

盘式磁流体发电机中最佳种子份数变化规律研究

方秀珍^{1,2,3}, 彭爱武^{1,2}, 刘保林¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 华北科技学院, 河北 廊坊 065201)

摘要:在磁流体发电机中,为了提高工质电导率,通常需要加入少量低电离电位的碱金属,即种子。前期研究表明,在一定工况下存在最佳种子份数使发电机性能最优。本文通过非稳态准一维数值模拟,研究了盘式磁流体发电工质电离、等离子体流动和发电机性能特性,获得了热源参数和磁感应强度对最佳种子份数影响的变化规律,提出较宽最佳种子份数变化范围的调控方法。模拟结果表明,对于所给定的发电通道,在热源条件一定时,随着磁感应强度增加,最佳种子份数及其变化范围减小,种子流量的控制越精确。当磁感应强度一定时,随着热源滞止压力降低,最佳种子份数几乎保持不变,而且,最佳种子份数的变化范围增大,降低了种子流量控制的要求。另外,磁感应强度越低,在较低的热源滞止压力条件下,最佳种子份数变化范围越宽。

关键词:盘式磁流体发电机; 非平衡电离; 发电机性能; 种子份数; 磁感应强度; 滞止压力

DOI: 10.12067/ATEEE2003007 **文章编号:** 1003-3076(2020)11-0041-07 **中图分类号:** TM916

1 引言

利用非平衡等离子体的磁流体发电机作为一种新型能量转换装置,与其他能量转换装置相比^[1,2],因其热效率高、功率密度大、可降低系统质量等优点,在空间发电装置^[3-6]、磁流体推进和加速^[7,8]等航空航天应用中具有潜在的应用前景,引起了人们的关注^[9]。

由于空间环境的特殊性,以及对电源系统尺寸和重量的限制,盘式磁流体发电机(如图1所示)由于其结构紧凑、磁体结构和电极简单,并在较低气体温度下发电通道中更易形成均匀非平衡等离子体而提高工质电导率等优点,使其更具优势。因此,研究发展高焓提取率的大功率盘式磁流体发电机具有重要的战略意义。

盘式磁流体发电机采用加入少量低电离电位的碱金属(称为种子)的惰性气体作为工质。通过增强种子电离,实现高电导率,可以在相对较低的惰性气体温度下高效地运行盘式磁流体发电机。种子份数(种子与惰性气体的摩尔比)是盘式磁流体发电

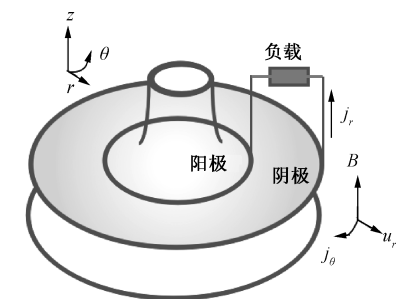


图1 盘式发电机结构示意图
Fig.1 Structure overview of disk generator

机的重要参数之一。关于种子份数的影响,从准一维^[10]、二维^[11]和三维^[12]的角度分别讨论了种子份数随时间变化和在平面内及空间内种子份数的不均匀性对等离子体行为及其发电机性能的影响。研究发现,种子份数在接近最佳条件时,等离子体结构几乎是均匀的,但在远离最佳值的情况下,由于种子材料的部分电离,观察到了非均匀、不稳定的等离子体结构,导致等离子体流动特性不均匀而显著降低发电机的性能。这表明,加种子等离子体的盘式磁流体发电机在一定工况下运行时,种子份数的高低对

收稿日期: 2020-03-04
作者简介: 方秀珍(1977-),女,吉林籍,博士研究生,研究方向为磁流体发电技术;
彭爱武(1964-),女,湖南籍,研究员,博士,研究方向为波浪能利用技术、磁流体发电技术、磁流体船舶推进技术及其应用等(通讯作者)。

发电机的运行性能有着直接影响。通常,加种子等离子体的盘式磁流体发电机对种子份数要求精确。

前期数值模拟^[10-12]和实验研究表明^[13-19],加种子等离子体的盘式磁流体发电机在一定工况下存在最佳种子份数,使发电机性能最优。同时,发电机性能对种子份数非常敏感,发电机最优性能所需的种子份数变化范围非常窄,不利于发电机变工况运行。本研究采用非稳态准一维数值模拟,通过研究盘式磁流体发电机工质电离、等离子体流动和发电机性能特性,分析热源参数和磁感应强度对最佳种子份数影响的变化规律,提出较宽种子份数变化范围的调控方法。

2 数值分析

2.1 基本方程

非平衡等离子体采用双温模型描述^[19],如下列出圆柱坐标系下非平衡等离子体非稳态准一维磁流体控制方程,由磁流体的气体动力学参数基本方程、等离子体的电参数基本方程和理想气体状态方程组成。

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + u_r \frac{\partial(\rho A)}{\partial r} = -\rho A \frac{\partial u_r}{\partial r} \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial p}{\partial r} + j_{\theta} B_z + \frac{\rho u_{\theta}^2}{r} - P_{Lr} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial u_{\theta}}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_{\theta}}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \left(j_r B_z + \frac{\rho u_r u_{\theta}}{r} \right) \tag{3}$$

$$\frac{\partial(c_v T_g)}{\partial t} + u_r \frac{\partial(c_v T_g)}{\partial r} = -\frac{P}{\rho A} \frac{\partial}{\partial r} (u_r A) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{j_r^2 + j_{\theta}^2}{\sigma} + u_r P_{Lr} - Q_L \right) \tag{4}$$

$$\frac{\partial(n_i A)}{\partial t} + u_r \frac{\partial(n_i A)}{\partial r} = \dot{n}_i A - n_i A \frac{\partial u_r}{\partial r} \tag{5}$$

(i = seed, noble gas, ion)

$$\frac{j_r^2 + j_{\theta}^2}{\sigma} = 3n_e k (T_e - T_g) \sum_h \frac{m_e v_{eh}}{m_h} + \sum_i \dot{n}_i \left(\frac{3}{2} k T_e + \varepsilon_i \right) \tag{6}$$

(h = seed, noble gas, ion; i = seed, noble gas)

$$j_r = \frac{\sigma}{1 + \beta^2} (E_r + u_{\theta} B_z + \beta u_r B_z) \tag{7}$$

$$j_{\theta} = \frac{\sigma}{1 + \beta^2} (\beta E_r + \beta u_{\theta} B_z - u_r B_z) \tag{8}$$

$$\frac{\partial(r E_{\theta})}{\partial r} = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial(j_r r h_z)}{\partial r} = 0 \tag{10}$$

$$P = \rho R T_g \tag{11}$$

式中, ρ 为气体质量密度; u 为气体速度; P 为气体压强; R 为气体常数; T_g 为气体温度; j 为电流密度; c_v 为定容比热容; Q_L 为热损失; P_{Lr} 为壁面摩擦阻力; B_z 为磁感应强度; A 为横截面面积; T_e 为电子温度; n 为粒子数密度; \dot{n} 为粒子产生率; m 为粒子质量; ε 为电离能; k 为玻尔兹曼常数; σ 为电导率; n_e 为电子数密度; m_e 为电子质量; v_{eh} 为电子与其他粒子的碰撞频率; β 为霍尔系数; E 为电场强度;下角标 r 、 θ 表示 r 、 θ 方向分量。考虑盘式发电机和超导磁体的配置和布局,假设磁感应强度只有 z 向分量 B_z ,上面方程的推导过程使用了这个假设。

2.2 计算条件和边界条件

盘式发电机的数值计算区域和计算条件如图 2 和表 1。径向(r)从喷嘴入口到阴极出口。

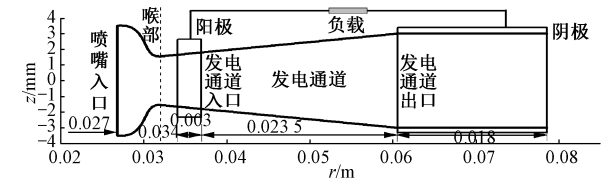


图 2 盘式发电机的计算区域
Fig.2 Calculation region of disk generator

表 1 盘式发电机的计算条件	
Tab.1 Calculation conditions of disk generator	
工质气体	Ar+Cs
种子份数	2E-5~5E-3
滞止压强/MPa	0.5/0.4/0.3
入口滞止温度/K	2 200
入口电子温度/K	3 000
磁感应强度/T	2~7

对于入口边界条件,喷嘴入口处滞止压力和滞止温度固定,气体的状态参数满足等熵关系,并设气体切向速度为零;喷嘴入口电子温度设为 3 000 K^[20]。对于出口边界条件,指定阴极出口为自由流出。流场分析区域与电磁场分析区域一致,整个分析区域磁感应强度均匀分布,沿 z 向。假设壁面温度 500 K^[20]。

3 结果与分析

研究中发电通道结构确定,采用非平衡盘式磁流体发电机的非稳态准一维控制方程组,通过调控磁感应强度和热源滞止压力,研究盘式磁流体发电工质电离、等离子体流动和发电机性能特性,使发电机可以在较宽的种子份数条件下仍可获得良好的发电等离子体状态,而不显著影响发电机的性能。

3.1 磁感应强度

在热源滞止压力(P_0) 0.4 MPa 和滞止温度(T_0) 2 200 K 情况下给出了不同磁感应强度($B=2\sim 7$ T)的种子份数($sf=2\times 10^{-5}\sim 5\times 10^{-3}$)与盘式发电机焓提取率(Enthalpy Extraction rate, E.E.)的关系,如图 3 所示。发电机的性能均在最优负载下获得。

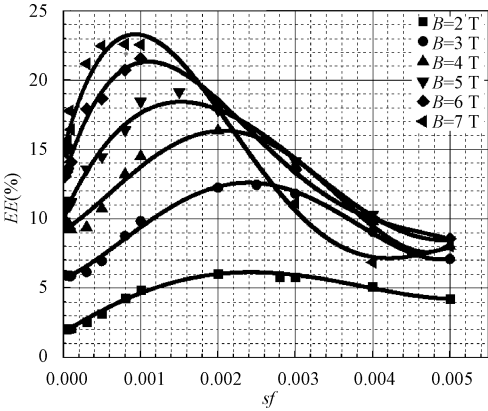


图 3 种子份数与发电性能的关系

Fig.3 Relationship between seed fraction and power generation performance

由图 3 可知,随着磁感应强度的增加,发电机的焓提取率显著上升,最佳种子份数由 10^{-3} 量级逐渐减小到 10^{-4} 量级,并且发电机最优性能的工作范围越来越窄,对种子份数的要求越来越精确。

在 $P_0=0.4$ MPa, $T_0=2\ 200$ K,磁感应强度 2 T 和 7 T 时显示了种子份数相对各自最佳种子份数($sf=2\times 10^{-3}$ 和 8×10^{-4})减小和增大时发电通道中种子 Cs 电离度、电子数密度和等离子体马赫数沿径向的变化规律,如图 4~图 6 所示。

由图 4(a)可知,磁感应强度较小($B=2$ T)时,盘式发电通道中电子吸收的焦耳热显著减少,种子份数越小越有利于发电通道中低电离能种子 Cs 电离度提高,提高发电通道中等离子体非平衡电离稳定性。但是由于磁感应强度较小,等离子体受磁感应强度的影响弱,显著降低了等离子体的磁流体(Magnetohydrodynamics, MHD)效应,使得发电通道

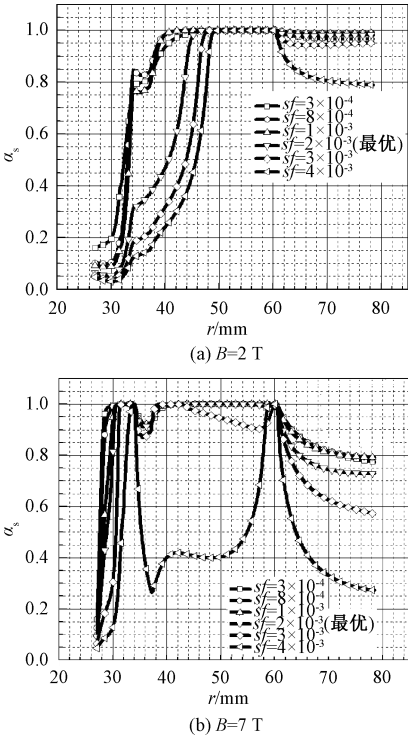


图 4 种子 Cs 电离度沿径向分布

Fig.4 Distribution of seed CS ionization degree along flow direction

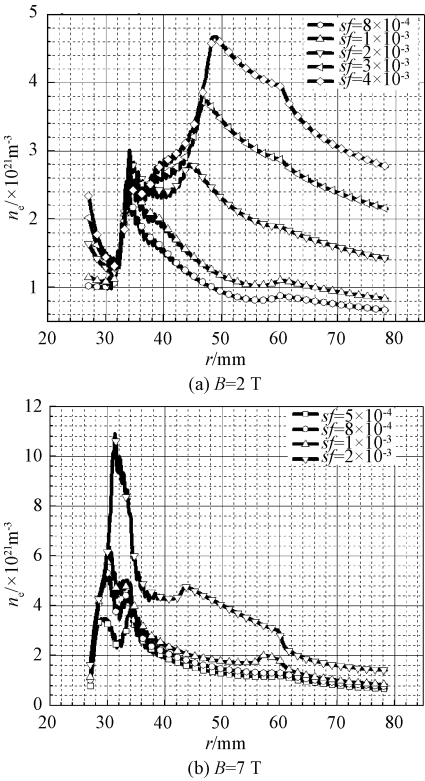


图 5 电子数密度沿径向分布

Fig.5 Distribution of electron number density along flow direction

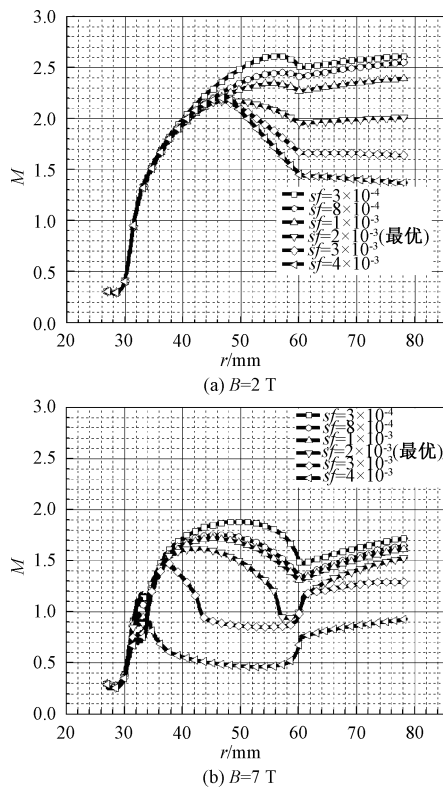


图 6 等离子体马赫数沿径向分布

Fig.6 Distribution of plasma Mach number along flow direction

中等离子体惯性力不断增大,加速等离子体的流动(如图 6(a)所示)。这导致等离子体的热能绝大部分转换为等离子体的动能,降低了发电机的热电转换能力。随着种子份数的增加,发电通道上游种子 Cs 的电离度显著下降,显著降低等离子体非平衡电离的稳定性。

然而,由于发电通道中等离子体流动速度的增加(如图 6(a)所示),等离子体吸收的焦耳热不断增大,发电通道下游种子 Cs 的电离度开始不断提高。在发电通道下游,种子份数越多,电子数密度越大(如图 5(a)所示),等离子体逐渐受到越来越强的 MHD 效应,不断使发电通道中等离子体的流动减速(如图 6(a)所示),提高发电机的性能。当种子份数再继续增大时,发电通道中等离子体非平衡电离稳定区域不断缩小,随着电子数密度的不断增大,等离子体 MHD 效应显著增强,降低了电子的自由行程,使得电子的迁移率下降,导致电子的霍尔漂移降低,发电机性能下降。因此,较小磁感应强度下,较高种子份数,更有利于提高等离子体 MHD 效应,改善发电机的性能(如图 3 所示)。而且,当种子份数偏离最优种子份数时,在较小磁感应强度下,

不易显著改善发电通道中等离子体非平衡电离特性。所以,较小磁感应强度下,发电机能在较宽的种子份数下维持发电机较高的性能。

由图 4(b)可知,当磁感应强度增大($B=7\text{ T}$)时,盘式发电通道中电子吸收的焦耳热显著增加,明显提高发电通道中低电离能种子 Cs 的电离度,甚至可以使较大种子份数的种子 Cs 在发电通道中几乎完全电离。这样就显著提高了等离子体 MHD 效应,即使在较小种子份数时等离子体流动速度也发生显著降低(如图 6(b)所示)。随着种子份数增加,电子数密度明显增多(如图 5(b)所示),显著增强等离子体的导电性,使得等离子体流速不断降低。这有利于发电机性能的提高。甚至,由于随着种子份数增加,显著增大了洛伦兹力对等离子体的压缩作用,在发电通道中产生了不可逆的压缩波——激波,使得发电通道中出现不均匀等离子体,导致发电机的性能下降。随着种子份数增加,强大的 MHD 效应甚至使整个发电通道中的等离子体处于亚音速流动状态,降低等离子体吸收的焦耳热,使得种子 Cs 的电离度急速下降,导致等离子体非平衡电离不稳定。所以,磁感应强度较大时,发电通道中等离子体 MHD 效应显著增强,发电机最优性能极易受种子份数的影响,对种子份数流量的控制要求更精确,使得种子份数的调控范围缩小。

3.2 热源滞止压力

图 7 在 $T_0=2\text{ 200 K}$,磁感应强度 3 T 和 7 T 情况下给出了不同热源滞止压力($P_0=0.3\text{ MPa}$ 、 0.4 MPa 和 0.5 MPa)的种子份数($sf=2\times 10^{-5}\sim 5\times 10^{-3}$)与盘式发电机焓提取率的关系。图 7 中发电机焓提取率均在最优负载下获得。

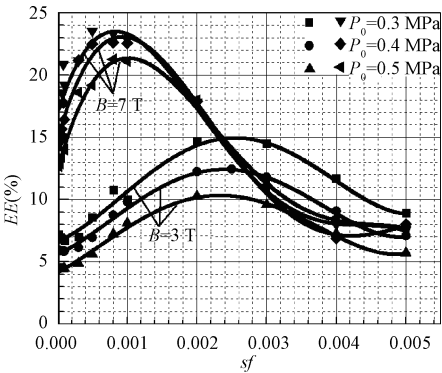


图 7 热源滞止压力与发电机性能的关系

Fig.7 Relationship between stagnation pressure of heat source and performance of generator

由图 7 可知,适当降低热源滞止压力能够提高发电机的最优性能,有利于发电机在较宽种子份数下工作,降低发电机最优性能对种子份数的精确要求。热源滞止压力在一定范围内变化时,发电机最优性能所需的最佳种子份数几乎不受影响。而且,磁感应强度越低,热源滞止压力的降低越有利于发电机在较宽的种子份数下工作,而不显著影响发电机的性能。

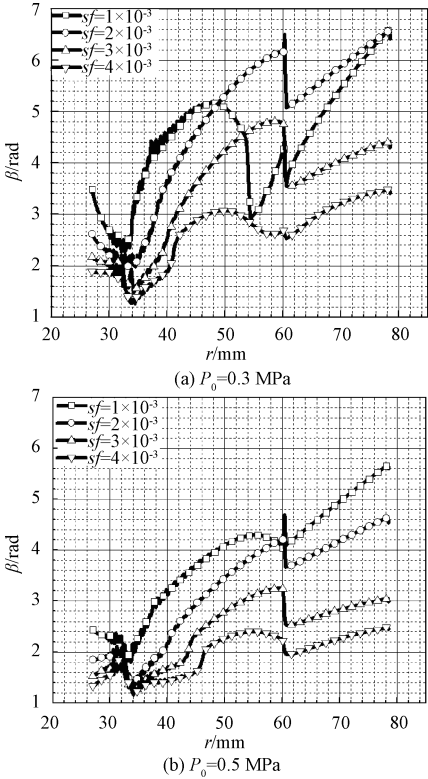


图 8 等离子体霍尔系数沿径向分布 ($B=3\text{ T}$)

Fig.8 Distribution of Hall parameter of plasma along flow direction ($B=3\text{ T}$)

在 $T_0=2\ 200\text{ K}$, $B=3\text{ T}$, 滞止压力 0.3 MPa 和 0.5 MPa 情况下分别给出了不同种子份数 ($sf=1\times10^{-3}$ 、 2×10^{-3} 、 3×10^{-3} 和 4×10^{-3}) 的等离子体霍尔系数沿径向分布规律。比较图 8(a) 和图 8(b) 可知,等离子体在较高滞止压力下,等离子体的霍尔系数比较低滞止压力下相同种子份数产生的等离子体霍尔系数明显降低。这主要是由于在较低滞止压力下,等离子体承受的静压小,减少了电子与其他粒子的碰撞,使得等离子体电子温度提高 (如图 9 所示),抑制了电子与离子的复合,提高了种子 Cs 的电离度,改善了发电通道中等离子体非平衡电离的稳定性,使等离子体电子迁移能力提高,从而使发电机的热电转换效率增加。因此,适当地降低热源滞

止压力有利于提高发电机的性能。

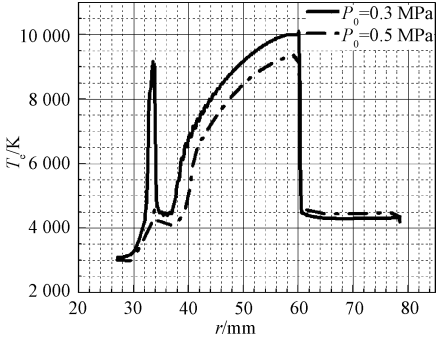


图 9 $B=3\text{ T}$ 电子温度沿径向分布

Fig.9 Distribution of electron temperature along flow direction ($B=3\text{ T}$)

然而,对于较低磁感应强度,最佳种子份数较大,发电通道中等离子体非平衡电离结构不稳定 (如图 4(a) 所示)。因此,在 $0.5\sim0.3\text{ MPa}$ 范围内,降低热源滞止压力,改善了发电通道中等离子体非平衡电离的不稳定结构,使得相应种子份数下,发电机的性能明显提高,增宽了发电机最优性能所需种子份数的范围,并且适当降低热源滞止压力,几乎不影响发电机最优性能所需要的最佳种子份数。东京工业大学在较低热源滞止压力 0.25 MPa , 较低磁感应强度 2.7 T 下利用激波管设施驱动盘式磁流体发电机^[18],实验测量和评估了种子份数在 $3.9\times10^{-4}\sim10\times10^{-4}$ 时发电机的性能。实验数据曲线,见文献^[18] 中图 2。由此实验数据可见,此实验在较低磁感应强度和较低热源滞止压力下实验评估的发电机性能在较宽的种子份数下几乎不受影响。

在 $T_0=2\ 200\text{ K}$, $B=7\text{ T}$, 滞止压力 0.3 MPa 和 0.5 MPa 情况下分别给出了不同种子份数 ($sf=5\times10^{-4}$ 、 8×10^{-4} 、 1×10^{-3} 和 2×10^{-3}) 的等离子体霍尔系数沿径向分布规律。由图 10 可知,在较高磁感应强度下,热源滞止压力降低,虽然提高了发电通道中等离子体霍尔系数,但是影响并不显著。这主要是由于在较大磁感应强度下发电通道中等离子体在较低种子份数下极易处于等离子体非平衡电离的稳定状态。因此,滞止压力的降低虽然改善了偏离最佳种子份数工况下等离子体的电离状态,但是由于磁感应强度较大,等离子体的 MHD 效应强,这又极易破坏发电通道中等离子体非平衡电离的稳定性。所以,磁感应强度较大时,对扩大发电机最佳种子份数的工作范围,通过降低滞止压力的这种调控方法效果并不显著,并且滞止压力的变化也几乎不影响发

电机最优性能所需要的最佳种子份数。

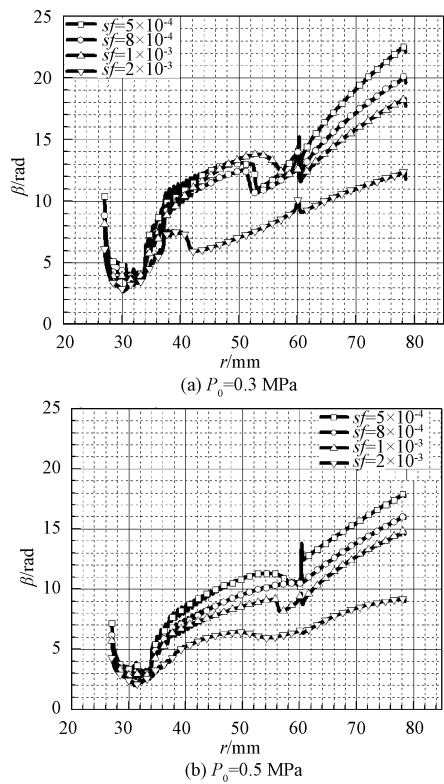


图 10 等离子体霍尔系数沿径向分布($B=7\text{ T}$)
Fig.10 Distribution of Hall parameter of plasma along
flow direction ($B=7\text{ T}$)

4 结论

本文中,发电通道结构确定,利用非平衡盘式磁流体发电机的准一维数值模拟方法,分析热源参数和磁感应强度对最佳种子份数影响的变化规律,提出较宽种子份数变化范围的调控方法。工质 $\text{Ar}+\text{Cs}$,分析区域从喷嘴入口到阴极出口。结论如下:

- (1)在热源条件一定时,随着磁感应强度的增加,发电机的焓提取率显著上升,最佳种子份数由 10^{-3} 量级逐渐减小到 10^{-4} 量级。
- (2)在热源条件一定时,随着磁感应强度的增加,发电机最优性能的工作范围越来越窄,对种子流量控制要求越来越精确。
- (3)在磁感应强度确定时,热源滞止压力在一定范围内变化时,发电机最优性能所需的最佳种子份数几乎不受影响。
- (4)在磁感应强度确定时,适当降低热源滞止压力能够提高发电机的最优性能,有利于发电机在较宽种子份数下工作,降低对种子流量控制的要求;而且,磁感应强度越低,热源滞止压力的降低越有利

于发电机在较宽的种子份数下工作,而不显著影响发电机的性能。

参考文献 (References):

[1] 杜燕, 赵韩广, 张显创, 等 (Du Yan, Zhao Hanguang, Zhang Xianchuang, et al.). 一种无锁相环动态阻尼的虚拟同步发电机 (Virtual synchronous generator adopting dynamic damping without frequency detection) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (7): 10-19.

[2] 柴秀慧, 张纯江, 柴建国, 等 (Chai Xiuhui, Zhang Chunjiang, Chai Jianguo, et al.). 蓄电池-超级电容混合储能系统性能优化 (Performance optimization of battery-ultracapacitor hybrid energy storage system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (9): 33-41.

[3] Jackson W D, Seikel G R. Cesium-seeded hydrogen-magnetohydrodynamic disk generator [A]. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference-IECEC 96 [C]. 1996. 860-865.

[4] Litchford R J, Robertson G A, Hawk C W, et al. Magnetic flux compression reactor concepts for space craft propulsion and power [A]. 31st Plasmadynamics and Lasers Conference [C]. 2000.

[5] Bitteker Leo. Nuclear-induced electrical conductivity in ^3He [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83 (8): 4018-4023.

[6] Litchford Ron J, Cole John, Lineberry John, et al. Magnetohydrodynamic augmented propulsion experiment [A]. 33rd Plasmadynamics and Lasers Conference [C]. 2002.

[7] Fraishtadt V L, Kuranov A L, Sheikin E G. Use of MHD systems in hypersonic aircraft [J]. Technical Physics, 1998, 43 (11): 1309-1313.

[8] Litchford Ron J, Cole John, Bityurin V A, et al. Thermodynamic cycle analysis of magnetohydrodynamic-bypass hypersonic air breathing engines [J]. Journal of Propulsion & Power, 2000, 17 (2): 477-480.

[9] Richard J Rosa. Experimental magnetohydrodynamic power generator [J]. Journal of Applied Physics, 1960, 31 (4): 735-736.

[10] Okuno Y. Effect of external fluctuations on the performance of a closed cycle disk MHD generator [J]. Transactions on Electrical and Electronic Engineering of Japan, 1988, 108: 614.

[11] Murakami T, Kobayashi H, Okuno Y, et al. Plasma behavior in a non-equilibrium disk MHD generator with a spatially non-uniform seed fraction [J]. Electrical Engi-

- neering in Japan, 1999, 126 (4): 48-54.
- [12] Shimizu K, Okuno Y, Yamasaki H, et al. Numerical simulation of plasma and fluid flow in a shock-tube-driven disk MHD generator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28 (5): 1706-1712.
- [13] Torii Syunsuke, Tsutsumi Masashi, Okuno Yoshihiro, et al. Improvement of performance of disk MHD generator with argon by introduction of swirl [J]. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan B, 2001, 121 (1): 18-25.
- [14] Murakami T, Okamura T. Effect of load segmentation on the performance of a nonequilibrium disk MHD generator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30 (5): 1999-2004.
- [15] Murakami T, Suekane T, Tsuji K, et al. Electron temperature measurement and performance of a nonequilibrium disk MHD generator [J]. Electrical Engineering in Japan, 1997, 120 (1): 16-22.
- [16] Okuno Y, Kabashima S, Okamura T, et al. Experimental studies on closed cycle MHD power generation with Fuji-1 facility [A]. Energy Conversion Engineering Conference [C]. 1996. 848-853.
- [17] Murakami T, Okuno Y, Yamasaki H. Non-equilibrium plasma MHD electrical power generation at Tokyo Tech [A]. AIP Conference Proceedings [C]. United States, 2008.
- [18] Shimizu K, Okuno Y, Yamasaki H, et al. Numerical simulation of plasma and fluid flow in a shock-tube-driven disk MHD generator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28 (5): 1706-1712.
- [19] Rosa R J. Nonequilibrium ionization in MHD generators [J]. Proceedings of the IEEE, 1963, 51 (5): 774-778.
- [20] Suekane T, Yoshikawa K, Kabashima S. The effects of boundary layer phenomena on the performance of disk CC-MHD generator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1995, 23 (1): 97-102.

Study on changing rule of optimal seed fraction in disk MHD generator

FANG Xiu-zhen^{1,2,3}, PENG Ai-wu^{1,2}, LIU Bao-lin¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China)

Abstract: In order to improve the conductivity of working fluid, a small amount of alkali metal with low ionization potential, i.e. seed, is usually added to the MHD generator. The previous research shows that there is an optimal seed fraction to optimize the performance of the generator. At the same time, the performance of generator is very sensitive to the seed fraction. In this paper, the characteristics of working medium ionization, plasma flow and generator performance of disk MHD power generation are studied by unsteady quasi-one-dimensional numerical simulation. The simulation results show that, for the given generation channel, when the heat source condition is fixed, with the increase of magnetic flux density, the optimal seed fraction and its range of variation decrease, and the control of seed flow is more accurate. When the magnetic flux density is constant, the optimal seed fraction will remain almost unchanged with the decrease of the stagnation pressure of the heat source, and the range of the optimal seed fraction will increase, which will reduce the requirement of seed flow control. In addition, the lower the magnetic flux density is, the wider the variation range of the optimal seed fraction is under the condition of lower stagnation pressure of heat source.

Key words: disk MHD generator; non-equilibrium ionization; generator performance; seed fraction; magnetic flux density; stagnation pressure