商用規模石炭燃焼亜音速ダイアゴナル形 MHD 発電機の 安定性解析 - 流速低減による安定性の改善 -

学生員 岩下 武史 (京都大)
正員 松尾 哲司 (京都大)
正員 石川 本雄 (京都大)
正員 卯本 重郎 (福山大)

Stabilization Analysis of Coal-Fired Subsonic Diagonal Type MHD Generators of Commercial Scale
- Improvement of Stability of MHD Generators with Reduced Velocity -

Takeshi Iwashita, Student Member, Tetsuji Matsuo, Motoo Ishikawa, Members, (Kyoto University)
and Juro Umoto, Member (Fukuyama University)

A local linear perturbation analysis and a channel-length scale linear stability analysis are carried out for coal-fired subsonic diagonal type MHD generators of commercial scale. Disturbances in subsonic flow propagate with downstream traveling waves and upstream traveling waves, and those waves reflect at inlet and exit boundaries. The local linear perturbation analysis examines the local growth rate of traveling waves which is determined by a dispersion equation. The channel-length scale linear stability analysis, which is based on the characteristic equation derived from the inlet and exit boundary conditions, judges whether the waves grow or decay during their propagation and reflection. The local linear perturbation analysis shows that a conventionally designed channel with near-sonic velocity has a large wave-growth rate and tends to be unstable. A newly designed channel with relatively low velocity has small wave-growth rates. The channel-length scale linear stability analysis indicates that disturbances in the conventionally designed channel grow during their propagation and reflection. The channel-length scale analysis also shows that the newly designed channel can be stably operated. Time-dependent calculations are carried out to verify the results obtained from the linear stability analyses.

キーワード： 石炭燃焼, MHD 発電, 商用規模, 亜音速, ダイアゴナル形, 安定性解析

1. はじめに

商用規模の直線形 MHD 発電機では、多数の電極を必要とするため、外部回路の構成の観点から、ダイアゴナル形チャネルを用いるのが有利であると考えられる。しかし、これまでの数値解析によって、大型のダイアゴナル形チャネルの動作が不安定となり易いことが報告されている⁽¹⁾。

著者らは、これまでに、まず、超音速ダイアゴナル形 MHD 発電機を対象とした安定性解析を行ない、定電圧負荷や抵抗負荷を接続し、電極電流の変動を小さく抑える事で、発電機の安定性を改善できる事を示した⁽²⁾。

本稿では、商用規模亜音速ダイアゴナル形 MHD 発電機を対象とした安定性解析を行なう。亜音速の MHD 発電機は、超音速機に比べ、ダクト内に衝撃波を発生しない、ノズルやディフューザでの流れの加減速が容易である等の利点

を持つ。しかし、亜音速機を対象とした場合、下流が上流に及ぼす影響も考慮しなければならないため、その安定性解析は、超音速機の場合に比べ複雑となる。本稿では、以下に述べる局所線形摂動解析及び、流路長線形安定性解析の2種類の安定性解析を行なう。

局所線形摂動解析⁽¹⁾では、擾乱を伝搬させる波動(音波、エントロピー波)について、分散方程式からチャネル内の各地点における局所的な成長率を求め、それによって、チャネルの安定性を評価する。

亜音速の発電機では、擾乱は、上流、下流の双方向に伝搬し、入口、出口境界で反射する。擾乱が、この反射と伝搬の繰り返しの間に増幅すると発電機は不安定となる。しかし、この擾乱の増幅に関しては、入口、出口境界を含めた発電機流路全体を解析する必要があるため、局所線形摂動解析では検討できない。そこで、著者らがディスク形の MHD 発電

機に対して開発した線形安定性解析手法⁽³⁾⁽⁴⁾をダイアゴナル形の発電機に適用することで、この反射と伝搬の繰り返しによる流路長規模の増幅に関して検討を行なう。本稿では、以後、この線形安定性解析を流路長線形安定性解析と呼んで、先に述べた局所線形摂動解析と区別する。

解析は、まず、著者らが以前に概念設計⁽¹⁾した、チャンネル内で音速に近い流速を持つ、高亜音速型の発電機に対して、局所線形摂動解析、流路長線形安定性解析を行ない、発電機が不安定に成り易い事を示す。

次に、発電機の安定性を考慮し、チャンネル内で比較的低いマッハ数（約0.8～0.6）を持ち、高亜音速型の発電機と同等の出力を有する発電機チャンネルを概念設計する。この発電機に対して、局所線形摂動解析を行ない、波の成長率が抑制されている事を示す。さらに、流路長線形安定性解析を行ない、擾乱が伝搬と反射の間に増幅しない事を示す。

また、時間依存計算を行ない、上記の安定性解析の結果を確認した。

2. 基礎方程式

< 2・1 > 基礎方程式 作動流体に関する基礎方程式として、次の1次元方程式を用いる。

$$\partial U / \partial t + \partial F(U) / \partial x = S(U) \dots\dots\dots (1)$$

$$U = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho A \\ \rho u A \\ \rho(\varepsilon + u^2/2)A \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

$$F(U) = \begin{pmatrix} \rho u A \\ (\rho u^2 + p)A \\ \rho u(h + u^2/2)A \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

$$S(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ p dA/dx + A J_y B - f_{ric} \\ (J \cdot E)A - q_{loss} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 A : ダクト断面積、 u : 作動流体流速、 ρ : 質量密度、 ε : 気体内部エネルギー、 p : 静圧、 $h(= \varepsilon + \frac{p}{\rho})$: エンタルピー、 f_{ric} : 摩擦損失、 q_{loss} : 熱損失、 $E = (E_x, E_y, 0)$: 電界、 $B = (0, 0, B)$: 磁束密度、 $J = (J_x, J_y, 0)$: 電流密度

摩擦損失 f_{ric} 及び熱損失 q_{loss} は文献⁽⁵⁾に従って与えるものとする。

作動流体の熱力学特性については、燃焼ガスの状態方程式、

$$\rho = \rho(p, T), \quad h = h(p, T) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 T : 気体温度
が与えられているものとする。

電気磁気学的諸量の関係式は、一般化されたオームの法則に加えて、以下のダイアゴナル形チャンネルに対する電流、電界の関係式によって与える。ただし、正方形ダクトを仮定しているため、チャンネル幅、チャンネル高さは共に $\sqrt{A}$ とした。一般化されたオームの法則は

$$J_x + \beta J_y = \sigma E_x \dots\dots\dots (6)$$

$$-\beta J_x + J_y = \sigma(E_y - uB + \frac{\Delta V}{\sqrt{A}}) \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 σ : 導電率、 β : ホールパラメータ、 ΔV : 電極電圧降下⁽⁶⁾

で与えられる。

電流連続の式は

$$(J_x - J_y \cot \theta_d)A = I - \frac{E_x}{R_{leak}} \sqrt{A} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 I : 負荷電流、 θ_d : ダイアゴナル角、 R_{leak} : 壁面リーク抵抗⁽⁷⁾

で与えられる。

電界に関する式は、

$$E_y = -E_x \cot \theta_d \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。

定常状態では、式(1)中の時間微分項は0と考えて良い。よって、式(1)より、

$$\frac{dU(x)}{dx} = \left(\frac{\partial F(U, A)}{\partial U} \right)^{-1} [S(U) - \frac{dA}{dx} \frac{\partial F(U, A)}{\partial A}] \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。式(10)より、チャンネル内の定常流れが決定される。

本解析では、負荷条件として、定電流負荷を仮定する。従って、負荷電流の擾乱については考慮しない。

式(10)より得られる定常流れに対して、時間依存項 $\exp(st)$ を持つ摂動、

$$U \rightarrow U + \delta U(x) \exp(st) \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 s : 擾乱の時間的な成長率（複素数）を考える。このとき、式(1)(11)より、摂動の振舞いを記述する方程式が次式のように得られる。

$$\frac{\partial F}{\partial U} \frac{d\delta U(x)}{dx} = \left(\frac{\partial S}{\partial U} - s \mathbf{1} - \frac{dU}{dx} \frac{\partial^2 F}{\partial U^2} - \frac{dA}{dx} \frac{\partial^2 F}{\partial A \partial U} \right) \delta U(x) \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 $\mathbf{1}$: 単位行列、

$$\frac{dU}{dx} \frac{\partial^2 F}{\partial U^2} = \sum_{k=1}^3 \frac{dU_k}{dx} \frac{\partial^2 F}{\partial U_k \partial U} \dots\dots\dots (13)$$

< 2・2 > 境界条件 入口境界条件は2つの条件式を与え、出口境界条件は1つの条件式を与えるものとし、それぞれ、

$$\text{入口: } b_{int}(U_{int}) = 0 \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{出口: } b_{ext}(U_{ext}) = 0 \dots\dots\dots (15)$$

のように表されるものとする。ここで、 U_{int} 、 U_{ext} は、それぞれ、入口、出口における U の値であり、 b_{int} は2次元のベクトル値関数である。

< 2・3 > 伝搬方向による成分の分離 行列 $\partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{U}$ の3つの固有値は、

$$\lambda_1 = u + a, \lambda_2 = u, \lambda_3 = u - a \dots \dots \dots (16)$$

ただし、 a :音速
 で与えられる。これらの固有値に対応する左固有ベクトルからなる行列は、

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{a} \begin{pmatrix} \chi + \frac{\kappa u^2}{2} + au & -\kappa u - a & \kappa \\ \kappa(h - \frac{u^2}{2}) & \kappa u & -\kappa \\ \chi + \frac{\kappa u^2}{2} - au & -\kappa u + a & \kappa \end{pmatrix} \quad (17)$$

ただし、

$$\chi = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{\epsilon = \text{const.}} \dots \dots \dots (18)$$

$$\kappa = \left(\frac{\partial p}{\partial \epsilon} \right)_{\rho = \text{const.}} \dots \dots \dots (19)$$

で与えられる。 $\mathbf{U}$ の摂動 $\delta \mathbf{U}$ に対して $\mathbf{L}$ による変換、

$$\delta \mathbf{w} = \mathbf{L}(\mathbf{U}) \delta \mathbf{U} \dots \dots \dots (20)$$

を行なうと、式(12)は、

$$\frac{\partial \delta \mathbf{w}}{\partial t} + \begin{pmatrix} u+a & 0 & 0 \\ 0 & u & 0 \\ 0 & 0 & u-a \end{pmatrix} \frac{\partial \delta \mathbf{w}}{\partial x} = \mathbf{S}_w \delta \mathbf{w} \dots \dots \dots (21)$$

ただし、

$$\mathbf{S}_w = \mathbf{L} \left[\left(\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \mathbf{U}} - \frac{d\mathbf{U}}{dx} \frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}^2} - \frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial A \partial \mathbf{U}} \frac{dA}{dx} \right) \mathbf{L}^{-1} - \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} \sum_{k=1}^3 \frac{d\mathbf{U}_k}{dx} \frac{\partial \mathbf{L}^{-1}}{\partial \mathbf{U}_k} \right] \dots \dots \dots (22)$$

と変換される。式(21)より、次式のように、 $\delta \mathbf{w}$ は上流から下流へ伝搬する成分 $\delta \mathbf{w}^+$ と下流から上流へ伝搬する成分 $\delta \mathbf{w}^-$ とに分離することができ(図1)。

$$\delta \mathbf{w}^+ = \mathbf{L}^+ \delta \mathbf{U}, \quad \delta \mathbf{w}^- = \mathbf{L}^- \delta \mathbf{U} \dots \dots \dots (23)$$

$$\mathbf{L}^+ = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \end{pmatrix}, \mathbf{L}^- = l_3 \dots \dots \dots (24)$$

下流から上流へ向かう波 $\delta \mathbf{w}^-$ は、入口で式(14)より得られる次式を満たすように反射する。

$$\frac{\partial b_{int}}{\partial \mathbf{U}_{int}} \left(\frac{\partial \mathbf{U}_{int}}{\partial \mathbf{w}_{int}^+} \delta \mathbf{w}_{int}^+ + \frac{\partial \mathbf{U}_{int}}{\partial \mathbf{w}_{int}^-} \delta \mathbf{w}_{int}^- \right) = 0 \dots \dots \dots (25)$$

上流から下流へ向かう波 $\delta \mathbf{w}^+$ は、出口で式(15)より得られる次式を満たすように反射する。

$$\frac{\partial b_{ext}}{\partial \mathbf{U}_{ext}} \left(\frac{\partial \mathbf{U}_{ext}}{\partial \mathbf{w}_{ext}^+} \delta \mathbf{w}_{ext}^+ + \frac{\partial \mathbf{U}_{ext}}{\partial \mathbf{w}_{ext}^-} \delta \mathbf{w}_{ext}^- \right) = 0 \dots \dots \dots (26)$$

ここで、ノズル入口においてダクト内に流入する成分 $\delta \mathbf{w}_{int}^+$ と、ディフューザ出口においてダクト内に流入する成分 $\delta \mathbf{w}_{ext}^-$ を用いて、流入成分によるベクトル $\delta \mathbf{W}_{in}$ を次式で定義する。

$$\delta \mathbf{W}_{in} = \begin{pmatrix} \delta \mathbf{w}_{int}^+ \\ \delta \mathbf{w}_{ext}^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{L}_{int}^+ \delta \mathbf{U}_{int} \\ \mathbf{L}_{ext}^- \delta \mathbf{U}_{ext} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (27)$$

この $\delta \mathbf{W}_{in}$ の波が時間とともに増大する場合、発電機は不安定となる。ここで、 $\delta \mathbf{W}_{in}$ と、 $\delta \mathbf{U}_{int}$ の間の関係式は以下のように入えられる。

図1 下流に伝搬する波と上流に伝搬する波

Fig.1. Downstream and upstream waves

$$\mathbf{A}_w \delta \mathbf{U}_{int} = \delta \mathbf{W}_{in} \dots \dots \dots (28)$$

$$\mathbf{A}_w = \begin{pmatrix} \mathbf{L}_{int}^+ \\ \mathbf{L}_{ext}^- \frac{\partial \mathbf{U}_{ext}}{\partial \mathbf{U}_{int}} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (29)$$

3. 解析手法

< 3・1 > 局所線形摂動解析 MHD 発電チャネル内では、擾乱は3種類の伝搬速度を持つ波として伝搬する。局所線形摂動解析⁽¹⁾では、それぞれの波について、チャネル内の各地点における擾乱の局所的な成長率を求め、これによってチャネルの安定性を評価する。

式(11)中の $\delta \mathbf{U}(x)$ が、次式で表されるように空間依存項 $\exp(-jkx)$ を持つとする。

$$\delta \mathbf{U}(x) = \mathbf{U}_0 e^{-jkx}, \quad k: \text{擾乱の波数} \dots \dots \dots (30)$$

このとき、式(12)より、摂動項に関して次式が成り立つ。

$$\mathbf{D}(s) \mathbf{U}_0 = 0 \dots \dots \dots (31)$$

ただし、

$$\mathbf{D}(s) = s \mathbf{I} + \frac{d\mathbf{U}}{dx} \frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}^2} - jk \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} + \frac{dA}{dx} \frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial A \partial \mathbf{U}} - \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \mathbf{U}} \quad (32)$$

ここで、 $\mathbf{U}_0$ に関する1次方程式(31)が自明でない解を持つ条件から、次の分散方程式が得られる。

$$\det\{\mathbf{D}(s)\} = 0 \dots \dots \dots (33)$$

実波数 k に対する分散方程式(33)の解を、 $s = \alpha + j\omega$ とおくと、摂動項は、

$$\delta \mathbf{U}(x) \exp(st) = \mathbf{U}_0 \exp(\alpha t) \exp\{j(\omega t - kx)\} \dots \dots \dots (34)$$

となる。式(34)より、波の伝搬速度は次式で与えられる。

$$\text{伝搬速度} = \omega/k \dots \dots \dots (35)$$

波数が充分大きい範囲では、方程式(33)の3解に対して、伝搬速度はそれぞれ、 $u+a, u, u-a$ となる。

本稿では、波が1m伝搬する間の成長率を、安定性を評価する指標(stability index)⁽¹⁾として次式のように定義する。

$$\text{指標 (単位長あたりの波の成長率)} = \exp(\alpha|k/\omega|) \quad (36)$$

式(35)(36)より、波の伝搬速度が速いほど、単位長あたりの波の成長率が抑制されることが分かる。

< 3・2 > 流路長線形安定性解析 亜音速機では、擾乱は、上流、下流の双方向に伝搬し、入口、出口境界で反射する。このような伝搬と反射の繰り返しによる、擾乱の増幅に関して、流路長線形安定性解析⁽⁴⁾によって検討を行なう。

入口における擾乱 δU_{int} に関して、入口、出口境界条件の式(14)(15)より、次式が成り立つ。

$$A\delta U_{int} = \left(\frac{\partial b_{int}}{\partial U_{ext}} \frac{\partial U_{ext}}{\partial U_{int}} \right) \delta U_{int} = 0 \dots\dots\dots (37)$$

ここで、式(37)中の $\partial U_{ext}/\partial U_{int}$ は、式(12)から得られる変分方程式⁽³⁾を解く事で得られる。式(28)(37)より、次式が得られる。

$$AA_w^{-1}\delta W_{in} = 0 \dots\dots\dots (38)$$

式(38)より、0でない摂動が存在し、それが時間とともに増大するための条件は、

$$\Delta(s) = \det(AA_w^{-1}) = \det(A)/\det(A_w) = 0 \dots\dots (39)$$

かつ

$$\text{Re}(s) > 0 \dots\dots\dots (40)$$

を満たす s が存在する事である。このような s が存在するかどうかは、ガウス平面上に描かれる軌跡 $\Delta(j\omega)$ ($\omega: -\infty \rightarrow \infty$)を用いて判定する。原点が軌跡 $\Delta(j\omega)$ ($\omega: -\infty \rightarrow \infty$)の右側に存在すると式(39)(40)を満たす s が存在し、発電機は不安定となる。

4. 解析対象

解析対象とする亜音速 MHD 発電機の基本仕様を表1に示す。

表1 ダイアゴナル形 MHD 発電機の基本仕様

Table 1. Basic specifications of diagonal type MHD generator

作動流体	石炭(中国大同炭) 空気燃焼ガス		
熱入力	1300MW	負荷数	4
チャンネル長	15m	電極数	600
ノズル長	1m	ディフューザ長	4m
入口総圧	4.5atm	入口総温	2700K

対象とする発電機は上記の基本仕様のもとで、チャンネル内の流速分布、チャンネル入口マッハ数、負荷電流を与えて概念設計される。なお、発電機を概念設計する際に、チャンネル出口総圧 1.0 atm 以上、最大電界強度 3500 V/m 以下、最大電流密度 10000 A/m² 以下の制約条件を与えた。

5. 高亜音速型のチャンネル

< 5・1 > 発電機概念設計 表1に示した基本仕様の下で、入口マッハ数を 0.95、チャンネル内の流速の減少率を 1m あたり 8[m/s] と設定し、負荷電流を上流側から、11000, 8800, 6800, 5000[A] とした場合の発電機概念設計結果を表2、図2に示す。図2において、 $0 \leq x \leq 1$ [m] はノズル部、 $1 \leq x \leq 16$ [m] はチャンネル部、 $16 \leq x \leq 20$ [m] はディフュー

ザ部である。図2に示されるように、この発電機チャンネル内で、流れは約 0.9 のマッハ数を持ち、高亜音速流となっている。

表2 高亜音速型チャンネルの設計諸量

Table 2. Designed values in the conventionally designed channel

	チャンネル入口	チャンネル出口
静圧[atm]	2.70	0.63
静温[K]	2532	2104
マッハ数	0.95	0.88
流速[m/s]	865	744
導電率[S/m]	6.80	1.81
発電機出力[MW]	253	
エンタルピー抽出率[%]	19.5

図2 高亜音速型発電機のマッハ数分布

Fig.2. Distribution of Mach number in the conventionally designed generator

< 5・2 > 局所線形摂動解析結果 チャンネル内に生ずる3種類の波動について、安定性の指標(波が1m伝搬する間の成長率)を図3に示す。ここで、波数が1以上になると、指標は波数にほとんど依存しなくなるので、図3には、 $k=10$ として計算した場合について示した。

図3 高亜音速型チャンネルの安定性の指標

Fig.3. Stability index for the conventionally designed channel

図3によると、 $u+a$ の伝搬速度を持つ波の成長率は1以下となり減衰するが、 u と $u-a$ の伝搬速度を持つ波は増幅

する。特に、 $u-a$ の伝搬速度を持つ波の成長率は、チャンネルの下流部で3以上の大きな値となっており、 $u-a$ の波が不安定に成り易いことが分かる。

< 5・3 > 流路長線形安定性解析結果 式(14)の入口境界条件として、入口で総圧 p_s 、総温 T_s 一定とし、式(15)の出口境界条件として、出口で総圧を一定とした場合の軌跡 $\Delta(j\omega)$ ($\omega \geq 0$)を図4に示す。ここで、図4において、◇印は $\omega = 0$ の点を表す。図4によると、軌跡の右側に原点が存在し、発電機は不安定となる。

図4 高亜音速型発電機における軌跡 $\Delta(j\omega)$ ($\omega \geq 0$)

Fig.4. Locus of $\Delta(j\omega)$ ($\omega \geq 0$) in the conventionally designed generator

< 5・4 > 時間依存計算結果 図5に、入口で総圧、総温を一定とし、出口で総圧を一定とした場合の、マッハ数分布の時間的な変化を示す。図5によると、発電機は、チャンネル内に衝撃波を発生して不安定となっている。これは、局所線形摂動解析の結果から、流れの擾乱が $u-a$ の波としてチャンネル内を伝搬する間に増幅したためと考えられ、流路長線形安定性解析の結果とも一致している。

図5 高亜音速型発電機におけるマッハ数分布の時間変化

Fig.5. Time-dependent distribution of Mach number in the conventionally designed generator

6. 低亜音速型のチャンネル

(新しく概念設計したチャンネル)

< 6・1 > 発電機概念設計 前節で対象とした、チャンネル内で1に近いマッハ数を持つ高亜音速型の発電機は、線形解析、非定常解析から、不安定となり易いことが分かった。そこで、本節では、より安定な発電機を概念設計することを考える。

マッハ数を低くし、流速を音速から遠ざけると、 $u-a$ の波の伝搬速度が増すので、<3.1>節で述べたように、 $u-a$ の波の成長率が抑制される。このように、高亜音速型のチャンネルにおいて特に大きな値を持つ、 $u-a$ の波の成長率を抑制する事は、発電機の安定性を改善すると考えられる。しかし、一方で、流速が低い場合、発電機の起電力が減少するため、発電機出力が低下する。従って、MHD 発電機を概念設計する際には、安定性、発電機出力の両方を考慮にいた上で、適当な流速分布を与える必要がある。

本節では、表1に示した基本仕様の下で、入口マッハ数を0.8、チャンネル内の流速の減少率を1mあたり30[m/s]と設定し、負荷電流を上流側から、14000, 10500, 9000, 7000[A]として発電機概念設計を行なった。その結果を、表3、図6に示す。この発電機は、高亜音速型の発電機と比較して、チャンネル内でマッハ数(図6)および流速が低いために起電力は減少するが、他方、静温が高いために導電率は大きくなる。その結果、本発電機は高亜音速型の発電機と同等の出力を有する。また、ここで設計したチャンネルは、高亜音速型のチャンネルに比べ、チャンネル出口での流速が低く、静圧が高いため、ディフューザの負担の点からも利点が多い。

表3 新たに概念設計したチャンネルの設計諸量

Table 3. Designed values of the newly designed channel

	チャンネル入口	チャンネル出口
静圧[atm]	3.12	0.81
静温[K]	2580	2196
マッハ数	0.80	0.60
流速[m/s]	735	510
導電率[S/m]	7.67	2.69
発電機出力[MW]	251	
エンタルピー抽出率[%]	19.3	

< 6・2 > 局所線形摂動解析 チャンネル内に生ずる3種類の波動について、安定性を評価する指標を図7に示す。図7においても、指標は $k=10$ として計算した。図3と比べ、特に、 $u-a$ の波の成長率が小さくなり、発電機チャンネルの安定性が改善されている事が分かる。

< 6・3 > 流路長線形安定性解析 図8に、入口で総圧 p_s 、総温 T_s を一定とし、出口で総圧 p_s を一定とした場合の軌跡 $\Delta(j\omega)$ ($\omega: 0 \rightarrow 200$)を示す。図8によると、原点は軌跡の右側に存在しないので、流れの擾乱は反射と伝搬の間に増幅することなく、発電機は安定となる。この流路長線形安定性解析の結果は、時間的に増幅する波がチャンネル

図6 新たに概念設計した発電機のマッハ数分布

Fig.6. Distribution of Mach number in the newly designed generator

図7 新たに概念設計したチャネルの安定性の指標

Fig.7. Stability index for the newly designed channel

内に存在する場合でも、それらの不安定な波の「単位長を伝搬する間の成長率」を低く保つことにより、発電機を安定に動作させることが可能であることを示している。この場合、不安定な波は、チャネル内で増幅するものの、チャネル内の流れに大きな乱れを生じさせることなくチャネル外に流出し、ディフューザ部における伝搬や入口・出口境界での反射により減衰する。

図9に、入口で静圧 p 、静温 T を一定とし、出口で静圧 p を一定とした場合の、軌跡 $\Delta(j\omega)$ ($\omega: 0 \rightarrow 300$) を示す。図9によると、この場合も、原点は軌跡の右側に存在せず、発電機は安定となる。

< 6・4 > 時間依存計算 図10に、入口で総圧、総温を一定とし、出口で総圧を一定とし、設計点を初期値として、時間依存計算を行なった場合の、マッハ数分布の変化を示す。発電機は安定に動作しており、流路長線形安定性解析の結果と一致している。また、入口で静圧、静温を一定とし、出口で静圧を一定とした場合についても、発電機は設計点で安定に動作することが時間依存計算からも示された。

7. むすび

本稿では、チャネル内で1に近いマッハ数を持つ、高亜音速型の発電機に対して、チャネル内で低いマッハ数を持つ発電機を概念設計し、両発電機に対して、局所線形摂動解析、

図8 新たに概念設計した発電機における軌跡 $\Delta(j\omega)$

($\omega: 0 \rightarrow 200$) (入口総圧, 入口総温, 出口総圧 一定)

Fig.8. Locus of $\Delta(j\omega)$ ($\omega: 0 \rightarrow 200$) in the newly designed generator (p_s and T_s are kept constant at the inlet. p_s is kept constant at the exit.) 図9 新たに概念設計した発電機における軌跡 $\Delta(j\omega)$

($\omega: 0 \rightarrow 300$) (入口静圧, 入口静温, 出口静圧 一定)

Fig.9. Locus of $\Delta(j\omega)$ ($\omega: 0 \rightarrow 300$) in the newly designed generator (p and T are kept constant at the inlet. p is kept constant at the exit.)

流路長線形安定性解析, 非定常解析を行ない, その安定性を評価した。その結果, 以下の事が結果として得られた。

- 亜音速のダイアゴナル形MHD 発電機において、チャネル内のマッハ数が1に近い値となるような高亜音速型の発電機は、その動作が不安定となることが、流路長線形安定性解析の結果からも確認された。

高亜音速型の発電機に比べて、チャネル内で低いマッハ数を持つ、今回概念設計した発電機に関して、以下の事が分かった。

- チャネル内の流速は低いが、導電率が高くなるため、高亜音速型の発電機と同等の出力を有する。
- 局所線形摂動解析の結果、従来型の発電機に比べ、波の成長率が小さく、特に $u-a$ の伝搬速度を持つ波の成長率が抑制されている。

図 10 新たに概念設計した発電機におけるマッハ数分布

Fig.10. Time-dependent distribution of Mach number in the newly designed generator

- 流路長線形安定性解析の結果、入口で、総温、総圧を一定とし、出口で、総圧を一定とした場合、および、入口で、静温、静圧を一定とし、出口で、静圧を一定とした場合、いずれも擾乱は、反射と伝搬の間に増幅せず、発電機は安定となる。この結果は、非定常解析結果からも確認された。

本稿では上記のように、発電チャネル内で流速を下げることにより、十分な発電機出力を維持しながら安定性を改善することができた。しかし、今回の解析では、負荷条件は、負荷電流固定としており、負荷電流中の擾乱がチャネル内の流れに及ぼす影響は考慮されていない。負荷条件を考慮した、亜音速ダイアゴナル形発電機の安定性解析は今後の課題である。

(平成 8 年 10 月 28 日受付, 同 9 年 2 月 10 日再受付)

文 献

- (1) 石川, 京極, 卯本: 「石炭燃焼 MHD 発電機大型チャネルの安定性」, 電学論 B, **115**, 1, pp.68-74(1995).
- (2) 岩下, 松尾, 石川, 卯本: 「商用規模石炭燃焼超音速ダイアゴナル形 MHD 発電機の安定性解析」, 電学論 B, **116**, 8, pp.973-978(1996).
- (3) 松尾, 石川, 卯本: 「オープンサイクル超音速ディスク形 MHD 発電機の安定性解析」, 電学論 B, **115**, 7, pp.847-854(1995).
- (4) 松尾, 石川, 卯本: 「オープンサイクル亜音速ディスク形 MHD 発電機の安定性解析」, 電学論 B, **116**, 3, pp.360-366(1996).
- (5) M.Ishikawa: "Unsteady Phenomena in High-Interaction MHD Generators", Tech. Rep. Institute of Atomic Energy Kyoto Univ., No 192(1982).

- (6) 電気学会; MHD 発電技術調査専門委員会: 「MHD 発電技術の現状」, 電気学会技術報告 No.309, p.23(1989)
- (7) M.Ishikawa et al., "Performance of Coal-Fired MHD Generators with Large Leakage Current", Energy Conversion and Management, **34**, No8, pp.607-617(1993).

岩下 武史

(学生員) 1971 年 1 月 13 日生。1995 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程入学。この間、MHD 発電の研究に従事。

松尾 哲司

(正員) 1964 年 3 月 11 日生。1991 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学第 2 専攻博士課程修了。同年 4 月同大学工学部電気工学科助手。工学博士。この間、非線形振動, MHD 発電の研究に従事。

石川 本雄

(正員) 1949 年 1 月 12 日生。1976 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。1984 年 1 月同大学工学部電気工学科助教授。工学博士。この間、主として MHD 発電の研究に従事。

卯本 重郎

(正員) 1930 年 4 月 19 日生。1958 年 3 月京都大学大学院(旧制)修了。1967 年 1 月同大学工学部教授。工学博士。1994 年 4 月京都大学名誉教授, 福山大学工学部電子・電気工学科教授。この間、電力系統における進行波, 過渡安定度, MHD 発電, 電気機器に関する研究に従事。

書 面 討 論

討 論

I. 質問事項 1

石炭燃焼はどのようにモデル化されたか？

II. 質問事項 2

大型商用機であることが安定性とどう関連しているか？

回 答

岩下武史・松尾哲司・石川本雄 (京都大)
卯本重郎 (福山大)

本論文では、以下のように石炭燃焼についてモデル化した。

I. 質問事項 1

1. 作動流体の熱力学特性

オープンサイクルの MHD 発電機では、重油燃焼ガス、石炭燃焼ガスなどが作動流体として用いられるが、作動流体によってその熱力学的特性は異なる。本論文においては、石炭空気燃焼ガスを作動流体として用いる。

熱力学特性のモデル化

(5)式に示される作動流体の熱力学的特性および導電率、ホールパラメータは、静圧および静温の関数として与えられるとする。この関数式は、石炭の組成、燃焼条件から熱化学平衡計算⁽⁸⁾によって求められる。

2. 石炭スラグ

石炭燃焼 MHD 発電機では、石炭に含まれる灰物質がスラグとして壁面上に付着し、スラグ層を形成する。スラグ層には、熱損失を低下させる効果や境界層での導電率の低下を防ぐ効果があるが、その一方で電極間短絡、電気的非一様性の原因となる。電気的非一様性を模擬し、スラグ層の影響を詳細に模擬するには、電気二次元解析が必要である。しかし、本論文では一次元解析を行うので、石炭スラグの影響を正確に模擬することはできない。

本論文では、壁面スラグの存在を考慮し、スラグの影響として以下の三つを考えた。

(1) スラグを介して電極間に流れるホール電流 本論文で対象とした、オープンサイクルの直線形 MHD 発電機では、ホール電界により、絶縁壁面近傍で、流れと逆方向のホール電流が流れる。このホール電流は、発電機の性能に大きな影響を与えるが、石炭燃焼 MHD 発電機では、流れの境界層より導電率の高いスラグ層を介して流れると考えてよい。(8)式中の $\frac{E_x}{R_{leak}}\sqrt{A}$ の項がこのホール電流にあたり、スラグの影響の大きさはリーク抵抗の値を検討することで考慮する。本論文では、リーク抵抗の値は 10 Ω

とした。これは、当研究室でこれまでに行われてきた、小型機を対象とした数値解析から、AVCO MARK VI, CDIF 1-B における実験結果をよく模擬する抵抗値として、7~10 Ω の値が得られていることに基づいている⁽⁹⁾。

(2) 熱損失 本論文では、熱損失として、伝導による損失と放射による損失を考える。伝導による損失では、スラグの影響により、壁温をスラグの蒸発温度である 1,800 K とした。これは、スラグの流れ側の表面において、スラグの堆積と蒸発が平衡状態にあり、表面温度がスラグの溶融温度に保たれているというモデルである。放射による損失では、ミスト状態となったスラグの影響を考慮した。以上の数学的モデルは文献(5)に示されている。

(3) 境界層、スラグ層における電圧降下 境界層、スラグ層の電極電圧に及ぼす影響については、(7)式中の電極電圧降下 ΔV を計算する際に含まれている。本解析では、現在提案されている電極電圧降下の相似則⁽⁶⁾に基づき、電極電圧降下を次式で与える。

$$\Delta V = 70.0 + 292.0(|J_y|/J^* \cdot \sqrt{1 + \beta^2})$$

ここに、 $J^* = \sqrt{q_t \sigma / \delta}$, q_t : 壁の熱流束, δ : 境界層厚さ

II. 質問事項 2

これまでの小型機を対象とした実験、解析において、発電機が安定に動作することが示されているのに対して、大型の商用機が不安定となりやすいという報告がこれまでになされている⁽¹⁾。大型機が不安定となる原因は、いまだ詳細には明らかにされていないが、これまでの研究から、下記に示すような理由によると考えられている。

(1) 大型機では小型機に比べ、発電機内の電流密度、磁束密度が高くなるので、発電機内の相互作用が強くなる。文献(9)によると、発電機内のじょう乱が大きな成長率をもつとき、ローレンツ力 $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ が大きく影響を及ぼすことが示されている。このことは、強い MHD 相互作用は、プラズマ内に生ずる波の成長を助長することを示している。このため、強 MHD 相互作用を用いる大型機では発電機は、小型機と比べ、不安定となりやすくなる。

(2) 大型の直線型 MHD 発電機では、流れ方向の電界強度の制限から、十分な発電機出力を得るために、小型機に比べそのチャンネル長は長くなる。チャンネル長が長い場合、チャンネル内に生ずる波動がチャンネル外に流出するのに時間がかかる。このため、不安定となる波が存在するとき、その波はチャンネル内に長くどまることにより大きく成長するので、発電機は不安定となりやすくなる。

文 献

- (8) 高野清南・加藤 健:「MHD 燃焼ガス物性の計算プログラム—その概要と使用法—」, 第 11 回エネルギー利用と直接発電シンポジウム, pp. 173~184 (昭 54)
- (9) 松尾哲司・石川本雄・卯本重郎:「オープンサイクル MHD 発電機チャンネル内における擾乱の成長率」, 電気学会新・省エネルギー研資, ESC-94-36 (平 6)