

DOI: 10.19666/j.rlfed.202304010

大型火电励磁国产化技术概述与应用

常青松¹, 何信林², 朱宏超³, 李宝明⁴

(1. 华能吉林发电有限公司九台电厂, 吉林 长春 130500;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 国电南瑞科技股份有限公司电气控制分公司, 江苏 南京 211106;

4. 中国船舶重工集团公司第七一二研究所, 湖北 武汉 430070)

[摘要] 大型火电机组励磁系统进行国产化替代, 要打破技术壁垒, 从信息系统、控制系统和电子器件等多方面实现突破。首先, 对现代励磁技术的控制与指令子系统、通信子系统、整流子系统及灭磁子系统等关键技术进行了系统地总结归纳, 针对各技术所涉及的研究现状、存在问题及难点进行了分析与概述; 其次, 叙述了大型超临界 670 MW 火电机组 HN-i6200 励磁系统的国产化替代历程, 对于火电机组励磁系统运行的特殊要求, 开展针对性设计, 研制高可靠性的国产直流开关, 并通过试验研究攻克火电机组励磁系统的运行策略, 成功研制出全国产化 HN-i6200 型励磁系统。现场测试与系统建模验证了全国产化励磁系统工作性能, 为电力工业励磁技术的国产化提供了技术与实践参考。

[关键词] 励磁系统; 全国产化; 励磁调节器; 直流开关; HN-i6200

[引用本文格式] 常青松, 何信林, 朱宏超, 等. 大型火电励磁国产化技术概述与应用[J]. 热力发电, 2023, 52(12): 11-19.
CHANG Qingsong, HE Xinlin, ZHU Hongchao, et al. Overview and application of large thermal power excitation localization[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(12): 11-19.

Overview and application of large thermal power excitation localization

CHANG Qingsong¹, HE Xinlin², ZHU Hongchao³, LI Baoming⁴

(1. Jiutai Power Plant, Huaneng Jilin Power Generation Co., Ltd., Changchun 130500, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. NanjingNanrui Group Company Electrical Control Branch, Nanjing 211106, China;

4. The 712th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Wuhan 430070, China)

Abstract: It is necessary to break the technical barrier and make breakthroughs in information system, control system, device and other aspects when reforming large thermal power excitation system domestically. The article first systematically concludes and summarizes the key technologies of modern excitation technology, including control and command subsystems, communication subsystems, rectifier subsystems, and excitation subsystems. It analyzes and summarizes the research status, existing problems, and difficulties involved in each technology at home and abroad. Secondly, the localization and replacement process of the HN-i6200 excitation system for large-scale supercritical 670 MW thermal power units was described. Targeted design was carried out to meet the special requirements of the excitation system operation for thermal power units, and highly reliable domestic DC breakers were developed. Through experimental research, the operation strategy of the excitation system for thermal power units was overcome, and a nationally produced HN-i6200 excitation system was successfully developed. The on-site testing and system modeling have verified the working performance of the nationwide production excitation system, providing technical and practical references for the localization of excitation technology in the power industry.

Key words: excitation system; to tally domestic; excitation regulator; DC breaker; HN-i6200

收稿日期: 2023-04-06

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ22-H36)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ22-H36)

第一作者简介: 常青松 (1983), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为发电机励磁系统理论分析, 13904318697@163.com。

随着国家发展战略和“十四五”电力发展规划对电厂设备智能化、国产化展开宏观布局^[1],国内多家电力企业对电力设备的智能化、国产化展开了前瞻研究与示范应用。例如,国电南瑞研制的自主可控全国产化继电保护成套装置已挂网运行,中国华能集团研制了全国产化 DCS“华能睿渥”,智深公司研制了自主可控智能控制系统 EDPF-iSol 系统等^[2],华电自主研发了“华电睿蓝”DCS、“华电睿信”水电监控系统。各领域电力装置智能化、国产化的示范应用项目百花齐放。其中,励磁作为发电单元的关键系统,其可靠性尤其重要,取代进口设备获得完全自主知识产权的国产化励磁系统,具有极其重要的意义。

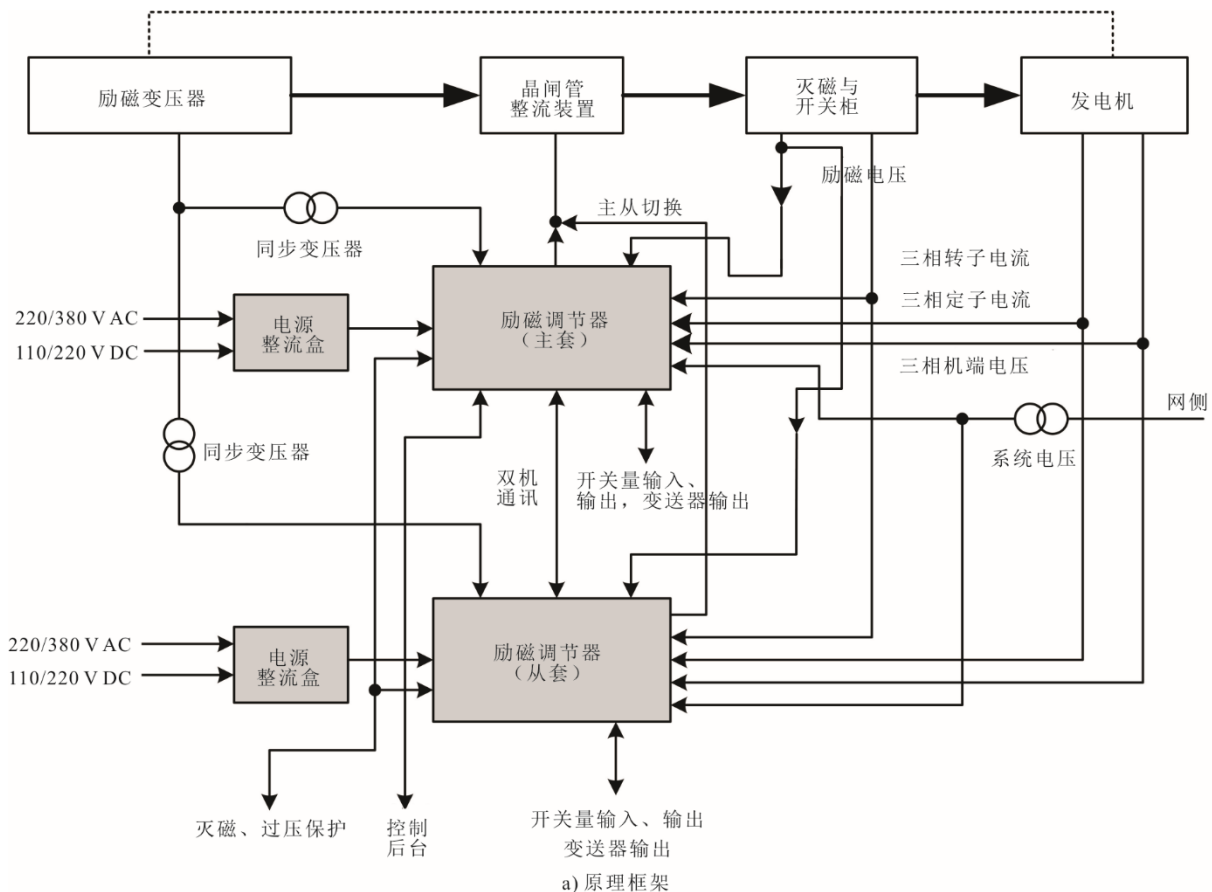
励磁系统在工业控制过程中,不仅要在芯片级保证连续高速的脉冲调制稳定性,还应确保例如可控硅整流单元、大容量磁场断路器等一次设备的综合安全性能,协同同步发电机转子建压、调节以及可靠灭磁停机的全过程^[3]。励磁系统涵盖供电、控制与指令、通信、整流、灭磁等五大子系统,各环节及元器件均需实现国产化,才可达到整体自主可控,完全意义上摆脱励磁技术“卡脖子”问题。

本文旨在探讨励磁系统及其国产化的关键技术问题,介绍了已应用于华能九台电厂的超临界

670 MW 大型火电机组全国产化励磁系统的“HN-i6200 系列”。该技术已实现芯片级的全国产化软、硬件替代,重点研究了国产芯片及其指令集、可控硅材料和大容量直流断路器等产品,研制高可靠性的国产直流开关,并通过试验研究攻克火电机组励磁系统的运行策略,成功研发 HN-i6200 型励磁调节器替代进口励磁调节器。该成果的成功应用表明全国产化励磁系统具有可持续、友好推广与升级的优势。它不仅可以有效地缩减技术服务和备件采购成本,还可进一步激发民族产业链的创新升级,为励磁技术的国产化推广应用提供技术支持与方案参考。

1 励磁国产化关键技术

现代励磁技术的典型原理框架如图 1 所示。励磁系统以成套柜体布置,输出铜排与发电机转子连接,励磁电源经励磁变压器接入整流柜。控制电源还需配置双路直流电,用于励磁调节器与灭磁开关等的供电;配置交流电源用于工控机、柜体照明、冷却风机和启励单元等器件供电^[4-5]。无论是设备级的供电还是芯片级的微型电源系统,国产化替代技术已有成熟方案。本节着重综述控制与指令、通信、整流、灭磁 4 部分关键技术。



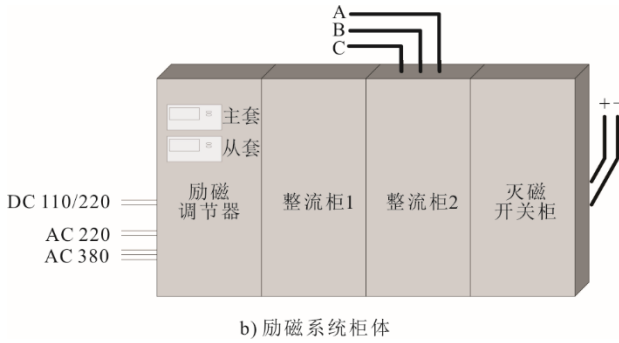


图 1 典型励磁系统结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of typical excitation system

1.1 控制与指令子系统

控制与指令子系统对应励磁调节器的硬件平台与指令，典型的指令控制原理如图 2 所示。励磁控制需要高速可靠地实时交互模拟量总线数据流、开关量总线数据流，进行数字式微机控制，主要任务是将不同上位控制信息转换为脉冲触发信号输出至功率整流单元，正常启停确保发电机安全运行。常规励磁调节器的主要指令控制硬件平台架构配置 DSP (digital signal processing) 板+CPU (central processing unit) 板，DSP 部分完成模拟采集、运算及控制，CPU 部分完成管理、通信以及开入/开出处理；亦或是纯 DSP 处理器完成控制与采集任务，典型如南瑞电控 SAVR2000 系列产品^[6]。

现有微机控制有四大 CPU 体系结构—ARM、X86/Atom、MIPS、PowerPC，比较电力工业励磁用 CPU 体系调研结果，励磁系统板控制器架构见表 1。还有一种精简指令集计算机 (reduced instruction set computer, RISC)，RISC 是一种执行较少类型计算机指令微处理器，起源于 80 年代的 MIPS 主机。该计算机因执行每个指令类型都需要额外晶体管和电路元件，计算机指令集越大就会使微处理器更复杂，执行操作也会更慢，目前还在发展起步中^[7]。

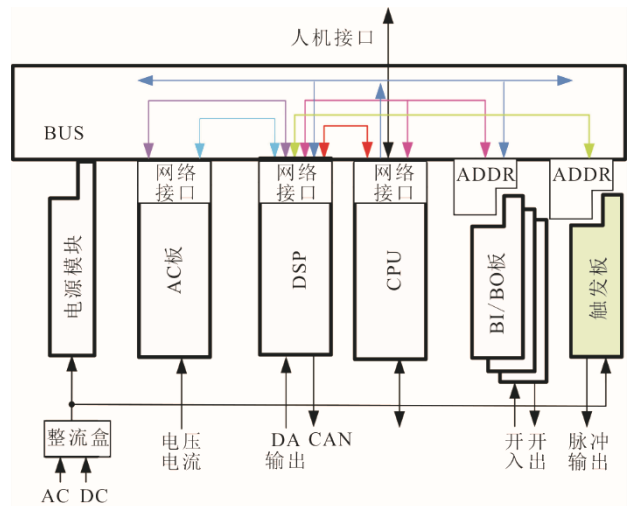


图 2 指令控制原理示意
Fig.2 Schematic diagram of instruction control theory

表 1 励磁系统板控制器架构
Tab.1 Excitation system controller architecture

项目	ARM 体系	X86 体系	MIPS 体系	PowerPC 体系
特点	低成本、高性能、低功耗	工艺先进，支持超线程技术	设计更简单、设计周期更短	嵌入式，可伸缩性好、方便灵活、性能优异，成本高
架构指令	提供了多样的授权条款，处理器架构授权开放	Intel 架构，指令封闭	目前开放	有限开发
授权情况	硬核授权	不可授权	软核授权	硬核授权
支持厂商	TI (德州仪器) / Samsung (三星) / Freescale (飞思卡尔) / Marvell (马维尔) / Nvidia (英伟达)	Intel 独家	2007 年 8 月 16 日 MIPS 科技宣布，中科院的龙芯中央处理器获得其处理器 IP 的全部专利和总线、指令集授权	IBM (国际商用机器公司) / Apple (苹果公司) / Motorola (摩托罗拉) / Freescale (飞思卡尔)
开发厂商	ARM 公司 (美国收购)	美国 Intel 公司	美国 MIPS 公司	AIM 联盟 (APPLE、IBM 和现 Freescale)
典型励磁产品	南瑞电控 NES5100 南瑞继保 PCS9400 西门子 THYRIPOL 四方励磁	四方励磁	暂无	广州擎天 EX2000 南瑞电控 NES6100 ABB UNITROL 6800
自主可控	用户有保留重制 ARM 内核的权利	不可控	可自主设计 MIPS 构架下的 CPU	不可控

当前工业技术态势下，国产化励磁系统在处理器架构可选方案只有 ARM 体系和 MIPS 体系 2 种。其中 ARM 公司已被芯片开发商收购，自主可控度

极度不稳定；MIPS 体系无硬核授权，可开发用户自己的处理器产品，因此 MIPS 体系的处理器是目前国产化励磁技术的优先方案。

励磁系统控制用的处理器架构下,需依靠串行总线连接 CPU 芯片和 FPGA (field programmable gate array),CPU 串行连接如图 3 所示。由 FPGA 负责数模采样、双套切换、频率测量、脉冲生成等重要功能^[8]。

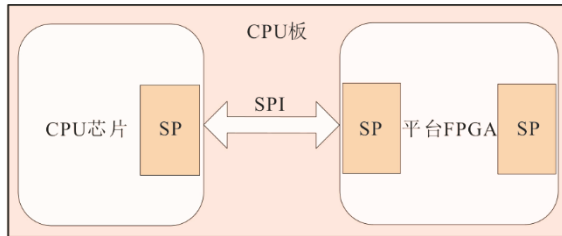


图 3 CPU 串行连接示意

Fig.3 Serial connection diagram of CPU

因此,励磁调节器的国产化硬件平台关键技术主要围绕 DSP+CPU 板的替代实现。

文献[9]中李鹏团队依托国家重点研发计划课题“电力专用 CPU 芯片和内嵌入式操作系统研发及应用”、南方电网公司科技项目“芯片化保护测控装置关键技术研究与应用”等项目,突破了新一代继电保护技术,在创新架构、高效集成、全面国产和安全可控等方面建立了完整的芯片保护技术体

系,取得了一系列重大技术突破。

从硬件性能、接口、功耗水平、工业应用场景、量产出出货量等 5 个维度综合分析来看,国产 CPU 芯片厂家有全志科技、瑞芯微、龙芯、飞腾等;国产 FPGA 芯片厂家有广东高云、紫光同创等;ADC (analog-to-digital converter) 芯片厂家有上海贝岭、芯云、核心互联等。在核心操作系统软件技术可控性方面,国内企业大都基于开源技术,掌握所有核心技术资料。如中兴、银河麒麟等企业均拥有源代码和代码仓库,具有 100% 的产品定制权限,可以根据客户需要进行全层级定制开发。

1.2 通信子系统

励磁调节器在主从套装置之间的信息交互一般采用 CAN (controller area network) 总线高速串行通信网络。调节器与上位机或人机交互系统的外部通信一般有 Modbus/TCP、IEC103 协议、IEC61850、OPC 等通信方式。

励磁调节器板件内部通信方式在现代励磁技术中主要体现在总线协议和数据流接口形式的配合,在调研国内代表性励磁厂家的通信配置方式后,将励磁系统板间通信方案总结见表 2。

表 2 励磁系统板间通信方案

Tab.2 Communication scheme between excitation system boards

项目	典型协议			典型接口		
	CAN	SPI	PCI-E	SPORT	RGMII	TTL
功能特点	串行通信	同步串行	串行通信	支持时分复用的方式	在上升沿和下降沿同时传输数据	并行方式传输接口
应用场景	各类控制器的局域网通信	嵌入式系统下连接外部设备	上位机与交换机访问、寄存器配置与 DMA 读写	模拟量传输、寄存器间数据流	模拟量传输、MAC 层间/MAC 层与物理层间数据流	数字集成电路
技术规格	数据传输速率 1 Mbit/s	传输速率每秒可达兆字节级	速率每秒可达千兆字节级	可以达到系统时钟的 1/2	传输速率可达 1 000 Mbit/s	数据传输速率 10 Mbit/s
优点	多主总线模式、通信速率高、抗干扰性强、成本低	有主从模式、全双工、成本低	高速串行替换使缓存和数据更接近 CPU	高速的数据传输	电路成本低	并行传输,全双工通信,传输速率极快
缺点	可能出现数据不一致性、信道堵塞	无指定流控制、无应答机制	通道仅支持点对点专用单向耦合	数据流单项	时序约束相对也更为严格	并行数据传输距离短、抗干扰差

综上,在数字通信协议簇中,用于系统内各芯片间的通信可选用如 CAN、SPI (serial peripheral interface) 等“小”协议;系统间通信则需要选用传输速度每秒达数百上千兆字节的“大”协议总线系统,如 PCI-E (peripheral component interconnect express) 协议。再由励磁技术应用场景配置对应的接口,组合传输可靠、性价比最优的方案即可^[10]。

通信子系统的国产化关键技术在于:1) 依照选

取确定的国产化控制器架构选取内部板件间通信方式与各类型接口;2) 高可靠的双套冗余通信配置方案;3) 通信器件国产厂商性能比选;4) 重点数据流传输与缓存的自校验;5) 友好人机交互的多种外部通信接口预留。

1.3 整流子系统

大型火电励磁系统整流子系统的功率柜设计需要遵循标准^[11-14],确保 N-1 和 N-2 模式下同步发

电机的所有工况安全运行。功率柜内配置的核心元器件为可控硅，或称晶闸管，辅助器件有快速熔断器、冷却风机、测温传感器等。

在提高功率柜的均流系数、解决交流侧过电压限制及功率柜优化散热方式等问题方面，目前有多个国产化示范应用项目^[15-18]。有的通过采用动态均流技术，功率柜间的均流系数达到 97% 以上；有的采用南瑞特有的阻容吸收选型计算方法，能够将交流侧过电压限制到 1.8 倍以下，有效抑制交流侧换相过电压；还有创新性地提出铝材散热器加强迫风冷的可控硅散热方式。

晶闸管是励磁系统中承担功率转换的基本单元，直流输电制造业是电力用晶闸管的发展源，两大跨国公司 ABB 和 SIMENS 的成套设备占据了高压直流领域的主要市场。大容量国产晶闸管换流阀制造商在晶闸管器件的研制、设计、试验全过程中已有工程应用，例如西电集团完成的舟山直流工程、西北-华中背靠背联网工程，许继集团完成的云广±800 kV 直流工程等。诸如株洲中车集团轨道交通牵引系统用的中型晶闸管、功率半导体产业公司西安派瑞等，为励磁系统整流子系统器件的国产化带来多选方案。

保证整流系统可靠、稳定运行的国产化关键技术还在于：1) 晶闸管性能选择的指标计算；2) 配置晶闸管配套运行的过压抑制系统方案；3) 晶闸管国产器件的深度测试；4) 晶闸管器件的一致性与柜间均流设计。

1.4 灭磁子系统

灭磁系统核心元器件包括磁场断路器、灭磁电阻以及转子过电压保护装置。其技术条件依照标准^[19-21]，分别确定磁场断路器额定电压、额定电流、额定最大分断电压、灭磁容量及转子过电压保护装置电压整定。

灭磁系统的作用是当机组故障时迅速切断发电机的励磁，并将存储在励磁绕组中的磁场能量快速消耗在灭磁回路耗能元件中。由于耗能型灭磁装置要将磁能消耗在磁场断路器中，易造成其开关损坏，所以目前广泛使用通过灭磁电阻耗能的移能型灭磁装置。火电机组鉴于转子本体具有很强的阻尼作用，快速灭磁只能加速纵轴励磁绕组回路中的转子励磁电流衰减，而不能使存储在发电机转子本体及横轴阻尼绕组中的能量迅速消失，因此汽轮发电机组通常采用线性电阻进行移能灭磁^[19-22]。

我国自主研制了适用于不同容量、场景的灭磁方案如 DM4、DMX、DDL 等新型灭磁开关与氧化锌 (ZnO) 非线性灭磁电阻搭配组合的灭磁装置^[23]，非线性电阻 ZnO 与其他换流方式的搭配组合^[24]，交、直流双磁场断路器与 SiC 非线性电阻冗余组合的灭磁方案^[25]，满足了发电机组的灭磁需要与安全要求。目前，应用较为成熟的国外磁场断路器还包括法国雷诺电气公司的 CEX 系列^[26-28]、瑞士赛雪龙公司的 HPB 系列及 UR 系列、美国通用公司的 Gerapid 系列，对于火电机组磁场断路器国产化的主要难点在于增大其通流能力保证正常运行时温升合格。

保证灭磁系统稳定可靠运行的国产化关键技术还在于：1) 大容量、高电压灭磁环境下的磁场断路器研发；2) 灭磁时序的优化设计。

2 HN-i6200 励磁系统国产化研发

HN-i6200 系列励磁系统重点研究了国产芯片及其指令集、可控硅材料和大容量直流断路器等部件，对于大型燃煤机组励磁系统运行的特殊要求，进行针对性设计，研制高可靠性的国产直流开关，并通过试验研究攻克火电机组励磁系统的运行策略，成功研发出全国产 HN-i6200 型励磁调节器替代进口励磁调节器，完成了励磁系统参数测试，并建立了电力系统稳定计算励磁系统数学模型。

2.1 MIPS 架构下的龙芯系列处理器

HN-i6200 型励磁调节器基于南瑞电控 NES6100 型励磁调节器架构进行二次研发，平台硬件彻底替代，操作系统层重新开发，依照 MIPS 体系下的芯片级、模块级、单板级和系统级优化设计适配开发平台中间件。

硬件架构保留经典励磁调节器的 DSP 板+CPU 板模式，DSP 板完成模拟采样、运算及控制，CPU 板完成管理通信以及开入开出处理，均采用中央控制芯片+FPGA 最小系统的硬件方案。选用的龙芯 2K1000CPU 为 64 位双核处理器，多 CAN 控制器及 PCIE 控制器，使 CPU 和 FPGA 之间的通信更加可靠、稳定。龙芯 2K1000 处理器片内数据缓存还配置硬件 ECC (error correcting code) 校验来提高了控制装置的可靠性。

配置 RGMII (reduced gigabit media independent interface) 高速模拟量通信通路，外部通信接口保留 Modbus TCP，还全面支持 IEC61850、IEC103 的人

机交互上位通信协议, 兼容智能变电站运用接口技术; 支持 IRIG-B、NTP 和 PPS 等多种对时方式。

软件国产化以 NES6100 型调节器为原型升级, 各基础模块板件设计完成, 底层代码编译以龙芯 LSK2000+FPGA 最小系统代码完成, CPU 编译环境确定为“麒麟 V10”环境编译, 在自主可控软硬件平台基础上, 完成从 32 位处理器到 64 位处理器的程序适配处理。

2.2 整流系统设计计算

整流系统的核心器件为可控硅, 国产方案较成熟, 设计选型为该系国产化关键。首先按照 $N-1$ 方式计算单面整流柜额定输出电流:

$$I_{SR} \geq \frac{1.1 \times I_{IN}}{K_a \times (N-1)} \quad (1)$$

式中: I_{SR} 为单个功率整流桥额定输出电流; I_{IN} 为发电机额定负载励磁电流; K_a 为均流系数; N 为功率整流桥数量。

元件的通态平均电流计算公式为:

$$I_{T(AV)} = \frac{K_I I_{SR}}{\frac{\pi}{2} \times \sqrt{3}} \quad (2)$$

式中: K_I 为电流裕度系数, 一般取 1.8~2.3。

计算可控硅反向重复峰值电压 U_{RRM} :

$$U_{RRM} \geq K_b K_u \sqrt{2} U_{2N} \quad (3)$$

式中: K_b 为过电压倍数, $K_b = K_1 \times K_2$, K_1 为换相过电压倍数取 1.6~1.8, K_2 为整流桥最大输入电压不小于 1.5 倍发电机额定机端电压, 故 K_b 取 2.4~2.7; K_u 为电压裕度系数, 取 1.05~1.10; U_{2N} 为励磁变压器额定二次电压。

利用通态平均电流和晶闸管反向重复峰值电压完成可控硅的型号初选, 还需校核可控硅结温发热, 完成整流子系统中可控硅的选型。

2.3 灭磁与过压保护系统设计

大型火电机组灭磁宜采用线性电阻灭磁方式, 根据 1~3 倍的发电机转子绕组直阻值初选灭磁电阻值, 如为 0.19Ω 。分别设置空载误强励、负载误强励和机端三相短路 3 种工况对灭磁过程进行仿真计算, 3 种工况下仿真结果如图 4—图 6 所示。

1) 工况 1 空载误强励灭磁 当发电机运行在额定空载工况时, 突然失控误强励, 在机端电压达到 1.3 倍额定电压后延时 0.5 s 跳磁场断路器, 同时将灭磁电阻接入灭磁回路进行灭磁。

2) 工况 2 负载误强励 当发电机运行在额定

负载工况时, 突然失控误强励, 由于发电机并列在网上, 故假设机端电压为额定电压。在发电机定子电流达到热稳定极限或转子电流达到热稳定极限或转子电流达到 2.5 倍额定电流后, 延时 0.5 s 跳磁场断路器, 同时将灭磁电阻接入灭磁回路进行灭磁。

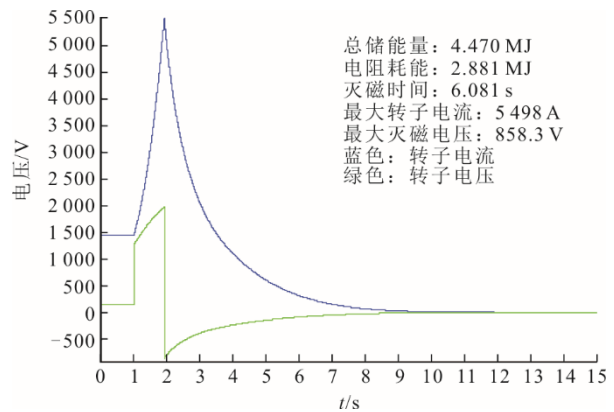


图 4 工况 1 仿真结果

Fig.4 Simulation results of working condition 1

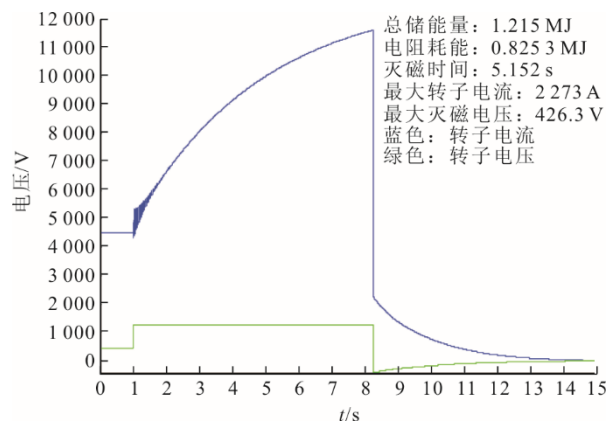


图 5 工况 2 仿真结果

Fig.5 Simulation results of working condition 2

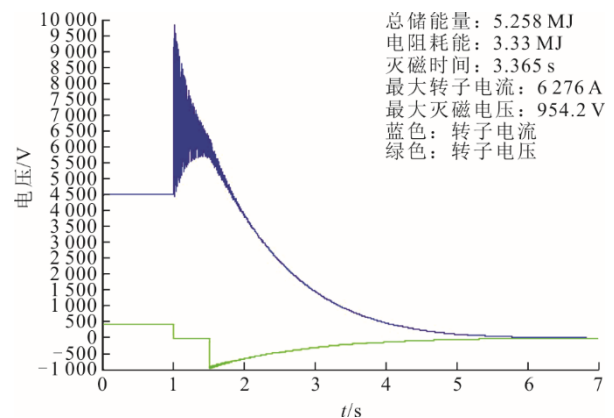


图 6 工况 3 仿真结果

Fig.6 Simulation results of working condition 3

3) 工况 3 负载额定下发电机机端三相短路 当发电机运行在额定负载工况时, 发电机端突然三

相短路，延时 0.3 s 跳负荷开关，同时联跳磁场断路器进行灭磁，但是由于短路点在发电机机端和机端断路器之间，因此跳机端断路器不能使得发电机与短路点断开。

经仿真分析，负载额定下发电机机端三相短路工况灭磁容量最大，灭磁容量为 3.33 MJ。保留一定裕度后，按照灭磁容量 6.00 MJ 的发热条件来确定线性电阻的布置工艺。

灭磁断路器的额定工作电压按照不小于整流单元交流输入额定电压峰值选择，按照大于等于 1.1 倍转子额定负载电流选择断路器额定连续电流。灭磁断路器最大分断电流按照励磁系统最大短路电流计算结果选择，直流磁场断路器额定短路分断电流应不小于整流柜出口侧短路的最大电流值。额定最大分断电压应大于灭磁电阻两端最大灭磁电压和晶闸管整流桥输出的最大电压之和。针对空载误强励和负载机端短路 2 种恶劣工况的仿真结果与整流桥最大输出电压，确定最大分断电压为 4 000 V。

过电压保护装置由非线性电阻、晶闸管跨接器组成，过压动作整定值需保证励磁绕组两端过电压时的瞬时值不超过出厂试验时绕组对地耐压试验电压幅值的 70%。

2.4 大容量、高弧压国产磁场断路器研发

励磁全硬件设备进行了国产供货商比选，其中大型火电机组用磁场断路器首次应用了国产直流开关，机械锁扣式的合闸保持技术、高可靠性的合闸锁机构技术、合闸零弹跳与主弧触头电流转移技术和断路器机械寿命次数的突破，确保了国产磁场断路器使用的可靠性，进口与国产磁场断路器对比如图 7 所示。

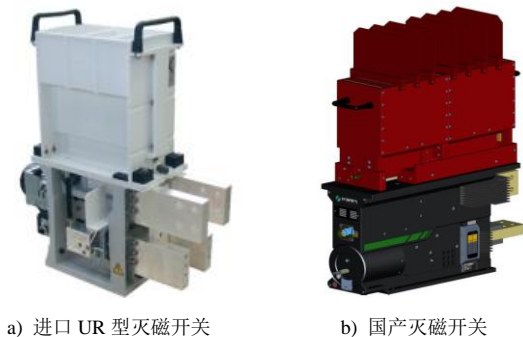


图 7 进口与国产磁场断路器对比

Fig.7 Renderings of imported and domestic magnetic field circuit breakers

研发技术难点主要集中在额定电流和断路器弧压不满足条件。通过采用大弧室、抬高引弧角，改

进燃弧触发位置、改进删片材料工艺及数量实现了弧压值的增强；通过改进触头材料工艺、外部增加主轴散热片、增大主轴导电回路截面材料实现了额定容量的提升。图 8 展示了 5 200 A 耐流下的国产磁场断路器温升测试曲线。由图 8 表明，国产磁场断路器满足大型火电机组转子应用的技术条件。

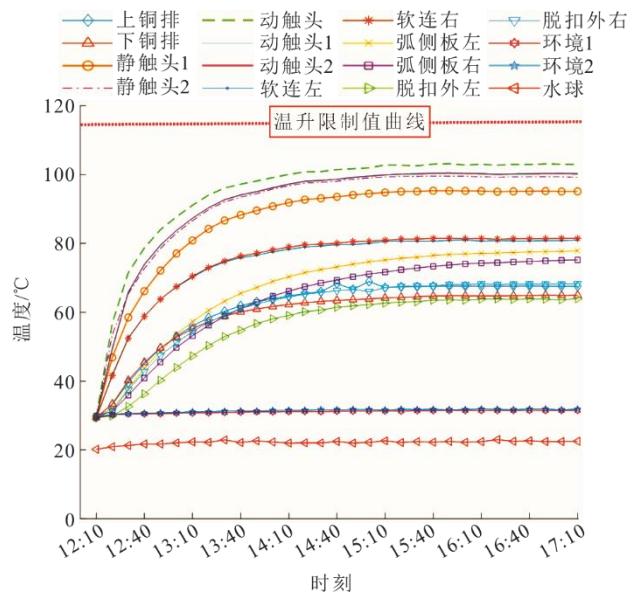


图 8 国产磁场断路器温升测试曲线
Fig.8 Temperature rise test curve of the domestic magnetic field circuit breakers

3 HN-i6200 大型火电励磁工程示范

HN-i6200 系列实现了全套机柜的国产化替代，并在超临界 670 MW 燃煤机组上进行了工程示范。该工程利用最小边界调试技术，安全、高效地利用原有回路并优化新配设施，保证励磁系统稳定可靠运行。

国产化替代实施的关键在于：1) 励磁系统原回路标记与不停电作业处理，来保障新柜敷设及接线作业效率；2) 以“最小边界”的子单元划分，对国产化励磁系统各部分进行静态调试、传动模拟，启动后的联合传动与励磁系统各项试验测试；3) 就地、远方的系统性控制逻辑优化，并网运行特性的记录与监视。

为加强对重点国产化元器件的运行特性监测，配置专用“HN-i6200 励磁系统智慧哨兵”后台监控系统，对整流柜可控硅结温、开关柜视讯和红外成像进行实施监控，完善并采集器件运行特性便于产品的持续升级。

表 3 为发电机空载 5% 阶跃指标对比，图 9 展示了 HN-i6200 励磁系统在 670 MW 火电机组的空

载建压过程,用时 10.5 s,软启特性良好,功率输出稳定。大量实验室测试数据、现场调试结果及在线监控数据均表明 HN-i6200 励磁系统的控制稳定性强、器件可靠性高,系统运行特性优良。

表 3 发电机空载 5% 阶跃指标对比
Tab.3 Calculations of the generator under no-load
5% step test

项目	实测曲线	仿真曲线	偏差	允许偏差
超调量 $M_p/\%$	7.520 0	10.680 0	3.160 0	± 5.0
上升时间 T_{up}/s	0.101 6	0.110 0	0.008 4	± 0.1
峰值时间 T_p/s	0.187 5	0.170 0	-0.017 5	± 0.2
调节时间 T_s/s	0.203 1	0.220 0	0.016 9	± 2.0
振荡次数 $N/\text{次}$	0.5	0.5	0	0.5

WFLC型便携式电量记录分析仪录波曲线



备注: A套就地软起励

图 9 HN-i6200 系列励磁系统零起升压过程
Fig.9 Zero boost process of the HN-i6200 series
excitation system

4 结论与展望

HN-i6200 系列励磁系统的成功应用,表明在励磁现场服务、备品采购等方面相较进口设备,可有效缩减成本。同时,HN-i6200 系列励磁产品各项性能达标,机组运行稳定,实现了大型火电机组励磁系统软、硬件 100% 国产化,解决了核心控制器非国产化的“卡脖子”难题,打破国外技术封锁,可激发民族产业链的进一步创新和升级,促进民族工业和大国制造的持续发展。

本文对国产化中的若干关键问题,包括控制与指令子系统、通信子系统、整流子系统及灭磁子系统等关键技术进行了系统性归纳,总结了目前励磁技术现状与进展,国产化励磁系统还需破除技术壁垒,突破多个系统的关键核心技术研发,未来的研究任重而道远。此外,大型火电机组励磁系统已取得摆脱“卡脖子”的技术突破,下一步还可进行“国产化”+“智能化”的持续升级,来深度保障电力设备信息安全、数字智能产业化迭代升级。

[参考文献]

- [1] 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知(国发(2015)号)[R/OL]. (2015-05-19). <http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content9784.html>.
- [2] 胡波,陈俊,杨柳,等. 全国产分散控制系统开发与应用[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 159-165.
HU Bo, CHEN Jun, YANG Liu, et al. Development and application of fully domestic distributed control system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 159-165.
- [3] 潘晓杰,张文朝,徐友平,等. 考虑水火电多场景协调的电力系统阻尼优化控制模型[J]. 可再生能源, 2020, 38(12): 1654-1661.
PAN Xiaojie, ZHANG Wenchao, XU Youping, et al. Damping optimization control model of power system considering multi-scenario coordination of water, thermal power[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(12): 1654-1661.
- [4] 张建承,张甜甜,熊鸿韬,等. 柔性励磁系统无功阻尼控制器参数整定方法及现场应用[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4435-4445.
ZHANG Jiancheng, ZHANG Tiantian, XIONG Hongtao, et al. Parameter setting method and field application of reactive power damping controller of flexible excitation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4435-4445.
- [5] 付敏,崔灿灿,王璐瑶,等. 分布式调相机励磁系统参数优化模型研究[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(2): 102-110.
FU Min, CUI Cancan, WANG Luyao, et al. Parameters optimization model study of excitation system of distributed synchronous condenser[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(2): 102-110.
- [6] 王道云. 同步发电机励磁控制系统智能优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2019: 1.
WANG Daoyun. Research on intelligent optimization of synchronous generator excitation control system[D]. Jinan: Shandong University, 2019: 1.
- [7] 李福荣. 同步发电机非线性协同励磁控制器设计[J]. 电气传动, 2019, 49(3): 87-91.
LI Furong. Design of nonlinear cooperative excitation controller for synchronous generator[J]. Electric Drive, 2019, 49(3): 87-91.
- [8] MANIKANDAN S, KOKIL P. Stability analysis of network-controlled generator excitation system with interval time-varying delays[J]. Automatika, 2021, 62(1): 65-75.
- [9] 李鹏. 芯片保护核心技术攻关及关键器件国产化[R/OL]. 南方电网数字电网研究院有限公司, (2021-09-08) [2023-01-05]. <https://m.gmw.cn/baijia/2021-09/08/35147848.html>.
LI Peng. Chip protection core technology research and localization of key devices[R/OL]. Guangdong Province, China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute Co., Ltd., (2021-09-08) [2023-01-05]. <https://m.gmw.cn/baijia/2021-09/08/35147848.html>.
- [10] 张晓艺. 分布式励磁系统高速通讯网络的研究与实现[D]. 天津: 河北工业大学, 2019: 1.
ZHANG Xiaoyi. Research and realization of high-speed communication network of distributed excitation

- system[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019: 1.
- [11] 同步发电机励磁系统技术条件: DL/T843—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021: 1.
Synchronous generator excitation system technical conditions: DL/T843—2021[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2021: 1.
- [12] 同步电机励磁系统大、中型同步发电机励磁系统技术要求: GB/T7409.3—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 1.
Excitation system for synchronous electrical machines—Technical requirements of excitation system for large and medium synchronous generators: GB/T7409.3—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007: 1.
- [13] 大中型水轮发电机静止整流励磁系统技术条件: DL/T 583—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018: 1.
Technical conditions for static rectifier excitation system of large and medium-sized hydrogenerator: DL/T 583—2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 1.
- [14] 大中型水轮发电机自并励励磁系统及装置运行和检修规程: DL/T 491—2008[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 1.
Code for operating and overhauling of self-shung excitation system equipment of large and medium-sized hydraulic generator: DL/T 491—2008[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 1.
- [15] 薛林锋, 崔超, 马少杰, 等. CCGP 发电机励磁系统国产化改造[J]. 冶金动力, 2020(10): 1-2.
XUE Linfeng, CUI Chao, MA Shaojie, et al. Domestic reform of excitation system of CCGP generator[J]. Metallurgical Power, 2020(10): 1-2.
- [16] 李建文. 三菱燃气轮机组 M701F4 国产化励磁系统的特点[J]. 电气技术, 2015(9): 114-117.
LI Jianwen. Characteristics of domestic excitation system of mitsubishi gas turbine M701F4[J]. Electrical Technology, 2015(9): 114-117.
- [17] 单华鹏, 顾建嵘. GE 9E 燃机无刷励磁系统的国产化改造[J]. 华电技术, 2019, 41(2): 6-9.
SHAN Huapeng, GU Jianrong. Domestic transformation of brushless excitation system for GE 9E gas turbine[J]. Huadian Technology, 2019, 41(2): 6-9.
- [18] 王本红, 张元栋, 李青茂, 等. 三峡左岸水轮机组调速及励磁系统国产化改造[J]. 水电站机电技术, 2022, 45(7): 85-88.
WANG Benhong, ZHANG Yuandong, LI Qingmao, et al. Domestic reform of speed regulation and excitation system of hydro-turbine on the left bank of three gorges[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2022, 45(7): 85-88.
- [19] 发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件 第 1 部分 磁场断路器: DL/T 294.1—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 1.
Generator demagnetization and rotor overvoltage protection devices-Technical conditions: part 1 magnetic field circuit breakers: DL/T 294.1—2011[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 1.
- [20] 发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件 第 3 部分 转子过电压保护: DL/T 294.3—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 1.
Technical conditions for generator demagnetization and rotor overvoltage protection devices: part 3 rotor overvoltage protection: DL/T 294.3—2019[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 1.
- [21] 发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件 第 4 部分 灭磁容量计算: DL/T 294.4—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 1.
Technical conditions for generator demagnetization and rotor overvoltage protection devices: part 4 Calculation of demagnetization capacity: DL/T 294.4 — 2019[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 1.
- [22] 王金铭. 宁海电厂 630 MW 机组 GE 灭磁开关改造分析[J]. 光源与照明, 2022(6): 106-108.
JIN Jinming. Modification analysis of GE magnetizing switch for 630 MW units in Ninghai Power Plant[J]. Light Sources and Lighting, 2022(6): 106-108.
- [23] 关安超. 浅论自动灭磁开关及灭磁技术[J]. 安装, 2010(10): 45-47.
GUAN Anchao. A brief discussion on automatic magnetic switch and magnetic technology[J]. Installation, 2010(10): 45-47.
- [24] 陈小明, 胡先洪, 邵显钧, 等. 国内外大型灭磁开关结构评价[J]. 大电机技术, 2004(4): 69-71.
CHEN Xiaoming, HU Xianhong, SHAO Xianjun, et al. Structure evaluation of large magnetization switch at home and abroad[J]. Large Electric Machine Technology, 2004(4): 69-71.
- [25] 巨民尚. 三峡右岸电站励磁系统调试[J]. 水电站机电技术, 2013, 36(5): 18-20.
JU Minshang. Commissioning of excitation system of three gorges right bank power station[J]. Mechanical and Electrical Technology of Hydroelectric Station, 2013, 36(5): 18-20.
- [26] 夏向龙, 方军民, 杨柳燕. 勒诺 CEX 系列灭磁开关在抽蓄电站的应用及维护[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 抽水蓄能电站工程建设文集 2021. 北京: 中国水利水电出版社, 2021: 4.
XIA Xianglong, FANG Junmin, YANG Liuyan. Application and maintenance of lenor CEX series magnetic switch in pumped storage power station[C]//China Society of Hydropower Engineering Network Peak Regulation and Pumped storage Professional Committee. Collected Works of Pumped Storage Power Station Construction 2021. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2021: 4.
- [27] SCHNEIDER A V, POPOV S A, DUBROVSKAYA E L. Influence of a pulsed axial magnetic field on a high-current arc of a vacuum circuit breaker[J]. Russian Physics Journal, 2021, 64: 348-354.
- [28] ZHENG S C, KANGZ J, QINK N, et al. Investigation of discharge process for argonspark switch at atmospheric pressure[J]. Vacuum, 2020, 178(8): 1-7.

(责任编辑 杜亚勤)