

基于虚拟 Modbus RTU 技术的双以太网双主站冗余
发电机励磁控制器设计

周宏林, 刘静波, 凌 乐

(东方电气股份有限公司中央研究院, 四川 成都 611731)

摘要: 具有高可靠性要求的同步发电机励磁控制器一般工作于双以太网双主站冗余环境下。虽然国外高端控制器易于应对复杂网络通信环境,但随着近年市场竞争加剧以及自主可控要求的提出,励磁控制器需要探索新的降本增效路线。然而基于单片机或 DSP 的中低端励磁控制器由于硬件资源限制,难以同时兼顾控制性能和复杂网络接入两方面的要求。为解决此矛盾,本文提出一种基于虚拟 Modbus RTU 技术的双以太网双主站冗余发电机励磁控制器设计方法。该方法让承担励磁控制任务的核心芯片只需要做简单的“虚拟 Modbus RTU”通信即可完成复杂的以太网接入。从而实现励磁控制与复杂网络通信任务间的解耦,有效降低励磁控制 DSP 核的通信负担,提升控制性能,同时还会给励磁控制器软件开发者带来极大的便利。本文首先介绍了励磁控制器的复杂网络工作环境和要求,然后提出了一种新的基于虚拟 Modbus RTU 技术的设计方案,接着给出了该设计的软硬件实现框架,最后通过 RTDS 半实物仿真实验全面验证了设计的可行性和性能。

关键词: 同步发电机; 励磁控制器; 工业以太网; 冗余; Modbus

DOI: 10. 12067/ATEEE1903027 **文章编号:** 1003-3076(2020)02-0057-07 **中图分类号:** TM341;TM571

1 引言

励磁系统是发电厂中重要的二次控制系统,承担着维持同步发电机机端电压稳定、协调并列机组间的无功分配以及抑制有功功率振荡的任务^[1]。发电机励磁控制系统对可靠性要求非常高。这些工业控制器一般通过以太网和其他执行机构连接在一起。为了保证整个控制系统有较高的可靠性,同时保证成本适中,一般采用双以太网双主站(简称双网双主)冗余的解决方案。

Modbus TCP 是一种在工业控制领域广泛应用的以太网通信协议,数十万计的设备使用了该通信协议。在上述双以太网双主冗余的通信解决方案中,也可以使用 Modbus TCP,并且使整个控制系统具有良好的兼容性和扩展性。对于工业控制领域中的高端控制器,通常都带有操作系统和网络通信功能,直接接入 Modbus TCP 网络并不困难,如 ABB 的 PEC80、GE EX2100MB 励磁控制器等。然而,随着

制造业竞争的加剧,降低工业控制器成本的要求也越来越明显。目前性价比较高的工业控制器均为中低端的嵌入式控制器,如基于单片机或者数字信号处理器(DSP)的控制器等等。这类中低端控制器的主要特征是擅长实时控制、价格低廉、软件简单、不带操作系统、不带网络接口。虽然这类中低端嵌入式控制器接入如 RS232,RS485,CAN 等现场总线网络并不困难,但由于硬件资源有限,要实现以太网的接入十分困难。如果还希望这类中低端嵌入式控制器作为主站接入双以太网,同时构成双主站冗余的高可靠性控制系统,就异常困难。目前国内大部分研究基于 DSP 的励磁控制器的文献都是基于现场总线技术的^[2-6]。

传统的解决中低端嵌入式控制器接入以太网的方式包括以下 3 种。

(1)通过在板上中低端 CPU 上直接编程,采用一些轻量级的 TCP/IP 协议栈如 LWIP^[7,8]。该方案的优点是无需增加硬件成本,但缺点是轻量级的

TCP/IP 协议栈是简化的协议栈,一方面其功能较弱甚至不具备并发多连接的能力,难以满足双网双主冗余的复杂应用,另一方面简化的协议栈多为开源版本,不能保证可靠性。

(2)控制器结合外部现场总线转 Modbus TCP 以太网的网关^[9]。该方案的优点是中低端嵌入式控制器无需进行软件升级即可接入以太网。但缺点一方面是集成度低,要求控制系统中增设额外的设备,降低可靠性;另一方面是控制器与外部现场总线通信速率受限制,难以满足高速大容量的双网双主通信应用。

(3)采用板载的串行总线如 SPI/UART 转 Modbus TCP 以太网的网关模块^[10]。该方案的优点是集成度高,中低端嵌入式控制器软件改动小。但缺点是现有报道产品功能过于简单,没有针对双网双主冗余系统进行特殊设计。现有文献中只针对了单网络来实现 Modbus RTU 到 Modbus TCP 的数据包的透明收发,且其网络通信的服务器/客户端角色固定,双主机同时在线时存在竞争问题,无法满足对双网双主系统的应用要求。

为解决这一问题,本文提出一种基于虚拟 Modbus RTU 技术的发电机励磁控制器设计,通过构造一种全新的软硬件框架,实现励磁控制与复杂网络通信任务间的解耦,有效降低励磁控制 DSP 核的通信负荷,提升控制性能。

2 励磁控制系统典型网络构架

励磁控制系统网络通信系统采用双网双主冗余拓扑的典型架构如图 1 所示。控制系统中包含 2 台相同的励磁控制器主站 A 和主站 B,二者互为热备用,实现控制器冗余。每台控制器还同时连接到两个独立的以太网上,同时收发数据,实现网络冗余。控制系统中还包含若干整流柜控制器、灭磁柜控制器、人机界面等从站设备,每个从站设备也是同时接入两个独立的以太网中。每个主站不仅要跟从站交互数据,获取信息和发出命令,同时还要和另外一个主站交互数据,以实现控制数据的备份和同步。同时还要处理来自两个独立以太网的数据和异常情况。可以看出,励磁控制器作为主站,其网络通信任务非常复杂。

3 网络通信关系定义

为确保两个励磁控制器主站在上述复杂网络中

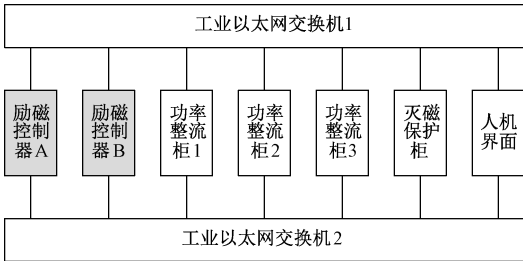


图 1 双网双主控制系统的典型拓扑结构

Fig.1 Typical topology of dual-ethernet dual-master control system

能稳定运行,必须对励磁控制器间以及励磁控制器和其他分柜控制器的通信关系进行详细而清晰的设计。由于系统中包括了两个独立网络,因此首先需要定义在一个网络上的通信关系,然后再扩展到两个网络上。通常这两个独立网络被分配为两个独立的网段。

考虑网段 1 上的通信,双网双主控制系统中的 Modbus TCP 数据连接关系如图 2 所示。首先定义励磁控制器间的通信关系。励磁控制器 A 与励磁控制器 B(以下简称通道 A 与通道 B)之间通信时,通道 A 作为客户端,B 作为服务器;同时,通道 A 也作为服务器,B 作为客户端。在正常工况下,A 主动发起与 B 的通信,二者可双向交换数据(例如备份一些控制数据);同时,B 也主动发起与 A 的通信,二者可双向交换数据。图 2 中虚线表示出于安全考虑,客户端对服务器是只读的。

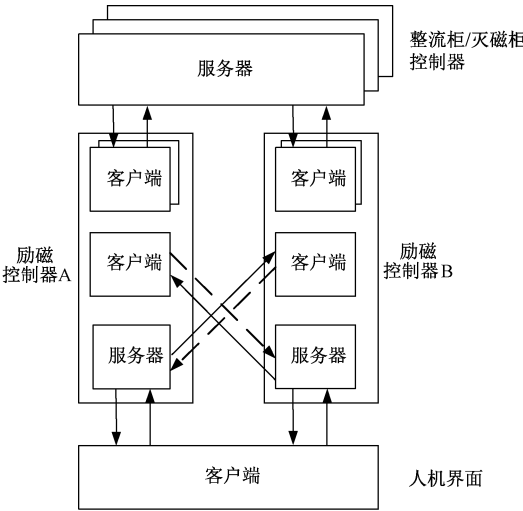


图 2 双网双主控制系统中的 Modbus TCP 数据连接关系

Fig.2 Communication relationship of dual-master network

当通道 A 或通道 B 故障时,A、B 之间无通信需求。当通道 A 或 B 恢复运行时,通道 A(客户端)继续主动发起与通道 B(服务器)的通信;同时,通道 B(客户端)也主动发起与通道 A(服务器)的通信。这一方面使得两个通道的通信程序对称,另一方面也使得两个通道可以采用只读的方式来备份对方的数据,更加可靠。

然后定义励磁控制器与其余分柜控制器的通信关系。通道 A、B 分别与功率柜和灭磁柜控制器通信时,均作为客户端,功率柜和灭磁柜作为服务器。通道 A、B 分别主动请求功率柜和灭磁柜的运行状态信息。A、B 通道得到功率柜和灭磁柜的状态信息是独立的,互不依赖,保证了系统的冗余性。

人机界面与通道 A、B 通信时,均作为客户端,通道 A、B 能够满足人机界面下发操作指令、监控系统状态的需求。

对网段 2 上的通信关系,情况与网段 1 完全相同,但完全独立于网段 1,不再赘述。

4 虚拟 Modbus RTU 通信框架设计

励磁控制器中负责控制任务的单片机或 DSP 要直接实现上述复杂的通信关系非常困难。一方面原因是硬件资源有限而难以直接接入以太网,另一方面则是励磁控制软件不宜深入参与高负荷的网络交互任务中。为解决这一矛盾,本文提出基于虚拟 Modbus RTU 的通信框架。其核心目标是让承担励磁控制任务的核心芯片只需要做简单的“虚拟 Modbus RTU”通信即可完成上述复杂的以太网接入。

基于虚拟 Modbus RTU 的通信框架的通信多层模型如图 3 所示。在硬件上,采用 DSP+ARM 的双核架构,二者通过板上高速数据总线进行通信。软件上,DSP 位于应用层,励磁控制软件在 DSP 中实现,ARM 则位于 TCP 层、IP 层和链路层,以太网通信则通过 ARM 实现。

在该设计下,复杂的 Modbus TCP 网络通信由带有标准 TCP/IP 通信协议栈的 ARM 核完成,而 DSP 则只需完成简单的“虚拟 Modbus RTU”通信即可。具体而言,本地端 DSP 通过 Modbus RTU 协议向 ARM 发起通信请求,然后 ARM 基于 Modbus TCP 协议与远端的 ARM 建立可靠以太网连接,远端 ARM 再将通信请求传递给远端的 DSP。远端 DSP 的回应过程也类似。因此从两端的 DSP 看,就像是通过一条虚拟 Modbus RTU 总线在进行通信。

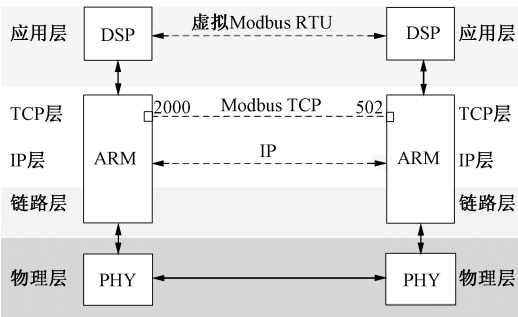


图 3 励磁控制器的虚拟 Modbus RTU 网络通信多层模型

Fig.3 Multilayer model of virtual Modbus RTU network

如第 3 节所述,在以太网上具有复杂的通信关系,因此这些关系也必须被一一映射到虚拟 Modbus RTU 总线上。本文提出的设计中,对所有设备按照通信关系进行特殊的统一编址。以含有 2 个功率柜、1 个灭磁柜的励磁系统为例,表 1 给出了该励磁控制系统网络在“虚拟 Modbus RTU”总线下的编址映射设计。该编址规则有以下特点:①包括励磁控制器在内的每个设备在每个网段上都有唯一的 IP 地址;②在不同的网段上,同一个设备有不同的虚拟 Modbus RTU 站号;③设备的虚拟 Modbus RTU 站号是与其以太网上通信角色(即客户端/服务器)固连的,由于励磁控制器在以太网上同时充当服务器和客户端,并且同时工作在两个独立网段上,因此其虚拟 Modbus RTU 站号有 4 个;④尽管励磁控制器在以太网上可能包含多个客户端角色,如图 2 所示,但只要这些客户端在一个网段上工作,则它们对应的虚拟 Modbus RTU 站号是相同的。

虽然标准 Modbus RTU 协议并不支持一个总线上存在双主站(Master),且通信是半双工的。但由于底层有以太网 TCP/IP 协议的支持,本设计中的“虚拟 Modbus RTU 总线”实际上表现出更加强大的特性,包括:

- (1) 所有的励磁控制器 DSP 核均可作为主站(Master)畅通无阻地发起针对虚拟 Modbus RTU 总线上其他所有设备的通信,而无需担心双主冲突。
- (2) 在励磁控制器 DSP 核作为主站的同时,它还可作为从站(Slave)被别的励磁控制器 DSP 核或标准设备(如人机界面)寻址访问,即它可实现全双工通信。
- (3) 对一个励磁控制器 DSP 核而言,所有的数据帧均是有序和一致的,无需担心网络上延迟的不确定性导致的数据帧混乱。

表 1 励磁控制系统网络在“虚拟 Modbus RTU”总线下的映射关系

Tab.1 Address map of virtual Modbus RTU network

对应设备含义	网段 1 上的 IP	虚拟 Modbus RTU 站号	网段 2 上的 IP	虚拟 Modbus RTU 站号
A 通道励磁控制器	192. 168. 1. 1	1(客户端)	192. 168. 2. 1	11(客户端)
		2(服务器)		12(服务器)
B 通道励磁控制器	192. 168. 1. 2	3(客户端)	192. 168. 2. 2	13(客户端)
		4(服务器)		14(服务器)
灭磁柜	192. 168. 1. 3	5(服务器)	192. 168. 2. 3	15(服务器)
功率柜 1	192. 168. 1. 4	7(服务器)	192. 168. 2. 4	17(服务器)
功率柜 2	192. 168. 1. 5	8(服务器)	192. 168. 2. 5	18(服务器)
人机界面	192. 168. 1. 100	6(客户端)	192. 168. 2. 100	16(客户端)

(4) 所有的通信关系均并行地存在,一个通信关系的故障(如某个设备退出网络)完全不会影响其他通信关系。

(5) 发生故障的通信关系是可以自恢复的,一旦通信故障解除,通信关系能够自动重新建立起来。

由于采用了双网双主冗余架构,不可避免地会存在双网竞争管理以及双主机竞争管理问题。管理策略跟具体应用密切相关,实现方式也有多种,这里给出励磁系统中的一种简单实现。

针对双网竞争管理,当两个网络同时工作时,在通信网络层面不进行任何特殊处理,网络数据的选择权交给控制器的应用层软件。也即,主站将会同时在两个网段上发起同样的数据请求,同时从站也会从两个网段上收到主站发来的数据请求,并同时在两个网段上进行回应。进而主站也会收到来自两个网段的数据回应。最终主站应用层软件选择使用其中某一个网络的数据即可,其选用的原则可以是先到优先原则,也可以是后到优先原则。

针对双主竞争管理,也是在应用层进行。主要解决的问题是防止励磁控制器 A 与 B 同时工作,导致竞争。一种典型的实现是采用主机标志位方式。当前控制器检测到另一个通道控制器的主机标志位置位时,当前控制器主机标志位清零;而当检测到另一个通道控制器的主机标志位清零时或检测不到其心跳时,则当前控制器主机标志位置位。由此保证系统中同一时刻只有一个主机在工作,另一个为热备用。此外,针对数据差错处理,由于 Modbus RTU 自带 CRC 校验^[11],同时 TCP/IP 协议也有完善的差错处理机制,由此二者联合保证了总体通信数据的正确性,而无需额外进行数据纠错处理。

综上,本文提出的基于虚拟 Modbus RTU 技术的双以太网双主站冗余发电机励磁控制器通信框架是一种全新的架构,它能够实现励磁控制与复杂网

络通信任务间的解耦,从而有效降低励磁控制 DSP 核的通信负担,提升控制性能。同时还会给励磁控制器软件开发者带来极大的便利,只需进行简单的现场总线级通信,也即虚拟 Modbus RTU 通信即可。

5 实验验证

为验证所提出的基于虚拟 Modbus RTU 技术的发电机励磁控制器在双以太网双主站冗余环境下的有效性,进行了励磁控制器研发设计和实验验证。新型励磁控制器实物如图 4 所示。硬件上,该励磁控制器的励磁控制 DSP 核采用 TI 的 C2000 系列芯片实现,以充分发挥其控制特长,而网络通信 ARM 核则采用 Atmel 的 ARM9 系列芯片实现,并搭载 Linux 操作系统,通过标准 TCP/IP 协议栈实现双以太网的驱动。

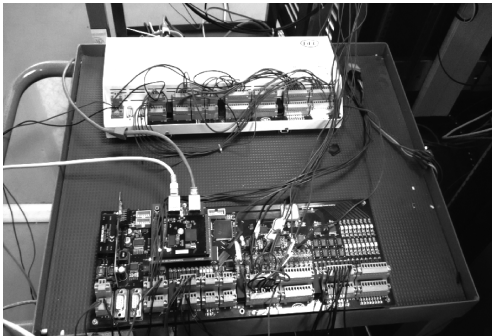


图 4 基于虚拟 Modbus RTU 技术的励磁控制器实物
Fig.4 Implemented excitation controller based on proposed virtual Modbus RTU Technology

按所提出方法实现的新型励磁控制器测试环境如图 5 所示。系统中包含 3 台新型励磁控制器,分别为励磁调节柜中的励磁控制器 A 和励磁控制器 B,以及功率整流柜中的控制器,同时还包含一台标准商用人机界面。所有设备都包含两个网口,并通过两个标准商用以太网路由器分别接入两个独立的

以太网段。两个励磁控制器 A 和 B 之间有硬件心跳线。同步发电机励磁系统在实时仿真系统 RTDS 中搭建,各个控制器通过硬接线方式与同步发电机励磁系统连接,形成闭环半实物仿真系统。

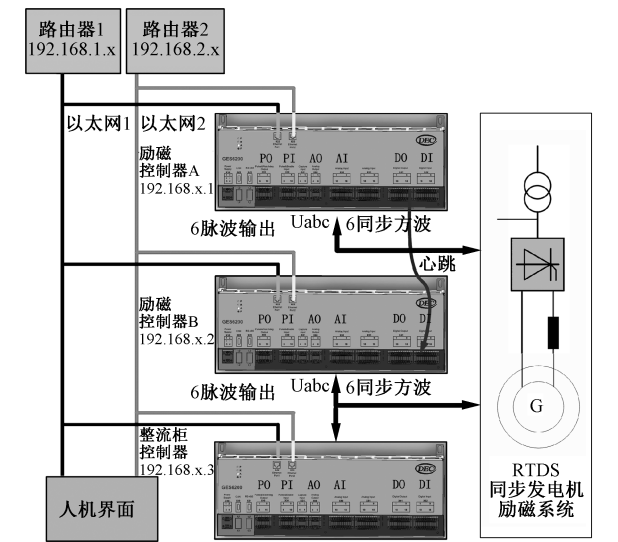


图 5 新型励磁控制器实验系统构架

Fig.5 Experimental set of proposed excitation controllers

图 6 给出了在商用人机界面上观察到的励磁控制器运行状态。从图 6 中“故障指示”栏中可以看出,当前 A 通道和 B 通道励磁控制器均已正常连接。从“运行主机”栏可以看出,A 通道和 B 通道励磁控制器互为热备用,当前 A 为运行主机,B 为备用主机。该实验说明励磁控制器已实现双网络双主机冗余运行。



图 6 商用人机界面上显示的励磁控制器连接情况

Fig.6 Operation status of proposed excitation controllers monitored by commercial HMI

整流功率柜控制器采集发电机机端电压等数据,并在以太网上作为服务器。励磁控制器作为客

户端对功率柜的数据服务器进行访问,获取采集到的电压数据用以进行励磁控制。然后又同时作为服务器向人机界面开放这些采集的数据用以监测。人机界面作为客户端,通过以太网访问励磁控制器从而获取到相关数据并显示给用户。图 7 给出了的人机界面所监测到的发电机定子电压波形,由此说明所设计的基于虚拟 Modbus RTU 技术的励磁控制器完全能够同时胜任复杂的网络通信中的各个角色,能够与按预期方式在以太网上稳定工作,证明了设计方法的有效性。

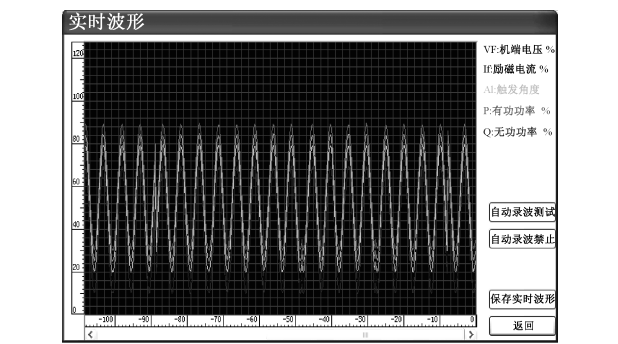


图 7 电网电压采样波形

Fig.7 Waveform of sampled grid voltages

图 8 给出了基于 RTDS 的硬件在环仿真测试结果。通过全闭环仿真,验证了新型励磁控制器能够顺利完成同步发电机的启励磁和并网,更加全面地验证了所设计的基于虚拟 Modbus RTU 技术的励磁控制器具有优良的性能,能够全面满足工程应用的要求。

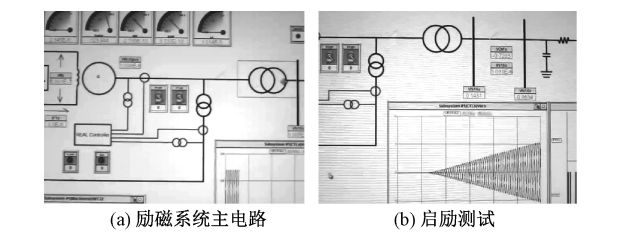


图 8 RTDS 硬件在环测试结果

Fig.8 Experimental results with RTDS

6 结论

本文提出的基于虚拟 Modbus RTU 技术的双以太网双主站冗余发电机励磁控制器设计方法让承担励磁控制任务的核心芯片只需要做简单的“虚拟 Modbus RTU”通信即可完成复杂的以太网接入。该设计包括定义网络通信关系、构建基于软硬件设计通信系统多层模型以及映射网络地址和虚拟 Modb-

us 总线站号等多个部分。

所提出的“虚拟 Modbus RTU 总线”由于底层有以太网 TCP/IP 协议的支持,实际上表现出比标准 Modbus 总线更加强大的特性,包括:①所有的励磁控制核均可作为主站畅通无阻地发起针对虚拟 Modbus RTU 总线上其他所有设备的通信,而无需担心双主冲突;②在励磁控制核作为主站的同时,它还可作为从站被别的励磁控制核或标准设备(如人机界面)寻址访问,即可实现全双工通信;③所有的数据帧均是有序和一致的,无需担心网络上延迟的不确定性导致的数据帧混乱;④所有的通信关系均并行地存在,一个通信关系的故障(如某个设备退出网络)完全不会影响其他通信关系;⑤发生故障的通信关系是可以自恢复的,一旦通信故障解除,通信关系能够自动重新建立起来。

基于所提出的方法进行了样机研制,并通过 RTDS 半实物仿真实验进行了全面测试。实验结果证明了本文设计的可行性和优良性能。

参考文献 (References):

- [1] 陆继明, 毛承雄, 范澍, 等 (Lu Jiming, Mao Chengxiong, Fan Shu, et al.). 同步发电机微机励磁控制器 (Microcomputer-based excitation controller for synchronous generator) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2006.
- [2] 冀晓诚 (Ji Xiaocheng). 基于 DSP 的同步发电机励磁控制器的研究与开发 (Research and development of synchronous generator excitation controller based on DSP) [D]. 南宁: 广西大学 (Nanning: Guangxi University), 2017.
- [3] 李成伟 (Li Chengwei). 基于 DSP 的同步发电机励磁控制器的研究 (Research on excitation controller of synchronous generator based on DSP) [D]. 天津: 天津大学 (Tianjin: Tianjin University), 2006.
- [4] 邓超 (Deng Chao). 同步发电机励磁控制器研究与开发 (Research and development of synchronous generator excitation controller) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science & Technology), 2011.
- [5] 赵东杰 (Zhao Dongjie). 同步发电机励磁控制器设计与研发 (Design and development of synchronous generator excitation controller) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science & Technology), 2013.
- [6] 谭海青 (Tan Haiqing). 同步发电机励磁控制器的研究与设计 (Research and design of synchronous generator excitation controller) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science & Technology), 2014.
- [7] 孔栋, 郑建宏 (Kong Dong, Zheng Jianhong). 嵌入式 TCPIP 协议栈 LWIP 在 ARM 平台上的移植与应用 (Transplant and application of LWIP in ARM platform) [J]. 通信技术 (Communication Technology), 2008, 41 (6): 38-40.
- [8] 张齐, 劳炽元 (Zhang Qi, Lao Chiyan). 轻量级协议栈 LWIP 的分析与改进 (Analysis and improvement of light weight protocol stack LWIP) [J]. 计算机工程与设计 (Computer Engineering and Design), 2010, 31 (10): 2169-2172.
- [9] 曹士芹 (Cao Shiqin). Modbus RTU/ASCII 转 Modbus TCP 网关关键技术及应用研究 (Research on key technologies and application of RTU/ASCII Modbus TCP modbus gateway) [D]. 天津: 天津理工大学 (Tianjin: Tianjin University of Technology), 2017.
- [10] 余翔, 王瑞清, 乐绪鑫, 等 (Yu Xiang, Wang Ruiqing, Yue Xuxin, et al.). 基于 ARM 的机组励磁控制器实现方案 (A scheme of generator excitation controller based on ARM) [J]. 水电与新能源 (Hydro Power and New Energy), 2015, 2: 1-3, 9.
- [11] 胡斯登, 赵争鸣, 张永昌 (Hu Sideng, Zhao Zhengming, Zhang Yongchang). 变频器通讯控制中的循环冗余校验检错原理与实现 (Research on CRC's calculation method and realization in converter communication) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2008, 27 (4): 40-43, 61.

Design of generator excitation controller based on virtual Modbus RTU technology with dual-Ethernet dual-master redundancy

ZHOU Hong-lin, LIU Jing-bo, LING Le

(Central Research Academy of DEC, Chengdu 611731, China)

Abstract: The excitation controller of synchronous generator with high reliability generally works with the dual Ethernet dual master redundancy. Foreign high-end controllers are indeed easy to cope with complex network environment, but with the intensification of market competition and the requirement of self-control in recent years, excitation controllers need to explore new ways to reduce costs and increase efficiency. However, due to the limitation of hardware, the excitation controller based on MCU or DSP can not meet the requirements of both control performance and complex network access. In order to solve this contradiction, this paper presents a design method of excitation controller based on the virtual Modbus RTU technology. This method enables the excitation control core to access the complex Ethernet only with simple virtual Modbus RTU communication. Thereby, the decoupling between excitation control and complex network communication is realized, the communication load of excitation control core is effectively reduced, and the control performance is improved. Moreover, it brings great convenience to the software developers of excitation controller. Firstly, the requirements of excitation controller are introduced. Then a new design scheme based on virtual Modbus RTU technology is proposed. After that the hardware and software implementation framework is given. Finally, the feasibility and performance of the design are fully verified by RTDS hardware-in-the-loop experiment.

Key words: synchronous generator; excitation controller; industrial Ethernet; redundancy; Modbus