The Magnetics Society of Japan

日本応用磁気学会誌 24, 791-794 (2000)

二次巻線並列形ブリッジ結合磁路を利用したパラメトリック変圧器

New Parametric Transformer Utilizing Bridge-Connected Magnetic Circuit with Parallel Secondary Winding

岡沼信一・関根宏・早坂明夫・一ノ倉理*

福島大学教育学部、福島市松川町浅川字直道2番地

*東北大学工学部、仙台市青葉区荒巻字青葉

S. Okanuma, H. Sekine, A. Hayasaka, and O. Ichinokura*

Faculty of Education, Fukushima Univ., *Matsukawa-machi, Fukushima 960-1296*

*Faculty of Engineering, Tohoku Univ., *Aramaki, Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579*

(1999年10月27日受理、2000年1月25日採録)

In a previous paper, we presented a parametric transformer constructed using a pair of bridge-connected magnetic circuits, which consist of toroidal cores and U-form cores. The amplitude of the transformer output voltage can be controlled by dc current flow in the U-form core windings. The waveform of the output voltage, however, is not sinusoidal because the magnetic characteristics of two toroidal cores are asymmetric due to the U-form cores. In this paper, we describe a new parametric transformer utilizing a bridge-connected magnetic circuit with parallel secondary winding. Magnetic symmetry is maintained because of the effect of secondary winding arrangements in the parametric transformer.

Key words: bridge-connected magnetic circuit with parallel secondary winding, U-form core, toroidal core, parametric transformer

1. はじめに

パラメトリック発振現象を利用したパラメトリック変圧器は，線間電圧調整，過負荷保護機能，双方向性の電気的ノイズ除去機能を有し，さらに正弦波状の出力電圧が得られるなどの特徴があるため，特に高信頼度の要求される機器の電源装置として，その応用が期待されている[1)~7)]．

筆者らは先に，トロイダル磁心とU形磁心で構成したブリッジ結合磁路を用いた二鉄心型パラメトリック変圧器を提案し，U形磁心に施された制御巻線の直流電流値により，発振出力電圧の振幅値が制御可能であるため，可変出力電圧機能を有するパラメトリック変圧器として，電源装置への応用が可能であることを報告した[8),9)]．しかし，このパラメトリック変圧器は，制御時の発振電圧波形の一部分が歪むという問題がある[8)]．これは，一次巻線と二次巻線をU形磁心で分割されたトロイダル磁心の磁路に分けて巻いているため，一方の磁路が飽和すると，他方の未飽和磁路の磁束がU形磁心に流れ込む期間が存在し，二次巻線のインダクタンス値が，一次巻線側磁路と二次巻線側磁路が飽和した場合で異なるためと考えられる．本論文では，この問題を解決するために二次巻線を並列に接続し，トロイダル磁心の未飽和磁路からU形磁心への交流磁束の流れを遮断することができるブリッジ結合磁路を考案し，これを用いて構成したパラメトリック変圧器の基本動作ならびに基礎特性について実験及び検討を行った．本論文は，これらの成果について報告するものである．

2. 二次巻線並列形ブリッジ結合磁路の磁心動作

Fig. 1(a) に，二次巻線並列形ブリッジ結合磁路の磁心構成を示す．図中，Aは角形ヒステリシス特性のトロイダル磁心で，BはU形磁心である[10)]．巻線構成をFig. 1(b)に示す．トロイダル磁心の磁路＃1及び＃2に施された巻線 N_1，N_2は各々一次，二次巻線である．二次巻線 N_2は，図示のように並列に接続される．N_Cは制御巻線で，直流電流 I_Cを流す．v_1，v_2は入出力電圧である．この回路では，I_CによりU形磁心で発生した直流磁束がトロイダル磁心の磁路＃1及び＃2を分流し，＃1および＃2の磁束を正及び負の方向にバイアスするため，＃1，＃2は入力電圧 v_1の正負の半周期ごと交互に飽和する．

Fig. 2は入力電圧 v_1の一周期における磁心動作を等価的に表したものである．同図(a)，(b) が v_1の正の半周期，(c)，(d) が負の半周期を示す．いま，(a) のように v_1の正の半周期でトロイダル磁心が未飽和の場合，＃1及び＃2には図の矢印の向きに磁束 ϕが発生する．一方，I_CによりU形磁心で発生した直流磁束 Φ_Cが＃1，＃2を分流し，＃1の磁束を正方向にバイアスするため，＃1は (b) のように正の半周期のある時刻に飽和する．＃1が飽和すると，未飽和の＃2はU形磁心と閉磁路を構成するが，飽和した＃1の出力巻線 N_2が短絡巻線として働き，＃1からU形磁心への交流磁束の流れを遮断する．次いで，v_1の負の半周期でも同様に＃2が飽和し，＃2の出力巻線 N_2が短絡巻線となる．このように，磁路＃1及び＃2のいずれが飽和しても，飽和した磁路の

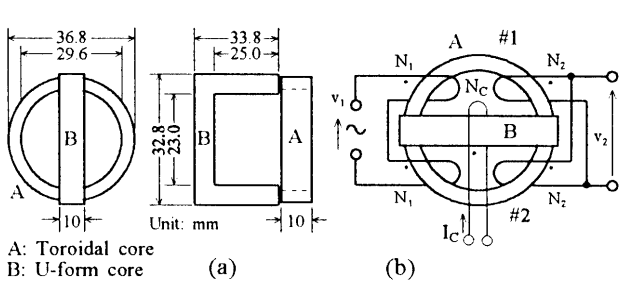

Fig. 1 Schematic diagram of a bridge-connected magnetic circuit with parallel secondary winding. (a) Core structure. (b) Basic circuit.

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

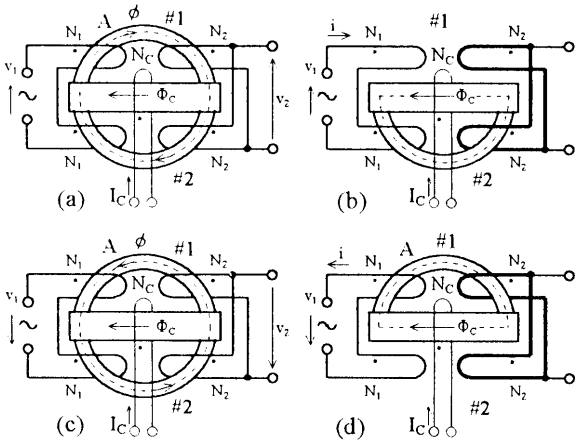

Fig. 2 Equivalent circuits for a period of input voltage.

出力巻線N_2が短絡巻線として働き，残った未飽和磁路からU形磁心への交流磁束の流れを妨げる．

Fig. 3(a) に，直流電流I_Cの値を変化させた場合のトロイダル磁心の磁気特性測定例を示す．ただし，トロイダル磁心としてはアモルファス ($Fe_{4.7}Co_{70.3}Si_{15}B_{10}$) を，U形磁心はMn-Znフェライトを使用した．測定回路をFig. 3(b)に示す．励磁周波数を20 kHzとした．nは磁束検出用の巻線である．Fig. 3(a) より，I_Cの値を増加させると，良好な角形ヒステリシス特性を保ったまま飽和磁束値が見掛け上減少しており，トロイダル磁心の飽和磁束値制御特性が良好であることがわかる。Fig. 4(a) は，比較のため，二次巻線を開放した場合の磁気特性の測定例を示したものである．測定回路をFig. 4(b)に示す．Fig. 4(a) を見ると，I_Cの値により見掛けの飽和磁束値は減少するが，U形磁心の影響により飽和領域での磁束の変化が大きいことがわかる．この結果からも，二次巻線N_2を並列に接続することは，トロイダル磁心からU形磁心への磁束の流れを妨げるために有効であることがわかる．

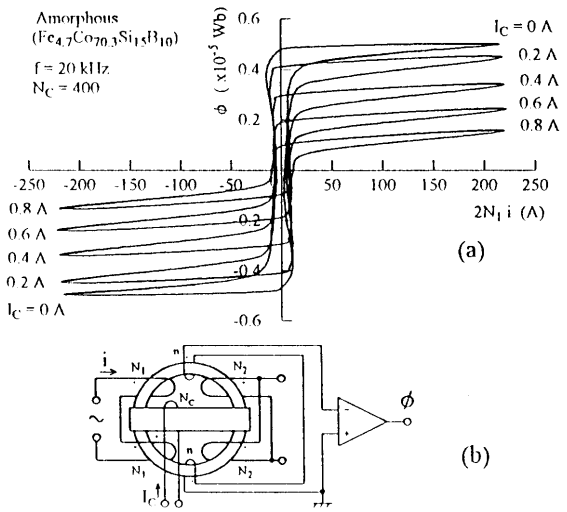

Fig. 3 ϕ - Ni loops of toroidal core for various values of I_C. (a) ϕ - Ni loops. (b) Measuring circuit.

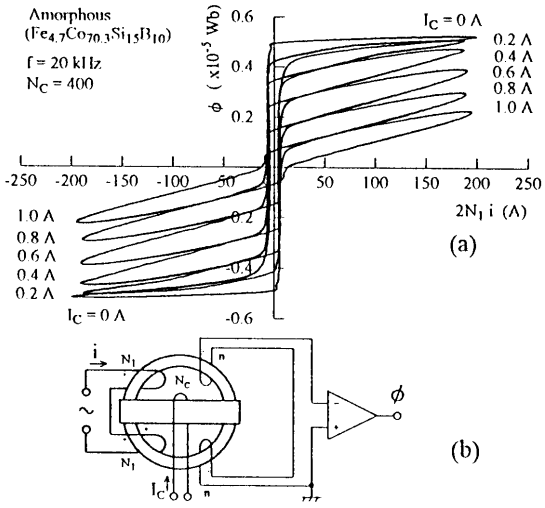

Fig. 4 ϕ - Ni loops of a toroidal core when the secondary windings were removed. (a) ϕ - Ni loops. (b) Measuring circuit.

3. 二次巻線並列形ブリッジ結合磁路を利用したパラメトリック変圧器の構成及び基本動作

Fig. 5に，二次巻線並列形ブリッジ結合磁路を利用して構成したパラメトリック変圧器の磁心構成(a) と基本回路 (b) を示す．磁心は，角形ヒステリシス特性のトロイダル磁心A_1，A_2と，制御磁心B_1，B_2で構成される．基本回路は，見やすさのため，図 (a) の点線x-yで切り開いた状態で表されている．図中，N_1及びN_2は各々一次及び二次巻線で，Cは同調用のコンデンサである．v_1，v_2は各々電源電圧及び出力電圧である．この回路では，I_Cの値を増加すると，トロイダル磁心の飽和磁束値が見掛け上減少するため，パラメトリック発振出力電圧v_2の振幅値が減少する．また，トロイダル磁心A_1，A_2と制御磁心B_1，B_2が閉磁路を構成するため，A_1とA_2の飽和磁束値制御量は同一となる．

以下，直流電流I_Cと出力電圧のv_2の関係を明らかにするため，

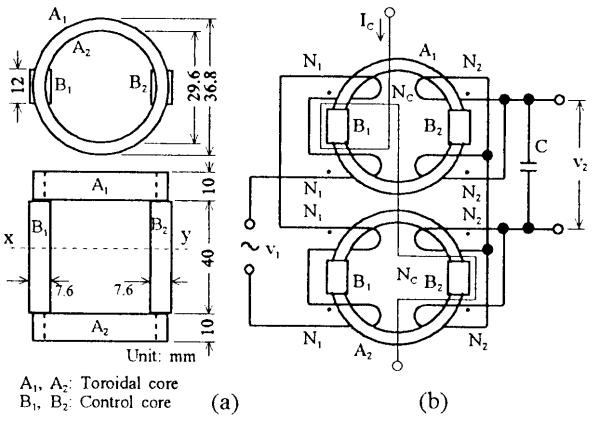

Fig. 5 Core structure and basic circuit of a new parametric transformer utilizing bridge-connected magnetic circuit with parallel secondary winding. (a) Core. (b) Basic circuit.

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

簡単な仮定に基づき動作解析を行う．すなわち，トロイダル磁心の磁気特性を $Ni=\alpha\phi^3$（α：係数，Ni：起磁力）で表し，制御磁心を $Ni=\phi/P_C$（P_C：パーミアンス値）で表す．Fig. 6に解析のための回路を示す．各部の電圧，電流及び磁束は図示の矢印の向きを正方向とする．以上の仮定より，Fig. 6の回路において，次の基本式を得る．

$$N_1 d(\phi_1+\phi_2+\phi_3+\phi_4)/dt=v_1, \quad (1)$$
$$N_2 d(\phi_1-\phi_3)/dt=v_2, \quad (2)$$
$$d(\phi_1-\phi_2)/dt=0,\quad d(\phi_4-\phi_3)/dt=0, \quad (3)$$
$$\phi_1-\phi_2=\Phi_C,\quad \phi_4-\phi_3=\Phi_C, \quad (4)$$
$$i_{21}+i_{22}=i_2,\quad i_{23}+i_{24}=i_2, \quad (5)$$
$$2N_1 i_1+N_2(i_{21}+i_{22})=\alpha(\phi_1^3+\phi_2^3)/2, \quad (6)$$
$$2N_1 i_1-N_2(i_{23}+i_{24})=\alpha(\phi_3^3+\phi_4^3)/2, \quad (7)$$
$$2N_C I_C-N_2(i_{24}+i_{22})=2(1/P_C)\,\Phi_C-\alpha(\phi_2^3-\phi_4^3)/2, \quad (8)$$
$$N_2(i_{21}+i_{23})+2N_C I_C=2(1/P_C)\,\Phi_C+\alpha(\phi_1^3-\phi_3^3)/2, \quad (9)$$
$$dv_2/dt+(1/C)\,i_2=0. \quad (10)$$

この基本式の中で，二次巻線 N_2 を並列接続としたため，制御磁心内の磁束 Φ_C が直流磁束であることは，(3)，(4)式により明らかである．次いで，(4)式を変形して次式のように書き換える．

$$\phi_1+\phi_3=\phi_2+\phi_4,\quad \phi_2-\phi_3=\phi_1-\phi_3-\Phi_C. \quad (11)$$

(11)式の左式における $\phi_1+\phi_3$ は，(1)式より電源電圧 V_1 により励磁される磁束の1/2を表す．一方，(11)式の右式内の $\phi_2-\phi_3$ は，(2)式及び Φ_C が直流磁束であることから，出力電圧 v_2 を発生させる交番磁束を表している．従って，基本式において，$\phi_1+\phi_3=y$ 及び $\phi_2-\phi_3=x$ なる変換を行って整理すると，次式を得る[11]．

$$d^2x/dt^2+(\alpha/8CN_2^2)\{3y^2x+x^3+3(P_C N_C I_C)^2 x\}=0. \quad (12)$$
$$2N_1(dy/dt)=v_1,\quad N_2(dx/dt)=v_2. \quad (13)$$

(12)，(13)式より，基本波成分に着目した調和平衡法[2]を用いて v_2 を求める．即ち，$v_1=\sqrt{2}\,V_1\sin\omega t$，$v_2=\sqrt{2}\,V_2\sin(\omega t+\theta)$ と仮定して(12)，(13)式に代入し，満足する V_2 と θ を求めると，次式を得る．

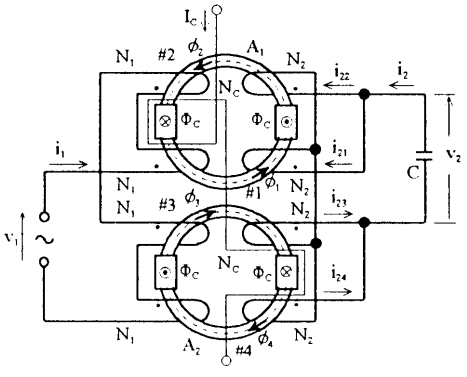

Fig. 6 Circuit for analysis.

$$V_2=(\omega N_2/\sqrt{2})\,\{(32\omega^2 CN_2^2/3\alpha)-(V_1/\sqrt{2}\,\omega N_1)^2-4(P_C N_C I_C)^2\}^{1/2}, \quad (14)$$
$$\theta=\pm\pi/2. \quad (15)$$

(15)式を見ると，出力電圧 v_2 の振幅値は I_C の関数であり，I_C の値を増加させれば，v_2 の振幅値が減少する傾向にあることがわかる．

4. 出力電圧制御特性

Fig. 7に，直流電流 I_C の値を変化させた場合の電源電圧 v_1 と出力電圧 v_2 の観測波形を示す．ただし，トロイダル磁心はアモルファス($Fe_{4.7}Co_{70.3}Si_{15}B_{10}$)を，制御磁心はMn-Znフェライトを使用し，$N_1$=75，$N_2$=75，$N_C$=400，$C$=0.09 μF とした．Fig. 8は，比較のために，従来のブリッジ結合磁路を用いたパラメトリック変圧器の回路構成と入出力電圧観測波形を示したものである[8]．これらを見ると，本方式によるパラメトリック変圧器では，制御時における出力電圧の波形が改善されていることがわかる．

Fig. 9は，種々の直流電流 I_C の値に対する無負荷入出力電圧特性の測定例を示したものである．図中，上下点線の矢印は，発振開始及び停止点を示す．一方，V_1 と V_2 の関係については，先の解析結果より，(15)式を変形して次式が得られる．

$$(V_2/\omega N_2)^2+(V_1/2\omega N_1)^2=(16\omega^2 CN_2^2/3\alpha)-2(P_C N_C I_C)^2. \quad (16)$$

(16)式を見ると，V_1 と V_2 の関係は円の方程式となっており，直流電流 I_C の値を増加すれば，円の半径が小さくなることがわかる．

Fig. 10に，電源電圧 V_1 の値を一定として，I_C の値に対する出力電圧 V_2 の関係の測定例を示す．これを見ると，出力電圧の制御

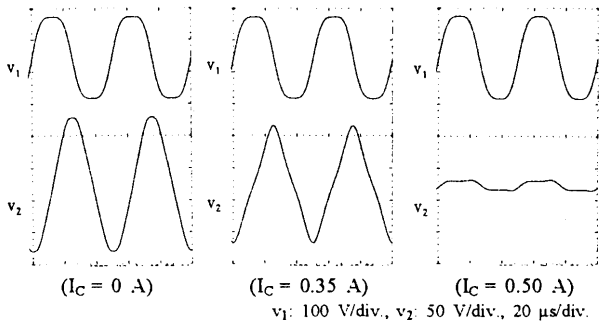

Fig. 7 Voltage waveforms observed in the parametric transformer.

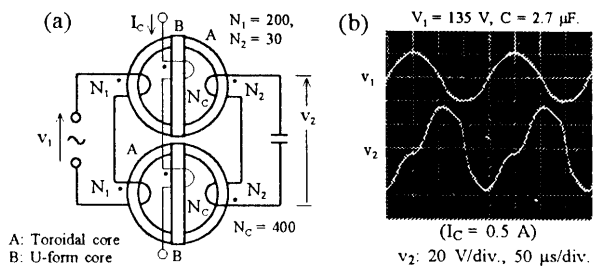

Fig. 8 Previous circuit of parametric transformer and its voltage waveforms. (a) Circuit. (b) Voltage waveforms.

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

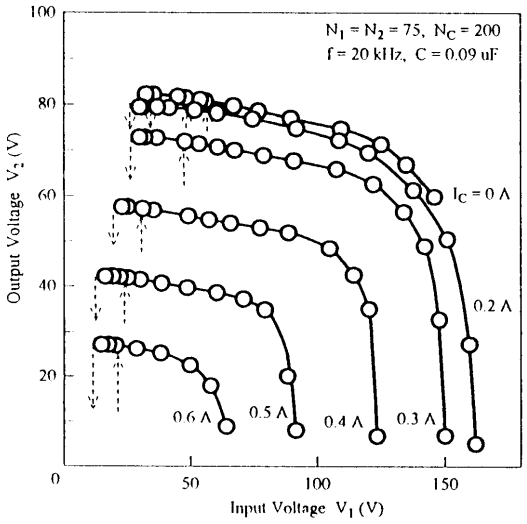

Fig. 9 Relationships between output voltage V_2 and supply voltage V_1 for various values of I_C.

特性は直線的ではないが，広い範囲にわたり V_2 の振幅値制御が可能であることがわかる．

Fig. 11 に，本変圧器の負荷特性の測定例を示す．ただし，I_L は同調用コンデンサの両端に接続した負荷抵抗を流れる出力電流

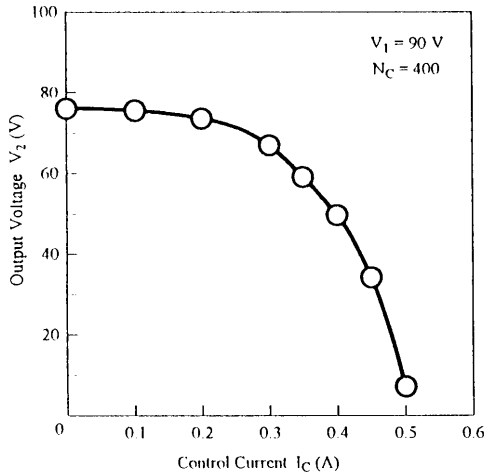

Fig. 10 Measured curve of the output voltage control.

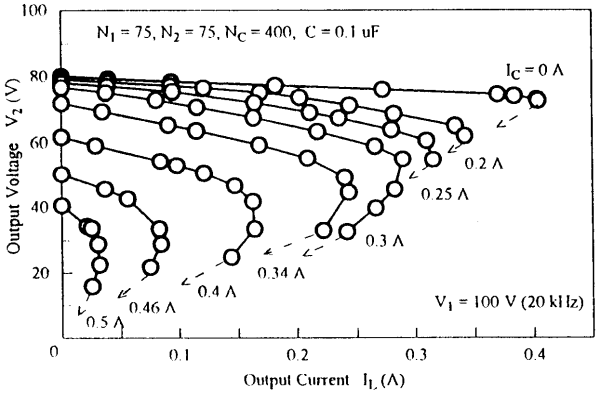

Fig. 11 Load characteristics of the parametric transformer.

の実効値である．これを見ると，負荷時においても I_C の値を増加させると，出力電圧 V_2 の値が制御可能であることがわかる．

5. あとがき

以上，二次巻線並列形ブリッジ結合磁路の磁心動作と，これを利用して構成したパラメトリック変圧器の基本動作ならびに基礎特性について検討を行った結果について報告した．

その結果，二次巻線並列形ブリッジ結合磁路は，出力巻線を並列接続化することによって，トロイダル磁心からU形磁心への交流磁束の流れを遮断することが可能であるため，トロイダル磁心の飽和磁束値制御特性が改善されること，従って，このブリッジ結合磁路を利用したパラメトリック変圧器では，出力電圧がほぼ正弦波状態を保ったまま，その振幅値が制御可能であることを明らかにした．本パラメトリック変圧器では，制御時においても磁心の角形性を保持し，かつ二鉄心型の構成であるため，並列接続された二次巻線を循環する短絡電流は小さく，これによる損失も小さいと考えている．

本変圧器は制御回路の構成が極めて簡単な可変電圧源として応用可能と思われる．

文　献

1) W. Z. Fam and R. P. Verma: IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, No. 6, 2494 (1972)
2) Z. H. Meiksin: IEEE Trans. Industry Applications, Vol. IA-10, No. 3, 428 (1974)
3) 別所，青木，竹内：電気学会全国大会，482 (1974)
4) 平井，原田：電気学会磁気応用研究会資料，AM-76-8 (1976)
5) 一ノ倉，村上：電気学会磁気応用研究会資料，AM-79-24 (1979)
6) 一ノ倉，村上：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-81-79 (1980)
7) 田島，一ノ倉，加賀，穴澤：磁気工学研究会資料，94-2-2 (1991)
8) 岡沼，一ノ倉，村上：昭和５７年度電気関係学会東北支部連合大会資料，2E10 (1982)
9) Okanuma, O. Ichinokura, and K. Murakami: IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-20, No. 5, 1777 (1984)
10) 村上：磁気応用工学，朝倉書店，第９章 (1984)
11) 志村：非線形回路理論，昭晃堂，第３章 (1977)

NII-Electronic Library Service