UDC 621.362 : 537.84

論 文

57-B 88

オープンサイクルダイアゴナル形 MHD 発電機の特性改善

正 員 吉 田 昌 春 (岐阜大)

正 員 卯 本 重 郎 (京都大)

非会員 乾 俊 一 (京都大)

1. ま え が き

化石燃料燃焼ガスを作動流体として用いるオープンサイクル MHD 発電は、高効率、低公害の大電力直接発生装置として、その実用化が待たれている。特にダイアゴナル形発電機は、比較的低いホールパラメータで良好な発電特性が得られること、単一または少数負荷で運転でき直交変換システムを簡略化できることなどにより、実用機としてはファラデー形やホール形よりも有望視されている。

ダイアゴナル形発電機は、実験的にはかなり研究が進められているが、その全体の流体的ならびに電気的特性の解析は、筆者らが考案開発した準二次元解析法による場合⁽¹⁾⁽²⁾を除くと、ほとんどが、準一次元解析法によって行なわれてきた。最近、ダイアゴナル形発電機の特性改善の問題がクローズアップされており、例えば、UTSI の実験に基づいた論文⁽³⁾⁽⁴⁾によると、多負荷にすることにより発電特性が改善されることが報告されている。しかしながら、その理論的根拠は局所的負荷率を 0.5 に近づけることにより、出力改善をすることであるため十分であるとはいえない。

そこで本論文では、まずダイアゴナル形 MHD 発電機全体の特性改善に対する幾つかの具体的な手法を提案し、その根拠についても明らかにする。次に、数値例として熱入力約 2,000 MW の実用規模の直線拡大形発電機の特性を、筆者らの提案開発した等価回路を用いる準二元解析法を適用して種々検討し、上記提案の方法によって発電特性が相当程度改善されること

を逐一確認する。なお、発電特性の評価には、主としてエンタルピー抽出率および等エントロピー効率を用いている。

2. 準二次元解析と特性の評価関数

本論文においては、図 1 に示すようなダイアゴナル角分布、負荷接続を有する発電機について特性の解析を行なう。図においてダイアゴナル角 φ は $x = x_{i1} = 0$, x_{i2} , x_{i3} , x_{i4} (ダクト出口) において、それぞれ $\varphi = \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ となるように設定し、中心軸上任意の位置 x においては次式

$$\left. \begin{aligned} \cot \varphi &= \cot \varphi_i + (\cot \varphi_{i+1} - \cot \varphi_i) \\ &\quad \times (x - x_{ii}) / (x_{i(i+1)} - x_{ii}) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

但し、

$$x_{ii} \leq x \leq x_{i(i+1)}, \quad i = 1, 2, 3$$

を満足するように与えられるものとする。また、電極番号 $N_{L0} = 1, N_{L1}, \dots, N_{Ln}$ から、それぞれ連続する $N_{00}, N_{01}, \dots, N_{0n}$ 個の電極を短絡して、第 0, 第 1, $\dots$, 第 n 出力電極としている。なお、 $R_{L1}, R_{L2}, \dots, R_{Ln}$ は負荷抵抗である。

次に、発電機中の電気的諸量ならびに流体力学的諸量の求め方について簡単に述べるが、詳しくは、文献 (1), (2) を参照されたい。

〈2・1〉 電気的諸量 本解析においては、電気的諸量は等価回路法を用いて求める。以下それについて簡単に述べる。

まず、ダクト内空間を多くの空間要素に分割する。各要素内においては一般化されたオームの法則

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}) - \beta/B(\mathbf{J} \times \mathbf{B}) + \beta\beta_i/B^2(\mathbf{J} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \dots\dots\dots (2)$$

が満足されている。但し、 σ はガスの導電率、 β, β_i はそれぞれ、電子、イオンに対するホールパラメータである。また、 $\mathbf{E}, \mathbf{J}, \mathbf{B}, \mathbf{u}$ はそれぞれ、電界、電流密度、印加磁束密度、ガス流速であり、それらは次式

Improvements of Performance Characteristics of Open-Cycle Diagonal Type MHD Power Generator. By Masaharu Yoshida, Member (Faculty of Education, Gifu University) Juro Umoto, Member & Toshikazu Inui, Non-member (Faculty of Engineering, Kyoto University).

吉田昌春：正員，岐阜大学教育学部

卯本重郎：正員，京都大学工学部電気工学科

乾 俊一：非会員，京都大学大学院工学研究科（現、関西電力株式会社）

図 1 多負荷ダイアゴナル形 MHD 発電機
Fig. 1. Schematic diagram of multiple-load diagonal type generator.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E} &= (E_x, E_y, 0), \quad \mathbf{J} = (J_x, J_y, 0) \\ \mathbf{B} &= (0, 0, B), \quad \mathbf{u} = (u, 0, 0) \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

のように仮定する。

一つの空間要素に対し(2),(3)式を適用すると、各要素内における電流と電圧の関係から、等価4端子回路が導出される⁽¹⁾。ダクト内は多くの空間要素によって構成されているから、各要素を上述の等価4端子回路で置換すると、ダクト内の全空間、従って発電機全体が等価回路網によって模擬される。その等価回路網について成り立つ回路電流に対する連立回路方程式を作成し、それらを数値計算によって解くと各部の電流が求まり、更に各要素の電流密度、電界などの x, y 成分が求まる。このようにして発電機内の電氣的諸量は二次元的に求められ、更に、発電機全体としての発電電力、電気変換効率なども計算される。

〈2.2〉 流体力学的諸量 流体力学的諸量は、主流と境界層内について別々に求める。

まず、主流においては、質量、運動量、エネルギーの各保存則

$$\left. \begin{aligned} \rho u A^* &= m_0 \\ d p / d x + \rho u d u / d x &= \langle J_y \rangle_c B \\ \rho u d (h + u^2/2) / d x &= \langle \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \rangle_c \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

を用いる。但し、 ρ, m_0, h, A^* は、それぞれ作動ガスの質量密度、流量、エンタルピー、有効断面積であり $\langle \rangle_c$ は諸量の主流中 y 方向における平均値を表わしている。

次に、境界層内においては、平板の乱流境界層理論を適用して運動量厚さ θ に関する次式

$$d\theta/dx = c_f/2 \dots (5)$$

但し、

$$c_f = [2.87 + 1.58 \log \{(1+x)/k_s\}]^{-2.5} \quad (5)'$$

を用いる⁽⁵⁾。但し、 c_f, k_s はそれぞれ摩擦係数、等価

砂粒粗さである。また、境界層内における流速 u_b 、温度 T_b は近似的に次の1/7乗法則

$$\frac{u_b}{u_i} = \frac{T_b - T_w}{T - T_w} = \left(\frac{y'}{\delta} \right)^{1/7} \dots (6)$$

に従って変化⁽⁶⁾。境界層内における圧力は主流における圧力に等しいと仮定する。但し、上式において添字 w は、ダクト壁面の諸量を表わし、 y', δ はそれぞれ壁面からの距離、境界層厚さである。上述した方法により、電氣的諸量と流体力学的諸量を求めることはきわめて困難であるので、各々を交互に計算し、収束解が得られるまで計算を繰り返す行なうものである。

〈2.3〉 評価関数 発電特性の評価関数として、主に次式によって定義されるエンタルピー抽出率 η_{ent} と等エントロピー効率 η_i 、すなわち

$$\eta_{ent} = \frac{P_{MHD}}{m_0 h_{s0}} \times 100(\%) \dots (7)$$

$$\eta_i = \frac{P_{MHD}}{m_0 (h_{s0} - h_{s1'})} \times 100(\%) \dots (8)$$

を用いる。但し、上式において P_{MHD} は発電機出力、 h_{s0} は燃焼器内における総エンタルピー、 $h_{s1'}$ は断熱過程を仮定した場合のダクト出口における総エンタルピーである。

以上のように発電機全体としての特性は、主に η_{ent} と η_i を用いて評価するが、第3章においては、ダクトの1電極ピッチ領域のみの電氣的特性を論じるためそれらが適用できない。よって、それらの代わりに出力密度 P_0 と電気変換効率 η_e を用いる。 P_0 および η_e を高めることは、それぞれ η_{ent} および η_i を高めることにつながる。

3. 特性改善の具体的手法の提案

〈3.1〉 ダイアゴナル角、負荷率(負荷電流)の選定 ダイアゴナル形発電機の中央部においては、いわゆる一次元ダイアゴナル条件

$$E_y = a E_x, \quad a = -\cot \varphi \dots (9)$$

が、ほぼ満たされるので、(2),(3),(9)式より出力密度 P_0 、電気変換効率 η_e は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_0 &= -(E_x J_x + E_y J_y) \\ &= \frac{\sigma u^2 B^2 (\beta - a)^2}{1 + a^2} \kappa (1 - \kappa) \dots (10) \end{aligned}$$

$$\eta_e = -\frac{P_0}{J_y u B} = \frac{(\beta - a)^2 (1 - \kappa)}{1 + a^2 + (\beta^2 - a^2)} \dots (11)$$

但し、

$$\kappa = -\frac{1 + a^2}{(\beta - a) u B} E_x \dots (12)$$

図2 η_e と P_o^* との関係Fig. 2. Relations between η_e and P_o^* .

ファラデー形発電機における最大出力密度 $\sigma u^2 B^2/4$ で正規化された出力密度 P_o^* は、(10)式から次のようになる。

$$P_o^* = \frac{P_o}{\sigma u^2 B^2/4} = \frac{4}{1+a^2} \frac{(\beta-a)^2}{1+\beta^2} \kappa(1-\kappa) \quad (13)$$

図2(a)～(c)には、それぞれ $\beta=1, 2, 3$ に対して φ と κ を変えた場合の η_e と P_o^* の関係を示している。図において破線はファラデー形発電機の特性を示

すが、ダイアゴナル形発電機特性の包絡線と一致しており、ダイアゴナル形発電機において、それぞれ β の値に対して φ と κ を適切に選定することにより、ファラデー形発電機に匹敵する特性が得られることがわかる。実際の発電機において、一般に β がダクト上流で小さく、下流に行くに従って増大することと、負荷率が負荷電流によって変化することを考慮すると、発電機全体の特性を改善する具体策として

(1) ダイアゴナル角をダクト上流部では小さめにし、下流部に行くに従って、 β に応じて適切に増加させること。

(2) 単一負荷の場合、ダクト入口から出口にわたって負荷率を変えることは困難であるため、図1に示したように、複数の出力電極を設けて多負荷にし負荷配分を制御すること。

が提案される。

〈3.2〉 アスペクト比の選定 MHD 発電機のアスペクト比は (ダクト高さ H)/(ダクト幅 D) で定義されが、ファラデー形発電機については、周期領域の三次元解析⁽²⁾によって、ダクト壁温が低い場合にダクト断面積、境界層厚みが一定ならば H/D を大きくすることにより、発電電力が大幅に増大できることが指摘されている。これは H/D を大きくすることにより、ガスプラズマの y 方向の不均一性が相対的に緩和されることに起因しており、この傾向はダイアゴナル形発電機にも適用され得ると思われる。

4. 単一負荷発電機

〈4.1〉 数値条件 K を 1% (重量比) シードした重油空気燃焼ガスを作動流体とする熱入力約 2,000 MW の実用規模のダイアゴナル形発電機を例にとって特性改善を検討する。数値条件は表1に示すとおりである。同表において、 Q_{fu} , T_{pr} はそれぞれ燃料の発熱量、空気予熱温度、 Q_{so} は Q_{fu} と予熱空気が持ち込む熱量の和で、燃焼器内の全熱量である。また A_0 , A_1 はそれぞれダクト入口、出口の断面積、 L , L_N , L_D はそれぞれダクト長、ノズル長、ディフューザ長、 N , N_{so} はそれぞれ全電極対数、単一負荷時に出力電極として短絡される電極対数、 p_{so} , M_0 , p_0 , T_0 , u_0 はそれぞれ入口における総圧、マッハ数、静圧、温度、流速である。

磁束密度はダクト中央部で B_0 とし、入口、出口部では、それぞれの x_{B1} , x_{B2} 位置からダクト端に向かって $|dB/dx|=g$ の割合で減衰するものとする。

〈4.2〉 ダイアゴナル角による特性改善 本節では、ダクト入口、出口、中央部におけるダイアゴナル

表 1 数値条件

Table 1. Numerical conditions.

Q_{fu} (MW)	2,085	x_{t1}, x_{t2} (m)	0, 1.5
T_{pr} (°C)	1,500	x_{t3}, x_{t4} (m)	11.5, 16
Q_{co} (MW)	2,843	$x_{B1}=L-x_{B2}$ (m)	1.5
h_{so} (J/kg)	4.22×10^6	g (T/m)	2.5
m_0 (kg/s)	673.5	B_0 (T)	6
A_0 (m ²)	1.08	p_{s0} (atm)	9
A_t (m ²)	14.44	M_0 (Mach)	0.9
L (m)	16	p_0 (atm)	5.8
L_N (m)	1.0	T_0 (K)	2,721
L_D (m)	3.8	u_0 (m/s)	853.5
N	100	T_w (K)	1,800
N_{ob}	8	$R_w=R'_w$ (Ω)	10*

図 3 $\eta_{ent}, \eta_i, p_{s1}$ に対する φ_1, I_L の影響Fig. 3. Influences of φ_1 and I_L on η_{ent}, η_i and p_{s1} .

角 $\varphi_1, \varphi_4, \varphi_3$ などが発電特性に及ぼす影響について検討する。

(1) φ_1 の影響 図 3 には、 $\varphi_2=\varphi_3=30^\circ$, $\varphi_4=90^\circ$ とし、 φ_1 を変えたときの負荷電流 I_L に対する $\eta_{ent}, \eta_i, p_{s1}$ の関係を示すが、 I_L が 40 kA 程度の高特性が得られている。 η_{ent}, η_i は $\varphi_1=90^\circ$ のときに最大になり、 φ_1 とともに減少することがわかる。 p_{s1} は逆に、 $\varphi_1=90^\circ$ のときに最低になっているが、1.2~1.5 気圧であるために運転上支障をきたすものではない。よって、 $\varphi_1=90^\circ$ のときに優れた特性が得られることになる。

図 4 に $I_L=40$ kA の場合の諸量の x 方向の分布を示すが、ダクト入口近くで β は 1 前後と小さい。ここで注意すべきことは、上述の結論が、 β が小さいときに φ を小さくするという前章の提案に反することである。この原因について調べるために、図 5 に $I_L=40$ kA の場合の φ_1 と 1 電極ピッチ当たりの出力 P_p の分布との関係を示す。但し、 P_p はダクト長を N 分

図 4 $p, T, u, \delta, \sigma, \beta$ の分布 ($\varphi_1=90^\circ, 60^\circ$)Fig. 4. Distributions of p, T, u, δ, σ and β when $\varphi_1=90^\circ$ and 60° . 図 5 P_p の分布 ($\varphi_1=90^\circ, 75^\circ, 60^\circ$)Fig. 5. Distribution of P_p when $\varphi_1=90^\circ, 75^\circ$ and 60° .

割し (N は電極対数)、各区間において次式を用いて算出したものである。

$$P_p = \sum_i P_i \Delta v_i / \sum_i \Delta v_i \dots \dots \dots (14)$$

P_i : 要素 i の発電電力、 Δv_i : 要素の体積

図からわかるように、 φ_1 を $90^\circ, 75^\circ, 60^\circ$ と小さく

図 6 η_{ent} , η_i , p_{s1} に対する φ_4 , I_L の影響

Fig. 6. Influences of φ_4 and I_L on η_{ent} , η_i and p_{s1} .

図 7 P_p の分布 ($\varphi_4=90^\circ, 75^\circ, 60^\circ$)

Fig. 7. Distribution of P_p when $\varphi_4=90^\circ, 75^\circ$ and 60° .

するに従って、 P_p が全般的に低下している。結局、 φ_1 が小さいときに η_{ent} が低下するのは、図 1 を見てもわかるように、 φ_1 を小さくするとダクト両端の出力電極間が短縮され、ダクトの実効長が短くなるためであると思われる。

(2) φ_4 の影響 ダクト中央部のダイアゴナル角を論じる前に、ダクト出口のダイアゴナル角 φ_4 について検討する。図 6 には $\varphi_1=90^\circ, \varphi_2=\varphi_3=30^\circ$ とし、 φ_4 を変化した場合の I_L と η_{ent} , η_i , p_{s1} との関係を示す。図から φ_4 を減少させると η_{ent} が少し増加し、 p_{s1} が少し減少することがわかる。また η_i は $\varphi_4=90^\circ$ と 75° ではほとんど差がないが、 $\varphi_4=60^\circ$ ではやや高くなっている。

次に、前項(1)の場合と同様、 $I_L=40$ kA の場合を例にとって、 $\varphi_4=60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の場合における P_p の x 方向における分布を求めると図 7 が得られる。 $x_{13}=11.5$ m であるから、 φ_4 の影響は $x>11.5$ m の領域で現われるように思われるが、同図においては、 φ_4 の影響が $x \approx 8$ m 付近から現われている。これは準一次元解析によっては得られない結果である。また、ダ

クト中央部から $x \approx 13$ m の範囲では、 φ_4 を 90° から 60° に近づけるに従って P_p が大きくなっているが、 $x>13$ m の領域では現象が逆転している。中央部から $x \approx 13$ m の領域の現象は、図 4 からわかるように $x \approx 12$ m において $\beta \approx 3$ であることを考慮すると、図 2 に関連して示したダイアゴナル角による特性改善の提案に合致している。

なお、 $x>14$ m の領域では β が著しく変化しているため、この領域特有のダイアゴナル角と負荷電流を選定する必要がある、この領域の特性を改善し更に発電機全体の特性の改善をはかるには、後述するように多負荷の導入を待たなければならない。

(3) φ_2, φ_3 の影響 以上の検討結果から、 φ_1, φ_4 はそれぞれ $90^\circ, 60^\circ$ とし、文献(1)における経験から $\varphi_2=30^\circ$ とした上で、 φ_3 が発電特性に及ぼす影響について調べる。図 8 に φ_3 をパラメータとして、 I_L に対する η_{ent} , η_i , p_{s1} の関係を示す。但し、同図において φ_3 が大きく I_L が小さい領域ではチョーキング現象⁽⁸⁾が発生するために解が得られない。

次に同図からわかるように、 η_{ent} は φ_3 と I_L に大

図 8 η_{ent} , η_i , p_{s1} に対する φ_3 , I_L の影響

Fig. 8. Influences of φ_3 and I_L on η_{ent} , η_i and p_{s1} .

図 9 P_p の分布 ($\varphi_3=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$)

Fig. 9. Distribution of P_p when $\varphi_3=30^\circ, 35^\circ$ and 40° .

きく依存しているが、 $35^\circ < \varphi_3 < 45^\circ$ の範囲では I_L の適切な選定により η_{ent} をかなり高めることができる。一方、 η_i は I_L に対して極大値をもっており、その値は φ_3 の増加とともに減少する。また p_{s1} は η_i と同様の傾向を示すが、 φ_3 の増加について、 η_i の極大値の位置が I_L の小さい方へずれるのに対し、 p_{s1} のそれは I_L の大きい方へずれる。なお、図 8 を総合的にみると、 $I_L=40\text{ kA}$ 、 $\varphi_3=30^\circ$ の場合、 η_i が大きく、 p_{s1} も十分高いが、 η_{ent} が少し低い。また、 $\varphi_3=40^\circ$ の場合には、 $I_L=35\text{ kA}$ で η_{ent} が大きく、 η_i もかなり高いが、 p_{s1} が 1 に近いための特性は良好とはいえない。 $\varphi_3=50^\circ$ の場合の特性は更によくない。

以上より、 $\varphi_3=35^\circ$ 、 $I_L=40\text{ kA}$ の場合には前項(2)で示した $\varphi_3=30^\circ$ 、 $I_L=40\text{ kA}$ の場合よりも η_{ent} が 1% 以上改善されている。 η_{ent} での 1% 増加は出力電力では、5% 程度の増加になるため、決して低い改善率とはいえない。次に、図 9 は $\varphi_3=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ 、 $I_L=40\text{ kA}$ の場合における P_r の分布を示している。 φ_3 を増すとダクト中央部における P_r は増すが、出口領域では逆に減少する傾向がみられる。

以上みてきたように、単一負荷発電機においてダイアゴナル角を、従来の $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)=(90^\circ, 30^\circ, 30^\circ, 90^\circ)$ から、 β の分布に応じて $(90^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 60^\circ)$ とし、負荷電流 I_L を適切に選定することにより、発電特性が改善されることが明らかになった。

〈4.3〉 アスペクト比による特性改善 本節においては、ダイアゴナル角分布は前節の検討結果で得られた $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)=(90^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 60^\circ)$ を用いる。ダクト断面積 $A(x)$ は表 1 の入口、出口の断面積から直線拡大形ダクトで得られる

$$A(x) = (1.04 + 0.173x)^2 \dots\dots\dots (15)$$

を用いる。以下に、アスペクト比 $H(x)/D(x)$ と η_{ent} 、 η_i などの関係を調べる。

図 10 に $T_w=1,800\text{ K}$ とした場合の H/D 、 I_L と η_{ent} 、 η_i 、 p_{s1} との関係を示す。 η_{ent} は $H/D < 1$ では著しく低下するが、 $H/D=1.3\sim 1.5$ で極大値を示している。 η_i は $H/D \approx 1.2$ で極大になるが、 $1 < H/D < 1.5$ ではあまり大きな変化はない。従って、従来の $H/D=1$ の場合と比較すると、 H/D の適切な選定により、主に η_{ent} が少し増加することがわかる。但し、ここでは T_w が比較的高いため特性改善はわずかで、例えば、 $I_L=40\text{ kA}$ の場合について $H/D=1$ と 1.25 の特性を比較すると、後者では η_{ent} で 0.21%、 η_i で 0.15% の改善がみられている。

次に、図 11 には $T_w=1,500\text{ K}$ の場合について、図 10 と同様の関係を示した。両図を比較すると、図

図 10 η_{ent} 、 η_i 、 p_{s1} に対する I_L 、 H/D の影響 ($T_w=1,800\text{ K}$)

Fig. 10. Influences of I_L and H/D on η_{ent} , η_i and p_{s1} when $T_w=1,800\text{ K}$.

図 11 η_{ent} 、 η_i 、 p_{s1} に対する I_L 、 H/D の影響 ($T_w=1,500\text{ K}$)

Fig. 11. Influences of I_L and H/D on η_{ent} , η_i and p_{s1} when $T_w=1,500\text{ K}$.

11 では T_w が低いために η_{ent} 、 η_i は低いが、 H/D による特性改善の割合は大きくなっている。例えば、 $H/D=1$ と 1.6 の場合を比較すると、後者の方が η_{ent} で約 0.9%、 η_i で約 0.6% 高くなっている。

上記したように、適切な H/D を選ぶことによって特性が改善されるが、 T_w の低い場合の方が改善の割合が大きい。しかしながら、アスペクト比による特性改善の程度は、前述したダイアゴナル角によるそれより大きくはない。これは本解析の対象としているダクトが実用規模であるために、 δ が H に比べて十分小さいことによるものである。ちなみに、文献(7)によると δ が大きいほど H/D による特性改善が著しく現われている。

5. 多負荷発電機

〈5.1〉 数値条件 本節では単一負荷発電機の I_L と P_r の関係を検討した上で、複負荷(図 1 において $n=2$)および三負荷($n=3$)発電機の特性について検討を行なう。ダイアゴナル角の配分については、前章

図 12 P_p の分布 ($I_L=30, 40, 50\text{kA}$)

Fig. 12. Distribution of P_p when $I_L=30, 40$ and 50kA .

で示したように良好な特性を与える ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$) = ($90^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 60^\circ$) を用いる。出力電極番号, 出力電極数などについては, 文献(1)における検討結果から, $N_{L0}=1, N_{Ln}=93, N_{00}=N_{0n}=8, N_{0i}(i=1, 2, \dots, n-1)=3$ とし, $N_{L1}(i=1, 2, \dots, n-1)$ を種々変化させて発電特性に対するその影響を調べる。なお, そのほかの数値条件は表 1 に示した値を用いる。

(5.2) 複負荷 ($n=2$) 発電機 まず, 図 12 に単一負荷発電機の, 種々の I_L に対する P_p の x 方向における分布を示す。ダクト上流部においては I_L が大きいほど P_p が大きく, 下流部では I_L が小さいほどが大きくなっている。従って複負荷にした場合には, 上流で大きい I_L を, 下流部では小さい I_L をそれぞれ設定することにより, 発電機全体としての電力増が期待される。

図 13 には $N_{L1}=60$ の複負荷発電機の上流部負荷電流 I_{L1} , 下流部負荷電流 I_{L2} と $\eta_{ent}, \eta_i, p_{s1}$ との関係を示す。同図において鎖線は図 8 に示した単一負荷発電機について, $I_L=40\text{kA}$ の場合に得られた高特

図 13 $\eta_{ent}, \eta_i, p_{s1}$ に対する I_{L1}, I_{L2} の影響

Fig. 13. Influences of I_{L1} and I_{L2} on η_{ent}, η_i , and p_{s1} .

性値を示している。同図からわかるように η_{ent} については, $I_{L1}=35\sim 50\text{kA}$ の範囲で複負荷発電機の方が単一負荷発電機の特性よりも優れているが, η_i については, $I_{L1}=35\text{kA}$ のときに前者は後者より劣っている。従って, η_{ent} と η_i から総合的に考えて I_{L1} を単一負荷時に高特性を与える電流値より幾分大きく選ぶと, 複負荷にすることにより発電機特性がかなり改善される。次に $I_{L2}=20\sim 30\text{kA}$ のときに η_{ent} が大きくなり, $I_{L2}=30\text{kA}$ のときに η_i が高くなる。また, $p_{s1}>1$ を考慮するならば, I_{L1}, I_{L2} がともに小さくなりすぎないように注意すべきである。

以上述べたことを要約すると, 複負荷発電機においては, 負荷電流をダクト上流部で幾分大きくし, 下流部で幾分小さくすることにより, 単一負荷発電機よりも η_{ent}, η_i を $1.5\sim 2\%$ 高くすることができ, 特性が相当改善されるということができる。

次に, 図 14 に $I_{L1}=45\text{kA}, I_{L2}=30\text{kA}$ の場合の N_{L1} と $\eta_{ent}, \eta_i, p_{s1}$ との関係を示す。 N_{L1} を小さくすると η_{ent} は増すが, η_i, p_{s1} がかなり低下すること, η_i は $N_{L1}=60$ でピーク値をもつことなどから, N_{L1}

図 14 η_{ent}, η_i に対するの N_{L1} 影響

Fig. 14. Influence of N_{L1} on η_{ent} and η_i .

図 15 $\eta_{ent}, \eta_i, p_{s1}$ に対する N_{L1}, N_{L2} の影響

Fig. 15. Influences of N_{L1} and N_{L2} on η_{ent}, η_i , and p_{s1} .

図 16 η_{ent} , η_i , p_{sl} に対する H/D の影響 ($n=1, 2, 3$)

Fig. 16. Influence of H/D on η_{ent} , η_i and p_{sl} when $n=1, 2$ and 3 .

の最適値が存在することが予測される。

〈5・3〉三負荷 ($n=3$) 発電機 三負荷発電機の場合には、特性に影響を及ぼす負荷電流配分、出力電極位置などのパラメータが増加するので、検討計算を行なうべき数が飛躍的に増してくる。筆者らは、数多くの計算を試みた結果、 $I_{L1}=45\text{ kA}$, $I_{L2}=35\text{ kA}$, $I_{L3}=30\text{ kA}$ としたうえ、 N_{L1} , N_{L2} が特性に与える影響を調べることで、特性改善の可能性を調べる。

図 15 に N_{L1} , N_{L2} と η_{ent} , η_i , p_{sl} との関係を示す。但し、鎖線は複負荷発電機について $I_{L1}=45\text{ kA}$, $I_{L2}=30\text{ kA}$, $N_{L1}=60$ のときに得られた高特性値を示している。同図より、 N_{L1} を小さくすると η_{ent} は増すが、 η_i は $N_{L1}=60$ でピーク値をもち、 p_{sl} は単調に減少することがわかる。また、 N_{L2} についても同様の傾向がみられるが、 η_i は $N_{L2}=80$ でピーク値をもち、 N_{L1} と N_{L2} の適切な選定により、複負荷よりも優れた η_{ent} , η_i を得ることができる。

上述したように三負荷の場合には出力電極位置の調整のみによっても複負荷の場合よりも優れた特性が得られている。従って、負荷配分をも考慮すると、更に大幅な特性改善が期待される。

〈5・4〉アスペクト比による特性改善 図 16 に単一負荷、複負荷、三負荷発電機について、 H/D と η_{ent} , η_i , p_{sl} との関係を示した。但し、前節までの結果を参照して、単一負荷の場合には $I_L=40\text{ kA}$ 、複負荷の場合には $I_{L1}=45\text{ kA}$, $I_{L2}=30\text{ kA}$, $N_{L1}=60$ 、三負荷の場合には $I_{L1}=45\text{ kA}$, $I_{L2}=35\text{ kA}$, $I_{L3}=30\text{ kA}$, $N_{L1}=50$, $N_{L2}=80$ の条件をそれぞれ用いている。同図から、 η_{ent} , η_i は負荷数を増すに従って H/D による特性改善の程度が著しいことがわかる。

6. む す び

以上、本論文において得られた結果を要約すると、次のようになる。

(1) ダイアゴナル形 MHD 発電機全体の特性の改善に対し、幾つかの具体的手法を提案した。すなわち、ダイアゴナル角をホールパラメータ β の値に応じて適切に選定する手法、単一負荷よりも複負荷以上にして負荷配分を適切に制御する手法、アスペクト比 H/D を適切に選定する手法などを提案した。

(2) 一般に β がダクト入口側では小さく、出口に行くにつれて増加するので、 φ_1 を除いて $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ を順次適切に増加させる。例えば $(\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4)=(30^\circ, 35^\circ, 60^\circ)$ とすることにより、 $(30^\circ, 30^\circ, 90^\circ)$ とした場合よりも η_{ent} , η_i が 1% 以上向上させることができた。

(3) H/D が小さい場合には、 η_{ent} , η_i がともに著しく低下するが、 $H/D=1.5\sim 2$ において両者は極大値をもつ。また、壁温が低い場合の方が、高い場合に比べて H/D が η_{ent} , η_i に及ぼす影響が大であり、特性改善の割合が大きくなる。

(4) 単一よりも複負荷以上にし、ダクト上流部においては、単一負荷時に良好な特性を与える負荷電流よりも幾分大きく、下流部においては逆に幾分小さく選定することにより、単一負荷時よりも 1.5~2% 優れた η_{ent} , η_i が得られた。

(5) ダイアゴナル角分布を選定し、多負荷にして負荷電流配分を選定し、 H/D を 1.5~2 に選定することにより、 η_{ent} , η_i を従来の発電機より 3% 以上増加させることができた。

終わりに、本研究は昭和 55 年度文部省科学研究費補助金 (一般研究 D) の援助を得て行なわれたものであることを付記する。また本研究を進めるにあたり、貴重な御助言をいただいた本研究室の原 武久助教授に対し謝意を表します。

(昭和 56 年 9 月 3 日受付, 同 57 年 3 月 15 日再受付)

文 献

- (1) 吉田・卯本:「ダイアゴナル形 MHD 発電機の準二次元解析」電学論 A 99, 3, 105 (昭 54-3)
- (2) M. Yoshida, et al.: "A New Quasi-Two-Dimensional Analysis of Whole Electrical and Gasdynamical Performances of Linearly-Diverging Diagonal Type Generator", 7th Int. Conf. on MHD Elec. Power Gen., Vol. 2, p. 524 (1980)
- (3) Y. C. L. Wu, et al.: "Experimental Investigation on a Direct Coal-Fired MHD Generator", 15th Symp. EAM, IV, 6 (1976)
- (4) J. W. Muehlhauser, et al.: "Experimental Investigation of Multiple-Load Diagonal Conducting Wall Generators", 16th Symp. EAM, I, 3.19 (1977)
- (5) H. Schlichting: "Boundary-Layer Theory" 631 (1968) McGraw-Hill, New York
- (6) 藤本:「流体力学」p. 232 (昭 47) 養賢堂
- (7) 吉田・卯本・青木:「ファラデー形 MHD 発電機の特性改善」電学論 B 102, 95 (昭 57-2)
- (8) 岡田・荒田:「プラズマ工学」p. 644 (昭 40) 日刊工業新聞社