

レトロフィリングを想定した 変圧器温度上昇計算

1. はじめに

近年、環境配慮や防災性などの観点から、植物由来のエステル系絶縁油（以下、植物油）を適用した変圧器の導入が進んでいる。植物油の適用は、新規品に加え、鉱油を使用した既設品についても、鉱油から植物油への入替（以下、レトロフィリング）の実用化が研究されている⁽¹⁾。

絶縁油の油種を変更すると、絶縁油の物性の違いにより変圧器の冷却性能が変化する。このため、レトロフィリングした場合、変圧器の温度上昇がどのように変わるかを事前に把握する必要がある。

そこで、油入自冷式変圧器を対象に、レトロフィリングした場合の周温に対する絶縁油の温度上昇（以下、油温上昇と呼ぶ）と平均巻線温度上昇を簡便に計算する方法を紹介する。

2. 油入自冷式変圧器の構造と温度分布

油入自冷式変圧器の構造と温度分布の例を図1に示す⁽²⁾。低圧及び高圧巻線（以下、巻線と呼ぶ）で発生した熱は絶縁油に伝わり、自然対流によって放熱器やタンクに至り、放熱器やタンクの表面から外気へ放散される。

そのため、外気の周温に対して、絶縁油の温度が高く、更に巻線の温度が絶縁油より高くなっている。また、絶縁油及び巻線には温度勾配があり、変圧器上部の温度が高く、下部の温度が低くなっている。

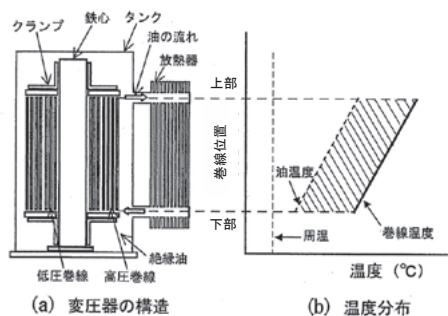
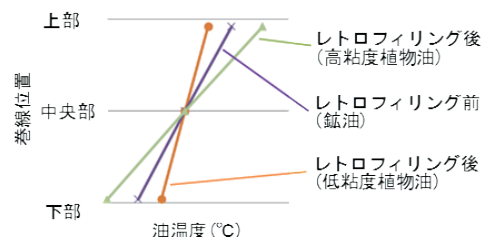


図1 油入自冷式変圧器の構造と温度分布

3. 油温上昇の計算方法

レトロフィリング前後の油入自冷式変圧器の油温分布モデルの例を図2に示す。図2に示す通り、中央部の油温度上昇（平均油温度上昇）は、油種によらず一定になる。また、油温度上昇の勾配は油種毎に異なる。

このことから、レトロフィリング前の平均油温と、油種毎の傾きが解ればレトロフィリング後の平均油温上昇と上部油温上昇を計算できる。



但し、粘度は高粘度植物油＞鉱油＞低粘度植物油とする。

図2 レトロフィリング前後の油入自冷式変圧器の油温分布モデル

3.1 平均油温上昇の計算方法

レトロフィリング後の平均油温上昇は油種によらず一定になる。変圧器の損失や冷却構造が同じであるため、熱伝達や輻射による放熱量の平均は同じとなる。このことから、平均油温上昇 $\Delta\theta_{oil}$ は、レトロフィリング前の温度上昇試験結果から求められる。

3.2 上部油温上昇の計算方法

上部油温上昇は、油種で異なる場合がある。上部油温上昇と平均油温上昇との差は、変圧器内絶縁油の循環速度により異なる。絶縁油の循環速度は、自然対流の駆動力と、巻線や放熱器内通過時の圧力損失とのバランスで決まる⁽³⁾。この関係を整理すると、上部油温上昇と平均油温上昇の差 $\Delta\theta_{dif}$ は、変圧器の構造と絶縁油の物性値で決まり、(1)式となる。

$$\Delta\theta_{dif} = K_o(v/\rho\beta)^{n_o} \quad \dots\dots (1)$$

K_o, n_o : 変圧器の構造で決まる定数、 v : 絶縁油の動粘度(m^2/s)、 ρ : 絶縁油の密度(kg/m^3)、 β : 絶縁油の体積膨張率($1/^\circ C$)

レトロフィリング前後で K_o, n_o は変わらないため、絶縁油物性値の比からレトロフィリング後の上部油温上昇と平均油温上昇の差 $\Delta\theta_{dif2}$ を計算できる。ここでレトロフィリング前の $\Delta\theta_{dif}$ を $\Delta\theta_{dif1}$ とすると、レトロフィリング前後の関係は(2)式となる。

$$\Delta\theta_{dif2} = \left(\frac{v_2/\rho_2\beta_2}{v_1/\rho_1\beta_1} \right)^{n_o} \times \Delta\theta_{dif1} \quad \dots\dots (2)$$

従って、 $\Delta\theta_{dif2}$ は、以下①～③の値がわかれば計算できる。

- ①レトロフィリング前の上部油温上昇と平均油温上昇の差 $\Delta\theta_{dif1}$
- ②絶縁油の物性値
レトロフィリング前 ν_1 、 β_2 、 ρ_2
レトロフィリング後 ν_2 、 β_2 、 ρ_2
- ③変圧器の構造で決まる定数 n_o

4. 平均巻線温度上昇の計算方法

平均巻線温度上昇 $\Delta\theta_{winding}$ は、図3に示すように、平均油温上昇 $\Delta\theta_{oil}$ と平均巻線温度と平均油温の差（以下、 $\Delta\theta$ ）との和で示され、(3)式となる⁽³⁾。

$$\Delta\theta_{winding} = \Delta\theta_{oil} + \Delta\theta \text{ (°C)} \quad \cdots \cdots (3)$$

平均油温上昇 $\Delta\theta_{oil}$ は、変圧器の損失や冷却構造を変更しない場合、油種で変わらないため、平均巻線温度上昇 $\Delta\theta_{winding}$ は、 $\Delta\theta$ がわかれば計算できる。

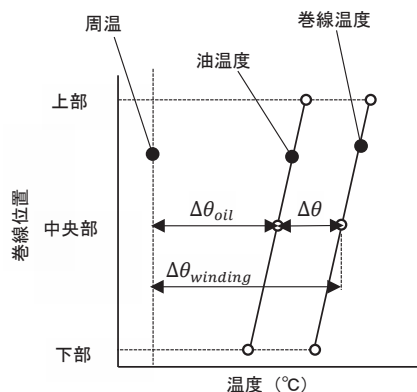


図3 油入変圧器の温度分布

ここで、 $\Delta\theta$ は、主な熱源である巻線導体から冷却媒体である絶縁油へ熱伝達により熱が伝わる際の温度差で、巻線の絶縁紙の熱伝導を無視すると(4)式となる。

$$\Delta\theta = q/\alpha \quad \cdots \cdots (4)$$

q : 巻線から生じる熱流束(W/m²)、
 α : 巻線-絶縁油間の熱伝達率(W/(m²・°C))

熱伝達率 α は熱源の熱流束が一定の場合、(5)、(6)式となる。(6)式の Gr^* と Pr は(7)、(8)式となる⁽⁴⁾。

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} \cdot Nu \quad \cdots \cdots (5)$$

$$Nu = K_w(Gr^* \cdot Pr)^{n_w} \quad \cdots \cdots (6)$$

$$Gr^* = \frac{\beta g q d^4}{\nu^2 \lambda} \quad \cdots \cdots (7)$$

$$Pr = \frac{\nu \rho C_p}{\lambda} \quad \cdots \cdots (8)$$

Nu :ヌセルト数、 Gr^* :修正グラスホフ数、
 Pr :プラントル数、 λ : 絶縁油の熱伝導率(W/(m・°C))、
 β : 絶縁油の体積膨張率(1/°C)、 g :重力加速度(m/s²)、
 ν : 絶縁油の動粘度(m²/s)、 ρ : 絶縁油の密度(kg/m³)
 C_p : 絶縁油の比熱(J/(kg・°C))、 d :代表長さ(m)、
 K_w および n_w :巻線の冷却構造決まる定数

$\Delta\theta$ は(5)～(8)式を(4)式に代入すると(9)式となり、絶縁油の物性値および熱流束、巻線の冷却構造で決まることがわかる。

$$\Delta\theta = \frac{q}{\frac{\lambda}{d} \cdot K_w \left(\frac{\beta g q d^4}{\nu^2 \lambda} \cdot \frac{\nu \rho C_p}{\lambda} \right)^{n_w}} \quad \cdots \cdots (9)$$

レトロフィリング後の巻線温度上昇は(3)式で算定する。平均油温上昇 $\Delta\theta_{oil}$ は前述の通り油種で変わらないので、レトロフィリング前の試験結果を用いればよい。

$\Delta\theta$ は、(9)式を用いて算出可能である。ここでレトロフィリング前の $\Delta\theta$ を $\Delta\theta_1$ 、レトロフィリング後を $\Delta\theta_2$ とすると、レトロフィリング前後の $\Delta\theta$ の比は(10)式となる。

$$\frac{\Delta\theta_2}{\Delta\theta_1} = \frac{\left\{ \frac{\nu_2 \lambda_2^{(2-1/n_w)}}{\beta_2 \rho_2 C_{p2}} \right\}^{n_w}}{\left\{ \frac{\nu_1 \lambda_1^{(2-1/n_w)}}{\beta_1 \rho_1 C_{p1}} \right\}^{n_w}} \quad \cdots \cdots (10)$$

従って、 $\Delta\theta_2$ は、以下①～③の値がわかれば計算できる。

- ①レトロフィリング前の温度上昇 $\Delta\theta_1$
- ②絶縁油の物性値
レトロフィリング前 ν_1 、 λ_1 、 β_1 、 ρ_1 、 C_{p1}
レトロフィリング後 ν_2 、 λ_2 、 β_2 、 ρ_2 、 C_{p1}
- ③巻線の冷却構造で決まる定数 n_w

5. 計算と実測の比較

実変圧器(77/6.9kV 4,500kVA。以降、試験対象変圧器)を対象に、植物油(植物由来エステル、または天然エステル)でレトロフィリングして温度上昇試験を実施した。

温度上昇の計算値と実測値の比較を表1に示す。計算値は実測値と近似値となり、本計算方法は妥当であることを立証した。

表1 計算値と実測値の比較

温度上昇 (p.u.※)	レトロ フィリング前	レトロフィリング後			
		植物由来 エステル油		天然 エステル油	
	実測値	実測値	計算値	実測値	計算値
平均油温上昇	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
上部油温上昇	1.28	1.21	1.25	1.42	1.45
平均巻線温度と 平均油温の差	一次側	0.41	0.33	0.37	0.57
	二次側	0.48	0.38	0.44	0.66
平均巻線温度上昇	一次側	1.41	1.33	1.37	1.57
	二次側	1.48	1.38	1.44	1.66

※レトロフィリング前鉱油の平均油温上昇実測値を基準にした比率

6. あとがき

油入自冷変圧器にて、レトロフィリングを想定した油温上昇と平均巻線温度上昇の計算方法を示した。また、試験対象変圧器で温度上昇の計算値と実測値との結果を比較し、本計算方法が妥当であることを示した。

本計算方法がレトロフィリングする際の温度上昇検討の一助になれば幸いである。

参考文献

- (1) 坂本進・野澤強久・山田慎：「天然エステルでの経年鉱油変圧器のレトロフィル検討」令和 5 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集 No. 48, (2023)
- (2) 「JEC-2200-2014 変圧器」(2014)
- (3) 久世信一・武田真：「自冷変圧器の最高点温度上昇」静止器研究会資料 TC-73-2 (1973 年)
- (4) 武山麗郎・大谷茂盛・相原利雄：『大学講座 伝熱工学 (1983)』丸善株式会社