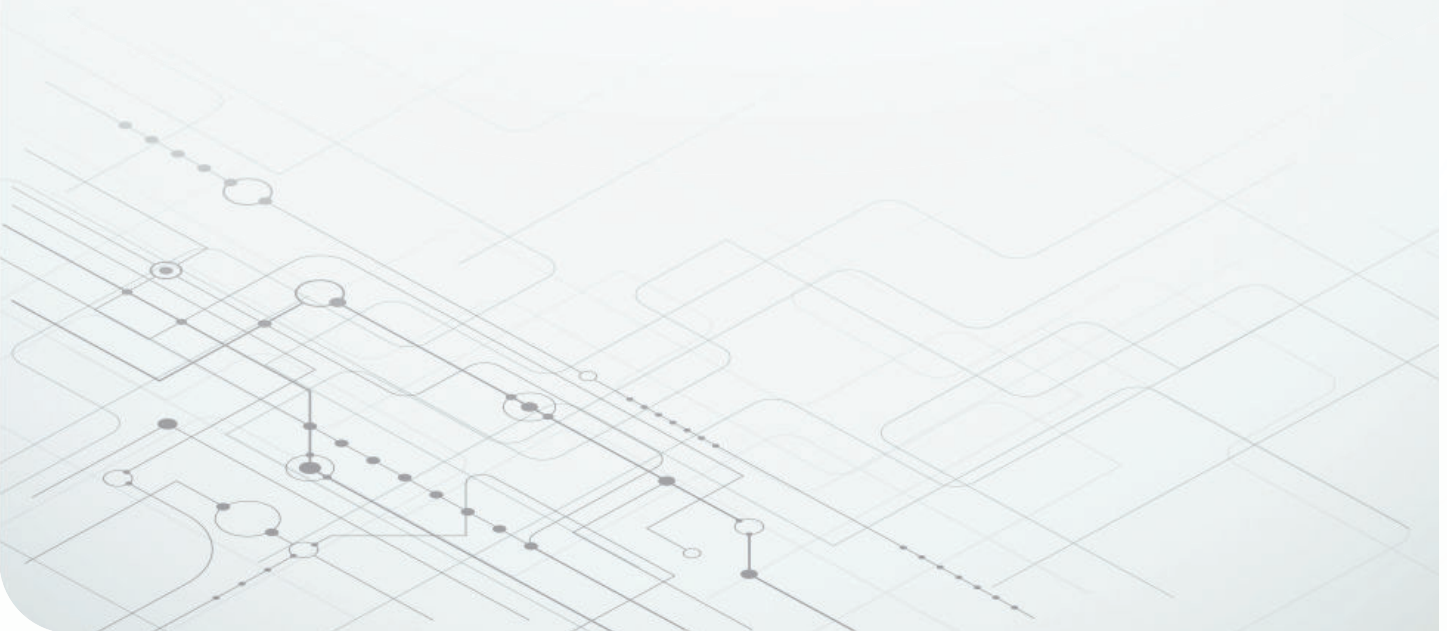


電氣化家庭中的邊緣智慧技術



Brandon Kanter
Systems Manager
Energy Infrastructure



透過先進感測、保護與處理技術，打造更安全、更智慧的住宅能源系統

摘要

- 現代住宅正從單純的電力分配架構，轉變為需要更智慧監測與保護能力的動態互聯環境。
- 邊緣智慧可在包含太陽能、儲能系統及電動汽車 (EV) 充電裝置的住宅能源系統中，實現即時故障偵測與回應。
- 先進感測技術可區分正常電氣事件與危險狀況，避免不必要的中斷，並提升系統可靠性。
- 整合式保護架構結合精準量測、本地處理與連接能力，實現更安全、更高效的家庭能源管理。

簡介

在德州炎熱的夏日，一位屋主返家後，將電動汽車接上充電。太陽能板產生的電力超過住宅的用電需求，多餘的電力可用於為家用儲能系統充電，或回送至電網。當天稍早，洗碗機已依排程完成運轉，而空調系統則自動提升至最大運轉能力。

太陽能系統、儲能系統和電動汽車充電站等家用系統，單獨來看或許都十分常見且為人熟悉。然而，當這些系統彼此互動時，便會形成截然不同的家庭能源環境，其特性受到更高的電氣化負載、浮動電價、能源儲存及雙向電力流動影響。隨著高功率系統日益普及，家庭愈來愈需要更智慧的能源管理，以支援由聯網家電與分散式能源所構成的複雜電氣系統。這就是電氣化家庭。

電氣化家庭的牆內配線與屋頂等各處流通著更多電力，因此也伴隨更高的風險。隨著電氣化程度持續提升，保護系

統的容錯空間也隨之縮小。為了協助降低這些風險，工程師必須設計能夠精準感測、在本地分析系統狀況，並提供所需連線能力，以實現可視性與協同運作的系統。這類系統暴露了傳統保護與控制技術的侷限性。

工程挑戰

基於閾值的斷路器無法充分因應電氣化家庭中能源流動的變化性，以及依賴情境判斷的運作特性。能源管理系統必須整合多個功能領域，包括感測、訊號調整、資料轉換、處理與通訊；其中每個功能領域都必須在具電氣雜訊與高電壓的環境中可靠運作，而不會發生誤跳脫。

隔離與感測技術的進步，讓設計師能夠更安全地管理高電壓與高電流狀況，降低電氣危害風險，並提升住戶的系統保護能力。但過度敏感的保護機制，與保護不足同樣會造成干擾。

工程師面臨的挑戰，是設計能在靈敏度與選擇性之間取得最佳平衡的保護系統。誤跳脫是指保護裝置在不存在真正故障的情況下中斷供電，這類情況可能造成重大後續影響。提升故障分類能力，可讓系統更一致地區分瞬態事件與真正故障狀況，減少不必要的中斷，並提升住戶與服務提供者的系統可靠性。

要最佳化電氣化家庭，工程師必須觀察電力如何在各系統之間流動。**图 1** 顯示一個智慧斷路器解決方案範例，可在電路層級提供遠端負載管理、自動化與控制功能。高解析度量測技術可提供各負載與分散式能源來源中電壓、電流及系統行為的詳細資料。這種可視性可協助工程師提升故障偵測能力，進而做出更明智的保護、控制與能源管理決策。



图 1. 智慧配電盤解決方案可在電路層級提供遠端負載管理、自動化與控制功能

智慧型保護架構

在系統層級，電氣化家庭保護系統會持續循環執行以下三項動作：

- 偵測 — 高解析度感測可即時擷取電壓、電流及系統狀態。
- 分析 — 嵌入式處理會評估電氣特徵，以識別模式與異常。
- 回應 — 保護機制會採取適當措施，視情況隔離故障或維持系統運作。

連續感測與偵測

在偵測階段，高度動態環境中的保護系統必須持續運作，以即時量測涵蓋廣泛動態範圍的電壓與電流。降低延遲相當重要，因為偵測系統必須擷取並傳遞資訊，取樣與處理作業有時需在毫秒級內完成。

透過本地智慧進行分析

嵌入式處理讓保護系統能夠分析電氣行為，而不再是簡單回應固定閾值。這項差異至關重要，因為在電氣化家庭環

境中，電氣特徵往往難以僅靠確定性規則加以描述。在資料來源本地執行模式分析，可提高準確性，進而提升系統回應速度，同時降低核心安全功能對連接能力的依賴。德州儀器 (TI) 的 **CCStudio™ Edge AI Studio** 等設計工具可協助簡化從資料擷取和標示到模型評估和部署的流程。

自適應保護與系統回應

最後一個階段是回應。在傳統二進位系統模型中，當量測值超過指定閾值時，系統便會觸發跳脫。然而，電氣化家庭環境需要更精細的回應方式，而不只是單純中斷供電。這需要具備智慧保護能力的系統，能透過區分瞬態啟動電流與持續性故障來評估情境，同時辨識太陽能、儲能及 EV 充電系統中不同方向的電力流動（**图 2**）。這能實現更具選擇性的介入方式，並協助協調住宅內的負載平衡，在兼顧安全性的同時維持系統性能。



图 2. 智慧監控系統可確保雙向能源流動順暢運作，同時保護住宅免受故障與危害影響

系統整合：從感測到可視性

對電氣化家庭而言，涵蓋實體系統之外的可視性已成為確保可靠運作的基礎，而感測、處理與通訊的協同運作，則共同決定了系統性能。這些技術各自都能實現關鍵功能，但缺乏整合的設計會限制系統性能、擴充性及可靠性。唯有將這些技術整合為一致的端對端架構，才能充分發揮其價值。

TI 為此架構提供支援，產品涵蓋整個訊號鏈，包括感測、隔離、資料轉換、邊緣處理及連接能力。在感測路徑中，高精度類比與電能計量技術可協助設計師在寬動態範圍內精準擷取電壓與電流。接著，隔離裝置與訊號鏈裝置可協助維持在高壓域與低壓處理電路之間傳輸訊號的完整性。

設計師也可運用資料轉換與訊號調整技術，將電氣行為轉換為可供系統運用的資料，並透過邊緣嵌入式處理進行本地分析，以支援保護與控制功能。

智慧保護架構運作方式

在图 3 中，此流程從感測層開始，系統在此擷取電壓與電流等物理參數，並將這些量測值轉換為可代表系統運作狀態的電氣訊號。

接著，這些訊號會進入訊號調整階段，前端電路會對訊號進行放大、濾波與隔離，使資料即使在高電氣雜訊與高電壓環境下，仍能維持準確性與可用性。

訊號調整後，邊緣處理層會透過本地分析，將資料轉換為即時系統理解能力，以偵測模式、分類事件並標記異常狀況。

接著，通訊層會在子系統之間傳遞經處理的資訊，

並在需要時將資訊傳送至外部介面，使系統能支援協調、診斷與控制功能。

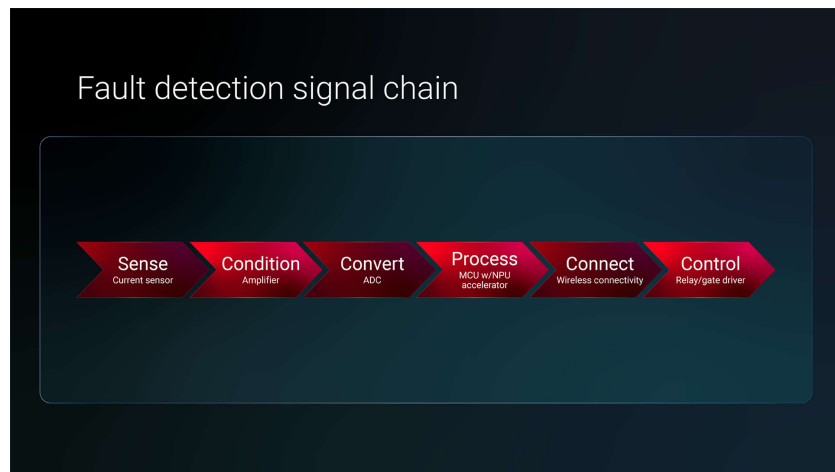


圖 3. 智慧保護架構的各個階段

智慧保護的核心組成元件

- 精密**類比轉數位轉換器**與**隔離式調變器**，可擷取電氣行為並轉換為可供系統運用的資料。
- 儀器放大器與訊號鏈裝置，可在高雜訊、高電壓環境中實現精準量測。
- 嵌入式處理裝置，例如 TI 的 **MSPM0G5187 微控制器** 搭配 **TinyEngine™ 神經處理單元**，可進行本機保護與控制分析。
- 有線與無線連線技術，支援跨子系統診斷、可視性及能源管理。

最後，有線與**無線連線技術**可協助在家庭能源各子系統或雲端介面之間傳輸相關資料，以支援診斷、可視性及能源管理等應用。

為什麼邊緣智慧如此重要

工程師必須設計電氣化家庭系統，使其能在本地即時做出重要安全決策，因為保護功能無法依靠雲端資源連線，也不能容忍潛在網路延遲造成的延遲。因此，工程師會設計系統，在邊緣分析量測資料並判讀電氣行為，以便立即採取適當的行動。

隨著住宅能源環境日益動態化，人工智慧 (AI) 的普及也讓邊緣處理更具可行性且功能更強大。家電啟動、馬達運轉及瞬態電流變化等正常運作事件，有時可能會呈現與故障狀況相似的特徵。邊緣 AI 可透過並行評估事件的多項特徵

來解決此問題，而非僅依賴固定閾值進行判斷。這可提升系統判斷事件是屬於預期行為，或是需要介入處理狀況的能力。

在電弧故障偵測等應用中，額外的情境資訊有助於區分危險事件與非危險事件。這可降低不必要中斷的發生頻率，使系統能更精準地回應，並提供更佳的使用者體驗。

住宅能源系統中的智慧保護

系統之間的互動定義了電氣化家庭，而設計師所遵循的架構原則並非僅停留於理論層面。這些原則已經影響住宅能源系統的設計，而設計師必須在日益複雜的環境中，兼顧安全性、效率與可靠性。

智慧型斷路器

配電盤正逐漸從被動式配電節點轉變為智慧化控制中心。智慧斷路器配電盤可作為系統的中央控制點，支援對系統元件進行遠端診斷與重設。

先進智慧電表

能源量測正從定期回報，轉向持續提供系統運作洞察。早期的智慧電表主要著重於自動抄表，而新一代智慧電表則能提供更細緻的運作洞察，讓使用者得以深入分析不同家電及不同時段的能源使用情況。

這種更高的可視性可同時帶來營運效益與使用者效益。電力公司能更有效地管理電網負載，而住戶也能更清楚瞭解家中各項系統的用電方式及用電時間。

更安全、更簡單的能源管理

住戶對智慧監測與保護的價值要求很簡單：更安心。在電氣化家庭中，太陽能、儲能系統、電動汽車充電裝置及各種連網負載彼此互動，因此保護系統必須具備精準感測、判讀情境及適當回應的能力，才能在避免不必要中斷的同時，讓家庭運作更安全、更可靠。

對建築商及系統設計師而言，隨著住宅能源系統日益複雜，這些能力有助於達成合規目標，並讓系統性能更加穩定且可預測。

當設計師對系統的自主監測與保護能力更具信心時，便能更放心地導入更高的充電速度、能源裝置之間更完善的協同運作，以及更先進的家庭能源管理功能。

結論

推動電氣化家庭發展的趨勢：電氣化、再生能源發電整合，以及系統智慧化提升，將在未來十年繼續延續。隨著住宅能源系統日益複雜，人工管理將變得越來越不切實際，也更加凸顯整合式架構與可靠、即時回應自動化的重要性。由於電氣化家庭具備高度動態與互聯的特性，精準感測、本地回應，以及在整個系統中整合智慧化能力，將成為建構更安全、更具韌性且更高效電氣化家庭的基礎，不僅如此，也能讓住戶更安心且擁有更大掌控權。

其他資源

- 閱讀公司部落格「[更智慧的斷路器，更安全的家園：能源豐沛住宅中的隱藏科技](#)」。

作者簡介

Brandon Kanter 是 TI 能源基礎設施部門的系統經理，專注於永續能源創新，涵蓋太陽能、電動汽車充電及智慧電網系統等領域。此前，他曾擔任電源管理積體電路事業的業務主管及應用經理，專注於工業與汽車應用。Brandon 畢業於肯塔基大學，取得電機工程學士學位及企業管理碩士學位。

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](#) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025