

3巻線変圧器の負荷損の測定法について

技術部変圧器課 杉田正吉郎

On the Measurement of the Load Losses of a Three-Winding Transformer

By Shōkichirō Sugita
(Transformer Div., Eng'g. Dep't.)

Synopsis

In the following article, the author examines the method with which the load losses of a three-winding transformer usually has been measured and point out the defect of that method, and will introduce a new idea to complete it.

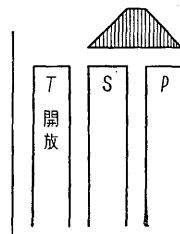
I. 序 言

3巻線変圧器において、指定の負荷条件に適合する負荷損を正確に決定するためには、特殊な測定方法を使用しなければならない。例えば3巻線変圧器の2次、3次端子にそれぞれある負荷をつなぎ、1次側からその定格電流を通すような定格周波数の電圧を加えた時、2次、3次の電流がそれぞれ定格電流になるようにその負荷を調整し、1次入力から2次、3次の出力を差引いたものをもってこの変圧器の負荷損とする。というような方法がまず考えられるが、そのような負荷を試験のために調達することが一般に困難である。ここに述べようとする方法は、別に真新しい方法ではなく、JEC-120（静止誘導機器規格）に記載の方法を検討し、その欠点を指摘し、これを補足するものである。以下これを詳細に述べ諸賢の御批判を願う次第である。

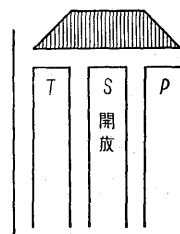
$$\frac{V_{PT} + V_{ST} - V_{PS}}{2} \equiv C$$

この方法は簡単でしかも算術的に筋が通っている。しかしながらこれをよく考えてみると以下のように A 、 B および C は各巻線の負荷損ではないことがわかる。

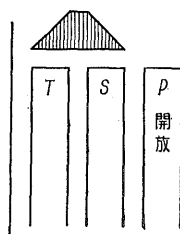
同心配置巻線変圧器では、それぞれの短絡試験時の漏洩磁束密度分布は、周知の通り第1～3図のようになる。（勿論巻線端絶縁強化や、タップをとったことによる半径方向漏洩磁束はあるが、これはできるだけ



第1図 3次開放時の磁束密度分布
Fig. 1. Flux density distribution at T'ry open



第2図 2次開放時の磁束密度分布
Fig. 2. Flux density distribution at S'ry open



第3図 1次開放時の磁束密度分布
Fig. 3. Flux density distribution at P'ry open

II. 3巻線変圧器の負荷損の測定

1. 従来の測定方法の検討

一般に3巻線変圧器の負荷損の測定は JEC-120 によって、1次2次間、1次3次間、および2次3次間におけるそれぞれの短絡試験より得た負荷損を V_{PS} 、 V_{PT} および V_{ST} とし、(1)式で算出した A 、 B および C を以てそれぞれ1次2次および3次巻線の負荷損としている。（説明を簡単にするために各巻線の容量に換算、温度換算等は省略する）

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_{PS} + V_{PT} - V_{ST}}{2} &\equiv A \\ \frac{V_{PS} + V_{ST} - V_{PT}}{2} &\equiv B \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

小さくなるように設計すべきものであるし、事実小さいから半径方向漏洩磁束は省略する) 第1図および第3図のような磁束分布による1次2次および3次巻線の負荷損をそれぞれ V_P V_S および V_T とすると、1次3次間で測定した V_{PT} 中には V_P , V_T の他に第2図のような磁束分布による2次巻線のうず流損 σ が含まれている。したがって (1) 式は次のように書き直せる。

$$\left. \begin{aligned} & \frac{V_{PS} + V_{PT} - V_{ST}}{2} \\ &= \frac{(V_P + V_S) + (V_P + \sigma + V_T) - (V_S + V_T)}{2} \\ &= V_P + \frac{\sigma}{2} \equiv A \\ & \frac{V_{PS} + V_{ST} - V_{PT}}{2} \\ &= \frac{(V_P + V_S) + (V_S + V_T) - (V_P + \sigma + V_T)}{2} \dots\dots(2) \\ &= V_S - \frac{\sigma}{2} \equiv B \\ & \frac{V_{PT} + V_{ST} - V_{PS}}{2} \\ &= \frac{(V_P + \sigma + V_T) + (V_S + V_T) - (V_P + V_S)}{2} \\ &= V_T + \frac{\sigma}{2} \equiv C \end{aligned} \right\}$$

(2) 式から明らかごとく、 A , B および C は各巻線の負荷損ではない。各巻線の負荷損 V_P , V_S および V_T は (3) 式で与えられるべきである。

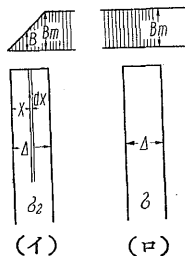
$$\left. \begin{aligned} V_P &= A - \frac{\sigma}{2} \\ V_S &= B + \frac{\sigma}{2} \\ V_T &= C - \frac{\sigma}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

ちなみに JEC-120 P 18 606 項, 説明 16 にしたがって負荷損を各巻線に分離すると、2次巻線の負荷損が抵抗損より少ないという矛盾が生ずる。すなわち P19 の中段で、2次 20 MVA 75°C のインピーダンスワットは 0.144%, 同じく抵抗損は 0.133% \times 1.27 = 0.169% (1.27 は温度換算係数) で前者が少い。これは前述の(2)式により負荷損は2次については $\frac{\sigma}{2}$ だけ少なく考え、1次および3次については $\frac{\sigma}{2}$ だけ大きく考えていることに起因する。

2. 従来の測定方法の修正

前述の通り各巻線の負荷損は(3)式で与えられるべき

であるから $\frac{\sigma}{2}$ が求められればよい。 $\frac{\sigma}{2}$ は次のようにして簡単に求められる。第4図(イ)のような三角形



第4図 漏洩磁束による導体中の渦流損
Fig. 4. Eddy current loss in conductors due to leakage flux

の磁束分布による2次巻線のうず流損を σ_2 , 同図(ロ)のそれを σ とすると、

$$\left. \begin{aligned} & \text{(イ)では } B = B_m \frac{x}{\Delta} \text{ であるから} \\ & \sigma_2 \doteq k \int_0^{\Delta} B^2 dx \doteq k \left(\frac{B_m}{\Delta} \right)^2 \int_0^{\Delta} x^2 dx = k \frac{B_m^2}{3} \Delta \\ & \text{(ロ)では } B = B_m \text{ であるから} \\ & \sigma \doteq k \int_0^{\Delta} B^2 dx = k B_m^2 \Delta \end{aligned} \right\} (4)$$

(4) 式より $\sigma \doteq 3 \sigma_2 \dots\dots(5)$

の関係が得られる。また $I_2^2 R_2$ を2次抵抗損とすると

$$V_S = I_2^2 R_2 + \sigma_2 \dots\dots(6)$$

(3)~(6) 式から

$$B + \frac{\sigma}{2} = I_2^2 R_2 = I_2^2 R_2 + \frac{\sigma}{3} \therefore \frac{\sigma}{6} = (I_2^2 R - B)$$

$$\text{または } \frac{\sigma}{2} = 3(I_2^2 R - B) \dots\dots(7)$$

(7) 式で得られる σ と (3) 式から V_P , V_S および V_T が求められる。

3. 計算例

この方法で先の例を計算してみる。

測定温度 9°C, 20,000 kVA における百分率インピーダンスワットは、1次2次間 0.428%, 1次3次間 0.708%, 2次3次間 0.480%

これより

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{0.428 + 0.708 - 0.480}{2} = 0.328\% \\ B &= \frac{0.428 + 0.480 - 0.708}{2} = 0.100\% \\ C &= \frac{0.708 + 0.480 - 0.428}{2} = 0.380\% \end{aligned} \right\}$$

9°C における抵抗値から計算した各巻線の抵抗損は 1次 0.134%, 2次 0.146%, 3次 0.132%, これを 20,000 kVA に換算して、1次 0.134%, 2次 0.133%, 3次 0.264%,

(7) 式より $\frac{\sigma}{2} = 3 \times (0.133 - 0.100) = 0.099\%$

(3) 式より

1 次インピーダンスワット

$$= A - \frac{\sigma}{2} = 0.328 - 0.099 = 0.229 \%$$

2 次インピーダンスワット

$$= B + \frac{\sigma}{2} = 0.100 + 0.099 = 0.199 \%$$

3 次インピーダンスワット

$$= C - \frac{\sigma}{2} = 0.380 - 0.099 = 0.281 \%$$

これらのインピーダンスワットを 75°C に換算すると

$$\frac{234.5+75}{234.5+9} = 1.27 \text{ より}$$

$$1 \text{ 次インピーダンスワット} = 0.134 \times 1.27 + (0.229 - 0.134) / 1.27 = 0.170 + 0.075 = 0.245 \%$$

$$2 \text{ 次インピーダンスワット} = 0.133 \times 1.27 + (0.199 - 0.133) / 1.27 = 0.169 + 0.052 = 0.221 \%$$

$$3 \text{ 次インピーダンスワット} = 0.264 \times 1.27 + (0.281 - 0.264) / 1.27 = 0.335 + 0.014 = 0.349 \%$$

これを各巻線の容量に換算すれば 1 次 0.245%, 2 次 0.243%, 3 次 0.174%

よって 75°C における負荷損は	ちなみに抵抗損は	JEC の方法では
1 次 $20,000 \times 0.245 \times \frac{1}{100} = 49 \text{ kW}$	34 kW	64.6 kW
2 次 $22,000 \times 0.243 \times \frac{1}{100} = 53.5 \text{ kW}$	40.8 kW	34.5 kW
3 次 $10,000 \times 0.174 \times \frac{1}{100} = 17.4 \text{ kW}$	16.8 kW	21.3 kW

すなわちこのような方法で計算すると、2 次巻線の負荷損が抵抗損より小さいという矛盾がなくなる。

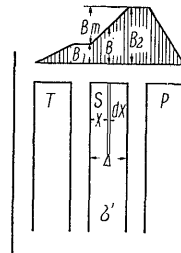
その他の事例を記すと、3 相 60~P 161/S 77/T 10.5 kV, P 60/S 66/T 30 MVA 変圧器では

	上述の方法による	抵抗損	JEC の方法による
1 次負荷損	136 kW	103 kW	147 kW
2 次負荷損	105 kW	95 kW	91 kW
3 次負荷損	32 kW	28 kW	35 kW

4. 実際運転状態における負荷損

上述のように JEC の方法で分離した各巻線の負荷損に 2) のような修正を加えれば、一応 2 次負荷損が抵抗損より小さいという矛盾はなくなるが、かような修正をして得た各巻線の負荷損をそのまま実際運転状態におけるそれと考えるわけにはいかない。例えば 2 次と 3 次が同相の負荷をとる 3 巻線変圧器では 1 次

入力 = 2 次出力 + 3 次出力の関係があるから、全巻線運転時の漏洩磁束密度分布は、明らかに第 5 図のようになる。



第 5 図 3 巻線運転時の磁束密度分布
Fig. 5. Flux density distribution at 3 winding operation.

先に 1) においては、2 次負荷損 V_s は第 4 図(イ)のような磁束密度分布によるうず流損 σ_2 を含むと考えたが、この場合には第 5 図のように梯形の磁束密度分布によってできるうず流損 σ' を含まなければならない。この場合 2 次負荷損を V_s' とすると

$$V_s' = I_2^2 R_2 + \sigma' \dots \dots \dots (8)$$

次に σ' を求める。

第 5 図で $B = B_1 + \frac{B_2 + B_1}{\Delta} x$ であるから

$$\begin{aligned} \sigma' &= k \int_0^{\Delta} B^2 dx = k \int_0^{\Delta} \left(B_1 + \frac{B_2 - B_1}{\Delta} x \right)^2 dx \\ &= k \frac{B_1^2 + B_1 B_2 + B_2^2}{3} \Delta \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

第 4 図(イ)における B_m を第 5 図の $B_2 - B_1$ に相当するものであると考えると、 $B_2 = B_1 + B_m$ を (9) 式に代入すれば

$$\begin{aligned} \sigma' &= k \frac{B_1^2 + B_1(B_1 + B_m) + (B_1 + B_m)^2}{3} \Delta \\ &= k \frac{3 B_1^2 + 3 B_1 B_m + B_m^2}{3} \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

(4) 式と (10) 式より

$$\sigma' = \frac{3 B_1^2 + 3 B_1 B_m + B_m^2}{B_m^2} \sigma_2 \dots \dots \dots (11)$$

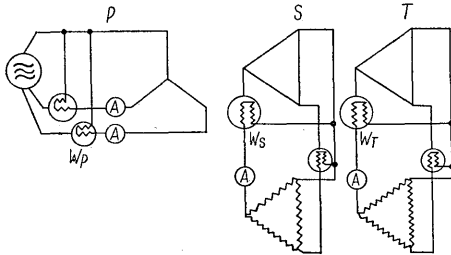
例えば定格容量 P 50/S 40/T 10 MVA の場合には、定格容量で運転時の磁束密度分布は $B_2 : B_m : B_1 = 5 : 4 : 1$ であるから (11) 式は $\sigma' = \frac{3 + 12 + 4^2}{4^2} = \frac{31}{16} \sigma_2$ となる。

すなわち (7) 式により得た σ' と (5) 式より、 σ_2 が得られるから、これを (11) 式に代入すれば σ' が得られる。よって (8) 式より V_s' が求められる。

5. 実験結果

普通の短絡試験から求めた実際運転時の負荷損推定値と、実際運転時の負荷損を比較するため、模擬送電線用 3 相変圧器を使用して、両者の試験をおこなった。

供試変圧器は 50～ P 1,650/S 220/T 220 V, P 30/S 33 /T 15 kVA のものであるがこれを P 30/S 20/T 10 kVA と考えると, P 10.5/S 52.5/T 26.2 A となる. 各巻線にかよな電流が流れるように, 第 6 図のごと



第 6 図 3巻線変圧器の銅損測定結線図
Fig. 6. Connection for copper loss measurement of 3 winding transformer

く 2 次および 3 次をそれぞれ適当な抵抗で短絡し, (12) 式により変圧器の負荷損を実測した。

$$W_{Tr} = W_P - (W_S + W_T) \dots\dots\dots(12)$$

ただし $W_P = 1$ 次入力 $W_S = 2$ 次出力
 $W_T = 3$ 次出力

これと, 2 巻線ずつの短絡試験から求めた計算値を次の表に示す。

第 1 表 負荷損測定結果
Table 1. Measuring result of load losses
24°C (測定時の温度のまま)

kVA	抵抗損 (W)	JEC の方法による負荷損推定値 (W)	4) による負荷損推定値 (W)	第 6 図による実際の負荷損実測値 (W)
P 30	220	251 (114%)	230(104.5%)	
S 20	107.5	104.5 (98.5%)	127 (118%)	
T 10	35.8	38.4 (107%)	36.1 (101%)	
	363.3	393.9(108.5%)	393.1(108%)	392(108%)

() は抵抗損に対する % である。

上の表より 3 巻線全部の負荷損はいずれの方法によるも大差はない. しかしながらこの場合にも JEC の方法によると 2 次巻線の負荷損が抵抗損よりも小さくなる. これは 75°C に換算するとこの傾向は増々大になる. 4) による負荷損推定値では, このようなことがなくなるばかりでなく, 総損失において実測とよく一致していることから, このような各巻線負荷損推定値は, 実際運転の負荷損と考えられる。

III. 結 論

3巻線変圧器の負荷損の測定は, JEC-120 またはその前身 JEC-36 (昭和 9 年 2 月) に, 「次に述べる方法は, 実際の状態と多少相違はあるが他に適当な方法がないので, 便宜上この方法によることを推奨する」と前がきしてあることを見ても, これについては相当議論したものである。

上に筆者が述べた方法といえども, 実際状態と一致するとはいえないが少なくとも, JEC の方法による 2 次負荷損が抵抗損より小さくなるという矛盾は解消し, 実際状態とやや近くなると思われる. 特に 2 次 3 次が同相の場合には上述の方法で, ほぼ実際状態に近似できると思う. 3 次に進相負荷をとる場合は, 磁束密度分布状態は, 実際は, 時間によって変化するので, そのことを考慮しなければならないのでさらに研究を要するところである。

次に JEC の方法によっても 2 次負荷損が抵抗値より小さくならない場合が稀にある. これは半径方向の磁束がタンク中のうず流損の影響が比較的大きいものである. この場合には勿論 (7) 式は成立しない。

以上 3 巻線変圧器の測定法について, 私見を述べたが諸先輩の御意見, 御叱責を賜れば幸である。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。