

# ハイパクトエポキシ絶縁—最新の高圧電動機用 無溶剤ワニス注入マイカ絶縁

Hipact Epoxy Insulation — Recent Mica Insulation Using  
Solventless Epoxy Vanish for High Voltage Motors

袴 田 武 司\* 桜 沢 敏 夫\*  
Takeshi Hakamada Toshio Sakurazawa

## 要 旨

最近の研究から生まれた特殊なマイカテープと無溶剤エポキシレジンより構成されるハイパクトエポキシ絶縁は、きわめてすぐれた電気的特性とじゅうぶんな機械的強度により機器の小形化に寄与するところ大であり、かつ著しく信頼性を向上し、保守の簡易化に貢献することができた。

## 1. 緒 言

ここ 15 年ほどの高圧電動機の絶縁を総括的にながめるとき、まず一つの流れとして熱硬化性樹脂を使用した溶剤系ワニスの絶縁方式がある。これにはテープ材としてマイカやクロスが使用され、樹脂にはアルキルフェノール樹脂あるいはエポキシエステル樹脂などが耐熱区分により使い分けられている。しかしながら 6,000V 級の普及や絶縁性能向上の要求から、この使用範囲は減少の傾向にあり、それにつれて、いま一つの流れである無溶剤ワニスを使用する絶縁方式が主流を占めつつある。この方式に属するものに日立 SLS 絶縁がある<sup>(1)</sup>。これは日立製作所において 1954 年に開発された回転電機用の高圧絶縁であり、誘導電動機には 1957 年に応用されて、1 号機として 550 HP, 6,000V, 4 極機が製造され、現在も無事故で運転を続けている。SLS 絶縁はマイカテープを連続的にテープ巻きしたコイルに無溶剤不飽和ポリエステルを真空注入して作られる高品質の絶縁である。この SLS 絶縁用のマイカテープにはマイカ材として最高級のフレックマイカ片クリヤブックフォームを使用し、裏打材として紙を使用した。これにつづく技術開発の成果として、1966 年に発表したハイパクト絶縁<sup>(2)</sup>はさらに最新の不飽和ポリエステルを使用し、テープ材としてパルプマイカ（フレックマイカを細粉し抄造にてシート状にしたもの、セルローズ繊維は含まない）と不織布およびフィルム材を使用するものである。その特長を列挙すれば、

- (1) 絶縁破壊強さがきわめて高いこと。
- (2) マイカは均質であること、この意味においてパルプマイカは、一片数平方センチのフレックマイカより品質が安定する。
- (3) マイカの裏打材としてのフィルムは均質であり、不織布はマイカ層へのレジン透過性もあり、ミクロ的には糸の重なり目など空けき部のあるガラス布よりもすぐれている。

一方、東海道新幹線の量産車の製作が開始された 1963 年ころから車両用電動機を中心に真空注入用のワニスとしての無溶剤エポキシの実用化が著しく進み、誘導電動機にも応用されるようになってきた。日立製作所では前述のハイパクト絶縁の技術を生かしながら、無溶剤エポキシを応用したハイパクトエポキシ絶縁を開発し、既に実機に適用しているが、ハイパクトエポキシ絶縁は不飽和ポリエステルを使用するハイパクト絶縁に比較していちだんと電気的、機械的特性が向上し無事故、無保守に近づいている。

## 2. ハイパクトエポキシ絶縁の特性

ハイパクトエポキシ絶縁の最大の特長は「コイル、コア一体注入

\* 日立製作所日立工場

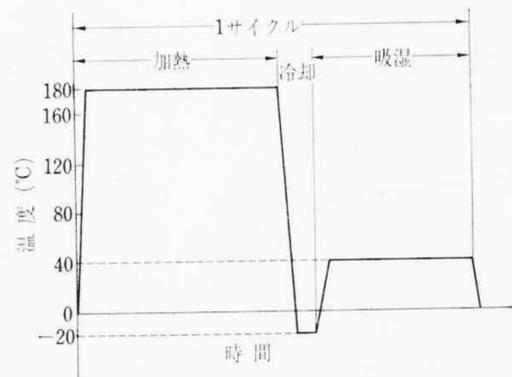


図 1 モデルコイルの試験サイクル

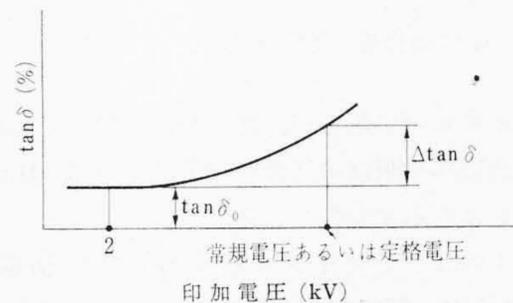


図 2 tan δ の説明

方式」を採用したことである。ハイパクトエポキシ絶縁以前にはコイル単独でワニス処理を行ない、それをコアに組み込んでいたが「コイル、コア一体注入方式」はテープ巻きを完了したワニス未処理の状態にあるコイルをコアに組み込み、コイルとコアをいっしょにして無溶剤エポキシレジン真空注入し加熱硬化させるものである。構造、材料および処理上の問題について特に配慮した点を以下に述べる。

実際のハイパクトエポキシ絶縁コイルは上述のようにコアに組込まれた状態でワニス処理されるが、コイルとしての諸特性を把握するには類似した条件で製造した単独コイルを試料としたほうが便利であり、100 kW 相当のコイルを試料として使用した。試料の劣化は図 1 に示す加熱、冷却、吸湿の組合せを 1 サイクルとする劣化サイクルを 20 サイクル実施し、その間各過程での諸特性の変化を追跡した。この劣化サイクルは、IEEE, Pub, No. 275 推奨のいわゆるモータレット試験法に準拠しており、電気的特性としては  $\tan \delta$ -電圧特性、部分放電開始電圧を、機械的特性としては曲げによる応力-ひずみ特性を測定した。

### (1) $\tan \delta$ -電圧特性

シェーリングブリッジを使用して 50 Hz の交流電圧を試料に印加し定格電圧以上までの  $\tan \delta$  を測定した。いま  $\tan \delta$  の最低値を  $\tan \delta_0$ 、常規電圧 (定格電圧/ $\sqrt{3}$ ) または定格電圧における  $\tan \delta$  と  $\tan \delta_0$  の差を  $\Delta \tan \delta$  とすれば図 2 に示すような形になる。 $\tan \delta$  は絶縁物の形状や寸法に無関係であり、供試料の平均化さ

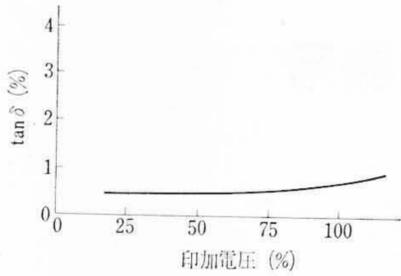


図3 tanδ-電圧特性

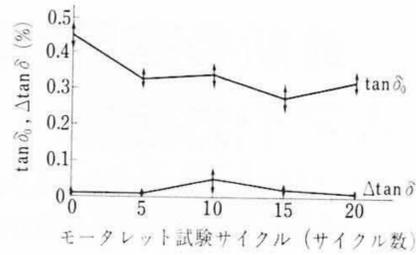


図4 tanδ<sub>0</sub>, Δtanδ劣化サイクル特性

表1 無溶剤エポキシ樹脂板の特性

| 試験項目                        | 試験条件            | 特性値                  |
|-----------------------------|-----------------|----------------------|
| 引張り強さ (kg/cm <sup>2</sup> ) | 初期 180℃         | 233                  |
| 引張り強さ (kg/cm <sup>2</sup> ) | 200℃, 30日後 180℃ | 165                  |
| 伸び (%)                      | 初期 180℃         | 8                    |
| 伸び (%)                      | 200℃, 30日後 180℃ | 1.5                  |
| 加熱減量 (%)                    | 200℃, 10日後      | 0.8                  |
| 誘電正接 (%)                    | 140℃            | 1.2                  |
| 体積固有抵抗 (Ωcm)                | 140℃            | 2.3×10 <sup>13</sup> |

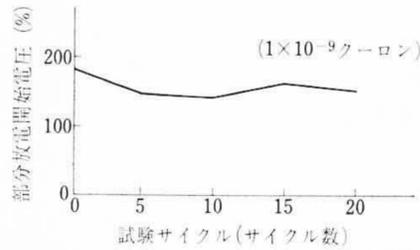


図5 部分放電開始電圧-劣化サイクル特性

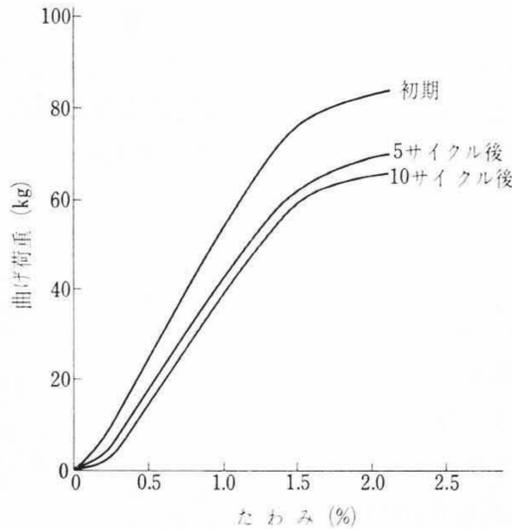


図6 曲げ荷重-たわみ特性

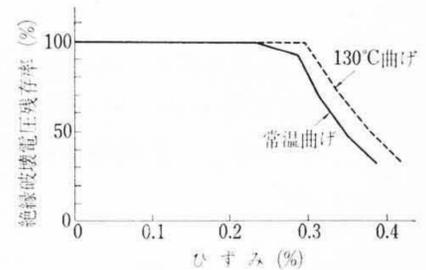


図8 絶縁破壊電圧-ひずみ特性

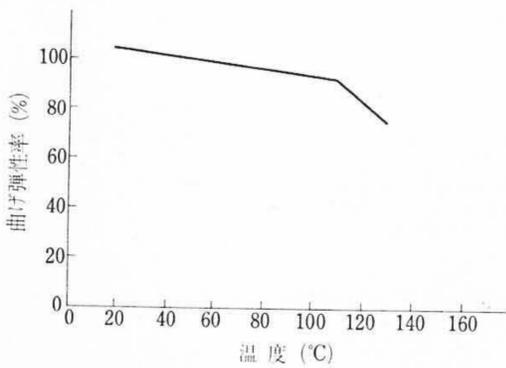


図7 曲げ弾性率-温度特性

れた性状を示すものであるが、だいたいにおいて  $\tan \delta_0$  は複合絶縁としての誘電率や吸湿の度合いを示し、また  $\Delta \tan \delta$  は内部ボイドの存在をよく示すものといえよう。

図3は図1のヒートサイクルを実施しない初期のコイルの  $\tan \delta$ -電圧特性の一例であり、図4は20サイクルまでの熱劣化による  $\tan \delta_0$ ,  $\Delta \tan \delta$  の変化の一例である。 $\tan \delta_0$  は、溶剤系の絶縁においては熱劣化により、かなり小さくなるのが普通であるが、ハイパクトエポキシ絶縁ではほとんど変化がない。また  $\Delta \tan \delta_1$  も20サイクルのヒートサイクルの熱劣化を通じてほとんど不変であり、20サイクル後においてほとんどゼロである。すなわちハイパクトエポキシ絶縁は、このような熱劣化に対してもボイドの生成あるいは成長がないことを意味する。ボイドの生成もしくは成長は絶縁層のハク離あるいは有機材の揮散の結果であるが、試験結果はこれがほとんど認められないことを示している。これはハイパクトエポキシ絶縁に使用される無溶剤エポキシレジンのきわめてすぐれた特性と、その高度な処理技術によるものである。ちなみにハイパクトエポキシ絶縁に使用される無溶剤エポキシレジンの基本特性を示したのが表1である。ここでハク離や揮散にかかわる数値として引張り強さや加熱減量を見ると、200℃にも及ぶ高温劣化に対してさえ、引張り強さの低下が認められず、加熱減量も0.8%と微小であることがわかる。

(2) 部分放電開始電圧

図5は部分放電開始電圧のヒートサイクル熱劣化による経時変化を示すもので、その意味するところは前述の  $\Delta \tan \delta$  と近似してボイドの生成あるいは成長をみるものである。部分放電開始電圧とは最大部分放電荷量が  $10^{-9}$  クーロンとなる電圧と定義されるが、これはこれ以上の大きな放電は絶縁の寿命に有害な影響を与えるものと考えられるからである。図5において初期の部分放電開始電圧は常規電圧の180%程度であり、20サイクル後においても

ほとんど低下していない。いずれにしてもこれは常規電圧より相当高い電圧であり、通常の使用状態においてはまったく有害な部分放電は存在しないことがわかる。

(3) 曲げによる応力ひずみ特性

図6は2点支持のコイルの中央に集中荷量を加えるときの荷重-たわみ曲線である。これから応力-ひずみ曲線を次式により求めることができる。

$$\sigma = \frac{3W}{2bh^2}$$

$$\epsilon = \frac{6hv}{l^2} \times 100$$

- ここに、  $l$  : 支点間距離       $W$  : 曲げ荷重
- $b$  : コイルの幅 (荷重と直角方法)
- $h$  : コイルの高さ (荷重と同方式)
- $v$  : 荷重点の変位

図6には初期および5サイクル、10サイクル劣化後の特性を比較して示したものであるが、この三者にほとんど差が認められない。

図7は10サイクル劣化後のコイルについて曲げ弾性率の温度依存性を示したものである。これによると110℃以上の温度すなわち実際の使用温度では相当柔軟性が発揮されることがわかる。図8はいろいろなひずみを経験したコイルの絶縁破壊電圧の低下率を示したものであるが、一定の大きさのひずみに対しては、そのひずみを経験する温度が常温よりもむしろ使用温度付近のほうが絶縁破壊電圧の低下が小さいことがわかる。もっとも、この差が認められるところのひずみ量は普通の運転ではあり得ない大きな値であり、われわれはコイルの支持法においてはるかに小さな変形量となるよう設計している。

3. ハイパクトエポキシ絶縁電動機の寿命

誘導電動機の寿命を短期間において誤りなく推定することは相当困難であるが、一つの方法としてIEEE, Pub, No. 275 推奨のモータレット試験法がある。これも機能的寿命評価試験法として実機の

表2 モータレット試験手順

| 熱劣化温度 日数 | 耐圧チェック                | 振動                                      | 吸湿              | 耐圧チェック                 |
|----------|-----------------------|---|-----------------|------------------------|
| 160℃ 14日 | アース間<br>チェック電圧<br>1分間 | 振幅 0.3 mm<br>振動数 3,000 cpm<br>加速度 1.5 g | 40℃<br>95±5% RH | アース間<br>チェック電圧<br>10分間 |
| 180℃ 4日  |                       |   |                 |                        |
| 200℃ 1日  |                       |   |                 |                        |

表3 実機寿命試験手順

| 熱劣化温度 日数 | 耐圧チェック                | 可逆運転                       | 吸湿              |
|----------|-----------------------|----------------------------|-----------------|
| 180℃ 4日  | アース間<br>チェック電圧<br>1分間 | 下図に示すデュー<br>ティで<br>3,000 回 | 40℃<br>95±5% RH |

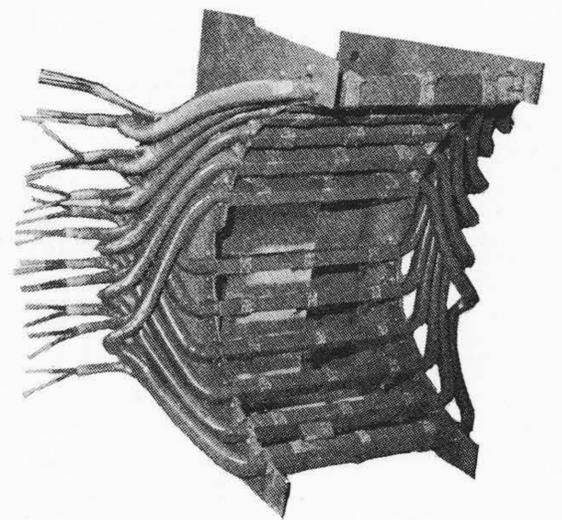
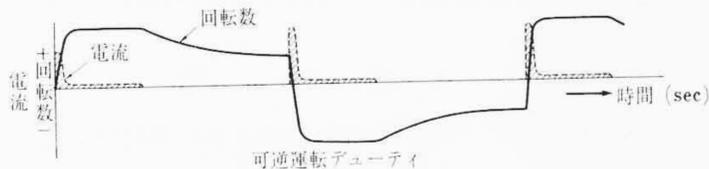


図9 モータレット試料の外観

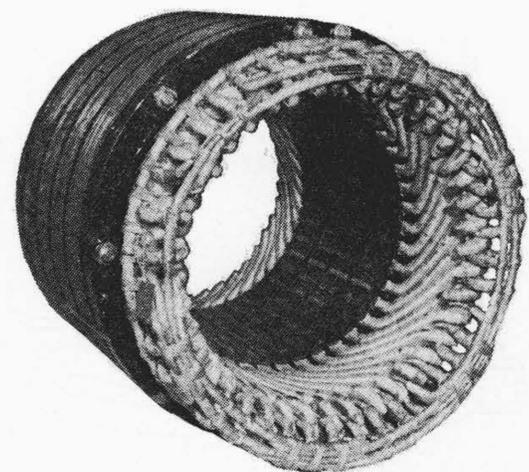


図10 75 kW 三相誘導電動機固定子巻線

運転状態と比較すると劣化要素にかなりの差があるように思われるので、現状では、この方法による従来の使用実績との比較試験のほか、さらに機能的要素を加味した試験法を追加することが行なわれている。すなわち熱劣化を恒温槽によらず通電ヒートサイクルによるとか、電圧印加を行なうとかの機能的要素の追加である。

筆者らの今回採用した方法はモータレット試験法をそのまま推奨案によるものとし、この不備を補うものとして、実機寿命試験を併用したものである。これは推奨案の評価にも役だつものと思う。

### 3.1 材料および試験法

図9はモータレット試料の外観を示したものである。コイルは75 kW 級のもので、スロット直線部の長さのみ縮小したものが1台に6本組込まれている。表2はモータレット試験における1サイクルの試験手順を示したものである。試料としては図9のものを4台製作し、1台を初期値の測定に、残る3台を表2の熱劣化温度160℃、180℃、200℃にそれぞれ1台ずつ供した。これによりB種最高許容温度130℃における寿命を外そう法により求めることが可能となる。筆者らは寿命の限界をアース絶縁の破壊電圧が電動機の試験電圧の85%値に低下するときとした。

図10は実機寿命試験に供された75 kW、4極、三相誘導電動機の固定子巻線であり、コイル・コア一体注入法で完成した状態を示す。表3は寿命試験のための劣化サイクルの1サイクルの構成を示している。これより明らかなように、実機寿命試験の熱劣化温度はモータレット試験の温度3点の中間温度を採用しており、また可逆運転は振動劣化に相当する。それ以外の劣化条件はまったく同一と見てよい。なお寿命の限界は前述のモータレット試験と同一電圧の耐圧によったが、ハイパクトエポキシ絶縁電動機の実力を知るために浸水試験やコイルの振動測定など、単独コイルでは評価できない非破壊試験を実施した。

### 3.2 試験結果

図11の曲線はモータレット試験の結果から、いわゆる温度寿命曲線を求めたものである。図において200℃の点は試料が全数破壊した結果であるが、180℃および160℃の点は未破壊の試料がまだ残っている。したがって、実際の寿命曲線のこう配は200℃の点を中心にしてもっと急なものとなるが、一応の曲線を求めると次式で表わされる。

$$\log L = \frac{5,500}{T} - 7.8$$

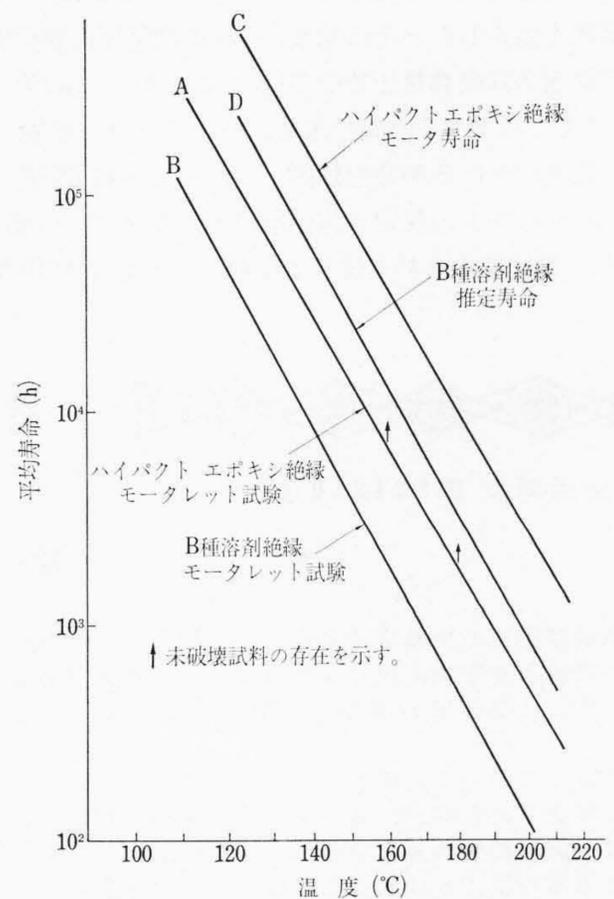


図11 平均寿命直線

ここで、 $L$ : 平均寿命 (h)

$T$ : 熱劣化試験温度 (°K)

またB曲線は従来の溶剤系マイカ絶縁に対する寿命曲線であるが、A曲線はそれよりはすぐれていることがわかる。

一方、実機寿命試験は規定のサイクルを10サイクル終了してもまったく異常がなく、その後は200℃の炉中で連続的に30日の熱劣化試験を行なった。それにもかかわらずチェック電圧での耐圧

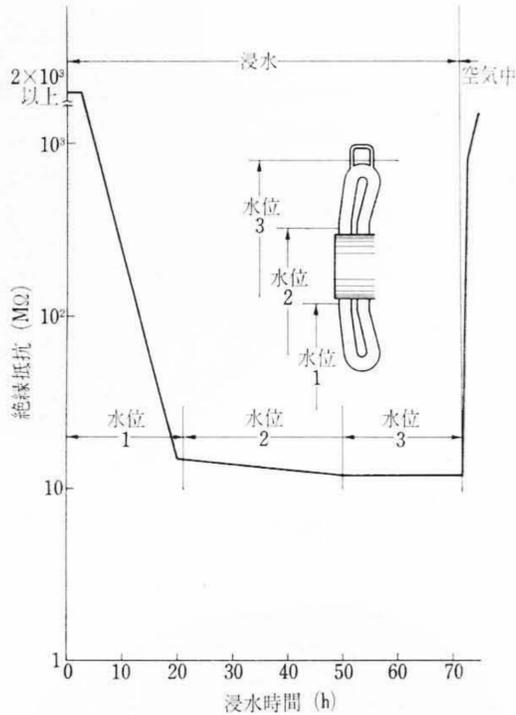


図12 絶縁抵抗-浸水時間

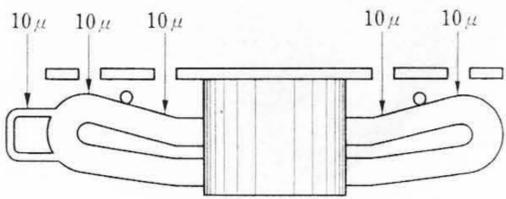


図13 振動測定位置および測定値

試験で破壊するものはまったくなく、やむなく強制的に全コイルの絶縁破壊電圧を測定した。その結果、残存破壊電圧は初期値の70%であり、標準偏差は破壊電圧値の10%であった。この値が試験電圧の85%にまで低下する時間を求め、モータレット試験の結果を用いて使用温度における寿命を外挿(そう)すると約38年となる。

図12は10サイクルの規定の劣化を終了した時点での浸水試験の結果である。接続部を含む水位3まで浸水してもなお10MΩ以上

を保持しており、これは接続部まで真空注入される一体注入方式が電動機の絶縁処理方式としてきわめてすぐれた技術であることを示している。なお、浸水後の回復メグ特性もきわめて良好であった。これは使用時の不慮の事故による浸水にも短時間ならよく耐え、また汚染の洗浄も簡単に行なえることを意味し、保守のうえでもたいへん有利である。

図13は同じく10サイクルの劣化を終了した時点で全電圧起動を行なったときの固定子巻線各部の振動を測定したものである。この結果から巻線の各部において振幅は小さく、曲げ試験で述べたように有害な大きさのひずみは存在しない。これは巻線の支持機構においても劣化に伴うゆるみがないことを意味している。従来、散見された糸縛りのゆるみなどということも、支持機構も含めてレジンを注入される一体注入方式では、まったく考えられないこととなった。

4. 結 言

ハイパクトエポキシ絶縁はパルプマイカに裏打材としてフィルム性のものを使用し、これに無溶剤エポキシレジンをコイル、コア一体注入方式で真空注入して製造される。これはそのすぐれた材料と製造技術から長期的劣化においても絶縁破壊電圧の低下はきわめて少なく、コイル支持方式にもゆるみを生じない。また劣化後の浸水においてさえ絶縁抵抗の低下はわずかであった。

このハイパクトエポキシ絶縁を採用した誘導電動機の製作実績は容量で37kWから1,000kW、電圧で3,000V~6,000Vのもので総容量にして13万kWに及んでいる。

また緒言でも述べたように、SLS絶縁は最高級のフレックマイカに無溶剤不飽和ポリエステルを真空注入するものであった。大形発電機ではこれをエポキシレジンに変えて一段と品質のすぐれたコイルを製造しているが<sup>(3)</sup>、誘導電動機でも超大形機はこの技術で製造されている。

参 考 文 献

- (1) 石坂：日本電気協会講演論文集
- (2) 今井，袴田：日立評論 48, 9 (1966, 9)
- (3) 安芸ほか4名：日立評論 49, 6 (1967, 6)



新 案 の 紹 介



登録実用新案 第824210号

舟 生 進

変 圧 器 の 冷 却 装 置

従来、乾式変圧器の冷却構造は各線輪に対応して特別に風道を開け空気流が線輪面を平均に吹くようにするのが普通である。しかしながらこの方式は変圧器の構成を複雑かつ大形化するきらいがあった。

この考案は、これらの問題を解決したものであり、1は鉄心、2は鉄心1に巻回された巻線、3および4は箱形に形成された鉄心締金具、5は一方の締金具4の内部に設けられ上下左右にV字形の導風面を有する案内板、6は内部を舟底のような中空Wとして乾式変圧器を載置保持する舟底ベース、7はベース6を移動可能としたローラ、8は案内板5の前面に内部に保持する油量調整用ダンパ9を装備した台形状のポケット、10は送風機、矢印は冷却風の流れを示すものである。

この考案は、下部の鉄心締金具3および4を中空の箱体に構成し、これら箱体の下部ベース6を中空Wの舟底状に形成して各鉄心締金具3および4の内部と連通し、一方の鉄心締金具4の鉄心1側へは上下左右に導風面を有する案内板5を設け、この案内板5側の鉄心締金具4を送風機10へ連通したものであり、これにより送風機10反対側へ送風する特別風道が不用になり、また案内板5を設けたことにより冷却効果を均一化し、さらには風量調整用ダンパ9によ

り冷却風量の調節を可能として変圧器全体の構造を小形化できるようにしたものである。(志賀)

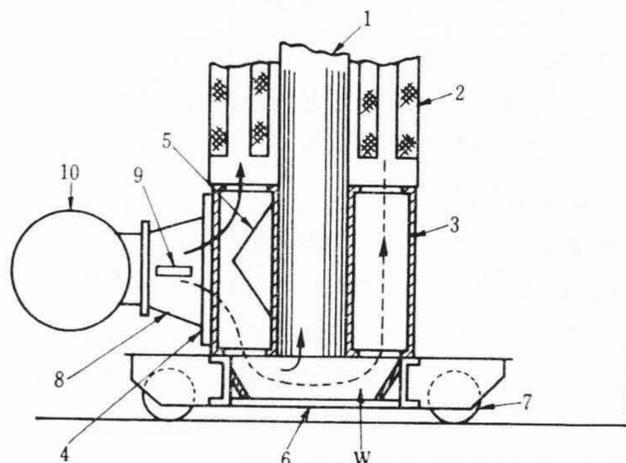


図 1