

最近の高圧回転機絶縁

Recent Insulation System for High Voltage Rotary Machines

谷 恭夫* Yasuo Tani · 山口博之** Hiroyuki Yamaguchi · 松下祐三** Yuhzoh Matsushita · 佐藤 進*** Susumu Satoh
奥村明夫* Akio Okumura

I. まえがき

回転電気機械（回転機）の絶縁は、材料の開発、製法の改良、寿命試験などの評価方法の開発により、長足の発展を成し遂げ、特に最近では、各種の評価試験方法を背景にさまざまな材料と製法の組合せを検証することにより、より信頼性の高い合理化された絶縁システムの追求が行われている。回転機に採用されている乾式絶縁システムでは、絶縁に加わるいろいろなストレスの中で、電圧印加によるストレスの影響度が高電圧と低電圧で異なるため、大略高圧絶縁システムと低圧絶縁システムに分けることができる。ここでいう高圧とは、定格電圧 3 kV 以上の電圧レベルを指しているが、コイル端部の電界緩和や、コロナ放電による影響度が大きい 6 kV 以上の定格電圧を対象にした絶縁設計の概念が、高圧回転機絶縁の基本となっている。絶縁システムの設計にあたっては、こうした電圧階級、耐熱区分という基本的制約とは別に、機械の大きさ、電気的仕様、用途から生ずる構造並びに使用状態に対する配慮と、実際の製造に際してコストミニマムが達成できる製法の集約を考慮していかなければならない。高圧回転機の固定子巻線として、レジ系絶縁の F レジン絶縁⁽¹⁾及びスタビラスチック絶縁⁽²⁾を適用してきたが、最近新たに全含浸方式及びレジンリッチモールド方式をそれらに加えて、機種及び用途に応じて最も適した絶縁方式を採用するようにしている。

一方、回転子巻線は機種、用途により構造が大きく異なっているが、絶縁システムとしては低圧絶縁システムであり、主として耐熱性、機械的特性及び運転中のヒートサイクル、汚損などの影響に考慮が払われている。これらの回転子巻線については、同期機の突極形界磁巻線、円筒形界磁巻線、誘導機の巻線形回転子などに分けることができる。以下にこれらの概要を紹介する。

II. 固定子巻線の絶縁方式

固定子巻線の絶縁方式は、マイカとエポキシ樹脂を主材料として使用し、製法的には真空含浸方法とプレスモールド方法を基本的製法として採用している。前述のように、最近開発したシステムを含め四つのシステムがあり、呼称の統一を図るため、F レジン/F 絶縁、F レジン/

R 絶縁、F レジン/S 絶縁、F レジン/G 絶縁と呼称している。これらは特性上の点では、耐熱性 B 種ないし F 種で、電気的特性、機械的特性に多少の差異はあってもほとんど有意な差はなく、優秀な特性を有している。むしろそれぞれの特徴は製法上の点にあるといえよう。第 1 表に各絶縁システムの特徴及び概略の適用範囲を示す。

第 1 表 固定子巻線の絶縁方式
Table 1. Insulation systems for stator coils

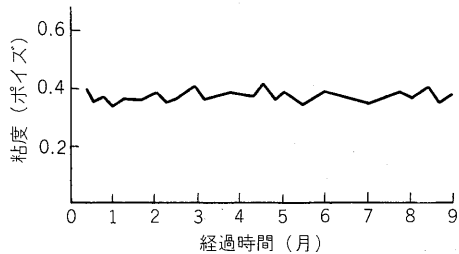
絶縁システム	製法の特徴	適用範囲
F レジン/F 絶縁	単一コイルのエポキシ真空含浸(全テーピング)	大容量水車発電機 タービン発電機
F レジン/R 絶縁	単一コイルのエポキシプレスモールド(全テーピング)	中・小容量水車発電機 大形工業用交流機
F レジン/S 絶縁	単一コイルのエポキシプレスモールド	一般交流機
F レジン/G 絶縁	エポキシ全含浸	大形工業用交流機

1. F レジン/F 絶縁

F レジン/F 絶縁は、当社が昭和33年に開発したレジ系の高圧絶縁である F レジン絶縁⁽³⁾を母体にして、その後改良を加えて現在に至っているもので、レジ系絶縁として当社で最も歴史の長いものである。本方式は主として転移導体を使用する大容量機に適用される。

主材料は、はがしマイカテープ、集成マイカテープ及びエポキシ樹脂である。開発当初はマイカテープも、はがしマイカを手貼りで作成したものを使用し、テープ厚、テープ幅も小さいものを使用していたが、現在では機械貼りのマイカテープを使用し、厚さ、幅を大きくして巻回数の少ない均一な絶縁が得られるよう改良されている。マイカテープはコイルエンド部まで連続して巻かれ、その後高真空のもとでエポキシ樹脂が含浸される。含浸方式及び樹脂組成も開発当初から改良され、現在では樹脂の粘度を低く、ポットライフを十分にとり、含浸サイクルも半分の時間に短縮されている。含浸性に影響する樹脂の粘度は、第 1 図に示すようにほとんど一定であり、安定した含浸が行われている。含浸されたコイルは鉄心端部の電界緩和のため、非線形特性を持つ高抵抗塗料の

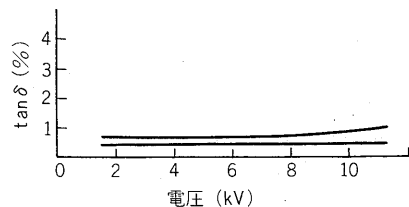
* 川崎工場 設計部 ** 中央研究所 第二部 *** 鈴鹿工場 回転機部



第1図 含浸樹脂の粘度変化
Fig. 1. Viscosity change of impregnating resins

処置がされる。

Fレジン/F絶縁は、水車発電機、揚水発電電動機、タービン発電機などの大容量機にすべて適用され、現在まで絶縁関係のノータラブルを誇っている。最近ある機会に十数年運転されたFレジン/F絶縁のコイルを調査する機会を得たが、第2図に示すように製作当初と比較してほとんど特性の変化がないことを確認している。



第2図 長期使用コイルの $\tan \delta$ -電圧特性 (Fレジン/F絶縁)
Fig. 2. $\tan \delta$ vs. voltage characteristics after long operation (F-resin/F insulation)

2. Fレジン/R絶縁

Fレジン/R絶縁は最近開発した絶縁方式で、従来のFレジン/F絶縁とFレジン/S絶縁の利点を取り入れた絶縁構成、製造方法となっている。Fレジン/R絶縁の主絶縁は、ガラス基材の集成マイカテープを成形した導体にスロット部、エンド部連続に規定回数巻いたのち、ヒートプレスにセットし加圧成形する方式で、この方式は、真空含浸方式に比べ種々のメリットがある。

すなわち、使用樹脂があらかじめ含まれているプリプレグ (レジンリッチ) 材料を用いるので樹脂のむだがなく、また効率のよい熱プレスを使用するため、乾燥炉による加熱に比しエネルギーのロスが小さくて済み、省資源、省エネルギーの面で優れている。更に、製造装置の管理がより容易となるので品質が一層向上する。また、含浸工程がなくなるため、工程の短縮、連続化ができ、しかも作業環境が向上する。

この絶縁方式は中・小容量水車発電機などの単一ハーフコイル形状のものを対象に開発され、種々の評価試験によってその高信頼性が確認されている。その詳細な内容については、別稿 (17~21ページ) に述べられている。

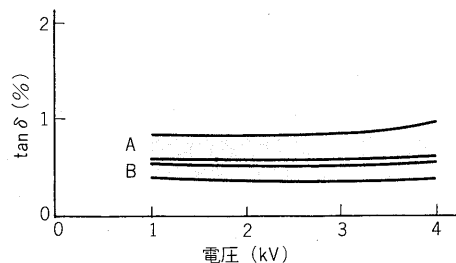
3. Fレジン/S絶縁

Fレジン/S絶縁は、従来のスタビラスチック絶縁⁽²⁾の技術を基礎に更に改良を加えたもので、特に耐環境性が一段と向上し、信頼性の高い絶縁となっている。スタビラスチック絶縁は既に10年の実績を有し、3~13.8kV級までの数多くの回転機に適用されている。

Fレジン/S絶縁は集成マイカを主体とし、それに基材を耐熱性エポキシ樹脂で張り合わせたプリプレグ (レジンリッチ) 材料を用い、高い圧力をかけて加熱成形し、完全に一体なモールド絶縁を形成させるのが特長である。このように十分な圧力をかけることにより、ボイドのない均一で強固な絶縁層が得られる。しかもこの成形作業は、多数のコイルを1回の工程で処理するため、特性のばらつきが非常に小さく品質が安定している。この主絶縁を形成したのち、 $\tan \delta$ 特性、コロナ特性及び素線間絶縁耐力など高圧機で問題となる諸特性をチェックし、品質管理を行っている。

コイルエンド部絶縁も同様のマイカテープを用い、コイルを鉄心に挿入して結線したのち、無溶剤レジンで含浸処理され、最終的には一体化した絶縁が形成される。

最近、約10年使用された2台 (A, B) の3.3kV級Fレジン/S絶縁コイルの特性を測定する機会を得たが、それらの $\tan \delta$ -電圧特性を第3図に示す。いずれもばらつきが小さく、初期と同じ良好な特性を示している。



第3図 長期使用コイルの $\tan \delta$ -電圧特性 (Fレジン/S絶縁)
Fig. 3. $\tan \delta$ vs. voltage characteristics after long operation (F-resin/S insulation)

4. Fレジン/G絶縁

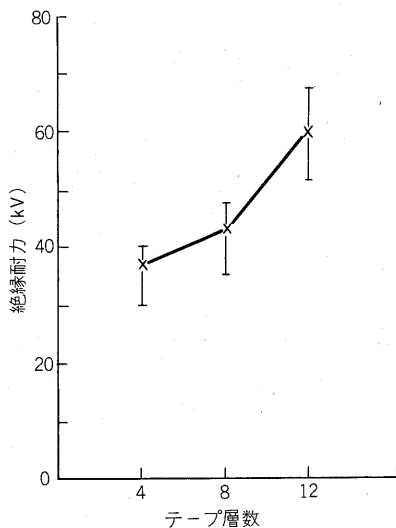
Fレジン/G絶縁⁽⁴⁾は、鉄心に巻線を挿入し、結線したのち巻線全体を樹脂の真空含浸を行う方法でいわゆる全含浸方式の絶縁システムである。この全含浸方式は、低圧絶縁並びに高圧絶縁に適用でき、樹脂含浸が一体で行われるため、巻線の機械的な強度を上げ、またコイルエンド部や接続部に完全に樹脂を充てんできるなどの利点がある。一方、装置の大きさから対象機が限定されること、絶縁処理が完了した状態での特性管理がコイル単体ではなく、巻線全体で評価しなければならないことなどの制約を受ける。

Fレジン/G絶縁では、対象機を大形機まで適用できるように大形の含浸装置を導入し、また高圧固定子巻線に

とって最も重要な点である素線間絶縁及びスロット部絶縁は、コイル単体の状態で完了し、品質管理を厳密に行えるシステムとなっている。

Fレジン/G絶縁の主構成材料は、集成マイカとエポキシ樹脂であり、素線絶縁には電圧階級に応じて高い絶縁耐力を有するフィルム巻二重ガラス巻電線あるいはマイカ巻電線を使用している。コイル製作は通常のFレジン/S絶縁と同様で、単体で素線間及びスロット部の電気的特性などを測定し、厳重な品質管理のうえ鉄心に挿入される。コイルの表面には含浸後の樹脂の流出を防止するため、特殊な仕上げテープを巻いてあるので、硬化時の樹脂流出による特性の低下はない。

第4図にコイルを水中に浸漬したのちの水中におけるエンド部の絶縁耐力を示すが、コイルエンド部もスロット部に対してそんな色のない絶縁耐力を有し、汚損に強い絶縁システムとなっている。Fレジン/G絶縁は大形の交流機及び直流機、並びに特殊仕様の一般交流機に適用されている。



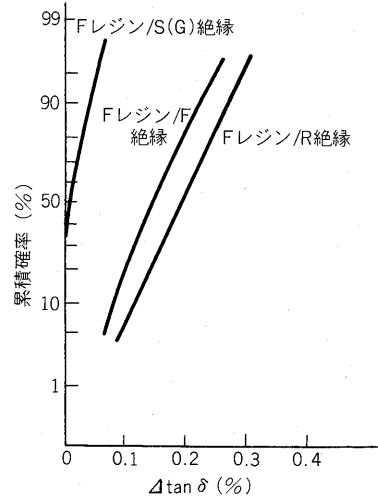
第4図 水中浸漬におけるコイルエンド絶縁耐力 (Fレジン/G絶縁, 水中浸漬3時間後)
Fig. 4. Dielectric strength of coil end insulation in 3 hours water-submerging (F-resin/G insulation)

5. 各絶縁方式の絶縁特性

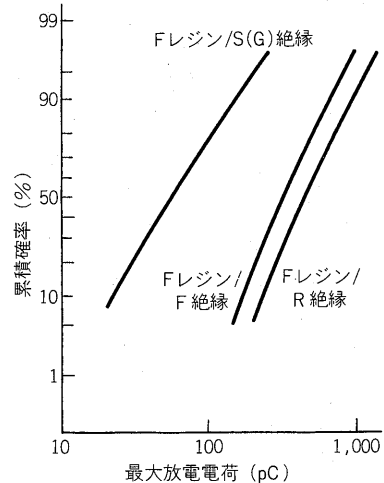
1) 初期特性

高圧コイルにおいては、初期の tan δ 特性、部分放電特性が良いこと、並びにその状態が運転時において変化なく維持されることがまず重要である。

第5図にFレジン/F絶縁、Fレジン/R絶縁、及びFレジン/S(G)絶縁の製造時における Δtan δ (定格電圧の tan δ と tan δ₀ の差) の確率分布を示す。また、第6図に定格電圧における部分放電の最大放電電荷量の確率分布の代表例を示す。いずれの絶縁も良好な tan δ 特性を有しており、また定格電圧での最大放電電荷量は 10⁻⁹ C 以



第5図 11kV級コイルの Δtan δ の累積確率分布
Fig. 5. Frequency percent of Δtan δ (11kV class coils)

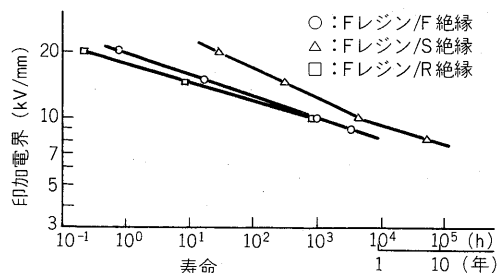


第6図 定格電圧における最大放電電荷量の累積確率分布
Fig. 6. Frequency percent of maximum partial discharge at rated voltage

下で、常規使用電圧では有害な部分放電が全く発生しない。

2) 耐電圧寿命特性

コイルの耐電圧特性は、一般に V-t 特性試験でみる事ができる。第7図に各絶縁方式の V-t 特性 (室温) を



第7図 V-t 特性
Fig. 7. Voltage endurance characteristics

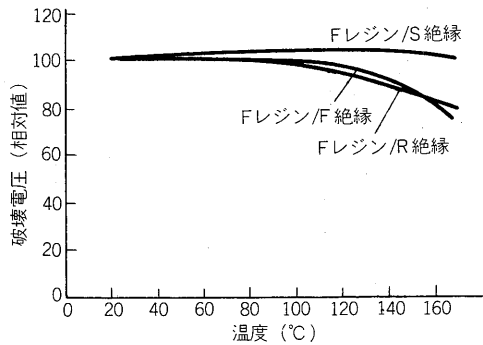
示す。同時に求めた高温(130~150℃)時の特性も、室温時のそれと大差はなく、いずれの方式も運転電圧における耐電圧寿命は非常に長く、電圧劣化はほとんど問題とならないと考えられる。

3) 熱安定性

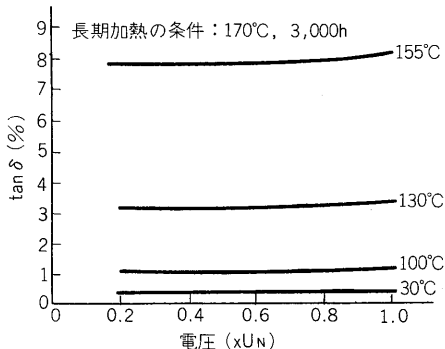
コイル絶縁の熱安定性は、基本的には温度だけにより定まる限界値に関係するところの形態安定性と、使用温度で長時間加熱された場合の耐熱劣化性の二つを考えなければならない。更に運転時の温度分布、あるいは始動停止、負荷変動により生ずる熱応力が重要な問題であり、また熱と機械応力あるいは雰囲気との相乗作用を考慮しなければならない。

絶縁層の高温特性の例として、第8図に破壊電圧の温度特性を示すが、特にフレジン/S(G)絶縁は良好な特性を有している。次に長期間加熱の安定性試験の例として、第9図にフレジン/S(G)絶縁コイルを170℃、3,000時間加熱したのちのtan δ-電圧特性の温度特性を示すが、初期とほとんど変わっていない。実際には長期間運転中の運転温度における特性が問題となるわけで、このように高温時の特性を求めて耐熱性を検討することが必要である。

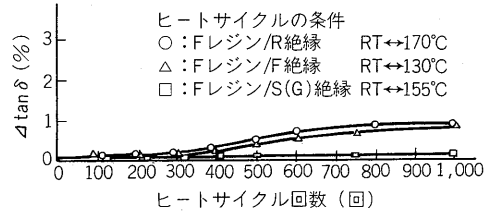
大形機においては特にヒートサイクルによる特性低下



第8図 絶縁破壊電圧-温度特性
Fig. 8. Dielectric strength vs. temperature characteristics



第9図 Fレジン/S(G)絶縁コイルの長期加熱後のtan δ-電圧特性
Fig. 9. tan δ vs. voltage characteristics of F-resin/S(G) insulation coils after aging at 170°C for 3,000 hrs.



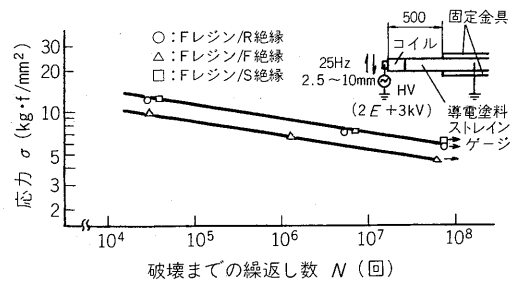
第10図 ヒートサイクル試験におけるΔtan δの経時変化
Fig. 10. Change in Δtan δ after thermal cycling

が問題となるが、第10図に各絶縁方式のヒートサイクル試験の結果の一例を示す。

4) 機械特性

コイルには系統短絡あるいは始動停止の際、大きな機械応力が加わり、また運転中の振動によっても繰り返しの応力が作用する。

第11図に、片持ちばりの方法で、コイルの先端に2.5~10mmの両振りの振幅を与えて振動させ、試験電圧(定格電圧×2+3kV)で破壊するまでの時間を求めた疲労特性を示す。このような機械特性に関する種々の検討を行い、実機でコイルに加わる応力に対してコイル絶縁の強度は、設計的に十分な安全率を有していることを確認している。



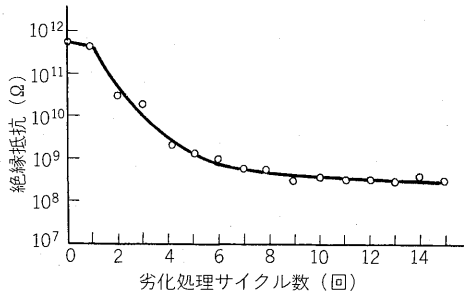
第11図 曲げ疲労特性
Fig. 11. Characteristics of cyclic bending fatigue

5) 耐環境性

特に電動機は使用環境が多様であり、高温でかつダストや電解質による汚損が激しい環境では問題を起こす可能性がある。非常に厳しい環境に対しては、保護方式で対処すべきであるが、コストその他の理由で開放形が使用される場合も多い。また、メンテナンスフリー化の要求への対応もあり、当社では耐環境性の向上に重点をおいて改良を加え、フレジン/S絶縁、フレジン/G絶縁とも耐環境性に優れた絶縁となっている。

モータレットあるいは実機での寿命試験においては、各サイクルごとの吸湿時に耐圧チェック以外の特性の追跡及び同じく各サイクルごとにIEEE Std. 429に準じた浸水試験を行い性能のチェックをしている。

第12図にフレジン/G絶縁のモータレット試験の各サイ

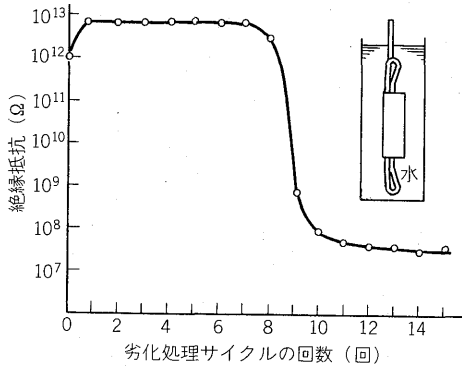


第12図 モータレット試験における吸湿時の絶縁抵抗の経時変化 (フレジン/G絶縁)

Fig. 12. Change in coil insulation resistance in motorette test

クルにおける吸湿時の絶縁抵抗の経時変化の一例を示す。この場合の加熱温度は210℃で、1サイクルの時間は2日、また吸湿条件は40℃ RH100% 48時間である。

また、第13図にフレジン/S絶縁の同じくモータレット試験の各サイクルにおける吸湿後の浸水試験における水中の絶縁抵抗の経時変化の一例を示す。この場合の加熱温度は210℃で、1サイクルの時間は2日であり、また絶縁抵抗は水中浸漬1時間後の値である。このように非常に過酷な試験においても、フレジン/S絶縁、フレジン/G絶縁はいずれも高い絶縁特性を示している。



第13図 モータレット試験における水中浸漬での絶縁抵抗の経時変化 (フレジン/S絶縁)

Fig. 13. Change in coil insulation resistance in motorette test

III. 回転子巻線の絶縁方式

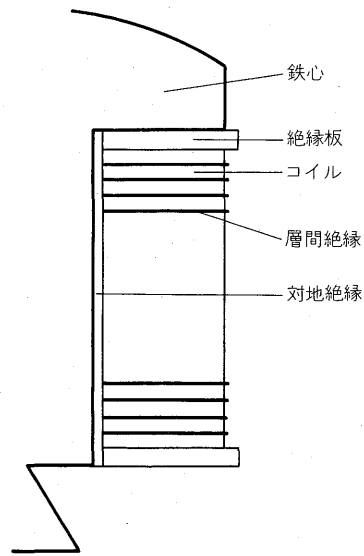
回転子巻線は、回転による遠心力と同時に熱サイクルによるコイルの熱膨張・収縮を受けるため、これに使用する絶縁材料は機械的に十分強く、その絶縁構成上からも機械的応力などを考慮した構成となっている。また、最近の傾向として、機械の使用温度や環境が過酷になってきており、絶縁設計上細心の配慮が必要である。

1. 突極形界磁コイル絶縁

突極形界磁コイルはその使用環境、設計条件から考えて、次の点に留意する必要がある。すなわち、使用環境が過酷で表面汚損の著しい機械に対しては、沿面距離を十分確保するか、あるいは界磁コイル表面をすべて絶縁

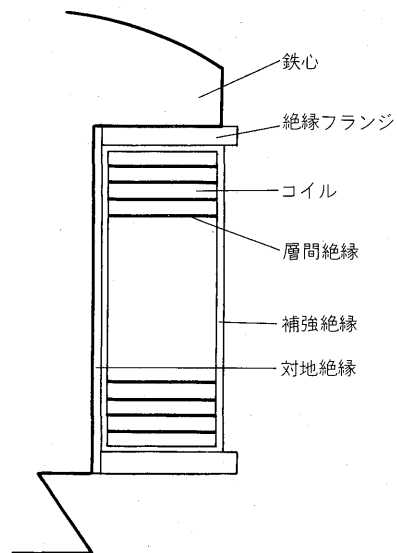
で覆うなどの方法を用いて絶縁抵抗の低下に対処している。また、高速機ではコイルの熱膨張・収縮が大きいが、膨張時に遠心力により拘束され伸びきれないことが繰り返されると、クリープに発展することがある。このため、絶縁フランジとコイルの界面に特殊処理を施し、すべらせるよう考慮を払っており、またコイル相互間の接着は強固にしている。更に、高温のコイルでは使用材料の選定に注意を払う必要があり、コイル間に挿入するレヤ材には、使用温度で枯れの少ない材料を使用している。

一般的な界磁コイル断面を第14図に示す。コイルは平角銅線の平打巻きで、層間絶縁には各種の実験から、接



第14図 突極形界磁コイルの断面図 (水車発電機などに使用される一般的界磁コイル)

Fig. 14. Cross section of salient pole coil insulation for normal use



第15図 突極形界磁コイルの断面図 (同期電動機などに使用される耐汚損界磁コイル)

Fig. 15. Cross section of salient pole coil insulation for special use

着力の強いエポキシ樹脂を接着剤としたアスベストを挿入し、高温加圧下でコイルを形成する。

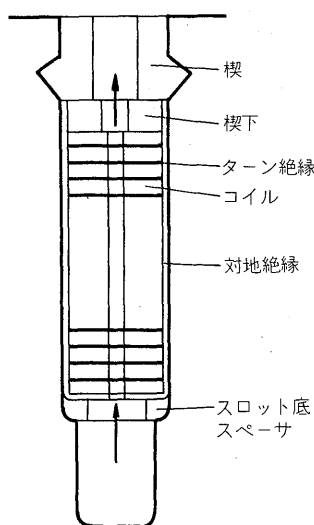
絶縁フランジには、機械的強度や耐熱性に優れたポリエステルガラス積層板、あるいはエポキシガラス積層板を使用する。対地絶縁にはマイカシート、あるいはポリエステルガラス積層板を使用しており、この絶縁構成は絶縁階級F種に十分耐えることを確認している。

また、第15図に化学工業や海岸地方に設置される電動機のように、耐汚損性が要求される絶縁の使用例を示す。同図は界磁コイル周上に特殊処理マイカテープをテーピングし、エポキシ樹脂を真空含浸する方式を採用している。この種の絶縁されたコイルは表面に均一な絶縁層が形成され、耐環境性に対する信頼性が非常に高い。

2. 円筒形界磁コイル絶縁

円筒形界磁コイルには非常に高い遠心力が常時働くため、絶縁材料、導体には次の点を考慮している。

使用する絶縁材料は枯れの少ないポリエステル、あるいはエポキシガラス積層品を使用する。また、前述の水車発電機の場合と同様に導体にはクリープが生じるので、導体には一部銀入り銅を使用している。第16図に大形2極直接ガラス冷却タイプを示す。導体には冷却通風用のエアホールが加工してあり、同様にレーヤにもエアホールが加工してある。レーヤ材には接着力の強いプリプレグ状のエポキシガラス積層品を使用し、高温高圧でコイル成形するので接着強度が高い。対地絶縁には機械的強度が高く、かつ電気的特性の優れたL形のエポキシガラス積層板を使用している。そのほか楔下絶縁にも大きな圧縮力が加わるため、同様にエポキシガラス積層板を使用している。



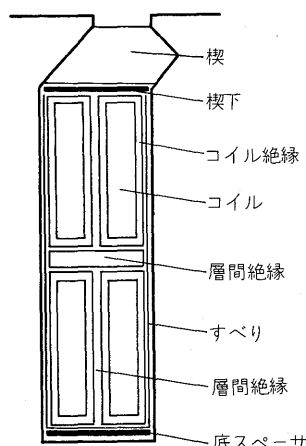
第16図 円筒形界磁コイルの断面図 (大形2極機、直接冷却ラジアルフロー形)
Fig. 16. Cross section of round rotor coil for large turbo generator

3. 誘導機巻線形回転子コイル絶縁

巻線形回転子コイルは、運転中に遠心力を受けるのはいうまでもないが、更に悪環境で汚損にさらされる場合もある。特に巻線形誘導機では、始動時に高い電圧を誘起するため、巻線が極度に汚損されているとリークに発

展する可能性がある。このため、汚損に見合った保護方式の選定はもちろんであるが、これらに対する絶縁構成を考えておく必要がある。また、一般的に誘導機回転子のコイル形状はバーコイルで、エンド部の接続は当社では銀ろうによるろう付け方式を採用し、熱的機械的に一段と信頼性の高い方式となっている。

第17図に高圧誘導機に使用される巻線形回転子コイルの断面を示す。コイルのスロット絶縁には耐熱フィルムを裏打材としたプリプレグシートを巻き付け、スロットに挿入、結線後に加熱硬化する。エンド絶縁には特殊テープを使用し、エンド接続部は集成マイカシートにて絶縁し、最後に、エポキシ樹脂で含浸する。樹脂は絶縁物中に十分含浸されるため、絶縁の接続部、スロット絶縁とエンド絶縁の継目などが一体となった絶縁となり、機械的強さ及び耐汚損性が向上し、信頼性が一段と高い構成となっている。コイルエンドの支持にはエポキシガラスバインドを使用し、機械的強度、そのほかに考慮を払っている。



第17図 誘導機回転子コイルの断面図
Fig. 17. Cross section of rotor coil for induction motor

IV. あとがき

高圧回転機の固定子及び回転子巻線の絶縁について、当社の絶縁方式の概要を紹介した。固定子絶縁のFレジン/F絶縁及びFレジン/S絶縁は、長年の実績を有しているが、今回Fレジン/R絶縁及びFレジン/G絶縁を開発し、更に充実させた。

なお、真空開閉器の普及に伴い急しゆんな開閉サージの侵入が予想されることから、ターン間絶縁の信頼性が重要で、この面でも十分な考慮を払っている。

参考文献

- (1) 山口ほか：Fレジン絶縁 (最近の大形発電機固定子コイル絶縁方式), 富士時報 45, No. 2 (昭47)
- (2) 山口ほか：富士F種スタビラスチック絶縁 (新しい高圧F種回転機絶縁), 富士時報 44, No. 9 (昭46)
- (3) 清水ほか：Fレジン (富士レジン) 絶縁コイル, 富士時報 31, No. 5 (昭33)
- (4) 藤井ほか：Fレジン/G絶縁, 富士時報 50, No.8 (昭52)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。