



·脉冲功率技术·

MW 级中性束注入弧电源系统优化*

张锦涛¹, 阳璞琼¹, 魏会领², 余珮炫², 罗怀宇²,
耿少飞², 周博文², 万银祥², 曹建勇²

(1. 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 核工业西南物理研究院, 成都 610041)

摘 要: 中性束注入弧电源的性能严重影响弧放电的稳定性和中性束加热的效率。HL-2A 装置弧电源采用基于晶闸管相控调压和 12 脉波不控整流的线性电源技术; HL-2M 测试束线弧电源采用基于超级电容和 IGBT 全控整流的开关电源技术。为了优化电源系统性能、改进弧放电稳定性, 研究了采样频率对弧放电稳定性的影响。通过对两套电源控制系统进行建模, 利用 MATLAB 仿真了不同采样频率下 HL-2M 弧流电源控制系统的阶跃响应性能和 HL-2A 的控制系统性能, 分析了采样频率对系统性能的影响。利用离子源测试平台进行不同采样频率下的弧放电实验对仿真结果进行验证, 实验结果与仿真结果一致。实验结果验证: 采样频率对弧放电稳定性有很大影响, 在频率可调范围内, 增大采样频率, 可以提高控制系统性能, 优化弧放电稳定性; HL-2A 弧放电不稳定的原因是晶闸管导通特性和滤波电路引起的。

关键词: 中性束注入; HL-2A; HL-2M; 弧电源; 控制系统; 采样频率

中图分类号: TL629

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210026

Research on optimization of MW level neutral beam injection arc power supply system

Zhang Jintao¹, Yang Puqiong¹, Wei Huiling², Yu Peixuan², Luo Huaiyu²,
Geng Shaofei², Zhou Bowen², Wan Yinxiang², Cao Jianyong²

(1. College of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The performance of the neutral beam injection arc power supply seriously affects the stability of the arc discharge and the efficiency of the neutral beam heating. HL-2A device arc power supply adopts linear power supply technology based on thyristor phase-controlled voltage regulation and 12-pulse uncontrolled rectification; HL-2M test beam line device arc power supply adopts switching power supply technology based on super capacitor and IGBT full-controlled rectification. To optimize the performance of the power system, improve the arc discharge stability, the influence of sampling frequency on the stability of arc discharge is studied. By modeling the HL-2A and HL-2M power supply control systems, MATLAB is used to simulate the step response performance of the HL-2M arc current power supply control system and the HL-2A control system performance under different sampling frequencies, and analyze the impact of the sampling frequency on the system performance. Then, the ion source test platform is used to conduct arc discharge experiments at different sampling frequencies to verify the simulation results, and the experimental results are consistent with the simulation results. It is verified by experiments that the sampling frequency has great influence on the stability of arc discharge, while in the frequency adjustable range, increasing the sampling frequency can improve the performance of the control system and optimize the stability of arc discharge; the reason for the unstable arc discharge of HL-2A is the conduction characteristics of the thyristor and the filter circuit.

Key words: neutral beam injection; HL-2A; HL-2M; arc power supply; control system; sampling frequency

* 收稿日期: 2021-01-21; 修订日期: 2021-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(11675074); 衡阳市科技计划项目(202002042159); 湖南省国际科技合作基地项目(2018WK4009)

作者简介: 张锦涛(1996—), 男, 硕士, 从事电力电子技术, 大功率中性束注入电源研究。

通信作者: 阳璞琼(1980—), 男, 博士, 副教授, 从事电力电子技术, 核能科学与工程研究。

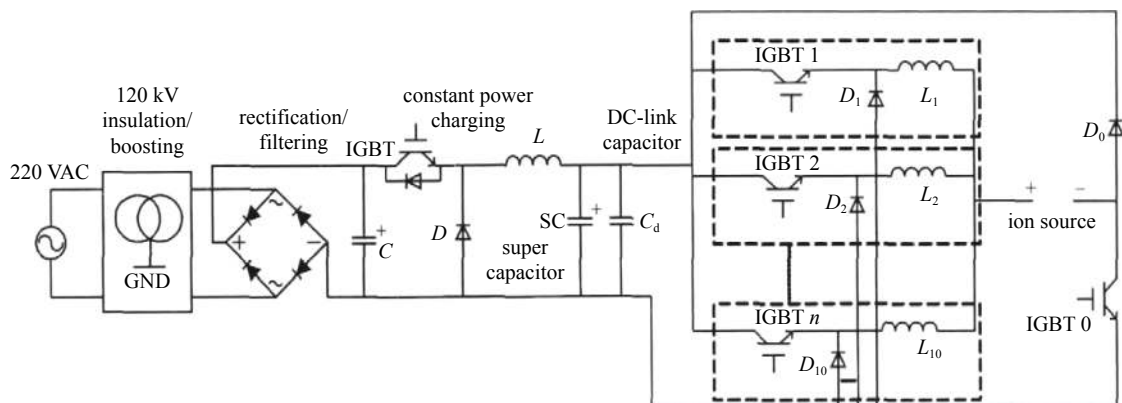


Fig. 2 Main circuit diagram of NBI arc power supply of HL-2M

图 2 HL-2M 装置 NBI 弧电源主电路图

空间平均法, 列出开通时间 T_{on} 和关断时间 T_{off} 两段电路模型的状态方程, 按照 IGBT 开关占空比进行加权平均^[17], 可得 Buck 变换器的控制到输出的传递函数

$$G_m(s) = \frac{V_s}{sL + R} = \frac{220}{4 \times 10^{-5}s + 0.1} \quad (1)$$

式中, V_s 为超级电容最高充电电压, HL-2M 装置 5MW 的 NBI 测试束线弧电流源超级电容最高充电电压为 220 V; L 为每一相 buck 变换器的滤波电感和电缆的分布电感之和 $L = (30 + 10) \mu\text{H} = 40 \mu\text{H}$; R 为离子源放电室内气体等效电阻值, 取 0.1Ω 。 $H(s)$ 为反馈网络, 为 AD 转换、控制延时环节的传递函数, 因此可以得到弧电源开环传递函数

$$G(s) = G_m(s)H(s) \quad (2)$$

代入相关参数得到系统开环传递函数

$$G(s) = \frac{220}{4 \times 10^{-5}s + 0.1} \times 7.2 \times \frac{1}{1 + 10^{-5}s} = \frac{1584}{4 \times 10^{-10}s^2 + 4.1 \times 10^{-5}s + 0.1} \quad (3)$$

2.2 HL-2A 装置 NBI 弧电源控制系统数学模型

HL-2A 装置 NBI 弧电源控制系统框图如图 4 所示, 因此可以得到弧电源开环传递函数

$$G(s) = G_a(s)G_{LC}(s)H(s) \quad (4)$$

式中: $G_a(s)$ 为晶闸管触发电路和整流装置的传递函数, 由晶闸管的失控时间形成的延迟环节, 十二脉波整流晶闸管失控时间 $T_s = 3.33 \text{ ms}$; $G_{LC}(s)$ 为 T 型滤波电路的传递函数, 其中电感 $L_1 = 0.6 \text{ mH}$, $L_2 = 0.05 \text{ mH}$, 电容 $C = 18.9 \text{ mF}$ 。代入相关参数得到系统开环传递函数

$$G(s) = \frac{66.7}{1 + 3.33 \times 10^{-3}s} \times \frac{1}{0.567 \times 10^{-9}s^3 + 0.3 \times 10^{-6}s^2 + 0.65s} \times \frac{3.4}{1 + 10^{-4}s} = \frac{226.8}{1.89 \times 10^{-16}s^5 + 2.05 \times 10^{-12}s^4 + 2.18 \times 10^{-7}s^3 + 2.23 \times 10^{-3}s^2 + 0.65s} \quad (5)$$

利用 MATLAB 中 sisotool 工具箱对 HL-2M 和 HL-2A 装置弧电源控制系统进行闭环补偿^[18-20], 补偿后, 弧电源闭环控制阶跃响应波形图如图 5 所示。

根据两套电源的系统阶跃响应图, 可以看出, HL-2M 的电流上升时间和调节时间要大大小于 HL-2A 装置, 对比控制模型分析可得, 导致这种现象的原因主要是因为晶闸管导通特性和滤波电路的影响。晶闸管的失控时间形

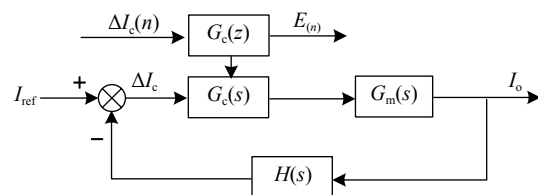


Fig. 3 Block diagram of NBI arc power supply control system of HL-2M

图 3 HL-2M 装置 NBI 弧电源控制系统框图

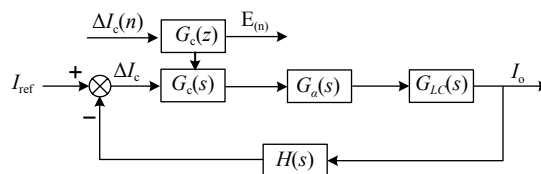


Fig. 4 Block diagram of NBI arc power supply control system of HL-2A

图 4 HL-2A 装置 NBI 弧电源控制系统框图

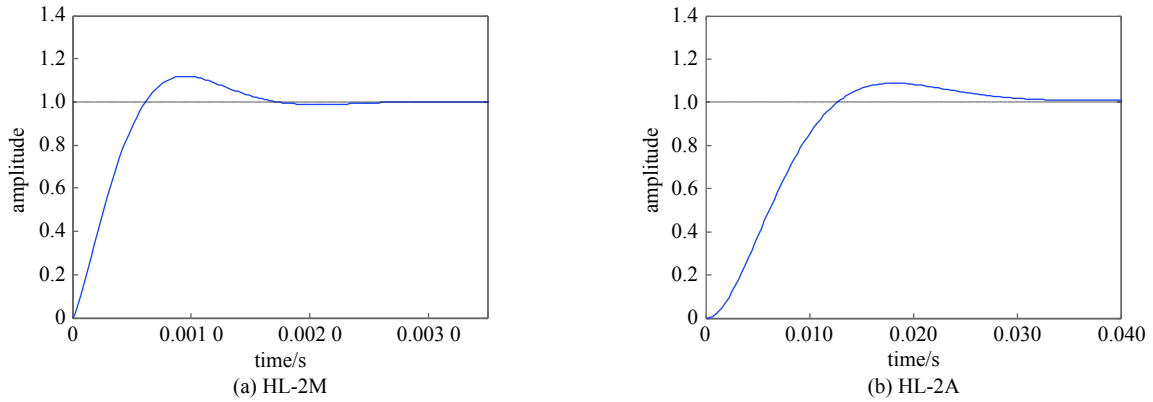


Fig. 5 Step response diagram of HL-2M and HL-2A arc power supply

图 5 HL-2M 和 HL-2A 弧电源阶跃响应图

成了较大延迟环节,大大增加了系统的上升时间。同时,滤波电路中滤波电感对电流变化的阻碍作用,导致上升时间更大。根据工程采样频率选取经验^[14,21],修改 HL-2M 装置 NBI 弧电源采样频率,改变采样周期时间,仿真不同采样频率下的阶跃响应图如图 6 所示。可以看出,采样频率对系统性能有很大影响,采样频率越高,系统响应时间越短,控制系统性能越好。将采样周期增大至晶闸管失控时间大小时,上升时间明显增大,因此可以确定,晶闸管失控时间引起的延迟环节对控制系统有很大影响。对比图 5(b)和图 6(b),图 6(b)上升时间要短。因此可以确定,晶闸管电源系统性能不佳的原因还有滤波电路大电感的阻碍作用。

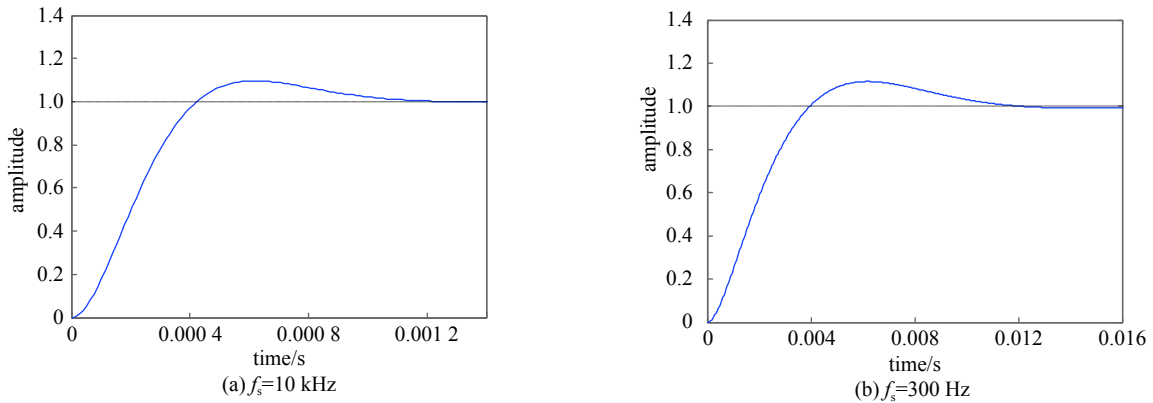


Fig. 6 Step response diagram of 10 kHz and 300 Hz arc power supply

图 6 采样频率为 10 kHz 和 300 Hz 弧电源阶跃响应图

3 弧放电实验

利用现在所搭建的 HL-2M 装置 NBI 测试束线离子源实验平台进行弧放电实验,分析采样频率对弧放电稳定性的影响和 HL-2A 弧放电不稳定的原因。首先在多组频率下进行弧放电实验,为了精确分析频率对系统调节的影响,在放电过程中给定一个扰动信号,观察扰动信号作用下系统的调节能力。同时修改控制周期等于晶闸管失控时间,进行 HL-2M 和 HL-2A 的弧放电实验,分析 HL-2A 弧放电不稳定的原因。

本文分别在 300 Hz、10 kHz 和 100 kHz 的频率下进行弧放电实验,弧流设定为 500 A,弧放电时间为 4 s。在弧放电 11 s 时刻给定一个干扰信号,通过设定弧流打坑给定干扰信号,设定弧流打坑时间 5 ms,打坑深度为 90%,观察输出弧流的调节效果和稳定性。采样频率为 300 Hz 的弧流输出波形及其局部放大如图 7 所示,可以看出,弧放电开始阶段,弧流上升时间较慢,这里主要是因为灯丝电源控制方式的影响,灯丝温度较低造成灯丝发射电子能力不够,电压最大输出调节弧流。11 s 时刻,电流开始打坑,从电流打坑开始恢复至稳定状态的时间较长,电流恢复至稳定状态时间较长。而且,输出弧流的毛刺比较多,纹波较大,系统的调节效果较差。

采样频率为 10 kHz 的弧流输出波形及其局部放大如图 8 所示。对比 300 Hz 弧流输出波形,弧流输出波形在打坑后恢复至稳定状态的时间大大缩短了,而且,输出弧流的纹波也小了很多。综合而言,系统的调节能力有所改善,抗干扰能力有所增强。

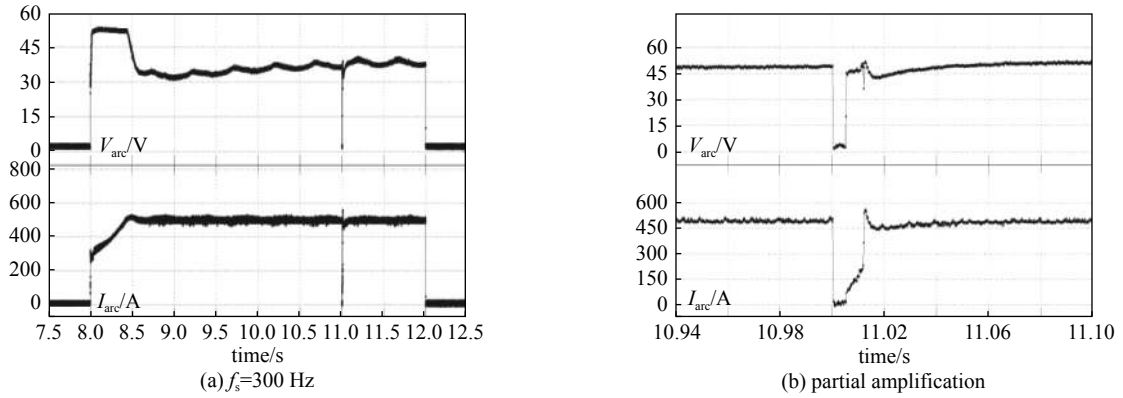


Fig. 7 Arc current output waveform and its partial amplification at 300 Hz

图 7 300 Hz 频率下弧流输出波形及其局部放大

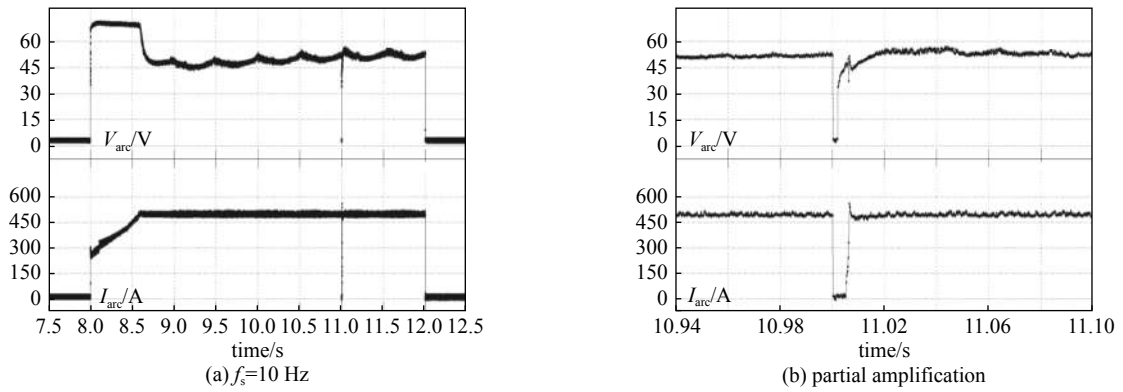


Fig. 8 Arc current output waveform and its partial amplification at 10 kHz

图 8 10 kHz 频率下弧流输出波形及其局部放大

采样频率为 100 kHz 的弧流输出波形及其局部放大如图 9 所示。对比 10 kHz 弧流输出波形，弧流输出波形在打坑后恢复至稳定状态的时间更短，电流恢复时间更快。输出弧流纹波大小很接近，总体而言，系统的性能有所改善。

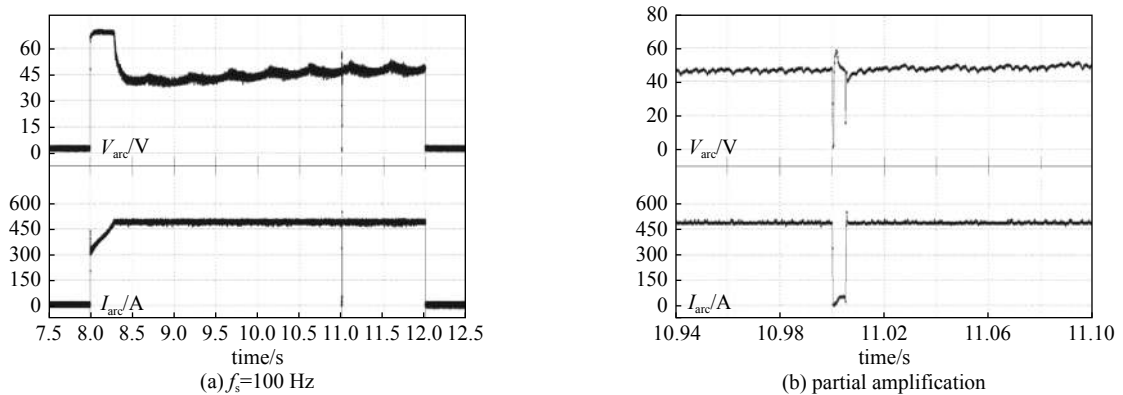


Fig. 9 Arc current output waveform and its partial amplification at 100 kHz

图 9 100 kHz 频率下弧流输出波形及其局部放大

三组频率下，弧流实际打坑时间、上升时间、调节时间，电流过冲和电流纹波大小如表 1 所示，对比可得，将采样频率降低到 300 Hz 后，控制系统各方面的性能下降很明显，和仿真得到的结论一致。可以确定，采样频率对系统的性能有着很大影响，提高采样频率，控制系统的性能更好。基于控制系统数学模型，当采样频率增大时，采样反馈电流更实时，采样延迟环节更小，系统响应时间更短，各项指标参数更好^[21-22]。晶闸管电源控制性能不佳的主要原因之一是因为晶闸管的导通特性，存在失控时间形成一个延迟环节。综合而言，频率越高，弧流纹波更小，超调量更小，系统调节能力更强，弧流输出更加稳定。

表 1 不同频率下弧电源各项参数对比

Table 1 Comparison of various parameters of arc power supply at different frequencies

sampling frequency/kHz	actual holding time/ms	rise time/ms	adjust time/ms	current overshoot/A	current ripple/A
0.3	11.9	6.9	14.7	59.7	46.8
10	6.2	1.3	6.1	60.8	29.2
100	5.4	0.25	1.0	52.8	29.5

对比 HL-2M 在 300 Hz 频率下与 HL-2A 的弧放电实验, 弧流参考值设为 300 A。HL-2A 弧放电时间为 1.5 s, HL-2M 弧放电时间为 5 s, HL-2A 和 HL-2M 测试束线输出波形如图 10 所示。中弧流上升慢的主要原因是因为灯丝电源控制方式引起的, 灯丝电源恒流控制运行时, 电流上升会更快。同频率下, 图(b)的上升时间更短, 电流纹波更小, 放电要更稳定。图(a)因为电源滤波电路中大电感对电流的阻碍作用, 阻碍电流变化。考虑未起弧的本底, 整体而言, 电流稳定后, HL-2M 的波形比 HL-2A 要平稳, 纹波要小。

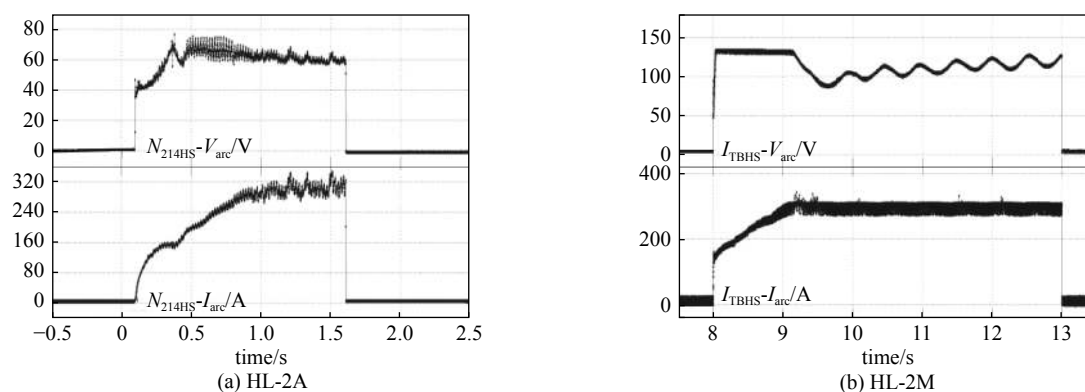


Fig. 10 HL-2A arc discharge waveform and HL-2M arc discharge waveform at 300 Hz frequency

图 10 HL-2A 弧放电波形和 HL-2M 在 300 Hz 频率下的弧放电波形

综上可知, 控制系统采样频率的大小对控制系统有着很大的影响, 对弧放电过程有很大影响。在频率可调范围内, 增大采样频率, 系统调节能力增强, 系统性能更好。HL-2A 弧放电不稳定的原因有两个: 一个是因为晶闸管失控时间形成的延迟环节所引起的, 另一个就是滤波电路大电感的影响, 滤波电感会产生感应电动势阻碍电流变化, 当离子源阻抗变化引起输出电流变化时, 不能及时地反馈调节。

4 结论

本文通过对 HL-2A 和 HL-2M 的控制系统进行建模, 在不同采样频率下进行弧放电实验, 分析采样频率对弧放电稳定性的影响和 HL-2A 弧放电不稳定的原因。经仿真和实验验证, 在频率可调范围内, 增大采样频率, 系统调节能力增强, 系统性能更好, 弧放电更稳定。HL-2A 弧放电不稳定的原因是因为晶闸管导通特性和滤波电路的影响, 提高电源频率和改进滤波电路有利于优化弧放电的稳定性。

参考文献:

- [1] 陈文光, 饶军, 李波, 等. HL-2A MW级中性束注入系统弧流电源设计[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(3): 379-384. (Chen Wenguang, Rao Jun, Li Bo, et al. Technical design of arc power supply for MW neutral beam injection system on HL-2A Tokamak[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(3): 379-384)
- [2] Chen Wenguang, Rao Jun, Li Bo, et al. Technical design of arc-discharge and deceleration power supply for MW level NBI system on HL-2A tokamak[J]. Plasma Science & Technology, 2012(10): 82-86.
- [3] 阳璞琼, 宣伟民, 张莹, 等. 5 MW中性束弧电源DC/DC变换器的设计与实现[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 084003. (Yang Puqiong, Xuan Weimin, Zhang Ying, et al. Design and implementation of 5 MW neutral beam injection arc power supply DC/DC converter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 084003)
- [4] 成继东, 魏会领, 余珮炫, 等. HL-2A装置MW级中性束加热系统灯丝电源设计与仿真分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2019, 39(3): 227-231. (Cheng Jidong, Wei Huiling, Yu Peixuan, et al. Design and simulation analysis of filament power supply for MW neutral beam heating system of HL-2A tokamak[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2019, 39(3): 227-231)
- [5] 阳璞琼, 宣伟民, 曹建勇, 等. 基于超级电容储能的中性束注入系统弧流电源设计[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(1): 166-170. (Yang Puqiong, Xuan Weimin, Cao Jianyong, et al. Design of arc power supply for neutral beam injection system based on super capacitor energy storage[J]. Atomic Energy Science and

- Technology, 2015, 49(1): 166-170)
- [6] Lee H J, Shin S C, Won C Y, et al. The control and design of a arc power supply for the neutral beam injection[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2011.
- [7] 尚霄. 基于DSP+FPGA的数字伺服控制器的设计[J]. 科学咨询(科技·管理), 2019(10): 52-53. (Shang Xiao. Design of a digital servo controller based on DSP+FPGA[J]. Scientific Consulting (Technology·Management), 2019(10): 52-53)
- [8] 王俊. 基于DSP+FPGA的高精度程控交流电源设计[J]. 电力电子技术, 2012, 46(4): 18-20. (Wang Jun. Design of a high precision programmable AC power source based on DSP+FPGA Device[J]. Power Electronics Technology, 2012, 46(4): 18-20)
- [9] 周航汛, 熊显名, 张文涛, 等. 高采样频率位移测量系统硬件架构设计[J]. 现代电子技术, 2020, 43(22): 10-14. (Zhou Hangxun, Xiong Xianming, Zhang Wentao, et al. Design of hardware architecture of displacement measurement system with high sampling frequency[J]. Modern Electronic Technology, 2020, 43(22): 10-14)
- [10] Park H Y, Jo Y H, Park K B. The ultimate bound of discrete sliding mode control system with short sampling period for DC motor system[J]. Journal of Institute of Control Robotics & Systems, 2010, 16(3): 245-248.
- [11] 孙绍凯, 管心盼, 张棣. 采样周期对控制系统性能的影响[J]. 黑龙江电子技术, 1998(6): 25-27. (Sun Shaokai, Guan Xinpan, Zhang Di. The influence of sampling period on the performance of control system[J]. Heilongjiang Electronic Technology, 1998(6): 25-27)
- [12] 李松平, 龚学余, 阳璞琼, 等. 兆瓦级NBI加热系统弧流电源故障诊断方法探究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2020, 40(2): 174-181. (Li Songping, Gong Xueyu, Yang Puqiong, et al. New advances in fault diagnosis method of arc power supply for MW neutral beam injector heating system[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2020, 40(2): 174-181)
- [13] 魏会领, 曹建勇, 余珮炫, 等. HL-2M装置5 MW中性束加热束线离子源放电室研制[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 046001. (Wei Huiling, Cao Jianyong, Yu Peixuan, et al. Development of HL-2M device 5 MW neutral beam heating beam line ion source discharge chamber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 046001)
- [14] 王忆. 关于计算机控制系统中采样周期的确定[J]. 信息与电脑(理论版), 2014(10): 214-215. (Wang Yi. On the determination of the sampling period in the computer control system[J]. Information and Computer (Theoretical Edition), 2014(10): 214-215)
- [15] Lee H J, Shin S C, Lee S G, et al. The design and implementation of arc power supply for neutral beam injection[J]. Nature Neuroscience, 2013, 27(6): 1463-71.
- [16] 张风雪, 阳春华, 周晓君, 等. 基于控制周期计算的锌液净化除铜过程优化控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(10): 1388-1395. (Zhang Fengxue, Yang Chunhua, Zhou Xiaojun, et al. Optimal control based on control period calculation for copper removal process of zinc solution purification[J]. Control Theory and Application, 2017, 34(10): 1388-1395)
- [17] 张元敏, 方如举. 利用状态平均法对DC/DC变换电路的分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 50-52. (Zhang Yuanmin, Fang Ruju. Analysis of DC/DC conversion circuit using state average method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 50-52)
- [18] 郭庆, 蒋丹, 李辉. MATLAB SISO工具箱在机电控制技术实践教学中的应用[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(2): 65-69. (Guo Qing, Jiang Dan, Li Hui. Application of MATLAB SISO tool in praxis teaching of mechatronics control technology[J]. Experiment Science and Technology, 2018, 16(2): 65-69)
- [19] 李昌春, 左为恒, 左焜. 智能控制与传统控制效果的仿真研究[J]. 兵工自动化, 2001(2): 19-21. (Li Changchun, Zuo Weiheng, Zuo Kun. Research on the simulation of effects for intelligent control and traditional control[J]. Ordnance Industry Automation, 2001(2): 19-21)
- [20] 黄璐, 文军, 姜杰. 电动舵机系统建模与仿真研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(12): 237-239, 244. (Huang Lu, Wen Jun, Jiang Jie. Research on modeling and simulation of electric servo system[J]. Automation and Instrumentation, 2020(12): 237-239, 244)
- [21] 谢妮慧, 王淳, 林喆. 遥感机构数字伺服控制系统采样周期的确定[J]. 电子测量技术, 2017, 40(7): 165-169. (Xie Nihui, Wang Chun, Lin Zhe. Determination of the sampling period of the digital servo control system of remote sensing mechanism[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(7): 165-169)
- [22] 李家羊, 岑韬, 张磊, 等. 提高柔性直流输电换流阀控系统性能的方法研究[J]. 电气技术, 2017(12): 152-156. (Li Jiayang, Cen Tao, Zhang Lei, et al. Research on improving valve control system performance of converter valve for VSC-HVDC[J]. Electrical Technology, 2017(12): 152-156)