

三次巻線付単巻変圧器の負荷損測定について

Load Loss Measurement of Autotransformer with Tertiary Winding

真 流 和 徳*
Kazunori Maryū

内 容 梗 概

直接接地の高電圧電路ではその経済性と高能率の点から三次巻線付単巻変圧器が採用されようとする気運にある。この変圧器の合理的な負荷損の決定法は現在定められていない。本文は従来の3巻線変圧器と同様な方法で三次巻線付単巻変圧器の負荷損を測定し、かつその測定値から定格運転時の全負荷損を算出しようことを述べた。またその合理性を証明した。

1. 緒 言

近年における送電容量の増加率は目覚ましいものがあり、系統もそれにとまって超高压、直接接地の方向へ進展している。わが国においては送電電圧の異なる直接接地系統同志の系統連けはいまだ実現の段階には到達していないが、電力系統の広域運営が論議されている昨今であるので近い将来には必ず実現しよう情勢にある。このような場合にその安価と高能率の点から従来の3巻線変圧器に代って三次巻線付単巻変圧器が注目されてきた。

この単巻変圧器は種々のすぐれた特長を有するものであるが、効率、温度上昇などの運転特性、短絡電流などの過渡特性を予知するためには変圧器の全体の負荷損を測定し、計算する方法を確立しておく必要がある。

周知のように多巻線変圧器の負荷損の測定に関しては一般的な方法は見出されていない。ただ従来から多数の製作例のある3巻線変圧器については JEC-120 で各2巻線ずつ三回測定した負荷損を代数的に加減して求めた各個の巻線の負荷損の総和をもって全損失を規約的に表現している。三次巻線付単巻変圧器も一種の多巻線変圧器であるのでこのような簡便な全負荷損の決定法はないが今後この種の変圧器が多数製作される気運にあるのでこの測定法も解明しておくべき一つの課題である。本稿はその測定法、計算法について一つの試みを述べたものである。

2. 三次巻線付単巻変圧器の負荷損測定法

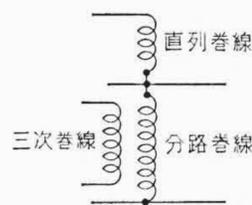
2.1 巻線変圧器として測定する方法

三次巻線付単巻変圧器(第1図)は直列巻線を一次、分路巻線を二次と想定すれば三次は同様な構造であるから、普通の3巻線変圧器の巻線配置となら変るところがない。したがって単巻変圧器であっても直列巻線と三次巻線とを組合せて負荷損を測定できる構造の変圧器であれば、3巻線変圧器と同様に各巻線の自己容量基準で各2巻線ごとの負荷損測定値から JEC-120 の方法によって全負荷損を求めることができる。すなわち基準容量(自己容量)における分離された負荷損を直列巻線 V'_s 、分路巻線 V'_c および三次巻線 V'_t とし、各2巻線宛の基準容量における測定損失を V_{sc} 、 V_{ct} 、 V_{st} とすれば分離負荷損は

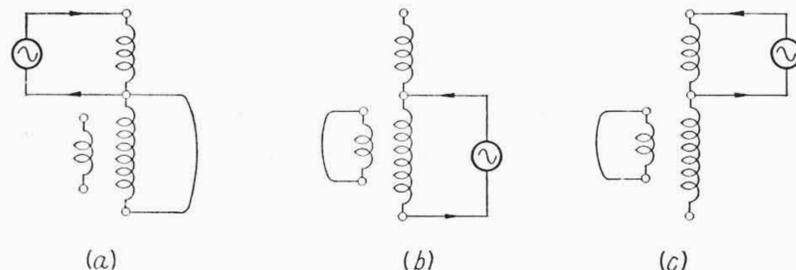
$$\left. \begin{aligned} V'_s &= \frac{V_{sc} + V_{st} - V_{ct}}{2} \\ V'_c &= \frac{V_{sc} + V_{ct} - V_{st}}{2} \\ V'_t &= \frac{V_{ct} + V_{st} - V_{sc}}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

と表わすことができる。測定回路は第2図に示す。これらの分離さ

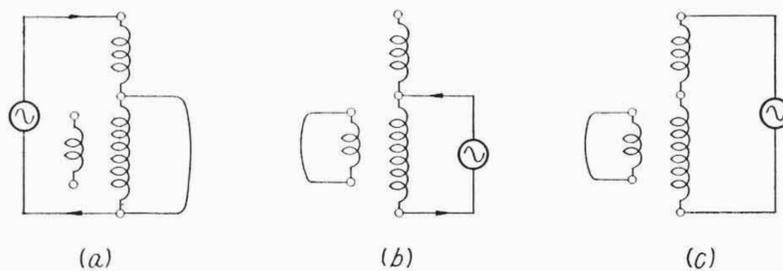
* 日立製作所国分工場



第1図 三次巻線付単巻変圧器の結線図



(a) 直列巻線—分路巻線 (b) 分路巻線—三次巻線 (c) 直列巻線—三次巻線
第2図 負荷損測定のための結線図 (I)



(a) 直列巻線—分路巻線 (b) 分路巻線—三次巻線 (c) 直列巻線—三次巻線
第3図 負荷損測定のための結線図 (II)

れたおのおのの負荷損は合理的に各巻線の損失をあらわすものでは決してないが、各巻線の容量に換算して合計した全負荷損はほぼ全負荷運転されているときの損失に相当することはすでに証明されている。

2.2 新しい一般的な測定法

前述の方法は大多数の三相変圧器の負荷損測定には適用することはむずかしく一般的な測定法ということとはできない。そこで三次巻線付単巻変圧器の一般的な測定法に移るわけであるが、この場合といえども3巻線変圧器と同様に全巻線に同時にそれぞれの定格電流を流して測定することは不可能である。したがって前述と同様に変圧器の巻線の組合わせを変えて三回の測定を行い、その値から分離して求めるより仕方がない。ここで一般的に考えられる組合わせは次の三通りであり、測定回路は第3図のようになる。

- (a) 直列巻線—分路巻線
- (b) 分路巻線—三次巻線
- (c) 直列巻線 } 三次巻線
分路巻線 }

しかしこのままの形では一見分離して全損失を求めることは不可

能と考えられるが、A. Boyajian氏⁽¹⁾ および O. T. Farry氏⁽²⁾ は上述の三測定値から三次巻線付単巻変圧器の星形等価回路または損失を算出する方法を述べている。すなわち(a)を3巻線変圧器の場合の一次～二次間、(b)を同じく二次～三次間、(c)も同様に一次～三次間と考えて3巻線変圧器と全然同一方法で、あたかも一次、二次および三次の巻線が独立していると考えてそれぞれ一次、二次および三次に負荷損を分離し等価回路における抵抗分を算出するかあるいは損失を計算している。しかしその合理性の証明は行われていない。これらの分離された値から全負荷損の計算が可能であることが証明できれば使用できるわけである。

3. 全負荷損の計算法

ここでは実際は三次巻線付単巻変圧器であるにかかわらず普通の3巻線変圧器と想定して計算するのであるからすべて線路容量が計算の基準となり単巻変圧器の自己容量のことは考えないことにする。ここに基準容量に換算した負荷損をそれぞれ

- 一次～二次間(直列巻線～分路巻線)..... V_{12}
- 二次～三次間(分路巻線～三次巻線)..... V_{23}
- 一次～三次間(直列巻線～三次巻線)..... V_{13}
- 一次回路 V_1
- 二次回路 V_2
- 三次回路 V_3

とすれば JEC-120 の方法で分離するのであるから

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \frac{V_{12} + V_{13} - V_{23}}{2} \\ V_2 &= \frac{V_{12} + V_{23} - V_{13}}{2} \\ V_3 &= \frac{V_{23} + V_{13} - V_{12}}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

となる。したがって一次容量を基準にとったとすれば全負荷損 V は3巻線変圧器と同様に

$$V = V_1 + k^2 V_2 + l^2 V_3 \dots\dots\dots (3)$$

となればよいわけであり、この式の合理性が証明できればよい。ここに

$$k = \frac{\text{二次容量}}{\text{一次容量}}$$

$$l = \frac{\text{三次容量}}{\text{一次容量}}$$

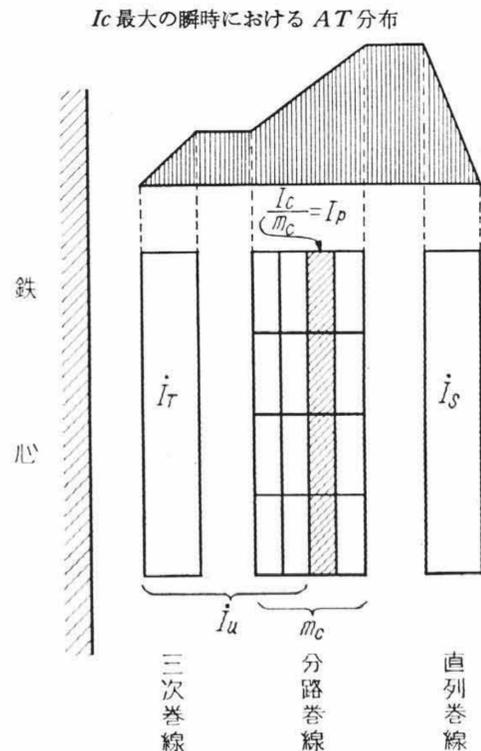
一般に知られているように変圧器の負荷損は抵抗損、うず電流損および漂游損からなっている。漂游損は外箱、鉄心、締金具などに発生し相当に大きな値に達することがある。うず電流損は大部分は軸方向の漏えい磁束により発生するものであるが半径方向の漏えい磁束による成分も含まれている。これらの値をすべて考慮に入れて計算することは実際上不可能であるので、従来から一般に行われているように負荷損は抵抗損および軸方向の漏えい磁束によるうず電流損よりのみならずと仮定して計算を進める。

三次巻線付の単巻変圧器の巻線配置は3巻線変圧器と同様であるから中央巻線の負荷損も同一方法で計算できる。一般に単巻変圧器は第4図に示すように外側から直列巻線、分路巻線および三次巻線の順になっている。

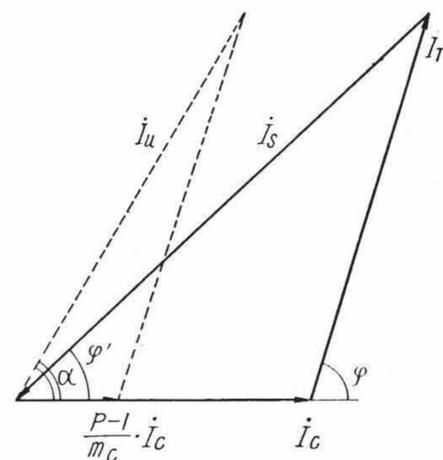
分路巻線の総電流(全巻数を1ターンとみたときの電流、つまりATのこと)を I_c 、巻線の層数を m_c とすれば第 p 層中の総電流は

$$I_p = \frac{I_c}{m_c} \dots\dots\dots (4)$$

となる。したがって第 p 層と鉄心までに含まれる総電流 I_u は



第4図 単巻線変圧器の巻線配置とAT分布



第5図 巻線総電流のベクトル図

$$I_u = I_T + \frac{(p-1)}{m_c} \cdot I_c \dots\dots\dots (5)$$

I_T は三次巻線の総電流である。 I_c 、 I_s 、 I_T の位相関係は第5図に示すとおりである。したがって

$$I_u^2 = I_T^2 + \frac{2(p-1)}{m_c} \cdot I_c I_T \cos \phi + \left(\frac{p-1}{m_c} \right)^2 \cdot I_c^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$I_u I_p \cos \alpha = \left(\frac{I_c}{m_c} \right) \cdot \left(\frac{p-1}{m_c} \cdot I_c + I_T \cos \phi \right) \dots\dots (7)$$

となる。第 p 層中の負荷損はよく知られているように

$$W_p = R_p \{ I_p^2 \phi(\xi) + (I_u^2 + I_u I_p \cos \alpha \phi(\xi)) \} \dots\dots\dots (8)$$

と表すことができる。ここに R_p は p 層を1ターンとみなしたときの抵抗である。

$$\phi(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \div 1 + \frac{4}{45} \xi^4 \quad (0 < \xi < 1 \text{ のとき})$$

$$\phi(\xi) = 2\xi \frac{\sinh \xi - \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} \div \frac{1}{3} \xi^4 \quad (0 < \xi < 1 \text{ のとき})$$

$$\xi = 2\pi \sqrt{\frac{nb}{l_s \rho}} \cdot a = 0.96 \sqrt{\frac{nb}{l_s}} \cdot a \quad (50 \sim 75^\circ\text{C} \text{ において})$$

$$= 1.05 \sqrt{\frac{nb}{l_s}} \cdot a \quad (60 \sim 75^\circ\text{C} \text{ において})$$

- ここに l_s : 漏えい磁路長 (cm)
- f : 周波数
- n : 漏えい磁束に直角方向の導体数

a : 導体の幅 (cm)
 b : 導体の厚み (cm)

(8)式に(6), (7)式を代入して

$$W_p = \left(\frac{I_C}{m_c}\right)^2 R_p \left[\varphi(\xi) + \left\{ p(p-1) + m_c(2p-1) \frac{I_T}{I_C} \cos \varphi + m_c^2 \left(\frac{I_T}{I_C}\right)^2 \right\} \phi(\xi) \right] \dots\dots\dots (9)$$

したがって分路巻線中の全負荷損 W_C は

$$W_C = \sum_{p=1}^{m_c} W_p = I_C^2 R_C \left[\left\{ \varphi(\xi) + \frac{m_c^2 - 1}{3} \phi(\xi) \right\} + \left\{ m_c^2 \left(\frac{I_T}{I_C}\right)^2 + m_c^2 \frac{I_T}{I_C} \cos \varphi \right\} \phi(\xi) \right] \dots\dots\dots (10)$$

$$= I_C^2 R_C \left[\varphi(\xi) + \phi(\xi) \left\{ m_c^2 \left(\frac{I_T}{I_C}\right)^2 + \frac{m_c^2 - 1}{3} + m_c^2 \frac{I_T}{I_C} \cos \varphi \right\} \right] \dots\dots\dots (11)$$

$$= I_C^2 R_C \left[\varphi(\xi) + \phi(\xi) \left\{ m_c^2 \left(\frac{I_S}{I_C}\right)^2 + \frac{m_c^2 - 1}{3} - m_c^2 \frac{I_S}{I_C} \cos \varphi' \right\} \right] \dots\dots\dots (12)$$

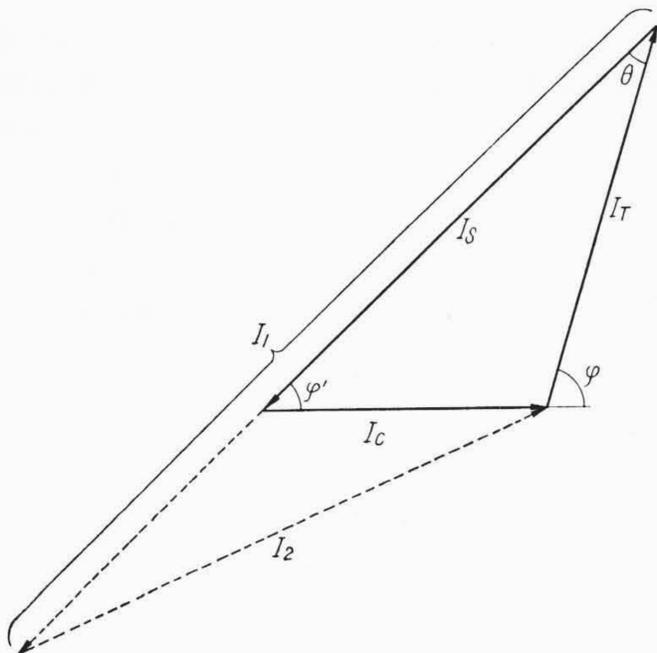
ここに R_C は分路巻線を1ターンとみなしたときの抵抗である。
 $\varphi(\xi)$ と $\phi(\xi)$ の略値を用いて

$$W_C = I_C^2 R_C + I_C^2 R_C \cdot \frac{m_c^2 - 0.2}{9} \cdot \xi^4 + I_T^2 R_C \frac{m_c^2}{3} \xi^4 + I_C I_T R_C \frac{m_c^2}{3} \xi^4 \cos \varphi$$

となる。この式の各項を次のようにおく

$$\left. \begin{aligned} I_C^2 R_C &= V_{CR} \\ I_C^2 R_C \cdot \frac{m_c^2 - 0.2}{9} \cdot \xi^4 &= W_{CC} \\ I_T^2 R_C \frac{m_c^2}{3} \xi^4 &= W_{CT} \\ I_C I_T R_C \frac{m_c^2}{3} \xi^4 \cos \varphi &= W_{CCT} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

V_{CR} は抵抗損, W_{CC} , W_{CT} , W_{CCT} はうず電流損である。
 単巻変圧器を一般3巻線変圧器として考えた時の一次総電流を I_1 , 二次総電流を I_2 とすれば各電流の位相関係は第6図のようになる。



第6図 総電流のベクトル図

この図より

$$I_S^2 = I_C^2 + I_T^2 + 2 I_C I_T \cos \varphi$$

となる。一方

$$I_C^2 = I_S^2 + I_T^2 - 2 I_S I_T \cos \theta$$

$$I_2^2 = I_1^2 + I_T^2 - 2 I_1 I_T \cos \theta$$

となるから

$$I_C^2 = I_S^2 + I_T^2 - \frac{I_S}{I_1} (I_1^2 + I_T^2 - I_2^2)$$

ここに

$$\frac{I_2}{I_1} = k, \quad \frac{I_T}{I_1} = l, \quad \frac{I_S}{I_1} = r, \quad \frac{I_C}{I_1} = x$$

とおけばそれらの関係は

$$x^2 = r^2 + l^2 - r(1 + l^2 - k^2) \dots\dots\dots (14)$$

となる。単巻変圧器の一次電圧を E_1 , 二次電圧を E_2 としたとき

$$\frac{E_1 - E_2}{E_1} = r$$

となる。この r を単巻比と称する。

基準容量に一次容量(線路)をとった場合の単巻変圧器の各一次容量基準に換算された測定負荷損を前述のようにそれぞれ V_{12} , V_{23} , V_{13} とすれば

$$\left. \begin{aligned} V_{12} &= V_S + (V_{CR} + W_{CC}) \cdot \frac{r^2}{x^2} \\ V_{23} &= \frac{V_T}{l^2} + (V_{CR} + W_{CC}) \cdot \frac{1}{x^2} \\ V_{13} &= V_S + \frac{V_T}{l^2} + (V_{CR} + W_{CC}) \cdot \frac{(1-r)^2}{x^2} + \frac{W_{CT}}{l^2} - \frac{(1-r) \cdot W_{CCT}}{lx \cos \varphi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

ここに V_S , V_T はそれぞれ定格負荷時における直列および三次巻線の負荷損である。分路巻線の V_{CR} および W_{CC} , W_{CT} , W_{CCT} もそれぞれ定格時における抵抗損およびうず電流損とする。

次に星形等価回路とするための一次回路の基準容量における負荷損を V_1 , 二次回路三次回路の負荷損をそれぞれ V_2 , V_3 とすれば(2)式より

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_S + (V_{CR} + W_{CC}) \frac{(1-r)^2 + r^2 - 1}{2x^2} + \frac{W_{CT}}{2l^2} - \frac{(1-r) \cdot W_{CCT}}{2lx \cos \varphi} \\ V_2 &= (V_{CR} + W_{CC}) \cdot \frac{r^2 + 1 - (1-r)^2}{2x^2} - \frac{W_{CT}}{2l^2} + \frac{(1-r) \cdot W_{CCT}}{2lx \cos \varphi} \\ V_3 &= \frac{V_T}{l^2} + (V_{CR} + W_{CC}) \cdot \frac{(1-r)^2 + 1 - r^2}{2x^2} + \frac{W_{CT}}{2l^2} - \frac{(1-r) \cdot W_{CCT}}{2lx \cos \varphi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

これらの値は結果的には3巻線変圧器と仮定して分離された負荷損と同一である。したがって定格負荷時の全負荷損 V にそれぞれ各回路ごとに分離された負荷損の合計値, $V_1 + k^2 V_2 + l^2 V_3$ が合致すればよい。

(16)式より

$$\begin{aligned} & V_1 + k^2 V_2 + l^2 V_3 \\ &= V_S + V_T + (V_{CR} + W_{CC}) \cdot \frac{r^2 - r - rk^2 + (1-r)l^2}{x^2} \\ & \quad + W_{CT} \frac{1 - k^2 + l^2}{2l^2} - W_{CCT} \cdot \frac{(1-r)(1 - k^2 + l^2)}{2lx \cos \varphi} \\ &= V_S + V_T + (V_{CR} + W_{CC}) \cdot \frac{r^2 + l^2 - r(1 + l^2 - k^2)}{x^2} + W_{CT} \\ & \quad + W_{CT} \cdot \frac{1 - k^2 - l^2}{2l^2} - W_{CCT} \cdot \frac{(1-r)(1 - k^2 + l^2)}{2lx \cos \varphi} \end{aligned} \dots\dots\dots (17)$$

しかるに(13), (14)式およびベクトル関係から

$$\left. \begin{aligned} x^2 &= r^2 + l^2 - r(1 + l^2 - k^2) \\ \cos \varphi &= \frac{r^2 - x^2 - l^2}{2lx} = \frac{r(1 - k^2 + l^2) - 2l^2}{2lx} \\ W_{CT} &= W_{CCT} \cdot \frac{l}{x \cos \varphi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

となるから(17)式をさらに変化させて

$$\begin{aligned} V_1 + k^2 V_2 + l^2 V_3 &= V_S + V_T + V_{CR} + W_{CC} + W_{CT} \\ &+ \left\{ \frac{1 - k^2 - l^2}{2lx \cos \varphi} - \frac{(1-r)(1 - k^2 + l^2)}{2lx \cos \varphi} \right\} \cdot W_{CCT} \\ &= V_S + V_T + V_{CR} + W_{CC} + W_{CT} \\ &+ \frac{r(1 - k^2 + l^2) - 2l^2}{2lx \cos \varphi} \cdot W_{CCT} \\ &= V_S + V_T + (V_{CR} + W_{CC} + W_{CT} + W_{CCT}) \end{aligned} \dots\dots\dots (19)$$

(19)式の括弧内の値は(13)式と同一、すなわち分路巻線の負荷損を表わす。したがって分離された見かけ上の一次、二次、三次回路の負荷損の合計は全負荷時の単巻変圧器の直列、分路および三次巻線の負荷損の和に等しいことが証明された。

4. 計 算 例

線路容量がそれぞれ一次 50 MVA 二次 55 MVA 三次 10 MVA, 電圧が一次 110 kV 二次 66 kV 三次 11 kV の単巻変圧器について全負荷損の計算を行ってみる。

- 一次容量基準における一次～二次間の負荷損 $V_{12} = 85.6 \text{ kW}$
 - 一次容量基準における二次～三次間の負荷損 $V_{23} = 600 \text{ kW}$
 - 一次容量基準における一次～三次間の負荷損 $V_{13} = 585.6 \text{ kW}$
- 基準容量を一次 50 MVA とする。

$$k = \frac{I_2}{I_1} = \frac{\text{二次容量}}{\text{一次容量}} = \frac{55}{50} = 1.1$$

$$l = \frac{I_T}{I_1} = \frac{\text{三次容量}}{\text{一次容量}} = \frac{10}{50} = 0.2$$

$$r = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = \frac{110 - 66}{110} = 0.4$$

$$x^2 = r^2 + l^2 - r(1 + l^2 - k^2) = 0.268$$

$$x = 0.518$$

よって(2)式より一次、二次、三次の一次容量基準における負荷損を求める。

$$V_1 = \frac{85.6 + 585.6 - 600}{2} = 35.6 \text{ kW}$$

$$V_2 = \frac{85.6 + 600 - 585.6}{2} = 50 \text{ kW}$$

$$V_3 = \frac{600 + 585.6 - 85.6}{2} = 550 \text{ kW}$$

したがって求める全負荷損は

$$V_1 + k^2 V_2 + l^2 V_3 = 35.6 + 1.1^2 \times 50 + 0.2^2 \times 550 = 118.1 \text{ kW}$$

となる。

5. 各巻線負荷損の分離

全負荷損は変圧器の特性や温度上昇を評価するための重要な因子であるが、全負荷時に各巻線の分担する負荷損がどれだけになるかを知ることも必要なことが多い。しかしこの値の厳密な計算はすこぶる困難である。3巻線変圧器については変圧器専門委員会で公表⁽³⁾した方法であるが、これは漂游損は軸方向の漏えい磁束のみに

よるうず電流損だけから成りたっているという仮定から出発しているので、実際の計算に適用するにあたっては相当の誤差を覚悟しなければならない。しかしほかに適当な計算法がないので、ここでも簡単に前述の方法に準じて計算して得られた分離方法を述べる。全負荷運転時の直列巻線の負荷損を V_S , 分路巻線の負荷損を V_C , 三次巻線の負荷損を V_T とする。しかるとき

$$\left. \begin{aligned} V_S &= V_1 + V_2 \cdot (1-r) - \frac{\sigma}{2} r^2 \\ V_C &= V_2 \cdot \frac{x^2}{r} + \frac{\sigma}{2} \cdot (r^2 + l^2) \\ V_T &= V_3 l^2 - V_2 \cdot \frac{(1-r)l^2}{r} - \frac{\sigma}{2} l^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

となる。ここに

$$\frac{\sigma}{2} = 3 \left(\frac{V_{CR}}{x^2} - \frac{V_2}{r} \right)$$

である。

(20)式より

$$V_S + V_C + V_T = V_1 + V_2(1-r) + V_2 \frac{x^2}{r} + V_3 l^2 - \frac{V_2(1-r)l^2}{r}$$

さらに $x^2 = r^2 + l^2 - r(1 + l^2 - k^2)$ であるから

$$V_S + V_C + V_T = V_1 + k^2 V_2 + l^2 V_3$$

となり、もちろん(19)式で表した全負荷損とも合致する。

ここで前述の計算例について計算してみる。ただし分路巻線の抵抗損は 50 MVA 基準で 166.2 kW である。

$$\frac{\sigma}{2} = 3 \cdot \left(166.2 - \frac{50}{0.4} \right) = 123.6 \text{ kW}$$

(20)式より

$$V_S = 35.6 + 50(1-0.4) - 123.6 \times 0.4^2 = 45.8 \text{ kW}$$

$$V_C = 50 \times \frac{0.286}{0.4} + 123.6 \times (0.4^2 + 0.2^2) = 58.3 \text{ kW}$$

$$V_T = 550 \times 0.2^2 - 50 \times \frac{(1-0.4)}{0.4} \times 0.2^2 - 123.6 \times 0.2^2 = 14 \text{ kW}$$

となる。

6. 結 言

三次巻線付単巻変圧器は巻線構造としては普通の3巻線変圧器と同様であるが接続法が異なる。3巻線変圧器については JEC-120 にその負荷損の測定法と全負荷損の計算法が述べてあるが、単巻変圧器についてはその方法はとりあげられておらず、実際どのような方法で行えばよいのかその方法が明らかでなかった。この全負荷損はたとえば工場で温度試験を行う場合に、実際に3巻線に定格状態の電流を流して行うことは困難であるので、一般に2端子間に電流を流し、放熱器を加減するか、電流を増減させるかして等価試験を実施しているが、この等価度を決定するために必要である。本報告では半径方向の漂游損やタンクなどに生ずる漂游損を無視しているので決して完全なものではないが、従来3巻線変圧器の全負荷損を求める方法とほぼ同一程度の精度を有する計算方式があること、およびその合理性を述べた。実際の単巻変圧器の負荷損測定に利用願えれば筆者の望外の喜びとするところである。

参 考 文 献

- (1) Blume: Transformer Engineering 111 (1951)
- (2) Farry: AIEE Transaction 73, 1486 (1954)
- (3) 報告: 電学誌 76, 632 (昭 31-6)