



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Elettronica

**DAL PANNELLO FOTOVOLTAICO ALLA TENSIONE ALTERNATA:**

**STUDIO E SIMULAZIONE DI UN SISTEMA FOTOVOLTAICO**

**CON UTILIZZO DI UN INVERTER MULTILIVELLO**

**FROM PHOTOVOLTAIC PANEL TO ALTERNATING VOLTAGE: STUDY**

**AND SIMULATION OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM**

**USING A MULTILEVEL INVERTER**

Relatore:

Prof. Simone Orcioni

Tesi di Laurea di:

Salvucci Riccardo

A.A. 2020/2021



# Sommario

Introduzione.....	4
1. Dalla cella solare al campo fotovoltaico .....	6
1.1 La cella solare: struttura e materiale.....	6
1.2 Conversione dell'energia solare in energia elettrica .....	6
1.3 Circuito equivalente di una cella solare.....	7
1.4 Il campo fotovoltaico.....	8
1.5 Condizione di parziale ombreggiamento della cella solare .....	11
2. Algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking) .....	12
2.1 Descrizione generale dell'algoritmo MPPT .....	12
2.2 Perturba & Osserva (P&O).....	12
2.3 Conduttanza incrementale.....	14
2.4 Tensione frazionaria a circuito aperto .....	16
3. Convertitore DC/DC .....	17
3.1 Convertitore DC/DC Boost.....	17
4 Inverter multilivello .....	19
5 Modello Simulink .....	21
5.1 Descrizione del sistema simulato .....	21
5.2 Simulazione del Convertitore DC-DC Boost.....	26
5.3 Simulazione dell'inverter multilivello.....	28
Conclusioni.....	31
Indice delle figure e delle tabelle.....	32
Bibliografia.....	33
Ringraziamenti.....	34

## Introduzione

Negli ultimi decenni il pianeta Terra è andato incontro al grande e preoccupante problema del riscaldamento globale e del cambiamento climatico. Ciò è stato causato dall'inquinamento e dall'utilizzo dei combustibili fossili che è aumentato a dismisura con lo sviluppo delle industrie e sta creando forti disagi e danni al nostro ambiente con conseguenze irreversibili.

È cresciuta, quindi, la volontà e il bisogno di trovare delle soluzioni energetiche alternative a quelle usate fino ad oggi come, ad esempio, il carbone o il petrolio. Pertanto, si è voluto investire nelle energie rinnovabili, ovvero in quelle fonti energetiche che non sono soggette ad esaurimento e non recano danni all'ambiente, quali la luce solare, il vento, il ciclo dell'acqua, le onde, il calore geotermico.

In particolare, negli ultimi anni c'è stato un grande aumento dell'impiego di energia solare, infatti l'utilizzo dei pannelli solari nel 2019 è aumentato all'incirca del 12% per raggiungere i 115 GW circa. Il decennio è finito con una forte domanda in Europa, Stati Uniti e nei mercati emergenti del mondo. Il mercato mondiale per il fotovoltaico è cresciuto circa del 44% nel 2019 e si è arrivati ad un totale globale di 627 GW rispetto ai 23 GW di dieci anni prima. Infatti, la domanda per i pannelli solari si sta sviluppando ed espandendo sempre più (come mostrato in Figura 1) in quanto è diventata l'opzione più competitiva per la generazione dell'energia elettrica in un numero sempre più grande di applicazioni, sia domestici che industriali. [1]

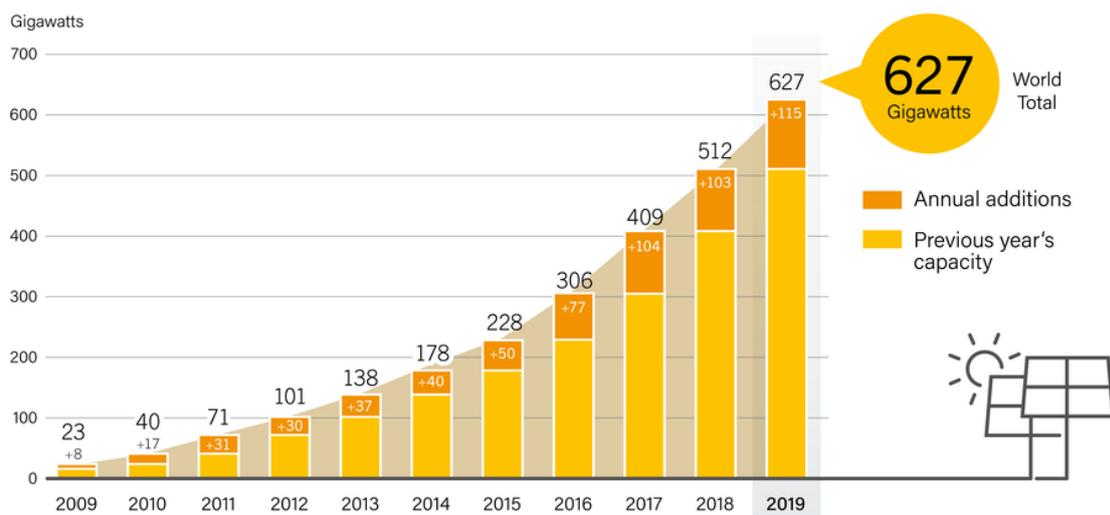


Figura 1: Capacità globale del fotovoltaico con aggiunte annuali, 2009-2019 [1]

Anche in Italia l'energia solare ha avuto un incremento significativo negli ultimi dieci anni. Si è passati infatti dai 483 impianti fotovoltaici nel 2008, ai 935838 nel 2020. In particolare, nel 2020 si è

registrata una potenza totale di 21,65 GW (+3,8% sul 2019) e una produzione vicina a 25 TWh (+5,3% sul 2019) nonostante l'emergenza Covid. [2]

Lo scopo di questo elaborato è quello di descrivere, in linea generale, quali sono le parti elettroniche che costituiscono un impianto fotovoltaico e quindi come avviene la trasformazione dell'energia solare in energia elettrica. In particolare, verranno commentate e analizzate delle simulazioni di un sistema fotovoltaico, realizzato in Simulink, nelle quali è stato usato un inverter multilivello.

# 1. Dalla cella solare al campo fotovoltaico

È importante capire come sono fatte le celle solari, quali sono i meccanismi di conversione dell'energia solare in energia elettrica e come si passa dalla cella solare al campo fotovoltaico.

## 1.1 La cella solare: struttura e materiale

Una cella solare è un dispositivo elettronico allo stato solido (semiconduttore) che converte l'energia della luce solare in energia elettrica. Il materiale di partenza utilizzato nella fabbricazione delle celle solari è il silicio, un elemento abbondante in natura, in quanto è il componente principale (25%) della crosta terrestre. Normalmente però, lo si trova sotto forma di composti non utilizzabili per la realizzazione di dispositivi elettronici, per questo motivo, a partire dalla materia prima (che in genere è sabbia) è necessario un processo di raffinazione. Una volta che si è ottenuto il silicio policristallino, tramite una tecnica specifica si ricavano dei cilindri di silicio cristallino (o monocristallino) uniformemente drogato, da cui vengono derivate delle fette ("wafers"). Tali fette vengono drogate in superficie (in modo da formare la giunzione p-n) e contattate metallicamente sui due lati per dare luogo a celle solari.

Tuttavia, l'esigenza di ridurre i costi di fabbricazione di tali celle ha spinto a ricercare tecniche di raffinazione più economiche in cambio di proprietà elettriche leggermente inferiori. Pertanto, il processo di raffinazione viene arrestato quando il silicio è allo stadio policristallino. Negli ultimi anni la maggioranza degli impianti fotovoltaici installati si basa su celle solari in silicio policristallino. [3]

Dal punto di vista elettrico una cella solare è una giunzione p-n che viene realizzata a partire da una fetta di silicio di tipo p la cui superficie (la faccia esposta alla luce) viene resa di tipo n mediante drogaggio con fosforo. Il fondo di una cella solare è interamente ricoperto da uno strato metallico mentre sulla superficie il contatto è ottenuto mediante una griglia in quanto, ovviamente, è necessario consentire alla luce di penetrare nel pannello. In un dispositivo reale la regione di tipo p presenta uno spessore nell'ordine delle centinaia di micron, mentre la profondità della regione superficiale di tipo n non supera il micron. Si vedrà nel seguito che le singole celle solari sono organizzate in moduli fotovoltaici che contengono alcune decine di celle affiancate tra loro ed elettricamente connesse in serie. [3]

## 1.2 Conversione dell'energia solare in energia elettrica

I semiconduttori, come il silicio che compone le celle solari, sono caratterizzati da una conducibilità che dipende dalle concentrazioni di portatori liberi (elettroni e lacune) ad una determinata temperatura. Affinché si rompa un legame covalente e si formi una coppia elettrone-lacuna, è

necessario fornire al materiale un'energia minima pari all'ampiezza della banda proibita che, nel caso del silicio, equivale a circa 1.1eV, in modo tale che gli elettroni riescano a passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Per comprendere meglio come sono disposte tali bande si consulti la Figura 2 che mostra una giunzione p-n all'equilibrio termodinamico. La gran parte dei fotoni che compongono la radiazione solare possiede energia superiore ad alcuni eV, quindi, l'esposizione di un semiconduttore alla luce comporta la rottura dei legami covalenti e la creazione di coppie elettrone-lacuna con il conseguente aumento della conducibilità del materiale. [3]

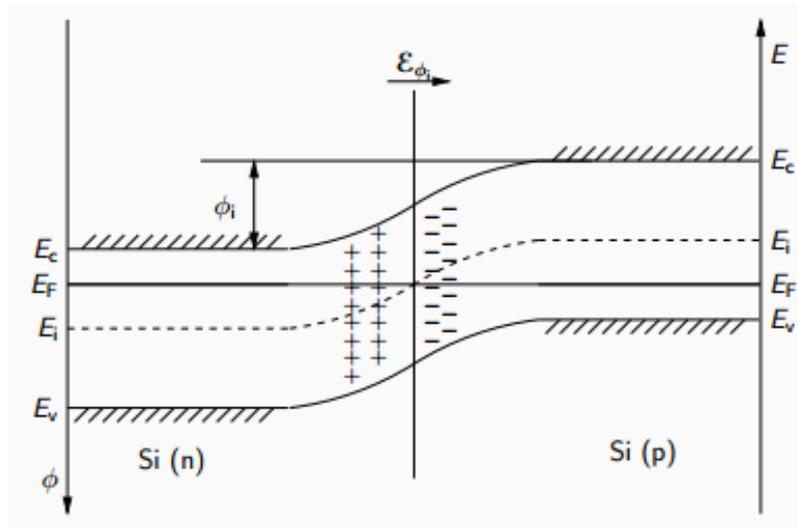


Figura 2: Giunzione p-n all'equilibrio termodinamico [4]

Il passaggio degli elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione, con conseguente aumento della conducibilità del materiale, non permette ancora la conversione dell'energia solare in energia elettrica. Nel materiale, infatti, non si crea alcuna differenza di potenziale perché la generazione di coppie elettrone-lacuna avviene in maniera uniforme nel semiconduttore. Non è dunque possibile la circolazione di corrente in un eventuale carico esterno e c'è bisogno che le coppie elettrone-lacuna, generate grazie alla luce solare, si separino e si addensino sui lati opposti del materiale, creando in tal modo una differenza di potenziale. Questo avviene grazie al campo elettrico (indicato da  $\epsilon$  nella Figura 2) che si genera in una giunzione p-n che fa in modo che avvenga la separazione elettrone-lacuna e la creazione di una differenza di potenziale. [3]

### 1.3 Circuito equivalente di una cella solare

Nella Figura 3 è mostrato il circuito equivalente di una cella solare. In esso si trova un diodo, che descrive il normale funzionamento della giunzione p-n, e un generatore di corrente, il quale rappresenta la corrente fotogenerata (cioè quella che realizza la conversione fotovoltaica e quindi il

passaggio da energia luminosa a cariche elettriche). A questi due componenti si aggiungono due parametri parassiti: la resistenza serie  $R_s$  e la resistenza shunt  $R_{sh}$ .

La prima rappresenta tutti quei fattori di perdita che la corrente incontra nel suo passaggio in quanto la tensione ai capi della cella solare viene misurata sui terminali esterni i quali sono fisicamente lontani dalla giunzione. Quindi la resistenza  $R_s$  tiene conto della resistenza dei contatti superiori e inferiori della cella, della resistenza di contatto tra il silicio e il conduttore e di tutti gli altri effetti resistivi che la corrente incontra lungo il suo percorso.

La resistenza shunt, invece, modella tutte le perdite interne della cella fotovoltaica dovute a difetti di fabbricazione, errori di progettazione, non purezza dei materiali utilizzati e imperfezioni della struttura cristallina. [3]

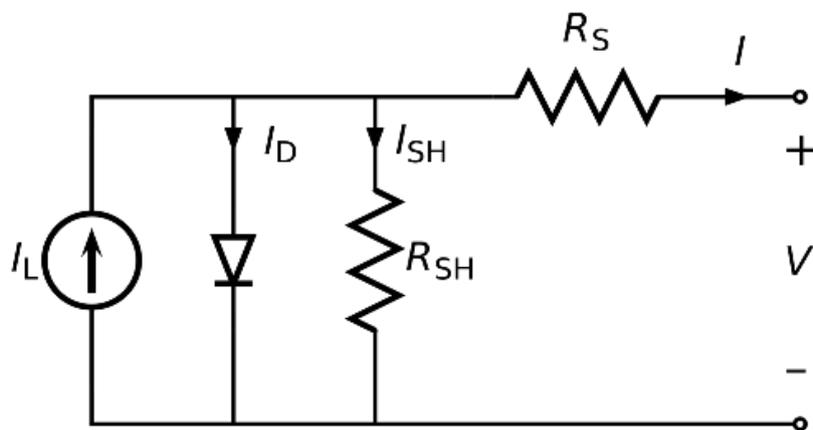


Figura 3: Circuito equivalente a singolo diodo di una cella solare [5]

## 1.4 Il campo fotovoltaico

La cella solare rappresenta l'elemento elementare di qualsiasi sistema fotovoltaico quale che sia la sua complessità. Uno dei punti di forza della tecnologia fotovoltaica è costituito dalla estrema modularità che consente, aggiungendo più celle solari insieme, di realizzare sistemi in grado di erogare da pochi watt fino a centinaia di megawatt. Per poter ottenere sistemi di potenza maggiore è necessario collegare tra di loro più celle fotovoltaiche e, per fare ciò, le scelte possibili sono due: il collegamento in serie o in parallelo.

Nel collegamento in serie, nell'ipotesi che tutte le celle solari siano identiche e soggette alla stessa illuminazione, la corrente fotogenerata associata ad esse è unica ed è la stessa (questa ipotesi non è sempre verificata in quanto, a causa di eventi esterni come ombre di un edificio o di nuvole, può capitare di avere alcune celle illuminate e altre no). La tensione ai capi della serie invece si ottiene semplicemente sommando le tensioni presenti ai capi delle singole celle.

Le proprietà di un sistema di celle collegate in parallelo invece, sono complementari rispetto a quelle della serie. La tensione ai capi del parallelo delle celle coincide infatti con quella ai capi della singola cella, mentre la corrente erogata è pari a  $N$  volte (dove  $N$  è il numero di celle in parallelo) quella della singola cella.

All'interno di un pannello fotovoltaico, però, non si trovano mai celle collegate in parallelo. Si preferisce evitare tale collegamento per un duplice motivo: non è conveniente elevare la corrente per evitare una eccessiva dissipazione di potenza; in più si preferisce evitare il collegamento in parallelo di dispositivi bipolari (diodi) nei quali la preferenza della corrente a focalizzarsi in uno solo di essi ne provocherebbe la rottura.

Le singole celle fotovoltaiche vengono organizzate in pannelli fotovoltaici (come quello mostrato in Figura 4) costituiti da un certo numero di celle in base alla potenza desiderata. Il pannello fotovoltaico, a sua volta, rappresenta il componente elementare di sistemi più complessi che possono ottenersi dal collegamento serie e/o parallelo di più pannelli fotovoltaici.



Figura 4: Pannello fotovoltaico [6]

Infatti, collegando in serie più moduli fotovoltaici, si ottiene una stringa di moduli come quella mostrata in Figura 5.



Figura 5: Stringa di pannelli fotovoltaici [7]

Assegnata una certa stringa, non potendo aumentare il numero di moduli connessi in serie, la realizzazione di un sistema fotovoltaico di potenza maggiore di quella di una singola stringa deve prevedere il loro collegamento in parallelo. Si considerino, ad esempio, due stringhe di uguale lunghezza (costituite dallo stesso numero di moduli) e di uguali caratteristiche elettriche (i pannelli che le compongono presentano le stesse proprietà). Procedendo a valutare la caratteristica corrente-tensione del sistema complessivo, è evidente che le correnti erogate dalle due stringhe si sommano e che la tensione ai capi del parallelo coincide con quella ai capi di ciascuna stringa. Ne consegue che si può ottenere un sistema fotovoltaico di potenza arbitrariamente grande semplicemente collegando tra loro un numero opportuno di stringhe elementari. In generale, un insieme di stringhe in parallelo viene definito sottocampo e più sottocampi, a loro volta collegati in parallelo, costituiscono un campo fotovoltaico come quello mostrato in Figura 6. [3]



Figura 6: Esempio di campo fotovoltaico [8]

## 1.5 Condizione di parziale ombreggiamento della cella solare

Fin ad ora si è considerato il caso in cui le celle solari sono irradiate allo stesso modo, ma nella realtà questo non è sempre vero. Infatti, sul pannello fotovoltaico si possono presentare delle ombre dovute alle nuvole o a edifici collocati nelle vicinanze. In tal caso viene meno il fatto di avere la stessa corrente fotogenerata su tutte le celle solari e si possono verificare fenomeni che potrebbero portare alla distruzione del pannello. Qualora si abbia una cella buia, la giunzione p-n di quest'ultima può andare in breakdown e rompersi. Per tale motivo la condizione di parziale ombreggiamento di un modulo fotovoltaico è potenzialmente distruttiva ed è necessario proteggere le celle solari da questa evenienza poiché momenti di ombreggiamento sono inevitabili.

A tale scopo si inserisce un diodo in antiparallelo alla cella ombreggiata, chiamato diodo di bypass, che consente alla corrente erogata dalle celle completamente illuminate di circolare liberamente come mostrato in Figura 7.



Figura 7: Percorso della corrente in caso di cella solare parzialmente ombreggiata [9]

## 2. Algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking)

La parte dei convertitori DC-DC e DC-AC, che consentono di convertire la tensione da continua (DC) ad alternata (AC), è preceduta dall'algoritmo MPPT che fa in modo che dal campo fotovoltaico venga estratta la massima potenza disponibile in condizioni variabili.

### 2.1 Descrizione generale dell'algoritmo MPPT

L'MPPT (Maximum Power Point Tracking) è un algoritmo implementato negli inverter fotovoltaici che serve a regolare continuamente l'impedenza vista dall'array solare in modo che il sistema PV operi alla potenza di picco del pannello in condizioni variabili come in caso di valori di irraggiamento e temperatura diversi e con ombreggiamenti parziali o totali. In fase di sviluppo degli inverter solari, l'MPPT deve essere implementato per massimizzare la potenza generata dai sistemi PV. Questi algoritmi controllano la tensione per garantire che il sistema funzioni al punto di massima potenza sulla curva della tensione di alimentazione come mostrato di seguito nella Figura 8. Si analizzeranno nel dettaglio le seguenti tre tecniche di inseguimento del punto di massima potenza: "Perturba e Osserva", "Conduttanza Incrementale" e "Tensione frazionaria a circuito aperto". [10]

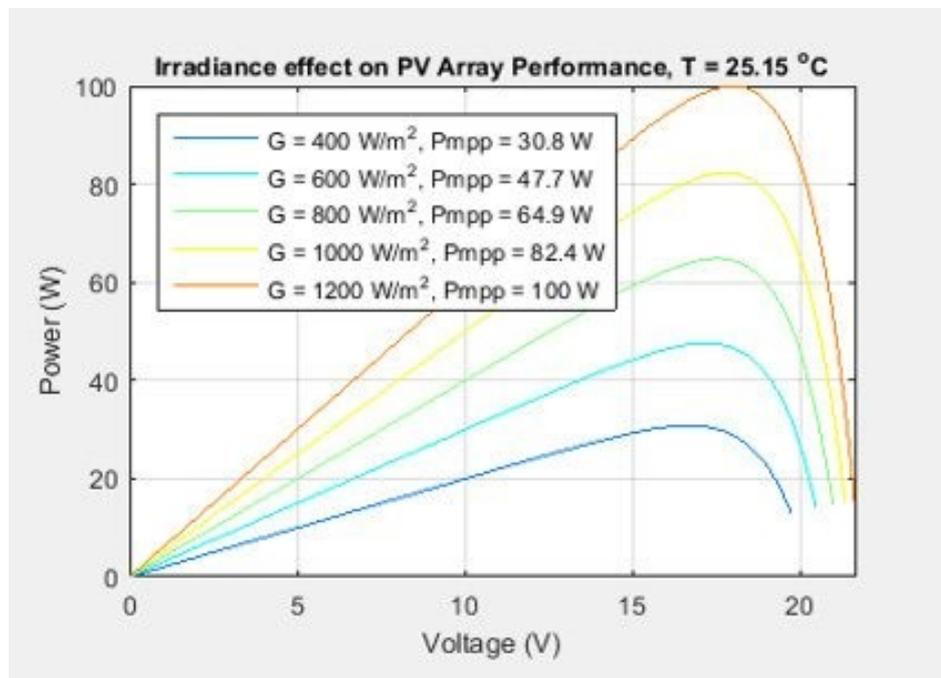


Figura 8: Curve delle tensioni di alimentazione con la caratteristica P-V di un sistema fotovoltaico in condizioni di irraggiamento solare variabili [10]

### 2.2 Perturba & Osserva (P&O)

L'algoritmo "Perturba & Osserva" ricerca il punto di massima potenza eseguendo continue variazioni del valore di tensione di uscita del pannello fotovoltaico. Osservando la caratteristica P-V (in blu) di

un generico pannello fotovoltaico come mostrato in Figura 9, si nota che aumentando (o diminuendo) la tensione, la potenza cresce (o diminuisce) quando si opera a sinistra dell'MPP (Maximum Power Point) mentre diminuisce (o aumenta) quando si opera alla destra dell'MPP.

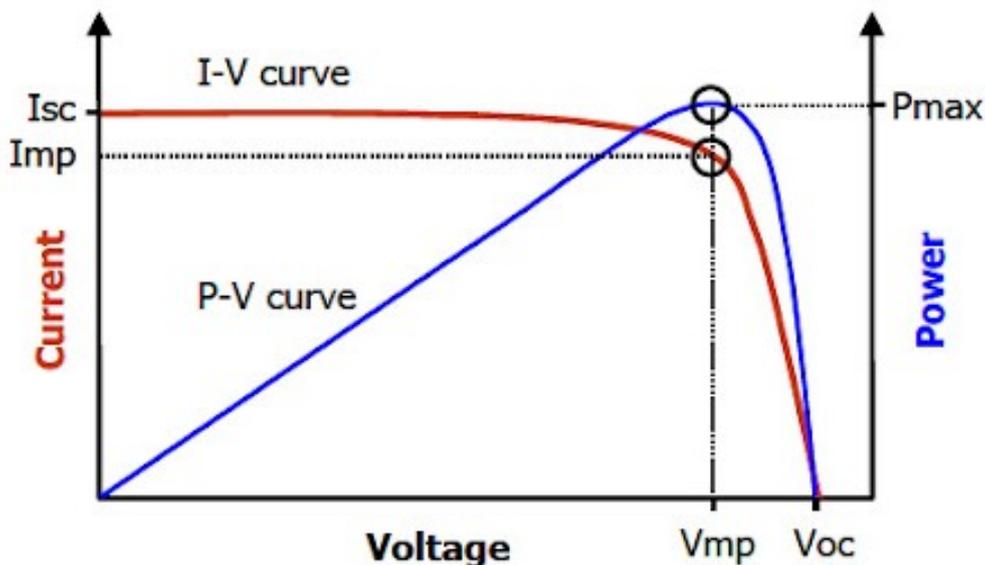


Figura 9: Caratteristica I-V e P-V di un pannello fotovoltaico [11]

Pertanto, se c'è un aumento di potenza la perturbazione successiva deve rimanere come la precedente in modo da raggiungere l'MPP. Invece, se si nota un decremento della potenza, la perturbazione successiva deve essere in direzione opposta rispetto alla precedente. In questo modo si raggiunge il punto di massima potenza attorno al quale il sistema continua ad oscillare. L'algoritmo è riassunto nella Tabella 1 mentre il flow chart è mostrato nella Figura 10. [3]

Perturbazione	Variazione della potenza	Prossima perturbazione
Positiva	Positiva	Positiva
Positiva	Negativa	Negativa
Negativa	Positiva	Negativa
Negativa	Negativa	Positiva

Tabella 1: Algoritmo "Perturba & Osserva"

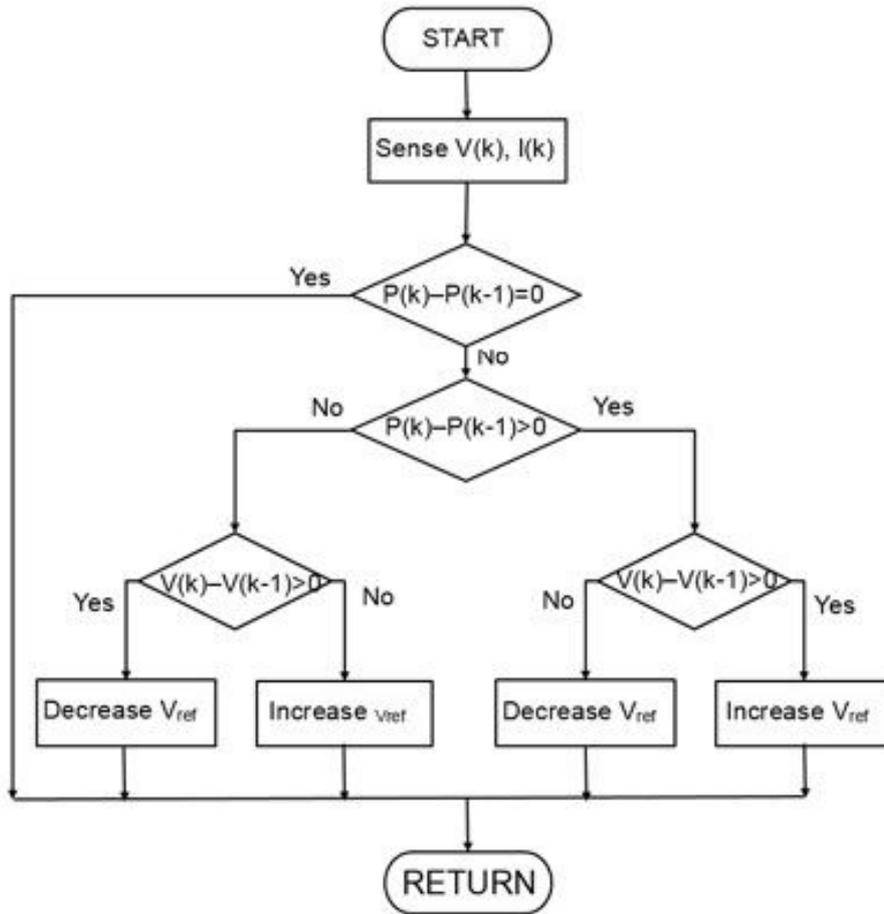


Figura 10: Flow chart dell'algoritmo "Perturba & Osserva" [10]

### 2.3 Conduttanza incrementale

Si analizza ora la tecnica che viene usata nel modello simulato. Il metodo della conduttanza incrementale insegue l'MPP (Maximum Power Point) basandosi sul fatto che la derivata prima della potenza rispetto alla tensione è nulla nel punto di massimo. Questo si può notare nella Figura 9 dove, in corrispondenza del punto di massimo, la pendenza di tale curva è nulla. Espressa la potenza istantanea  $P$  generata dal pannello fotovoltaico in funzione della corrente e della tensione  $e$ , derivandola rispetto alla tensione, si ottiene:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (1)$$

da cui, dato che la derivata nel punto di massima potenza è nulla,

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ per } V = V_{MPP} \quad (2)$$

si può stabilire dove si trova la tensione misurata rispetto a  $V_{MPP}$  semplicemente valutando la derivata della potenza rispetto alla tensione in tale punto:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ per } V < V_{MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ per } V > V_{MPP}$$

In particolare, combinando le equazioni (1) e (2) si ottiene la condizione:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} = -g$$

e di conseguenza le condizioni scritte sopra diventano:

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ per } V < V_{MPP}$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ per } V > V_{MPP}$$

A partire da questi vincoli si decide in che direzione deve essere variata la tensione misurata. Se invece, per un dato valore di tensione, la derivata è nulla ciò significa che si è già nel punto di massima potenza e non è necessaria nessuna operazione.

Questo algoritmo pertanto, ad ogni iterazione, inizia con la misura della tensione e della corrente del generatore fotovoltaico e calcola le rispettive variazioni  $\Delta V$  e  $\Delta I$  rispetto ai valori assunti nel ciclo precedente. Se non ci sono stati cambiamenti, l'algoritmo non effettua nessuna operazione, se invece a causa di eventi esterni (come, ad esempio, la variazione della luminosità del sole) si verificano delle variazioni, il sistema opera sulla tensione con lo scopo di raggiungere l'MPP.

Rispetto all'algoritmo "Perturba & Osserva", il metodo della "Conduttanza Incrementale" è molto vantaggioso in quanto, una volta raggiunto il punto di massima potenza, non continua ad oscillare e rimane in tale punto fino a quando non si verificano delle variazioni dovute ad eventi esterni. Il flow chart di questo algoritmo è mostrato in Figura 11. [3]

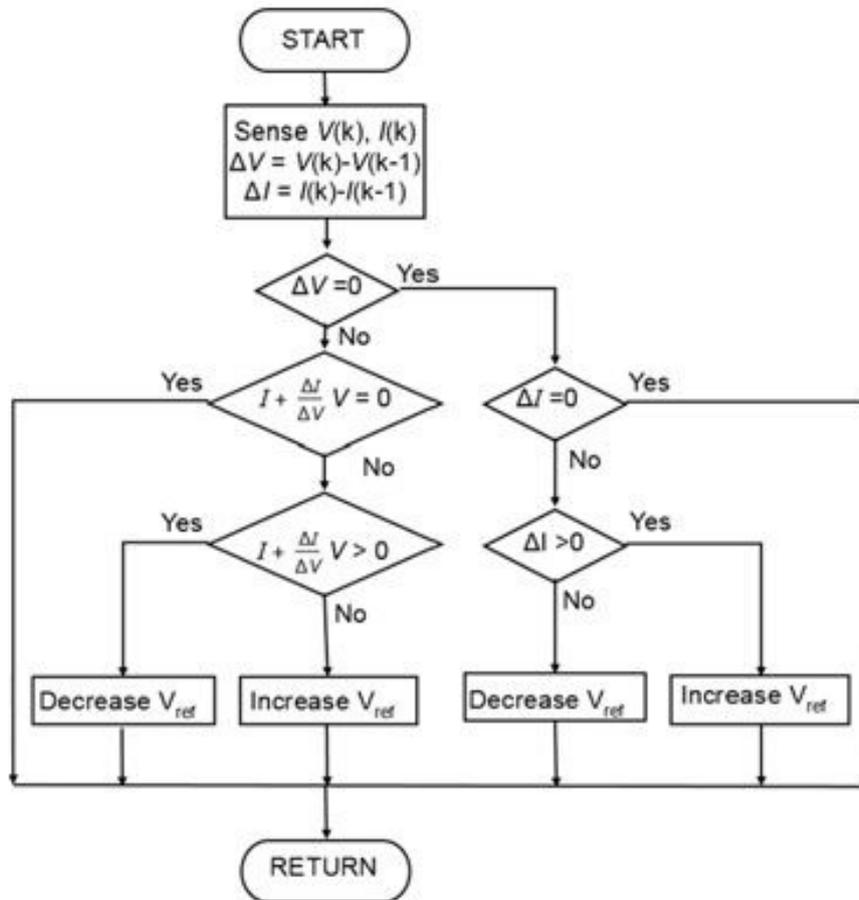


Figura 11: Flow chart dell’algoritmo “Conduttanza Incrementale” [10]

## 2.4 Tensione frazionaria a circuito aperto

Questo algoritmo raggiunge il punto di massima potenza a partire dalla misura della tensione di circuito aperto del generatore fotovoltaico. Dopo averla misurata, si ricava la tensione  $V_{MPP}$ :

$$V_{MPP} = k_V V_{OC}$$

dove  $k_V$  è un opportuno fattore di proporzionalità che si ricava dal datasheet del pannello fotovoltaico considerato. Dopodiché si confronta  $V_{MPP}$  con il valore della tensione di lavoro del generatore  $V_{PV}$ . Se  $V_{PV} > V_{MPP}$ , il duty cycle viene incrementato di un valore fisso o diminuito di tale valore se  $V_{PV} < V_{MPP}$ . Nel caso in cui le due tensioni siano uguali, il valore del duty cycle non subisce variazioni. [3]

### 3. Convertitore DC/DC

Si è descritto nel primo capitolo come è fatto un pannello fotovoltaico e quindi qual è il meccanismo che porta alla generazione dell'energia elettrica. I pannelli fotovoltaici, prima del convertitore AC (che fornisce la tensione alternata che poi arriva nelle case), sono connessi a dei convertitori DC-DC che adattano la tensione del singolo pannello alla tensione necessaria all'inverter per fornire la potenza in rete.

#### 3.1 Convertitore DC/DC Boost

Nel modello simulato, è stato usato un convertitore DC-DC boost (anche chiamato step-up) il cui scopo è quello di innalzare la tensione e fare in modo che la tensione di uscita sia maggiore della tensione di ingresso.

La Figura 12 mostra lo schema circuitale del convertitore. Il funzionamento del circuito si basa sulla capacità dell'induttore di immagazzinare energia sotto forma di corrente in quanto, quando si applica una tensione continua ad un induttore, la corrente sale indefinitamente fino ad un livello che dipende solo dal tempo di applicazione della tensione.

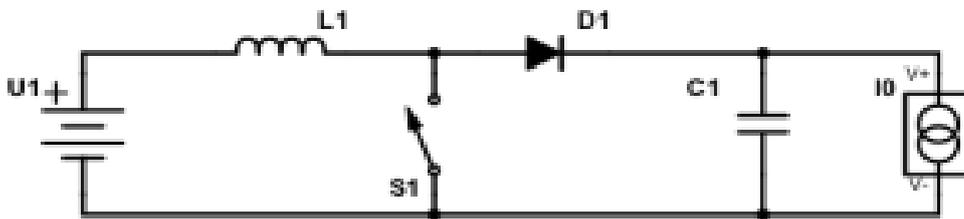


Figura 12: Schema circuitale convertitore DC-DC Boost

Quando l'interruttore è chiuso (durante il  $T_{on}$ ) il circuito precedente diventa quello di Figura 13 dove il diodo è interdetto e viene sostituito da un circuito aperto. All'induttore risulta applicata la tensione costante  $V_{in}$  e la corrente su di esso cresce linearmente. Durante questa fase quindi l'energia viene trasferita dall'alimentazione all'induttanza.

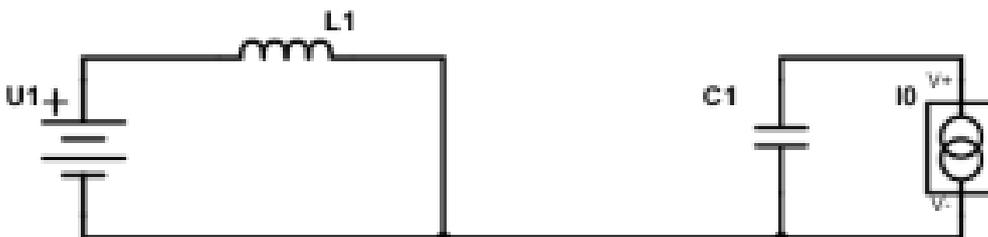


Figura 13: Convertitore DC-DC Boost durante il  $T_{on}$  dell'interruttore

Nel  $T_{off}$  invece l'interruttore si apre, il diodo conduce (lo si sostituisce con un corto circuito) e la corrente immagazzinata nell'induttore durante il  $T_{on}$  fluisce verso il carico esterno la cui tensione aumenterà fino al valore imposto dalla corrente. Quindi il generatore di tensione e l'induttanza trasferiscono energia allo stadio di uscita.

Per ricavare la relazione analitica che lega la tensione di ingresso  $V_{in}$  con la tensione di uscita  $V_{out}$ , si analizza il circuito durante il  $T_{on}$  e durante il  $T_{off}$  e si sfrutta la proprietà dell'induttore in regime stazionario, grazie al quale l'energia accumulata nel periodo di  $T_{on}$  viene restituita nel  $T_{off}$  e quindi l'escursione della corrente nei due intervalli di tempo è uguale, per cui  $i_L(T_{on}) = i_L(T_{off})$  da cui:

$$\frac{V_{in}}{L} T_{on} \equiv -\frac{(V_{in} - V_{out})}{L} T_{off}$$

Semplificando l'induttanza al denominatore e separando i termini con  $V_{in}$  e  $V_{out}$  si ottiene:

$$V_{in} T_{on} + V_{in} T_{off} = V_{out} T_{off}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{T_s}{T_{off}} = \frac{1}{1 - D}$$

dove  $T_s = T_{on} + T_{off}$  è il periodo totale e  $D = \frac{T_{on}}{T_s}$  è il duty cycle che serve ad esprimere per quanta porzione di periodo  $T_s$  il segnale è a livello alto (ovvero livello attivo).

L'azione di amplificazione svolta dal DC-DC Boost Converter permette di poter lavorare anche in punti con tensione bassa e questo ci permette di avere un intervallo di tensioni operative più ampie. Da ciò deriva una maggiore flessibilità nella struttura del generatore fotovoltaico e nella possibilità di inseguire l'MPPT anche dove esso si sposti a tensioni più basse di quella nominale a causa della temperatura o dell'irraggiamento o di eventi di ombreggiamento parziale.

## 4 Inverter multilivello

Gli inverter sono dispositivi elettronici di potenza che convertono l'alimentazione continua in alimentazione alternata. L'uscita AC generata da un inverter dovrebbe avere bassa distorsione con lo scopo di ottenere una buona qualità della potenza. Quindi per ottenere bassa distorsione sulla forma d'onda della tensione di uscita, gli inverter convenzionali vengono commutati in un range di frequenza molto alto che va da pochi kHz fino a 100 kHz. Tuttavia, alte frequenze di commutazione causano un valore alto della derivata  $\frac{dV}{dt}$  della tensione di uscita, alte perdite di commutazione e interferenze elettromagnetiche. Pertanto, negli ultimi anni si è trovata un'alternativa a questi problemi sviluppando gli inverter multilivello.

Gli inverter multilivello generano una tensione alternata usando piccoli gradini di tensione ottenuti con l'aiuto di alimentazioni DC o banchi di condensatori. Le tensioni di uscita degli inverter multilivello sono superiori in termini di qualità e necessitano di un numero minore di filtri riducendo in tal modo la dimensione complessiva del sistema.

Quindi l'uso di un inverter multilivello rappresenta un modo di migliorare l'efficienza e la qualità di conversione dell'energia. Il convertitore multilivello, infatti, produce in uscita tensioni molto più simili alla forma d'onda sinusoidale con livelli di distorsione armonica estremamente bassi. Questo offre il vantaggio di poter lavorare con frequenze di commutazione inferiori a quelle dell'inverter a due livelli e riduce i filtri di uscita diminuendo i costi e le dimensioni del sistema. [12]

Le tre topologie più comuni sono il "Neutral Clamped Inverter", il "Flying Capacitor Inverter" e il "Cascaded H-Bridge Inverter". Nel modello implementato si è utilizzato il "Cascaded H-Bridge" che ha una struttura modulare ed è più affidabile rispetto alle altre due topologie.

Il "Cascaded H-Bridge", per un dato numero di livelli, richiede un numero minore di componenti e contiene un circuito di potenza semplice: esso consiste in ponti ad H connessi in serie ognuno dei quali è alimentato da sorgenti di tensione DC separate come si vede nella Figura 14. Questa caratteristica rende possibile connettere i pannelli fotovoltaici in ogni ponte ad H ed è quello che verrà fatto nel modello simulato. La strategia di modulazione di larghezza di impulso PWM (Pulse Width Modulation) comunemente usata è la PS-PWM, ovvero la modulazione di larghezza di impulso con fase shiftata (Phase Shift). Questa tecnica è realizzata con una PWM unipolare dove le portanti designate per ogni ponte ad H sono shiftate tra loro di un valore pari a  $\frac{T_s}{n}$ :  $T_s$  rappresenta il periodo della portante mentre  $n$  è il numero di ponti ad H presenti nel circuito. [13]

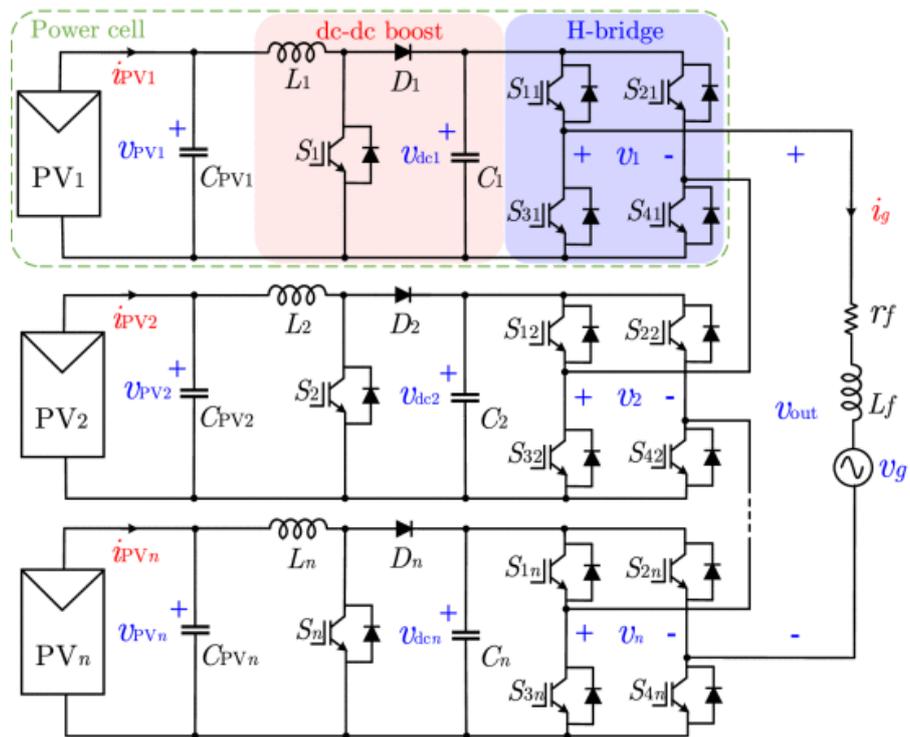


Figura 14: Schema generale di un sistema fotovoltaico con il “Cascaded H-Bridge” [13]

## 5 Modello Simulink

### 5.1 Descrizione del sistema simulato

Il sistema fotovoltaico simulato è stato realizzato in Simulink, un software per la modellazione, simulazione e analisi di sistemi dinamici, sviluppato dalla compagnia statunitense MathWorks.

È stato preso un modello di un impianto fotovoltaico già esistente nella MathWorks ed è stato opportunamente modificato per implementare un inverter multilivello, in particolare il “Cascaded H-Bridge”.

L'ingresso del sistema è un blocco chiamato “Irradiance and Temperature” ovvero un generatore arbitrario di irradiazione solare e temperatura che simula le condizioni atmosferiche che si trovano generalmente su un pannello. Nel caso preso in esame, si ha un valore di irradiazione solare e di temperatura costante pari rispettivamente a  $1000 \frac{W}{m^2}$  e  $50^{\circ}C$  come mostrato in Figura 15.

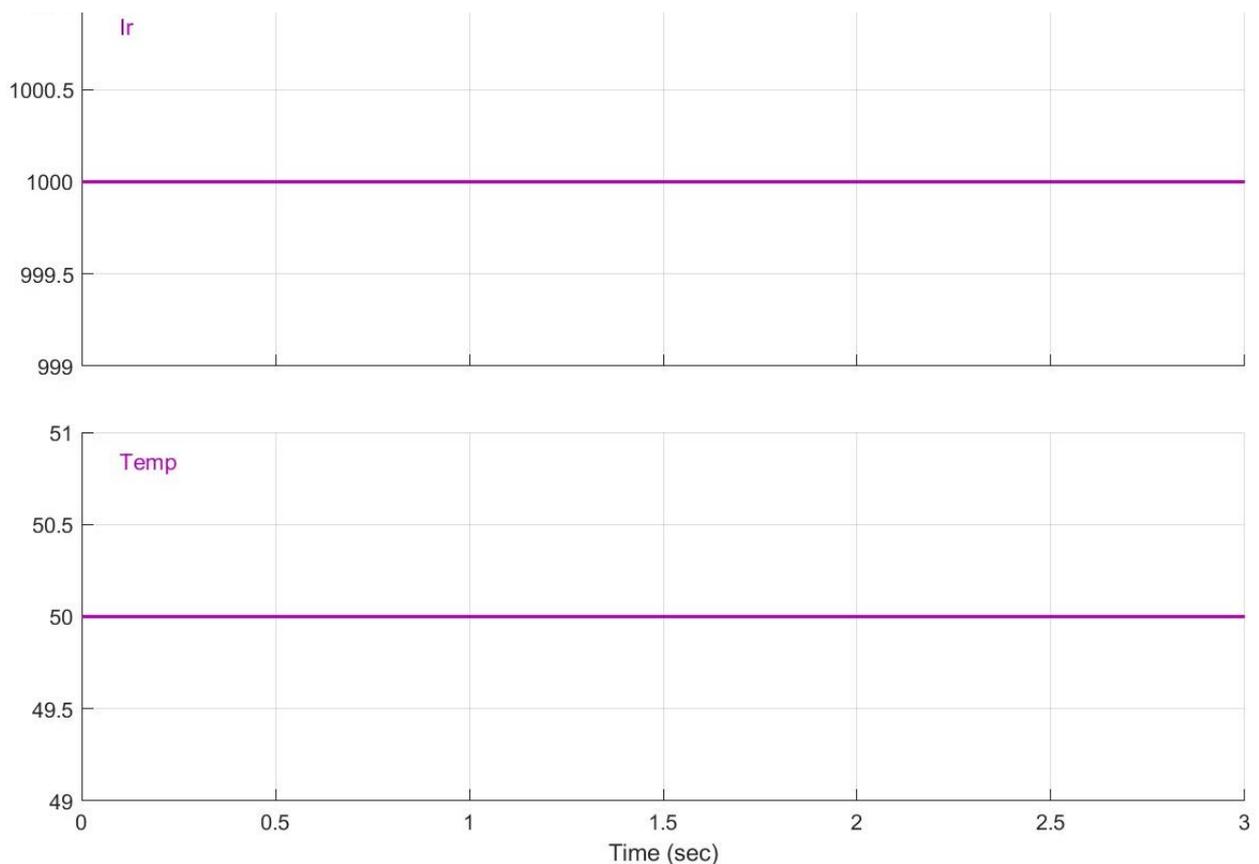


Figura 15: Andamento dell'irradiazione solare e della temperatura sul pannello

Questi valori simulati sono gli ingressi del PV Array che rappresenta un certo numero di stringhe di moduli PV connessi in parallelo nelle quali, come visto nel Capitolo 1, ognuna di esse consiste in

pannelli connessi in serie. Per il modello in questione sono stati scelti i moduli “SunPower SPR-305E-WHT-D”, in particolare, questi vengono configurati in modo da avere 66 stringhe in parallelo ognuna costituita da un modulo. Con lo scopo di simulare il “Cascaded H-Bridge”, si utilizza una serie di cinque PV Array realizzati tutti allo stesso modo come appena descritto.

Le principali caratteristiche del modulo “SunPower SPR-305E-WHT-D” sono mostrate nella Tabella 2.

Potenza massima	Numero di celle solari per ogni modulo	Tensione di circuito aperto	Corrente di corto-circuito	Tensione nel punto di massima potenza	Corrente nel punto di massima potenza
305.226W	96	64.2V	5.96A	54.7V	5.58A

Tabella 2: Valori principali del modulo “SunPower SPR-305E-WHT-D”

Mentre le caratteristiche V-I e V-P sono rappresentate in Figura 16.

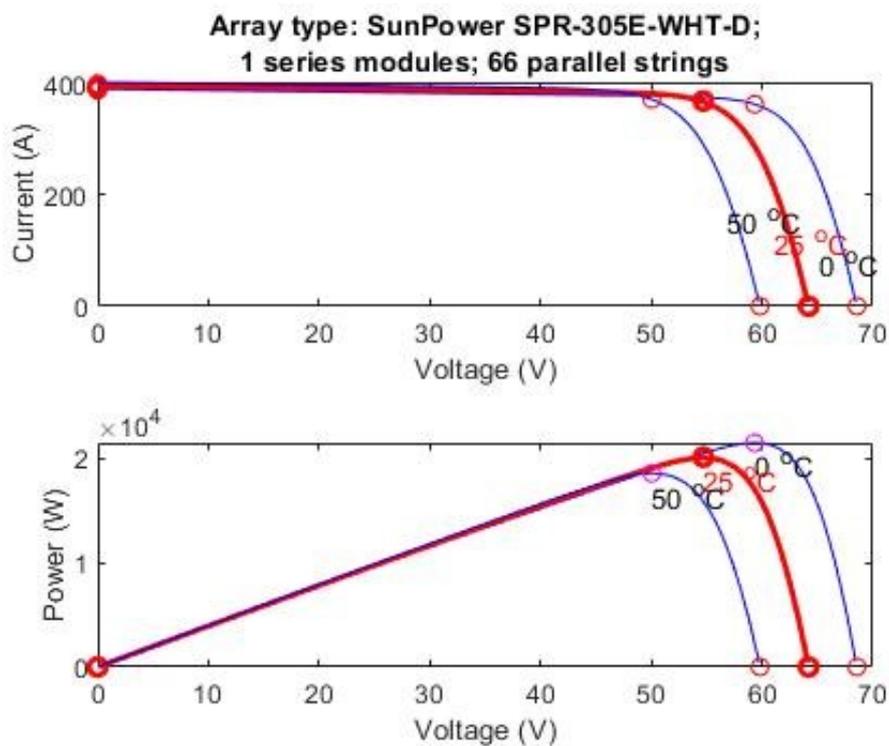


Figura 16: Caratteristica V-I e V-P del “SunPower SPR-305E-WHT-D”

Per fare in modo che il pannello operi al punto di massima potenza, si è utilizzato l’algoritmo MPPT “Conduzzanza Incrementale” descritto nel Capitolo 2.

A questo punto, la tensione continua generata dal modulo fotovoltaico viene innalzata dal convertitore DC-DC Boost, come si vede nel circuito di Figura 17, il quale è costituito da un IGBT (transistore bipolare a gate isolato) come interruttore.

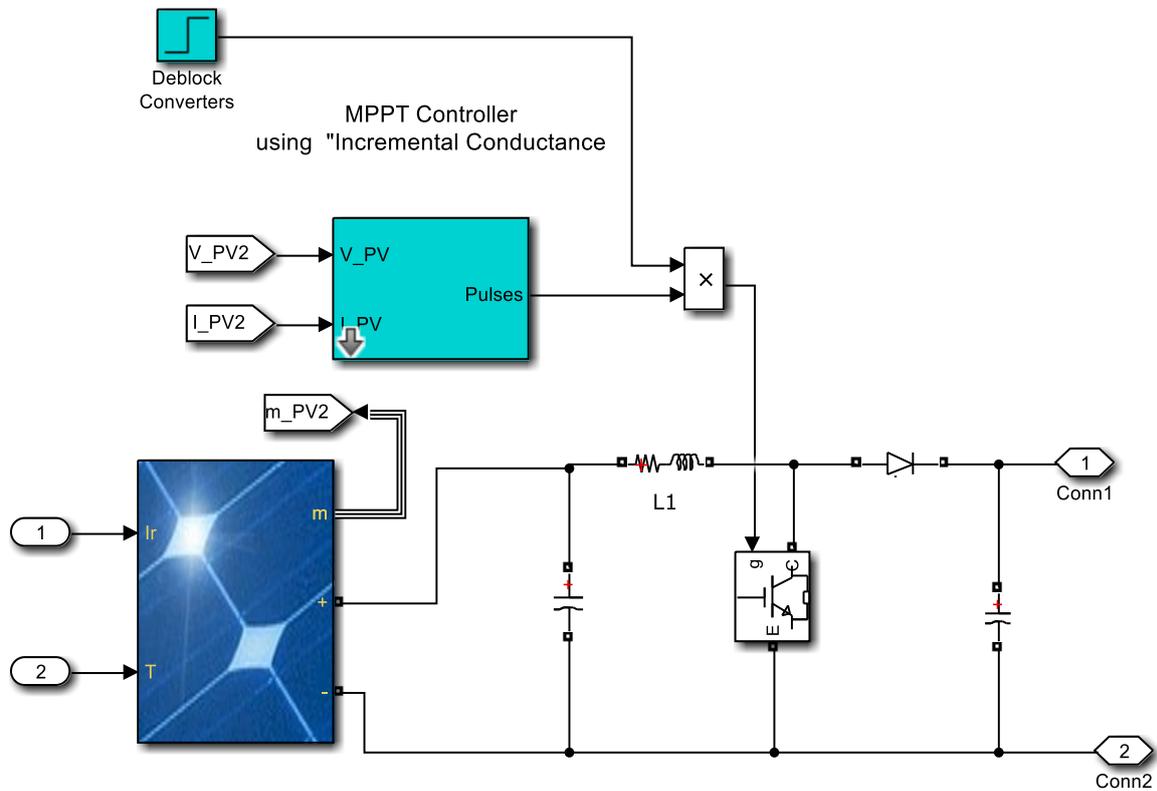


Figura 17: Schema circuitale del PV Array con l’algoritmo MPPT e il convertitore DC-DC

L’apertura e la chiusura dell’IGBT viene comandata tramite un segnale che viene dato in ingresso al terminale di controllo “g”. L’impulso viene emesso dal “PWM Generator DC-DC”, riportato in Figura 18, che ha come ingresso il duty cycle ed è ad una frequenza di switching (ovvero frequenza di commutazione) di 5kHz.

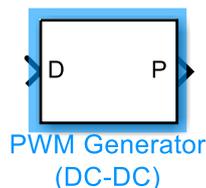


Figura 18: Blocco del Simulink che genera l’impulso per pilotare l’IGBT del Boost

Una volta che la tensione DC generata dal PV Array viene innalzata tramite il convertitore DC-DC, si inserisce per ogni pannello un blocco “Full-Bridge Converter”, mostrato in Figura 19, che implementa il convertitore a ponte ad H per realizzare l’inverter multilivello.

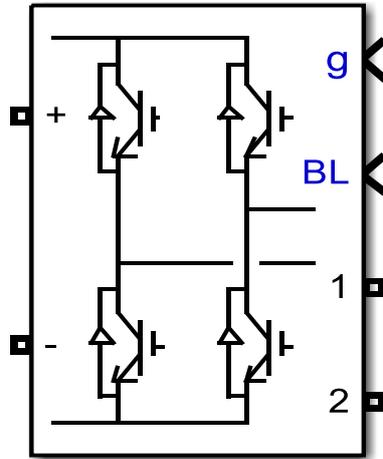


Figura 19: Full-Bridge Converter

Esso è formato da due rami (ovvero due leg) ognuno dei quali, nella parte superiore e nella parte inferiore, è costituito da un IGBT con un diodo in anti-parallelo. Il blocco prende come ingresso la tensione continua del Boost e fornisce in uscita (dai terminali “1” e “2”) una tensione alternata. Per controllare i convertitori, i ponti ad H (in totale sono cinque: uno per ogni pannello fotovoltaico) necessitano di un segnale di controllo nel terminale “g” che deve contenere quattro impulsi per pilotare i quattro IGBT. Questo controllo viene realizzato circuitalmente come mostrato in Figura 20.

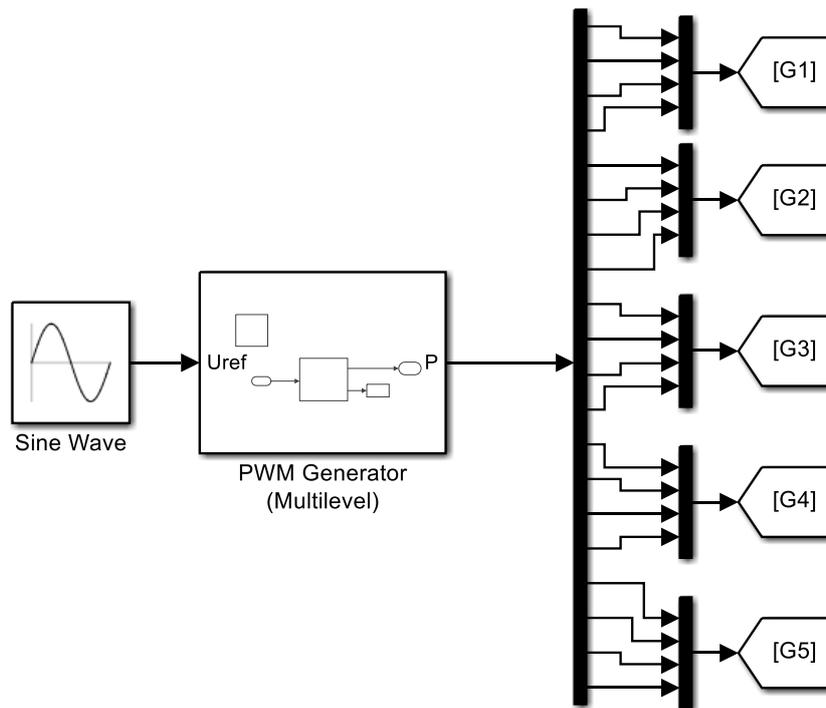


Figura 20: Circuito di controllo dei ponti ad H

Il blocco “PWM Generator (Multilevel)” ha come ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza unitaria e genera in uscita un segnale di controllo vettorizzato. In particolare, il generatore della PWM implementato genera le portanti (“carriers”) che sono sfasate tra loro di un angolo pari al rapporto tra 180 gradi e il numero di ponti ad H. Si è visto infatti che, per comandare un inverter multilivello e quindi i ponti ad H, si utilizza la PS-PWM (ovvero la PWM con fase sfasata). In questo modello sono stati utilizzati cinque ponti ad H e pertanto in uscita dal generatore di PWM si avranno venti impulsi che vengono opportunamente divisi in cinque parti come mostrato nella Figura 20.

Inoltre, tramite il terminale “BL” del “Full-Bridge Converter”, applicando un segnale costante di valore uno, si potrebbero bloccare tutti gli impulsi al convertitore. Ovviamente si vogliono usare i convertitori e per tale motivo si applicherà al terminale “BL” un segnale costante di valore zero.

Si è passati quindi dall’alimentazione continua generata dal pannello fotovoltaico all’alimentazione alternata. Quest’ultima viene filtrata da un filtro RL di tipo passa-basso e collegata ad un carico serie RC.

Lo schema generale del sistema fotovoltaico completo è rappresentato in Figura 21. Si noti che i cinque rettangoli centrali sono tutti uguali e racchiudono il circuito analizzato in Figura 17.

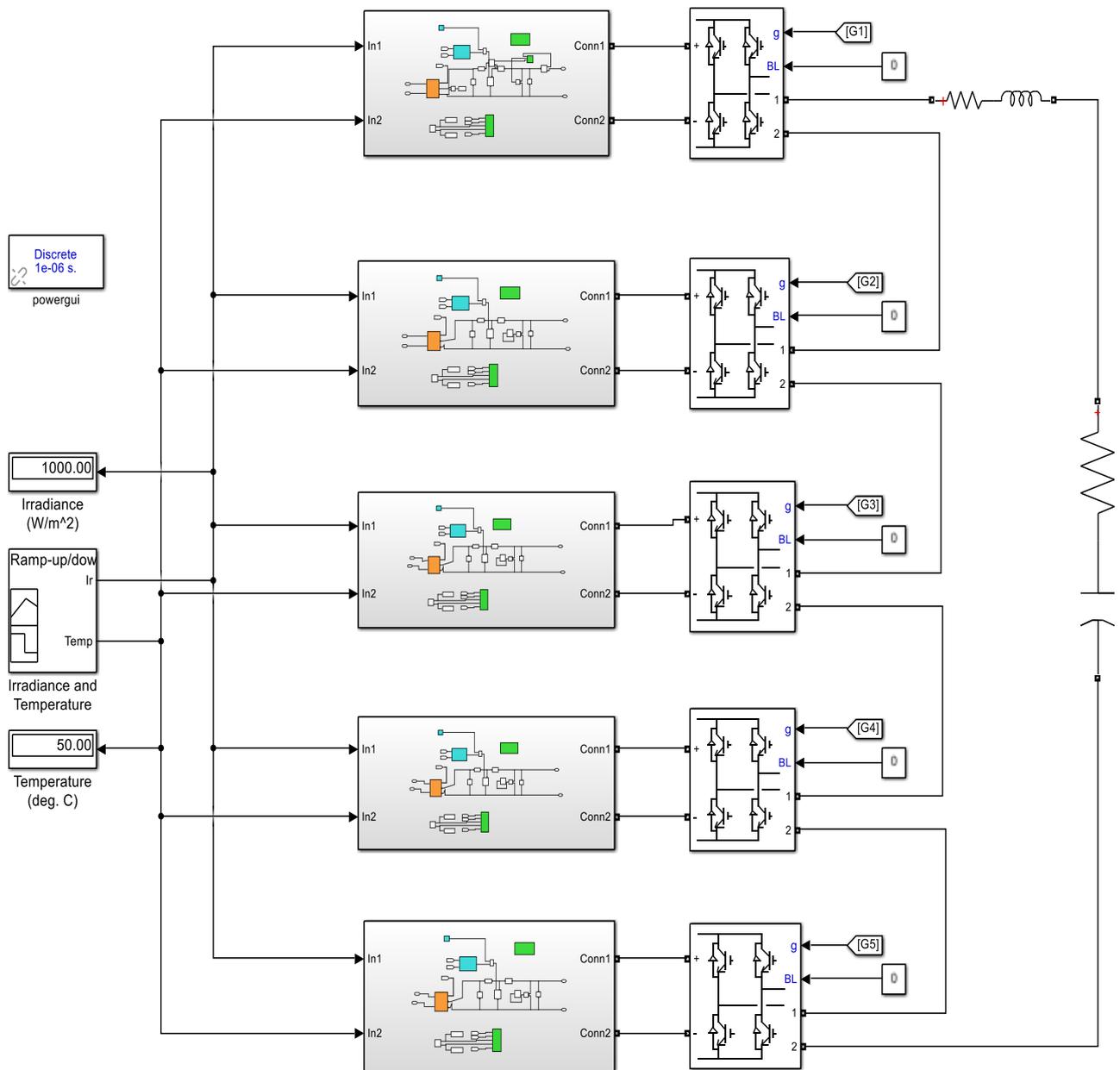


Figura 21: Schema completo del sistema fotovoltaico simulato

## 5.2 Simulazione del Convertitore DC-DC Boost

A questo punto si procede con la simulazione del circuito della Figura 22 il quale contiene il PV Array che genera la tensione continua, l'algoritmo MPPT che porta il sistema ad operare al punto di massima potenza e il Convertitore DC-DC Boost, collegato ad un carico resistivo, che innalza la tensione generata dal pannello.

Alla fine della simulazione, si è ottenuto che la tensione continua in uscita dal pannello è costante e pari a 53.59V, però il sistema deve lavorare nel punto di massima potenza in modo tale da non “sprecare” l’energia prodotta dal modulo. Per tale motivo, l’algoritmo MPPT a “Conduttanza Incrementale” porta la tensione generata dal pannello a 50V che, osservando la Figura 16, corrisponde al valore di tensione per il quale si sviluppa la potenza massima. Poi il convertitore DC-DC Boost duplica la tensione di uscita e perciò, in uscita, si ottiene una tensione continua di valore pari a 100V come mostrato in Figura 23.

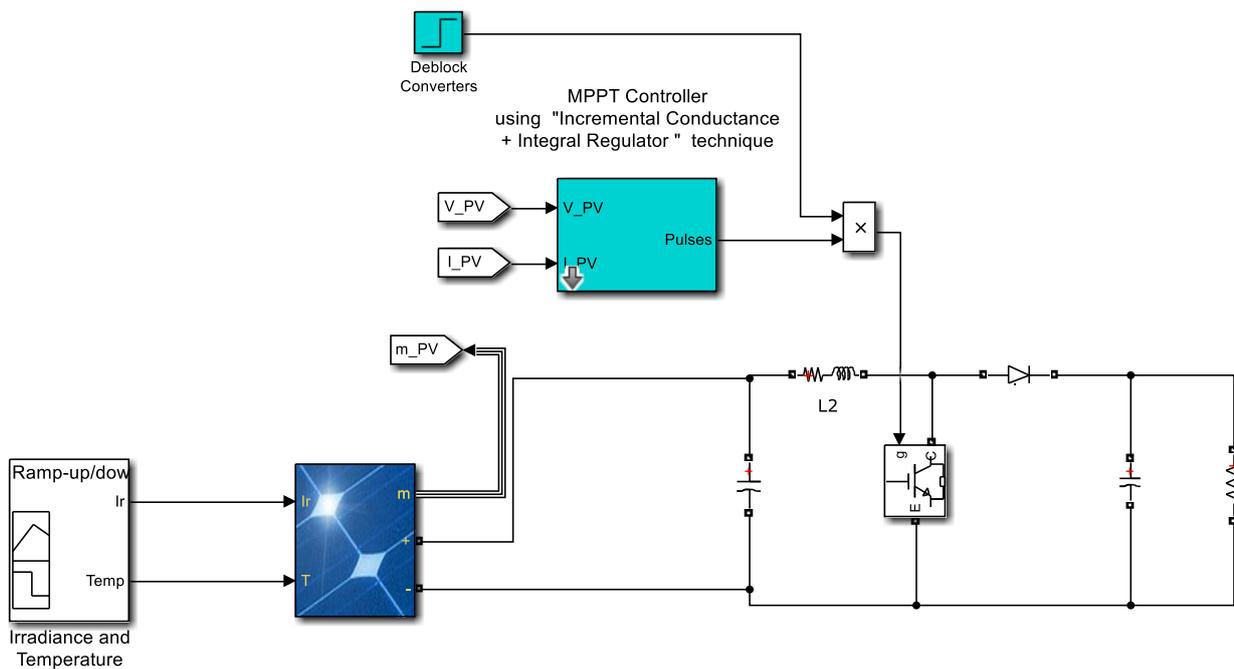


Figura 22: Simulazione del Boost con un carico resistivo

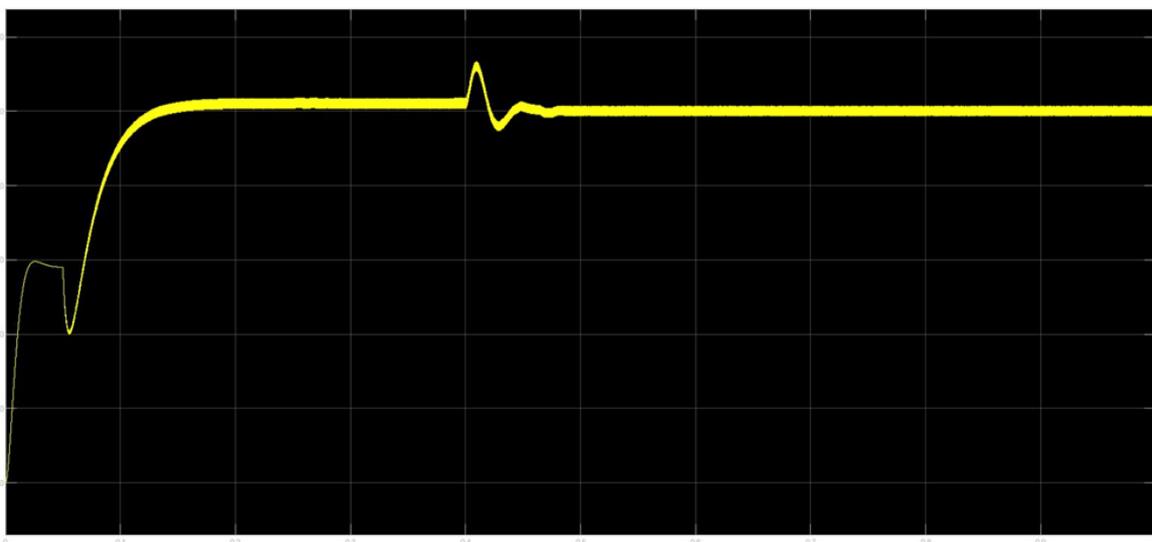


Figura 23: Tensione continua in uscita al Boost

La simulazione si è svolta nell'arco temporale di un secondo e si nota come la tensione si è stabilizzata una volta che si è esaurito il transitorio a partire da circa 0.45 secondi.

### 5.3 Simulazione dell'inverter multilivello

Per analizzare la tensione alternata in uscita all'inverter multilivello, si è simulato il circuito della Figura 24.

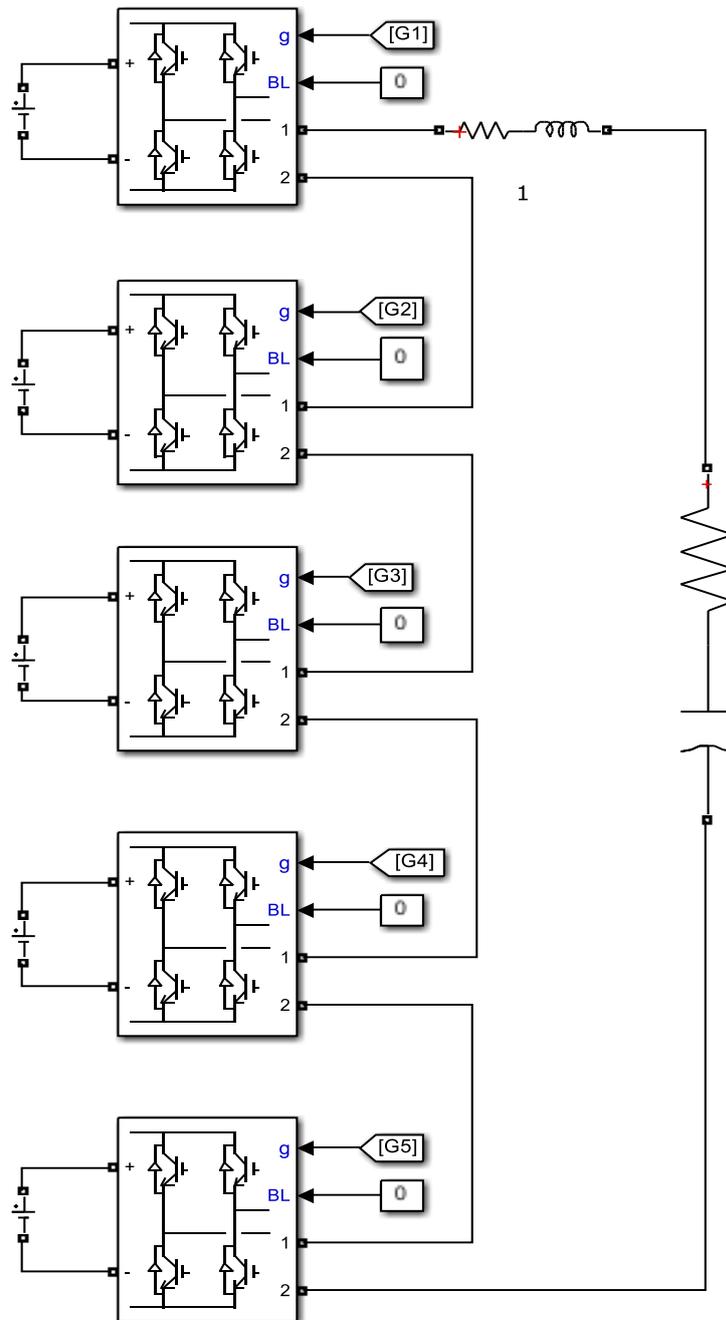


Figura 24: Circuito di simulazione dell'inverter multilivello

Ogni ponte ad H prende in ingresso un generatore di tensione costante di valore pari a 100V ovvero la tensione continua in uscita dal Boost Converter. Questi convertitori vengono controllati dal PWM Generator di Figura 20 il quale genera portanti (“carriers”) che sono sfasate e questo lo si nota nella Figura 25 nella quale è riportato il primo impulso di ogni convertitore. Si può osservare così come i cinque impulsi siano tutti sfasati tra loro.

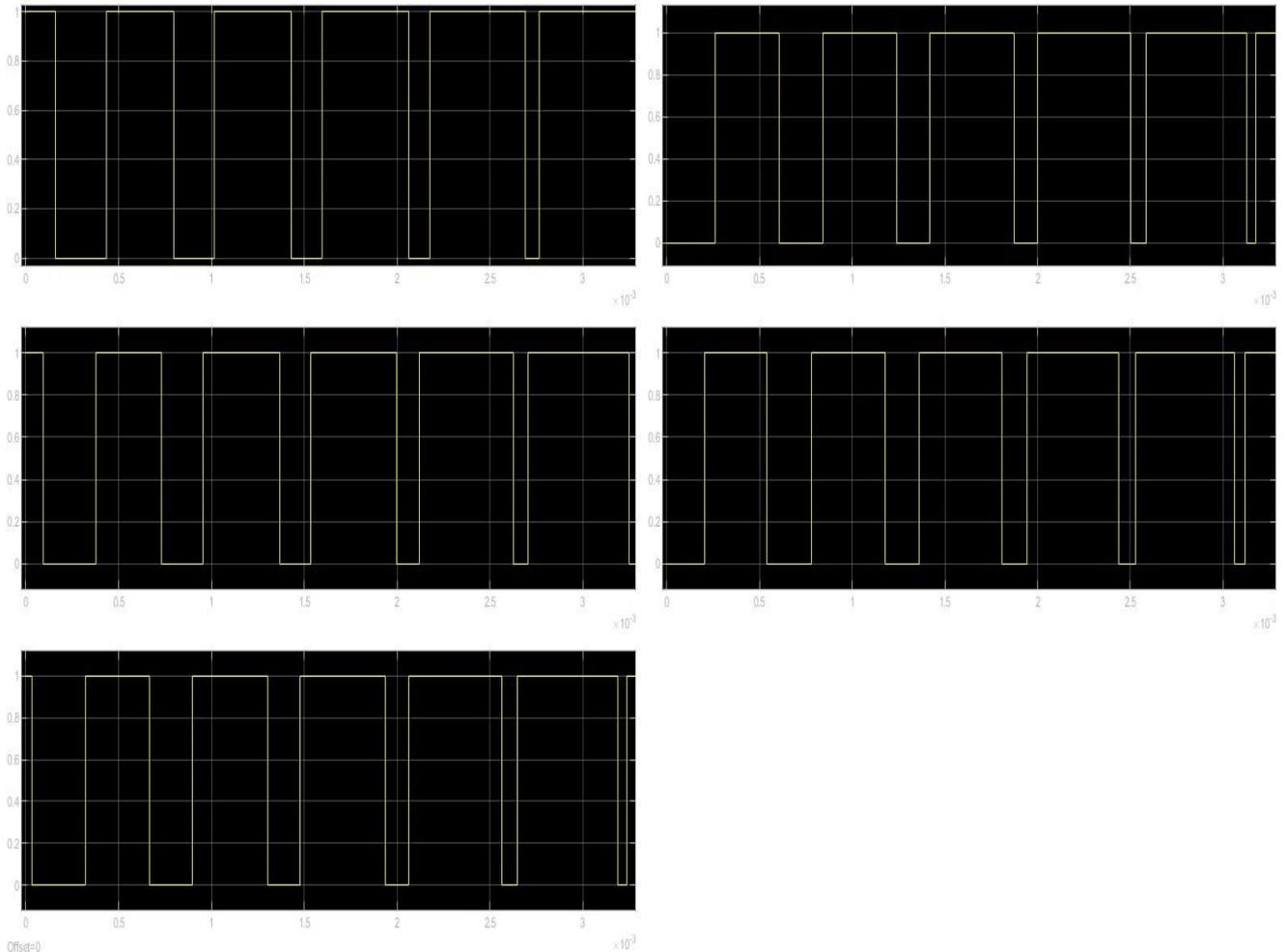


Figura 25: Primo impulso di ogni ponte ad H

In uscita dal “Cascaded H-Bridge” si avrà quindi un’alimentazione alternata la quale viene opportunamente filtrata con un filtro RL di tipo passa-basso e poi collegata ad un carico RC serie ad una frequenza di 50Hz. L’andamento della tensione e della corrente alternata sul carico sono mostrati in Figura 26.

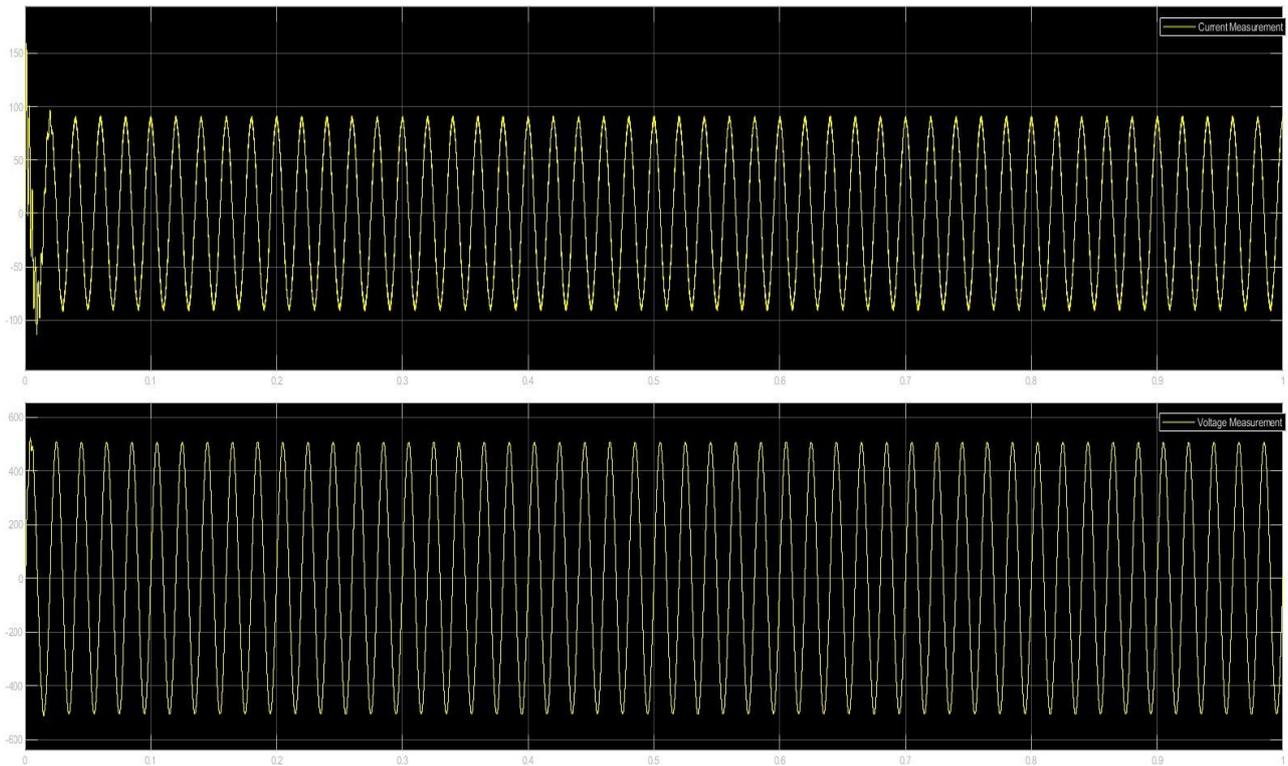


Figura 26: Andamento della tensione e della corrente alternata sul carico

In particolare, l'immagine superiore rappresenta la corrente sul carico che oscilla tra circa 90A e  $-90^\circ$ , mentre quella inferiore raffigura la tensione sul carico che varia tra 500V e  $-500$  V.

## Conclusioni

In questa tesi di laurea si è descritto nel dettaglio qual è il principio di funzionamento di un sistema fotovoltaico e quali sono quindi le parti elettroniche che, in fase di progettazione, devono essere configurate in modo opportuno per ottenere la potenza desiderata.

Si è posta l'attenzione sull'inverter multilivello in quanto negli ultimi anni ha assunto un'importanza via via crescente nella conversione delle medie/alte potenze grazie ai vantaggi che offre rispetto agli inverter tradizionali. I Convertitori Modulari Multilivello (MCC: Modular Multilevel Converter) infatti, dal nome stesso, sono modulari ovvero "componibili" attraverso l'unione di più unità di base che vengono collegate in modo opportuno per ottenere il convertitore completo. Nel caso simulato si è preso in considerazione un singolo ponte ad H, lo si è replicato per cinque volte in corrispondenza di ogni sorgente DC e si sono connessi in cascata tutti i convertitori per comporre una tensione alternata d'uscita di valore maggiore a quella che si sarebbe ottenuta con un singolo convertitore.

La scelta del "Cascaded H-Bridge" piuttosto che "Flying Capacitor" o "Diode Clamped" è da attribuire al fatto che ogni "H-Bridge" deve avere una tensione di alimentazione indipendente e isolata come quella fornita dai generatori fotovoltaici in cui le sorgenti sono chiaramente isolate fra di loro.

Infine, grazie all'azione politica di utilizzare sempre di più le energie rinnovabili, negli ultimi anni sono stati introdotti una serie di incentivi per promuovere la diffusione dei sistemi fotovoltaici. È stata svolta e si sta facendo ancora tanta ricerca per lo sviluppo della conversione DC-AC degli impianti fotovoltaici con il duplice scopo di massimizzare l'energia prodotta e di ridurre i costi per realizzare un sistema fotovoltaico. Questo sistema di generazione di energia elettrica è a bassissimo impatto ambientale e rappresenta uno dei principali sistemi di energia rinnovabile utilizzabili ai giorni d'oggi.

## Indice delle figure e delle tabelle

Figura 1: Capacità globale del fotovoltaico con aggiunte annuali, 2009-2019.....	4
Figura 2: Giunzione p-n all'equilibrio termodinamico .....	7
Figura 3: Circuito equivalente a singolo diodo di una cella solare.....	8
Figura 4: Pannello fotovoltaico .....	9
Figura 5: Stringa di pannelli fotovoltaici .....	10
Figura 6: Esempio di campo fotovoltaico .....	10
Figura 7: Percorso della corrente in caso di cella solare parzialmente ombreggiata.....	11
Figura 8: Curve delle tensioni di alimentazione con la caratteristica P-V di un sistema fotovoltaico in condizioni di irraggiamento solare variabili.....	12
Figura 9: Caratteristica I-V e P-V di un pannello fotovoltaico .....	13
Tabella 1: Algoritmo "Perturba & Osserva" .....	13
Figura 10: Flow chart dell'algoritmo "Perturba & Osserva" .....	14
Figura 11: Flow chart dell'algoritmo "Conduttanza Incrementale" .....	16
Figura 12: Schema circuitale convertitore DC-DC Boost.....	17
Figura 13: Convertitore DC-DC Boost durante il Ton dell'interruttore.....	17
Figura 14: Schema generale di un sistema fotovoltaico con il "Cascaded H-Bridge" .....	20
Figura 15: Andamento dell'irradiazione solare e della temperatura sul pannello.....	21
Tabella 2: Valori principali del modulo "SunPower SPR-305E-WHT-D".....	22
Figura 16: Caratteristica V-I e V-P del "SunPower SPR-305E-WHT-D".....	22
Figura 17: Schema circuitale del PV Array con l'algoritmo MPPT e il convertitore DC-DC.....	23
Figura 18: Blocco del Simulink che genera l'impulso per pilotare l'IGBT del Boost .....	23
Figura 19: Full-Bridge Converter .....	24
Figura 20: Circuito di controllo dei ponti ad H.....	25
Figura 21: Schema completo del sistema fotovoltaico simulato .....	26
Figura 22: Simulazione del Boost con un carico resistivo .....	27
Figura 23: Tensione continua in uscita al Boost.....	27
Figura 24: Circuito di simulazione dell'inverter multilivello.....	28
Figura 25: Primo impulso di ogni ponte ad H.....	29
Figura 26: Andamento della tensione e della corrente alternata sul carico.....	30

## Bibliografia

- [1] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2020 Global Status Report. 2020
- [2] Rapporto Statistico “Solare Fotovoltaico” 2020, GSE (Gestore Servizi Energetici)
- [3] “Dispositivi e sistemi fotovoltaici”, D’Aliento, D’Alessandro, Guerriero, 2014, Edises
- [4] “Elettronica Analogica”, Simone Orcioni, 2017, Pitagora”
- [5] St Ingegneria. On-line: <http://www.st-ingegneria.com/analisi-rendimento-moduli-fotovoltaici-e-curva-corrente-tensione-i-v.html>
- [6] Rinnovabili.it. On-line: <https://www.rinnovabili.it/energia/fotovoltaico/moduli-fotovoltaici-ad-alto-rendimento-lg-neon-h-neon-r/attachment/lg-neon-r-810x608/>
- [7] Enerpoint. On-line: <https://www.enerpoint.it/solare/fotovoltaico/tecnologia/moduli-fv.php>
- [8] Gettyimages. On-line: <https://www.gettyimages.it/detail/foto/field-with-solar-panels-immagine-royalty-free/521691937?adppopup=true>
- [9]Energiasolare100. On-line:<https://energiasolare100.com/it/blog/impianto-fotovoltaicodifferenza-diodo-blocco-diodo-by-pass/>
- [10] MathWorks. On-line: <https://it.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/mppt-algorithm.html>
- [11] Consulente Energia. On-line. <http://www.consulente-energia.com/ao-come-misurare-la-prestazione-di-un-impianto-fotovoltaico-valutazione-del-fattore-di-forma-e-della-curva-vi-di-una-stringa-fotovoltaica.html>
- [12] M. Anzari, J. Meenakshi and V. T. Sreedevi, "Simulation of a transistor clamped H-bridge multilevel inverter and its comparison with a conventional H-bridge multilevel inverter," 2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014], 2014, pp. 958-963, doi: 10.1109/ICCPCT.2014.7054952.
- [13] A. Lashab et al., "Cascaded Multilevel PV Inverter With Improved Harmonic Performance During Power Imbalance Between Power Cells," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 3, pp. 2788-2798, May-June 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.297

## **Ringraziamenti**

*A Babbo e Mamma, senza i quali questo traguardo non sarebbe stato possibile. Grazie per avermi permesso di crescere, di studiare, di diventare adulto insieme a voi. Siete i migliori Genitori che si possano avere, grazie per il vostro amore che mi dimostrate ogni giorno.*

*A Virginia, il mio amore. Grazie per essermi stata sempre vicino, per avermi incoraggiato e supportato durante questo percorso. Questo traguardo è dedicato a te. A te che hai passato momenti brutti e sei stata capace di risollevarti e riprendere con forza la tua Vita in mano nonostante tutte le difficoltà. A te e a Noi, affinché questo rappresenti non un punto di arrivo ma un punto di partenza per la costruzione del nostro Futuro insieme.*

*A Giulia, la mia sorellina da sempre. Abbiamo passato tanti momenti da veri fratelli e sono orgoglioso di averti vicino a me. Ti auguro di raggiungere sempre i tuoi obiettivi e di vivere con gioia la tua Vita.*

*Ai miei Nonni, Marino e Orfeo. Anche se non vi ho mai potuto conoscere, sono sicuro che mi guardate sempre da lassù.*

*Alle mie Nonne, Bruna ed Elide. A voi che vi voglio un bene dell'anima. Grazie dell'amore che mi continuate a dare da quando sono piccolo.*

*Ai miei Zii, ai miei cugini e a tutto il resto della famiglia. Grazie per il vostro supporto e il vostro affetto.*

*Ai miei amici, in particolare i 4B e gli UP. Grazie per essermi stati sempre vicini, per aver condiviso con me tutti i momenti di spensieratezza e di gioia. Siete i migliori.*

*A tutte le persone che sono entrate a far parte della mia Vita negli ultimi anni e in particolar modo a Paolo e a Chiara e Vincenzo con Elia ed Elisa, grazie per condividere insieme a me questo traguardo.*

*Al Professor Orcioni, grazie per la sua disponibilità, il suo supporto costruttivo e le preziose indicazioni che mi ha dimostrato in questi mesi.*

*A me stesso, per non aver mai mollato e per aver sempre superato ogni difficoltà anche nei momenti di maggior sconforto. Auguro a me stesso di essere così determinato e paziente in modo da poter raggiungere ogni traguardo da me prefissato nella mia vita personale e lavorativa.*