

低温 Al 導体使用の空心変圧器

小林 佑 光*

Transformers without an Iron Core Using a Supercooled Al Conductor

Yūkoh KOBAYASHI

Abstract

Using a supercooled conductor as windings in a large power transformer, it should be expected that the transformer is lower in loss, smaller in size and lighter in weight. For such a conductor, Be ($2 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ at 77°K of the liquid nitrogen), Al ($3 \times 10^{-11} \Omega\text{m}$ at 20°K of the liquid hydrogen) and Nb (superconducting at 4.2°K of the liquid helium) can be cited but Nb and Be are less useful by the reason of its quenching in the leakage flux and its large magnetoresistance effect respectively.

In this paper, a coreless transformer is considered and a supercooled Al conductor is employed in it. The merits of this transformer are that

1. there is not such a catastrophic heat generation as in a superconducting transformer and so fast circuit breaker is not necessary
2. simultaneously, to stop operating the transformer for a long time owing to such heat up can be avoided
3. it uses an inexpensive hydrogen gas
4. the dewar vessel is simplified because the transformer has not an iron core

The rough calculations on a 3-phase 190MVA transformer show that this coreless transformer is about 25% reduction of the conventional value in weight and 39% reduction in volume.

使用記号の説明

a = 一個のコイルの半径 [m]
 B_m = 磁束密度の最大値 [Wb/m²]
 b, c = 導線一本の断面寸法 [m]
 E = コイルの端子電圧 [V]
 f = 周波数 [Hz]
 h = 一個のコイルの巻厚み [m]
 I = 定格負荷電流 [A]
 J_0 = 励磁電流 [A]
 j, k = 三相変圧器の縦・横の寸法 [m]
 L = 一個のコイルの自己インダクタンス [H]
 λ = 長岡係数
 l = コイルの長さ [m]
 l_w = 一個のコイルの使用導線全長 [m]
 N = 一個のコイルの巻数 [turn]

P_e = 渦電流損 [W]
 P_{ec} = コイル一個あたりの渦電流損 [W]
 P_t = コイル一個あたりの伝導電流損 [W]
 \bar{P}_t = 変圧器の全伝導電流損 [W]
 P_o = 変圧器容量 [VA]
 P_{tt} = 伝導電流損と渦電流損とを合せた全導体損 [W]
 R = 一個のコイルの直流抵抗分 [Ω]
 $S = b \cdot c$ = 導線の断面積 [m²]
 t = 導体の厚さ [m]
 V = 体積 [m³]
 V_c = 変圧器の全導体体積 [m³]
 W_c = 変圧器の重量 [kg]
 z = 励磁電流と定格負荷電流との比
 α = 渦電流損と伝導電流損との比
 $\gamma_h = h/2a$ = コイルの巻厚みとコイル直径との比

* 電気工学教室

- $r_l = l/2a =$ コイルの長さとおよびコイル直径との比
 $\eta_c =$ 規約効率 [%]
 $\eta_r =$ 冷却機の効率 [%]
 $\eta_t =$ 冷却機効率を含んだ総合効率 [%]
 $\mu_0 =$ 真空の透磁率 $= 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]
 $\rho =$ 抵抗率 [Ωm]
 $\sigma =$ 導体の密度 [kg/m^3]
 $\omega =$ 角周波数 $= 2\pi \times$ 周波数 [rad/sec]

1. ま え が き

近年、液体窒素温度 (77°K) 以下のいわゆる極低温領域において、かなりの技術的、工学的進歩がなされた。例えば、冷却機の低廉化、効率の向上、故障率の改善等がおこなわれ、また、新しい材料の発明、発見も多い。これら極低温技術、材料を実際に応用することが各種こころみられ、一部はすでに実用に供されている。

大電力を扱う電力用機器へのこのような応用は、超伝導体では抵抗が零であること、また純金属では低温で抵抗が非常に小さくなることを利用し、低損失化、小形軽量化を期待して検討が進められている。現在アメリカにおいては、超伝導体を用いた電力ケーブルが試作実験されており、近い将来これが実現されれば、変圧器、発電機をも極低温で動作させる方が、外部からの熱流入を少なくする点において能率的となろう。

この種の極低温導体を巻線に使用し、鉄心は室温に保つような電力用変圧器について、これまで試算例がいくつか発表されている^{1,2,3,4}。しかし余り実用的ではないようである。

低温導体としては、Be (液体窒素温度 77°K で抵抗率 $2 \times 10^{-10} \Omega m$)、Al (液体水素温度 20°K で抵抗率 $3 \times 10^{-11} \Omega m$) および Nb (液体ヘリウム 温度 4.2°K で超伝導) が挙げられる。Nbは約 1.5KOe 程度の磁界で超伝導が壊れるため、変圧器には実用的でない。漏れ磁束のため 10KOe 以上の磁界になるからである。また Be と Al との比較では、冷却機効率と磁気抵抗効果との点で、Al の方が有利である。もっとも、爆発性の水素ガスを使うという難点もあるが、現在ではその危険性も小さくなっている。

本論文の目的は、低温 (20°K) Al 導体を巻線に使用し、損失の大きい、鉄心を有しない変圧器を考え、損失・重量・体積の点で従来の変圧器より果して利点があり得るかどうかという可能性を検討することにある。したがって、ここで概算された値は理想的なものであ

り、絶縁、機械的強度、リード線からの熱流入、その他技術上の問題は考慮していない。それらを考慮した場合には、必ず、やや悪い結果に傾くことになる。

計算結果として、従来のものより重量において約 1/4、体積において約 1/2.6 のものが得られた。この長所も、冷却装置および特性上の問題から、余り実用的とは思われないが、特殊な目的としてならば使用されるであろう。

2. 空 心 変 圧 器

2.1 損失および重量

Fig. 1 に示すような同心配置巻線を考える。前述のように、最良の条件における値を得るのが目的であるから絶縁物の厚さは無視し、また

$$h \ll a \ll l \quad (1)$$

で、一次と二次との結合は十分密であるとする。

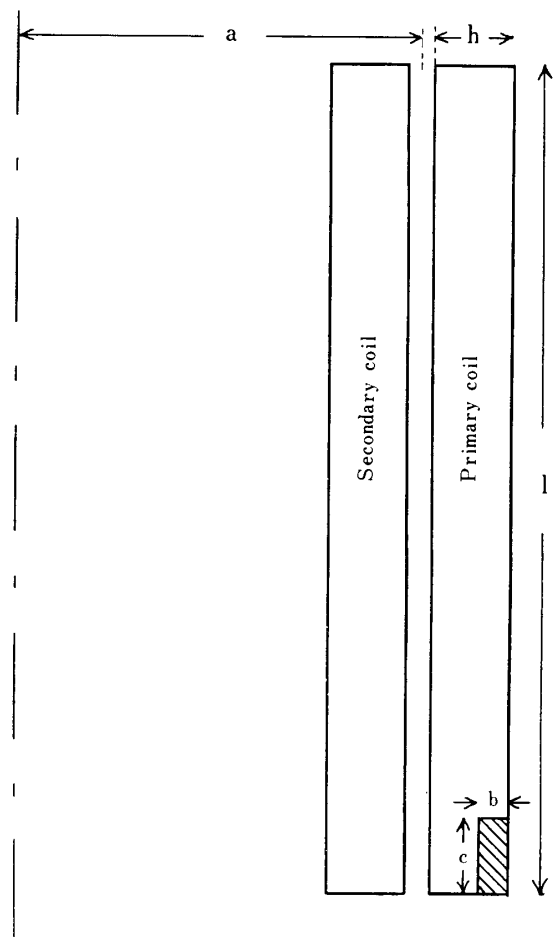


Fig. 1 Transformer without an iron core

いま、一次コイルのみについて考え、これに定格負荷電流 I が流れた場合、渦電流損を無視すれば伝導電流損はつぎのように書ける。

$$P_t = \rho \left(\frac{l_w}{S} \right) I^2 \quad (2)$$

一方

$$l_w = 2 \pi a N \quad (3)$$

$$S = bc = \frac{hl}{N} \quad (4)$$

であるので

$$P_t = \rho \frac{2 \pi a N^2 I^2}{hl} \quad (5)$$

となる。自己インダクタンスは

$$L = \int \frac{4 \pi^2 a^2 N^2}{l} \times 10^{-7} \quad [\text{H}] \quad (6)$$

で与えられるから

$$P_t = \rho I^2 \frac{L}{\int \pi \gamma_h (2a)^2} \times 10^7 \quad [\text{W}] \quad (7)$$

と書ける。また励磁電流 I_0 を

$$I_0 = zI \quad (8)$$

とおき、直流抵抗分 R が ωL に比し十分小さいときには(これは実際に確かめられる)、インダクタンス L は

$$L = \frac{E}{2 \pi f I_0} = \frac{E}{2 \pi f z I} \quad (9)$$

として定められる。結局変圧器の損失は

$$\bar{P}_t \approx 2 P_t = \frac{\rho P_o \times 10^7}{\int \pi^2 f^2 \gamma_h (2a)^2} \quad [\text{W}] \quad (10)$$

のように得られる。

効率、導体の体積および重量は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \eta_c &= \frac{P_o}{P_o + \bar{P}_t} \times 100 \quad [\%] \\ \eta_t &= \frac{P_o}{P_o + \bar{P}_t / \eta_r} \times 100 \quad [\%] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

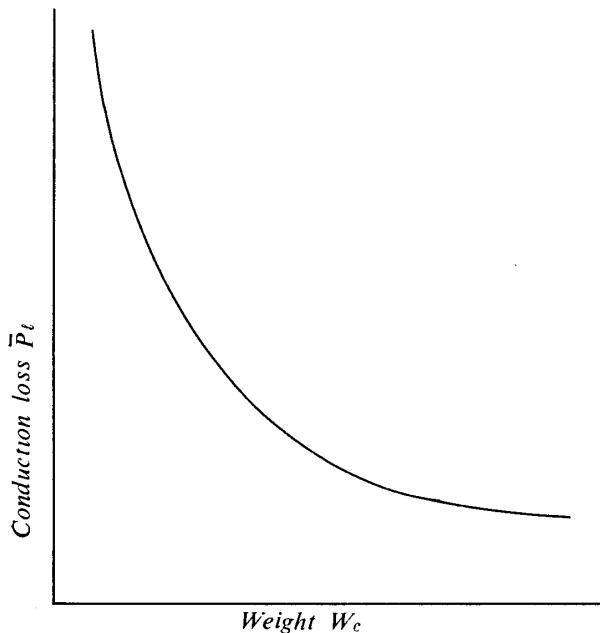


Fig. 2 General relation between the conduction loss \bar{P}_t and the transformer weight W_c for a coreless transformer

$$V_c = 6 \pi \gamma_h \gamma_t (2a)^3 \quad [\text{m}^3] \quad (\text{三相変圧器}) \quad (12)$$

$$W_c = 6 \pi \sigma \gamma_h \gamma_t (2a)^3 \quad [\text{kg}] \quad (\text{三相変圧器}) \quad (13)$$

次に、損失と重量との関係をもとめてみると(10)および(13)式より

$$\bar{P}_t = \left(\frac{6}{\pi^2} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{\rho P_o (\sigma \gamma_h \gamma_t)^{\frac{2}{3}}}{\int f^2 \gamma_h} W_c^{-\frac{2}{3}} \quad (14)$$

となり、重量が大となれば当然損失は小さくなっていくことがわかる。これをFig. 2に示す。

2・2 渦電流損

前節においては簡単のため、渦電流損を無視したが、これが許せるような導体の厚さを調べてみよう。

20°Kにおけるアルミニウムの抵抗率は非常に小さいために、磁場の侵入深さはかなり小で、50Hzにおいては0.383mmである。したがって、導体の厚さはこの値よりもずっと薄くなければならない。

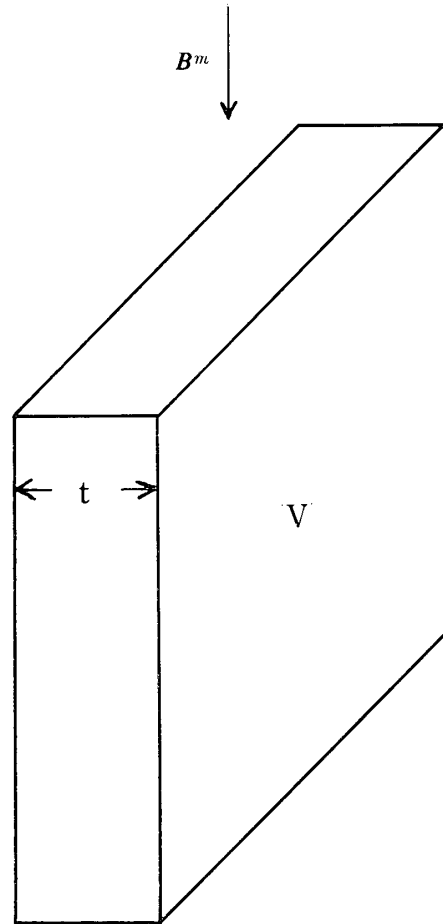


Fig. 3 Eddy current loss

Fig. 3に示すように、周波数 f 、最大磁束密度 B_m の一様な交番磁界中に、厚さ t が侵入の深さより十分薄いような薄板をおいた場合一般にその渦電流損は次式で表わされる。

$$P_e = \frac{\pi^2}{6} \frac{(B_m f t)^2}{\rho} V \quad [\text{W}] \quad (15)$$

導線を Fig. 4 のように厚さ t の薄板に多分割し、またコイル内の磁束密度分布を Fig. 5 に示すように仮定する。

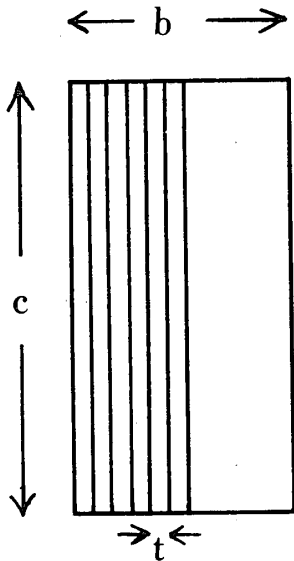


Fig.4 Multi-split conductor

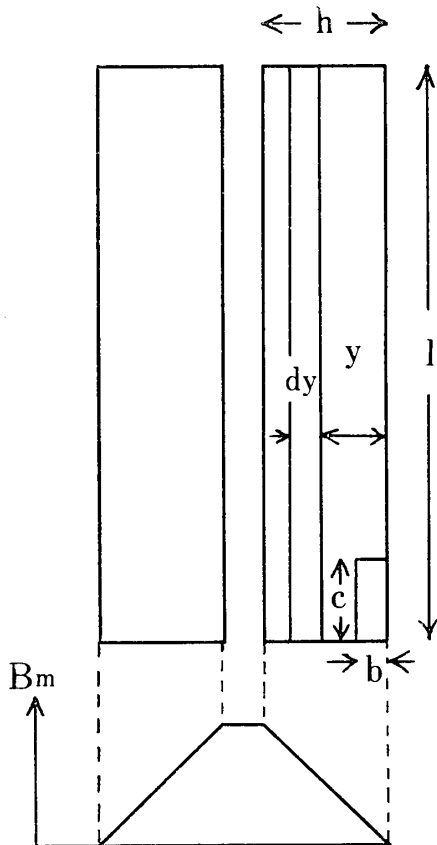


Fig.5 Flux density distribution in coils

更に、距離 y における磁束密度の最大値 B_m は

$$B_m = \frac{\sqrt{2} \left(\frac{I}{t} \right) (tN) \mu_0}{l} \frac{y}{h} \quad (16)$$

で与えられるものとする。 (16) 式を (15) 式に代入し、 y について積分すれば一つのコイルに対する渦電流損 P_{ec} がつぎのように求まる。

$$P_{ec} = \frac{2\pi^3}{9} (\mu_0 f t N I)^2 \frac{h a}{l \rho} \quad [W] \quad (17)$$

故に、伝導電流損と渦電流損とを合せた全導体損は、一コイル当り

$$P_{tl} = \rho \left(\frac{\pi N^2 I^2}{2 a \gamma_h \gamma_t} \right) (1 + \alpha) \quad (18)$$

となる。ここに

$$\alpha = \frac{P_{ec}}{P_t} = \left(\frac{\pi}{3} \frac{2 a \mu_0 f t \gamma_h}{\rho} \right)^2 \quad (19)$$

である。したがって、薄板の厚さは

$$t = \frac{3}{\pi} \frac{\rho}{\mu_0 f \gamma_h} \left(\frac{\sqrt{\alpha}}{2 a} \right) \quad (20)$$

と求まる。

コイルの直径 $2a$ に対して厚さ t の変化を、 α をパラメータとして Fig. 6 に示す。 図より渦電流損が無視できるためには、導体は μm 程度の厚さでなければならぬことがわかる。

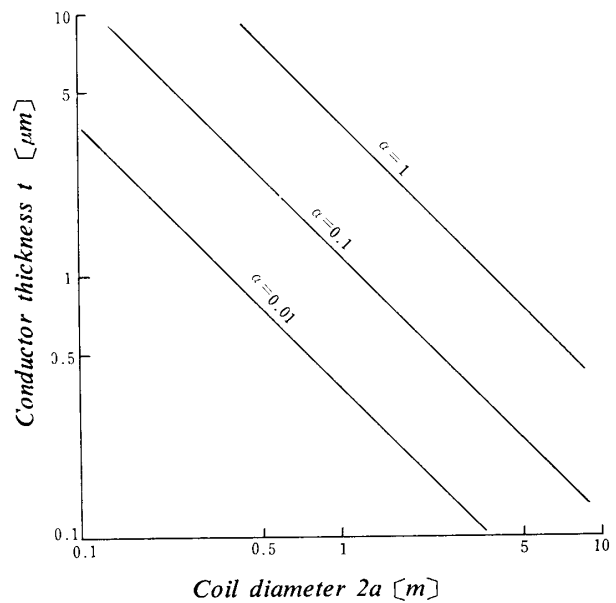


Fig. 6 Relations between the conductor thickness t and the coil diameter $2a$ for various α in the case of $\rho = 3 \times 10^{-11} \Omega m$, $f = 60 Hz$ and $\gamma_h = 0.1$

3. 従来の変圧器との比較

例として、三相190MVA変圧器²⁾ (一次電圧17.2kV 4結線, 二次電圧 220kVY結線, 一次相電流 3680A, 二次相電流 498A) について前述の式を用いて設計したものと、従来の変圧器とを比較してみよう。それらを各々 Table 1, Table 2に掲げる。Sizeは、Table 1ではFig. 7のように取り、Table 2では鉄心にコイルを巻いた状態での外側寸法である。

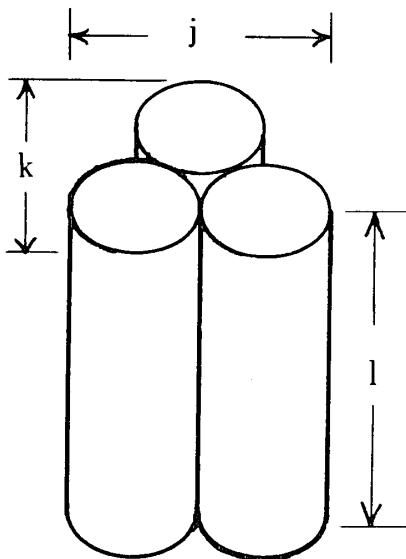


Fig. 7 Showing how to take the size of a 3-phase coreless transformer in Table 1

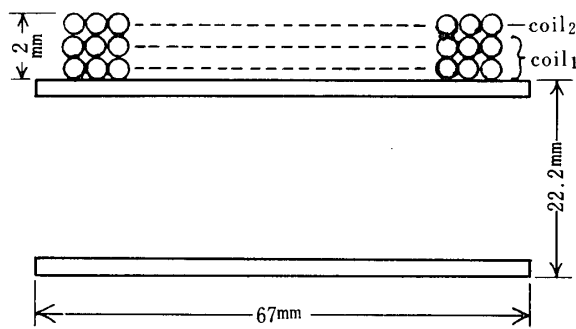


Fig. 8 Test coils for the measurement of a coupling constant. Each layer has 110 turns.

これらの表から、空心変圧器では従来の変圧器に比べ励磁電流および巻数が、およそ1ケタ程度大きくなることがわかる。Magnetizing current 5%, Coil dia. 1 m の空心変圧器は、冷却機入力 (将来値) においては従来の変圧器の損失と同程度であるが、重量においては約1/4, 体積においては約1/2.6となる。

4. 考 察

以上、理想的な場合つまり絶縁の厚さ、リード線からの熱流入、電磁機械力に対する強度等を考慮に入れない場合について、190MVA 空心変圧器の試算を行った。

空心変圧器において問題となる点は

- ①結合係数が大きくとれるかどうか
- ②ミクロン程度に薄い板状導体でコイルが作製可能かどうか

という点である。①に関しては、Fig. 8に示すような空心のポビンに巻数比 2 : 1 の二つのコイル coil 1 および coil 2 を重ねて巻いたものを実際に作り、その結合係数を測定してみたて 0.921 という値を得た。これは $2a/l (=1/r_c) = 0.332$ の場合であるので、 $2a/l$ の値をもつと小さい値とすれば、つまり細長くすれば、結合係数をかなり 1 に近づかせることは可能と思われる。実際の場合では、絶縁物のために一次コイルと二次コイルとの間隔が大きくなるので、一次と二次とを一層づつ交互に巻いてゆくなどの工夫が必要であろう。しかしそれでもやはり鉄心入りの変圧器よりは磁束の漏れが大きくなることはまぬがれないと思われるので、空心変圧器は電圧変動を余り問題としないところとか、負荷が一定であるようなところに使用されるであろう。②に関しては、ミクロン程度のアルミニウムの板に極く薄く絶縁を施し、これを数百~数百万枚重ねて一本の導線としてコイルを巻くことになるが、十分な機械的強度を持ったそのような多分割導線を作ることは、相当の技術的困難が予想される。

液体ヘリウム温度 (4.2°K) で電気抵抗が零となる超伝導体を変圧器に使用することも考えられているということは先に述べた。そのような変圧器で最も問題となるのは、短絡電流など故障時の過大電流により瞬間的に超伝導が壊れ、導体が温度上昇を起すことである。このため、再運転できるには数時間も待たねばならない。かかる事態を防止する為には、高速のしゃ断器が必要であるが、超伝導破壊が余りにも瞬間的でありすぎるので、現在のところそのような高速しゃ断器の製作は非常に困難である。ところが、低温アルミニウムを使った空心変圧器ではそれほどの突発的な熱発生はないので、しゃ断器の製作もそれほど困難でもなく、長時間の給電停止ということも起らないであろう。利点としては、更に、鉄心がないので巻きやすくまたデューワーも構造が簡単となること、安価な水素ガスで冷却することなどである。

Table 1 Design values for a 3-phase coreless transformer, rated at 190MVA, 60Hz, 220kV star, 17.2kV delta. It is taken that $\tau_t = 4$, $\tau_h = 0.1$, $\sigma = 3 \times 10^3$ and $1/\eta_r = 78(39)$ where the parenthesized figures indicate the estimated future values

| Magnetizing current α [%] | Coil dia. $2a$ [m] | Coil length l [m] | Size $j \times k \times l$ [m] | Weight W_c [ton] | No. of turns (primary) N_1 [turn] | No. of turns (secondary) N_2 [turn] | Loss \bar{P}_l [kW] | Refrigerator input power \bar{P}_l/η_r [kW] | Efficiency [%] | |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|--|----------------|----------------|
| | | | | | | | | | η_c | η_t |
| 10 | 1 | 4 | $2 \times 1.87 \times 4$ | 22.6 | 747 | 5520 | 10.7 | 832(416) | 99.994 | 99.564(99.781) |
| " | 2 | 8 | $4 \times 3.73 \times 8$ | 181 | 528 | 3900 | 2.67 | 208(104) | 99.999 | 99.891(99.945) |
| " | 3 | 12 | $6 \times 5.60 \times 12$ | 611 | 431 | 3190 | 1.19 | 92.5(46.2) | 99.999 | 99.951(99.976) |
| 5 | 1 | 4 | $2 \times 1.87 \times 4$ | 22.6 | 1060 | 7800 | 21.3 | 1670(832) | 99.989 | 99.132(99.564) |
| " | 2 | 8 | $4 \times 3.73 \times 8$ | 181 | 747 | 5520 | 5.34 | 416(208) | 99.997 | 99.781(99.891) |
| " | 3 | 12 | $6 \times 5.60 \times 12$ | 611 | 610 | 4510 | 2.37 | 185(92.4) | 99.999 | 99.903(99.951) |
| 1 | 1 | 4 | $2 \times 1.87 \times 4$ | 22.6 | 2360 | 17500 | 107 | 8320(4160) | 99.944 | 95.804(97.857) |
| " | 2 | 8 | $4 \times 3.73 \times 8$ | 181 | 1670 | 12300 | 26.7 | 2080(1040) | 99.986 | 98.917(99.455) |
| " | 3 | 12 | $6 \times 5.60 \times 12$ | 611 | 1360 | 10100 | 11.9 | 925(462) | 99.994 | 99.516(99.757) |

Table 2 Design values⁽²⁾ for a conventional 3-phase transformer, rated at the same 190MVA as Table 1. The total weight is the sum of an iron core and copper conductors

| Magnetizing current [%] | Size [m] | Total weight [ton] | No. of turns (primary) [turn] | No. of turns (secondary) [turn] | Iron loss [kW] | Copper loss [kW] | Total loss [kW] | Efficiency [%] |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|
| 0.39 | $2.73 \times 2.86 \times 5.02$ | 95.1 | 58 | 448 | 195 | 731 | 926 | 99.515 |

結論として、従来のものより重量において約1/4、体積において約1/2.6となる試算結果が得られたが、冷却装置等のため経済的に従来のものより有利とはいえないであろう。終りに有益なる御助言を賜った九州大学入江富士男教授に感謝の意を表す。

参 考 文 献

1) K.J.R. Wilkinson : Proc. IEE, 110, 2271 (1963)

2) K.J.R. Wilkinson : IEEE Transactions on Magnetics, MAG-2 (3), 369 (1966).

3) K.J.R. Wilkinson : Proc. IEE, 113, 1509 (1966).

4) P.H. Borchers : Proc. IEE, 113, 1953 (1966).

5) 木村久男：新版：変圧器の設計工作法，電気書院（1967）p. 279.

（昭和43年11月25日受理）