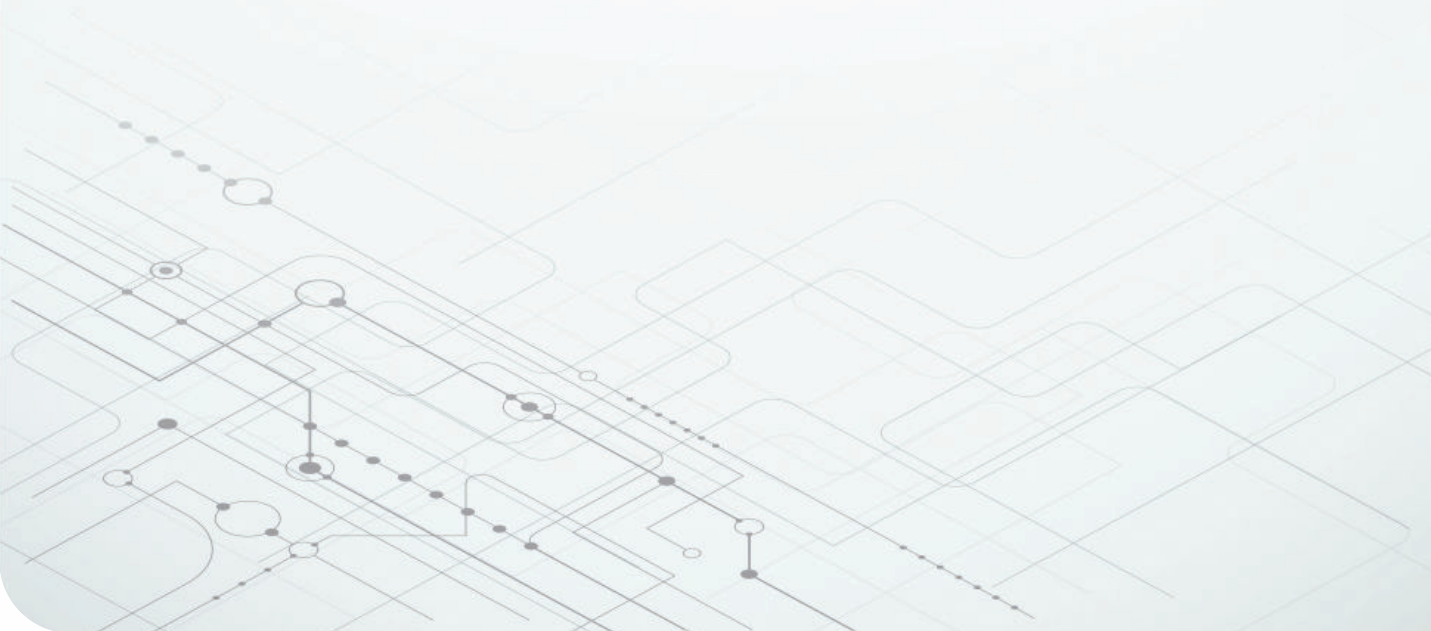


面向能源化家庭的边缘智能



Brandon Kanter
Systems Manager
Energy Infrastructure



通过先进的检测、保护和处理功能，设计更安全、更智能的住宅能源系统

内容概览

- 现代家庭正在从简单的配电架构转变为需要更智能监控和保护动态、互连环境。
- 边缘智能可在具有太阳能、电池存储和电动汽车 (EV) 充电功能的住宅能源系统中实现实时故障检测和响应。
- 先进的检测技术能够区分正常的电气事件和危险条件，从而防止不必要的中断并提高系统可靠性。
- 集成保护架构将精密测量、本地处理和连接相结合，可实现更安全、更高效的家庭能源管理。

简介

在德克萨斯州炎热的夏日，一位房主回到家中，为他们的电动汽车充电。太阳能电池板产生的电力多于房屋消耗的电力，可以提供多余的电力为家庭的电池系统充电，或者将电力返回到电网。当天早些时候，洗碗机按预定程序启动运行，空调系统则自动升至全功率运转状态。

太阳能装置、电池储能系统和电动汽车充电站等家用系统可能会让人感觉很普通和熟悉。但当这些设备相互交互时，便催生了一种截然不同的家庭能源环境——其核心特征包括更高的电气化负荷、动态电价、储能系统以及双向电力流。随着高功率系统日益普及，家庭越来越需要更智能的能源管理，以支持由互联电器和分布式能源构成的复杂电气系统。这便是能源化家庭。

能源化家庭在墙体和屋顶之间输送的能量更多，这本身就会带来更高的风险，因为随着电气化程度的提高，保护系

统的容错空间正在不断收窄。为了帮助应对这些风险，工程师必须设计能够准确检测、在本地分析条件并提供可见性和协调所需的连通性。这种系统暴露了传统保护和控制技术的局限性。

工程挑战

基于阈值的断路器无法充分应对能源化家庭的能量流可变性和上下文相关行为特性。能源管理系统必须集成多个功能域，包括检测、信号调节、数据转换、处理和通信，每种技术都必须在电气噪声和高压环境中可靠运行，不能发生误跳闸。

隔离和传感技术的进步使设计人员能够安全地管理高压和高电流状况，从而降低电气危害的风险并改善对房主的系统保护。但是，过于敏感的保护与保护不足同样具有破坏性。

工程师面临的挑战是设计出在灵敏度和选择性之间实现最佳平衡的保护系统。当保护器件在没有真正故障的情况下中断电源时，会发生误跳闸，这会产生显著的下游影响。改进故障分类使系统能够更一致地区分瞬态事件和真实故障情况，从而减少不必要的中断，并为房主和服务提供商提高系统可靠性。

为了优化能源化家庭，工程师需要观察电力如何流经系统。[图 1](#) 展示了智能断路器解决方案的示例，该解决方案在电路级别提供远程负载管理、自动化和控制。高分辨率测量技术可提供有关负载和分布式能源上的电压、电流和系统行为的详细数据。这种可见性有助于工程师改善故障检测，从而做出更明智的保护、控制和能源管理决策。



图 1. 智能面板解决方案提供远程负载管理、自动化和电路级控制

智能保护架构

在系统级别，能源化家庭的保护系统在以下三种措施的连续环路中运行：

- 检测 – 高分辨率检测可实时捕获电压、电流和系统状况。
- 分析 – 嵌入式处理可评估电气特征，以识别模式和异常。
- 响应 – 保护机制基于上下文，酌情隔离故障或维持运行。

连续感应和检测

在检测阶段，高度动态环境中的保护系统必须持续运行以收集宽动态范围内电压和电流的实时测量值。降低延迟很重要，因为检测系统必须通过采样和处理（有时以毫秒为单位）来捕获和中继信息。

通过本地情报进行分析

嵌入式处理使保护系统能够解读电气行为，而不是简单地响应固定阈值。这种区别很重要，因为在能源化的家庭环

境中，电气特征可能很难仅用确定的规则来描述。在数据源本地执行基于模式的分析可实现更高的精度，从而提高响应能力并减少核心安全功能对连接性的依赖。德州仪器 (TI) 的 **CCStudio™ Edge AI Studio** 等设计工具可帮助简化从数据采集和标记到模型评估和部署的流程。

自适应保护和系统响应

最后一个阶段是响应。在传统的二进制系统模型中，当测量值超过指定阈值时，系统会跳闸。但是，能源化的家庭环境需要细致入微的响应，而不仅仅是简单的中断。它们需要智能保护系统，通过区分持续故障的瞬态浪涌电流来评估环境，同时还需要识别电源何时在太阳能、储能系统和 EV 充电系统中向不同方向流动 (图 2)。这支持更多的选择性干预，并有助于协调整个家庭的负载平衡，同时管理安全性和系统性能。



图2. 智能监控系统可确保双向能量无缝流动，同时保护家庭免受故障和危险的影响

系统集成：从感应到可见性

在能源化家庭中，超越物理系统的可见性已成为可靠运行的基础，传感、处理与通信的协同运作共同决定了系统的性能表现。这些技术单独来看都能实现关键功能，但碎片化的设计会限制系统的性能、可扩展性和可靠性。只有工程师将其集成到一个连贯的端到端架构中时，它们才会产生完整的价值。

TI 在整个信号链中支持此架构，包括传感、隔离、数据转换、边缘处理和连接。在传感路径中，精密模拟与计量技术能够帮助设计人员在宽动态范围内精确采集电压和电流信号。然后，隔离和信号链器件有助于保持在高压域和低压处理电子设备之间所传输信号的完整性。

设计人员还可以使用数据转换和信号调节技术将电气行为转换为可用的系统数据，并使用边缘嵌入式处理来支持针对保护和控制功能的本地分析。

智能保护架构的工作原理

在图3中，流量从检测层开始，系统在其中捕获电压和电流等物理参数，并将电流量转换为代表系统中发生的情况的电信号。

然后，这些信号进入信号调节模式，前端对其进行放大、滤波和隔离，确保即使在电噪声高的高压环境中，数据也能保持准确和可用。

对信号进行调节后，边缘处理层会通过运行本地分析来检测模式、对事件进行分类并标记异常情况，从而将数据转换为实时系统理解。

然后，通信层在子系统之间传递处理后的信息，

并在需要时传递到外部接口，以便系统可以支持协调、诊断和控制。

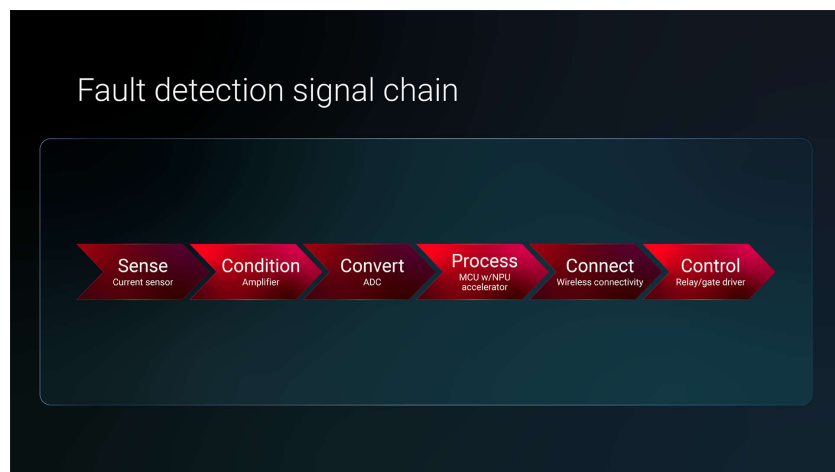


图 3. 智能保护架构的各个阶段

实现智能保护的构建块

- 精密**模数转换器**和**隔离式调制器**，用于将电气行为捕获为可用的系统数据。
- 仪表放大器和信号链器件，可在嘈杂的高压环境中进行精确测量。
- 嵌入式处理器件（例如 TI 的 **MSPM0G5187 微控制器**），具有 **TinyEngine™ 神经处理单元**，用于本地保护和控制分析。
- 用于跨子系统的诊断、可见性和能源管理的有线和无线连接技术。

最后，有线和**无线连接技术**有助于在家庭能源子系统或基于云的接口之间移动相关数据，用于实现诊断、可见性和能源管理等功能。

为何边缘智能至关重要

工程师在设计能源化家庭系统时，必须使其能够在本地实时做出重要的安全决策，因为保护功能既不能依赖于对云端资源的连接，也无法承受潜在网络延迟所带来的时间延误。因此，工程师设计系统来分析测量结果并解读边缘的电气行为，以便立即采取适当的措施。

随着住宅能源环境的动态发展，人工智能 (AI) 的可及性不断提高，边缘处理变得更加实用、功能更加强大。正常运行事件（例如电器启动、电机活动和瞬态电流变化）有时

可能看起来类似于故障条件。边缘 AI 通过并行评估事件的多个特性而不是仅依靠固定阈值来帮助解决该问题。这提高了系统确定事件是反映预期行为还是需要干预的条件的能力。

在电弧故障检测等应用场景中，附加的上下文信息有助于区分危险事件与良性事件。这可以减少不必要中断的发生，从而使系统能够更准确地响应并支持更好的用户体验。

住宅能源系统中的智能保护

系统间的交互定义了能源化家庭，而设计师所遵循的架构原则并非纯粹的理论推演。这些原则已经塑造了住宅能源系统的设计。在日益复杂的环境中，设计师必须确保系统具备安全性、高效性和可靠性。

智能断路器

电气面板正在成为智能控制点，而不是被动分配节点。智能断路器面板可用作系统的中央控制点，支持系统元件的远程诊断和复位功能。

先进的智能仪表

能源测量正在从定期报告转变为持续的系统洞察。早期的智能仪表主要关注自动抄表，而较新的智能仪表则提供了更精细的见解，从而能够对不同电器和时间段的能源使用情况进行详细分析。

这提升了可见性，增强了运营优势和用户体验。公用事业公司可以更好地管理电网需求，同时房主可以更清楚地了解其家庭系统的耗能方式和时间。

更安全、更简单的能源管理

对于房主来说，智能监控和保护的价值很简单：让人更加安心。在配备太阳能、电池储能、电动汽车充电及各类互联负载的能源化家庭中，保护系统需要具备精确感知、情境解读和恰当响应的能力，从而在提升家居安全性与可靠性的同时，避免不必要的供电中断。

对于构建商和系统设计人员来说，随着住宅能源系统变得越来越复杂，这些相同的功能有助于实现合规性目标和更可预测的系统性能。

当设计人员对系统如何监测和保护自身有更大的信心时，他们可以更自信地实现更高的充电速度、更好地协调能源资产，以及进行更先进的家庭能源管理。

结语

推动能家庭发展的三大趋势——电气化、可再生能源发电的整合以及系统智能化程度的提升——将在未来十年内持续深化。随着住宅能源系统变得越来越复杂，手动管理将变得不那么实用，这突显了集成架构和可靠、响应迅速的自动化功能的重要性。由于能源化家庭兼具高度动态性与互联性，精确感知、本地响应以及跨系统智能集成的能力，不仅是构建更安全、更具韧性且更高效的能源化家庭的基石，更是赋予房主更强信心与更高自主权的关键。

其他资源

- 阅读公司博客“[更智能、更安全的家居：隐藏在能源充足型住宅背后的技术](#)”

关于作者

Brandon Kanter 是 TI 能源基础设施的系统经理，专注于可持续能源创新，包括太阳能、电动汽车充电和智能电网系统。之前，他曾担任电源管理集成电路业务主管和应用

经理，主要负责工业和汽车领域。Brandon 在肯塔基大学获得了电气工程学士学位和工商管理硕士学位。

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。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（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，不保证没有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、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(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、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月