

Ricerca di Sistema elettrico



Studio di Sistemi stazionari Ibridi per lo Stoccaggio – Elettrochimico e Termico – per l'integrazione efficiente delle fonti rinnovabili

Lorenzo Bartolucci, Stefano Cordiner, Vincenzo Mulone
Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Roma Tor Vergata



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Studio di Sistemi stazionari Ibridi per lo Stoccaggio – Elettrochimico e Termico – per l'integrazione efficiente delle fonti rinnovabili

L. Bartolucci, S. Cordiner, V. Mulone

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Roma Tor Vergata

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.2 – Progetto integrato Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico.

Linea di attività: LA 2.15

Responsabile del Progetto: Margherita Moreno, ENEA.

Responsabile del Work Package: Margherita Moreno, ENEA.

Responsabile Linea di Attività: Vincenzo Mulone, Università di Roma Tor Vergata

Mese inizio previsto: 18

Mese inizio effettivo: 18

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte

Indice

1	Risultati attesi	3
2	Risultati ottenuti	3
3	Analisi degli scostamenti su attività e risultati	5
4	Sintesi delle attività svolte	5
5	Dettaglio delle attività svolte	6
6	Pubblicazioni scientifiche.....	7
7	Eventi di disseminazione	7

1 Risultati attesi

L'attività LA 2.15, intitolata "Studio di Sistemi stazionari Ibridi per lo Stoccaggio – Elettrochimico e Termico – per l'integrazione efficiente delle fonti rinnovabili", si inserisce in un contesto di crescente necessità di decarbonizzazione dei sistemi energetici e di mobilità. I risultati attesi dell'attività possono essere sintetizzati come segue:

- **Sviluppo e validazione di strategie di controllo predittivo (MPC)** per la gestione della ricarica dei veicoli elettrici, con l'obiettivo di aumentare l'efficienza energetica e ridurre l'impatto ambientale, minimizzando il prelievo di energia da rete in fasce orarie a maggiore intensità di emissioni di CO₂.
- **Progettazione e dimensionamento di sistemi di accumulo ibridi elettrochimico-termici**, orientati all'integrazione ottimale con la produzione da fonti rinnovabili, al fine di massimizzare l'autoconsumo locale in contesti di comunità energetiche.
- **Valutazione comparativa dell'impatto ambientale delle tecnologie di accumulo** prese in esame, attraverso indicatori LCA come il Cumulative Energy Demand e i fattori di emissione CO₂eq per kWh.
- **Definizione di strategie di controllo congiunto per sistemi ibridi basate su algoritmi MPC**, che tengano conto dell'efficienza energetica complessiva e della massimizzazione della vita utile delle batterie mediante gestione termica integrata.
- **Analisi su casi studio realistici** per validare le soluzioni proposte in scenari rappresentativi di comunità energetiche, includendo carichi sia mobili (mobilità elettrica) che stazionari (elettrici e termici).
- **Identificazione di configurazioni ottimali per sistemi di accumulo integrati**, comprendenti batterie Li-ion e sistemi di accumulo termico TES – Thermal Energy Storage basati su calore sensibile o materiali a cambiamento di fase (PCM – Phase Change Materials).

2 Risultati ottenuti

Sviluppo e validazione di strategie di controllo predittivo (MPC)

È stato implementato un algoritmo MPC per la gestione ottimizzata dell'energia in una microgrid residenziale con sistemi di accumulo ibridi. Questo include la gestione dei flussi energetici di carichi elettrici, pompe di calore, accumuli elettrochimici e accumuli termici, su un orizzonte temporale di 12 settimane, con passo di 15 minuti. Le funzioni obiettivo miravano a minimizzare energia scambiata, costi o emissioni di CO₂. I metodi di risoluzione sono stati definiti a partire da MILP su Matlab/YALMIP con ottimizzatore Gurobi.

Progettazione e dimensionamento di sistemi di accumulo ibridi elettrochimico-termici

Il dimensionamento ottimale è stato eseguito per diverse combinazioni di taglia dell'accumulo elettrochimico (batterie da 0 a 75 kWh) e termico (TES da 0 a 3000 L), su tre impianti fotovoltaici da 31, 42 e 51 moduli. Sono state individuate configurazioni di saturazione oltre le quali i benefici marginali diventano trascurabili

Valutazione comparativa dell'impatto ambientale delle tecnologie di accumulo

È stato integrato un modello LCA semplificato per stimare:

- CO₂ equivalente associata all'energia da rete (basata su Electricity Maps).
- Emissioni legate a produzione/installazione di pannelli, batterie, TES e PCM.

I risultati mostrano un minimo ambientale ottenibile con batteria da 50 kWh e TES da 3000 L

Strategie di controllo integrate per sistemi ibridi

Le strategie MPC sono state definite in modo da consentire la gestione congiunta di sistemi di accumulo elettrochimico e TES, sfruttandone la sinergia. I principali risultati ottenuti a riguardo consentono di affermare come:

- Il TES consente di limitare lo stress operativo sulla batteria, aumentandone la durata utile (profilo del SoC più stabile nel tempo).
- Nel confrontare scenari con e senza TES, si ottiene una riduzione della potenza di picco prelevata dalla rete con il conseguimento di una maggiore efficienza energetica.

Analisi su casi studio realistici

Il caso studio si riferisce ad una microgrid residenziale simulata con dati realistici risalenti all'inverno 2021-2022. La microgrid simulata con modello fisico termico dettagliato implementato in Simulink per ciascun appartamento, considera 4 appartamenti con profili di carico generati tramite LPG- LoadProfileGenerator. La mobilità elettrica è stata simulata per 4 automobili con processo di ricarica lenta e veloce.

Identificazione di configurazioni ottimali per sistemi di accumulo integrati

Sono stati esplorati sistemi TES con PCM (Rubitherm RT44HC) per ridurre il volume rispetto all'accumulo con acqua. Sono stati ottenuti in sintesi i seguenti risultati:

- Con un serbatoio da 1000 L e 30% PCM, si ottengono prestazioni comparabili a un accumulo di acqua da 2000 L.
- Per l'ottimizzazione della CO₂, si ottiene una configurazione ottima per un volume compreso tra 1000 e 2000 L con PCM del 50%.
- Per il costo, il punto ottimale è a 1000 L e PCM del 50%.

3 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Integrazione tra storage elettrochimico e PCM: evoluzione da integrazione fisica a funzionale

La tecnologia a cambiamento di fase (PCM, Phase Change Material) è stata mantenuta all'interno delle attività previste, ed è stata oggetto di un'analisi approfondita. Tuttavia, rispetto alla pianificazione iniziale, è stata modificata la modalità di integrazione con il sistema di accumulo elettrochimico. Nello specifico, si è scelto di non proseguire con un'integrazione fisica diretta tra i due sistemi, a favore di una integrazione funzionale gestita tramite algoritmi di controllo predittivo (Model Predictive Control, MPC).

Tale scelta è stata motivata dai risultati delle analisi preliminari, che hanno evidenziato un potenziale di miglioramento limitato derivante dall'integrazione fisica, tale da non giustificare l'ulteriore sviluppo. Al contrario, l'approccio funzionale ha mostrato benefici significativi in termini di efficienza complessiva e di ottimizzazione nella gestione delle risorse energetiche, risultando più promettente e flessibile. I risultati di questa integrazione funzionale sono descritti in dettaglio nel report tecnico.

Ridefinizione del caso studio: scelta di un contesto residenziale per comunità energetica

Un'ulteriore variazione rispetto alle attività inizialmente pianificate ha riguardato la tipologia del caso studio. In luogo dei contesti precedentemente ipotizzati, il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Roma Tor Vergata o la sede ENEA Casaccia, è stato adottato un caso studio residenziale, rappresentativo del funzionamento realistico di una comunità energetica.

Questa decisione è stata guidata da due elementi principali:

- la maggiore disponibilità e qualità dei dati relativi al contesto residenziale, condizione necessaria per lo svolgimento di simulazioni affidabili e coerenti con gli obiettivi analitici del progetto;
- la maggiore rilevanza applicativa di tale scenario, che consente una migliore scalabilità e trasferibilità dei risultati ottenuti verso contesti reali di diffusione delle comunità energetiche.

Le modifiche sopra descritte non hanno in ogni caso alterato gli obiettivi complessivi della Linea di Attività, ma ne hanno altresì rafforzato la coerenza rispetto a scenari di applicazione più realistici, in piena sintonia con le finalità generali del progetto.

4 Sintesi delle attività svolte

Le attività hanno riguardato l'integrazione tra sistemi di accumulo elettrochimico e termico in riferimento a comunità energetiche, valutandone la configurazione ottimale e l'impatto ambientale. È stato implementato un algoritmo di controllo predittivo (MPC) per massimizzare l'autoconsumo e la durata delle batterie, evitando il prelievo di energia in fasce ad alta intensità di

CO₂. Il caso studio considerato consiste in una microgrid residenziale considerando carichi elettrici, termici e mobilità elettrica. L'integrazione funzionale tra batterie Li-ion e TES (acqua e PCM) ha mostrato benefici rilevanti in termini di efficienza, costi e parametri di sostenibilità. È stata inoltre condotta un'analisi LCA semplificata, evidenziando l'esistenza di configurazioni ottimali caratterizzate da ridotto impatto ambientale. Gli obiettivi sono stati pienamente raggiunti.

5 Dettaglio delle attività svolte

Il rapporto presenta i risultati dell'attività di ricerca volta a studiare e ottimizzare l'integrazione di sistemi di accumulo elettrochimici e termici in comunità energetiche, con particolare riferimento a contesti residenziali. Obiettivo dell'attività è la progettazione di sistemi ibridi capaci di massimizzare l'autoconsumo da fonti rinnovabili, ridurre l'impatto ambientale ed estendere la vita utile delle batterie, grazie all'impiego di strategie avanzate di gestione energetica basate su algoritmi di controllo predittivo MPC.

È stato adottato un approccio modellistico avanzato, attraverso la simulazione di una microgrid residenziale composta da quattro appartamenti dotati di pompe di calore, impianti fotovoltaici, batterie per accumulo elettrochimico (Li-ion) e serbatoi per accumulo termico (TES). Il sistema prevede anche la presenza di veicoli elettrici con possibilità di ricarica lenta ovvero veloce. I dati di consumo elettrico e termico sono stati generati con LoadProfileGenerator, mentre i modelli termici degli edifici sono stati rappresentati in modelli Simulink. La generazione fotovoltaica è stata modellata considerando i profili di radiazione reale, con riferimento geografico corrispondente all'area geografica di Roma.

L'algoritmo Model Predictive Control (MPC) è stato implementato in modo da formulare un problema di programmazione lineare intera mista (MILP), con orizzonte di previsione settimanale e passo temporale di 15 minuti. L'ottimizzazione può essere configurata per minimizzare energia scambiata con la rete, costi o emissioni di CO₂. I risultati mostrano come la gestione predittiva consenta di evitare il prelievo nei momenti ad alta intensità emissiva di CO₂, migliorando le caratteristiche di sostenibilità ambientale della microgrid.

Per quanto riguarda i sistemi di accumulo, sono stati studiati numerosi scenari variando la capacità della batteria (fino a 75 kWh) e del TES (fino a 3000 L). È stata inoltre condotta un'analisi LCA semplificata, considerando:

- l'energia primaria spesa per la produzione dei componenti (pannelli FV, batterie, TES);
- le emissioni di CO₂ equivalenti associate ai processi di produzione delle tecnologie;
- l'energia e le emissioni evitate grazie alla produzione di energia distribuita.

L'integrazione del sistema termico ha mostrato notevoli potenzialità sinergiche, soprattutto in merito al contenimento dei picchi di assorbimento elettrico e per la riduzione del danno da

invecchiamento della batteria. In particolare, si è osservato come l'adozione del TES consenta di stabilizzare il profilo di carico, riducendo lo stress operativo sulla batteria ed aumentandone di conseguenza la vita utile.

Si è inoltre valutato l'effetto dell'impiego di accumuli termici realizzati mediante PCM (Phase Change Materials). Il materiale selezionato (RT44HC) presenta una maggiore densità di stoccaggio rispetto all'acqua. Sono stati quindi studiati serbatoi ibridi (acqua + PCM), osservando l'ottenimento di configurazioni ottimali in termini di costi, volume e prestazioni ambientali.

Sono stati conseguiti tutti gli obiettivi prefissati, e in particolare:

- sono state individuate configurazioni ottimali dei sistemi ibridi di stoccaggio dell'energia;
- è stata dimostrata l'efficacia delle logiche di controllo MPC nell'aumentare autoconsumo e parametri di sostenibilità;
- è stato quantificato l'impatto ambientale attraverso indicatori LCA;
- sono state fornite raccomandazioni tecniche per la progettazione di sistemi integrati, replicabili in contesti reali in merito a comunità energetiche.

6 Pubblicazioni scientifiche

- Daniel Simion Gabriel. Ottimizzazione dei flussi energetici di una microgrid residenziale: effetto della funzione obiettivo sul dimensionamento e sul controllo, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica, Università di Roma Tor Vergata, 2024.

7 Eventi di disseminazione

- Vincenzo Mulone. Storing electrochemical and thermal energy: a case study for efficient use of renewables in domestic use. Nanoinnovation, 2023.
- Marco Donnini. Storing electrochemical and thermal energy: influence of design on performance parameters. Nanoinnovation 2024.