

# 風力発電用永久磁石式発電機の絶縁技術

🔊 大形風力発電機，絶縁システム，耐久性

\* 服部 武 Takeshi Hattori   \* 高橋昭彦 Akihiko Takahashi   \* 古賀一滝 Kazutaki Koga

## 概要

風力発電機において，長期間故障無しで運転するために，固定子コイル絶縁の信頼性は極めて重要である。大形風力発電機の機器の構造や設置環境を考慮し，耐久性に優れた絶縁システムを開発した。

大形風力発電機の主な特徴は，「低速大容量で鉄心が長い」，「負荷側にコンバータがあり，サージ電圧が発電機に侵入する」，「海浜地区に設置されることも多い」などである。このため，絶縁システムの耐ヒートサイクル性と耐電圧性を高め，海浜環境での湿気や塩分の浸入に備えて耐汚損性を強化し，信頼性を確保した。



風力発電機の絶縁システム

## 1. ま え が き

風力発電機は高さ60～80mの塔の上に設置され，分解して点検や修理を行うことが難しいため，特に高い品質と長期信頼性が要求される。回転機の寿命に大きな影響を与えるコイル絶縁性能は，電氣的・熱的・機械的・環境的要因により，経年劣化する。本風力発電機では，長期間故障無しで運転する必要があるために，機器の構造や設置環境に応じて，以下の取り組みが重要となる。

- (1) 定格電圧（660V）は低いですが，電力安定供給用のコンバータが接続されているので，コイル絶縁の耐電圧性を高める。
- (2) 大形で鉄心が長いことから，溝内コイル絶縁に対するヒートサイクル（コイルの熱伸縮）の影響を緩和する。
- (3) 海浜環境での湿気や塩分の浸入によるトラッ

\*回転機システム工場

キングや絶縁抵抗の低下を防ぐため，耐汚損性を強化する。

本稿では，これら3点の取り組みを中心に，大形風力発電機の絶縁技術について紹介する。

## 2. 絶縁方式と構成

本風力発電機の固定子コイルには，平角絶縁電線で形成したコイルを採用している。素線にはマイカテープ巻電線を，対地絶縁には集成マイカテープを使用し，耐電圧性能を含めて信頼性の高い絶縁構成とした。更に，コイルエンドや接続部には，水分などの浸入を防ぐため高シール性絶縁処理を施している。絶縁方式には，当社の回転機で長年にわたり使用実績のある以下に示す2つの絶縁方式を適用し，両方式で良好な絶縁性能を実現している。第1表に各絶縁方式と工程を示す。

- (1) レジタイト絶縁方式      コイルをはめ込ん

### 第1表 絶縁方式と工程

レジスタイト絶縁方式とシールタイト絶縁方式の概略工程を示す。シールタイト絶縁方式ではレジン含浸工程が不要である。

レジスタイト絶縁方式	シールタイト絶縁方式
コイル成形／絶縁	コイル成形／絶縁
↓	↓
コイルはめ／接続	コイルはめ／接続
↓	↓
レジン含浸	
↓	↓
レジン硬化	レジン硬化
↓	↓
検査	検査
↓	↓
表面ワニス／乾燥	表面ワニス／乾燥

だ固定子を真空中でレジンに浸漬し、コイル絶縁にレジンを浸透させる方式で、耐湿性や耐部分放電特性などに優れた絶縁システムである<sup>(1)</sup>。コイル含浸レジンには、大形回転機用の耐熱性に優れたミューレジン#9000を適用した<sup>(2)</sup>。

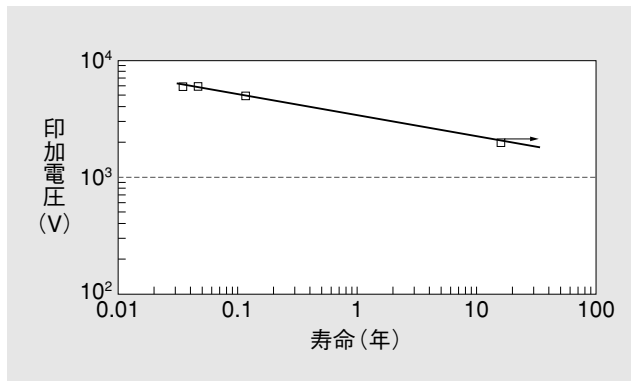
(2) シールタイト絶縁方式 プリプレグ方式とも呼ばれ、半硬化状態のレジンを含んだテープによりコイルを絶縁する。コイルを固定子にはめ込んだ後、加熱炉に入れて硬化させる。レジスタイト方式と同様に、諸特性に優れた絶縁システムが得られる。含浸設備が不要なため、施設や設備上の制約が少ない。

## 3. 絶縁特性

### 3.1 耐電圧性

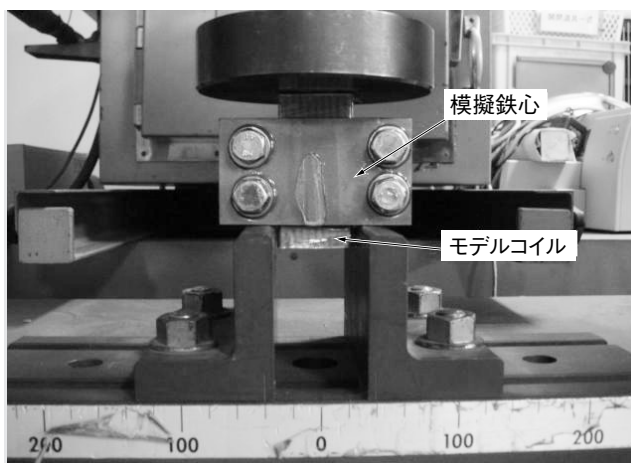
素線にはマイカテープ巻電線を、対地絶縁には集成マイカテープを使用し、絶縁システムの耐電圧性能を高めている。対地絶縁の耐電圧性は、使用環境を考慮した「汚損+高湿度」の過酷な条件下での課電圧寿命(V-t)特性により評価した。第1図にコイルエンド及び接続部に導電性汚損物(塩水+との粉)を塗布したモデルによる高湿槽内での課電圧寿命試験結果を示す。高圧固定子コイル絶縁と同様な傾きのV-t特性を有しており、過酷な条件下においても使用電圧における耐電圧寿命は十分な裕度がある。

ターン間絶縁については、固定子巻線に侵入するサージ電圧の大きさのほかに、周波数や波形も問題となる。そのため、ターン間の耐電圧試験に加えて、立ち上がり時間が速いインパルス電圧での部分放電試験を行って評価した。その結果、部分



第1図 課電圧寿命(V-t)特性

高湿槽内課電圧試験での印加電圧と寿命の関係を示す。電圧に対する劣化は少なく、耐電圧性は良好である。(2kV試験は周波数加速による。)



第2図 接着強度試験状況

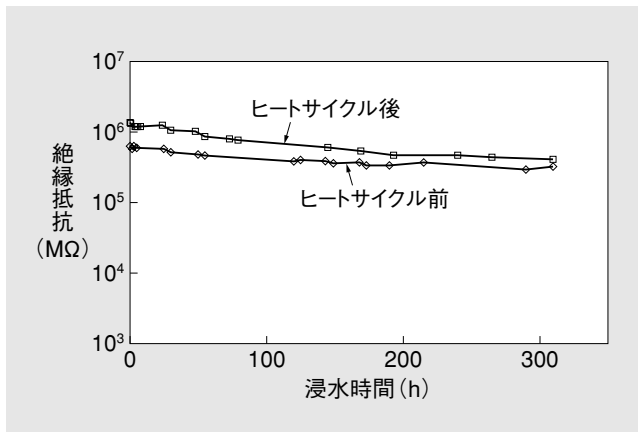
模擬鉄心を固定し、モデルコイルに荷重をかけ、コイル表面と鉄心間のせん断接着強度を測定した。接着強度は小さく、コイル表面と鉄心間が滑りやすいことを確認した。

放電開始電圧は、サージ電圧により想定されるターン間分担電圧よりも十分に高いことを確認した。

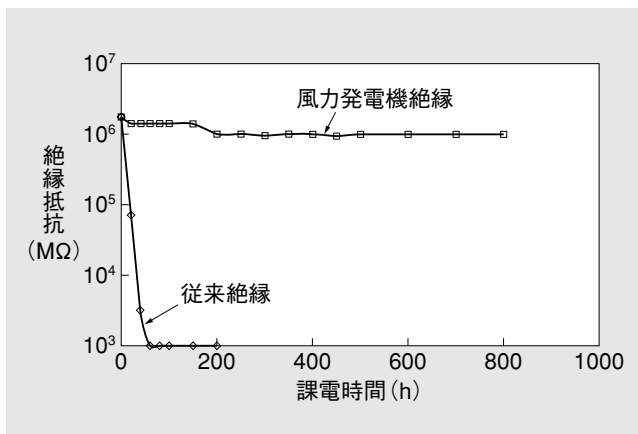
### 3.2 耐ヒートサイクル性

(1) ストレス緩和処理 コイルと鉄心が強く接着され、本風力発電機のように鉄心が長い場合、ヒートサイクル(コイルの熱伸縮)による溝内コイル絶縁の内部ストレスが大きくなる。大形回転機では、コイル表面に特殊な処理を施し、コイル表面と鉄心間を滑らせることにより、内部ストレスを緩和している<sup>(3)</sup>。本風力発電機では、固定子体格の小形化のため、処理層が従来方式よりも薄いストレス緩和処理法を開発した。第2図の接着強度試験状況に示すように、モデルコイル表面と鉄心間の接着強度を測定することにより、従来方式と同程度に接着強度が小さく、コイル表面と鉄心間が滑りやすいことを確認した。

(2) ヒートサイクル試験 ストレス緩和処理の効



**第3図 浸水中の絶縁抵抗**  
 コイルの絶縁抵抗と浸水時間の関係を示す。ヒートサイクル前後共に、高い絶縁抵抗を保持している。



**第4図 汚損下課電試験中の絶縁抵抗**  
 コイルの絶縁抵抗と汚損環境中課電時間の関係を示す。風力発電機絶縁は長時間にわたり高い絶縁抵抗を保持している。

果を確かめるため、模擬スロットを取り付けたコイルで、ヒートサイクル (50℃→150℃→50℃) 試験を行った。ヒートサイクルによる部分放電開始電圧の低下は小さく、ストレス緩和処理の効果は良好である。また、第3図にヒートサイクル試験前後で行った浸水試験の結果を示す。ヒートサイクル前後で、同程度に高い絶縁抵抗を保持しており、ヒートサイクルによるシール性能の低下も見られない。

**3.3 耐汚損性**

海浜環境で使用される場合は、湿気や塩分が発電機内に浸入する可能性がある。トラッキングの発生や絶縁抵抗の低下を防ぐため、コイル表面に高シール性材料を適用した。また、弱点となりやすい接続部の絶縁には、すきまが発生し難いシール構成を採用した。

コイル絶縁の耐汚損性を評価するため、モデル

コイルに導電性汚損物 (塩水+との粉) を塗布し、高湿槽内で長時間の課電試験を行った。第4図に一定時間ごとに測定した絶縁抵抗の変化を示す。長時間にわたり高い絶縁抵抗を保持しており、厳しい汚損環境下での使用に耐えることができる。

**4. む す び**

以上、紹介したように、本大形風力発電機の絶縁システムは長期間故障無しで運転するための良好な耐電圧性、耐ヒートサイクル性、耐汚損性を持つ。今後も、お客様のご要望や使用環境に適応した高品質・高信頼性の大型風力発電機絶縁を開発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) 熊田, 横野, 中村: 「大形回転機用レジタイト絶縁」, 明電時報151号, 1980/No.2, pp.33~36
- (2) 徳田, 陣内: 「最近の含浸ワニス・レジン及びシート技術について」, 明電時報273号, 2000/No.4, pp.20~24
- (3) 徳田, 山本: 「大形回転機用レジタイト絶縁の基礎特性」, 明電時報163号, 1982/No.2, pp.30~34

《執筆者紹介》



服部 武 Takeshi Hattori  
 回転機巻線の生産技術開発に従事



高橋昭彦 Akihiko Takahashi  
 回転機巻線の生産技術開発に従事



古賀一滝 Kazutaki Koga  
 回転機巻線の生産技術開発に従事