油入変圧器過負荷時の絶縁紙熱劣化に関する研究

正 員 酒井 祐之 (東京電力)

正 員 小林 直樹 (東京電力)

正 員 大工原 信幸 (東京電力)

Research on Insulation Paper Thermal Deterioration
in Oil-Immersed Transformer Over-Load OperationMasayuki Sakai, Member Naoki Kobayashi, Member and Nobuyuki Daikuhara, Member
(TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY)

When the heat deterioration of the insulation paper in the range of 120–180°C was evaluated in the average degree of polymerization, it was found out that it declined to less than 800 in the early stages of deterioration rapidly, and the slow deterioration continued the next. The deterioration characteristics of the average degree of polymerization can be explained in a unified manner, by using “the life consumption rate” which was defined in this paper. The over-load examination of the model transformer was done, and it was found out that the actual measured value of the average degree of polymerization, corresponded to the calculated value based on the heating history. Therefore, the life consumption rate and the decreasing degree of a average degree of polymerization caused by short time overload operation, can be obtained by the proposed calculation. On the other hand, deterioration characteristics of a transformer, which operated in a usual operation for a long time, should be investigated in future.

キーワード：油入変圧器、絶縁紙、平均重合度、熱劣化近似式、実規模モデル

1 まえがき

電力流通設備の稼働率を向上するには、緊急時に変圧器を定格以上の負荷で運転するいわゆる過負荷運転をより厳しい過負荷率で行うことが求められる。油入変圧器の寿命は、運転中の温度履歴により巻線絶縁紙やプレスボードなどの絶縁材料の熱劣化が進み、短絡電流通過による電磁機械力などに耐えられなくなった時点としており⁽¹⁻⁴⁾過負荷率の上昇は、変圧器の寿命にも影響があると考えられる。これまで過負荷運転時の寿命影響については、絶縁紙の熱劣化特性を6℃温度上昇毎に倍増するものとし、代表的な変圧器巻線の温度上昇特性に対して、過負荷時の劣化促進量と年間の劣化量との比による寿命犠牲率を計算し、許容過負荷率を検討する際の目安にしてきた⁽⁵⁾。

筆者らは、最近変圧器の過負荷限界、即ちそれ以上の過負荷運転を行うと変圧器の性能に重大な支障を与えるような限界を、巻線から気泡が発生し運転状態で絶縁強度が低下する負荷率とする考え方を確立した⁽⁶⁾。従って、筆者らは絶縁破壊に至るリスクを回避する必要から、実器相当の変圧器モデルによる温度上昇試験を行い、機種毎の巻線の

温度上昇特性を把握した。これに伴い絶縁材料の劣化状態についてもより精度の高い評価方法の確立が望まれている。

今回、絶縁紙の熱劣化試験結果に基づき、劣化の指標となる平均重合度の熱劣化近似式を導出し、変圧器の温度履歴と熱劣化近似式から平均重合度を算出する方法を考案した。更に実規模の変圧器モデルによる過負荷試験時の温度記録から計算した平均重合度と、解体後の平均重合度実測値に良好な相関が認められたため、その内容を報告する。

2. 絶縁紙の熱劣化による寿命消費

図1は、変圧器巻線用の絶縁紙として汎用的に使用されるクラフト紙について、120℃～180℃の温度範囲で加熱時間と平均重合度の関係を調べた結果である。クラフト紙は紙中水分 0.1wt%程度まで十分乾燥したものを、変圧器と同様にタンク内に絶縁油とともに密閉し、制限酸素劣化条件下で加熱劣化させた。実験の詳細は文献⁽⁷⁾を参照。各温度とも時間とともに平均重合度が低下する特性を示している。

図1のデータから各温度で一定の重合度に到達するまでの所要時間を求め、再整理した結果を図2に示す。平均重合度がある一定の値に低下するのに要する時間と絶対温度

図1 加熱時間と絶縁紙の平均重合度の関係

Fig.1 The relationship between heating time and the average degree of polymerization of insulation paper

図2 平均重合度低下に要する時間の温度依存性

Fig.2 The temperature dependence of the deterioration time of average degree of polymerization.

の逆数には直線関係が認められ、劣化プロセスは従来知られている通りアレニウス則に従っている。そこで、この結果を用いて、絶縁紙の寿命を表す係数を求める。

現在、平均重合度 450 が寿命レベルと言われているが、実使用温度に最も近い 120°C の試験データは平均重合度 558 までであるため、なるべく外挿誤差を少なくし、かつ寿命に近い領域を選択し、平均重合度 500 到達時間を各加熱温度について求め、これをアレニウス則の関数形式 (寿命 = $A \exp(B/T)$) で近似し、(1)式を得た。

$$L = 6 \times 10^{-17} \exp(18.4 \times 10^3 / T) \quad (\text{時間}) \quad (1)$$

ここで、T は絶対温度(K)

ここで、絶縁紙をある温度 T で t 時間加熱したとき、t を温度 T での寿命時間 L で割った値 (t/L) を寿命消費率 t と呼ぶこととする。

$$\text{寿命消費率 } t = \frac{t : \text{温度 } T \text{ での持続時間}}{L} \quad (2)$$

図1の各測定ポイントについて時間軸を寿命消費率 t で置き換えると、図3を得る。図3の曲線には2つの特徴が認められる。

図3 寿命消費率に対する平均重合度低下特性

Fig.3 The average degree of polymerization deterioration character toward the life consumption rate.

- (1) 各温度の劣化特性は寿命消費率 t に対しほぼ同一の低下特性を示す。
- (2) 平均重合度が 800 弱まで短期間に急速に低下する初期の劣化と、それ以降 200 程度までの緩慢な劣化の2つの領域が存在する。

(1)の特徴から、120°C~180°Cの温度範囲での絶縁紙熱劣化特性は、寿命消費率 t で統一した表現ができる。

(2)の特徴から、絶縁紙の劣化には加熱初期に急速に分解して枯渇する部分と長期間一定割合で劣化する部分がある。このため平均重合度の低下曲線を単一の指数関数で表せないこととなる。絶縁紙劣化の初期とその後の違いについては、機械強度や化学的性質の面から検討された例がある^(1, 8)、劣化の機構は明らかになっていない。

3. 平均重合度低下特性の近似

巻線絶縁紙の主成分は、セルロースであり、セルロースは炭素や酸素からなる6員環に水酸基等が付加した単位構造(グルコース)が重合した鎖状高分子である。セルロースは加熱により分解し、切断されることから、劣化したセルロースは重合度が低下する。

ここで、初期平均重合度 N_0 のセルロースが、時間 t の経過とともに等確率で分解し、平均重合度が $N(t)$ に低下したとする。初期の結合数 $M_0 = N_0 - 1$ 、時間 t 経過後の切断した結合の平均数を $S(t)$ とすると、平均重合度 $N(t)$ は(3)式のように表される。

$$N(t) = N_0 / (S(t) + 1) \quad (3)$$

残存結合数は $M(t) = N_0 - 1 - S(t)$ と表されるので、

$$\frac{dM(t)}{dt} = -\alpha M(t) \quad (4)$$

を解き、

$$M(t) = M_0 \exp(-\alpha t) \quad (5)$$

となる。これを、 $M(t) = N_0 - 1 - S(t)$ に代入して整理すると、

$$S(t) = M_0 (1 - \exp(-\alpha t)) \quad (6)$$

となる。

(3)式、(6)式より $S(t)$ 、 M_0 を消去し整理すると、

$$N(t) = \frac{1}{1 - \gamma \exp(-\alpha t)} \quad (7)$$

ここで、 $\gamma = (N_0 - 1) / N_0$

となる。

絶縁紙の熱劣化試験の結果から、絶縁紙には分解の遅い部分と早い部分が存在することを考慮し、それぞれの全結合に占める比率を A 、 $(A - 1)$ とすると、平均重合度 $N(t)$ は次のように表わせる。

$$N(t) = \frac{A}{1 - \gamma \exp(-\alpha_A t)} + \frac{1 - A}{1 - \gamma \exp(-\alpha_B t)} \quad (8)$$

ここで、 α_A 、 α_B は反応速度係数であり温度 T の関数であるが、前述のように劣化過程の温度毎に加熱時間 t を寿命消費率 t_n の形式で正規化すれば、 α_A 、 α_B は一定の係数として取り扱える。

図3に示す実験データに基づき最小2乗法により各係数を求めた結果が、(9)式である。

$$N(t) = \frac{0.74}{1 - 0.999 \exp(-0.000454 t)} + \frac{0.26}{1 - 0.999 \exp(-0.035 t)} \quad (9)$$

γ は、絶縁紙の初期重合度 N_0 が通常 1000 程度であることから、 $\gamma = (N_0 - 1) / N_0$ より 0.999 とした。図3の実線は(9)式であり、(9)式の計算値に対する実験値のばらつきの平均は2.2%であった。

4. 温度履歴による平均重合度計算方法

以上の結果を用いると、絶縁物の温度履歴を知ることが出来れば、平均重合度を計算により予測する事が可能となる。温度履歴後の絶縁紙の平均重合度を求める計算の手順は次の通りである。

- ① まず対象部位の絶縁物の温度履歴を、温度毎の継続時間にまとめる。
- ② (1)式、(2)式を用い、各温度毎の寿命消費率 t_n を求める。
- ③ 各温度毎の寿命消費率 t_n の合計 $\sum t$ を求める。
- ④ $\sum t$ を(9)式の t に代入する。

図4に計算のフローチャートを示す。

図4 寿命消費率、平均重合度の計算フローチャート
Fig.4 The calculation flow chart of the life consumption rate and the average degree of polymerization

5. 試験

<5.1>モデル変圧器 実際に使用されている変圧器の中から巻線 hottest 部の温度上昇が厳し目と想定される機種を選定し、その機種と同じ構造を持つモデル変圧器を製作した。各巻線内部には温度センサを装着した他、温度上昇に影響しない防音壁や外部の制御盤類の省略、タップ切替装置の無電圧切替化をしているが、ほぼ実器と同一のものである。モデル変圧器は配電用変圧器2機種、送電用変圧器2機種であり、各々の主要定格を表1に示す。

表1 モデル変圧器の主要定格事項

Table1 The rated item of the model transformer

	モデルA、B	モデルC	モデルD
電圧(kV)			
1次	72-64.5-57	537.5/√3 500 /√3 462.5/√3	527.7/√3 500 /√3 477.7/√3
2次	6.9	147/√3	275/√3
3次	—	63	63
定格容量(MVA)	20	250	250
周波数(Hz)	50	50	50
相数	3	1	1
%インピーダンス	15.5	2.3	1.4
タップ	無電圧切替	無電圧切替	無電圧切替
その他	油入自冷 内鉄型	送油風冷 内鉄型	送油風冷 外鉄型単巻

＜5.2＞温度センサ 温度センサは主に熱電対を使用した。感温部を 0.2mm 厚の薄いプレスボードで保護した状態でコイルターン間に挟み込んでいる。装着状態を図5に示す。また、通電によりインピーダンス電圧が発生しセンサと導体の絶縁が保てない個所については、光温度センサを用いた。光温度センサは、感温部に GaAs（ガリウム砒素）単結晶を持ち、LED 光源から光ファイバーを通じて遠赤外光を送ると、GaAs 結晶が光を吸収して温度に応じて波長の異なる光を放射する特性（光ルミネッセンス現象）を応用したものである^(9, 10)。装着状態を図6に示す。

各モデル変圧器の巻線内温度センサ取付位置を図7に示す。温度センサは、ホットテスト部が存在すると考えられる巻線上部の他、巻線内温度分布の影響を調べるため、巻線の中央部、下部にも取り付けた。

図5 熱電対取り付け状況

Fig.5 Thermocouple installation conditions

図6 光温度センサ取り付け状況

Fig.6 Optical temperature sensor installation conditions

＜5.3＞試験方法 各モデルの1次2次巻線間に所定の電流を通電し、変圧器規格の温度上昇試験と同様の要領でダイヤル温度計指示値の定常を確認し、各温度センサの温度を記録した。表2に試験条件一覧を示す。温度上昇が過酷となる最低タップを主にして定格容量の100%から150%まで10%刻みで実施した。モデルDは巻線の温度上昇が比較的少ないため、170%まで実施した。

6. 結果

通電試験の結果、巻線ホットテスト部は、配電用変圧器のモデルA、Bの場合は2次巻線の一部であり、送電用変圧器のモデルCは1次巻線一部、モデルDは直列巻線一部に存在することが分かった。

表2に各モデル変圧器巻線ホットテスト部位の通電条件毎の到達温度、通電の時間、寿命消費率を示す。寿命消費率の計算は図4のフローに示す手順で行った。

モデル器の通電を室温状態から開始した場合は、定常温度に達するまでに時間を要し、その時間には巻線、油の温度上昇時定数や、使用する冷却器の台数が影響する。今回は温度の変化が急激なため、寿命消費率計算は刻みに温度を与えて精度を確保した。到達温度が高く寿命消費も大きい「周囲温度40℃相当」の試験は、夏季に周囲温度が40℃まで上昇した場合を想定し、冷却器使用台数を減らして行った試験である。寿命消費の大半は、この周囲温度40℃相当試験と、最低タップ150%以上の試験で生じている。寿命消費率を詳細に比較すると、通電電流との関係が必ずしも一定していないが、通電時間の長さ、試験時の室温、冷却器使用台数の制御による温度上昇速度の違いによるものである。

表2の下部に、巻線ホットテスト部における平均重合度の計算値と実測値を示すが、良い一致が見られた。更に、図4に示した巻線各部の温度測定点について図3と同様の計算を行った結果を図8、9に示す。

図8は、寿命消費率と平均重合度実測値の関係を示し、(9)式の曲線および図3の実験結果も一緒に示した。劣化初期はばらつきが大きいものの、劣化が進み平均重合度800以下になると近似式(9)の曲線の近くに分布する。

図9では平均重合度の実測値と計算値の比較をした。平均重合度800以下の範囲では計算値の実測値に対する差の平均は8%であり、相関係数は0.77であった。

図8 各部絶縁紙の寿命消費率と実測値

Fig.8 The life consumption rate of each department insulation paper and actual measurement value

図7 モデル変圧器の巻線構造と温度、平均重合度測定部位

Fig.7 The winding structure of the model transformer and the measurement part place of temperature and the average degree of polymerization

表2 試験ケース毎の巻線 hottest 部到達温度、寿命消費率計算値 () 内は hottest 部

Table2 The winding hottest part temperature, the life consumption rate of every test case

通電条件		モデルA (2次巻線上部)				モデルB (2次巻線上部)				モデルC (1次巻線上部)				モデルD (直列巻線上部)			
		温度 (°C)	時間 (h)	寿命 消費率		温度 (°C)	時間 (h)	寿命 消費率		温度 (°C)	時間 (h)	寿命 消費率		温度 (°C)	時間 (h)	寿命 消費率	
最低タップ	100%	97.0	25.8	0.000088		88.0	16.0	0.000020		125.0	6.0	0.000079		61.2	10.7	0.000014	
	110%	110.6	6.7	0.000175		99.6	6.5	0.000041		136.3	7.0	0.000405		65.5	7.5	0.000011	
	120%	117.4	17.0	0.001070		109.7	13.5	0.000327		151.2	5.5	0.001746		75.7	4.2	0.000012	
	130%	129.7	14.5	0.003300		123.7	9.0	0.000892		-	-	-		79.9	8.4	0.000019	
	140%	139.8	28.4	0.017300		135.6	9.5	0.003676		186.8	6.5	0.064952		91.9	4.8	0.000026	
	150%	154.2	16.3	0.051100		149.5	10.0	0.017101		213.9	5.5	0.807300		101.1	6.0	0.000019	
	170%	-	-	-		-	-	-		-	-	-		147.0	3.8	0.004520	
定格タップ	150%	-	-	-		-	-	-		172.9	7.0	0.103556		94.4	4.4	0.000022	
最高タップ	150%	149.1	18.3	0.035182		145.9	10.3	0.012656		167.0	6.5	0.010933		89.0	6.0	0.000016	
周囲温度 40°C相当	最低タップ 150%	173.3	10.4	0.179706		160.7	8.5	0.040697		-	-	-		123.6	7.2	0.000642	
	定格タップ 150%	-	-	-		-	-	-		211.8	11.3	0.776156		-	-	-	
その他		-	-	0.012946		-	-	0.010025		-	-	0.0208714		-	-	0.000077	
寿命消費率 合計		0.300866				0.085435				1.785996				0.005377			
平均重合度	計算値	674				778				413				958			
	実測値	645				736				395				952			
試験時の室温		15.5~23.5°C				20.9~27.8°C				17.4~20.9°C				6.1~14.0°C

図9 各部絶縁紙の平均重合度実測値と計算値の比較

Fig.9 The comparison of the average degree of polymerization actual measurement value of each department insulation paper and the calculation

7. 考察

モデル変圧器の温度上昇試験による温度履歴に基づき、寿命消費率、重合度計算式で求めた平均重合度は、800 以下の領域では実測値と比較的良好一致する事が判った。ただし、10%程度のばらつきがありこの理由を考察すると、

- ・モデル変圧器の乾燥処理工程の違いによる紙中水分値の違い
- ・絶縁紙の初期重合度の違い

などが考えられる。モデル変圧器は紙中水分実測値が 0.35 ~1%程度であったのに対して、計算式の定数は 0.1%程度まで乾燥した絶縁紙の劣化特性に基づいている。絶縁紙の水分含有量が紙の劣化を加速する事は知られており^(3, 4)、計算は、重合度の低下を少なく見積もる可能性がある。ただし、今回の温度上昇試験による巻線の温度は 100℃を超える場合がほとんどであり、このため紙中水分は油中に放出され、巻線の絶縁紙中水分は全体平均より低めになるため、モデル器巻線部の絶縁紙と紙単独の実験の水分条件は比較的近かったものと考えられる。

また、モデルA、BとモデルC、Dは電圧階級が異なり、水分管理レベルの差もあることから、モデルA、Bの方がやや劣化が早い傾向になったと考えられる。

劣化速度に影響のある紙中水分については、変圧器内部の温度分布に応じた水分分布、巻線温度変化に対応した変動などを総合して検討する必要がある、これらを反映すればさらに精度を高めて平均重合度低下を推定することが可能になると思われるが、その挙動は極めて複雑であり、今後の課題である。しかし、長年月の劣化を評価する上では避けられない問題と考えられる。

各モデルで平均重合度 1000~800 の劣化の少ない範囲の実測値はばらつきが大きかった。その理由として、初期劣化への水分の影響などが考えられるが、重合度 800 は寿命消費率が 0.06 程度であり、実用上の支障はあまりないと考えられる。

8. まとめ

絶縁紙の熱劣化特性について、120~180℃の温度範囲での熱劣化試験の結果、劣化の良い指標となる平均重合度は、劣化初期に 800 弱まで短期間に低下し、引き続き緩慢な劣化が起こっていることが判った。

平均重合度の低下速度は上述のように2つの領域を持つものの、熱劣化後の平均重合度は劣化温度に関わらず寿命消費率で統一した評価ができることを示した。また、絶縁紙が温度変動を伴う熱履歴を受けた場合について、各温度毎の寿命消費率を累積する事により、熱履歴後の平均重合度を計算する方法を示した。

4つのモデル変圧器の過負荷試験を行い、それぞれの温度履歴に基づく平均重合度計算値は、800 以下の領域で実測値と良く一致した。従って、本方法を用いれば、変圧器過負荷運転を行う際の寿命消費状況や平均重合度低下度合いを評価する事が可能になると考えられる。

一方、経年変圧器の劣化状況の評価や適正な稼働レベルの検討に関しては、過去の運転履歴(温度履歴)が判れば一応の評価は可能である。ただし、運転温度はほとんどの時間で 100℃より低く、寿命消費率計算のために絶縁紙の寿命特性を 120℃以下の温度に外挿する事になる。ところが、絶縁紙の熱劣化寿命は約 120℃以下では高温試験からの外挿よりも短いというデータも報告されており⁽¹¹⁾、通常の運転温度(常温~110℃)領域での水分の影響を含めた絶縁紙劣化特性が不明確である。このため、今後は実使用状態に近い温度での長期間の材料劣化試験を行い、変圧器の評価に役立てる予定である。

終わりに、本研究にあたり多大なる協力・助言を戴いた東芝、三菱電機、高岳製作所、明電舎の関係者に感謝の意を表する。

(平成 12 年 6 月 30 日受付、平成 12 年 11 月 8 日再受付)

文 献

- (1) 齊藤、武 編、藤田；電気絶縁紙(第7章)、コロナ社、(1969)
- (2) 田村、姉帯、石井、河村；経時生成ガスによる絶縁紙の劣化診断、電学論A、101-A巻、1号(1981-1)
- (3) 月岡、森、後藤、鈴木；CO₂+COによる油入変圧器の経年劣化度診断の研究、電学論A、106-A巻、7号(1986-7)
- (4) 電気協同研究；油入変圧器の保守管理、54巻5号(1999-2)
- (5) 電気学会技術報告 油入変圧器運転指針、(I部)143号(1986-11)
- (6) 酒井、大工原、牧、谷口、柳父；油入変圧器過負荷運転時の気泡発生限界温度、電学論B(投稿中)
- (7) 酒井、大工原、石岡、井坂、熊谷；変圧器絶縁紙の熱劣化特性、電学論B(投稿中)
- (8) 藤田；加熱によるケーブル絶縁紙劣化反応の研究(第4報)、大日電線時報、27号(1964-8)

- (9) W. Lampe, L. Pettersson, C. Övrenén, B. Wäklström ;
Hot-Spot Measurements in Power Transformers, CIGRE
Report No. 12-02 (1984)
- (10) 伊藤、小田、寺沢；光ファイバ温度計による変圧器巻
線温度の直接測定、高岳レビュー Vol. 39 No. 1、70、
(1992-2)
- (11) 板倉、姉帯、牧野、宮本；絶縁紙の長期寿命試験、電
気学会全国大会、371、(1988-3)

酒井 祐之 (正員) 1954年10月29日生。1979年3月

慶応義塾大学大学院電気工学研究科修士
課程修了。同年東京電力(株)入社。現
在、電力技術研究所送変電グループ主管
研究員。変電機器に関する技術開発に従
事。

小林 直樹 (正員) 1966年9月19日生まれ。1991年3

月東京大学大学院工学系研究科電気工学専
攻修士課程修了。同年東京電力(株)入社。
現在同社技術部系統計画グループにて、基
幹系統の計画業務に従事。博士(工学)。
平成8年電気学会論文賞受賞。

大工原 信幸 (正員) 1967年9月10日生。1992年3月

千葉大学大学院工学研究科電気工学専攻
修士課程修了。同年東京電力(株)入社。
電力技術研究所勤務時に変電機器に関す
る技術開発に従事。現在、千葉支店成田
工務所変電グループ主任。