

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：12102
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2017～2020
課題番号：17K07026
研究課題名(和文) 再生可能エネルギー電源の大量導入を支える希ガスMHD発電の高速負荷追従能力の検証

研究課題名(英文) Study on high-speed load following operation of non-equilibrium MHD generators supporting energy systems with a large amount of regenerative energy power sources

研究代表者
藤野 貴康 (FUJINO, TAKAYASU)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：80375427
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：大量の再生可能エネルギー電源を含む次世代エネルギーシステムにおいて、火力発電には高効率に加えて調整電源としての高い負荷追従能力が求められている。本研究では、実用規模の希ガスMHD発電機を対象に、発電機内の電磁流体場と同発電機が接続された電力系統の連成解析から、希ガスMHD発電機の高速負荷追従能力の評価、また出力調整時のプラズマ流体の応答特性について調べた。その結果から、希ガスMHD発電機を組み込んだ電力系統において、シード量の制御により、定格出力の20-100%の範囲の出力調整を1秒未満で行える可能性を確認した。また、その調整時に発電機内では安定したプラズマ状態が維持し得ることも確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然変動型の再生エネルギーが大量に電力系統に導入された場合、電力の安定供給には大規模な出力変動補償用電源が必要不可欠である。火力発電機にはその役割を担うことが期待されているが、そのためには負荷追従能力を格段に高める必要がある。本研究では次世代型火力発電機の一つである希ガスMHD発電機を対象に、同発電機の負荷追従能力を数値解析により調べ、同発電機が既存のタービン発電機に比べて異次元の負荷追従能力を持つことを解析結果からではあるが示した。今後は、この希ガスMHD発電機の負荷追従能力の実験的実証に向けた研究を段階的に進め、持続可能なエネルギー社会の実現に貢献し得る希ガスMHD発電機の実用化に繋げたい。

研究成果の概要(英文)：In next-generation energy systems with a large amount of regenerative power sources, thermal power generators are desired to have high load-following capability as power adjusting sources as well as high thermal efficiency. In this study, the potential of noble gas plasma (NGP) MHD generators as power adjusting sources is examined by numerical simulation, where the behavior of magnetoplasma dynamics coupled with a power transmission system is analyzed. Numerical results demonstrate that a commercial-scale NGP MHD generator can control an amount of power output in a range of 20-100% of a rated power output within 1 sec, which indicates that NGP MHD generators have a significantly high load-following capability, compared to conventional thermal power generators. Furthermore, the numerical results show that the plasma-fluid properties in the NGP MHD generator considered here keep a stable behavior without ionization instability in high-speed power adjustment operation.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：MHD発電 希ガスプラズマ 出力調整電源

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽光/風力発電の大量導入時における電力安定供給の実現は喫緊の課題であり、火力発電には高効率のみならず電力需給ギャップの調整電源としての高い負荷追従能力が求められている。

本研究で対象とする図1の希ガスMHD発電機は、機械的可動(回転)部をもたず作動気体のエネルギーを直接電気エネルギーに変換することから、高温利用による高効率発電のみならず、既存の火力タービン発電機とは異次元の負荷追従能力(1秒未満の高速出力調整)を発揮する可能性がある。

これまで、希ガスMHD発電機の「高性能化」研究は着実に成果を上げ、実用規模の大型発電機の性能予測に資する知見が蓄積されてきた。その一方で、希ガスMHD発電機では回転運動の大きな慣性力に支配されることなく出力調整が可能で、高効率を維持したまま高い負荷追従能力が期待できるにもかかわらず、「負荷追従能力」についての確度の高い定量的評価は本研究開始当初まで十分にはなされていなかった。再生可能エネルギー電源の大量導入を見据えた上で希ガスMHD発電機の開発意義・役割を明確にするには、発電性能のみならず負荷追従能力の把握も必要不可欠である。そして、この能力こそが希ガスMHD発電機と従来型火力発電機との明確な差別化をもたらし得ると研究代表者は考える。

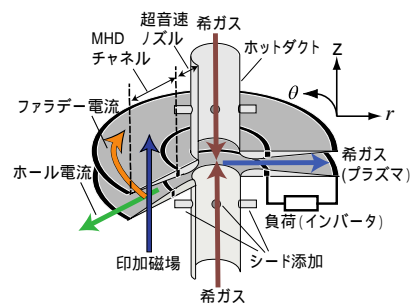


図1 希ガス MHD 発電機

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究では、実用規模大型希ガスMHD発電機(定格出力300MW程度)を対象に、図1の希ガスMHD発電機を扱った電磁流体解析と同発電機を系統に接続することを想定した電力系統解析の連成解析から、シード量・インバータの時間的制御に対するプラズマ流体の動的応答に関する学理的理解を深めるとともに、高速出力調整に適したこの制御手法を提示する。その上で、希ガスMHD発電機の高負荷追従能力を現実的な発電機環境下で定量的に予測し、再生可能エネルギー電源大量導入時の数秒周期の激しい負荷変動への追従可能性を調べる。

3. 研究の方法

(1)申請者が開発した高性能発電をもたらす希ガスMHD発電機の流路形状および定格運転条件の数値設計手法(定常電磁流体方程式を用いた逆問題的設計法)により、本研究で対象とする実用規模の大型希ガスMHD発電機の流路形状と定格運転条件を決定する。この数値設計手法で設計した発電機は運転条件によっては強いMHD相互作用に起因した衝撃波や低電子温度による電離不安定性で同発電機が不安定に動作する可能性がある。そこで、定格運転条件での安定性を確認するために、非定常電磁流体解析を実施し、その安定性を評価する。

(2)上述の希ガスMHD発電機そのものの安定性評価のための電磁流体解析の実施と並行して、インバータを介した希ガスMHD発電機の外部電力系統との接続解析モデル(電気回路モデル)を構築し、それを電磁流体解析プログラムに導入する。このモデルでは、MHD発電機の容量に比べて電力系統の容量の方がはるかに大きいと考え、3相無限大母線として外部電力系統を扱う。

(3)上述の(1)にて、発電機単体では安定に動作することを確認できた希ガスMHD発電機を(2)で構築した系統解析モデルに組み込む。その上で、電磁流体解析と電力系統解析の連成解析から定格運転時に所定の電力を系統に安定に送電できる電力系統接続システムの各構成要素の回路定数をパラメトリック解析から決定する。

(4)時間的出力調整指令(再生可能エネルギー電源の大量導入時のサブ秒～数秒周期程度の負荷変動を想定)に対して、シード量・インバータ点弧角制御を用いた希ガスMHD発電機の高負荷追従能力を電磁流体解析から定量的に把握するとともに、高速出力調整に適した出力制御システムの運用方法を調べる。

4. 研究成果

(1)高性能発電を可能とする実用規模希ガスMHD発電機の仕様選定

上述の研究手法(1)により、希ガスMHD発電機単体(電力系統に接続せず、電極間に所定の負荷を結線して作動させる場合を想定)において、定格運転時にエンタルピー抽出率30%、等エントロピー効率80%の発電性能を満足する熱入力1000MW希ガスMHD発電機の流路形状・運転条件の仕様を数値設計した。その結果、表1の運転条件、また図2の流路形状を得た。

表 1 数値設計から得られた

希ガス MHD 発電機の定格運転仕様

作動気体	He/Cs
熱入力	1000 MW
入口全圧	0.35 MPa
入口全温	2200 K
印加磁束密度	10 T
シード率	8.8×10^{-6}
電極間(端子)電圧	17.6 kV
定格発電出力	300 MW
エンタルピー抽出率	30%
等エントロピー効率	81%

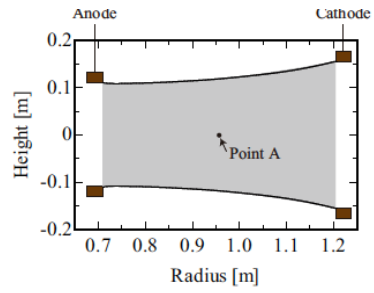


図 2 数値設計された希ガス MHD 発電機の流路形状

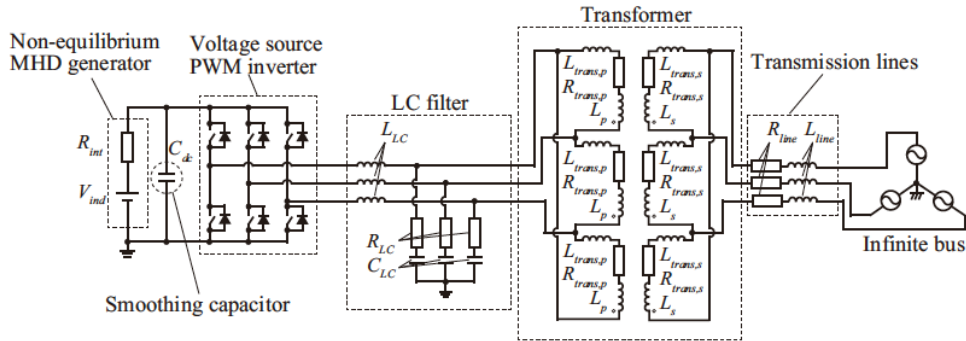


図 3 希ガス MHD 発電機の電力系統接続モデル

(2) 電力系統に接続した実用規模希ガス MHD 発電機の定格運転時の安定性解析

上述の研究方法(2)(3)で述べたように、選定した商用規模の希ガス MHD 発電機を本研究で構築した電力系統モデルに組み込み、その上で、同発電機の電磁流体解析と電力系統の連成解析を実施した。ここで構築した電力系統モデルの回路構成の概要を図 3 に示す。

図 4 に上述の連成解析から得られた定格運転時の希ガス MHD 発電機の発電性能の時間的挙動を示す。同図から今回数値設計した希ガス MHD 発電機を系統に接続した場合にも所定の定格性能(エンタルピー抽出率 E.E.R.: 30%, 等エントロピー効率 I.E.: 80%)を概ね安定して得られることが確認できた。また、このとき、系統に送られた有効電力も、インバータのスイッチングに起因した僅かな揺動(変動幅: 定格値の 0.95%程度)はあるものの、概ね定格 300 MW で安定して送電できることを確認した。

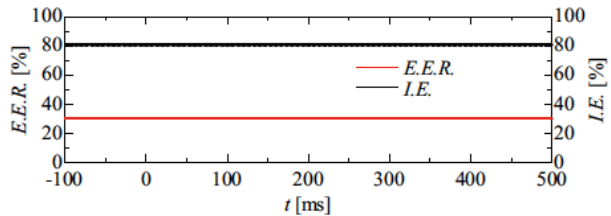


図 4 電力系統に接続された希ガス MHD 発電機の発電性能の動特性

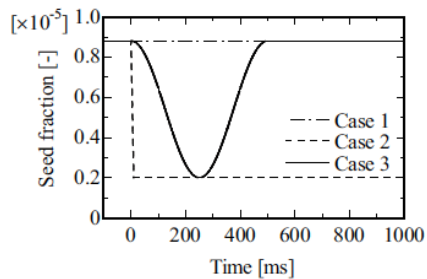


図 5 出力調整能力を検証するために設定したシード率条件

(3) 電力系統に接続した実用規模希ガス MHD 発電機の高速度出力調整能力の検証

図 3 の希ガス MHD 発電機を組み込んだ電力系統接続モデルに対して、同発電機のシード率(希ガスに対するアルカリ金属のモル分率)の調整により、希ガス MHD 発電機の出力量調整能力(時間

応答性・下げしろ)を電磁流体解析と電力系統の連成解析から調べた。図5に、その検討で用いたシード率の時間的变化条件の代表例を示す。この解析で得られた図6からもわかるように(図5のCase-2の場合)、希ガスMHD発電機は当初の予想通り、1秒未満での出力調整が可能であり、また、定格値の20%程度まで出力を落としても安定に運転できることがわかった。なお、この下げ幅の限界値はより低い側にあると解析結果から予想されること

から、今後出力をより下げて運転可能か否かも検討する。ここで、系統から外して発電機単体でシード率の出力調整を行ったところ、発電原理からも予想されるように希ガスMHD発電機の出力調整はミリ秒オーダーで十分に可能であることを確認している。すなわち、図6の有効電力の応答時間は電力系統の回路構成・定数設定から決まるものであることがわかった。

以上の通り、本研究で実施した電磁流体場と電力系統の連成解析から、希ガスMHD発電機は既存の火力発電機に比べて異次元の負荷追従能力(1秒未満の高速出力調整)を持つことが示された。今後、この負荷追従能力を実験的に検証することが望まれる。

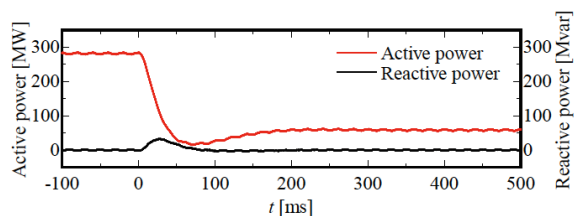


図6 希ガスMHD発電機の高速出力調整運転

(図5のCase-2に対する解析結果)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Fujino, D. Ichinokiyama, T. Ichikawa	4. 巻 34,4
2. 論文標題 Plasma Characteristics and Performance of Nonequilibrium Disk Magnetohydrodynamic Generator with Swirl Vanes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Propulsion and Powers	6. 最初と最後の頁 992-1001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.B36947	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 坂本裕基, 佐々木亮, 藤野貴康	4. 巻 141
2. 論文標題 非平衡ディスク形MHD発電機の超音速ノズル内の全圧損失と等エントロピー効率の関係	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 391-399
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejpes.141.391	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Fujino, Y. Ito, Y. Okuno	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Study of Nonequilibrium Seed-Free Argon Plasma Magnetohydrodynamic Generator using Collisional-Radiative Model,	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Plasma Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPS.2021.3059440	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 S. Ito, T. Takahashi, T. Fujino, and Y.Okuno
2. 発表標題 Numerical Analysis of a Commercial Scale Frozen Inert Gas Plasma MHD Power Generator Coupled with an Electrical Power System
3. 学会等名 The International Council on Electrical Engineering Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Sakamoto, S. Ito, and T. Fujino
2. 発表標題 Influence of Hot Duct Structure on Plasma-fluid Characteristics in a Nonequilibrium MHD Generator
3. 学会等名 The International Council on Electrical Engineering Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤創志, 藤野貴康, 奥野喜裕
2. 発表標題 電力系統へ接続された凍結希ガスプラズマMHD発電機の動特性
3. 学会等名 電気学会新エネルギー・環境研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂本裕基, 入江裕哉, 佐々木亮, 伊藤創志, 藤野貴康
2. 発表標題 商用規模非平衡MHD発電機の入口全温と発電性能の関係
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木亮, 坂本裕基, 伊藤創志, 藤野貴康
2. 発表標題 系統連系された商用規模非平衡MHD発電機のシード率制御による出力調整時の動特性
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤創志, 藤野貴康, 奥野喜裕
2. 発表標題 アルゴンの二原子イオンの生成と消滅がFIP MHD発電機の性能に及ぼす影響
3. 学会等名 電気学会新エネルギー・環境研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂本裕基, 伊藤創志, 藤野貴康
2. 発表標題 非平衡MHD発電機の性能に及ぼす乱流の影響
3. 学会等名 電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤創志, 藤野貴康, 奥野喜裕
2. 発表標題 Heを作動気体とする凍結希ガスプラズマMHD発電機の流路形状に関する数値解析的検討
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Fujino, S. Ito, and Y. Okuno
2. 発表標題 Numerical Study on Influences of Radiative De-excitation on Seed-Free Magnetohydrodynamic Generator
3. 学会等名 2018 AIAA Propulsion and Energy Forum (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市川拓, 高橋徹, 藤野貴康
2. 発表標題 電圧形インバータを用いた非平衡ディスク形MHD発電機の系統連系に関する検討
3. 学会等名 電気学会新エネルギー・環境研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 市川拓, 高橋徹, 藤野貴康
2. 発表標題 系統連系用電圧形インバータシステムを負荷とした非平衡ディスク形MHD発電機の電磁流体挙動
3. 学会等名 平成29年電気学会電力・エネルギー部門大
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤野貴康
2. 発表標題 非平衡MHD発電機の性能予測解析
3. 学会等名 電気学会新エネルギー・環境研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://fmm.kz.tsukuba.ac.jp/new_mpd/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------