

パネル型電力用変圧器に関する基礎的検討

Basic Studies of The Panel Type Power Transformer

金子聡*、緑川洋一、早野誠治、齋藤兆古

S.Kaneko, Y.Midorikawa, S.Hayano, and Y.Saito

法政大学 工学部

College of Engineering, Hosei University

Previously we have proposed the high frequency transformer which utilizes the skin effect in the conducting materials.

This paper shows that, it is possible to improve the low frequency characteristics of our high frequency transformer by means of the shape optimization and employment of magnetic materials. Thus, we have succeeded in realizing the panel shape transformers for power use.

キーワード：パネル型変圧器、ツイストコイル型変圧器、表皮効果
(Panel type transformer, Twist coil type transformer, Skin effect)

1. まえがき

電力用変圧器は、交流電化が実現され始めた産業革命にまでその歴史を溯る事が出来る。現在でも、変圧器の動作原理と構造は、初期の形式と基本的には同一であり、技術的な改良は主として主磁路を形成する磁性材料、絶縁技術、冷却方式に対してなされた。

近年、電力用半導体の進歩と普及が変圧器の可変周波数駆動を促し、従来の商用周波数を前提とする変圧器設計の概念を見直す必要な時期に到達していると考えられる。特に、インバータ駆動の蛍光灯やプラズマディスプレイでは駆動周波数が数十kHzから数百kHzへ高周波化しつつあり、DC/DCコンバータではMHz帯でのスイッチングが実用化されつつある。また、インテリジェントビル等では電源機器の小型軽量化のために高周波配電も検討されつつある。

筆者等は、このような現状に鑑み、表皮効果を利用したフィルム状変圧器がスイッチング電源で充分実用可能であることを示し[1-6]、更にフィルム状リアクト

ルがノイズフィルター構成素子として有効であることを示した[3]。

本稿は、筆者等が提唱したフィルム状変圧器を低周波領域でも動作可能とし、究極は商用周波数で薄型・軽量のパネル型変圧器を実現する基礎的検討を行ったものである。さて、フィルム変圧器は平面状に一次と二次導体を交互に同心円状に巻く型式で構成されるが、フィルム状導体の幅を外側へ向かって変化させることで周波数特性が異なることが知られている[2]。本稿では、まず最初にフィルム変圧器の低周波特性改善にフィルム幅の効果を吟味する。次に本来フィルム変圧器は表皮効果で導体内部インダクタンスを減少し、一次・二次コイル間の結合を高くする原理に基づいているが、低周波では表皮効果による結合は期待できないため、磁性体を用いて磁束の流れを制御する方法を検討する。注意すべきは、従来型変圧器で磁性体は主磁路を形成するために用いられているのに対し、本稿の磁性体は磁束の流れを方向付けするために用いられる点にある。これは、変圧器を構成する磁性体の使用量を大幅に削減し、軽量化につながることを意味する。更に、電力用を前提としているため、フィルム状導体は熱拡散には有利であるが電流容量を大きくするには必然的に面積を広く取る必要があることと、積層する場合のフィルム間絶縁が困難であるため（絶縁を保つためフィルム導体間の距離を取ることで一次・二次間の結合が相反する）、一次・二次コイルにホルマル線を用い、互いにツイストしたツイストコイル型変圧器の低周波特性改善も試みた。

2. フラット型変圧器

2.1 動作原理 従来型変圧器は、図1に示すように閉磁路を形成する磁性体に一次・二次コイルを巻いた形式で作られる。これに対し、フラット型変圧器は、図2に示すように平面上に一次・二次コイルを交互に同心円状に巻く形式で作られる。

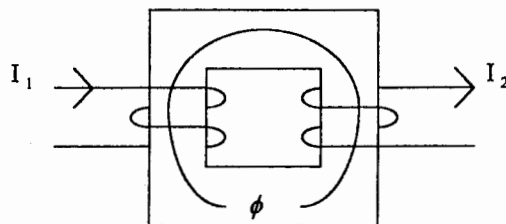


図1. 従来型(内鉄型)変圧器の構成

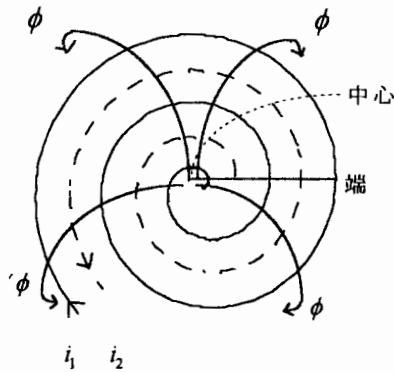


図2 フラット型変圧器の原理

図1の従来型変圧器では、主磁路が磁性体で形成されるため、低周波から高周波まで良好な一次・二次コイル間の結合が期待できる。しかし、磁束は必ず磁性体内を通過するため高周波時の鉄損増加による効率の低下は免れない。他方、フラット型は隣接する一次・二次コイル間の磁氣的結合を前提としているために、導体の内部インダクタンスが大きい低周波で高い結合は望めない。しかし、高周波では表皮効果で電流が表面に集中するため内部インダクタンスが減少し、一次・二次間の磁氣的結合は高められる。

さて、図1に示す従来型変圧器ではすべての巻線に鎖交する主磁束 ϕ が存在する。フラット型変圧器ですべてのコイルに鎖交する磁束は、実際は図2に示す程単純な磁束分布でなく、図3(a),(b)に示す様に周波数によって変化する[2]。



(a) 1 [kHz]

(b) 100 [kHz]

図3 フラット変圧器の磁束分布(計算値)

2.2. 試作フラット変圧器 フィルム幅の連続的な変化は一次・二次間の共通磁束の変化を促すことが判明している。これを実験的に検証するために図4に示す2種類の型式を試作した。図4(a)は外側へ行く程導体幅の広がる型式（以下、外広型と略記）であり、同図(b)は内側へ行く程、導体幅が広がる型式（以下、内広型と略記）である。表1に試作フラット変圧器の諸定数を示す。

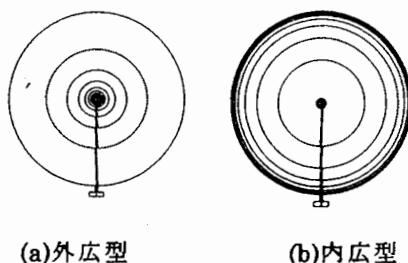


図4 試作フラット変圧器パターン

表1. 試作フラット変圧器の諸定数

	内径	外径	導体厚	積層枚数	結線方式
外広型	1.6[cm]	29.2[cm]	1[mm]	6	直列
内広型	1.6[cm]	29.2[cm]	1[mm]	6	直列

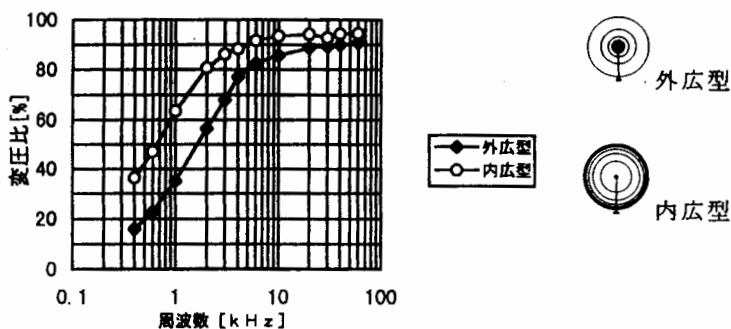
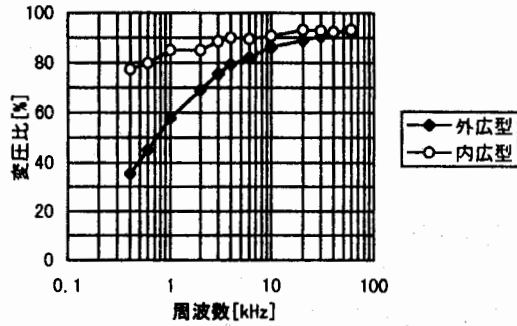
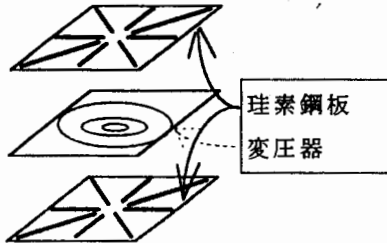


図5 フラット型変圧器の変圧比対周波数特性

図5に試作変圧器の周波数対変圧比（二次誘導電圧／一次印加電圧）特性を示す。図5から、内広型の方が大幅に低周波特性が改善されることがわかる。これは、同心円状に配置された導体で、内側ほど鎖交磁束が大きく、端部程鎖交磁束が少ないフラット変圧器の磁束分布特性（図3参照）から、内側の導体幅が広く

なることで表皮効果が加速された結果と考えられる。

次に図2に示すようにフラット変圧器を包み込む形に磁束分布を近づけるため、フラット変圧器を上下2枚の珪素鋼板でサンドイッチ状に挟み込むことを考える。珪素鋼板は磁束を方向付けるために用い、主磁路を形成するためでないことに注意を要する。図6(a)にサンドイッチ型フラット変圧器の概念図を示す、使用した珪素鋼板は、渦電流を低減するため、図6(a)に示す様に中心からスリットが入れている。



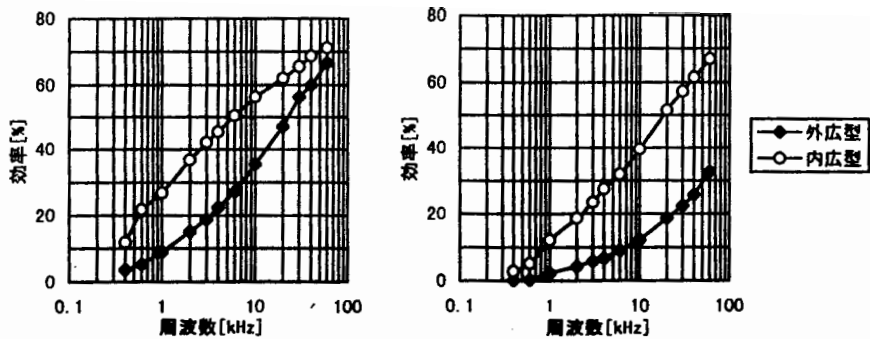
(a) 構造

(b) 周波数対変圧比特性

図6 サンドイッチ型フラット変圧器の構成と周波数対変圧比特性

図6(b)を図5と比較すれば、サンドイッチ構造によって大幅に低周波特性が改善され、インバータ蛍光灯やプラズマディスプレイにはほぼ実用化可能な特性といえる。また、珪素鋼板は磁束の方向付けには有効であるが、主磁路となっていないことが周波数の増加と共に変圧比の向上する特性から分かる。

図7に周波数対効率(=出力[w]/入力[w])特性を示す。表皮効果によって一次・二次間の結合が保たれるため、必然的に変圧器の内部抵抗は大きく、このため図7に示す周波数範囲では、インピーダンスマッチングが取れず最大効率に達していない。効率の向上は、上下層のコイル間接続を並列結線することで変圧器のインピーダンスを低減して実現可能である。



(a) 純抵抗負荷 6.2[Ω]

(b) 純抵抗負荷 25[Ω]

図7 サンドイッチ型変圧器の周波数対効率特性

3 ツイストコイル型変圧器

3.1. 試作ツイストコイル型変圧器 ツイストコイルを用いた変圧器を2型式試作した。一方は、ツイストコイルをソレノイド状に巻き、更にそれを図8(a)に示すように渦巻状に巻いた型式（以下、ソレノイド型と略記）である。他方は、図8(b)に示すように一次・二次導体をツイストしたコイルを平面状に渦巻状に巻いた型式（以下、平面型と略記）である。表2に試作変圧器の諸定数を示す。使用した磁性体は、ソレノイド型についてはコイルを巻く心に用い、また平面型についてはフラット型変圧器の場合と同様にサンドイッチ状に挟み込むために用いている。

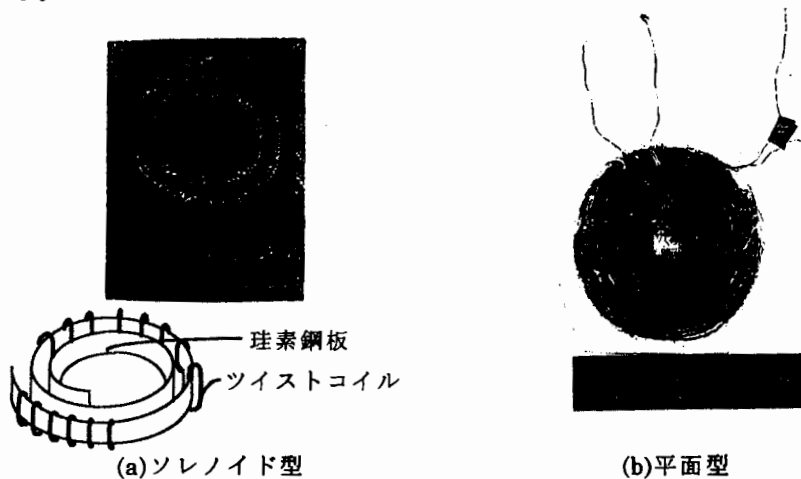


図8 試作ツイストコイル変圧器

表2 試作ツイストコイル変圧器の諸定数

型式	導線直径	導線長	磁性体
ソレノイド型	0.6[mm]	4.5[m]	珪素鋼板 0.7×23×0.1[cm]
平面型	0.6[mm]	4.5[m]	スリット入り珪素鋼板 10.6×10.6×0.1[cm]

3.2 試作ツイストコイル型変圧器の特性 図9にツイストコイルを用いた試作変圧器の周波数対変圧比特性を示す。図9から珪素鋼板を用いたツイストコイル変圧器は、目的とする1から60[kHz]の周波数範囲で実用化可能な特性を有することが分かる。これは、一次・二次コイルをツイストさせているため、フラット型よりも本質的に磁氣的結合が高いためと考えられる。

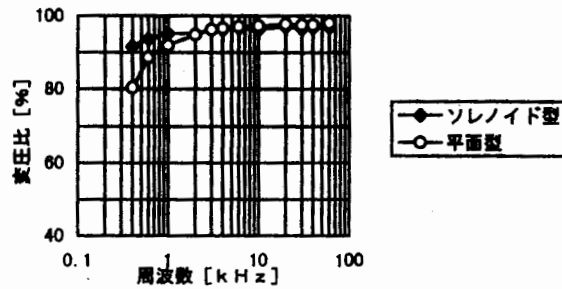
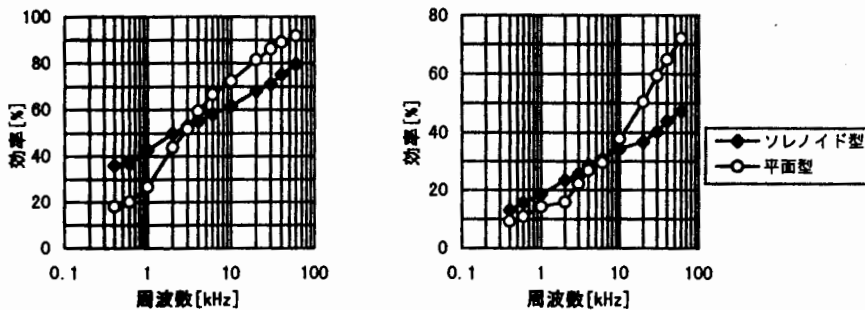


図9 ツイストコイルを用いた試作変圧器の周波数対変圧比特性



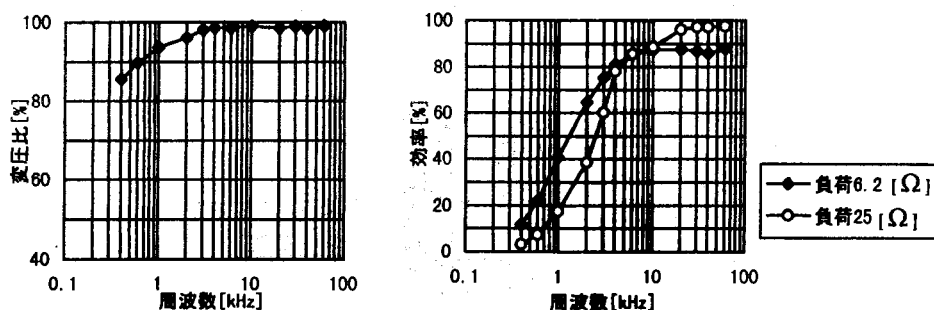
(a) 純負荷抵抗 6.2[Ω]

(b) 純負荷抵抗 25[Ω]

図10 周波数対効率特性

図 10 の結果は、ツイストコイルを用いた変圧器は 10 から 60 kHz の周波数範囲で実用化が可能であることを示している。図 11 に平面型変圧器で珪素鋼板の代わりにフェライトタイルでサンドイッチ状にした実験例を示す。珪素鋼板を使用した場合の周波数特性よりも良好な結果が得られるのが分かる。

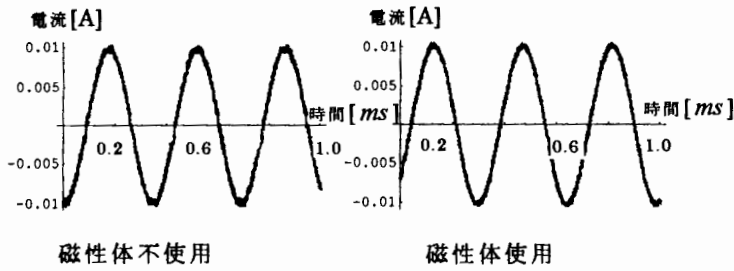
次に磁性体を使用しない場合と、磁性体を使用した場合のフラット型圧器とツイストコイル型変圧器の電流波形を示す。電流波形は、いずれの場合もほとんど正弦波であり歪まない。これは、磁性体が主磁路を形成していないことを意味する。



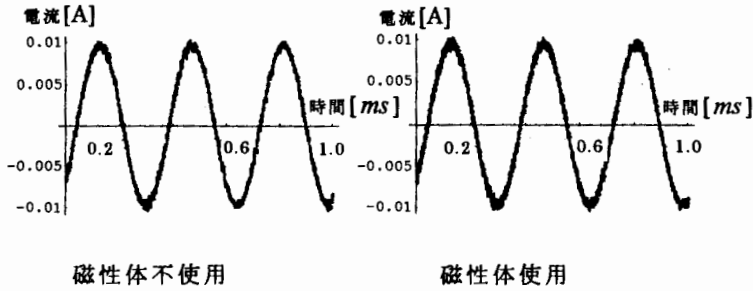
(a) 周波数対変圧比特性

(b) 周波数対効率特性

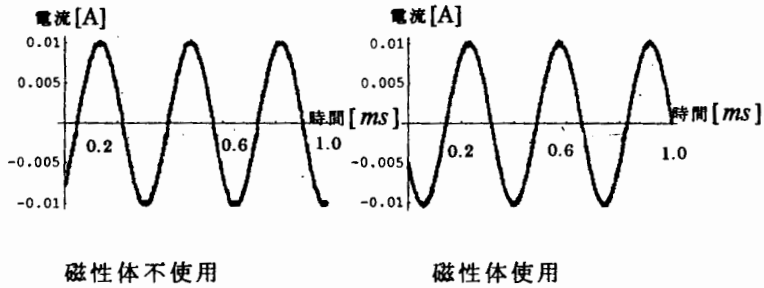
図 11 周波数対効率特性



(a)フラット外広型



(b)フラット内広型



(c)ツイスト平面型

図 1 2 電流波形の比較(周波数 2kHz)

4.まとめ

本稿では、商用周波数で小型・軽量・薄型の電力用変圧器実現を目指した基礎的検討を行った。具体的にはフィルム導体を用いたフラット型変圧器を2台、ツイストコイルを用いた変圧器を2台試作し、低周波特性の評価を行った。その結

果、フィルム型では、内側程フィルム幅を広くする内広型に磁性体を併用すれば比較的的低周波まで良好な特性を有するフラット型変圧器が実現出来る可能性を明らかにした。

ツイストコイルを用いたフラット型では、ツイストコイルを平面上に渦巻型に巻いた平面型に磁性体を併用することで良好な低周波特性を有するフラット型変圧器が実現できる見通しを得た。

参考文献

- [1] S.Hayano, Y.Midorikawa, and Y.Saito, "Development of film transformer" IEEE Trans.Magn,Vol.30,No.6,pp.4758-4760 (November 1994).
- [2] I.Marinova, Y.Midorikawa, S.Hayano, and Y.Saito " Thin Film Transformer and Its Analysis by Integral Equation Method" IEEE Trans.Magn, Vol.31, No.4.pp2432-2437 (July 1995)
- [3] Y.Midorikawa, S.Hayano, and Y.Saito, "A new inductor having a noise filtering capability" IEEE Trans.Magn, Vol30, No.6, pp.4761-4763 (November 1994).
- [4] Y.Midorikawa, I.Marinova, S.Hayano, and Y.Saito "Electromagnetic Field Analysis of Film Transformer" IEEE Trans.Magn, Vol.31, No.3.pp1456-1459 (May 1995)
- [5] 緑川、早野、斎藤、"フィルム変圧器の基礎的考察"、電気学会論文誌 A、115 巻 12 号,pp1221-1227(1995)
- [6] Y.Midorikawa, I.Marinova, S.Hayano, and Y.Saito, "Electromagnetic Film Transformer" IEEE Trans.Magn, Vol.31, No3, pp.1456-1459 (May 1995).

原稿受付日	平成 8 年 10 月 1 日
-------	-----------------