

学位論文題名

かご形ダンパ超電導発電機の開発と
その電気特性に関する研究

学位論文内容の要旨

界磁巻線を超電導化した超電導発電機は、電力システムの安定度向上、発電機の小型・軽量化、効率向上といった利点があり、実用化に向けた開発が国内外で進められている。日本では、200MW級パイロット機的设计・製作技術の確立を目的とした「70MW級モデル発電機の開発」が1988年度から1999年度に、発電機のコスト低減と大容量化を目的とした「超電導発電機基盤技術研究開発」が2000年度から2003年度に、国家プロジェクトとして実施されている。

超電導発電機の回転子は、界磁巻線を極低温に冷却する目的から真空断熱層を持つ多重円筒で構成され、最内層に巻線取付軸、その外層に低温ダンパ、常温ダンパが配置される。一方、発電機内の電磁現象は、負荷が平衡している場合を除いて、界磁側、電機子側の磁界の変動を伴う現象である。例えば、負荷が不平衡の場合には、電機子側から逆相磁界が発生して回転子と鎖交する。また、突発短絡時には、界磁側と電機子側の磁界が急変する。磁界変動が発生するとダンパに渦電流が誘導され、その結果として発電機内の磁界分布が決まることから、発電機の主要な運転特性(不平衡負荷耐量、突発短絡時端子量、速応励磁時端子量等)は、ダンパの電磁特性により決まることになる。また、超電導界磁巻線はクエンチ抑制の観点からその温度上昇が1K程度に制限されるため、電機子側変動磁界による極低温部での損失発生を、ダンパの磁界遮蔽特性により抑制する必要がある。このように、ダンパは、超電導発電機の運転、界磁巻線の保護において重要な役割を担っている。

超電導発電機のダンパは、室温の常温ダンパと80K程度の低温ダンパを良導電性の円筒で構成する方式がよく研究されてきた。本論文では、これに対して常温ダンパをかご形回路で構成する方式を開発した。本方式はダンパ導体を支持構造体の外周に設けたスロットに挿入する構造であって、ダンパの冷却が良くなるとともに支持構造体の厚みを薄くできるため、結果として発電機の体格が小さくなる利点がある。開発の第一ステップとして、70MW級モデル発電機(以下70MW級機)の約1/2スケールのモデル試験機を製作して、かご型ダンパの電磁、熱特性を検証するとともに、回転子端部の影響を考慮した2次元解析により回転子中央部の電磁特性が評価できることを確認した。得られた特性と本解析法を基に、70MW級機の電磁、熱特性の検討を行って設計に反映し、かご形ダンパを適用した70MW級機用回転子を製作した。完成した回転子を空隙巻線電機子と組合せて、発電機としての特性検証試験を実施した。その結果、逆相電流耐量、磁界の遮蔽・透過特性、ダンピング特性、リアクタンス・時定数、回転子強度等、超電導発電機の運転において要求される特性が良好であることを検証した。以上から、200MW級パイロット機的设计技術を確立するとともに、実用機的设计が可能であることを確認した。更に、600MW級超

電導発電機の電磁気、熱、機械強度特性を評価して発電機の設計を行い、大容量機に対しても、かご型ダンパ構成を有する回転子が適用可能であることを示した。

本論文は7章から構成されている。以下に各章の要旨を説明する。

第1章では、本研究の背景および目的を述べるとともに、各章の概要を記した。

第2章では、70MW級機の開発仕様に基づいて、回転子の基本構成の検討、概念設計、界磁巻線の詳細設計を実施し、研究のベースとなる70MW級機の端子量、体格、リアクタンスと界磁巻線の主要設計諸元を定めた。回転子には、実用機への拡張性を考慮して、界磁巻線全長のスロット内固定構造、3層構造1回撚り超電導線などを適用することとした。また、回転子に非磁性材を使用し電機子に空隙巻線を適用することで、同期リアクタンスを従来型発電機の1/4~1/5に低減できること、界磁巻線の最大磁界の低減には巻線端部コーナ部の曲げ半径拡大が有効であることなどを示した。

第3章では、モデル試験機による、かご形ダンパの電磁特性、熱特性の検証結果を示す。かご形ダンパでは円周方向に低抵抗部と高抵抗部が交互に存在するため解析は3次元的な取扱いとなり、開発当初は解析のみでの評価が困難であった。また、逆相電流耐量に関しては、更に熱的な問題が絡むことから、70MW級機の約2分の1スケールのモデル試験機を製作し、逆相電流耐量、系統動揺時のダンピング特性、磁界の遮蔽、透過特性、発電機過渡定数などを評価した。試験結果からかご形ダンパの電磁気特性、熱特性を明らかにするとともに、70MW級機の回転子設計に対する指針を得た。また、回転子端部の影響をスロット内の抵抗増加により考慮した2次元電磁界解析で、回転子中央部の電磁特性を評価できることを示した。

第4章では、モデル試験機で得られた特性と本研究で提案した解析法を基に、70MW級機の電磁特性、熱特性を詳細に評価して回転子の設計を実施した。その結果を示す。実用機で想定される運転条件に対して特性評価を実施した結果、かご形ダンパが温度、強度面の仕様を満足すること、及び界磁巻線が突発短絡時の過渡電流変化に対して熱的に安定であること等を示した。ヘリウムの冷却特性等の別途実施した評価と合わせ、基本設計を終了した。この設計を基に70MW級機の回転子を製作しており、具体的な構成を示した。

第5章では、70MW級機の現地試験において実施した特性検証結果とその評価を示す。かご形ダンパの電磁特性の他、界磁巻線の突発短絡に対する安定性と突発短絡時の電磁圧縮力に対する回転子強度などを評価した。実用機で想定される運転条件に対して試験した結果、超電導発電機の回転子が具備すべき「逆相電流耐量」、「突発短絡時の120Hz磁界に対する遮蔽特性」、「系統動揺時の1Hz前後の磁界に対する透過特性」、「突発短絡時の回転子強度」等の特性が良好であることを実証するとともに、解析との対比から実用機の設計が可能であること確認した。また、界磁巻線が突発短絡時の界磁電流変化に対して安定であり、超電導線の仕様、冷却・支持構成が妥当であることを実証した。

第6章では、超電導発電機の実用化への課題である「低コスト」、「大容量化」への対応を反映した60万kW級超電導発電機について、フィジビリティスタディを実施した結果を示す。高出力密度化により体格を縮小してコストを低減する設計としており、電気装荷、磁気装荷が増大することで、逆相電流耐量、突発短絡時のクエンチに対する安定性、回転子強度等に対する設計条件が厳しくなる。検討の結果、電磁特性、熱特性、機械強度特性を基本的に満足するものの、実用化に際しては、界磁巻線の安定性、常温ダンパ強度について裕度の向上が必要との結果が得られた。

第7章では、本論文を纏めるとともに、実用化への課題について述べる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 酒 井 洋 輔
副 査 教 授 大 西 利 只
副 査 教 授 長 谷 川 淳
副 査 教 授 本 間 利 久

学 位 論 文 題 名

かご形ダンパ超電導発電機の開発と その電気特性に関する研究

界磁巻線を超電導化した超電導発電機は、電力システムの安定度向上、発電機の小型・軽量化、効率向上の観点から、開発が進められている。わが国では、1988年度から12カ年間で200MW級パイロット機的设计・製作技術の確立を目的とした「70MW級モデル発電機の開発」、また2000年度から2003年度にかけて発電機のコスト低減と大容量化を目的とした「超電導発電機基盤技術研究開発」が、国家プロジェクトとして実施された。

超電導発電機の回転子は、界磁巻線を極低温に冷却するため真空断熱層を持つ多重円筒で構成され、最内層に巻線取付軸、その外層に低温ダンパ、常温ダンパが配置される。一方、発電機内の電磁現象は、負荷が平衡している場合を除いて、界磁側、電機子側の磁界の変動を伴う。例えば、負荷が不平衡の場合には、電機子側から逆相磁界が発生して回転子と鎖交する。また、突発短絡時には、界磁側と電機子側の磁界が急変する。磁界変動が発生するとダンパに渦電流が誘導され、その結果として発電機内の磁界分布が決まることから、発電機の主要な運転特性（不平衡負荷耐量、突発短絡時端子量、速応励磁時端子量等）は、ダンパの電磁特性により決まることになる。また、この超電導界磁巻線はクエンチ抑制の観点からその温度上昇が1K程度に制限されなければならないため、電機子側変動磁界による極低温部での損失発生を、ダンパの磁界遮蔽特性により抑制する必要がある。このように、ダンパは、超電導発電機の運転、界磁巻線の保護において重要な役割を担っている。これまでのダンパは、常温ダンパと80K程度の低温ダンパを良導電性の円筒で構成する方式がよく研究されてきた。

本論文では、これに対して常温ダンパをかご形回路で構成する方式を開発した。本方式はダンパ導体を支持構造体の外周に設けたスロットに挿入する構造であって、ダンパの冷却が良くなるとともに支持構造体の厚みを薄くできるため、結果として発電

機の体格が小型化できる利点がある。開発の第一ステップとして、70MW級モデル発電機（以下70MW級機）の約1/2スケールのモデル試験機を製作して、かご型ダンパの電磁、熱特性を検証するとともに、回転子端部の影響を考慮した2次元解析により回転子中央部の電磁特性が評価できることを確認した。本解析法を基に、70MW級機の電磁、熱特性の検討を行って設計に反映し、かご形ダンパを用いた70MW級機用回転子を製作した。完成した回転子を空隙巻線電機子と組合せて、無負荷での特性試験の他、負荷運転試験、負荷運転からの突発短絡試験など実運転状態を模擬した試験を実施して発電機としての特性を検証した。その結果、同期リアクタンスを従来型発電機の1/4から1/5低減できるなど実用規模の超電導発電機にてその規模を実証するとともに逆相電流耐量、磁界の遮蔽・透過特性、ダンピング特性、リアクタンス・時定数、回転子強度等、超電導発電機の運転において要求される特性が良好であることを検証した。以上から、200MW級パイロット機の設計技術を確立するとともに、実用機の設計が可能であることを確認した。更に、600MW級超電導発電機の電磁気、熱、機械強度特性を評価して発電機の設計を行い、大容量機に対しても、かご型ダンパ構成を有する回転子が適用可能であることを示した。

以上のように、本論文は70MWならびに200MW級超電導発電機の電磁気特性、熱特性、および機械強度特性を評価して発電機の設計を行い、大容量機に対しても、かご型ダンパ構成を有する回転子が適用可能であることを明らかにしたものであり、超電導工学ならびに電気機器工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。