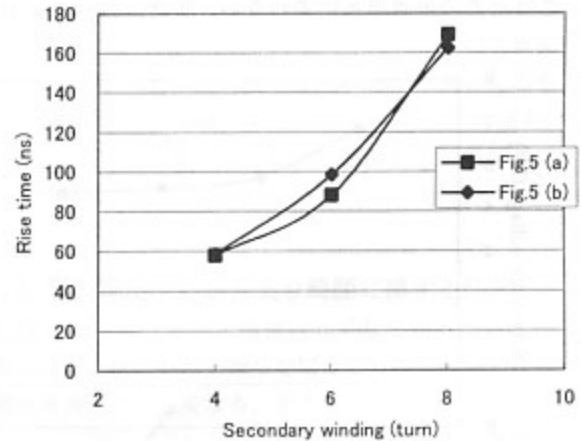


図 7 二次電圧立上り時間の特性
Fig. 7. Rise time characteristics of secondary voltage.

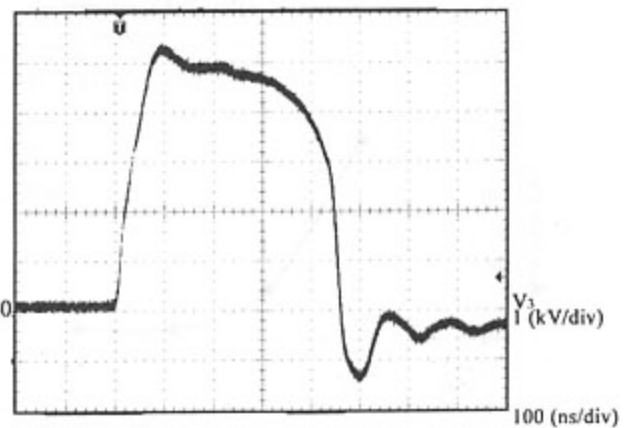


図 8 二次電圧の波形 (図 5(a)の場合)
Fig. 8. secondary voltages (in case of Fig. 5(a)).

時間もトランスの段数と巻数に大きく依存する。巻数が半分になると立上り時間も半減することがわかる。

3.2 巻線構成に対する出力特性の比較

二次巻線を Fig. 5(a)のように全てのコアを共通に貫通させた場合と、(b)のように各コアにそれぞれ巻き付けて直列接続した場合の2種類で比較実験を行った。高電圧パルス電源装置としての体格は、Fig. 5(a)の構成で直径70 (mm)、高さ70 (mm)の円筒形となり、Fig. 5(b)の構成では直径100 (mm)、高さ70 (mm)の円筒形となった。

トランスの一次側巻数を4一定として、トランスの段数を10段、二次側巻数を4、6、8と変化させて、パルス電圧波高値と立上り時間の特性を調べた。Fig. 6は二次電圧波高値を示しており、全てのコアを共通に貫通する構成の方が各コアに巻き付けて直列接続する構成より、1 (kV)高い電圧を出力することができた。Fig. 7は二次側電圧立上り時間の特性を示しており、ここには両者の差は顕著に表れない。また、Fig. 7より出

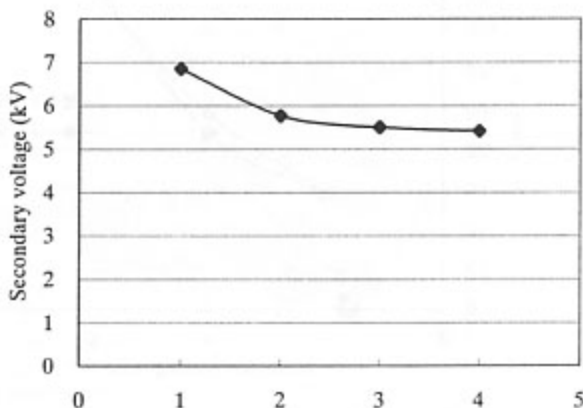
力パルスの立上り時間は巻数に大きく依存し、巻数が半分になると立上り時間も半減することがわかる。

例として Fig. 5(a)の巻線構造を採用した場合の二次電圧波形を Fig. 8 に示す。条件は一次電圧500 (V)、巻数比1である。このように5.40 (kV)の波高値をもったパルス電圧がわずか58 (ns)で立ち上がっている。

3.3 磁束密度を一定としトランスの段数と巻数比を変化させた場合の比較

本稿で検討する多重トランスは一次側を並列、二次側を直列に接続しており、トランスの段数と二次側の巻数を変化させ実験検証を行っている。例えば、トランスが10段で巻数比が1である場合とトランスが1段で巻数比が10とした場合でも、同様に10倍のパルス電圧が得られる。しかし、段数と巻数比を変えただけではコアの磁束密度を一定にしていることにはならないのでこれを一定となるように再度実験を行った。つまり10段のときは1個のコアを1組として10組を多重化、5段のときは2個のコアを1組として5組を多重化、2段のときは5個のコアを1組として2組を多重化した。

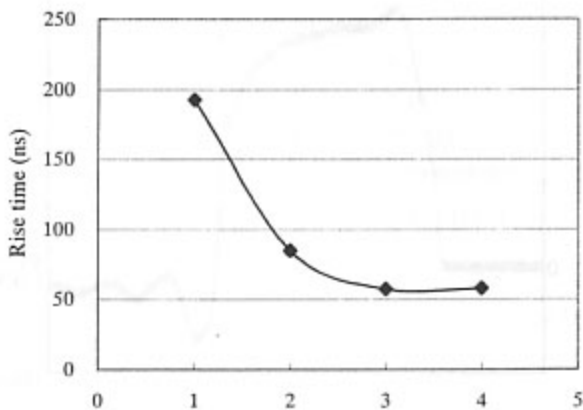
Fig. 9に二次電圧波高値、Fig. 10に立上り時間を示す。これは一次電圧500 (V)におけるトランスの段数を10、5、2、1と変化させ、それに応じて昇圧比が10一定となるように一次巻線を4として二次巻線を4、8、20、40と変えている。Fig. 9より二次電圧波高値の特性には大きな変化は見られないが、Fig. 10よりトランスを分割した方が漏れインダクタンスを減らせるため立上り時間が短くなることをわかる。



1=1 Parallel, 2=2 Parallel, 3=5 Parallel, 4=10 Parallel

図9 二次電圧波高値の特性

Fig. 9. Peak secondary-voltage characteristics.



1=1 Parallel, 2=2 Parallel, 3=5 Parallel, 4=10 Parallel

図10 二次電圧立上り時間の特性

Fig. 10. Rise time characteristics of secondary voltage.

4. 考察

4.1 回路実装に関する検討

本稿ではトランスの一次側最大電圧を1000 (V)として設計を行った。これは汎用素子として使用されている高速高耐圧IGBTとして耐圧1200 (V)のものが入手性が良いためである。プロトタイプで使用したIGBT

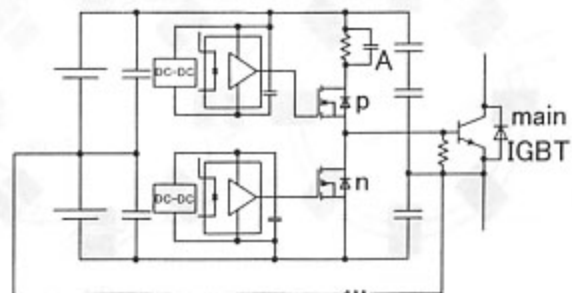


図11 ドライブ回路

Fig. 11. Drive circuit.

(CM100DU-24F) は V_{CES} が 1200 (V), I_c が 100 (A), t_r が 50 (ns) である。

また、ドライブ回路は Fig.11 に示す回路を製作した。トータムポール型の電流ブースト回路を採用し、両アームとも超高速 FET を使用している。また上アームの A 部分にはスピードアップコンデンサを付加し電荷注入を速くすることでメイン IGBT の立上り時間を短くする工夫を施している。

4.2 線路インダクタンスに関する検討

3.3 の実験において、Fig. 10 でトランスの段数が増加するに従い立上り時間が短くなった。この実験ではコアの磁束密度を一定に保つため、段数が多くなれば二次巻線の巻数を少なくしている。Table. 2 に昇圧比を 10 倍とするためのトランスの個数と一次側、二次側巻数の関係を示す。

Table. 2 から分かるようにトランスの段数が 1 段と 10 段の場合を比較すると巻数としては 1/10 でよい。インダクタンスは巻数の二乗に比例して増加する。これにより漏れインダクタンスも同様に増加すると考えられ、結果として立上り時間に差が出ると思われる。また、Table. 3 にはその二次巻線と線路長、二次巻線の断面積、そして本稿で用いた PC40 T51×31×15 の窓面積 754.3 (mm²) における占積率の関係を示した。

4.3 占積率と漏れインダクタンスに関する検討

Fig. 10 においてコア 2 個 5 組を 5 段の場合とコア 1 個 10 段の場合で特性に大きな差が現われていない。先の理論によれば巻数が半分になることによって立上り

表 2 トランス段数と巻数の関係

Table. 2 Relationship between number of multiple transformers and turn ratio.

Number of multiple transformers	Turn ratio
1	4:40
2	4:20
5	4:8
10	4:4

表 3 巻数と線路長の関係

Table. 3 Relationship between number of turn and winding length.

Secondary winding (Turn)	Winding length (mm)	Cross-sectional area (mm ²)	Space factor (%)
4	1120	16	2.1
8	2240	32	4.2
20	5600	80	10.6
40	11200	160	21.2

時間も半減するはずであるが、実際はそのようになっていない。これには窓面積が全体を通して一定であり、巻数によって占積率が大きく変化することが関連していると考えられる。Table. 3 に示したように本実験では巻数が少なくなるにつれて占積率が極端に小さくなる。このことは貫通巻きを施した場合、コアに巻線がゆるく巻かれていることを意味し、それにより漏れインダクタンスが増大すると考えられる。

また、漏れ磁束が生じる個所としてはトランスとトランス間の配線が考えられる。この線路長が大きい場合、コアの磁化に寄与しない磁束が漏れとなる。そのため、巻数の少ない方式が有効になるとと思われる。

4.4 トランスの巻数比と巻線構成に関する検討

本方式を用いるとトランスの巻数比によって出力波形の特性が変化する。Fig. 3, Fig. 4 からわかるようにトランスの巻数を多くするほど高い二次電圧を得られるが、それに伴って立上り時間が長くなる。これは巻数を多くすると各トランスの漏れ磁束の総和が大きくなるため、出力パルス電圧の立上り時間が長くなる。また、トランスの二次巻線も長くなるため漏れインダクタンスが増加する。

4.5 最大電圧・最短立上り時間に関する検討

巻数を増やせば電圧波高値は高くなるが立上り時間は長くなる。逆に巻数を減らせば立上り時間は短くなるが電圧波高値が小さくなる。本方式ではこのようなトレードオフの関係が成り立つ、そこで本稿における最適設計の条件を列挙する。プラズマを発生させるためには立上り時間が 100 (ns) 以下、波高値が 10 (kV)、繰返し周期が 1 (kHz) であることが条件として挙げられ、また IGBT の耐圧から一次電圧が 1000 (V) を超えないことが挙げられる。以上の条件よりトランス段数が 10 段、巻数比 4:8 の時は 11 (kV) を発生することができるが立上り時間が 100 (ns) を超える 168 (ns) のため除外される。また同様に一次電圧が 1200 (V) 以上となり得るトランス段数が 10 段、巻数比 4:2 の場合も除外される。

表 4 最大電圧波高値と最速短上り時間

Table. 4 Maximum voltage and most fast rise time

Number of multiple transformers	Primary winding (Turn)	Secondary winding (Turn)	Primary voltage (V)	Secondary voltage (kV)	Rise time (ns)
1	4	24	1120	10.0	69.1
2	4	20	1000	11.6	93.5
2	4	16	1102	10.8	69.4
5	4	11	700	11.0	96.1
5	4	8	900	9.3	58.1

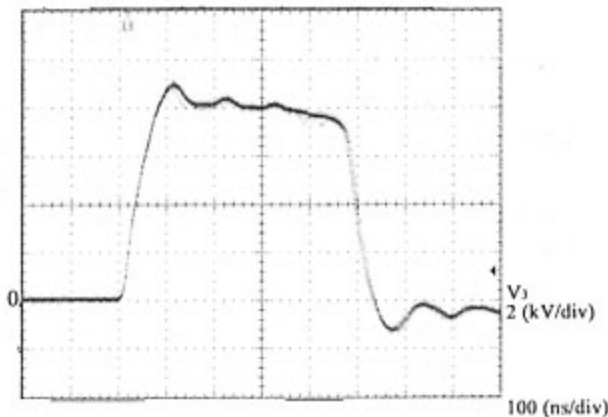


図 12 トランス 5 個、巻数比 4 : 8 の電圧波形

Fig. 12 Voltage waveform of trance 5, winding ratio 4 : 8

Table. 4 に二次電圧波高値が 9 (kV) 以上、立上り時間が 100 (ns) 未満の実験データを列挙する。条件を満たしているデータに優劣を付けることは困難である。Fig. 10 よりトランスの段数が多くなるにつれて立上り時間は短くなることを示した。一般に提案するトランスの構成では、段数を多くすることにより立上り時間の短縮化を図ることができる。以上のことから Table. 4 で列挙したデータからはトランス 5 段、巻線比 4 : 8 のときに二次電圧波高値が 9.3 (kV)、立上り時間 58 (ns) を示したデータが最良であると考えられる。Fig. 12 にそのときの出力電圧波形を示す。

5. まとめ

高電圧パルス発生装置のための昇圧トランスとして二次巻線貫通形多重トランス方式の有効性を示した。多重トランスの段数と巻数比に対する出力特性の比較において、トランス 10 段、5 段のときの系統的なデータを取得し出力電圧波高値と立上り時間の段数及び巻数依存性を明らかにした。

また、巻線構成に対する出力特性の比較では貫通方式と各コアに巻き電氣的に直列接続する方法の比較を行い前者の方が電圧波高値が 1 (kV) 高いという結果を得た。ここで二次側の巻数が全体を通して少なかったために立上り時間に大きな差異は発生しなかった。

最後に磁束密度を一定としトランスの段数と巻数比を変化させた場合の比較では、トランスの段数を多くすることにより立上り時間が短くなることを実証した。これは二次巻線の巻数が少なくなることが最大の要因であると考えられる。提案する手法の有効性が以上の実験により示した。

最後に目標仕様を実現する条件を列挙し、それを達成したデータを挙げた。前に述べたようにトランスの段数が多い場合に立上り時間が短くなることから本稿では

トランス 5 段、巻線比 4 : 8 の時が最適設計点であると判断した。

今後の課題としては出力パルスの立上り時間などに影響を及ぼす設計パラメータの追求が挙げられ、これを解決するために高周波高電圧での測定法を検討すべきである。また今回使用したトロイダルコアは比較実験を行うため窓面積の大きなものを使用したため本稿での最適設計点で占積率を低くせざるを得ず、漏れインダクタンスの増大を助長する結果となった。今後、この点を改善することにより、さらに良い出力特性が得られると考えられる。また、コアの材質に関しても、さらに透磁率が高く、飽和磁束密度が大きく、周波数特性の良いものを使用することにより特性の改善を図ることが可能であると考えられる。

文 献

- [1] Formation of nitroethylene during selective catalytic reduction of NO₂ by C₂H₄ over H-ferrierite, Chemical Communications, pp.173-174(2000)
- [2] Search Zn, Al, Rh-mixed oxides derived from hydrotalcite-like compound and their catalytic properties for N₂O decomposition, Applied Catalysis B: Environmental, vol.13, pp. 197-203 (1997)
- [3] I.Takahashi, Project of Next² Generation D-D Converters: "Proposal of a Switching Power Supply of Next² Generation", National convention record I.E.E. JAPAN, 4-030, pp.36 (2003)
高橋 勲, 次々世代 D-D コンバータ開発プロ:「次々世代スイッチング電源の提案 (0.5V 200A 3mm)」電気学会全国大会, 4-030, pp.36 (平成 15)
- [4] H.Maeoka, T.Noguchi: "Study on Windings Structure and Output Characteristics of Multiple Transformers in High-Voltage Pulse Power Supply", IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 1, 101, pp.487-488, (2004)
前岡宏信, 野口季彦:「高電圧パルス電源における多重トランスの巻線構造と出力特性に関する検討」電気学会産業応用部門大会, Vol. 1, 101, pp.487-488 (平成 16)
- [5] N.Tsuji, S.Kondo: "Development of High Efficiency Low Voltage / High Current DC Power Supply", Industry Electric and Electronic Application, IEE Japan, SPC-03-141, pp.45-50(2003)
辻 修立・近藤正示:「薄型トランスを用いた低圧大電流 DC 電源の高効率化」電気学会半導体電力変換研究会, SPC-03-141, pp.45-50 (平成 15)
- [6] 環境省:「平成 16 年版循環型社会白書」

原稿受付日

平成 16 年 12 月 21 日