



**Politecnico
di Torino**

String Inverter Control Design for Photovoltaic Applications

Vincenzo Barba

Relatori: ***Prof. Radu Bojoi ; Dr. Francisco Freijedo***

Laurea magistrale in Ingegneria Elettrica

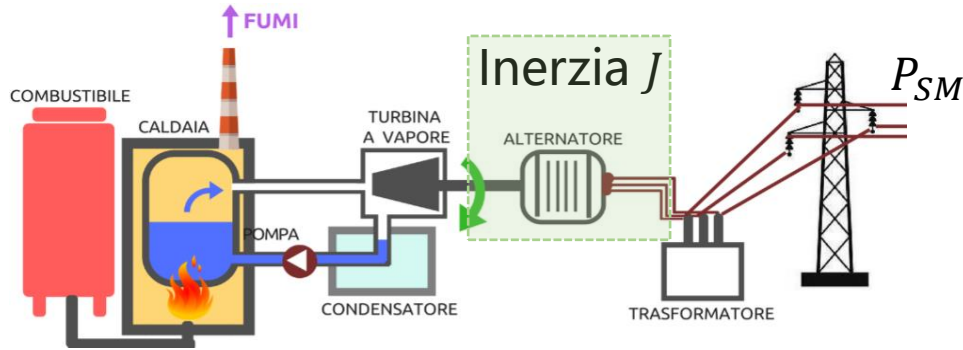
6/10/2021

Indice

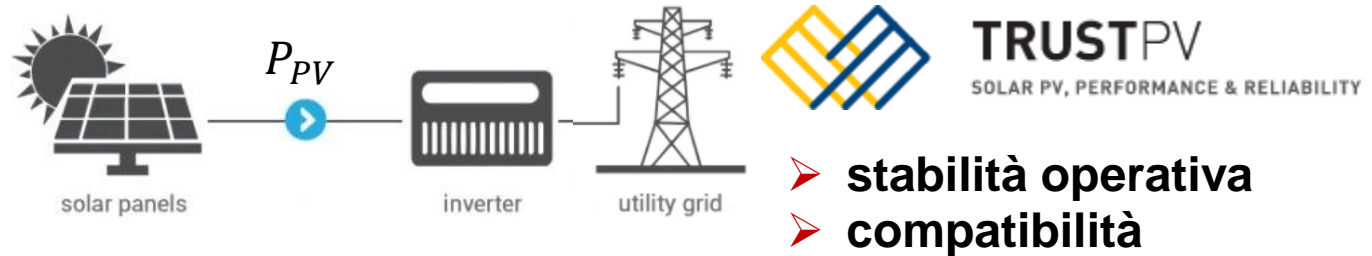
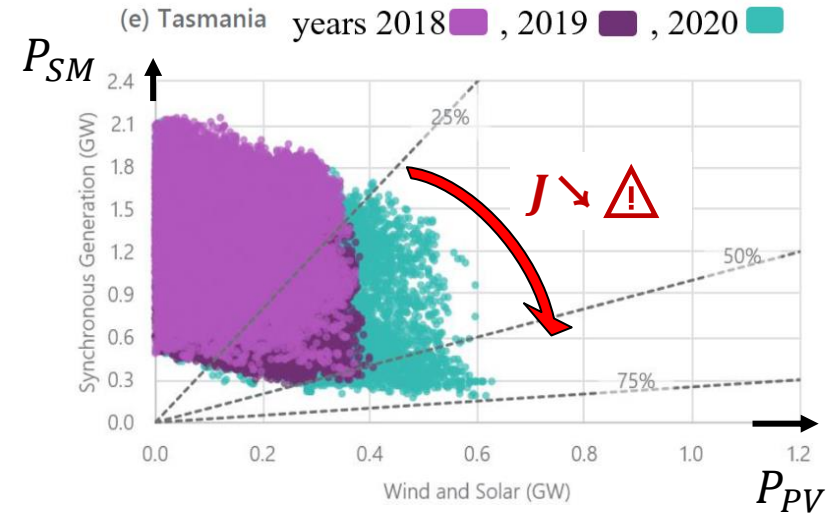
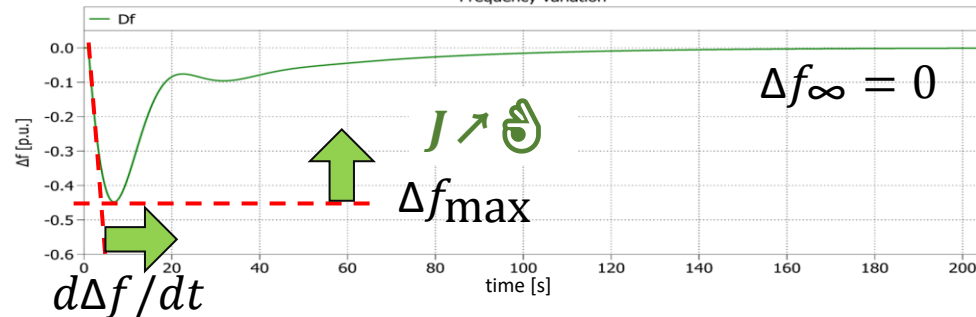
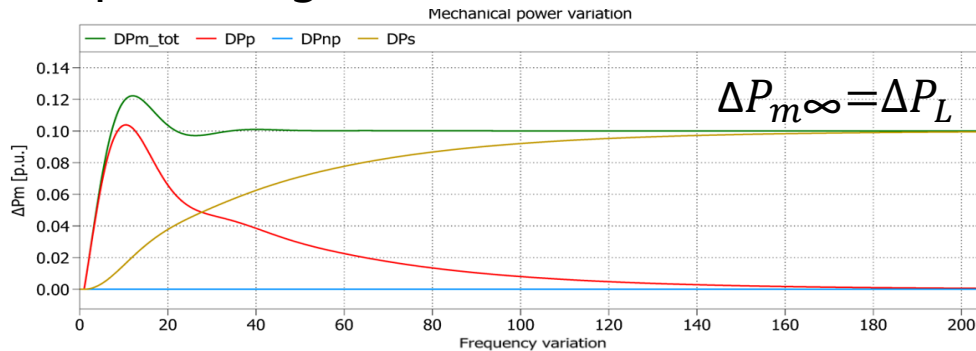
- ❑ Stato dell'arte - Regolazione del sistema di potenza
- ❑ Convertitore VS macchina sincrona
- ❑ Schema del sistema di potenza
- ❑ Tecniche di controllo per convertitori
- ❑ Schema a blocchi del controllo complessivo
- ❑ Risultati simulazione
- ❑ Conclusioni

Stato dell'arte - Regolazione del sistema di potenza

Regolazione con macchine sincrone (SM)



Risposta al gradino di carico $\Delta P_L = 10\%$



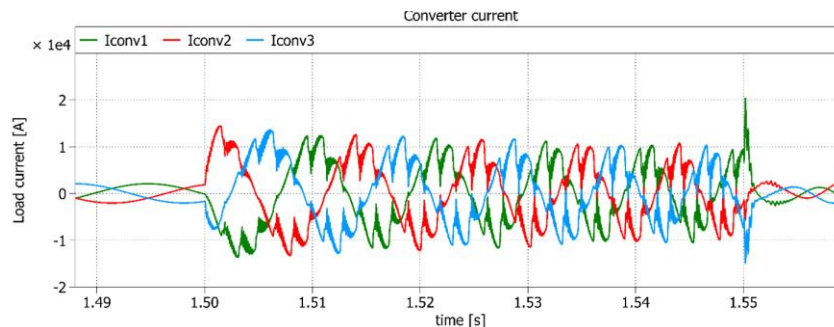
Obiettivo

Progettare il controllo dello string inverter per applicazioni PV

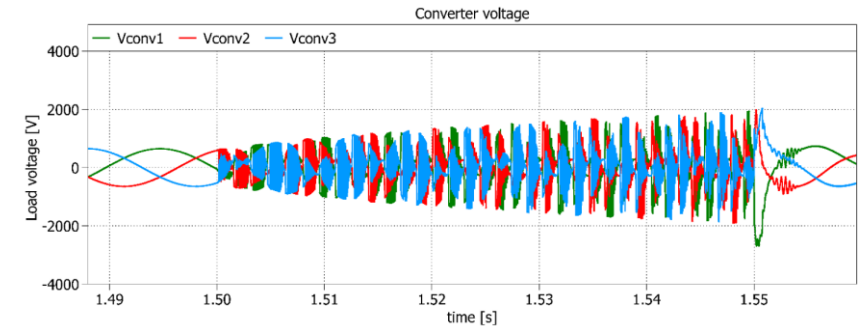
Convertitore VS macchina sincrona

	<i>macchine sincrone</i>	<i>convertitore di potenza</i>
<i>Sovraccarico</i>	✓	✗
<i>Accumulatore d'energia</i>	Energia cinetica	✗
<i>Controllo</i>	frequenza tensione AC	frequenza tensione AC (μs) tensione DC (s)
Stabilità del sistema	Stabilità d' angolo Stabilità della frequenza	Sincronismo con la rete

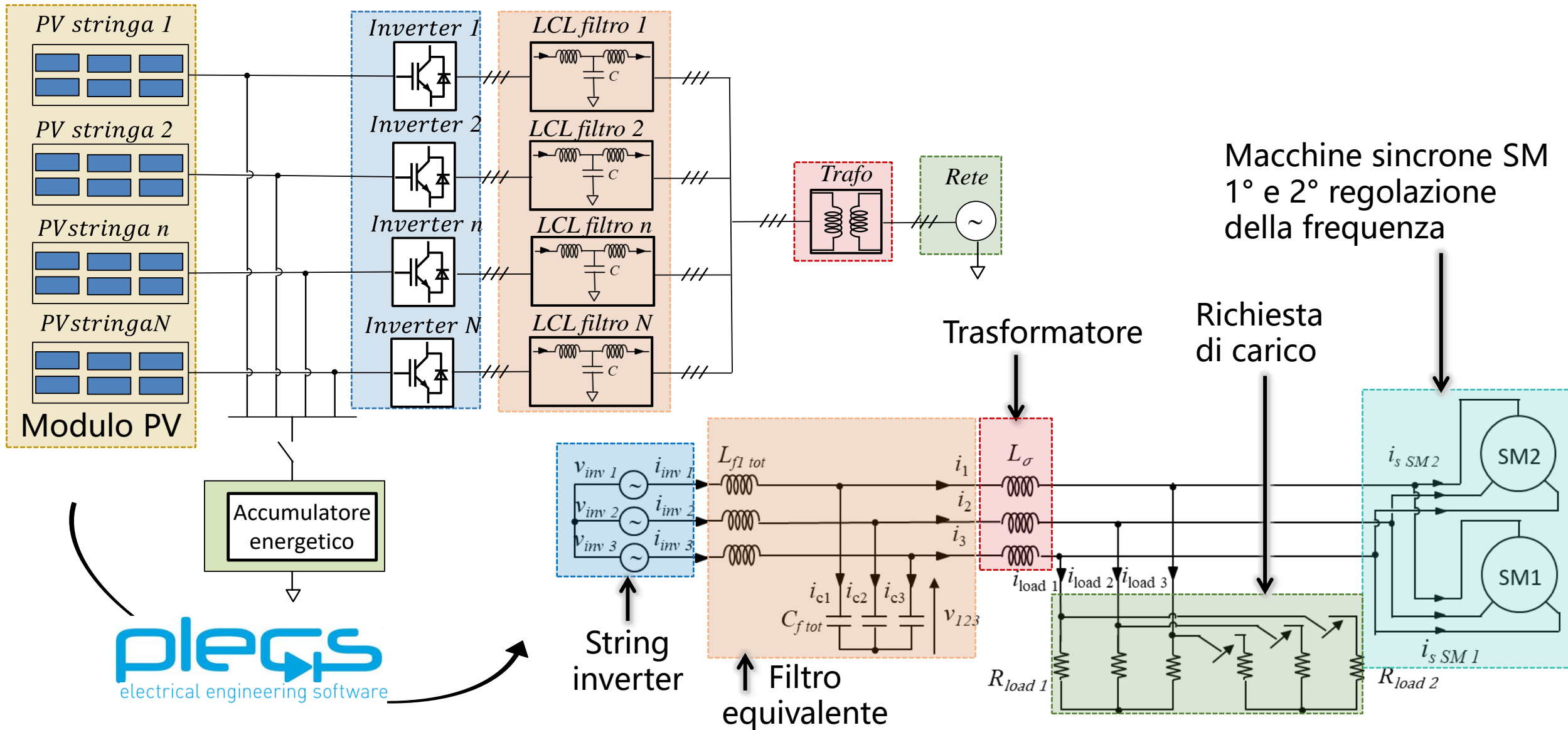
Guasto con convertitore: $i_{sc SM} > i_{sc converter}$



Tensione AC ad alta frequenza



Schema di potenza complessivo



plegs
electrical engineering software

Tecniche di controllo per convertitori

Grid Following

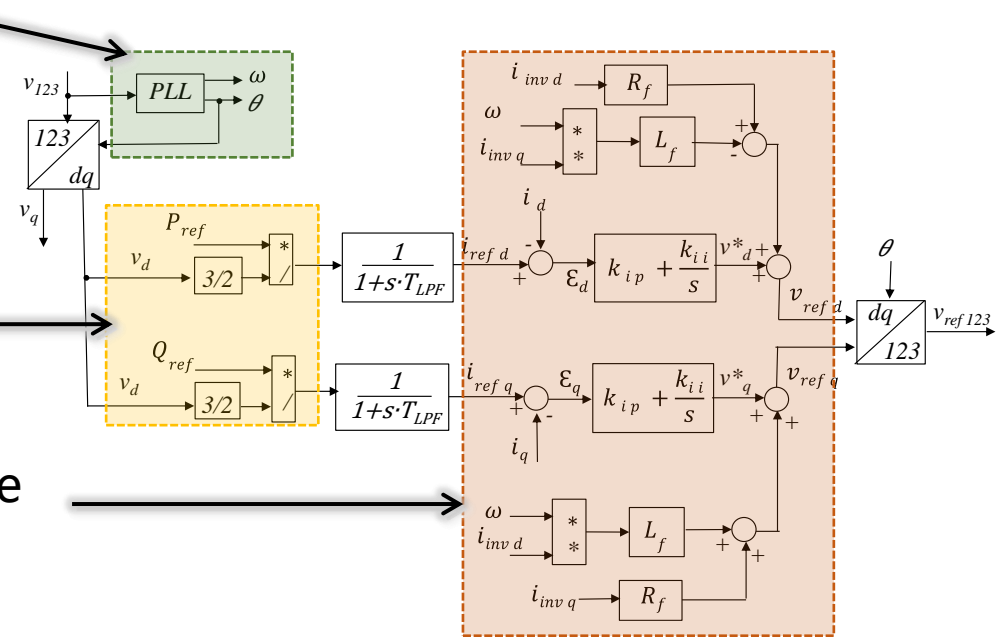
- $f = f_1 \Rightarrow P = P_n$
- $\Delta P = f(\Delta f)$
- $P_{ref} = P_n + \Delta P$

Rilevatore di fase (PLL)

$$\theta = \angle v_{g\ 123}$$

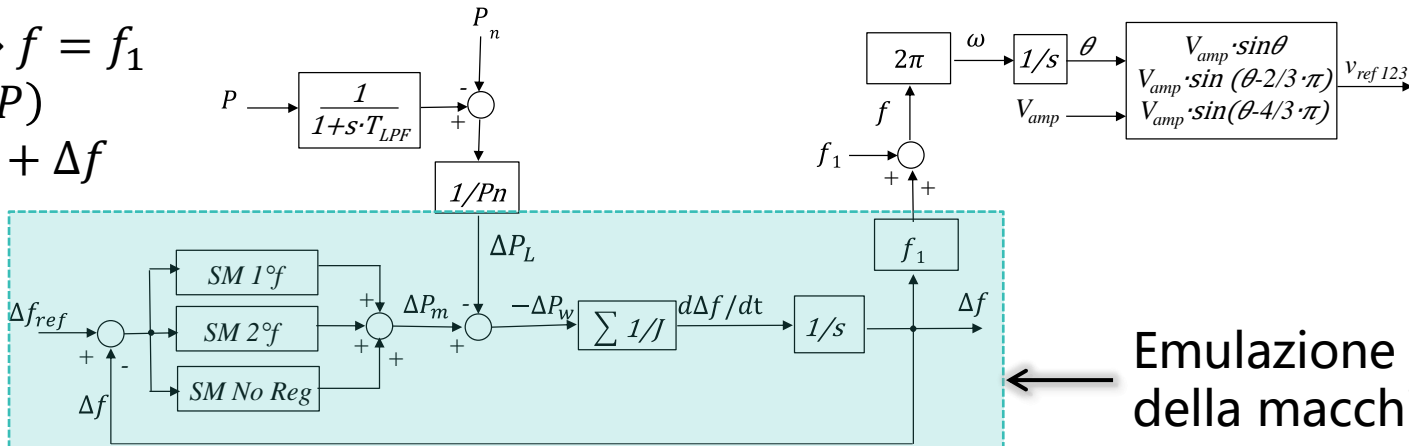
Generazione riferimenti di corrente

Controllo di corrente



Grid Forming

- $P = P_n \Rightarrow f = f_1$
- $\Delta f = f(\Delta P)$
- $f_{ref} = f_1 + \Delta f$



- Auto-sincronizzazione
- $\theta = \angle v_{g\ 123}$

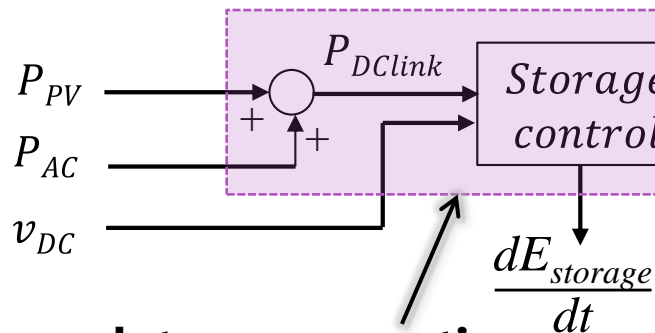
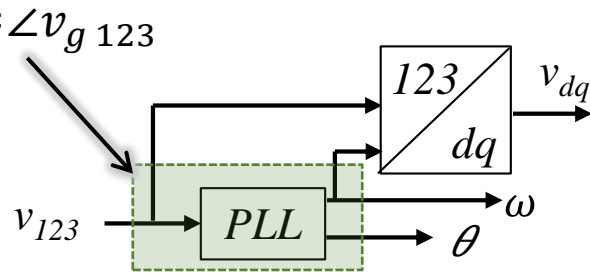
Emulazione del comportamento della macchina sincrona

Schema a blocchi del controllo complessivo

Rilevatore di fase (PLL)

- sincronizzazione con la rete

$$\theta = \angle v_{g\ 123}$$

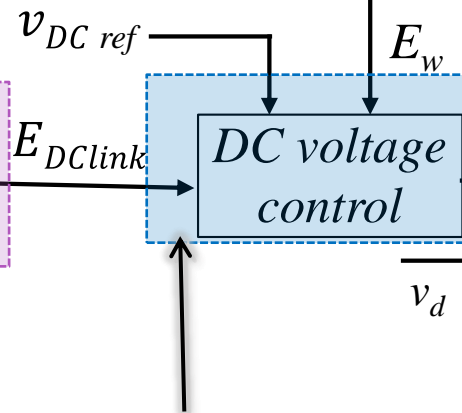
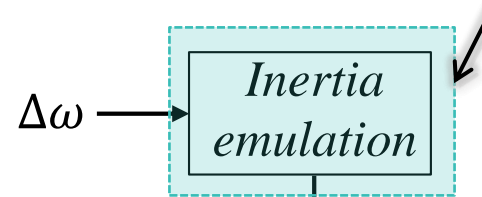


Attivazione accumulatore energetico

- mantenere $v_{DC} \in [V_{DC\ min}; V_{DC\ max}]$
- evitare scarica del DC-link
- accumulare energia in caso di sovrapproduzione del PV

Generazione energia inerziale virtuale

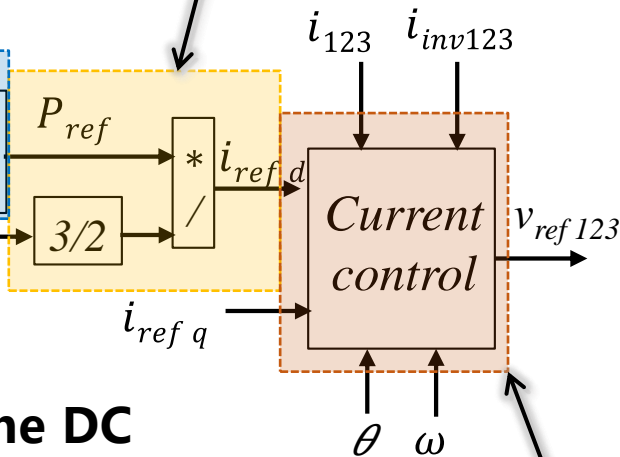
- partecipazione alla regolazione della frequenza
- azione veloce rispetto SM



Controllo tensione DC

- regolatore PI
- controllo $v_{DC}^2(t)$
- generazione riferimento di potenza

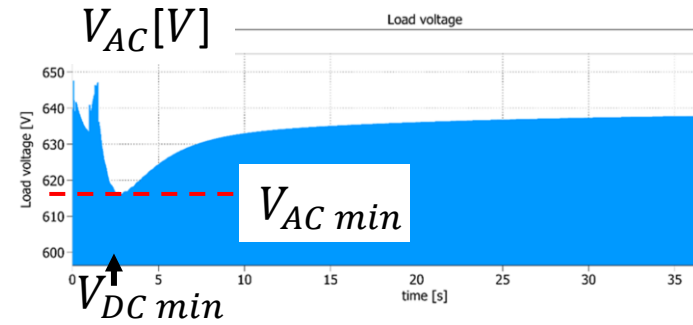
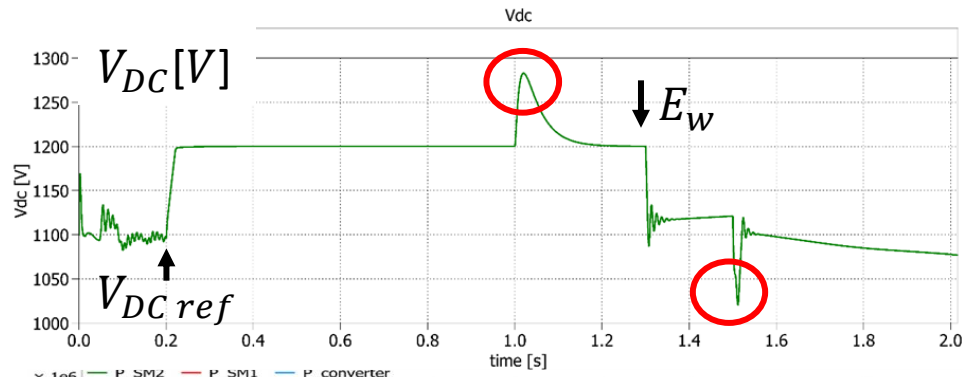
Generazione riferimento di corrente



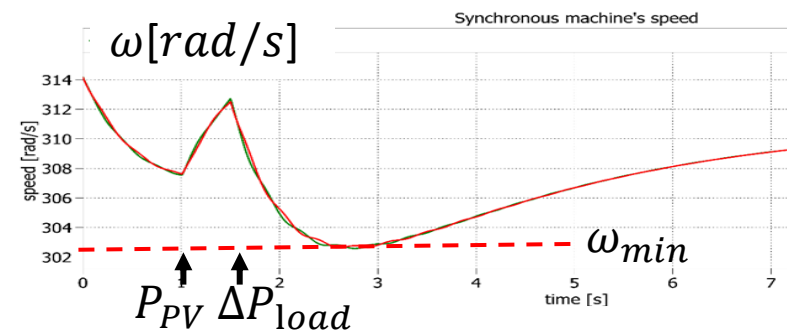
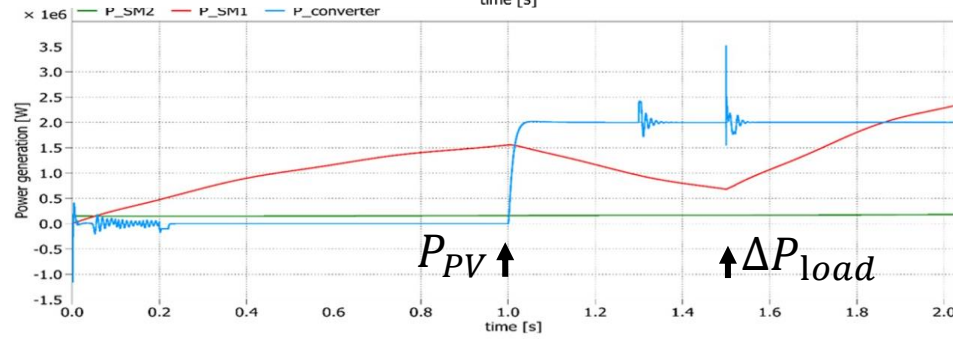
Controllo di corrente

- regolatore PI
- design per passività
- stabilità del convertitore

Risultati simulazione - senza accumulatore energetico

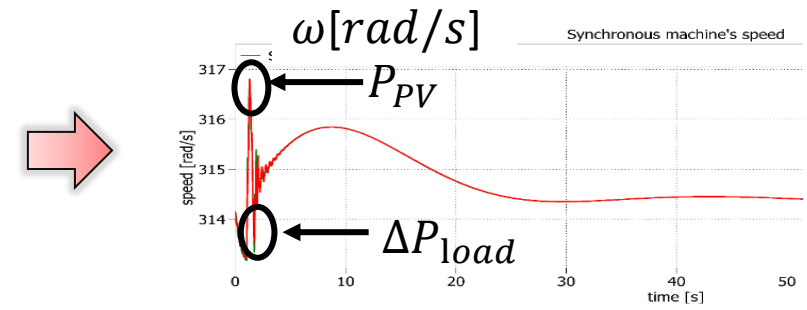
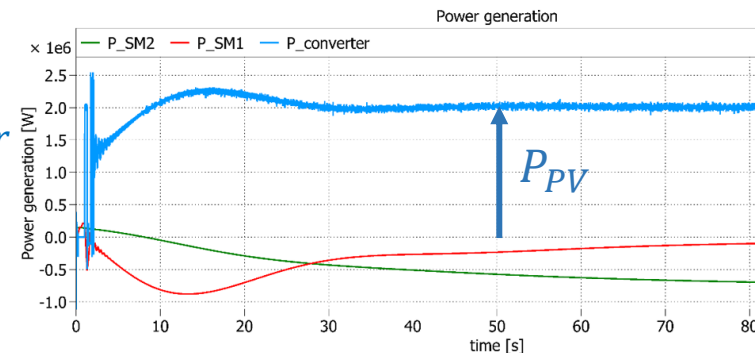


$P[W]$
 $P_{Converter}$
 P_{SM1}
 P_{SM2}

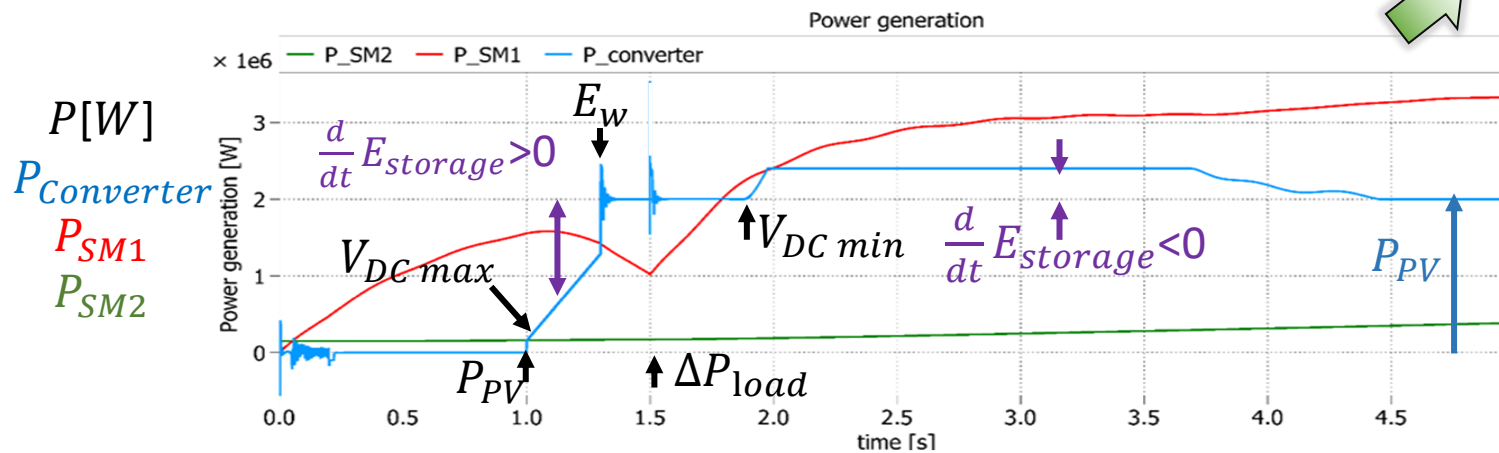
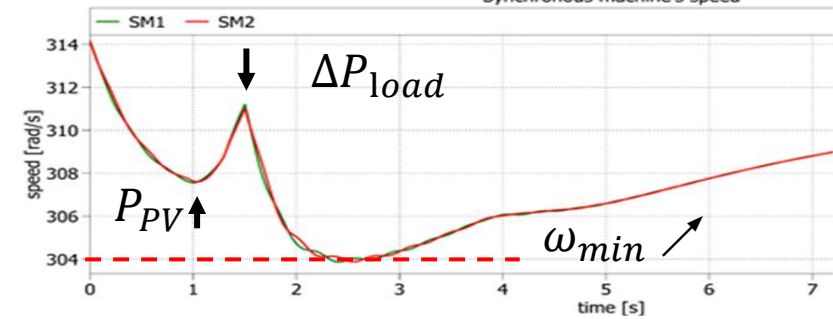
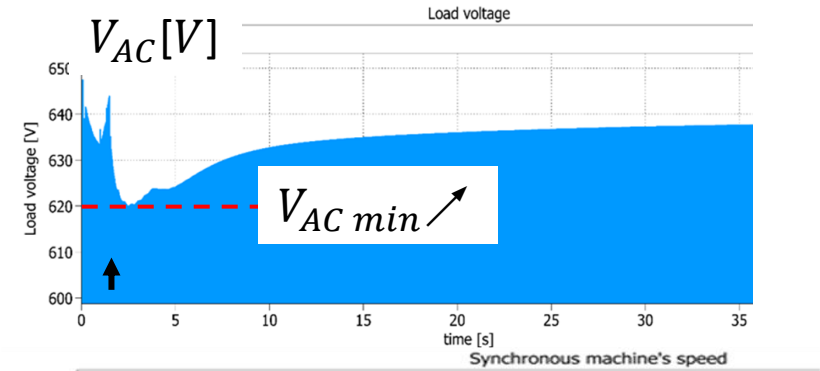
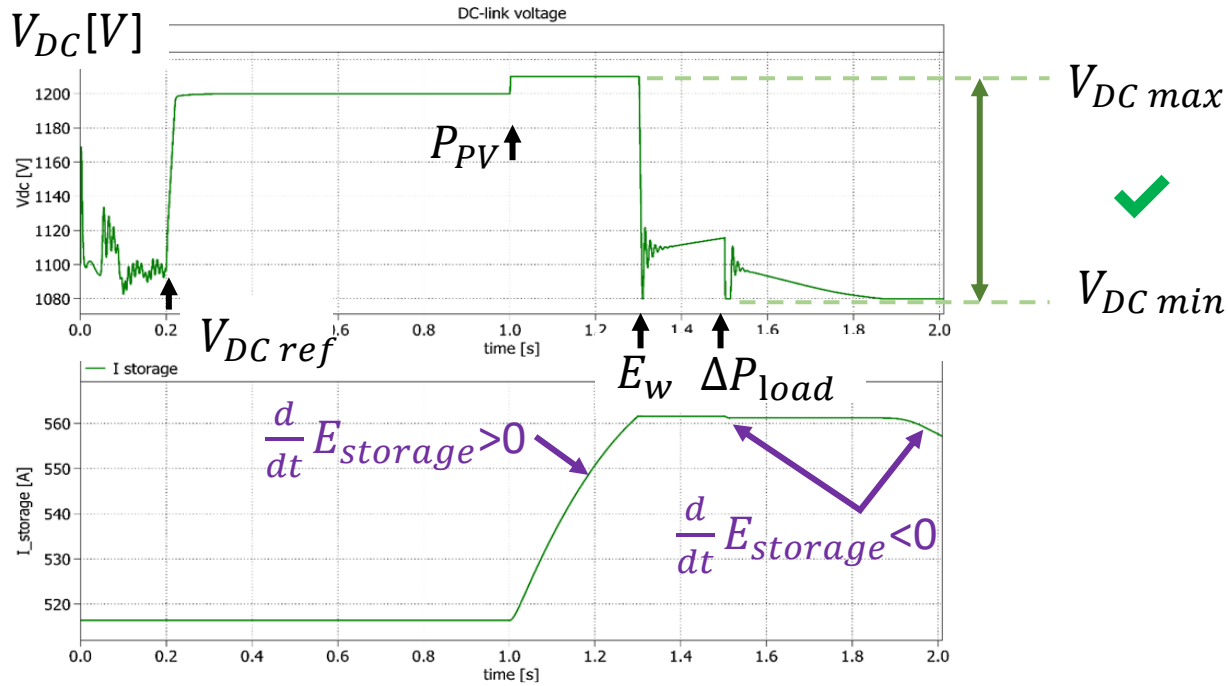


Sovraproduzione:
 $P_{PV} > P_{load}$

$P[W]$
 $P_{Converter}$
 P_{SM1}
 P_{SM2}

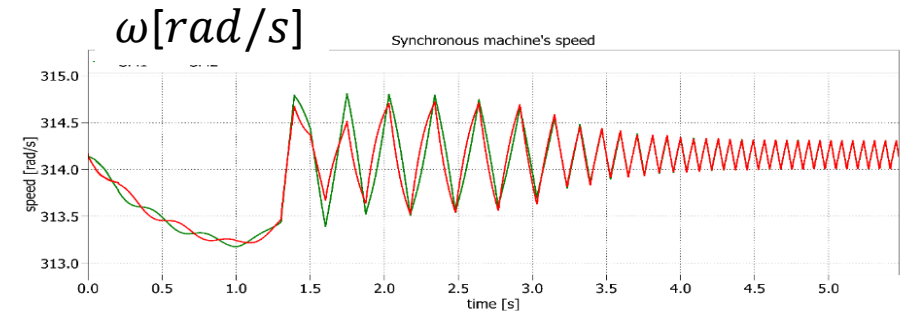
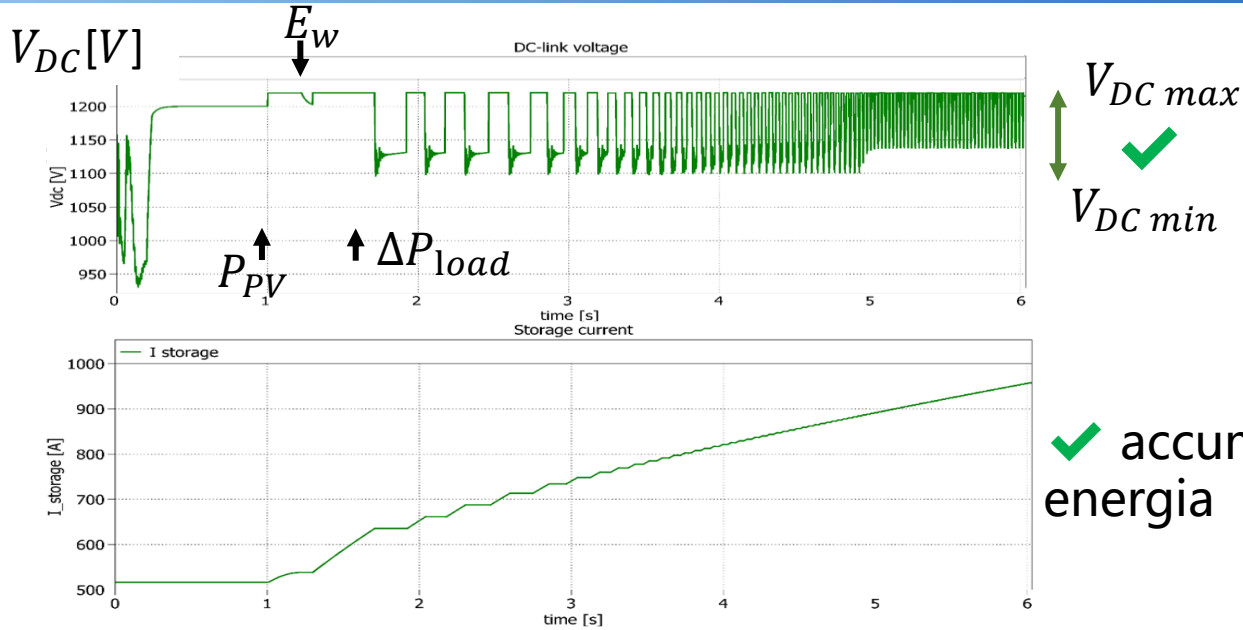


Risultati simulazione - $P_{PV} < P_{load}$



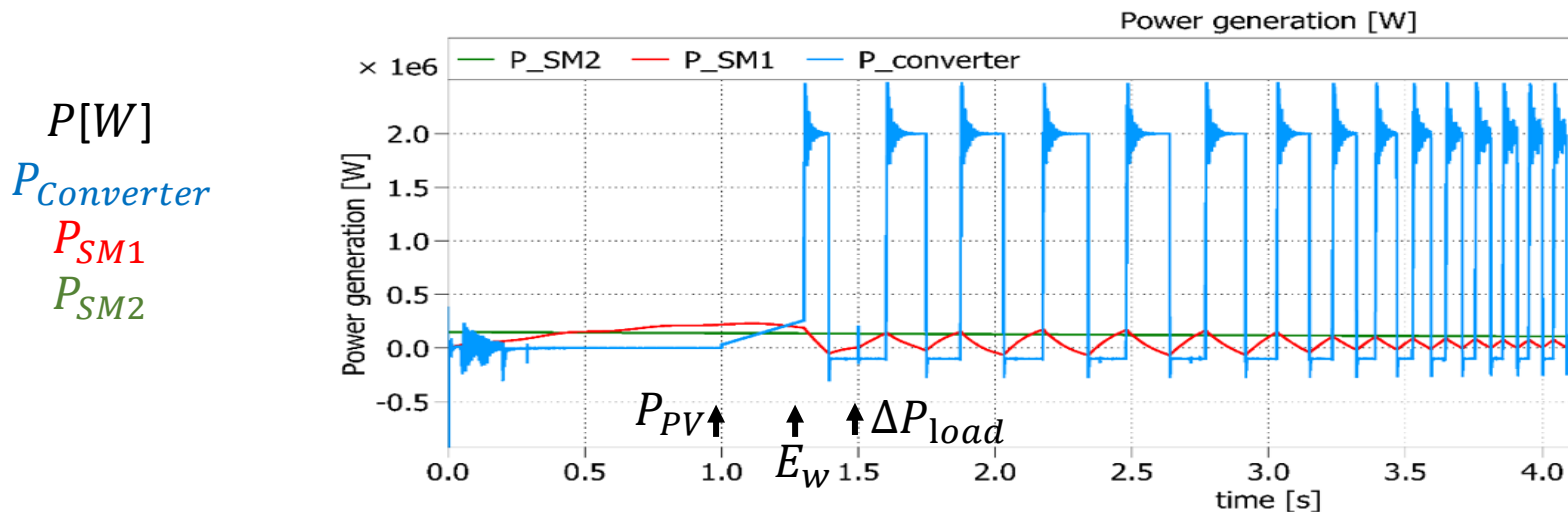
✓ Partecipazione alla regolazione della frequenza

Risultati simulazione - $P_{PV} > P_{load}$



✓ Azione veloce rispetto SM

➤ $\Delta\omega \searrow \Rightarrow f \approx f_n$



Valori medi - regime

$$P_{Converter\infty} = P_{load}$$

$$P_{SM1\infty} = 0$$

$$P_{SM2\infty} = 0$$

$$\frac{d}{dt} E_{storage\infty} = P_{PV} - P_{load}$$

Conclusioni

Il completo controllo del convertitore realizzato:

- ✓ è stabile
- ✓ soddisfa la richiesta di carico per diversi livelli di potenza e produzione PV
- ✓ partecipa alla regolazione della frequenza
- ✓ accumula energia in caso di sovrapproduzione del PV

I miei contributi personali sono:

- analisi dello stato dell'arte del sistema di regolazione;
- capire le conseguenze della futura rete a bassa densità di generazione non sincrona
- progettare il modello a valori medi dello string inverter
- progettare il modello di controllo dello string inverter
- effettuare simulazioni PLECS per mostrare il comportamento del sistema

Prospettive future:

- Enel integrerà modelli dettagliati dei componenti
- Test nei prossimi punti del progetto PV TRUST



String Inverter Control Design for Photovoltaic Applications

Vincenzo Barba

Prof. Radu Bojoi
Dr. Francisco Freijedo

Grazie!



**Politecnico
di Torino**