

## Abstract

### Italiano

La transizione energetica sta trasformando profondamente il settore elettrico, con le fonti rinnovabili in prima linea. L'energia fotovoltaica (PV) è un elemento chiave per la decarbonizzazione grazie alla sua modularità, scalabilità e ai costi in diminuzione. Tuttavia, la variabilità della produzione solare complica l'equilibrio tra domanda e offerta, aumenta il rischio di curtailment e richiede l'impiego di servizi ancillari per garantire la stabilità della rete. Previsioni accurate della produzione fotovoltaica risultano quindi essenziali per anticipare le fluttuazioni e consentire un funzionamento più affidabile del sistema.

Parallelamente alla crescente diffusione delle rinnovabili, è aumentato il fabbisogno di sistemi di accumulo energetico (ESS). Lo storage è cruciale per mitigare la variabilità della generazione fotovoltaica ed eolica, garantendo continuità dell'approvvigionamento e stabilità della rete. Sebbene le batterie agli ioni di litio dominino attualmente il mercato grazie alla loro efficienza e maturità tecnologica, le vanadium redox flow batteries (VRFB) stanno emergendo come alternativa promettente, in particolare per le applicazioni di lunga durata, dove il disaccoppiamento tra potenza ed energia offre una maggiore flessibilità. L'ottimizzazione del dimensionamento dello storage è quindi fondamentale per massimizzare le prestazioni e garantire la sostenibilità economica dei sistemi.

La presente tesi sviluppa un metodo integrato che combina previsioni avanzate della produzione fotovoltaica con lo sviluppo di un modello per l'ottimizzazione dei sistemi di accumulo a batteria, con un focus sulla tecnologia VRFB. Gli obiettivi principali sono: (i) la progettazione di modelli previsionali basati su gradient boosting (GBM) e lightGBM, arricchiti da strategie ibride di feature engineering; e (ii) lo sviluppo di un modello di ottimizzazione specificamente adattato alle caratteristiche delle VRFB per una valutazione tecnico-economica in sistemi ibridi rinnovabili.

Dal lato delle previsioni, l'approccio proposto utilizza metodi di ensemble learning per catturare pattern meteorologici non lineari ed è validato con dati storici e previsionali, enfatizzando la robustezza rispetto all'incertezza degli input. Dal lato dello storage, il modello di ottimizzazione incorpora caratteristiche chiave delle VRFB, come il disaccoppiamento tra potenza e capacità energetica. L'applicazione a un caso studio PV-wind consente di individuare la taglia ottimale e di effettuare un confronto con le batterie agli ioni di litio.

I risultati mostrano che previsioni accurate della produzione fotovoltaica permettono un utilizzo più efficiente dell'energia rinnovabile, mentre le VRFB si rivelano particolarmente competitive nelle applicazioni di lunga durata rispetto alle batterie agli ioni di litio. Nel complesso, l'integrazione di forecasting e ottimizzazione emerge come fattore chiave non solo per migliorare le prestazioni tecnico-economiche dei sistemi rinnovabili, ma anche per favorirne una diffusione più ampia, sostenibile e affidabile nei futuri sistemi energetici a basse emissioni di carbonio.

### Inglese

The energy transition is profoundly reshaping the electricity sector, with renewables at the forefront. Photovoltaic (PV) power is a key driver of decarbonisation thanks to its modularity, scalability, and falling costs. However, the variability of solar power complicates the balance between supply and demand, increases

the risk of curtailment, and necessitates the use of ancillary services to ensure grid stability. Accurate PV forecasting is therefore essential to anticipate fluctuations and enable more reliable system operation.

In parallel with the growing share of renewables, the need for energy storage systems (ESS) has increased. Storage is crucial to mitigate the variability of PV and wind generation, ensuring continuity of supply and grid stability. While lithium-ion batteries dominate the market for their efficiency and maturity, vanadium redox flow batteries (VRFB) are emerging as a promising alternative, particularly for long-duration applications where the decoupling of power and energy provides greater flexibility. Optimising the design and sizing of storage is therefore essential to maximise performance and ensure economic feasibility.

This thesis develops an integrated method that combines advanced PV forecasting with the development of a model for the optimisation of battery energy storage systems, focusing on VRFB technology. The two main objectives are: (i) the design of forecasting models based on gradient boosting (GBM) and lightGBM, enhanced with hybrid feature engineering strategies; and (ii) the development of an optimisation model tailored to VRFB technology for techno-economic assessment in hybrid renewable systems.

On the forecasting side, the proposed approach leverages ensemble learning to capture nonlinear meteorological patterns and is validated with historical and forecast weather data, emphasizing robustness to input uncertainty. On the storage side, the optimisation model incorporates key VRFB characteristics such as decoupled power and energy capacity. Application to a PV-wind case study enables optimal sizing and benchmarking against lithium-ion batteries.

Results show that accurate PV forecasting enables more efficient use of renewable energy, while VRFBs prove particularly competitive in long-duration applications compared to lithium-ion batteries. Overall, the integration of forecasting and optimisation emerges as a key factor not only for improving the techno-economic performance of renewable systems, but also for supporting their wider, sustainable and reliable deployment in future low-carbon energy networks.