UDC 621.314.211.041.3: 621.371.39.002.5

論 文

53-B 8

電子機器用電源変圧器の経済的寸法比

正 員 岩 原 正 吉 (福井大)

正 員 村 本 浩 (福井大)

正 員 宮 澤 永次郎 (福井大)

1. ま え が き

最適な変圧器設計を行なうには、適用分野、容量の大小、使用する電圧・電流の大小、要求される機械的強度などの諸項目と、それらを取巻く各種の技術によってその手法が異なるが、適切な材料の選択と温度上昇および電気的特性の仕様を満足させた上で、更に価格・容積・損失などの評価条件を満足させる必要がある。

従来、変圧器鉄心の主要寸法は装荷配分法⁽¹⁾や $V-t$ 法⁽²⁾などによって決めているが、経験の数値に依存する部分が多く諸特性との理論的關係および評価条件との関連が必ずしも明白でない。これに対して、可能な限り理論的根拠を明らかにする試みが幾つか成されており、古くは Reed 氏による磁束密度 B および電流密度 J を一定とした場合の経済的寸法比の研究⁽³⁾があり、最近では JIS によって規定される鉄損・銅損を与えて経済的設計を行なう安藤氏らの研究⁽⁴⁾がある。また、比較的小容量の変圧器に対しては、Hamaker, Hehenkamp 氏らの研究⁽⁵⁾や Garbarino 氏の研究⁽⁶⁾がある。これらの研究はいずれも $B \cdot J$ または鉄損・銅損を既知量として取扱っている。

しかし、これらの量は一般には既知量ではなく、評価条件によって定まる量であり、鉄心形状に直接影響する。更に、これらの研究は変圧器設計上必ず満足していなければならない温度上昇との関係を明確にしている。

これに対して、冷却条件を与えて望ましい鉄心形状を求めることが可能ならば、 B や J を仮定する必要がなくなり、より効果的な設計が期待できる。

我々はこのような考え方に基づいて、1VA から 10

kVA の比較的小容量の電子機器用電源変圧器を対象として、冷却条件および温度上昇限界を与えて電流密度を導出する解析を行ない⁽⁷⁾⁽⁸⁾、単位出力あたりの変圧器主要材料の価格を最小とする鉄心寸法比の検討を行ってきた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、対象を小容量域としたので定格出力の式には巻線抵抗も考慮することとした。

解析の結果、定格出力を変えたとその経済的な鉄心寸法比の変化することが明らかとなり、特に極小容量域ではその変化の著しいことも明らかとなった。また得られた経済的な寸法比の変圧器は、従来経験的にも知られていたが、小容量域になるに従ってその電気的特性が悪化することも示された。更に、電気的特性を改善する条件を付加すれば、内鉄形・外鉄形の使用区分が明らかとなり、従来の経験的事実と一致することも明らかとなった。

2. 温度上昇を考慮した場合の経済的寸法比

〈2・1〉 解 析 解析を行なうにあたって、使用材料を磁気特性の良い巻鉄心に定め、冷却条件はあらかじめ決定しておくものとする。これに加えて、使用材料および対象とする変圧器出力を考慮して次の仮定を置く。

- (1) 磁束は正弦波であるものとする。
- (2) 漏れリアクタンスは巻線抵抗に比べて無視できるものとする。
- (3) 巻線と鉄心とは互いに、熱的に絶縁されているものとする。
- (4) 巻線は一次側を内側に、二次側を外側にそれぞれ密着巻きとする。
- (5) 冷却は乾式自然冷却とする。
- (6) 負荷は抵抗とする。

いま、定格動作時の磁束密度の最大値を B_m (T) とすると、二次側誘起電圧 E_2 は

$$E_2 = 4.44 f N_2 f_i S_i B_m \text{ (V)} \dots\dots\dots (1)$$

となる。但し、 f は周波数 (Hz)、 N_2 は二次巻線の巻数、 f_i は鉄心の占積率、 S_i は鉄心の見掛けの断面積

Economical Core Dimension Ratio of The Power Transformer for Electronic Equipment. By Masayoshi Iwahara, Member, Hiroshi Muramoto, Member & Eijiro Miyazawa, Member (Faculty of Engineering, Fukui-University).

岩原正吉: 正員, 福井大学工学部電気工学科
村本 浩: 正員, 福井大学工学部電気工学科
宮澤永次郎: 正員, 福井大学工学部電気工学科

(m^2)である。

また、二次巻線の定格電流を I_2 とすれば、

$$I_2 = k_2 f_{c2} Q J_2 / N_2 \text{ (A)} \dots\dots\dots (2)$$

と表とされ、二次巻線の抵抗 r_2 は

$$r_2 = \rho_2 l_{m2} N_2^2 / (k_2 f_{c2} Q) \text{ (}\Omega\text{)} \dots\dots\dots (3)$$

と表わされる。但し、 k_2 は二次巻線が窓面積に占める割合、 f_{c2} は二次巻線の占積率、 Q は鉄心の窓面積(m^2)、 J_2 は二次巻線の電流密度(A/m^2)、 ρ_2 は二次巻線の抵抗率($\Omega \cdot \text{m}$)、 l_{m2} は二次巻線の平均巻線長さ(m)である。

従って、定格出力 P_2 は(1)~(3)式より

$$\begin{aligned} P_2 &= 4.44 f k_2 f_{c2} f_i (B_m J_2) (S_i Q) \\ &\times 10^{-3} - \rho_2 l_{m2} k_2 f_{c2} Q J_2^2 \\ &\times 10^{-3} \text{ (kVA)} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

と表わされる。

(4)式第2項は巻線抵抗を考慮したことによって生じた項である。冷却方法に見合った適当な電流密度を仮定すれば、与えられた鉄心寸法より取出し得る定格出力が定まるが、ここでは電流密度は仮定することなく冷却条件を与えることにより直接求められる。すなわち、変圧器より発生した熱は巻線表面および鉄心表面を通して大気中に放散されるので、各表面の熱放散の係数が定まれば電流密度を決定できる。

いま、適当な冷却条件を決めると、変圧器表面より放散される熱量は一意的に定まる。すなわち、仮定より巻線の損失 P_{cu} と変圧器の有効放熱面積 S_{cr} (m^2)、巻線の表面温度上昇 ΔT (deg) との間には、

$$P_{cu} = h_t \Delta T S_{cr} \text{ (W)} \dots\dots\dots (5)$$

が成立つ。但し、 h_t は熱伝達係数($\text{W}/\text{deg}/\text{m}^2$)である。

しかるに、(5)式の左辺は一次巻線の抵抗 r_1 および定格出力時の電流 I_1

$$r_1 = \rho_1 l_{m1} N_1^2 / \{f_{c1}(1-k_2)Q\} \text{ (}\Omega\text{)} \dots\dots\dots (6)$$

$$I_1 = J_1 f_{c1}(1-k_2)Q / N_1 \text{ (A)} \dots\dots\dots (7)$$

を用いて

$$\begin{aligned} P_{cu} &= \rho_2 f_{c2} k_2 Q (\rho f_{c2} k J_1^2 l_{m1} + J_2^2 l_{m2}) \\ &\dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

と与えられる。但し、 $\rho = \rho_1 / \rho_2$ 、 $f_c = f_{c1} / f_{c2}$ 、 $k = (1 - k_2) / k_2$ であり、 ρ_1 は一次巻線の抵抗率($\Omega \cdot \text{m}$)、 l_{m1} は一次巻線の平均長さ(m)、 f_{c1} は一次巻線の占積率、 J_1 は一次巻線の電流密度(A/m^2)、 N_1 は一次巻線の巻数である。

対象とする使用材料を考慮して、 J_1 を J_2 について解けば、 $f_c k J_1 = J_2$ となるので、(5)式および(8)式より J_2 を求めることができ、

$$J_2 = \sqrt{\frac{h_t \Delta T S_{cr}}{\rho_2 f_{c2} k_2 Q \{(\rho / f_c k) l_{m1} + l_{m2}\}}} \text{ (A}/\text{m}^2\text{)} \dots\dots\dots (9)$$

となる。

従って、定格出力 P_2 は(4)式および(9)式を用いて

$$\begin{aligned} P_2 &= C_1 S_1 \sqrt{\frac{Q S_{cr}}{(\rho / f_c k) l_{m1} + l_{m2}}} \\ &- C_2 \frac{l_{m2} S_{cr}}{(\rho / f_c k) l_{m1} + l_{m2}} \text{ (kVA)} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

但し、

$$C_1 = 4.44 f B_m f_i \sqrt{\frac{h_t \Delta T k_2 f_{c2}}{\rho_2}} \times 10^{-3}$$

$$C_2 = h_t \Delta T \times 10^{-3}$$

となる。 C_1 、 C_2 は設計される変圧器の種類によって決められる設計パラメータである。

(10)式は鉄心の形状に無関係に成立つ式であり(4)式との比較から、電流密度を冷却条件より与えることによって、よく知られた定格容量 $\propto S_i \cdot Q$ の関係式からどのようにずれていくかを示している。

鉄心寸法が既知であれば、その鉄心より取出し得る定格出力は(10)式によって求められるが、定格出力が与えられた場合、それを満足する鉄心寸法は無数に存在し、一意的に定まらない。

従って、何らかの評価条件が必要となる。評価条件としては損失最小、重量最小、容積最小や価格最小などが考えられるが、なにを採用するかは対象とする用途による。しかし、前述の評価条件はいずれも銅線の体積および鉄心の体積を変数とするので、いずれか一つの条件について最適化を行えば他の条件もその最適点に近くなる。ここでは鉄心材料費と銅線材料費の和、すなわち主要材料の価格を最小とする経済性を評価条件とした。

いま、その材料費を C_i とすれば、鉄心の見掛けの体積を V_i (m^3)、銅線の見掛けの体積を V_c (m^3)とにおいて

$$C_i = (V_i + K V_c) \cdot C_i \sigma_i f_i \times 10^{-3} \text{ (円)} \dots\dots\dots (11)$$

と表わされる。但し、 C_i は鉄心の材料単価($\text{円}/\text{kg}$)、 C_c は銅線の材料単価($\text{円}/\text{kg}$)、 σ_i は鉄心の密度(kg/m^3)、 σ_c は銅線の密度(kg/m^3)、 $f_c = (f_{c1} + f_{c2})/2$ 、 $K = C_c \sigma_c f_c / C_i \sigma_i f_i$ である。

我々はこの解析を用いて、内鉄形と外鉄形の二種類について経済的な寸法比の検討を行なった。

すなわち、使用する鉄心の形状を第1図とし、その組立形状を第2図とした。また、変圧器の寸法は定格出力によってその絶対値が異なるので、比較を容易に

第 1 図 鉄心の寸法
Fig. 1. Core size.

(a) 内鉄形

(b) 外鉄形

第 2 図 変圧器の組立形状

Fig. 2. Assembled forms of the transformer.

第 1 表 形式と寸法比

Table 1. Types and dimension ratios.

形式	内鉄形	外鉄形
寸法比		
α	b/a	$b/2a$
β	c/a	$c/2a$
γ	d/a	$d/2a$

するため第 1 表に示すような寸法比を用いて検討するものとした。

経済的寸法を求めるには価格を最小とし、定格出力を最大とする条件を用いばよい。

いま、価格を定格出力で割ったものを C_t/P とすれば

(i) 内鉄形

$$C_t/P = \frac{\{[f_c k + 0.5(1-k_2)(\rho - f_c)]\pi\alpha\}}{C_1 \gamma V \alpha \beta \{\pi\alpha(\alpha+2\beta) + 2(2+\gamma)\}} \times$$

$$\times \frac{+2(1+\gamma)(\rho + f_c k)\{\gamma[\pi + 2(\alpha+\beta)]\}}{(\alpha+\beta)\{[f_c k + 0.5(1-k_2)(\rho - f_c)]\}} \times$$

$$\times \frac{+K\alpha\beta[0.5\pi\alpha + 2(1+\gamma)]aC_i\sigma_i f_i}{\pi\alpha + 2(1+\gamma)(\rho + f_c k)\{f_c k a^3 - f_c k C_2\}} \times$$

$$\times 10^{-6}$$

$$\times \frac{\{(1-0.5k_2)\pi\alpha + 2(1+\gamma)\}\{\pi\alpha(\alpha+2\beta)\}}{+2(2+\gamma)(\alpha+\beta)} \text{ (千円/kVA) } \dots (12)$$

(ii) 外鉄形

$$C_t/P = \frac{\{(2f_c k + (1-k_2)(\rho - f_c))\pi\alpha + 2\}}{2C_1 \gamma V \alpha \beta \{\pi\alpha(\alpha+\beta) + 2\alpha + \beta\}} \times$$

$$\times \frac{(1+\gamma)(\rho + f_c k)\{\gamma[0.5\pi + 2(\alpha+\beta)]\}}{\{(2f_c k + (1-k_2)(\rho - f_c))\pi\alpha + 2(1+\gamma)\}} \times$$

$$\times \frac{+K\alpha\beta[\pi\alpha + 2(1+\gamma)]aC_i\sigma_i f_i}{\gamma(\rho + f_c k)\{f_c k a^3 - 2f_c k C_2\}(1+\gamma)} \times$$

$$\times 10^{-6}$$

$$\times \frac{-0.5k_2\pi\alpha + 1 + \gamma}{+2\alpha + \beta} \{\pi\alpha(\alpha+\beta)\} \text{ (千円/kVA) } \dots (13)$$

となる。

(12), (13) 式は α, β, γ, a の関数であるから、これより経済的寸法比を決めるには $dC_t/P=0$, すなわち

$$dC_t/P = \frac{\partial C_t/P}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial C_t/P}{\partial \beta} d\beta$$

$$+ \frac{\partial C_t/P}{\partial \gamma} d\gamma + \frac{\partial C_t/P}{\partial a} da$$

を零とすればよい。これは α, β, γ, a に関する非線形連立方程式、 $(\partial C_t/P)/\partial \alpha = (\partial C_t/P)/\partial \beta = (\partial C_t/P)/\partial \gamma = (\partial C_t/P)/\partial a = 0$ を解くことを意味する。

上式について、解析的に経済的寸法比を求めることは容易でないで、ここでは特定の設計パラメータを定め数値計算を行ない、経済的な寸法比がどのような特徴を有するかを検討した。

〈2・2〉 数値計算例 この解析によって求められる変圧器の経済的な寸法比を検討するために、A 種絶縁で自然空冷の冷却条件として、次の設計パラメータを与えて定格出力 1VA から 10kVA の範囲で数値計算を行なった。

第 3 図 温度上昇を考慮した場合の経済的寸法比と単位出力あたりの主要材料価格

Fig. 3. Economical core dimension ratio and prime cost/output power in case of limited temperature rise.

(1) 設計パラメータ $f=50\text{Hz}$, $B_m=1.5\text{T}$, $f_1=0.95$, $f_{c1}=f_{c2}=0.3$, $k_2=0.5$, $h_1=10\text{W/deg/m}^2$, $\rho_1=\rho_2=2.164\times 10^{-8}\Omega\cdot\text{m}$, $\Delta T=50\text{deg}$, $C_i=500\text{円/kg}$, $C_c/C_i=2$.

設計パラメータは厳密には定格出力に対して変える必要がある。例えば、巻線の占積率は巻くくや巻しるを考慮すれば、小容量では小さな値となり、中容量では少し大きな値としなければならない。しかし、ここでは本解析の妥当性および諸傾向を検討することを主眼とするので、設計パラメータは定格出力ごとに变えずに平均的な値を用いることとした。

計算の結果を第 3 図に示す。図中の点線は(10)式の第 2 項が、第 1 項に比べて無視できる場合を示している。すなわち、 α, β, γ, a および C_i/P はいずれも定格出力が増大するに従って点線の値に近付くことを示している。このことは、定格出力の大きな所では変圧器の巻線抵抗を考慮する必要はないことを示しており経験的な事実と一致する。更に、図より明らかなように、各寸法比は定格出力によって著しく異なっておりその程度は外鉄形よりも内鉄形の方が著しい。また、価格上からは内鉄形のほうが外鉄形よりも経済的な

第 4 図 経済的変圧器の電圧変動率と効率

Fig. 4. Voltage regulation and efficiency of economical transformers calculated.

っている。

求められた寸法が、その特性においても望ましいものであるか否かを検討するために、電圧変動率 ϵ および効率 η を求められた寸法比について計算してみた。その結果を第 4 図に示す。また、ここで対象とした定格出力の範囲に対して JIS・C 6436-1970 電子機器用小形電源変圧器の規格⁽¹¹⁾に電圧変動率、無負荷損、温度上昇などの規格があるので、参考のために併せて図示した。図によれば、求められた寸法比の変圧器は JIS 規格の示す特性とよく一致するばかりでなく、内鉄形・外鉄形とも規格を満足している。

すなわち、この解析より求められた寸法比の変圧器の特性は、従来より経験的に知られている特性と一致しているものと結論され、解析方法がほぼ妥当なものであると推論される。

次に、実用上の問題として、電圧変動率を温度上昇を考慮して求められた値よりも低く制限したいことがある。そのような場合、温度上昇を制限するだけでなく、同時に電圧変動率も制限しなければならない。以下、電圧変動率をも制限した場合について述べる。

3. 電圧変動率をも考慮した場合の経済的寸法比

〈3.1〉 解 析 仮定によって、漏れリアクタンスが無視できるので、この解析が定格出力を対象としていることを考慮して、変圧器の電圧変動率 ϵ は $P_{cu}/P_2 \times 100(\%)$ と表わされ

$$\epsilon = \frac{\{(r_1/a^2) + r_2\} I_2}{E_2 - r_2 I_2} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (14)$$

と書ける。但し、 $a=N_1/N_2$ である。

(14)式を I_2 について解いて、 $\epsilon'=\epsilon/100$ とおき、(2)式を用いて J_2 で表わすと

$$J_2 = \frac{4.44\epsilon' f B_m f_i S_i}{\rho_2 \{(\rho/fck) l_{m1} + (1+\epsilon') l_{m2}\}} \quad (\text{A/m}^2)$$

$$\dots\dots\dots(15)$$

となる。

従って、電圧変動率をパラメータとする定格出力の式を求めることもできる。この場合、変圧器の巻線の表面の温度上昇はどのようになるかは不明であり、巻線抵抗は巻線表面の温度上昇によって定まるので、 $P_{cu} = k_i \Delta T S_{c_i}$ の関係式を用いて表面温度を求めて巻線抵抗を決定しなければならない。

上記のことを考慮して、(15)式を(4)式に代入し、 P_2 について解けば

$$P_2 = \sqrt{C_1' Q S_{c_i} \left\{ \frac{\rho}{f_c k} l_{m1} + l_{m2} \right\}} * \left\{ \frac{S_i}{\left\{ \frac{\rho}{f_c k} l_{m1} + (1+\varepsilon') l_{m2} \right\}^2} \right\} * + (C_2 S_{c_i})^2 - C_2' S_{c_i} \text{ (kVA)} \dots\dots(16)$$

但し、

$$C_1' = \frac{2 f_{c2} k_2 h_i (\pi f B_m f_i)^2}{\rho_{20} \delta_{20}} \times 10^{-6}$$

$$C_2' = \frac{(1 + \delta_{20} T_a') h_i}{2 \delta_{20} \varepsilon'} \times 10^{-3}$$

となる。

また、 C_1' および C_2' における ρ_{20} は 20°C における銅線の抵抗率 ($\Omega \cdot \text{m}$)、 δ_{20} は 20°C における銅線の温度係数 ($1/\text{deg}$)、 $T_a' = T_a - 20$ である。

従って、温度上昇を制限した場合と同様に、単位出力あたりの価格を最小とすることによって経済的寸法比を求めることができる。

内鉄形・外鉄形についてそれぞれ C_i/P を示せば、

(1) 内鉄形

$$C_i/P = \frac{\{[0.5(1-k_2)\rho + f_c k(1+\varepsilon')]\}}{\sqrt{C_1' \alpha \beta \gamma^2 \{\pi \alpha (\alpha + 2\beta) + 2\}}} * \frac{(1-0.5k_2)\pi \alpha + 2(1+\gamma)\{\rho + f_c k\}}{(2+\gamma)(\alpha + \beta) \{[f_c k + 0.5(1-k_2)]\}} * \frac{(1+\varepsilon') \cdot \{\gamma[\pi + 2(\alpha + \beta)] + K \alpha \beta\}}{(\rho - f_c) \pi \alpha + 2(1+\gamma)(\rho + f_c k)} * \frac{[0.5\pi \alpha + 2(1+\gamma)] a C_i \sigma_i f_i \times 10^{-6}}{f_c k a^3 + \{C_2' [\pi \alpha (\alpha + 2\beta) + 2(2+\gamma)]\}} * \frac{(\alpha + \beta) \{[0.5(1-k_2)\rho + f_c k(1+\varepsilon')]\}}{(1-0.5k_2)\pi \alpha + 2(1+\gamma)\{\rho + f_c k\}} * \frac{\{[0.5(1-k_2)\rho + f_c k(1+\varepsilon')]\}^2 - C_2' \{\pi \alpha (\alpha + 2\beta) + 2\}}{(2+\gamma)(\alpha + \beta) \{[0.5(1-k_2)\rho + f_c k\}} * \frac{(1+\varepsilon')(1-0.5k_2)\pi \alpha + 2(1+\gamma)}{(1+\varepsilon')}\} \text{ (千円/kVA)} \dots\dots(17)$$

(ii) 外鉄形

$$C_i/P = \frac{\{[(1-k_2)\rho + 2f_c k(1+\varepsilon')](1-0.5k_2)\pi \alpha + 2(1+\gamma)\{\rho + f_c k(1+\varepsilon')\}\}}{\sqrt{4C_1' \alpha \beta \gamma^2 \{\pi \alpha (\alpha + \beta) + 2\alpha + \beta\} \{2f_c k + (1-k_2)(\rho - f_c)\} \pi \alpha + 2\}} * \frac{\{\gamma[0.5\pi + 2(\alpha + \beta)] + K \alpha \beta\} \pi \alpha + 2}{(1+\gamma)(\rho + f_c k) f_c k a^3 + \{C_2' [\pi \alpha (\alpha + 2\beta) + 2(1+\gamma)]\}} * \frac{a C_i \sigma_i f_i \times 10^{-6}}{(\alpha + \beta) + 2\alpha + \beta \{[(1-k_2)\rho + 2f_c k(1+\varepsilon')]\}} * \frac{(1-0.5k_2)\pi \alpha + 2(1+\gamma)\{\rho + f_c k(1+\varepsilon')\}}{(1+\varepsilon')(1-0.5k_2)\pi \alpha + 2(1+\gamma)} * \frac{\{[\rho + f_c k(1+\varepsilon')]\}^2 - C_2' \{\pi \alpha (\alpha + \beta) + 2\alpha + \beta\} \{[(1-k_2)\rho + 2f_c k(1+\varepsilon')]\}}{(1-0.5k_2)\pi \alpha + 2(1+\gamma)\{\rho + f_c k(1+\varepsilon')\}} * \frac{(1+\varepsilon')}{(1+\varepsilon')}\} \text{ (千円/kVA)} \dots\dots(18)$$

となる。

〈3・2〉 数値計算例

数値計算を行なうにあたって、まず電圧変動率をどのように設定するかを検討する。温度上昇を制限した場合において、得られた寸法比の変圧器の特性をどの程度に改善すべきかは用途によって異なり、それらの値は一意的に決定しにくい。少なくとも温度上昇を制限した場合に得られた値より低く設定しなければ意味がない。また、設定するとすれば JIS 規格のように定格出力の範囲を区切って段階的に設定するのが実用上は望ましい。しかし、ここでは温度上昇を制限した場合との対比を目的としているので、一率にある値に限定したほうが比較しやすい。

従って、実用上の対象範囲を若干考慮して電圧変動率を 10% とし、この値に近い定格出力 100 VA 以下を計算の対象とした。計算に用いた設計パラメータは

(1) 設計パラメータ $f = 50 \text{ Hz}$, $B_m = 1.5 \text{ T}$, $f_i = 0.95$, $f_{c1} = f_{c2} = 0.3$, $k_2 = 0.5$, $h_i = 10 \text{ W/deg/m}^2$, $\rho_{20} = 1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, $\delta_{20} = 3.93 \times 10^{-3}/\text{deg}$, $T_a = 35^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 10\%$, $C_i = 500 \text{ 円/kg}$, $C_c/C_i = 2$ である。

この計算結果は第 5 図に示す。第 4 図との比較した場合、内鉄形・外鉄形とも定格出力によって著しく寸法比が変化しないことが分かる。また特性を改善したことによって単位出力あたりの価格は同一定格について温度上昇のそれよりも高くなっており、内鉄形よりも外鉄形が安価となっている。

第 5 図 電圧変動率をも考慮した場合の
経済的寸法比と単位出力あたりの
主要材料価格

Fig. 5. Economical core dimension ratio and prime cost/output power in case of limited voltage regulation.

4. あとがき

電子機器用電源変圧器を対象として巻線抵抗を考慮し、冷却条件および温度上昇限界を与え、定格出力を決定する理論に経済的な評価条件を付加した解析の結果、次のことが明らかとなった。

(1) 変圧器の定格出力は、広く知られている寸法の 4 乗に比例せず、設計条件の与え方によって変化する。

(2) 経済的寸法比は定格出力によって異なる。

(3) 温度上昇のみを制限すれば、対象とする定格出力範囲内では内鉄形が経済的である。

(4) 上記の条件では極小出力域で電気的特性が著しく悪化することが、従来から広く経験的に知られていたが、理論上からも裏付けられ、電圧変動率を中心に設計を行なう必要のあることが証明された。

(5) 電圧変動率を中心とする場合は外鉄形が経済的である。

(6) 以上のことから、極小出力域では外鉄形が経済的であり、それ以上の出力域では、内鉄形が経済的となり、USSR の IEC への提案⁽¹²⁾の結果とも一致する。

既に述べたように、この解析より得られた多くの事実は従来からの経験事実とよく一致する。また、今回は乾式自然冷却で A 種絶縁の場合についてのみ検討したが、冷却手段を強性空冷に変えた場合や B 種絶縁とした場合にもこの解析方法がそのまま利用でき、3 相用変圧器に対しても同様に適用できる。

更に設計を精密化していくには、考慮しなかった巻線と鉄心との間の熱伝導を考慮する必要がある、磁束密度も仮定せずに導出できることが望ましい。これらの点については今後の検討事項としたい。

終りに、本研究をまとめるにあたって有益な討論をいただきました磁気応用委員会、磁性材料委員会の各委員の方々に深謝します。また、理論上の仮定を検討する上で数々の材料の提供を快く引受けて下さいました日本金属株式会社開発部の方々に併せて感謝いたします。(昭和 52 年 2 月 1 日受付)

文 献

- (1) 竹内・磯部：新版電気機器設計学 (昭 41)
- (2) 高橋：電気機器設計 I (昭 44)
- (3) E. G. Reed: The Electric Journal 23, 11, 567 (1926)
- (4) 安藤・谷山：電学誌 83, 892, 1 (昭 38)
- (5) H. C. Hamaker, et al: Philips Res. Rep. 5, 357 (1950)
- (6) H. L. Garbarino: Trans. Amer. Inst. Elect. Engers. 73, 675 (1954)
- (7) 宮澤：磁性材料研資 MAG-71-8 (昭 46)
- (8) 宮澤・村本・岩原：昭 48 電気四学会北陸支大 A-29
- (9) 岩原・村本・宮澤：磁性材料研資 MAG-75-26 (昭 50)
- (10) 岩原・村本・宮澤：磁性材料研資 AM-75-4 (昭 50)
- (11) 日本工業規格: JIS・C 6436-1970 (昭 45)
- (12) IEC: Technical Committee No. 51 (1974)