



すべり軸受で支えられた回転軸の複素固有値解析とその実設計応用に関する研究

富沢, 正雄

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1991-03-18

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1522

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001522>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍)	とみ 富	さわ 沢	まさ 正	お 雄	(鳥取県)
学位の種類	工学博士				
学位記番号	工博ろ第50号				
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当				
学位授与の日付	平成3年3月18日				
学位論文題目	すべり軸受で支えられた回転軸の複素固有値解析とその実設計応用に関する研究				
審査委員	主査	教授	岩	壺	卓
			教授	肥	爪
			教授	森	脇
				教授	富
					田
					佳
					宏
					道

論文内容の要旨

火力発電用2極タービン発電機は、我国の総発電量に占める原子力発電の比重が高まるにつれ、大容量機であっても、頻繁な負荷の変動や始動・停止を行なう運転形態が採られるようになった。タービン発電機の回転子は大形で弾性的であるため、微小な温度むらでも軸曲がりが生じ、運転中に振動が変化する。振動問題による大容量発電設備の運転停止が社会に与える影響は大きく、タービン発電機の振動設計技術を確立し、振動問題発生を回避することが強く要求されていた。

本論文では、このような状況下にあるタービン発電機を主な研究対象とし、その回転軸の曲げ振動に関する理論的および実験的研究を行うことで、実際の設計に活用できる振動解析法と軸系のモデル化技術を開発し、さらに実機の運転データを分析・検討することで、大形弾性軸のつりあい応答に関する振動設計技術の向上を図った。本論文は、次の内容の8章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の工業上の背景と意義を述べ、回転軸の振動に関する従来の研究を整理するなかでその問題点を述べ、本研究の目的と意義および研究内容の概要を述べた。

第2章では、複雑な形状の実機を伝達マトリックス法で詳細にモデル化し、つりあい応答、回転数とは異なる周波数の非同期応答および複素固有値を効率的に計算するための数値解析アルゴリズムを開発した。さらに、軸受の非線形特性を考慮して回転軸の振動応答を計算するため、伝達マトリックス法の新しい計算アルゴリズムを開発し、系の自由度に比べて格段に小さい次数の非線形方程式を導き、これをニュートン法で解く効率的な数値解析法を提案した。

第3章では、複素固有値解析で得られた計算結果を回転軸の振動検討に活用するため、新しい複素モード解析理論を提案し、理論の妥当性を解析的および数値的に確認した。そして、前向き円加振や

後向き円加振は応答の円振れまわりの対応する円成分を励起すること、外部からの一定方向加振は円振れまわりの加振方向への投影振幅の $1/2$ を励起するなど回転軸に作用する種々の外力と応答の円振れまわり形状との関係を明かにし、振動現象を理解するには従来の数学的に厳密な複素モード解析理論よりも提案した理論の方が優れていることを示した。さらに、軸受の特性など系のパラメータを変更したときの振動特性推定への提案した理論の応用法を示した。このように物理的解釈が容易な複素モード解析理論を開発することで、複素固有値解析法を実機の応答特性の検討に活用できる手法へと発展させることができた。

前章までの解析法を実機の設計に適用するには、その振動特性を正確に解析できるモデル化技術の開発が不可欠である。大形回転機械はすべり軸受で支えられるが、その弾性定数や減衰定数は回転軸の振動特性に大きく影響する。このため、第4章と第5章では、すべり軸受と軸受支持系の数学モデル化の妥当性について調べるとともに、これらが回転軸の振動に与える影響を検討した。

第4章では、タービン発電機など多軸受軸系を据え付けるときに重要なアライメントの問題を第2章の非線形応答解析法を応用して検討した。まず多軸受軸系の適正アライメントの設定法を示し、ミスアライメントで生じる問題を軸受の荷重と浮き上がりの非線形性を考慮して解析した。そして、軸の浮き上がりを見捨てた従来の線形計算の不備を指摘するとともに、ミスアライメントにより生じる軸受特性の変化と軸受設計上の問題点を明かにした。次に軸受動特性について実験し、流体潤滑理論の計算結果と比較することで、振動計算に用いるべき軸受の弾性定数と減衰定数、軸受温度の算出法を示した。

第5章では、第4章の実験で流体潤滑理論の計算結果と差異が認められた低偏心率で作動するときのすべり軸受の数学モデル化の妥当性を調べるため、軸受荷重が可変できるモデル軸を製作し、広い軸受荷重範囲における回転軸の振動特性を検討した。そして、軽荷重軸受で支えられた回転軸においては、通常の軸受解析では考慮しない給油圧が無視できず、これは安定性能を低下させることを明かにした。さらに、軸受を支える構造物の影響を検討し、従来では解明されていなかった回転軸と構造物が連成した系におけるすべり軸受の不安定現象を明らかにした。

第6章では、前章までの研究成果をタービン発電機の実設計に導入することで、危険速度や共振倍率、すべり軸受の安定限界速度の解析精度が飛躍的に向上したことを確認した。しかし、実機を設計・製作する立場からは、さまざまな振動現象を解析する技術を開発しただけでは不十分である。機械の設計段階で振動の大きさを予測するには回転軸に作用する外力の大きさを把握する必要がある。このため、軸の長手方向に分布した曲げ剛性の非対称性を評価する手法を開発し、実機回転子の非対称性の実状を明かにした。さらに、実機運転時の回転子の温度と振動変化量の関係およびつりあわせ時の影響係数から、大容量タービン発電機を設計するときに必要な運転中に生じる軸曲がり量に関する基礎データを得た。

第7章では、回転子の軸曲がりの実情をふまえ、弾性軸のつりあい応答に対する振動設計法を検討した。まず、弾性軸のつりあい応答特性を的確に評価できる指標としてつりあい感度を提案し、第3章の複素モード解析理論でこれに及ぼす種々の要因を明かにした。つりあい感度は、従来から

回転軸の振動設計に用いられてきた応答倍率と、弾性軸のモードの形状と軸質量分布で決まる固有偏重心量から構成される。そして、固有偏重心量は、1次モードで1～1.5、2次モードで1.5～3、オーバハングのモードで3～6であり、固有偏重心量が弾性軸のつりあい応答特性に大きく影響することを明かにした。また、つりあい感度は多くのつりあい分布を仮定して計算した平均応答値に相当することを数値的に確認した。次に、つりあい感度が高いために生じた振動問題の事例と対策結果について述べ、これらの経験を基にしたつりあい感度のおおよその限界値を示した。そして、第6章で示した運転中に生じる軸曲がりの実状、各種の振動規格との対応から弾性軸のつりあい応答の振動設計法を提案した。

第8章では、第2章から第7章までで得られた主要な研究成果についてまとめを行い、本論文の目的が達成できたことを述べた。

論文審査の結果要旨

我国の総発電量に占める原子力発電の比重が高まるにつれ、火力発電用大容量タービン発電機は、頻繁な負荷変動や始動・停止を行う運転形態がとられている。タービン発電機の回転子は大型で弾性的であるため、微小な温度むらでも軸曲がりが生じて振動が変化するが、これによる大容量発電設備の運転停止は社会に大きな影響を与える。このため、大型弾性軸の振動設計技術を確立し、タービン発電機の振動を軽減することが強く要求されている。

第2章では、伝達マトリックス法で実機を詳細にモデル化し、つりあい応答、非同期応答および複素固有値を効率的に計算できる数値解析アルゴリズムを示している。さらに、軸受の非線形特性が考慮できる新しい計算アルゴリズムを開発している。

第3章では、複素固有値解析法を回転軸の振動検討に活用するため、新しい複素モード解析理論を提案し、理論の有効性を解析的および数値的に確認している。そして振動現象を理解したり設計に適用するには、従来の数学的に厳密な複素モード解析理論よりもこの理論が優れていることを明かにしている。

第4章では、多軸受軸系を据え付けるときに重要なアライメントの問題を軸受の荷重と浮き上がりの非線形性を考慮して検討している。そして、軸受の浮き上がりを無視した従来の線形計算の不備を指摘するとともに、ミスアライメントによるすべり軸受の特性変化と軸受設計上の問題点を明かにしている。次に軸受特性について実験し、流体潤滑理論の計算結果と比較することで、振動計算に用いるべき軸受の弾性定数と減衰定数、軸受温度の算出法を示している。

第5章では、低偏心率で作動するときのすべり軸受の数学モデル化の妥当性を調べるため、軸受荷重が可変できるモデル軸で実験を行っている。そして、軽荷重軸受で支えられた回転軸においては、通常の軸受解析では考慮しない給油圧が無視できず、これは安定性能を低下させることを明かにしている。さらに、軸受を支える構造物の影響を検討し、従来では解明されていなかった回転軸と構造物が連成した系におけるすべり軸受の不安定現象を明かにしている。

第6章では、前章までの研究成果をタービン発電機の実設計に導入することで、危険速度や共振倍率、軸受の安定限界速度の解析精度が飛躍的に向上したことを確認している。また軸の曲げ剛性の非対称量を評価する手法を開発し、実機回転子の実状を明かにしている。さらに、タービン発電機を設計するときに必要な運転中の曲がり量に関する基礎データを得ている。

第7章では、弾性軸の不つりあい応答特性を評価する指標として不つりあい感度を提案し、設計に用いることの有効性を示している。次に、不つりあい感度が高いために生じた振動問題の事例とその対策結果について述べ、これらの経験から不つりあい感度の限界値を明かにしている。そして、第6章で示した運転中の軸曲がりの実状、回転機械の各種振動規格との関係から運転中に発生する軸曲がりによる不つりあい変化を考慮した弾性軸の振動設計法を提案している。

以上の研究は、すべり軸受で支えられた大形弾性軸の振動設計に関する重要かつ独創的な研究を集積したものであり、工学上寄与するところ大である。

よって、学位申請者 富沢正雄は工学博士の学位を得る資格があると認める。