Controllo di un convertitore trifase a quattro fili come Virtual Synchronous Machine per l'alimentazione di carichi monofase: modellazione, progetto del filtro LC e validazione in PLECS

Candidato: Carlo Giordani **Relatore:** Fabio Mandrile **Correlatore:** Federico Campanelli

Abstract - **Il lavoro presenta progetto, implementazione in PLECS e validazione simulativa di un convertitore trifase a quattro fili controllato come Virtual Synchronous Machine (VSM), destinato ad alimentare utenze monofase anche in condizioni di carico sbilanciato. È stato sviluppato il controllo di corrente a quattro regolatori P-RES, il dimensionamento del filtro LC di interfaccia e il modello VSM esteso al caso 4L4W, con particolare attenzione alla gestione del neutro. Le simulazioni verificano sincronizzazione, regolazione di potenza, comportamento a carico equilibrato/sbilanciato, disturbi di tensione e risposta inerziale.**

I. Introduzione

L'elevata penetrazione di generazione connessa tramite inverter riduce l'inerzia del sistema elettrico e può compromettere la stabilità di frequenza. Le *Virtual Synchronous Machines* emulano le dinamiche dei generatori sincroni (inerzia, smorzamento, regolazione di tensione/reattivo), fornendo servizi dinamici alla rete. In molte applicazioni (microreti, interfacce verso utenze miste) è necessario alimentare carichi monofase su un sistema a quattro fili. In tali condizioni compare una corrente di neutro che deve essere gestita attivamente. Nel presente lavoro ho sviluppato e validato in simulazione una VSM trifase a quattro fili (4L4W), in cui la quarta gamba regola il neutro dei carichi sbilanciati. L'impianto considerato è mostrato in Figura 1: un inverter a quattro gambe interfacciato alla rete tramite filtro LC e destinato ad alimentare tre carichi monofase (anche sbilanciati) al PCC.

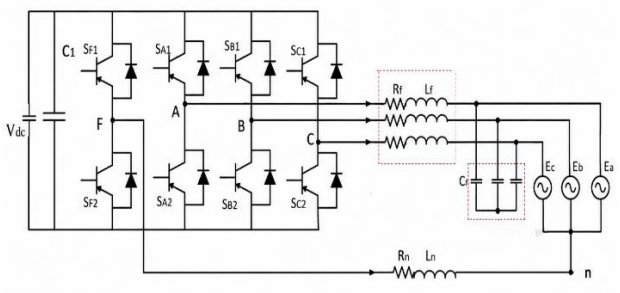


Figura 1 - Schema del convertitore considerato.

Obiettivi: progetto del filtro LC, implementazione del controllo VSM 4L4W in PLECS e validazione simulativa in condizioni di carico e di disturbo di rete.

II. Convertitore e filtro LC

Il convertitore è un inverter trifase a quattro fili (tre fasi e neutro), con bus in continua, circuito di pre-charge e modulazione PWM. Tra inverter e PCC è interposto un filtro LC: la capacità è dimensionata imponendo una potenza reattiva di filtro non superiore al 5 % della potenza apparente di base; l'induttanza è scelta in base al ripple di corrente ammesso e verificata in simulazione. Ho inoltre valutato: risonanza, resistenza di damping e perdite; per l'induttore ho realizzato: il design (nucleo Kool Mu, avvolgimento Litz, perdite rame e nel ferro tramite script Matlab, stima termica), il modello 3D realizzato su Onshape e il layout PCB del modulo monofase, replicabile sulle tre fasi eseguito sul software Altium Designer.

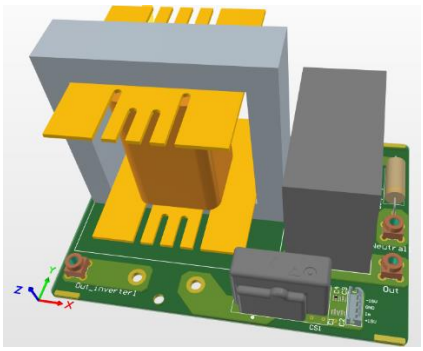


Figura 2 - Modulo PCB del filtro LC (vista 3D).

III. VSM a 4 fili: modello e implementazione

Il controllo completo, eseguito in PLECS all'interno di un *triggered subsystem* alla frequenza di *switching*, integra avviamento, anelli della VSM, generazione dei riferimenti di corrente e regolazione di corrente a quattro canali tramite controllori P-RES. La VSM adotta un modello di tipo RQ (smorzamento in asse q): l'anello attivo fornisce ω_v e θ_v, l'anello reattivo il flusso di eccitazione F_e; le equazioni di stator generano le correnti virtuali di sequenza diretta i^+_{abc}.

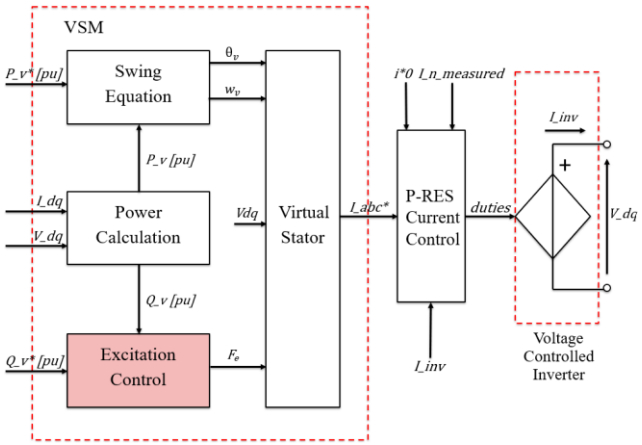


Figura 3 – Algoritmo di controllo.

Per l'estensione a quattro fili, il riferimento di neutro è ottenuto dalle correnti di carico e sui riferimenti di fase si applica la correzione omopolare:

$$i_n^* = -(i_a + i_b + i_c)_{\text{carico}},\ i_0^* = -\frac{i_n^*}{3}$$

$$i_x^* = i_x^+ + i_0^*\ \ (x = a, b, c)$$

V. Risultati di simulazione

Le prove principali in PLECS includono:

- Vuoto: $\omega_v \to 1\,\text{p.u.}$, $F_e \approx 1\,\text{p.u.}$, correnti virtuali prossime a zero dopo la sincronizzazione.
- Carico equilibrato e sbilanciato ($\cos\varphi = 1$ e $\cos\varphi \neq 1$): inseguimento delle correnti, ripartizione inverter/rete al PCC; in sbilanciamento, corrente di neutro sulla quarta gamba coerente con $\sum i_{\text{carico}}$.
- Voltage dip/swell a pieno carico: assenza di perdita di passo; aumento di corrente durante il dip legato a $I \sim P/V$.
- Risposta inerziale: gradino di potenza su rete equivalente (inerzia M, regolazione primaria).

Si riportano di seguito, in Figg. 2, 3 e 4 gli andamenti inerenti al caso con carico squilibrato e $\cos\varphi \neq 1$ su una fase e la risposta inerziale.

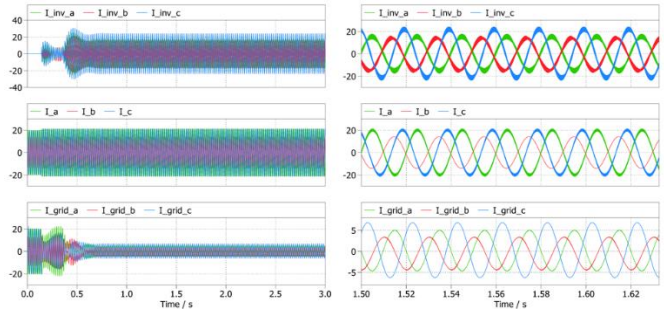


Figura 4 – Andamento delle correnti (convertitore, carico e grid) con carico squilibrato e $\cos\varphi \neq 1$.

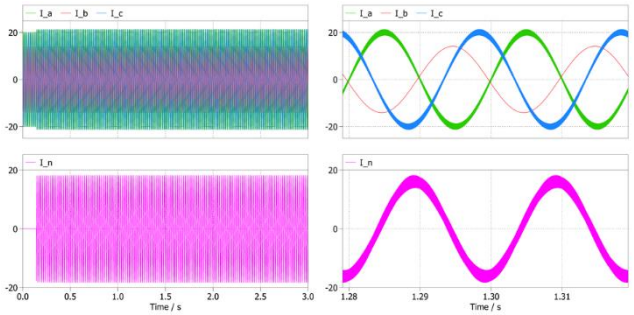


Figura 5 - Correnti sul carico (in alto) e corrente sul neutro (in basso) con carico squilibrato e $\cos\varphi \neq 1$.

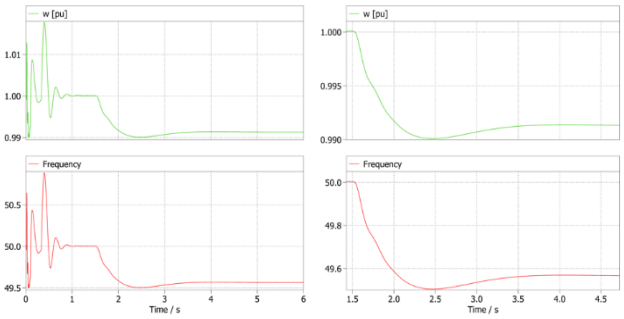


Figura 6 – Risposta inerziale (sola regolazione primaria) con relativi andamenti di *w [pu]* e della frequenza per tutta la durata della simulazione (sinistra) e dopo il guasto (destra).

VI. Conclusioni e Contributi personali

Ho realizzato e validato in simulazione una VSM trifase a quattro fili in grado di alimentare carichi monofase, regolando attivamente la corrente di neutro tramite la quarta gamba. Il lavoro integra controllo di corrente, filtro LC e dinamica di macchina virtuale, dimostrando sincronizzazione senza PLL e comportamento coerente in condizioni di sbilanciamento e di disturbo di rete. Sviluppi futuri includono validazione sperimentale, prove con armoniche/variazioni di fase e strategie di ride-through (limitazione di corrente in caso di buco di tensione).

I miei contributi personali si possono riassumere come segue:

- Validazione del controllo di corrente 4L4W a P-RES in *grid-following*.
- Dimensionamento e design del filtro LC (elettrico, perdite, magnetico, 3D/PCB).
- Implementazione PLECS di una VSM a quattro fili con gestione esplicita del neutro (i_n^*, i_0^*).
- Piano di simulazione su carichi equilibrati/sbilanciati, disturbi di tensione e risposta inerziale.