UDC 621.315.615.2 : 543.27.061 : 546.11

論 文

55-A 2

変圧器用油中水素常時監視装置の研究

正 員 月 岡 淑 郎 (日 立)

正 員 菅 原 捷 夫 (日 立)

正 員 森 悦 紀 (日 立)

1. ま え が き

変圧器内で局部過熱、放電などの異常が発生すると、その異常部近辺の絶縁油、絶縁紙などが分解して CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 などの炭化水素、および H_2 、 CO 、 CO_2 などとなり、これらが油に溶けて存在するようになる。この現象に着目し、油中ガスを分析し変圧器に異常の前兆がないかどうかを診断する手法が現在広く用いられている。これは変圧器の安全運転管理上欠くことができないものとなっている。しかし、この手法はまず変圧器より油を採取し、次にこの油に溶けているガス成分を抽出し、更にこのガスをガスクロマトグラフィで定量分析するもので、かなり繁雑であり、労力、時間も要する。これらを改善するために著者らは次のような研究を行ってきた。

すなわち、著者らは、さきに油中で局部過熱あるいは放電が発生した場合、いずれの場合にも H_2 が分解ガスの主要成分の一つになっていることを見だし⁽¹⁾、この H_2 だけを検知しても変圧器の異常の前兆の有無は判断できることを明らかにした。更に、 H_2 だけならば現行の面倒な油中ガス抽出操作をしなくても、高分子膜のガス透過性を応用して油から極めて容易に分離できることを明らかにした⁽²⁾。こうした手法については Kurz 氏⁽³⁾、Belanger 氏ら⁽⁴⁾も報告しているが、 H_2 検知にはいずれもガスクロマトグラフィを用いている。ガスクロマトグラフィを用いるとかなり煩雑な検量線の補正、充てん剤の交換、キャリアガスの保守点

検などが必要となる。そこで、我々は膜を透過した H_2 の検知には市販の可燃性ガスセンサを利用し、保守点検作業が全く必要のない完全自動の変圧器用油中水素常時監視装置について種々検討した。

本論文は、変圧器用油中水素常時監視装置として油中 H_2 をポリイミド膜で分離し、これを市販の特に H_2 に鋭敏なガスセンサで検知する方式が実用的であることがわかったので、これについてまとめたものである。

2. 原 理

変圧器に異常の前兆が発生したとき、油あるいは紙類が分解してガスが発生するが、その主要成分は下記のものである。

(1) 過熱の場合

油だけの場合： H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 など

油と共に絶縁紙、プレスボードなどが存在する場合： CO 、 CO_2 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 など

(2) 放電の場合： H_2 、 C_2H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 など

このように異常のタイプにかかわらず、 H_2 は主成分の一つになっている。従って、油中 H_2 の変化量を常に追跡していれば、変圧器が正常に運転されているかどうかはあくできる。追跡方法としては油中 H_2 を自動的に抽出し、これを H_2 ガスセンサで検知することが可能となれば簡便で、保守点検がほとんど必要のない変圧器用油中水素常時監視装置ができることになる。

〈2・1〉油中 H_2 の抽出 油中 H_2 を自動的に抽出する簡便な方法として、高分子膜のガス透過性を応用することができる⁽²⁾。特に H_2 のような分子の小さいものは膜の透過性も良い。しかも、この方法はメンテナンスの必要がなく、監視装置の自動化の目的を十

Study on Continuous Monitoring of Hydrogen Gas Dissolved in Transformer Oil. By Hideo Tsukioka, Member, Katsuo Sugawara, Member (Hitachi Research Lab., Hitachi Ltd.) & Etsunori Mori, Member (Kokubu Factory, Hitachi Ltd.).

月岡淑郎：正員、(株)日立製作所日立研究所

菅原捷夫：正員、(株)日立製作所日立研究所

森悦紀：正員、(株)日立製作所国分工場

分満足できる。高分子膜には耐油性、耐熱性が優れているポリイミドフィルムが適している。ポリイミドフィルムの H_2 透過性については既に報告したように、次の式で表わすことができる⁽²⁾。

$$P_2 = (P_1 - P_0)(1 - e^{-(76PA/Vd)t}) + P_0 \dots (1)$$

ただし、 P_0 : 透過側における初期の H_2 ガス圧力 (cmHg), P_1 : 被透過側から透過する H_2 ガスの圧力 (cmHg), P_2 : 透過側に透過した H_2 ガスの圧力 (cmHg), P : 透過係数 ($ml \cdot cm/cm^2 \cdot s \cdot cmHg$), A : 膜の面積 (cm^2), V : 透過側容器の容積 (cm^3), d : 膜の厚さ (cm), t : 透過時間 (s)

また、実際には圧力単位でなく、濃度単位で表示した方が取り扱いに便利である。油中 H_2 圧力 P_1 は、ヘンリーの法則により $P_1 = kv$ (ただし、 k : 定数, v : 油中の H_2 濃度) と表わすことができるので、 H_2 を ppm 単位で表示すると次のようになる。

$$C = (1.3 \times 10^4 kv - C_0) \times (1 - e^{-(76PA/Vd)t}) + C_0 \dots (2)$$

ただし、 C_0 : 透過側の初期の H_2 濃度 (ppm),

C : 透過側の H_2 濃度 (ppm)

この式を用いて油中 H_2 の膜透過量の経時変化を計算した例が第1図である。ただし、 $25^\circ C$ における H_2 のポリイミド膜に対する透過係数は $1.0 \times 10^{-10} ml \cdot cm/cm^2 \cdot s \cdot cmHg$, 定数 k は $1.38 \times 10^{-3} cmHg/ppm$ である⁽²⁾。実験値も併記した。計算値と実験値とは良く一致している。また、油中 H_2 は 100 時間ぐらいで膜を透過した H_2 と平衡になることがわかる。この平衡に達する時間は (2) 式からわかるように、膜の面積と透過係数が大きいほど、また透過側の容器が小さく、膜の厚さが薄いほど短くなる。透過係数は温度が高くなるほど大きくなる。

〈2・2〉 H_2 の検知 膜を透過した H_2 の検知には n 形半導体のガスセンサを用いた。このセンサはすべ

第1図 膜を透過する水素の時間依存性
Fig. 1. Time dependence of hydrogen quantity permeated through membrane.

ての可燃性ガスに感度をもつが、本論文では特に H_2 に鋭敏なものを用いた。ただし、このセンサは使用するにあたって透過側の容器 (以下、ガス室とする) 内で常時検知可能な状態にしておく、センサの H_2 と反応する速度が膜からの H_2 透過速度より大きいためにセンサの出力は常に零表示になる。一方、センサは常時電流を流しておき、安定化した状態にしておく必要がある。このようなことから、油中 H_2 が膜を透過してガス室にある程度たまった後にセンサが H_2 と接触するようにしなければならないと考えた。

以上のように、ポリイミド膜で油中 H_2 を分離し、分離した H_2 をガスセンサで一定時間ごとに自動的に検知するようにすれば、メンテナンスの必要がほとんどなく、労力のいらぬ変圧器用油中水素常時監視装置とすることができる。

3. 装 置

〈3・1〉 構 成 第2図は上記の考え方をもとにして考案した変圧器用油中水素常時監視装置の概要である。大別してガス分離部とガス検知部からなる。

ガス分離部は厚さ 0.005cm、直径 9.6cm のポリイミド膜と多数の穴のあいた厚さ 0.2cm の鉄製補強板からできており、これが蝶形フランジ弁を介して変圧器の側面に取り付けられるようになっている。

ガス検知部はガス室、電磁バルブ部、ガスセンサ室および計器部からなっている。ガス室は膜を透過した H_2 がたまる場所である。電磁バルブはガス室に H_2 がたまった後、この H_2 をガスセンサ室のセンサに接触するための開閉を行なうものである。通常は図のようにガス室とガスセンサ室はシャ断された状態になっており、かつガスセンサ室は、大気に連通して前述のガスセンサが大気中で常時測定可能な状態にして

第2図 変圧器用油中水素常時監視装置の概略図

Fig. 2. Schematic diagram of continuous monitoring of hydrogen gas in transformer oil.

ある。ガス室の H_2 濃度測定時に電磁バルブが作動して、ガスセンサ室が大气からシャ断されると同時にガス室と通ずるようになる。計器部は電磁バルブを一定時間ごとに開閉させるタイマ、警報器および記録計からなっている。

〈3・2〉 ガスセンサの H_2 検知性能 ガスセンサを密閉容器内で使用する場合、センサの出力は一定時間後に最大となり、その後、次第に低下する。第3図はガス室の容積が 58 cm^3 、ガスセンサ室の容積が 12 cm^3 で、測定時の H_2 濃度が 250, 560, 1,120 ppm の場合におけるセンサの出力-検知時間特性を示したものである。出力は検知時間が3~5分で最大となり、その後漸減する。最大値に到達する時間は H_2 濃度が高いほど長くなる。実際の変圧器の場合で異常と判定

第3図 ガスセンサの出力-検知時間特性

Fig. 3. Detection time-output characteristic of gas sensor.

第4図 センサの出力-水素濃度特性

Fig. 4. Characteristic of sensor's output-hydrogen concentration.

第5図 ガスセンサの水素消費速度

Fig. 5. Consumption velocities of hydrogen of gas sensor.

する可燃性ガスの総量は $0.06\text{ ml}/100\text{ ml}$ 油 (600 ppm) と言われている⁽⁵⁾。そこで油中 H_2 だけの異常値を安全サイドに考えて、その $1/10$ の $0.006\text{ ml}/100\text{ ml}$ 油 (60 ppm) とすると、この油中 H_2 濃度に対するガス室での飽和 H_2 濃度は(2)式から $1,089\text{ ppm}$ となる。従って、実用的なセンサの最大出力は検知時間が5分以内に現われることになる。

第4図はガス室の H_2 濃度とその濃度に対するセンサの最大出力値との関係を測定した結果である。両者の間には両対数で直線的な関係が認められる。これから、ガスセンサで H_2 濃度を定量的に測定できることがわかる。

一方、第3図で出力が零になるまで、すなわち、ガス室内の H_2 が完全になくなるまでには長い検知時間を要し、次の検知操作までの時間間隔が長くなる。このため、検知操作をセンサの最大出力値到達後早めに終了させる必要がある。そこで、まず検知時間とガス室の H_2 濃度残率との関係を検討した。その結果が第5図である。ガス室の容積、初期の H_2 濃度は図中に示した。ガス室の容積が小さいと、 H_2 の濃度残率は比較的早い時間で小さくなることがわかる。初期の H_2 濃度による影響はほとんどない。

〈3・3〉 ガス室の容積 上述のように、ガス室の容積の大きさは H_2 の検知性能に大きな影響を与える。ここでは、この問題について更に詳細に検討した。

膜の大きさを一定とした場合、ガス室にたまる H_2 濃度の増加速度は、ガス室の容積が小さいほど速くなる。第6図は、ガス室の容積と H_2 濃度の増加割合との関係を(1)式によって計算して求めた結果である。なお、ガス室の H_2 濃度増加割合は透過した H_2 ガスの圧力 P_2 に対する油中 H_2 圧力 P_1 の比で示した。 P_2/P_1

第 6 図 水素検知時間間隔を変えたときの
ガス室の容積の P_2/P_1 への影響

Fig. 6. Effect of gas chamber volume on P_2/P_1 for various time intervals of hydrogen detection.

$P_1=1$ が飽和した場合である。油温は 60°C で、 H_2 が透過し始めて H_2 検知までの時間は 24, 48, 72, 96, 192 時間の各場合について示した。また膜の面積の大きさは、この装置の変圧器への取り付け場所の形状によってある程度限定されるが、本論文ではできるだけ面積を大きく取り 72cm^2 の円形とした。第 6 図から、ガス室が小さいほど、また H_2 検知時間間隔が長いほどガス室内の H_2 は高濃度になることがわかる。

一方、ガス室の容積が小さくなると H_2 測定時にガス室とガスセンサ室が通じた際、系中の H_2 濃度の低下が大きくなる。そこで本装置は、この H_2 濃度低下をできるだけ小さくするため、ガスセンサ室の容積はできるだけ小さくし、センサを入れた状態で 14cm^3 とした。このときのガス室容積に対するガス室とガス

第 7 図 ガス室がガスセンサ室と通じた
ときの水素容積変化

Fig. 7. Volume change of hydrogen for opening gas room into gas sensor's chamber.

第 8 図 水素検知時間間隔を変えたとき
のガス室の容積の $V/(V+V')$
 $\times P_2/P_1$ への影響

Fig. 8. Effect of gas chamber volume on $V/(V+V') \times P_2/P_1$ for various time intervals of hydrogen detection.

センサ室とが通じた場合の濃度変化率〔これは $V/(V+V')$ に等しい〕を求めたのが第 7 図である。ただし、 V はガス室の容積、 V' は検知室の容積（ここでは 14cm^3 ）である。ガス室の最適容積は第 6 図の P_2/P_1 と、第 7 図の $V/(V+V')$ との積が最大になるときである。この値を求めた結果が第 8 図である。

ガス室の最適容積は H_2 を検知するまでの透過時間を長くするほど大きくなり、同時により高濃度の H_2 が検知できるようになることがわかる。変圧器の異常の前兆を検出する場合、短い時間間隔で行なうほど好ましいが、3 日に一度のひん度で十分と考え、本装置は H_2 透過時間を 72 時間として検知することにした。なお、このときのガス室の最適容積は、第 8 図から約 28cm^3 である。

4. 実験結果

〈4・1〉 油中 H_2 濃度が一定の場合 以上の検討結果から、(2)式の各因子を決定して本装置の H_2 検知特性を検討した。第 9 図～第 11 図は(2)式を用いて油温が 25, 60, 80°C で油中 H_2 濃度が 30ppm の場合での検知特性を計算して示したものである。実線は 72 時間ごとに検知操作を繰返した場合、破線は検知操作をしないで連続してガス室に H_2 がたまった場合の計算値である。(2)式のそれぞれの因子は次の値とした。

A: 72cm^2 , V : 28cm^3 , d : 0.005cm

$P^{(2)}$: $\begin{cases} 25^\circ\text{C} \text{ では} \\ 1.0 \times 10^{-10} \text{ ml} \cdot \text{cm} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg} \\ 60^\circ\text{C} \text{ では} \end{cases}$

第 9 図 油中水素濃度が一定の場合におけるガス室の水素検知特性

Fig. 9. Detection characteristics of hydrogen in gas chamber at the constant hydrogen concentration in oil.

第 10 図 油中水素濃度が一定の場合におけるガス室の水素検知特性

Fig. 10. Detection characteristics of hydrogen in gas chamber at the constant hydrogen concentration in oil.

$$k^{(2)} = \begin{cases} 2.5 \times 10^{-10} \text{ ml} \cdot \text{cm} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg} & 80^\circ\text{C} \text{ では} \\ 3.9 \times 10^{-10} \text{ ml} \cdot \text{cm} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg} & \\ 1.38 \times 10^{-3} \text{ cmHg/ppm} & 25^\circ\text{C} \text{ では} \\ 1.12 \times 10^{-3} \text{ cmHg/ppm} & 60^\circ\text{C} \text{ では} \\ 0.98 \times 10^{-3} \text{ cmHg/ppm} & 80^\circ\text{C} \text{ では} \end{cases}$$

また、 H_2 を検知するために、ガス室内の H_2 をガスセンサと接触する時間は 30 分とし、この H_2 検知操作終了後ガス室に残る H_2 量は、第 5 図の結果から 35% として計算した。

第 9 図～第 11 図の結果から、72 時間に 1 回の割合

第 11 図 油中水素濃度が一定の場合におけるガス室の水素検知特性

Fig. 11. Detection characteristics of hydrogen in gas chamber at the constant hydrogen concentration in oil.

で検知操作を繰返すと 2～3 回目ではほぼ飽和値に達し、温度が高くなるほど飽和値に達するまでの時間が短くなる。この飽和値の温度による影響は 25～80°C では小さい。一方、検知操作をしないで連続して透過した場合の H_2 濃度は温度が高くなるほど短時間で飽和値に達し、しかもその値は小さくなり、72 時間ごとに検知した場合の飽和値に近づくことがわかる。このような結果から、油中 H_2 濃度と 72 時間ごとに検知した場合のガス室の H_2 濃度飽和値との検量線を求めておけば、72 時間ごとの測定で油中 H_2 濃度が求められることになる。実際に使用されている変圧器の油温は、普通 60°C ぐらいにはなっているので、第 10 図、第 11 図の第 1 回の 72 時間目の測定でも飽和値に近い値になり、これから油中 H_2 濃度を求めることができる。

第 1 表は、油温が 60°C の場合について 72 時間ごとに実測した結果を示したものである。実験装置は第 2 図に示した装置で、変圧器の代わりに温度と油中水素濃度が調整できる 170 l 入り油タンクに取り付けたものを用いた。実測値はガスセンサの出力値と、第 4 図のセンサの出力- H_2 濃度特性から求めた H_2 濃度を併記した。この結果から、72 時間ごとの検知を繰返

第 1 表 72 時間ごとに検知を繰返した場合のセンサの出力と水素ガス濃度

Table 1. Hydrogen concentration and sensor's out-put for every 72 hours detection intervals.

測定時間 (h)	72	144	216	288	360	432
検知素子の出力 (V)	2.5	2.75	2.8	2.75	2.85	2.85
水素濃度 (ppm)	330	410	420	410	430	430

第 12 図 72 時間ごとに水素検知をする場合の油中水素濃度とガス室の水素濃度との関係

Fig. 12. Relations between hydrogen concentration in gas chamber and hydrogen concentration in oil for every 72 hours detection intervals.

しても 2~3 回ではほぼ飽和値に達し、この実測値は第 10 図の計算値とほぼ一致することがわかる。実測値の 1 回目の値が計算値より低くなっているのは、センサの安定化に時間を要するので、この安定化不足による感度低下のためと考える。

第 12 図は第 9 図~第 11 図で種々の油中 H_2 濃度に対して 72 時間ごとの H_2 検知を行なった場合の飽和値と、そのときの油中 H_2 濃度の関係を (2) 式から計算して求めたものである。25, 60, 80°C の場合について示したが、60°C の場合が最も H_2 が透過しやすいことがわかる。これは (2) 式において温度が高くなると透過係数 P は大きくなるが、定数 k は小さくなるためである。実際の変圧器に本装置を取り付けた場合、油中 H_2 濃度は第 12 図によって求められる。油温が 25~80°C における油中 H_2 濃度に対するガス室内の H_2 濃度の変動幅は、平均の油中 H_2 濃度-ガス室 H_2 濃度特性直線に対して 5% 以下である。従って、実用的には温度補正の必要はないと考える。

〈4.2〉油中 H_2 が増加する場合 次に油中 H_2 濃度が増加する場合の H_2 検知特性を検討した。第 13 図は 60°C における検討結果を示したものである。油中 H_2 は前述の油 170l 入りの油タンク内にヒータを組み込み局部的に油を熱分解して発生させ、図中の実線で示したように増加させる。油中 H_2 濃度は、別途油中ガスを抽出し、これをガスクロマトグラフィで測定した。ガス室の H_2 は第 4 図に示した特性をもつガ

第 13 図 油中水素濃度が増加する場合におけるガス室の水素検知特性

Fig. 13. Detection characteristics of hydrogen in gas chamber for increasing hydrogen concentration in oil.

スセンサで測定した。第 13 図から、ガス室の H_2 濃度は油中 H_2 濃度の増加と共に増加するが、第 12 図の計算値との比較からガス室の H_2 濃度は約 72 時間前の油中 H_2 濃度の値に対応している。ガスの膜透過性から油中 H_2 濃度の増加の程度が大きいほどそれに対するガス室内の H_2 濃度増加の遅れは大きくなる。しかし、これまで異常と認められた変圧器の例から考えると、油中 H_2 の増加速度は大きい場合でも数 ppm/月である。第 13 図の油中 H_2 の増加速度は約 2.3 ppm/日と極めて大きい場合の例である。

従って、実際の変圧器に用いた場合の追従性はかなり良くなり、72 時間ごとの検知操作でも比較的正しい油中 H_2 濃度が検知できることになる。また、もし第 13 図のような油中 H_2 増加があったとしても 72 時間遅れで検知することになり、実際の変圧器においてはこの程度の遅れは問題ない。

〈4.3〉変圧器に取り付けた場合 次に、本装置を実際の変圧器に取り付けた場合の H_2 検知特性を検討した。運転中の変圧器で油中 H_2 を増加させることはできないので、ここでは、休止している油量 40kl の変圧器内の油に定期的に一定量の H_2 を注入して増加させた。油はポンプで循環するようにした。循環速度は 1,500 l/min で、 H_2 は注入後 1 時間以内に油中に均一化されていることをあらかじめ確認した。油温は 0~20°C で 8,640 時間まで実験を行なった。油中 H_2 濃度は油を採取し、これから油中溶存ガスを抽出してガスクロマトグラフィで測定した。

第 14 図 変圧器に取り付けた監視装置の水素検知例

Fig. 14. Example of hydrogen detection of fault detector fixed to transformer.

第 15 図 水素ガスセンサの出力-水素濃度特性

Fig. 15. Characteristic of sensor's output-hydrogen concentration.

第 14 図 (a) は油中 H_2 濃度の経時変化を、第 14 図 (b) はそのときのガス室の H_2 濃度変化を示したものである。ガス室の H_2 検知に用いたガスセンサは、第 15 図に示した特性をもつものである。第 14 図をもとにして、油中 H_2 濃度とガス室の H_2 濃度との関係を示したのが第 16 図である。図には $0^\circ C$ と $20^\circ C$ のときの計算値も併記した。この結果から、実測値と計算値とは比較的良く一致することがわかる。従って、(2) 式は実用的に使える計算式であることがわかる。

現在、変圧器に異常の前兆があると判断する油中可燃性ガスの全量は、変圧器の種類によって一義的に決められないが、一般的な目安は 600 ppm とされている⁽⁶⁾。 H_2 量だけの異常値は決められていないが、安全サイドに考えて、上記の可燃性ガスの場合の 1/10

第 16 図 油中水素濃度-ガス室の水素濃度特性の実験値と計算値との比較

Fig. 16. Comparison of experimental values and calculated values of characteristic of hydrogen concentration in gas chamber and in oil.

の 60 ppm とすると、この場合における本装置のガス室の濃度は第 12 図から 795 ppm となる。25~ $80^\circ C$ の油温の範囲を考慮すると 760~830 ppm となる。従って、下限値の 760 ppm になったときに警報が作動するようにセットしておけば良いことになる。なお、本装置全体を含めた測定値のばらつきは $\pm 20\%$ ぐらいあるので、この下限値を考慮に入れて警報器をセットすれば更に安全サイドになる。また、本装置は記録計も取り付けられるので、それによって油中 H_2 濃度の経時変化を知ることができる。

以上の検討結果から、変圧器用油中水素常時監視装置として、ポリイミド膜で油中 H_2 を分離し、これを H_2 ガスセンサで検知する方式が適用できることがわかった。また、(2) 式の油中 H_2 のポリイミド膜透過式は実験値と比較的良好一致し、その式から本論文で述べた変圧器用油中水素常時監視装置に関する実的な諸特性を求めることができる。

5. ま と め

現在、変圧器の保守管理にはひん度の差はあるが、すべての変圧器に対して定期的な油の採取、その油からの可燃性ガス油出、更にそのガスのガスクロマトグラフィによる定量分析などと、煩雑な操作を行なっている。本論文で述べた装置は、このような煩雑な労力のかかる方法に変えて、完全自動、メンテナンスフリーのもとに常時監視し、異常箇所がどこにあるかは別として、まずは変圧器に異常の前兆が発生したかどうかを早期に発見することをねらったものである。ま

た、構造が簡単で既設変圧器への取り付けも可能なように設計されている。従って、現在行なっている油中可燃性ガスのガスクロマトグラフィ分析は、本装置で異常の前兆が発生したと判定されたものに対してだけ行なえば良いと言える。

終わりに臨み、本研究の遂行にあたり御援助をいただいた日立製作所国分工場 秋丸副技師長、同社日立研究所 佐藤部長、ならびに種々の実験に協力していただいた同所 谷 一太郎氏に感謝する。

(昭和54年3月2日受付)

文 献

- (1) 月岡・菅原・大江: 電学論A, 98, 381 (昭 53-7)
- (2) 月岡・菅原: 電学論A, 99, 135 (昭 54-3)
- (3) R. A. Kurz: 13th Electrical/Electronics Insulation Conference, p. 174 (1977-9)
- (4) G. Belanger & M. Duval: *IEEE Trans. Elect. Insulation*, EI-12, 334 (1977)
- (5) 電気協同研究会: 電気協同研究, 30, No. 6 (昭 50-3)