

発電機の信頼性向上に貢献する予防保全技術

小倉一晃*
梶原 剛*

Preventive Maintenance Technology for Enhancement of Generator Reliability

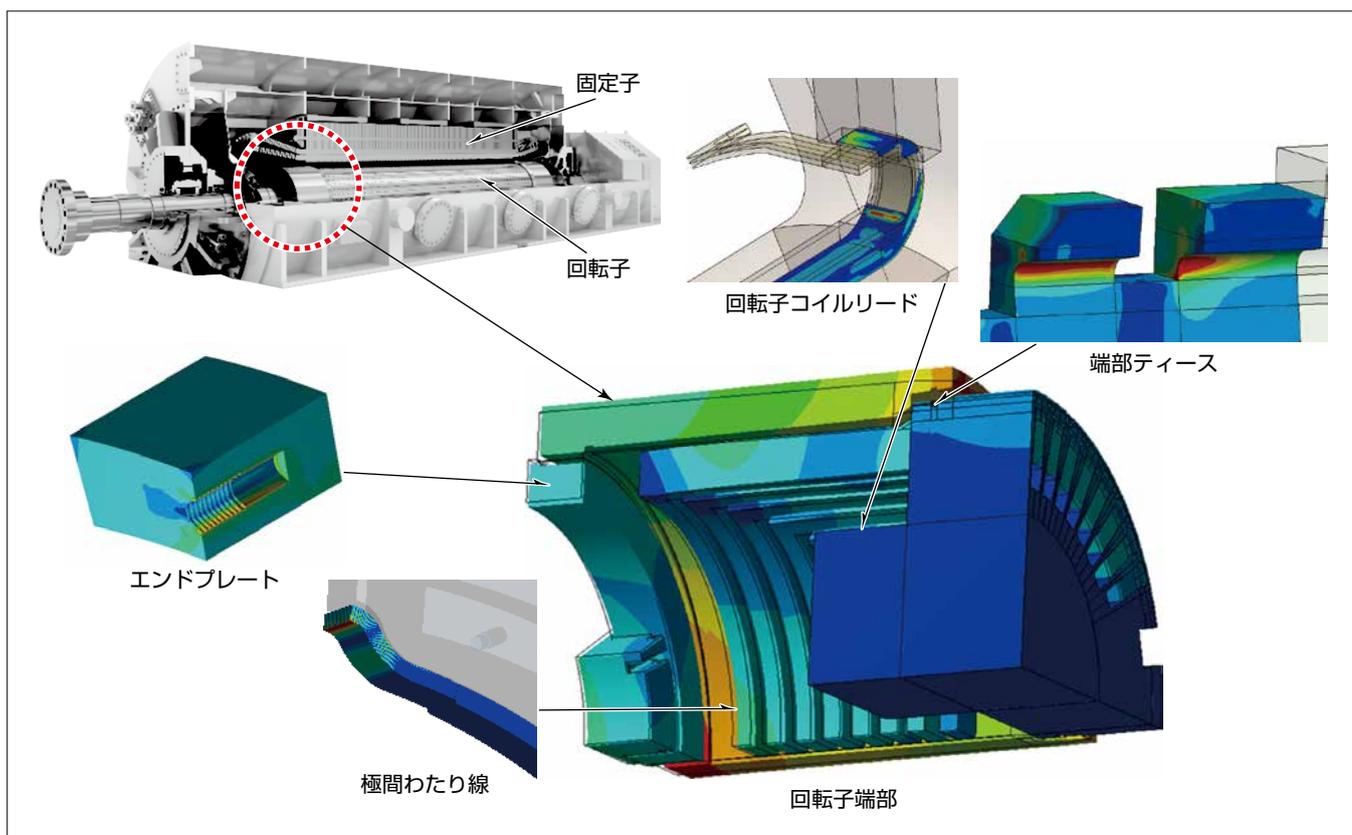
Kazuaki Ogura, Go Kajiwara

要 旨

近年、太陽光発電システムに代表される再生可能エネルギーを利用した発電システムの普及が着実に拡大している。それらの発電量は変動が大きいため、電力安定供給には系統の負荷調整力や予備力が必要となる。火力発電に求められる役割は、従来のベースロード運用から、出力調整用のピーク運用へと変化している。発電機をこれまでのように長期間連続運転せずに一日の中で必要な時間だけ運転(Daily Start and Stop : DSS)させる運用となるため、今後の火力発電プラントでの発電機の起動停止回数は従来と比べて確実に増加することが予想される。特に発電機の回転子部品は、起動停止回数の増加に伴って各部に作用する遠心力による繰り返し負荷の回数が増加するため、疲労に

よる破損リスクの増大を避けられない。そのため、三菱電機では、発電機の今後の長期間運用での高信頼性を確保するため、破損が懸念される部品を抽出し、最新解析技術を駆使した高精度な寿命評価技術の開発を進めている。

また、発電機運用が過酷化していく一方で、定期点検に割かれる費用と機会は削減傾向にあるため、予防保全技術の重要度は増している。破損リスクの予知だけでなく、定期点検期間内で短時間かつ確実に損傷を検知する点検技術も不可欠であり、回転子部品の新しい非破壊検査技術、及び予防保全工事での付加価値向上を実現する新規開発を進めている⁽¹⁾。



タービン発電機の回転子端部モデルと変位・応力分布

回転子端部の大規模三次元解析モデルを使用して計算した半径方向変位分布(右下図)、及びこれらの結果を基に計算した回転子各部の応力分布(右上・左下図)。

1. ま え が き

近年、再生可能エネルギーを利用した発電システムの普及が着実に拡大しており、火力発電に求められる役割は、従来のベースロード運用から、出力調整用のピーク運用等へと変化している。発電機を一日の中で必要な時間だけ運転(DSS)させる運用となるため、タービン発電機の起動停止回数は従来と比べて確実に増加することが予想される。特に発電機の回転子部品に関しては、起動停止回数の増加に伴って各部に作用する遠心力による繰り返し負荷の回数が増加するため、疲労による破損リスクの増大を避けられない。そのため発電機の今後の長期間運用での高信頼性を確保するため、最新解析技術を駆使した高精度な寿命評価技術の開発を進めている。さらに、回転子部品の新しい非破壊検査技術、及び予防保全工事で付加価値向上を実現する新規開発の一例についても、本稿で併せて述べる。

2. 発電機のDSS運用と回転子部品の低サイクル疲労

DSS運用とは、火力発電プラントを電力需要ピーク時の負荷調整用等として使用し、一日当たり約一回のサイクルで起動と停止を繰り返す運用方法である。この運用を継続することによって起動停止回数は数年で千回に達する。

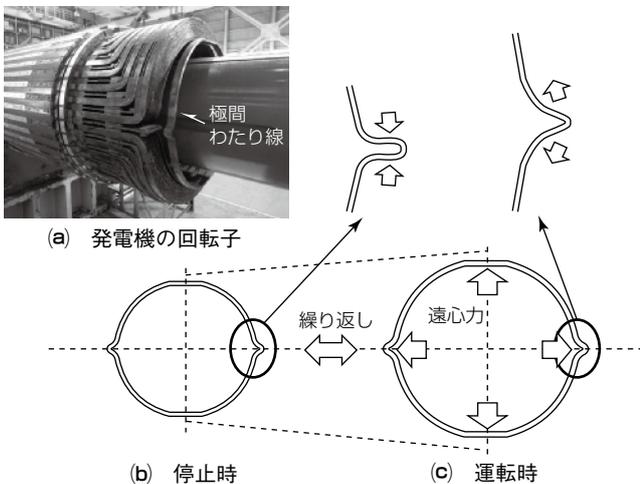


図1. 起動停止に伴って回転子部品に発生する繰り返し応力

発電機運転時、回転子各部には遠心力や、温度上昇による熱応力が発生するが、その応力レベルが材料の降伏点を超えない程度であっても、発電機の起動停止に伴って応力が振幅となって繰り返し作用した場合、低サイクル疲労破壊が生じる可能性がある。一般的に低サイクル疲労は 10^4 回レベルで破壊が発生するものを指すが、破壊のしきい値は繰り返し回数と応力振幅の大きさで決定するため、応力の大きさによっては数千回程度で破壊が生じることも起こり得る。

発電機の起動停止に伴って回転子部品に発生する繰り返し応力の例を図1に示す。極間わたり線は一円構造であるため、運転中には自身の遠心力によって周方向に引張力が発生する。さらに一部で変形を吸収する構造になっているため、図2(a)に示すような応力集中箇所が存在する。この状態で運転を行っても瞬時に部品が破損することはないが、発電機の起動停止に伴い応力振幅の回数が増加すると、当該部に亀裂が生じる可能性がある。図2(b)に示すとおり、計算上の応力集中箇所と実際に破損した箇所はよく一致する。このように、発電機の起動停止回数が増加する場合は、応力集中箇所の応力振幅を正確に計算して低サイクル疲労強度を評価することが重要となる。

3. 回転子部品の大規模三次元解析技術

3.1 発電機回転子の端部構造

図3にタービン発電機の回転子断面形状を示す。回転子は主に回転子コイルと、回転子軸(シャフト/ティース)、及びウェッジで構成され、シャフトの軸方向溝(スロット)の内部にコイルとウェッジが格納される構造である。運転時、コイルの遠心力はウェッジを介してティースが保持するため、ティース及びウェッジには引張力が作用する。停止時にはこの引張力が除荷され、起動停止に伴い応力振幅が発生する。図4に回転子端部構造を示す。リテーニングリングは回転子端部コイルの遠心力を保持する部品であり、運転時に離間しないようシャフト及びエンドプレートに十分強く嵌(は)め合う構造(焼嵌(やきば)め)を採用している。そのため、リテーニングリングとシャフト又はエンドブ

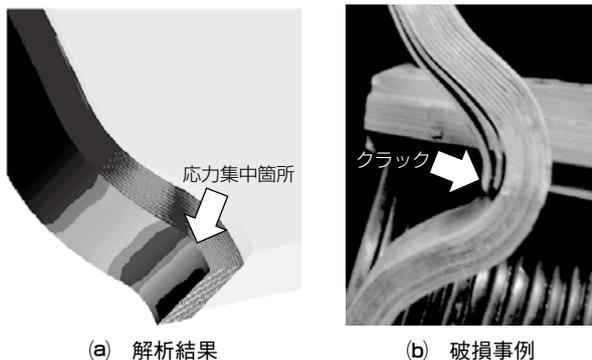


図2. 低サイクル疲労による回転子部品の破損事例

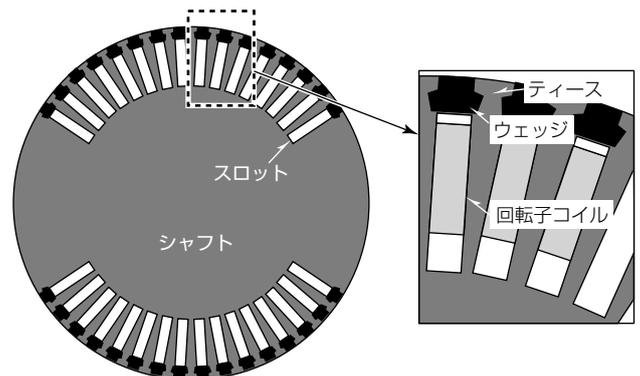


図3. 回転子の断面形状

レート嵌合(かんごう)部では停止時に焼嵌めによる圧縮力が作用し、運転時には遠心力による引張力が作用する。つまり起動停止に伴って端部ティースやエンドプレート、リテーニングリングに応力振幅が発生する。

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、リテーニングリングや回転子コイル等を含む回転子端部構造を三次元で丸ごとモデル化した構造解析が実用レベルで可能になった。これら背景に伴い、過去の要素検証の再評価や実機運用状態との比較評価を通じ、低サイクル疲労寿命に影響する先に述べた回転子各部の複雑な形状の局所応力のより正確な評価が可能になり、各 부품の寿命評価の高精度化を実現した。

3.2 三次元解析結果及びその妥当性

図5に回転子端部の構造解析モデル、図6に発電機起動停止1回当たりの回転子端部各部の応力振幅値(運転時と停止時の応力変動幅)を示す。矢印で示される部分が応力集中箇所であり、起動停止の繰り返しに伴う低サイクル疲労による破損リスクが高い部分と一致する。回転子端部ティース、エンドプレート、リテーニングリングの応力は周方向に分布を持ち、軸方向についても従来の二次元解析とは異なる傾向が得られており、これは当初想定に応力振幅値を上回る結果であった。これは実機の低サイクル疲労破壊に対する許容可能な起動停止回数は想定よりも小さいことを示しており、三次元解析によって得られた新たな知見である。この結果から、従来解析で周方向に対称と仮定していた回転子端部は、実機を持つわずかな構造的な非対称性が、低サイクル疲労寿命評価の点で無視できないことが明らかとなったと言える。

また、既存データとの比較評価からこの三次元解析は設計上十分な推定精度を持っているが、予防保全工事での付加価値提案を見越し、発生応力の計算精度再確認の位置付けで、実機モデル回転子を使用した回転子各部の歪(ひず)み計測を実施した。計測結果の一例として、図7に回転子ウェッジとリテーニングリングの歪み計測結果を示す。図では回転子ウェッジとリテーニングリングそれぞれの計測値のうち最も大きいものを1として正規化している。どの

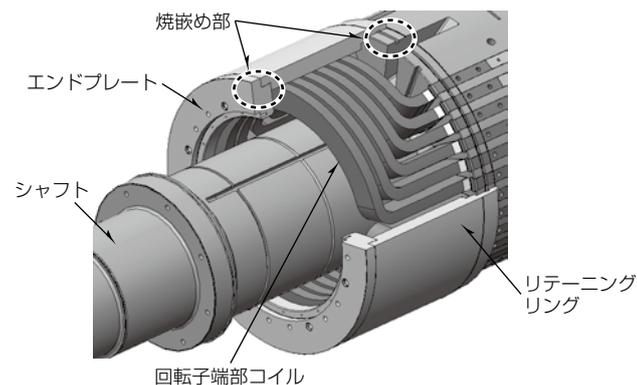


図4. 回転子端部構造

結果も、周方向及び軸方向の差分を含め、解析値と歪み計測値は問題なく一致しており、境界条件を含む現行解析手法の妥当性が示されたものと考えられる。なお、材料側の疲労特性については、実機を模擬した試験片でデータを個別に収集し、高精度な疲労寿命評価を実現している。

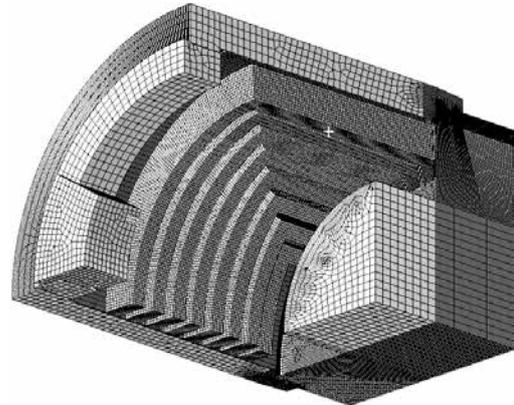


図5. 回転子端部の構造解析モデル(1/4円周)

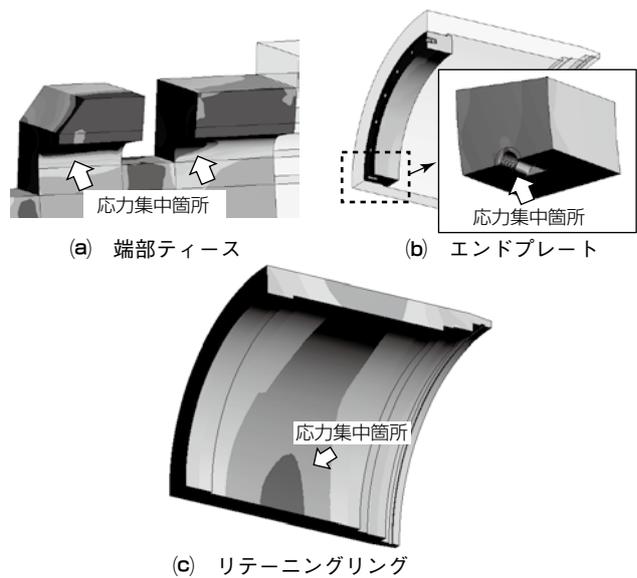


図6. 回転子端部の起動停止時応力振幅

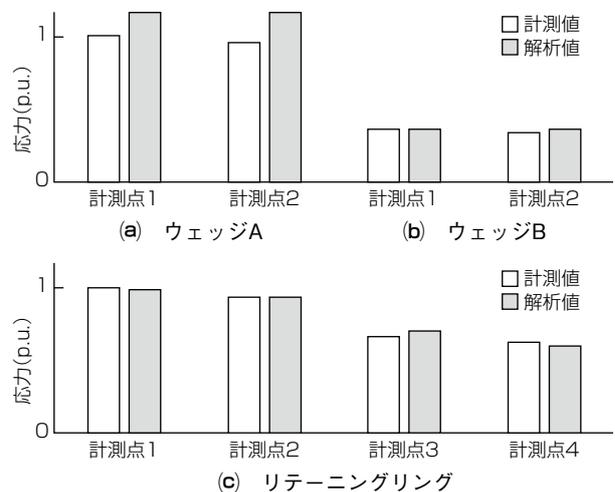


図7. 回転子ウェッジとリテーニングリングの歪み計測結果

4. 顧客メリット創出に向けた予防保全技術

4.1 回転子部品の非破壊検査技術

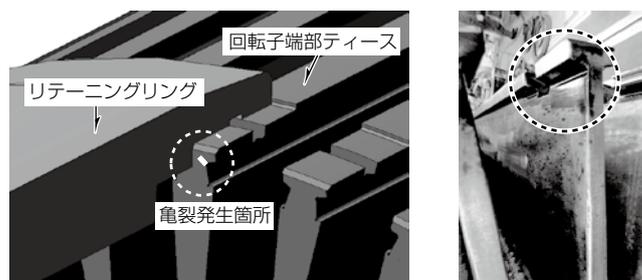
3章で述べた三次元解析を用いた上で、実際の発電機の運用状態と照らし合わせることによって、破損リスクの事前予知は可能である。しかし、過去に製作した全発電機の寿命評価を行うことは費用対効果の面で現実的ではなく、定期点検期間の短縮・頻度低下の昨今の状況を踏まえ、実機点検の機会に短時間で確実に回転子の損傷を検知する点検技術の開発も必要不可欠となってきた。

発電機の起動停止に伴い、低サイクル疲労によって発生した亀裂は、発生前と比較して小さな負荷であっても進展し、破断に至るおそれがある。回転子部品の周辺は運転時に遠心力が作用するほか、軸振動に起因した微小な繰り返し応力が継続して発生する環境にあるため、亀裂が残存したままの状態でも運転を継続することは安全面から許容はできず、このような場合は初期亀裂を早期に見つけることが重要になる。従来、回転子部品の微細な初期亀裂を発見するためには浸透探傷検査を必要としていたが、例えば図8に示す回転子端部ティースの亀裂発生箇所であれば、リテーニングリングの内側に隠れる構造のため、直接的に検査を行うことは不可能であった。したがってこの部分を検査するためには回転子を発電機から引き抜いた後、各部品を分解する必要があるが、検査工程が長期にわたることから顧客ニーズとも合致していなかった。

現在、当社では検査工程短縮のための技術開発を進めており、先に述べたリテーニングリング内側部の回転子端部ティースの超音波探傷検査のイメージを図9に示す。新技術ではリテーニングリングの表面からその内部にあるティース部の亀裂を、超音波探傷で検知する手法としており、この技術の導入で回転子端部部品の分解をすることなく検査を実施することが可能になる。つまり、従来の検査工程の大幅短縮を実現するとともに、従来の定期点検期間内では実施不可能であった回転子部品の詳細点検を、今後は無理なく所定の期間内に組み込み、回転子部品の詳細点検機会を増加させることが可能になる。今後、同様の技術を回転子各部品の点検に展開することを計画しており、火力発電プラントの稼働率を低下させることなく、破損リスクの早期発見と重大事故の未然防止を可能にするために開発を継続していく。

4.2 予防保全工事での付加価値向上

各部品の正確な疲労寿命評価は、発電機の適切な点検時期及び部品の適切な交換時期を提示し、発電機長期運用の信頼性を高めることが可能になるだけでなく、部品レベルの強度設計基準を適正化することで、発電機の効率向上や低コスト化への寄与も実現できる。その具体例として、



(a) 回転子端部ティースの亀裂発生箇所 (b) 浸透探傷検査

図8. 回転子端部ティースの浸透探傷検査

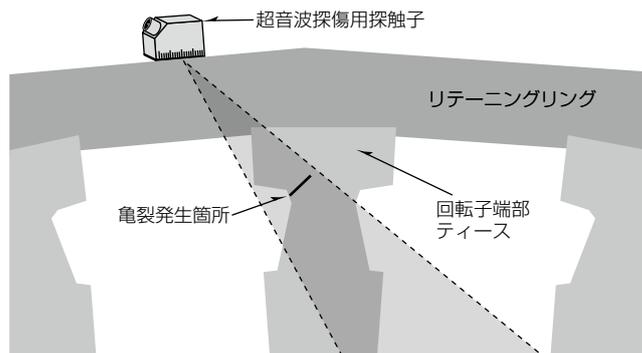


図9. 回転子端部ティースの超音波探傷検査のイメージ

今回の結果を回転子断面の設計に反映し、形状を最適化することによって発電機効率の0.02%の向上を可能にした。発電機効率の向上によって、環境面からはCO₂排出量削減に貢献できるほか、発電量あたりの所要コストを低減させることによって発電所の収益性向上に貢献できる。

5. む す び

火力発電プラントの運用環境が変化してきており、タービン発電機では特に回転子部品の予防保全技術の重要性が高くなってきている。そのため当社では、最新の解析技術を駆使し、実機検証や材料の要素試験結果と組み合わせることによって回転子部品の寿命評価技術を進歩させた。さらに定期点検期間短縮・発電機稼働率向上の観点から、回転子部品の破損を短時間で確実に検知する検査技術の新規開発も進めている。

今後はこれらの技術を用いて、適切なメンテナンス時期だけでなく、予防保全工事時に付加価値向上に関わる要素技術を併せて提案することによって、発電機の長期運用での信頼性向上及び収益性向上に対して継続して貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 舟崎陽一，ほか：水素間接冷却タービン発電機“VP-Xシリーズ”と要素技術の既設機への展開，三菱電機技報，90，No.11，635～638（2016）