



UNIVERSITÀ DEGLI  
STUDI DI SALERNO

## **Facoltà di Ingegneria**

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione ed Elettrica e Matematica Applicata

Dottorato di Ricerca in Ingegneria dell'Informazione  
XIV Ciclo – Nuova Serie

TESI DI DOTTORATO

# **Control Issues in Photovoltaic Power Converters**

CANDIDATO: **MASSIMILIANO DE CRISTOFARO**

COORDINATORE: **PROF. MAURIZIO LONGO**

TUTOR: **PROF. NICOLA FEMIA**

CO-TUTOR: **PROF. GIOVANNI PETRONE**

Anno Accademico 2014 – 2015

Lo sviluppo di questo lavoro di tesi è nato dalla cooperazione tra il *Power Electronics and Renewable Sources Laboratory* dell'Università degli Studi di Salerno e l'azienda *ABB Solar Group (ex Power-One)* di Terranuova Bracciolini (AR), Italia. Lo scopo è investigare problemi di controllo nei sistemi fotovoltaici (PV) in quanto il progetto di tali sistemi, nello scenario evolutivo attuale, non è completamente definito. Tale azienda ha evidenziato un grande interesse nello sviluppare nuove tecniche di controllo tali da ottenere prestazioni statiche e dinamiche superiori rispetto le tecniche attualmente impiegate nei loro sistemi, nell'analizzare nuovi scenari dovuti all'inserzione di sistemi distribuiti di generazione di potenza (DPGSs) nella rete e nell'ottimizzare gli attuali metodi per estrarre la massima potenza da una sorgente fotovoltaica con l'obiettivo finale di incrementare le prestazioni di sistemi PV ad ogni livello, sistema, rete e circuito. Questi argomenti, oltre ad essere di interesse per il mondo industriale, hanno anche un grande impatto nel settore scientifico e tecnologico di appartenenza.

A livello sistema, un migliorato controllo Dead Beat (DB) basato su una tecnica di *Observe&Perturba (O&P)* è sviluppato con lo scopo di avere prestazioni statiche e dinamiche superiori al largamente utilizzato, anche da *ABB Solar Group*, controllo Proporzionale Integrale (PI). L'idea dell' *O&P* è di perturbare le leggi di controllo del sistema con i valori  $\Delta V_d$  e  $\Delta V_q$ , ad un tempo fisso  $T_a$ , per ottenere errori medi di tracciamento nulli mantenendo la veloce dinamica del controllo DB. Più grandi sono tali errori medi e più grandi dovranno essere le perturbazioni  $\Delta V_d$  e  $\Delta V_q$ . Le condizioni per la determinazione dei parametri  $T_a$ ,  $\Delta V_d$  e  $\Delta V_q$  sono fornite imponendo che tali parametri non incidono sulla stabilità del sistema. Come caso studio, un *Neutral Point Clamped (NPC)* inverter nel frame dq frame, basato sull' inverter *AURORA ULTRA* di *ABB* è considerato. Un confronto tra i controlli PI, DB, Integrale+DB (I+DB) e l'*O&P* DB è effettuato tramite simulazioni eseguite da un dedicato tool scritto in linguaggio C++. I risultati simulativi, prendendo come ingresso dati reali presi dalla rete Indiana mostrano che il controllo *O&P* DB ha la stessa veloce dinamica del DB, superiore al PI, e ha anche errori medi di tracciamento nulli mentre il PI ha gli stessi errori nulli ma presenta una dinamica più lenta. I controllori DB e l' *I+DB* hanno dinamiche superiori al PI ma non hanno errori medi di tracciamento nulli. Quindi il controllo *O&P* DB mostra le migliori prestazioni sia statiche che dinamiche. In presenza di mismatch nel modello, il controllo *O&P* DB mantiene ancora gli errori medi di tracciamento nulli, ma la dinamica inizia a rallentare. Tuttavia, come mostrato nei risultati simulativi, tale mismatch deve essere consistente, per esempio il mancato feedforward della tensione di rete, per impattare effettivamente la dinamica. Sia il metodo *O&P* DB che il tool di simulazione sono molto generali in grado di essere applicati a tutti i convertitori e non solo agli inverter NPC. Il controllo *O&P* DB è anche implementato sul microcontrollore ( $\mu c$ ) *F28379D* della *Texas Instruments* per verificare la sua fattibilità, con tutti i suoi componenti, ossia l'algoritmo *O&P*, il controllo e la modulazione, su un unico sistema embedded e i risultati delle simulazioni con il tool e con il  $\mu c$  sono uguali rendendo il controllo *O&P* DB adatto per sistemi digitali. Questa implementazione su  $\mu c$  è stata eseguita presso lo sede della *Texas Instruments* di *Freising*, in Germania.

A livello di rete, viene analizzato uno scenario critico composto da uno *Smart Transformer (ST)*, alcuni carichi e alcuni *DPGSs* direttamente collegati al lato bassa tensione dello *ST*. L'analisi del sistema richiede che i carichi e i *DPGSs* siano adeguatamente modellati e il modello più utilizzato, per gli studi del sistema di potenza statici, è un carico a potenza costante (*CPL*) in quanto convertitori di potenza e motori, quando regolati bene, si comportano come carichi a potenza costante. La caratteristica principale di un *CPL* è quella di presentare un'impedenza negativa per l'analisi a piccolo segnale che può influenzare la stabilità del sistema. Il caso

peggiore per la stabilità è quando il carico presenta solo CPL. Quindi, è analizzato un sistema trifase con un Voltage Source Inverter (VSI), un filtro LC che rappresenta lo stadio di uscita dello ST, una sorgente DC rappresentante lo stage di uscita DC dello ST, il CPL, il controllore e il modulatore PWM. L'obiettivo è quello di verificare se è possibile utilizzare i controllori normalmente progettati per sistemi stabili, proporzionali e P+Risonanti, anche quando il sistema è instabile o se è necessario avere un sistema stabile per utilizzare tali controllori. Tale risultato è molto interessante per aziende come il ABB Solar Group, in quanto implementano ampiamente questi controllori nei propri sistemi. Questa indagine ha posto le basi per tutte le future opere per DPGS con CPL, perché si dimostra che non è possibile utilizzare un controllo con un doppio-loop, in quanto il sistema a circuito chiuso è sempre instabile e che il sistema deve essere stabile con l'azione del filtro LC, per un controllo a singolo-loop, per utilizzare questi controllori in quanto non è possibile stabilizzare il sistema tramite il loro utilizzo. Le condizioni di stabilità sono determinate e dipendono principalmente dal rapporto  $L_f/C_fR_c$  dove  $L_f$  è l'induttore del filtro,  $C_f$  il condensatore di filtro e  $R_c$  la resistenza di smorzamento. Questo rapporto deve essere inferiore alla resistenza equivalente del CPL per avere un sistema stabile. L'analisi di un sistema con un CPL è stata sviluppata in collaborazione con il Chair of Power Electronics dell'Albrechts-Universität zu Kiel, Germania.

A livello circuitale, è presentato un nuovo metodo per determinare il periodo di campionamento  $T_{MPPT}$  e l'ampiezza della perturbazione del duty-cycle  $\Delta D$  per ottimizzare i metodi esistenti per estrarre potenza da una sorgente fotovoltaica. Tale metodo realizza l'adattamento in real time del controllo P&O MPPT con un minimo sforzo computazionale per massimizzare l'energy harvesting del sistema fotovoltaico rispetto ai cambiamenti dell'irradiazione solare, della temperatura, delle caratteristiche della sorgente fotovoltaica e da tutto il sistema di cui fa parte la sorgente fotovoltaica. Si è utilizzata la correlazione esistente tra l'efficienza dell'MPPT e l'inizio di un'oscillazione permanente di 3 livelli quantizzati intorno all'MPP. Questa proprietà universale della tecnica P&O MPPT permette di ottenere un setup ottimo, solo attraverso 2 contatori, nell'implementazione di tale tecnica sui microcontrollori evitando così calcoli su quantità misurate e l'uso di metodi e modelli sofisticati. Un confronto tra tale algoritmo e un esistente adattativo evidenzia che esibiscono gli stessi risultati in termini di energy harvesting ma che il proposto algoritmo presenta un'implementazione leggermente più semplice poiché utilizza solo 2 contatori con la possibilità di rilassare l'adattamento  $\Delta D$  attraverso i 2 valori  $N_n$  e  $N_p$  mentre l'altro metodo utilizza un vettore. Quindi è stata utilizzata come caso studio una applicazione composta da diversi tipi di controllo e un microcontrollore F28069 della Texas Instruments, lo stesso usato da ABB Solar Group nei suoi inverter, per implementare tale algoritmo di controllo adattativo, un LED driver dimming e un controllo della tensione di bulk per un prototipo di sistema LED lighting da 70W alimentato da un pannello fotovoltaico. I risultati sperimentali mostrano le buone prestazioni dell'architettura integrata proposta, utile per l'implementazione su microcontrollori di basso costo. Il metodo proposto può essere applicato a tutti i sistemi digitali in quanto non è legato alla specifica implementazione.