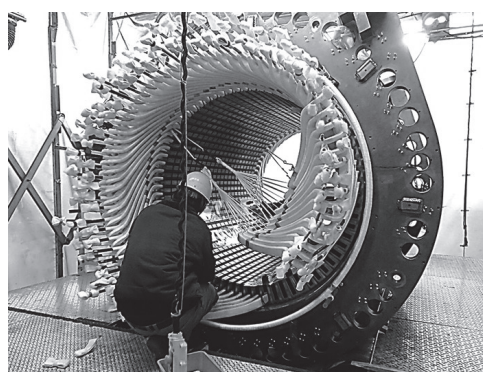


# 新形4極タービン発電機 固定子巻線絶縁開発

明石康行 Yasuyuki Akashi  
白須達也 Tatsuya Shirasu  
小川裕治 Yuji Ogawa

キーワード 絶縁技術, 高圧回転機（発電機）, 固定子, 巻線

## 概要



開発試作機 固定子巻線

近年、当社では電気機器出力増加や高効率化を目的とし、塊状突極形回転子を採用した4極タービン発電機を開発し、納入している。

4極タービン発電機は、当社最大製造可能容量75MVAを対象とし、更なる小形・高効率化のため固定子巻線絶縁システムの開発に着手した。

薄厚材料採用や、電氣的負荷集中部の負荷緩和を行うことで、固定子コイルの絶縁厚みを従来比10%以上低減し、かつIEEE 1553・IEC 60034評価で耐用年数20年以上を確保する絶縁システムを開発した。また、固定子コイルエンド部構造変更起因する負荷を評価し、十分な信頼性を確認した。

## 1 まえがき

当社は電気機器の出力増加・高効率化を目的とし、突極形回転子を採用した4極タービン発電機を開発した<sup>(1)</sup>。ここで更なる小形・高効率化を達成するために、コイルを保護する絶縁システムの薄厚化が求められた。絶縁は電気機器の耐久性に直結する重要要素であるが、耐久性向上のために絶縁を厚くすると、例えば固定子の場合スロット内占積率が低下し、鉄心の大型化や効率低下につながってしまう。

本稿では、75MVAクラス4極タービン発電機を想定して開発した定格電圧6kV級・11kV級・13kV級それぞれの固定子巻線絶縁システムを紹介する。

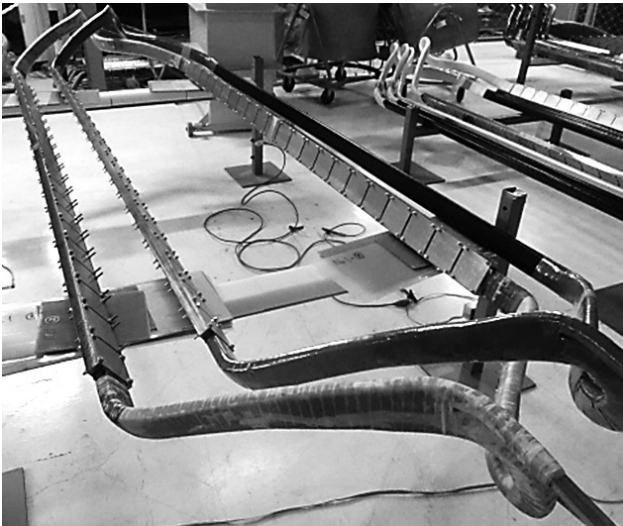
## 2 固定子巻線絶縁

### 2.1 固定子絶縁システム概要

**第1図**に75MVAクラスの亀甲形固定子コイルを示す。当社ではこの亀甲型のコイルを鉄心に挿入した後、真空タンク内でレジンに浸漬し、鉄心と一体で加圧含浸した後、加熱・硬化させて高圧固定子コイルを製作する。**第2図**に固定子スロット内コイル断面模式図を示す。模式図に示すとおり、コイル絶縁は大きく以下の要素から成る。

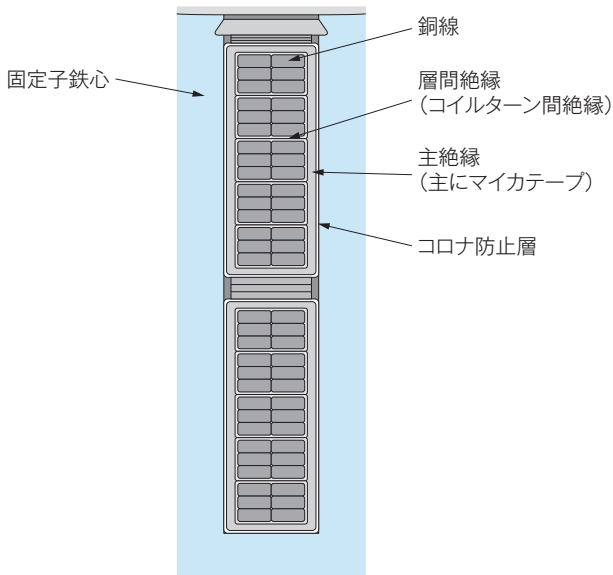
- (1) 層間絶縁層（コイルターン間の絶縁）
- (2) 主絶縁層（コイルの対地絶縁部）
- (3) コロナ防止層（鉄心間での放電発生を防ぐ）

このうち主絶縁は、基材にガラスクロスが使用された集成マイカテープ材を所定の回数、巻回している。今回の小形・高効率化では、テープ基材として従来よりも薄厚、かつ機械強度に優れたガラスクロス



第 1 図 75MVA クラス亀甲形固定子コイル

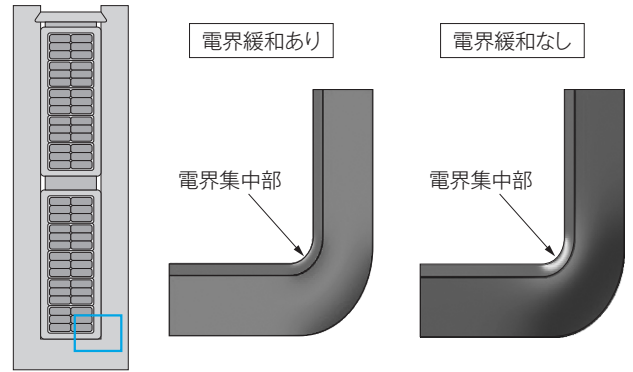
75MVA クラス 4 極タービン発電機固定子コイルを示す。当社最大サイズの亀甲形コイルである。



第 2 図 固定子スロット内コイル断面模式図

固定子スロットに挿入されたコイルの断面を示す。コイル絶縁は、主に層間絶縁・主絶縁・コロナ防止層から構成される。

を選定した。この新しいテープを従来よりも多数巻回することで主絶縁層を緻密化し、高電界・高強度な主絶縁層を形成しながら、絶縁層全体の厚みを低減した。一方で全体の厚みが縮小すると、従来以上に電界集中部に対する電界緩和が必要となる。そのため主絶縁以外の構成についても電界解析並びに試作検証を行い、電界集中部に対する適切な緩和材料



第 3 図 固定子鉄心内部電界解析

固定子鉄心内部の電界解析結果を示す。絶縁システムを最適化することで、電界集中部に対し電界緩和を行った。

を適用した。第 3 図に固定子鉄心内部電界解析を示す。

## 2.2 固定子絶縁システム耐久性評価

### 2.2.1 試験方法

開発した絶縁システムは、長期課電劣化試験（以下、V-t 試験）、ヒートサイクル試験で絶縁耐久性評価を行っている。V-t 試験は、IEC 60034-18-32 及び近年の国際的な評価の動向に合わせ、米国電気電子学会制定規格 IEEE 1553 による評価も行った。ヒートサイクル試験は従来どおり IEC 60034-18-34 に準拠した試験を行い、試験後 IEEE 1553 に即した課電試験で劣化評価した。第 1 表に耐久性評価基準（準拠した規格）を示す。

### 2.2.2 長期課電試験（V-t 試験）

第 4 図に定格電圧 11kV 級コイルの V-t 試験結果を示す。試験結果から定格電圧 11.5kV - 20 年以上の耐久性を有すると評価できた。なお、定格電圧 6kV 級・13kV 級コイルでも同様に評価している。

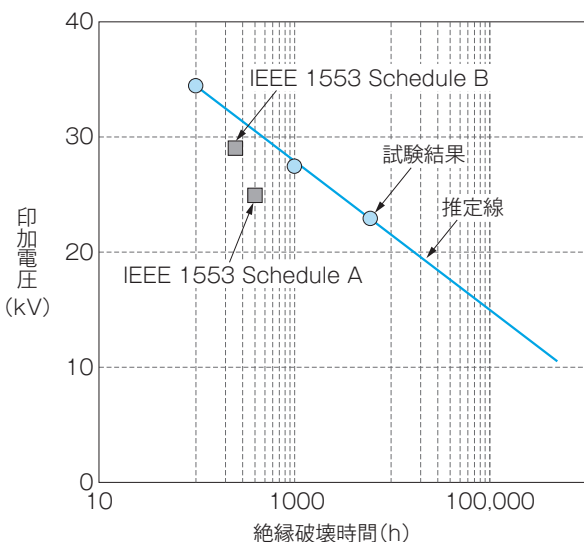
### 2.2.3 ヒートサイクル試験

真空加圧一体含浸式は固定子鉄心とコイルが強固に密着するため、前項のように優れた絶縁特性を示すが、線膨張係数の異なる材料同士が強く接着するため、熱応力によるストレスが大きくなる。第 5 図にヒートサイクル試験の様子を、第 6 図に温度サイクル条件を示す。IEC 60034 に基づき室温～155℃～室温を 1 サイクルとして、所定の熱サイクル経過

**第1表 固定子コイル絶縁 耐久性評価基準**

固定子コイル絶縁開発で、耐久性評価試験基準とした規格一覧を示す。

規格	試験項目	試験仕様
IEC 60034-18-32	長期課電試験 (V-t試験)	下記3条件結果から寿命推定 (1) 絶縁破壊時間 about 100h (2) 絶縁破壊時間 above 1000h (3) 絶縁破壊時間 above 5000h
IEEE 1553	長期課電試験 (V-t試験)	Schedule A: 2.17Un-400h以上 Schedule B: 2.53Un-250h以上 Un: 定格電圧
IEC 60034-18-34	ヒートサイクル試験	(1) 試験方法 ・加熱-冷却試験 ・室温 (30~50℃) ~耐熱クラス ・500サイクル以上 (2) 評価方法 ・非破壊試験 (tan δ, コロナ放電など) ・耐圧試験 (2Un + 1kV-1min), サージ試験 ・V-t試験
※参考 IEEE 1310	ヒートサイクル試験	(1) 試験方法 ・加熱-冷却試験 ・40℃~耐熱クラス ・500サイクル以上 (2) 評価方法 ・非破壊試験 ・耐圧試験, サージ試験 ・V-t試験



**第4図 定格電圧11kV級コイル V-t試験結果**

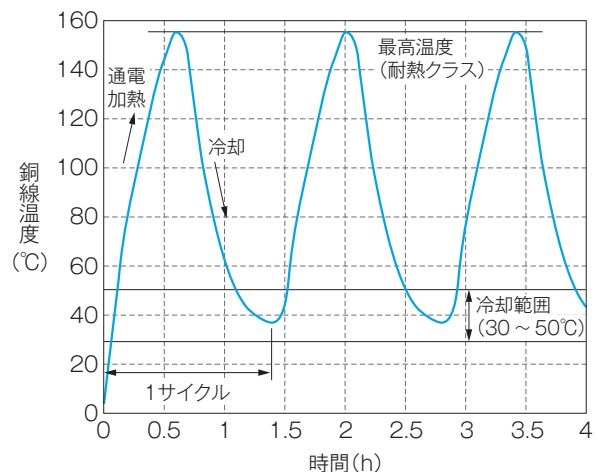
定格電圧11kV級 75MVAクラスコイルの長期課電試験 (V-t試験) 結果を示す。IEEE 1553を満たし、かつIEC基準評価では11.5kV-20年以上の耐久性と評価できる。

後のコイルに対して**第1表**のIEEE 1553課電試験を行い、耐久性を確認している。



**第5図 ヒートサイクル試験**

IEC 60034-18-34に準拠した通電ヒートサイクル試験を示す。機器運転時のコイル熱延びを模擬している。



**第6図 ヒートサイクル試験 温度条件**

**第4図**のヒートサイクル試験における具体的な温度変化を示す。室温(30~50℃)耐熱クラス(クラスFなら155℃)で最低500サイクルを実施した。

### 3 固定子鉄心外部(コイルエンド)絶縁

#### 3.1 コイルエンド絶縁概要

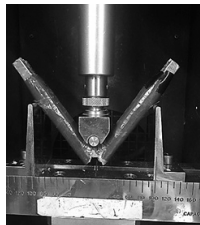
固定子鉄心の内部絶縁は、前項までに述べてきたとおりである。鉄心外部のコイルエンド絶縁は、これまでも湿気や汚損物に対する対策を行っているが、機械の小形・軽量化に伴い、コイルの成形精度



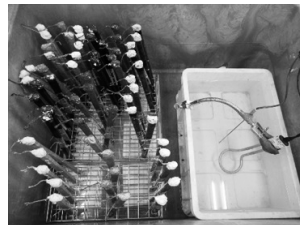
(a) コイルエンドV-t試験



(c) コイルエンドモデル熱劣化試験



(b) コイルエンドモデル3点曲げ試験



(d) コイルエンドモデル95%RH吸湿試験

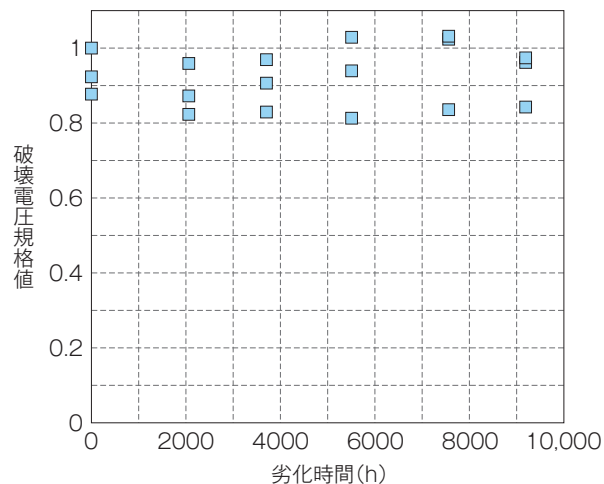
### 第7図 固定子コイルエンド絶縁 耐久性試験

固定子コイルエンドとそのモデルサンプルを使った絶縁性能評価試験を示す。課電寿命・耐熱性・機械強度・耐湿性を評価し、十分な性能を確認した。

や表面冷却による冷却性能の向上が求められている。前述の特性を良くするために、収縮シール性の高いテープによる絶縁処理を改良した。

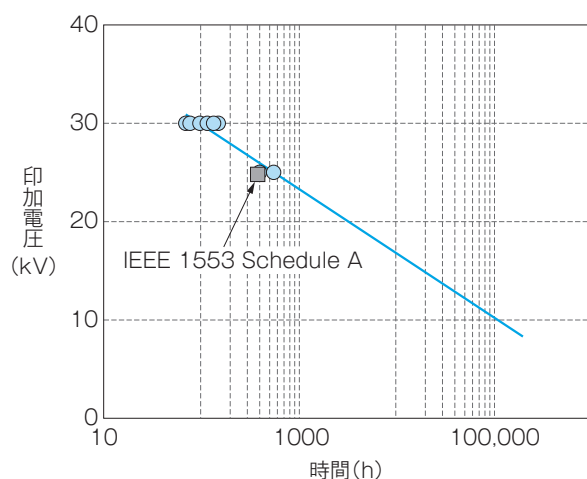
### 3.2 コイルエンド絶縁評価試験

コイルエンド絶縁の評価は定められた規格がないが、当社では長年の発電機製造実績に基づく独自の評価指標を定めている。第7図に耐久性試験の様子を、第8図と第9図にそれぞれ熱劣化試験、V-t試験の結果を示す。熱劣化試験は180℃・200℃・220℃の3条件で、それぞれ想定される運転温度に対し20年以上に相当する劣化試験を行った。第8図に示すとおり、180℃環境下で1年以上の熱劣化試験を行ったが、絶縁破壊電圧は未劣化時と比較し80%以上で、十分な熱的耐久性を有していた。200℃・220℃の熱劣化でも破壊電圧の著しい低下は見られなかった。また第9図に示すとおり、コイルエンド部ではIEEE 1553 Schedule Aの絶縁特性をクリアしており、熱的・電氣的にみても十分な耐久性を有していた。現在、課電試験を継続しているが、最終的には2項と同様にIECに準拠して試験し、寿命評価する。



### 第8図 コイルエンドモデルサンプル 熱劣化試験

コイルエンドモデルサンプルについて、熱劣化後、短時間絶縁破壊試験を実施した。未劣化品のうち最大破壊電圧を1.0としたとき、劣化しても0.8以上の破壊電圧を有しており、十分な耐熱性を持つと言える。



### 第9図 固定子コイルエンドV-t試験

固定子コイルエンド絶縁のV-t試験を示す。コイル成形時の絶縁損傷を考慮した評価を行う必要があるため、モデルサンプルではなくコイルを試験対象とした。IEEE 1553 Schedule A程度の性能を確認した。

### 3.3 コイルエンドモデル振動試験

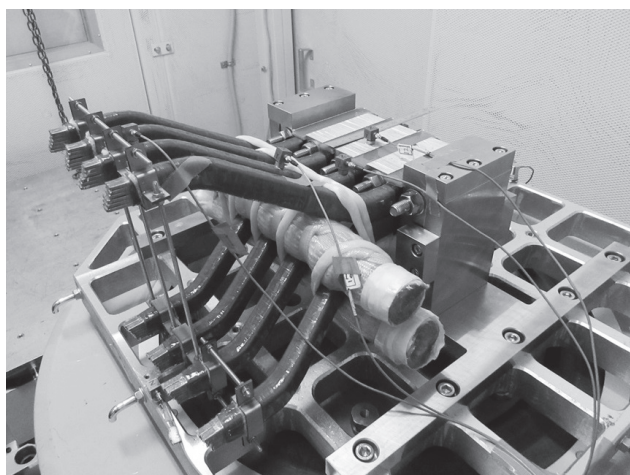
近年、計測技術の発達で、コイルエンドのような高電圧部位の振動を非金属系加速度センサで計測できるようになり、コイルエンドの振動計測に関する規格IEC 60034-32TSが発行され、コイルエンドの振動と劣化に対する評価が注目されている。

当社では絶縁システムや冷却技術の効果を確認するため、開発試作機を製作し評価試験を行った。開発試作機では冷却性能向上のため、固定子コイルエンドに構造上多くの変更点がある。これらがコイ



第10図 開発試作機 加速度センサ取り付け

開発試作機への光ファイバ式加速度センサ取り付けの様子を示す。緩みが生じず、かつ測定に影響が出ないようにセンサを試作機へ取り付け、実機振動データを取得した。



第11図 固定子コイルエンドモデル振動試験

固定子コイルエンドを模擬したサンプルの振動試験を示す。応力のかかる固定子鉄心端部や、絶縁摩耗の原因となり得る緊縛コードなどを模擬した加振試験を行い、信頼性を確認した。

ルエンドに及ぼす影響を考慮し、光ファイバーセンサ式加速度計を開発機に取り付け、実機運転時の振

動を測定した。その結果からコイルエンドモデルによる加速振動試験を行い、緊縛緩みや絶縁摩耗のないことを確認した。第10図に加速度センサ取り付けの様子を、第11図を固定子コイルエンドモデル振動試験の様子を示す。

## 4 むすび

突極形4極タービン発電機の固定子巻線絶縁システムについて、絶縁厚低減を図るとともに、その耐久性を確認した。また、固定子コイルエンドも十分な信頼性を持つことを確認した。

今後も更なる高性能・高品質な絶縁システムの開発を継続していく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

### 《参考文献》

(1) 太田・村井・石橋：「新形4極タービン発電機」, 明電時報345号, 2014/No.4, pp.10-14

### 《執筆者紹介》



明石 康行  
Yasuyuki Akashi  
基盤技術研究所  
高圧回転機の絶縁開発に従事



白須 達也  
Tatsuya Shirasu  
基盤技術研究所  
高圧回転機の絶縁開発に従事



小川 裕治  
Yuji Ogawa  
基盤技術研究所  
高圧回転機（発電機）の基盤開発に従事