

# 用于继电保护设备的 Sitara™AM6x 处理器



Amrit Mundra,  
Bryan Trinh,  
Sreenivasa Kallikuppa,  
Prasanna Rajagopal

德州仪器

# 全球电力基础设施的作用是连接发电、输电和配电系统， 通常称作电网

为了提高整体可靠性、利用率和效率，人们正在增加更多的通信功能和传感器，从而使电网更加智能，通常称作智能电网。

变电站是智能电网基础设施中的重要组成部分，通常位于输电线路和配电线路，其中包括为住宅和企业供电的低压配电线路。变电站可以改变输电电压电平，执行重要功能，如馈线开关、负载开关和断路器保护以及资源连续监控等，从而提高利用率、效率并缩短停机时间。

多功能继电器保护器是电网中使用的一大关键终端设备。多功能继电器保护器提供保护和控制功能，配置多功能保护继电器可以为发电机、输电线、电机、母线或其他电网设备提供保护。

多功能继电器保护器在智能电网发挥的作用包括：

- 检测电网的异常电力系统行为，发出报警并采取必要行动。
- 采样模拟输入，计算其所连接设备的电气参数，并根据配置的功能采取行动，包括向断路器发送跳闸信号从而保护设备。
- 提高电力系统（包括发电、输电和配电）的效率和可靠性。
- 根据国际电工委员会（IEC）61850 和 IEC 62439 标准的要求，通过冗余通信基础设施，如高可用性无缝冗余（HSR）/ 并行冗余协议（PRP）将最新状态信息发送至集中监控系统。

继电器保护器包括交流模拟模块和处理器模块。交流模拟模块与多路电压和电流输入相连，将输入缩放到 ADC 范围，并使用高精度 ADC 将模拟输入转换为数

字量。处理器模块从模拟输入模块中获取采样的数字量，并处理数字滤波等样本数据，计算电气参数，执行保护算法并将参数传送到中央网络。

本白皮书重点介绍保护继电器中的处理器模块。

继电器保护器中的处理器模块通常如图1所示，对数据执行采集样本、处理和通信功能，并且还提供 HMI 和诊断功能。

处理器模块使用串行/并行接口从模数转换器（ADC）采集数字数据，并对这些数据进行数字滤波以平滑输入信号并消除异常。

经过滤波后的数据会交由继电器保护算法做进一步处理，该算法根据继电器保护应用的要求，分析所监控的参数是否在合理范围内，例如用于终端设备保护的数据，如过载、差分、反向功率等是否合理，并按预定时序向断路器提供跳闸信号。滤波后的数据还用于测量和诊断电气参数。通信单元提供不同的通信接口和所需的协议，包括 HSR/PRP 等冗余协议，并向 SCADA 监控和数据采集系统等更高层级报告事件和状态。图形 LCD 屏可以图形方式显示参数和受保护设备的状

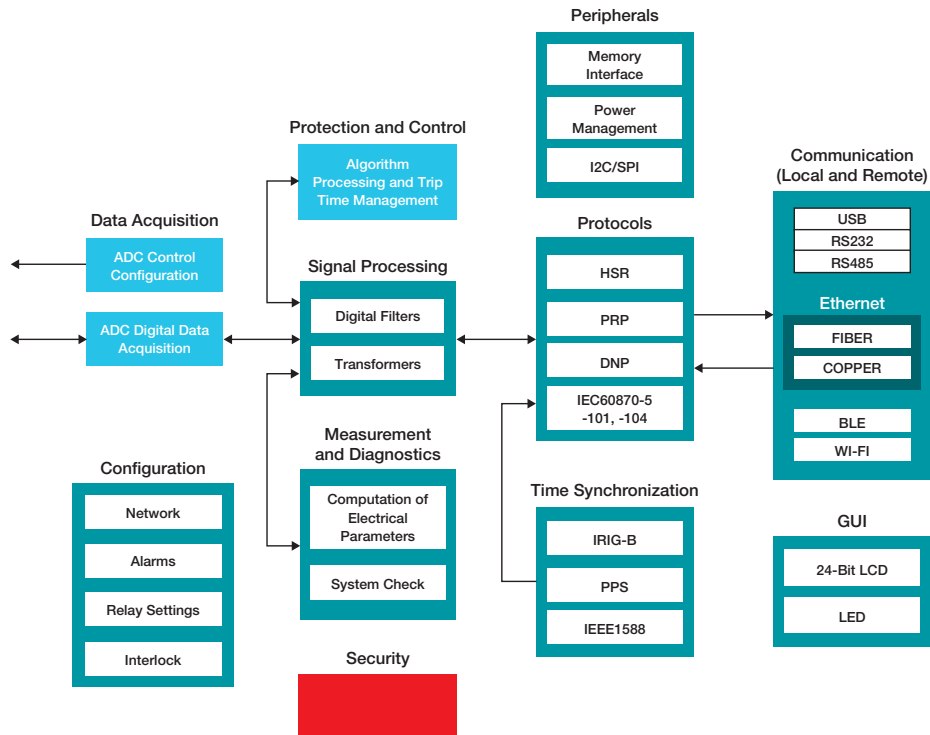


图1. 继电保护器处理器模块中的典型数据流。

态, 便于快速分析。

## 处理器模块在继电保护器中解决的难题

随着智能电网取代传统电网, 以及智能电网部署的增加, 处理器模块必须解决以下难题:

- 与外部 ADC 模块对接具备多接口和多协议功能
- 高性能处理采集的 ADC 数据
- 使用多核子系统执行高级数字信号处理 (DSP)、转换和数据管理功能。
- 支持 HSR/PRP 等冗余工业以太网协议。
- 展现直观且丰富的人机界面 (HMI)。
- 支持高可靠性、长开机时间 (POH) 和 ECC 纠错功能 (ECC)。
- 支持高级安全功能和功能性安全。

- 具有广泛的外围设备, 可连接多个串行和并行接口。

## 用于多功能继电保护器处理器模块应用的 Sitara™ AM6x 设备

处理器模块可能需要多个处理子系统来应对不同的处理需求和难题。将功能组合到更少的设备或单个设备上可降低成本和复杂性。

德州仪器 (TI) 的 Sitara™ AM6x 处理器是单芯片解决方案, 非常适合继电保护设备中的处理器模块。下图是 AM6x 处理器系列 AM654x 处理器的框图。

针对上面列出的难题, 下面一一介绍 AM6x 处理器的相应功能。

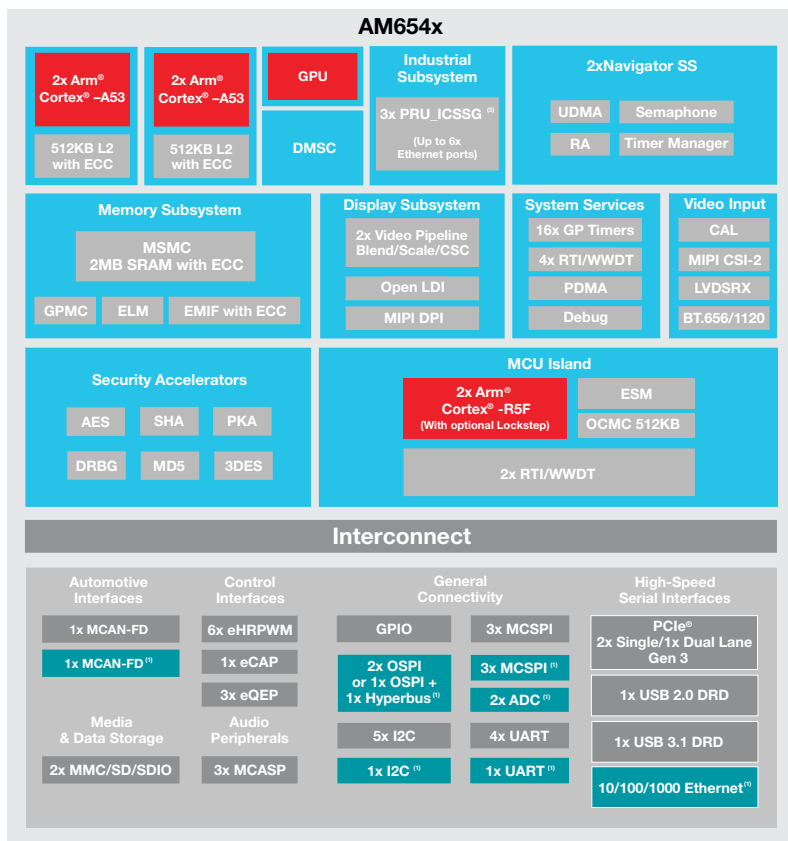


图2.AM654x处理器框图。

**从具有不同接口和协议的外部 ADC 采集高速和高性能数据。**处理器模块的主要难题之一在于能够同时连接多个外部 ADC,而且 ADC 可能具有不同接口类型,如串行外设接口 (SPI) 等。同时处理器需要适应不同输入频率的变化时序要求,以便执行相干采样。让情况更加复杂的是,许多 ADC 制造商已经定义了 ADC 接口,需要处理器具备定制时序能力直接对连 ADC 采集数据。

TI AM6x 处理器用可编程实时单元子系统和工业通信子系统 (PRU-ICSS) 解决了与多类型 ADC 外围设备对接的难题。它可直接与外部 ADC 连接,从而节省物料清单 (BOM) 成本。PRU-ICSS 接口可以与 ADC 接口时序相关采样,从而改善了信号链性能,减

少频谱泄漏。

**执行高级数字处理运算和数据管理功能的多核处理架构。**为了满足高性能处理要求,包括先进的信号处理和管理功能,AM6x 器件系列最多可将四个带 NEON 扩展的 Arm® Cortex®-A53 内核和一个双 Arm Cortex-R5F 微控制器 (MCU) 子系统组合在一起。Cortex-A53 内核设置在具有共享 L2 内存的双核集群中,4个Cortex-A53 可以组建成两个高性能处理子单元。Cortex-R5F 内核可用于 ADC 样本数据过滤和数字信号处理,而 Cortex-A53 内核可用于继电保护管理和以太网通信功能。

**支持以太网协议, 包括 HSR/PRP 等冗余工业协议。** 针对变电站自动化的高可靠性和可预测性的以太网网络需求来自于 IEC 62439 标准, 目的是为了创建低成本、易维护、可互操作并具有内置冗余的通信网络基础设施。IEC 62439-3 第 4 和第 5 条则定义了高可用性无缝冗余 (HSR) 和并行冗余协议 (PRP)。

AM6x 处理器利用 PRU-ICSS 子系统为 HSR/PRP 提供支持。该实现过程包括 PRU-ICSS 固件、驱动程序 (Linux®/ 实时操作系统 (RTOS))、应用程序和简单网络管理协议支持。PRU-ICSS 固件用于处理链路冗余, 而主核 (Cortex-A53) 负责运行驱动程序和应用程序代码。TI 免费提供 PRU-ICSS HSR 固件和驱动程序 (基于 Linux 和 TI-RTOS), 并对 AM6x PRU-ICSS 进行了升级以支持千兆 HSR/PRP。

使用 UART/SPI 端口可实现其他异步或同步通信接口, 也可以使用 PRU-ICSS 来添加其他通用异步收发端口或 SPI 端口。PRU-ICSS 内核也可用于定制通用输入/输出操作和深度封包检测。

**展示直观且丰富的 HMI。** 多功能继电保护设备还可以配备直观的 HMI 图形 LCD, 用于显示波形、趋势、电气参数、配置和状态。丰富的 HMI 有助于降低培训成本, 简化分析, 并最大限度地降低错误配置的几率。AM6x 处理器具有集成 LCD 控制器和 3D 图形加速器, 便于设计丰富的 HMI 功能。

**通过支持高可靠性、长久的 POH 和完整的 ECC 提高了可靠性和诊断能力。** 继电保护器需有高可靠性和更长的使用寿命, 并且通常在极端环境中运行。而 AM6x 能够完全满足这些要求。广泛覆盖内存的 ECC 功能以及其他一些降低故障率的设计策略使

得复杂的片上系统实现了最低软失效率。

AM6x 处理器工业版结温 (Tj) 范围为 -40°C 至 105°C。但当器件工作在最高结温 105°C, Cortex-A53 内核频率工作在 1.0GHz, 器件其余部分则以最高频率工作的情况下, AM6x 处理器的估计工作寿命为 100,000 POH。

工业应用的另一常见要求为操作设备的寿命超过 100,000 POH。对于使用更低结温 95°C 的应用, AM6x 处理器的估计工作寿命高达 200,000 POH。

AM6x 处理器包括可持续运行的丰富的硬件诊断功能。例如异步锁 Cortex-R5F 架构、内存管理单元、防火墙、内存单比特检测、双比特检测和奇偶校验功能、电源诊断、温度传感器和复位诊断。AM6x 安全手册中详细介绍了诊断功能。

**支持高级安全功能和功能安全特性。** 功能安全是对保护继电器的一项新要求, 这是由于它通常是保护电网基础设施的最后一道防线。功能安全也可以让系统设计师对系统快速诊断部件故障并防止损坏的能力更加充满信心。TI 对 AM6x 处理器设计了功能安全特性以及完整的 ECC 特性。

AM6x 处理器可用于高达 IEC 61508 安全完整性等级 (SIL) 3 级的工业控制应用。对于集成 AM6x 处理器并管理系统性故障和随机故障的系统, TI 提供 SafeTI™ 设计包以帮助满足它们的功能性安全要求。按照标准要求, TI 遵循独立认证的硬件和软件开发流程以及需求跟踪、文件编制和验证。

TI 提供软件合规模程序包和编译器认证工具包以管理系统故障。对于随机故障, TI 提供可配置的 AM6x 故障模式效果和诊断分析工具, 可详细说明器件设计和诊断覆盖范围的故障模式和指标。SafeTI™ 设计包还提供了安全分析报告, 此报告是 AM6x 处理器作为独立安全单元时第三方评估的认证概要。

目前, 人们对网络基础设施攻击的担忧处于历史最高水平。安全威胁始终存在, 而随着智能电网中物联网的快速普及, 这些威胁可能来自任何地方, 甚至是毫不起眼的低成本终端节点设备。问题不在于是否系统会受到攻击, 而在于何时受到攻击。安全的设计, 风险管理与保护措施同等重要。鉴于保护继电器可能会受到攻击, 系统设计人员必须将安全放在第一位。

软件和硬件安全功能必须协同工作, 从而获得比单独使用某一种解决方案更多的保护层。当然, 安全架构的强度取决于其基础。基础层的四个方面非常重要, 即: 安全启动过程、调试安全性、基于硬件的设备密钥 /ID 和加密加速。

AM6x 处理器支持诸多安全功能, 如安全启动、调试安全性、密钥 /ID、加密加速、可信执行环境 (TEE)、安全存储、网络安全、软件知识产权 (IP) 保护、初始安全编程、安全固件和软件。

## 处理器模块 BOM

对处理器模块来说, 降低 BOM 始终是一大优先事项。降低 BOM 成本的一种方法是减少器件的使用量, 这样有助于节省部件和相关的印刷电路板 (PCB) 成本。部件更少意味着设计更简单, PCB 布线问题也更

少。

AM6x 处理器集成了 PRU-ICSS, 无需使用现场可编程门阵列 (FPGA) 即可连接外部 ADC。

这个 PRU-ICSS 外围设备也可以用于执行 HSR/PRP 等冗余协议。AM6x 处理器集成了 LCD 控制器和 3D 图形加速器, 另外还具有高性能多核架构, 非常适合于处理器模块。

## 使用 AM6x 的处理器模块示例

**图3** 是基于 AM6x 处理器的多功能继电保护器示例。借助 SPI 或多个 SPI 的接口信号, 外部 ADC 可直接连接到 PRU-ICSS。PRU-ICSS 在 PRU-ICSS 固件控制下执行 ADC 配置和数据采集功能; 此固件可根据所选的外部 ADC 进行自定义。

AM6x 处理器包括三个 PRU-ICSS 模块。一个用于 ADC 接口, 另外两个 PRU-ICSS 子系统用于 HSR/PRP 处理。每个 PRU-ICSS 支持两个以太网端口, 因此总共有四个以太网端口。

AM6x PRU-ICSS 的三个 RISC 内核, 运行频率为 250MHz, 可进行零交叉检测和有限脉冲响应滤波等基础信号处理。处理后数据可通过内存访问硬件引擎传输至 Cortex-R5F 子系统内存

AM6x 处理器包括两个运行频率为 400MHz 的 Arm Cortex-R5F MCU, 可实时处理滤波、归一化以及其他一些终端设备的实时算法。每个 Cortex-R5F 内核都具有快速访问的 64KB TCM 数据内存。由于 Cortex-R5F 是实时处理内核, 可以用该子系统执行终端设备的操作和处理命令。



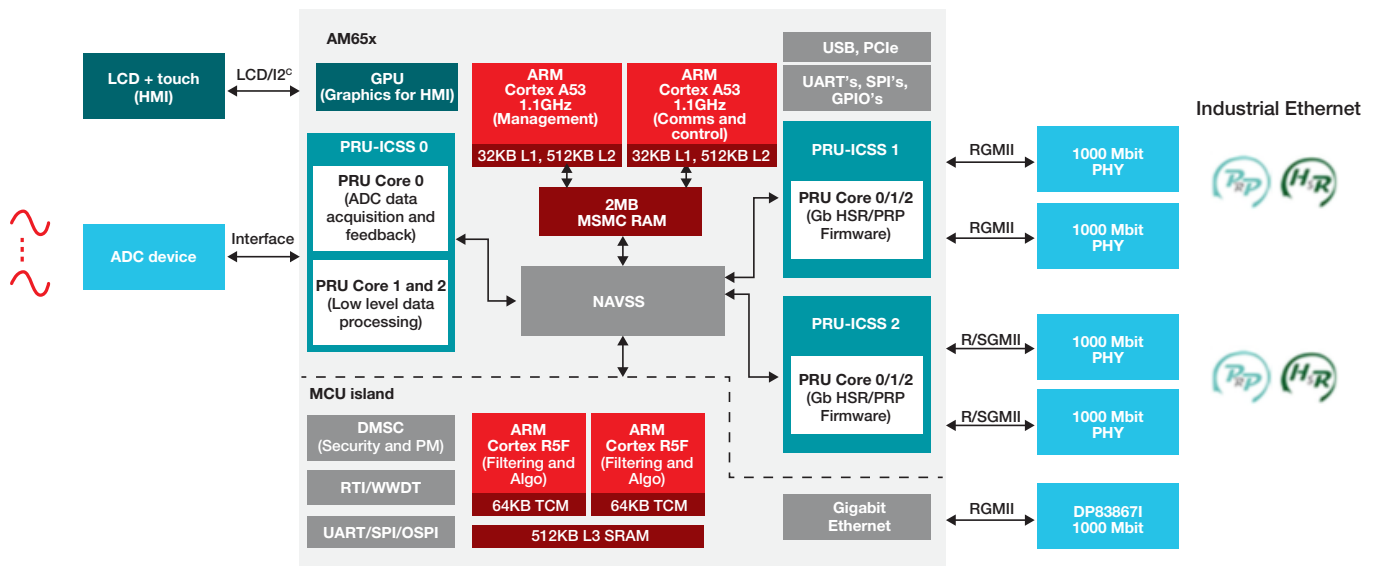


Figure 3. System block diagram for AM6x processor-based protection relays.

AM6x 处理器还具有四个 Arm Cortex-A53 处理器内核,可执行常规应用程序管理以及运行通信协议堆栈。每个内核能以 1.1GHz 的最大速度运行,从而为复杂的堆栈和协议管理提供充足的计算能力。

## 结论

AM6x 处理器为多功能继电保护设备中的处理器模块提供单芯片解决方案,能够直接连接外部 ADC,并实现多种通信接口和协议。使用 PRU-ICSS 能够提供可定制接口和协议,无需借助 FPGA 即可与 ADC 进行连接。

AM6x 处理器还可利用 PRU-ICSS 和 TI 免费提供的固件为千兆位 HSR/PRP 协议提供支持。AM6x 处理器有三个 PRU-ICSS 模块,每个模块可用于 ADC 连接或双端口 HSR/PRP。

AM6x 处理器的集成 LCD 控制器和 3D 图形加速器符合当前继电保护装置 HMI 功能日益丰富的发展趋势,可为操作人员提供设备状态和配置信息以及培训视频。AM6x 处理器提供丰富的连接选项,包括多个 UART、SPI、I2C、McASP、USB 和外围组件互连 (PCIe) 等,无需借助外部扩展设备即可直接连接外围设备。

AM6x 处理器的可靠性和功能性安全功能包括器件中所有内存的完整 ECC,片上内存、外围设备和片内互连总线支持丰富的硬件诊断功能。处理器的整体特性旨在帮助客户设计实现高达 IEC 61508 的 SIL 3 级标准功能的系统。

AM6x 处理器支持诸多安全功能(如安全启动、调试安全性、密钥/ID、加密加速、TEE、安全存储、网络安全、软件 IP 保护、初始安全编程、安全固件和软件),可保护机电设备免遭恶意攻击。

## 其他资源

- TI 为 ADS8688 等通用 ADC 提供参考设计,包括[采用多个 ADC 且适用于同步相干 DAQ 的灵活接口 \(PRU-ICSS\)](#)。
- 阅读应用报告,“[适用于电网变电站通信的Sitara处理器的HSR/PRP解决方案](#)。”
- 观看 [PRU-ICSS 培训系列](#)。

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。TI 建议用户在下订单前查阅全面的全新产品与服务信息。TI 对应用帮助、客户应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不承担任何责任。有关任何其他公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的批准、担保或认可。

平台标识是德州仪器 (TI) 的商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产。



## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品；(2) 设计、验证并测试您的应用；(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122  
Copyright © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司