

## 学位論文題名

## MHD 発電チャネル-励磁コイル

## 連成最適化問題の数値解析

## 学位論文内容の要旨

オープンサイクルMHD発電機は、従来の汽力あるいはガスタービン発電に比べ、高温流体に接触しながら高速回転しなければならないタービン翼を必要とせず、導電性流体(MHD流体)と磁界との相互作用に基づいて直接的に発電することで、作動流体の最高温度を高くでき、さらに環境に排出する $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{CO}_2$ を抑制できる発電システムとして日本、米国、ロシア、インド、中国などを中心に研究開発が進められている。

これまでMHD発電システムの実用化における最大の技術的課題は、電極材料の耐久性にあると考えられていたが、近年では日本および米国における耐久試験により、商用化にあたっての目標である8000時間連続運転が可能であるとの評価がなされている。残された課題は発電効率の向上による発電機の高効率化・小型化および発電コストの軽減である。

導電性をもつ流体に磁界を印加することによって発電を行うMHD発電において、発電チャネル(発電部)の形状、磁界を発生させる励磁コイルの形状およびチャネル内の磁束密度の分布は発電性能および発電コストに直接影響を及ぼす重要なパラメータである。したがって、これらのパラメータの最適化を行うことは発電性能の向上および発電コストの軽減などに大きく寄与する。

これまで、「チャネル形状の最適化」および「コイル形状および磁束密度分布の最適化」に関する種々の研究が行われてきたが、これらの最適化はそれぞれ独立したものとして考えられてきており、この2つを同時に考慮した最適化は行われていない。そこで著者は、ある形状の発電チャネルに対しては最適な励磁コイルの形状も、別の形状のチャネルに対しては最適形状ではない、すなわち、発電チャネルと励磁コイルの形状は互いに影響しあう。と考え、発電性能が最高となる最適「発電チャネル-励磁コイル系形状」を決定するために、上記の2つの最適化を同時に行うことを本論文の主題とする。そして、商用(大型)MHD発電機にこの同時最適化を適用した場合について論じ、矩形断面発電チャネル内に発電性能の向上を目的として一様磁界および非一様磁界を印加した場合の解析を行い、発電出力を低下させることなく、発電チャネルの長さ(寸法)を最小にすることができる最適コイル形状および最適チャネル断面形状の組み合わせを決定し、発電性能の改善およびそれにとまなう発電コストの軽減の可能性を検討したものである。

本論文は全7章から構成されており、以下に、本論分の概要を述べる。

第1章では、MHD発電技術に関する従来の研究と、現在認識されている問題点を整理し、本研究の意義について述べている。

第2章ではMHD発電の原理、有効性、および電磁流体が従う熱流体場および電気場の支配方程式および本研究で想定しているファラデー型MHD発電チャネルの構造について概説している。

第3章ではMHD発電チャンネル内に磁界を印加するための励磁コイルについて述べている。まず、励磁コイルの基本的（全体的）な形状および励磁コイルに要求される条件について概説している。次に従来のMHD研究で主に想定されてきた一様磁界を発生させるクレセントコイルの形状および、最適化において、比較の対象となるクレセントコイルの設計方法について述べている。次に矩形断面のコイルによって発生する磁界について述べている。この矩形断面コイルを用いることにより、最適化を行うにあたって、励磁コイルを「矩形断面コイルエレメントの集合体」として取り扱うことができる。

第4章では数値解析を行うために行った発電チャンネル内の物理諸量および支配方程式のモデル化について論じている。また、本研究で用いた数値解析手法の特徴および有効性について概説している。

第5章では励磁コイル-発電チャンネル系形状の最適化の定義および最大傾斜法を用いた最適化の手順を述べている。また、この最適化を小型の発電チャンネル（実験機）および大型の発電チャンネル（商用機）の断面に適用し、従来の研究で主に想定されてきた一様磁界の場合よりも発電出力密度が大きく増大することを確認した。また、この発電出力密度の増大は、小型の発電チャンネルよりも大型の発電チャンネルの方が著しいことを確認した。

第6章では、第5章で論じた「発電チャンネル-励磁コイル系形状」の最適化を商用規模の発電チャンネルに適用し、解析領域を発電チャンネル全体に拡張して行い、最も発電効率が高くなる系の形状、すなわち、最短のチャンネル長さで最大の発電出力が得られる最適コイル形状および最適チャンネル断面形状の組み合わせを決定している。そして、最適化を行うことにより発電出力を低下させることなく発電チャンネル-励磁コイル系の長さを大幅に短縮できることを示している。そして、形状の最適化にともなう種々の効果について考察を行い、この発電チャンネル-励磁コイル系形状の最適化の結果、発電チャンネル長の短縮および励磁コイルの蓄積エネルギーの軽減により、MHD-汽力発電プラントの建設コストおよび運転コストが大幅に削減される可能性があることを示した。

最後に、第7章では本研究で得られた結論を要約し、本研究がMHD発電の商用化に大きく寄与することを述べている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 粥 川 尚 之  
副 査 教 授 阿 部 寛  
副 査 教 授 榎 戸 武 揚  
副 査 助 教 授 青 木 義 明

学 位 論 文 題 名

## MHD 発電チャンネル-励磁コイル

### 連成最適化問題の数値解析

オープンサイクルMHD発電機では、現在の蒸気およびガスタービン発電と異なり、高温状態で高速回転をするタービン翼を必要とせず、導電性流体すなわちMHDプラズマと磁界との相互作用により誘導される起電場を用いて直接発電が行われる。このため最高動作温度を高く、さらに環境へのNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>排出を抑制できる発電システムとして日本、米国、ロシア、インド、中国などを中心に研究開発が進められている。

これまでMHD発電の実用化における最大の技術的課題は、プラズマ流路壁材料の耐久性にあると考えられていたが、近年では日本および米国における耐久試験により、8000時間連続運転の目度がついたとされている。したがって、残る重要な課題は発電効率の向上による発電機の高効率化・小型化および発電コストの軽減であるとされている。

磁界を横切る高速プラズマの膨張過程で発電を行うMHD発電において、発電チャンネルの形状、励磁コイルの形状およびチャンネル内における磁束密度の分布は発電性能と発電コストを直接左右する重要なパラメータである。したがって、これらの最適条件を明らかにすることは発電性能の向上および発電コストの軽減に大きく寄与すると考えられる。

これまでも、「チャンネル形状の最適化」および「コイル形状および磁束密度分布の最適化」に関して種々の研究が行われてきた。しかしそれらは、個々に独立した問題として扱われており、両者を互いに関連する最適化操作は行われていない。しかしチャンネルの形状はプラズマの熱流動過程と電気的な振舞いに影響し、そこで必要な磁束密度の強さと分布はチャンネルを取り巻く励磁コイルの配置と形状に依存している。したがって、両者は本来密接に関連している。以上の観点から、本論文では発電性能が最高となる最適「発電チャンネル-励磁コイル系」を2つの系の連成最適化問題として扱うことを主題とする。そして、商用規模の大型MHD発電機に著者が開発した最適

化手法を適用し、矩形断面発電チャネルに一樣磁界および非一樣磁界を印加した場合の解析と検討を行い、発電出力を低下させることなく、発電チャネルの長さを最小にすることができる最適コイル形状および最適チャネル断面形状の組み合わせを決定し、発電性能の改善およびそれに伴う小形化とコスト軽減の効果について定量的な研究を行ったものである。本研究で著者が明らかにした主な知見とその意義は次のようにまとめられる。

①MHD発電チャネル断面で、2次元磁場のもとで境界層を有する不均一なプラズマ中の電氣的パラメータを簡単な空間積分操作で近似的に求める新たな解析法を提案し、2次元有限要素法解析結果と比較し、その有効性を明らかにした。この成果は、実用上十分な近似度の簡単な性能評価法を与えた点で意味がある。

②与えられた断面積を有し一定の電流で励磁される矩形断面コイルを「矩形断面要素コイル」に分割し、要素の移動で得られる各磁界配置について発電出力とチャネル長さを比較する新しい最適励磁コイル設計法を提案した。これは著者独自の手法であり、MHD発電機に限らずいわゆる $E \times B$ 装置一般に適用できる点で評価されるべき手法である。

③上記①②の解析法を5MWth級小形実験機および1000MWth級大型石炭燃焼型MHD発電機に適用し、それらの連成最適解を与えると共に、従来の一様磁界から出力密度が大きく増大し必要なチャネル長が大きく減少することを明らかにした。また励磁コイルとプラズマを連成した最適化の効果は、大型チャネルでより著しいことを示した。境界層損失は大型チャネルでは相対的に少なくなるため、在来最適化の意義は小形流路で大きいとされていた見解は、励磁コイルを考慮する場合、必ずしも正しくないことを明らかにした点で重要である。

以上を要するに本論文は、不均一なプラズマの電気場の近似解法を提案すると共に従来、プラズマと独立に扱われていた印加磁界分布とそれを発生する励磁コイル形状に最適解があり、しかもその様な最適設計の効果が実用規模の大型MHD発電機で大きいことを数値解析で示したものであり、電磁流体工学およびエネルギー変換工学の進歩に貢献するところ大である。

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。