

核电站应急柴油机冗余式控制系统自主设计及国产化研究

张金柱¹, 杨永文^{2,3,4}, 王昌庆^{2,3,4}, 闫 宇^{2,3,4}, 韩 琳^{2,3,4}, 张玲琪⁴

(1. 阳江核电有限公司, 阳江 529500; 2. 先进船舶发动机技术全国重点实验室, 上海 201108; 3. 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心, 上海 201108; 4. 上海船用柴油机研究所, 上海 201108)

Autonomous Design and Localization Research of Redundant Control System for Emergency Diesel Engines in Nuclear Power Plants

ZHANG Jinzhu¹, YANG Yongwen^{2,3,4}, WANG Changqing^{2,3,4}, YAN Yu^{2,3,4}, HAN Lin^{2,3,4}, ZHANG Lingqi⁴

(1. Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang 529500, China; 2. National Key Laboratory of Marine Engine Science and Technology, Shanghai 201108, China; 3. National Engineering Research Center for Special Equipment and Power System of Ship and Marine Engineering, Shanghai 201108, China; 4. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to solve the problem of long-term dependence on imports of Chinese nuclear power emergency diesel engine control system, a redundant control system of smart digital control-nuclear (SDC-N) was developed. The control system was designed with dual redundancy for both hardware and software, and it was equipped with functions such as starting control, speed regulation control, sequential turbocharging control, fault diagnosis and redundant switching control. Tests such as speed regulation and redundancy switching were conducted on emergency diesel engines of nuclear power plants, and extreme failover switching tests were carried out on a hardware-in-the-loop test platform. The test results show that the speed fluctuation rate during speed regulation was less than $\pm 1\%$, and the speed fluctuation during redundancy switching was less than 7% of the rated speed. The stability time of redundancy switching was less than 2 s. The test results meet the requirements of various functions and indicators, and can improve the fault tolerance and reliability.

摘要: 为了解决中国核电应急柴油机控制系统长期依赖进口的问题,自主研制了智能数字控制单元(smart digital control-nuclear, SDC-N)冗余式控制系统。该控制系统分别针对硬件和软件进行了双冗余设计,具备起动控制、调速控制、相继增压控制、故障诊断及冗余切换控制等功能。在核电站应急柴油机上进行了调速、冗余切换等试验验证,在硬件在环测试平台上进行了极端的故障切换试验验证。试验结果表明调速时转速波动率小于 $\pm 1\%$,冗余切换时转速波动小于标定转速的7%,冗余切换稳定时间小于2 s。试验结果满足各项功能和指标要求,提高了容错能力和可靠性。

关键词: 核电; 应急柴油机; 调速控制; 冗余切换控制

Key words: nuclear power; emergency diesel engine; speed control; redundancy switching control

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2025.02.011

中图分类号: TK421+.4

收稿日期: 2024-07-04

修回日期: 2024-08-21

作者简介: 张金柱(1989—),男,学士,主要研究方向为核电应急柴油机, E-mail: 18506619921@163.com;

杨永文(通信作者), E-mail: yangyongwen@smderi.cn。

0 概述

核电厂的应急发电机组是由柴油机作为原动机,在核电站的厂用电源发生故障时,提供可靠应急电源以保证反应堆安全停堆,防止重要厂用设备损坏和确保人身安全^[1-2]。其中,调速控制器是核电应急柴油发电机组的核心部件,控制发电机组的转速、功率等参数,对整个机组系统安全稳定运行起着至关重要的作用,是核安全的重要仪控设备。

目前,核电应急柴油发电机组的调速控制系统长期依赖进口,国际局势变幻莫测,作为核心控制部件,运行在国外非开源系统中,无法做到设备的自主可控和安全可信,既不利于核电供应链的经济性和稳定性,也不利于核电技术自主设计的可持续发展^[3-4]。且随着电子控制技术的快速发展,现有产品的设计思路和控制集成度方面也需进行改进提升^[5]。现有产品的稳定性及元器件的可靠性等方面陆续产生了一系列问题,虽然原厂家也已经同步开展技术升级,但升级版本的控制器仍旧未进行冗余设计,无法人为切换主备控制器的控制权,当单个控制器发生故障时只能对整体进行更换,无法仅对故障控制器进行单独更换,导致维修工程量大,严重影响应急柴油发电机组的安全可靠性。

在此背景下,进行了核电站应急柴油机冗余式控制系统自主设计及国产化研究。自主研发的SDC-N冗余式控制系统采用模块化设计,具备完善的信号采集、起动控制、数字调速、故障诊断记录等功能,机械和电气接口与原机柴油机控制系统(engine control system, ECS)保持一致,覆盖原机控制系统的所有控制功能,具有安全冗余控制功能,对核电先进研发体系建设和核电技术自主创新发展都具有重要意义。

1 自主研发控制系统设计

1.1 结构特点

冗余技术的应用可以提高系统的容错能力和可靠性,满足核电仪控设备的要求。双机冗余系统的工作方式有三种^[6],其对比如表1所示。其中,双机热备份是软硬件都有冗余的一种高效容错方式,控制信息准确,当发生故障时可实现系统不停机状态下快速无缝切换,保持设备正常运行。主从模式是指只有主控制器的处理结果输出。全双工模式是指对两个控制器的处理结果进行表决比较后对外输出,其切换性能更有优势,但处理的同步数据量大,硬件电路更复杂。考虑到控制系统更注重实时性的要求,采用双机热备份主从模式进行SDC-N冗余式控制系统的设计。

表 1 双机冗余工作方式

Table 1 Dual-machine redundant working modes

工作模式	工作特点	优缺点
冷备份模式	单机上电,单机工作。工作控制器出现故障后,人工切换至备用控制器	需要人工控制,切换时间长,实时性差
暖备份模式	同时上电,单机工作。工作控制器出现故障后,自动切换至备用控制器	实时性有所提升,控制器使用寿命不平衡
热备份模式	双机工作。主从模式或全双工模式。工作控制器出现故障后,放弃控制权,自动切换至备用控制器	实时性高,且平衡了控制器的寿命

SDC-N冗余式控制系统由主控制器(SDC-N(M))、备控制器(SDC-N(B))和接线箱(terminal box-nuclear, TER-N)组成。主控制器和备控制器均由SDC-N控制单元构成,软件和硬件一致,通过身份(Identification, ID)区分功能,ID通过开关量识别。当任一控制器损坏时,可更换单一故障控制器。

SDC-N冗余式控制系统具备控制器(主、备控制器)、供电电源、负载驱动(电液执行器驱动、增压器驱动)、传感器信号(柴油机转速、增压器转速、执行器位置)、外部操控信号(停车、加速、减速等)及内部控制器局域网总线(controller area network, CAN)通讯双冗余控制功能^[7]。控制系统分别采集传感器信号、外部操控信号,进行运算后控制电液执行器和增压器驱动电磁阀动作,调节柴油机的进油量和进气量,从而控制输出相应的功率。单个控制器也可以独立完成控制。同时,主、备控制器相互监测各自状态,当主控制器故障时备控制器自动接管柴油机控制功能;当备控制器故障时主控制器同样能够实现全部控制功能,确保柴油机运行稳定、响应及时。SDC-N冗余式控制系统结构图如图1所示。

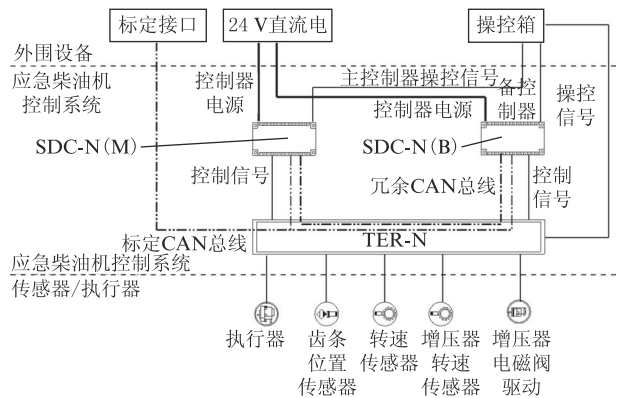


图1 SDC-N冗余式控制系统结构图

Figure 1 Structure diagram of the SDC-N redundant control system

国产化 SDC-N 冗余式控制系统覆盖了 ECS 的所有功能,并进行了优化升级。硬件方面,主、备控制器的电路板完全一致,无直接的电气连接,独立分离无耦合。软件方面,程序开源,增加了转速下垂(Droop 模式)控制功能,优化了冗余切换功能,参数可标定。与原机 ECS 控制系统的对比情况如表 2 所示。

表 2 ECS 与 SDC-N 系统对比情况
Table 2 Comparison of ECS and SDC-N

性能指标	参数	
	ECS 系统	国产 SDC-N 系统
控制器是否可控	依赖进口	自主研发,方便升级迭代
控制参数是否可标定	未开放独立的标定权限	可以,更好地匹配不同的柴油机
是否可更换单一控制器	两个控制器不一致,电气互联,不可单独更换	可以,控制器软件、硬件一致,方便更换
是否可单机工作	否	可以,任一控制器都能够单独完成全部的控制功能
控制功能	无下垂控制功能,冗余切换功能单一	增加下垂控制功能,增加外部强制控制权切换功能,优化严重故障控制权切换功能
应用	应用场景广泛,认可度高,稳定性强	未广泛应用,无耐久试验

1.2 硬件设计

控制器硬件按照模块化进行开发,降低各电路模块之间的耦合,提高硬件故障的隔离率。控制器以微处理器电路为核心,输入信号处理电路将传感器、外部控制指令信号处理成微处理器可以识别的数字量或模拟量信号,调速执行器、增压器驱动等执行器的驱动电路根据微处理器发出的数字量信号驱动负载或转换为模拟量输出。硬件功能框图如图 2 所示,图中 PWM 为脉冲宽度调制(pulse width modulation)。

其中,增压器电磁阀驱动设计了冗余控制功能。主、备控制器分别采用高端连接增压器电磁阀,低端共地。当任一高端控制信号有效时,对应的电磁阀工作,实现对增压器的切入控制。这种机制可保证电磁阀不工作时不带 DC24 V 电源,还能防止绝缘不佳或短路时控制器的故障风险。同时,在高端驱动位置设置过流防护保护,如果在电磁阀工作时有异常短路情况,还能够避免控制器故障。

1.3 软件设计

软件设计功能分为转速控制、增压器控制、冗余切换控制、故障检测等。其中,转速控制、冗余切换控制是该设备国产化过程中的关键技术和技术难点。以层次化、模块化进行软件的开发,降低软件耦合度。软件总体分为平台软件、硬件驱动层、底层服

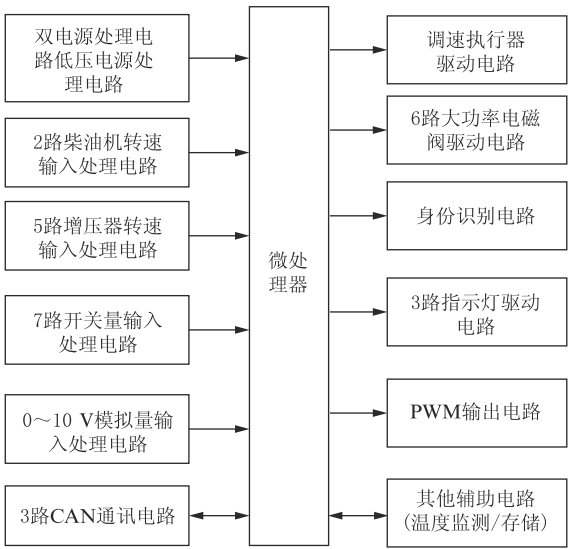


图 2 SDC-N 控制单元硬件功能框图

Figure 2 Hardware function block diagram of the SDC-N redundant control system

务层和应用层。软件功能框图如图 3 所示。

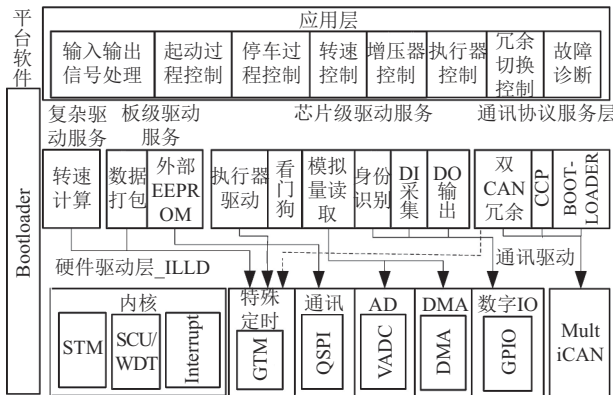


图 3 SDC-N 控制单元软件功能框图

Figure 3 Software function block diagram of the SDC-N redundant control system

1.3.1 转速控制

应急柴油机发电机组核心控制系统主要控制目标是速度。由于柴油机是一个非常庞大复杂的非线性系统,为了满足应急柴油机应用中对转速控制精确性的要求,保证并网稳定有效运行,设计了转速下垂控制模式,并对实际转速的计算和转速闭环控制进行了研究。

下垂模式下,柴油机的设定转速是一条斜线,转速随着负荷的增加而下降。设计的稳定调速率在 0~5% 范围内可标定。

软件中对两路柴油机转速信号进行故障检测和表决,得到最终的实际转速,可进一步确保柴油机实际转速的准确性。故障检测包含齿周期极值故障、齿周期变化率故障两种。在设定转速范围内,检测齿周期值

是否在极小值和极大值之间,检测相邻齿周期的变化率是否超过设定值,判断该路信号是否故障。转速计算表决算法见表 3,表中 Δn 为两路转速最大偏差。

表 3 转速计算表决算法
Table 3 Voting algorithm for speed calculation

工作情景	转速表决
两个转速传感器均采集到转速信号	若传感器 A 计算的转速大于传感器 B 计算的转速 + Δn , 转速取 A 计算值, 反之取 B 计算值
只有一个转速传感器采集到转速信号	转速取该传感器转速值
两个转速传感器均未采集到转速信号	转速为 0 r/min

目前柴油机电子调速器应用最为广泛的控制算法是柴油机转速-执行器位置双闭环的串级比例积分微分(proportional-integral-derivative, PID)控制,这种控制方法通过标定合理控制参数能够达到很好的稳态

性能,但是需要使用分段 PID 控制才能达到满意的柴油机瞬态调速性能,并且根据润滑油温度和进气压力对输出驱动进行修正才能勉强满足一级电站的性能指标,可能还需要加入模糊或者神经网络等控制算法,使得控制器的设计和现场标定比较复杂。本文中采用的控制方法为柴油机转速-驱动电流双闭环的串级 PID,位置滞后于电流,转速-电流环方法从理论分析较转速-位置环更快,相关研究也表明转速-电流环的瞬态性能非常好,即便是使用固定 PID 控制参数的控制方法也能轻松达到一级电站的瞬态性能指标^[8]。

转速控制原理图如图 4 所示。具有控制权的控制器通过 CAN 通讯同步两个控制器的目标驱动电流,主控制器、备控制器分别连接调速执行器的线圈 1 和线圈 2,两个线圈共同拉动执行器,可以保证线圈分担驱动输出,使得柴油机达到目标转速。当某一控制器断电故障时,另外一个控制器可单独控制对应的线圈,完成系统所有的控制功能。

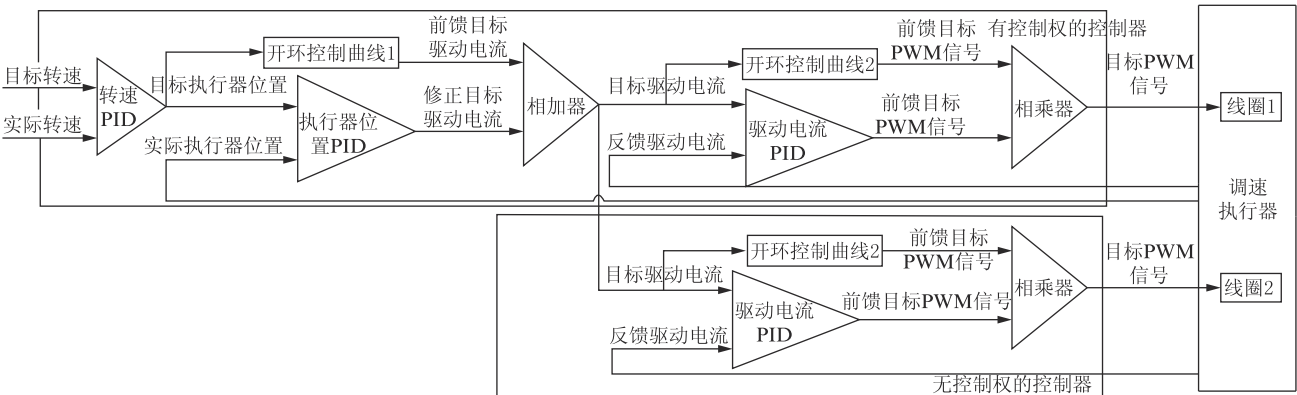


图 4 转速控制原理图

Figure 4 Schematic diagram of the rotational speed control

1.3.2 冗余切换控制

冗余切换控制原理图如图 5 所示。控制器的控制状态包括初始化状态、具有控制权状态、备用状态、故障状态。主、备控制器根据当前的控制状态生成对应不同占空比的 PWM 心跳信号,向对方发送并且获取对方的 PWM 心跳信号。默认情况下,系统正常上电后,主控制器具有控制权,备控制器处于备用状态。为了兼顾调试和正常应用,设计了两种控制权切换模式:第一种是外部强制切换。当需要备用控制器接管控制权时,通过外部输入强制切换指令,假如备控制器无故障,则主控制器交出控制权,备控制器获得控制权;假如备控制器故障,则此次强制切换指令不起作用;且外部强制切换可在维持预设时长后将控制权切换回来。第二种是严重故障切换。控制系统对控制器、传感器和执行器进行

实时的监测,判断是否发生了控制器复位、柴油机转速信号丢失、执行器驱动输出错误、执行器实际位置信号错误等严重故障,当主控制器发生严重故障时,交出控制权,备控制器获得控制权。

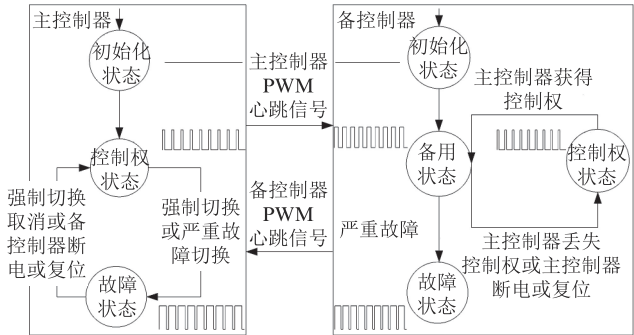


图 5 冗余切换控制原理图

Figure 5 Schematic diagram of redundant switching control

2 K3 级鉴定试验

根据法国 RCC-E:2005《核岛电气设备设计和建造规则》的分类,质量鉴定等级包含 K1、K2 和 K3 级^[9-10]。K3 级是指设备位于安全壳外,验证其在正常环境条件下和地震载荷下能够执行规定功能的鉴定等级。

SDC-N 冗余式控制系统安装于安全壳外,执行安全相关功能,其对应的设备鉴定级别为 K3 级。本控制系统完成了 K3 级质量鉴定试验,试验项目包括基准试验、正常运行环境条件下极限值试验、机械强度试验、耐久性试验、IP 防护试验、盐雾试验及地震试验。试验结果均满足鉴定试验大纲的要求。

3 软件验证与确认 (verification and validation, V&V) 认证

GB/T 15474—2010《核电厂安全重要仪表和控制功能分类》标准将核电厂安全重要仪表和控制功能分为 A、B、C 三类,安全系统范围内的功能属于 A 类或者 B 类,安全有关系统范围内的功能属于 B 类或者 C 类^[11]。SDC-N 冗余式控制系统的设计要求是可靠地控制应急柴油机,起到维持核电厂安全的作用,其标准定级为 A 类标准。

委托有认证资质的第三方机构进行了 V&V 认证。依据标准 IEC60880:2006 对 SDC-N 冗余式控制系统软件代码进行了验证与确认^[12]。认证内容主要包括质量管理评审、需求和设计文档的符合性评审、编码规则检查、单元测试、集成测试及确认测试。认证结果表明,SDC-N 冗余式控制系统软件符合 IEC60880:2006 中关于通用语言的新软件 V&V 的要求。

4 配机试验验证

配机验证用机器为核电站 MTU956TB33 应急柴油机,满载功率为 6 000 kW,标定转速为 1 500 r/min。对 SDC-N 冗余式控制系统的转速控制、冗余切换控制、相继增压控制等功能进行验证。按照参考文献[13-16]等标准要求,确定核电站应急柴油机控制指标见表 4。

4.1 转速控制试验

4.1.1 起动控制功能验证

起动控制试验要求柴油机能顺利起动,快速起动模式下起动时间小于 10 s,起动成功后转速不能低于 1 485 r/min,不能超调于 1 575 r/min,系统无报警。其中,起动时间是指柴油机从接收到起动指令

表 4 核电站应急柴油机控制指标

Table 4 Control indicators for emergency diesel engines in nuclear power plants

项目	指标
快速起动时间/s	<10
瞬调速率/%	≤2
转速波动率/%	<±1
控制权切换稳定时间/s	<2

到转速达到 1 485 r/min 的用时。

控制策略中起动过程设置了三段加速速率控制功能,通过标定不同的加速速率,可以控制起动时间和起动成功时的转速。本次试验控制系统的加速速率标定值见表 5。将控制系统设定在下垂快速起动模式下起动柴油机,设置稳定调速率为 4%。起动控制试验的转速变化曲线、执行器位置变化曲线见图 6,起动用时 8.7 s,因出现转速波动降低至 1 476 r/min 报警,试验结果不符合试验要求。

表 5 初始加速速率标定值

Table 5 Initial calibration value of acceleration rate 1

项目	参数		
转速区间/(r·min ⁻¹)	540~1 400	1 400~1 500	1 500~1 560
加速速率/(r·min ⁻²)	14 100	1 200	600

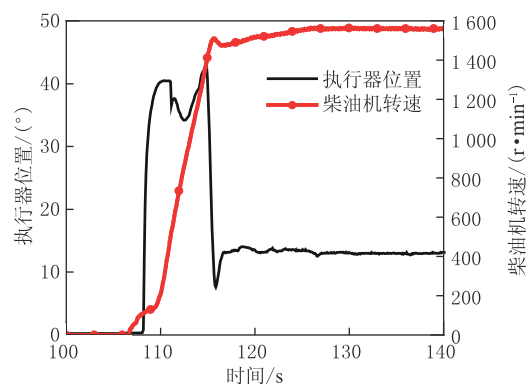


图 6 下垂模式快速起动到标定转速(初始加速速率标定值)
Figure 6 Fast startup to calibrated speed in drop mode (Initial calibration value of acceleration rate)

为了满足起动控制的要求,重新标定起动过程的加速速率,见表 6。重新起动柴油机,记录相关数据。起动控制试验的转速变化曲线、执行器位置变化曲线见图 7。标定参数优化后,起动用时 7.6 s,起动成功后最低转速为 1 558 r/min,最高转速为 1 560 r/min,系统无报警,试验结果符合试验要求。

综上所述,标定不同的加速速率可以满足不同的起动时间、起动转速的控制要求。这也是控制系统国产化后,源代码可控的最大优势。

表 6 重新标定后加速速率标定值
Table 6 Recalibration value of acceleration rate 2

项目	参数		
转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	540~1 000	1 000~1 420	1 420~1 560
加速速率/($\text{r}\cdot\text{min}^{-2}$)	15 000	13 200	2 400

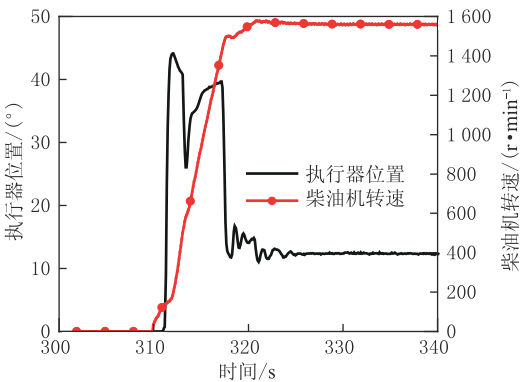


图 7 下垂模式快速启动到标定转速(重新标定后加速速率值)
Figure 7 Fast startup to calibrated speed in droop mode
(recalibration value of acceleration rate)

4.1.2 稳定调速率测试加载试验

将外部移动负载接入控制系统,待柴油机启动成功稳定运行后,参考《MTU956TB33 柴油机出厂试验大纲》的加载要求,按照 0 kW、1 535 kW、2 829 kW、3 572 kW、4 581 kW、4 725 kW、5 128 kW、5 538 kW、5 924 kW 逐级进行加载,要求 2 s 后转速偏差不得超过 2%,转速波动率小于±1%,系统无报警。

设置稳定调速率为 4%,在下垂模式下启动柴油机,待柴油机稳定运行后,进行加载试验。下垂模式突加载过程试验的转速变化曲线、执行器位置变化曲线见图 8,加载试验调速特性曲线见图 9,稳定调速率为 4%,试验数据见表 7,系统无报警,转速波动率小于±1%,试验结果满足试验要求。

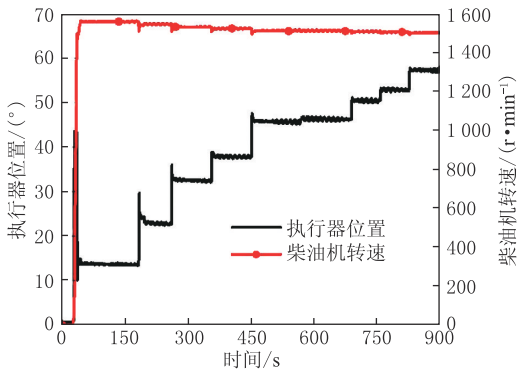


图 8 下垂模式突加载过程的转速变化和执行器位置变化曲线
Figure 8 Variation curves of speed and actuator position during sudden loading in droop mode

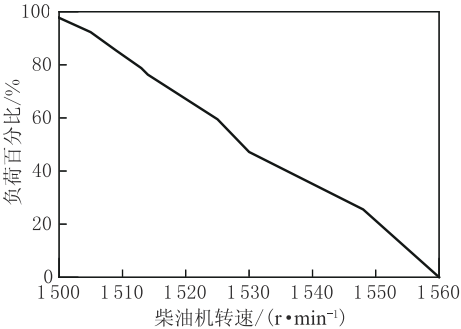


图 9 加载试验调速特性曲线
Figure 9 Speed regulation characteristic curve of load test

表 7 下垂模式突加载试验记录
Table 7 Records of sudden loading in droop mode test

功率/ kW	加载前稳定转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	2 s 后转速区间/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	瞬时 调速 率/%	转速 波动 率/%
1 535	1 558	1 537~1 548	-1.40	0.37
2 829	1 545	1 519~1 530	-1.87	0.37
3 572	1 529	1 517~1 527	-1.60	0.33
4 581	1 522	1 509~1 514	-1.83	0.17
4 725	1 512	1 504~1 513	-1.00	0.30
5 128	1 512	1 497~1 509	-0.87	0.40
5 538	1 507	1 500~1 506	-0.67	0.20
5 924	1 505	1 498~1 502	-0.80	0.13

4.1.3 稳定调速率测试减载试验

设置稳定调速率为 3%,在下垂模式下启动柴油机,待柴油机稳定运行后,缓慢将负荷增加至 100% 负荷,突卸 100% 负荷。要求最高转速不超过 1 670 r/min,系统无报警。突卸载试验的转速变化曲线、执行器位置变化曲线见图 10,减载试验调速特性曲线见图 11,稳定调速率为 3%。突卸 100% 负荷时,最高转速为 1 594 r/min,系统无报警,试验结果满足试验要求。

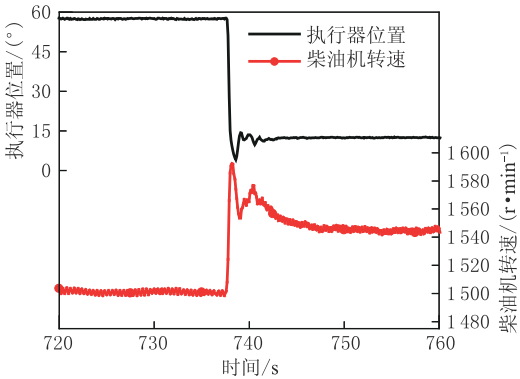


图 10 下垂模式突卸 100% 负荷过程的转速和执行器位置变化曲线
Figure 10 Variation curves of speed and actuator position during unloading 100% loading in droop mode

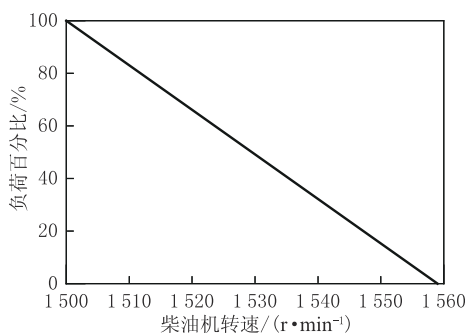


图 11 减载试验调速特性曲线

Figure 11 Speed regulation characteristic curve of reduced test

由 4.1.2 节和 4.1.3 节可知,稳定调速率可标定,当双机并车时能够满足均衡承载电网负载的要求,提高了运行品质和控制系统的稳定性。

4.2 冗余切换控制试验

冗余切换试验用于验证控制系统控制权切换功能是否正常,确定是否提高了控制系统的可靠性。该试验要求控制权切换过程中转速波动小于标定转速的 7%,稳定时间小于 2 s。

4.2.1 外部强制切换

起动柴油机稳定运行后,给定外部强制切换指令。执外部强制切换冗余试验的转速变化曲线见图 12。给定外部强制切换指令后,控制权切换至备控制器,冗余切换过程中,转速波动 $-3 \sim 1$ r/min,稳定时间 1.3 s,转速波动小于标定转速的 7%,切换稳定时间小于 2 s,试验结果满足试验要求。

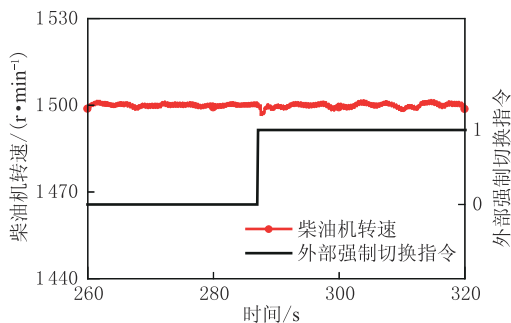


图 12 冗余切换(外部强制切换)过程的转速变化曲线

Figure 12 Variation curves of speed during redundant switching (external enforced switching)

4.2.2 转速信号丢失冗余切换

起动柴油机稳定运行后,依次设置主控制器转速 1 丢失、主控制器转速 2 丢失。转速信号丢失冗余切换试验的转速变化曲线见图 13,图中主控制器转速状态数值 0 为正常,数值 1 为故障。主控制器转速信号 1 丢失时,控制权不切换,转速无明显波动;主控制器转速信号 1、转速信号 2 均丢失时,控

制权切换至备控制器,冗余切换过程中,转速波动 $-9 \sim 25$ r/min,稳定时间 1.5 s,转速波动小于标定转速的 7%,切换稳定时间小于 2 s,试验结果满足试验要求。

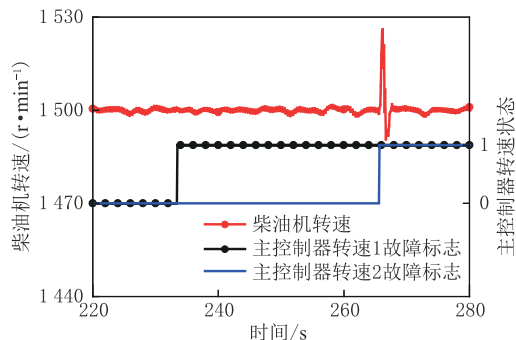


图 13 冗余切换(转速信号丢失切换)过程的转速变化曲线

Figure 13 Variation curves of speed during redundant switching (speed signal loss switching)

4.2.3 执行器位置信号丢失冗余切换

起动柴油机稳定运行后,设置主控制器位置传感器信号丢失。执行器位置信号丢失冗余切换试验的转速变化曲线见图 14,图中主控制器执行器传感器状态数值 0 为正常,数值 1 为故障。执行器位置信号丢失后,控制权切换至备控制器,冗余切换过程中,转速无明显波动,试验结果满足试验要求。

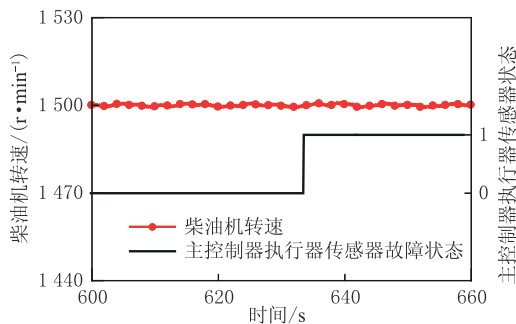


图 14 冗余切换(位置传感器丢失切换)过程的转速变化曲线

Figure 14 Variation curves of speed during redundant switching (position sensor loss switching)

4.3 相继增压控制试验

柴油机稳定运行后,逐渐加载至 6 000 kW,再逐渐减载,并停机,进行相继增压控制试验。要求能够按照设定条件进行增压器的切入切出,系统无报警。增压器切入切出试验转速变化曲线和 5 个增压器转速变化曲线见图 15,试验数据见表 8,试验结果满足试验要求。

5 硬件在环(hardware-in-the-loop, HIL)平台极端故障切换功能验证

HIL 测试是将系统的部分实物接入仿真回路,

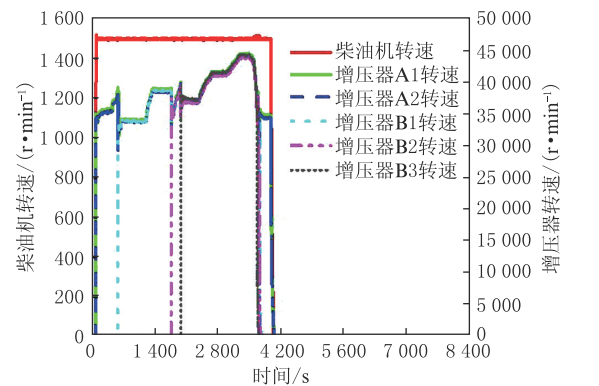


图 15 相继增压控制过程的转速变化曲线
Figure 15 Variation curves of speed during sequential turbocharging control

表 8 相继增压控制试验记录		
Table 8 Records of sequential turbocharging control test		
试验内容	标定阈值	试验结果
A1、A2切入	柴油机转速 ≥ 300 r/min	柴油机转速=319 r/min
B1切入	增压器转速 $\geq 39\,000$ r/min	增压器转速=39 261 r/min
B2切入	增压器转速 $\geq 39\,000$ r/min	增压器转速=39 168 r/min
B3切入	增压器转速 $\geq 40\,000$ r/min	增压器转速=40 093 r/min
B3切出	增压器转速 $\leq 34\,000$ r/min	增压器转速=33 910 r/min
B2切出	增压器转速 $\leq 31\,000$ r/min	增压器转速=30 921 r/min
B1切出	增压器转速 $\leq 30\,000$ r/min	增压器转速=29 988 r/min
A1、A2切出	停机工况	停机工况

采用实物与数学仿真模型相结合进行的试验^[17]。相对于实装试验,HIL平台试验安全且成本低,可以模拟一些极限工况,测试充分性更好^[18]。本文中在HIL平台对SDC-N冗余式控制系统的转速控制、冗余切换控制、相继增压控制等功能进行了系统确认测试,作为配机试验验证的补充。建立的HIL仿真测试平台结构见图16。

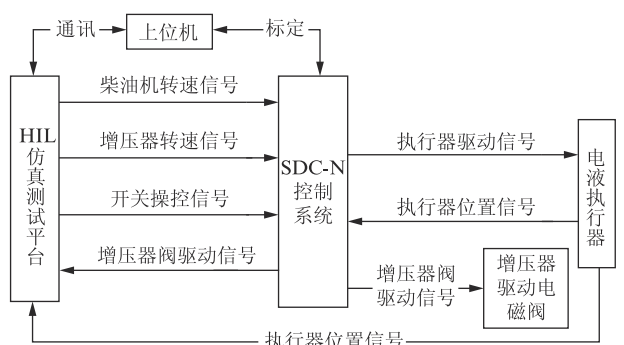


图 16 HIL测试平台结构图
Figure 16 Diagram of the structure of the HIL test platform

5.1 主控制器断电故障冗余切换试验

HIL平台起动柴油机稳定运行后,依次设置主控制器主电源丢失、主控制器辅电源丢失。主控制器

断电冗余切换试验的转速变化曲线见图17。主控制器主电源丢失时,控制权不切换,转速无明显波动,依旧是双机热备份工作模式;主控制器主电源、辅电源均丢失时,控制权切换至备控制器,冗余切换至单机工作模式的过程中,转速波动 $-12\sim 11$ r/min,稳定时间0.6 s,转速波动小于标定转速的7%,切换稳定时间小于2 s,试验结果满足试验要求。

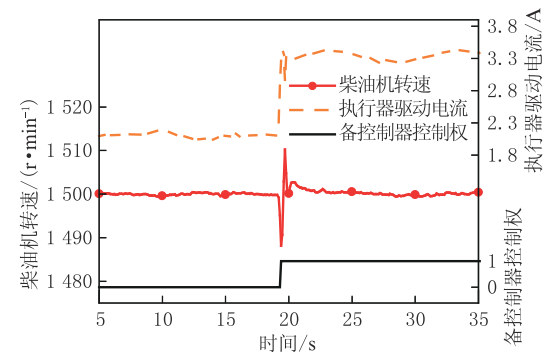


图 17 冗余切换(主控制器断电)转速和执行器驱动电流变化曲线
Figure 17 Variation curves of speed and actuator drive current during redundant switching (SDC-N(M) powered off)

5.2 备控制器断电故障试验

HIL平台起动柴油机稳定运行后,依次设置备控制器主电源丢失、备控制器辅电源丢失。备控制器断电试验的转速变化曲线见图18。备控制器主电源丢失时,控制权不切换,转速无明显波动,依旧是双机热备份工作模式;备控制器主电源、辅电源均丢失时,控制权不切换,转变为单机工作模式的过程中,转速波动 $-35\sim 42$ r/min,稳定时间4.8 s。

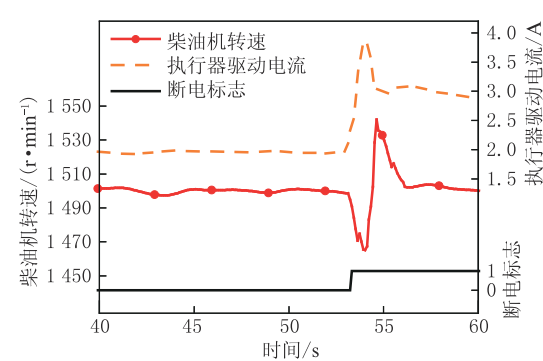


图 18 冗余切换(备控制器断电)转速和执行器驱动电流变化曲线
Figure 18 Variation curves of speed and actuator drive current during redundant switching (SDC-N(B) powered off)

当其中一个控制器断电变为单机控制时,由于一个线圈突然不工作,导致执行器位置减小,供油量降低,转速下降。当单控制器完全接管后,驱动电流变大,线圈

拉动执行器至设定位置,完成转速的闭环控制。

由于 HIL 平台的被控对象为柴油机模型,其动态响应精度与真实柴油机有差距,需要用较多的数据优化模型。因此在 HIL 平台只进行功能验证,不做性能指标的验证。

6 结论

(1) 结合核电应急柴油机控制系统的特点,选用“双机热备份主从”模式进行了国产化 SDC-N 冗余式控制系统的研究。本控制系统完成了 K3 级质量鉴定试验,试验结果均满足鉴定试验大纲的要求。委托有认证资质的第三方机构进行的 V&V 认证表明,本控制系统软件符合 IEC60880:2006 中关于通用语言的新软件 V&V 的要求。

(2) 进行了 SDC-N 冗余式控制系统匹配核电站 MTU956TB33 应急柴油机的试验,对控制系统的调速控制、相继增压控制、冗余切换控制等功能进行了验证。试验结果表明,转速波动率小于 $\pm 1\%$,转速控制满足指标要求要求。冗余切换时转速波动小于标定转速的 7% ,切换稳定时间小于 2 s ,满足冗余控制的性能指标,提高了控制系统的可靠性。

(3) 在硬件在环测试平台上验证了主控制器断电、备控制器断电极端故障的切换功能,可实现单机工作模式。

参考文献:

- [1] 李建武,姜烨. 核电站应急柴油发电机组调速系统对电气指标的影响[J]. 柴油机, 2021, 43(2): 38 - 41.
LI J W, JIANG Y. The influence of the speed control system of emergency diesel gensets in a nuclear power station on electric indexes[J]. Diesel Engine, 2021, 43(2): 38 - 41.
- [2] 滕飞,刘广山. 核电站应急柴油发电机组调速系统设计[J]. 电工技术, 2020(10): 103 - 104.
TENG F, LIU G S. Design of speed regulation system of emergency diesel generator set in nuclear power station [J]. Electric Engineering, 2020(10): 103 - 104.
- [3] 张宏韬,李想,郭爱华. 关于推进第三代核电关键仪控系统国产化的探索[J]. 自动化仪表, 2016, 37(11): 48 - 51.
ZHANG H T, LI X, GUO A H. Exploration on promoting the localization of the critical instrumentation and control system for the third generation nuclear power [J]. Process Automation Instrumentation, 2016, 37(11): 48 - 51.
- [4] 杨已颢,刘建全,徐佩佩,等. 中国核电产业国产化发展分析[J]. 科技和产业, 2020, 20(5): 113 - 118.
YANG Y H, LIU J Q, XU P P, et al. Analysis on the domestic development of China's nuclear power industry [J]. Science Technology and Industry, 2020, 20(5): 113 - 118.
- [5] 李明钢,张波. 国内核电厂应急柴油发电机组控制系统应用现状分析及应对建议[J]. 自动化博览, 2023, 40(9): 54 - 56.
LI M G, ZHANG B. Application of the analysis status and countermeasures for the emergency diesel generator control system in domestic nuclear power plant [J]. Automation Panorama, 2023, 40(9): 54 - 56.
- [6] 唐坤,刘文烽. 电动汽车主控制器双机热备的设计[J]. 汽车实用技术, 2016(10): 17 - 19.
TANG K, LIU W F. Dual-unit hot-standby design of center controller of electric vehicle [J]. Automobile Applied Technology, 2016(10): 17 - 19.
- [7] 姜春宇,金江善,王君惠,等. 船用柴油机冗余 CANopen 过程数据对象可调度性与一致性问题研究[J]. 内燃机工程, 2019, 40(4): 78 - 84.
JIANG C Y, JIN J S, WANG J H, et al. Research on the schedulability and consistency of redundant CANopen's process data object of a marine diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2019, 40(4): 78 - 84.
- [8] 宋恩哲,刘庆伟,赵国峰,等. 转速和电流双闭环在柴油机电子调速器上的应用研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(4): 97 - 100, 106.
SONG E Z, LIU Q W, ZHAO G F, et al. Application research of electronic governor based on speed and current double closed loop for a diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(4): 97 - 100, 106.
- [9] 黄伟杰,张宓,张云波,等. 核电厂数字化仪表控制系统设备鉴定方法研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(6): 111 - 114.
HUANG W J, ZHANG M, ZHANG Y B, et al. A preliminary study on qualification of instrumentation and control system for nuclear power plants [J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(6): 111 - 114.
- [10] Association Francaise pour les regles de conception et de construction et de surveillance en exploitation des materiels des chaudières electro-nucléaires. 2005 Design and construction rules for the electrical equipments of nuclear islands: RCC-E [S]. Paris: Association Francaise pour les Regles de Conception et de Construction et de Surveillance en Exploitation des Materiels des Chaudières Electro-Nucléaires, 2005.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 核电厂安全重要仪表和控制功能分类: GB/T 15474—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [12] International Electrotechnical Commission. Nuclear power plants-instrumentation and control systems important to safety-software aspects for computer-based systems performing category a functions: IEC60880—2006[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2006.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 船用柴油机调速系统技术要求和试验方法: GB/T 3475—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 中国核工业总公司. 核电厂备用电源用柴油发电机组准则: EJ/T 625—2004[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2004.
- [15] Kerntechnische Ausschuss. Emergency power generating facilities with diesel-generator units in nuclear power plants: KTA 3702—2000[S]. Salzgitter: Kerntechnische Ausschuss, 2000.
- [16] Nuclear Power Engineering Committee of the IEEE Power and Energy Society. IEEE standard criteria for diesel-generator units applied as standby power supplies for nuclear power generating stations: IEEE 387—1995[S]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995.
- [17] 韩璐瑶,齐华岳,曹红艳,等. AT 变速器控制器硬件在环测试研究[J]. 汽车电器, 2023(12): 85 - 87.
HAN L Y, QI H Y, CAO H Y, et al. Hardware-in-the-loop test research study of AT transmission controller [J]. Auto Electric Parts, 2023(12): 85 - 87.
- [18] 丁敬应,胡亮,熊威,等. 一种核用调速器硬件在环仿真验证系统及其使用方法: CN116165913[P]. 2023-05-26.