

Abstract

L'attuale crescita dei sistemi fotovoltaici (PV) richiede strumenti diagnostici avanzati e modelli di simulazione per garantirne l'affidabilità a lungo termine. Tuttavia, la maggior parte degli approcci esistenti si concentra esclusivamente sul dominio statico o su quello dinamico, limitando la capacità di caratterizzare appieno il comportamento del sistema. Ad esempio, il modello a diodo singolo (SDM), il più ampiamente adottato, cattura efficacemente le caratteristiche in regime stazionario, ma non riesce a rappresentare il comportamento dinamico dipendente dalla frequenza richiesto per le applicazioni più performanti. Questa limitazione riduce la sua applicabilità nella progettazione e simulazione di convertitori elettronici di potenza, dove la modellazione dell'interazione dinamica tra la sorgente fotovoltaica e la circuiteria di interfaccia è necessaria, non solo per la valutazione a livello di sistema ma anche per un'analisi diagnostica robusta.

L'analisi dinamica è particolarmente preziosa, poiché rivela meccanismi di degradazione e guasti operativi nelle stringhe fotovoltaiche e nei relativi sistemi di accumulo di energia, fenomeni che risultano più evidenti nel dominio della frequenza. Tecniche come la Spettroscopia di Impedenza (IS) sono diventate indispensabili per la diagnostica delle batterie e stanno guadagnando riconoscimento come strumenti utili per la valutazione dei sistemi fotovoltaici. Tuttavia, l'assenza di un modello in grado di catturare sia il comportamento statico che quello dinamico limita lo sviluppo di queste tecniche diagnostiche. Framework di modellazione che integrino entrambe le risposte sono necessari per colmare questo divario e fornire una valutazione più approfondita delle prestazioni dei sistemi fotovoltaici in scenari operativi reali.

Questa tesi affronta le limitazioni delineate attraverso due contributi interconnessi. In primo luogo, introduce un modello fotovoltaico auto-adattativo che unifica il comportamento statico e dinamico all'interno di un unico framework compatibile con la simulazione. L'SDM avanzato proposto può riprodurre simultaneamente sia lo spettro di impedenza dipendente dalla frequenza che le proprietà in regime stazionario, integrando la formulazione semi-empirica del diodo di Berkeley nella struttura tradizionale dell'SDM. Per supportare questo modello, è stata sviluppata una robusta procedura di identificazione dei parametri, che consente l'estrazione di tutti i parametri richiesti da un set minimo di misurazioni elettriche. La validazione sperimentale in diverse condizioni operative, incluso l'ombreggiamento parziale, ha dimostrato la capacità del modello di prevedere

accuratamente fenomeni complessi senza la necessità di ricalibrazione.

Il secondo contributo di questo lavoro è l'analisi dell'utilizzo di convertitori elettronici di potenza come componenti di un sistema embedded per la diagnostica online. In questo contesto, la stima dello stato di salute (SoH) garantisce la stabilità della rete e la resilienza del sistema. Per fornire la diagnostica per i sistemi di accumulo di energia, la fase di investigazione è stata condotta in collaborazione con Bitron S.p.A. e ha comportato solo lievi modifiche a un convertitore di potenza esistente. La fattibilità del riutilizzo di convertitori di potenza commerciali è stata dimostrata in questa fase attraverso la corretta implementazione della Spettroscopia di Impedenza Elettrochimica (EIS) per batterie con valori compresi tra 100 mHz e 100 Hz. Dati sperimentali evidenziano che gli spettri di impedenza (IS) dei pannelli fotovoltaici spaziano solitamente da 10 Hz a 10 kHz. Ciò implica che i convertitori di potenza debbano essere opportunamente progettati per impiegare approcci IS sul lato fotovoltaico.

Per rispondere a questo requisito, è stata svolta un'attività di ricerca presso l'Universidad Rey Juan Carlos in Spagna per sviluppare un convertitore di potenza sincrono interleaved per la diagnostica fotovoltaica basata su IS. L'SDM avanzato è stato utilizzato per progettare e testare questo convertitore di potenza. La topologia del convertitore e la tecnica di controllo sono state affinate mediante simulazioni dettagliate per fornire segnali di eccitazione sinusoidali per stimoli IS accurati. La diagnostica è stata inclusa nella scheda di controllo del convertitore per misurazioni in situ. Insieme, questi contributi forniscono un framework validato sperimentalmente, che integra un modello fotovoltaico unificato con elettronica di potenza dedicata, per consentire una robusta diagnostica online per i sistemi fotovoltaici.

Abstract

The current growth of photovoltaic (PV) systems demands advanced diagnostic tools and simulation models to ensure long-term reliability. However, most existing approaches focus exclusively on either the static or the dynamic domain, limiting their ability to fully characterize system behavior. For instance, the single diode model (SDM), the most widely adopted, effectively captures steady-state characteristics, but it fails to represent the dynamic frequency-dependent behavior required for modern applications. This limitation reduces its applicability in the design and simulation of power electronic converters, where modeling the dynamic interaction between the PV source and the interfacing circuitry is necessary, not only for system-level assessment but also for robust diagnostic analysis.

Dynamic analysis is particularly valuable, as it reveals degradation mechanisms and operational faults in PV arrays and their associated energy storage systems, phenomena that are most evident in the frequency domain. Techniques such as Impedance Spectroscopy (IS) have grown indispensable for battery diagnostics and are gaining recognition as useful tools for PV system assessment. However, the lack of a model that can capture both static and dynamic behaviors limits the development of these diagnostic techniques. Modeling frameworks that incorporate both responses are necessary to close this gap and provide a more thorough assessment of PV system performance in real-world operating scenarios.

This thesis addresses the outlined limitations through two interconnected contributions. First, it introduces a self-adapting PV model that unifies static and dynamic behavior within a single, simulation-compatible framework. The proposed enhanced SDM can reproduce both the frequency-dependent impedance spectra and the steady-state properties at the same time by integrating the semi-empirical Berkeley diode formulation into the traditional SDM structure. To support this model, a robust parameter identification procedure was developed, allowing the extraction of all required parameters from a minimal set of electrical measurements. Experimental validation under diverse operating conditions, including partial shading, demonstrated the model's ability to accurately predict complex phenomena without the need for recalibration.

This work's second contribution is the analysis of using power electronic converters as a component of an embedded system for online diagnostics. In this context, estimation of the state of health (SoH) ensures grid stability and system resilience. To provide diagnostics for energy storage systems, the investigation phase was carried out in cooperation with Bitron S.p.A. and involved only minor modifications to an existing power converter. The viability of reusing commercial power converters was demonstrated at this phase by the successful implementation of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) for batteries with values ranging from 100 mHz to 100 Hz. The impedance spectra (IS) of PV panels, however, usually range from 10 Hz to 10 kHz, according to an extensive experimental campaign. This implies that power converters are necessary to employ IS approaches on the PV side.

To address this requirement, a research stage at Universidad Rey Juan Carlos in Spain was carried out to build on a synchronous interleaved power converter for IS-based PV diagnostics. The Enhanced SDM was used to design and test this power converter. The converter topology and control technique were refined using detailed simulations to provide sinusoidal excitation signals for accurate IS stimuli. Diagnostics were included in the converter's control board for in situ measurements. Together, these contributions provide an experimentally validated framework, integrating a unified PV model with dedicated power electronics, to enable robust online diagnostics for photovoltaic systems.