エポキシマイカ絶縁の機械的疲労による 絶縁劣化特性

正員 三井久安 (東芝)
正員 吉田勝彦 (東芝)
非会員 石坂哲之 (東芝)
正員 吉田宏 (東芝)

1. ま え が き

タービン発電機、水車発電機、高電圧電動機、一般産業用直流機などの大形回転機は、大容量化するにつれ鉄心長が長くなり、運転温度も上がる傾向にある。また近年、省資源、省エネルギーの必要性から、負荷調整運転する機会が増え、起動・停止の頻度が高くなる傾向がある。回転機に使われるエポキシマイカ絶縁は導体や鉄心と熱膨張率が異なり、それぞれの温度も均一ではないため、起動・停止時に熱機械応力が発生し、これが繰返されると疲労劣化が起きやすくなる。一方、起動時や運転中、また短絡時などにはコイルに電磁力が働き振動する。このため絶縁層が振動による疲労劣化を起こす。近年、回転機の小形化を意図し、コイル1本あたりに流れる電流を増し、運転温度を上げる一方、絶縁厚を削減する傾向にある。このため絶縁層に加わる振動による機械的ストレスが大きくなると共に疲労劣化が起きやすくなってきている。著者らは、このような観点から、回転機に使われるエポキシマイカ絶縁の熱機械応力ならびに振動による疲労劣化特性の把握に努めてきた^{(1)~(4)}。

ここでは、絶縁層の切出し片を使った疲労試験の結果を基に、別に行なった実規模のタービン発電機コイルのヒートサイクル試験およびコイル絶縁の繰返し曲げ疲労試験の結果について検討した。その結果、通常

回転機が使われる温度条件では、コイル絶縁は引張りより圧縮による疲労が起きやすいこと、また一定変位の繰返し曲げ試験においては、絶縁層の弾性率が急激に低下し始める温度付近で疲労が極大となる現象が見られることなどが明らかになった。

2. 試料および試験方法

〈2・1〉 絶縁層の切出し片による引張りおよび圧縮疲労特性 図1に示すように、断面が10mm×50mmのアルミニウム板に離型用のポリテトラフルオロエチレン(PTFE)テープを巻回したのち、マイカテープを1/2重巻きし、エポキシ樹脂を真空加圧含浸し加熱硬化したモデルバーコイルを作製した。

このコイルから、切削加工により図2のような形の絶縁層を試料として切出した。試験に用いた絶縁は表1の①~③に示すような構成である。引張り疲労試験の場合、テープ幅の影響を調べるために、絶縁③について10mm幅(③A)、32mm幅(③B)、平巻き(③C)の試料を用意した。また、絶縁層中のボイドの影響を調べるために、マイカテープ幅が32mmの絶縁③の中央部の一層に厚さ25μm、幅21mmのPTFEテープを21mmずつ飛ばし巻きした試料(③D)も用意した。疲労試験は、驚宮製作所製油圧サーボEFH-100

図1 絶縁層からの試料の切出し方法

Fig. 1. Method of cutting-out specimens from insulation wall.

Degradation Characteristics due to Mechanical Fatigue of Epoxy Micaceous Insulations. By Hisayasu Mitsui, Member, Katsuhiko Yoshida, Member, Takashi Ishizaka, Non-member & Hiroshi Yoshida, Member (Toshiba Corporation).

三井久安: 正員, (株)東芝
吉田勝彦: 正員, (株)東芝
石坂哲之: 非会員, (株)東芝
吉田 宏: 正員, (株)東芝

(a) 引張疲労試験

(b) 圧縮疲労試験

図 2 試料の形状と応力を加えた方向

Fig. 2. Shape of specimens and stress applied directions.

表 1 試料の絶縁構成

Table 1. Insulation structure of specimens.

絶縁	マイカテープ			含浸樹脂	絶縁システム
	マイカ	補強材	接着剤		
①	M_1	G_1	E_1	E_5	VPI（真空加圧含浸）方式
②	M_2		E_2	E_6	
③			E_3		
④	M_3	G_2	E_4		レジンリッチ方式（液圧硬化方式）
⑤	M_3+F				
⑥	F				

(注) M: 集成マイカ, F: はがしマイカ, G: ガラス繊維, E: エポキシ樹脂

を使い、定荷重方式で、繰返し周波数 1 Hz の正弦波により引張りおよび圧縮試験を行なった。応力はコイルのヒートサイクルや振動により生ずる応力の方向を考慮して、図 2 に示すようにコイルの長手方向に相当する方向に加えた。なお、繰返し応力の大きさは応力振幅 σ_a で表わした。ここで、 $\sigma_a = 1/2 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)$ で、 σ_1 , σ_2 はそれぞれ上限応力、下限応力であり、 $\sigma_2 \geq 0$ である。

〈2・2〉実規模コイルによるヒートサイクル劣化特性 表 1 の絶縁 ①～③ を施した 22kV-600 MW 級タービン発電機コイルを、長さ 6.6 m の鉄心に装着し、通電による加熱と扇風機による冷却により、45℃～160℃ のヒートサイクル試験を行なった⁽²⁾。ヒートサイクルによる絶縁性状の変化を調べるために、シェーリングブリッジにより電圧-tan δ 特性を測定した。また試験終了後絶縁破壊試験を行ない、絶縁破壊箇所近傍の絶縁層を走査形電子顕微鏡 (SEM) により観察

図 3 繰返し曲げ疲労試験装置

Fig. 3. Test setup for repeated bending fatigue test.

した。

〈2・3〉繰返し曲げ疲労特性 10mm×50mm×800mm のアルミニウム板に表 1 に示す絶縁 (厚さ約 1.7mm) を施したモデルバーコイルを試料とした。

図 3 に示すように、試料を恒温槽に入れ、中央部を固定し、片端を振動させた⁽¹⁾。振動は 11.7 Hz で主に両振りで行なったが、一部片振りによる試験も行なった。また、振幅の大きさを変え変位量の影響についても調べた。なお、図 3 の装置では高温の場合は試料の長さ方向に温度こう配ができるので、試料の温度を均一にするため駆動装置を含め環境試験室に入れた試験も行なった。振動を加えたコイルの中央部 250mm に銀ペイントを塗り、室温の油中にて 1 kV/s の昇圧速度で短時間破壊電圧 (BDV) を求めた。

3. 試験結果および考察

〈3・1〉絶縁層の切出し片による引張りおよび圧縮疲労特性 図 4 に絶縁 ①～③ の 25, 80, 120, 160℃ における引張り疲労特性を示す。応力振幅 σ_a (kg/mm²) と破断までの繰返し数 N (回) は両対数紙上で直線近似でき、次の (1) 式で表わすことのできる関係があることがわかる。

$$N = k \sigma_a^\alpha \quad (1)$$

ただし、 k , α : 定数

また、温度が高くなるほど疲労しやすくなり、25℃に比べ高温の場合のほうが各絶縁の引張り疲労特性の差が顕著に現われることがわかる。

絶縁 ④～⑥ の引張り疲労特性を図 5 に示す。これからマイカの構成が全集成マイカ>集成マイカ・はがしマイカ混用>全はがしマイカの順に疲労特性が優れていると言える。これは試料を切出す際にはがしマイカ部分が損傷を受けやすいこともあるが、はがしマイカの場合、へき開性があるのできれつが生じやすいためと考えられる。

図 6 に、絶縁 ③ における引張り疲労特性に及ぼすテープ幅の影響および PTFE テープ巻込みの影響を調

図 4 絶縁①~③の引張り疲労特性

Fig. 4. Tensile fatigue characteristics of insulations ①~③.

図 5 絶縁④~⑥の引張り疲労特性

Fig. 5. Tensile fatigue characteristics of insulations ④~⑥.

③A: 10mm 幅テープ, ③B: 32mm 幅テープ, ③C: 平巻,
③D: PTFE テープ巻込 32mm 幅テープ

図 6 絶縁③の引張り疲労特性

Fig. 6. Tensile fatigue characteristics of insulation ③.

べた結果を示す。図から引張り疲労特性はテープ幅に大きく影響を受け、テープ幅が広いほど疲労に強く、また PTFE テープを巻込んだ試料は疲労しやすいと言える。これは図 7 に破断の進展経路を示すが、破断

図 7 引張り疲労によるクラックの進展経路

Fig. 7. Crack propagation path due to tensile fatigue.

はテープの重なり目を縫うようにして最短距離をきれつが進展することにより起きるからで、テープ幅が狭いほどクラックの所要進展距離が短くなり疲労しやすくなる。また PTFE テープを巻込んだ試料では、PTFE とマイカテープの界面がはがれやすいために、クラックの進展距離が見かけ上短くなったと同じ効果があり、早く破断すると考えられる。従って、絶縁層に含浸不良や劣化などでボイドができると疲労劣化が早まることが考えられる。

次に、図 8 に絶縁①~③の圧縮疲労特性を示す。図から圧縮疲労特性も(1)式で近似できること、絶縁により圧縮疲労特性の温度依存性がかなり異なり、絶縁③は 80, 120°C において圧縮疲労特性が絶縁①に比べて劣り、データのばらつきも大きいこと、また絶縁③を 180°C で後硬化した試料は 80, 120°C においては疲労劣化されにくくなっており、ばらつきも少なくなっていることがわかる。後硬化により疲労劣化されにくくなったことから、絶縁③の高温での疲労特性が

図 8 絶縁①～③の圧縮疲労特性

Fig. 8. Compressive fatigue characteristics of insulations ①～③.

図 9 絶縁④, ⑤の圧縮疲労特性

Fig. 9. Compressive fatigue characteristics of insulations ④, ⑤.

劣るのは硬化が不十分なためと思われる。

絶縁④, ⑤の圧縮疲労特性を図9に示す。図から、25°Cでは全集成マイカの絶縁のほうが集成マイカ、はがしマイカ混用の絶縁より疲労特性が優れているが、80, 120°Cでは逆に集成マイカ-はがしマイカ混用の絶縁のほうが全集成マイカの絶縁より優れていると言える。絶縁⑤はタービン発電機において20年近くの優れた運転実績をもっているが、これに比べ全集成マイカの真空加圧含浸絶縁①, ②, ③は更に優れた疲労特性を有していると言える。

なお、図4と図8、図5と図9を比べると、高温においては同じ応力振幅では圧縮のほうが引張りより疲労劣化しやすいことがわかる。

〈3・2〉実規模コイルによるヒートサイクル劣化特性 ヒートサイクルによる疲労劣化を表わす指標と

図 10 実規模コイルを使ったヒートサイクルによる絶縁①～③の $\Delta \tan \delta$ の変化

Fig. 10. $\Delta \tan \delta$ change of insulations ①～③ due to thermal cycles using actual machine coils.

(a) ヒートサイクル試験 (45°C ± 160°C, 1,000回) 後

(b) 圧縮疲労試験 ($\sigma_a = 7.08 \text{ kg/mm}^2$, 25°C, 431,366回) 後

図 11 絶縁層に見られたクラック (絶縁③, 108×)

Fig. 11. Crack observed in the insulation wall (insulation ③, 108×).

なる $\Delta \tan \delta$ (定格電圧と 3kV での $\tan \delta$ の差) の変化を図10に示す。図から、 $\Delta \tan \delta$ の増加は絶縁③が絶縁①に比べ顕著であり、絶縁③のほうが絶縁①に比べヒートサイクルによる劣化が大きいことがわかる。ヒートサイクル試験を終了したコイルの絶縁層の絶縁破壊箇所近傍には、図11に示すように絶縁層の切出し片により圧縮疲労試験を終了した絶縁層に見られたものと極めて良く似た絶縁層のしゅう曲ならびに

きれつが観察された。従って、ヒートサイクルによるコイル絶縁の疲労は、主に圧縮疲労に基づくものと思われる。

図10で絶縁③のほうが絶縁①に比べヒートサイクルによる劣化が大きかったのは、図8で絶縁③が絶縁①に比べ80℃、120℃における圧縮疲労特性がかなり劣る結果と良く対応している。一般にコイルのヒートサイクルによる絶縁劣化は、絶縁層の疲労特性のほかに、導体と絶縁層の界面の接着、温度分布、絶縁の鉄心に対するすべりなどが大きく影響する。ここで、3種類の絶縁について行なったヒートサイクル試験は、コイルの寸法、支持固定方法が同じであり、温度分布鉄心に対するすべりなどはほぼ同じ条件と考えられる。また、導体と絶縁層の界面の接着は、絶縁層の疲労特性と類似の性質をもつものと考えられる。従って、今回のように異なる絶縁について同一の条件でヒートサイクル試験を実施した場合の絶縁劣化は、主に絶縁層の疲労劣化に支配されるものと思われる。このような理由で、絶縁層の切出し片による疲労劣化特性とコイルのヒートサイクルによる劣化傾向がよく対応したのであろう。

〈3.3〉 繰返し曲げ疲労特性 絶縁③の繰返し曲げによる破壊電圧 (BDV) の変化と温度の関係を図12に示す。ただし、モデル鉄心端部に生ずる最大ひずみは、室温にて振幅 (δ_{p-p}) 10 mm で 735μ 、8 mm で 575μ 、6 mm で 420μ 、4 mm で 280μ であった。 $\delta_{p-p}=10$ mm で繰返し曲げ回数 (N)= 5×10^6 回後のBDVは室温付近ではほとんど低下しないが、図13に示すように、この絶縁の弾性率が急激に低下し始める80℃付近で急激に低下し極小値を示す。更に、BDVは100℃を越えると徐々に低下が少なくなり、130～150℃ではほとんど低下が見られなくなり、180℃で

はまた低下が大きくなる。80℃でBDVの低下が大きいということは、図14に示すように80℃では N の少ない領域でBDVの低下を生じ、疲労が早く起きると言い換えることができる。なお、図12から80℃におけるBDVの低下は振幅を小さくすると共に少なくなることもわかる。以上述べた絶縁の弾性率が急激に低下し始める温度付近でコイル絶縁の繰返し曲げ疲労による劣化が極大になるという傾向は、絶縁③に限らず他の絶縁にも共通に見られた現象である。

本試験装置は、図3に示したように供試材料の一部が恒温槽から露出しているため、加振部とモデル鉄心部では温度差が生じる。このため、特に設定温度が絶縁層の弾性率が急激に低下する80℃付近の温度では、モデル鉄心端部の絶縁にコイルの長手方向に絶縁層の曲げ弾性率が変化することに起因した応力集中が起き、疲労劣化が大きくなることが考えられた。そこで、駆動装置も含め繰返し曲げ疲労試験装置全体を環境試験室に入れて、コイルの温度を長手方向に均一に

図13 絶縁③の絶縁層の弾性率の温度依存性
Fig. 13. Temperature dependence of elastic modulus for insulation ③.

図12 絶縁③の繰返し曲げ疲労試験後の破壊電圧 (BDV)
Fig. 12. Breakdown voltage of insulation ③ after repeated bending fatigue tests.

図14 繰返し曲げ回数と破壊電圧の関係
Fig. 14. Relationship between repeated bending cycles and breakdown voltage (BDV).

(a) 絶縁 ④ ($N=5 \times 10^6$ 回) (b) 絶縁 ⑤ ($N=10^6$) (c) 絶縁 ⑥ ($N=10^6$)絶縁 ③, 振幅=10 mm, $N=10^6$, 80°C, 6.1×

図 15 片振りによる繰返し曲げ疲労後の絶縁層の断面

Fig. 15. Cross sectional photograph of insulation wall after single sided bending fatigue test.

した条件で試験を行なった。その結果、この場合でも図 12 と同じ特性が得られることがわかった。なお、片振りにより行なった試験では、絶縁 ③ のみならず、マイカ構成の異なる絶縁 ④～⑥ のいずれの場合も圧縮側で絶縁破壊しており、繰返し曲げ疲労による劣化は圧縮疲労により起きるものと考えられる。

図 15 に、絶縁 ④～⑥ の片振りにより繰返し曲げ疲労を受けた絶縁層の断面写真を示す。試料はいずれも圧縮側のほうが損傷が顕著であることがわかる。全集成マイカの絶縁 ④ では、圧縮疲労によると思われる絶縁層のしゅう曲ならびに主にマイカテープ間に形成される樹脂層とマイカとの界面での微小なきれつが局所的に見られる。一方、はがしマイカ入の絶縁 ⑤, ⑥ では、はがしマイカのへき開によるはく離がかなり広範囲に見られ、絶縁の著しい膨らみが観察される。

以上の結果を踏まえ、絶縁の弾性率が急激に低下し始める温度付近でコイル絶縁の繰返し曲げ疲労による劣化が極大になるという現象について、絶縁 ③ を例にとって以下に検討する。繰返し曲げ試験によりモデル鉄心端に生じる最大応力 $\sigma_{\max}$ は、次の(2)式から求めることができる。

$$\sigma_{\max} = 3Eb\delta/2l^2 \dots \dots \dots (2)$$

表 2 温度と $\sigma_s/\sigma_{\max}$ の関係Table 2. Relationship between temperature and $\sigma_s/\sigma_{\max}$.

温 度 (°C)	$\sigma_{\max}$ (kg/mm ²)	σ_s (kg/mm ²)	$\sigma_s/\sigma_{\max}$
25	4.79	11.22	2.34
60	4.38	4.80	1.10
80	3.80	2.54	0.67
100	1.58	1.37	0.86
120	1.18	1.29	1.09
160	0.98	1.15	1.17

ここで、 E : 弾性率 (kg/mm²), b : 試料の厚さ (mm), δ : 駆動部における片側最大変位量 (mm), l : モデル鉄心端から駆動部までの距離 (mm)

そこで、絶縁 ③ について $\delta=4$ mm として(2)式から求めた $\sigma_{\max}$ と、図 3 のような圧縮疲労特性から 10^6 回で破断すると推定される応力振幅の 2 倍に等しい圧縮応力 σ_s とを比較した。

表 2 に疲労劣化に対する裕度の目安となる $\sigma_s/\sigma_{\max}$ と温度の関係を示す。同表の結果は、 σ_s と $\sigma_{\max}$ の温度依存性が異なるため、弾性率が急激に低下し始める 80°C 付近で $\sigma_s/\sigma_{\max}$ が最も小さくなり、この温度付近で圧縮疲労による劣化が最も起きやすいことを示唆している。表 2 の結果は図 12 の結果と比較的良好に対応しており、図 12 のようなコイル絶縁の繰返し曲げ疲労劣化と温度の関係は、曲げにより絶縁層に発生する応力とその応力における絶縁層の圧縮疲労特性を反映したものと言える。

絶縁層の切出し片による試験は、試料の作製が容易で、コイルを使った試験に比べ手軽に行なえる。この試験は、以上述べたとおり絶縁の選別に有用だけでなく、コイル絶縁のヒートサイクルや繰返し曲げによる疲労劣化現象を解明するうえでも有意義である。

4. ま と め

高電圧回転機に使われているエポキシマイカ絶縁の機械的疲労による劣化特性について、絶縁層の切出し片による引張りおよび圧縮疲労試験、実規模コイルのヒートサイクル試験およびコイル絶縁の繰返し曲げ疲労試験を行ない比較検討した結果、以下のことが明らかになった。

ヒートサイクルや振動による劣化は主に圧縮疲労によるもので、はがしマイカ入絶縁の場合ははがしマイカのへき開面で、集成マイカ絶縁の場合はマイカテープ間に形成される樹脂層とマイカとの界面できれつが発生、進展するために生ずる。一般に絶縁層の引張りおよび圧縮疲労は温度が高いほど起きやすくなる。た

だし、一定変位の繰返し曲げ試験の場合、絶縁の弾性率と疲労劣化特性の温度依存性が異なるため、弾性率が急激に低下し始める温度付近で疲労劣化が極大となる。なお、絶縁層中の樹脂の硬化が不十分なため高温での疲労劣化が大きい場合、後硬化により疲労劣化されにくくすることができる。また、絶縁層の切出し片による疲労試験は、その結果がコイル絶縁のヒートサイクル試験や繰返し曲げ試験による結果と良く対応しており、簡便な疲労試験方法として有用である。

これらの結果は、高電圧回転機絶縁の信頼性向上、機能評価法の合理化に重要な示唆を与えるもので、次世代の高電圧回転機絶縁システムの開発に役立つものと確信する。

最後に、本試験を行なうにあたって種々の有益な御

助言を賜った名古屋大学工学部教授 家田正之先生に謝意を表します。

(昭和 59 年 2 月 20 日受付, 同 59 年 10 月 18 日再受付)

文 献

- (1) H. Mitsui, K. Yoshida, Y. Inoue & K. Kawahara: "Mechanical Degradation of High Voltage Rotating Machine Insulation", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, EI-10, 533 (1981)
- (2) H. Mitsui, K. Yoshida, Y. Inoue & S. Kenjo: "Thermal Cyclic Degradation of Coil Insulation for Rotating Machines," *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-102, 67 (1983)
- (3) 三井・吉田・吉田:「曲げストレス下におけるエポキシマイカ絶縁の課題寿命特性」, 電気学会絶縁材料研究, EIM-83-95 (昭 58-8)
- (4) 三井・石坂・吉田・井上・山田・吉田:「回転機コイル絶縁の疲労劣化」, 第 16 回電気絶縁材料シンポジウム予稿集, p. 147 (昭 58-9)