

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.05.014

大功率电弧加热器电源设计

王钢^{1,2}, 梁雪林^{1,2}, 杨远剑^{1,2}, 何敏^{1,2}

(1. 中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000;

2. 飞行器流体物理全国重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对电弧风洞试验的高性能需求, 本文设计了一套输出电流 0~3 000 A 可调、电压 0~22 000 V 可调的 52 MW 大功率电弧加热器电源, 具体包括变流器拓扑分析、关键器件选型、参数设计、损耗及散热设计。为解决电弧负载的非线性特性问题, 提出了一种基于模糊 PI 控制的优化控制策略, 并在此基础上对保护系统进行了详细设计。通过某电弧风洞的运行考核验证, 所设计的电源能够在额定电流条件下实现千秒级长时间稳定运行, 恒流精度达到 0.57%, 电流无超调, 输出电流纹波系数小于 3%。实验结果表明, 该电源的各项性能参数均满足设计要求, 为电弧风洞试验提供了高性能、高可靠性的电源解决方案。

关键词: 大功率电弧加热器电源; 变流器拓扑; 关键参数设计; 模糊 PI 控制; 电弧风洞试验

Design of High-power Supply for Arc Heater

WANG Gang^{1,2}, LIANG Xuelin^{1,2}, YANG Yuanjian^{1,2}, HE Min^{1,2}

(1. Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center,

Sichuan Mianyang 621000, China; 2. National Key Laboratory of Aerospace Physics in Fluids,

Sichuan Mianyang 621000, China)

Abstract: As for the high-performance requirements of arc wind tunnel test, in this paper a set of 52 MW high-power arc heater power supply with adjustable output current (0~3 000 A) and adjustable voltage (0~22 000 V) is designed, including specifically topology analysis of converter, type selection, parameter design, loss and radiation design of key elements. To address the nonlinear characteristics of the arc load, an optimized control strategy based on fuzzy PI control is proposed and, on this basis, the protection system is designed in detail. It is demonstrated through operational assessment and verification in a certain arc wind tunnel that the designed power supply can achieve long-duration stable operation at the rated current for over a thousand seconds, with a constant current accuracy of 0.57%, no current overshoot and an output current ripple coefficient of less than 3%. The Experimental results show that each performance parameter of the power supply can meet the design requirements, and provide a high-performance and highly reliable power solution for arc wind tunnel test.

Keywords: high power supply for arc heater; converter topology; crucial parameters design; fuzzy PI control; arc wind tunnel test

0 引言

电弧风洞可以长时间模拟高空层流的高焓、高热环境, 实现高超音速飞行设备的热防护、热性能等测试, 是航天航空领域和武器研究中的重要手段^[1]。电弧风洞主要包括空气加压系统、电弧加热器、大功率电弧加热器电源、试验区 and 气体处理区等几部分,

其中电弧加热器系统是电弧风洞的核心部分^[2-3]。大功率电弧加热器电源通过产生瞬时高压将电弧加热器中的空气击穿或者采用引弧丝方式拉弧, 产生稳定燃烧的等离子体电弧, 在电弧风洞试验中至关重要, 是保证电弧产生、稳定和高热燃烧的关键设备, 其输出性能的优劣直接决定着烧蚀试验的品质与能力。随着航天领域的快速发展, 电弧加热器

收稿日期: 2025-06-08

试验的功率等级不断提高,同时也对电弧加热器电源的功率等级和性能提出了更高要求^[4-10]。

电弧加热器整流电源主要经历了二极管整流、晶闸管整流及新型可关断器件整流3个阶段^[11]。早期的电弧加热器电源主要采用饱和电抗器调压方案,这种方案损耗较大且调压范围有限,在效率、功率等级和控制效果等方面存在较大局限^[12]。随着电力电子技术的发展,大功率晶闸管整流技术方案具有调压范围广,响应速度较快,电源效率高等优点,已成为当前电弧加热器电源的主要方案^[13-16]。

本文设计了一套输出电流连续可调(0~3 000 A),电压连续可调(0~22 000 V)的24脉波大功率电弧加热器电源,并针对电弧的非线性特性提出了模糊PI控制方法,确保了系统输出电流的控制精度,提高了控制系统的鲁棒性,消除了电流超调,实现了电源的低纹波输出。仿真及运行结果证明,所设计的高功率电弧加热器电源电气性能参数均能满足设计需求。

1 电弧加热器电源拓扑设计

1.1 加热器电源拓扑及参数

加热器电源系统的负载为等离子体电弧,呈现非线性阻抗特性。由于气体电离与复合的相互作用,起弧后可能出现断弧现象,因此当负载扰动发生时,电源要能快速响应保证电弧的稳定燃烧^[17-19]。根据风洞试验要求,所设计的电弧加热器电源关键参数见表1。

表1 电弧加热器电源关键参数
Table 1 Key parameters of power supply of arc heater

参数	设计要求
输出电压(空载)/kV	DC 22 (0~22 kV连续可调)
额定输出电流/kA	DC 3 (0~3 kA连续可调)
恒流精度/%	≤1
输出电流纹波峰值系数/%	≤3
超调量 δ_c /%	<10

电源系统拓扑见图1,为实现直流22 000 V高压输出,采用4套变流器串联方案,每套变流器设计输出5 500 V/3 000 A。为了降低交流侧谐波、降低直流侧输出电流纹波,采用24脉波整流方案。为改善谐波,采用两组6脉波整流桥串联,并在整流桥输入侧经过移相变压器进行错相30°连接,构成12脉波整流输出,在提高输出电压等级的同时可有效降低输入输出的谐波。另外,两套机组在输入侧再通过15°移相,最终构成24脉波整流。

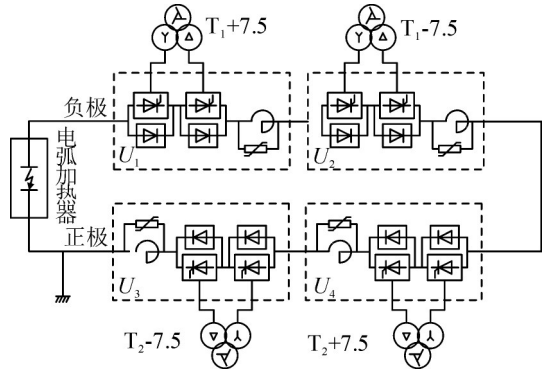


图1 电弧加热器拓扑结构
Fig. 1 Topological structure of arc heater

1.2 变流器单元拓扑及参数

电弧加热器单套电源采用三相桥式晶闸管整流电路,额定输出电流3 000 A(0~3 000 A连续可调),通过控制触发角实现输出电压0~5 500 V连续可调,如图2所示。每组6脉波整流桥的直流侧并联一组续流二极管,可实现单机组、和双机组串联运行的实时动态切换。每个晶闸管并联一个阻容吸收单元,用来吸收换相过电压,桥臂采用串联快速熔断器的方式进行硬件过流保护,交、直流侧采用压敏电阻进行硬件过压保护。在电源输出侧串联直流电抗器,不仅可以稳定电弧,还可以降低输出纹波。整流变压器参数为:35 kV/2 037 V,34 MVA,输出电抗器参数为4 mH/3 000 A。

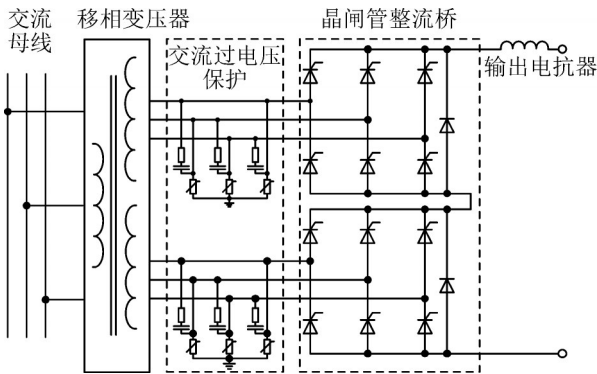


图2 电弧加热器电源单元拓扑结构
Fig. 2 Topological structure of power supply unit of arc heater

1.3 加热器电源关键器件选型设计

1)晶闸管选型

晶闸管主要参数见表2。根据表2可知,单个整流桥额定交流输入电压为2 037 V,额定输出直流电流为3 000 A。交流母线输入峰值电压可计算得2 880 V,整流支路电流有效值为2 448 A。

由12脉波整流器运行原理可知,每个桥臂的关断电压为母线电压的峰值2 880 V,设计2.5倍安全裕量,晶闸管耐压值大于7 200 V。最大功率输出时,

流经晶闸管的电流有效值最大为 2 448 A,考虑 1.5 倍电流裕量,晶闸管的通态有效电流应大于 3 672 A。因此,选用中车的 KPC2800-65 晶闸管,其通态有效电流 $I_{T(RMS)}$ 为 4 400 A,反向重复峰值电压 U_{RRM} 为 6 500 V,每个桥臂由两个晶闸管串联构成,在 0.95 的均压系数下耐压值可达到 12 350 V。

表2 晶闸管主要参数
Table 2 Main parameters of thyristor

序列	名称	技术参数
1	型号	KPC2800-65
2	正向平均电流 I_{AV}/A	2 800
3	反向重复峰值电压 U_{RRM}/V	6 500
4	门槛电压 V_{TO}/V	1.18
5	斜率电阻 $r_T/m\Omega$	0.274

2) 二极管选型

续流二极管两端承受的电压为交流母线电压峰值 2 880 V,设计 2 倍安全裕量,额定电压应大于 5 760 V。续流二极管为输出电抗器续流提供回路,额定电流为输出电流最大值 3 000 A,考虑 1.5 倍安全裕量,额定电流应大于 4 500 A。选用中车型号为 ZPC-6800-34 的续流二极管,采用双管串联。

3) 快速熔断器选型

根据快速熔断器选型规则,快速熔断器的额定电压、额定电流取决于交流输入侧的电压和电流值,其总动作 I_t 均必须小于晶闸管的允许热累积 I_t 。单个整流桥额定交流输入电压为 2 037 V,整流支路电流有效值为 2 448 A。因此,选用 RS8AC2000 V/1 400 A 型号西熔的快速熔断器,在变流器交流输入侧的每相采用两个快速熔断器并联,两相之间相当于 4 个快速熔断器构成两串两并,额定电压可达 4 000 V,额定电流可达 2 800 A,满足设计要求。

由晶闸管 KPC2800-65 的数据手册知:10 ms 的允许热累积用电流平方积分系数表达为 $1\,010 \times 10^4 \text{ kA}^2\text{s}$ 。电抗器前端短路故障时,10 ms 故障电流平方积分系数为 $2\,108 \times 10^3 \text{ kA}^2\text{s}$,大于快速熔断器动作值;电抗器后端短路故障时,10 ms 故障电流平方积分系数为 $1\,106 \times 10^3 \text{ kA}^2\text{s}$,小于快速熔断器动作值。电抗器前短路时,快速熔断器先于晶闸管熔断,尽可能减少晶闸管损坏。因此 RS8AC2000 V/1 400 A 型号快速熔断器过电流校验满足要求。

2 控制保护系统设计

2.1 基于模糊PI的控制系统设计

由于电弧负载具有非线性阻抗特性,且其运行状况受多种因素影响,难以建立准确的数学模型。

传统 PI 电流闭环控制的抗干扰能力差,且存在扰动后恢复时间较长等问题^[20-21]。模糊控制不需要建立被控对象的数学模型,鲁棒性强,尤其适用于非线性时变系统的控制,且具有较强的容错能力^[22-24]。本文将传统 PI 控制算法与模糊控制算法相结合,对 PI 控制器参数进行实时整定,以提高电弧加热器电源的控制性能,达到预期效果。

以负载电流与给定电流的偏差 i_e 以及偏差变化率 di_e/dt 为输入量,经模糊化处理后转化为模糊量输入模糊控制器,通过与模糊规则库比对确定控制参数的模糊量输出 ΔK_p 、 ΔK_i ,最后将模糊量清晰化处理后转换成具体数据发给 PI 控制器,实现对 PI 参数的实时调节,如图 3 所示。

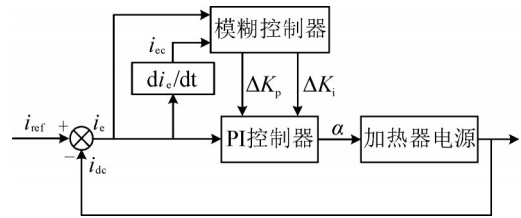


图3 模糊PI控制
Fig. 3 Fuzzy PI control

设定 $E, EC = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 为 i_e 和 di_e/dt 的模糊论域, $K_p, K_i = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 为 ΔK_p 、 ΔK_i 的模糊论域,模糊子集表示为:NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。输入量 E, EC , 和输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 的隶属函数分布如图 4 所示,左边界选用 zmf 型,中间选用 trimf 型,右边界选用 smf 型。

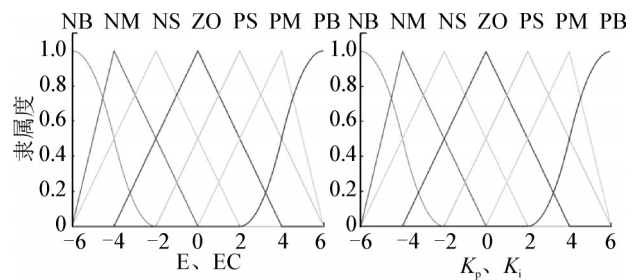


图4 隶属函数分布
Fig. 4 Membership function distribution

设输入量实际变化范围为 $[I_L, I_H]$, 对应模糊论域为 $\{-n, -(n-1), \dots, 0, 1, \dots, n-1, n\}$, 输出量实际变化范围为 $[U_L, U_H]$, 对应模糊论域为 $\{-m, -(m-1), \dots, 0, 1, \dots, m-1, m\}$, 量化因子 K_j 和比例因子 G_u 公式为

$$\begin{cases} K_j = \frac{2n}{I_H - I_L} \\ G_u = \frac{U_H - U_L}{2m} \end{cases} \quad (1)$$

根据电弧加热器电源的实际运行经验,确定模糊规则,控制参数 K_p 、 K_i 的模糊规则见表 3 和表 4。

表 3 K_p 模糊规则
Table 3 Fuzzy rule of K_p

EC	NB	NM	NS	EZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM

表 4 K_i 模糊规则
Table 4 Fuzzy rule of K_i

EC	NB	NM	NS	EZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM

根据模糊规则,采用常用的 mamdani 法对输入模糊量 A^* 进行推理,将被激活的模糊规则进行运算,得到模糊推理的输出结果 U^* 为公式(2)。其中, $R_i(i=1,2,\cdots,49)$ 为 49 条模糊规则。

$$U^* = \bigcup_{i=1}^{49} \left(\left(A^* \right)^T R_i \right) = \bigcup_{i=1}^{49} U_i^* \quad (2)$$

采用 centroid 法进行清晰化处理,由于 K_p 、 K_i 的论域是离散的,隶属函数可以设为 n 个分段函数的组合,根据式(3)计算清晰值。

$$U_{\text{cen}} = \sum_{i=1}^n u_i S_i / \left(\sum_{i=1}^n S_i \right) \quad (3)$$

将模糊控制器输出 Δk_p 、 Δk_i 作为 PI 控制器输入,PI 控制器的参数可表示为式(4), K_{p0} 和 K_{i0} 为 PI 控制器的初始参数。

$$\begin{cases} k_p = K_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = K_{i0} + \Delta k_i \end{cases} \quad (4)$$

2.2 保护系统设计

1)交流侧过电压保护

交流侧过电压保护由 RC 电路和压敏电阻组成,用来吸收交流电流突变引发的变压器副边电压过压。表达式为

$$C\Delta U^2 \geq L_p I^2 \quad (5)$$

式中: ΔU 取 4 988 V; L_p 取 140 μH ; I 取 2 552 A, 计算得吸收电容 $C \geq 36 \mu\text{F}$ 。

选用 SDD-6000-1.25-64F8 型高压电容,电容

参数为 6 000 V/1.25 μF ,采用电容并联,电容值为 37.5 μF 。吸收电阻计算公式为

$$R \leq 1/(2.3Cf) \quad (6)$$

式中: $C=37.5 \mu\text{F}$; $f=500 \text{ Hz}$, 计算得 $R \leq 23.2 \Omega$ 。选取 RXGH-200 W-20 Ω 电阻,阻值为 20 Ω ,满足要求。

压敏电阻根据变压器副边相电压峰值等级的 2 倍左右选取,且能量应大于 $0.5L_p I^2=456 \text{ J}$ 。选取 GNY-10KJ/3 000 V 型压敏电阻,额定电压 3 000 V,能量 10 kJ,满足要求。

2)换相过电压保护

换相过电压保护由 RC 电路构成,计算方法同交流侧 RC 电路。C 的计算式为

$$C\Delta U^2 \geq L_p I^2 \quad (7)$$

式中: ΔU 取 4 988 V; L_p 为按最大 2 μH 考虑; I 取 2 552 A, 计算得吸收电容 $C \geq 0.26 \mu\text{F}$ 。选用 SDD-6000-1.25-64F8 型高压电容,电容参数为 6 000 V/1.25 μF ,满足要求。

吸收电阻计算公式为

$$R \leq 1/(2.3Cf) \quad (8)$$

式中: $C=1.25 \mu\text{F}$, $f=3\ 000 \text{ Hz}$, 计算得 $R \leq 119 \Omega$ 。选取 RXGH-200W-20 Ω 电阻,阻值为 20 Ω ,满足要求。

3)直流过电压保护

直流过电压保护采用压敏电阻,额定电压应大于 5 760 V,且能量应大于 $0.5L_p I^2=456 \text{ J}$ 。选取 GNY-10KJ/3 000 V 型压敏电阻,额定电压 3 000 V,能量 10 kJ,两个串联,满足要求。

4)支路过流保护

支路过流保护采用快速熔断器,根据设计经验,额定电压需大于等于变压器副边线电压有效值,即 2 037 V;额定电流需约等于晶闸管最大有效值电流的 1.5 倍,即 $1\ 770 \times 1.5=2\ 655 \text{ A}$ 。

综上,选取 RS8-2000-28 熔断器,额定电压 2 000 V,额定电流 2 800 A,与所需参数基本一致,满足设计需求。

3 变流器单元损耗及散热设计

3.1 晶闸管损耗

首先计算晶闸管最大损耗。根据晶闸管整流桥运行原理,当输出最大功率时,移向角接近 0,输出电流为额定 3 000 A,此时,单个晶闸管的有效值电流最大为 $3\ 000 \times 0.577=1\ 731 \text{ A}$ 。

因此,以 $I_m=1\ 731 \text{ A}$ 计算单个晶闸管的损耗,损耗结算结果为 $P_{\text{th}}=2.86 \text{ kW}$ 。

3.2 续流二极管损耗

首先计算二极管最大损耗。续流二极管考虑额定输出电流全部流经二极管的情况,此时热量最大,再考虑2并联,即 $I_m=1\,500\text{ A}$,单个续流二极管损耗结算结果为 $P_{Pi}=1.28\text{ kW}$ 。

3.3 散热器参数计算

热阻由3部分组成,即结壳热阻 R_{thjc} ,接触热阻 R_{thch} ,散热器热阻 R_{tho} 。为控制器件结温在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,可将晶闸管散热器的热阻抗设计为 0.005 K/W ,二极管散热器热阻抗设计为 0.005 K/W 。散热器相关参数和散热效果见表5。

表5 散热器参数和散热效果
Table 5 Parameters and heat dissipation effect of radiator

参数	数值
晶闸管散热器热阻抗/(K/W)	0.005
晶闸管最大结温/ $^{\circ}\text{C}$	64.272
晶闸管散热水流量/(L/s)	0.136
二极管散热器热阻抗/(K/W)	0.005
二极管最大结温/ $^{\circ}\text{C}$	63.53
二极管散热水流量/(L/s)	0.062

3.4 变流器 ANSYS 有限元热分析

通过数值计算的方法对变流器空间电磁场分布、电磁应力和稳态热进行分析。由于电力电子设备元件复杂且排布紧密,难以通过理论推导进行计算,因此利用有限元仿真软件对变流器稳态运行和短路的瞬态过程进行研究和分析。

对电弧加热电源的实体三维模型进行简化,对每种情况下的电流通路进行电磁场分析,并以电磁场分析得到的欧姆损耗及电磁力作为载荷进行稳态热和结构分析,具体结果见图5。

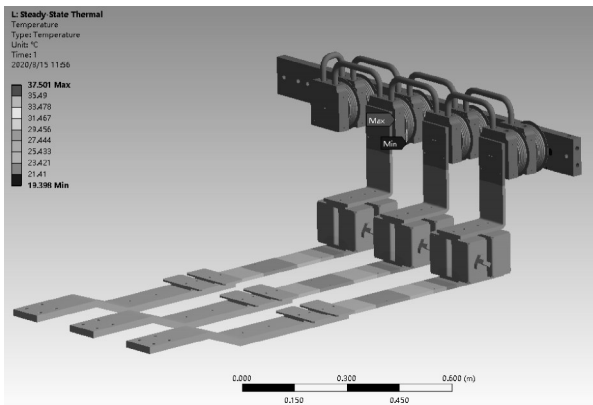


图5 变流器母排稳态热分析
Fig. 5 Steady-state thermal analysis of converter busbar

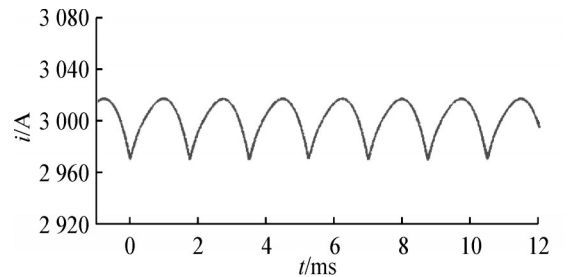
根据流过每条支路的热等效电流进行稳态热分析如图所示,忽略晶闸管热点到表面热阻,近似认为均匀热源。考虑对空气辐射、自然对流及水冷

散热板的散热,环境温度 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$,对于功率器件总发热量约为 3 kW ,仿真结果显示最大温升为 $18.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。散热器能够有效吸收晶闸管发热。

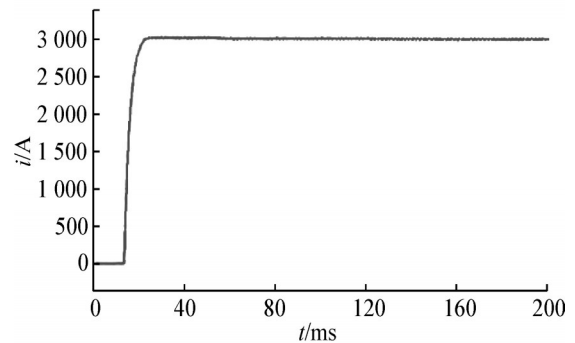
4 仿真分析与运行验证

4.1 仿真分析

额定输出功率时的电流稳态波形如图6(a)所示,电流纹波幅值为 30 A ,纹波占比 1% ,满足小于 3% 的设计需求。电流平均值为 $2\,999\text{ A}$,恒流精度小于 1% 。输出电流动态波形如图6(b)所示,空载突切至额定功率时超调量为 85 A ,占比 2.8% ,满足如表1中所示的设计需求($<10\%$);响应时间和调节时间分别为 23 ms 和 85 ms ,均满足的设计需求($<100\text{ ms}$)。



(a) 额定输出功率



(b) 空载至额定输出功率

图6 输出电流性能
Fig. 6 Performance of output current

由于单个晶闸管整流桥谐波较大,因此通过观察变压器原边电流反映总的谐波情况。单个整流机组为12脉波,双机组构成24脉波可进一步降低谐波,24脉波下的变压器原边电流和电压波形分别如图7-8所示,可以看出,电流波形正弦度较好,谐波含量较低;电压波形畸变很小,基本未受谐波电流影响。电流波形具体频谱分析见图9。

根据变压器原边电流FFT分析结果可以看出,THD=2.64%,满足小于 5% 的国家并网标准。

4.2 实验验证

图10为某大功率电弧加热器电源,输出电流 $0\sim 3\,000\text{ A}$ 可调,电压 $0\sim 22\,000\text{ V}$ 可调。

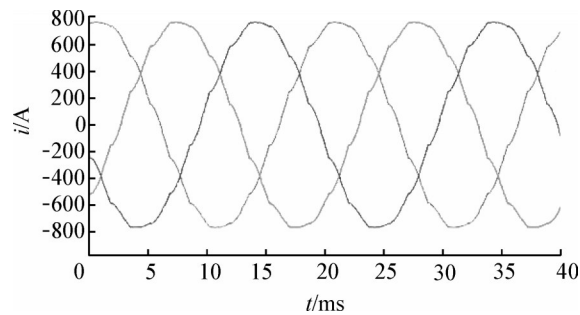


图7 变压器原边电流波形(24脉波)
Fig. 7 Primary current waveform of transformer (24 pulse)

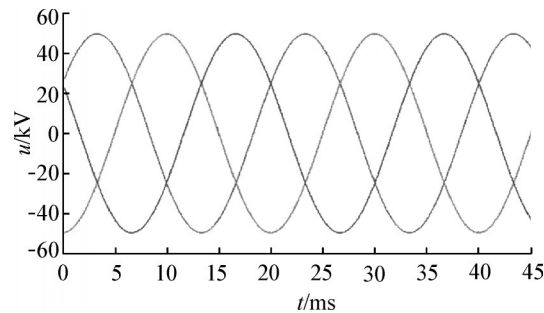


图8 变压器原边电压波形(24脉波)
Fig. 8 Primary voltage waveform of transformer (24 pulse)

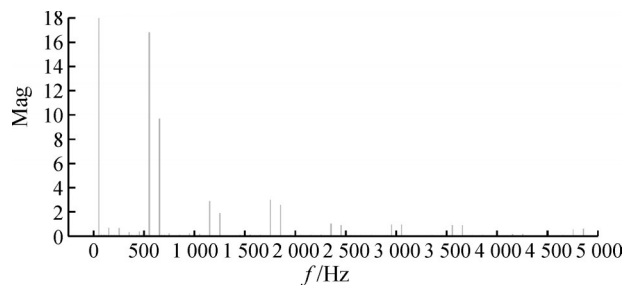


图9 变压器原边电流FFT(24脉波)
Fig. 9 Primary current FFT of transformer (24 pulse)



图10 大功率电弧加热器电源
Fig. 10 Power supply for high-power arc heater

图 11 为大功率电弧加热器电源在假负载条件下,额定电流 3 000 A,长达 5 208 s 的温升实验波形,环境温度 35 ℃,湿度 51%。

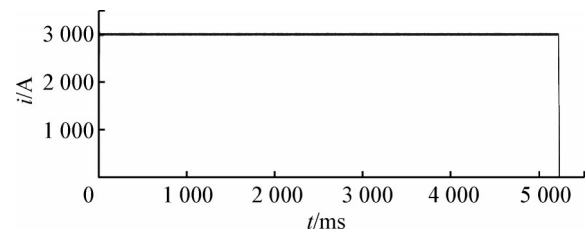


图11 3 000 A 额定电流温升实验波形
Fig. 11 Temperature rise test waveform at rated current of 3 000 A

本文所研发的晶闸管电弧加热器电源可以在额定电流条件下稳定运行,温升结果如表 6 所示,电源的关键部件的温升均在允许范围内。进出水采用热阻水温表测量温度,电源柜内元器件采用 Ti10 红外成像仪测量温度。

表 6 温升实验结果
Table 6 Temperature rise test result

t/min	温度/℃				
	进水	出水	快熔	晶闸管	驱动器
0	32.0	32.0	35	35	35
36	32.0	37.2	75	55	73
60	32.1	37.3	88	55	85
80	32.1	37.4	93	57	86
温升/K	0.1	5.3	58	22	51

由实验结果可知,额定电流下纹波 70 A,纹波占比 2.3%,满足小于 3% 的设计需求。电流平均值为 3 017 A,恒流精度 0.57%,满足小于 1% 的设计需求。

图 12 所示为带实际负载运行时,根据实验需求设定不同的电流阶跃波形。由运行结果可知,在 1 009 s 的运行过程中,电流多次动态变化时,电源系统可以及时响应,且每个电流平台转换过程电流超调量为零,无过冲,对电弧加热器的安全运行有极大好处。

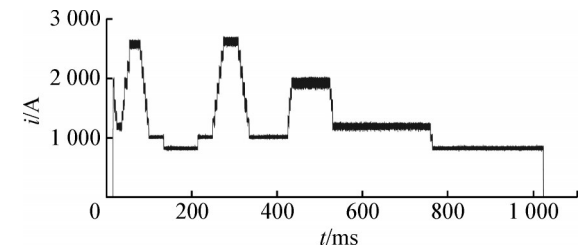


图12 输出电流动态阶跃运行波形
Fig. 12 Dynamic step test waveform of output current

5 结语

本文设计研发了 52 MW 的高功率电弧加热器电源,完成了变流器拓扑、关键器件及参数、保护系统、损耗及散热等设计工作。为提高输出电流的控制精度和控制系统的鲁棒性,提出了模糊 PI 控制方法,经仿真及运行证明,所设计的大功率电弧加热器电源可以实现额定电流条件下的长达千秒级的

稳定运行,恒流精度达到0.57%,输出电流纹波峰值系数达到2.3%,电流超调量为零,实际性能参数均能满足设计需求,为电弧风洞试验提供了高性能、高可靠性电源。

参考文献

- [1] 隆永胜,袁竭,姚峰,等. 大功率电弧加热器关键技术概述[J]. 西北工业大学学报,2021,39(4):776-785.
LONG Yongsheng, YUAN Jie, YAO Feng, et al. Overview of key technologies of high power arc heater[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(4): 776-785.
- [2] LUO Wanqing, YANG Yuanjian, LIANG Jianhan, et al. Study on the simulation method of the ground test in the arc-heated wind tunnel[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2020, 2020(1): 8890743.
- [3] 袁修荣. 大功率电弧加热器电源系统的建模与控制[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- [4] VECCHIO A D, PURPURA C, FILIPPIS F D. Cold air injection and mixing in scirocco hypersonic large scale arcjet facility [C]// Aiaa International Space Planes & Hypersonic Systems & Technologies. Norfolk, Virginia: AIAA, 2003: 69-59.
- [5] JIN Yong, LI Yue, JIANG Chuan, et al. Review on the research progress of arc plasma power sources in China[J]. IEEE Access, 2023(11): 141394-141405.
- [6] 刘天立. 高压大功率电源控制系统研制[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- [7] 王泽宇. 大功率电弧加热器电源系统的建模及串并联运行研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.
- [8] 欧东斌,曾徽,马汉东,等. 大功率电弧加热器起弧过程流场特性研究[J]. 气体物理,2021,6(3):62-67.
OU Dongbin, ZENG Hui, MA Handong, et al. Quantitative study of flow characteristics during ignition for high power arc heater[J]. Physics of Gases, 2021, 6(3): 62-67.
- [9] ŁUKASIK, Z, OLCZYKOWSKI, et al. Estimating the impact of arc furnaces on the quality of power in supply systems[J]. Energies, 2020, 13(6): 1462-1491.
- [10] OLCZYKOWSKI, Z. Arc voltage distortion as a source of higher harmonics generated by electric arc furnaces[J]. Energies, 2022, 15(10): 3628-3650.
- [11] 胡官鹏. 大功率电弧加热器电源串并联运行控制系统研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [12] P. A. MONTGOMERY, D. M. SMITH, J. M. SHEELEY, et al. The quest for higher total pressures justification and current development efforts for a higher pressure arc-heated facility [C]// USAF Developmental Test and Evaluation Summit, Woodland Hills, California: AIAA, 2004: 6815.
- [13] 戴隽文. 大功率电弧加热器系统的仿真研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [14] 郭文杰. 航天器大气环境模拟用高压大功率电弧加热器电源系统研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.
- [15] DAI Junwen, HAO Ruixiang, YOU Xiaojie, et al. Modeling of plasma arc for the high power arc heater in Matlab[C]// 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. [S. l.]: IEEE, 2010: 463-468.
- [16] 郑琼林,郭文杰,郝瑞祥. 大功率电弧加热器电源的设计研究[J]. 电力电子技术,2009,43(10):8-10.
ZHENG Qionglin, GUO Wenjie, HAO Ruixiang. Study on high power converter for arc heater applications[J]. Power Electronics, 2009, 43(10): 8-10.
- [17] TAKAYUKI SHIMODA1, KAZUHIKO YAMADA. Arc heating wind tunnel facility in isas/japan and the activity to update and improve it for further sample return missions [C]// 2016 46th International Conference on Environmental Systems, Austria: ICES, 2016.
- [18] GUO Wenjie, FAN Lin, XU You, et al. Nonlinear control of power supply for an arc heater [C]// 2006 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore: IEEE, 2006: 1-4.
- [19] 臧春艳. 航天继电器稳态电弧等离子体电离过程与电弧特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
- [20] GUO Wenjie, FAN Lin, XU You, et al. Analysis of nonlinear control for high power arc heater utilizing thyristor converter [C]// 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Korea (South): IEEE, 2006: 1-5.
- [21] 徐建明. PID控制器及其设计方法研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2002.
- [22] KIM B, CHOI S B, KIM Y. Observer-based control for a torque converter lock-up clutch utilizing a steady-state torque map[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2023, 31(3): 1208-1219.
- [23] LIU X, QIU L, FANG Y, et al. A fuzzy approximation for FCS-MPC in power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9153-9163.
- [24] GHIORMEZ L, PANOIU M, PANOIU C. Fuzzy logic controller for power control of an electric arc furnace[J]. Mathematics, 2024, 12(21): 3445-3470.

作者简介:

王钢(1983—),男,工程师,主要从事大功率整流电源工作。E-mail:2429674162@qq.com。

梁雪林(1988—),男,工程师,通信作者,主要从事大功率整流电源工作。E-mail:lxlsbssgcs@163.com。

杨远剑(1979—),男,研究员,主要从事大功率整流电源。E-mail:1588271237@163.com。

何敏(1973—),男,正高级工程师,主要从事大功率整流电源工作。E-mail:xl432009@163.com。