

# MODELLI INTELLIGENTI E TECNICHE DI CONTROLLO OTTIMIZZATE E SPIEGABILI NEGLI ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS PER LE COMUNITÀ ENERGETICHE RINNOVABILI

Antonello Rizzi, Enrico De Santis, Gianluca Ferro, Danial Zendehdel, Antonino Capillo  
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Elettronica e Telecomunicazioni

Università di Roma "La Sapienza"  
Via Eudossiana 18, 00184 Roma

Negli ultimi anni, l'evoluzione delle Comunità Energetiche Rinnovabili (REC) ha sollevato nuove sfide per i sistemi di gestione energetica (Energy Management Systems, EMS), specialmente in contesti gerarchici distribuiti. La crescente complessità delle architetture per microgrid e la necessità di decisioni tempestive ed efficienti spingono verso l'impiego di modelli di intelligenza artificiale avanzati, capaci non solo di ottimizzare i flussi energetici, ma anche di fornire spiegazioni comprensibili sulle scelte effettuate. In questa prospettiva si inserisce il nostro filone di ricerca, volto allo sviluppo di modelli EMS in grado di coniugare ottimizzazione multi-obiettivo, robustezza operativa e *explainability*.

Una prima direzione esplorata riguarda l'impiego di algoritmi di *Reinforcement Learning* avanzati, e in particolare il paradigma *Soft Actor-Critic* (SAC), per il dispatching ottimale delle batterie. Rispetto alle tradizionali formulazioni mono-obiettivo, si introduce una modellazione multi-obiettivo penalizzata attraverso moltiplicatori di Lagrange, al fine di bilanciare efficacemente tre criteri fondamentali, quali i) la minimizzazione dei costi, ii) il rispetto dello *State of Safety Reserve* (SSR) e iii) la durata della batteria. Il modello, validato su uno scenario realistico di microgrid con accumulo e produzione distribuita, mostra una capacità superiore nel mantenere la stabilità del sistema e nel garantire cicli di carica/scarica che preservano l'integrità delle batterie. Le *policy* ottimali apprese risultano più efficaci di quelle ottenute con SAC standard, in quanto guidate da un gradiente che internalizza la struttura del problema di ottimizzazione [1]. Un secondo asse di ricerca ha affrontato il problema della *spiegabilità* nei modelli predittivi e decisionali EMS, con un focus particolare sull'impiego delle Kolmogorov-Arnold Networks (KAN). Tali reti si distinguono dai tradizionali Multi-Layer Perceptrons per l'utilizzo di spline parametriche sui collegamenti neurali, rendendo possibile l'estrazione di funzioni composte esplicite che approssimano il comportamento del sistema. All'interno di un'architettura gerarchica REC-HEMS, si è progettato un modello basato su reti KAN ottimizzate mediante Algoritmi Genetici (KAN-GA), finalizzato alla minimizzazione dei costi operativi dell'intera REC. Il modello KAN, pur mantenendo alte prestazioni in predizione, consente l'estrazione di un equivalente modello semplificato ed interpretabile, basato su approssimazione delle funzioni *spline*, il quale riduce significativamente i costi computazionali in fase di inferenza, senza compromettere l'accuratezza [2].

L'architettura implementata prevede una fase di previsione tramite LSTM delle variabili chiave (produzione PV, consumo, stato di carica), seguita da una doppia ottimizzazione: prima locale, condotta autonomamente dai nodi microgrid, e successivamente globale, effettuata dal modulo HEMS centrale che sovrascrive le decisioni locali, se necessario. La rete KAN funge da motore inferenziale per questa seconda fase, generando decisioni ottimali per ciascun nodo. I risultati

evidenziano che il modello KAN ottimizzato (e la sua versione spiegabile) garantiscono errori inferiori al 10% rispetto alla soluzione ottima di riferimento, con un risparmio computazionale superiore al 900% nel caso del modello estratto [2].

Dal punto di vista metodologico, sono stati introdotti diversi elementi innovativi. In primo luogo, la procedura di quantizzazione dei coefficienti *spline* consente di codificare architetture KAN complesse in individui a lunghezza fissa per l'ottimizzazione genetica, migliorando l'efficienza del processo evolutivo. In secondo luogo, è stato implementato un sistema di *pruning* automatico che elimina le connessioni non significative mantenendo la continuità della rete. Infine, la procedura di verifica della continuità topologica garantisce che i modelli generati siano sempre computazionalmente validi. Complessivamente, questi due contributi convergono verso un modello di EMS avanzato, che coniuga la capacità adattativa e ottimizzante del *Reinforcement Learning* con la trasparenza e la leggibilità del paradigma KAN. In particolare, mentre l'algoritmo SAC potenziato introduce la capacità di intervenire in scenari multi-obiettivo con vincoli strutturati, il modello KAN-GA fornisce un'infrastruttura inferenziale esplicitabile e generalizzabile. Tale sinergia appare particolarmente promettente per l'applicazione in contesti reali, dove le esigenze di efficienza, robustezza e spiegabilità devono coesistere.

Alla luce di questi risultati, si aprono diverse prospettive di sviluppo. In particolare, dall'applicazione in tempo reale del modello KAN spiegabile, alla sua integrazione con sistemi fuzzy per la generazione automatica di regole interpretative, fino alla composizione modulare di modelli ibridi RL/KAN per il controllo predittivo distribuito nelle REC. In un contesto normativo e tecnologico in rapida evoluzione, la nostra ricerca si pone dunque come contributo metodologico per lo sviluppo di EMS intelligenti, sostenibili e trasparenti in linea con i dettami del PNRR.

- [1] D. Zendejdel, E. De Santis, A. Rizzi, «Multiple Objectives Battery Dispatching using an Enhanced SAC Algorithm», in *Proc. IEEE Int. Joint Conf. Neural Netw. (IJCNN)*, Rome, Italy, Jun. 30–Jul. 5, 2025.
- [2] A. Capillo, E. De Santis, A. Rizzi, «On a Fast and Explainable REC HEMS Based on Kolmogorov-Arnold Networks», in *Proc. IEEE Int. Joint Conf. Neural Netw. (IJCNN)*, Rome, Italy, Jun. 30–Jul. 5, 2025.
- [3] H. Nagpal et al., «Local Energy Communities in Service of Sustainability and Grid Flexibility Provision: Hierarchical Management of Shared Energy Storage», *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 13, no. 3, pp. 1523–1535, 2022.
- [4] E. Cutore et al., «Energy management and sustainability assessment of renewable energy communities: The Italian context», *Energy Convers. Manag.*, vol. 278, p. 116713, 2023.
- [5] Z. Liu et al., «KAN: Kolmogorov-Arnold Networks», arXiv:2404.19756, 2024.
- [6] T. Ji et al., «A comprehensive survey on Kolmogorov Arnold Networks (KAN)», arXiv:2407.11075, 2025.