漏れ変圧器の等価回路について

前 田 稔 夫* 専 門 会 員 浦 山 隆*

Electric Equivalent Circuits for Leakage Transformers

Toshio Maeda, Takashi Urayama (Fellow Member)

(Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University)

ABSTRACT

The leakage transformer and its applied devices have been widely used in various fields, that is, regulated power supplies and ballasts for various discharge lamps.

The equivalent circuits for the leakage transformers are derived by various procedures, and authors have shown that such an equivalent circuit can be derived by applying Ampere's and Faraday's Law.

In this paper, the following issues are discussed;

The equivalent circuits by derived such a procedure are divided into two types, T and π but such an equivalent circuit is identical mathematically.

In the leakage transformers with a complicated construction of windings such that primary or secondary windings are partially wound around the secondary or primary core portions and since the auto leakage transformer, has the current and voltage sources added to the above T and π -type equivalent circuits, its equivalent circuits are expressed in same form as a popular leakage transformer with separated windings, and also, an equivalent circuit for the constant wattage ballast with auto leakage transformer is derived.

1. 緒 言

従来、電気機械の解析や特性算定には、等価回路による方法がよく用いられてきた。最近では、種々の分野で半導体化の試みがなされ、かなり実用化されてきているが、放電灯用安定器、定電圧装置などに漏れ変圧器は今なお盛んに使用されている。そして、このような電磁装置の解析に対しても等価回路による方法が適用され、それに伴って種々の電気-磁気変換方法が提案されてきた¹⁻³⁾。

一般に、変圧器のような電磁結合を有する磁気回路の電氣的等価回路は無数の回路が考えられるが、そのうちよく用いられるものは、T形等価回路と π 形等価回路に

大別される。そして、T形等価回路は通常の電力用変圧器の解析に、 π 形等価回路は鉄心の磁気飽和特性を表わすのにすぐれていること⁴⁾より、漏れ変圧器の解析に使用されることが多い。

筆者らは、さきに漏れ変圧器に対する電氣的等価回路を電気-磁気に関する二つの基本式、すなわち、(1) 磁束と電圧に関する Faraday's Law, (2) 起磁力と電流に関する Ampere's Law をもとにして導き出した⁵⁾。

本文においては、前述の等価回路をもとに各種巻線構造を有する巻線分離形、および単巻漏れ変圧器の等価回路の求め方を述べ、求められた等価回路の諸量と実際の漏れ変圧器の電氣的諸量との対応関係、および特性算定の基礎となる各巻線間の電圧関係式を求めた。また、等価回路定数の測定法についても述べた。

* 立命館大学理工学部

2. 巻線分離形漏れ変圧器⁵⁾

2.1 等 価 回 路

図 1 に示すような分離形漏れ変圧器で、氣中漏れ磁束と鉄心の非直線性を無視し、印加電圧は正弦波状に変化するものとした場合の起磁力の関係式、および一次、二次巻線に対する電圧方程式を求めると、(1)式および(2)式ようになる。

図 1 巻線分離形漏れ変圧器

$$\left. \begin{aligned} N_1 I_1 + N_2 I_2 &= \Phi_1 R_1 + \Phi_2 R_2 \\ N_1 I_1 &= \Phi_1 R_1 + \Phi_l R_l \\ \Phi_1 &= \Phi_2 + \Phi_l \\ V_1 &= r_1 I_1 + j\omega N_1 \Phi_1 \\ V_2 &= r_2 I_2 + j\omega N_2 \Phi_2 = Z_2 I_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= r_1 I_1 + j\omega N_1 \Phi_1 \\ V_2 &= r_2 I_2 + j\omega N_2 \Phi_2 = Z_2 I_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 V_1, V_2 ：一次巻線、二次巻線の端子電圧

I_1, I_2 ：一次巻線、二次巻線の巻線電流

r_1, r_2 ：一次巻線、二次巻線の巻線抵抗

N_1, N_2 ：一次巻線、二次巻線の巻数

R_1, R_2, R_l ：鉄心磁路 l_1, l_2, l_l に対するレクタンス

Z_2 ：二次負荷インピーダンス

(1) 式、(2) 式より Φ を消去すると、

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= r_1 I_1 + j\omega N_1^2 \frac{R_2 + R_l}{\Delta} I_1 + j\omega N_1 N_2 \frac{R_l}{\Delta} I_2 \\ 0 &= (r_2 + Z_2) I_2 + j\omega N_2^2 \frac{R_1 + R_l}{\Delta} I_2 \\ &\quad + j\omega N_1 N_2 \frac{R_l}{\Delta} I_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta = R_1 R_l + R_1 R_2 + R_2 R_l$$

となる。(3) 式より I_2 を消去し、 $\omega N^2/R = X$ なるリアクタンス成分で書き替えると(4)式のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= I_1 \left[r_1 + jx_{l1} + \frac{jax_0(r_2 + z_2 + jx_{l2})a^2}{a^2(r_2 + z_2 + jx_{l2}) + jax_0} \right] \dots\dots\dots (4) \\ N_1/N_2 &= a \end{aligned} \right\}$$

ただし、 $x_0 = \omega N_1 N_2 R_l / \Delta$ ：励磁リアクタンス成分

$x_{l1} = \omega N_1^2 R_l / \Delta$ ：一次漏れリアクタンス成分

図 2 T 形等価回路

$$a = \frac{N_1}{N_2}$$

$x_{l2} = \omega N_2^2 R_l / \Delta$ ：二次漏れリアクタンス成分

視察により、(4)式は図 2 のような回路網に対する電圧方程式となる。したがって、図 2 は図 1 の漏れ変圧器を一次側に換算した場合の等価回路を表わす。

図 2 の等価回路のリアクタンス部分について、Y- Δ 変換を施すと図 3 のような π 形等価回路が得られる。等価回路定数 x_{01}, x_{02}, x_l は、それぞれ次のように表わされる。

$x_{01} = \omega N_1^2 / R_l$ ：一次鉄心脚励磁リアクタンス成分

$x_{02} = \omega N_1^2 / R_2$ ：二次鉄心脚励磁リアクタンス成分

$x_l = \omega N_1^2 / R_l$ ：漏れ磁路に対するリアクタンス成分

図 3 π 形等価回路

図 3 の等価回路は高井²⁾その他によって提案され、一般に広く使用されているものと同一である。すなわち、図 2、図 3 の等価回路は互いに等価であり、T 形等価回路は回路網解析に用いられる Node Equation を磁気回路に適用して得られるものであり、 π 形等価回路は Mesh Equation を適用して得られる等価回路である。したがって、いずれの等価回路を使用してもその解析結果は同一となるが、一般に、図 3 の π 形等価回路が使用されているので、以後 π 形等価回路によって行なう。

2.2 特性算定式

図 3 において、一次、二次巻線抵抗を無視すると、次の関係式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_2' + V_l \quad (aV_2 = V_2') \\ V_l &= jx_l I_l \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

簡単のために負荷インピーダンスを抵抗負荷とし $z_2 = r_2$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} I_l &= I_{02} + I_2' \quad (I_2' = I_2/a) \\ I_{02} &= V_2' / jx_{02} \\ I_2' &= V_2' / r_2' \quad (r_2' = a^2 r_2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

したがって(5)、(6)式より

$$V_1 = V_2' \left\{ \left(1 + \frac{x_l}{x_{c2}} \right)^2 + j \frac{x_l}{r_2'} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、電源電圧 V_1 と二次電圧 V_2' の絶対値とその位相角 θ は

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{V_1}{V_2'} &= \sqrt{\left(1 + \frac{x_l}{x_{c2}} \right)^2 + \left(\frac{x_l}{r_2'} \right)^2} \\ \tan \theta &= \frac{x_l \cdot x_{c2}}{r_2' (x_l + x_{c2})} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。(8)式で x_l は磁路 l_l の一部に空隙を有するので一定とみなしうが、 x_{c2} は鉄心の磁束密度によって変化する、その値は、

$$x_{c2} = \omega N_1^2 / R_2 = \omega N_1^2 \mu A_2 / l_2 = k \mu \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 l_2 : 二次鉄心部分の平均磁路長

A_2 : 二次鉄心部分の鉄心断面積

N_1 : 一次巻線の巻数

となり、ほぼ鉄心の透磁率 μ に比例する。しかるに、 x_{c2} の値の決定には、鉄心の機械的寸法のほかに鉄心の磁束密度が与えられる必要がある。そのためには最初に V_2' の値を仮定する必要がある、この V_2' に対する磁束 Φ_2 を定め、その値から鉄心の透磁率を求めて x_{c2} を決定する。したがって印加電圧が与えられている場合には、はじめに仮定した V_2' 、 x_{c2} を (8) 式に代入して V_1 を計算し、与えられた V_1 の値に一致するようになるまで V_2' の値を修正する。

3. 複合二次コイルを有する漏れ変圧器

3.1 等価回路

図4は、二次巻線の一部が一次巻線の巻かれている鉄心脚にも巻かれた構造の漏れ変圧器で、これは溶接変圧器、定電圧変圧器によく使用されている。

図4 複合二次コイルを有する漏れ変圧器 (定電圧変圧器)

巻線抵抗、気中漏れ磁束をとともに無視すると、印加電圧と V_1 コイル N_{21} にかかる電圧 V_{21} の間には、負荷インピーダンスに関係なく

$$V_{21} = \frac{N_{21}}{N_1} V_1 \quad \dots\dots\dots (10)$$

なる関係が成り立つ。したがって、図4の漏れ変圧器はコイル N_1 と N_{21} の間には巻数比が $N_1 : N_{21}$ なる理想変圧器と、コイル N_1 と N_{22} の間には磁気分路を有し、巻数比が $N_1 : N_{22}$ なる巻線分離形漏れ変圧器とに分けることができる。そこで、一次電流中の負荷電流成分 I_{11} と二次電流 I_2 の間には、

$$N_1 I_{11} = (N_{21} + N_{22}) I_2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

なる関係が成り立つが、 $N_1 I_{11}$ を $N_{21} I_2$ に対応するアンペアターン $N_1 I_1'$ と $N_{22} I_2$ に対応するアンペアターン $N_1 I_1''$ に分けると (11) 式は、

$$N_1 (I_1' + I_1'') = (N_{21} + N_{22}) I_2$$

となるので、アンペアターン $N_{21} I_2$ に対応する一次負荷電流成分 I_1' を電流源として電源に対し並列に取り出し、さらに巻線 N_{21} による誘起電圧を電圧源 V_{21} として、二次負荷に直列に挿入すると図4は図5のような回路で表わすことができる。図5の回路の漏れ変圧器部分をT形およびπ形等価回路で表わすと、それぞれ図6(a),

図5 図4の回路図

(a) T形等価回路

図6(a) 等価回路

$$\begin{aligned} I_2'' &= \left(\frac{N_{22}}{N_1} \right) I_2, & I_1'' &= \left(\frac{N_{21}}{N_1} \right) I_2 = \left(\frac{N_{21}}{N_{22}} \right) I_2', \\ V_{21}' &= \left(\frac{N_{21}}{N_{22}} \right) V_1, & Z_1' &= \left(\frac{N_1}{N_{22}} \right)^2 Z_2 \end{aligned}$$

(b) π形等価回路

図6(b) 等価回路

(b) のようになる。図 6 の各リアクタンスはそれぞれ (3) 式, (4) 式で表わされるものと同じである。

3.2 特性算定式

図 6 (b) において, $z_2 = r_2$ としたとき, 一次印加電圧とコイル N_{22} 端電圧の関係は次のようになる。

$$V_1 = V_l + V_{22}' \quad \dots\dots\dots(12)$$

また,

$$\left. \begin{aligned} V_l &= jx_l I_l = jx_l (I_{02} + I_2') \\ I_{02} &= V_{22}' / jx_{02} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(13)$$

より

$$V_1 = V_{22}' \left\{ 1 + \frac{x_l}{x_{02}} \right\} + jx_l I_2' \quad \dots\dots\dots(14)$$

また, 次端子電圧 V_2' は

$$V_2' = V_{22}' + V_{21}' = V_{22}' + \frac{N_{21}}{N_{22}} V_1 = I_2' r_2' \quad \dots\dots\dots(15)$$

となり, (15) 式より I_2' を求め, (14) 式に代入すると,

$$V_1 = V_{22}' \left(1 + \frac{x_l}{x_{02}} + j \frac{x_l}{r_2'} \cdot \frac{N_{21}}{N_{22}} V_1 \right) \quad \dots\dots\dots(16)$$

となる。これより,

$$V_1 \left(1 - j \frac{x_l}{r_2'} \cdot \frac{N_{21}}{N_{22}} \right) = V_{22}' \left\{ 1 + \frac{x_l}{x_{02}} + j \frac{x_l}{r_2'} \right\} \quad \dots\dots\dots(17)$$

となる。したがってその絶対値および V_1 と V_{22}' 間の位相角 θ_{1s} は

$$\left. \begin{aligned} \left| \frac{V_1}{V_{22}'} \right| &= \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{x_l}{x_{02}} \right)^2 + \left(\frac{x_l}{r_2'} \right)^2}{1 + \left(\frac{x_l}{r_2'} \cdot \frac{N_{21}}{N_{22}} \right)^2}} \\ \tan \theta_{1s} &= \frac{x_l r_2' \left(\frac{N_{22} + N_{21}}{N_{22}} + \frac{x_l}{x_{02}} \cdot \frac{N_{21}}{N_{22}} \right)}{r_2' \left(1 + \frac{x_l}{x_{02}} \right) - \frac{N_{21}}{N_{22}}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(18)$$

となる。また, V_{22}' と二次端子電圧 V_2' の関係は (15) 式に (17) 式の関係代入することにより

$$V_2' = V_{22}' \left\{ \frac{1 + \left(1 + \frac{x_l}{x_{02}} \right) \frac{N_{21}}{N_{22}}}{1 - j \frac{x_l}{r_2'} \cdot \frac{N_{21}}{N_{22}}} \right\} \quad \dots\dots\dots(19)$$

となり, その絶対値および V_2' と V_{22}' 間の位相角 θ_{2s} は,

$$\left. \begin{aligned} \left| \frac{V_2'}{V_{22}'} \right| &= \left\{ 1 + \frac{N_{21}}{N_{22}} \left(1 + \frac{x_l}{x_{02}} \right) \right\} \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{x_l}{r_2'} \cdot \frac{N_{21}}{N_{22}} \right)^2}} \\ \tan \theta_{2s} &= \frac{x_{02} \frac{N_{21}}{N_{22}}}{r_2'} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(20)$$

となる。 V_{22}' が与えられるならば, 負荷一定なる条件のもとでは, (18) 式, (20) 式より電源電圧 V_1 および二次端子電圧 V_2' が与えられる。一次電圧 V_1 と二次端子電圧 V_2' の関係は (17) 式, (19) 式より, 次のように表わすことができる。

$$V_1 = V_{22}' \left\{ \frac{\left(1 + \frac{x_l}{x_{02}} \right) + j \frac{x_l}{r_2'}}{1 + \left(1 + \frac{x_l}{x_{02}} \right) \frac{N_{21}}{N_{22}}} \right\} \quad \dots\dots\dots(21)$$

そして, その絶対値 V_1 と V_2' 間の位相角 θ_{12} は

$$\left. \begin{aligned} \left| \frac{V_1}{V_2'} \right| &= \frac{1}{1 + \left(1 + \frac{x_l}{x_{02}} \right) \frac{N_{21}}{N_{22}}} \sqrt{\left(1 + \frac{x_l}{x_{02}} \right)^2 + \left(\frac{x_l}{r_2'} \right)^2} \\ \tan \theta_{12} &= \frac{x_l \cdot x_{02}}{r_2' (x_{02} + x_l)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(22)$$

となる。なお, 図 7 のような一次低圧, 二次高圧単巻

図 7 単巻漏れ変圧器

漏れ変圧器は図 4 の $N_{21} = N_1$ とした場合に相当する。これを図 6 (b) の等価回路と比較すると, 巻線 N_{22} , N_1 にかかる電圧はそれぞれ V_1 , V_{22}' であり, N_{22} , N_1 中を流れる電流は I_2' および $(I_1' + I_0)$ となる。

4. 複合一次コイルを有する漏れ変圧器

4.1 等価回路

図 8 のように, 一次巻線の一部分が二次巻線と同一の鉄心脚に巻かれた場合について考える。

図 8 複合一次コイルを有する漏れ変圧器

巻線 N_2 と N_{12} の間には理想変圧器と同様の関係が、 N_2 と N_{11} の間には分離形漏れ変圧器としての関係がある。巻線 N_{12} にかかる電圧 V_{12} と二次電圧 V_2 の間には、

$$V_{12} = V_2 \frac{N_{12}}{N_2}$$

の関係が成り立つので、 V_{12} を電圧源として一次側に取り出し、また、二次電流 I_2 を一次巻線 N_{11} によるアンペアターンに対応するアンペアターン $N_2 I_{21}$ と、 N_{12} によるアンペアターンに対応するアンペアターン $N_2 I_{22}$ に分け、 I_{22} を電流源として取り出すと図9のように巻数比が $N_{11} : N_2$ なる分離形変圧器に等価変換できる。

図9 図8に対する回路図

すなわち、一次電流の負荷電流成分 I_{11} と二次電流 I_2 の間には、

$$(N_{11} + N_{12})I_{11} = N_2 I_2 = N_2 (I_{21} + I_{22}) \quad \dots\dots\dots (23)$$

なる関係が成り立つ。また、アンペアターン $N_2 I_{21}$ 、 $N_2 I_{22}$ はそれぞれ次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} N_2 I_{21} &= N_{11} I_{11} = N_2 I_2 (N_{11}/N_{12} + N_{11}) \\ N_2 I_{22} &= N_{12} I_{11} = N_2 I_2 (N_{12}/N_{12} + N_{11}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (24)$$

また、図9で Z_{21} 、 Z_{22} にかかる電圧は等しく、次の関係式が成り立つ。

$$V_2 = Z_{21} I_{21} = Z_{22} I_{22} \quad \dots\dots\dots (25)$$

しかるに、図8、図9において二次電圧は同一の値を有することより、

$$\left. \begin{aligned} V_2 &= I_2 Z_2 = I_{21} Z_{21} = I_2 Z_{21} N_{11}/(N_{11} + N_{12}) \\ V_2 &= I_2 Z_2 = I_{22} Z_{22} = I_2 Z_{22} N_{12}/(N_{11} + N_{12}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (26)$$

となり、 Z_{21} 、 Z_{22} は実際の負荷インピーダンス Z_2 に対し次のように換算される。

$$\left. \begin{aligned} Z_{21} &= \frac{N_{11} + N_{12}}{N_{11}} Z_2 \\ Z_{22} &= \frac{N_{11} + N_{12}}{N_{12}} Z_2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (26')$$

図10 π 形等価回路

$$I_{21}' = I_{21} \left(\frac{N_2}{N_{11}} \right), \quad I_{22}' = I_{22} \left(\frac{N_2}{N_{11}} \right), \quad V_2' = V_2 \left(\frac{N_{11}}{N_2} \right)$$

図11 簡易等価回路

図9に対する π 形等価回路は図10のように表わされるが、特性計算は、電源を取り去った図11の等価回路でも行なうことができる。

4.2 特性算定式

負荷を抵抗負荷 r_2 とすると、電圧 V_{11} と V_2 の関係は(6)式と同様であり、一次電圧 V_1 と二次電圧の関係は、

$$V_1 = V_{12} + V_{11}$$

であり、 V_{12} 、 V_{11} は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} V_{12} &= \frac{N_{12}}{N_2} V_2 = \left(\frac{N_{12}}{N_{11}} \right) V_2' \\ V_{11} &= V_2' \left\{ \left(1 + \frac{x_l}{x_{o2}} \right) + j \frac{x_l}{r_{21}'} \right\} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (27)$$

したがって V_1 は

$$V_1 = V_2' \left\{ \left(1 + \frac{x_l}{x_{o2}} + \frac{N_{12}}{N_{11}} \right) + j \frac{x_l}{r_{21}'} \right\} \quad \dots\dots\dots (28)$$

ただし、

$$r_{21}' = \left(\frac{N_{11}}{N_2} \right)^2 \left(\frac{N_{11} + N_{12}}{N_{11}} \right) r_2 = \frac{N_{11}(N_{11} + N_{12})}{N_2^2} r_2$$

となる。したがって V_1 、 V_2' の絶対値とその位相角 θ_{12} は、次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_1}{V_2'} &= \sqrt{\left(1 + \frac{x_l}{x_{o2}} + \frac{N_{12}}{N_{11}} \right)^2 + \left(\frac{x_l}{r_{21}'} \right)^2} \\ \tan \theta_{12} &= \frac{x_l}{r_{21}' \left(1 + \frac{x_l}{x_{o2}} + \frac{N_{12}}{N_{11}} \right)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (29)$$

なお、 V_{11} と V_2' の絶対値およびその間の位相角 θ_{s2} は27式より次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_{11}}{V_2'} &= \sqrt{\left(1 + \frac{x_l}{x_{o2}} \right)^2 + \left(\frac{x_l}{r_{21}'} \right)^2} \\ \tan \theta_{s2} &= \frac{x_l}{r_{21}' \left(1 + \frac{x_l}{x_{o2}} \right)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (30)$$

一次高圧、二次低圧単巻漏れ変圧器の等価回路は、図10で $N_{12} = N_2$ なる場合に相当する。ただし、ここで注意すべきことは、単巻漏れ変圧器の共通巻線を流れる電流は、図10の等価回路では I_{21}' に相当するが、実際には、これに全励磁電流 I_0 を加えた $I_0 + I_{21}'$ なる値となることである。

5. 電力形安定器として用いられる漏れ変圧器の等価回路

漏れ変圧器を定電力形安定器として使用する場合、所定の無負荷電圧および動作電圧が得られるよう図 5 のような巻線配置構造のもの、およびこれを単巻変圧器化したもの、あるいは巻線構造を一部変形した図 12 のような構造のものがよく用いられる。

図 12 定電力形安定器

図 12 は巻線 N_{11} , N_{12} よりなる一次巻線部分が単巻変圧器構造になっているので、これを 3 章で述べた方法によって一次巻線が $N_1 = N_{11} + N_{12}$ 、二次巻線が $N_2 + N_2$

図 13 12 と等価本巻線分離形漏れ変圧器

図 14 等価回路

$$a = \frac{N_1}{N_2}, \quad V_{12}' = V_{12} \frac{N_1}{N_2} = \frac{N_{12}}{N_2} V_1, \\ I_{12}' = \frac{N_{12}}{N_1} I_2 = \frac{N_{12}}{N_2} I_2', \quad Z_2' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right) Z_2$$

となる図 13 のような分離形変圧器に変形できる。図 13 の π 形等価回路は図 14 のように表わすことができる。なお、単巻漏れ変圧器部の共通巻線 N_{12} に流れる電流は $I_{11} + I_0$ である。

6. 等価回路定数の決定法

漏れ変圧器の機械的寸法が明らかな場合は、 π 形等価回路の回路定数は(4)式より

$$\left. \begin{aligned} x_{01} &= \omega N_1^2 / R_1 = \omega N_1^2 \mu A_1 / l_1 = k_1 \mu \\ x_{02} &= \omega N_1^2 / R_2 = \omega N_1^2 \mu A_2 / l_2 = k_2 \mu \\ x_l &= \omega N_1^2 / R_l = \omega N_1^2 \mu A_l / l_l \doteq k_l \mu_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots(31)$$

として求められる。ただし、 μ_1 , μ_0 は鉄心および空気中の透磁率である。漏れ磁路に空隙を有する場合、漏れリアクタンス x_l は、近似的に空隙のレクタンスによって決まるものとして、磁束密度に関係なくほとんど一定とみなしてよい。しかし、 x_{01} , x_{02} は鉄心の磁束密度によって変化し、それは鉄心の $B-\mu$ 特性に従う。これを実測によって求める場合、次のような方法が考えられる。

すなわち、無負荷試験によって得られる一次巻線からみた無負荷リアクタンス x_{10} は、一次巻線の抵抗を無視すると図 2 で $Z_2 \rightarrow \infty$ において、

$$x_{10} = \left(\frac{V_1}{I_1} \right)_{Z_2 \rightarrow \infty} = x_{l1} + a x_0 \quad (\text{T-type}) \dots\dots(32)$$

また、 π 形等価回路で表わした場合、図 3 の関係より

$$x_{10} = \left(\frac{V_1}{I_1} \right)_{Z_2 \rightarrow \infty} = \frac{x_{01}(x_{02} + x_l)}{x_{02} + x_{01} + x_l} \quad (\pi\text{-type}) \dots\dots(32')$$

となる。これをレクタンスの関係式で表わした場合、(32) 式、(32') 式はともに次のように表わされる。

$$x_{10} = \omega N_1^2 \frac{R_2 + R_l}{R_1 R_l + R_1 R_2 + R_2 R_l} \dots\dots(32'')$$

R_1 , R_2 はともに R_l 比し無視しえるほど小さいとすると、(32'') 式は

$$x_{10} = \omega N_1^2 (R_1 + R_2)^{-1} \dots\dots(33)$$

となり、このとき必要なアンペアターンは次式を満足する値となる。

$$N_1 I_0 = \Phi_0 (R_1 + R_2) = N_1 (I_{01} + I_{02}) \dots\dots(34)$$

すなわち、漏れ変圧器の漏れ磁路を取り去り、通常の変圧器とするか、あるいは漏れ磁路を通る磁束がゼロとなるような試験方法を行なえば、このとき電源より流入する電流は(34)式を満足する。その方法としては、分離形漏れ変圧器において、一次、二次巻線それぞれに同相電圧を印加し、その電圧比が巻数比になるようにする。このとき、一次、二次巻線中の電流によって作られる磁束は等しくなり、漏れ磁路中の磁束はゼロとなる。このときの一次巻線、二次巻線中の電流が I_{01} , I_{02} に相

当する⁴⁾。

また、簡易測定法として、一次、二次鉄心断面積、平均磁路長がともに等しい対称配置構造では、 $R_1=R_2$ となるので、(34)式は $N_1 I_0=2\Phi_0 R_1$ となる。したがって、漏れ変圧器の漏れ磁路を取り去った状態で無負荷試験を行なえば、このときの一次電流の半分が一次、二次鉄心部分に必要な励磁電流 I_{01} , I_{02} となる。

また、短絡試験で求めた一次側からみた短絡リアクタンス x_{1s} は $Z_2 \rightarrow 0$ よりリアクタンスで表示すると、

$$\left. \begin{aligned} x_{1s} &= \left(\frac{V_1}{I_1} \right)_{Z_2=0} \\ &= x_{l1} + \frac{ax_0 \cdot a^2 x_{l2}}{a^2 x_{l2} + ax_0} \quad (\text{T-type}) \\ &= \frac{x_l \cdot x_{01}}{x_l + x_{01}} \quad (\pi\text{-type}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(35)$$

となる、これをレクタンスで表示すると、

$$x_{1s} = \omega N_1^2 \left(\frac{1}{R_1 + R_l} \right) \dots\dots\dots(35')$$

となり、二次鉄心部分のレクタンスは関係しない。二次短絡試験では二次鉄心部分には磁束はなく、一次巻線と鎖交する全磁束 Φ_1 は一次鉄心部分、漏れ磁路中を通る。図1で一次巻線と短絡した場合についてアンペータンの関係式を求めると、

$$\left. \begin{aligned} N_1 I_1 &= \Phi_1 R_1 + \Phi_1 R_l = \Phi_1 (R_1 + R_l) \\ N_2 I_2 &= \Phi_1 R_l \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(36)$$

となり、漏れ磁路中に磁透 Φ_1 を通すに必要なアンペータンは、(36)式の第2式より $N_2 I_2$ で与えられる。したがって一次側よりみた漏れリアクタンス x_l は、 I_2 を一次側に換算し、次式で与えられる。

$$x_l = \frac{V_1}{I_2/a} \dots\dots\dots(37)$$

7. 結 言

巻線分離形、および単巻漏れ変圧器の等価回路について述べた。π形等価回路は分離形漏れ変圧器に対し過去

に提案されてきたものと同一であり、あえて特別の電気-磁気変換法を用いなくとも Ampere's Law, および Faraday's Law を用いても導出することができる。また、筆者らはすでにT形等価回路を提案してきたが、T形、π形等価回路は、両回路のリアクタンス素子部分をY-Δ変換することによりどちらの等価回路にも表示でき、互いに等価である。

単巻漏れ変圧器は、共通巻線にかかる電圧と共通巻線内の電流によるアンペータンに対応する専用巻線（一次高圧の場合は一次側専用巻線、二次高圧の場合は二次専用巻線）内電流成分をそれぞれ電圧源、電流域として外部に取り出すことによって巻線が共通巻線、専用巻線と同一の巻数を有する巻線分離形変圧器と同様に取り扱うことができるので、特性算定も比較的簡単に行なうことができる。

π形等価回路によって漏れ変圧器の特性を算定する場合には、まず x_{l2} の値を決定する必要がある。そのためには、二次端子電圧（したがって二次側鉄心磁束密度）を仮定する必要がある。この方法によると、規定の一次電圧に対する二次電圧を求める場合、二次電圧より一次電圧を逆算し、その値が規定電圧に近づくよう Cut and Try 法によるか、規定一次電圧の若干の値について計算し作図によって求める必要がある。具体的な計算方法については別に述べる。

終わりに、本研究を進めるにあたりご指導ならびにご助力と賜わった本学辻村寛助教授に深謝します。

参 考 文 献

- (1) 猪狩：電学誌 83 (昭38) 2095
- (2) 高井，天野：電学誌 74 (昭29) 785
- (3) E. R. Laithwaite : Proc. IEE, 114, (1967) 1805
- (4) H. W. Lord : Trans. AIEE, 78 pt. I, (1959) 580
- (5) 山本，前田，浦山：照学誌 56 (昭47) 131

(受付1974年5月17日)

×

×

×