等価回路解析に基づくクロストランスの特性改善に関する考察

A Study of Improvement of Characteristics of Cloth Transformer Based on Equivalent Circuit Analysis

松木英敏・宮澤秀樹・撫原浩嗣*・山口正洋**・村上孝一・山本孝幸*

東北大学工学部電気工学科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 (〒980)

*ユニテカ中央研究所, 宇治市宇治小桜 23 (〒611)

**東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980)

H. Matsuki, H. Miyazawa, K. Nadehara*, M. Yamaguchi**, K. Murakami and T. Yamamoto*

Dept. of Electrical Engng., Tohoku Univ., Aramaki, Aoba, Aoba-ku, Sendai 980

*Res. & Develop. Center, UNITIKA Ltd., 23, Ujikozakura, Uji 611

**Res. Inst. of Electrical Communication, Tohoku Univ., 1-1, Katahira 2-chome, Aoba-ku, Sendai 980

A cloth transformer is very thin, and is anticipated to be useful in the MHz frequency region. We calculated the characteristics of the cloth transformer using an equivalent circuit and taking account of stray capacities. In order to improve the instrument's characteristics, the exciting reactance must be increased. Under a given driving frequency, the inductance per unit volume was calculated based on simple assumptions. Analysis indicated that there was a suitable ratio of the diameter of amorphous wire to copper wire.

1. ま え が き

近年、電子機器の小形化への要求に伴い、チップ化、集積回路化などによる電子部品の小形化・高周波化が進展している。その一方で、磁気素子の小形化・高周波化は遅れており、これらの寸法が機器のサイズを決定する大きな要因となっていることから、より小形でかつ十分な電流容量を有する磁気素子の開発が望まれている。

先に筆者らは、アモルファス磁性繊維¹⁾と導電性繊維とを織物状に組み合わせて構成したクロストランス²⁾を提案し、極めて薄形の形状ながらある程度以上の電流容量を有し、単位体積当たりのインダクタンス値が数 $\mu\text{H}/\text{mm}^2$ を越える素子を実現可能であること³⁾、巻線を群構造化することにより良好な電圧伝達特性を保ちながら 1 次、2 次巻線容量を大幅に低減できること⁴⁾などについて報告してきた。しかし素子の一層の小形化・高周波化を図る上では、巻線間に存在する漂遊容量などが素子の特性に与える影響を明確にし、巻線と磁心の直径の比率などをはじめとする素子の形状の最適化を図る必要がある。

以上の考えに基づき、各巻線同士間あるいは 1 次、2 次巻線間などに存在する漂遊容量を含む等価回路による

特性算定を試みた結果、素子の諸特性の算定が可能となった。さらに、巻線の 1 群をインダクタと捉えて単位体積当たりのインダクタンス値と素子寸法との関係について検討したところ、磁心と巻線の直径の間に適当な比率が存在することが明らかとなったので報告する。

2. 等価回路によるクロストランスの特性算定

2.1 クロストランスの構造および等価回路

Fig. 1 は、巻線を群構造化したクロストランス⁴⁾の概略図である。同図に示されるように、本素子はアモルファス磁性繊維（以下、ワイヤと略称する）と導線（以下、巻線と称する）を織物状に組み合わせて構成され、巻線は任意の回数毎交互に配置されている。

これまででは、素子の特性に大きな影響を及ぼす各巻線同士間や 1 次、2 次巻線間などに存在する漂遊容量を分離した上での特性算定は行われていなかった。そこで、Fig. 2(a) に示すような漂遊容量を含む等価回路による特性算定を試みた⁵⁾。ここでは計算の簡略化のため巻数比を 1 : 1 とした。同図で、 R_c は巻線低抗、 R_l は磁心の損失抵抗、 L_1 は励磁インダクタンス、 L_2 は漏れインダクタンス、 C_1 は各巻線同士間の漂遊容量、 C_2 は 1 次および 2 次巻線間容量である。以下にこれらの等価回路定数

Fig. 1 Structure of cloth transformer with divided windings.

Fig. 2 Equivalent circuit of cloth transformer. (a) fundamental circuit, (b) $1/\omega C_1, 1/\omega C_2 \gg \omega L_1$, (c) $1/\omega C_1, 1/\omega C_2, R_f \gg \omega L_1$.

の決定法を述べる。

Fig. 2(a), (b), (c) において無負荷時の入力インピーダンスを Z_{i0} とすると、試作した素子では 0~0.1 MHz の周波数帯においては巻線抵抗およびインダクタンスが素子の特性を支配する。そこで、この周波数帯では Fig. 2 (c) に示される R_c, L_1 および L_2 により構成される等価回路を用いて Z_{i0} の実部の実測値より R_c を決定し、さらに Z_{i0} および端子 1-2 間のインピーダンスの虚部の実測値より L_1, L_2 を求めた。一方、0.1~1 MHz の周波数帯では磁心の損失抵抗の影響が現れる。そこで、この周波数帯では Fig. 2(b) に示される R_f を含む等価回路を用いて Z_{i0} の実部の実測値より R_f を求めた。また、 C_2 は平行に配置された 2 円柱導体間の静電容量の総和で表されるとして求めた⁶⁾。さらに、共振周波数では Z_{i0} の偏角が零になることから、 C_1 は Z_{i0} の共振周波数の実測値を用いて Fig. 2(a) の等価回路より決定した。

2.2 試作クロストランスの諸特性

Table 1 に、試作クロストランスの寸法を示す。type a および type b は、各々透磁率の比較的低いワイヤ（比透磁率 $\mu_r' = 800$ ）および高透磁率のワイヤ（比透磁率 $\mu_r' = 4000$ ）を用いた素子である。ワイヤの直径は共に 10 μm とした。これらの素子では、ワイヤを 600 本束ねた磁心を 1 糸系としてこれを平行に 10 本配置し、ここに

緯糸として直径 70 μm の銅線を 4 本より合わせたものを 1 次巻線および 2 次巻線共に 20 回ずつ打ち込んだ。巻線は各々 4 群に分割した。

Fig. 3 は、試作クロストランスの負荷特性である。負荷としては純抵抗負荷を用いた。同図に、Fig. 2 の等価回路による計算結果を併せて示す。同図で、実測値と計算値はよく一致しており、本等価回路がクロストランスの特性算定に有効であることが了解される。

Table 2 は、得られた試作クロストランスの等価回路定数である。同表で、type a および type b の各巻線同士間の漂遊容量 C_1 および漏れインダクタンス L_2 の値はほぼ等しいことから、これらの量は主に素子の形状によって決定され、ワイヤの透磁率への依存性は小であるといえる。また同表で、type b で用いたワイヤの比透磁率は type a の約 5 倍であるのに対し、type b の励磁インダクタンス L_1 の値は type a の約 3 倍であり、ワイヤの比透磁率の向上ほどには励磁インダクタンスが改善されないことから、ワイヤの高透磁率化による励磁インダクタンスの改善には限界が存在することがうかがわれ

Fig. 3 Load characteristics. V_1 : primary voltage. V_2 : secondary voltage. I_2 : secondary current. η : efficiency. f : frequency.

Table 1 Dimensions of the transformers

type	ℓ mm	w mm	d mm
a	13.5	12.7	0.9
b	13.0	14.9	1.0

ℓ : Length of device.
w: Width of device.
d: Thickness of device.

Table 2 Equivalent circuit constants of the transformer

type	R_c	R_f	L_1	L_2	C_1	C_2
a	0.81	3000	7.1	1.2	6	17
b	0.74	2400	25	1.4	6	17

unit: R_c, R_f : Ω
 L_1, L_2 : μH
 C_1, C_2 : pF

る。

Fig. 4 は正弦波電圧印加時の 1 次電圧 V_1 および 2 次電圧 V_2 の波形例であり, Fig. 5 はこのときの 2 次電流 I_2 と 1 次および 2 次電圧波形の歪み率 r_d の関係である。Fig. 5 で, 1 次および 2 次電圧波形の歪み率の値は極めて小であり, 2 次電圧波形の歪みは無視できると言える。また, 同図で 1 次および 2 次電圧波形の歪み率の値はほぼ一致しており, ここでは 2 次側において入力電圧波形を正確に再現していると考えられる。

3. 磁心径および巻線径の最適化に関する考察

Fig. 6 は, 本等価回路解析において励磁インダクタンス L_1 と漏れインダクタンス L_2 の比 L_1/L_2 を変化させた場合の無負荷時の入出力電圧比 V_2/V_1 および効率の最大値 $\eta_{\max}$ の変化に関する計算結果である。同図で, L_1/L_2 の値の増大に伴い入出力電圧比および効率の最大

Fig. 4 Observed waveforms.

Fig. 5 Relation between secondary current I_2 and the distortion ratio of primary and secondary voltage r_d .

Fig. 6 Effects of L_1/L_2 on the output voltage and the maximum efficiency. V_1 : primary voltage. V_2 : no-load secondary voltage. $\eta_{\max}$: maximum value of efficiency.

値は共に増加しており, ことに L_1/L_2 の値が 100 程度ならば入出力電圧比の値はほぼ巻数比に近い値まで改善されることから, 本素子の特性改善には L_1/L_2 の改善が有効であると言える。 L_1/L_2 の値の向上には励磁インダクタンス L_1 の改善が有効であると考え, ここでは巻線を群構造化した素子の各巻線群をクロスインダクタと捉えて個々のインダクタの単位体積当たりのインダクタンス値の向上による L_1 の改善について検討した⁸⁾。

クロスインダクタの単位体積当たりのインダクタンス L_d は (1) 式で与えられる²⁾。

$$L_d = \frac{\mu_0 \mu_r' \pi (d_a/2)^2 m n N}{2 d_c \{1 + N_d (\mu_r' - 1)\} \cdot V} \quad (1)$$

ただし, $N_d = \{\ln(1.5u) - 1\} / u^2$

$$u = 2 d_c N / D_a, D_a = \sqrt{n} \cdot d_a$$

$$V = l \cdot w \cdot d$$

$$l = 2 d_c N, w = (m+1) d_c + m D_a$$

$$d = 2 d_c + D_a$$

であり, μ_0 は真空の透磁率, μ_r' はワイヤの比透磁率, d_a

Fig. 7 Relation between equivalent diameter of core D_a and inductance per unit volume L_d .

Fig. 8 Relation between diameter of winding d_c and that of core D_a when inductance per unit volume L_d takes maximum value.

はワイヤの直径, N は巻数, d_c は巻線径, n は磁心 1 本当たりのワイヤの本数, m は磁心の数, N_d は反磁界係数, D_s は等価磁心直径, V は素子の体積, l, w, d は各々素子の長さ, 幅, 厚さである.

Fig. 7 は, (1) 式を用いて計算した等価磁心直径 D_s と単位体積当たりのインダクタンス L_d の値の関係である. ここではワイヤの直径 d_w を $10\mu\text{m}$, ワイヤの比透磁率 μ_r を 4000, 巻数 N を 50 回, 磁心の数 m を 10 とし計算している. 同図で, L_d はピークをとっており, さらに巻線の細線化により巻線を密に巻くことが可能となるために巻線径 d_c の減少に伴い L_d の値が増加していることが了解される. Fig. 8 は, 単位体積当たりのインダクタンス L_d の値がピークをとるときの等価磁心直径 D_s と巻線の直径 d_c の関係であり, 同図より両者の比は 1 対 1 程度が適当であるといえる. 両図より, 巻線と磁心の細線化により素子の一層の高性能化が可能であり, さらに両者の間には単位体積当たりのインダクタンスの値を最大にする最適な比率が存在するといえる. この結論に基づいて計算したところ, 試作した type b の素子で 20 程度であった L_1/L_2 の値は巻線径および等価磁心直径を $80\mu\text{m}$ 程度にすることで 100 程度となり, 無負荷時の入出力電圧比をほぼ巻数比に近い値まで改善できることが明らかとなった.

4. ま と め

以上, 漂遊容量を考慮した等価回路を用いてクロストランスの諸特性を算定したところ, クロストランスの漏

れインダクタンスや漂遊容量は主に巻線の巻き方などの形状に依存していることが明らかとなった. さらに, 巻線を群構造化した素子の 1 巻線群をインダクタと捉えて解析を行った結果, インダクタンスを最大にする磁心径と巻線径の比率が存在することを示唆する計算結果が得られた.

文 献

- 1) I. Ohnaka *et al.*: Proc. 4th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals, p. 31 (1981).
- 2) 山本, 松木, 村上: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-86-185 (1986).
- 3) 松木, 村上, 山本: 日本応用磁気学会誌論文特集号, 10, 343 (1986).
- 4) 山本, 平野, 撫原, 宮澤, 松木, 村上: 日本応用磁気学会誌論文特集号, 12, 381 (1988).
- 5) 宮澤, 松木, 山口, 村上, 山本: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-88-133 (1988).
- 6) 大津, 尾形: 電子通信学会論文誌, J68-C, 942 (1985).
- 7) 山本, 平野, 松木, 村上: 電気学会マグネティックス, 電子情報通信学会非線形問題共催研究会資料, MAG-87-106, NLP 87-25 (1987).
- 8) 撫原, 山本, 松木, 山口, 村上: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-88-132 (1988).
- 9) H. Matsuki and K. Murakami: *IEEE Trans. Magn.*, MAG-21, 1738 (1985).
- 10) 松木, 村上: 日本応用磁気学会誌論文特集号, 9, 255 (1985).
- 11) H. Matsuki, K. Murakami and T. Yamamoto: *IEEE Trans. Magn.*, MAG-22, 415 (1986).

1988 年 11 月 21 日受理, 1989 年 2 月 10 日採録