

# Analisi sperimentale di distorsione armonica in carichi elettronici e di comportamento dinamico di batterie LiFePO<sub>4</sub> per determinare il loro circuito equivalente

Matteo Barbero

Relatori: Prof. Spertino Filippo, Prof. Ciocia Alessandro

## Introduzione

La presente tesi si inserisce nell'ambito delle attività di ricerca e sperimentazione condotte presso il laboratorio PVZEN del Politecnico di Torino, una microrete dedicata allo studio integrato della generazione fotovoltaica, dei sistemi di accumulo elettrochimico e della gestione intelligente dei flussi energetici. L'obiettivo del lavoro è stato, attraverso un approccio sperimentale, caratterizzare le forme d'onda, analizzare la qualità dell'energia in un punto dell'impianto e fornire un modello dinamico del sistema di accumulo installato nel laboratorio.

## Sviluppo della tesi

Il progetto si sviluppa su più fasi complementari tra loro: ogni fase comprende la progettazione e l'implementazione di un setup di misura dedicato, l'acquisizione sperimentale dei dati, l'analisi dei risultati ottenuti, ed infine la modellazione dei fenomeni osservati mediante software di calcolo (Matlab) e simulazione (Simulink, LTspice). Questa struttura ha contribuito a costruire un percorso di lavoro coerente, tra sperimentazione reale e modellazione numerica, garantendo una descrizione accurata del comportamento elettrico e dinamico dei sistemi analizzati.

### Analisi sperimentale e setup di misura

Nella prima fase è stato realizzato un setup di misura ad alta risoluzione, specificamente progettato per il monitoraggio delle tre linee che alimentano gli emulatori di carico elettronici del laboratorio. Questi carichi, di natura resistiva e controllabili via software, sono impiegati per simulare il comportamento elettrico di edifici o utenze reali in condizioni variabili di funzionamento. Le misure sono state condotte utilizzando strumentazione ad alta frequenza di campionamento (25.6 kSa/s), garantendo un'elevata risoluzione temporale dei segnali acquisiti. Impostando una finestra temporale corrispondente a 10 periodi (0.2 s), sono stati acquisiti i segnali di tensione e corrente per ciascuna linea, come illustrato in Figura 1, consentendo una caratterizzazione accurata delle forme d'onda. Successivamente, gli stessi dati sono stati elaborati nel dominio della frequenza tramite la Fast Fourier Transform (FFT) per identificare le principali componenti armoniche e inter-armoniche, le distorsioni e i contributi di rumore (Figura 2). Parallelamente, è stata condotta un'analisi di potenza in regime non sinusoidale, e sono stati calcolati i coefficienti di distorsione armonica totale (THD), la potenza attiva, reattiva e distorta, al fine di valutare in modo quantitativo l'impatto degli emulatori di carico sul comportamento complessivo della rete.

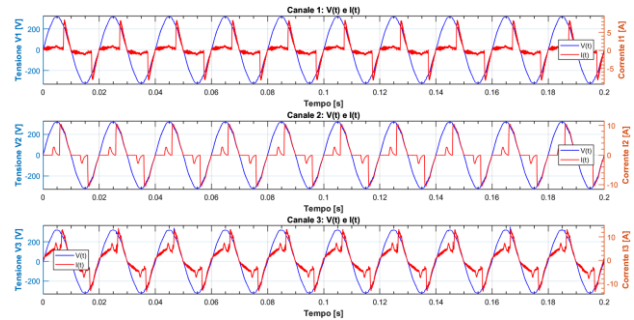


Figura 1: Forme d'onda di tensione e corrente acquisite sulle 3 linee di alimentazione ai carichi emulati

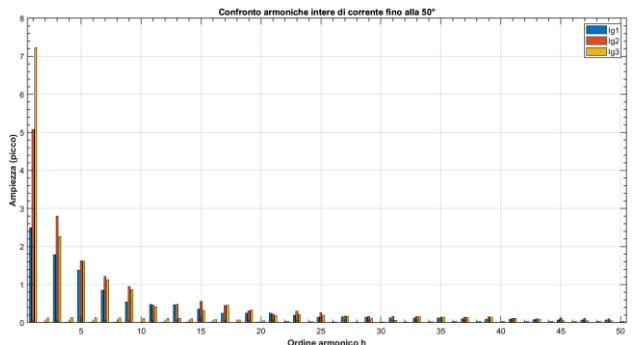


Figura 2: Spettro armonico della corrente dei 3 canali

### Validazione sperimentale e confronto con Asita

Nella seconda fase del lavoro è stata condotta una campagna di acquisizione prolungata di dati utilizzando l'oscilloscopio in modalità *datalogger*. Tale analisi ha permesso di verificare il comportamento e l'evoluzione dei parametri elettrici in un arco temporale esteso, e di valutare relazioni reciproche tra potenza attiva (P), fattore di potenza ( $\cos\phi$ ) e THD registrate dall'oscilloscopio. Le relazioni ottenute sono riportate in Figura 3. Successivamente, un confronto sistematico tra le misure ottenute con l'oscilloscopio in modalità *datalogger* e quelle registrate dal sistema di monitoraggio Asita, già installato nel laboratorio, ha permesso di validare l'affidabilità metrologica del sistema di acquisizione installato e di verificarne la coerenza.

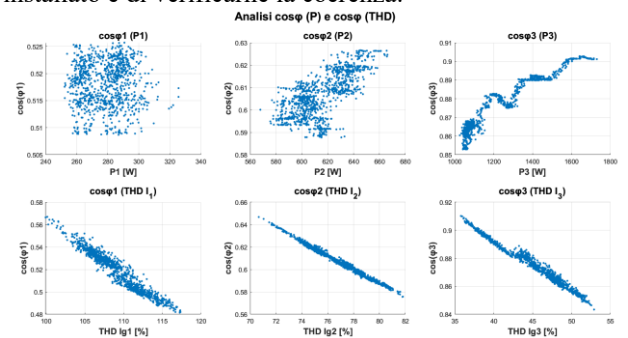


Figura 3: Relazioni  $\cos\phi$  vs P e  $\cos\phi$  vs THD<sub>i</sub>

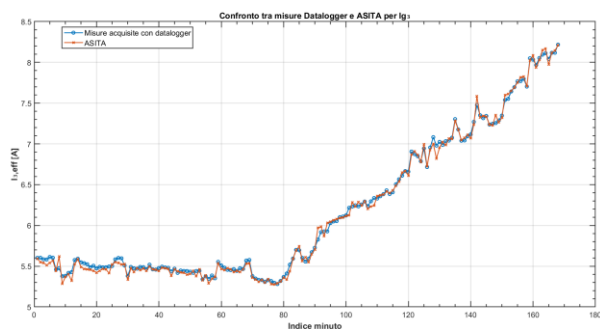


Figura 4: Confronto della corrente (Asita e datalogger)

In Figura 4 è riportato il confronto sui valori efficaci di corrente in una delle linee monitorate, in un intervallo temporale di circa tre ore.

### Modello dinamico della batteria e validazione

Il lavoro si è concluso con la modellazione dinamica di una delle batterie al litio-ferro-fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ), installate nella microrete del PVZEN. Il comportamento della batteria è stato valutato durante un transitorio di carica impulsiva di un condensatore, utilizzato come carico. I dati ottenuti sono stati utilizzati per sviluppare un modello equivalente accurato e validato sperimentalmente. L'acquisizione dei dati è stata realizzata mediante la *setup* di misura mostrato in Figura 5, progettato per acquisire con elevata risoluzione temporale i segnali di tensione e corrente durante il transitorio. Sono state realizzate più prove con condensatori di diverse capacità (390  $\mu\text{F}$ , 1000  $\mu\text{F}$  e 10 mF), collegandoli alla batteria attraverso un blocco di interfaccia dotato di selettori e interruttori. Sulla base dei dati acquisiti è stato costruito il circuito equivalente del sistema e sono stati stimati i parametri elettrici equivalenti del sistema batteria-circuito, in particolare resistenza interna, induttanza parassita e capacità distribuita della batteria. Come primo step, utilizzando il software di simulazione LTspice, è stato realizzato il circuito equivalente riportato in Figura 6, in grado di riprodurre una risposta qualitativamente coerente con le acquisizioni, al fine di stimare l'ordine di grandezza dei parametri del circuito (resistenze dei cavi, parametri della sonda, induttanza e componenti parassite). In seguito, a partire dai segnali acquisiti con l'oscilloscopio digitale, è stata condotta un'analisi nel dominio del tempo per la stima dei parametri caratteristici di un circuito RLC del secondo ordine, identificando le costanti di smorzamento, le pulsazioni naturali e smorzate, nonché il comportamento sottosmorzato del sistema nelle condizioni operative. Queste informazioni hanno fornito le basi per la modellazione analitica della batteria, rappresentata come una sorgente ideale di tensione in serie alla resistenza interna, all'induttanza equivalente e alla capacità parassita.

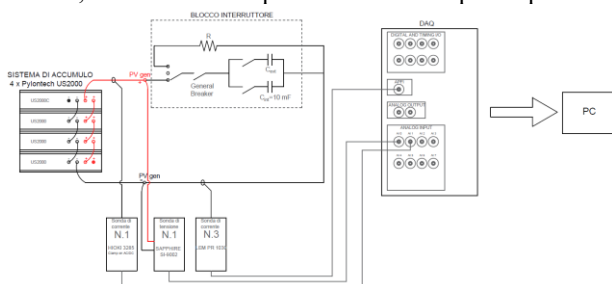


Figura 5: Schema di misura

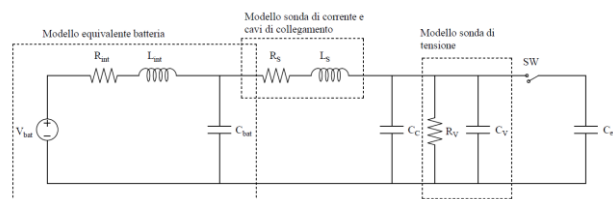


Figura 6: Circuito equivalente del comportamento dinamico degli accumulatori al litio

Il modello è stato poi validato in Simulink, con l'obiettivo di riprodurre fedelmente le forme d'onda sperimentali. La correttezza dei parametri equivalenti ottenuti è stata verificata anche attraverso la simulazione di transitori più lenti, tipici di scariche RC, smorzando il circuito di misura con una resistenza esterna (1  $\Omega$ ). Infine, è stata costruita la caratteristica statica  $V(I)$ , ottenendo una relazione lineare tra tensione e corrente nel circuito sovrasmorzato.

### Conclusioni

In conclusione, il lavoro svolto ha permesso di validare un setup di misura ad alta risoluzione dedicato all'analisi della qualità della potenza nelle linee che alimentano gli emulatori di carico del laboratorio PVZEN, garantendo l'acquisizione accurata dei segnali elettrici e la valutazione dei principali indici di *power quality*. Dall'analisi dei risultati è emerso che i segnali di tensione presentano un andamento pressoché sinusoidale, con distorsione armonica molto ridotta, indice di una buona qualità della rete locale. Al contrario, le correnti assorbite dagli emulatori di carico mostrano forme d'onda fortemente distorte, con un elevato contenuto armonico dovuto alla natura dei carichi elettronici, i quali, in funzione della potenza richiesta, interrompono e ritardano la conduzione del segnale sinusoidale. In alcune condizioni operative, il THD delle correnti ha raggiunto valori anche superiori al 100 %, evidenziando un comportamento non lineare, tipico dei carichi controllati staticamente. In linea generale, all'aumentare della potenza richiesta dal carico, la distorsione armonica della forma d'onda di corrente tende a diminuire. È stata inoltre verificata e confermata l'affidabilità, la robustezza e la ripetibilità delle misure degli strumenti commerciali Asita, installati nei quadri, attraverso il confronto con le misure acquisite dall'oscilloscopio digitale in modalità *datalogger*. Tuttavia, sono emerse differenze significative nel calcolo delle armoniche, dovute alla diversa metodologia di acquisizione e analisi dei due sistemi. Parallelamente, è stato sviluppato un modello dinamico accurato della batteria al litio-ferro-fosfato, capace di riprodurre con elevata fedeltà i fenomeni transitori e le interazioni tra batteria e carico, fornendo così un valido strumento per l'analisi e la previsione del comportamento reale. Mediante l'integrazione di approccio sperimentale, validazione metrologica e modellazione fisica, questo lavoro ha offerto una metodologia completa per lo studio e la caratterizzazione di sistemi elettrici ed energetici. Tale contributo rappresenta un passo significativo per l'evoluzione di laboratori come il PVZEN, dove la sinergia richiesta tra sperimentazione e simulazione costituisce la base per lo sviluppo di sistemi intelligenti e avanzati.