

盘式磁流体发电机通道结构对等离子体稳定性的影响研究

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: 盘式磁流体发电机工质因其主要吸收切线方向法拉第电流产生的自激焦耳热而形成非平衡电离等离子体。当盘式通道型线一定时, 等离子体松弛区域的变化将改变发电通道入口等离子体吸收自激焦耳热区域的大小, 引起发电通道入口等离子体电离状态变化, 导致等离子体非平衡电离不稳定, 严重影响发电机输出性能。本文采用非平衡盘式磁流体发电机的非稳态准一维数学模型进行数值模拟, 分析较高磁感应强度下盘式磁流体发电机等离子体松弛区域对等离子体稳定性和磁流体流动特性的影响。分析结果表明: 当发电通道型线和气体滞止状态一定时, 等离子体松弛区域的改变抑制发电通道中电子数密度的波动, 维持等离子体非平衡电离的稳定性, 促进发电机性能的提高; 磁感应强度越高, 等离子体松弛区域越小, 最优阳极位置越靠近圆盘中心, 发电通道中等离子体越容易达到非平衡电离的稳定; 等离子体松弛区域的改变抑制了发电通道中或发电通道前等离子体流动中激波的产生, 维持了发电通道中等离子体适当的超音速流动, 促进发电机性能的提高; 磁感应强度越大, 发电通道中激波的产生越受等离子体松弛区域的影响, 发电机的性能极易恶化。

关键词: 盘式磁流体发电机; 等离子体松弛区域; 非平衡电离; 磁感应强度; 等离子体稳定性

DOI: 10.12067/ATEEE2003006

文章编号: 1003-3076(2020)09-0013-07

中图分类号: TM916

1 引言

自1960年以来, 人们开始关注一种潜在的新型能源转换装置-非平衡等离子体的磁流体(Magneto-hydrodynamics, MHD)发电机。磁流体发电机是一种将热能直接转化成电能的新型发电方式。由于MHD发电机使用高温气体($\sim 2000\text{ K}$), 它可以提供比传统发电设备更高的能量转换效率, 比其他能量转换装置^[1,2]功率密度大, 又因其没有机械运动部件^[3], 在航天器的应用中具有独特优势。研究发展高焓提取率的大功率磁流体发电机, 提高能源系统转换效率、降低初始质量、缩短飞行时间, 具有重要的战略意义。

磁流体发电机有两种类型: 直线型和盘型, 盘型结构如图1所示。盘式磁流体发电机由于其结构紧凑、磁体结构简单和在较低气体温度下发电通道中更易形成非平衡等离子体而提高工质电导率等优

点, 备受各国研究者的青睐。尤其, 东京工业大学在过去的40年中, 利用数值模拟^[4]和磁流体发电实验研究^[5-7], 不断探索发电通道中非平衡电离的稳定性和均匀性问题, 从而促使发电机性能得到提高。

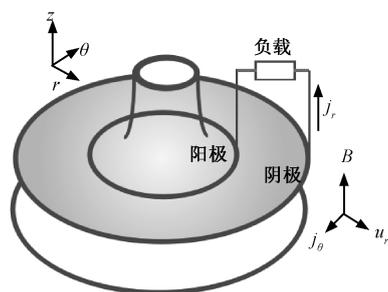


图1 盘式磁流体发电机结构示意图

Fig.1 Structure overview of disk MHD generator

研究表明, 在非平衡MHD盘式发电机中, 电离不稳定性可以通过发电通道前一短的开路等离子体

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)。

松弛区域达到稳定的目的^[8], 研究中讨论了磁感应强度由 1.5 T 升高到 2 T 时松弛区域对等离子体稳定性和发电机性能的影响。大量的研究者们^[9-16] 开展了松弛区域确定时如何通过改变工况和发电通道形状而达到稳定等离子体非平衡电离的目的。那么, 当通道形状确定时, 较高磁感应强度下, 等离子体松弛区域的大小对等离子体的稳定性的影响又如何呢?

本研究利用非稳态准一维数值模拟方法进一步探讨当通道形状确定时, 较高磁感应强度下等离子体松弛区域对等离子体非平衡电离稳定性的影响, 阐述等离子体松弛区域对等离子体电离和流动特性的影响, 揭示等离子体松弛区域影响等离子体稳定性的物理现象。

2 数值分析

2.1 基本方程

基本方程由基于两温模型描述非平衡等离子体的磁流体方程、麦克斯韦方程和状态方程组成^[17]。

首先, 等离子体气体动力学参数的基本方程用式(1)表示:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + u_r \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial r} = \mathbf{C} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho A \\ \rho u_r \\ \rho u_\theta \\ \rho c_v T_g \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -\rho A \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \frac{\rho u_\theta^2}{r} + j_\theta B_z - f_r - \frac{\partial(p + p_{\text{art}})}{\partial r} \\ -\frac{\rho u_r u_\theta}{r} - j_r B_z \\ \frac{j_r^2 + j_\theta^2}{\sigma} + f_r u_r - Q_{\text{loss}} - \frac{p + p_{\text{art}}}{A} \frac{\partial(u_r A)}{\partial r} \end{bmatrix}$$

$$p = \rho R T_g \quad (2)$$

式中, ρ 为气体密度; \mathbf{u} 为气体流速; p 为气体压强; T_g 为气体温度; \mathbf{j} 为电流密度; p_{art} 为人工粘性项; B_z 为磁感应强度; R 为气体常数; c_v 为定容比热容; Q_{loss} 为热损失; f_r 为壁面摩擦阻力; σ 为电导率; A 为横截面积; 下角标 r, θ, z 表示 r, θ, z 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。

其次, 等离子体电参数的基本方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (4)$$

$$j_r = \frac{\sigma}{1 + \beta^2} (E_r + u_\theta B_z + \beta u_r B_z) \quad (5)$$

$$j_\theta = \frac{\sigma}{1 + \beta^2} (\beta E_r + \beta u_\theta B_z - u_r B_z) \quad (6)$$

$$\frac{\partial n_h}{\partial t} + n_h \nabla \cdot \mathbf{u} = \dot{n}_h \quad (7)$$

$$\frac{\partial n_c}{\partial t} + n_c \nabla \cdot \mathbf{u} = \dot{n}_c \quad (8)$$

$$\frac{\partial n_{\text{ih}}}{\partial t} + n_{\text{ih}} \nabla \cdot \mathbf{u} = \dot{n}_{\text{ih}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial n_{\text{ic}}}{\partial t} + n_{\text{ic}} \nabla \cdot \mathbf{u} = \dot{n}_{\text{ic}} \quad (10)$$

$$n_e = n_{\text{ih}} + n_{\text{ic}} \quad (11)$$

$$\frac{j_r^2 + j_\theta^2}{\sigma} = \frac{3}{2} \delta n_e m_e k (T_e - T_g) \left(\frac{v_h}{m_h} + \frac{v_c}{m_c} + \frac{v_{\text{ih}}}{m_{\text{ih}}} + \frac{v_{\text{ic}}}{m_{\text{ic}}} \right) + \frac{3}{2} k T_e \dot{n}_e + \sum_j \varepsilon_{\text{hj}} \dot{n}_{\text{hj}} + \sum_j \varepsilon_{\text{cj}} \dot{n}_{\text{cj}} \quad (12)$$

式中, \mathbf{E} 为电场强度; T_e 为电子温度; β 为霍尔系数; n 为粒子数密度; \dot{n} 为粒子净产生率; m 为粒子质量; ε 为电离能; ν 为电子与粒子碰撞频率; δ 为非弹性碰撞损失系数(本研究中 $\delta = 2$); k 为玻尔兹曼常数; 下角标 $e, \text{hj}, \text{cj}, \text{h}, \text{c}, \text{ih}, \text{ic}$ 表示自由电子、氢的 j 层价电子、铯的 j 层价电子、氢原子、铯原子、氢离子和铯离子。

2.2 计算条件和边界条件

盘式发电机的数值计算区域如图 2 所示, 计算条件列于表 1 中。

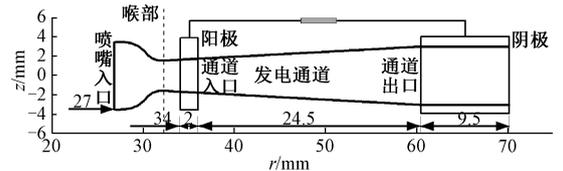


图2 盘式发电机的计算区域

Fig.2 Calculation region of disk generator

数值计算栅格点的数目为 182。 r 方向栅格平均长 0.2 mm。为了满足 CFL 条件, 时间步长为

表 1 盘式发电机的计算条件

Tab.1 Calculation condition of disk generator

参数	数值
工质气体	Ar+Cs
种子份数	2×10^{-4}
入口滞止压强/MPa	0.4
入口滞止温度/K	2 200
磁感应强度/T	3~8
入口电子温度/K	3 000
入口旋流比	0

0.01 μ s。等离子体松弛区域的大小由阳极的放置位置决定。本研究中,阳极入口半径范围为 $r=28 \sim 50$ mm(2 mm 宽),对应的等离子体松弛区域为 1~13 mm。阴极位于 $r=60.5 \sim 70$ mm。从喷嘴入口到阴极出口计算等离子体的流动特性和电离特性。磁场垂直于盘面均匀作用于整个发电机计算区域。计算中,发电机的负载均调整到使发电机的性能达到最优。

2.3 边界条件

(1)入口边界:滞止压力和滞止温度固定不变,见表1。径向速度,静温,静压由等熵膨胀计算。切向速度设为零。在入口电子温度条件下,通过 saha 平衡方程计算电子数密度。

(2)壁面边界:气体无滑移,壁面温度设为 500 K^[18]。

(3)出口边界:气体自由流出。

3 结果与分析

图3在种子份数(sf) 2×10^{-4} 、滞止压力(P_0)0.4 MPa和滞止温度(T_0)2 200 K的情况下,给出了不同磁感应强度($B=3 \sim 8$ T)的阳极位置($AIR=28 \sim 50$ mm)与盘式发电机焓提取率($E.E.$)的关系。

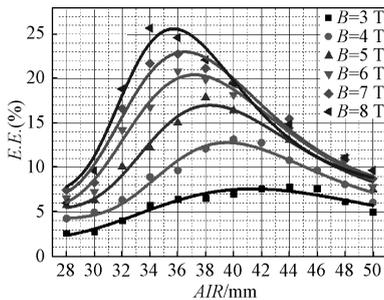


图3 阳极位置与发电机焓提取率的关系

Fig.3 Relationship between anode position and enthalpy extraction rate

由图3可知,当磁感应强度确定时,发电机最优

焓提取率都存在一个最优阳极位置;随着磁感应强度增加,发电机最优阳极位置逐渐靠近圆盘中心,等离子体松弛区域缩小,发电机最优焓提取率显著提高;而且,磁感应强度越大,发电机最优性能受等离子体松弛区域影响越显著。

为了揭示图3中阳极位置对发电机性能影响的物理现象,研究中给定盘式发电通道型线和气体滞止状态,通过调整磁感应强度,分析阳极位置对等离子体电离特性、等离子体流动特性以及发电机输出特性的影响。

3.1 等离子体电离特性

在 $P_0=0.4$ MPa, $T_0=2 200$ K, $sf=2 \times 10^{-4}$, 磁感应强度分别为 4 T 和 7 T 时,在各自最优阳极位置临近处给出了电子数密度和种子 Cs 电离度沿流动方向的分布规律,如图4和图5所示。

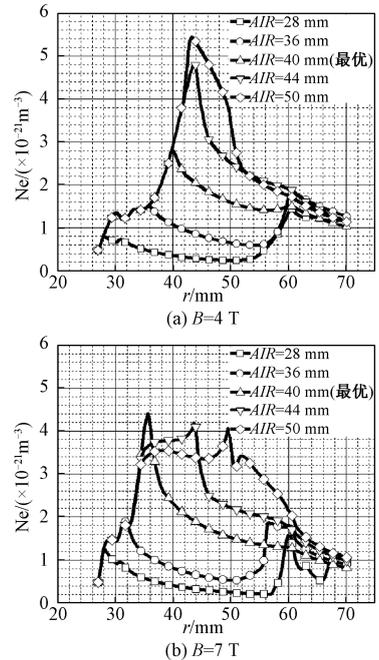


图4 电子数密度沿流动方向分布

Fig.4 Distribution of electron number density along flow direction

由图4(a)可知,随着阳极逐渐由 28 mm 处远离圆盘中心,移向最优阳极位置 40 mm,发电通道前的等离子体松弛区域增大,等离子体在松弛区域停留时间增长,使得等离子体在进入发电通道之前吸收的焦耳热越来越多,致使等离子体中电子温度上升,促进易电离的种子电离度提高(如图5(a)所示),从而使发电通道入口电子数密度增多。这逐渐增强了发电通道中等离子体 MHD 效应,导致电子与其他粒子的碰撞电离加剧,从而使得发电通道中电子

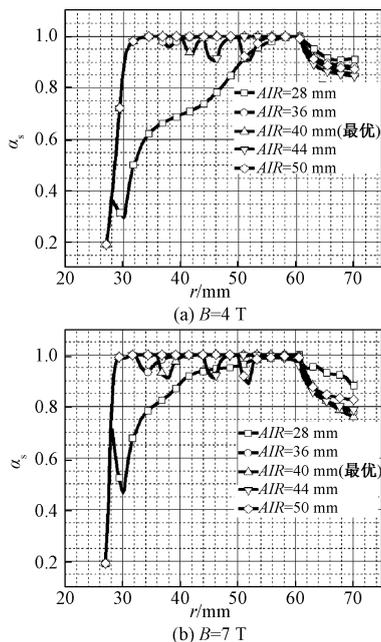


图 5 种子 Cs 电离度沿流动方向分布

Fig.5 Distribution of seed Cs ionization degree along flow direction

数密度随着阳极靠近最优阳极位置逐渐增多。随着发电通道中等离子体导电性增强,发电通道中霍尔电场强度逐渐增大,不断加速电子,供给电子能量,同时法拉第焦耳热也持续供给电子能量,使得发电通道中下游电子数密度不断增多,发电通道中出现显著电子数密度不均匀区域,导致等离子体非平衡电离不稳定,使得发电机性能降低。随着等离子体松弛区域增大,发电通道入口前种子 Cs 几乎处于完全电离状态(如图 5(a)所示),使得发电通道中电子数密度逐渐保持均匀,增强了等离子体非平衡电离的稳定能力,提高发电机性能。

随着阳极继续移动,远离最优阳极位置,发电通道前种子 Cs 吸收足够焦耳热,种子 Cs 基本完全电离(如图 5(a)所示),等离子体 MHD 效应增强,使得发电通道中焦耳热显著增加,电子温度明显升高,促进高能电子与 Ar 原子碰撞发生弱电离,加剧了发电通道中低能电子与离子的复合反应,在发电通道中出现明显的电子数密度不均匀区域,破坏了等离子体非平衡电离的稳定性,使发电机性能恶化。

然而,由图 4(b)可知,随着磁感应强度的增加,等离子体在较小的弛豫区域中就可以吸收到较多焦耳热,显著地提高发电通道入口电子数密度,提高发电通道入口种子 Cs 电离度(如图 5(b)所示),增强发电通道中等离子体 MHD 效应,极易使发电通道

中等离子体的流动出现激波,使得发电通道中形成明显降低等离子体非平衡电离稳定性的电子数密度不均匀区域。然而,随着阳极远离圆盘中心,焦耳热显著增多,较高磁感应强度在较小松弛区域下使得发电通道中电子数密度达到平稳状态,而使等离子体处于非平衡电离稳定状态。但是,随着阳极继续移动,发电通道中显著增强等离子体 MHD 效应,又极易促进 Ar 原子弱电离,破坏等离子体非平衡电离稳定性,导致发电机性能减小。

因此,当磁感应强度确定时,等离子体松弛区域的改变影响了发电机通道入口电子数密度,抑制了发电通道中电子数密度的波动,维持等离子体非平衡电离的稳定性,促进发电机性能的提高。而且,磁感应强度越高,等离子体松弛区域越小,最优阳极位置越靠近圆盘中心,发电通道中等离子体越容易达到稳定的非平衡电离。然而,磁感应强度越高,等离子体松弛区域对发电通道中等离子体非平衡电离的稳定性影响越显著。

3.2 等离子体流动特性

在 $P_0=0.4\text{ MPa}$, $T_0=2\ 200\text{ K}$, $s_f=2\times 10^{-4}$, 磁感应强度分别为 4 T 和 7 T 时,在各自最优阳极位置临近处给出了等离子体马赫数和电导率沿流动方向的分布规律,如图 6 和图 7 所示。

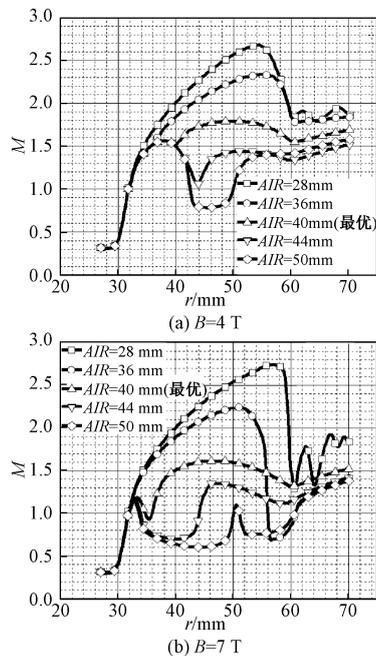


图 6 马赫数沿流动方向分布

Fig.6 Mach number distribution along flow direction

由图 6(a)可知,发电通道中等离子体流动马赫数随着阳极由 28 mm 移向最优阳极位置(40 mm)

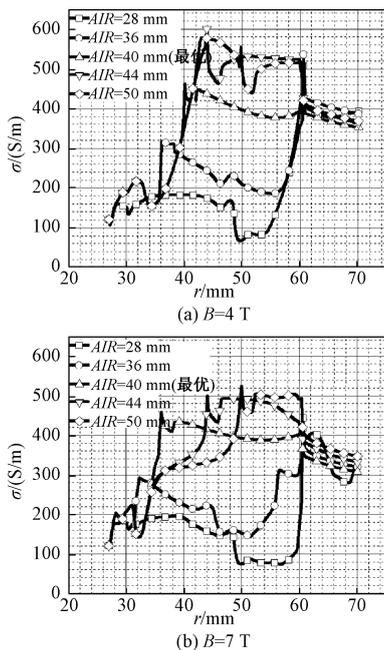


图7 电导率沿流动方向分布

Fig.7 Electrical conductivity distribution along flow direction

逐渐减小。这主要是由于发电通道中电子数密度逐渐增多, 等离子体导电性增强(如图7(a)所示), MHD效应增大, 使得等离子体流动减速, 洛伦兹力做功增多, 增大发电机热电转换能力, 逐渐提高发电机性能。然而, 随着阳极继续移动, 远离最优阳极所在位置, 由于发电通道前电子数密度进一步增多, 增大的法拉第电流产生的洛伦兹力使得等离子体流动减速, 将一部分热能转换为等离子体内能而损失, 从而使发电通道中等离子体流动速度进一步降低, 减小了发电通道中洛伦兹力的做功能力, 降低了发电机性能。甚至当阳极进一步远离最优阳极位置时, 发电通道前会出现不可逆的流动损失——激波, 使得等离子体的总能量减少, 显著降低发电机性能。

由图6(b)可知, 随着磁感应强度增大, 发电通道中电子数密度比较低磁感应强度高, 增强等离子体MHD效应(如图7(b)所示), 等离子体流动中更易出现激波。但是, 随着发电通道中不均匀电子数密度区域消失, 形成稳定的等离子体非平衡电离, 发电通道中激波也随之消失, 发电机性能逐渐提高。然而, 随着阳极进一步远离最优阳极位置, 较高磁场下的等离子体用较小松弛区域就达到了提高种子Cs电离能力的目的, 从而获得更多的电子。这使得发电通道前等离子体导电性增强(如图7(b)所示), 等离子体流动中极易出现激波, 甚至使发电通

道中等离子体流动处于亚音速状态, 而显著地降低发电机性能。

因此, 当磁感应强度确定时, 等离子体松弛区域的改变影响发电通道中等离子体流动速度, 抑制发电通道中或发电通道前等离子体流动中激波的产生, 维持发电通道中等离子体适当的超音速流动, 促进发电机性能提高。然而, 磁感应强度越大, 发电通道中激波的产生越受等离子体松弛区域影响, 发电机性能越易恶化。

4 结论

本文利用非稳态准一维数值模拟方法分析了盘式磁流体发电通道型线和气体滞止状态确定时等离子体松弛区域对等离子体稳定性的影响, 阐述了等离子体松弛区域对等离子体电离和磁流体流动特性及其发电机性能的影响, 揭示了等离子体松弛区域影响等离子体稳定性的物理现象。研究中盘式发电机中流动工质为Ar+Cs等离子体, 结论如下:

(1) 等离子体松弛区域的改变影响发电通道入口电子数密度, 抑制发电通道中电子数密度的波动, 维持等离子体非平衡电离的稳定性, 促进发电机性能的提高。

(2) 当磁感应强度确定时, 随着阳极位置逐渐远离圆盘中心, 靠近最优阳极位置时, 发电通道中电子数密度逐渐由不均匀等离子体转化为电子数密度几乎保持均匀的稳定非平衡等离子体; 随着阳极位置由最优阳极位置逐渐远离圆盘中心, 发电通道中MHD效应增强, 导致Ar原子发生弱电离, 使发电通道中出现电子数密度波动, 破坏等离子体电离的稳定性。

(3) 随着磁感应强度增加, 等离子体松弛区域减小, 阳极越靠近圆盘中心, 发电通道中等离子体越容易达到稳定的非平衡电离。磁感应强度越高, 等离子体松弛区域对发电通道中等离子体非平衡电离的稳定性影响越显著。

(4) 当磁感应强度确定时, 等离子体松弛区域的改变影响发电通道中等离子体流动速度, 抑制发电通道中激波的产生, 维持发电通道中等离子体适当的超音速流动状态, 增大热电转化能力, 促进发电机性能提高; 随着磁感应强度增加, 发电通道中激波的产生越易受等离子体松弛区域影响, 甚至使发电通道前出现激波, 导致发电通道中等离子体处于亚音速流动状态, 显著恶化发电机性能。

参考文献 (References):

- [1] 张彤, 邹楠, 杨广忠, 等 (Zhang Tong, Zou Nan, Yang Guangzhong, et al.). 考虑光伏和储能的三阶段联合负荷恢复算法 (Three-stage combined load recovery algorithm considering photovoltaic and energy storage) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (7): 73-80.
- [2] 程淳, 张阳, 邓木生 (Cheng Zhun, Zhang Yang, Deng Musheng). 基于阻抗源逆变器的永磁直驱风力发电变流系统综述 (Review of permanent magnet direct drive wind power conversion system with impedance-source inverter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (6): 57-67.
- [3] 居滋象, 吕友昌, 荆伯弘 (Ju Zixiang, Lv Youchang, Jing Bohong). 开环磁流体发电 (Open cycle MHD power generation) [M]. 北京: 北京工业大学出版社 (Beijing: Beijing University of Technology Press), 1998.
- [4] Liberati A. Numerical simulation of less divergent disk MHD generator with high magnetic flux density [A]. 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference [C]. San Francisco, California, 2006. 1-12.
- [5] Murakami T, Okuno Y, Yamasaki H. Achievement of the highest performance of a CCMHD generator: an isentropic efficiency of 63% and an enthalpy extraction ratio of 31% [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32 (5): 1886-1892.
- [6] Okuno Y, Okamura T, Suekane T, et al. Magneto-hydrodynamic power generation experiments with Fuji-1 blow-down facility [J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19 (5): 894-900.
- [7] Murakami T, Okuno Y, Yamasaki H. Experimental results of fluid dynamical behaviour and thermal performance of closed loop facility [A]. Proceeding 15th International Conference on MHD Energy Conversion [C]. Moscow, Russia, 2005. 45-51.
- [8] Lin B C. Performance and stability of non-equilibrium MHD disk generator [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [9] Tanaka M, Okuno Y. Plasma behavior in a high-temperature noble gas plasma disk-shaped MHD power generator [J]. Electrical Engineering in Japan, 2016, 197 (2): 33-40.
- [10] Murakami T, Okuno Y. Magneto-hydrodynamic electrical power generation using convexly divergent channel; II. Numerical simulation [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44 (18): 185-202.
- [11] Kiyoshi T, Masaaki O, Hiroyuki Y, et al. Characteristics of flow and plasma under high MHD interaction in non-equilibrium disk MHD generator using argon [J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 116 (3): 52-63.
- [12] Fujino T, Okuno Y, Yamasaki H. Performance of disk MHD generator with one-sided anode [J]. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 2008, 121: 405-410.
- [13] Inui Y, Hirata T, Ishikawa M. Effects of two-divided anodes on performance of supersonic nonequilibrium disk MHD generator [J]. IEEJ Transactions on Power & Energy, 2000, 120 (11): 1521-1528.
- [14] Liberati A, Okuno Y. Influence of anode-region boundary-layer separation on disk MHD generator performance [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35 (5): 1588-1597.
- [15] Okuno Y, Okamura T, Yoshikawa K, et al. High enthalpy extraction experiments with Fuji1 MHD blow-down facility [J]. Energy Conversion & Management, 1999, 40 (11): 1177-1190.
- [16] Kabashima S. Effect of external fluctuation on non-equilibrium MHD power generation [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1988, 16 (2): 324-325.
- [17] Fang Xiuzhen, Peng Aiwu, Liu Baolin, et al. Numerical study on the effect of anode position on the performance of disk MHD generator [A]. 2018 2nd International Conference on Energy and Power Engineering [C]. Chengdu, China, 2018.
- [18] 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 influence of channel structure of disk MHD generator on stability of plasma

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: The working gas of the disk MHD generator mainly absorbs the self-excited Joule heating produced by Faraday current in tangent direction and forms the non-equilibrium ionized plasma. At the same time, with the collision going on, the electrons lose energy, and continue to recombination with ions, forming a non-equilibrium ionization process. When the shape of the disk channel is fixed, the change of the plasma relaxation region will change the region size of the self-excited Joule heating absorbed by the plasma at the entrance of the power generation channel, which will cause the change of the ionization state of the plasma at the entrance of the power generation channel, lead to the instability of the non-equilibrium ionization of the plasma, and seriously affect the output performance of the generator. In this study, the quasi-one-dimensional mathematical model of the non-equilibrium disk MHD generator is used to simulate the effect of the plasma relaxation region on the plasma stability and MHD flow characteristics. The results show that the change of plasma relaxation region restrains the fluctuation of electron number density, maintains the stability of plasma non-equilibrium ionization and improves the performance of generator when the generation channel profile and gas stagnation state are fixed. The higher the magnetic flux density is, the smaller the relaxation area is, and the closer the optimal anode position is to the center of the disk, the easier the plasma in the power generation channel is to achieve the stability of non-equilibrium ionization. The change of the plasma relaxation region restrains the generation of shock wave in the plasma flow in or before the generation channel, maintains the appropriate supersonic flow of plasma in the generation channel, and promotes the improvement of generator performance. The larger the magnetic flux density is, the more the shock wave is affected by the plasma relaxation region in the power generation channel, and the performance of the generator is easily deteriorated.

Key words: disk MHD generator; plasma relaxation region; non-equilibrium ionization; magnetic flux density; plasma stability