絶縁紙の劣化生成ガスによる過熱診断

正員 田村 良平 (三菱)

正員 姉帯 仁 (三菱)

正員 石井 敏次 (三菱)

正員 牧野 芳弘 (三菱)

1. ま え が き

油入変圧器などに多量に使用されているセルロース系絶縁紙は耐熱許容限界が比較的低いので、変圧器の運転中に経時的な劣化が進行し、場合によっては局部的な過熱による劣化の起こることもある。変圧器内の絶縁紙は劣化したとき容易にそれだけを交換することができないので、絶縁紙の劣化による特性の低下は変圧器本体の寿命に直接影響する。従って、運転中の変圧器に使用されている絶縁紙について、その過熱劣化の有無を探知することは信頼性確保のうえから重要な問題である。

油入変圧器の保守管理のために油中ガス分析が広く行なわれており、ガス分析の結果から変圧器の内部異常の有無を判定する基準や異常の種類を診断する方法が検討されている^{(1)~(3)}。ガス分析によって変圧器の内部診断を行なう際には、炭酸ガス(CO₂)および一酸化炭素(CO)は主にコイル絶縁紙やプレスボードなどの固体絶縁物の劣化に関係したガスであるとして重視されている。

絶縁紙の過熱診断の指標としては、IEC⁽³⁾で推奨しているCO/CO₂の値があるだけで、そのほかに公表されているものはないようである。IECの方法では、

CO/CO₂の値が0.33を超えるか、または0.09より小さい場合には、セルロース系絶縁物の関与するホットスポットやアークなどの異常と診断することになっている。しかし、CO/CO₂の値のみから固体絶縁物の異常の有無を診断しようとする、ガス分析結果の中には判断に苦しむような場合が少なくない。

本論文は、絶縁紙の過熱の有無をIECの方法のようにCO/CO₂の値だけから診断することには問題があり、CO₂およびCOの油中濃度ならびにCO/CO₂の経時変化も併せて検知することによって初めて有効な診断が可能であることを示したものである。

2. 変圧器における一酸化炭素と炭酸ガスの比率

第1図は約400台の平常運転変圧器について、CO/CO₂の値と運転年数との関係を調査した結果を示している。運転年数が長くなるにつれてCO/CO₂の値は小さくなり、10年以上の運転年数の変圧器では0.1以下の値を示している。しかし、運転初期にはIECの診断基準である0.33を超えるものがある。

また現地掘付完了後、運転開始までのあいだ放置されている変圧器について調査した結果でも、CO/CO₂の値はIECの診断基準を超えるものがあった。

そこで筆者らは、CO/CO₂の値だけから絶縁紙の異常の有無を診断することには問題があると考え、絶縁紙の吸湿量を定量的かつ広範囲に変化させてCO₂およびCOそれぞれの発生量に及ぼす水分、加熱温度ならびに加熱時間の影響を調べ、新たな診断方法について検討を加えた。

A Diagnosis on the Overheating Deterioration of Insulating Paper in Transformers by Gas Analysis. By Ryohei Tamura, Member, Hitoshi Anetai, Member, Toshitsugu Ishii, Member & Yoshihiro Makino, Member (Mitsubishi Electric Corporation).

田村良平：正員，三菱電機株式会社重電事業本部

姉帯 仁：正員，三菱電機株式会社赤穂製作所

石井敏次：正員，三菱電機株式会社赤穂製作所

牧野芳弘：正員，三菱電機株式会社赤穂製作所

第1図 運転中変圧器の CO/CO_2 の値と
運転年数との関係

Fig. 1. CO/CO_2 ratio in energized
transformers vs. period of operation.

3. 実験方法および実験結果

JIS C 2304 で規定されている厚さ 0.08 mm の二種コイル絶縁紙(クラフト紙)を幅 2 mm, 長さ 15 mm 程度の大きさに切断し, その 2~5 g を内容積 140 ml のガラスアンプルに入れたのち絶縁紙の吸湿量を 0.2~4.4% に調整した。このガラスアンプル内に約 500 mmHg の N_2 を封入し, 80, 100, 120, 140, 160 および 180°C の各温度で 8 時間~20 日間加熱保持したのち室温まで放置した。ガラスアンプル内のガスの分析は, テプラーポンプ式脱ガス装置で全ガスを抜き取り, ガスクロマトグラフにより行なった。分析対象ガスは, N_2 , O_2 のほかに CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8 , $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$, $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ の 13 種類とした。

加熱前の吸湿量は, 前処理として行なった 60°C の温度における真空乾燥の乾燥時間を変化させるか, または真空乾燥したのち更に所定の相対湿度に調整された硫酸入デシケータ中に放置することによって調整した。調整後の吸湿量は, 加熱用試料と同様の方法で作成した水分測定用試料について, カールフィッシャー法により測定した。

コイル絶縁紙の試料重量は, ガラスアンプル内に封入したあとの全重量から, ガラスアンプルの重量を差し引き, 更に吸湿量の測定値を用いて補正した絶乾重量を用いた。

なお, ここでガラスアンプルを用いて実験を行なったのは N_2 を封入しやすく, 空気の漏れが少ないので劣化ふんい気の調整が容易であり, しかもアンプル内

第1表 絶縁紙の加熱による発生ガスの代表例

Table 1. Examples of gases evolved from
kraft paper by ageing.

加熱温度 (°C)	加熱時間 (h)	吸湿量 (%)	ガス分析結果 (ml/g of paper)			
			CO_2	CO	H_2	炭化水素 ($\text{C}_1\sim\text{C}_4$)
80	360	0.4	0.0051	0.0021	0.0004	検出されず
	360	1.6	0.0454	0.0016	0.0017	検出されず
	480	4.4	0.0576	こん跡	0.0010	検出されず
120	360	0.4	0.1255	0.0128	0.0005	検出されず
	480	1.6	0.4194	0.0082	0.0004	検出されず
	480	4.4	0.7656	0.0075	0.0043	検出されず
160	120	0.3	0.6655	0.2013	0.0023	検出されず
	120	1.0	1.3412	0.1224	0.0024	検出されず
	72	2.2	1.5956	0.0948	0.0025	検出されず

の全ガスを抜き取って分析できるので, 実験精度が良くなるためである。

第1表はガス分析結果の代表例を示しており, ガス発生量は絶縁紙の絶乾重量 1 g あたりの発生量に換算した値である。発生ガスの種類としては CO_2 , CO および H_2 の 3 種類であり, その他の炭化水素は検出されていない。 CO_2 および CO の発生量は加熱温度と吸湿量によって顕著な変化を示している。 H_2 については加熱温度が高くなるにつれて発生量が増加する傾向を示しているが, CO_2 , CO と比較すると絶対量は少なく, 大きな変化も認められない。

第2図~第5図は 80~180°C の各温度における CO_2 および CO の発生量と加熱時間との関係について, 吸湿量をパラメータとして示している。ガス発生量はガラスアンプル内の全発生量を絶縁紙の絶乾重量 1 g あたりの発生量に換算した値を用いている。

CO_2 の発生量は加熱日数が長くなるにつれて増加し, 加熱温度が高くなるほど, また温度が一定ならば吸湿量が多くなるほど大きな値になっている。更に, 各温度において発生量が加熱初期に急増したあとは, ほぼ一定の割合で増加している。

CO の発生量も CO_2 と同様に加熱初期に急増したあと加熱時間が長くなるにつれて増加し, 加熱温度が高くなるほど大きな値になっている。しかし, 吸湿量の影響は CO_2 の場合とは傾向が異なり, 80~140°C の各温度では吸湿量が多くなるほど CO の発生量は少なくなっている。特に 80°C および 100°C の温度で吸湿量が 4.4% の場合には, CO の発生はほとんど認められない。160°C および 180°C の温度では吸湿量の影響は顕著でなく, 吸湿量が異なっても同程度の発生量になっている。

第6図および第7図は 80~180°C の各温度における CO/CO_2 の値と加熱時間の関係について, 吸湿量をパ

第2図 80~120°Cにおけるクラフト紙のCO₂発生量と加熱日数との関係

Fig. 2. Amount of CO₂ evolved from kraft paper vs. ageing period at 80~120°C.

第3図 140~180°Cにおけるクラフト紙のCO₂発生量と加熱時間との関係

Fig. 3. Amount of CO₂ evolved from kraft paper vs. ageing period at 140~180°C.

第4図 80~120°Cにおけるクラフト紙のCO発生量と加熱日数との関係

Fig. 4. Amount of CO evolved from kraft paper vs. ageing period at 80~120°C.

第5図 140~180°Cにおけるクラフト紙のCO発生量と加熱時間との関係

Fig. 5. Amount of CO evolved from kraft paper vs. ageing period at 140~180°C.

ラメータとして示している。CO/CO₂の値は、第2図~第5図に示される各曲線から、CO₂とCOの発生量を読み取って求めたものである。

CO/CO₂の値は加熱時間が長くなるにつれてほぼ一

定の値となる傾向を示している。ただし、80°Cの温度では吸湿量が少なくなると加熱初期に大きな値を示すが、加熱時間が長くなるにつれて小さな値に変化している。

第 6 図 80~120°C における CO/CO_2 の値と加熱日数との関係

Fig. 6. CO/CO_2 ratio vs. ageing period at 80~120°C.

第 7 図 140~180°C における CO/CO_2 の値と加熱時間との関係

Fig. 7. CO/CO_2 ratio vs. ageing period at 140~180°C.

4. 考 察

第 8 図は CO/CO_2 の値と加熱温度との関係について、吸湿量をパラメータとして示している。ここでの CO/CO_2 の値は、第 6 図および第 7 図のそれぞれ 20 日加熱後および 200 時間加熱後における CO/CO_2 の

第 8 図 CO/CO_2 の値と加熱温度との関係

Fig. 8. CO/CO_2 ratio vs. ageing temperature.

値と吸湿量との関係について、加熱温度をパラメータとしてプロットした図から読み取って求めたものである。

加熱温度が同じならば吸湿量が少なくなるにつれて CO/CO_2 の値は大きくなる傾向を示している。また、加熱温度が 120°C より高くなるにつれて、吸湿量が 0.4、0.7 および 2% のいずれの場合にも CO/CO_2 の値は大きくなる傾向を示している。一方、加熱温度が 120°C より低い場合には、加熱温度が低くなるにつれて CO/CO_2 の値は大きくなり、この傾向は吸湿量が少なくなるほど顕著である。

CO/CO_2 の値については 130°C 以上の高温における値が幾つか報告されているが、真空中でクラフト紙を加熱したときの Murphy 氏⁽⁴⁾の値 (0.40; 160°C) および斉藤氏ら⁽⁵⁾の値 (0.29; 135°C) は、ここで得られた結果の中で吸湿量が少ないときの値と比較的良好一致している。

第 8 図の結果を用いて、 CO/CO_2 の値が IEC の診断基準である 0.33 を超える温度を求めると、吸湿量が 0.4% の場合には 160°C のような高温域と 80°C のような低温域の両方に存在していることがわかる。従って、変圧器の通常の運転温度付近でも吸湿量が少なくなると、 CO/CO_2 の値は IEC の診断基準を超える可能性があり、 CO/CO_2 の値だけから絶縁紙の過熱の有無を診断することには問題がある。

ところで、 CO_2 と CO の発生速度は加熱温度によって著しく異なる。第 9 図および第 10 図はそれぞれ CO_2 の発生速度および CO の発生速度と吸湿量との関係について、加熱温度をパラメータとして示している。 CO_2 および CO の発生速度は、第 2 図~第 5 図においてガス発生量が加熱時間に対して一定の割合で増加しているときの値を用いている。加熱温度が高くなるにつれて CO_2 および CO の発生速度は大きくなり、温度が一定ならば発生速度の対数と吸湿量の対数との間には直線関係が認められる。ただし、 CO_2 については吸湿量が多くなるにつれて発生速度は大きく

第 9 図 クラフト紙の CO_2 発生速度と吸湿量との関係

Fig. 9. Evolution rate of CO_2 from kraft paper vs. moisture content.

第 10 図 クラフト紙の CO 発生速度と吸湿量との関係

Fig. 10. Evolution rate of CO from kraft paper vs. moisture content.

り、 CO については逆に吸湿量が多くなると発生速度は小さくなる傾向を示している。

第 9 図および第 10 図の結果から、吸湿量が 0.4% の場合の $(\text{CO} + \text{CO}_2)$ 発生速度を求めると、80°C の温度では $1.1 \times 10^{-5} \text{ ml/g} \cdot \text{h}$ であるのに対して、160°C の温度では $4.9 \times 10^{-3} \text{ ml/g} \cdot \text{h}$ であり、約 450 倍の値になっている。

また、吸湿量が少ない場合には、第 6 図および第 7 図に示されるように、 CO/CO_2 の値の経時変化は 80°C のような低温域と 160°C のような高温域とで異なる傾向を示す。80°C の加熱温度では加熱初期に CO/CO_2

第 11 図 CO , CO_2 の発生量と CO/CO_2 の経時変化

Fig. 11. CO , CO_2 and CO/CO_2 vs. ageing period.

は大きな値を示すが、加熱時間が長くなるにつれて小さな値に変化する。しかし 160°C の加熱温度では、加熱時間が長くなるにつれて CO/CO_2 の値は大きくなり、そのあとほぼ一定の値を示す。

以上のように、 CO_2 と CO の発生速度、 CO/CO_2 の値とその経時変化は、吸湿量および加熱温度によって異なることが明らかになったので、次にこれらの指標による絶縁紙の過熱診断の可能性について検討した。

第 11 図は絶縁紙 1 kg が 80°C の温度で加熱されているときに、その 1/1,000 (1 g) が加熱開始 150 日後から 160°C または 180°C の温度で加熱された場合の CO_2 および CO の発生量と CO/CO_2 の値の経時変化を求めた結果を示している。ただし、絶縁紙の吸湿量を 0.4% とし、加熱開始 20 日後までの CO_2 と CO の発生量は第 2 図および第 4 図の結果を用いている。それ以後の発生量については第 9 図および第 10 図の結果から、80, 160, 180°C の各温度における発生速度を読み取り計算で求めた。

CO_2 と CO の発生量は加熱初期に急増したあと、150 日後までは一定の割合で増加する。 CO/CO_2 の値は加熱初期に大きな値を示すが、加熱時間が長くなるにつれて小さな値に変化する。150 日後から絶縁紙の一部が 160°C または 180°C の温度で加熱されると CO_2 および CO の発生量は増加し、 CO/CO_2 の値は増大したあとほぼ一定の値になる。

従って、運転中の変圧器の油中ガス分析の結果から

CO₂ と CO の油中濃度および CO/CO₂ の値, 更にそれらの経時変化を知ることができれば絶縁紙の過熱の有無を診断できるものと考えられる。

なお, 絶縁紙の過熱の規模が小さいときには, 油中ガス分析の感度にもよるが, 過熱による発生ガスが経年劣化による発生ガスにマスクされることが考えられる。更に, 変圧器の位置部位によって温度が異なり, 負荷の変動により温度が変化して診断を誤ることがある。その場合には油中ガス分析以外の情報もあわせて総合的な診断をすることが必要とされる。

5. ま と め

絶縁紙の劣化生成ガスである CO₂ と CO の発生に加熱温度と吸湿量がどのような影響を及ぼすかを調べ, 絶縁紙の劣化生成ガスによる過熱診断の可能性について検討した結果, 次のことが明らかになった。

(1) CO₂ の発生速度は加熱温度が高くなるほど, また加熱温度が一定ならば吸湿量が多くなるほど大きくなる。

(2) CO の発生速度も加熱温度が高くなるほど大きくなるが, 加熱温度が一定ならば吸湿量が少なくなるほど大きくなる。

(3) CO と CO₂ の発生量の比率 (CO/CO₂) は加熱温度が一定ならば吸湿量が少なくなるほど大きな値

になる。また, 吸湿量が 1% 程度より少ないときには, 120℃ の温度より低温側では加熱温度が低くなるほど, 高温側では加熱温度が高くなるほど CO/CO₂ は大きな値になる傾向を示す。更に, 加熱温度が低い場合には加熱初期に CO/CO₂ が大きな値を示しても, 加熱時間が長くなるにつれて小さな値に変化する。従って, CO/CO₂ の比率だけから絶縁紙の過熱の有無を診断する IEC の方法には問題がある。

(4) 運転中の変圧器の油中ガス分析の結果から, CO₂ および CO の油中濃度ならびにその比率, 更にそれらの経時変化を検知することによって, 絶縁紙の過熱の有無を診断することができると考える。

今後は, 変圧器の絶縁紙の過熱劣化に関する油中ガス分析などのデータを蓄積し, 実験結果との対応を検討することが課題である。

終りに, 基本的な一連の御助言をいただいた東京大学生産技術研究所 河村達雄教授に感謝の意を表する。(昭和 54 年 6 月 11 日受付, 同 55 年 4 月 11 日再受付)

文 献

- (1) I. Davies: *J. Appl. Chem. Biotechnol.*, **21**, 194 (1971)
- (2) Galand: *R.E.G.-Tome*, **81**, No. 11 (1972)
- (3) IEC 10 A (central office) p. 37
- (4) E. J. Murphy: *J. Polymer Sci.*, **58**, 649 (1962)
- (5) Y. Saito, et al.: *Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs*, **78**, 602 (1959)