

電力用コンデンサの熱安定性に関するコンピュータ解析

吉田 恭信 ・ 田村 庸平*

Computer Analysis of Thermal Stability of Power Capacitors

Yasunobu YOSHIDA and Youhei TAMURA *

ABSTRACT

Capacitor elements are composed of completely refined insulating paper and/or polypropylene film impregnated with aromatic hydrocarbon oil and hermetically sealed so as to avoid the influences of atmospheric air and humidity.

Therefore, power capacitors have very high reliability. On the other hand, if excessive voltages are imposed upon the capacitors, the capacitors lose the thermal balance and may come to thermal breakdown.

This paper clarified the mechanism of thermal balance of the power capacitors, and made it possible to analyze the temperature rise and the permissible over load of the power capacitors using a computer.

Key words: Power capacitors, Thermal stability, Computer analysis,
Heat dissipation coefficient, Temperature rise.

キーワード: 電力用コンデンサ、熱安定性、コンピュータ解析、放熱係数、温度上昇。

1 はしがき

電力用コンデンサは厳密に品質管理された絶縁紙、ポリプロピレンフィルムなどの薄葉絶縁物を真空加熱乾燥した後、予め脱気・脱湿・精製処理した絶縁油を含浸したものを誘電体とし、その後も外気が侵入しないように完全密封構造としているため、通常の使用によっては誘電体はほとんど劣化することがない。また、電力用コンデンサは一般に通常の電圧によっては誘電体に部分放電を発生しないように設計・製造されるので、極めて長い年月にわたって安定に運転することができる。

しかしながら、通常の運転によっても誘電体の損失などによって発熱し内部の温度が上昇するため、有機物である薄葉絶縁物や絶縁油が経年的に変化することを免れることはできない。

特に、高い周囲温度において過度の電圧が印加され過負荷運転される場合には、誘電体の温度が異常に上昇して経年変化を促進するのみならず、場合によっては内部の発熱量が容器壁からの放熱量を

上回って熱的平衡を失い、遂には熱破壊することも起こりうる。

本研究は電力用コンデンサの定格運転ならびに過負荷運転時における内部温度上昇、熱的平衡条件で決まるコンデンサの許容過負荷率などをコンピュータによって解析することを目的として行った。

2 電力用コンデンサの誘電体の変遷 [1],[2]

わが国の電力用コンデンサは1930年代に開発・実用化され、当初は絶縁紙に鉱物油を含浸したいわゆる油浸紙が誘電体として用いられた。油浸紙は誘電率が比較的高い長所を有するが、誘電正接が劣っているため、1960年代後半より極めて低損失のポリプロピレンフィルムが絶縁紙に代って次第に使用されるようになってきた。このフィルムはコンデンサ素子とした場合に乾燥および絶縁油含浸が困難であり、誘電率が低い欠点を有するため、最初は絶縁紙と交互に重ね合わせた、いわゆる油浸紙・フィルム誘電体として用いられたが、1970

* 情報処理工学科

年代中頃よりフィルムの表面を粗面化することによって乾燥・含浸を容易にし、フィルム単独で油浸フィルム誘電体として用いられるようになってきた。また、このフィルムの誘電率が低い欠点は、その厚さを薄くして、単位厚さ当たりの絶縁耐力を向上させて補うことにより、単位容量当たりの体積を油浸紙誘電体の場合に比べて大幅に低減することが可能になった。

一方、鉱物油には可燃性で誘電率が低い欠点があるため、米国では1930年頃から不燃性で誘電率が高い3ないし5塩化ジフェニルが用いられ、わが国でも1950年代から、容器に薄い鉄板またはステンレス板を用いた小容量の缶型コンデンサに塩化ジフェニルが採用された。しかし、塩化ジフェニルは化学的に極めて安定であるため、なんらかの原因によって自然界に流出したとき容易に分解されず、食物連鎖によって人体に摂取されたとき、長く人体内に留まって悪影響を及ぼすことが判明し、1970年代になって、わが国を始めとして各国で相次いでその使用が禁止されるに至った。塩化ジフェニルの代替油には、誘電率は低く可燃性ではあるが、部分放電や過熱によって発生する分解ガスを吸収する能力が高く、絶縁紙やフィルムとともに使用するとき油浸薄葉絶縁物としての絶縁耐力を向上させることができるアルキルナフタレンやアルキルジフェニルエタンなどの2環芳香族合成油が採用され今日に至っている。なお、缶型コンデンサに塩化ジフェニルが採用された後も、容器に厚い鉄板を用いる大容量のタンク型コンデンサには、鉱物油が用いられてきたが、缶型コンデンサで2環芳香族合成油含浸紙・フィルム誘電体が用いられるようになったのに伴い、1970年後半より、タンク型コンデンサにおいても鉱油含浸紙に代わって、この誘電体が用いられるようになった。図1に、これら誘電体の誘電率 ϵ および誘電正接 $\tan \delta$ の温度特性の代表例を示す。[1]

3 電力用コンデンサの発熱量と放熱量 [3]

3.1 電力用コンデンサの発熱量

電力用コンデンサの損失には誘電体の誘電損失のほか電極箔やリード線での抵抗損などがあるが、一般には誘電損失が大部分を占めているので、コンデンサの発熱量は、その運転容量に誘電体の

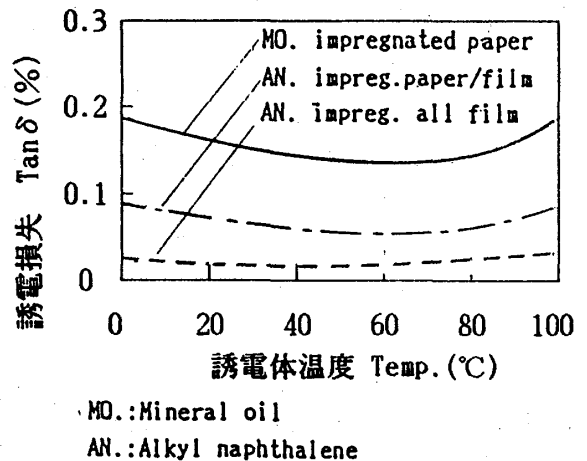


図1 各種誘電体の誘電損失—温度特性
Fig.1 $\tan \delta$ - Temperature Characteristics of Various Dielectrics.

$\tan \delta$ を乗じることによって求めることができる。運転容量は定格容量 Q (var) に過負荷率 k を乗じたものになるから、コンデンサの発熱量 W (W) は次式で与えられる。

$$W = k Q \tan \delta \quad (1)$$

電力用コンデンサの誘電体には前章に記したように種々のものがあるが、それらの $\tan \delta$ の温度特性は図1に見るごとく、いずれも通常の使用温度においては数十°Cにおいて最低値を有するV字状を示し、一般に2次曲線で近似することができるので、任意の3点の温度における $\tan \delta$ の値を与えることによって使用誘電体の $\tan \delta$ の温度特性を表すことができる。

従って、(1)式からコンデンサの定格容量 Q 、過負荷率 k および任意の3点の温度における誘電体の $\tan \delta$ を与えれば、そのときのコンデンサの発熱量 W の温度特性を求めることができる。

3.2 電力用コンデンサの放熱量と放熱係数

(1) 電力用コンデンサの放熱量

電力用コンデンサを運転したときに誘電体から発生した熱量はコンデンサ容器の壁面を通過して外部へ放散される。器壁からの放熱量は周囲温度との温度差(温度上昇)に比例して増大するので、器壁の温度は発熱量と放熱量が平衡するまで上昇し、それにつれて誘電体の温度も上昇する。器壁から

の放熱量 P (W) は、器壁の面積 S (m^2)、放熱係数 h ($W/^\circ C m^2$) および温度上昇 ΔT ($^\circ C$) で決まり、次式で与えられる。

$$P = h S \Delta T \quad (2)$$

(2) 器壁の放熱係数

容器壁面からの放熱係数は、壁面の配置状況、塗装色によって相違する。これらの条件を種々変えて実験した結果は表 1 に示すごとくで、放熱係数は温度上昇が十数 $^\circ C$ 以上ではほぼ一定になる。[3]

表 1 電気機器の器壁の放熱係数
Table 1 Heat Radiation Coefficient of Walls of Electric Apparatus

塗装色	壁面の位置	放熱係数 ($W/^\circ C m^2$)
黒色	側面	11.5
	上面	12.2
	下面	10.0
	床面	12.5
中間色 (7.5GB 6/1.5)	側面	11.2
	上面	11.7
	下面	9.8
アルミ地 (無塗装)	側面	7.7
	上面	8.3
	下面	6.0

容器の塗装色については無塗装のアルミ地のままの場合と黒色または中間色 (7.5 GB 6/1.5) で塗装した場合について実測したが黒色と中間色の場合の差は僅かで、黒色の場合の放熱係数が 3% ほど高かった。アルミ地のままの場合の放熱係数は黒色の場合の 60 ないし 70% と低かった。従って、電力用コンデンサの温度上昇を極力抑えるためには黒色ないし中間色に塗装することが望ましい。通常、電力用コンデンサは灰色系や紺色系などの中間色で塗装されるので、表 1 より、側面、上面、下面を平均して放熱係数として $11.5 W/^\circ C m^2$ を用いればよいと考えられる。なお、2 台以上のコンデンサを併設するときには、隣接するコンデンサとの間隔が狭くなると、側面からの放熱係数が低下する。図 2 は黒色塗装をした 2 枚の壁面を間隔を変えて対向させたときの放熱係数の実測結果を示すもので、単独に設置した場合の $11.5 W/^\circ C m^2$ に対し、間隔が 30cm では $10.5 W/^\circ C m^2$ 、間隔 10cm

では約 $9 W/^\circ C m^2$ に低下する。缶型コンデンサを併設する場合には、かなり狭い間隔で設置するのが一般的であるので、単独設置の場合に比べて放熱係数が低下し、温度上昇が高くなることに留意する必要がある。

(3) コンデンサの放熱面積

コンデンサの放熱量を算定するためには、その放熱面積 S (m^2) を知る必要がある。このためにはコンデンサの容器の縦、横、高さの寸法を与えるのが直接的であるが、本報ではこれらの寸法を与える代わりにコンデンサの容量を与えて、これから寸法を算出する方法を採用した。ただし、寸法の算出を簡単にするため、コンデンサの容器を立方体と仮定して、既知の誘電率 ϵ 、設計電界の強さ G ($V/\mu m$) およびコンデンサの定格周波数 f (Hz) ならびに定格容量 Q (var) から次式によりコンデンサの体積 V (m^3) を求め、その立方根から 1 辺の長さ L (m) を求めて $S = 6 L^2$ とした。

$$V = 1.8 \times 10^7 Q / f \epsilon G^2 \quad (3)$$

なお、コンデンサの形状はタンク型では立方体に近く、このように仮定しても差し支えが少なくと思われるが、缶型コンデンサの形状は一般に扁平な直方体であり、このように仮定することは実情にそぐわないので、今後再検討することを予定している。

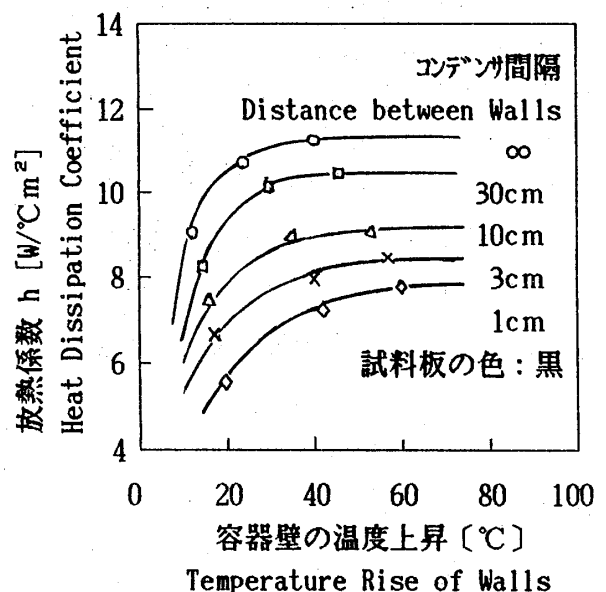


図 2 容器壁の間隔と放熱係数の関係
Fig.2 Heat Dissipation Coefficient vs. Distance between Walls.

4 コンデンサの熱平衡

電力用コンデンサを周囲温度 T_0 ($^{\circ}\text{C}$)において過負荷率 k で使用したときの発熱量は前述したごとく $W = k Q \tan \delta$ となり、図3の W_1 曲線で与えられる。一方、放熱量 $P = h S \Delta T$ は同図の P 直線で与えられる。従って、両者の交点Aでは発熱量と放熱量が等しくなり、コンデンサは熱的に平衡する。

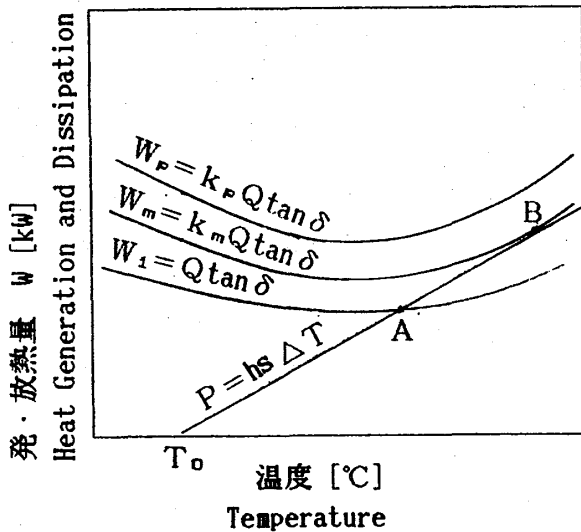


図3 電力用コンデンサの熱的安定性

Fig.3 Thermal Balance of Power Capacitors

図の $W_m = k_m Q \tan \delta$ 曲線は発熱量と放熱量がB点で接する場合で、過負荷率がこの値以上になると発熱量が放熱量を上まわって熱平衡が破れ、コンデンサの内部温度は際限なく上昇するようになり、遂には熱破壊に至る。従って、 k_m は熱平衡から決まる許容過負荷率の限界を与える。[4]

前述のごとく、発熱特性を2次曲線で近似し、放熱特性を勾配 h (放熱係数)の直線とし、

$$\text{発熱曲線} : kW = a T^2 + b T + c$$

$$\text{放熱曲線} : P = h s (T - T_0)$$

とすれば、両者が熱平衡する場合には

$$a T^2 + b T + c = h s (T - T_0)$$

従って、

$$a T^2 + (b - h s) T + (c + h s T_0) = 0$$

となり、この解は次式で与えられる。

$$T = - \{ (b - h s) \pm \sqrt{D} \} / 2 a$$

この式で D は判別式で、

$$D = (b - h s)^2 - 4 a (c + h s T_0)$$

となる。

D の値によって次の3つの場合に分けられる。

- (i) $D > 0$ のとき
熱平衡 (過負荷率: k)
- (ii) $D = 0$ のとき
熱平衡限界 (限界過負荷率: k_m)
- (iii) $D < 0$ のとき
熱不平衡

この場合、周囲温度をJIS C 4902で定められた最高温度 40°C とすると、そのコンデンサに許容される許容過負荷率の限度が得られる。

なお、以上では器壁温度と誘電体温度を同じとして取り扱ったが、実際には後者の方が 10°C 前後高くなることを考慮する必要がある。

5 コンデンサの熱安定性に関するコンピュータ解析

以上の結果をコンピュータで解析するためのプログラムを作成し、任意の温度3点における誘電体の $\tan \delta$ 、定格容量 Q 、放熱係数 h ならびに周囲温度 T_0 を与えることによって、コンデンサを定格使用した場合の誘電体温度および熱平衡で制約される許容過負荷率 k とそのときの誘電体温度を求めることを可能にした。一例として、誘電体を鉱物油含浸紙 ($\epsilon = 3.3$, $G = 12 \text{ V}/\mu\text{m}$ とした)、定格容量を $1,000 \text{ kvar}$ 、周囲温度を 40°C としたときの出力結果を図4および以下に示す。ただし放熱係数は $11.5 \text{ W}/^{\circ}\text{C m}^2$ とし、3点の温度に対する $\tan \delta$ の値を次のごとく入力した。

$20^{\circ}\text{C} : 0.0013$

$60^{\circ}\text{C} : 0.0012$

$100^{\circ}\text{C} : 0.0015$

コンピュータ解析の出力結果:

定格使用時の誘電体の温度 = 73.5°C

このときのコンデンサの温度上昇 = 33.5°C
熱平衡から定まるコンデンサの

許容過負荷率 = 1.76

このときの誘電体の温度 = 135°C

なお、誘電体温度 135℃ は有機絶縁材料である鉱物油および絶縁紙にとっては過大であるので、実際にはこのコンデンサに対して 1.76 倍の過負荷率を許容することは妥当ではなく、今後、誘電体許容温度からの制約による許容過負荷率を併せて算出し、熱平衡からの制約による許容過負荷率と比較して、低い方をそのコンデンサの許容過負荷率とするようにプログラムを改良したいと考えている。

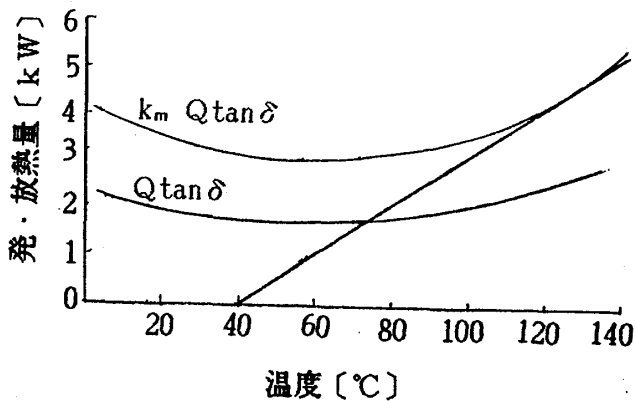


図4 電力用コンデンサの熱的安定性および温度上昇のコンピュータ解析結果の一例
コンデンサの定格：60Hz 1,000kVar
Fig.4 Example of Computer Analysis of Thermal Stability and Temperature Rise of Power Capacitor.
Capacitor Rating:60Hz,1,000kVar

6 むすび

電力用コンデンサにおける発熱および放熱ならびに熱安定性について考察し、この結果に基づいて誘電体の $\tan \delta$ の温度特性、定格出力、運転周囲温度を入力することによって定格使用時における誘電体の温度、許容過負荷率ならびに最高許容周囲温度において許容過負荷限度で使用したときの誘電体の温度を求めるプログラムを作成した。これによりコンデンサの熱安定性、温度上昇などを時間とコストをかけて試験することなく、コンピュータによって解析することを可能にした。しかし、現在のプログラムには本文中で述べたように、なお改善すべき点が残されており、今後より完全なものとするよう検討を続けている。

参考文献

- 1 吉田恭信：電力用コンデンサの進歩と今後の課題、日新電機技報、Vol.20, No.1, 1975.
- 2 Yasunobu Yoshida, Takashi Muraoka "The Development of High Voltage Power Capacitor Technology in Japan", IEEE Electrical Insulation Magazines, Vol.11, No.1, 1995.
- 3 吉田恭信：電力用コンデンサの熱的安定性ならびに寿命と誘電体の特性係数（その1）、日新電機技報、Vol.24, No.3, 1979.
- 4 M.Pierson, "Influence of the Improvement in the Quality of Paper on Capacitors Rating", CIGRE Report No.112, 1958.