

# Power Hardware In The Loop per Generatori Eolici

## Realizzazione e test del set-up sperimentale dell'emulatore di turbina eolica

Candidato: Luca RAGUSA

Relatore: Dott. Fabio MANDRILE

Correlatore: Dott. Sandro RUBINO

**Abstract**—La necessità crescente di ottimizzare le tecnologie legate alle risorse rinnovabili richiede uno studio sempre più accurato dei sistemi di generazione impiegati. Per questo motivo il lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la creazione in laboratorio un sistema eolico completamente funzionante tramite il concetto di Power Hardware in the Loop (P-HiL). La turbina eolica è stata emulata da un azionamento industriale, accoppiato ad un generatore sincrono ed al blocco di conversione a piena potenza per poter immettere energia in rete. In questo modo sono state osservate le caratteristiche reali del sistema eolico, identificando gli aspetti su cui agire per perfezionare la generazione, ad esempio algoritmi di Maximum Power Point Tracker (MPPT) e miglioramento della power quality.

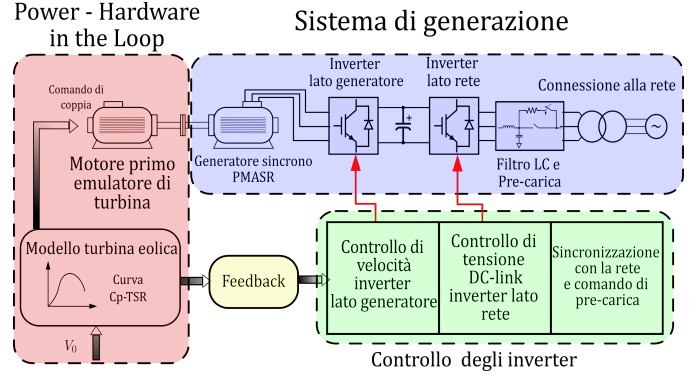


Figura 1: Schema generale del sistema di generazione eolica implementato in laboratorio.

### I. INTRODUZIONE

Lo sviluppo delle risorse rinnovabili è una tematica che ormai da più di cinquant'anni assume un rilievo sempre maggiore nella società mondiale. Guardando al futuro si prevede l'elettrificazione maggioritaria dei consumi energetici e per questo motivo le attenzioni e gli studi su risorse come fotovoltaico ed eolico, risultano più intensi ed accurati. Proprio per ragioni di accuratezza e di analisi del reale comportamento del sistema di generazione eolica, l'obiettivo di questa tesi è lo studio sperimentale di una turbina riprodotta in laboratorio con un sistema di P-HiL. Questo sistema permette di eseguire in tempo reale il modello meccanico di una turbina eolica e applicare, tramite un motore primo, una coppia all'albero su cui è calettato il generatore eolico. Quest'ultimo si interfaccia alla rete tramite due inverter connessi in configurazione back-to-back ai quali viene applicato un controllo specifico per il tipo di configurazione di generazione utilizzata. Lo schema operativo seguito è rappresentato in Fig. 1.

### II. MODELLIZZAZIONE DELLA TURBINA EOLICA

La realizzazione di un modello analitico di turbina eolica è tale da avere in ingresso la velocità del vento e la velocità di rotazione della turbina e come output la coppia generata all'albero. A seguito di un ampio studio bibliografico sullo stato dell'arte delle turbine eoliche ad asse orizzontale e sui metodi di modellizzazione è stato individuato il parametro chiave che determina la caratteristica di coppia, ovvero il *Coefficiente di Potenza*  $C_p$ . Questo è un numero adimensionale legato alla coppia secondo la seguente relazione:

$$T_{turbina} = \frac{P_{vento}}{\omega_{turbina}} \cdot C_p$$

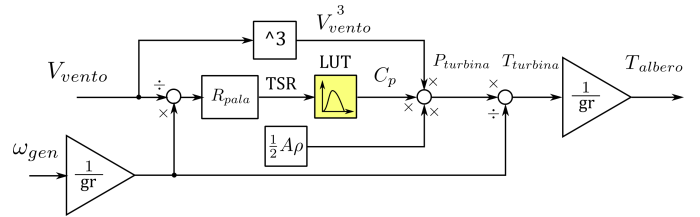


Figura 2: Schema a blocchi della turbina eolica.

Il  $C_p$  ha un andamento non lineare che dipende da diversi fattori costruttivi della pala e può essere calcolato secondo diversi metodi. Per farlo ho scelto il metodo BEM (Blade Element and Momentum) che si basa sulla teoria fluidodinamica applicata alle pale delle turbine eoliche e permette di realizzare sia il dimensionamento della turbina, che la caratteristica del  $C_p$ . Il risultato ottenuto a seguito dei calcoli iterativi definiti dal metodo BEM è rappresentato in Fig. 3 e si vede come ben ricostruisca la caratteristica di potenza di una turbina commerciale. La curva ricavata viene inserita, sotto forma di Look-Up Table (LUT), all'interno dello schema a blocchi della turbina eolica (Fig. 2).

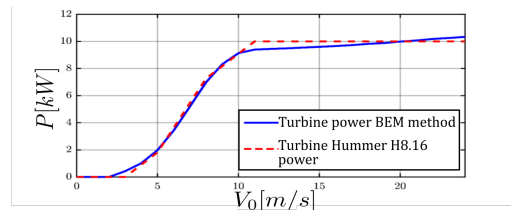


Figura 3: Confronto tra la potenza della turbina modellizzata e quella di una turbina in commercio.

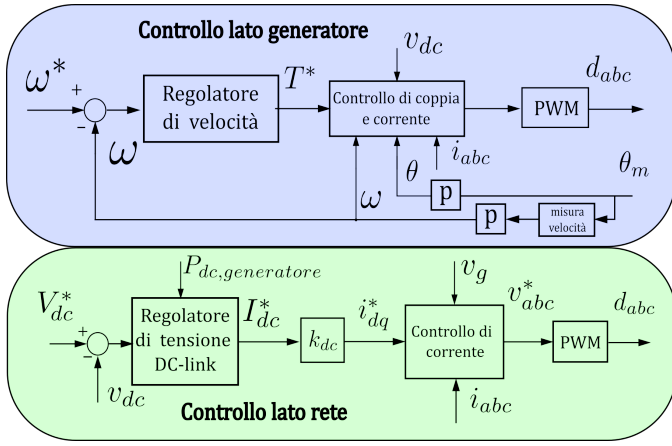


Figura 4: Schema a blocchi del controllo lato generatore e lato rete.

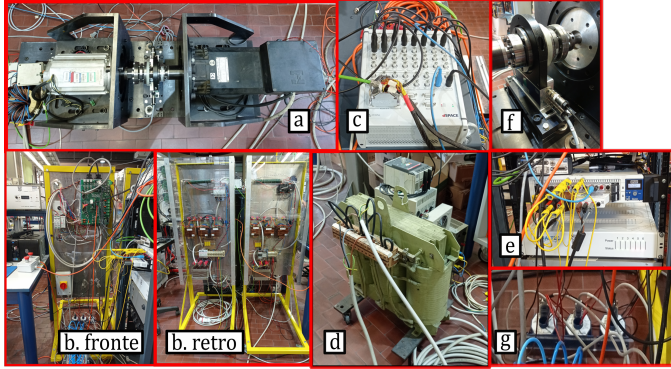


Figura 5: Foto dei componenti del set-up sperimentale.

### III. INTERFACCIAMENTO DELLA TURBINA ALLA RETE

L'impianto rappresentato in Fig.1 è composto da un generatore PMASR, controllato in velocità dall'inverter lato generatore. L'inverter lato rete, invece, regola la tensione del DC-link al suo valore nominale e gestisce l'iniezione di potenza in rete a fattore di potenza unitario. Questi controlli sono schematizzati in Fig.4. Il controllo è stato implementato e validato in ambiente di simulazione PLECS. Il lavoro di simulazione ha permesso il debugging del codice di controllo, ma soprattutto è servito a produrre un'anteprima dei risultati dei test che sono stati svolti successivamente in laboratorio, e quindi un termine di confronto.

### IV. TEST SPERIMENTALI

Il banco prova utilizzato per i test sperimentali corrisponde al diagramma di Fig. 1 ed è composto dai seguenti elementi (Fig. 5): (a) motore primo comandato in coppia per realizzare il P-HiL e generatore sincrono PMASR; (b) una coppia di inverter back-to-back, (c) una piattaforma di controllo con interfaccia utente PC, (d) un trasformatore abbassatore di tensione per la connessione in rete, (e) il sistema di acquisizione delle misure e relativi sensori: encoder, (f) torsionmetro e (g) pinze amperometriche.

Test preliminari hanno messo in luce la presenza di armoniche non previste sulla corrente immessa in rete.

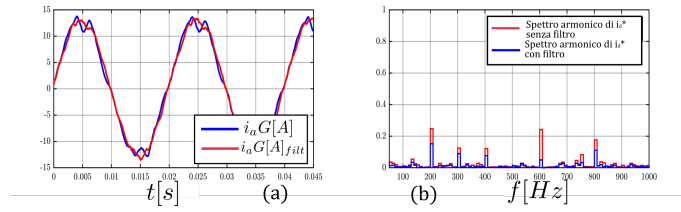


Figura 6: Confronto prima e dopo l'uso di filtri: (a) corrente di fase lato rete; (b) spettro armonico della corrente in asse d.

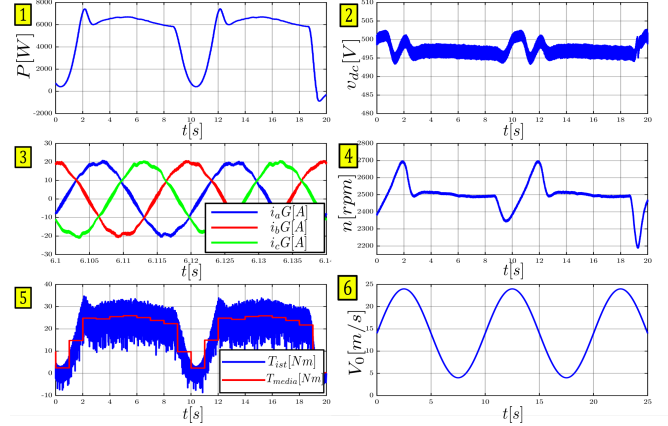


Figura 7: In ordine: Potenza elettrica, tensione  $v_{dc}$  correnti di fase lato rete, velocità di rotazione, coppia e variazione sinusoidale della velocità del vento.

Appositi filtri, tarati sperimentalmente, hanno contrastato la distorsione in modo adeguato (Fig. 6). Una volta eseguite queste modifiche sono stati svolti i test seguenti:

- Carica del DC-link: controllo di tensione in avvio;
- Spunto del generatore: controllo di velocità in avvio;
- Risposta del controllo di tensione sul DC-link e controllo di velocità al variare della potenza generata;
- Test in varie condizioni di regime operative;
- Comportamento del sistema con variazione sinusoidale della velocità del vento (Fig. 7).

### V. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti dai test sono in accordo con le previsioni di simulazione e forniscono un esempio valido delle caratteristiche e della qualità dell'energia che viene immessa in rete da una turbina eolica. Il sistema di P-HiL ed il modello di turbina eolica sviluppati vengono pertanto validati raggiungendo l'obiettivo prefissato. I contributi personali sono stati:

- Studio bibliografico sui sistemi eolici e sulla loro modellizzazione;
- Implementazione del metodo BEM e conseguente dimensionamento e modellizzazione di una turbina eolica per il P-HiL;
- Realizzazione della simulazione PLECS del sistema;
- Scrittura del codice C di controllo inverter e gestione software del sistema;
- Assemblaggio del set-up sperimentale in laboratorio e adattamento dei componenti alle esigenze del sistema;
- Definizione ed esecuzione dei test sperimentali.