



Laboratoire Systèmes et
Applications des Technologies de
l'Information et de l'Energie

SATIE

Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie
n° 417: Génie électrique et électronique



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI SALERNO

Dipartimento di Ingegneria
dell'Informazione ed Elettrica e
Matematica Applicata

.DIEM

Dottorato di Ricerca, di Interesse
Nazionale in "Photovoltaics", Ciclo 38

Ph.D. Thesis

On-line diagnosis and optimization of Energy Management Systems for Smart Buildings

Luis Enrique Garcia Marrero

Supervisors

Prof. Eric Monmasson

Prof. Giovanni Petrone

Jury President: Prof. Mickael Hilaiet

Academic Year: 2024-2025

Abstract

This thesis presents an integrated framework for demand- and supply-side intelligence in smart-building Energy Management Systems (EMS) designed for deployment on resource-constrained edge-computing platforms. The demand-side research focuses on appliance load monitoring using the cost-efficient Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) approach. Current state-of-the-art NILM methods face limitations, including poor generalization to domain shifts and high computational requirements. Initially, a theoretical study of convolutional neural network-based NILM architectures is conducted, quantifying performance degradation under domain shifts through a first-order Taylor expansion and identifying the primary error sources that affect generalization. To solve this practical limitation, a novel training-less NILM framework is developed, combining a probabilistic appliance state model, dynamic programming for sequential updates, a lightweight base-load estimation module, and a population-based incremental learning algorithm. The proposed method operates in real-time, is robust to domain shifts, and eliminates the need for abundant appliance-specific training data.

The supply-side research focuses on model-based PV diagnostics, with a particular emphasis on enhancing parameter identification under real-world operating conditions. Current model-based methods for monitoring PV modules typically rely on the single-diode model (SDM) or its variants, assuming uniform operating conditions that are rarely achieved in real-world applications. When a PV module operates under mismatching conditions, estimating SDM parameters under the assumption of uniformity introduces errors that render the parameters unreliable for diagnostic purposes. As a first step, a multi-objective optimization framework is developed for the joint identification of parameters in static and dynamic PV models, integrating current-voltage (I-V) curve data with impedance spectroscopy (IS) measurements to produce physically meaningful parameter estimates. However, this approach is currently limited by its reliance on IS hardware, which is not yet sufficiently mature for online PV applications. To overcome this limitation, a self-adapting seven-parameter Double Single-Diode Model (D-SDM) is introduced,

which estimates parameters using only I-V data. A robust error function is proposed to isolate valid curve segments, and evolutionary algorithms are employed for parameter fitting, ensuring stable and accurate estimation under real-world operating conditions, while reliably detecting degradation phenomena such as increases in series resistance.

Finally, to demonstrate the practical feasibility of the technical advancements developed in this thesis, the NILM and PV diagnostic frameworks are deployed into a unified edge-computing platform capable of executing both tasks concurrently. The system is tested on a Raspberry Pi 4 running Home Assistant, an open-source platform widely used for home automation. All processing is performed locally on the edge device, and results are delivered through a single, integrated interface that ensures user privacy and ease of use. Experimental validation confirms that the platform maintains low latency, stable performance, and continuous operation while providing real-time demand- and supply-side monitoring. Furthermore, to support large-scale deployment of edge-based energy monitoring solutions, a commercialization strategy is proposed that combines local computation with optional cloud-based services such as accurate appliance modeling, forecasting, and automated insights. This strategy targets residential users, PV system owners, and professional installers, offering a scalable and cost-effective solution for real-time energy monitoring and management in smart buildings.

This thesis is conducted within the framework of the SMARTGYsum (SMART Green energyY Systems and bUsiness Models) research and training program. The main objective of this Innovative Training Network (ITN) is to establish a multidisciplinary and innovative framework that integrates academic and industrial expertise to train a new generation of Early Stage Researchers (ESRs) capable of advancing the European Green Energy Economy. SMARTGYsum specifically focuses on equipping ESRs with essential knowledge, methodologies, and practical skills across various disciplines related to the energy ecosystem. The program emphasizes the Renewable Electric Energy Systems (REES), aiming to support the development and consolidation of business models that facilitate the integration of renewable technologies into the energy system.

Abstract (Italian)

Questa tesi presenta un framework integrato per Sistemi di Energy Management (EMS) demand-side e supply-side in edifici intelligenti, progettati per l'implementazione su piattaforme edge con risorse limitate. Per quanto riguarda il demand-side, la ricerca si concentra sull'identificazione dei carichi elettrici utilizzando l'approccio basato sul Non-Intrusive Load Monitoring (NILM). I metodi NILM più recenti presentano limiti come la scarsa generalizzazione ai cambiamenti di dominio e l'elevato costo computazionale. Inizialmente viene condotto uno studio teorico sulle architetture NILM basate su reti neurali convoluzionali, quantificando il degrado delle prestazioni in presenza di cambiamenti di dominio mediante un'espansione di Taylor del primo ordine e identificando le principali fonti di errore. Per risolvere questo limite pratico, è stato sviluppato un nuovo framework NILM privo di fase di addestramento, che combina un modello probabilistico degli stati delle apparecchiature elettriche, aggiornamenti sequenziali con programmazione dinamica, un modulo per la stima della potenza di bias dovuta a carichi non-intermittenti e un algoritmo di apprendimento di tipo evolutivo. Il metodo funziona in tempo reale, è robusto ai cambiamenti di dominio e non richiede grandi quantità di dati specifici. L'attività riguardante il supply-side si concentra sulla diagnostica fotovoltaica basata su modelli, con particolare attenzione al miglioramento dell'identificazione dei parametri in condizioni operative reali. I metodi attuali per il monitoraggio dei moduli fotovoltaici si basano sul modello a singolo diodo (SDM) o sue varianti, assumendo condizioni uniformi che raramente si verificano nella pratica. Quando un modulo opera in condizioni non uniformi, stimare i parametri assumendo omogeneità introduce errori che li rendono inaffidabili per fini diagnostici. Come primo passo, è stato sviluppato un framework di ottimizzazione multi-obiettivo per l'identificazione congiunta dei parametri in modelli statici e dinamici, integrando curve corrente-tensione (I-V) con misurazioni dello spettro di impedenza (IS) di pannello per ottenere stime coerenti dal punto di vista fisico. Tuttavia, questo approccio è limitato dalla necessità di hardware dedicato per la misura IS. Per superare questa limitazione, è stato introdotto un modello

Doppio Singolo-Diodo (D-SDM) auto-adattante a sette parametri, che utilizza esclusivamente dati I-V. Una funzione di errore robusta seleziona i segmenti validi della curva, mentre algoritmi evolutivi eseguono il fitting dei parametri, garantendo stime stabili e accurate in condizioni reali, con rilevamento affidabile di fenomeni di degrado, come ad esempio l'aumento della resistenza in serie. Per dimostrare la fattibilità pratica degli algoritmi sviluppati in questa tesi, i framework NILM e diagnostica fotovoltaica sono stati implementati su una piattaforma edge unificata in grado di eseguire entrambi i compiti in parallelo. Il sistema è stato testato su Raspberry Pi 4 con Home Assistant, una piattaforma open-source ampiamente usata per l'automazione domestica. Tutto il processamento avviene localmente sul dispositivo edge, e i risultati vengono presentati tramite un'unica interfaccia integrata che garantisce privacy e facilità d'uso. La validazione sperimentale conferma bassa latenza, prestazioni stabili e monitoraggio continuo in tempo reale, ad esempio il consumo delle apparecchiature (demand-side) e il degrado della sorgente fotovoltaica (supply-side). Per supportare una diffusione su larga scala di soluzioni edge per il monitoraggio energetico, viene proposta una strategia commerciale che unisce il calcolo locale con servizi cloud opzionali come modellazione precisa degli elettrodomestici, previsione di produttività energetica e analisi automatizzate. Questa strategia è rivolta a utenti residenziali, proprietari di impianti fotovoltaici e installatori, offrendo una soluzione scalabile ed economica per il monitoraggio e la gestione energetica negli edifici intelligenti.