

## 特集論文

タービン発電機の性能向上に貢献する  
最新の技術開発動向

竹崎慶太郎\*

Keitaro Takesaki

奥田龍弥\*

Tatsuya Okuda

梶原 剛\*

Go Kajiwara

Latest Technology Development Trends Contributing to Performance  
Improvement of Turbine Generator

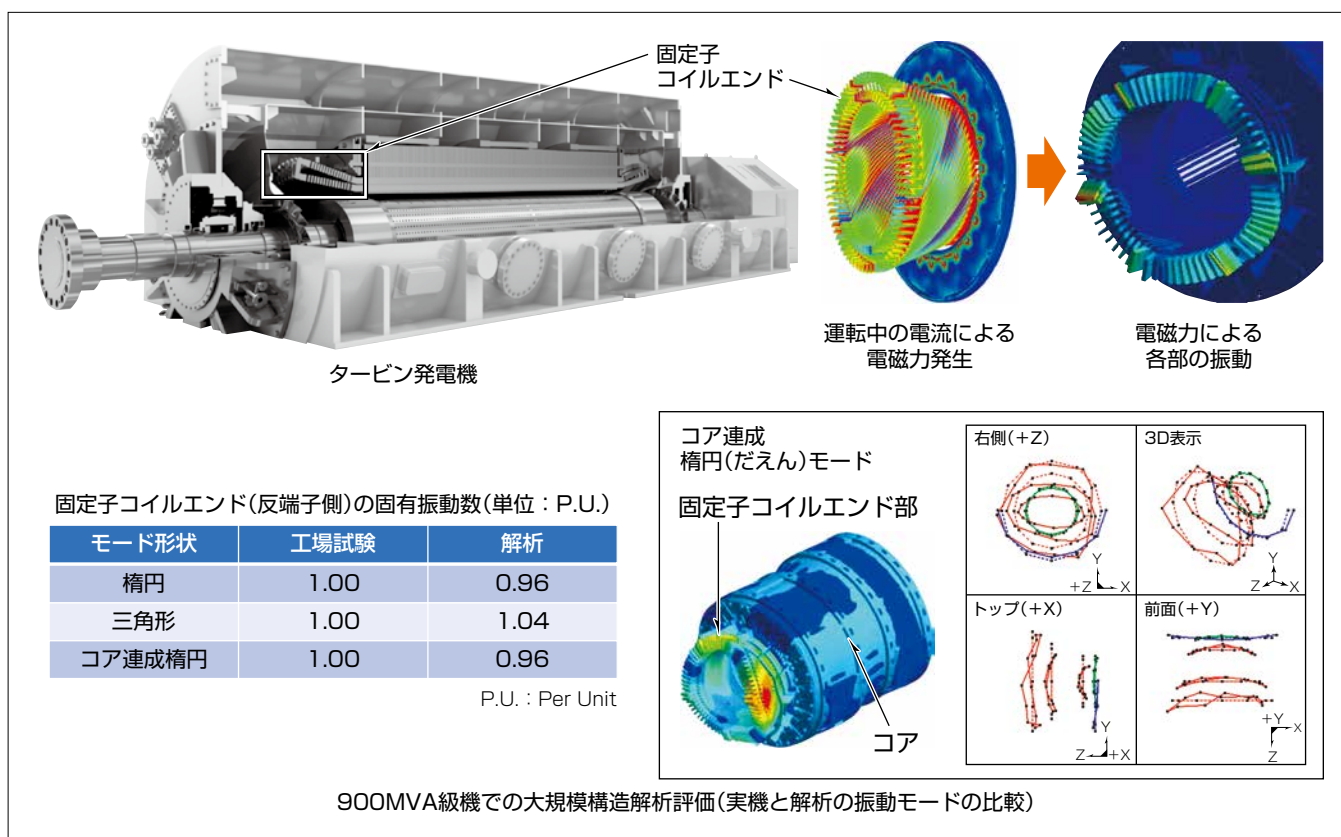
## 要 旨

近年、火力発電プラントでは、再生可能エネルギー導入拡大に伴う調整力の向上や稼働率向上による低コスト化の取組みが活発であり、タービン発電機の新設市場では、単機大容量化・部分負荷効率の向上、アフターサービス市場では、増出力化・定期点検の低頻度化を狙った信頼性向上などの要求が高まっている。発電機の大容量化や既設機改造は、電磁加振力の増加、発電機を構成する機械構造物の運転時振動モードの複雑化を招くことが多く、固定子各部の振動抑制策の事前検討が重要になる。また発電機の長期運用信頼性確保には、負荷運転時の各部品の固有振動数や振動応答・振動モードなどの挙動を正確に把握し、機械的信頼性を高めることが重要になる<sup>(1)</sup>。

三菱電機では大規模構造解析(発電機丸ごと解析)を用い

て、固定子コイルエンド周り支持構造の細部までを適切にモデル化することで、各部の連成を考慮した振動モード解析が可能になる高精度な評価技術を開発した<sup>(2)</sup>。この技術を900MVA級水素間接冷却発電機設計に適用し、工場試験結果と比較した結果、この技術は信頼性の高いコイルエンド設計の実現とこれまで設計評価が困難であった振動モードとその固有振動数について実機挙動を忠実に再現可能であることを確認した。

この技術の活用によって、新設機の性能向上だけでなく既設機改造時の付加価値向上を含めて、タービン発電機の運用効率最適化及び信頼性向上の要望に対応して、今後の電力安定供給に引き続き貢献していく。



## タービン発電機への大規模構造解析評価の導入

大規模構造解析を用いたタービン発電機固定子コイルエンド周り支持構造の振動評価技術を開発した。この技術を900MVA級水素間接冷却発電機の構造設計に適用し、設計想定値と工場試験結果を比較した結果、これまで設計評価が困難であった複雑な連成振動モードが再現でき、その固有振動数も正確に予測できることを確認した。

## 1. ま え が き

近年、火力発電プラントでは、再生可能エネルギー導入拡大に伴う電力系統調整力の向上や稼働率向上による低コスト化の取組みが活発になっており、タービン発電機では、新設市場は単機大容量化・部分負荷効率の向上、アフターサービス市場でも増出力化・定期点検の低頻度化を狙った信頼性向上などの要求が高まっている。タービン発電機の大容量化や既設機のアップグレード改造は、電磁加振力の増加、発電機を構成する機械構造物の運転時振動モードの複雑化を招くケースがほとんどであり、固定子各部での振動抑制策の事前検討が重要になる。また、発電機の長期運用信頼性を確保するためには、負荷運転時の発電機各部品での固有振動数や振動応答・振動モードなどの挙動を正確に把握し、機械的信頼性を高めることが重要になる。

このため、大規模構造解析(発電機丸ごと解析)を用いて、固定子全体の細部までを適切にモデル化することで各部の連成を考慮した振動モード解析を可能にする、固定子コイルエンド周り支持構造の高精度な評価技術を開発した。

本稿では、タービン発電機の性能・信頼性向上に貢献する最新技術動向の一例として、固定コイルエンド部を対象とした評価技術について述べる。

## 2. 固定子コイルエンド部の振動評価最新技術

図1に示すように、タービン発電機は回転子と固定子で構成しており、固定子はコア(鉄心)とコイル(巻線)に分けられる。コイルの直線部はコアに設けた溝に挿入し、端部のコイルエンド部は外径側に広がった円錐(えんすい)形構造をしている。さらに、コイルエンド部の励磁側には発電

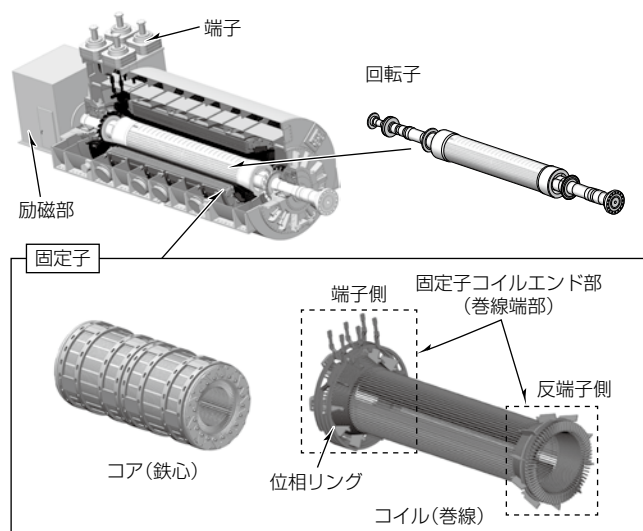


図1. タービン発電機の基本構造

機端子とコイルエンド部を接続するための位相リングを取り付けた構造になっている。

### 2.1 固定子コイルエンド振動評価の重要性

発電機負荷運転中の固定子コア・コイルには電磁力が発生しており、この電磁力によって固定子コア・コイルは常に振動している。固定子コイルエンド部が共振等によって過大に振動すると、コイル損傷やそれに付随する短絡事故に発展することがある。このような事例では図2に示すような支持部材の劣化や損傷に伴う振動増加が経時的に確認されることが一般的に知られており、短絡事故に発展した場合は発電プラントの運用に支障をきたす可能性があることから昨今では予防保全の観点から振動計設置によるコイルエンド部振動の常時監視の需要も高まってきている。そのため、昨今の高機能の発電機の設計段階では、長期運用信頼性を確保するために固定子コイルエンド部の固有振動数・振動モード等について入念な評価を実施することが極めて重要である。

### 2.2 固定子コイルエンド部の振動モード評価

発電機運転中のコイルエンド部は、回転子の磁気吸引力によるコアの楕円振動とコイルエンド部に発生する電磁力によって加振されるため、発電機基本周波数の2倍の周波数を持つコアの楕円振動モードと、それに同期するコイルエンド部楕円振動モードの固有振動数が一致した場合に振動が大きくなることが知られており、この一致を回避することが必要である。また昨今の発電機大型化に伴って、固定子コイルエンド部とコア端部、位相リングが連成する複雑な振動モードが現れてきており、それらの振動応答が無視できないケースもまれに経験することがある。

実際に過去の発電機工場試験時で、コイルエンド部振動の制御を目的とした支持剛性の調整の際に、ほとんど期待効果が得られなかったこともあり、これは振動計測部だけの局所的な振動ではなく、かつこれまで評価対象としていなかった複雑なモードの連成による新しい知見であることが最近になって分かってきた。

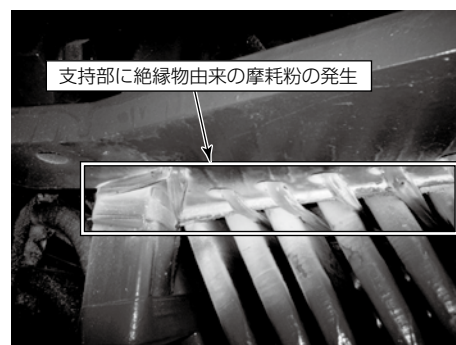


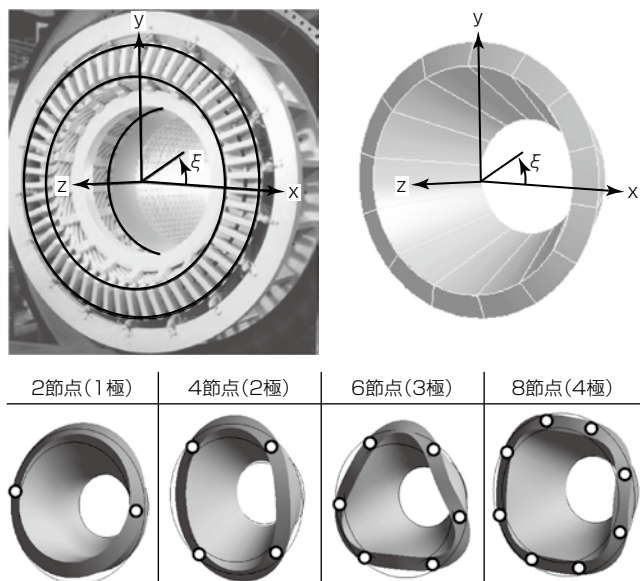
図2. 固定子コイルエンド支持部材劣化の事例



このようなコイルエンド振動モードは、新たに制定されたIEC(International Electrotechnical Commission)60034-32(2016)での“グローバルモード”(図3)に相当し、ここに規定されたガイドラインに沿う形で評価を進めることが妥当である。具体的には、グローバルモードの場合にはある振動モードの固有振動数が発電機基本周波数の2倍と一致したとしても必ずしも振動応答が現れるものではなく、その許容可否は当該振動モードの剛性・加振力・減衰にも左右され、結果の解釈については製造メーカーへ照会することを推奨するとの方針が示されている。これは、各製造メーカー共通の判定基準が存在しないことと同意であるため、当社はコイルエンド部の信頼性向上に向けて過去の実測データ分析による有害になり得る振動モードの抽出・評価を行い、その結果、コア連成楕円及び位相リング連成楕円の2点の振動モードの固有振動数を追加評価対象と定めた。

## 2.3 大規模構造解析技術の開発

発電機負荷運転中の固定子コイルには電流が流れており、固定子コイルの温度上昇が生じる。温度が上昇すると材料の物性値が変化して固定子コイルエンドの剛性・固有振動数が増減するため振動モードが変化する。そのため電磁気・熱・振動の3種類の物理場を考慮しなければ正確な固有振動数・振動応答を予測できないが、従来の解析手法では計算機性能の制約から実物コイルエンドを簡素化したモデルを使用する必要があったため、電磁気・熱・振動の連携解析はもとより、コイルエンドがコア端、位相リングと連成するモード自体の導出も不可能であり、設計段階で実機での振動挙動の様相を正確に把握することが難しいという課題があった。



出典：IEC60034-32(2016)

図3. 固定子コイルエンド部振動のグローバルモード

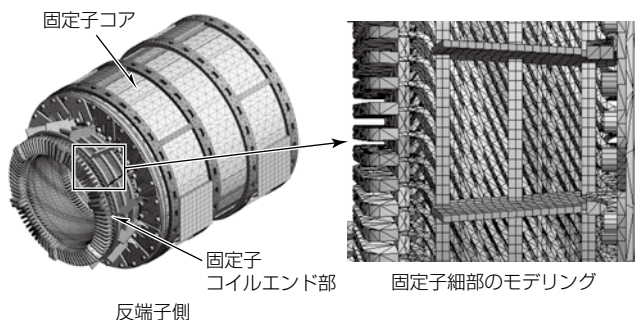


図4. 大規模構造解析モデル

近年、計算機の性能向上によって複雑な構造で要素数の多いモデルの計算時間が大幅に短縮された。そのため、当社ではコイルエンド部の支持構造の高精度な評価を目的にして電磁気・熱・振動の大規模化構造解析(発電機丸ごと解析)を用いた評価技術を開発した。従来の解析では簡略化してモデル化していた部位も図4に示すように固定子全体の細部まで適切にモデル化することで、電磁界解析で求めた電磁力分布や電磁損失分布を入力としてモデルへマッピングし、振動応答とともに複雑に連成した振動モードが表現できる大規模解析を構築した。特長は次のとおりである。

- (1) メッシュ分割数・要素積分方法・固有値解法を適切に設定することで、不安定モード(アワーグラスモード)の発生を抑制して解析結果取得までの時間を最短化する。
- (2) 電磁気・熱・振動の連携解析による振動応答評価、コア連成楕円モードと位相リング連成楕円モードの導出及び設計段階での評価が可能である。

## 3. 900MVA級水素間接冷却発電機設計への適用

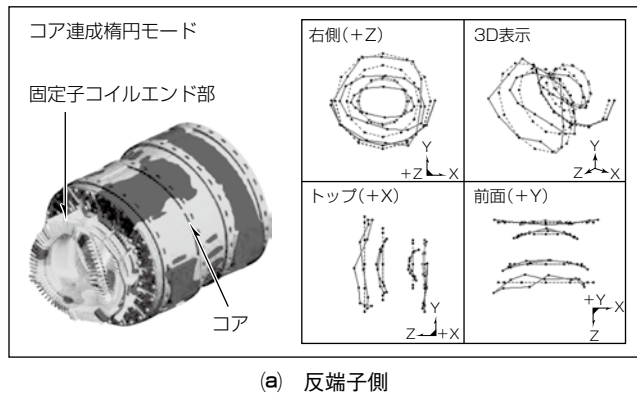
大規模解析技術構築・過去実測データの詳細分析によって設計段階で固有振動数とその振動の応答を評価することで、支持構造変更や剛性強化などの適切な対策による固有振動数の調整や振動応答の低減を発電機の製作着手前に実現することが可能になった。

その成果を2019年に製作・出荷した一軸ガスタービン・コンバインドサイクル向け900MVA級水素間接冷却発電機の固定子コイルエンド設計に適用した。その結果、機械的信頼性の高いコイルエンド構造を実現し、製作過程での固有振動数計測・評価、工場試験による振動計測・評価を経て出荷を完了した。主な成果は次のとおりである。

- (1) コイルエンド部の各振動モードについて、設計想定値と工場試験結果を比較した結果、モード形状は一致し、固有振動数も最大10%程度の誤差と解析精度が十分高いことを確認した(図5)。
- (2) 以前から評価対象であったコアの楕円振動モードと同期する典型的なコイルエンド部楕円モードに加えて、こ

反端子側の固有振動数(単位:P.U.)

| モード形状  | 工場試験 | 解析   |
|--------|------|------|
| 楕円     | 1.00 | 0.96 |
| 三角形    | 1.00 | 1.04 |
| コア連成楕円 | 1.00 | 0.96 |



端子側の固有振動数(単位:P.U.)

| モード形状     | 工場試験 | 解析   |
|-----------|------|------|
| 楕円        | 1.00 | 0.94 |
| 三角形       | 1.00 | 1.11 |
| 位相リング連成楕円 | 1.00 | 1.00 |

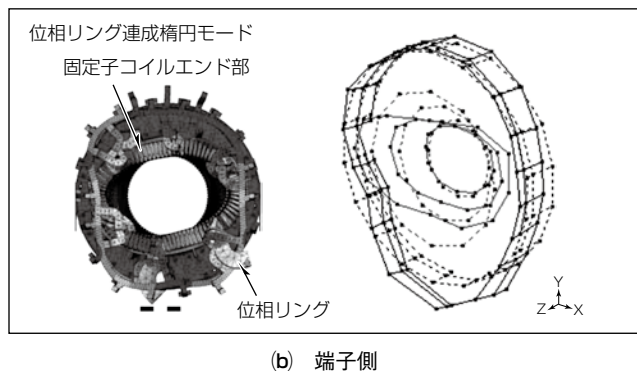


図5. 実機と解析の振動モード比較

れまで把握が困難であったコア連成楕円モードと位相リング連成楕円モードの固有振動数についても実機挙動を正確に再現可能であり、またこれらの連成モードの固有振動数は設計想定どおり発電機基本周波数の2倍の周波数近傍を回避できていることを確認した。

- (3) 工場試験で負荷運転想定時のコイルエンド部の振動値は設計想定値と10%程度の誤差でおおむね一致し、当社判定基準を十分満足することを確認した。

#### 4. 既設機の付加価値向上に向けた取組み

既設機運用効率の最適化に際して、現在、延命化や増出力化といった、既設機に対する各種アップグレード改造の試みがユーザー・メーカー一体になって進められている。仮にアップグレード改造として増出力化を実施した場合、構造的な差異に加えて運転中の固定子コイルエンド温度や

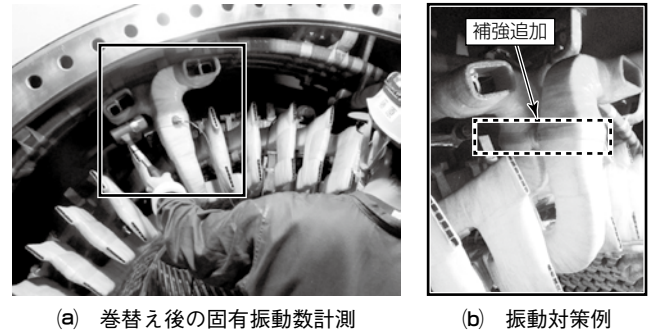


図6. 既設機でのコイルエンド振動対策

電磁加振力が増出力前から変化することになるため、振動モードや固有振動数が変化して図6に示すように現地で追加のコイルエンドの振動対策が必要になることがある。今回開発した大規模構造解析技術は、既設機のアップグレード改造での固定子コイルエンド剛性や固有振動数評価に対しても有効であり、この解析技術の投入によって事前に改造工事の影響をより正確に評価して効果的な対策構造を決定しておくことで発電機信頼性を確実に高めることが可能になる。固定子コイルの巻替え(既設固定子コイルを除去し、新しい固定子コイルに更新する工事)時では、発電機の増出力や効率向上といった機能向上も見込めることから、早期に巻替え工事を行うことで既設発電機の付加価値向上に加えて、その後の運用での長期信頼性確保及び発電機稼働率向上を同時に実現することが可能である。

#### 5. む す び

近年の火力発電プラントでの新設市場の発電機大容量化・部分負荷効率の向上、アフターサービス市場の増出力化・定期点検の低頻度化を狙った信頼性向上などの要求を受けて、大規模構造解析(発電機丸ごと解析)技術を開発した。この技術の世界最大級になる900MVA級発電機の設計に適用し、機械的信頼性の高いコイルエンド構造を設計想定値との差も少なく十分高い精度で実現した。また、この技術は既設機のアップグレード改造工事を実施する際の事前評価にも有効であり、適切な構造設計を施すことで、既設発電機の付加価値向上と同時に、長期信頼性確保・発電機稼働率向上への寄与も実現することが可能になる。

この技術の活用によって、タービン発電機新設機の性能向上と既設機改造時の付加価値向上及び信頼性向上を実現し、今後の電力安定供給に引き続き貢献していく。

#### 参考文献

- (1) 奥田龍弥：大規模解析によるタービン発電機固定子コイルエンドの信頼性向上，火力原子力発電技術協会 創立70周年記念火力原子力発電大会 (2020)
- (2) 柳館直成，ほか：製品開発を支える振動・音響解析技術，三菱電機技報，93，No.6，379～382 (2019)