電力用油浸紙フィルムコンデンサの劣化特性について

正員 岡部成光 (東京電力)

正員 向當正典 (東京電力)

正員 奈良敏雄 (日新電機)

正員 菅沼紀美夫 (日新電機)

正員 高橋邦彦 (日新電機)

Study on Deterioration Characteristics of Power Capacitors with Oil-impregnated Paper-film
 Shigemitsu Okabe, Member, Masanori Koto, Member (Tokyo Electric Power Co.), Toshio Nara, Member,
 Kimio Suganuma, Member, Kunihiko Takahashi, Member (Nissin Electric Co., Ltd)

Power capacitors are highly reliable equipment due to their completely enclosed configuration. They have usually worked without almost any trouble for a long time. Their dielectric strength can be however reduced due to some stresses such as over-voltage application or thermal degradation of the insulation material during their long period of operation and these events can result in the dielectric breakdown of the capacitors in extreme cases.

Power capacitors with oil-impregnated paper-film are commonly used in substation. Therefore, it is very important to diagnose the deterioration and predict the remaining service life of such equipment, to assist in plant maintenance. To establish the diagnostic method of the deterioration of the capacitors with oil-impregnated paper-film, we have conducted thermally- and electrically- accelerated deterioration tests and investigated the changes of their characteristics. Based on the experimental results we obtained, it can be concluded that the behavior of the oil-dissolved gases can be used as a useful index to diagnose the insulation deterioration of these capacitors.

キーワード：電力コンデンサ，劣化，絶縁紙，ポリプロピレンフィルム，絶縁油，部分放電，ガス分析

1. まえがき

電力用コンデンサは、電力系統の電圧調整、負荷の力率改善などの目的で多量に使用されており、変電設備として欠くことのできない機器である。⁽¹⁾

この電力用コンデンサに使用される絶縁材料は、十分に脱気・脱湿されており、またコンデンサは完全密封構造としている為、その特性は長期間にわたり極めて安定しており、信頼度の高いものとなっている。しかし、使用中に加わる過電圧や熱などのストレス、使用環境の諸条件等により絶縁性能が低下し、ついには絶縁破壊に至ることも考えられる。⁽¹⁾

電力用コンデンサは油浸紙コンデンサに始まり、誘電体材料も絶縁紙からポリプロピレンフィルム（以下PPフィルム）へ、絶縁油も鉱物油から合成油と変遷してきた。その中でも油浸紙コンデンサは、20年以上の使用年数に達しているものが多く、設備保守の面から、機器の経年劣化診断及び余寿命診断が極めて重要となってきた。このこ

とから我々は以前に、油浸紙コンデンサの劣化に係わる諸特性及び、その評価項目について検討し、報告した。⁽²⁾

そこで今回、現在最も多く使用されている電力用油浸紙フィルムコンデンサの劣化診断を確立する為に、熱、電圧による加速劣化試験を実施し、劣化特性及び劣化評価項目について検討した。その結果について報告する。

2. 劣化試験

<2.1> 供試コンデンサ

図1に示す供試コンデンサを用いて試験を行った。仕様は下記の通りである。

- ・ 定格：1.6kV 1φ 60Hz 5kVA
- ・ 使用誘電体：絶縁紙／PPフィルム
アルキルナフタレン含浸
- ・ 構造：油量調整装置、採油バルブ付属

図1 供試コンデンサ

Fig. 1. Model capacitor

この供試コンデンサの素子容量は、実器コンデンサ素子容量の1/75に相当する。また絶縁紙(kg)/絶縁油(ℓ)の比は、供試コンデンサと実器コンデンサが等価的に考えられる範囲である。

なおこの供試コンデンサには、絶縁油を容易に採油できるように、採油バルブを付属し、加熱温度による絶縁油量の変化を調整するセルを設けていることを特徴とする。

〈2.2〉 試験条件

電力用コンデンサの実使用条件における劣化要因は、主として誘電体材料の熱ストレス、電圧ストレス、及びそれらの複合ストレスと考えられる。これらのストレス毎に、短期間で劣化評価項目を探索する為に、加熱、課電劣化試験を実施し検討を行った。

試験条件は下記を考慮に入れ、図2に示す耐電圧特性の基本であるV-t特性⁽⁸⁾、及び図3の室温における部分放電発生-時間特性(DIV-t特性)から、表1のように設定した。

- ・部分放電が発生しない条件。
- ・誘電体材料の劣化形態が変わらない範囲。
- ・諸特性変化の追跡を行いやすくする為、部分放電発生まで、ある程度の時間的猶予(1ヶ月程度)がある条件。

図2 供試コンデンサのV-t特性

Fig. 2. V-t characteristics of capacitor

図3 供試コンデンサの部分放電発生-時間特性

Fig. 3. DIV-time characteristic of model capacitor

表1 加速劣化試験条件

Table 1. Accelerated deterioration test conditions

温度 ^{注2)}	電圧 ^{注1)}	1.9 E n	2.1 E n	2.2 E n
室温		○	○	○
90℃		○	○	○
110℃		○	○	○
130℃		○	—	—

注1) E nは定格電圧

注2) 周囲温度

〈2.3〉 評価項目

コンデンサの劣化として考えられる項目とその現象を表2に示す。そこで供試コンデンサによる試験に先立ち、誘電体材料(絶縁紙、PPフィルム、絶縁油)の熱単独による

表2 劣化評価項目

Table 2. Indexes for diagnostics

劣化評価項目	劣化の傾向として考えられる現象
コンデンサ	誘電特性 静電容量、tan δの値が増加する。CRが低下する。
	部分放電特性(DIV) 絶縁油などの絶縁耐力低下により、DIVが低下する。
素子	AC耐電圧 破壊電圧値が低下し、バラツキが大きくなる。
	DC耐電圧 破壊電圧値が低下し、バラツキが大きくなる。
絶縁油	誘電特性 tan δが増大し、ρが減少する。
	油中溶存ガス 絶縁紙の分解や絶縁油の分解により、ガスが発生・溶存する。
絶縁紙	平均重合度 熱によりセルロースが分解し、平均重合度が低下する。
	機械的特性 機械的強度が低下する。
PPフィルム	DC耐電圧 破壊電圧値が低下し、バラツキが大きくなる。
	機械的特性 機械的強度が低下する。

劣化試験を実施し、材料劣化の概要を調べ、評価項目を絞った。

その時の各項目の変化を表3に示す。これらをもとに供試コンデンサの劣化特性として、電気特性〔静電容量(C), $\tan \delta$, CR値(静電容量C×絶縁抵抗R), AC, DC絶縁耐力、部分放電開始電圧(DIV)〕、構成要素としての材料特性(絶縁紙の平均重合度・PPフィルムのDC破壊特性)に着目し、劣化進展度合を定量的に把握した。またコンデンサの劣化評価基準としては、DIVを用いた。

表3 誘電体材料の加熱劣化と各項目の変化

Table 3. Change in characteristics of insulating materials under thermal stress

項目 材料	油中溶存 ガス濃度	紙の平均 重合度	機械的性 質 注1)	DC破壊特 性	油の物性 注2)
絶縁紙 (油中劣化)	○	○	×	×	×
PPフィルム (油中劣化)	×	—	△	○	×
絶縁油のみ	×	—	—	—	×

○: 初期値と比較し、変化した。 注1) 引張り強さ, 伸び
△: 初期値と比較し、やや変化した。 注2) 比重, 屈折率, 全酸価
×: 初期値と比較し、変わらなかった。

3. 試験結果

各ストレスにおいて、課電電圧で部分放電が発生するまでのコンデンサ特性及び部分放電発生時点の素子、材料特性について調べた。

<3.1> 部分放電特性

図4に110℃ 2.2En時の経過時間とDIVの関係を示す。この結果、同一の加熱課電条件において、時間的にばらつきが見られるものの、劣化によって部分放電特性が低下し

図4 コンデンサの経過時間と部分放電特性

Fig. 4. Relationship between deterioration time and DIV

ている。また、測定温度が高温(試験温度)の場合は、室温の値と比べ、初期値からの低下傾向が大きく、劣化による部分放電特性の低下は高温時に顕著に現れる傾向がある。

<3.2> 誘電特性・CR特性

図5に加速劣化時間と誘電特性及びCR特性を示す。静電容量は経過時間に係らず、初期値との差は認められなかった。

$\tan \delta$ は試験開始後、課電の効果によって一部が劣化初期に値が低減するが、劣化の特徴である増大傾向は認められなかった。

CR値は途中でやや低下傾向を示すが、その後殆ど変化はなく、劣化の傾向は認められなかった。

図5 経過時間とコンデンサ特性

Fig. 5 Relationship between time and capacitor parameters

<3.3> コンデンサの耐電圧特性

部分放電が発生しはじめたコンデンサ素子の、AC耐電圧特性を調査した結果を図6に示す。AC破壊値は、無課電素子、課電素子とも違いはなく、初期値からの顕著な低下は認められない。またDC耐電圧値も同様の傾向を示し、

図6 コンデンサ素子のAC耐電圧特性

Fig. 6. AC breakdown voltage of capacitor elements

劣化による低下傾向は認められなかった。

〈3・4〉 誘電体材料の劣化特性

部分放電が発生しはじめたコンデンサから絶縁紙とPPフィルムを取出し、絶縁紙の平均重合度とPPフィルムのDC耐電圧値〔JIS C 2330（電気用ポリプロピレンフィルム）に準拠〕を測定した。

図7に経過時間と絶縁紙の平均重合度を示す。絶縁紙の平均重合度は、加熱時間とともに低下し、絶縁紙が熱分解していることがわかる。また、加熱温度が高いと低下率は大きくなっている。なお今回の劣化状態（重合度残率が約60%以上）では、絶縁紙の熱劣化の特徴の一つである熱分解による機械的強度の大きな低下は認められず、DC耐電圧特性にも顕著な低下傾向は認められないことを、前述の材料試験によって確認している。

次にPPフィルムのDC耐電圧特性を図8に示す。この結果、PPフィルムのDC破壊値は、劣化温度が高いほど平均値が低下し、バラツキが大きくなる。なお課電を受け

図7 経過時間と絶縁紙の平均重合度

Fig. 7. Relationship between time and average degree of polymerization for insulating paper

図8 PPフィルムのDC耐電圧特性

Fig. 8. Weibull plots of the DC breakdown voltage for PP films

た素子と無課電素子にはほとんど差はなく、熱的要因によって低下の傾向が顕著に現れる。

〈3・5〉 油中溶存ガス

油中溶存ガスは、絶縁紙の熱分解によって発生するCO、CO₂ガスが大半をしめる。図9に課電条件が1.9Enの時の経過時間と油中溶存ガス濃度を示す。この結果、経過時間とともにCO+CO₂ガス濃度が増大し、約16000ppmで部分放電が発生しはじめた。また2.2En課電時は1000~6700ppmで部分放電が発生し、印加電圧が高いほど、低い油中溶存ガス濃度で部分放電が発生する。

H₂ガス濃度は、時間の経過とともに若干増加するが、今回は部分放電が発生するまでの試験であることから、絶縁油の分解に伴う急増傾向は認められなかった。

図9 経過時間と油中溶存ガス濃度

Fig. 9. Relationship between time and concentration of the dissolved gases in the oil

4. 劣化指標項目の検討

各試験条件での劣化とその特性調査結果をまとめると下記のとおりとなる。

- (1) 絶縁油単独の場合には、絶縁油自身の劣化による特性低下は見られない。
- (2) 絶縁紙は熱劣化によって分解し、この結果、劣化生成物の一つとしてCO、CO₂ガスが発生する。このガスが増大するとコンデンサの部分放電開始電圧が低下する。
- (3) PPフィルムは熱的要因が中心となり、DC耐電圧値が低下する。

しかし、今回の試験結果から、(2)の状態（部分放電特性が低下）になっていても、素子耐電圧値の低下までに至っていない。これらから、非破壊診断の観点から最適劣化指標項目を考えた場合、油中溶存ガスが有効であることがわかった。

そこで、 $\text{CO} + \text{CO}_2$ 油中溶存ガス濃度と部分放電開始電圧との関係を調査した。結果を図10に示す。

この結果から、劣化温度による傾向の違いは認められず、いずれもバラツキはあるものの、油中溶存ガス濃度が増大するに従い、部分放電開始電圧が低下する傾向が見られる。回路投入時のコンデンサ過電圧を考慮した時の値である、部分放電開始電圧が $2.0E_n$ となるガス濃度が1000ppm 付近の場合もあった。

測定温度は室温 (20~25℃)

図10 $\text{CO} + \text{CO}_2$ 油中溶存ガス濃度と DIV

Fig. 10. Relationship between DIV and concentration of CO and CO_2 dissolved in the oil

5. 劣化進展メカニズムの検討

試験結果をもとに、電力用油浸紙フィルムコンデンサの

劣化進展メカニズムを、誘電体材料別に検討を行った。劣化進展フローを図11に示す。

電力用コンデンサは部分放電が発生しない領域で設計・使用されており、この部分放電が発生しはじめた時点コンデンサの寿命（期待特性を維持できない状態）とすると、電圧劣化の影響は小さく、経年劣化は熱的要因が支配的と考えられる。

誘電体材料の劣化は絶縁紙の劣化とPPフィルムの劣化がある。

絶縁紙の場合は、熱ストレスを受けると、絶縁紙が分解し、分解生成物の一つとして CO 、 CO_2 ガスが発生し、絶縁油中に溶存する。そして、ガス濃度の増大によって絶縁油の絶縁耐力が低下し、コンデンサの部分放電特性が低下する。やがて、投入時の過電圧で部分放電が発生するようになり、さらにこの状態が進展すると、放電によって絶縁油が分解して、分解ガスである H_2 、 C_2H_2 が発生し、次第に部分放電電荷が大きくなり、最終的に絶縁破壊に至る。

一方、PPフィルムの場合は、熱ストレスによって、PPフィルムのDC耐電圧特性が低下傾向を示す。しかし、コンデンサとしての誘電体は、複数枚で構成されている為、これらフィルムの劣化による弱点部分がマスキングされ、素子レベルでは絶縁特性が低下しにくい。この結果、今回の試験条件からは、PPフィルムの劣化が素子レベルの絶縁耐力に影響を与える以前に、油中溶存ガス濃度増大による部分放電特性低下が現れると推定される。

6. まとめ

電力用油浸紙フィルムコンデンサの劣化診断法を確立する為に、モデルコンデンサを用いて加速劣化試験を実施し、

図11 劣化進展フローの推定

Fig. 11. Presumption of deterioration progress

劣化特性及び劣化評価項目について検討を行った。この結果、以下の知見を得ることができた。

- (1) C , $\tan \delta$, CR は部分放電開始電圧の低下に係わらず、顕著な変化は見られないが、油中溶存ガス濃度の増大と部分放電開始電圧の低下には良い相関が見られ、劣化指標項目として有効である。
- (2) 誘電体の劣化には、絶縁紙の劣化とPPフィルムの劣化があるが、PPフィルムの劣化が素子レベルの絶縁耐力に影響を与える以前に、絶縁紙の分解で増大する油中溶存ガスによって、部分放電特性が低下すると推定される。
- (3) 油中溶存ガスに着目した場合、経年劣化によるDIVの低下と相関性のある CO 、 CO_2 ガスが指標として有効である。
- (4) 試験結果より、誘電体材料別に劣化進展メカニズムを推定した。また、経年劣化は熱的要因が支配的であると考えられる。

今後は、電力用油浸紙フィルムコンデンサの劣化診断技術の確立を図る為、現在運用中のコンデンサのデータを蓄積し、劣化判定基準・運用基準について検討していきたい。

(平成7年7月24日受付、同7年10月30日再受付)

文 献

- (1) 萬屋・高須・神庭・菅沼・一葉・向井：「電力用コンデンサ劣化診断法の研究」，静止機器研究会資料，SA-90-52(1990)
- (2) 岡部・向當・福田・林・奈良・高橋：「電力用油浸紙コンデンサの劣化特性について」，電学論A, 115, 30(平7-1)
- (3) 吉田・岸本・井上・菅沼：「電力用コンデンサのV-t特性とコンピュータ作図」，静止機器研究会資料，SA-91-11(1991)
- (4) 電気学会技術報告：「電力用コンデンサ運用指針」，Ⅱ部，No. 399(1991)
- (5) 月岡・森・後藤・鈴木：「 CO_2 と CO による油入変圧器の経年劣化度」，電学論A, 106, 331(昭61-7)

岡部 成光

(正員) 1958年9月18日生まれ。1986年東京大学大学院博士課程修了。同年東京電力(株)入社。主として絶縁協調、設備診断の研究に従事。工学博士。

向當 正典

(正員) 1965年3月1日生まれ。1989年金沢大学大学院修士課程修了。同年東京電力(株)入社。主として設備診断の研究に従事。

奈良 敏雄

(正員) 1951年4月16日生まれ。1974年3月武蔵工業大学工学部電気工学科卒業。同年4月日新電機(株)入社。主にコンデンサ用誘電体材料の研究に従事。現在第1電力機器事業部産業コンデンサ部課長。

菅沼 紀美夫

(正員) 1955年2月11日生まれ。1978年3月名古屋大学工学部電気工学科卒業。同年4月日新電機(株)入社。主にコンデンサ誘電体ならびに予測保全技術に関する研究開発に従事。現在第1電力機器事業部電力コンデンサ部主任。

高橋 邦彦

(正員) 1963年8月29日生まれ。1987年3月近畿大学理工学部原子炉工学科卒業。同年日新電機(株)入社。主として乾式コンデンサ及び誘電体材料の研究開発、電力用コンデンサの劣化診断法の研究に従事。