

電気機器絶縁の進歩

三菱電機KK研究所*

原 仁 吾

1. ま え が き

電気機器の絶縁は、基礎理論の発達、新しい絶縁材料の出現、およびこれらの適用に関する絶縁技術の進歩などが相まって最近いちじるしく進歩した。すなわち誘電体論や絶縁破壊に関する理論が体形づけられて、絶縁現象に対する理解が深められ、絶縁設計が合理化され、一方新しい合成絶縁材料の目覚ましい発達とともに、これらの適用に関する技術は、工作技術の改善とともに急速に進歩し、過去の絶縁材料は新しい材料に置きかえられて絶縁方式が一変した機種は少なくない。ここでは代表的な機種について絶縁方式に関する最近のすう勢を紹介する。

2. 発 電 機

発電機の単機容量は最近ますます増大化し、水車発電機では100MVA以上、タービン発電機では200MVA以上のものが次々に製作され、端子電圧も水車発電機では13.2~16.5KVが、またタービン発電機では18~22KVが採用されるようになった。このように高電圧、大容量でしかも信頼性の高い機器の製作が可能になったのは、冷却方式の進歩に負う所が大きく、とくにタービン発電機における内部冷却方式の採用によりフレームサイズは半減されたが、絶縁材料や絶縁技術の進歩に負う所も極めて大きい。

発電機固定子コイルの絶縁は最初セラックを接着剤としたマイカホリウムを用い、コイル端部はワニステープの重ね巻きが用いられたが、1930年頃からアスファルト系コンパウンドが用いられるようになり、全長マイカテープ半重ね巻き絶縁が採用されて絶縁性能は一段と向上したが、発電機が大形化するにつれてコイル長は増大し、繰返し負荷の熱サイクルによるコイルの膨脹収縮によつて、コイル絶縁の受ける機械的ストレスが無視できなくなり、かつコンパウンドが熱可塑性であることの不都合が絶縁はく離事故を起すおそれが予測されるに至りコイルの膨脹収縮に対して十分な弾性をもち、その応力に耐える絶縁材料と絶縁方式の要求が高まつて来た。この問題に対しアメリカでは1940年頃からコンパウンドの

代わりに新しい合成レジンを用いる研究が活発に開始され1949年 W. H.社では、不飽和ポリエステルとビニールモノマーを含浸材料として用い、マイカテープの接着剤にも同系統のレジンを用いた新しい絶縁方式を大形タービン発電機の絶縁に適用することに成功し、これをサーマラスチック絶縁と称して発表した。この絶縁方式は、含浸レジンが重合反応によつて硬化するので絶縁内部に空隙ができず、絶縁層は弾力性にとみ、抗張力が大きく、加熱サイクルによるコイル導体の膨脹収縮によつてマイカはく離を起すことがなく、単位厚さ当りの破壊電圧強度は従来のコンパウンド方式にくらべると約20%以上増大する。また $\tan \delta$ やコロナ特性に優れ、耐熱、耐湿耐薬品性に優れているなど多くの特長を有するが、更に不飽和ポリエステルとビニールモノマーの重合体は、反応剤や架橋剤の選択によつて、性質のことなつた各種のものを得ることができるので、要求される機能に合致した性質のレジを作ることができるのが特色である。最近ではエポキシタイプ不飽和ポリエステルが用いられるようになって、機械的特性は一段と向上した。

サーマラスチック絶縁が発表されて以来、合成レジンに対する関心は非常に高まり、G. E. 社では天然マイカの代りにマイカマットを用い、変成エポキシで接着および含浸した絶縁方式を1954年に開発し、これをマイカパール絶縁と称して発表した。これはマイカを細かく粉砕し、これを圧縮接着したマイカマットシートの絶縁層を主絶縁とし、天然マイカとガラス編組で補強した絶縁構成に変成エポキシレジンを含浸したもので、機械的強度が大きく、絶縁耐力や $\tan \delta$ 特性が良く、また耐熱性や化学的性質が優れていることが報告されている。Oerlikon 社でも上述のマイカパール絶縁と同じような絶縁方式を1954年に開発し Orlista 絶縁および Emorite 絶縁と称して発表した。前者はサマイカをエポキシ樹脂で接着したホリウム式絶縁で、後者はサマイカテープとガラステープの連続巻き絶縁に変成エポキシ樹脂を含浸したものである。

わが国でもこの分野における研究は極めて活発で、昭和29年ダイヤラスチック絶縁が始めてタービン発電機の絶縁に應用することに成功して以来、サンラック絶縁、Fレジン絶縁、ミューレジン絶縁などが発表されている。これらのうちFレジン絶縁以外は、主絶縁に天然マイ

* 兵庫県尼崎市南清水字中野

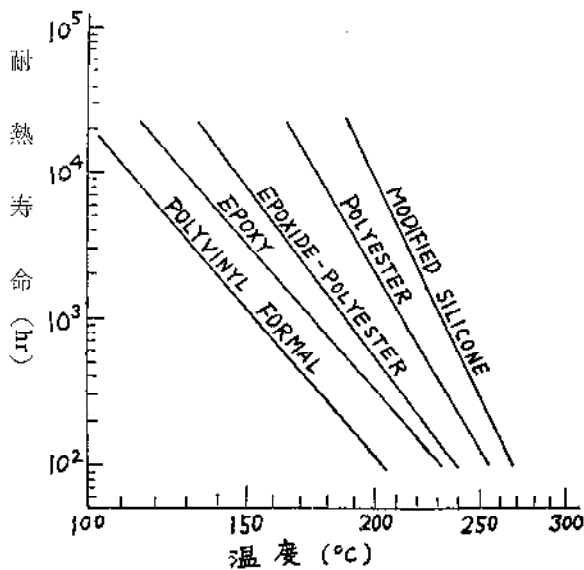
カを用い、含浸剤には不飽和ポリエステル系統のレジンを用いているが、Fレジン天然マイカを用いず、含浸および接着にエポキシ樹脂を用いたものである。

このように最近の高電圧発電機の絶縁は合成レジンに置きかえられ、絶縁性脂が向上し信頼性が高められたがさらに耐コロナ、耐熱などの長期劣化に関する研究が活発に進められている。

3. 誘導電動機

誘導電動機はここ数年来いちじるしく小形軽量になったが、これはエナメル線の発達、スロットセル絶縁の進歩および含浸ワニス等の発達がその主なる原因である。また機能試験法の確立によつてこれらの材料の適用に関する研究が促進されたことも見逃せない。

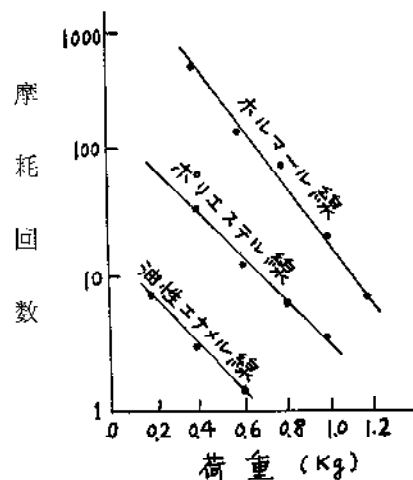
マグネットワイヤは最初油性エナメル線が用いられていたが、昭和25、6年頃からPVF線が用いられるようになって絶縁特性は著しく向上した。最近ではポリエステル線、ポリウレタン線、変成エポキシエナメル線、シリコンエナメル線などが登場し、耐熱特性は更に一段と向上した。第1図は各種のエナメル線の耐熱性を示す一



第1図 マグネットワイヤの耐熱寿命特性の一例 (AIEE. No.57. Twist Test)

例である。耐摩耗性においては第2図に示すようにPVF線が断然優れており、現在ではPVF線とポリエステル線が最も広く用いられており、エポキシ線やシリコン線は現在ではまだ特殊電動機に用いられている。このほかガラスまたはセラミックなどの無機材料を絶縁皮膜としたエナメル線が、アメリカなどで航空機やミサイルなどの電子機器の一部実用されているが、今後重電機への応用が注目される。

スロットセルは従来のフィッシュ紙、フラーボードなど



線径1mm. 皮膜厚0.04mm

第2図 マグネットワイヤの耐摩耗性の一例 (NEMA式)

ワに代つてマイラおよびマイラとラグ紙などのコンビネーションが用いられるようになって、耐熱、耐電圧特性が向上し、スペースファクターが改良された。含浸ワニスにはフェノールレジンに代り、アルキッドレジンやフェノリックアルキッドレジンが用いられるようになり、耐熱寿命は従来の約170%程度に増加した。

大形電動機や特殊電動機には、不飽和ポリエステルなどのいわゆるソルベントレスワニスや、シリコンワニスを用いられて来たが、特に不飽和ポリエステル系ワニスは、小形の汎用モータにもその使用が拡大される傾向にある。

4. 電車電動機

電車電動機の小形軽量化と吊り掛け方式の進歩により最近の電気車はますます高速度化されつつあるが、高速度電動機の発達は絶縁材料の進歩に負う所が非常に多い。電車電動機の絶縁に要求される問題点は、他の機器よりも特に苛酷で、振動や衝撃に対して強いこと、耐湿性が高いこと、加熱冷却の温度サイクルの繰返しに強いこと、小形軽量化は必然的に温度上昇を高くするから耐熱性や熱伝導度が良く、またスペースファクターが良い絶縁層でなければならない。このような苛酷な運転条件およびスペースの制限などによる特殊事情のため、電車電動機は他の一般用電動機にくらべ、かなり高い温度上昇値が許容されている。

最近の電車電動機は殆んど全部B種またはそれ以上の温度クラスの絶縁が採用されている。また外部汚損に対して保護するため巻線の一部または全部を包んでしまう方式が一般に行われているが、このため熱放散が悪くなつて温度上昇が高くなるので、従来のB種絶縁に対して更に耐熱性の高いH種絶縁が用いられるようになった。

生産と技術

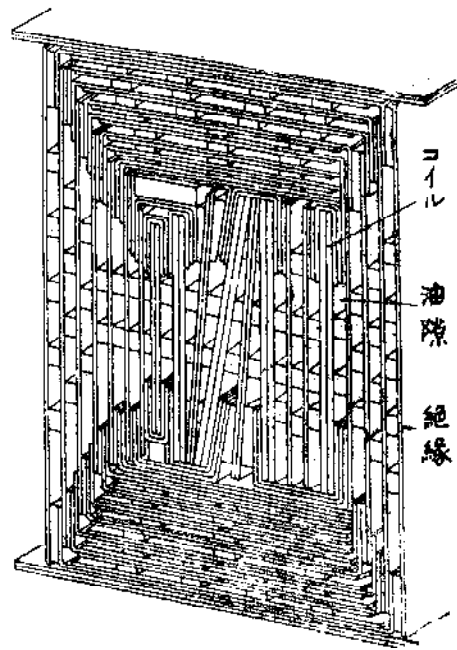
すなわちシリコンボンドマイカテープ、マイカシート、ガラステープなどにシリコンワニスを含浸した絶縁方式が採用され始めたが、工作処理法がむづかしいことと、米国では耐溶剤性の点などで全面的には採用されていない。最近ではソルベントレスワニスの発達によつて全体が強固で空隙を残さぬ一体絶縁方式が考えられ、この方式は外部汚損に対する保護と同時に良好な熱放散が可能であるので、H種の耐熱性を有するソルベントレスシリコンの採用が大きくクローズアップして来た。しかしシリコンのもつ耐溶剤性の弱さから米国ではエポキシによる一体絶縁構造を採用し、熱放散に考慮を払つた巻線構造にして耐熱性の低いのをカバーする方式をとつている。またシリコンゴムの発達によつて、米英ではマイカレスのシリコンゴム絶縁方式が一部に用いられている。

このように耐熱絶縁材料が果している役割は、この分野において特に目覚ましいものがあるが、今後の電圧電動機が、ソルベントレスシリコンとマイカの組合せ絶縁に進むか、エポキシとマイカの組合せ絶縁に進むか、あるいはマイカレスのシリコンゴム絶縁の何れに進むかは、今後の問題点である。

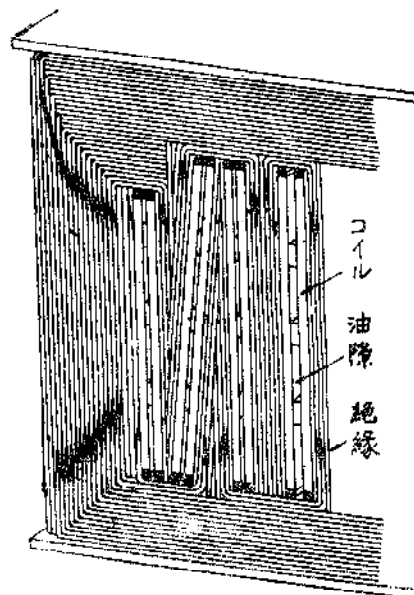
5. 電力用変圧器

電力用変圧器の絶縁構成は、変圧器が運転中に受ける雷電圧や開閉サージに対して特に考慮が払われている。最近の電力用変圧器の容量は著しく増大し、わが国でも312MVAの大容量変圧器が既に運転されており、定格電圧も275KVのものは既に旧間に属するようになって380KV級変圧器が各社で試作研究されている。このように高電圧大容量にして、しかも組立輸送の可能な変圧器の出現は、けい素鋼板の改良に負う所が大きいが、さらに絶縁構成の合理化、絶縁処理法の改善、新しい絶縁材料の適用などによつてもたらされた。

三塩化ベンゾールと五塩化ジフェニールを主体とした不燃性絶縁油はすでに実用期に入り、屋内用変圧器や、不燃性を要求される特殊の変圧器に用いられているが、価格の点で大容量変圧器は依然として鉱物油とプレスボードの絶縁方式が用いられている。この分野でのトピックスは内部冷却変圧器の出現で、従来の電力用変圧器の絶縁は、油浸プレスボードと油隙の組合せからなつていて、油隙は絶縁のほかに冷却作用をつかさどつていたが油の誘電率は油浸プレスボードの約半分で、両者にかかる電界強度の分担は油に大で油浸プレスボードに小さい。一方絶縁耐力はプレスボードの方が大きく、冷却作用を考慮せずに単に絶縁破壊の面だけから見ると決して合理的な絶縁配置ではない。W. H. 社が発表した新しい内部冷却変圧器は、冷却作用は導体内部に油を流して行



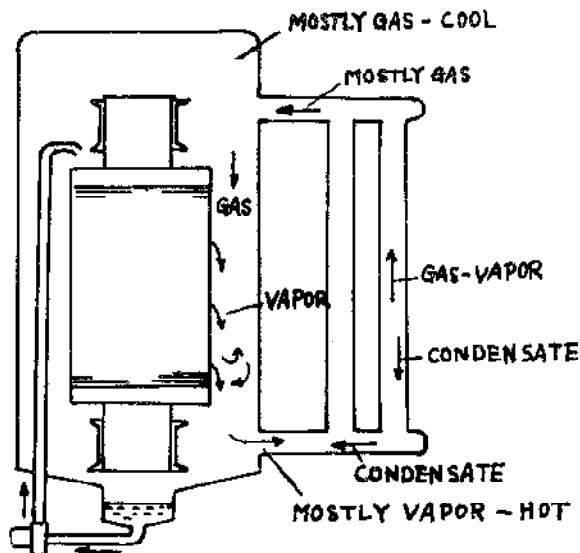
第3図 外鉄形変圧器の標準絶縁構造



第4図 外鉄形変圧器の内部冷却絶縁構造

い、絶縁部には油隙を設けず一体の油浸プレスボードを用いた絶縁構造のもので、プレスボード間にごく僅かの油隙も生じないようにプレスボードの重ね合せや突き合せには特殊の構造がとられている。第3図および第4図は外鉄形変圧器のコイル断面を示す図で、第3図は従来の標準絶縁構造、第4図は内部冷却形絶縁構造である。この構造により冷却効果は従来と変わりなく、115KV級変圧器で約11%の重量減少ができ、電圧階級が高くなるほど重量の減少率は大きくなるので、輸送制限に対する困難さが軽減され、より大容量、高電圧の変圧器が製作できると報告されている。

シリコンワニスを用いた最近の乾式変圧器は200°C以上の高温に耐えるものが製作されているが、一方空気にくらべて絶縁耐力が高くまた冷却効率のよい六弗化硫黄や弗化炭素ガスを用いたガス絶縁変圧器がアメリカでは実用され始めている。これらガスの利用により冷却効率や絶縁耐力が向上し、従来の乾式変圧器にくらべると大分きりつめた設計が可能となつたが、油入変圧器にくらべるとなお冷却効率は非常に悪い。この冷却効率を改善するために考えられたのが蒸発冷却ガス絶縁変圧器である。これは適当な沸点をもつ弗化炭素の液体を変圧器の上部からその鉄心および絶縁物にふりかけ、その蒸発熱によつて変圧器を冷却し、同時に蒸発した弗化炭素ガスの高い絶縁耐力を絶縁に利用する方式で、1951年W. H. 社から発表され、その後改良が加えられて最近7,500 KVAのこの種変圧器の詳細が発表されている。この変圧器に用いられている弗化炭素は C_3F_8O の分子式をもつたもので、沸点は大気圧で101°C、不活性で熱的に安定であり、液状の絶縁耐力はほぼ鉱油に等しく、またガス状の絶縁耐力は、大気圧で SF_6 の約2倍、 1 kg/cm^2 のゲージ圧ではほぼ鉱油の絶縁耐力に匹敵する。この種の変圧器は運転開始直後のように温度が低いときは液の蒸気圧が低く、一方ガスの絶縁耐力はガス圧とともに上昇するので低温時の絶縁耐力が低い。この欠点を補うため変圧器タンク内には非凝縮性の SF_6 があらかじめ充填されている。第5図はこの構造を示したものでタンク底の液溜りよりポンプで上部にあげられた液が変圧



第5図 蒸発冷却形ガス絶縁変圧器の構造

器にふりかけられ、液の一部は蒸発して SF_6 と混合するが、 C_3F_8O のガスは SF_6 より重いので、混合ガスは下方に流れて冷却器にいき、ここで蒸発ガスは凝縮されてふたたび液溜りにもどる。この変圧器は従来の鉱油入変圧器と同じ絶縁BILを有し、現在まで満足に運転され

ていることが報告されている。

6. 計器用変成器

乾式の計器用変成器は新しい絶縁材料の適用によりその様相は一変した観がある。すなわち従来のコンパウンド絶縁方式は、特性の優れた注形用や封入用の各種合成レジンにおき代えられ、たとえばポリエステルモールドブチルゴムモールド、エポキシモールド、さらにはシリコンゴムモールドなどに移行して来た。

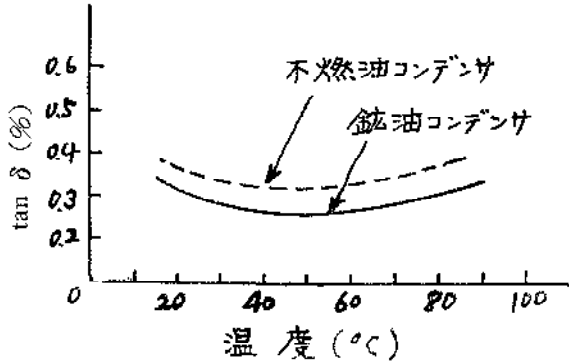
ブチルゴムは機械的に強靱で耐摩性に優れ、衝撃にも強く、化学的性質が優れ特に耐候性が強い。ブチルゴムを用いた変成器は1948年GE社から発表され、最近わが国でも盛んに製作されている。モールド用樹脂としてポリエステルが優れた特性をもっていることは周知の通りで、耐湿、耐薬品性に優れ、電気的特性が良好であるので20KV級以下の変成器に多く用いられている。エポキシ樹脂は硬化時の収縮が注形樹脂中もつとも少なく、接着力が強大であるなど他の樹脂に見られない特長を有するが、一般に粘度が高く、ポットライフが短いなど工作難点があつたが、工作処理法の改善、レジンの改良などによつて欧米ではエポキシモールド変成器はすでに実用期に入つたと報告されており、わが国でも各社で研究が進められていて、この将来は注目すべきものがある。さらにシリコンゴムが登場し、耐熱性の一段と優れたシリコンゴムモールド方式が1955年にW. H. 社から発表された。この方式は200°C以上の高温に耐え、寸法および重量がいちじるしく減少できる。

これらの新しい合成樹脂を適用した変成器は、何れも内部に空隙を有せず、従来のコンパウンド方式にくらべると、耐熱、耐湿、耐薬品性などは勿論、 $\tan \delta$ や絶縁耐力などの電気的特性がいちじるしく改善され、また金属ケースや磁気プッシングを有しないものが大部分で外観上も過去のものに一変した。

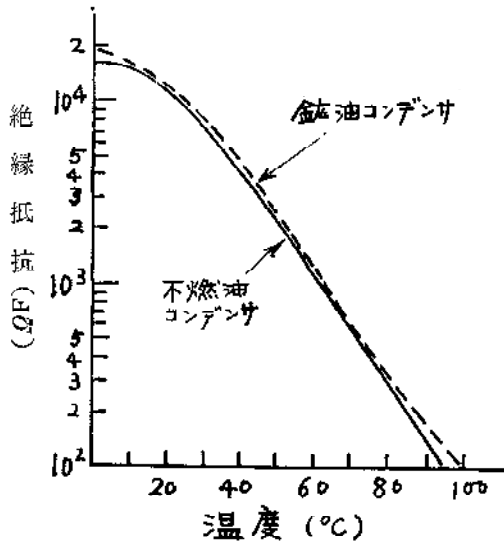
7. 電力用コンデンサー

油浸紙を主体とする現用の電力用コンデンサーは、構造的には古くから用いられているものと大差ないが、絶縁紙の乾燥技術や絶縁油の含浸技術の発達、真空密封技術の発達などに加えて、油浸紙の誘電特性、絶縁紙の密度や気密度あるいは紙厚と破壊電圧の関係などが明らかにされるに従い、その特性はいちじるしく改善され、信頼性が向上されている。

五塩化ジフェニールは不燃性で誘電率が鉱油の約2倍、絶縁耐力も高く化学的に安定であるので数年前からわが国でも広く用いられているが、アメリカにおいては電力用コンデンサーは殆んど全部が鉱油を用いず五塩化または三塩化ジフェニールを用いている。誘電率が高いの



第6図 コンデンサの $\tan \delta$ -温度特性



第7図 コンデンサの絶縁抵抗-温度特性

で同一出力のコンデンサの容積は鉱油含浸の約 $\frac{2}{3}$ となり、含浸後の破壊電圧が鉱油含浸にくらべ約10~20%高いので、電位傾度を高くとることができるので、総体的に容積が約半分になる。ただ鉱油にくらべ幾分高価であるのが難点である。 $\tan \delta$ や絶縁抵抗特性は鉱油含浸のものとはほとんど差異がない。第6図および第7図はその一例を示す。

マイラやポリエチレンのような合成フィルムを従来の絶縁紙の代りに用いる試みは、電力ケーブルの分野においては盛んに研究が行われており、その将来は注目すべきものがあるが、これらの合成レジン誘電率は油浸紙にくらべて小さいので、コンデンサとしては不適當であり、また現状ではクラフト紙にくらべて高価であるので、電力用コンデンサには未だ用いられていない。

8. むすび

以上電気機器絶縁の進歩につきその大略を述べたが、要約すると、電気機器絶縁の進歩は、理論が精密化され絶縁現象の理解が深められたこと、目覚ましい新種の合成絶縁材料が出現して従来の天然材料にとり代つたこと、絶縁材料や絶縁組織の耐熱性を評価する機能試験法が発達して新しい絶縁材料の適用を促進させたこと、およびこれらの適用により電気機器の性能がいちじるしく向上したことなどによつてその進歩がもたらされて来た。

問題が広範囲で、紙面の都合と筆者の不勉強のため不十分な点が多いが、電気機器絶縁のすう勢を知る上に何等かの御参考になれば幸いである。