

新方式高周波トランスの提案
A New Type High Frequency Transformer

齊藤 兆古
Y. Saito

法政大学 工学部
College of Engineering, Hosei University

1. まえがき

交流電圧を高電圧から低電圧、または低電圧から高電圧に変圧する場合、また直流的に一次と二次を絶縁しようとする場合などに用いられる電気機器として変圧器がある。変圧器は小型の電子機器から大規模な変電所まで広範に使用されており、現代文明を支える機器の重要な一要素と言っても過言でない。磁性材料や絶縁材料の進歩に伴って変圧器も大きな改良が積み重ねられて来たが、依然としてより大きな改良の必要性が、電子機器の小型化と共に高まっている。特に、集積回路技術の進歩により、電気信号を取り扱う部分は極度な小型化が実現されているにもかかわらず、電子回路に電力を供給する電源部は、トランスやチョークコイルなどのため、小型化が遅れている。ちなみに、大規模な信号を扱うデジタル計算機においては、その全体積の約半分が電源部である。電源を小型化する一方法として、動作周波数の高周波化が行われている。この高周波化に伴う小型化のために、積層形のマイクロ磁心を用いた平板状トランスなどが提案され、その実用化が急がれている [1-3]。また、高周波特性の優れたアモルファス磁性材料を用いた変圧器も試作されている [4]。

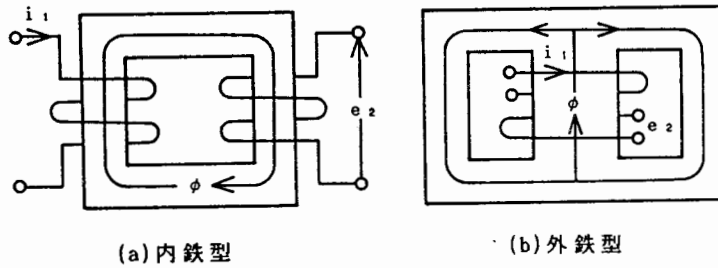
変圧器の動作周波数を上げることで理論上小型化は可能であるが、磁束の主磁路を構成する磁性材料の高周波特性によって動作周波数の上限が制限されるため、本質的な解決は磁性材料を用いない空心で漏れ磁束の少ない一次・二次間の結合が密な変圧器の開発が理想となる。比較的高周波特性の良好な磁性材料であるフェライトにおいても、MHz帯以上の動作では透磁率が小さく実質的に空心と同じ動作となり、さらに材料のうず電流やヒステリシス損失が増加し、磁性材料を用いる利点が失われてしまう [5-7]。

本稿はこのような現状に鑑み、究極の目的である空心変圧器を実現化する新方式の高周波変圧器を提案するものである。基本的な原理は、従来漏れ磁束として扱われていたコイルを取り囲む磁束を用いて一次と二次コイルを結合させんとすることにある。この原理に基づき、試作したプロトタイプの初期実験結果を報告する。

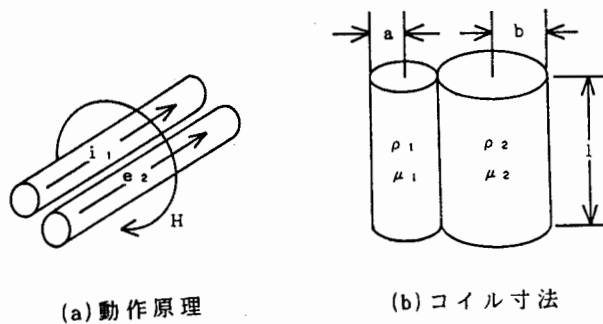
2. 新方式変圧器

2. 1 基本原理

新方式変圧器の動作原理を示すまえに、従来の変圧器の動作原理と構成を述べておく。従来の変圧器は、第1図に示すように磁束の通り易い高透磁率磁性材料を用いた磁路（磁気コア）の周辺にコイルを巻き、一次に流れる電流 i_1 によって磁界 H ひいては磁束 ϕ を作り、この磁束 ϕ を二次コイルに鎖交させて二次電圧 e_2 を発生させる。第1図 (a) と (b) のどちらの型式も、本質的にループ状に巻かれたコイル中を通過する磁束を前提として変圧器が構成されている。このように、磁束の通る経路を磁性材料を用いて作り、この磁気コアにコイルを巻く型式が従来の変圧器の構成法であり、過去に製作された変圧器は大部分がこの型式に属する。また、近年開発されている平板状トランスも平板上に巻いたコイルから発生する平板に垂直方向の磁束を利用して一次と二次間を結合させている [1-3]。



第1図 従来の変圧器の構成



第2図 新方式変圧器の構成

第2図に示すように、ループコイルを伸ばし直線状にし、一次と二次コイルを平行に並べた場合の電磁誘導について考える。第2(a)図から分かるように、一次コイルに流れる電流 i_1 の作る磁界 H は結果として、 i_1 を取り囲む磁束 ϕ を作る。このため、一次コイルに平行に配置してある二次コイルに誘導電圧 e_2 を発生する。すなわち、Ampereの法則によって生ずる一次コイル周辺の磁界 H を直接二次コイルに鎖交させて、Faradayの法則によって二次誘起電圧を得る。これが、本稿で提唱する新方式の動作原理である。

2. 2 基礎理論

2.2.1 抵抗と内部インダクタンス

第2(c)図で、一次・二次コイル両者共、同一材料で作られたコイルとする。コイルの抵抗率と透磁率をそれぞれ ρ 、 μ_0 とし、電源角速度を ω とすれば、一次直流抵抗 R_{D1} は

$$R_{D1} = \frac{\rho l}{\pi a^2}, \quad (1)$$

で与えられ、交流抵抗 R_{A1} と一次コイル内部インダクタンス L_{11} は、 I_0 を0階第1種変形Bessel関数として、

$$\frac{1}{R_{D1}} (R_{A1} + j\omega L_{11}) = \frac{k_1 a}{2} \frac{I_0(k_1 a)}{I_0'(k_1 a)}. \quad (2)$$

より与えられる。ここで k_1 は

$$k_1 = a \sqrt{\frac{\mu_0 \pi \omega}{2\rho}}, \quad (3)$$

である[8]。

a) 低周波領域

電源角速度 ω が小さく、従って k_1 が小さいとき、(2)式は、

$$\frac{1}{R_{D1}} (R_{A1} + j\omega L_{11}) = 1 + j k_1^2 + \frac{1}{3} k_1^4 - j \frac{1}{6} k_1^6 + \dots \quad (4)$$

と展開できるため、 R_{A1} と L_{11} は

$$R_{A1} \cong R_{D1} \left(1 + \frac{1}{3} k_1^4\right). \quad (5a)$$

$$L_{11} \cong \frac{\mu_0 l}{2} \left(1 - \frac{1}{6} k_1^4\right). \quad (5b)$$

で与えられる。

b) 高周波領域

電源角速度 ω が大きく、従って k_1 が大きいとき、(2)式は、

$$\frac{1}{R_{D1}} (R_{A1} + j\omega L_{11}) = (1+j) + \frac{1}{4} + \frac{3}{32(1+j)k_1} + \dots, \quad (6)$$

と展開できるため、 R_{A1} と L_{11} は

$$R_{A1} \approx R_{D1} \left(\frac{1}{4} + k_1 + \frac{1}{64} \frac{1}{k_1^3} \right), \quad (7a)$$

$$L_{11} \approx \frac{\mu_0 l}{2} \left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{64} \frac{1}{k_1^3} \right), \quad (7b)$$

で与えられる。

2.2.2 相互インダクタンスと自己インダクタンス

電流が各コイル軸を中心として対称に分布すると仮定した場合、第2(b)図の一次・二次コイル間の相互インダクタンス M は

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} l \left\{ \log \left(\frac{2l}{a+b} \right) - 1 \right\}, \quad (8)$$

で与えられ、一次コイルの自己インダクタンス L_1 は

$$L_1 = L_{11} + \frac{\mu_0}{2\pi} l \left\{ \log \left(\frac{2l}{a} \right) - 1 \right\}, \quad (9)$$

で与えられる[9]。

二次コイルの自己インダクタンス L_2 も(9)式と同様にして、

$$L_2 = L_{12} + \frac{\mu_0}{2\pi} l \left\{ \log \left(\frac{2l}{b} \right) - 1 \right\}, \quad (10)$$

で与えられる。ここで、 L_{12} は二次コイルの内部インダクタンスであり、

$$k_2 = b \sqrt{\frac{\mu_0 \pi \omega}{2\rho}}, \quad (11)$$

として、次式で与えられる。

$$\text{低周波:} \quad L_{12} \approx \frac{\mu_0}{2} l \left(1 - \frac{1}{6} k_2^4 \right), \quad (12a)$$

$$\text{高周波:} \quad L_{12} \approx \frac{\mu_0}{2} l \left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{64} \frac{1}{k_2^3} \right), \quad (12b)$$

2.2.3 結合係数 k と変圧比 c

一次と二次コイル間の結合係数 k は次式で定義される。

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (13)$$

従って、低周波領域の結合係数 k_L は、 $k_1 = k_2 = 0$ として、

$$k_L = \frac{\frac{1}{\pi} \left\{ \log \left(\frac{2l}{a+b} \right) - 1 \right\}}{\sqrt{\left[1 + \frac{1}{\pi} \left\{ \log \left(\frac{2l}{a} \right) - 1 \right\} \right] \left[1 + \frac{1}{\pi} \left\{ \log \left(\frac{2l}{b} \right) - 1 \right\} \right]}}, \quad (14)$$

となる。他方、高周波領域の結合係数 k_H は、 $k_1 = k_2 = \infty$ として、

$$k_H = \frac{\log \left(\frac{2l}{a+b} \right) - 1}{\sqrt{\left\{ \log \left(\frac{2l}{a} \right) - 1 \right\} \left\{ \log \left(\frac{2l}{b} \right) - 1 \right\}}}, \quad (15)$$

となる。

次に、変圧比 c は、 v_1 と v_2 をそれぞれ一次印加電圧と二次誘起電圧として、次式で定義されるとする。

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{v_2}{v_1} \\
 &= \frac{\omega M}{\sqrt{R_{A1}^2 + (\omega L_1)^2}} \\
 &= \frac{M}{L_1} \frac{1}{\sqrt{(R_{A1}/\omega L_1)^2 + 1}} \quad (16)
 \end{aligned}$$

(16)式で $(R_{A1}/\omega L_1)$ の項は、低周波では

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} (R_{A1}/\omega L_1) = \infty, \quad (17)$$

となって、(16)式の変圧比 c は零となる。しかし、高周波では、

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} (R_{A1}/\omega L_1) = 0, \quad (18)$$

となる。従って、変圧比 c は、高周波で、

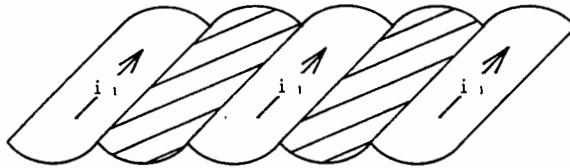
$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} c = \frac{M}{L_1}, \quad (19)$$

となる。よって、一次・二次共に同一コイルで作られているとすれば、高周波における変圧比 c は、 $L_1 = L_2$ であるから、結合係数は k_H に等しい。

2. 3. 実験

2.3.1 基本構成 (ツイスト コイル)

第2図に示してあるように単純に一次コイルと二次コイルを平行に並べるだけでは、一次と二次間の結合が弱く実用性に乏しい。このため、第3図に示すように一次と二次コイルを捻る(ツイストする)ことによって一次と二次間の結合が高められる。また、変圧比は長い方のコイルを往路と帰路の電流方向が一致するように重ねて巻くことで調整できる。このツイストコイルを新方式変圧器の基本構成とする。



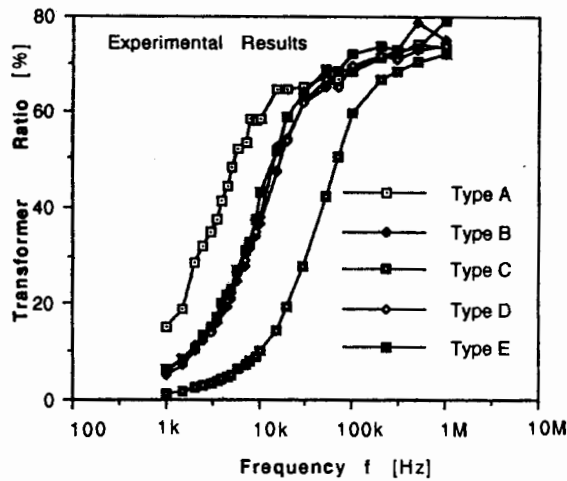
第3図 ツイスト コイル

2.3.2 基礎実験

試作したツイスト コイルは第1表に示すA～Eの5種類である。

第1表 試作ツイスト コイル

タイプ	長さ l [m]	コイル径 [mm]	ツイスト数 N	結合係数
A	$l_1 = 3$ $l_2 = 3$	$2a = 0.8$ $2b = 0.8$	350	$k_L = 0.653$ $k_H = 0.920$
B	$l_1 = 3$ $l_2 = 3$	$2a = 0.4$ $2b = 0.4$	350	$k_L = 0.674$ $k_H = 0.926$
C	$l_1 = 3$ $l_2 = 3$	$2a = 0.2$ $2b = 0.2$	350	$k_L = 0.692$ $k_H = 0.931$
D	$l_1 = 2$ $l_2 = 2$	$2a = 0.4$ $2b = 0.4$	350	$k_L = 0.662$ $k_H = 0.922$
E	$l_1 = 3$ $l_2 = 3$	$2a = 0.4$ $2b = 0.4$	700	$k_L = 0.674$ $k_H = 0.926$



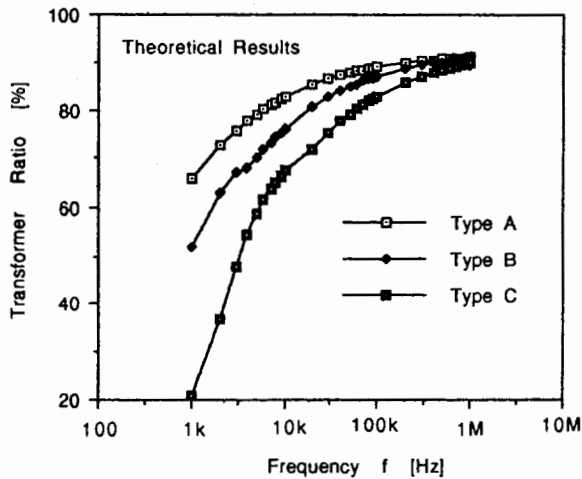
第4図 二次に負荷抵抗10[kΩ]を接続した場合の変圧比c対周波数f間の特性

第1表の試作ツイスト コイルそれぞれの二次に10[kΩ]の純抵抗負荷を接続し、一次印加電圧 v_1 の周波数 f を1[kHz]から1[MHz]まで変化し、変圧比 $c = (v_2 / v_1) \times 100 [\%]$ を測定した。その結果を第4図に示す。尚、二次を解放し無負荷とした場合の変圧比 c 対周波数 f の特性も測定したが、第4図の結果とほとんど同じであった。また、第1表のタイプA,B,C間では顕著な周波数特性の違いが第4図からわかる。しかし、タイプB,D,Eはほとんど同一周波数特性となることがわかる。

2.2.3節で述べたように低周波領域では、変圧比 c は零に近づくことが第4図からわかる。しかし、高周波領域では、第1表中の結合係数 k_H の理論値より小さく、タイプA~Eのいずれの結果も、 k_H と k_L の間の値 $c = 70 \sim 80 [\%]$ となっている。これは、2.2節で展開した理論が、一次・二次コイルの相互作用を無視して電流が各コイル軸に対称に分布すると仮定しているためと考えられる。

タイプA,B,C間の違いはコイル径である。タイプA,B,Cの順に細いコイル径であり、第4図の結果はコイル径が大きい程、周波数 f に対して変圧比 c が早く立ち上がることを示している。これは、(16)式で $R_{A1} / \omega L_1$ を考えたとき、 $k_1 \rightarrow \infty$ として、

$$\begin{aligned} \left. \frac{R_{A1}}{\omega L_1} \right|_{k_1=\infty} &= \frac{\frac{\rho l_1}{\pi a^2} \left(\frac{1}{4\omega} + \frac{a}{\sqrt{\omega}} \sqrt{\frac{\mu_0 \pi}{2\rho}} \right)}{\frac{\mu_0}{2\pi} l_1 \left\{ \log \left(\frac{2l_1}{a} \right) - 1 \right\}} \\ &= \frac{2 \frac{\rho}{\mu_0} \left(\frac{1}{4 a \omega} + \frac{1}{a \sqrt{\omega}} \sqrt{\frac{\mu_0 \pi}{2\rho}} \right)}{\log \left(\frac{2l_1}{a} \right) - 1} \end{aligned} \quad (20)$$



第5図 二次を解放した場合の変圧比 c 対周波数 f 特性の(16)式による理論値

となる。従って、コイルの半径 a が角周波数 ω の増加を加速する役割を行い、コイル径が大きい程、変圧比 c が結合係数 k_H に早く到達するためと考えられる。また、(20)式の分母におけるコイル長 l_1 の影響は、第4図中のタイプDの結果から、比較的小さいことがわかる。

第5図に二次を解放した場合の、変圧比 c 対周波数 f の特性をタイプA,B,Cについて(16)式により計算した結果を示す。第5図の理論値は第4図の実験値と周波数に対する定性的な特性はよく一致し、タイプAからB,Cと順に低い周波数から立ち上がっている。このことから、ツイストコイルによる変圧器の動作は、導体の表皮効果によって支配され、2.2.節で述べた理論が妥当であることがわかる。第4図と第5図の大きさが一致せず、理論値が実験値より大きくなる原因は、実験値は二次に $10[k\Omega]$ の負荷抵抗を有し、負荷抵抗およびその周波数特性が理論値に含まれないことや、リード線部分が無視されていることに起因すると考えられる。

3. 結言

本稿では、一次・二次のコイルをツイストすることによりコイル周辺を取り囲む磁束を利用した新方式の高周波変圧器を提案し、理論および実験的検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 一次・二次コイル電流がそれぞれの軸に対称に分布すると仮定した理論で比較的良好に実験結果を説明できる。
- 2) コイル径を細くすれば、一次・二次間の結合は高められるが、動作周波数を高くしなければならない。
- 3) コイル径を大きくすれば、一次・二次間の結合は高くないが比較的low周波から動作することが可能となる。

以上、本稿では、基本構成であるツイストコイルによる変圧器動作について述べた。このツイストコイルをトロイダル状に巻くことや、鉄心を用いることで一次・二次間の結合が飛躍的に高められることを次報で報告する予定である。

参考文献

- [1] 山沢 他、電気学会 マグネチックス研究会資料、1985年 No.MAG-85-71.
- [2] 大城 他、電気学会 マグネチックス研究会資料、1988年 No.MAG-88-164.
- [3] K.Yamasawa & et al, IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-26, No.3, May (1990).
- [4] 霜村 他、電気学会 マグネチックス研究会資料、1988年 No.MAG-88-177.
- [5] S.Hayano & et al, J.Appl.Phys., in printing.
- [6] S.Hayano & et al, J.Appl.Phys., in printing.
- [7] 宮崎 他、電気学会 静止器・回転機研究会資料、1990年、SA-90-34 or RM-90-46.
- [8] F.Bowman 著、平野鉄太郎 訳、ベッセル函数入門、日新出版、昭和44年4月第3版.
- [9] 電気学会大学講座 電気磁気学、昭和40年4月第70版.

M
A
S