

低温 Al 変圧器

小林 佑 光*

Supercooled-Al Transformer

Yūkoh KOBAYASHI

Abstract

Year after year, the electrical power to be consumed in the world becomes larger, and also power transformers must become larger in size and heavier in weight.

In this paper, prospects for employment of deeply cooled Al conductors as transformer windings are considered. At liquid hydrogen temperature, 20°K, Al exhibits a resistivity of $3 \times 10^{-11} \Omega m$, and it is about 1/1000 times of a normal Cu resistivity.

For this subject some considerations are given by K. J. R. Wilkinson²⁾, but this paper makes examinations of it from a different standpoint.

At the beginning, for a three-phase core-type transformer general expressions of its loss, weight, size, etc. are introduced in a simple case, and then using the obtained expressions, 190MVA three-phase transformers with supercooled-Al windings are designed, to be compared with the conventional transformer. From this calculations it results that in the case of maximum flux density B_m to be equal to conventional value the supercooled-Al transformer is about 1/3.5 times of a conventional one in loss and weight, and in the case of B_m to be decreased so that the transformer weight may be equal to conventional value the diminution of about 1/5.3 times is obtained in loss.

使用記号の説明

A_{ie} = 脚部鉄心の有効断面積 ($= r_{ic}(\pi a_i^2)$) [m²]

A_{wd} = 鉄心窓の所要面積 [m²]

A_{1ph} = 一相当りの一次巻線導体の全断面積 [m²]

a_i = 鉄心の半径 [m]

B_m = 鉄心内磁束密度の最大値 [Wb/m²]

E_{1ph} = 一次定格相電圧 [V]

E_{2ph} = 二次定格相電圧 [V]

f = 周波数 [Hz]

G = 変圧器の重量 [kg]

G_c = 導体の重量 [kg]

G_{cph} = 一相分の導体の重量 [kg]

G_i = 鉄心の重量 [kg]

h_{wd} = 鉄心窓の高さ [m]

I_{0mph} = 一相分の励磁電流 [A]

I_{1ph} = 一次定格相電流 [A]

k_{il} = 鉄損の比例係数

k_l = 磁路長の補正係数

k_{om} = 励磁電流と定格電流との比

l = 一相分の磁路長 [m]

l_x = 変圧器の寸法 [m]

l_y = " [m]

l_z = " [m]

N = 巻数 [Turns]

N_{1ph} = 一相当りの一次巻数 [Turns]

N_{2ph} = 一相当りの二次巻数 [Turns]

(VA) = 変圧器の容量 [VA]

V_i = 鉄心の体積 [m³]

V_T = 変圧器の体積 [m³]

W = 変圧器の全損失 [W]

W_c = 導体損 [W]

W_{c1ph} = 一相当りの一次巻線の導体損 [W]

* 電気工学教室

- W_i = 鉄損 [W]
- w_{wd} = 鉄心窓の巾 [m]
- γ_{hw} = 鉄心窓の高さと巾との比 ($=h_{wd}/w_{wd}$)
- γ_{ic} = 脚部鉄心の有効断面積を表わす係数 ($=A_{ic}/\pi a_i^2$)
- γ_w = 鉄損と導体損との比 ($=W_i/W_c$)
- γ_{wa} = 鉄心窓の巾と鉄心直径との比 ($w_{wd}/2a_i$)
- γ_{wd} = 鉄心窓内の導体占積率
- η_r = 冷却機の効率 [%]
- η_t = 変圧器の総合効率 [%]
- μ = 透磁率 [H/m]
- ρ_c = 導体の抵抗率 [Ωm]
- σ_c = 導体の密度 [kg/m^3]
- σ_i = 鉄心の密度 [kg/m^3]
- ϕ_m = 主磁束の最大値 [Wb]

1. ま え が き

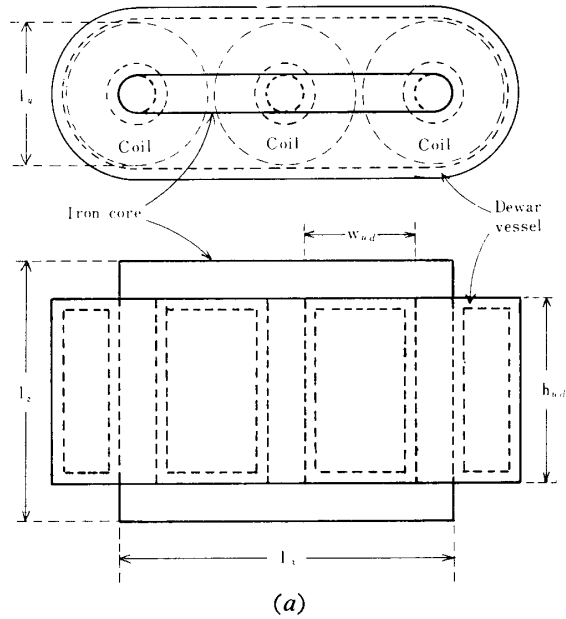
年々急増する電力需要にともない、発電機、変圧器等の電力用機器の大型化が目立っている。このため、外形の大きさと同時に重量も大となるので設置場所や輸送などの点でも問題になり、大容量機器の小型化、軽量化が望まれている。さらに、効率の向上をも合わせて満たされれば非常に好都合である。

この問題の解決法の一つとして、液体窒素温度77°K以下のいわゆる極低温領域における金属導体が示す特種な性質を利用することが考えられ始めた。

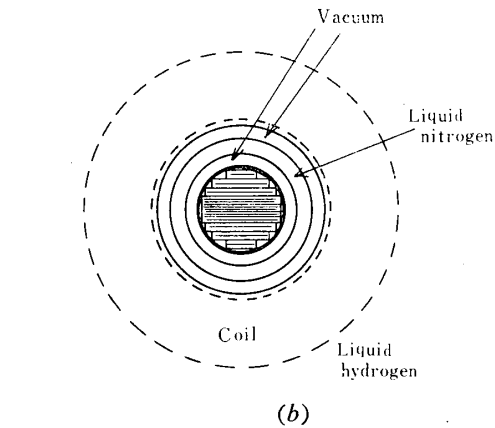
本論文では、電力用の変圧器について考えるが、そのための導体としては抵抗率が小さいことがまず必要であり、その他軽いこと、機械的に丈夫なこと、価格の安いことなどが要求される。低温導体として、現在考えられているものは、Table 1 のようなものである。

この表のうち、超伝導体である Nb はあまり高い磁場中では超伝導状態が壊れてしまうので大型の変圧器には不適當である。Be は磁気抵抗効果が相当大きいので、結局今の段階では Al が最も有利と考えられる。

筆者は、先に、このような液体水素冷却 Al 導体を用いた空心変圧器について諸量の計算を行ったが¹⁾、ここでは、鉄心入りの変圧器を考えて、同様に、かなり理想化した条件のもとに大きさ、重量、損失等の点において従来のものよりどの程度の利点があり得るかということ考察した。この種の可能性については、K.J.R. Wilkinson²⁾ などにより検討



A 3-phase core-type transformer



The cross-section of iron core and Dewar vessel
Fig.1 Showing schematically the structure of a low temperature transformer

Table 1 Conductors for the use at low temperature and refrigerator efficiencies

Metal	Temperature [°K]	Resistivity [Ωm]	Liquid refrigerant	Refrigerator input power per watt transported		
				Carnot ideal [W]	Present practice [W]	Estimated future practice [W]
Nb	4.2	superconductive	Helium	65	620	300
Al	20	3×10^{-11}	Hydrogen	12	78	39
Be	77	2×10^{-10}	Nitrogen	2.5	9.3	5

されているが、筆者は、鉄損などを考慮し、別の観点より試算を行なった。

2. 諸量計算式の導出

冷却機の負荷をできるだけ小さくするために、巻線のみをデュワー容器内に入れて冷却し、鉄心は外に出して常温とする。ここでは、簡単のため内鉄形の三相変圧器を考える。低温変圧器の外観および構造は、Fig. 1 の如くであって、同図(b)に示すように脚部鉄心の断面は段付近似円形とし、デュワー容器は、二重構造で、内側から順に、真空、液体窒素、真空、液体水素および巻線という具合に、液体窒素 (77°K) を中間冷却に使用する。デュワー容器の厚さは、実際上約 5 cm あればよいと思われる。

以下、簡単のため、絶縁物やデュワー容器の重さなどは無視し、概略の値を知るための計算式を求める。これらの式において、冷却機効率 $\eta_r = 1$ とおけば、従来の変圧器に対しても適用できる。

2・1 変圧器の損失

まず鉄損を求める。

毎相の一次誘起起電力は、次式のように表わされる。

$$E_{1ph} = \sqrt{2} \pi f N_{1ph} \phi_m \quad [\text{V}] \quad (1)$$

一方主磁束の最大値 ϕ_m は、

$$\phi_m = \frac{\text{起磁力}}{\text{磁気抵抗}} = \frac{\sqrt{2} \mu N_{1ph} I_{0m} A_{ie}}{l} \quad [\text{Wb}] \quad (2)$$

である。(1)、(2)式より N_{1ph} を消去すれば、

$$I_{0m} E_{1ph} = \frac{\pi f}{\mu} B_m^2 (A_{ie} l) \quad (3)$$

となる。ただし

$$B_m = \frac{\phi_m}{A_{ie}} = \frac{\phi_m}{(\pi a_i^2) \gamma_{ic}} \quad [\text{Wb/m}^2] \quad (4)$$

なる関係がある。また、Fig. 1 (a) のような寸法の三相内鉄形の変圧器鉄心の一相当りの磁路長 l として、補正係数 k_l を使い

$$l = k_l (4 w_{wd} + 3 h_{wd} + 12 a_i) / 3 \quad [\text{m}] \quad (5)$$

と表わすと、(3)式はつぎのように書きかえられる。

$$I_{0m} E_{1ph} = \frac{\pi}{3 \mu} k_l f B_m^2 V_i \quad (6)$$

これより、鉄心の体積 V_i が

$$V_i = \frac{k_{om} \mu (VA)}{\pi k_l f B_m^2} \quad [\text{m}^3] \quad (7)$$

として求まる。したがって、鉄心の重さ G_i は

$$G_i = \frac{k_{om} \mu \sigma_i (VA)}{\pi k_l f B_m^2} \quad [\text{kg}] \quad (8)$$

となる。

単位重量当りの鉄損 W_i/kg を簡単のため次式のよ

$$W_i/\text{kg} = k_{il} B_m^2 \quad (9)$$

そうすると、求める鉄損 W_i はつぎのように書ける。

$$W_i = k_{il} B_m^2 G_i = \frac{k_{il} k_{om} \mu \sigma_i (VA)}{\pi k_l f} \quad [\text{W}] \quad (10)$$

変圧器の全損失 W は鉄損 W_i と導体伝導損 W_c との和であり、

$$\begin{aligned} W &= W_i + W_c \\ &= W_i \left(1 + \frac{W_c}{W_i} \right) \\ &= \frac{k_{il} k_{om} \mu \sigma_i (VA)}{\pi k_l f} \left(1 + \frac{1}{\gamma_w} \right) \left(\frac{\mu \sigma_i (VA)}{f} \right) \quad [\text{W}] \quad (11) \end{aligned}$$

と表わされる。ただし

$$\gamma_w = \frac{W_i}{W_c} \quad (12)$$

である。普通 γ_w は 1 より小に選ばれる。

また、鉄心の体積 V_i は、鉄心の寸法からも計算でき、つぎのように表わされる。

$$V_i = 2 \pi \gamma_{ic} (4 \gamma_{wa} + 3 \gamma_{wa} \gamma_{hw} + 6) a_i^3 \quad (13)$$

この式と(7)式とにより、鉄心の半径 a_i がつぎのように計算される。

$$a_i = \left[\frac{k_{om} \mu (VA)}{2 \pi^2 \gamma_{ic} k_l f (4 \gamma_{wa} + 3 \gamma_{wa} \gamma_{hw} + 6) B_m^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad [\text{m}] \quad (14)$$

次に、導体の抵抗による損失を抵抗率 ρ_c を使って求めよう。渦電流による損失は無視できるものとし、冷却機入力に換算した損失を計算する。

今、各相の導体の一回巻の平均長を、簡単のためデュワー容器の厚さを無視して、 $2 \pi (a_i + w_{wd}/4)$ とすれば、一次巻線の損失 W_{c1ph} は

$$W_{c1ph} = \left(\frac{\rho_c}{\mu_r} \right) \frac{2 \pi (a_i + w_{wd}/4)}{A_{1ph}} (N_{1ph} I_{1ph})^2 \quad [\text{W}] \quad (15)$$

と表わされる。さらにつぎの式

$$A_{1ph} = \frac{1}{4} \gamma_{wd} A_{wd} = \gamma_{wd} \gamma_{hw} \gamma_{wa}^2 a_i^2 \quad [\text{m}^2] \quad (16)$$

および(1)式よりの N_{1ph} を(15)式に代入すると、つぎのようになる。

$$W_{c1ph} = \frac{1}{18 \pi^3} \left(\frac{2 + \gamma_{wa}}{\gamma_{wd} \gamma_{hw} \gamma_{wa}^2 \gamma_{ic}^2} \right) \times \left(\frac{\rho_c}{\eta_r} \right) \frac{(VA)^2}{f^2 B_m^2 a_i^6} \quad [\text{W}] \quad (17)$$

三相変圧器の場合では、全導体損 W_c は

$$W_c = 6 W_{c1ph} \quad (18)$$

であり、(17)式および(14)式より

$$W_c = \frac{4}{6} \frac{4}{3} \pi^{\frac{1}{3}} \left(\frac{2 + \gamma wa}{\gamma_{wd} \gamma_{hw} \gamma_{wa}^2} \right) \times \left\{ \frac{k_{il}^5 (4 \gamma wa + 3 \gamma wa \gamma_{hw} + 6)^5}{\gamma_{ic} k_{om}^5} \right\}^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\rho_c}{\eta_r} \right)^{\frac{1}{3}} \left\{ \frac{(VA) B_m^4}{\mu^5 f} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad [W] \quad (19)$$

が得られる。したがって、この W_c と(10)式の W_i とを(12)式によって関係づければ、励磁電流 k_{om} がつぎのように表わされる。

$$k_{om}^8 = \left(\frac{32}{27\pi^4} \right) \left(\frac{\gamma_w^3 k_{il}^8}{k_{il}^3 \gamma_{wd}^3 \gamma_{ic}} \right) \times (4 \gamma wa + 3 \gamma wa \gamma_{hw} + 6)^5 \left(\frac{2 + \gamma wa}{\gamma_{hw} \gamma_{wa}^2} \right)^3 \times \left(\frac{\rho_c}{\eta_r} \right)^3 \left(\frac{f^2 B_m^4}{\mu^8 \sigma_i^3 (VA)^2} \right) \quad (20)$$

この k_{om} を(11)式に代入すると

$$W^8 = \left(\frac{32}{27\pi^4} \right) \left(\frac{k_{il}^5}{\gamma_{ic} \gamma_{wa}^3} \right) \gamma_w^3 \left(\frac{1}{\gamma_w} + 1 \right)^8 \times (4 \gamma wa + 3 \gamma wa \gamma_{hw} + 6)^5 \left(\frac{2 + \gamma wa}{\gamma_{hw} \gamma_{wa}^2} \right)^3 \times \left(\frac{\rho_c}{\eta_r} \right)^3 \left(\frac{\sigma_i^5 (VA)^6 B_m^4}{f^6} \right) \quad (21)$$

が得られる。

2・2 変圧器の重量

一相分の導体の重さ G_{cph} は、平均的に

$$G_{cph} = 4 \pi \gamma_{wd} \gamma_{hw} \gamma_{wa}^2 \left(1 + \frac{\gamma wa}{2} \right) \sigma_c a_i^3 \quad [kg] \quad (22)$$

で与えられるので、三相分の導体重量 G_c は、上式の3倍で、

$$G_c = 6 \pi \gamma_{wd} \gamma_{hw} \gamma_{wa}^2 (2 + \gamma wa) \sigma_c a_i^3 \quad [kg] \quad (23)$$

である。ここで(14)式の a_i を代入すれば、つぎのように書き直される。

$$G_c = \frac{3}{\pi} \left\{ \frac{\gamma_{wd} \gamma_{hw} \gamma_{wa}^2 (2 + \gamma wa) k_{om}}{\gamma_{ic} k_{il} (4 \gamma wa + 3 \gamma wa \gamma_{hw} + 6)} \right\} \left(\frac{\sigma_c \mu (VA)}{f B_m^2} \right) \quad [kg] \quad (24)$$

ゆえに、三相変圧器の全重量 G は(24)式および(8)式を使ってつぎのように計算される。

$$G = G_c + G_i = \left\{ \frac{3 \gamma_{hw} \gamma_{wa}^2 (2 + \gamma wa)}{4 \gamma wa + 3 \gamma wa \gamma_{hw} + 6} + \frac{\gamma_{ic} \sigma_i}{\gamma_{wd} \sigma_c} \right\} \times \left(\frac{\gamma_{wd} k_{om}}{\pi \gamma_{ic} k_{il}} \right) \left(\frac{\mu \sigma_c (VA)}{f B_m^2} \right) \quad [kg] \quad (25)$$

さらに、 k_{om} として(20)式の k_{om} を代入して書き直すと、

$$G^8 = \left(\frac{32}{27\pi^4} \right) \left\{ \frac{3 \gamma_{hw} \gamma_{wa}^2 (2 + \gamma wa)}{4 \gamma wa + 3 \gamma wa \gamma_{hw} + 6} + \frac{\gamma_{ic} \sigma_i}{\gamma_{wd} \sigma_c} \right\}^8 \left(\frac{\gamma_{wd}^5 \gamma_w^3}{\gamma_{ic}^9 k_{il}^3} \right)$$

$$\times \left(\frac{2 + \gamma wa}{\gamma_{hw} \gamma_{wa}^2} \right)^3 (4 \gamma wa + 3 \gamma wa \gamma_{hw} + 6)^5 \times \left(\frac{\rho_c}{\eta_r} \right)^3 \left(\frac{\sigma_c^8 (VA)^6}{\sigma_i^3 f^6 B_m^{12}} \right) \quad (26)$$

となる。

2・3 変圧器の大きさ

変圧器の大きさとして、Fig. 1(a)に示すように、 l_x , l_y , l_z を考えれば、それらは各々次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} l_x &= 6 (1 + \gamma wa) a_i \quad [m] \\ l_y &= 2 (1 + \gamma wa) a_i \quad [m] \\ l_z &= 2 (2 + \gamma_{hw} \gamma_{wa}) a_i \quad [m] \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

また体積は

$$V_T = l_x l_y l_z = 24 (1 + \gamma wa)^2 (2 + \gamma_{hw} \gamma_{wa}) a_i^3 \quad [m^3] \quad (28)$$

で与えられ、さらに、鉄心の半径 a_i は(14)式に(20)式の k_{om} を代入して、

$$a_i^8 = \left(\frac{1}{6\pi^4} \right) \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_{ic}^3 k_{il} \gamma_{wd}} \right) \left\{ \frac{2 + \gamma wa}{\gamma_{hw} \gamma_{wa}^2 (4 \gamma wa + 3 \gamma wa \gamma_{hw} + 6)} \right\} \times \left(\frac{\rho_c}{\eta_r} \right) \left(\frac{(VA)^2}{f^2 \sigma_i B_m^4} \right) \quad (29)$$

より求まる。

2・4 効率および巻数

冷却機の効率 η_r を含めた場合の変圧器効率 η_t は、(21)式の W を使って、次式で与えられる、

$$\eta_t = \frac{(VA)}{(VA) + W} \times 100 \quad [\%] \quad (30)$$

つぎに(1)式および(4)式より、一相の一次巻数 N_{1ph} は、

$$N_{1ph} = \frac{E_{1nh}}{\sqrt{2} \pi^2 \gamma_{ic} f} \left(\frac{1}{B_m a_i^2} \right) \quad [Turns] \quad (31)$$

となるが、(29)式を使うと、

$$N_{1ph} = \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{\pi} \right) \left\{ \frac{k_{il} \gamma_{wd} \gamma_{hw} \gamma_{wa}^2 (4 \gamma wa + 3 \gamma wa \gamma_{hw} + 6)}{\gamma_{ic} \gamma_w (2 + \gamma wa)} \right\}^{\frac{1}{4}} \times \left(\frac{\eta_r}{\rho_c} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\sigma_i}{f^2 (VA)^2} \right)^{\frac{1}{4}} E_{1ph} \quad [Turns] \quad (32)$$

と表わされる。二次巻数 N_{2ph} は

$$\begin{aligned} N_{2ph} &= \frac{E_{2ph}}{E_{1ph}} N_{1ph} \\ &= \frac{E_{2ph}}{\sqrt{2} \pi^2 \gamma_{ic} f} \left(\frac{1}{B_m a_i^2} \right) \\ &= \left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{\pi} \right) \left\{ \frac{k_{il} \gamma_{wd} \gamma_{hw} \gamma_{wa}^2 (4 \gamma wa + 3 \gamma wa \gamma_{hw} + 6)}{\gamma_{ic} \gamma_w (2 + \gamma wa)} \right\}^{\frac{1}{4}} \\ &\quad \times \left(\frac{\eta_r}{\rho_c} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\sigma_i}{f^2 (VA)^2} \right)^{\frac{1}{4}} E_{2ph} \quad [Turns] \quad (33) \end{aligned}$$

となる。

3. 損失最小化の検討

変圧器の全損失 W は(21)式のように求まったが、こ

の式をもとにして損失 W をできるだけ小さくすることを考えてみる。

右辺の各値のうち、 k_{il} および a_i は、鉄心材料によって定まる。 f , (VA) , ρ_c , γ_{ic} , γ_{wd} および η_r は設計時に与えられるものとして良い。 B_m の値について考えると、これを小さい値にすれば、損失は小さくなるが、一方(20)式からわかるように、重量が大きくなっていく (Fig. 5 参照)。

γ_w は、効率を最大ならしめるような負荷の大きさと結びついているので、普通 0.4~0.64 程度に選ばれるわけであるが、(21)式にしたがえば、どのような値で、 W が最小を示すものであるかをつぎに調べてみよう。

いま、

$$W^8 \propto F_1(\gamma_w) = \gamma_w^8 \left(1 + \frac{1}{\gamma_w} \right)^8 \quad (34)$$

とおき、 $dF_1/d\gamma_w = 0$ なる条件を求めると、

$$\gamma_w = \frac{5}{3} = 1.67 \quad (35)$$

であり、このとき W は最小値をとる。実際に γ_w の選び方によって損失 W がどの程度影響されるかを図示すれば、Fig. 2 のようになって、 $0.4 < \gamma_w < 1.0$ の範囲ではそれほど大きく影響されるわけではないことがわかる。

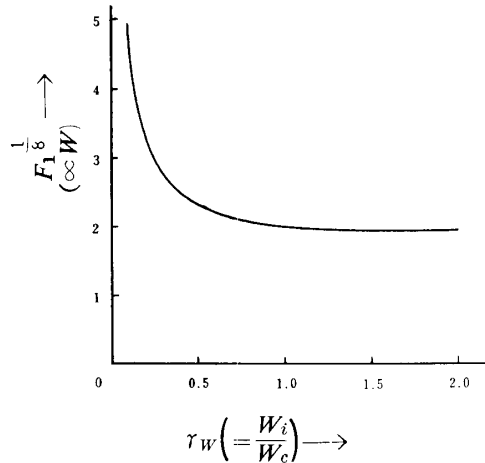


Fig. 2 Variation of loss W for γ_w

同様に γ_{wa} および γ_{hw} について考える。

$$F_2(\gamma_{wa}, \gamma_{hw}) = (4\gamma_{wa} + 3\gamma_{wa}\gamma_{hw} + 6)^8 \left(\frac{2 + \gamma_{wa}}{\gamma_{hw}\gamma_{wa}^2} \right)^3 \quad (36)$$

とおくと、この最小条件は、 $\partial F_2/\partial \gamma_{wa} = \partial F_2/\partial \gamma_{hw} = 0$ であり、これより

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{wa} &= 2.68 \\ \gamma_{hw} &= 3.12 \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

なる値のとき、損失は最小となる。

以上の議論は、低温変圧器に限らず、普通の変圧器

に対しても言えるということを付け加えておく。

4. 従来の変圧器との比較

先に導いた各式を使って、低温 Al 導体を使用した変圧器と、銅導体を使用した従来の変圧器との比較を一般的に行なってみよう。

低温変圧器と従来の変圧器とで、数値が変わってくるのは、冷却機入力からみた等価的導体抵抗率 ρ_c/η_r および導体の密度 σ_c であり、さらにデューワー容器のため、低温変圧器では鉄心窓内の導体占積率 γ_{wd} がやや悪くなる。この γ_{wd} の悪化を小さくするためと冷却機の効率を良くするため、また冷却機系の建設費などの問題から、低温変圧器の対象としては大容量のものでなければ有利さが得られないであろう。

以下においては、従来の変圧器に使用されている銅導体の抵抗率を $2 \times 10^{-8} \Omega m$ (340°K)、密度を $8.89 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とし、20°K の Al の抵抗率を $3 \times 10^{-11} \Omega m$ 、密度を $2.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ として計算する。水素ガス液化機の効率 η_r は Table 1 の将来値をとり $\eta_r = 1/3.9 = 0.0257$ とした。このとき、低温 Al の抵抗率は、液化機効率も含めて等価的に普通の銅の $1/7.1$ となり、また密度においては $1/3.29$ となる。以下、符号のあとに (Cu) または (Al) を付けてそれぞれを区別することとする。

4.1 損失

損失 W は、(21)式で示されているように、

$$W \propto \left\{ \frac{1}{\gamma_{wd}} \left(\frac{\rho_c}{\eta_r} \right)^3 \right\}^8 \quad (38)$$

であり、 γ_{wd} によって変化する。この様子を Fig. 3 に示す。デューワー容器の厚さのために

$$\frac{\gamma_{wd}(\text{Cu})}{\gamma_{wd}(\text{Al})} > 1 \quad (39)$$

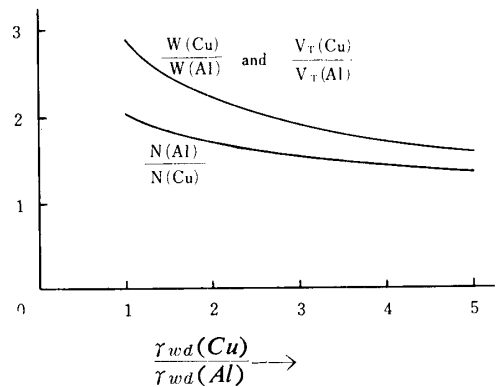


Fig. 3 Comparison between a conventional Cu transformer and a supercooled-Al transformer on its loss W , volume V_T and number of turns N

となるので、他の各値が同じであれば、低温変圧器の損失は、従来のものの $1/2.90$ 以下にはならない。

4.2 重 量

重量 G は、(26)式で与えられる。和の項があるために一般的なことは言えないが、 $\sigma_c(\rho_c/\eta_r)^{3/8}$ の係数のみを考えれば、銅と低温 Al との比は 9.55 となるので、軽くなることが期待される。

4.3 体 積

(28), (29)式からわかるように、変圧器の体積は、 $\{(\rho_c/\eta_r)/r_{wd}\}^{3/8}$ に比例する。これは損失 W についての場合と全く同様で、 $1/2.90$ 以上の減少は期待できない (Fig. 3 参照)。

4.4 巻 数

(32), (33)式に示されるように、巻数 N は、

$$N \propto \left\{ r_{wd} \left(\frac{\eta_r}{\rho_c} \right) \right\}^{1/4} \quad (40)$$

であり、 r_{wd} の比による変化は Fig. 3 のようである。以上では、 B_m , γ_w , γ_{wa} , γ_{hw} などを低温変圧器でも従来の値と変わらないものとして考察したが、実

際は、損失、重量、大きさ、価格等のかねあいにより、かなり経験的に決定されるものであるので、必ずしも同じ値とする必要はない。

つぎに、実際の変圧器の試算例をあげる。

5. 試 算 例

ここで、一つの設計例として、三相 190MVA, 60 Hz, 一次電圧 17.2kV (Δ 結線), 二次電圧 220kV (Y結線) の変圧器を考え、その結果を従来のものと比較してみよう。Table 2 の第 2 欄に従来の変圧器の設計値を示す (参考文献³⁾ による)。

つぎに最大磁束密度 B_m および鉄損と導体損との比 γ_w が第 2 欄の値と同じであるようにして、低温変圧器を設計する。

まず、損失を小さくするために r_{hw} を (37)式のようにとり、 r_{wa} による損失、重量等の変化を Fig. 4 に図示する。これらの量をどのような値に持って行くかは、各量間のつり合いを考えて適当になされるものである。Table 2 の第 3 欄には、損失 W が最小となるように r_{wa} を選んだ場合の設計例をあげた。

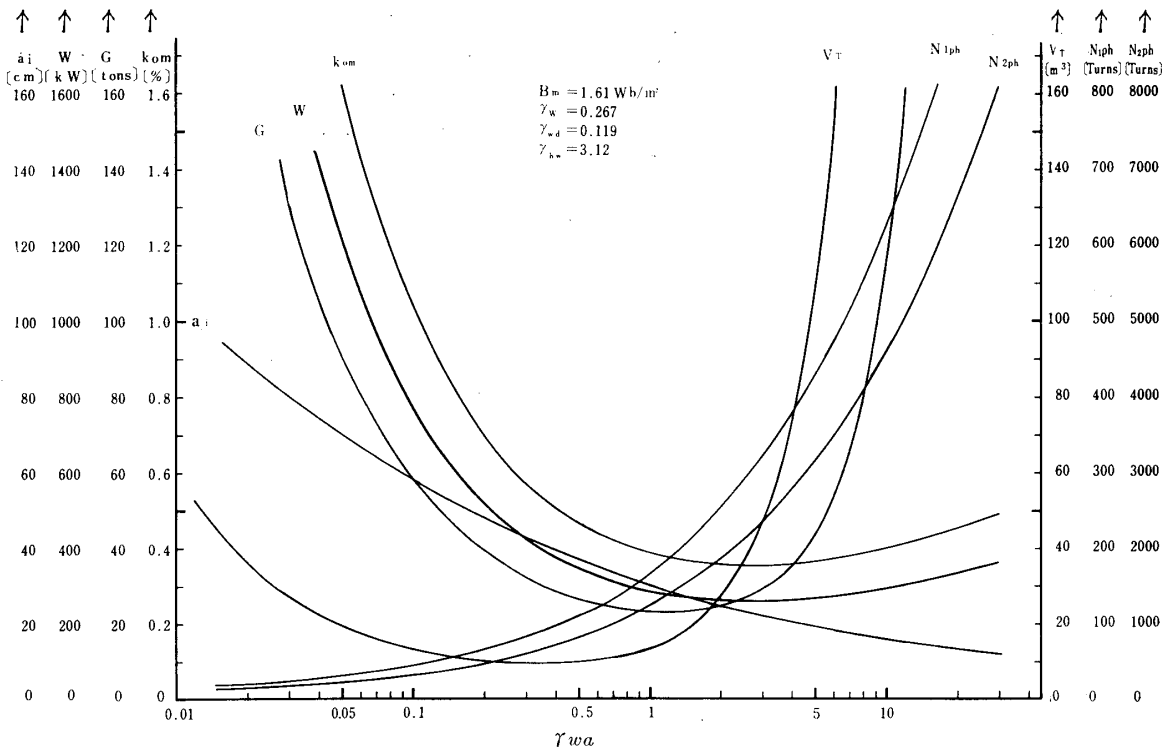


Fig.4 Variations between various quantities of a 190MVA supercooled-Al transformer and γ_{wa} .

It is taken that $B_m=1.61$, $\gamma_w=0.267$, $\gamma_{ic}=0.8$, $k_{il}=1.08$, $\gamma_{wa}=0.119$, $(VA)=190 \times 10^6$, $f=60$, $\sigma_i=7.8 \times 10^3$, $\sigma_c=2.7 \times 10^3$, $\rho_c=3.0 \times 10^{-11}$, $\eta_r=0.0257$, $E_{1ph}=17.2 \times 10^3$, $E_{2ph}=127 \times 10^3$, $\mu=2.02 \times 10^{-3}$, $k_l=1.1$ and $\gamma_{hw}=3.12$.

Table 2 Design values for a 3-phase transformer rated at 190MVA, 60Hz, 220kV star, 17.2kV delta. Conductor loss of the supercooled-Al transformer is the refrigerator input power.

Item	Conventional transformer		Supercooled-Al transformer
	Shell type	Core type	Core type
Type	Shell type	Core type	Core type
Maximum flux density in core [KG]	16.1	16.1	7.0
Core cross-section [mm]	560×1300	459 (dia.)	697(dia.)
Effective core area [cm ²]	6920	1320	3050
Size of core window [mm]	780×1300	1230×3840	1870×5820
Space factor of conductor in core-window	0.145	0.119	0.119
Iron loss in W/kg	2.8	2.8	2.8
Primary phase-current [A]	3680	3680	3680
Secondary phase-current [A]	499	499	499
Number of primary turns [Turns]	58	302	302
Number of secondary turns [Turns]	428	2230	2230
Exciting current [%]	0.39	0.356	5.15×10 ⁻⁴
Iron loss [kW]	195	55.6	36.7
Conductor loss [kW]	731	208	138
Total loss [kW]	926	264	174
Ratio of iron loss to conductor loss	0.267	0.267	0.267
Iron core weight [tons]	69.5	19.8	69.2
Conductor weight [tons]	25.6	7.7	26.9
Total weight [tons]	95.1	27.5	96.1
Efficiency at full-load [%]	99.515	99.861	99.908
at half-load [%]	99.604	99.886	99.925
Size of transformer [mm]	2730×2860×5020	5070×1690×4760	7690×2560×7220
Volume of transformer [m ³]	39.2	40.8	142

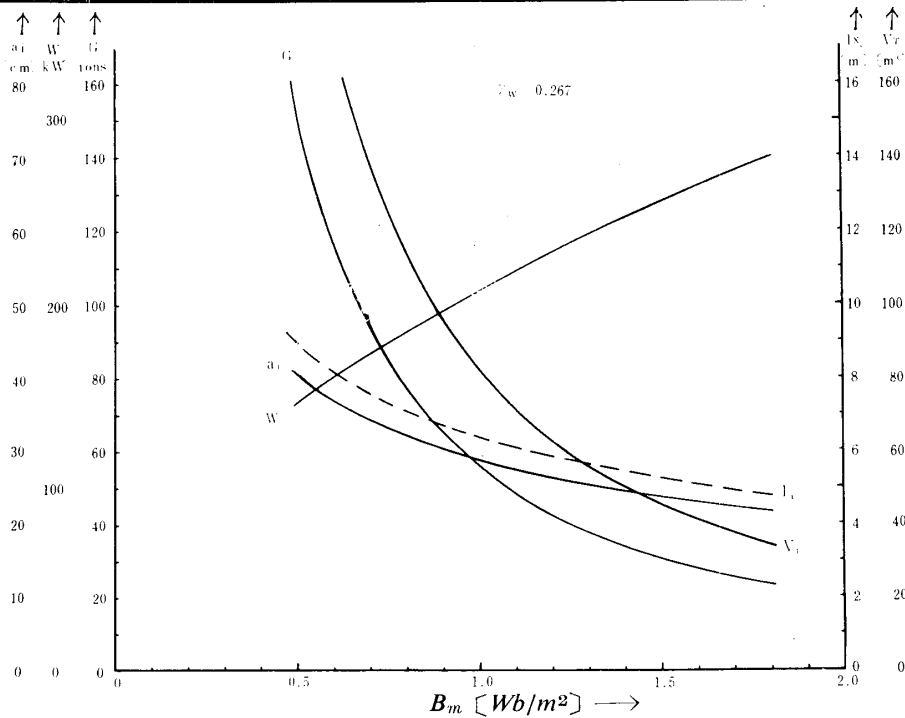


Fig.5 Variations between various quantities of a 190MVA supercooled-Al transformer and B_m . It is taken that $\gamma_{wa}=2.68$, $\gamma_{hw}=3.12$, $\gamma_{ic}=0.8$, $k_{il}=1.08$, $\gamma_{wd}=0.119$, $(VA)=190 \times 10^6$, $f=60$, $\sigma_i=7.8 \times 10^3$, $\sigma_c=2.7 \times 10^3$, $\rho_c=3.0 \times 10^{-11}$, $\eta_r=0.0257$, $E_{1ph}=17.2 \times 10^3$, $E_{2ph}=127 \times 10^3$ and $\gamma_w=0.267$.

このTable 2の第2欄と第3欄との比較から、低温変圧器では鉄心の太さが小さくてすむために、重量および損失の点においては従来のものの約 $\frac{1}{6.5}$ となり、他方巻数については5.2倍となっている。体積の点では、ほとんど変わらない値であるが、従来の変圧器では、冷却用の油タンク、放熱器および送風機が周囲に取付けられるので、その分だけ小型化されることになる。

前述の設計例では、最大磁束密度 B_m は定まったものと考えたが、さらに、 B_m を変えた場合、低温変圧器の諸量がどのように変化するかを検討してみよう。鉄心半径 a_i 、損失 W 、重量 G 、体積 V_T および変圧器の一辺の長さ l_x の B_m に対する変化の様子を示せば、Fig. 5 のようである。

重量が、従来の場合と同程度となるように B_m を選んで計算すると、Table 2の最右欄に掲げたように損失が従来の値の約 $\frac{1}{6.3}$ となるものが得られる。この場合、透磁率 μ が非常に大きいので、励磁電流が約 $\frac{1}{1000}$ に減少する。他方、体積は約3.6倍に大きくなる。

6. 結 言

Al 導体を液体水素温度20°Kに冷却すると、非常に低い抵抗率を持つようになること、また同時に銅よりも密度が小さいということから、この導体を電力用変圧器の巻線に利用することを考えた。そして、普通の銅を使ったものと比べて、損失や重量などの点で、どの程度の利益が望まれるかを式によって検討し、さらに、例として190MVAの変圧器について大まかな設計を行ない、この値と従来のものの値とを比較した。最大磁束密度 B_m を従来の変圧器における値と等しい値とすると、損失および重量において共に約 $\frac{1}{6.5}$ となる結果が得られ、また B_m を変えて重量を従来のものと同じとなるように設計すると、損失が約 $\frac{1}{6.3}$ になることがわかった。

以上の計算においては、Al 導体中の渦電流損は無視したが、これが妥当であるためには、Al 導体の厚さは数ミクロンの厚さでなければならない¹⁾。この薄板を多数重ね合せて一本の導体として使用することになる。

この低温 Al 変圧器の利点としては、

- ①安価な水素ガスを冷却剤として使用すること。
- ②超伝導体を使用する場合には、突発的な超伝導破壊に対処するために高速のしゃ断器の開発が必要とされるが、低温 Al 変圧器ではそれほど高速のものでなくてもよいこと。
- ③Al は磁気抵抗効果が小さいこと。
- ④近年の銅不足の一助となること。

等が挙げられる。

実際上の問題として考えられることは、大容量液化機の製作、建設費およびその信頼性に関すること、ミクロン程度の厚さの Al の薄板に十分な機械的強度を持たせること、また入出力回路からの熱流入を最小限におさえること、絶縁物の選択などである。したがって、実用化には今後の技術的発展および経済的变化に伴ないつつ、さらにくわしい検討が必要である。

最後に日頃なにかと御援助頂く佐々木次郎教授、ご教示頂いた足立宜良講師および城市久徳助手、さらにご鞭撻頂く九州大学入江富士男教授の方々に、深く感謝の意を表す。また、数値計算には本学の電子計算機 FACOM-231 を使用し、その際、古谷宜子氏の手を煩らわした。付記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 小林佑光：山口大学工学部研究報告，19 No.3, 43(1969)
- 2) K. J. R. Wilkinson : Proc. IEE, 113, 1509(1966)
- 3) 木村久男：新版・変圧器の設計工作法，電気書院，(1967) P.279

(昭和44年4月21日受理)