

一种自主可控励磁控制模块硬件实现方案

肖权,周筱珊,王瑞清,刘钰琦,赵先元

(能事达电气股份有限公司,湖北 武汉 430070)

摘要:同步发电机励磁控制模块是电力生产与安全运行的关键设备,其关键物料自主率低。结合同步发电机励磁控制模块控制性能,从芯片自主可控研究出发,遵循发电机励磁控制模块可靠性、灵活性和快速响应的基本要求,从硬件上介绍自主可控励磁控制模块设计原理与实现方式。自主可控励磁控制模块已经在水力发电厂投入商业运行,运行效果良好。

关键词:自主可控;同步发电机;励磁;控制模块

中图分类号:TM517 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24339

A Scheme of Autonomous Controllable Excitation Control Module Based on Hardware

XIAO Quan, ZHOU Xiaoshan, WANG Ruiqing, LIU Yuqi, ZHAO Xianyuan

(Nengshida Electric Co., Ltd., Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: The excitation control module of synchronous generator is the key equipment for power production and safe operation, and the localization rate of its key materials is low. Based on the control performance of the synchronous generator excitation control module, starting from the research of chip independent controllability, following the basic requirements of reliability, flexibility, and fast response of the generator excitation control module, a design principle and implementation method of the independent controllable excitation control module from a hardware perspective was introduced. The autonomous controllable excitation control module has been put into commercial operation in hydroelectric power plants, and the operation effect is good.

Key words: autonomous control; synchronous generator; excitation; control module

同步发电机励磁装置是电厂二次控制系统中核心设备。国内发电厂励磁控制设备所用物料基本全为进口物料;物料价格高、有技术壁垒,在复杂国际形势下,国际芯片公司随时可能因为各种原因对中国市场限制或停止正常供货;同时进口器件在软件底层驱动及软件安全上也面临严重的安全挑战^[1-2]。在复杂多变的国际形势下,实现同步发电机励磁控制设备的完全自主可控对保障电力供应的安全及促进国民经济健康发展有重要意义^[3]。

由于国家电子元器件物料生产基础工业能力弱,配套产业链不完善,导致国产电子元器件物料在功能、质量、稳定性方面存在品质控制问题^[4]。近年来,随着政策支持及在利益驱动下,国内芯片产业取得了飞速的发展,逐步出现了满足同步发电机励磁模块使用的高性能电子物料,给自主可控励磁控制模块提供了很好条件^[1,4]。

一种自主可控励磁控制模块设计了励磁系

统控制逻辑控制单元、开关量输入输出模块、发电机机端模拟量信号采集模块、通信模块等。

文章分别从硬件与软件介绍了自主可控励磁控制模块实现方式,并在水力发电厂进入商业化运行,验证自主可控励磁控制模块可行性。

1 自主可控励磁控制模块设计

自主可控励磁控制模块在原有同步发电机励磁系统稳定运行架构的基础上,遵行硬件与软件2个层面分层解耦,从硬件上完成芯片国产化替换与性能升级,软件按照划分功能单元逐步升级,实现完全自主可控。自主可控励磁控制模块设计原则如下^[5-8]:

1) 在同步发电机励磁控制系统成熟稳定基础上替换与升级,沿用嵌入式、分布式控制的整体架构。

2) 硬件平台兼容同步发电机励磁系统需求,考虑模拟信号的高速采样、测发频信号实时可控

等功能选择的MCU芯片定时器稳定可靠。

3)在硬件设计时,硬件功能设计逐步解耦、模块化;选择芯片在满足性能的同时,也要考虑使用国产不同品牌同功能芯片做兼容设计。

4)在软件设计时,配合硬件设计方案,底层驱动与应用软件解耦设计。

5)冗余设计。硬件与软件密切配合,保证励磁控制模块可靠性的同时必须满足模块的冗余性能。

自主可控励磁控制模块包括供电电源单元、内核单元、模拟信号单元、通信单元和开关量单元,其硬件架构如图1所示。

供电电源单元负责将励磁系统中的24 V电源经过隔离、变换后给励磁控制模块内核单元与外设供电;内核单元由微控制单元(micro controller unit, MCU)、现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)、非易失性数据存储单元 FLASH 及 MCU 拓展静态随机存取存储器 (static random-access memory, SRAM) 组成,内核单元负责执行励磁控制系统逻辑运算与数据存储;模拟信号单元由输入与输出构成,模拟量输入单元可以满足8路模拟信号高速同步采样,模拟量输出4路电压信号;通信单元由标准RS232串口、RS485串口,控制器局域网络(controller area network, CAN)总线及100 M以太网构成。内核单元与其他单元通过高速数字隔离器实现信号全隔离。

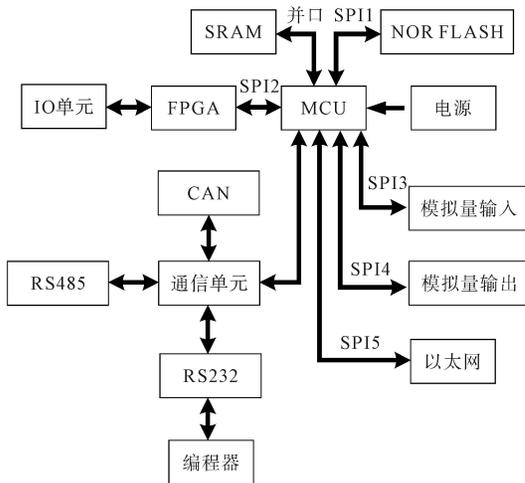


图1 自主可控励磁控制模块硬件架构

Fig.1 Block diagram of autonomous controllable excitation control module

2 励磁控制模块硬件方案

2.1 供电电源单元实现方案

24 V 输入电源经共模电感 LN114-1.5/2、电

容、电源去耦给励磁控制模块供电;内核单元及其外围扩展电源电压为5 V与3.3 V,通过VRB2405ZP-6WR2模块变换输出5 V,5 V电源经LDO变换输出3.3 V;模拟量输入采集单元及其拓展电路供电电源5 V电源经过VRB2405ZP-6WR2模块变换实现;模拟量输出供电电源为±15 V,电源型号为A2415D-2WR2;RS232与CAN总线芯片供电电源型号为B2405XT-1WR2。

2.2 内核单元及其外围电路实现方案

内核单元由MCU, FPGA, NOR FLASH及SRAM构成。MCU为GD32F45XX系列, FPGA为高云GW1N系列, SRAM为EMI516NF16TM。MCU与SRAM以并行总线实现数据传输; MCU与FPGA, NOR FLASH均采用以SPI总线方式实现数据传输。IO单元(包括高速开关量输入输出)由FPGA的GPIO(general purpose input/output)引脚直接控制。

MCU的实时时钟(real time clock, RTC)晶振为32.768 kHz,系统时钟晶振为25 MHz, BOOT0引脚通过电阻R4接电源地, MCU复位引脚通过2K电阻上拉,同时复位引脚对电源地并联10 μF电容, MCU以拨码开关方式识别站点号^[9-10]。

FPGA与MCU的SPI4总线连接实现数据传输, FPGA晶振为有源50 MHz, MCU的SPI总线监视FPGA的工作状态,并通过PF10引脚控制FPGA的硬件复位引脚RECONFIG实现MCU对FPGA控制^[11]。

NOR FLASH为GD25Q64与MCU的SPI总线连接实现数据传输,该芯片的片选1,3与7引脚通过10K电阻上拉3.3 V电源,实现MCU对NOR FLASH芯片控制。拓展缓存SRAM与MCU以并行总线方式实现数据传输, SRAM访问时间为10 ns,提高了MCU实时运算速度。

2.3 模拟信号单元电路实现方案

模拟信号输入单元硬件架构如图2所示。模拟信号输入采集芯片为CL1606,该芯片同时满足8路模拟数字转换芯片(analog-to-digital converter, ADC)同步采样, ADC与MCU以标准SPI总线方式实现数据传输。数字模拟转换芯片(digital-to-analog converter, DAC)为TPC116S4, DAC输出4路,精度16位,输出信号0~5 V经过调理输出0~10 V信号, DAC与MCU以标准SPI总线方式实现数据传输。

模拟信号输入采集芯片CL1606与MCU以标准SPI总线方式实现数据传输,基准用CL1606自

带的2.5 V,隔离器型号为CA-IS374XX系列,信号传输速率150 Mbps,原副边电压隔离可达到5 kV,CL1606的OS0,OS1,OS2引脚接地实现快速过采样,量程引脚RANGE接高电平采集-10~10 V交流信号^[12]。

模拟信号输出单元硬件架构如图3所示。模拟量输出DAC芯片TPC116S4与MCU以标准SPI

总线方式实现数据传输,外接MC1403的2.5 V基准;由于DAC芯片输出0~5 V直流信号,在DAC输出模拟量信号经过TL074G放大与跟随后对外输出0~10 V直流信号;DAC供电电源±15 V经AMS1117-5.0转换成5 V电源给DAC及隔离器供电;TPC116S4的LOAD引脚接入2K电阻到地,DAC输出信号放大2倍,经过运放跟随后对外输出^[13]。

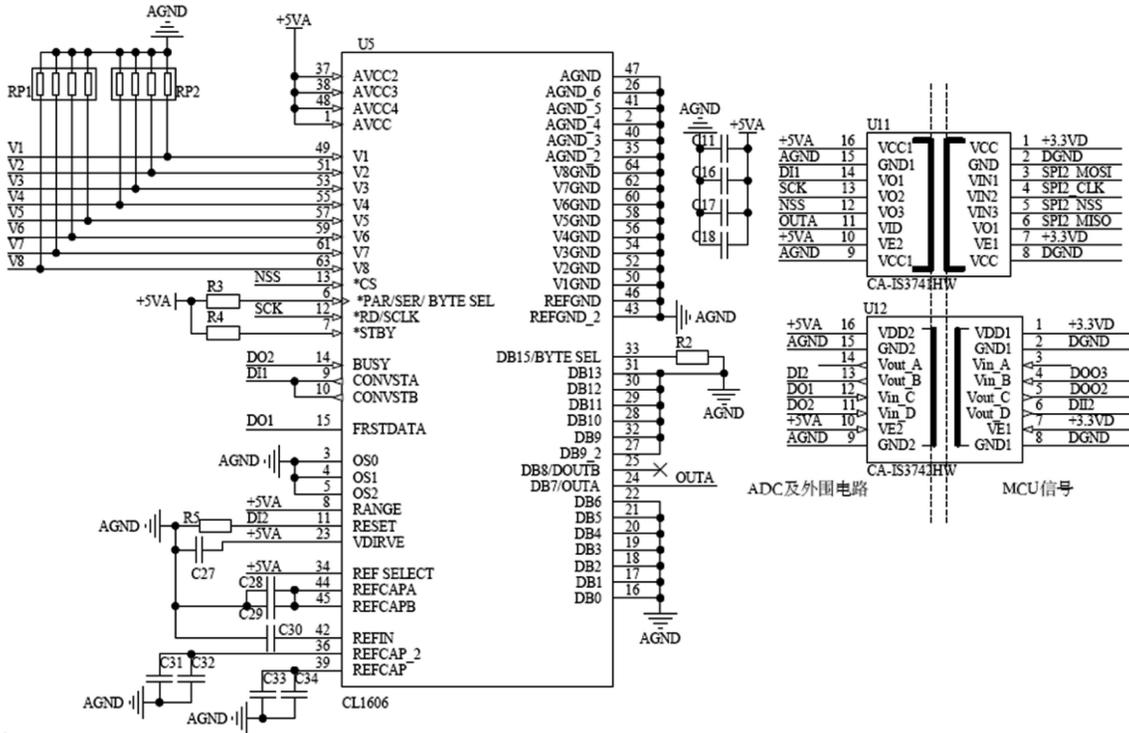


图2 模拟信号输入单元硬件架构

Fig.2 Block diagram of analog signal input unit

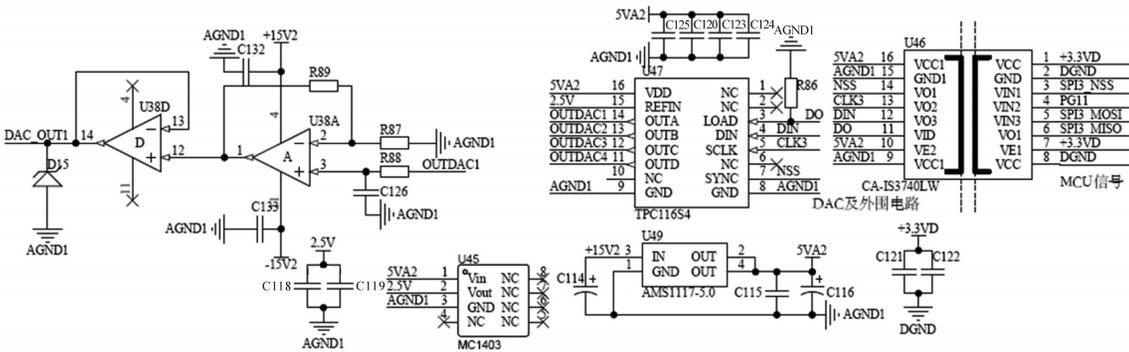


图3 模拟信号输出单元硬件架构

Fig.3 Block diagram of analog signal output unit

2.4 通信单元电路实现方案

标准RS232芯片为SIT232ESE,RS485芯片为CA-IS3092W,CAN总线芯片为CA-IS3052G.MCU的GPIO引脚与CAN芯片引脚信号经过调理、数字信号隔离后对外输出。串口通信硬件架构如图4所示。

2路RS232串口信号分别与MCU的GPIO引

脚PA9,PA10和PB10,PB11引脚连接,MCU的GPIO引脚经过CA-IS374X隔离、信号调理后传输给SIT232ESE芯片^[14]。

1路RS485串口信号与MCU的GPIO引脚PB6,PB7及使能PA8连接;MCU的GPIO引脚经485隔离转换芯片CA-IS3092W调理后,经共模电感滤波与浪涌吸收后,调理成标准RS485电路^[15]。

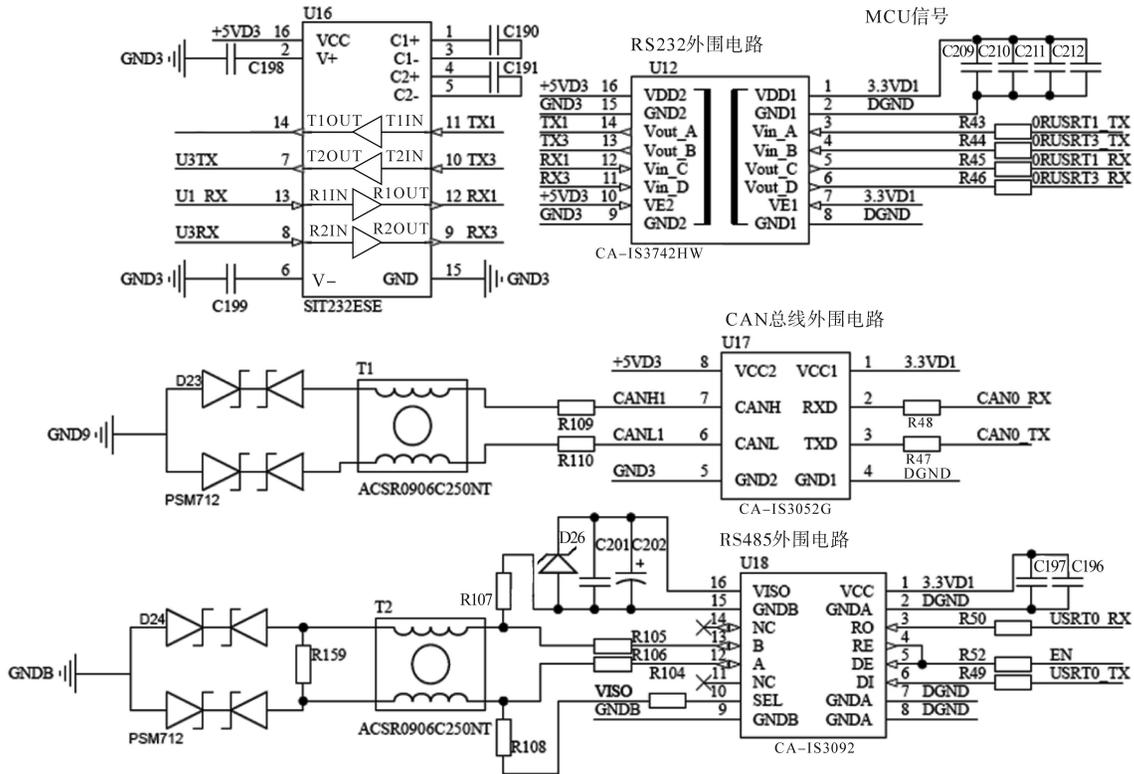


图4 串口通信硬件架构

Fig.4 Serial communication circuit

1路CAN总线信号与MCU的GPIO引脚PB8, PB9连接;PB8, PB9信号经过CAN总线隔离芯片CA-IS3052G调理、共模电感滤波与浪涌吸收后,调理成标准CAN总线电路^[15]。

以太网电路实现方案如图5所示,以太网芯片为CH395Q,芯片供电电源电压为+3.3V和1.8V。5V电源经过LDO变换成3.3V与1.8V给CH395Q供电,时钟晶振30MHz。CH395Q引脚与MCU的GPIO引脚以串行总线方式实现传输数据, TXD引脚通过0Ω电阻接电源地;RSETE引脚通过18K电阻接地;SEL引脚悬空,设置成串行通信方式^[16]。

在励磁控制模块中,标准以太网网口用于人机界面通信,励磁控制模块将各通道之间运行时关键数据波形文件及事件记录向人机界面传输。

2.5 开关量单元电路实现方案

开关量单元电路实现方案如图6所示,开关量信号由FPGA的GPIO引脚直接控制。MCU以串行总线方式操作FPGA的GPIO引脚状态,GPIO引脚开出信号经过数字隔离器CA-IS3740HW变换成24V TTL电平信号对外输出。开关量输入信号经过光电隔离、调理,传输到FPGA的GPIO引脚实现开关量输入计数。

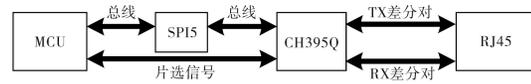


图5 以太网电路实现方案

Fig.5 Ethernet circuit implementation scheme

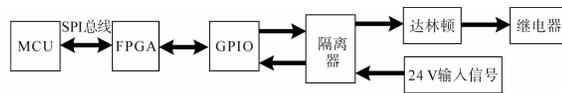


图6 开关量单元电路实现方案

Fig.6 Implementation scheme of switching value unit circuit

3 励磁控制模块软件实现方案

励磁控制模块可以配置成单个或多个系统冗余结构,不同模块间通过拨码开关设置不同的站点号,通过CAN总线通信实现。

3.1 频率测量与脉冲生成软件实现方案

GD32F45XX系列有4个可设置定时器通道。作为开关量输入通道时,可以捕捉MCU的GPIO引脚电平信号变化,实现中断计数,并将中断计数值存入对应的寄存器中;作为开关量输出通道时,相应通道在计数器达到事先设置的计数值时触发比较中断。

TIM2的定时器中前4个定义输入捕捉,MCU的GPIO引脚PA0, PA1, PA2分别测量发电机机

端三相电压信号频率与相序,PA3测量B码定时输入信号。在GD32F45XX系列中,32位定时器有TIM2与TIM5。TIM2用于测频测相序的同时生成第1对脉冲序列的上升沿,TIM5用于生成脉冲序列其他边沿。TIM2与TIM5合成双窄脉冲方式如图7所示,控制器测量同步信号后触发定时器,经过脉冲延时后产生第1路固定宽度脉冲,第2路脉冲经过延时后产生第1路固定宽度脉冲的同时给第2路脉冲生成第1个脉冲,第3~6路脉冲生成方式依次类推^[7-8]。

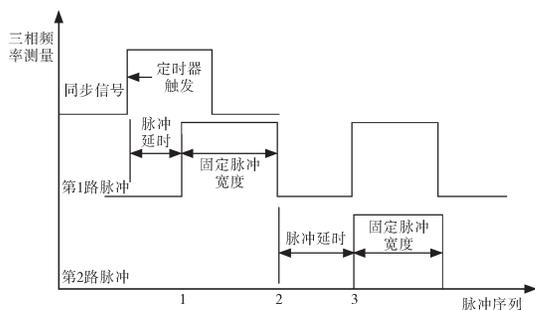


图7 脉冲生成实现方案

Fig.7 Pulse generation scheme

3.2 模拟量信号采样软件实施方案

励磁控制模块8路输入通道测量0~10V交流信号,在励磁控制模块中采集信号为对称交流信号,因此采样数值在一个采样周期内均匀分布。根据同步发电机国家标准,结合硬件及控制逻辑响应时间等系统特性,同步发电机模拟信号一个周期内采集24点^[17-18],24点经过傅立叶离散变换计算电压信号与电流信号的实部和虚部数值,数值先平方求和,再计算均方值,得到模拟信号采样有效值,从而实现同步发电机模拟信号采样。

3.3 开关量输入输出软件实施方案

励磁控制模块在自动或手动运行状态时,FPGA的GPIO引脚收到远方监控控制平台或同步发电机先手动控制输入信号,然后以串行总线方式传输给MCU的GPIO引脚;MCU收到输入信号或MCU执行励磁控制逻辑运算时判定发电机工作状态,并以总线方式操控FPGA的GPIO引脚对外发出监控信号。

4 试验验证及结论

本次试验励磁控制模块由两套控制通道组成,两个控制通道采用100%冗余结构,在软件、硬件及结构上完全独立,而且在每个自动通道中设有手动控制单元。两个控制通道具有完全独立的电源回路、测量单元、逻辑控制。通道间采

用热备用的运行方式,同时接受输入控制与调节信号并执行操作与调节。

该励磁控制模块已在河北某水电站投入运行,机组容量4Mvar,额定电压6.3kV,额定定子电流458.2A,空载励磁电流200A,额定励磁电流365A,励磁电压113V,额定功率因数0.8(滞后)。

4.1 机组零启升压试验

试验中均使用标么值,励磁模块收到开机令后投初励,机端电压跟踪给定值调整控制角,机端电压从零到额定值、控制角及励磁电流变化曲线如图8所示。给定值为监控系统下发的机组额定电压、电流及功率参数,纵坐标负时间值为机组在未收到监控信号时运行状态,正时间值为机组收到监控信号状态。机组零启升压过程中没有出大的波动,机组零启升压性能满足国家标准。

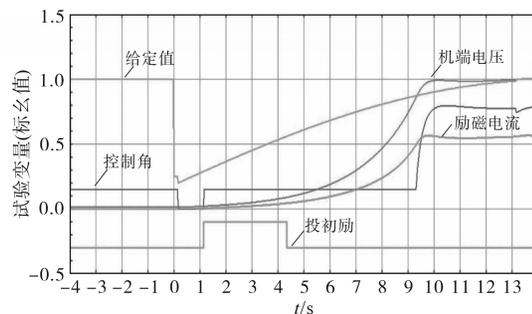


图8 机组零启升压试验

Fig.8 Building voltage from zero to rated voltage in the generator

4.2 机组100%甩负荷试验

励磁模块收到机组100%甩负荷指令后,配合机组调速器,在机组100%甩负荷过程中,机端电压值波动不大,控制角在机组频率上升时先减小,为维持机端电压稳定,控制角变化跟随给定值变化,励磁电流变化与控制角度一致,如图9所示。纵坐标负时间值为机组在未收到监控信号时运行状态,正时间值为机组收到监控信号状态。机组100%甩负荷性能满足国家标准。

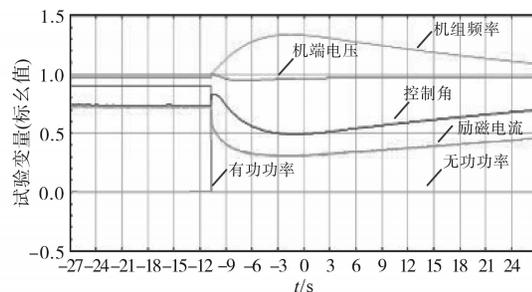


图9 机组100%甩负荷试验

Fig.9 100% load rejection in the generator

本文设计自主可控励磁控制模块,分别从硬与软件介绍了自主可控励磁控制模块实施方案。

励磁系统商业化运行表明自主可控励磁控制模块完全满足励磁模块系统控制功能,为发电机组励磁控制设备国产化建立良好基础。

参考文献

- [1] 倪光南,朱新忠.自主可控关键软硬件在我国宇航领域的应用与发展建议[J].上海航天(中英文),2021,38(3):30-34.
NI Guangnan, ZHU Xinzong. Application and development proposal of autonomous and controllable key electronic components and basic software in aerospace field of China[J]. Aerospace Shanghai(Chinese & English), 2021, 38(3):30-34.
- [2] 李友军,周华良,徐广辉,等.基于龙芯处理器的继电保护装置平台及关键技术[J].电力自动化设备,2022,42(3):218-224.
LI Youjun, ZHOU Hualiang, XU Guanghui, et al. Relay protection device platform and key technologies based on Loongson chip processor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3):218-224.
- [3] 沈天骄,仲浩,王永平,等.自主可控特高压直流控制保护系统设计及研发[J].电气技术,2022,23(3):50-56.
SHEN Tianjiao, ZHONG Hao, WANG Yongping, et al. Design and development of autonomous and controllable UHVDC control and protection system[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(3):50-56.
- [4] 周游,付玉娟,赵鹏,等.自主可控背景下元器件的包装国产化判据探讨[J].电子元器件与可靠性试验,2021,39(5):50-56.
ZHOU You, FU Yujuan, ZHAO Peng, et al. Discussion on the criteria for the packaging localization of component under the background of autonomous control[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2021, 39(5):50-56.
- [5] 陆继明,毛承雄.同步发电机微机励磁控制[M].北京:中国电力出版社,2006.
LU Jiming, MAO Chengxiong. Microcomputer excitation controller for synchronous generator[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [6] 余翔,王波,毛承雄,等.一种基于PCC的励磁控制器实现方案[J].大电机技术,2006(5):58-61.
YU Xiang, WANG Bo, MAO Chengxiong, et al. A scheme of excitation controller based on PCC[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2006(5):58-61.
- [7] 王波,张敬,胡先洪,等.三峡地下电站国产化励磁系统[J].大电机技术,2011(6):63-66.
WANG Bo, ZHANG Jing, HU Xianhong, et al. National produced excitation control system being applied to underground powerhouse in three gorges hydraulic power plant[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2011(6):63-66.
- [8] 余翔,张敬,王波,等.一种基于F2812的流程控制器[J].大电机技术,2007(3):56-59.
YU Xiang, ZHANG Jing, WANG Bo, et al. A scheme of excitation controller based on F2812[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2007(3):56-59.
- [9] GD公司.基于GD32F450的图标式多功能应用系统设计[R].北京:GD公司,2017.
GigaDevice Semiconductor Inc. Design of icon based multifunctional application system based on GD32F450[R]. Beijing: GigaDevice Semiconductor Inc., 2017.
- [10] GD公司.基于GD32F450的机智云功能板应用[R].北京:GD公司,2017.
GigaDevice Semiconductor Inc. Application of smart cloud function board based on GD32F450[R]. Beijing: GigaDevice Semiconductor Inc., 2017.
- [11] 广东高云半导体科技股份有限公司.GW1N系列产品数据手册[R].广东:高云半导体科技股份有限公司,2022.
Gowin Semiconductor Corporation. GW1N series DATA SHEET [R]. Guangdong: Gowin Semiconductor Corporation, 2022.
- [12] 核心互联公司.CL1606 DATA SHEET[R].青岛:核心互联公司,2021.
Corelink Technology Co., Ltd.. CL1606 DATA SHEET[R]. Qingdao: Corelink Technology Co., Ltd., 2021.
- [13] 思瑞浦公司.TPC116S4 DATA SHEET[R].苏州:思瑞浦公司,2021.
3PEAK INCORPORATED. TPC116S4 DATA SHEET[R]. Suzhou: 3PEAK INCORPORATED, 2021.
- [14] 川土微公司.CA-IS3092W DATA SHEET[R].杭州:川土微公司,2020.
Chuantu Microelectronics Co., Ltd.. CA-IS3092W DATA SHEET [R]. Hangzhou: Chuantu Microelectronics Co., Ltd., 2020.
- [15] 川土微公司.CA-IS3052G DATA SHEET[R].杭州:川土微公司,2020.
Chuantu Microelectronics Co., Ltd.. CA-IS3052G DATA SHEET. [R]. Hangzhou: Chuantu Microelectronics Co., Ltd., 2020.
- [16] 南京沁恒公司.CH395Q DATA SHEET[R].南京:南京沁恒公司,2020.
Nanjing Qinheng Microelectronics Co., Ltd.. CH395Q DATA SHEET[R]. Nanjing: Nanjing Qinheng Microelectronics Co., Ltd., 2020.
- [17] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.DLT/583—2018大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置技术条件[S].北京:中国电力出版社,2018.
National Development and Reform Commission. DLT/583—2018 da zhong xing shui lun fa dian ji jing zhi zheng liu li ci xi tong ji zhuang zhi ji shu tiao jian[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [18] 李翀,陶鹏,申洪涛,等.基于暂态阻尼特性的虚拟同步发电机控制策略研究基于暂态阻尼特性的虚拟同步发电机控制策略研究[J].电气传动,2021,51(22):48-55.
LI Chong, TAO Peng, SHEN Hongtao, et al. Research on control strategy of virtual synchronous generator based on transient damping characteristics[J]. Electric Drive, 2021, 51(22):48-55.

收稿日期:2022-04-28

修改稿日期:2022-06-07