



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

**Convertitore current source connesso
alla rete con generatore sincrono
virtuale**

Relatori

Dr. Fabio Mandrile

Ms. Alessia Camboni

Candidato

Matteo Paschetta

Novembre 2025

Sommario

Nel corso degli ultimi decenni, si è assistito ad un rapido incremento del numero di sorgenti di generazione connesse alla rete tramite inverter: impianti fotovoltaici, eolici e sistemi di accumulo. Questi però, non garantiscono l'erogazione dei servizi ausiliari di rete, come gli impianti a combustibili fossili, muniti di generatori sincroni rotanti. Per questo motivo, una scelta valida di progettazione è utilizzare una tecnologia rinnovabile per la produzione di energia elettrica controllata mediante un sistema che implementa un generatore rotante virtuale VSG. Inoltre, al posto del classico inverter di tensione negli ultimi anni sta acquisendo sempre più notorietà la soluzione che vede l'utilizzo di un Current Source Inverter (CSI). Questo elaborato si propone di analizzare e simulare l'implementazione di un convertitore CSI descrivendone la tecnica di controllo e di modulazione con l'obiettivo di utilizzarlo per fare da interfaccia con la rete elettrica attraverso l'uso di un generatore sincrono virtuale VSG, in modo da fornire i servizi ausiliari di rete. Inoltre, vengono effettuate simulazioni e prove sperimentali per determinare il funzionamento del sistema.

Indice

Elenco delle tabelle	VI
Elenco delle figure	VII
1 Introduzione	1
1.1 Obiettivo	4
2 Current Source Inverter (CSI)	5
2.1 Modulazione	11
2.1.1 Modulazione discontinua	12
2.1.2 Modulazione continua	14
2.1.3 Modulazione continua derivata da VSI	14
3 Virtual Synchronous Generator (VSG)	17
3.1 Modello meccanico	18
3.2 Calcolo della potenza virtuale	19
3.3 Modello dell'eccitazione	19
3.4 Statore virtuale	20
4 Modello di simulazione	23
4.1 Simulazione in tempo continuo	24
4.1.1 Current Source Inverter	25
4.1.2 Generatore di corrente continua	25
4.1.3 Rete elettrica	26
4.1.4 Filtro CLC di rete	27
4.1.5 Controllo in simulazione	28
4.1.6 Modulazione	43
4.2 Risultati di simulazione in tempo continuo	43
4.2.1 Simulazione con PLL	44
4.2.2 Simulazione con VSG	49
4.3 Simulazione in tempo discreto	55
4.3.1 Controllo discreto in simulazione	56

4.3.2	Modulazione	62
4.4	Risultati di simulazione in tempo discreto	66
4.4.1	Simulazione con modulazione discontinua	67
4.4.2	Simulazione con modulazione continua	73
4.4.3	Simulazione con modulazione derivata da VSI	76
5	Modello di simulazione real time	81
5.1	RTbox3	84
5.2	Scheda Nucleo G474RE	86
5.3	Simulazione svolta in laboratorio	87
5.3.1	Modello implementato su RT Box 3	87
5.3.2	Modello implementato sulla scheda Nucleo G474RE	91
5.4	Risultati delle simulazioni real time	97
5.4.1	Prove con rete variabile	102
6	Conclusioni	105
	Bibliografia	107

Elenco delle tabelle

4.1	Valori impiegati in simulazione.	23
4.2	Valori impiegati in simulazione	55
5.1	Parametri per il sistema simulato su RT Box 3.	87
5.2	Parametri per il sistema simulato su Nucleo G474RE.	91
6.1	Confronto tra valori simulati e sperimentali.	105

Elenco delle figure

1.1	Produzione interna energia Italia 2023, Fonte: IEA.	2
1.2	Produzione interna energia Italia 2000-2023, Fonte: IEA.	2
2.1	circuito CSI da [1].	5
2.2	circuito CSI a mosfet.	7
2.3	CSI semplificato da [2].	8
2.4	esagono SVM da [1].	9
2.5	schema di un CSI reale da [2].	9
2.6	schema di calcolo del duty cycle.	12
2.7	forma d'onda duty cycle.	13
2.8	schema di calcolo dei comandi.	14
2.9	Modulazione derivata da VSI presente in [3].	15
2.10	A sinistra: esagono del VSI. A destra: esagono del CSI. Da [3].	16
3.1	schema concettuale VSG.	18
3.2	schema concettuale parte meccanica.	19
3.3	circuito equivalente asse d.	20
3.4	circuito equivalente asse q.	21
4.1	schema concettuale simulazione.	24
4.2	circuito CSI simulato.	25
4.3	circuito CSI simulato.	26
4.4	rete elettrica.	27
4.5	stella di condensatori lato CSI e filtro risonante LC.	28
4.6	schema completo del controllo CSI.	29
4.7	PLL da [6].	30
4.8	schema calcolo riferimento di corrente.	31
4.9	blocco per il calcolo duty cycle e comandi.	32
4.10	State Machine.	33
4.11	transistor Q in ingresso al CSI.	34
4.12	schema di controllo DC/DC.	34
4.13	calcolo I di riferimento.	36
4.14	sistema PI di comando del DC/DC.	36
4.15	controllo CSI con VSG.	37
4.16	schema di controllo VSG.	38

4.17	blocchi di funzionamento VSG.	39
4.18	blocco meccanico del VSG.	40
4.19	riferimenti di potenza del VSG.	40
4.20	sopra: blocco statore virtuale del VSG, sotto: blocco asse d.	41
4.21	blocco dell'eccitazione del VSG.	41
4.22	blocco per il calcolo dei riferimenti di corrente.	42
4.23	calcolo corrente in asse d.	43
4.24	Corrente di rete a vuoto.	44
4.25	Frequenza di rete stimata dal PLL.	45
4.26	Correnti di riferimento.	46
4.27	sinistra: Duty cycle gamba a del CSI, destra: Comando switch CSI.	46
4.28	Corrente lato convertitore CSI.	47
4.29	Corrente filtrata lato rete.	48
4.30	Tensione filtrata di rete.	48
4.31	Correnti continua del DC/DC in ingresso.	49
4.32	Frequenza VSG.	50
4.33	Correnti di riferimento.	50
4.34	Correnti in uscita dal CSI.	51
4.35	Correnti di rete filtrate.	52
4.36	Dinamica delle correnti di rete.	52
4.37	Potenza attiva virtuale.	53
4.38	Potenza reattiva virtuale.	54
4.39	Tensione di rete.	54
4.40	Corrente continua del DC/DC in ingresso.	55
4.41	controllo CSI discreto.	56
4.42	controllo CSI discreto.	57
4.43	Modello meccanico discreto del VSG.	58
4.44	Configurazione del lead-lag discreto.	59
4.45	Modello discreto dell'eccitazione del VSG.	59
4.46	Modello discreto di statore del VSG, in alto: asse d e in basso: asse q.	60
4.47	Modello discreto del filtro risonante di tensione di rete.	61
4.48	Macchina a stati in tempo discreto.	61
4.49	Calcolo dei comandi.	63
4.50	Calcolo dei duty cycle.	63
4.51	Calcolo componente discontinua Delta.	64
4.52	Calcolo dei comandi.	65
4.53	Calcolo dei duty cycle.	65
4.54	Calcolo duty e comandi modulazione derivata da VSI.	66
4.55	Pulsazione del VSG.	67
4.56	Correnti di riferimento.	68
4.57	Corrente di rete a vuoto.	68
4.58	Corrente di rete prima del filtro passa basso.	69

4.59	Tensione di rete senza filtro passa basso.	70
4.60	Tensione di rete filtrata.	70
4.61	Corrente lato CSI.	71
4.62	Corrente di rete filtrata	71
4.63	Potenza attiva virtuale del VSG dato disturbo di frequenza.	72
4.64	Frequenza di rete perturbata.	72
4.65	Correnti di riferimento.	73
4.66	Correnti lato convertitore CSI.	74
4.67	Correnti di rete filtrate.	74
4.68	Frequenza di rete.	75
4.69	Potenza attiva virtuale.	75
4.70	Correnti lato CSI.	76
4.71	Correnti di rete filtrate.	77
4.72	Comando S1.	77
4.73	Tensione di rete misurata.	78
4.74	Perturbazione della frequenza di rete.	79
4.75	Potenza attiva virtuale in risposta alla perturbazione di frequenza.	79
5.1	Schema concettuale prove sperimentali.	82
5.2	Dispositivi usati in laboratorio e loro connessione.	82
5.3	RT Box 3 e scheda Nucleo G474RE.	83
5.4	RTBox LaunchPad-Nucleo Interface.	85
5.5	scheda Nucleo G474RE.	86
5.6	Modello di simulazione su RT Box 3.	88
5.7	Capture PWM collegati alle porte Digital In.	89
5.8	Calcolo dei comandi per il CSI.	89
5.9	Conditioning della corrente DC misurata.	90
5.10	Conditioning della tensione di rete misurata.	90
5.11	Segnali analogici da misurare con oscilloscopio.	91
5.12	Acquisizione ADC e scaling di tensioni di rete e corrente DC.	92
5.13	Modello del VSG e calcolo dei riferimenti.	92
5.14	Modello del generatore sincrono virtuale.	93
5.15	Calcolo delle correnti di riferimento.	94
5.16	Controllo del CSI.	94
5.17	Calcolo dei duty cycle per il controllo del CSI.	95
5.18	Controllo del DC/DC.	96
5.19	Calcolo dei duty cycle per il DC/DC con tecnica unipolare.	96
5.20	Corrente di rete a vuoto.	97
5.21	Corrente continua fornita dal DC/DC.	98
5.22	Corrente di rete lato CSI non filtrata.	99
5.23	Corrente di rete a regime modulata dal CSI.	99
5.24	Comando dello switch S1 del CSI.	100
5.25	Corrente di rete dato il gradino di potenza attiva.	101

5.26	Corrente continua dato il gradino di potenza attiva.	101
5.27	Modello della rete elettrica variabile.	102
5.28	In alto: ampiezza della tensione di rete, In basso: corrente fornita dal CSI.	102
5.29	In alto: perturbazione della frequenza di rete, In basso: potenza attiva fornita.	103
5.30	Postazione sperimentale per la cattura dei segnali analogici.	104

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni si è verificato un progressivo aumento delle tecnologie rinnovabili per la produzione di energia elettrica sostituendo numerosi generatori tradizionali a combustibili fossili. A livello nazionale, l'Italia negli ultimi anni si sta fortemente impegnando nell'inseguire l'obiettivo di ridurre le emissioni di CO₂ entro il 2030 e raggiungere entro questa data una produzione di energia da fonti rinnovabili del 30 % della produzione totale. Inoltre, l'intenzione è quella di ridurre la domanda complessiva di gas naturale attraverso un passaggio accelerato a fonti di energia alternative e una maggiore attenzione all'efficienza energetica, specialmente negli edifici, che, non solo rafforzerà ulteriormente la sicurezza energetica, ma aiuterà anche il paese a raggiungere i suoi obiettivi climatici. La Figura 1.1 rappresenta la produzione interna totale di energia in Italia nel 2023, mentre in Figura 1.2, viene rappresentata l'evoluzione della produzione di energia e il diverso utilizzo delle fonti di produzione degli impianti.

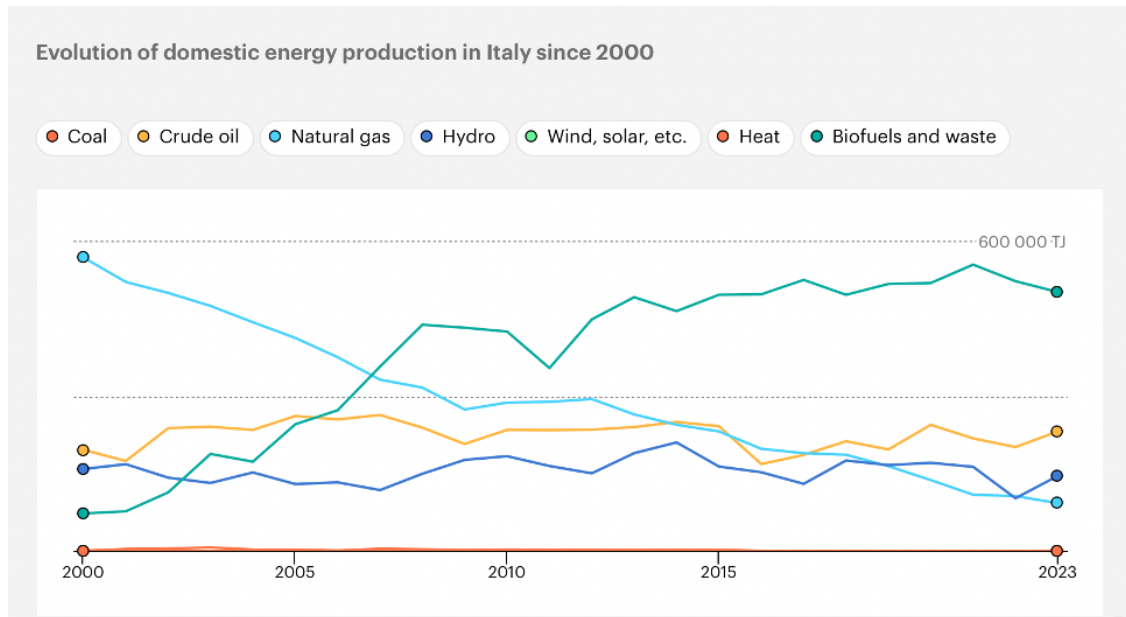


Figura 1.1: Produzione interna energia Italia 2023, Fonte: IEA.

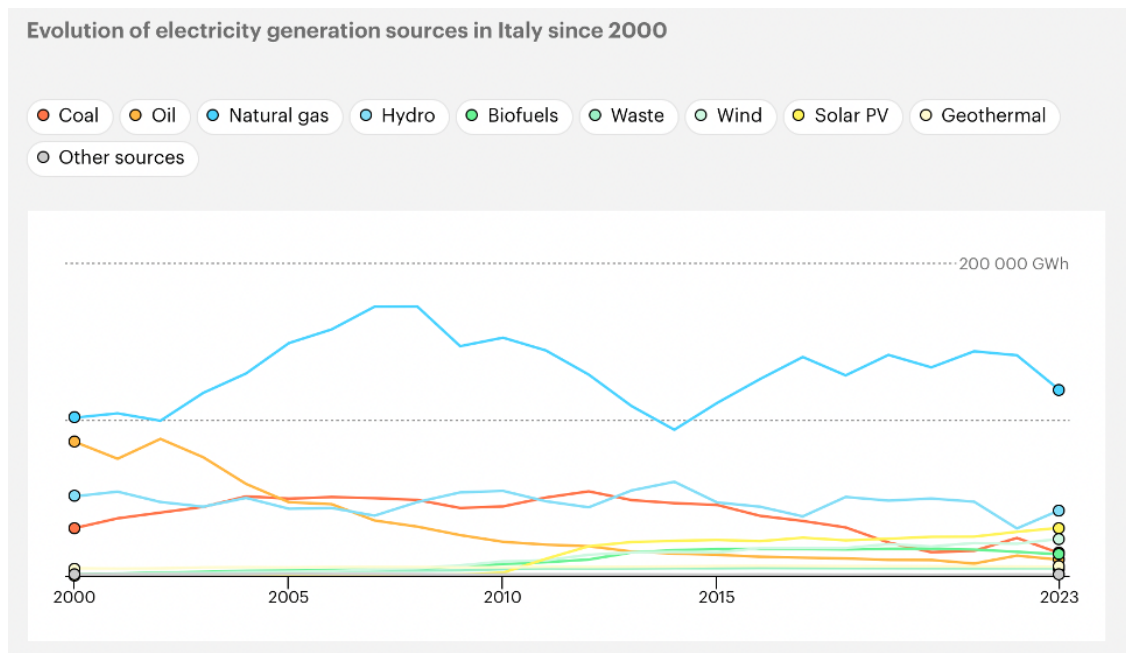


Figura 1.2: Produzione interna energia Italia 2000-2023, Fonte: IEA.

Nello specifico, la tecnologia più adottata è quella fotovoltaica, grazie ai numerosi vantaggi presenti. Oltre al principale vantaggio riguardante la riduzione delle emissioni, si possono aggiungere la facilità di installazione e la quasi assenza di manutenzione. Nota

a sfavore è la necessità di un impianto di accumulo, come batterie o un serbatoio idrico e ovviamente la produzione molto variabile e stagionale dell'impianto che giustifica ulteriormente il primo punto. Inoltre, l'evoluzione del settore fotovoltaico ha portato a una riduzione significativa dei costi di produzione e a un miglioramento delle prestazioni dei moduli, favorendone una sempre più ampia diffusione a livello globale.

Tuttavia, affinché l'energia prodotta possa essere efficacemente immessa nella rete elettrica, è necessario disporre di sistemi di conversione e controllo avanzati e il ruolo chiave per la conversione e l'interfaccia con la rete è interpretato dall'inverter. Questo dispositivo è in grado di convertire una corrente continua in alternata e permette uno scambio di energia in entrambe le direzioni, verso la rete e verso il carico. Esistono diverse tipologie di inverter a seconda dell'utilizzo che ne viene fatto, per la conversione nelle reti elettriche oppure per il controllo di motori elettrici ma la principale suddivisione si ha tra inverter di tensione VSI e inverter di corrente CSI. Nel primo caso, si tratta di un convertitore che data una tensione costante, utilizza degli switch comandati in modo tale da applicare una tensione alternata in uscita, dove la corrente è conseguenza del carico connesso. Invece per quanto riguarda il convertitore CSI, questo utilizza anche esso degli switch controllati in modo tale da deviare il percorso della corrente e ottenere una corrente alternata in uscita. Sono presenti numerose differenze tra le due tipologie di convertitore, prima fra tutte, la popolarità del convertitore di tensione, largamente più utilizzato e diffuso rispetto al convertitore di corrente che sta guadagnando popolarità solo negli ultimi anni.

In aggiunta ai dispositivi di conversione dell'energia appena trattati, in un impianto di produzione connesso alla rete che utilizza fonti di energia rinnovabili, sono di fondamentale importanza i dispositivi per il mantenimento dei servizi ausiliari di rete. Per un impianto di produzione classico che utilizza combustibili fossili e vede l'impiego di generatori rotanti questi servizi sono già garantiti. Si devono quindi implementare dei sistemi che permettano che questo avvenga anche negli impianti rinnovabili moderni che vogliono sostituire gli impianti più datati. I servizi ausiliari assumono un ruolo fondamentale per garantire la stabilità e l'affidabilità del sistema. Essi comprendono funzioni come il controllo della tensione, il sostegno della frequenza e la fornitura di potenza reattiva, indispensabili per mantenere la qualità dell'energia erogata e preservare l'integrità della rete anche in condizioni di disturbo o variazioni improvvise del carico. Per garantire questi servizi fondamentali vengono impiegate diverse tecnologie, tra cui l'implementazione virtuale di un generatore sincrono rotante. Infatti, come detto in precedenza, negli impianti classici che vedono la presenza di un generatore rotante i servizi ausiliari di rete vengono garantiti. L'idea quindi, è quella di simulare il funzionamento di un generatore sincrono virtuale e controllare il convertitore connesso a rete fornendo la potenza attiva e reattiva data come riferimento dal generatore rotante virtuale. Ci si riferisce a questo dispositivo con una sigla inglese VSG, Virtual Synchronous Generator, e viene analizzato nel dettaglio nei successivi paragrafi.

1.1 Obbiettivo

Questo elaborato si propone di analizzare e simulare l'implementazione di un convertitore CSI descrivendone la tecnica di controllo e di modulazione con l'obbiettivo di utilizzarlo per fare da interfaccia con la rete elettrica attraverso l'uso di un generatore sincrono virtuale VSG. Inoltre, vengono effettuate simulazioni e prove sperimentali per determinare il funzionamento del sistema. Nei successivi capitoli vengono descritti i dispositivi utilizzati, il loro funzionamento e la tecnica di controllo adottata. Vengono inoltre descritte nel dettaglio le simulazioni effettuate in tempo continuo e discreto evidenziando le problematiche riscontrate e le soluzioni adottate. Infine, il sistema descritto viene implementato nella realtà su un banco di prova fisico e vengono analizzati i risultati ottenuti e confrontati rispetto a quelli ricavati dalle simulazioni.

Capitolo 2

Current Source Inverter (CSI)

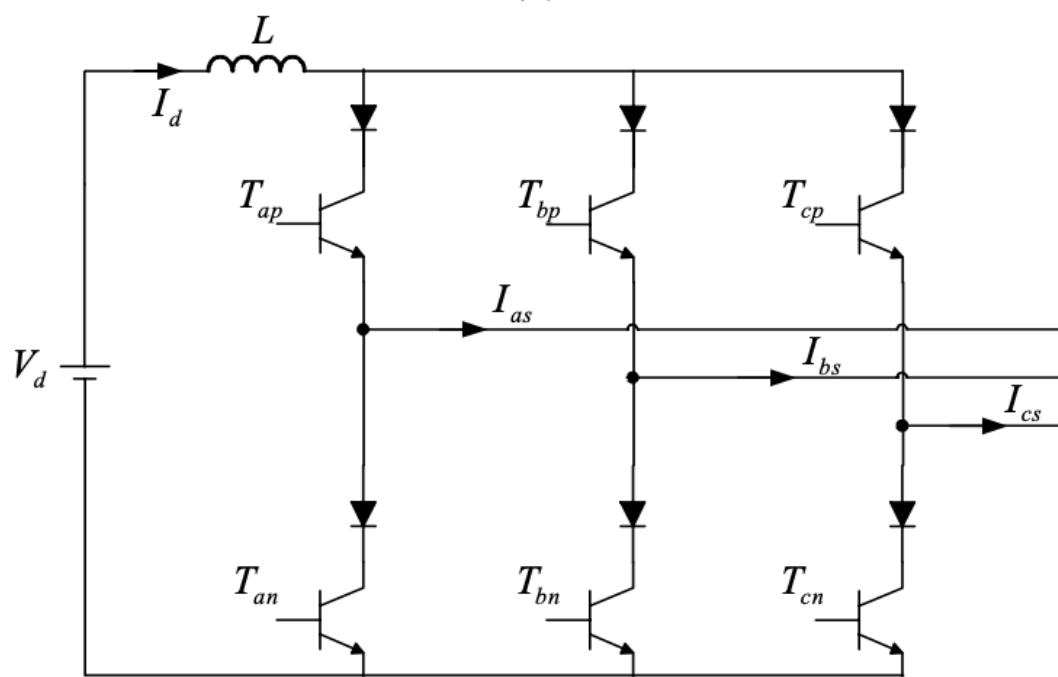


Figura 2.1: circuito CSI da [1].

Il Current Source Inverter è un convertitore elettronico di potenza capace di convertire una corrente continua in alternata con l'utilizzo di switch comandati. Dal nome del dispositivo si intuisce che la protagonista della conversione è la corrente elettrica che partendo da una sorgente continua, viene convertita in un segnale sinusoidale, contenente le armoniche derivanti dal funzionamento del convertitore stesso. Come detto nel capitolo precedente, il convertitore CSI è meno diffuso del VSI, ma negli ultimi anni l'interesse per il convertitore in corrente è cresciuto. In particolare, per le applicazioni in campo fotovoltaico, e il motivo di questo crescente interesse è dovuto ai numerosi vantaggi offerti dal dispositivo:

- Indipendenza della corrente dal carico
- Ammissibile il corto circuito di gamba
- Non necessita diodo di freewheeling

Il convertitore è costituito da switch comandati che possono essere di diverso tipo, numero e disposizione a seconda della tecnologia adottata. La caratteristica principale che devono avere gli switch è quella di essere in grado di bloccare tensioni negative e positive, in modo da poter deviare il percorso della corrente in modo efficace. A seconda della tipologia di switch adottata si possono avere convertitori a 6 oppure a 12 switch con caratteristiche differenti, le tecnologie principali di switch sono tre:

- Tiristori SCR
- Doppio Mosfet in anti-serie
- Monolithic Bidirectional Switch

Gli switch SCR sono l'opzione più vecchia, dove vengono utilizzati dei dispositivi difficili da comandare e che non si possono spegnere con un comando ma si spengono naturalmente. Questa caratteristica impatta negativamente sul controllo e sulla massima frequenza di commutazione del convertitore. La tecnologia Mosfet invece, è la classica che viene anche utilizzata nei dispositivi di tipo VSI dove si controlla uno switch con ottime caratteristiche di controllo e di rapidità. Nel convertitore CSI però, utilizzando i Mosfet bisogna connettere due switch in anti-serie per poter bloccare la tensione in entrambe le direzioni, ottenendo un convertitore con dodici dispositivi. Questo aspetto comporta costi aggiuntivi. Infine, i Monolithic Bidirectional Switch, sono dispositivi nella maggior parte dei casi costituiti da materiale di tipo GaN, in grado di bloccare tensioni sia positive che negative, ottenendo quindi una topologia di convertitore con sei switch.

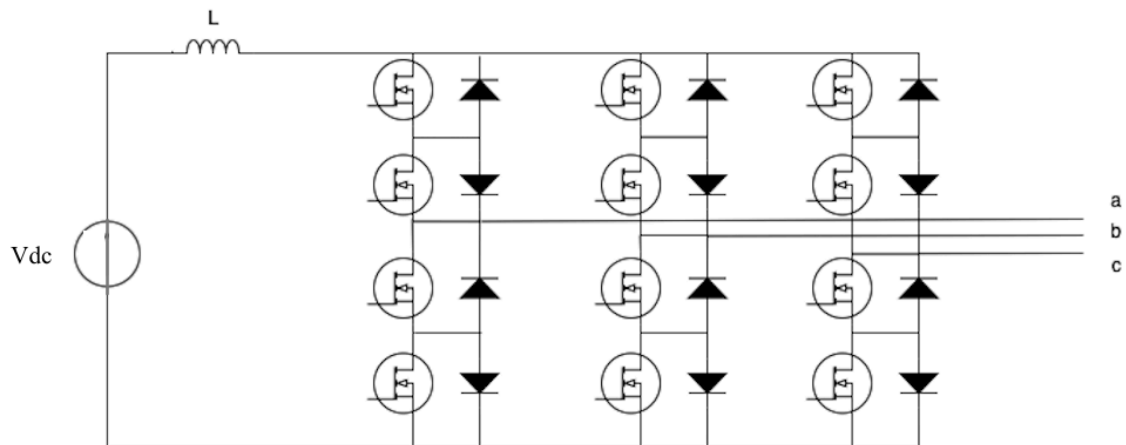


Figura 2.2: circuito CSI a mosfet.

In Figura 2.2 è rappresentato lo schema circuitale di un convertitore CSI a Mosfet alimentato in ingresso da un generatore ideale di tensione. Per filtrare la corrente e garantire maggiore continuità di quest'ultima, viene utilizzato in ingresso un induttore di grandi dimensioni.

Una volta elencate le principali soluzioni adottate per progettare un Current Source Inverter, viene analizzato in dettaglio il suo funzionamento. Il principio di funzionamento prevede che gli switch vengano comandati in modo tale da deviare il percorso della corrente nelle tre fasi dell'inverter e ottenere quindi in uscita tre segnali sinusoidali. Per spiegare meglio il principio di funzionamento, viene illustrata sotto in Figura 2.2 una rappresentazione semplificata del convertitore, dove gli switch vengono sostituiti con due deviatori ideali Th e Tl.

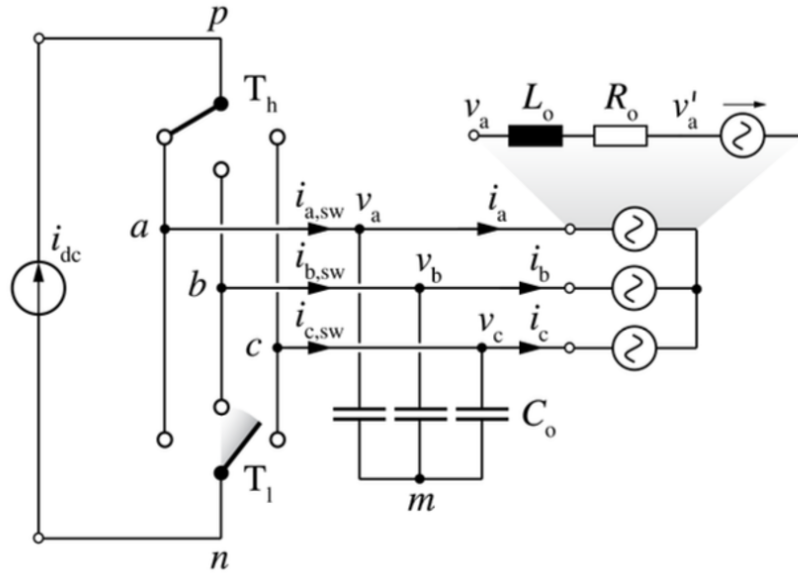


Figura 2.3: CSI semplificato da [2].

Nel sistema rappresentato in Figura 2.3 abbiamo due deviatori che possono occupare tre posizioni differenti ciascuno. In questo modo si ottengono nove configurazioni possibili che vengono divise in due famiglie: active state e zero state. Active state si riferisce alle sei posizioni impiegate che garantiscono un collegamento tra sorgente e carico, invece zero state si riferisce alle tre posizioni che cortocircuitano il generatore ideale in ingresso. Gli switch sono comandati seguendo una logica di tipo Space Vector, dove a seconda del rispettivo sestante nel quale si trova il vettore corrente si impiegano due active states e uno zero state. Lo schema che rappresenta gli active e gli zero states viene illustrato nell'esagono di Figura 2.3. Andando quindi a comandare opportunamente gli switch all'interno del nostro convertitore con gli opportuni active states e zero states si ottiene in uscita per ciascuna fase una forma d'onda di corrente sinusoidale.

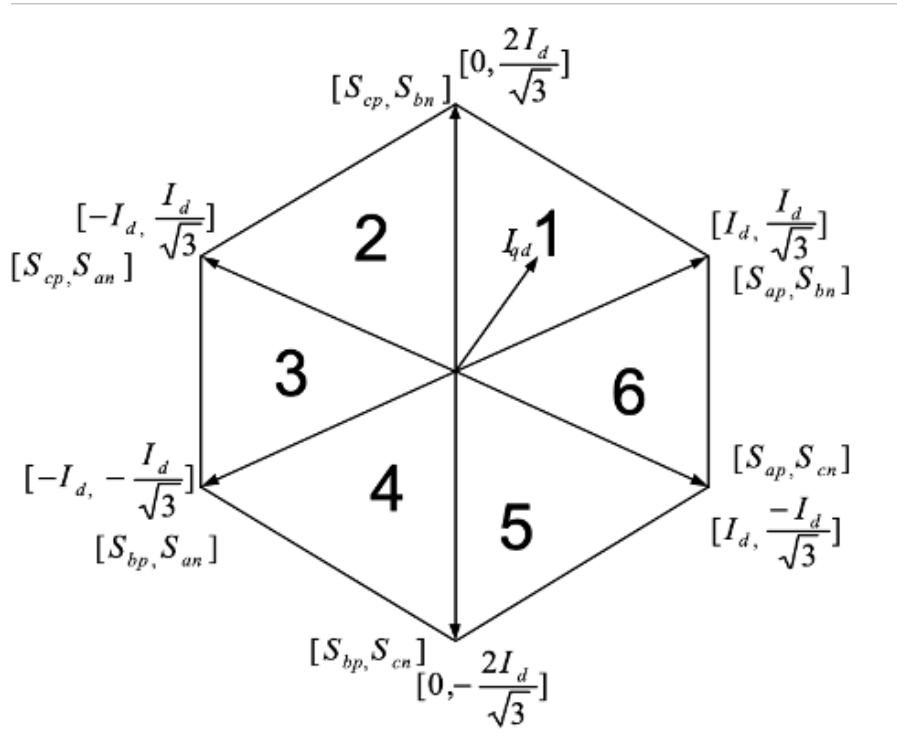


Figura 2.4: esagono SVM da [1].

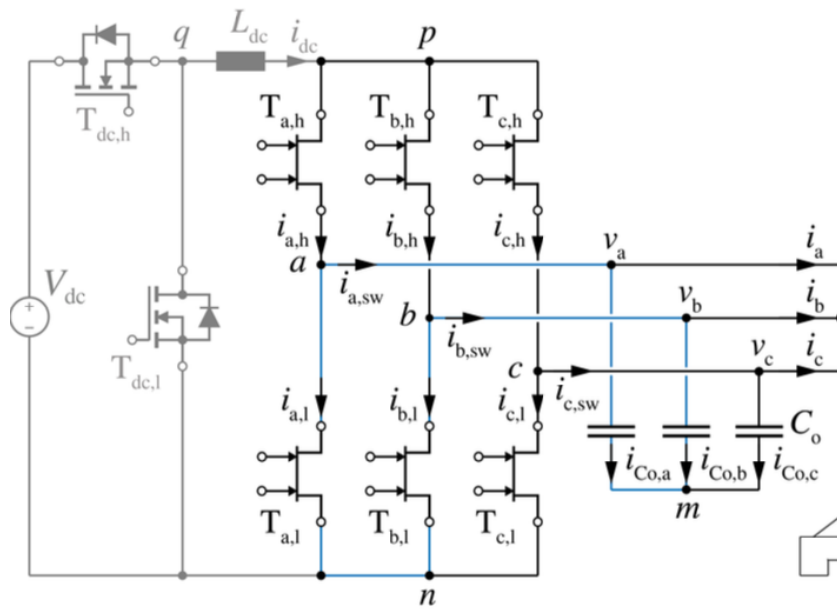


Figura 2.5: schema di un CSI reale da [2].

Un esempio applicativo di utilizzo di un convertitore CSI si può vedere in Figura 2.5, dove è rappresentato lo schema di un inverter di corrente reale, dove vengono impiegati sei Monolithic Bidirectional Switches. Inoltre, è possibile vedere la presenza di tre condensatori connessi a stella sulle tre fasi in uscita dal convertitore, che hanno lo scopo di garantire la continuità del segnale di tensione ai capi degli switch. Il convertitore in esame ha un ingresso di tipo induttivo (Boost) con un grosso induttore L_{dc} dimensionato per filtrare il ripple di corrente in ingresso e ottenere una corrente continua il più ideale possibile. E' bene notare come il generatore ideale di tensione rappresenta un generatore fotovoltaico con convertitore DC/DC connesso per adattare e inseguire il valore di tensione desiderato. Infine, si nota nello schema proposto un ulteriore switch connesso in parallelo prima del CSI, questo dispositivo ha un ruolo di sicurezza e cortocircuita il generatore di ingresso impedendo il funzionamento del convertitore a valle.

2.1 Modulazione

In questa sezione vengono descritte le diverse tecniche di modulazione che si possono adottare per il controllo di un Current Source Inverter. Con modulazione si intende la strategia di controllo degli switch comandati al fine di ottenere il corretto funzionamento del convertitore e quindi avere in uscita le forme d'onda sinusoidali volute. Esistono diverse tecniche di modulazione differenti che si distinguono principalmente in due categorie: tecniche di modulazione continue e discontinue.

- Tecniche di modulazione Continue: i duty cycle calcolati sono delle forme d'onda continue e senza saturazione.
- Tecniche di modulazione Discontinue: i duty cycle calcolati non sono continui e presentano dei tratti saturati.

Il motivo dell'utilizzo di tecniche di modulazione discontinue è legata ad una maggiore efficienza e quindi minore dissipazione di energia di commutazione grazie alla saturazione di alcuni switch per un certo periodo di tempo. Le tecniche Continue principali sono:

- PWM sinusoidale
- Space Vector Modulation, SVM
- Six-Step continuo

Le tecniche Discontinue principali sono:

- PWM discontinuo
- Selective Harmonic Elimination
- SVM discontinuo

Di seguito vengono spiegate le tre tecniche di modulazione utilizzate per controllare il convertitore CSI all'interno delle simulazioni eseguite in seguito.

2.1.1 Modulazione discontinua

La tecnica di modulazione utilizzata nella progettazione e studio del convertitore in esame è una tecnica di tipo discontinuo basata sulla Space Vector Modulation descritta in [2]. Il metodo di controllo scelto garantisce una notevole semplicità nel calcolo dei duty cycle e quindi dei vettori da imporre all'interno dell'esagono della SVM. Infatti, non c'è la necessità di dover individuare la corretta posizione del vettore rotante di corrente e non è richiesta la conoscenza dell'angolo. Come per la tecnica SVM, in ogni sestante si applicano 2 vettori Attivi e 1 vettore Zero, andando a calcolare i duty high e low attivi aggiungendo inoltre il duty associato allo zero state. Le formule utilizzate per la modulazione sono quelle illustrate in Figura 2.6 riportata sotto.

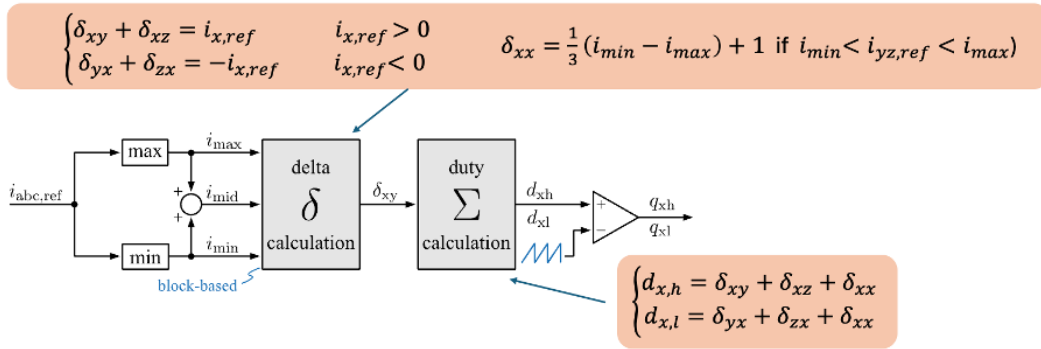


Figura 2.6: schema di calcolo del duty cycle.

Come si evince dalla Figura sopra, partendo dalla corrente di riferimento desiderata e calcolando il massimo e il minimo si ottengono i duty high e low. Inoltre, quando il riferimento è compreso tra il valore minimo e il valore massimo, viene aggiunto il termine delta come zero state. La forma d'onda dei duty cycles ottenuti con le formule descritte è visibile in Figura 2.7 sotto, dove è evidente il comportamento discontinuo dovuto alla tecnica utilizzata.

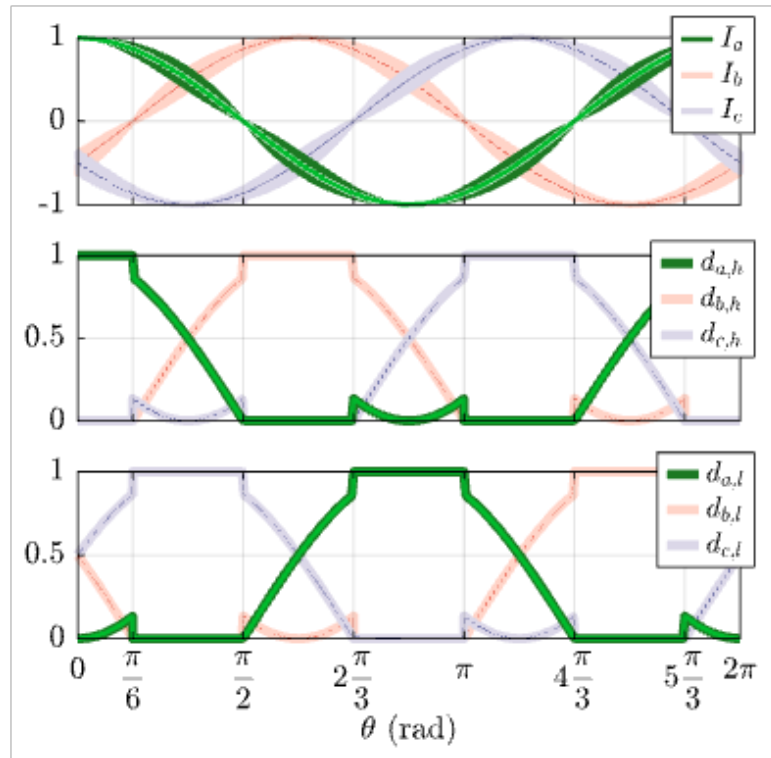


Figura 2.7: forma d'onda duty cycle.

Una volta ottenuti i duty cycles come descritto in precedenza, si calcolano i comandi da imporre ai gate driver degli switch comandati, e per fare ciò viene utilizzato lo schema di Figura 2.8. Nello schema proposto si esegue un confronto tra il duty cycle e una forma d'onda triangolare con una frequenza ben definita: la frequenza di switching. Questa frequenza determina la velocità di esecuzione della conversione del Current Source Inverter, e di conseguenza le relative armoniche in uscita. Inoltre, nel calcolo dei comandi vengono utilizzate delle unità logiche come quella NOT e si ottengono infine le tre q_a, b e c alte e basse, per un totale di sei comandi.

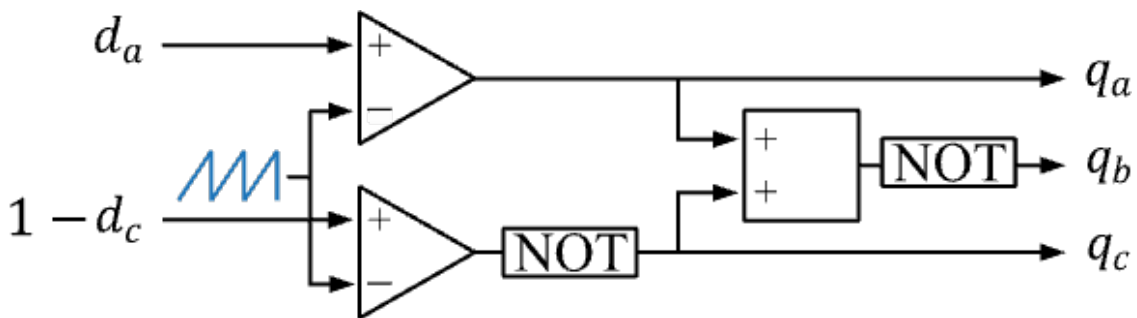


Figura 2.8: schema di calcolo dei comandi.

2.1.2 Modulazione continua

Partendo dalla modulazione appena discussa, si utilizzano le stesse equazioni presenti in Figura 2.6 con la differenza che non viene considerato il contributo di discontinuità dello stato Zero. Infatti, partendo dai riferimenti sinusoidali non viene aggiunto il componente Delta discontinuo utilizzato in precedenza. In questo modo, si ottiene una forma d'onda di duty cycle sinusoidale come la prima Figura in 2.7, che garantisce l'assenza di discontinuità nella modulazione del convertitore. Questo però non garantisce i vantaggi presenti con una modulazione di tipo discontinuo come la presenza di minori perdite di commutazione. La necessità di modificare la tecnica di modulazione originale e renderla continua, nasce per poter ottenere delle forme d'onda di corrente in uscita meno distorte. Questa modulazione non garantisce la presenza di un ripple di corrente sulle tre fasi della stessa ampiezza, perciò, si decide di utilizzare un'ulteriore tecnica spiegata sotto.

2.1.3 Modulazione continua derivata da VSI

La tecnica di modulazione in esame è una tecnica che deriva dal controllo space vector di un inverter di tensione (VSI), che viene adattato al controllo di un inverter di corrente (CSI) contenuta in [3]. Questo viene fatto perchè, come già detto, le tecniche precedenti calcolano i comandi utilizzando solo due duty cycle su tre e le forme d'onda di corrente ottenute presentano un diverso valore di ripple sulle tre fasi. Utilizzando la

tecnica derivata dal VSI questo problema non esiste e inoltre è una tecnica continua. In Figura 2.9 viene rappresentato lo schema presente in [3], che spiega come implementare la modulazione.

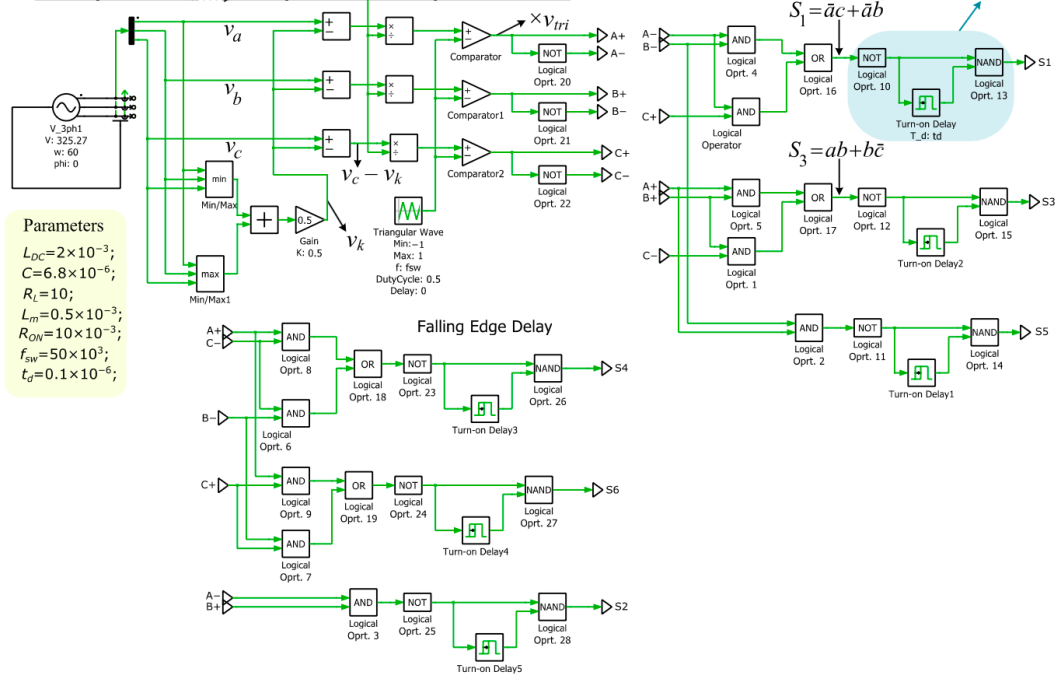


Figura 2.9: Modulazione derivata da VSI presente in [3].

Nota importante da evidenziare, è la differenza tra la modulazione ottenuta e applicata al CSI e la modulazione classica SVM per il VSI. Data la diversa natura dei due convertitori, l'esagono che definisce i sestanti di modulazione è differente per i due dispositivi. In Figura 2.10, si nota a sinistra, l'esagono per il VSI e a destra l'esagono del CSI. La modulazione costruita per il CSI, sulla base della tecnica per il VSI è corretta se vengono sfasati i riferimenti di corrente in ingresso di 30° elettrici. In questo modo, l'esagono che definisce i sestanti coincide per i due convertitori.

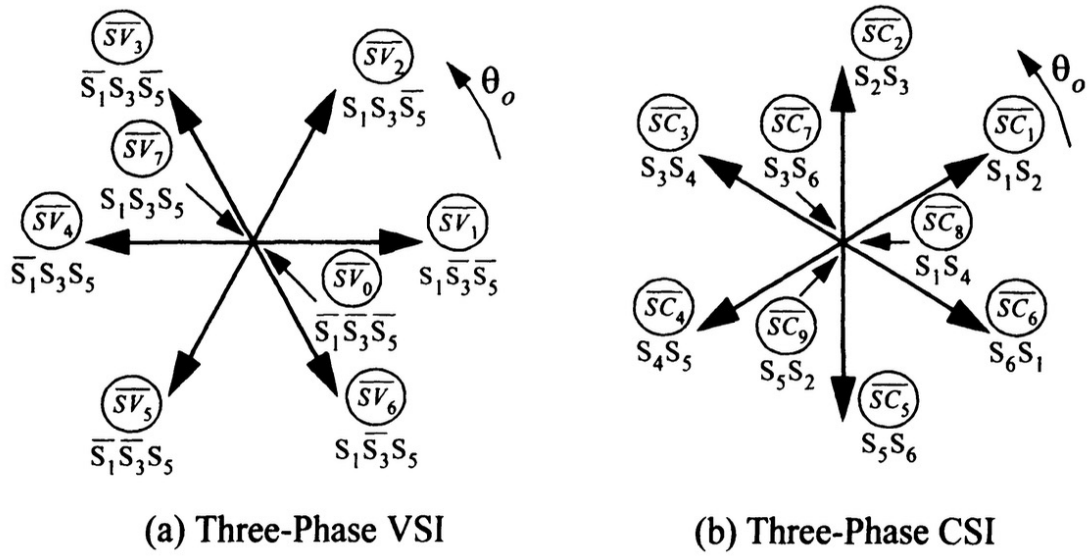


Figura 2.10: A sinistra: esagono del VSI. A destra: esagono del CSI. Da [3].

Capitolo 3

Virtual Synchronous Generator (VSG)

In questo capitolo viene discusso il funzionamento del generatore sincrono virtuale VSG, utilizzato nel progetto in esame per connettere il convertitore CSI con la rete elettrica. Il generatore sincrono rotante normalmente viene impiegato per la produzione classica di energia elettrica mediante combustibili fossili ed è in grado di fornire dei servizi ausiliari per la gestione della rete elettrica. Il più importante è l'inerzia del generatore che garantisce una regolazione della frequenza di rete in caso di una repentina variazione di energia nella rete. Il generatore rotante è di fondamentale importanza quindi per la gestione dell'intero sistema elettrico ma, la recente tendenza a sostituire impianti di produzione classici con impianti rinnovabili fotovoltaici non garantisce i servizi di cui sopra. Nasce quindi la necessità di implementare un sistema virtuale che emuli il comportamento del generatore sincrono per mantenere funzionante e stabile la rete elettrica. La risposta a questa necessità è fornita proprio dal Virtual Synchronous Generator, un modello matematico costituito da diverse parti che emula in modo virtuale un generatore sincrono rotante e ne garantisce i medesimi comportamenti dinamici. Inoltre, nell'applicazione in esame, il VSG fornisce i valori di angolo e pulsazione di rete che, tranne in un primo transitorio coincidono esattamente con i valori reali della rete connessa. Utilizzando quindi angolo e pulsazione ottenuti dallo stesso generatore virtuale, non esiste la necessità di inseguitori e stimatori di angolo per il controllo del CSI come il sistema PLL.

Il modello completo viene rappresentato nello schema concettuale in Figura 3.1, dove si notano in ordine: la parte meccanica, il calcolo della potenza virtuale, l'eccitazione e lo statore virtuale. Nota importante da considerare è quella relativa al fatto che l'intero sistema lavora in valori relativi, quindi ogni grandezza in ingresso viene convertita in pu e i risultati in uscita dal VSG vengono successivamente riconvertiti in grandezze reali.

Inoltre, il generatore sincrono virtuale utilizzato nel seguente elaborato lavora in una condizione particolare, a riferimenti di potenza nulli. I generatori sincroni classici lavorano con riferimenti di potenza diversi da zero che però garantiscono un funzionamento all'interno della regione stabile di esercizio. Nel caso del generatore sincrono virtuale per le applicazioni di interfaccia alla rete con impianti rinnovabili invece, il sistema lavora

con riferimenti di potenza a zero. Cioè il modello lavora sempre senza carico e opera solamente quando è necessario, quando si ha una variazione della frequenza. Nella maggior parte del tempo il sistema è inerte e il riferimento di potenza è garantito dal Current Source Inverter.

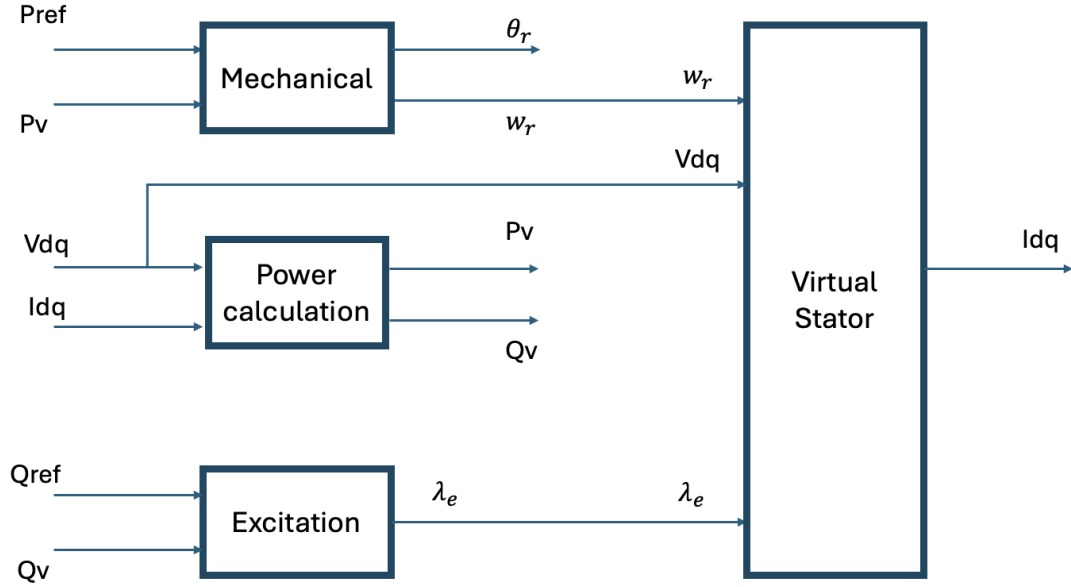


Figura 3.1: schema concettuale VSG.

Nei successivi paragrafi, vengono analizzate una per una in ordine le parti che descrivono il modello completo del generatore virtuale basandosi sulle informazioni contenute in [4].

3.1 Modello meccanico

Il modello meccanico è la parte che descrive la dinamica meccanica del generatore rotante. Il modello viene implementato seguendo l'equazione meccanica del rotore in modo semplificato, la Swing Equation, senza considerare lo smorzamento.

$$P_v^* - P_v = 2H \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3.1)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \cdot \omega_b \quad (3.2)$$

Le equazioni scritte sopra vengono usate e scritte in blocchi in Figura 3.2, inoltre si nota la presenza di uno smorzamento che viene introdotto. Lo smorzamento viene introdotto

utilizzando un filtro Lead-Lag con l'equazione 3.3 che filtra la potenza virtuale derivante dal modello del generatore.

$$H_{LL}(s) = \frac{1 + s\tau_z}{1 + s\tau_p} \quad (3.3)$$

I parametri del filtro utilizzato sono scelti in base alla taratura presente in [5].

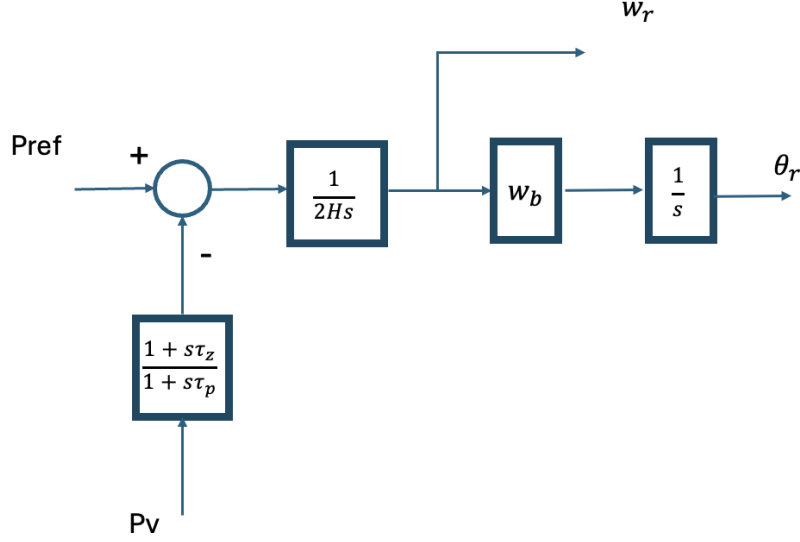


Figura 3.2: schema concettuale parte meccanica.

3.2 Calcolo della potenza virtuale

Per calcolare la potenza virtuale presente in un determinato istante si usa l'equazione 3.4 illustrata sotto, che utilizza la tensione e la corrente in assi d e q misurate. Nello specifico, la tensione è quella misurata di rete, mentre la corrente deriva dalla corrente di statore virtuale del modello del generatore che viene analizzato in seguito.

$$P_v + jQ_v = (v_d + jv_q)(i_d - ji_q) \quad (3.4)$$

3.3 Modello dell'eccitazione

L'eccitazione del generatore sincrono virtuale viene modellata utilizzando l'equazione 3.5. La formula prevede l'integrazione della differenza tra la potenza reattiva presente e quella desiderata utilizzando il termine Ke. Questo, come illustrato nell'equazione 3.6, racchiude rispettivamente i valori di induttanza dello statore del nostro generatore e

dell'induttanza stimata di rete.

$$\lambda_e = \int \frac{k_e (Q_v^* - Q_v)}{V_g} dt \quad (3.5)$$

$$k_e = \frac{L_s + L_g^{\text{est}}}{\tau_e}, \quad \tau_e = 1 \text{ s} \quad (3.6)$$

3.4 Statore virtuale

Lo statore virtuale del generatore sincrono virtuale viene modellizzato utilizzando le equazioni elettriche di statore di un sincro riportate di seguito.

$$v_d = -R_s i_d - \omega_r \lambda_q + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda_d}{dt} \quad (3.7)$$

$$v_q = -R_s i_q + \omega_r \lambda_d + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\lambda_q}{dt} \quad (3.8)$$

Inoltre, in Figura 3.3 e in Figura 3.4 si possono notare i circuiti equivalenti di statore in asse d e in asse q che fanno riferimento alle stesse equazioni riportate in precedenza. Come detto nei paragrafi precedenti, non viene considerato alcun smorzatore nelle equazioni per semplicità di realizzazione.

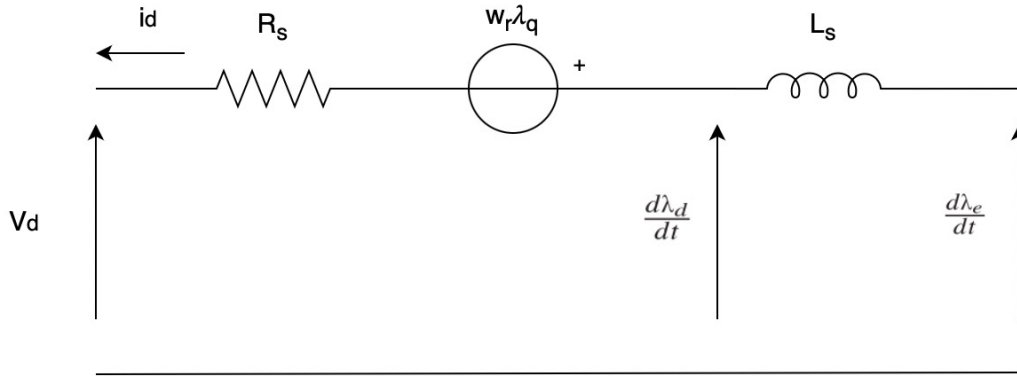


Figura 3.3: circuito equivalente asse d.

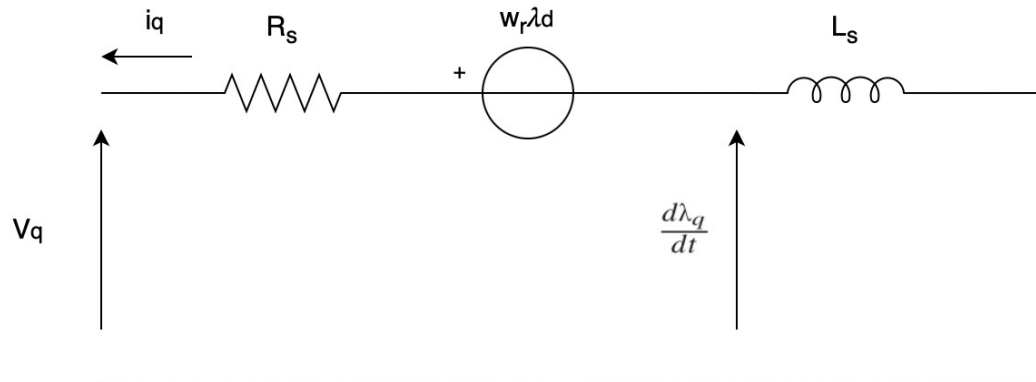


Figura 3.4: circuito equivalente asse q.

Capitolo 4

Modello di simulazione

In questo capitolo viene descritto il modello di simulazione che implementa il convertitore Current Source Inverter connesso alla rete elettrica con l'utilizzo del VSG mediante il software Plecs. Nello specifico, nell'ambiente simulato sono presenti: il convertitore DC/DC che svolge il ruolo di generatore di corrente ideale in ingresso, il convertitore CSI, il filtro CLC in uscita e infine la rete elettrica. Inoltre, per eseguire il controllo del sistema, viene implementato il controllo del CSI prima con l'utilizzo di un inseguitore PLL e successivamente con il VSG. La tabella che segue riassume i dati principali della simulazione plecs.

Potenza base	150 kVA
Valore efficace tensione rete	230 V
Tensione del generatore DC	600 V
Freq. di switching	30 kHz
Freq. di rete	50 Hz

Tabella 4.1: Valori impiegati in simulazione.

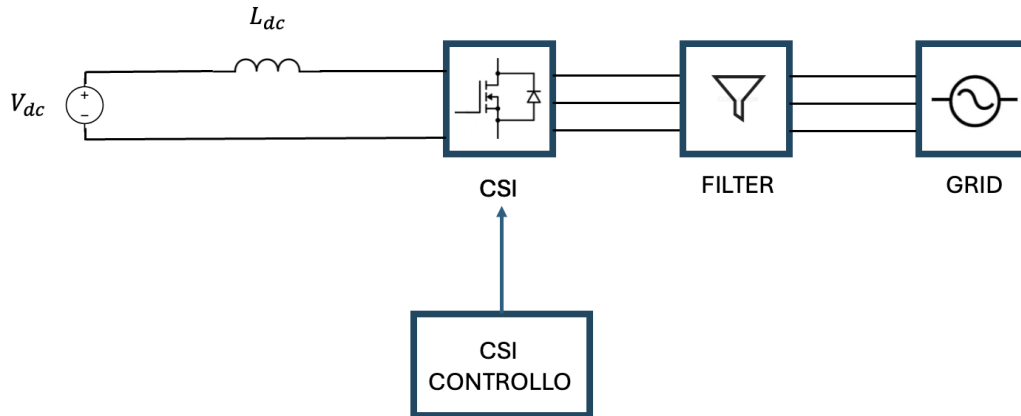


Figura 4.1: schema concettuale simulazione.

Lo schema concettuale rappresentato in Figura 4.1 visualizza gli elementi presenti all'interno del sistema simulato. Partendo da sinistra si nota il generatore ideale di corrente continua, il convertitore CSI, l'unità di filtraggio e la rete elettrica. In seguito vengono analizzati tutti i dispositivi presenti, viene chiarito il loro funzionamento e le modalità di controllo.

Nei paragrafi successivi viene descritto nel dettaglio il modello di simulazione, dove il sistema viene implementato e controllato prima in tempo continuo, successivamente utilizzando un tempo discreto, emulando il comportamento di un controllo reale digitale, e infine viene simulato il sistema utilizzando i dispositivi presenti in laboratorio come RTBox e la scheda microSTM.

4.1 Simulazione in tempo continuo

In questa sezione viene descritta la simulazione dell'impianto utilizzando grandezze nel tempo continuo per familiarizzare con il convertitore e implementare una simulazione più semplice, non considerando quindi un controllo reale di tipo digitale che verrà descritto in seguito. Inoltre, in questo paragrafo, sono esposti e analizzati i risultati ottenuti e i problemi riscontrati durante la simulazione.

Sotto, sono analizzati uno per uno tutti i dispositivi utilizzati all'interno della simulazione, con relative figure per chiarire la modalità di implementazione utilizzata.

4.1.1 Current Source Inverter

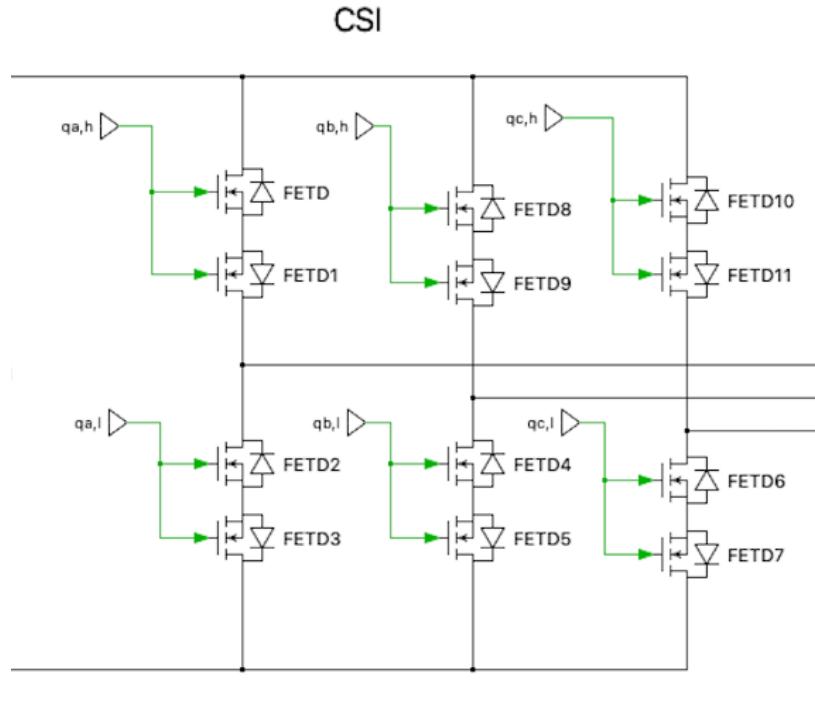


Figura 4.2: circuito CSI simulato.

In Figura 4.2 è rappresentato lo schema circuitale del CSI utilizzato in simulazione. Il convertitore utilizza dodici Mosfet connessi in antiserie per garantire il corretto funzionamento. Inoltre come si può vedere ogni coppia di switch è comandata con un segnale di controllo q , per un totale di sei comandi complessivamente.

4.1.2 Generatore di corrente continua

Il generatore ideale di corrente continua è un dispositivo che non esiste nella realtà, ma in simulazione può essere utilizzato prendendo il blocco "current generator" e impostando un valore costante di corrente. Nella simulazione in esame però, questo generatore è implementato utilizzando un convertitore DC/DC di tensione. Infatti, nella Figura 4.3 si vede il generatore ideale di tensione, che nella realtà potrebbe essere un impianto fotovoltaico o una batteria, connesso ad una coppia di Mosfet comandati che formano un convertitore H-bridge. Quest'ultimo, consente la regolazione di una tensione continua, erogata dal generatore in ingresso e garantisce il mantenimento di una corrente continua circa costante. Si ottiene quindi un funzionamento non ideale dove sono presenti numerose armoniche dovute al convertitore stesso che però garantisce un comportamento

medio molto simile al caso ideale con una corrente circa continua in ingresso al CSI. La tensione del generatore ideale in ingresso è impostata a 600 V per garantire il corretto funzionamento del convertitore data la potenza richiesta. Inoltre, in uscita dal convertitore viene inserito un induttore di grosse dimensioni per filtrare il ripple presente all'interno della corrente continua generata. Il valore di induttanza è calcolato con le equazioni sotto utilizzando un valore massimo di ripple consentito del cinque percento della corrente continua.

$$\Delta I = 0.05 \cdot I_{DC} \quad (4.1)$$

$$L_{DC} = \frac{1}{\Delta I_L} \cdot \frac{V_{in}}{f_{swDC}} \cdot (1 - 0.5) \cdot 0.5 \quad (4.2)$$

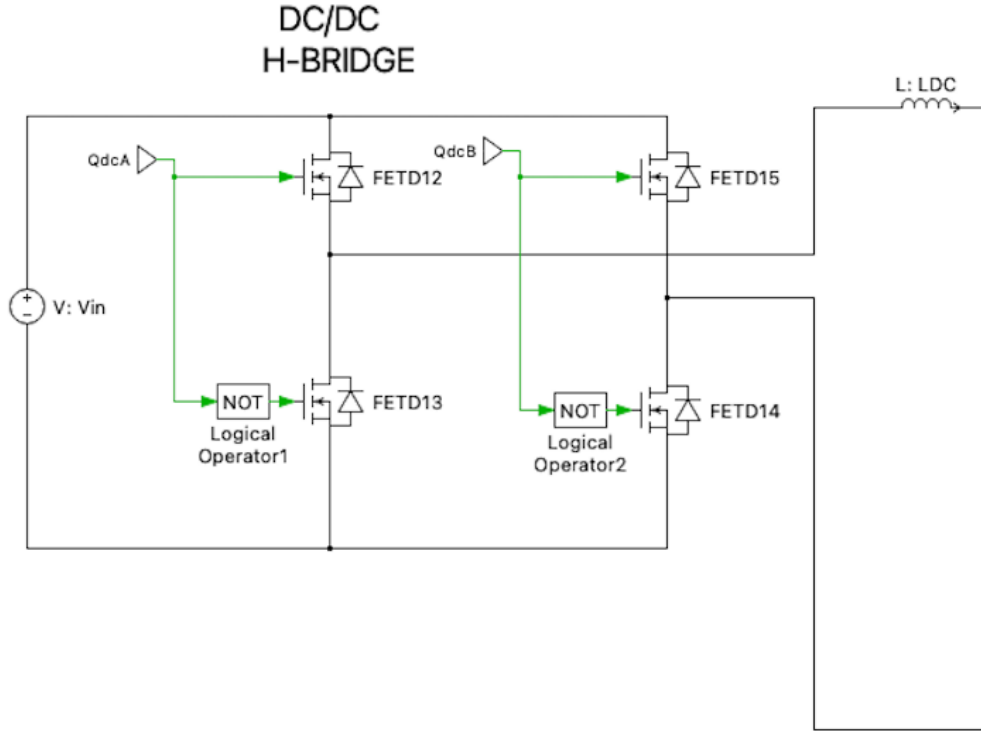


Figura 4.3: circuito CSI simulato.

4.1.3 Rete elettrica

Il modello che rappresenta la rete elettrica trifase è composto da tre fasi dove in ognuna di esse è presente una parte resistiva e una reattiva, induttiva. Inoltre, vengono utilizzati tre generatori sinusoidali di tensione ideali configurati opportunamente in modo da funzionare come una vera rete trifase. I generatori di tensione sono settati con una tensione di fase efficace pari a 230 V, le tre fasi hanno uno sfasamento di 120 gradi

elettrici con frequenza di rete a 50 Hz. Per quanto riguarda invece i valori resistivi e reattivi della rete sono settati utilizzando i seguenti valori base:

$$V_b = \sqrt{2} \cdot 230V, S_b = 150kVA \quad (4.3)$$

$$\frac{X}{R} = 8, X_{pu} = 0.05 \quad (4.4)$$

Lo schema elettrico della rete utilizzata all'interna della simulazione è rappresentato in Figura 4.4.

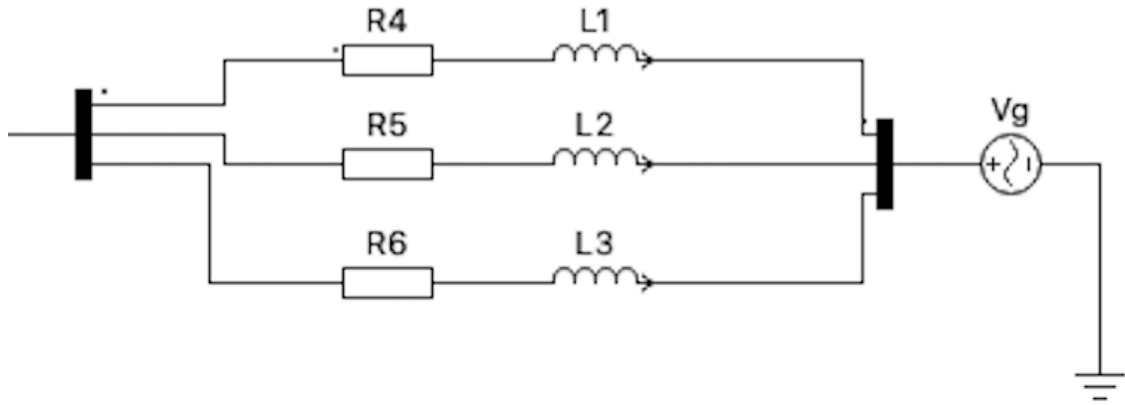


Figura 4.4: rete elettrica.

4.1.4 Filtro CLC di rete

Con l'obiettivo di filtrare le armoniche presenti nelle correnti in uscita dal convertitore CSI, si implementa un filtro CLC posizionato prima della rete elettrica. Come detto nel paragrafo che descrive l'inverter di corrente, all'uscita di quest'ultimo bisogna inserire una stella di condensatori in modo tale da fornire la continuità della tensione sulle fasi. In aggiunta a queste capacità, si inseriscono in serie, una terna di induttori e una stella di condensatori come si può vedere in Figura 4.5. Il filtro composto da tre induttori e tre capacità lato rete, è un filtro del secondo ordine con frequenza di risonanza calcolata appositamente a 5 kHz. Per calcolare il valore di induttanza e capacità, viene fissato il valore di capacità C_{limite} al 5% della capacità base C_b . La capacità del filtro ottenuta viene suddivisa tra le due stelle di condensatori presenti, dove la stella lato convertitore è dimensionata con il 20% della C_{limite} , e invece la stella lato rete è dimensionata con l'80% della C_{limite} . Inoltre, come si nota nella 4.5, sono presenti delle resistenze di

smorzamento che anche esse vengono suddivise lato convertitore a $1m\Omega$ e lato rete a 5Ω . Una volta fissati i valori di capacità del filtro e la frequenza di risonanza si definisce l'induttanza da utilizzare con l'equazione seguente:

$$L_{fg} = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f_{res}}\right)^2}{C} \quad (4.5)$$

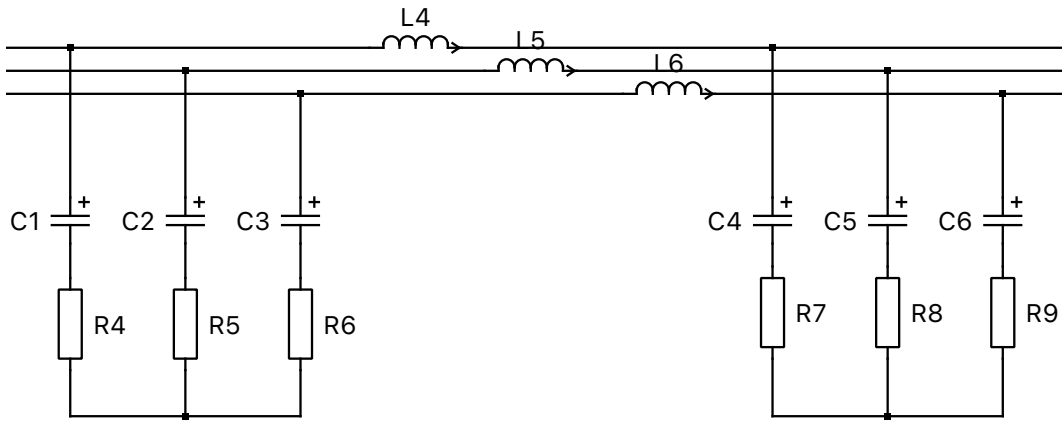


Figura 4.5: stella di condensatori lato CSI e filtro risonante LC.

4.1.5 Controllo in simulazione

Per ottenere il corretto funzionamento del sistema in simulazione, viene utilizzato un controllo appositamente tarato in grado di costruire i comandi degli switch dei due convertitori presenti: CSI e H-bridge. In seguito sono descritte le tecniche utilizzate in simulazioni per entrambi i convertitori. Inoltre, per l'inverter di corrente vengono analizzate due tecniche di controllo con il medesimo scopo ma dove vengono utilizzati nel primo caso uno stimatore PLL e nel secondo il generatore sincrono virtuale visto sopra.

Controllo CSI con PLL

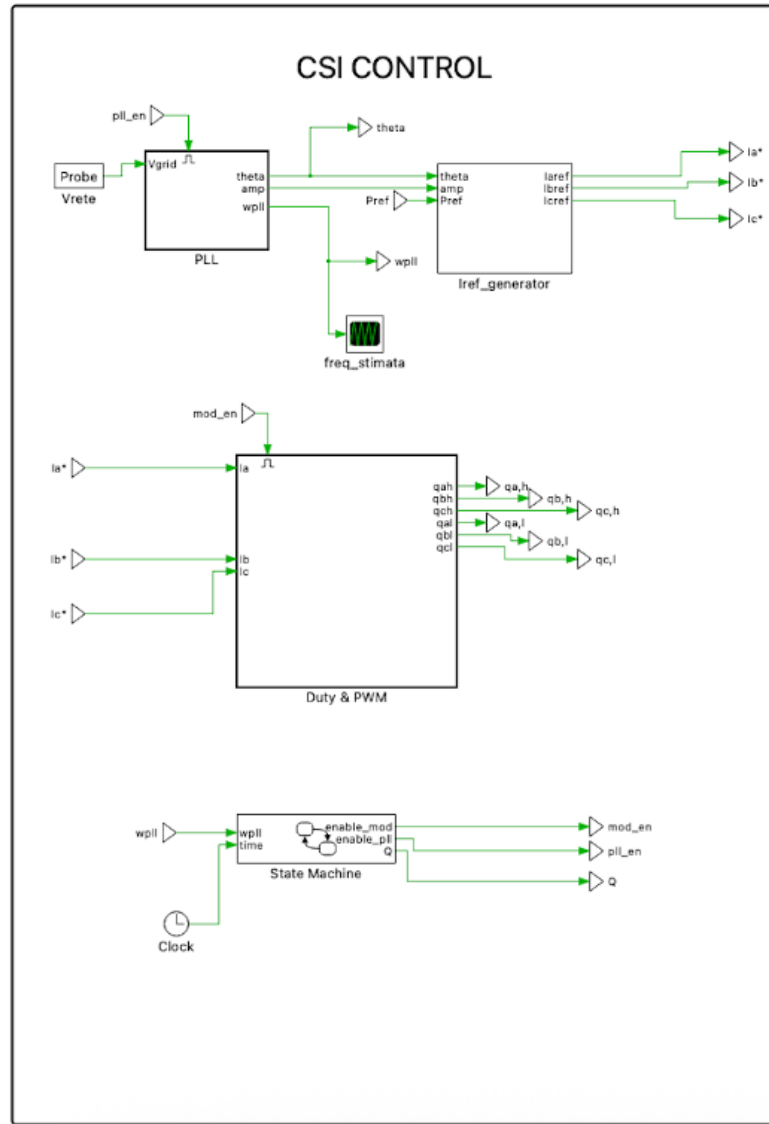


Figura 4.6: schema completo del controllo CSI.

Il controllo dell'inverter in corrente è rappresentato in Figura 4.6, dove si notano un primo blocco PLL, il blocco per il calcolo delle correnti di riferimento e il blocco del calcolo dei duty e dei comandi. Lo scopo principale è controllare il CSI in modo tale che, date tre correnti sinusoidali di riferimento, in uscita dal convertitore le tre correnti sinusoidali siano il più simili possibile ai riferimenti. I riferimenti di corrente utilizzati all'interno della simulazione sono ricavati a partire dal valore di potenza presente e dalla tensione di rete. Quest'ultima, viene stimata in ampiezza e fase dal blocco PLL (Phase

Locked Loop) che riceve in ingresso la tensione trifase misurata sui condensatori connessi all'uscita del CSI e ricava ampiezza, fase e pulsazione del vettore di rete rotante. Quindi, sulla base della misura della tensione di rete si costruiscono i riferimenti di corrente con cui controllare il CSI.

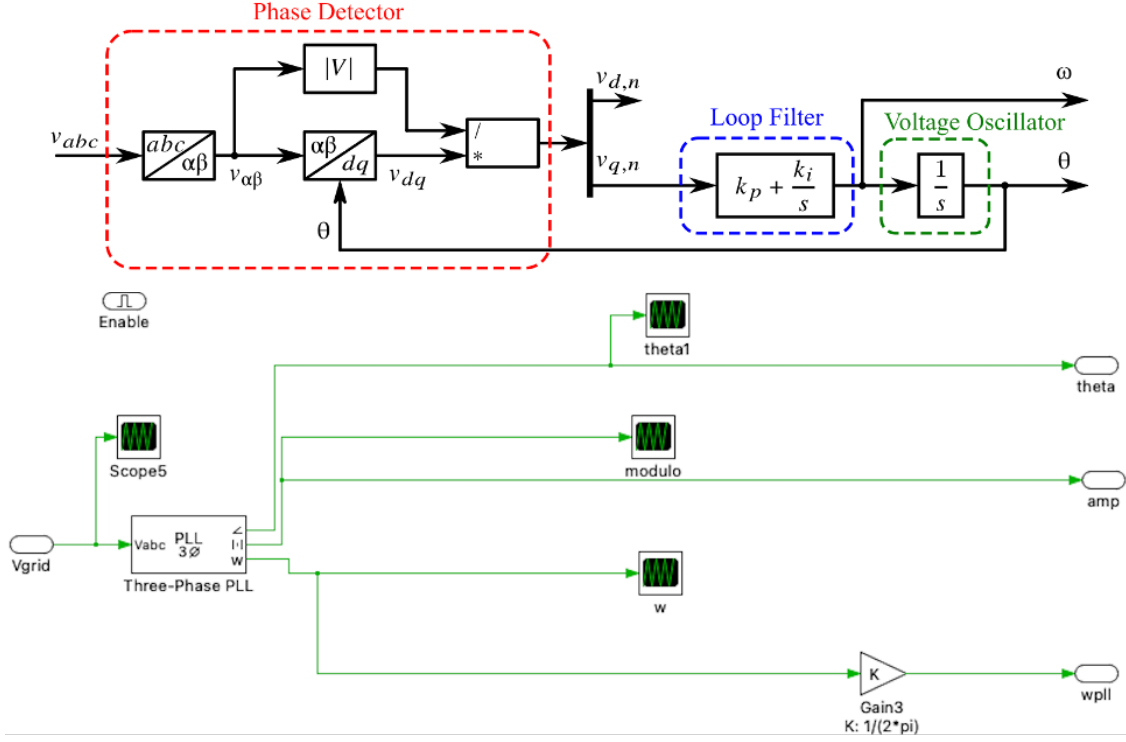


Figura 4.7: PLL da [6].

In Figura 4.7 è rappresentato il blocco PLL e lo schema concettuale che ne spiega il funzionamento presente in [6]. Come si può vedere, data in ingresso la tensione misurata sui condensatori delle fasi a, b e c, questa viene convertita in coordinate alpha e beta dalla quale si ottiene il modulo del vettore tensione. Successivamente, si calcola il vettore in coordinate d e q, e con l'utilizzo di un proporzionale, integrale, indicato in figura come "Loop Filter", si ottiene dal vettore rotante d,q la pulsazione. I guadagni del blocco PI sono settati in modo da ottenere una dinamica sufficientemente rapida e con un errore a regime ridotto. Le equazioni mostrate di seguito impostano i valori dei guadagni per il PLL.

$$\omega_{bw} = 2 \cdot \pi \cdot fbw, fbw = 10Hz \quad (4.6)$$

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4.7)$$

$$k_p = 2 \zeta \omega_{bw} \quad (4.8)$$

$$k_i = \omega_{bw}^2 \quad (4.9)$$

Infine, integrando nuovamente si calcola il valore della posizione angolare theta del vettore in ingresso. Viene utilizzato il blocco PLL per andare a stimare correttamente la pulsazione e l'angolo del vettore rotante di rete per andare a controllare il CSI in modo tale che venga garantito il sincronismo e che la corrente trifase da controllare sia in accordo con la tensione di rete.

Una volta stimata correttamente la tensione di rete in modulo, posizione e pulsazione, vengono calcolati i riferimenti di corrente da utilizzare nel controllo del CSI.

I riferimenti di corrente nella simulazione sono calcolati all'interno di un blocco dedicato che prevede la conoscenza della tensione di rete e della potenza attiva richiesta. Dati gli input richiesti, con l'utilizzo dell'equazione 4.10, si ottengono le correnti di riferimento in coordinate d,q, che successivamente con l'utilizzo dell'angolo theta vengono trasformate in coordinante trifase a,b e c. Inoltre, come si nota in Figura 4.8, una volta ottenuti i valori di corrente, questi vengono divisi in modulo per il valore della corrente continua in ingresso.

$$i_d = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_{ref}}{|V_d|}; i_q = 0 \quad (4.10)$$

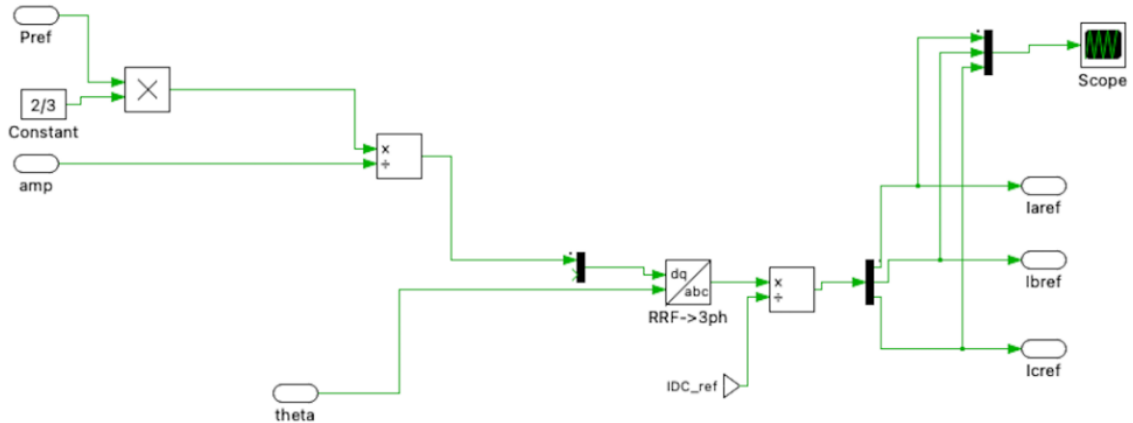


Figura 4.8: schema calcolo riferimento di corrente.

E' bene notare come non viene considerata la presenza di corrente in asse q, quindi si ipotizza potenza reattiva richiesta nulla. Questa ipotesi, viene usata solo in questa prima tecnica di controllo con il blocco PLL, e verrà abbandonata con il VSG.

Una volta calcolati i riferimenti di corrente da inseguire, si costruiscono i duty cycle e successivamente i comandi per il controllo vero e proprio del convertitore di corrente.

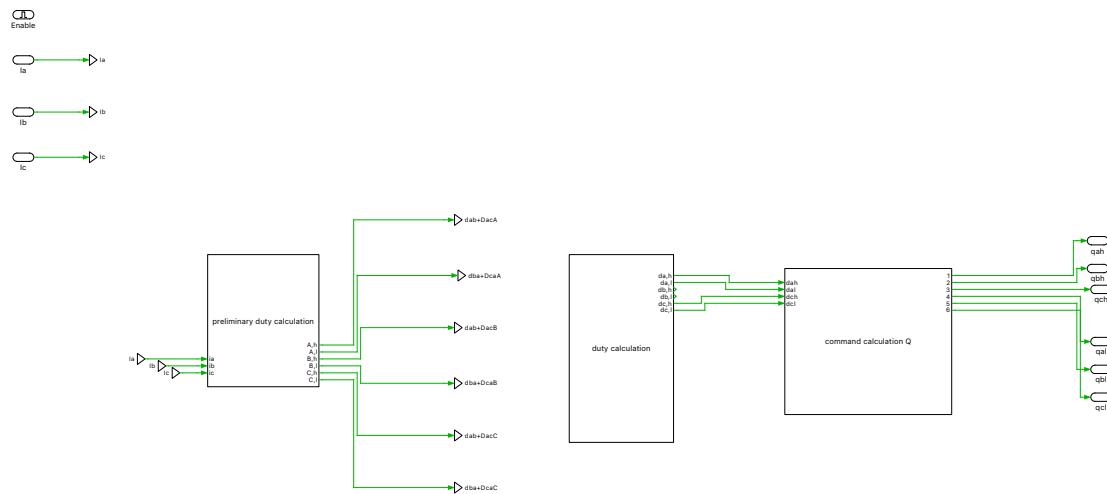


Figura 4.9: blocco per il calcolo duty cycle e comandi.

In Figura 4.9 viene mostrato il blocco di simulazione che ha il compito di costruire i comandi da dare al convertitore in corrente. La tecnica di modulazione utilizzata è una tecnica di tipo PWM discontinuo che è già stata spiegata nel dettaglio nei paragrafi precedenti. Dati in ingresso i tre riferimenti di corrente si calcolano dei duty preliminari, dove a seconda che la corrente di riferimento sia positiva o negativa otteniamo una forma d'onda con solo semionde positive o viceversa. Per calcolare i duty cycle successivamente viene implementata la tecnica discontinua seguendo la Figura 2.6. Inoltre, negli istanti opportuni, si somma ai duty calcolati il segnale costruito delta che ha il ruolo chiave di aggiungere la discontinuità al segnale in uscita. Infine, ottenuti i duty cycle si calcolano i comandi utilizzando le formule descritte in Figura 2.8.

Per coordinare la simulazione e far sì che i controlli presenti vengano effettuati con un certo ordine seguendo una certa sequenza, viene utilizzato il blocco Plecs "State Machine". Questo blocco è configurato in modo tale da abilitare i blocchi dello schema uno per volta a seconda del tempo trascorso dall'inizio della simulazione e dalla stima del PLL, infatti iniziamo a commutare il convertitore CSI solo quando siamo sicuri che la stima eseguita dal PLL del vettore di tensione di rete sia corretta.

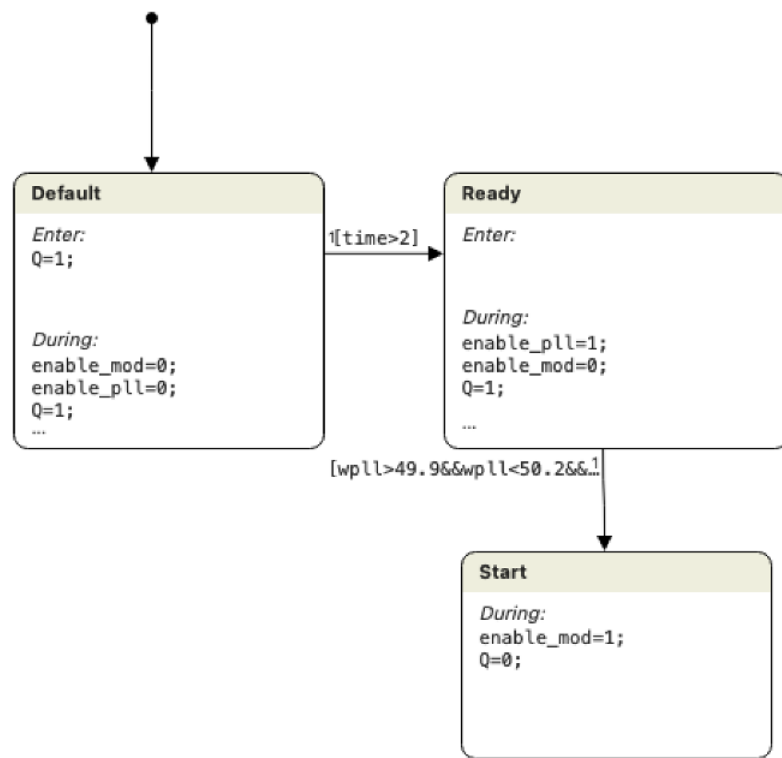
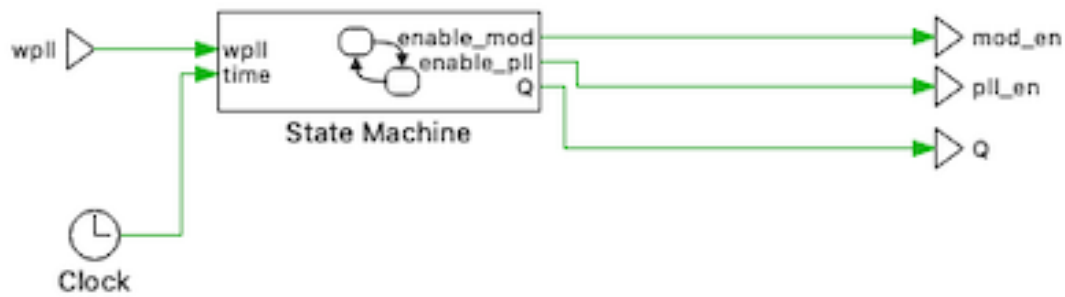


Figura 4.10: State Machine.

In Figura 4.10, si vedono gli stati configurati all'interno del blocco "State Machine". Una volta avviata la simulazione si entra nello stato "Default", dove il sistema è ancora spento e non vengono abilitati né il PLL né la modulazione del CSI. Dopo 2 secondi, viene avviato l'inseguitore PLL per ottenere la stima del vettore di tensione di rete, quando la pulsazione di quest'ultimo è vicina al valore della pulsazione di rete a 50 Hz, e dopo aver atteso un altro secondo, viene avviata la modulazione per l'inverter. Il segnale Q che si vede nello schema è relativo al transistor in ingresso al convertitore di corrente, infatti questo transistor viene comandato sempre chiuso mettendo in corto circuito il generatore di corrente. Solo dopo il segnale dato dal blocco "State Machine" con $Q=0$, il transistor

viene aperto e la corrente può fluire attraverso l'inverter. In Figura 4.11 è raffigurato il circuito elettrico simulato che evidenzia il componente transistor in parallelo all'uscita del ponte ad H.

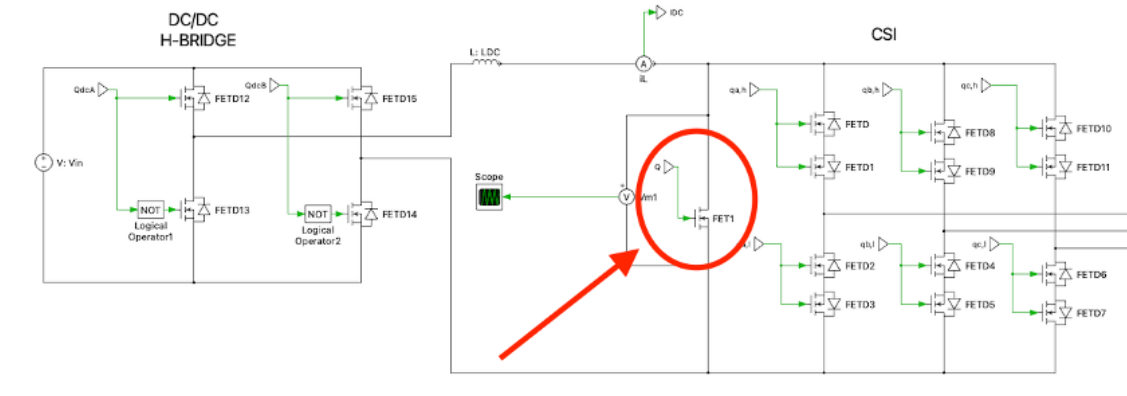


Figura 4.11: transistor Q in ingresso al CSI.

Controllo DC/DC

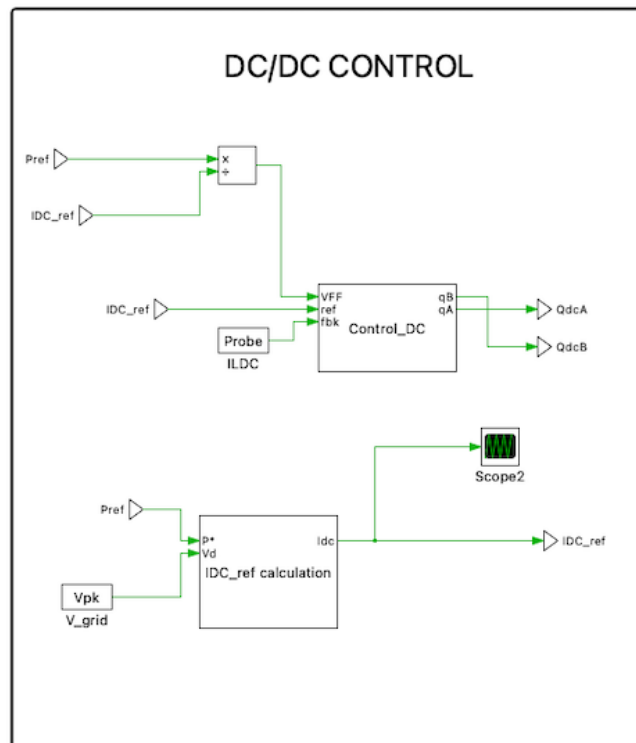


Figura 4.12: schema di controllo DC/DC.

Come già discusso in precedenza, nella simulazione il generatore ideale di corrente continua è implementato usando un generatore di tensione continua regolato tramite un ponte ad H a Mosfet. Quest'ultimo, viene controllato in base alla potenza attiva richiesta calcolando gli opportuni comandi per le due gambe del convertitore. In Figura 4.12 è rappresentato lo schema di controllo del convertitore DC/DC, composto da due blocchi principali. In alto, il controllo vero e proprio che ha il compito di calcolare i comandi delle due gambe del ponte ad H e in basso il calcolo della corrente continua di riferimento. Quest'ultimo, rappresentato in Figura 4.13, dati in ingresso la potenza attiva di riferimento P_{ref} e l'ampiezza della tensione di rete misurata, calcola il valore di corrente equivalente continua ottenuta in uscita dal convertitore DC/DC. Per fare questo si utilizza l'equazione 4.11 già utilizzata prima e moltiplicando il risultato per il guadagno K_{dc} e si ottiene un valore di corrente con un certo margine superiore alla corrente richiesta. Nella simulazione viene utilizzato un guadagno cautelativo di circa il 50 %, $K_{dc}=1.5$.

$$i_{dc} = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_{ref}}{V_{pk}} \cdot k_{dc} \quad (4.11)$$

La corrente ottenuta viene infine saturata ai limiti massimi e minimi consentiti dal sistema. Ottenuta la corrente continua di riferimento, si devono calcolare i comandi per il DC/DC. Per fare ciò si utilizza un blocco integrale, proporzionale settato con gli opportuni guadagni, calcolati come di seguito, in modo da ottenere la dinamica desiderata.

$$\omega_{bw,DC} = 2\pi \cdot \frac{f_{sw}}{10}, f_{sw} = 30kHz \quad (4.12)$$

$$k_{p,DC} = L_{DC} \cdot \omega_{bw,DC} \quad (4.13)$$

$$k_{i,DC} = k_{p,DC} \cdot \frac{\omega_{bw,DC}}{20} \quad (4.14)$$

Il sistema PI, rappresentato in Figura 4.14, dati in ingresso il valore di corrente di riferimento e la corrente misurata sull'induttore di filtraggio in ingresso calcola la tensione da dare per ottenere la corrente continua desiderata. In aggiunta, viene sommata la tensione di feedforward calcolata dividendo la potenza attiva di riferimento e la corrente DC di riferimento calcolata prima. In questo modo, l'integratore impiega meno tempo per arrivare a regime. Successivamente, dividendo il tutto per la tensione del generatore ideale in ingresso $V_{in} = 600$ V si ottiene il duty cycle che confrontato con una triangola alla frequenza di switching di simulazione calcola i comandi delle gambe del ponte ad H. Il convertitore DC/DC avendo due gambe utilizza due comandi q_a e q_b , dove il secondo è uguale al primo ma è negato per un corretto controllo.

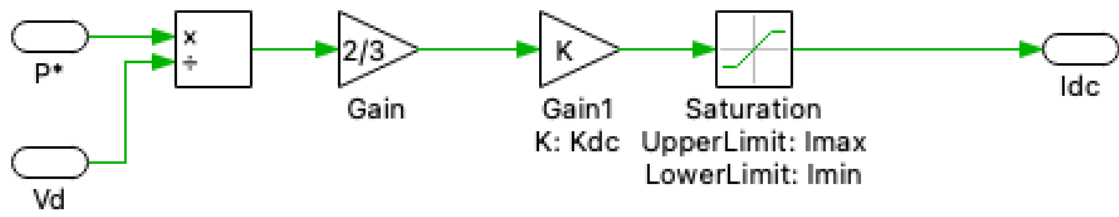


Figura 4.13: calcolo I di riferimento.

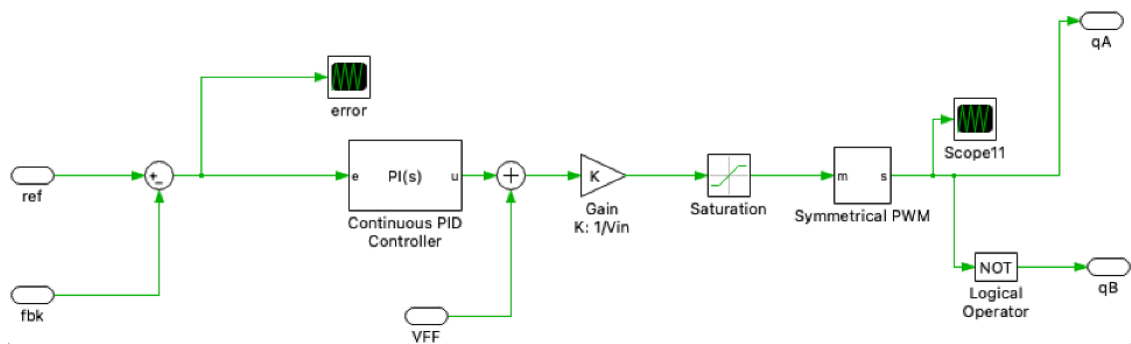


Figura 4.14: sistema PI di comando del DC/DC.

Controllo CSI con VSG

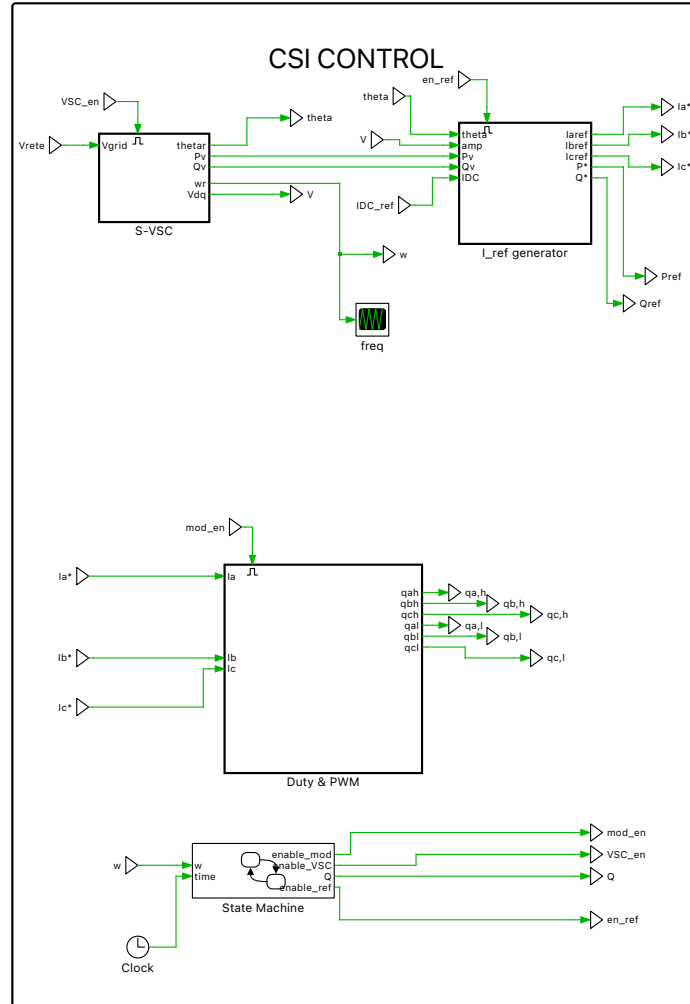


Figura 4.15: controllo CSI con VSG.

In Figura 4.15, si può vedere il sistema di controllo del convertitore CSI con l'utilizzo del dispositivo VSG. Infatti, a differenza del controllo descritto in precedenza che utilizza lo stimatore PLL, viene simulato il dispositivo virtuale del generatore sincrono rotante. Il suo obiettivo è quello di fornire i riferimenti di potenza per poi calcolare in modo corretto i riferimenti di corrente. In Figura 4.16 viene rappresentato il blocco del generatore rotante virtuale che ha in ingresso la tensione trifase di rete misurata sulla stella dei condensatori in uscita dal CSI e fornisce come output la posizione del rotore virtuale, la pulsazione, i riferimenti di potenza e la tensione di rete trasformata su assi d,q. Il blocco principale al suo interno è quello che descrive il sincrono virtuale S-VSC dove sono presenti la parte

meccanica, la parte per il calcolo dei riferimenti di potenza virtuale e l'eccitazione. Il modello fatto segue le equazioni meccaniche ed elettriche descritte negli scorsi paragrafi dove si simula il funzionamento di una macchina elettrica rotante alla frequenza di rete in grado di fornire i servizi ausiliari di rete imponendo al controllo del CSI i riferimenti di potenza. Il blocco di simulazione utilizza tutti valori in per unità per il suo funzionamento e le grandezze di ingresso vengono divise per i valori base.

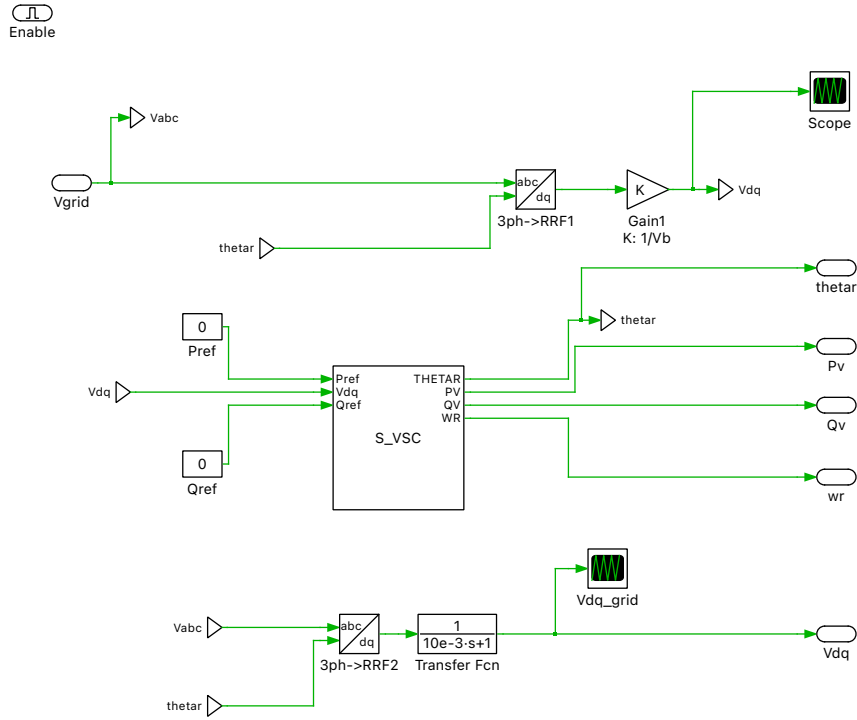


Figura 4.16: schema di controllo VSG.

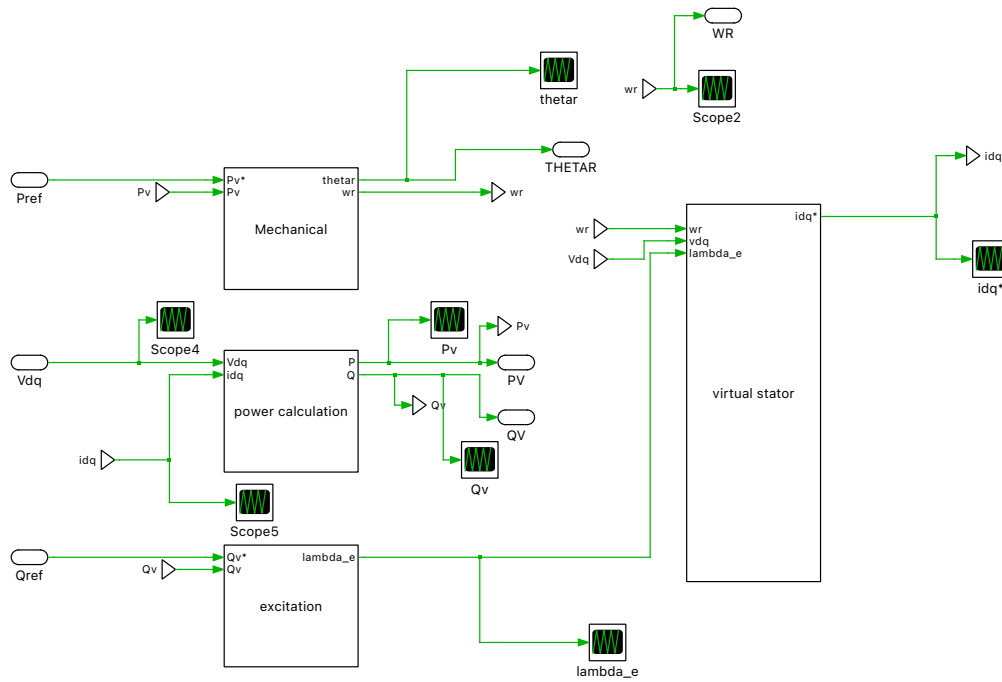


Figura 4.17: blocchi di funzionamento VSG.

In Figura 4.17 si può vedere l'interno del sincrono virtuale simulato con i blocchi che lo compongono. La parte meccanica viene simulata implementando la Swing Equation vista in precedenza nel paragrafo 3.1. Il blocco che simula il modello meccanico è raffigurato in Figura 4.18. Le potenze virtuali di riferimento sono calcolate nel blocco dedicato di Figura 4.19 utilizzando le equazioni elettriche 3.4, dove la tensione è quella di rete misurata e trasformata su assi dq, mentre la corrente d,q è calcolata dal blocco di statore virtuale. Il blocco che simula lo statore segue le equazioni elettriche di statore viste in precedenza 3.7 e 3.8. Infine il blocco dell'eccitazione, data la potenza reattiva stimata e quella di riferimento, usa l'equazione 3.5 e calcola il flusso elettrico da fornire allo statore virtuale. Gli ultimi due blocchi descritti vengono raffigurati sotto nelle Figure 4.20 e 4.21.

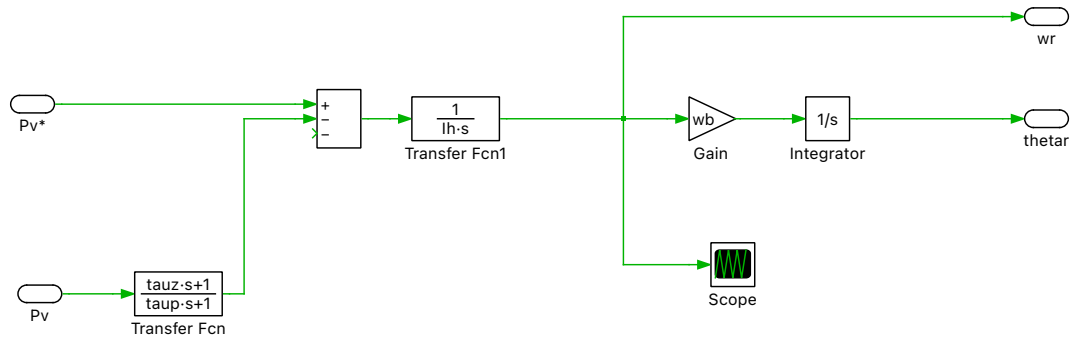


Figura 4.18: blocco meccanico del VSG.

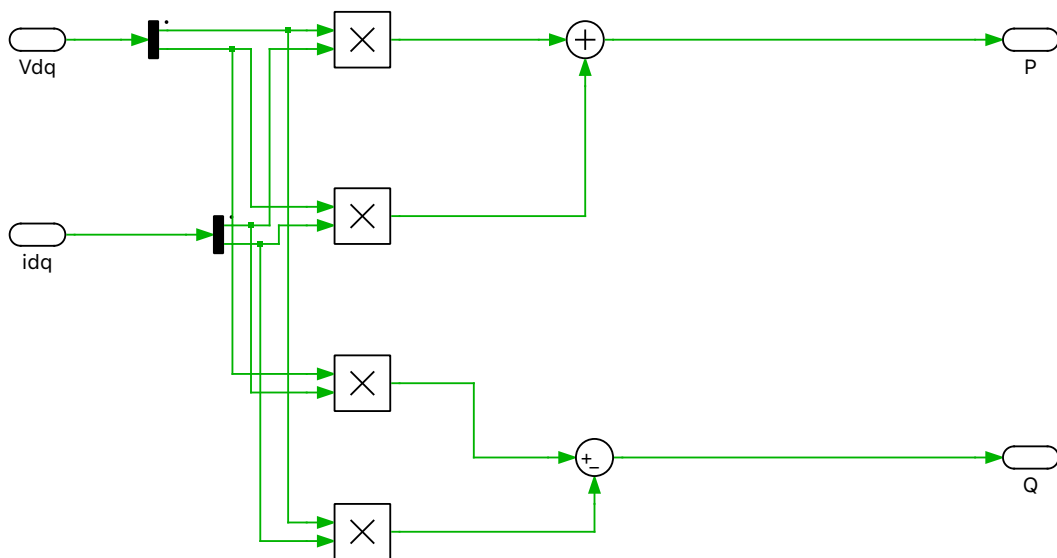


Figura 4.19: riferimenti di potenza del VSG.

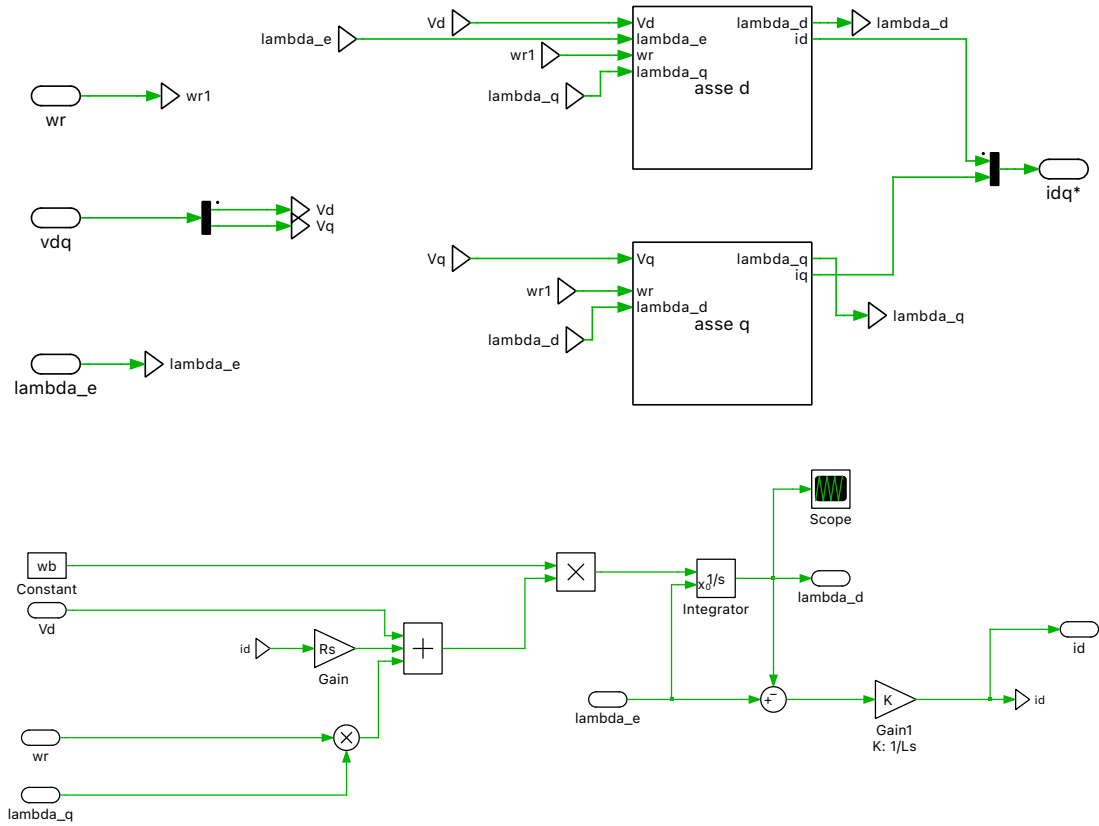


Figura 4.20: sopra: blocco statore virtuale del VSG, sotto: blocco asse d.



Figura 4.21: blocco dell'eccitazione del VSG.

Come spiegato nel paragrafo dedicato al generatore sincrono virtuale VSG, i riferimenti di potenza attiva e reattiva sono posti a zero in modo da fare lavorare il generatore rotante solo quando è necessario e quindi pilotare il convertitore CSI. Il sistema descritto in simulazione viene controllato con il blocco di sincronizzazione "State Machine", usato anche nel caso del PLL. Infatti, il sincrono virtuale è acceso in un determinato istante deciso dal controllo della simulazione.

Per controllare l'accensione nell'istante desiderato il blocco del sincrono virtuale è di tipo "enable subsystem" e cioè un blocco che inizia a funzionare solo quando riceve un segnale enable.

Calcolate le potenze di riferimento e ottenuto l'angolo di rete del generatore sincrono virtuale si passa al calcolo dei riferimenti di corrente da fornire in ingresso al modulatore del CSI. Al'ingresso del blocco usato in simulazione per calcolare le correnti di riferimento, gli input sono: la tensione di rete in assi d,q, le potenze virtuali ottenute dal VSG, la posizione angolare del rotore del generatore virtuale sincronizzato alla pulsazione di rete e infine la corrente continua di riferimento. Quest'ultima viene calcolata nello stesso modo di Figura 4.12 già vista in precedenza.

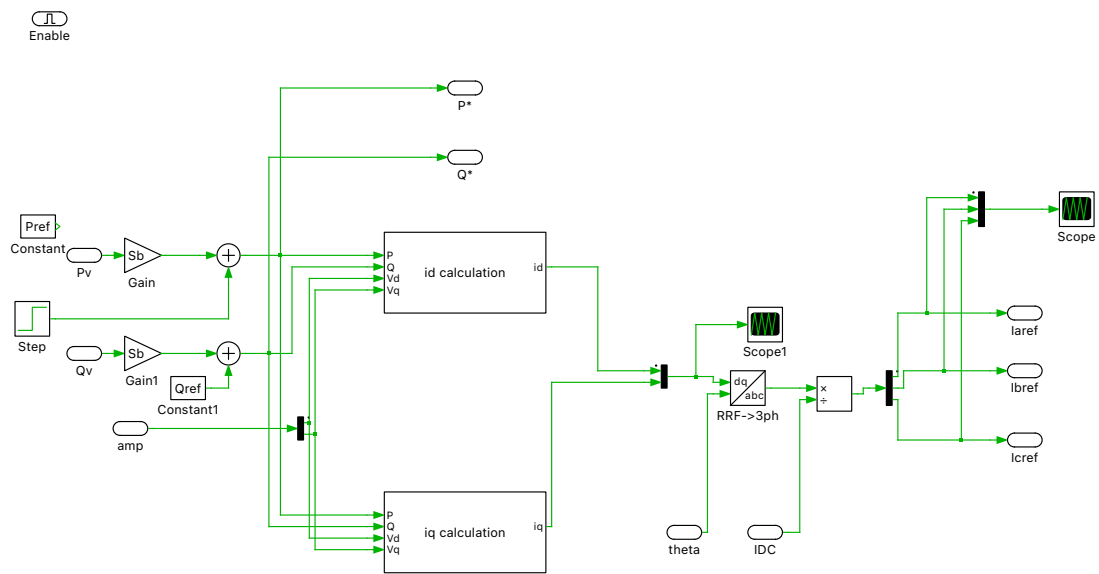


Figura 4.22: blocco per il calcolo dei riferimenti di corrente.

In Figura 4.22 si vede il blocco usato in simulazione per calcolare i riferimenti di corrente di cui sopra. Date le potenze virtuali ottenute dal modello del generatore sincrono P_v e Q_v a cui vengono sommate le potenze richieste dal sistema P_{ref} e Q_{ref} , dove la potenza reattiva richiesta è nulla, il blocco calcola le correnti in assi d e q da fornire come riferimento alla modulazione del CSI per ottenere il comportamento dinamico descritto dal VSG. Il calcolo viene effettuato seguendo le equazioni elettriche e viene illustrato in Figura 4.23.

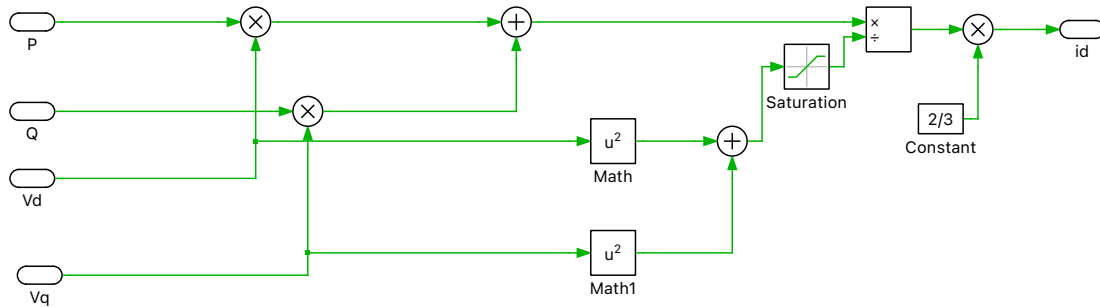


Figura 4.23: calcolo corrente in asse d.

Le correnti in assi d e q sono successivamente trasformate in assi a, b e c usando l'angolo theta fornito dal sincrono virtuale, e vengono divise per la corrente continua di riferimento. In questo modo si ottiene in uscita una terna di correnti trifase di riferimento usate per calcolare i duty cycle e i comandi per controllare l'inverter di corrente. Il calcolo dei duty e dei comandi delle gambe viene eseguito nello stesso modo rispetto a quanto già fatto nel paragrafo sul controllo con PLL. La modulazione utilizzata è discontinua ed è la stessa utilizzata nella simulazione precedente senza differenze, infatti la principale differenza è l'utilizzo del sincrono virtuale in grado di pilotare i riferimenti di corrente per erogare i servizi ausiliari di rete, cosa che non poteva essere fatta con l'utilizzo dello stimatore PLL.

4.1.6 Modulazione

La modulazione utilizzata nelle simulazioni in tempo continuo con l'utilizzo dell'inseguitore PLL e del sincrono virtuale VSG è di tipo discontinua da [2]. Come già parzialmente discusso nei capitoli precedenti, presi i riferimenti di corrente si calcolano i duty cycle prendendo la semi onda positiva e negativa rispettivamente per i duty degli switch alti e bassi. I duty ottenuti rappresentano gli stati attivi dell'esagono di modulazione, al quale bisogna aggiungere lo stato zero Delta. Quest'ultimo, rappresenta la parte discontinua della modulazione e viene sommato agli stati attivi solo quando i riferimenti sono compresi tra i valori massimi e minimi. In uscita quindi, si ottengono delle forme di duty cycle discontinue sulla quale vengono calcolati i comandi per controllare il CSI. Nelle Figure 2.6, 2.7 e 2.8, sono rappresentati le formule per il calcolo dei duty e dei comandi e le forme d'onda discontinue ottenute.

4.2 Risultati di simulazione in tempo continuo

In questo paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti nelle simulazioni in tempo continuo del convertitore CSI evidenziando le caratteristiche delle forme d'onda acquisite.

Prima vengono illustrati i risultati ottenuti con l'utilizzo del PLL e successivamente quelli con l'utilizzo del sincrono virtuale.

4.2.1 Simulazione con PLL

I risultati ottenuti nella simulazione in esame vengono illustrati nelle figure sottostanti. Per descrivere in modo esaustivo il comportamento del sistema implementato si acquisiscono le schermate degli oscilloscopi per far vedere l'andamento delle grandezze elettriche di rete in uscita dal convertitore CSI. In Figura 4.24, è rappresentato l'andamento della corrente di rete a vuoto, ovvero quando l'inverter di corrente non è abilitato. La corrente quindi è imposta dalla rete e non si notano disturbi.

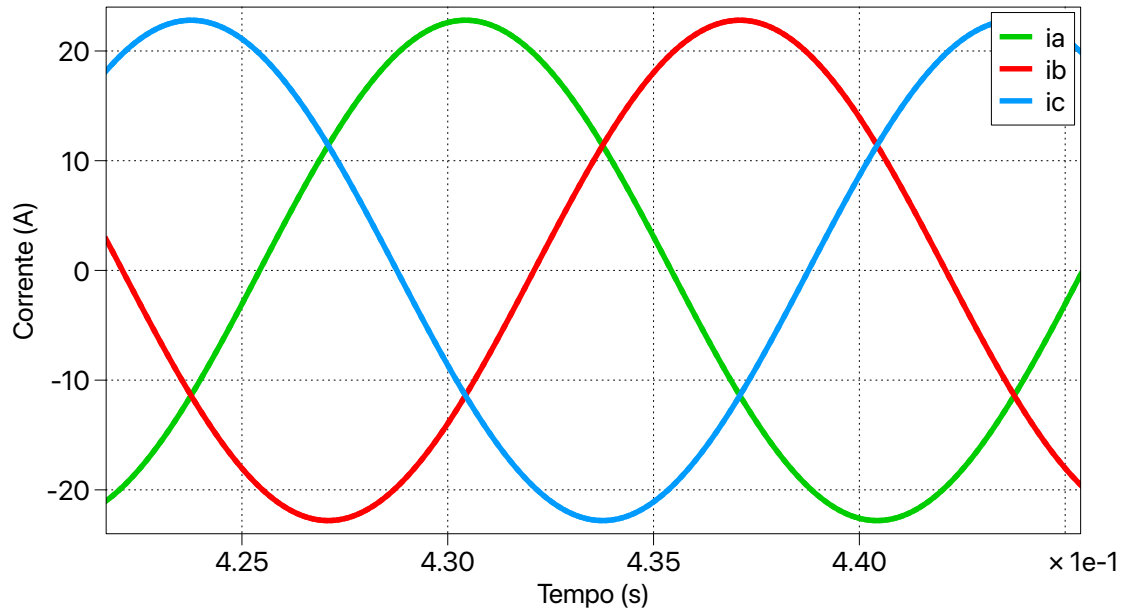


Figura 4.24: Corrente di rete a vuoto.

Si decide quindi di abilitare la stima del PLL in modo tale da sincronizzarsi con il vettore rotante di rete prima di iniziare la modulazione del convertitore CSI. In Figura 4.25, si nota l'andamento della pulsazione del vettore rotante stimato dal PLL che a regime raggiunge la frequenza di rete dopo una dinamica transitoria definita dai guadagni proporzionali e integrali.

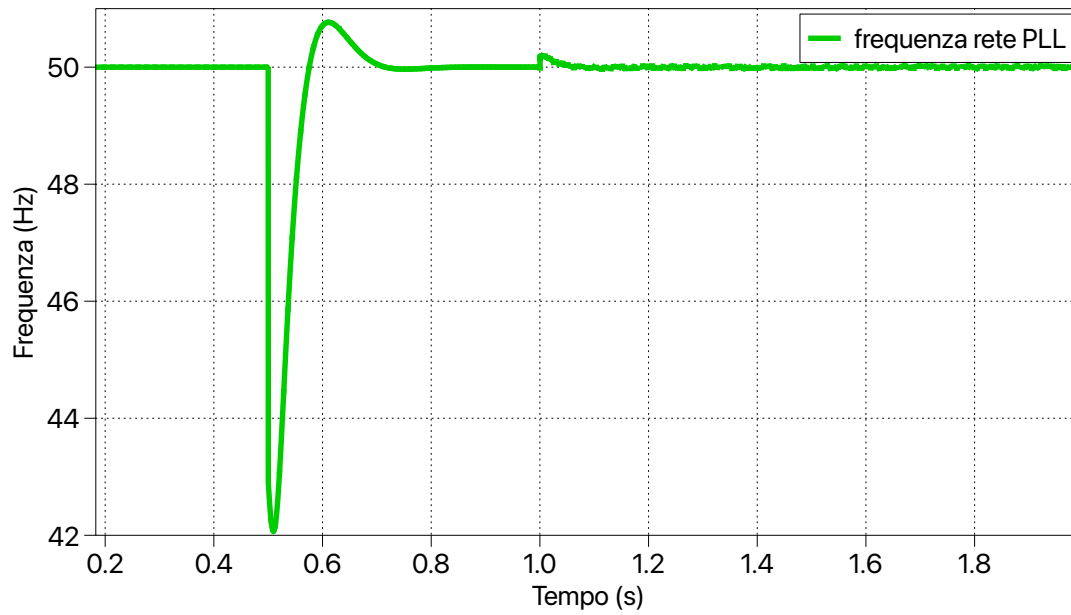


Figura 4.25: Frequenza di rete stimata dal PLL.

Una volta raggiunto il sincronismo con la rete elettrica, si calcolano i riferimenti di corrente da fornire al modulatore. Bisogna attendere la sincronizzazione del PLL con la rete elettrica in modo tale da utilizzare l'angolo di rete correttamente stimato per eseguire le trasformazioni necessarie. Le correnti di riferimento su assi a,b e c sono illustrate in Figura 4.26.

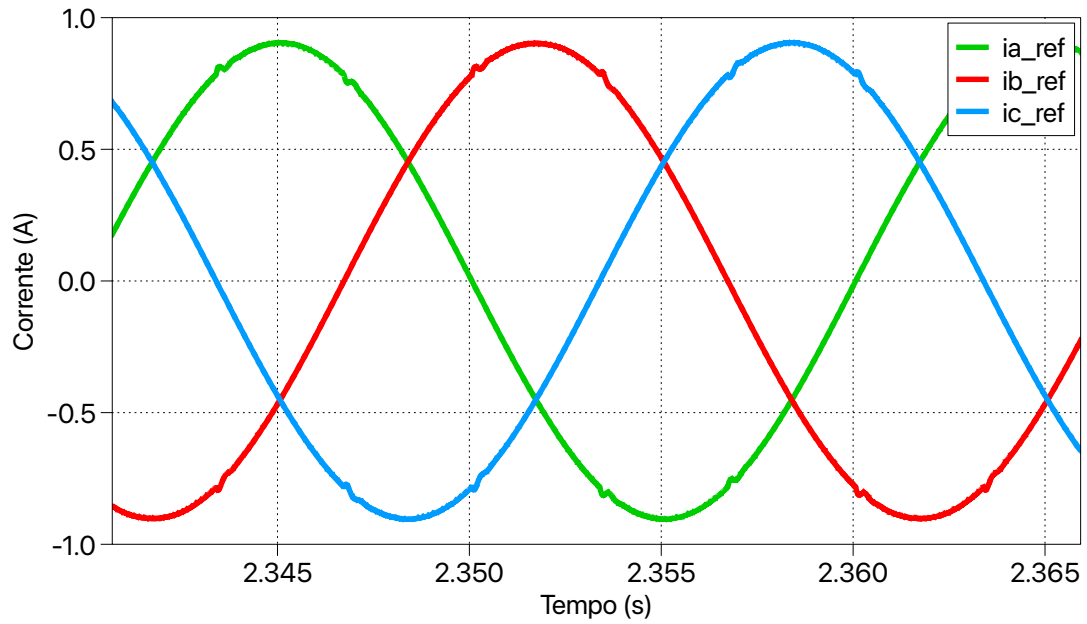


Figura 4.26: Correnti di riferimento.

Date le correnti di riferimento si calcolano i duty cycle e i comandi seguendo la modulazione discontinua discussa in precedenza. Questi ultimi sono visibili nelle figura sottostante 4.27.

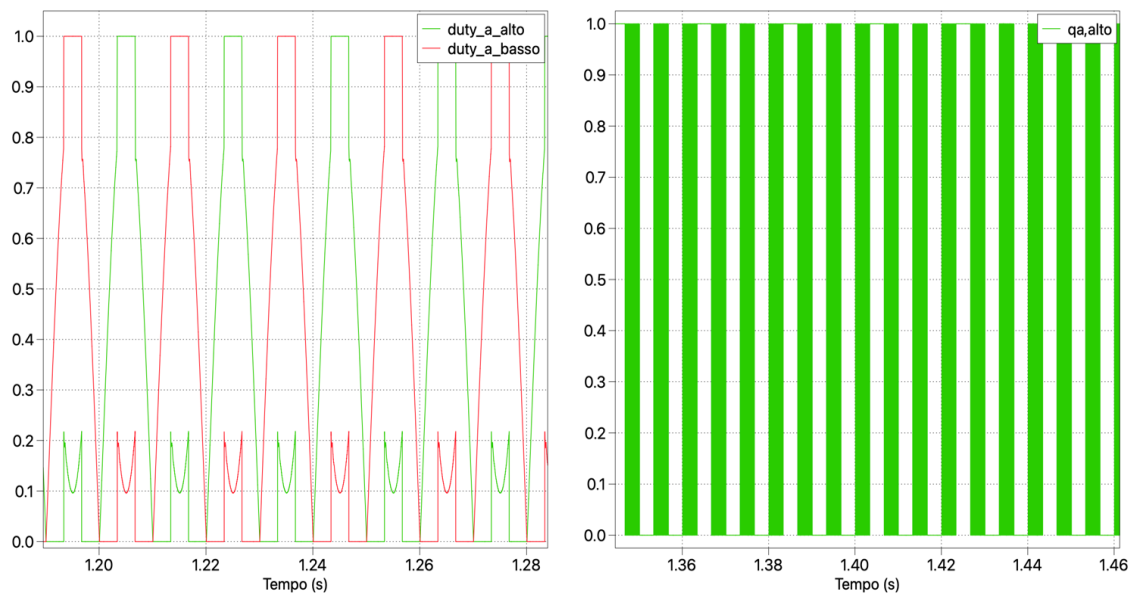


Figura 4.27: sinistra: Duty cycle gamba a del CSI, destra: Comando switch CSI.

La corrente in uscita dal convertitore CSI controllato con i comandi calcolati è rappresentata in Figura 4.28. Come si vede, è una corrente a impulsi che deve essere filtrata con l'utilizzo del filtro CLC dimensionato. La corrente di rete filtrata è rappresentata in Figura 4.29. Il filtro riesce a filtrare la maggior parte delle armoniche presenti nelle correnti di uscita ma sono presenti dei disturbi. Questi, sono dovuti alla natura stessa della modulazione discontinua utilizzata.

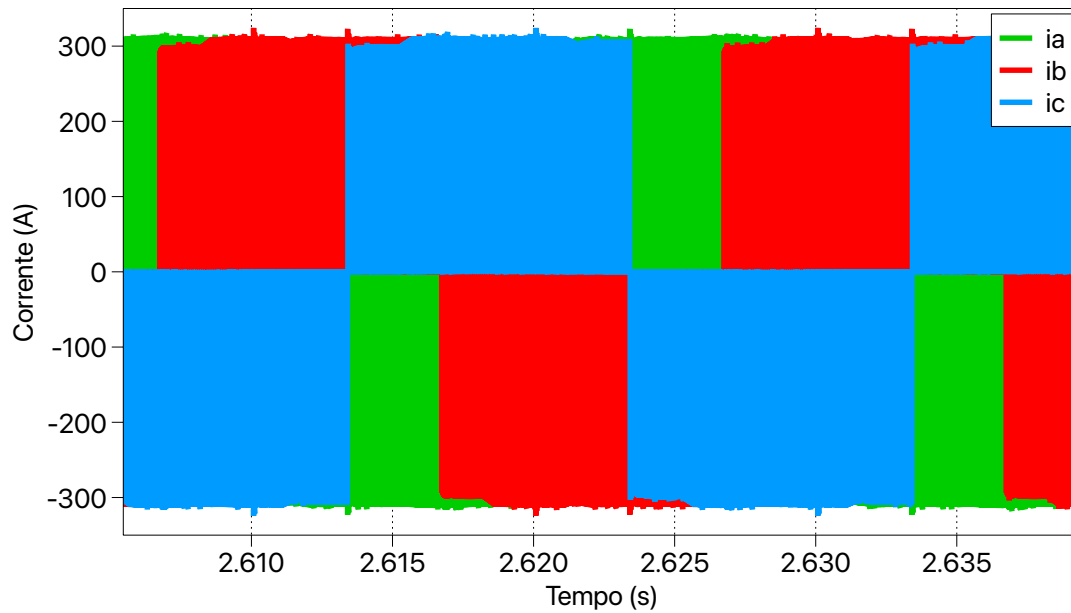


Figura 4.28: Corrente lato convertitore CSI.

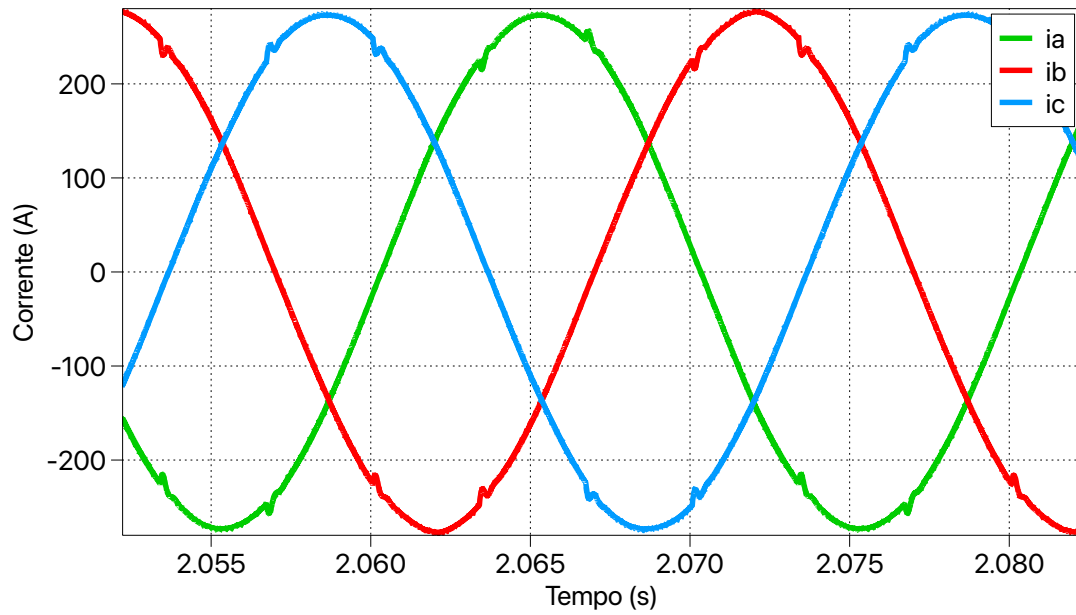


Figura 4.29: Corrente filtrata lato rete.

La discontinuità dovuta alla tecnica di modulazione usata è presente anche nella tensione di rete misurata sulla stella di condensatori collegata all'uscita del CSI, come si vede in Figura 4.30.

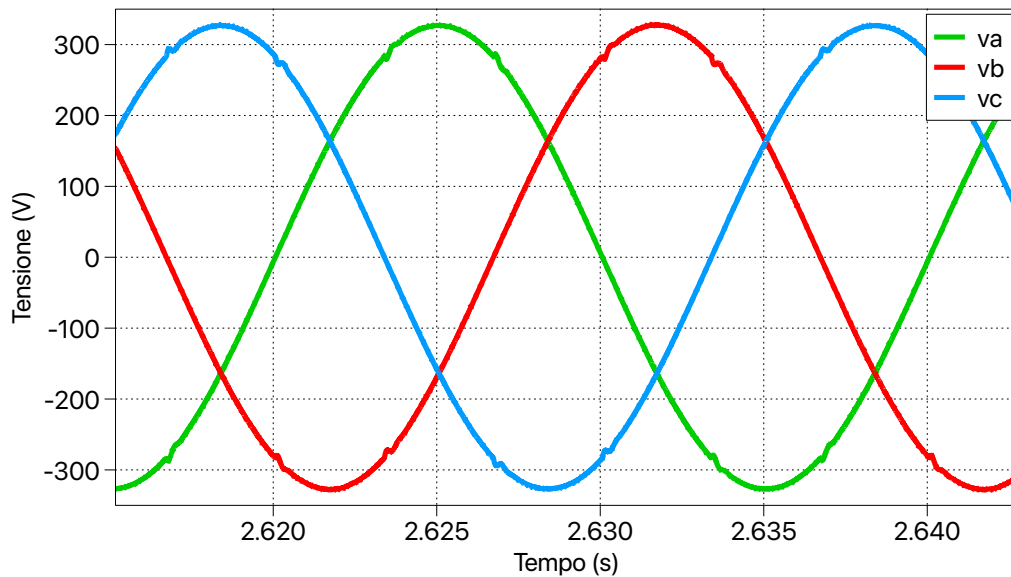


Figura 4.30: Tensione filtrata di rete.

Infine, la corrente fornita dal DC/DC in ingresso è rappresentata in Figura 4.31.

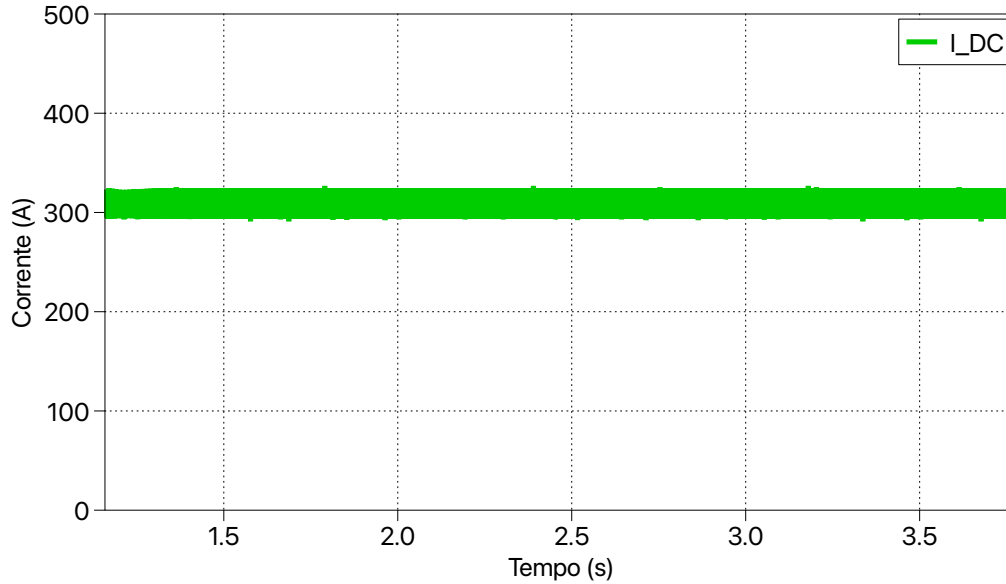


Figura 4.31: Correnti continua del DC/DC in ingresso.

4.2.2 Simulazione con VSG

Nella sezione seguente sono illustrati i risultati ottenuti dalla simulazione in tempo continuo con l'utilizzo del sincro virtuale. In questo caso quindi, l'angolo e la pulsazione di rete sono forniti dal modello del VSG che si sincronizza con la rete elettrica. In questo modo non si utilizza uno stimatore, come il PLL, ma un dispositivo rotante virtuale che ruota alla frequenza di rete. In Figura 4.32 è rappresentata la pulsazione del generatore sincro virtuale, dove si nota la dinamica di sincronizzazione e il raggiungimento della stabilità a regime.

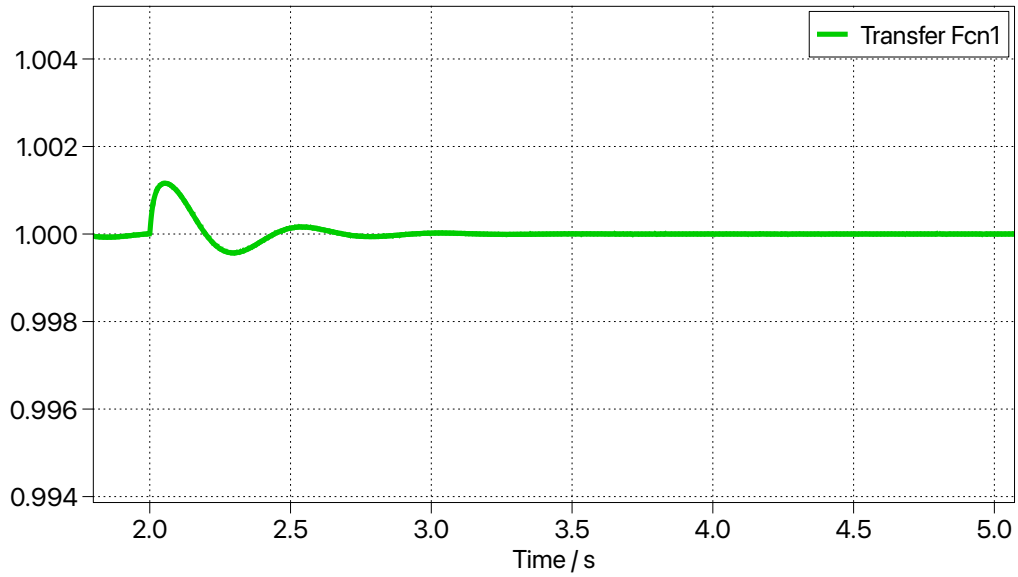


Figura 4.32: Frequenza VSG.

Una volta che il VSG si è sincronizzato alla frequenza di rete, viene abilitato il calcolo dei riferimenti di corrente da dare al modulatore del CSI che rimane spento per permettere il corretto calcolo dei riferimenti. In Figura 4.33 è possibile vedere le tre correnti di riferimento calcolate.

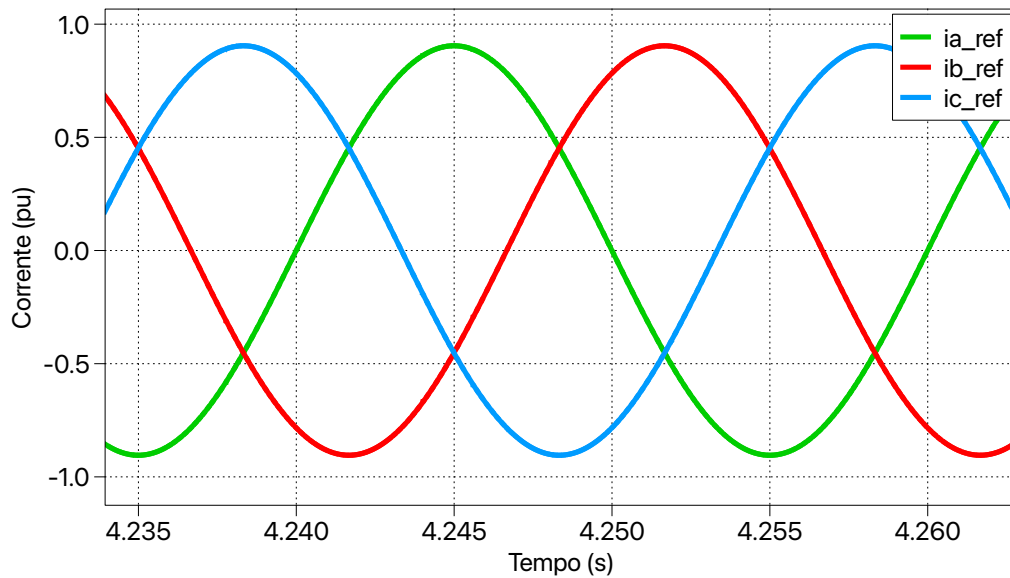


Figura 4.33: Correnti di riferimento.

Si calcolano i duty e i comandi seguendo la medesima modulazione della simulazione precedente e si abilita il funzionamento del convertitore CSI. In Figura 4.34 sono visibili le correnti in uscita dall'inverter che necessitano di essere filtrate. Questo viene fatto dal filtro CLC connesso a rete e le correnti filtrate sono visibili in Figura 4.33. Anche in questo caso, il filtro riesce a rimuovere quasi totalmente le armoniche di corrente ma si nota la presenza del disturbo dovuto al tipo di modulazione discontinua utilizzato.

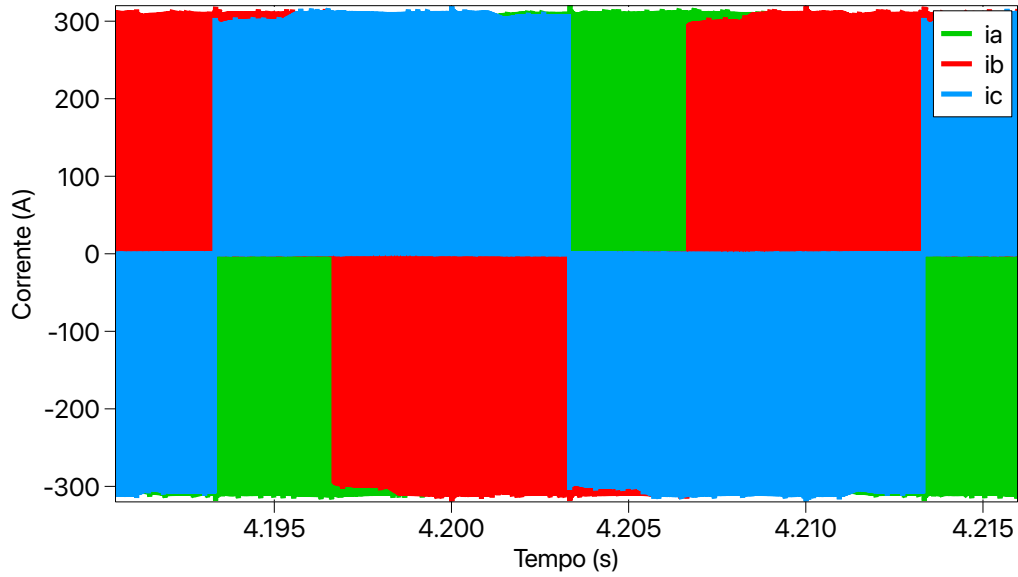


Figura 4.34: Correnti in uscita dal CSI.

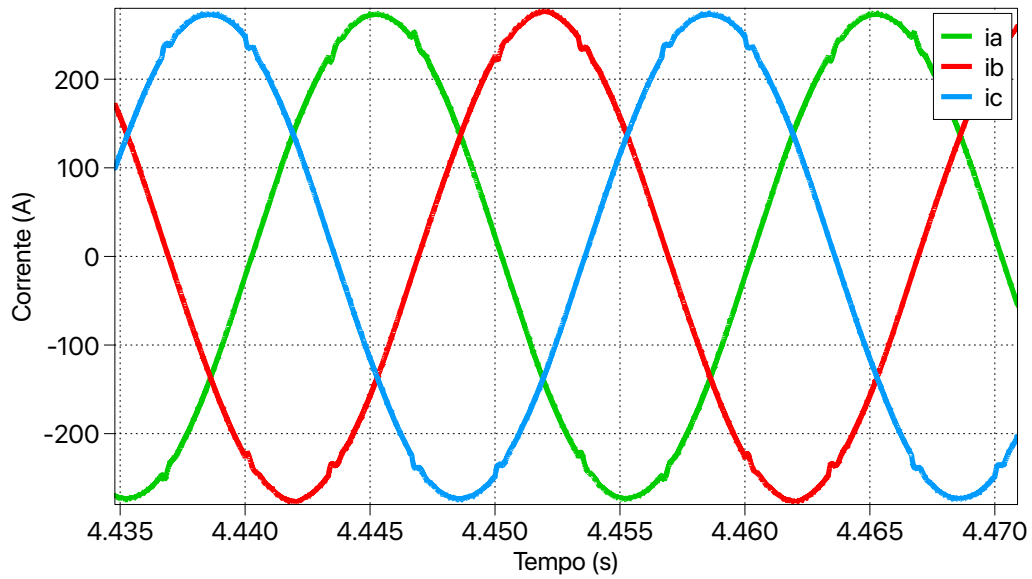


Figura 4.35: Correnti di rete filtrate.

Per sottolineare la dinamica del generatore sincrono viene rappresentata in Figura 4.36 l'andamento della corrente di rete. Come si nota, questa segue la dinamica del VSG che fornisce i riferimenti adeguati una volta acceso il convertitore CSI a circa 2 secondi di simulazione.

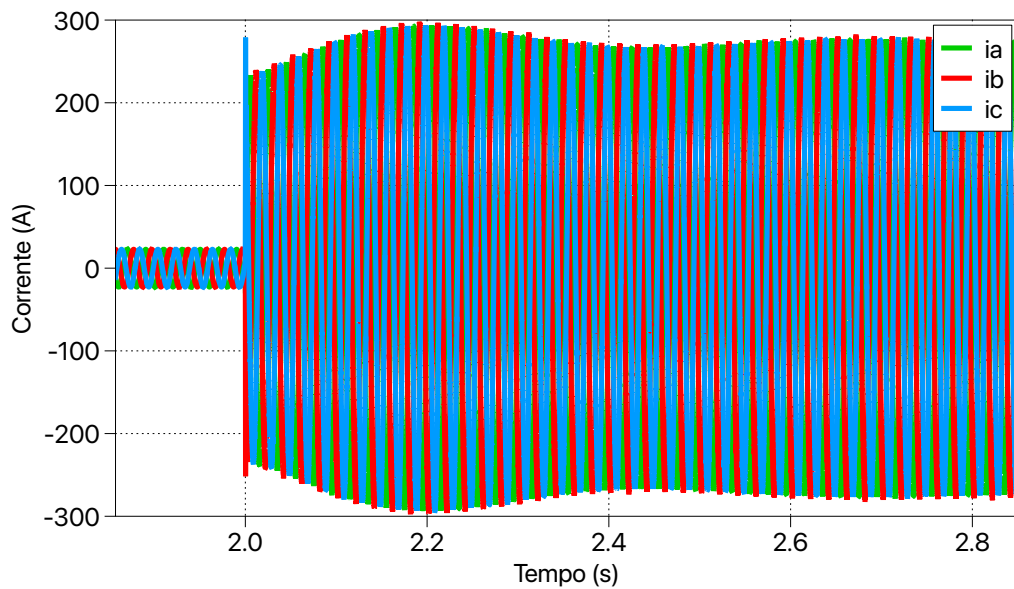


Figura 4.36: Dinamica delle correnti di rete.

In Figura 4.37 e in Figura 4.38 sono rappresentate le potenze attiva e reattiva virtuali fornite dal modello del VSG. Come si nota, il modello cerca di stabilire l'equilibrio facendo lavorare il sincro virtuale a vuoto come già spiegato nel paragrafo sul VSG. Il VSG infatti, fornisce potenza attiva e reattiva solo quando il sistema è perturbato e non si hanno le condizioni di frequenza alla frequenza di rete. Si notano valori di potenza diversi da zero quando il CSI inizia a commutare, intorno ai due secondi di simulazione.

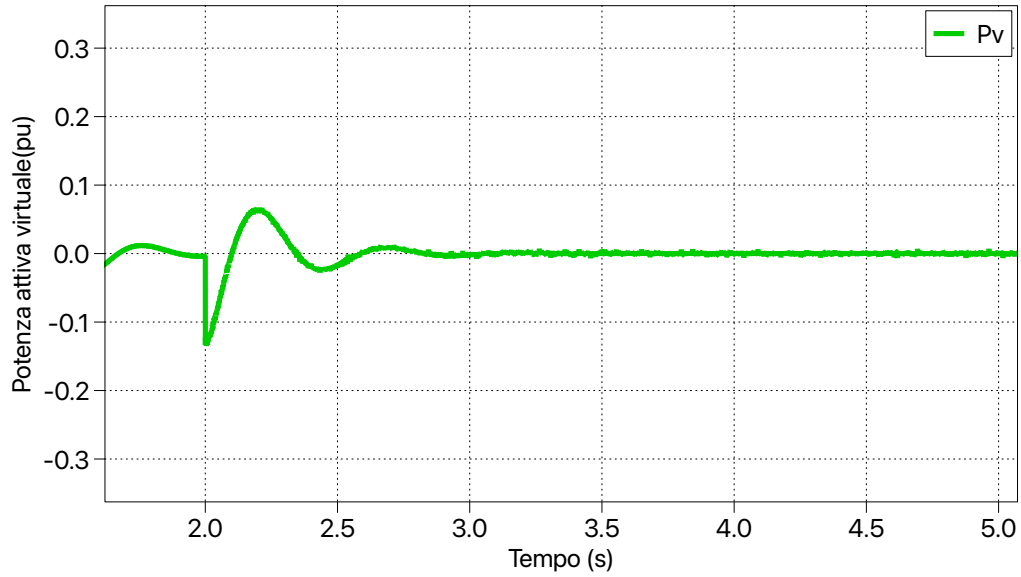


Figura 4.37: Potenza attiva virtuale.

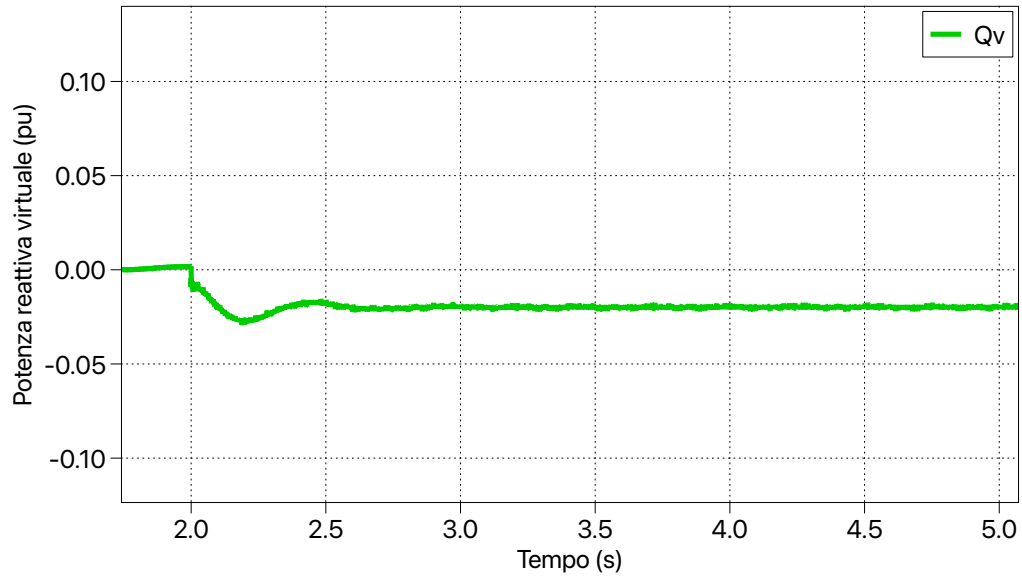


Figura 4.38: Potenza reattiva virtuale.

La tensione di rete è rappresentata in Figura 4.39 e la corrente fornita dal convertitore DC/DC in ingresso è visibile in Figura 4.40 di seguito.

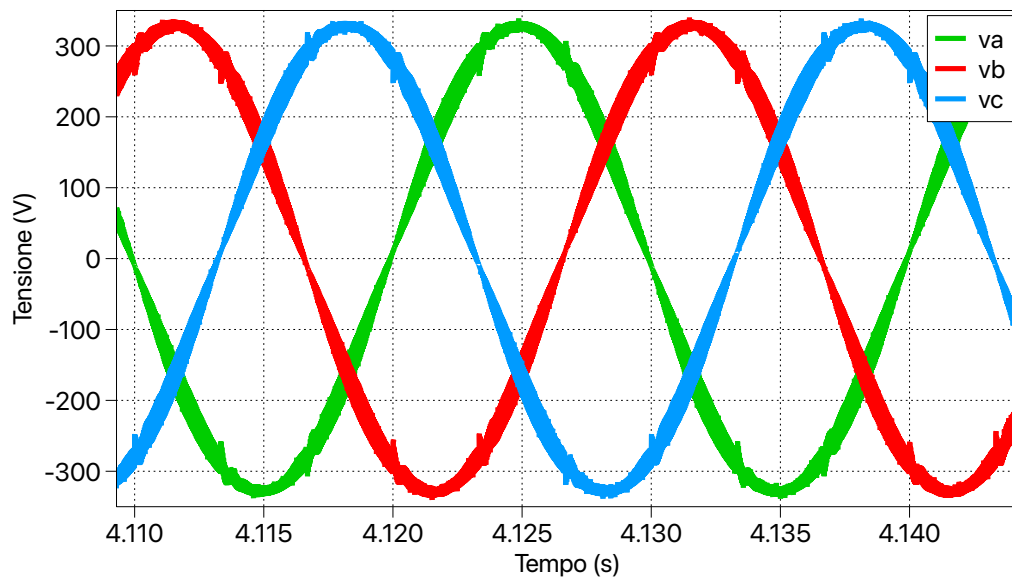


Figura 4.39: Tensione di rete.

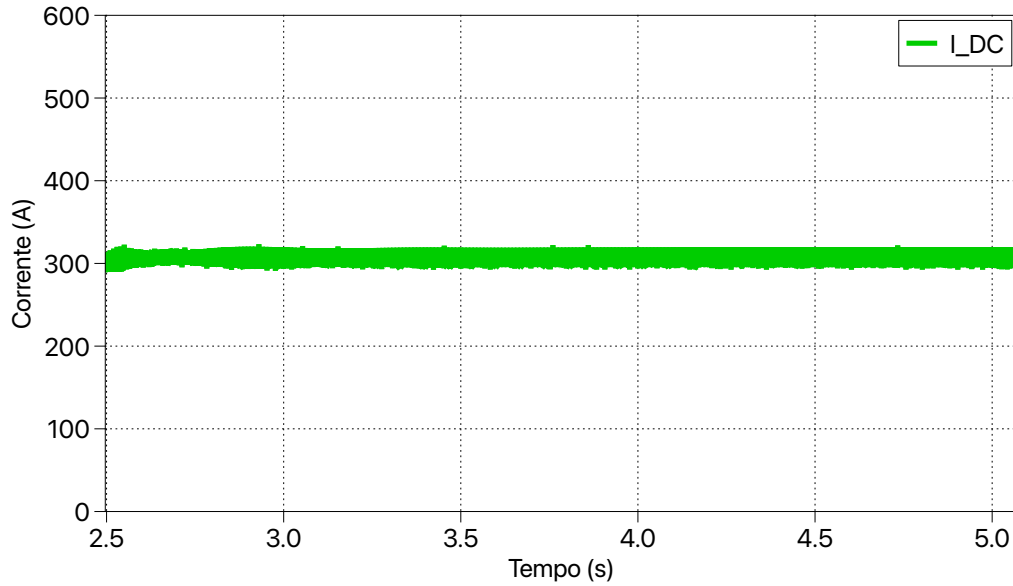


Figura 4.40: Corrente continua del DC/DC in ingresso.

Come si vede, la corrente continua in ingresso al CSI presenta un ripple sovrapposto, dovuto alla dimensione dell'induttore scelto. L'induttore infatti, viene dimensionato per avere un ripple del 5% della corrente continua, circa 15 – 20A.

4.3 Simulazione in tempo discreto

Potenza base	150 kVA
Valore efficace tensione rete	230 V
Tensione del generatore DC	600 V
Freq. di switching	30 kHz
Freq. di rete	50 Hz
Tempo di discretizzazione T_s	33 μs

Tabella 4.2: Valori impiegati in simulazione

In questa sezione viene analizzato il sistema simulato nell'ambiente PLECS in tempo discreto. Ciò significa considerare il funzionamento della simulazione in un tempo discretizzato dove le istruzioni e il funzionamento del sistema avvengono in una finestra temporale fissata dal tempo di esecuzione. Per la simulazione in esame il tempo utilizzato viene descritto dalla seguente equazione:

$$T_s = \frac{1}{f_s}; f_s = 30 \text{ kHz} \quad (4.15)$$

Durante la simulazione quindi, ogni istante T_s , viene eseguito il sistema discreto che si occupa del controllo mentre l'impianto che rappresenta il mondo fisico: ovvero convertitore CSI e rete seguono il tempo di simulazione come nella simulazione in tempo continuo.

Per quanto riguarda i componenti presenti in simulazione, come l'inverter CSI e la rete elettrica, non vengono modificati in nessun modo e le topologie rimangono le stesse viste nel capitolo che descrive la simulazione in tempo continuo. Per quanto riguarda invece il convertitore DC/DC in ingresso, viene sostituito da un generatore ideale di corrente continua e quindi non è più presente la parte di controllo e modulazione del DC/DC. Di seguito, viene descritto in dettaglio il controllo del CSI utilizzato nella simulazione in tempo discreto.

4.3.1 Controllo discreto in simulazione

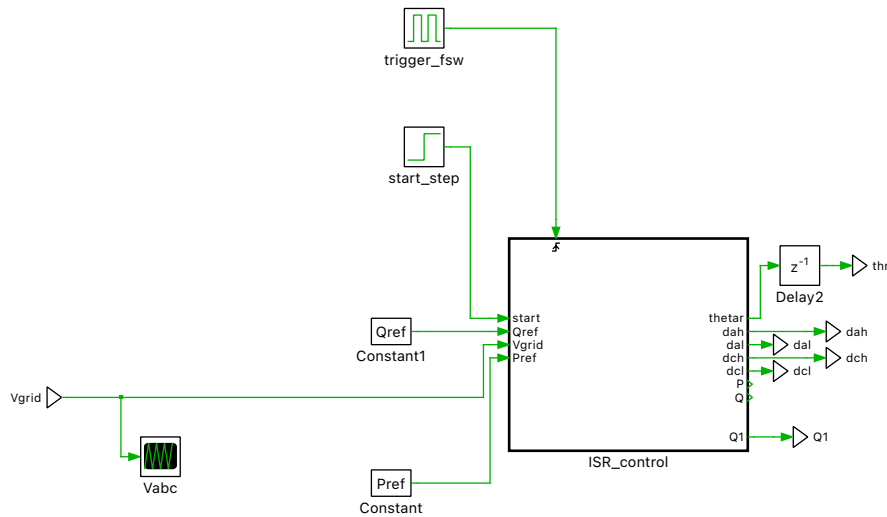


Figura 4.41: controllo CSI discreto.

In Figura 4.41 è raffigurato il blocco che implementa il controllo discreto del convertitore di corrente. Il controllo viene eseguito ogni volta che il blocco *trigger_fsw* lancia il segnale di esecuzione e questo avviene ogni T_s secondi. Il segnale è costruito come un'onda quadra ad impulsi con valore minimo zero e massimo uno con frequenza pari alla frequenza di discretizzazione f_s . Gli ulteriori input presenti definiscono: le potenze

attiva e reattiva di riferimento, il segnale di start per avviare il controllo e la tensione di rete misurata sulla stella di condensatori in uscita all'inverter CSI. Per quanto riguarda gli output, sono presenti: i duty cycle calcolati, l'angolo del generatore sincrono virtuale e il comando Q per comandare lo switch in ingresso al CSI per cortocircuitare il sistema prima della modulazione del convertitore.

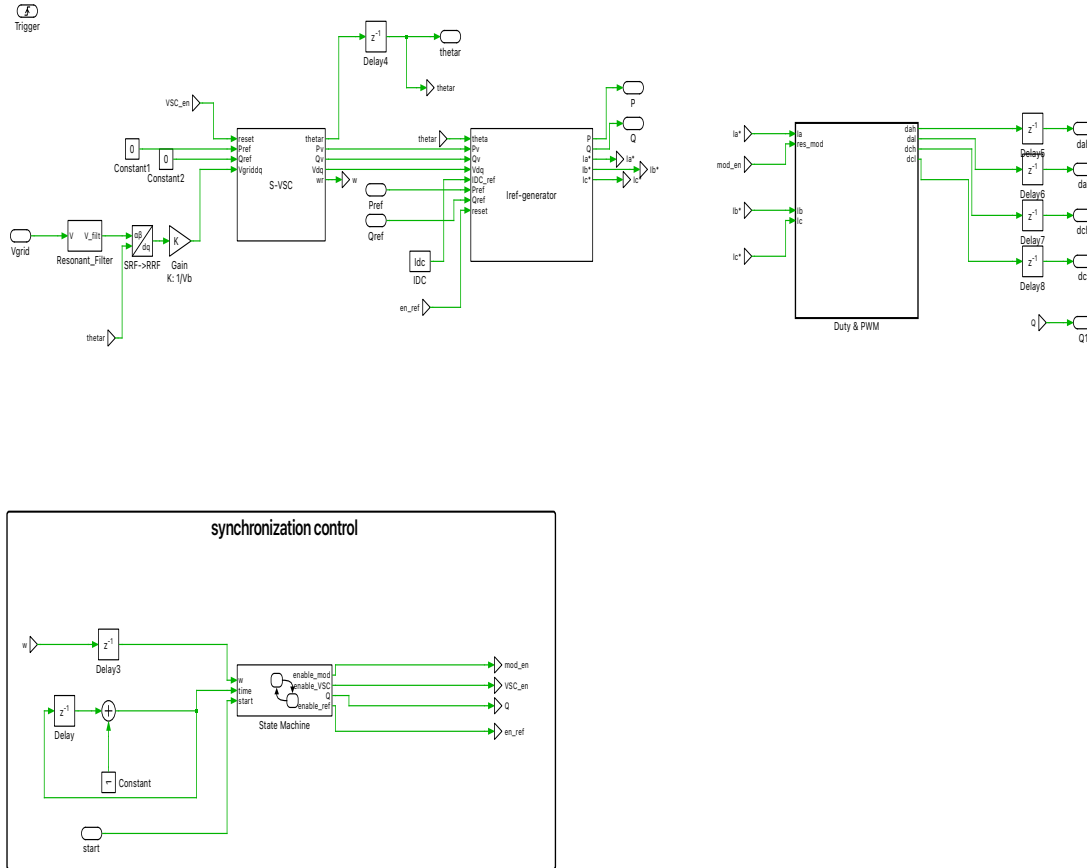


Figura 4.42: controllo CSI discreto.

In dettaglio, il blocco 4.41 viene analizzato al suo interno e raffigurato in Figura 4.42. Il concetto di funzionamento è il medesimo della simulazione in tempo continuo. Infatti, i blocchi presenti all'interno del controllo del CSI sono gli stessi: sincrono virtuale, calcolo dei riferimenti, calcolo dei duty cycle e sincronizzatore state machine. La differenza principale è dovuta proprio alla natura della simulazione che viene discretizzata. Ogni blocco integrativo e ogni funzione di trasferimento viene convertita in blocchi discreti di Plescs eseguiti con passo T_s . Di seguito sono analizzati ed evidenziati i blocchi di simulazione modificati nella nuova simulazione. Partendo dal modello del sincrono virtuale, le equazioni utilizzate sono le stesse ma gli integratori sono integratori discreti con il reset eseguito esternamente per inizializzare il calcolo.

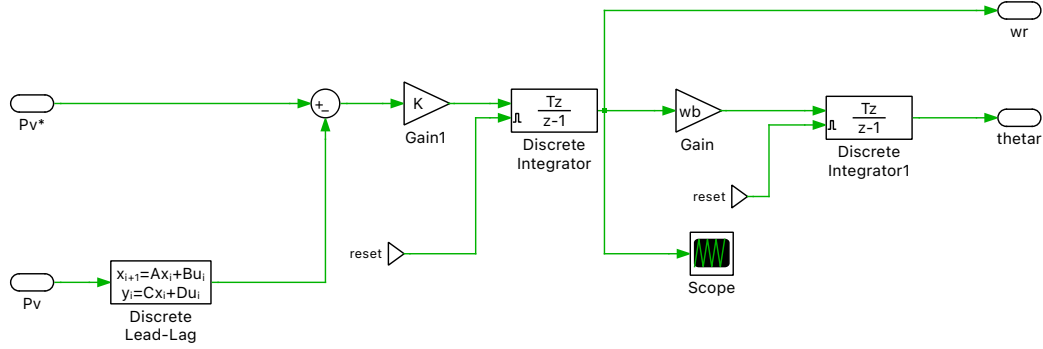


Figura 4.43: Modello meccanico discreto del VSG.

In Figura 4.43 è rappresentato il modello usato in simulazione che rappresenta le equazioni meccaniche del generatore virtuale. Come si nota, è presente l'integratore discreto che viene resettato da un segnale esterno imposto dalla sezione "State Machine" che abilita l'integrazione e quindi il funzionamento del modello del sincro virtuale da un certo istante in base alle impostazioni di simulazione. Oltre al blocco discreto dell'integratore, viene modificata anche la funzione di trasferimento per il lead-lag utilizzato per fornire lo smorzamento meccanico necessario. Il lead-lag viene modificato sostituendo la funzione di trasferimento continua con il blocco "Discrete Space State" che utilizza le seguenti equazioni presenti in [5]:

$$x_{LL}^{k+1} = e^{-T_s/\tau_p} \cdot x_{LL}^k + \left(1 - e^{-T_s/\tau_p}\right) \left(1 - \frac{\tau_z}{\tau_p}\right) \cdot P_v^k \quad (4.16)$$

$$P_{v,f}^k = x_{LL}^k + \frac{\tau_z}{\tau_p} \cdot P_v^k \quad (4.17)$$

Nelle equazioni sopra l'ingresso è rappresentato dalla potenza meccanica al passo k P_v^k l'uscita è la potenza $P_{v,f}^k$ e lo stato al passo k è X_{LL}^k . I coefficienti usati vengono settati in simulazione andando a inserire i valori corretti negli appositi spazi del blocco plecs come in Figura 4.44.

Discrete State Space

Discrete state-space model of the form:
 $x(i+1) = Ax(i) + Bu(i)$
 $y(i) = Cx(i) + Du(i)$

Parameters Assertions

A:
 $\exp(-T_s/\tau_{ap})$

B:
 $(1-\exp(-T_s/\tau_{ap})) \cdot (1-\tau_{auz}/\tau_{ap})$

C:
1

D:
 τ_{auz}/τ_{ap}

Sample time (s):
-1

Initial condition:
0

Figura 4.44: Configurazione del lead-lag discreto.

I coefficienti A, B, C e D vengono quindi costruiti appositamente utilizzando il passo di discretizzazione T_s e le costanti di tempo già presenti nel tempo continuo τ_p e τ_z . Il modello che implementa il calcolo dell'eccitazione anche esso viene modificato sostituendo l'integratore continuo con quello discreto, come viene fatto anche per lo statore virtuale. Entrambi sono rappresentati rispettivamente in Figura 4.45 e Figura 4.46.

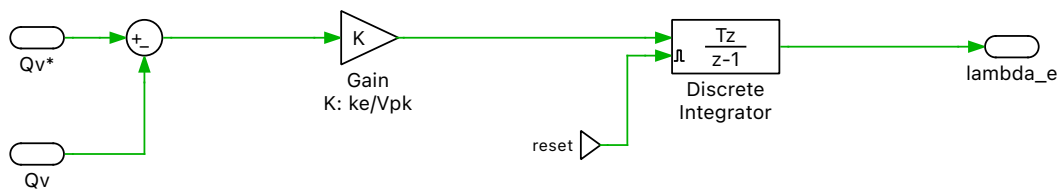
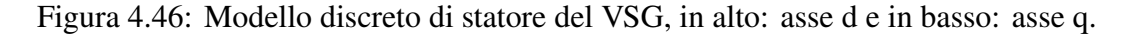


Figura 4.45: Modello discreto dell'eccitazione del VSG.



60

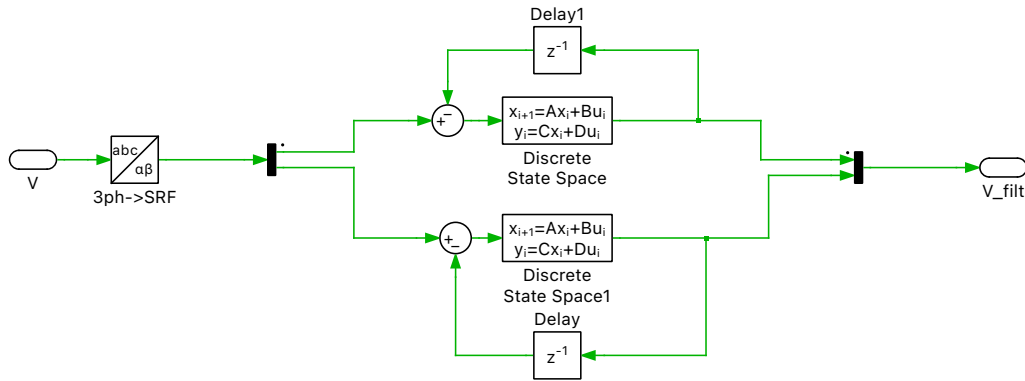


Figura 4.47: Modello discreto del filtro risonante di tensione di rete.

In Figura 4.47 viene rappresentato il filtro risonante appena descritto, che lavora su assi alpha e beta come descritto in [7]. Per sincronizzare il funzionamento dei blocchi presenti in simulazione, viene utilizzata la State Machine già presente nella simulazione continua. Grazie a questo blocco è possibile decidere quando abilitare il sincrono virtuale, il calcolo dei riferimenti e la modulazione. La macchina a stati è rappresentata in Figura 4.48, dove il tempo non essendo disponibile data la natura della simulazione, viene sostituito con l'utilizzo di un contatore. Quindi nuovamente, in primis viene azionato il generatore sincrono virtuale, successivamente quando il rotore si è agganciato alla frequenza di rete viene abilitato il calcolo delle correnti di riferimento e infine una volta che i riferimenti sono stabili viene abilitata la modulazione del CSI.

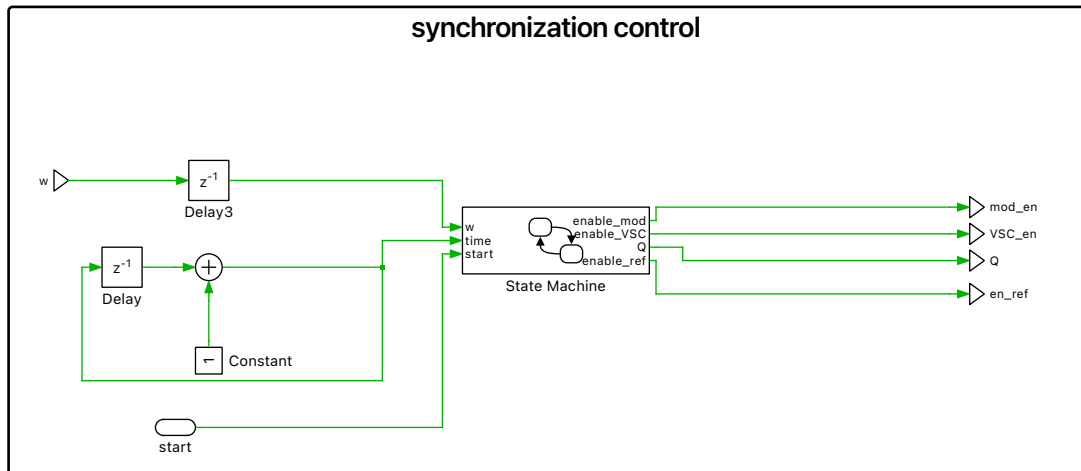


Figura 4.48: Macchina a stati in tempo discreto.

Per quanto riguarda il calcolo delle correnti di riferimento, questo non cambia rispetto alla simulazione in continuo, perché non sono presenti integratori o funzioni di

trasferimento da modificare e il funzionamento rimane il medesimo di Figura 4.22.

4.3.2 Modulazione

La simulazione in tempo discreto, ha un comportamento più simile alla realtà rispetto al funzionamento in tempo continuo. Come già visto dai risultati della simulazione continua, la corrente in uscita dall'inverter presenta numerosi disturbi e oscillazioni, dovuti al funzionamento stesso del convertitore e alla presenza della rete elettrica e del filtro CLC. Infatti il convertitore CSI non commuta la tensione ma direttamente forza la corrente a seguire il percorso definito dal controllo degli switch, e questo fa sì che si percepisca in rete una corrente disturbata. Inoltre, la modulazione discontinua utilizzata peggiora il comportamento e fa risuonare ancora di più la corrente in uscita con il filtro CLC. Per attenuare questi disturbi, nella simulazione in tempo discreto vengono utilizzate le tre tecniche viste nei capitoli precedenti. Nel paragrafo successivo vengono analizzati i risultati ottenuti con le diverse tecniche. In questo paragrafo si approfondisce come vengono implementate le tecniche in simulazione.

Tecnica di modulazione discontinua

La tecnica in esame viene implementata seguendo [2] come spiegato nel capitolo 2. In Figura 4.49 viene descritto il modello utilizzato per implementare la tecnica discontinua. I duty cycle in ingresso sono calcolati sulla base delle correnti di riferimento imposte dal controllo selezionando la semi onda positiva di corrente per i duty degli switch alti e la semi onda negativa per gli switch bassi. Inoltre, come si nota dalla Figura 4.50 ai duty cycle calcolati viene aggiunta la componente discontinua "delta" calcolata come differenza tra il minimo e il massimo ottenuti dai riferimenti di corrente seguendo l'equazione di Figura 2.6. Questa componente discontinua viene aggiunta alle forme d'onda dei duty cycle come in Figura 4.51, considerando il valore della corrente di riferimento rispetto ai valori massimi e minimi calcolati.

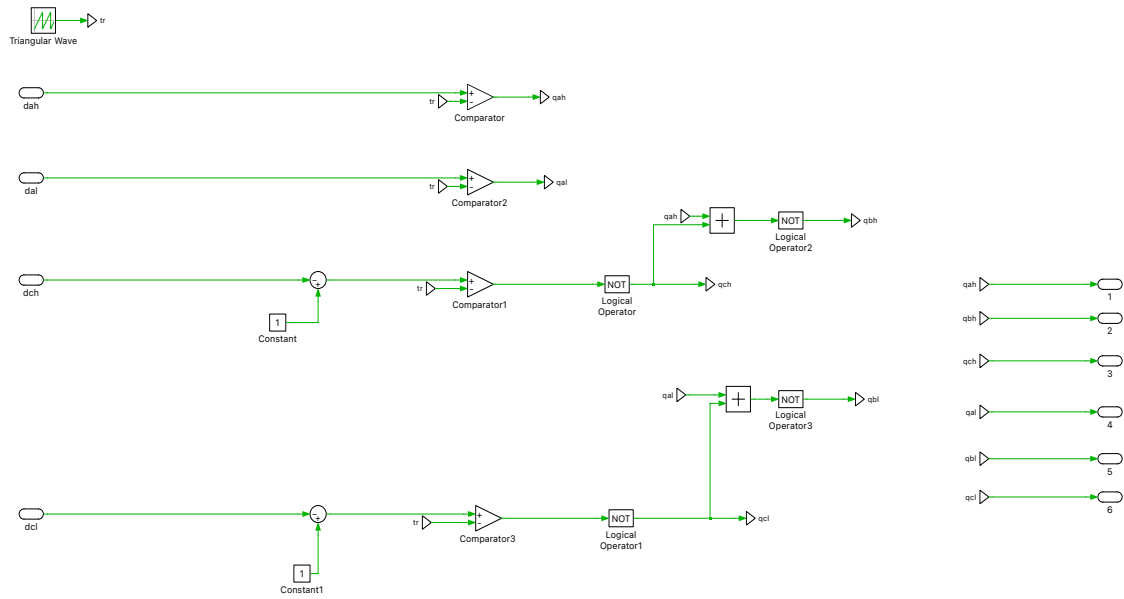


Figura 4.49: Calcolo dei comandi.

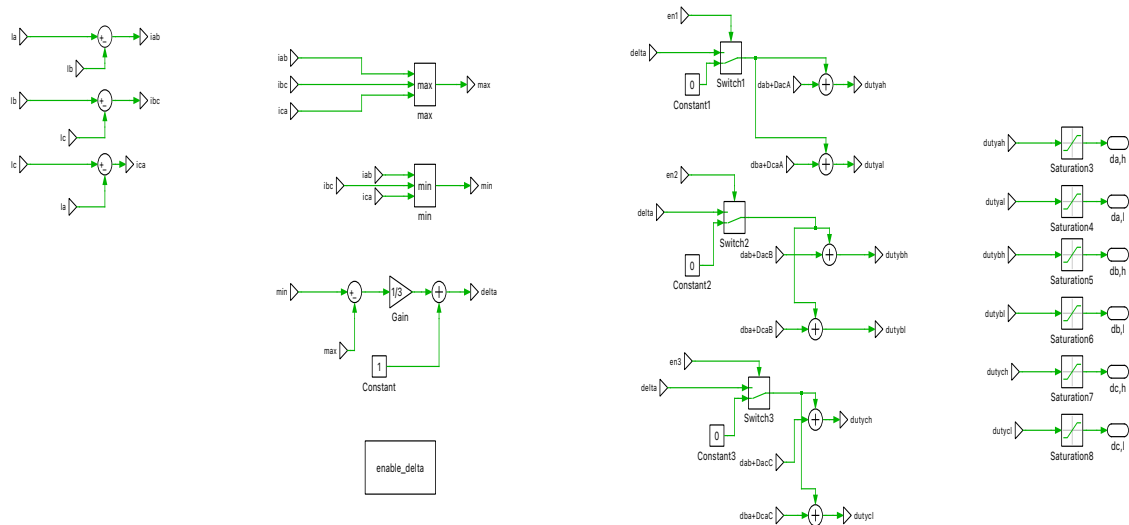


Figura 4.50: Calcolo dei duty cycle.

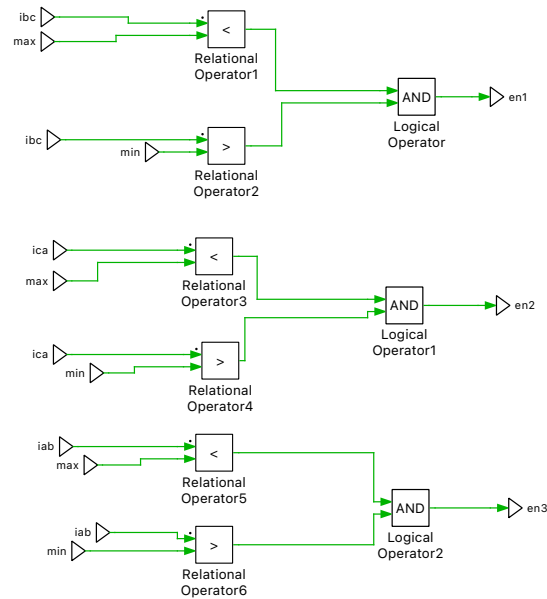


Figura 4.51: Calcolo componente discontinua Delta.

Tecnica di modulazione continua

La tecnica di modulazione continua viene implementata sulla base della modulazione precedente. Infatti, viene tolta la componente discontinua Delta e vengono lasciati i duty cycle come semi onda positiva e negativa per gli switch rispettivamente alti e bassi. In questo modo, i duty cycle hanno una forma continua sinusoidale e permettono di controllare il convertitore CSI in modo tale da ottenere in uscita delle correnti meno disturbate. In Figura 4.52 si nota il calcolo dei comandi e invece in Figura 4.53 è presente il calcolo dei duty cycle continui.

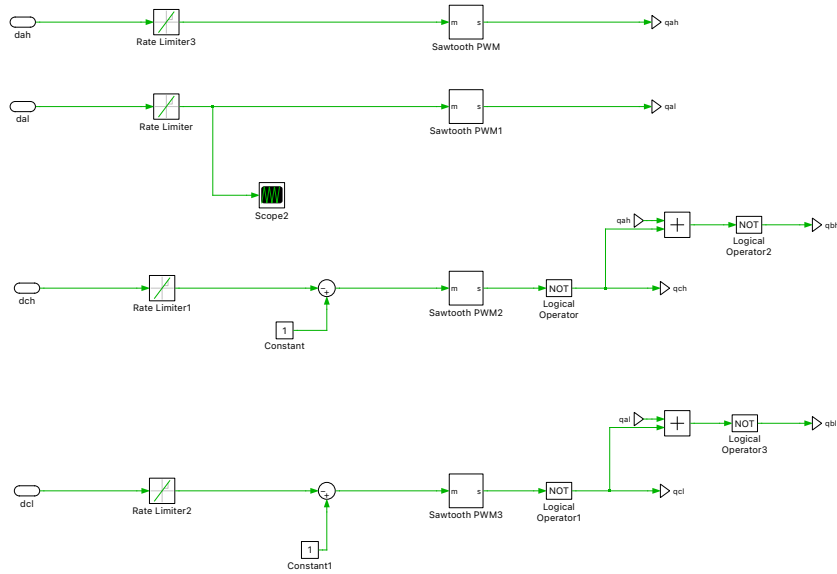


Figura 4.52: Calcolo dei comandi.

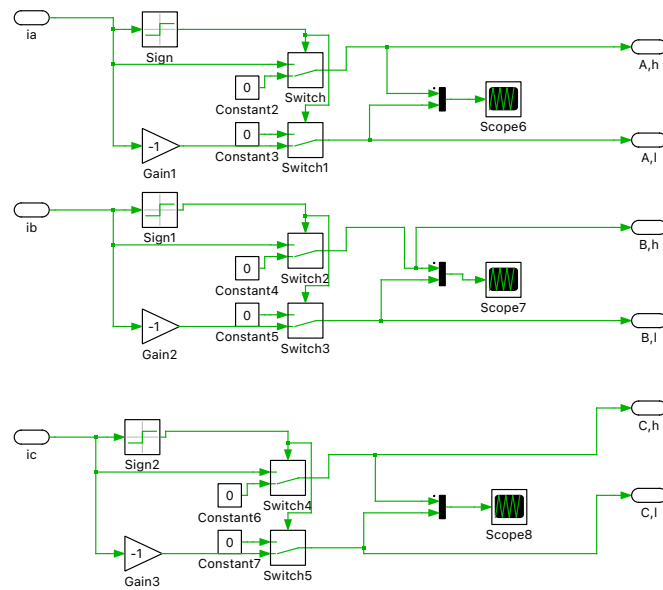


Figura 4.53: Calcolo dei duty cycle.

Tecnica di modulazione derivata da controllo VSI

La tecnica di modulazione in esame, deriva dalla modulazione classica Space Vector di un inverter di tensione VSI. Per implementare questa tecnica si seguono le istruzioni

presenti in [3] in modo tale da ottenere una modulazione SVM continua e garantire l'uguaglianza delle correnti delle tre fasi in uscita dal convertitore CSI. Infatti, una criticità della modulazione precedente anche se continua, è la presenza di una fase con caratteristiche diverse dalle altre due. Questo è dovuto al fatto che i duty cycle e i comandi vengono ricostruiti utilizzando l'informazione diretta soltanto di due fasi invece che tre. In Figura 4.54 viene rappresentato il calcolo dei duty e dei comandi date le tre correnti di riferimento.

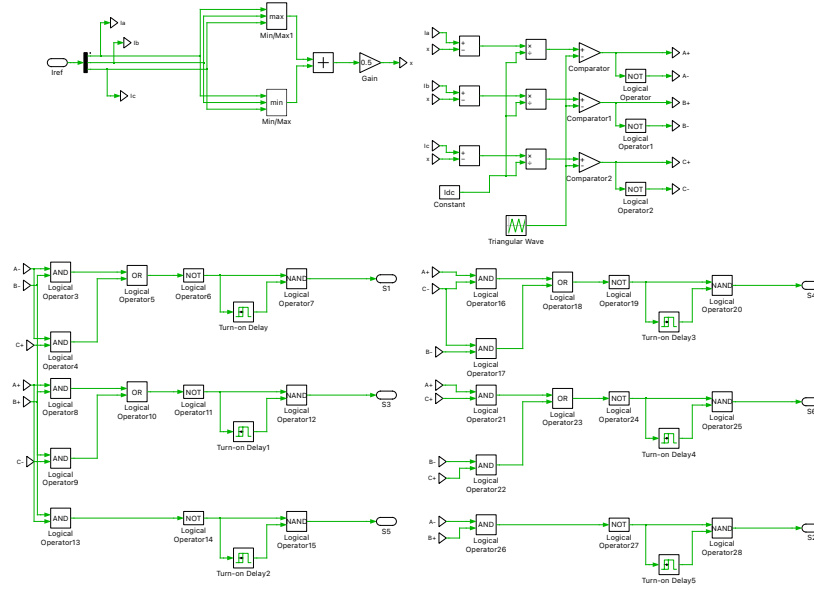


Figura 4.54: Calcolo duty e comandi modulazione derivata da VSI.

4.4 Risultati di simulazione in tempo discreto

Nel paragrafo in esame vengono raccolti e commentati i risultati ottenuti nelle simulazioni in tempo discreto con l'utilizzo delle tre tecniche di modulazione spiegate in precedenza. Come già spiegato, Il controllo in simulazione viene eseguito seguendo il tempo discreto definito dal segnale ad impulsi a frequenza f_s , definita dal tempo di discretizzazione scelto.

Inoltre, per quanto riguarda la corrente continua fornita dall'ingresso, nelle simulazioni in tempo discreto viene utilizzato un generatore di corrente DC ideale che garantisce una corrente ideale. Per questo motivo non verrà discussa né analizzata la corrente continua ideale in ingresso.

4.4.1 Simulazione con modulazione discontinua

In Figura 4.55, è rappresentata la frequenza del generatore sincrono virtuale, che presenta un primo tratto transitorio per poi sincronizzarsi alla frequenza di rete. Come si vede, il transitorio si ha quando incomincia la modulazione del CSI.

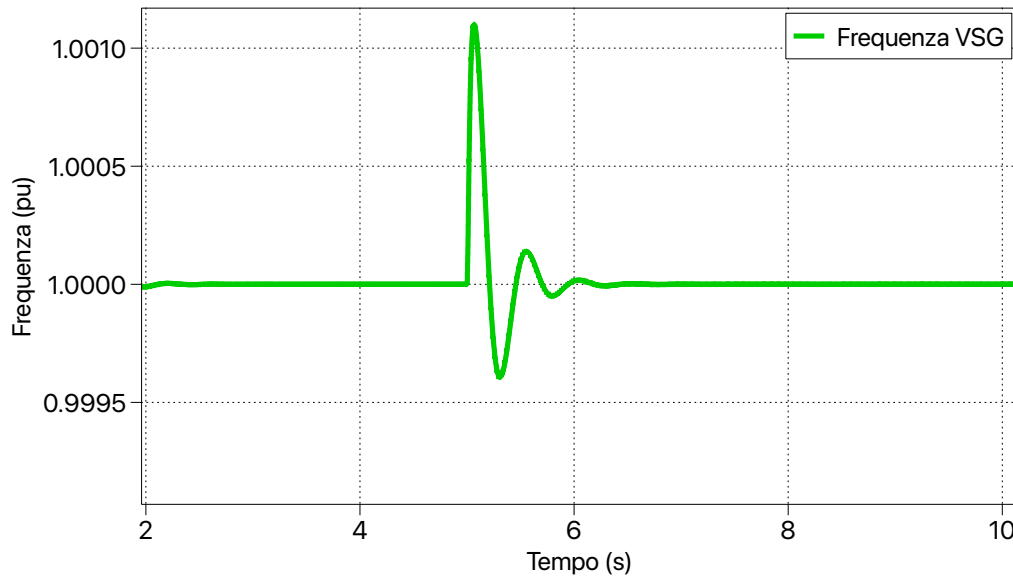


Figura 4.55: Pulsazione del VSG.

Una volta che il sincrono virtuale si è sincronizzato alla pulsazione di rete, prendendo l'angolo elettrico θ fornito dalla posizione rotorica del VSG si calcolano le correnti di riferimento visibili in Figura 4.56.

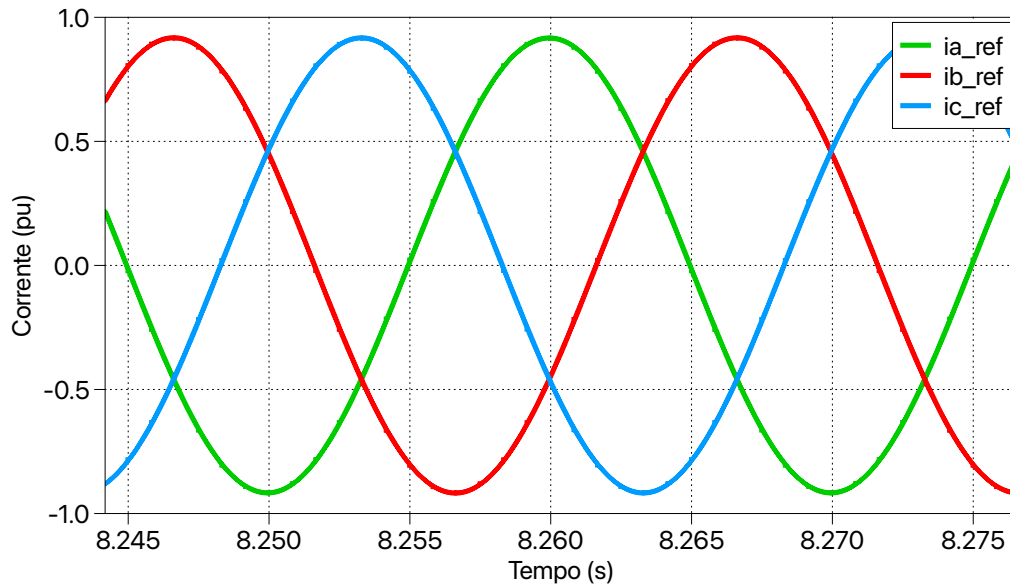


Figura 4.56: Correnti di riferimento.

I riferimenti calcolati sopra sono utilizzati per definire i duty cycle e i comandi del convertitore CSI. La modulazione discontinua e quindi il funzionamento del CSI viene abilitato solo quando la frequenza del sincrono virtuale è sincrona con la pulsazione di rete e inoltre, si verifica che i riferimenti siano stabili. Prima di abilitare il funzionamento del CSI la corrente di rete a vuoto è quella di Figura 4.57.

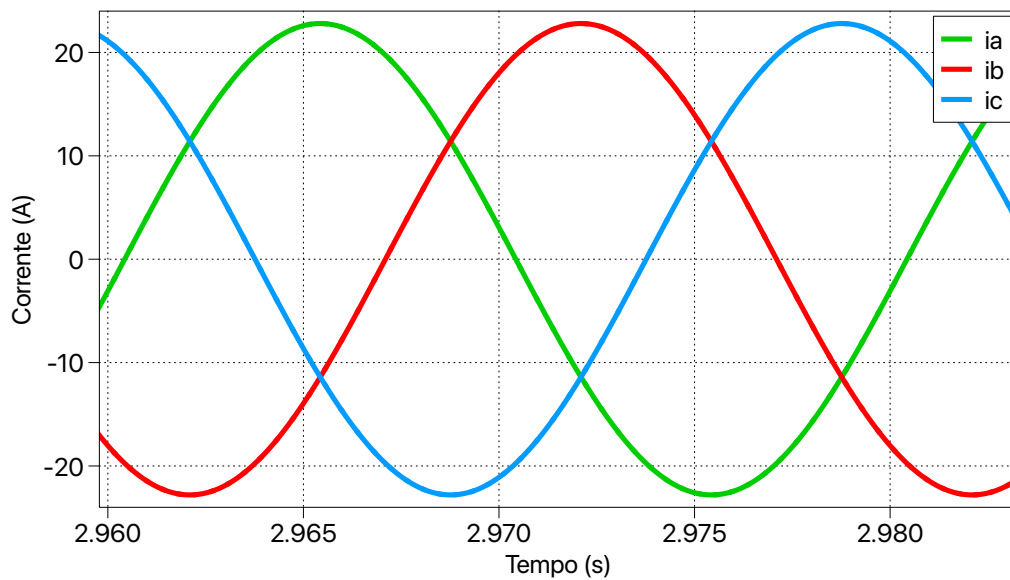


Figura 4.57: Corrente di rete a vuoto.

Si abilita la modulazione e si ottengono le correnti di rete di Figura 4.58.

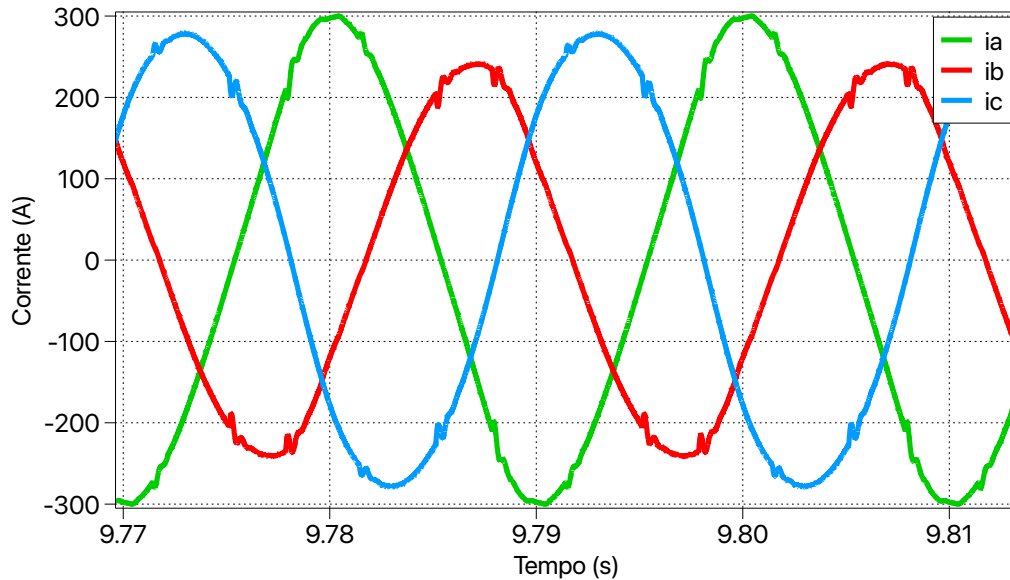


Figura 4.58: Corrente di rete prima del filtro passa basso.

Come si vede però, le forme d'onda di corrente sono fortemente distorte e di ampiezza diversa. Questi disturbi sono dovuti alla presenza di armoniche parassite nella tensione misurata nella stella di condensatori in uscita di Figura 4.59. Si inserisce quindi un filtro passa basso con frequenza di taglio a circa 1kHz , che permette di filtrare in modo corretto la tensione di rete e ottenere quindi una tensione pulita in uscita, come si vede in Figura 4.60.

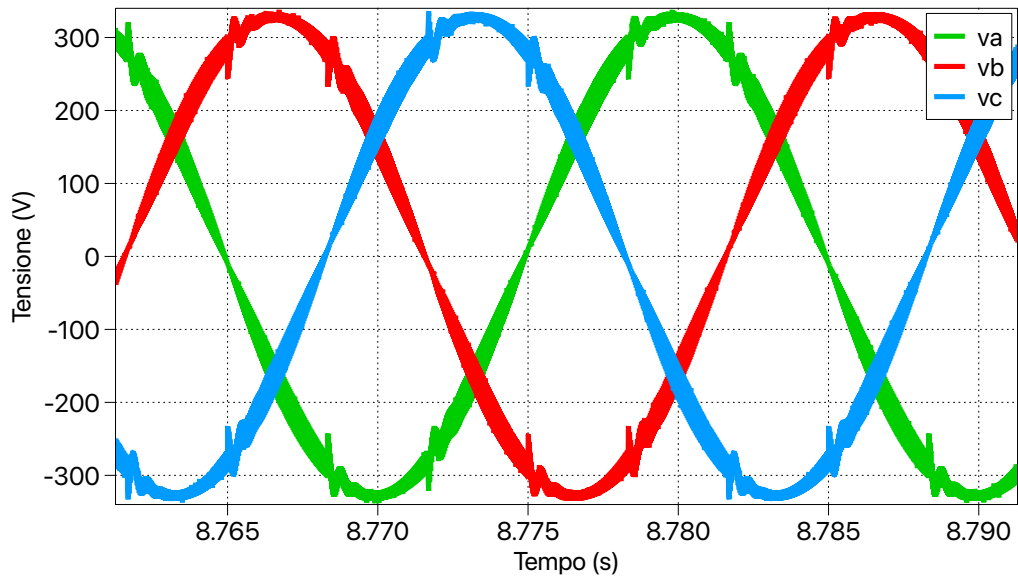


Figura 4.59: Tensione di rete senza filtro passa basso.

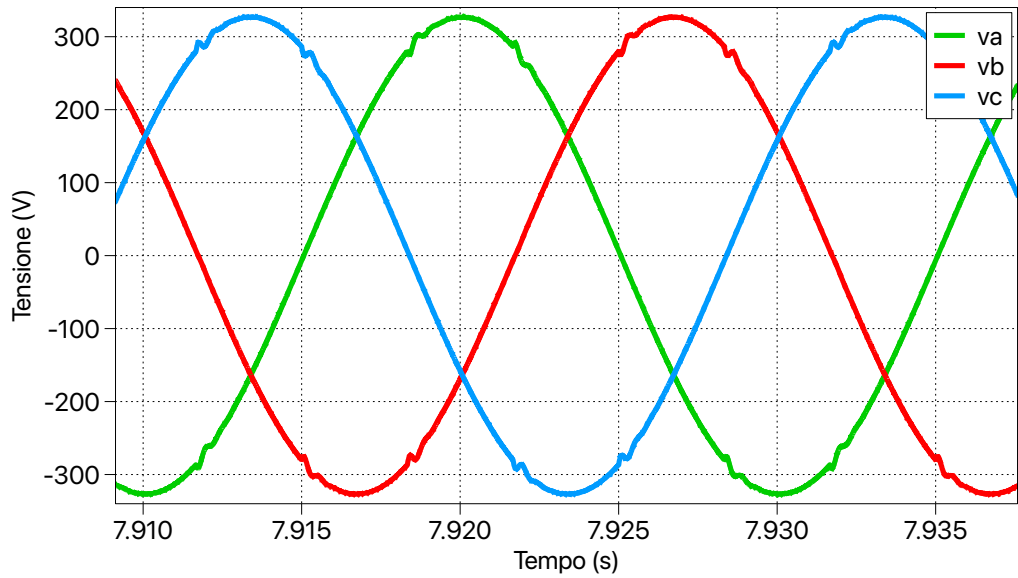


Figura 4.60: Tensione di rete filtrata.

La corrente in uscita dal CSI è raffigurata in Figura 4.61, che viene filtrata con il filtro CLC e diventa come in Figura 4.62.

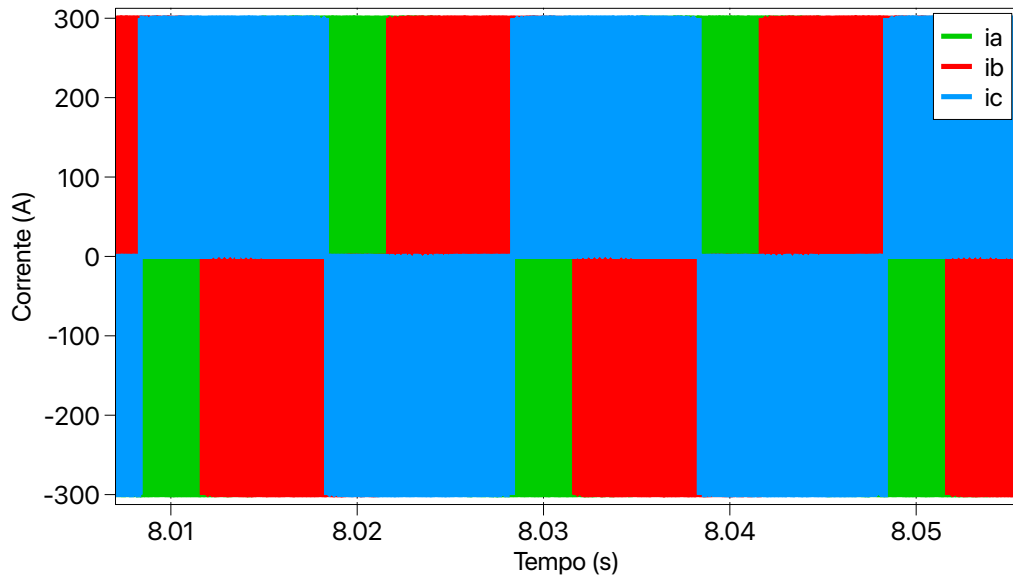


Figura 4.61: Corrente lato CSI.

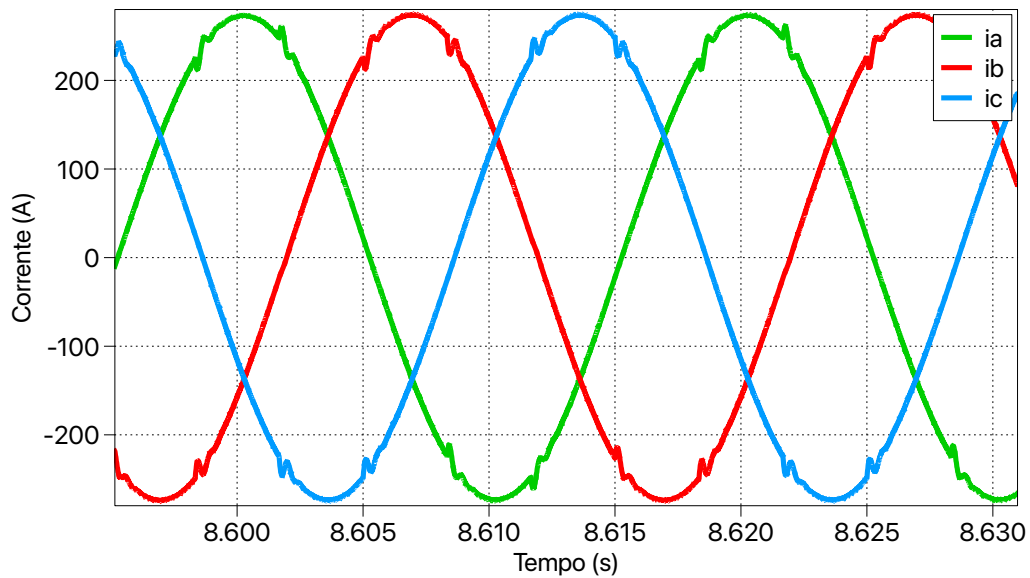


Figura 4.62: Corrente di rete filtrata

Il comportamento del generatore sincrono virtuale che definisce il riferimento di potenza attiva virtuale e l'andamento della frequenza di rete dato un disturbo di frequenza, sono rappresentati rispettivamente in Figura 4.63 e Figura 4.64 sotto. Come si vede, il

sistema reagisce per riportare il valore di frequenza a quello di normale funzionamento. Nella potenza attiva virtuale, si notano due picchi, il primo dovuto all'inizio della modulazione, il secondo più ampio, dovuto al disturbo di frequenza.

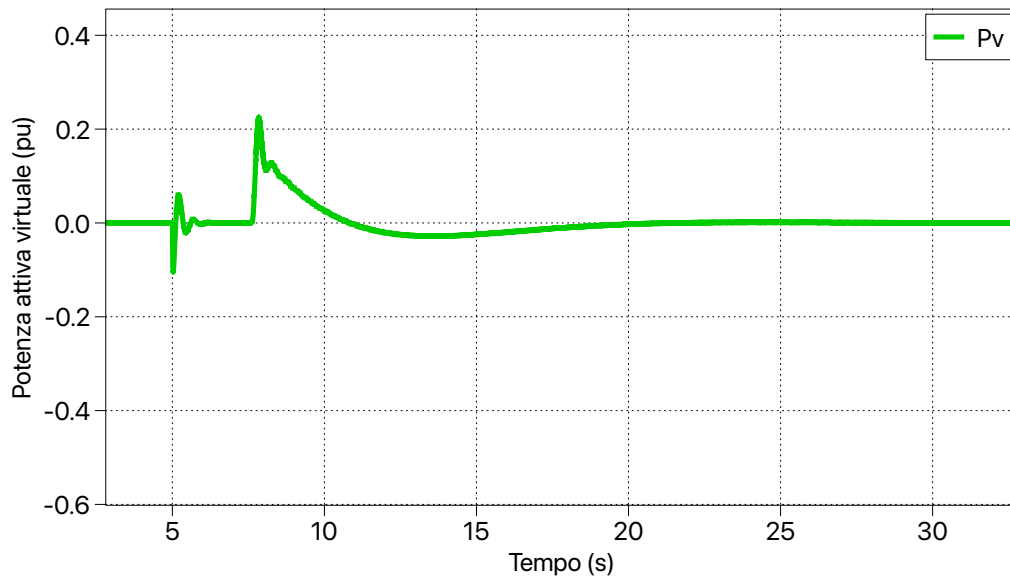


Figura 4.63: Potenza attiva virtuale del VSG dato disturbo di frequenza.

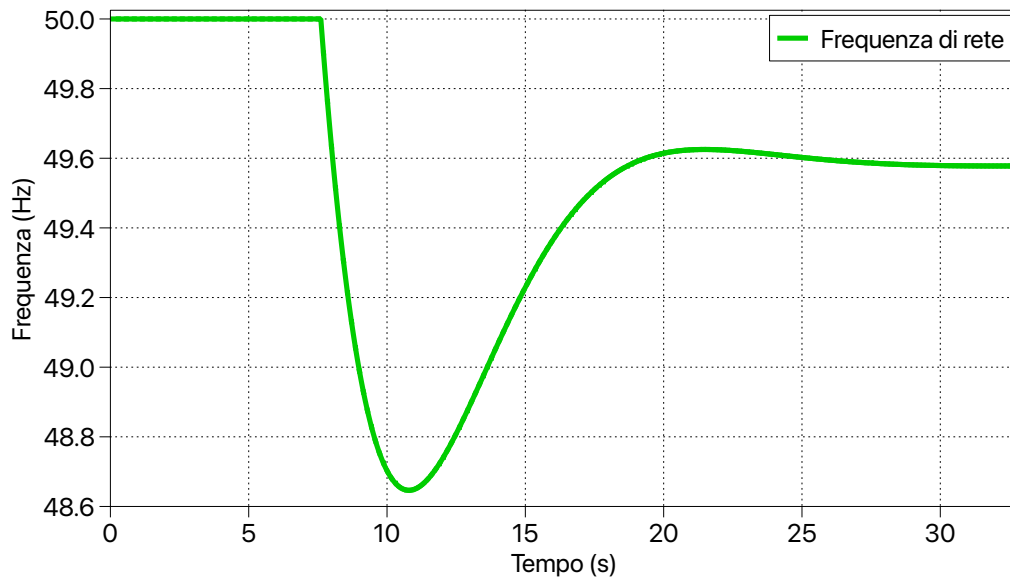


Figura 4.64: Frequenza di rete perturbata.

4.4.2 Simulazione con modulazione continua

In questa sezione vengono illustrati e analizzati i risultati ottenuti nella simulazione in tempo discreto con l'utilizzo della modulazione continua. Il funzionamento generale è il medesimo della simulazione precedente, dove, una volta che il VSG si sincronizza alla pulsazione di rete, vengono calcolati sulla base della potenza attiva e reattiva virtuale i riferimenti di corrente. In Figura 4.65, si notano i riferimenti di corrente.

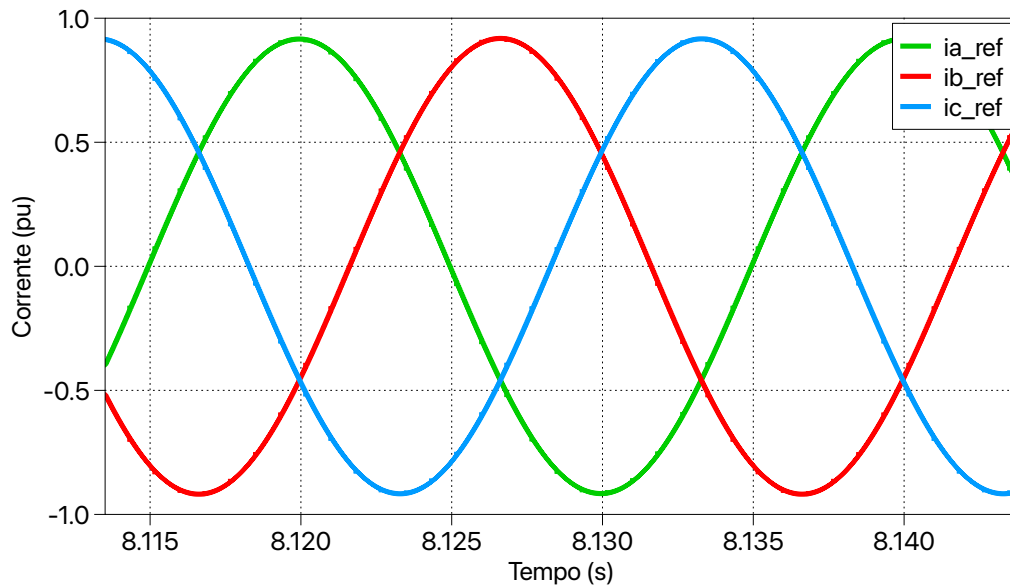


Figura 4.65: Correnti di riferimento.

Come si vede, le figure rappresentate sopra mostrano la stessa pulsazione e le stesse correnti di riferimento già ottenute nelle simulazioni precedenti. In Figura 4.66 sono rappresentate le correnti in uscita dal CSI e in Figura 4.67 sono rappresentate le correnti di rete filtrate. Rispetto alle forme d'onda ottenute nelle simulazioni precedenti, queste ultime presentano meno disturbi. Inoltre, si nota la totale assenza di perturbazioni dovute alla discontinuità della modulazione, dovuta all'utilizzo invece di una modulazione continua.

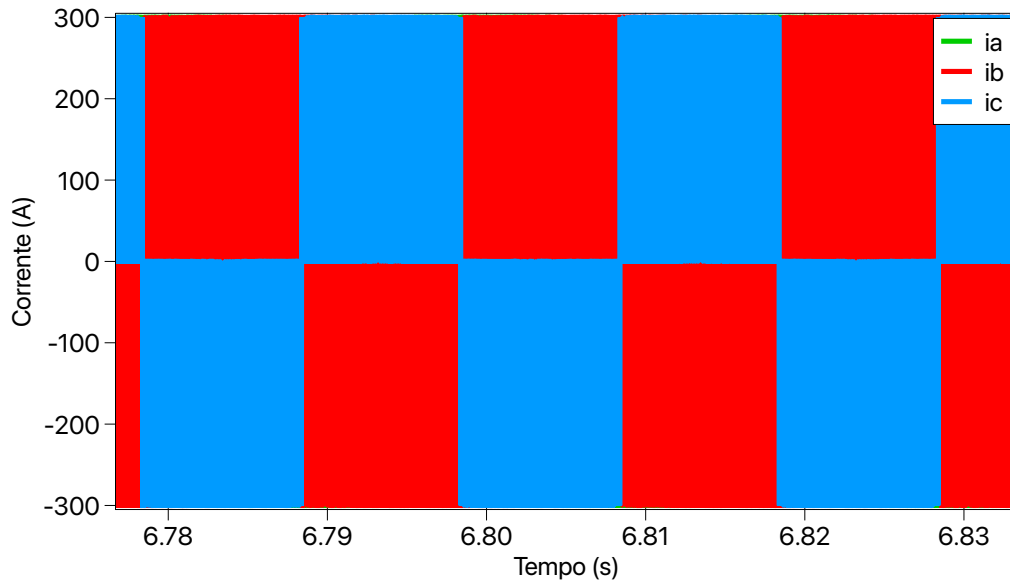


Figura 4.66: Correnti lato convertitore CSI.

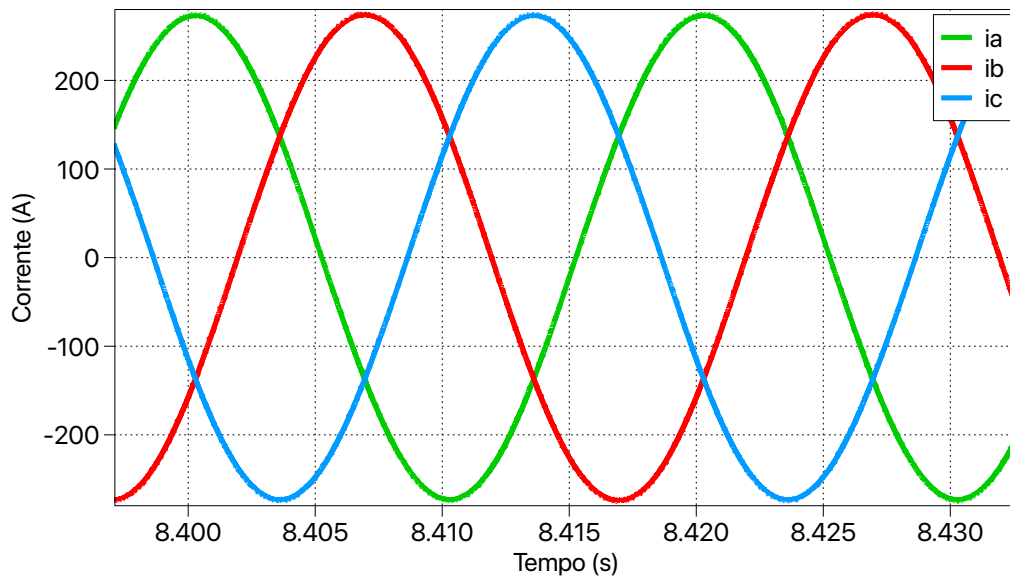


Figura 4.67: Correnti di rete filtrate.

Infine, la modulazione utilizzata, sfrutta la tecnica discontinua ma senza il termine discontinuo Delta, questo garantisce l'assenza di disturbi nelle correnti in uscita ma, come si vede nelle figure precedenti, le correnti sulle tre fasi non hanno la stessa ampiezza di ripple. Questo fenomeno è relativo alla natura stessa della modulazione, che prevede

l'utilizzo di soli due duty cycle dove il terzo viene ricavato dai primi due. Inoltre, di seguito in Figura 4.68 e 4.69, sono rappresentati la frequenza di rete affetta da un disturbo transitorio che ne attenua il valore e la conseguente risposta del controllo CSI+VSG che fornisce i riferimenti di corrente opportuni per riportare la frequenza intorno a 50 Hz.

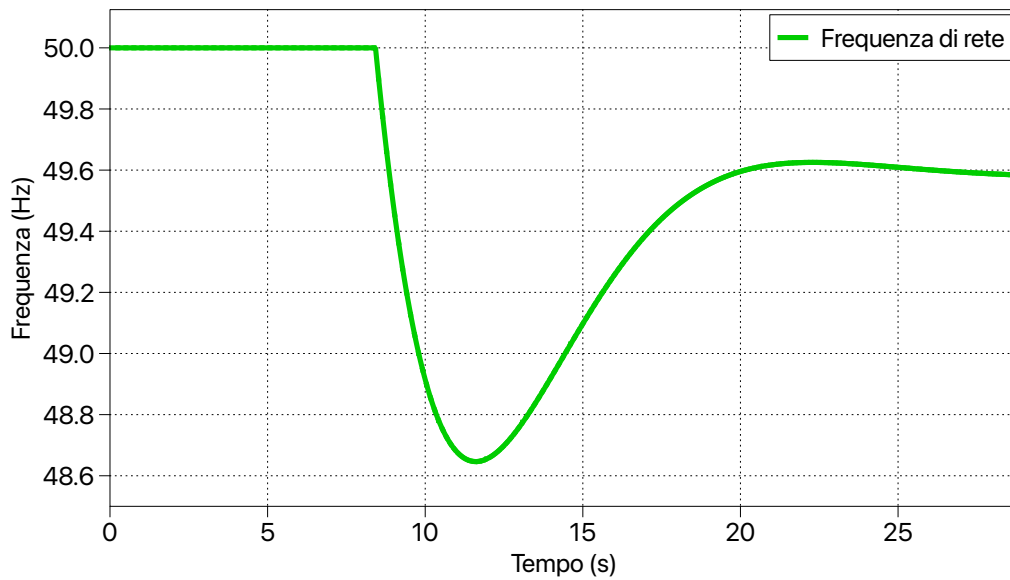


Figura 4.68: Frequenza di rete.

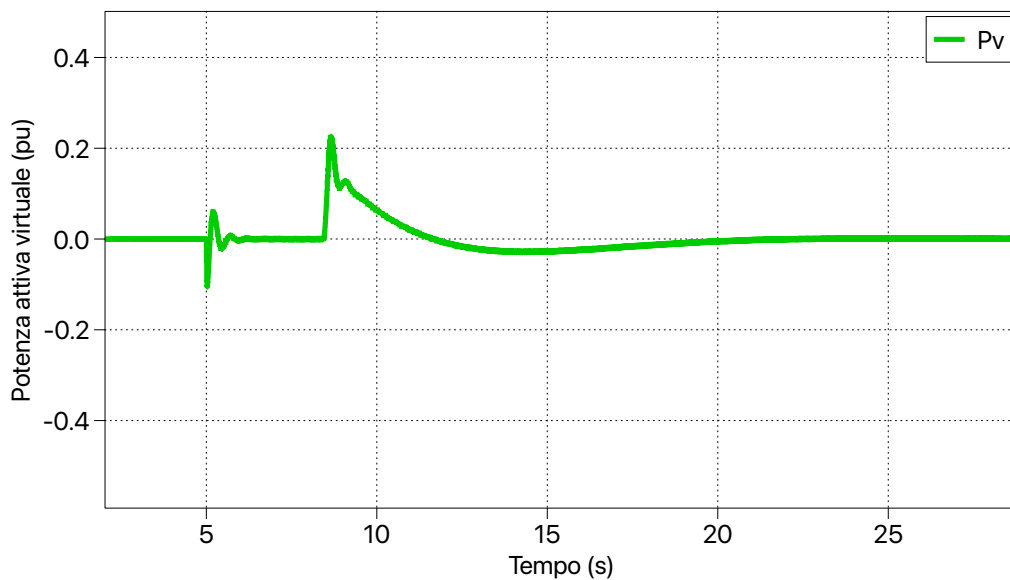


Figura 4.69: Potenza attiva virtuale.

4.4.3 Simulazione con modulazione derivata da VSI

In questa sezione vengono descritti i risultati principali ottenuti nella simulazione in tempo discreto con l'uso della modulazione continua derivata dall'inverter di tensione VSI. Inoltre, si evidenziano le principali differenze rispetto alle precedenti simulazioni. Una volta raggiunta la sincronizzazione della pulsazione del VSG alla pulsazione di rete e calcolati i riferimenti, come di consuetudine, viene abilitata la modulazione del CSI. In Figura 4.70 è rappresentata la corrente lato convertitore non filtrata, mentre in Figura 4.71 viene rappresentata la corrente trifase di rete filtrata dal filtro CLC in uscita.

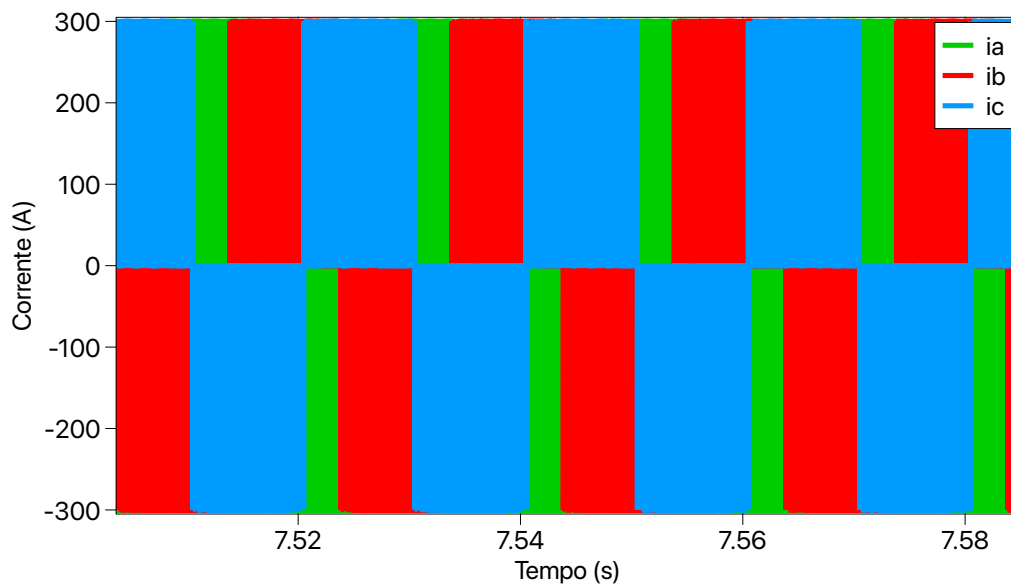


Figura 4.70: Correnti lato CSI.

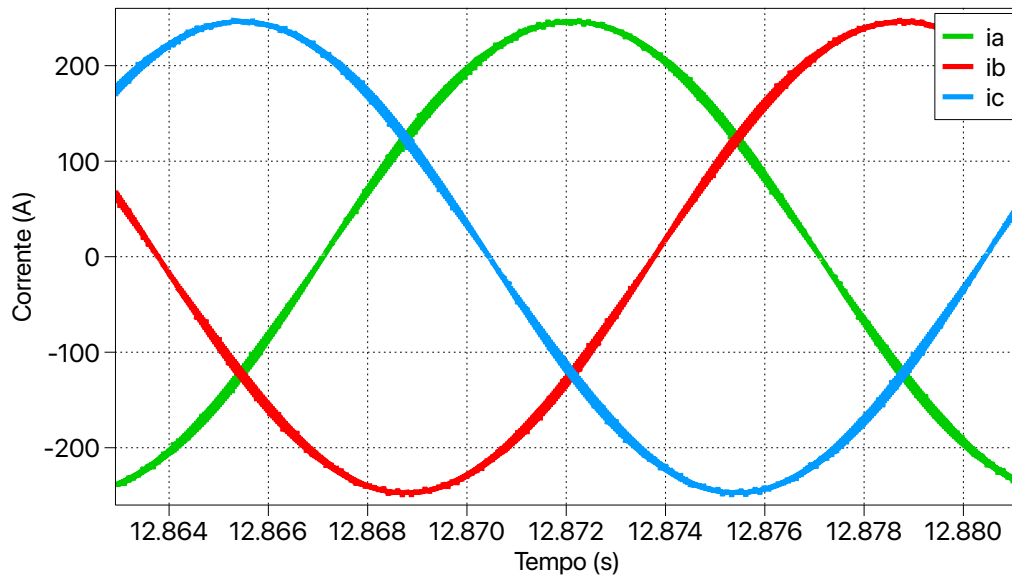
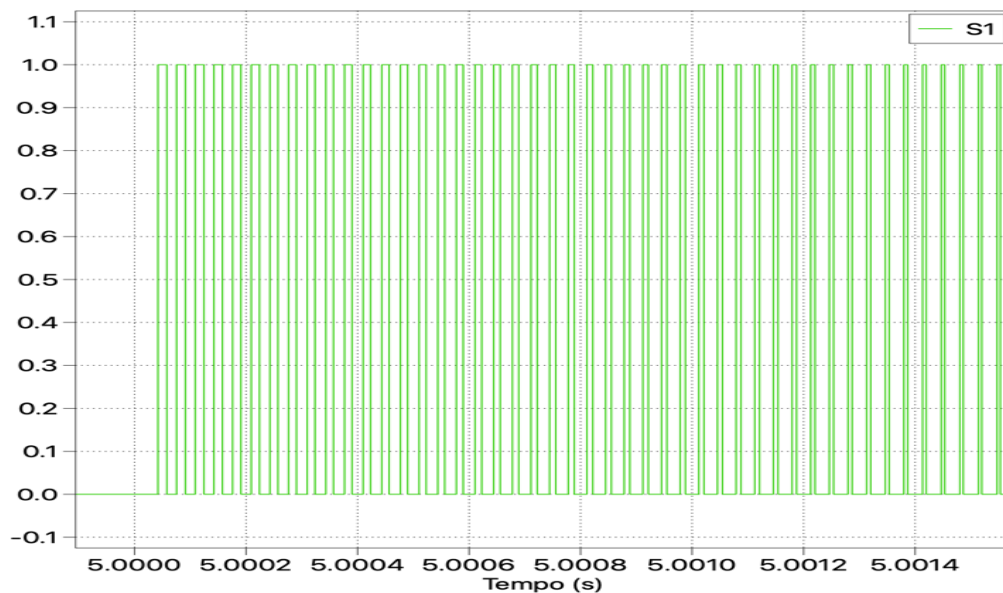


Figura 4.71: Correnti di rete filtrate.

Come si può vedere, la corrente di rete fornita dal CSI è priva di disturbi e inoltre, l'ampiezza del ripple delle forme d'onda sulle tre fasi è la stessa, proprio grazie alla modulazione utilizzata. Inoltre, in Figura 4.72 è raffigurato il comando *S1* dato allo switch alto della prima gamba di inverter che non presenta saturazione.

Figura 4.72: Comando *S1*.

Infine, in Figura 4.73 è visibile la tensione di rete misurata che presenta delle armoniche sovrapposte. Nonostante ciò non è necessario aggiungere al filtro risonante un ulteriore filtro passa basso per eliminare le armoniche e ottenere il corretto funzionamento data la modulazione utilizzata.

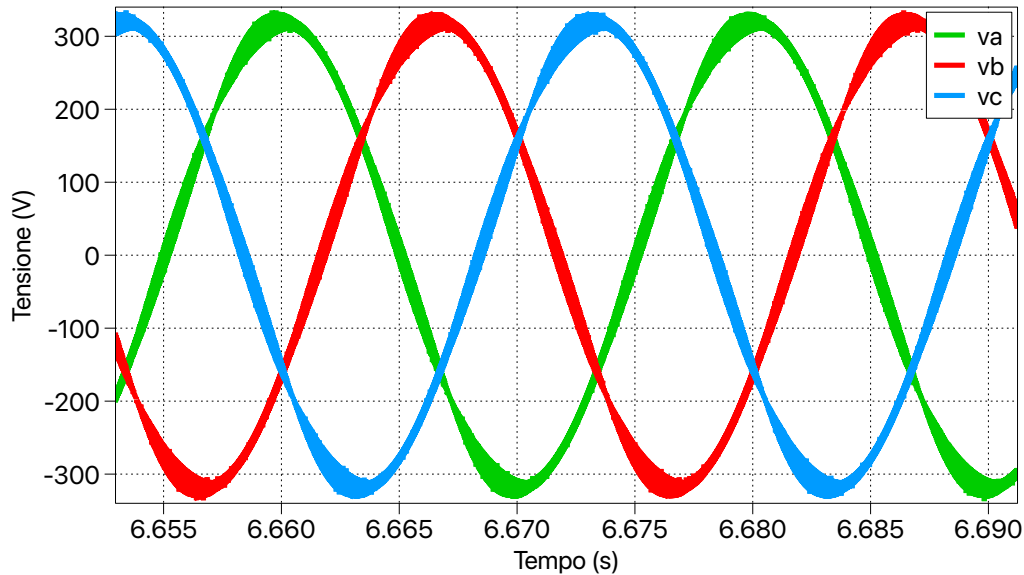


Figura 4.73: Tensione di rete misurata.

Inoltre, anche con questa tecnica di modulazione sono state effettuate delle prove dinamiche per verificare l'efficacia della risposta del controllo inserendo una perturbazione di frequenza, visibile in Figura 4.74. Come si vede in Figura 4.75, anche in questo caso, il controllo del CSI+VSG imposta dei riferimenti di potenza virtuale e quindi di corrente, tale da riportare al valore nominale la frequenza di rete.

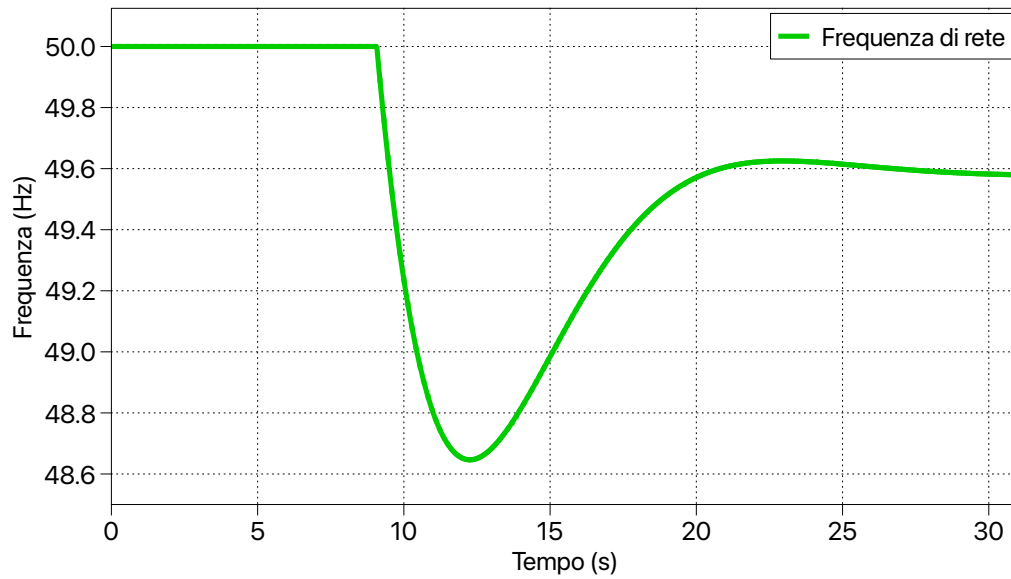


Figura 4.74: Perturbazione della frequenza di rete.

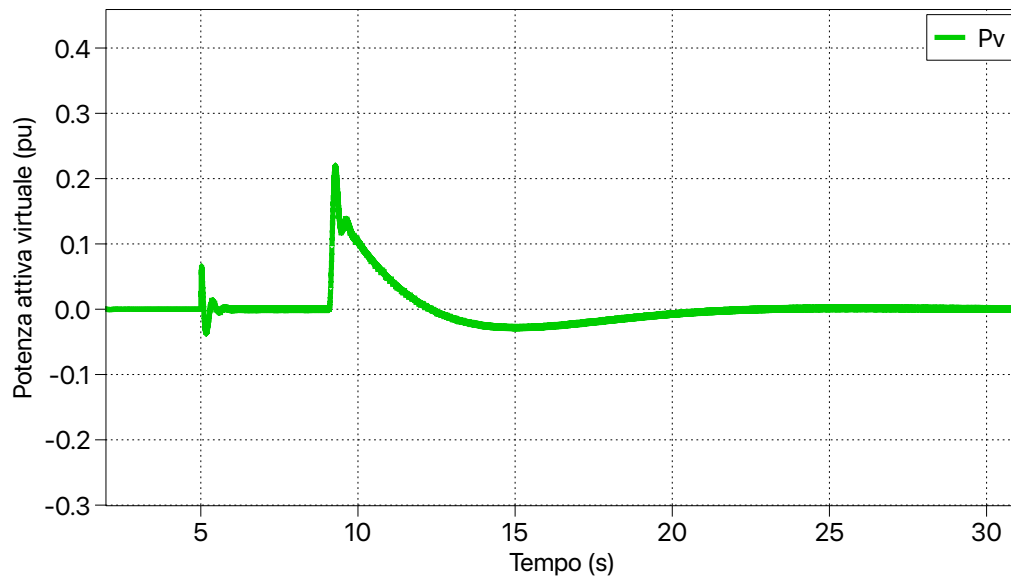


Figura 4.75: Potenza attiva virtuale in risposta alla perturbazione di frequenza.

Capitolo 5

Modello di simulazione real time

In questo capitolo viene descritta e analizzata la simulazione eseguita in laboratorio, utilizzando dispositivi Real Time come l'integrato RT Box 3, fornito da Plexim e la scheda Nucleo G474RE. L'obiettivo di queste simulazioni è implementare il sistema, finora simulato sul software PLECS, su dei dispositivi per la modellizzazione realistici che forniscono delle forme d'onda più inerenti alla realtà. Nello specifico, la scheda Nucleo G474RE viene utilizzata per implementare la parte del controllo del CSI con VSG e del controllo del DC/DC in ingresso. Invece, RTBox3 viene utilizzata per modellizzare la rete e i convertitori appena citati. In Figura 5.2, si può vedere la postazione utilizzata in laboratorio, dove, a sinistra si vede il dispositivo RT Box 3 connesso con cavo ethernet al PC di destra. Inoltre, la scheda connessa all'RT Box 3 è la Nucleo G474RE controllata tramite interfaccia PLECS connessa anche essa al PC tramite USB e si può vedere da vicino in Figura 5.3.

Nei paragrafi successivi, vengono analizzati singolarmente i dispositivi utilizzati in laboratorio e viene descritta la simulazione effettuata con i relativi risultati ottenuti. Inoltre, di seguito in Figura 5.1 è presente uno schema concettuale che permette una migliore comprensione dei collegamenti tra i dispositivi utilizzati nelle prove sperimentali e l'entità dei dati scambiati tra loro.

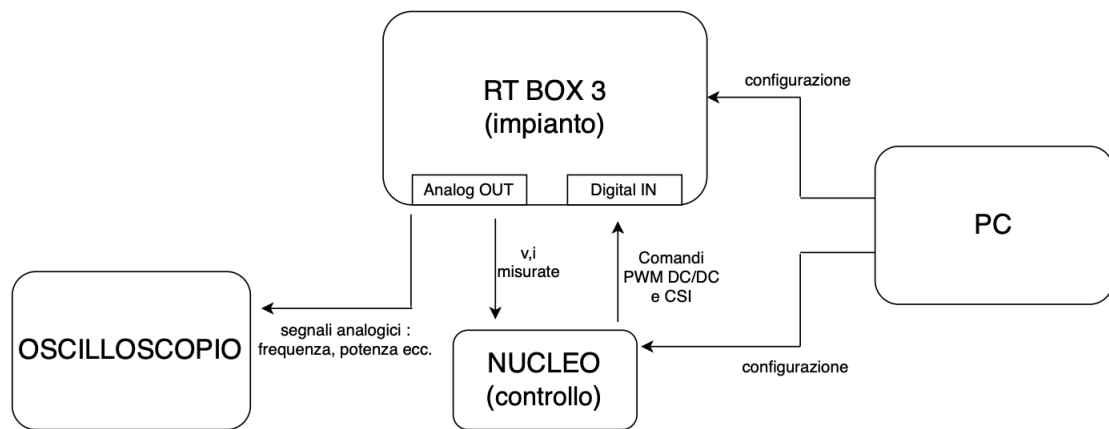


Figura 5.1: Schema concettuale prove sperimentali.

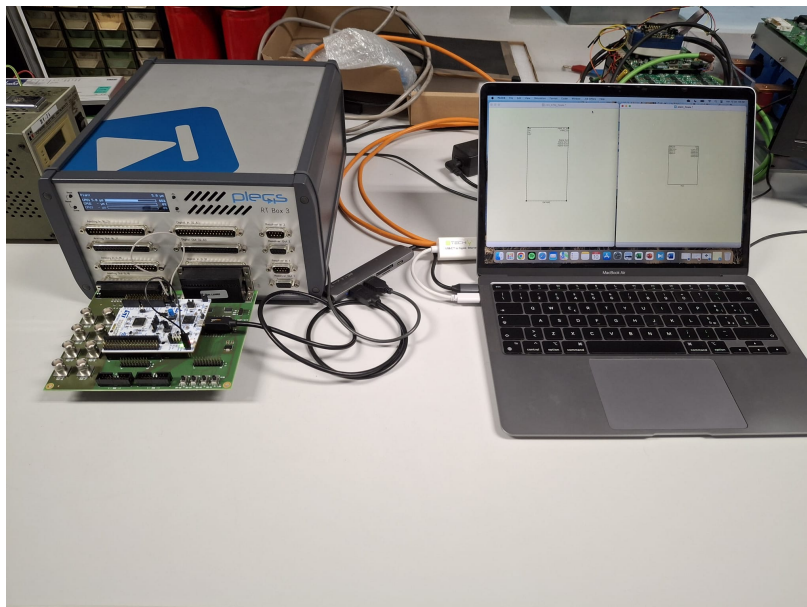


Figura 5.2: Dispositivi usati in laboratorio e loro connessione.



Figura 5.3: RT Box 3 e scheda Nucleo G474RE.

5.1 RTbox3

Il dispositivo RT Box 3, come descritto in [8], è una piattaforma avanzata per simulazione in tempo reale (HIL – Hardware-in-the-Loop) e prototipazione rapida di controllo nel dominio dell’elettronica di potenza. Questo dispositivo si interfaccia con il software di modellazione PLECS, consentendo di portare modelli simulati di impianti oppure convertitori direttamente in tempo reale e di farli interagire con hardware di controllo reale o con sensori/attuatori esterni. Il suo impiego tipico comprende l’emulazione del “plant” (ad esempio un convertitore o motore) mentre il controller è reale. Dal punto di vista operativo, RT Box 3 dispone di una potente architettura hardware basata su processore Xilinx Zynq Ultrascale+ (con CPU ARM e logica FPGA) e di due unità di calcolo “Nano-step” che permettono passi di simulazione estremamente ridotti per modellare switching ad alta frequenza. Dispone inoltre, di un elevato numero di canali input e output, 32 ingressi analogici, 32 uscite analogiche, 64 ingressi digitali e 64 uscite digitali. In sintesi, l’RT Box 3 costituisce un ponte tra simulazione e realtà, offrendo la capacità di testare algoritmi di controllo e impianti ad alta velocità e in condizioni realistiche prima della messa in servizio dell’hardware finale, contribuendo così a ridurre tempi di sviluppo, rischi e costi.

Nella simulazione in esame, come già detto, il dispositivo viene utilizzato per simulare l’hardware presente nel sistema, composto da convertitore DC/DC, CSI e rete elettrica. Il dispositivo invia all’esterno i segnali analogici attraverso le porte Analog out 0;15 e comunica segnali digitali in ingresso e uscita con le porte Digital In e Out 0;31. Inoltre, viene utilizzata la scheda di interfaccia RTBox LaunchPad-Nucleo Interface, anche essa sviluppata da Plexim, che permette la connessione e la comunicazione con la scheda Nucleo G474RE. La LaunchPad-Nucleo, è fornita di connettori e piste che permettono la connessione di schede di controllo con il dispositivo RTBox3. Inoltre, sono presenti sei canali con connettori BNC che permettono la visualizzazione dei segnali analogici simulati attraverso l’uso di un oscilloscopio. La scheda di interfaccia è rappresentata in Figura 5.4 sotto.

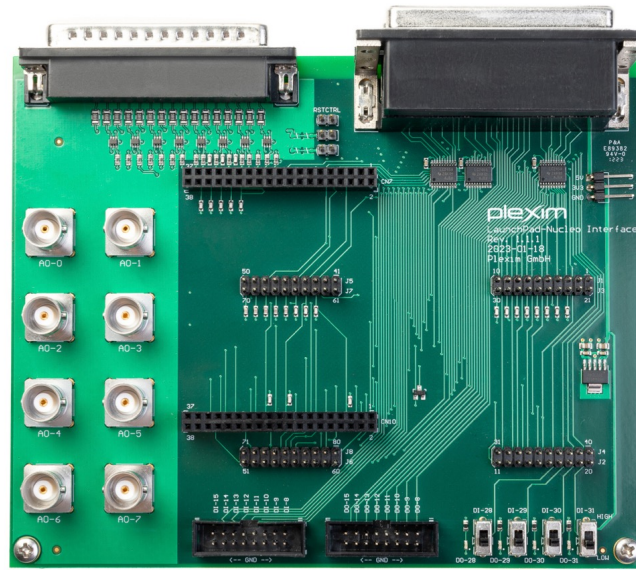


Figura 5.4: RTBox LaunchPad-Nucleo Interface.

5.2 Scheda Nucleo G474RE

La scheda NUCLEO-G474RE, come descritto in [9], è una piattaforma di sviluppo basata sul micro controllore STM32G474RE, appartenente alla serie STM32G4 di ST-Microelectronics. La scheda è progettata per offrire un ambiente economico ma potente per la prototipazione rapida di sistemi embedded, in particolare laddove siano richieste elevate prestazioni in termini di calcolo, convertitori analogici, PWM ad alta risoluzione e funzionalità di controllo. Dal punto di vista hardware, la scheda ospita il microcontrollore STM32G474RE con core ARM Cortex-M4 operativo fino a 170 MHz circa. La scheda inoltre, dispone di una vasta dotazione di periferiche analogiche e digitali: ADC, DAC, comparatori ultra-rapidi, timer ad alta risoluzione per applicazioni di controllo, oltre a interfacce di comunicazione (USART, SP, CAN, USB) integrate. Un debugger/programmer ST-LINK integrato (versione V3E) facilita la programmazione e il debug senza necessità di strumenti esterni. In termini di funzionamento, la NUCLEO-G474RE può essere collegata al computer via USB per alimentazione e debug, oppure alimentata attraverso sorgenti esterne (5 V, 7-12 V, 3.3 V) selezionabili attraverso jumper, a seconda dell'applicazione sperimentale. Una volta alimentata, la scheda viene configurata attraverso il software Plecs con l'utilizzo dei pacchetti appositi per interfacciare il software e la scheda Nucleo. Quest'ultima, è visibile in Figura 5.5.

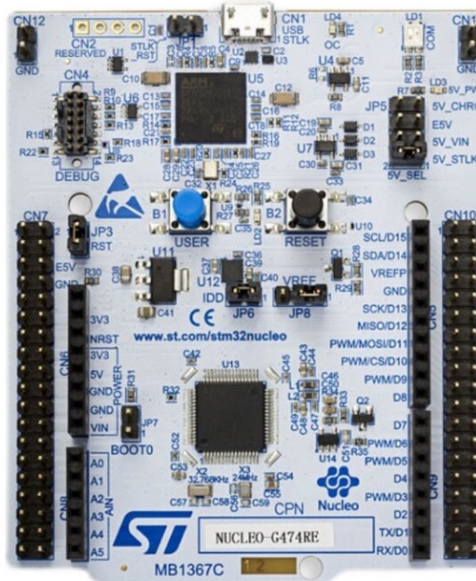


Figura 5.5: scheda Nucleo G474RE.

5.3 Simulazione svolta in laboratorio

In questa sezione, viene descritto il modello implementato sulla piattaforma RT Box 3 e, successivamente, viene descritto invece il modello di simulazione per il controllo dei dispositivi, effettuato sulla scheda esterna Nucleo G474RE. Entrambe, vengono sviluppate con l'utilizzo dell'interfaccia software Plects e in questo modo quindi, non è necessario programmare e settare i due dispositivi con dei software dedicati differenti.

5.3.1 Modello implementato su RT Box 3

Come già detto in precedenza, viene sviluppato il modello fisico dell'impianto composto da: DC/DC, CSI, filtro CLC e rete elettrica, con l'utilizzo del software Plects. La piattaforma fisica RT Box 3 simula l'impianto con un certo passo di discretizzazione scelto. Questo, deve essere sufficientemente piccolo rispetto alla frequenza di switching dei convertitori, in modo da garantire il corretto funzionamento ed ottenere risultati corretti. Nella tabella sotto sono elencate le principali caratteristiche e i parametri impostati per la simulazione su RT Box 3.

Potenza base	150 kVA
Valore efficace tensione rete	230 V
Tensione del generatore DC	600 V
Freq. di rete	50 Hz
Tempo di discretizzazione	5 μs

Tabella 5.1: Parametri per il sistema simulato su RT Box 3.

L'impianto simulato, riprende quello già implementato nelle simulazioni viste in precedenza su Plects e, come si vede in Figura 5.6, la topologia è la stessa.

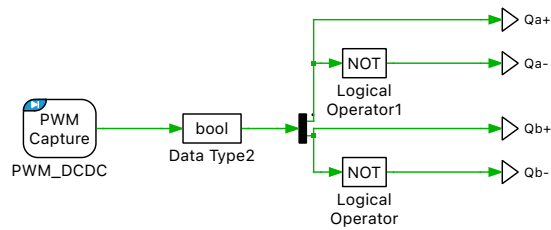
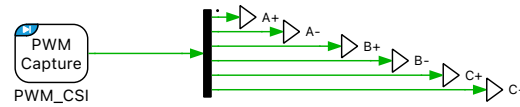


Figura 5.7: Capture PWM collegati alle porte Digital In.

Una volta catturati i segnali di controllo provenienti dagli input digitali, si calcolano i comandi con cui impulsare gli switch del CSI e del DC/DC. Per l'inverter di corrente la modulazione utilizzata è quella derivata dalla modulazione di un VSI. In questo modo, evitiamo le perturbazioni della modulazione discontinua e garantiamo pari ampiezza delle correnti sulle fasi. In Figura 5.8 è rappresentato il calcolo dei comandi già visto nella simulazione in discreto.

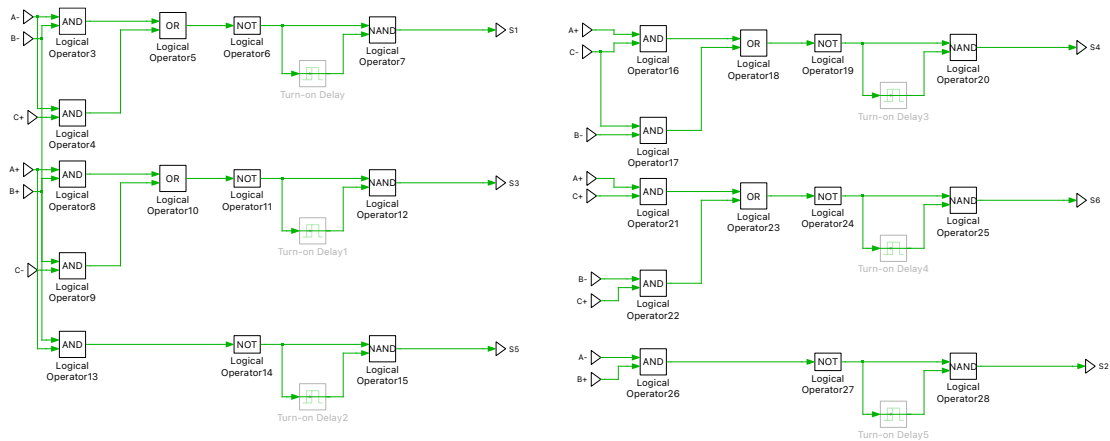


Figura 5.8: Calcolo dei comandi per il CSI.

I segnali analogici che servono per il controllo dell'impianto simulato vengono inviati all'esterno del RT Box 3 usando i canali di Analog Out. I canali 2, 3 e 8 vengono usati

per inviare alla scheda Nucleo le tensioni di rete misurate, mentre, il canale 10 viene utilizzato per inviare il valore di corrente continua fornito dal convertitore DC/DC. I segnali analogici che possono essere letti dalla scheda Nucleo però, sono segnali di tensione compresi tra 0 e 3.3 V. Per questo motivo, i valori analogici inviati sono scalati di un fattore "gain" e gli viene sommato un valore "offset". In Figura 5.9 e 5.10 sono rappresentati i calcoli di adattamento dei valori di corrente continua e tensione di rete misurati prima dell'invio alle porte analogiche di uscita.

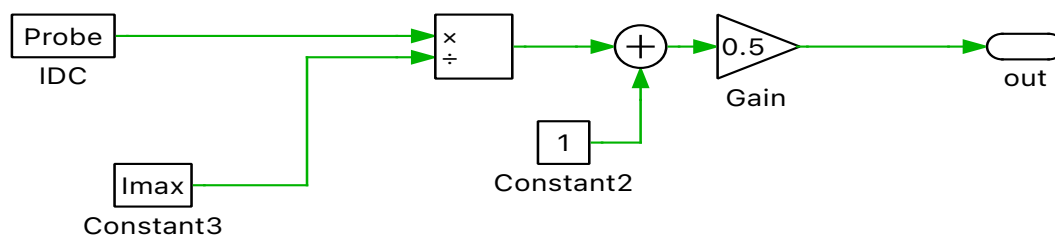


Figura 5.9: Conditioning della corrente DC misurata.

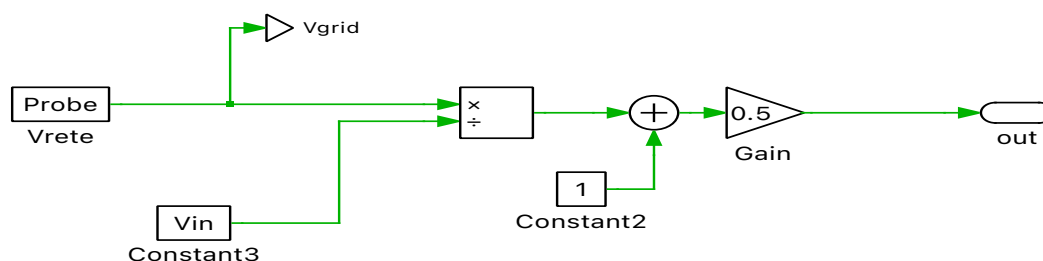


Figura 5.10: Conditioning della tensione di rete misurata.

I segnali di interesse che vengono successivamente visualizzati sull'oscilloscopio vengono inviati a ulteriori porte analogiche come in Figura 5.11. Inoltre, come in precedenza, questi segnali vengono riscaldati a dovere per poter essere inviati fuori correttamente.

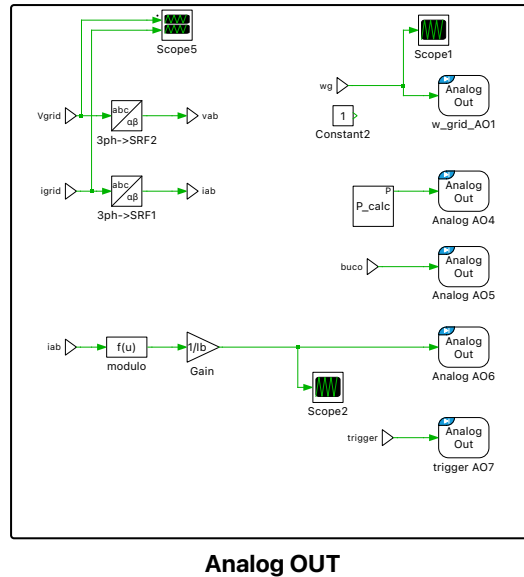


Figura 5.11: Segnali analogici da misurare con oscilloscopio.

5.3.2 Modello implementato sulla scheda Nucleo G474RE

Il modello implementato sulla scheda Nucleo viene costruito sempre con l'utilizzo del software PLECS ed è eseguito in un tempo discreto. Infatti, il micro controllore presente sulla scheda esegue le istruzioni contenute in una routine che viene eseguita con una certa frequenza in base al tempo di discretizzazione utilizzato. Nella tabella sotto, sono evidenziati i parametri principali utilizzati nella simulazione in esame. Il

Potenza base	150 kVA
Frequenza di switching	5 kHz
Tempo di discretizzazione	200 μs

Tabella 5.2: Parametri per il sistema simulato su Nucleo G474RE.

Il modello sviluppato sulla scheda Nucleo ha l'obiettivo di controllare il convertitore CSI e il DC/DC fornendo come segnali PWM digitali in uscita i comandi. Per fare questo, il primo passo è implementare l'acquisizione e la conversione dei segnali analogici ricevuti dalla piattaforma RT Box 3. Si utilizzano quattro ingressi delle unità di conversione ADC (Analog to Digital Converter) presenti nel micro controllore. Gli ingressi analogici 17, 15 e 11, degli ADC 1 e 2 sono utilizzati per acquisire le forme d'onda di tensione di rete misurate. L'ingresso analogico 12 dell'ADC 1 invece, è usato per acquisire il segnale di corrente continua misurata sull'impianto modellizzato su RT Box 3. I segnali acquisiti sono delle tensioni comprese tra 0 e 3.3 V che vengono riscaldati opportunamente per ottenere le ampiezze reali di tensione e corrente. In Figura 5.12 è presente il modello

utilizzato in simulazione per eseguire la conversione analogica digitale e lo scaling delle forme d'onda.

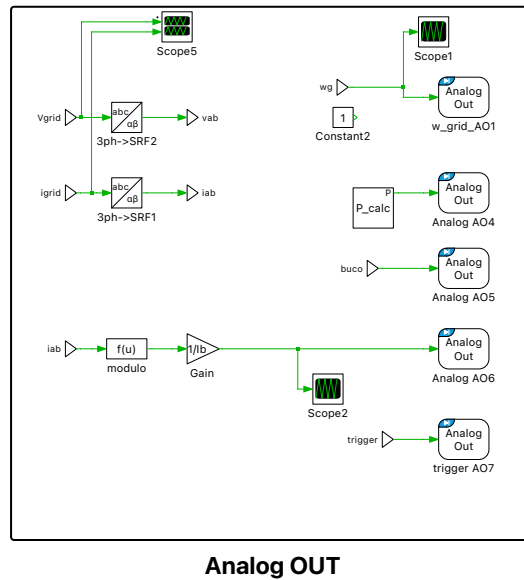


Figura 5.12: Acquisizione ADC e scaling di tensioni di rete e corrente DC.

Come si nota, nella figura sopra è presente un filtro per eliminare le armoniche presenti nella tensione di rete. Nello specifico, viene utilizzato il filtro risonante implementato in tempo discreto, già visto nelle simulazioni precedenti.

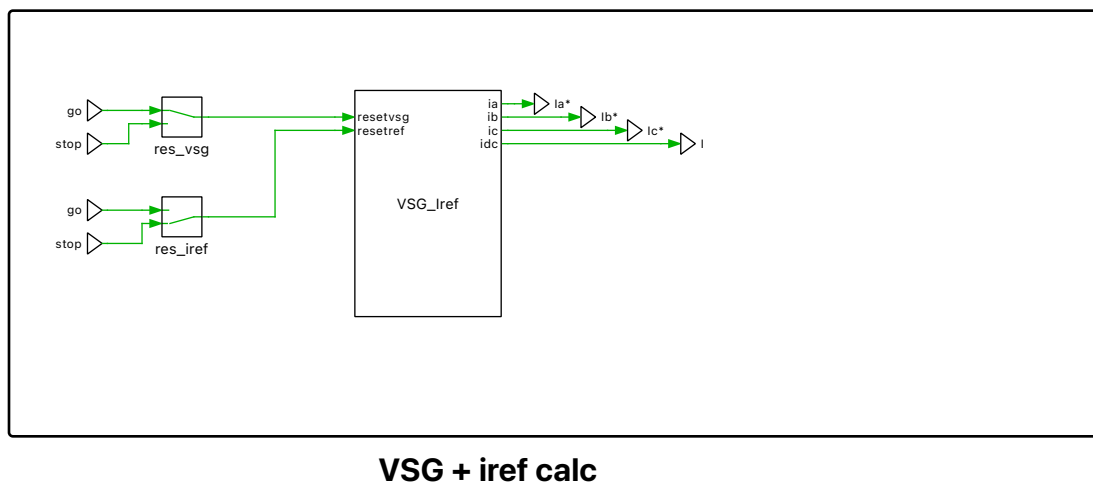


Figura 5.13: Modello del VSG e calcolo dei riferimenti.

In Figura 5.13, è rappresentato il blocco contenente il sincrono virtuale e il calcolo delle correnti di riferimento. Il modello utilizzato e le equazioni sono le stesse utilizzate nelle simulazioni viste su PLECS. All'esterno sono visibili due switch manuali che vengono utilizzati per abilitare il sincrono virtuale e il calcolo delle correnti. Questi dispositivi svolgono il ruolo della State Machine impiegata in simulazione e servono quindi per sincronizzare l'esecuzione della simulazione. In Figura 5.14 è rappresentato il VSG e invece in Figura 5.15 il calcolo dei riferimenti, contenuti nel blocco rappresentato prima. All'interno, i blocchi visti vengono modellizzati nello stesso modo delle simulazioni PLECS precedenti.

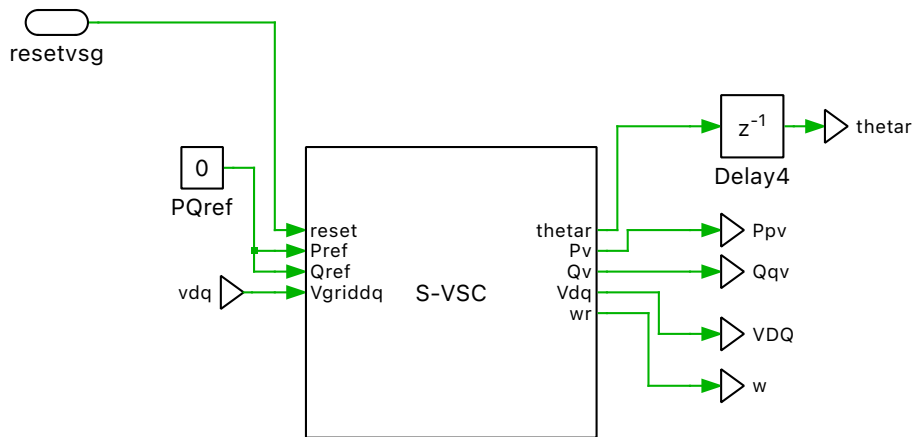


Figura 5.14: Modello del generatore sincrono virtuale.

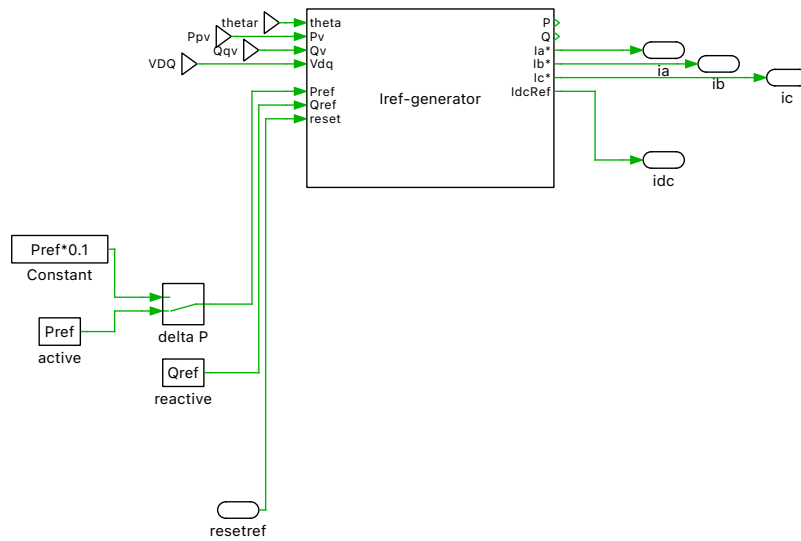
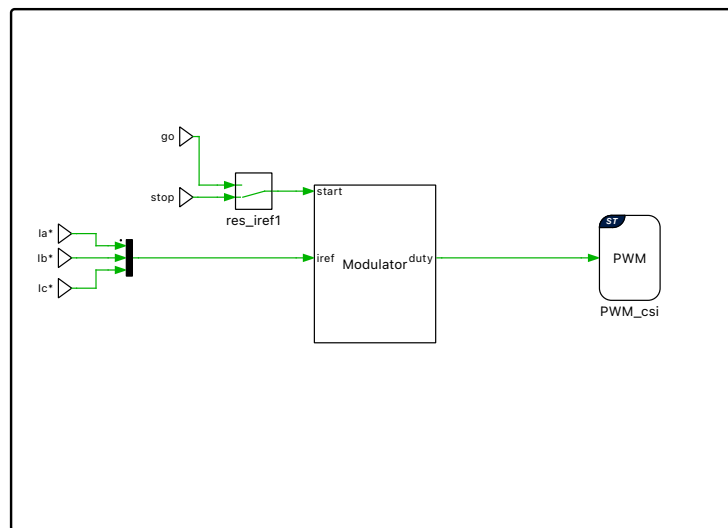


Figura 5.15: Calcolo delle correnti di riferimento.

Come si vede, anche qui è presente uno switch che viene utilizzato per cambiare i riferimenti di potenza. Successivamente, verrà illustrata la dinamica del sistema simulato al cambio di riferimento di potenza attiva.



CSI PWM

Figura 5.16: Controllo del CSI.

Una volta calcolate le correnti di riferimento, si costruiscono i comandi da inviare agli

switch del CSI. Per fare ciò, viene impiegato il blocco di Figura 5.16, che viene abilitato selezionando lo switch manuale durante l'esecuzione facendo partire la modulazione. Il contenuto del blocco è rappresentato in Figura 5.17, dove è presente la modulazione continua derivata dall'inverter VSI. I tre duty cycle ottenuti dal calcolo, vengono trasformati in comandi grazie all'utilizzo dei Timer presenti nel micro controllore. Infatti, vengono utilizzati i tre canali del Timer 1 selezionando l'uscita complementare per ottenere sei comandi a coppie di due, rispettivamente comando alto e basso negato. I comandi calcolati, vengono inviati alle porte digitali in ingresso alla piattaforma RT Box 3, rispettivamente alle porte dalla numero 0 alla 5. Il calcolo dei comandi e l'invio digitale, viene svolto utilizzando il blocco PWM della libreria Plecs per configurare la scheda Nucleo visibile a destra in Figura 5.16.

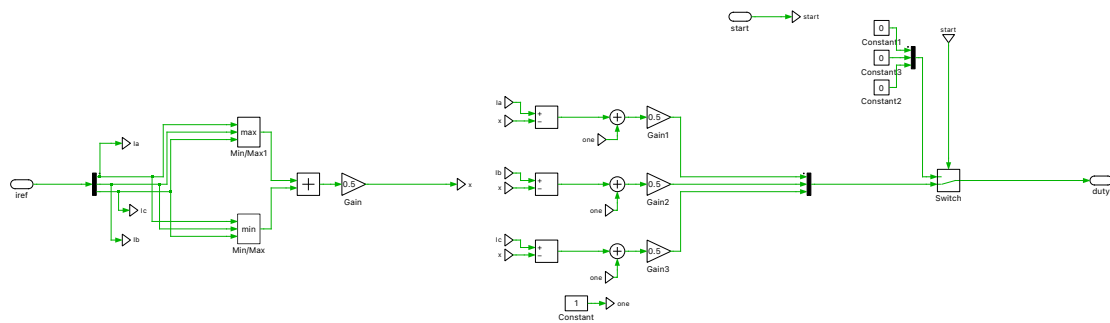
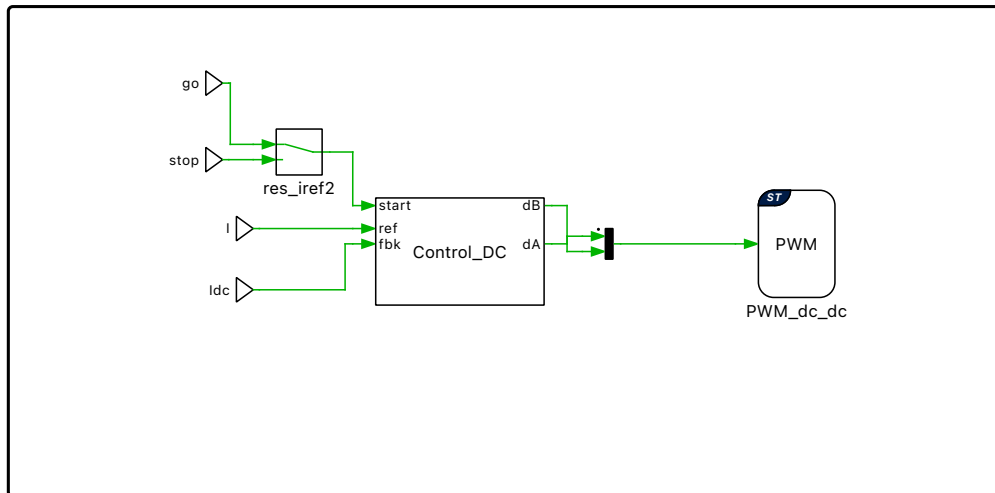


Figura 5.17: Calcolo dei duty cycle per il controllo del CSI.

Per quanto riguarda il controllo del convertitore DC/DC, questo è raffigurato in Figura 5.18 dove è presente uno switch in ingresso per abilitare il controllo. Viene utilizzata la modulazione unipolare per controllare il ponte ad H in simulazione seguendo lo schema di Figura 5.19 raffigurato sotto. Inoltre, il regolatore PI presente nell'immagine è impostato con i guadagni k_p e k_i già utilizzati nelle simulazioni precedenti in modo da garantire la stessa dinamica e poter fare un confronto esaustivo.



DCD/DC CONTROL

Figura 5.18: Controllo del DC/DC.

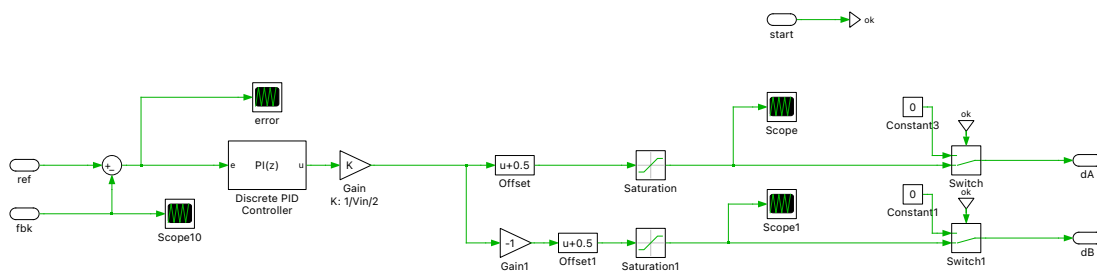


Figura 5.19: Calcolo dei duty cycle per il DC/DC con tecnica unipolare.

Anche in questo caso, viene utilizzato un Timer per generare i comandi PWM in uscita, nello specifico il Timer 8, selezionando due canali in configurazione con output singolo. In questo modo, si hanno in uscita due comandi PWM, ognuno per gamba del convertitore che vengono successivamente negati per ottenere i comandi per gli switch bassi di gamba.

5.4 Risultati delle simulazioni real time

Per eseguire la simulazione si segue una routine di controllo in modo da ottenere un corretto funzionamento del sistema. Per prima cosa si carica la simulazione sul dispositivo RT Box 3, successivamente si carica il modello sulla scheda Nucleo G474RE e si fanno partire le simulazioni. In questo momento nell'impianto di rete simulato, circola la corrente a vuoto di rete visibile in Figura 5.20

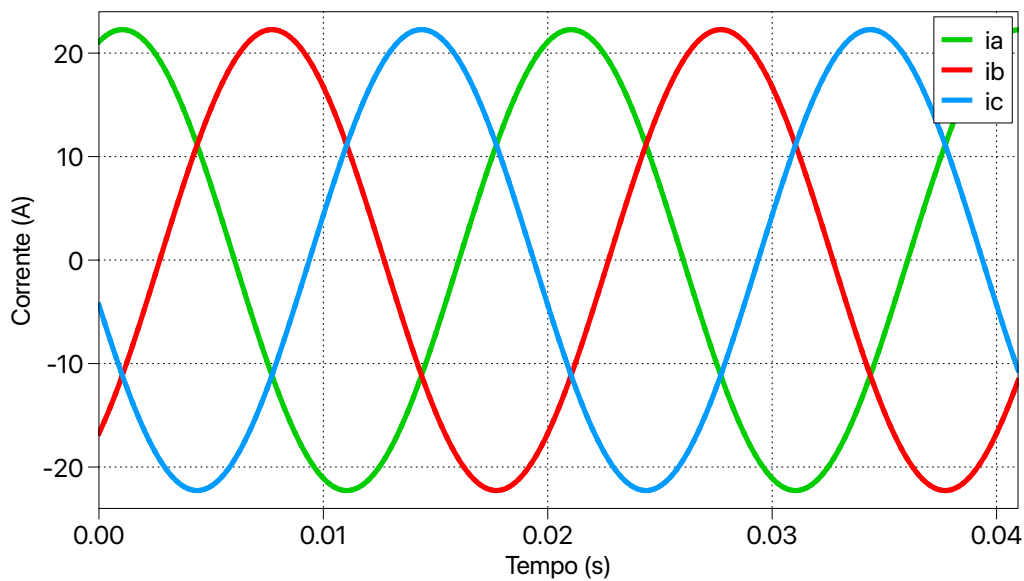


Figura 5.20: Corrente di rete a vuoto.

Successivamente, sulla scheda Nucleo si abilita il modello del generatore sincrono virtuale che si sincronizza alla pulsazione di rete a 50 Hz. Una volta che il VSG è a regime, si abilita il calcolo dei riferimenti di corrente, successivamente viene abilitato il controllo del DC/DC, e come ultimo passo si comincia a modulare il CSI. Di seguito vengono mostrate le acquisizioni delle forme d'onda di simulazione real time campionate con il relativo tempo di discretizzazione scelto. In Figura 5.21, è visibile l'andamento della corrente continua fornita dal convertitore DC/DC in ingresso.

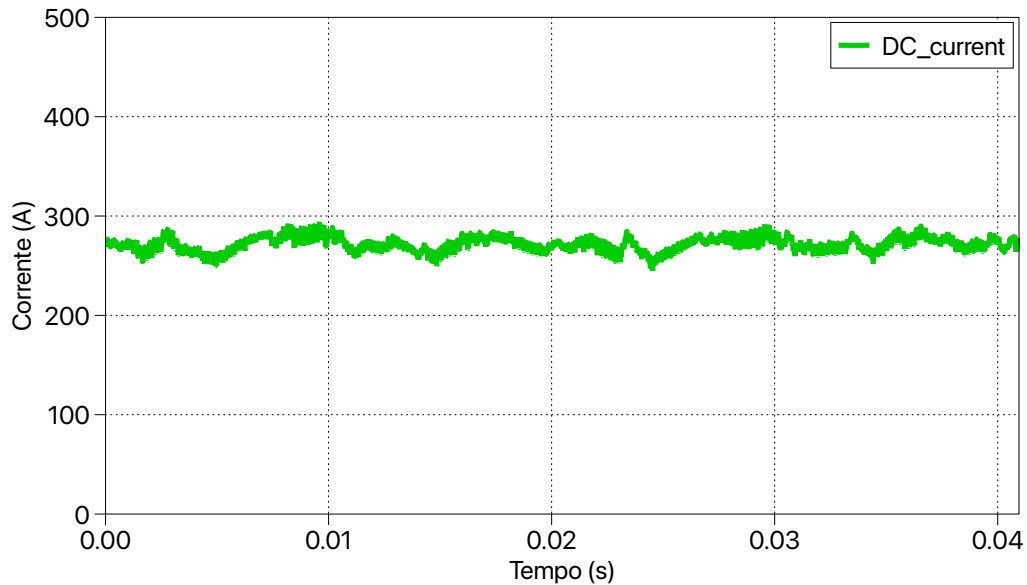


Figura 5.21: Corrente continua fornita dal DC/DC.

La corrente di rete in uscita dal convertitore CSI non filtrata è rappresentata in Figura 5.22. La corrente di rete filtrata è rappresentata in Figura 5.23 dove le forme d'onda sono molto distorte dovute al limite della strumentazione utilizzata che non permette di simulare un controllo alla frequenza voluta di 30 kHz ma ci limita a soli 5 kHz e inoltre al passo di discretizzazione di $5\ \mu s$ non sufficiente per ottenere delle forme d'onda pulite. Questi due valori sono stati scelti per fare sì che la simulazione funzionasse correttamente sui dispositivi usati.

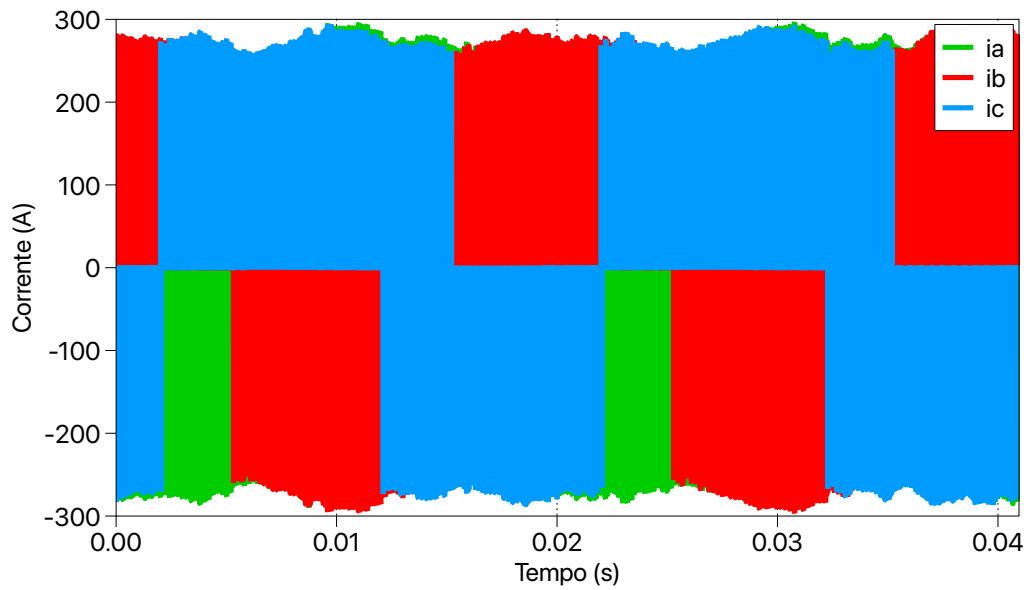


Figura 5.22: Corrente di rete lato CSI non filtrata.

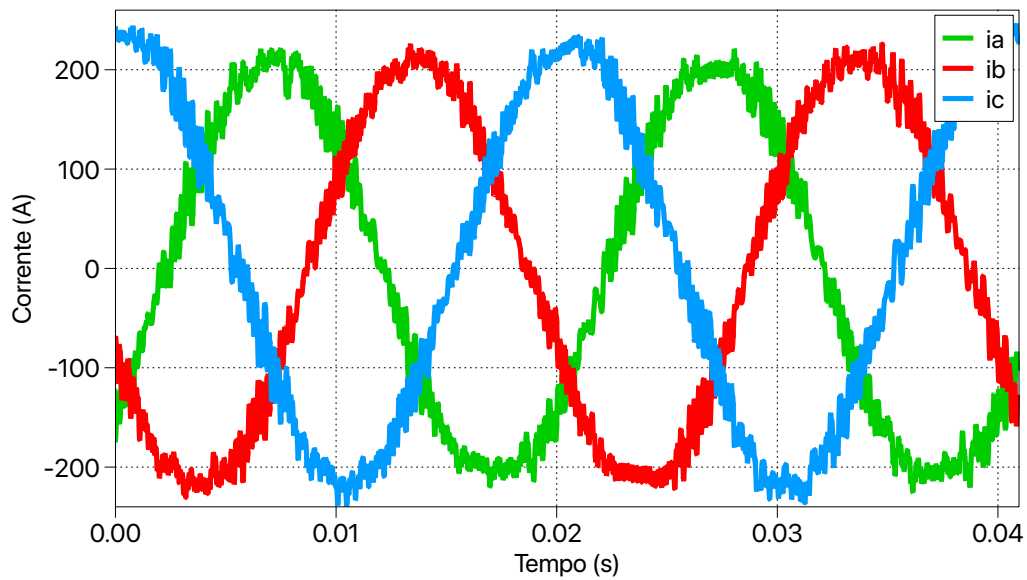


Figura 5.23: Corrente di rete a regime modulata dal CSI.

Inoltre, in Figura 5.24 viene rappresentato il comando S1 fornito allo switch alto della prima gamba dell'inverter di corrente.

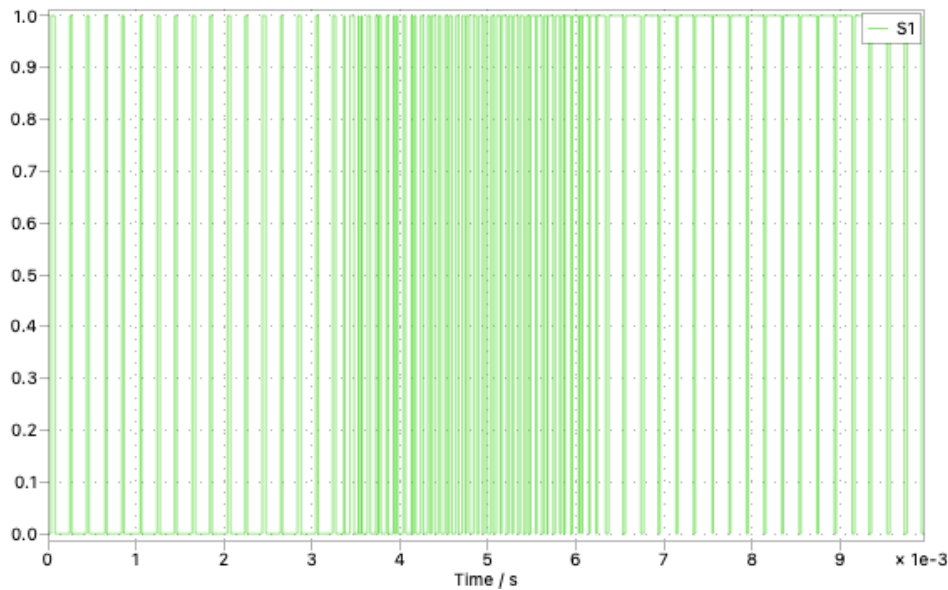


Figura 5.24: Comando dello switch S1 del CSI.

Durante la simulazione, l'impiego dei processori presenti all'interno della piattaforma RT Box 3 utilizzata, è stato di circa il 72% mentre, per quanto riguarda invece, la percentuale di utilizzazione del micro controllore della scheda Nucleo G474RE, è stato di circa il 23%. Nella simulazione effettuata in laboratorio non è stato possibile utilizzare un passo di discretizzazione inferiore a quello utilizzato pari a $5\mu s$ e inoltre la simulazione FPGA non supporta ancora il convertitore CSI. Infatti, i risultati ottenuti presentano molti disturbi dovuti proprio a questi fattori a cui si può aggiungere la non possibilità di scalare l'intero sistema simulato. Infatti, l'impianto teoricamente deve operare ad una frequenza di switching pari a $30kHz$ limitato a soli $5kHz$, con un controllo discretizzato a $200\mu s$ invece che $33\mu s$. Di regola quindi, oltre alla frequenza del filtro LCL, che viene scalata da $5kHz$ a $1kHz$ si dovrebbe scalare anche la frequenza di rete le capacità e le induttanze presenti. Si avrebbe però un sistema molto lontano dalla realtà e quindi si scala solo l'induttanza del filtro LCL mantenendo la capacità base al 5%.

In laboratorio sono state effettuate ulteriori prove dinamiche, dove viene cambiato il riferimento di potenza attiva dal 40% della potenza base al 90% della potenza base e in Figura 5.25 e 5.26 sono rappresentate le forme d'onda di corrente di rete e corrente continua ottenute.

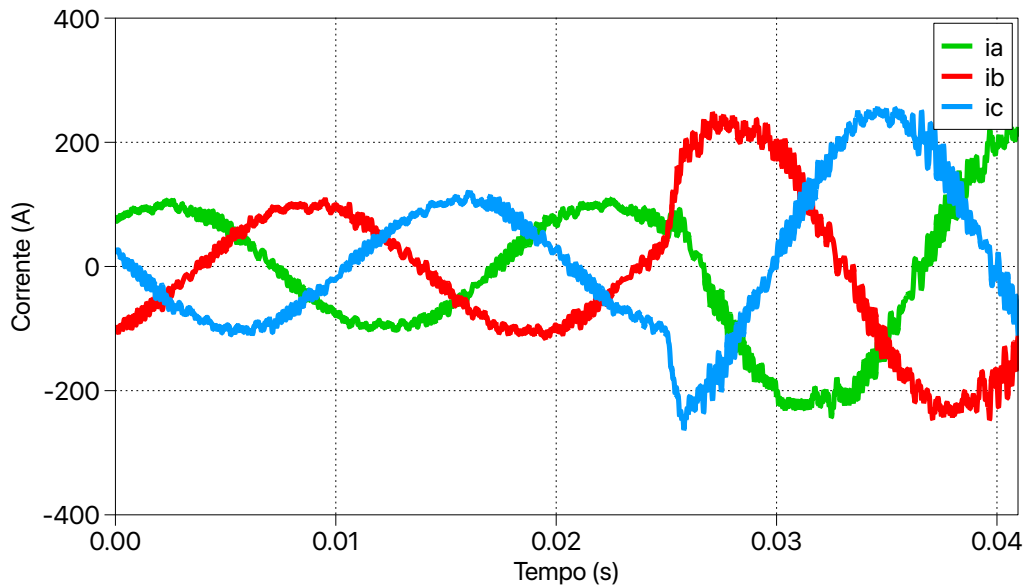


Figura 5.25: Corrente di rete dato il gradino di potenza attiva.

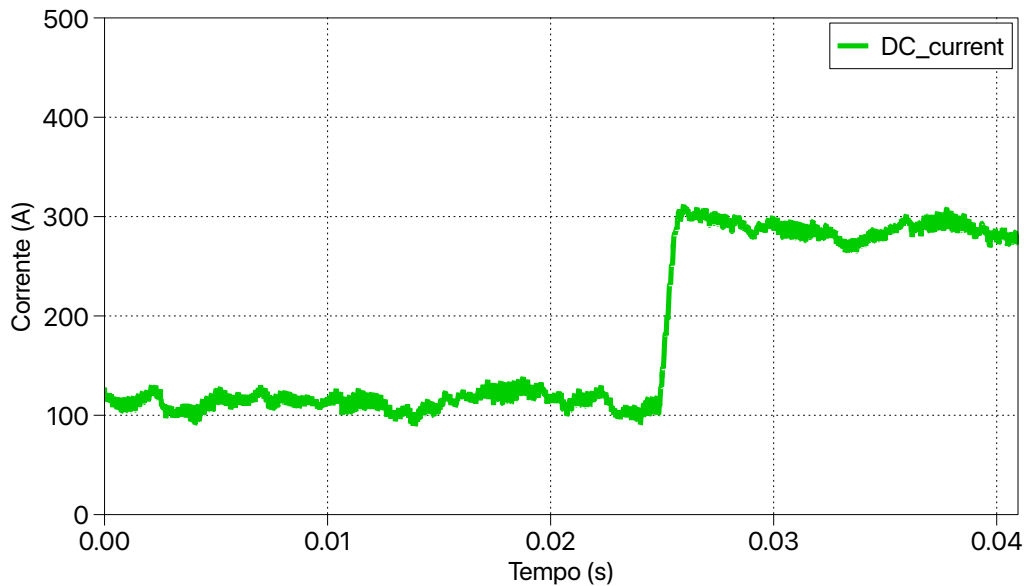


Figura 5.26: Corrente continua dato il gradino di potenza attiva.

5.4.1 Prove con rete variabile

In laboratorio, sono state effettuate alcune prove per simulare il funzionamento reale della rete elettrica che prevede: abbassamenti di frequenza e presenza di guasto tramite buco di tensione. Per eseguire queste prove, viene utilizzato un modello dedicato della rete elettrica che permette di variare la frequenza, inserire dei disturbi armonici e modificare l'ampiezza della tensione. Il blocco utilizzato è raffigurato in Figura 5.27.

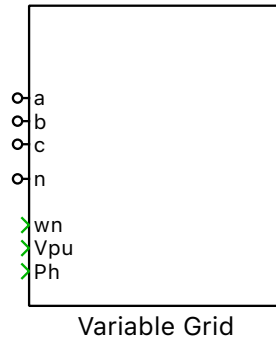


Figura 5.27: Modello della rete elettrica variabile.

Dopo avere effettuato la procedura di controllo dell'impianto, si varia l'ampiezza della tensione di rete per circa 400 ms portandola dal 100% al 90% dell'ampiezza nominale di rete. In questo modo, si simula un guasto con abbassamento della tensione. Le forme d'onda di tensione di rete e la corrente di picco fornita dal convertitore CSI, in seguito al guasto simulato, sono rappresentate in Figura 5.28.

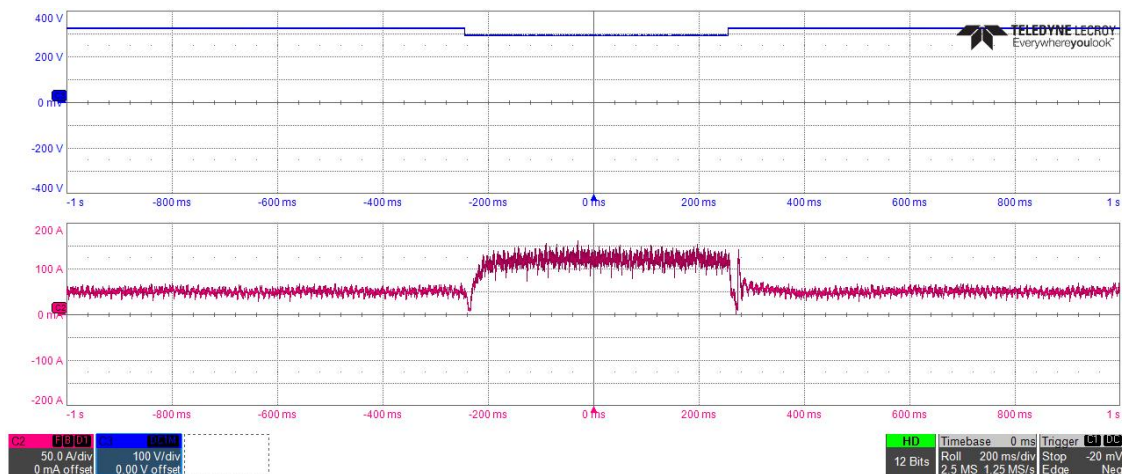


Figura 5.28: In alto: ampiezza della tensione di rete, In basso: corrente fornita dal CSI.

Inoltre, viene effettuata un'ulteriore prova per testare la risposta del controllo composta dal convertitore CSI con il sincrono virtuale in caso di variazione della frequenza

di rete. In Figura 5.30, è rappresentato, in alto, l'abbassamento della frequenza grazie al blocco descritto prima che implementa la rete variabile, e in basso, la risposta del controllo. Come si vede dato l'abbassamento della frequenza di rete, i riferimenti variano in modo da ristabilire l'equilibrio iniziale e riportare la frequenza al valore nominale di rete.

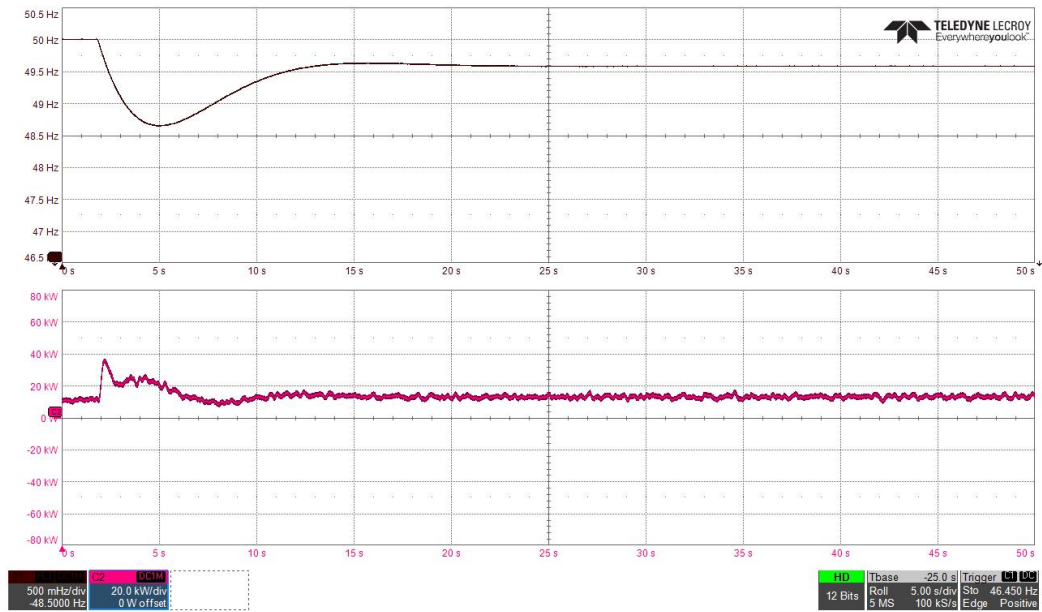


Figura 5.29: In alto: perturbazione della frequenza di rete, In basso: potenza attiva fornita.

Infine, in Figura 5.30, sono raffigurate le connessioni fatte in laboratorio utilizzando l'oscilloscopio digitale connesso ai canali analogici presenti sulla scheda di interfaccia LauchPad Nucleo Board.

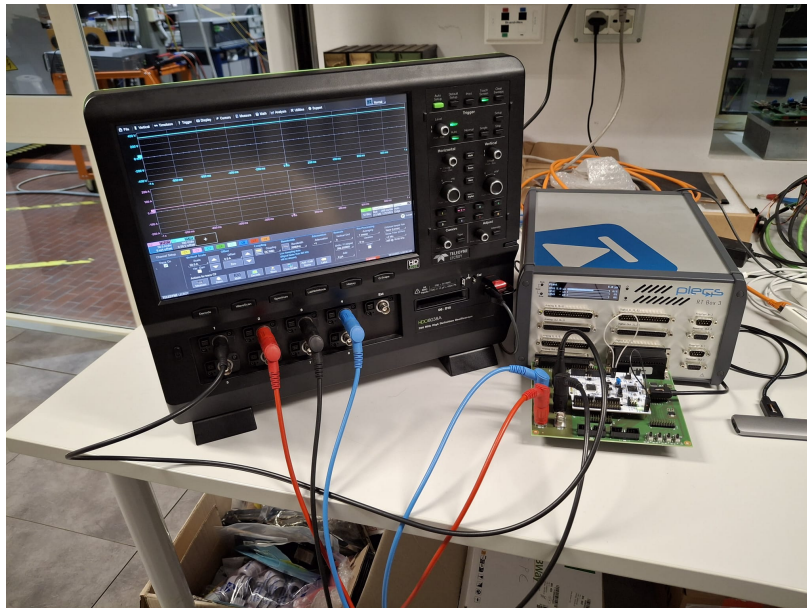


Figura 5.30: Postazione sperimentale per la cattura dei segnali analogici.

Capitolo 6

Conclusioni

L'elaborato è riuscito a raggiungere gli obiettivi fissati, riuscendo a validare il funzionamento del convertitore di corrente CSI controllato con il generatore sincrono virtuale VSG. Grazie alle numerose simulazioni effettuate sul software Plecs, è possibile avere un modello dettagliato che descrive il funzionamento del convertitore, ci da un'anteprima dei risultati che si possono ottenere, e inoltre, fornisce le basi per sviluppare modelli futuri. Inoltre, durante l'elaborato sono state testate varie tecniche di modulazione differenti, garantendo un più ampio spettro di tecniche utilizzabili per il controllo a seconda dell'applicazione in studio. Infine, le prove sperimentali effettuate hanno trovato riscontro nei risultati ottenuti nelle simulazioni software, e le prove dinamiche di disturbi di rete hanno confermato l'efficacia del controllo con sincrono virtuale. A seguito dell'hardware utilizzato però, non è stato possibile eseguire un confronto con gli stessi valori utilizzati nelle simulazioni Plecs. Questi, sono elencati nella Tabella 6.1 sotto.

Parametro	Simulazione	Sperimentale
Potenza base [kVA]	150	150
Passo di discretizzazione del controllo [μs]	33	200
Frequenza di switching [kHz]	30	5
Frequenza di rete [Hz]	50	50
Frequenza di risonanza del CLC [kHz]	5	1

Tabella 6.1: Confronto tra valori simulati e sperimentali.

In seguito all'utilizzo di valori differenti come frequenza di switching e passo di discretizzazione, si ottengono nelle prove sperimentali delle forme d'onda molto distorte ma, l'andamento è fedele a quello ottenuto in simulazione e inoltre il sistema fornisce i servizi ausiliari richiesti. Le prove sperimentali possono essere più accurate con l'utilizzo della simulazione su RT Box con tecnica FPGA, non utilizzata in questo progetto perchè non supporta ancora il convertitore CSI.

I miei contributi personali di tesi hanno riguardato:

- Ricerca bibliografica su inverter di corrente e generatore sincrono virtuale.
- Ricerca bibliografica sulle tecniche di modulazione per CSI.
- Studio e modellizzazione filtro lato rete per convertitore CSI.
- Implementazione di modelli Plecs in tempo continuo e discontinuo:
 - Modello inverter di corrente CSI.
 - Modello della rete elettrica.
 - Modello convertitore DC/DC.
 - Modello del sincrono virtuale VSG.
- Prove in simulazione Plecs dinamiche.
- Validazione dei modelli su dispositivi real-time.
- Prove real-time dinamiche.

Bibliografia

- [1] Olorunfemi Ojo e Sravan Vanaparthi. “Carrier-based discontinuous PWM modulation for current source converters”. In: *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting*. Vol. 4. IEEE. 2004, pp. 2224–2231.
- [2] Mattia Guacci et al. “Three-phase two-third-PWM buck-boost current source inverter system employing dual-gate monolithic bidirectional GaN e-FETs”. In: *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications* 4.4 (2019), pp. 339–354.
- [3] Gurhan Ertasgin e Erol Nikocecic. “Development and Application of Comprehensive Simulation Models for Current-Source Inverter Modulators”. In: *Applied Sciences* 15.11 (2025), p. 6148.
- [4] Fabio Mandrile, Enrico Carpaneto e Radu Bojoi. “Grid-feeding inverter with simplified virtual synchronous compensator providing grid services and grid support”. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 57.1 (2020), pp. 559–569.
- [5] Fabio Mandrile et al. “Lead-lag filter-based damping of virtual synchronous machines”. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 59.6 (2023), pp. 6900–6913.
- [6] PEIC. “Conventional control of grid power converters”. Materiale didattico, Politecnico di Torino, PEIC, non pubblicato. 2024.
- [7] Radu Iustin Bojoi et al. “Current control strategy for power conditioners using sinusoidal signal integrators in synchronous reference frame”. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 20.6 (2005), pp. 1402–1412.
- [8] Plexim GmbH. *PLECS User Manual*. Plexim GmbH. Zurigo, Svizzera, 2024. URL: <https://www.plexim.com/download/documentation>.
- [9] STMicroelectronics. *STM32G474xx Reference Manual: Advanced Arm[®]-based 32-bit MCUs*. STMicroelectronics. Geneva, Switzerland, 2023. URL: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0440-stm32g4-series-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf.