

コンサベータ隔膜破損 の診断法の研究

宮島 極^{※1} 水野 康宏^{※2}
Kiwamu Miyajima Yasuhiro Mizuno
吉田 覚^{※2} 太田 秀希^{※3}
Satoru Yoshida Hideki Oota
杉本 敏文^{※3} 伊藤 保則^{※3}
Toshihumi Sugimoto Yasunori Ito

Study of Diagnosis Method for Diaphragm Trouble of Sealed Type Transformer

1. まえがき

電力の自由化が進み市場競争が激化する中、電力会社は抜本的なコストダウンを進めている。低効率な火力発電所の停止をはじめ、合理化による人員削減、新規設備建設の抑制など、構造改革はあらゆる分野に及んでいる。

配電用変圧器においても、従来の想定寿命30年を超過して運転を継続することが多くなっている。そのため、既設変圧器に対するメンテナンスの最適化や余寿命診断など、設備をより安全に、かつ効率的に運転するための各種研究が行われている。今回は、そのうちの一つのテーマとして、コンサベータ隔膜の劣化破損についての診断法を取り上げて研究を実施した。

なお、本研究の結果やデータ等については、既に電気学会や中部電力技術開発ニュースで発表済みである⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾が、本稿では、それらに詳細説明を加え、より一般的な説明・紹介をするものである。

2. コンサベータ

2.1 絶縁油の劣化

変圧器内の油は、温度変化により膨張・収縮する。これに伴い変圧器内部に空気が供給されると、絶縁油は徐々に酸素によって酸化劣化していく。絶縁油の酸化劣化が進行すれば、電気特性の低下をきたし、ひいてはスラッジが生成することになる。また、絶縁紙等の有機質材料も酸素の存在で劣化が促進される。このような絶縁材料の劣化防止のためにコンサベータが用いられる。

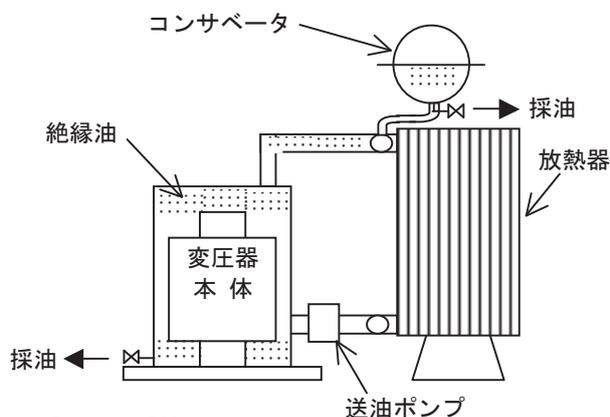


図1 変圧器の外観

2.2 コンサベータ

コンサベータは、油入変圧器の油劣化防止を目的に、変圧器の上部に設置されて、油を貯める容器のことである(図1)。

これは、絶縁油と空気との接触面積を最小限にし、かつ油温を低くして油の劣化を抑制する働きをする。コンサベータには大別して、開放式と密封式の2種類がある。

(1) 開放式コンサベータ

開放式では、空気と絶縁油の接触により酸素が絶縁油中に溶解するので、絶縁紙等の絶縁物は酸化し劣化が促進される。このため、開放式変圧器は活性アルミナを充填した油劣化防止装置を備え、劣化時に発生する生成物による絶縁油の特性低下を防止している。

(2) 密封式コンサベータ

密封式コンサベータにはゴム膜式とゴム袋式があり、いずれもゴム膜によって空気と絶縁油の接触が遮られており酸素による油劣化は起こらない。このため、密封式変圧器は、油劣化防止装置を備えていない。当社ではゴム膜式(隔膜式と呼称)を採用している。この隔膜式コンサベータを図2に示す。

3. コンサベータ用隔膜ゴム

3.1 材質・構造

コンサベータ用の隔膜ゴムは、内層のナイロンバリヤーを基布として、その両外層をニトリルゴムとしたサンドイッチ構造となっている。

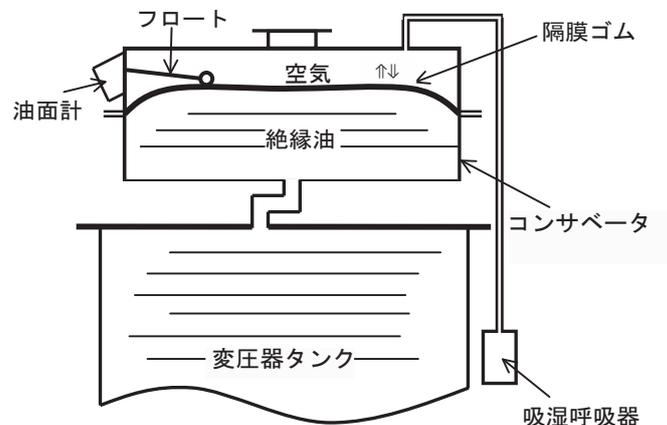


図2 隔膜式コンサベータ

※1 開発環境事業部 テクニカルセンター ※2 電力事業部 変圧器設計G
※3 中部電力株式会社 流通本部 工務部

3.2 隔膜ゴムの劣化

隔膜ゴムは、長期間油の膨張・収縮に追従して屈曲を繰り返すため、折りくせがつきしわが発生する。そしてゴムが劣化によって硬化してくると、折りくせ部に応力が集中し、絶縁油がゴム内層まで浸透しブリストア（膨れ）が発生する。さらに屈曲を繰り返せば、隔膜ゴムに割れや破れが発生する。この孔は外気と通じ、空気と絶縁油が接触するようになってしまう。

密封式変圧器のコンサベータに使用する隔膜ゴムは、15年で取り替えるように推奨されている。初期のものは20年以上が経過しているが、取替実績はわずかである。近年、変圧器は想定寿命の30年を超過して運転されることが多くなってきており、最近になって隔膜ゴムの不具合が報告され始めている。このため、効果的なコンサベータ隔膜破損に対する診断方法の開発が期待されている。

4. 診断方法の検討

4.1 現状の診断方法

日常の巡視点検では、隔膜ゴムの損傷を低油面警報および油温度と油面位置の関係にてチェックしている。しかし、油面位置、隔膜ゴム損傷部位によっては診断できないモードがあり、常に点検時に正しい油面位置を把握できるとは限らない。これが、隔膜ゴムの異常検知を困難にしている。

隔膜ゴムの劣化による不具合を早期に発見し、対処する方法の開発が変圧器の保守管理上必要であると考えられる。

4.2 新しい診断方法

(1) 油中ガス分析について

油中ガス分析による変圧器本体の劣化診断では、指標にCO、CO₂を、異常診断の指標にはH₂、C₂H₂などを用いる。一方、酸素と窒素は診断時に測定はされるが、指標ではないことから記録されていない場合がある。そこで、変圧器の診断時に測定される酸素や窒素の分析値を利用して、特に点検機会を設けずにコンサベータ用隔膜ゴムの劣化診断ができないかを検討した。

(2) 窒素による診断

窒素は不活性であるので、酸素のように消費されることはなく、侵入した量が飽和に達するまで油中に留まる。そのため、不具合発見の指標として相応しいものと考えられる。油中ガス分析記録のある変圧器について窒素濃度を調査した。窒素濃度は、運転年数が増すに従い漸増傾向にあり、その濃度は変圧器の期待寿命である30年においても飽和の半分程度であった。

また、コンサベータ内の点検を行ったところ、一部で隔膜ゴム上側への漏油が認められた。これらは、漏油が認めら

れないものに比べて窒素濃度が高い傾向にあった。

(3) 酸素による診断

これまでの油中ガス分析結果を調査すると、隔膜式変圧器の油中酸素濃度は、数10～3000ppm程度に観測される。また、同一変圧器においても、測定するタイミングにより濃度変動する現象が確認されている。

これらの調査結果から言えることは、まず通常の油中酸素濃度は飽和濃度以下で推移していることである。次に、個体差や同一個体でも変動が大きく見られるということである。この理由を検討してみる。

まず、酸素濃度の特徴であるが、酸素は窒素と異なり、絶縁油、その他の絶縁物の酸化により消費されるということである。次に酸素の供給であるが、正常な隔膜であればゴムを透過する量は極めて少ないので、油中酸素濃度は容易に飽和濃度に到達せずに供給と消費のバランス状態を保っていると考えられる。

酸化による消費量は温度により左右され、高温時には多く消費され、低温時には消費量は少なくなる。このため、高温運転されている変圧器では油中酸素濃度は低く、低温運転されている変圧器では濃度が高いという個体差が発生する。また、同一個体での変動も同じ理由により、温度変動が酸素濃度の変動を引き起こす。

以上のことから、酸素・窒素量の変化による診断を考えてみる。通常、酸素・窒素濃度は飽和濃度以下であるため、隔膜ゴムが損傷し孔が形成されると、供給量が増大し濃度が上がると考えられる。しかし、個体差が大きい場合濃度の絶対値での異常判断は困難と考えられる。

しかし、孔形成による供給量の増大により、通常の変動を超えた濃度へと上昇する現象が発生するものと想定される。その変動イメージを図3に示す。

この様に、同一個体の油中ガス濃度を継続監視して、濃度の急増を捉えれば、隔膜ゴムの不具合を検知できると考えられる。この診断方法について、実験、検討を行った。

5. 絶縁油への溶解実験

本検討では、隔膜ゴムに孔が開いた場合、酸素・窒素濃度

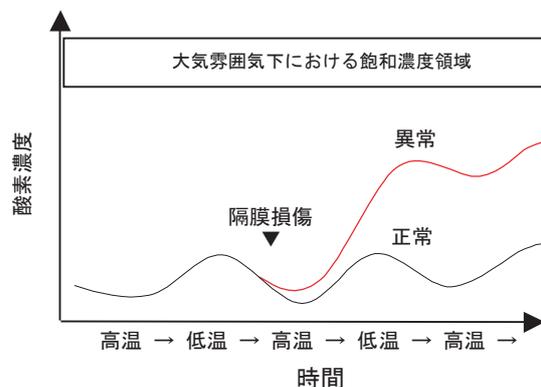


図3 隔膜式変圧器の酸素濃度の変動のイメージ

が通常の変動以上に大きく増加すると推察した。そこで、隔膜ゴムの損傷を模擬して、実験的に隔膜損傷時における酸素・窒素の溶解挙動を検証した。酸素・窒素は同様の挙動を示すので、ここでは酸素のみについて述べる。

5.1 実験方法

実験は、図4に示す隔膜ゴム損傷模擬試験容器を用いて実施した。

実験パラメータを、

- ① 接触面積： 孔の大きさをえて、面積の影響を調査
 - ② 絶縁油体積： 絶縁油体積をえて、体積の影響を調査
 - ③ 温度： 温度をえて、温度の影響を調査
- として、絶縁油中への酸素溶解量を測定した。

5.2 溶解度式

一定温度、一定圧力の下で気体の濃度は(1)式の微分方程式で表される⁽⁴⁾。(1)式の定数 B は、容器の形状や寸法、気体と液体の種類、温度などに依存するもので、ここでは容器定数と呼ぶことにする。本研究では容器定数 B を求め(1)式の実用化を検討した。

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C_0 - C}{B} \dots\dots (1)$$

ただし、

C_0 ：飽和濃度(温度に依存する)、 C ：現在の濃度

B ：容器定数、 t ：時刻

である。

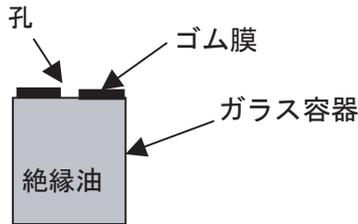


図4 隔膜ゴム損傷模擬試験容器

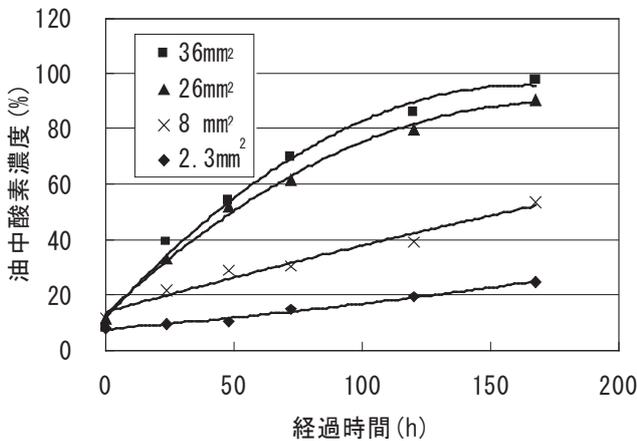


図5 接触面積による油中酸素濃度の経時変化

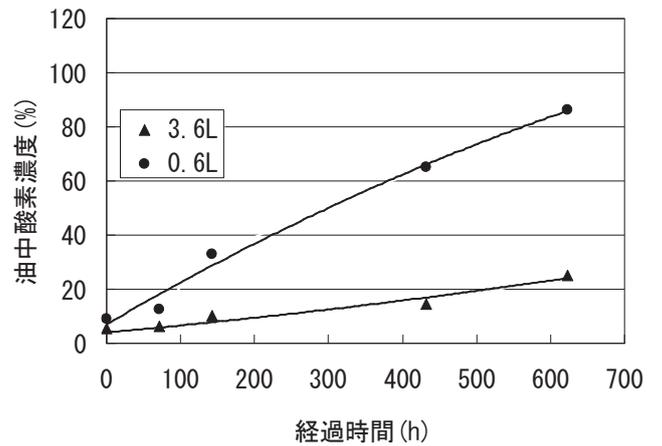


図6 体積による油中酸素濃度の経時変化

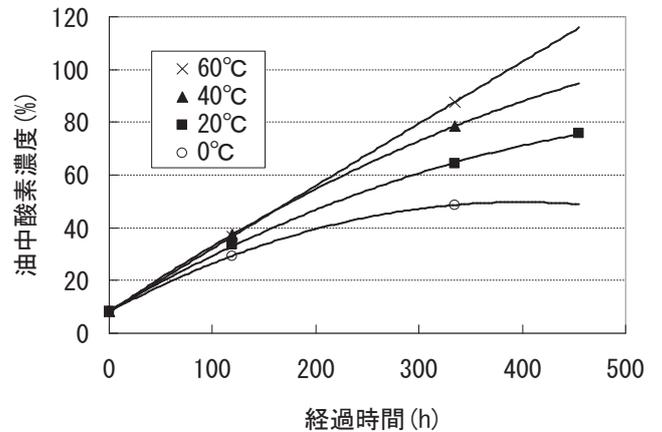


図7 温度による油中酸素濃度の経時変化

5.3 接触面積と油中酸素濃度

温度・体積一定条件の下、絶縁油と空気との接触面積を変化させ、酸素濃度の経時測定を実施した。測定結果を図5に示す。油中酸素濃度は、20℃における飽和値を100%として規格化した。酸素の溶解速度は接触面積が大きくなるほど速くなることがわかった。

5.4 体積と油中酸素濃度

温度・接触面積一定条件の下、絶縁油体積を変化させ、絶縁油中の酸素濃度測定を実施した。測定結果を図6に示す。酸素の溶解速度は絶縁油体積が大きくなるほど遅くなることがわかった。また、接触部付近の濃度(容器の上部)が下部より高いことが予測されたため⁽⁴⁾、容器の上部と下部の濃度を測定したが、有意差は認められなかった。

5.5 温度と油中酸素濃度

接触面積・体積一定条件の下、温度を変化させ絶縁油中の酸素濃度測定を実施した。測定結果を図7に示す。酸素の溶解速度は温度が高くなるほど早くなることがわかった。

5.6 実験のまとめ

実験の結果から、油中酸素濃度は、容器内での濃度勾配はなく、接触面積および温度に比例し、油体積に反比例することがわかった。

これら結果を基に(1)式について初期濃度を C_i として、微分方程式を解くと、時刻 t における油中酸素・窒素濃度は(2)式となる。

$$C = C_o - (C_o - C_i)e^{-t/B} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、容器定数 B は、 $B=KV/S$

K ：温度定数

V ：体積、 S ：接触面積

である。

図5～7の実験結果と(2)式との比較を行なったところ、計算値は実測値とよく一致していることがわかった。

6. 実機を使用した検証実験

6.1 実験条件

前述の溶解実験結果の妥当性を検証するため、実機によるコンサベータと本体間における酸素の移動について調査した。検証実験は密封式変圧器を無通電ではあるが、実フィールドでの運用に近い形態を模擬して実施した。実験風景を図8に示す。隔膜が破損した場合の酸素の溶解挙動を模擬するため、隔膜に直径5mmの孔を開け定期的に採油して溶解酸素量を測定した。採油箇所は、本体下部ドレーンおよびコンサベータの2箇所とした。試験期間中の温度変動は約4℃であった。また、本体の送油ポンプは試験期間中連続運転とした。

6.2 シミュレーションと実験結果

酸素濃度の経時変化をシミュレーションにより計算し、



図8 実機を用いた実験風景

実験結果と比較した。シミュレーションの変動条件は、温度差4℃で1日1回の油の膨張収縮による呼吸をするものとした。コンサベータ内の酸素濃度の計算式には、(2)式を用いた。変圧器本体の濃度については、コンサベータの油が膨張収縮により、本体に酸素が輸送されるとして計算を行なった。結果を図9に示す。油中酸素濃度は、20℃における飽和値を100%として規格化した。実験結果とシミュレーション結果は、良く一致した。

さらに、本シミュレーションで、時間を更に延長して計算を行うと、9ヶ月程度で本体の酸素濃度は通常酸素濃度の3倍程度となる。これにより、本体からの採油でも損傷の発見は、継続監視することにより可能であると考えられる。

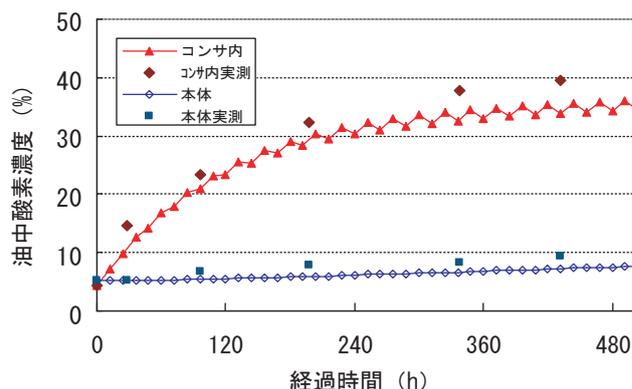


図9 実機の酸素濃度変化

6.3 今後の課題

隔膜が損傷し孔が開いていると推定されるものは、

- ① 隔膜ゴムの経年が15年を超過している
- ② 油温と油面位置の正常な相関関係を逸脱している
- ③ 酸素濃度が急増している(窒素濃度についても同様)の各条件と考えられる。

①と②は、日常の点検時に発見することができる。しかし、②は油面位置表示が正しくても隔膜が損傷している場合もあり、判断の信頼性が十分ではない。③の場合の隔膜損傷の検知には、気温、負荷等による油面位置変動と、油中酸素濃度の変動との関係を精度よく知ることが重要と考えられる。今後は、フィールドデータを収集しデータの蓄積を行なうとともに、診断技術の確立を図る予定である。

7. まとめ

本検討では、隔膜が損傷したときの酸素・窒素の絶縁油への溶解現象について調査を実施した。その結果、隔膜損傷時の油中酸素・窒素濃度は、接触面積・温度上昇に比例し、油体積に反比例することがわかった。

今回の検討から、変圧器油中の酸素・窒素濃度を測定することにより、隔膜の損傷が診断できる可能性があることがわかった。今後は、データの蓄積をすすめ、密封形変圧器

の隔膜損傷に対する外部診断技術としての適用性を検証する予定である。

参考文献

- (1) 太田 他：「密封形変圧器隔膜不具合時の異常診断方法検討」電気関係学会東海支部大会(2003)
- (2) 太田 他：「密封形変圧器隔膜不具合時の異常診断方法検討その2」電気関係学会東海支部大会(2004)
- (3) 太田 他：「密封形変圧器隔膜異常診断手法の開発」中部電力技術開発ニュース No.111 (2004-11)
- (4) 白井 他：「絶縁液体中のガスの飽和溶解度と拡散」三菱電機技報 vol.33 No.12 (1959)

最近登録された愛知出願

特許

特許番号	名 称	発明者	共有権利者
3388068	ブラシレスモータの駆動方法及びその装置	太田 久義	
3388168	電動機の軸受装置	鈴木 正見 児玉 誠 岩井 祐二	
3388184	電動機の軸受装置	城處 元彦 竹村 淳登	
3406122	配電線の電圧管理方式	佐藤 徹 梶田 寛	中部電力(株) (株)ダイヘン
3410889	蓋体の自動着脱・搬送装置	山田 直人	
3423992	柱上据付型変圧器装置	池間 秀夫	中部電力(株) (株)日立産機システム (株)ダイヘン
3447539	変圧器の巻線支持装置	須田 芳和	
3447540	配電用変圧器	高田 真臣	
3455623	電動アクチュエータの駆動位置検出装置	野々村勝己 安田 徹 北村 昭則	
3462935	油入アモルフラス鉄心変圧器	池間 秀夫	中部電力(株)
3481085	鉄心材料の段積方法及び段積装置	白石 真澄 河瀬 文雄	
3494887	同期電動機の回転子	山田 智	
3506808	電圧調整設備	浅井 政一	中部電力(株) (株)ダイヘン
3507257	ステップ式自動電圧調整装置の制御装置	浅井 政一	
3515302	鉄心材料の積層方法及び積層装置	白石 真澄 河瀬 文雄	
3522466	変圧器鉄心の層間固着解離方法及びその装置	白石 真澄	
3524814	電気機器用コイルボビン	城處 元彦 高見 健二	
3539818	巻鉄心の製造装置	白石 真澄 河瀬 文雄	
3539842	帯状鋼板の自動交換装置	鈴木 康夫 加藤 雅彦	
3545124	電動機の駆動制御装置	安田 徹	パラマウントベッド(株)
3545215	ブラシレスモータ	山田 智 久保池祥雄 米山 裕晃	
3545231	単相ブラシレスモータのセンサレス駆動回路装置	森 和彦	
3545262	永久磁石モータ	森 和彦	
3561633	送風機の気密保持装置	城處 元彦 竹村 淳登 可児 直紀	
3592595	系統連系用電力変換システム	神部 晃 桑原 祐 有川 清二	

意匠

登録番号	意匠に係る物品	創作者	共有権利者
1176771	畜舎用送風機	伊藤 嘉章	
1201456	電動機	伊藤 嘉章	