

Abstract

Effective monitoring and diagnostic strategies are fundamental to ensuring optimal operation and long-term reliability of photovoltaic systems. Electric monitoring methods, in particular current-voltage curve tracing and impedance spectroscopy, allow to accurately assess the performance and state of degradation of photovoltaic systems. However, state-of-the-art approaches based on module-level monitoring suffer from several limitations. Conventional current-voltage curve tracers require the shutdown of the photovoltaic plant and a long and costly string disassembly, negatively impacting the return on investment. Conversely, solutions based on impedance spectroscopy rely on bulky and expensive laboratory-grade instruments, confining this technique to indoor characterizations and hindering its applicability on-field.

This research aims to overcome these limitations by developing enhanced embedded electronic circuits capable of performing on-field and on-line electric measurements at the module level. The core objective is the design and realization of compact, low-cost hardware solutions that enable current-voltage curve tracing and impedance spectroscopy measurements under real operating conditions. Two complementary circuit topologies have been proposed and validated: a linear circuit based on bipolar junction transistors, allowing accurate current-voltage curve sweeping, and a switch-mode converter topology equipped with an energy storage system, enabling on-field impedance measurements across a wide range of frequencies.

The research further explores the modeling of both static and dynamic electrical behavior of photovoltaic modules. A detailed DC model has been formulated to reproduce current-voltage characteristics under varying irradiance and temperature conditions, with particular emphasis on bifacial technologies. The tool incorporates a novel irradiance modeling approach based on view factor analysis to account for albedo-induced mismatch losses. Additionally, a dynamic equivalent circuit model has been developed to interpret impedance data, capturing the frequency-dependent response of photovoltaic modules and enabling accurate fault identification.

Overall, this work contributes to the advancement of module-level monitoring and diagnostic methodologies by integrating innovative design strategies of

circuits with improved modeling tools.

Keywords: photovoltaic, monitoring and diagnosis, current-voltage curve tracing, impedance spectroscopy, DC model, bifacial modules, dynamic model

Sintesi in lingua italiana

Le strategie di monitoraggio e diagnostica sono fondamentali per garantire il funzionamento ottimale e l'affidabilità a lungo termine dei sistemi fotovoltaici. Le tecniche di monitoraggio di tipo elettrico, in particolare il tracciamento della caratteristica corrente-tensione e la spettroscopia di impedenza, consentono di valutare le prestazioni e lo stato di degradazione dei sistemi fotovoltaici. Tuttavia, gli approcci allo stato dell'arte basati sul monitoraggio a livello di modulo presentano ancora svariate limitazioni. I tracciatori di caratteristiche corrente-tensione convenzionali richiedono lo spegnimento dell'impianto fotovoltaico e un lungo e costoso smontaggio della stringa, causando un impatto negativo sulla redditività operativa. Al contrario, le soluzioni basate sulla spettroscopia di impedenza richiedono l'uso di ingombranti e costosi strumenti da laboratorio che ostacolano l'applicazione di tale tecnica sul campo. L'attività di ricerca svolta si propone di superare tali limitazioni attraverso lo sviluppo di circuiti elettronici avanzati in grado di eseguire misure elettriche sul campo a livello di modulo durante il funzionamento normale dell'impianto fotovoltaico. L'obiettivo principale è la progettazione e la realizzazione di soluzioni hardware compatte e a basso costo, capaci di effettuare il tracciamento della curva corrente-tensione e implementare la tecnica di spettroscopia di impedenza in condizioni operative reali. Sono state proposte e validate due topologie circuitali complementari: un circuito lineare basato su transistori bipolari per il tracciamento della curva corrente-tensione, e un circuito basato sulla topologia di convertitore a commutazione dotato di un sistema di accumulo energetico, che permette l'esecuzione di misure di impedenza in campo su un ampio intervallo di frequenze.

La ricerca approfondisce inoltre la modellazione del comportamento elettrico statico e dinamico dei moduli fotovoltaici. È stato sviluppato un modello in corrente continua in grado di riprodurre le caratteristiche corrente-tensione al variare dell'irradianza e della temperatura, con particolare attenzione alle tecnologie bifacciali. Lo strumento integra un innovativo approccio di modellazione dell'irradianza basato sull'analisi dei fattori di vista, per modellare le perdite da mismatch indotte dall'albedo. Inoltre, è stato elaborato un modello circuitalo dinamico per l'interpretazione dei dati di impedenza, capace di descrivere la risposta in frequenza dei moduli fotovoltaici e consentire l'identificazione accu-

rata dei guasti.

Nel complesso, questo lavoro contribuisce all'avanzamento delle metodologie di monitoraggio e diagnostica a livello di modulo, integrando lo sviluppo di soluzioni hardware con strategie di modellazione avanzati.

Parole chiave: fotovoltaico, monitoraggio e diagnosi, tracciamento della curva corrente-tensione, spettroscopia di impedenza, modello dc, moduli bifacciali, modello dinamico