

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Elettronica

Sviluppo di un algoritmo di MPPT per inverter fotovoltaici basato su AI

Design and development of an AI-based MPPT algorithm for photovoltaic inverters

Relatore:

Prof. Lucio Ciabattoni

Tesi di Laurea di:

Francesco Traini

A.A. 2019 / 2020

SOMMARIO

INTRODUZIONE	3
1 - L'EFFETTO FOTOELETTRICO	5
2 - LA CELLA FOTOVOLTAICA	6
3 - CURVA TENSIONE-CORRENTE	8
3.1 - DIPENDENZA DALLA TEMPERATURA	8
3.2 - DIPENDENZA DALL'IRRADIANZA	9
4 - RENDIMENTO DELLA CELLA FOTOVOLTAICA	10
5 - DALLA CELLA ALL'IMPIANTO	11
6 - TIPOLOGIE DI IMPIANTO	12
7 – L'INVERTER	14
8 – L'MPPT	16
8.1 – Utilità	16
8.2 – Ombreggiamento parziale	17
9 – ALGORITMI	21
9.1 - Perturb & Observe	21
9.2 - INCREMENTAL CONDUCTANCE	22
9.3 - FRACTIONAL OPEN-CIRCUIT VOLTAGE	23
9.4 - PARTICLE SWARM OPTIMIZATION	24

9.5 - Importanza degli algoritmi	25
10 – IMPLEMENTAZIONE	27
10.1 – Circuito	27
10.2 – Codice Matlab	29
10.3 - SIMULAZIONE STATICA	31
10.4 - SIMULAZIONE DINAMICA	36
10.5 - CONFRONTO CON P&O	37
11 – CONCLUSIONI	40
BIBLIOGRAFIA	42

INTRODUZIONE

Dopo secoli di utilizzo di enormi quantità di energie non rinnovabili e provenienti dalla combustione ci si sta accorgendo sempre di più degli enormi ed irreparabili danni che tutto ciò ha portato e continua a portare all'ambiente. Con il riscaldamento globale visibile ed in aumento, è giunto il momento di cambiare le modalità di produzione energetica, orientandole verso fonti rinnovabili e ad impatto ambientale minore, possibilmente nullo. È un cambiamento che sta avvenendo a ritmi lenti, anche se la crescente attenzione all'ambiente da parte di opinione pubblica e di alcuni governi potrebbe portare, nei prossimi anni, ad una netta accelerazione.

L'energia rinnovabile è tuttora uno dei mercati più promettenti e destinati a crescere enormemente nei prossimi anni, sia per l'attenzione all'ambiente, sia soprattutto perché sta diventando anche economicamente conveniente rispetto alle fonti non rinnovabili. L'energia solare è per la Terra la fonte primaria di energia, dalla quale ha avuto origine tutta la vita oggi conosciuta. È l'energia più abbondante disponibile sul pianeta Terra, è praticamente infinita (almeno per qualche altro miliardo di anni), disponibile in ogni parte del globo in misura ampiamente superiore alla quantità di energia necessaria ai consumi umani.

La componente di potenza irradiata dal sole che colpisce la terra è circa 174000 TW, a fronte di un consumo mondiale che si attesta sulle decine di TW. Considerando che solo una piccola percentuale dell'energia utilizzata attualmente proviene dalle rinnovabili, il fotovoltaico è certamente una delle fonti rinnovabili destinate a crescere, poiché ancora poco diffuso in proporzione alle superfici disponibili e sempre più economico.

Per sfruttare una porzione maggiore dell'energia solare si possono aumentare le superfici destinate al fotovoltaico, (dando possibilmente precedenza a quelle già cementificate, come tetti o parcheggi coperti) oppure aumentare l'efficienza dei pannelli, in modo da trasformare, a parità di superficie occupata, una quantità maggiore dell'energia che li colpisce. Un'altra soluzione è quella di migliorare l'efficienza dei dispositivi elettronici a corredo per disperdere meno energia possibile.

Il dispositivo elettronico chiave che si pone come interfaccia tra la parte di produzione, i pannelli, e la rete elettrica in generale, è l'inverter [1]. Per massimizzare la resa di un impianto, la sua impedenza d'ingresso deve essere tale da prelevale dai pannelli la maggior quantità di potenza possibile, collocandosi nell'MPP (maximum power point). Poiché con il variare dell'irradianza, in particolare se essa risulta diversa tra più pannelli che si trovano a lavorare insieme, come nel caso di un ombreggiamento locale, l'MPP cambia posizione, si pone il problema di regolare di conseguenza l'impedenza d'ingresso per sfruttare costantemente la massima potenza. Per questo si utilizza un sistema di inseguimento, l'MPPT (maximum power point tracking) [2], che può utilizzare particolari algoritmi, alcuni più e altri meno efficienti.

Il lavoro di tesi consiste nel testare e validare, con un impianto fotovoltaico simulato con Matlab Simulink, la validità e l'efficienza di una versione modificata di un algoritmo di ottimizzazione euristico, la Particle Swarm Optimization, trovando i parametri che ne massimizzano l'efficienza e confrontandolo con gli algoritmi più diffusi in letteratura e sul mercato (il Perturb & Observe).

1 - L'EFFETTO FOTOELETTRICO

Il pannello fotovoltaico è un dispositivo che trasforma energia elettromagnetica in energia elettrica. Il suo funzionamento è basato sull'effetto fotoelettrico, cioè sulla capacità di un materiale di liberare elettroni quando colpito da radiazione elettromagnetica. Questo effetto è presente anche nei semiconduttori, come per esempio il silicio, che è il materiale base nella costruzione di quasi tutti i pannelli fotovoltaici esistenti. Quando un fotone colpisce un materiale, se l'energia del fotone, che è proporzionale alla sua frequenza v, è maggiore di E_g , l'energy gap del materiale, è assorbita da un elettrone, che passa dalla banda di valenza a quella di conduzione. L'elettrone a questo punto è libero di spostarsi nel reticolo cristallino, per poi tornare in banda di valenza legandosi ad un altro atomo e liberando l'energia precedentemente acquisita sotto forma di un ulteriore fotone di frequenza proporzionale al nuovo salto di energia.

Il legame tra frequenza ed energia di un fotone è vincolato dalla costante di Planck $h = 6.626 * 10^{-34} [J * s]$, che fissa una soglia energetica minima per i fotoni necessaria a provocare il salto di banda (*eq. 1*).

$$E_{fot} = h * v = h * \frac{c}{\lambda} \ge E_g \tag{1}$$

La componente di luce solare che porta contributo alla produzione elettrica è solamente quella caratterizzata da una lunghezza d'onda λ inferiore ad una certa soglia, dipendente dal materiale scelto per la realizzazione del pannello. Nel caso del silicio, prendono parte alla conversione le onde elettromagnetiche caratterizzate da una lunghezza d'onda minore di 1107nm, a partire dall'infrarosso, inclusa la parte visibile dello spettro.

2 - LA CELLA FOTOVOLTAICA

L'unità elementare che costituisce il pannello fotovoltaico è la cella fotovoltaica. Essa è formata da un diodo costituito da due strati sovrapposti di silicio, ampi diversi centimetri e sottili pochi micron, drogati rispettivamente con atomi di tipo N e di tipo P. Il contatto tra i due materiali diversamente drogati crea un campo elettrico, detto campo di giunzione, che permette di catturare gli elettroni liberati dall'effetto fotoelettrico impedendo la loro ricombinazione immediata.

Sulle superfici del diodo sono inseriti due elettrodi: quello inferiore è ampio come l'intera superficie del pannello, quello superiore è costituito da una matrice di conduttori di argento sottili il più possibile per non creare ombra sul silicio sottostante. Il loro compito è catturare gli elettroni liberati dall'effetto fotoelettrico evitando che ricadano nella banda di valenza, in modo da poterli indirizzare, attraverso il carico utilizzatore, a ricombinarsi con le lacune presenti nella zona P. L'attraversamento del carico porta a rilasciare potenza su di esso, generando quindi energia elettrica.

Il circuito equivalente elementare di una cella fotovoltaica è il seguente, costituito da un generatore ideale di corrente in parallelo ad un diodo.



La corrente generata dalla cella (eq. 2) è proporzionale alla tipologia della cella stessa (k), alla superficie esposta (S) ed alla quantità di luce solare incidente, detta irradianza (G):

$$I_q = k * S * G \tag{2}$$

ad essa va sottratta la corrente che attraversa il diodo, dipendente dalla tensione ai suoi capi secondo la relazione in *(eq. 3)*:

$$I = I_0 * (e^{A * U_j} - 1)$$
(3)

con A pari a:
$$A = \frac{m}{q * K * T}$$
(4)

dove I_0 è la corrente di saturazione inversa del diodo, U_j la tensione applicata alla giunzione, $q = -1,602 * 10^{-19}C$ la carica elettrica dell'elettrone, *m* il coefficiente di non idealità della giunzione, $K = 1,38 * 10^{-23} \left[\frac{J}{K}\right]$ la costante di Boltzmann e *T* la temperatura della giunzione espressa in gradi Kelvin.

3 - CURVA TENSIONE-CORRENTE

La curva I(V) risultante è quella in *figura 2*, caratterizzata da una corrente di cortocircuito limitata, poco superiore a quella di lavoro e di conseguenza non pericolosa per la cella. La corrente si mantiene costante (a meno di parametri parassiti trascurabili) all'aumentare della tensione fino alla tensione di soglia del diodo, che a quel punto entra in conduzione lasciando scorrere su di esso tutta la corrente prodotta. Anche la tensione a circuito aperto è limitata e non pericolosa per l'integrità della cella.



FIGURA 2 - CURVA I(V) DI UNA CELLA FOTOVOLTAICA [17]

La curva caratteristica della cella fotovoltaica è visibilmente non lineare e tende anche a modificarsi al variare dei parametri ambientali. I fattori principali che portano al suo cambiamento sostanziale sono due: la temperatura e, soprattutto, l'irradianza [3].

3.1 - DIPENDENZA DALLA TEMPERATURA

La temperatura della cella varia in base alla quantità di luce che la colpisce, comportamento dovuto alla parte di energia che non viene né riflessa né trasformata ma assorbita e dissipata come calore. La temperatura della cella varia in funzione della quantità di luce che la colpisce e della temperatura ambientale. Nelle ore più calde del giorno, soprattutto durante la stagione estiva, si ha un maggiore surriscaldamento. Inoltre, se da essa non viene prelevata l'energia disponibile, anche questa componente viene dissipata dalla cella stessa e contribuisce al suo riscaldamento, portando nel lungo termine ad una maggiore usura. La potenza massima prodotta dalla cella, inoltre, diminuisce con l'aumentare della temperatura. Come si può osservare qualitativamente dalla *figura 3*, all'aumentare della temperatura diminuisce la tensione prodotta dal pannello,

sia quella a circuito aperto, sia quella di massima potenza di circa lo 0.3 - 0.5 %/°C, che viene compensata solo in piccola parte da un leggero aumento della corrente disponibile.



FIGURA 3 - CURVA I(V) AL VARIARE DELLA TEMPERATURA DELLA CELLA [4]

3.2 - DIPENDENZA DALL'IRRADIANZA

La luce è la fonte di energia che alimenta la cella fotovoltaica, l'irradianza è di conseguenza la grandezza principale per disegnare il grafico I(V), dalla quale area si ricava la potenza prodotta. Mantenendo la temperatura costante, la corrente di cortocircuito è proporzionale alla luce che colpisce la cella (più fotoni incidenti portano a più elettroni liberati); la tensione a vuoto invece diminuisce in modo logaritmico.



FIGURA 4 - CURVA I(V) AL VARIARE DELL'IRRADIANZA DELLA CELLA [4]

4 - RENDIMENTO DELLA CELLA FOTOVOLTAICA

Il rendimento η di una cella fotovoltaica è dato dal rapporto tra la massima potenza elettrica prelevabile P_{max} e la potenza solare incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \tag{5}$$

Ci sono vari fattori che concorrono ad abbassare la potenza prodotta: la riflessione dei fotoni dovuta allo strato protettivo in vetro del pannello e agli elettrodi della cella; la quantizzazione energetica degli orbitali atomici, che richiede quantità ben precise di energia, rifiutando i fotoni con energia troppo bassa e dissipando l'eccesso portato dai più energetici; la ricombinazione di parte degli elettroni che non vengono catturati dagli elettrodi; le resistenze parassite dovute ai materiali che costituiscono la cella che ovviamente non sono ideali.

Il rendimento dei pannelli fotovoltaici varia in base alla tecnologia utilizzata. Per i moduli commerciali, principalmente in silicio policristallino o monocristallino, è circa del 15-20% [5].

5 - DALLA CELLA ALL'IMPIANTO

Ogni cella fotovoltaica produce una tensione di circa 0.5-0.6V, tensione di soglia del diodo al silicio, e una corrente di qualche Ampere: valori troppo piccoli per essere utilizzati in una rete elettrica. Per raggiungere tensioni maggiori si creano gruppi di celle messe in serie a formare un modulo che può arrivare a circa 30-40V. Uno o più moduli sono connessi in parallelo per formare un pannello fotovoltaico, inglobato in una struttura rigida in alluminio, EVA e vetro, necessari a garantirne la protezione meccanica e dagli agenti atmosferici [6].

Più celle poste in serie vincolano la corrente che le attraversa ad essere la stessa per tutte. Ciò diventa un problema nel momento in cui una di esse si viene a trovare in ombra: tenderà a lavorare a tensione inversa comportandosi come un carico, diminuendo la produzione dell'intera serie, surriscaldandosi e potenzialmente danneggiandosi. Per evitare questo si utilizzano dei diodi di bypass posti in antiparallelo, che possono escludere una o un piccolo gruppo di celle alla volta (*figura 5*).



FIGURA 5 - CELLE IN SERIE CON DIODO DI BYPASS [18]

Per ottenere un impianto fotovoltaico adatto a produrre alcuni kW, più pannelli sono posti in serie e in parallelo per aumentare ulteriormente la tensione e la corrente prodotta.

6 - TIPOLOGIE DI IMPIANTO

Un impianto fotovoltaico può essere di due tipologie: on-grid, cioè connesso alla rete di distribuzione elettrica oppure off-grid, non connesso alla rete e destinato al solo autoconsumo dell'energia prodotta.

L'impianto off-grid (*figura 6*) è il più elementare, costituito da un generatore fotovoltaico, un utilizzatore e un eventuale sistema di accumulo.



FIGURA 6 - IMPIANTO OFF GRID

Permette di generare energia elettrica, vincolata ovviamente all'illuminazione ambientale e di utilizzarla in luogo, eventualmente accumulandola per le ore notturne. Gli impianti fotovoltaici off-grid possono essere piccoli sistemi (orologi, calcolatrici con pannellino, sistemi da giardino per l'illuminazione notturna), impianti più grandi che permettono di avere energia a bassa tensione disponibile in qualunque situazione (camper, barche) o impianti domestici collocati in posti non raggiunti dalla rete elettrica. Sono tutti costituiti da pannelli, da un sistema di accumulo che permette di immagazzinare l'energia in eccedenza e da un regolatore di carica per proteggere l'accumulo dalla sovraccarica o dalla sovrascarica.

Un impianto off-grid non ha però modo di gestire l'energia in eccesso, e una volta caricate completamente le batterie, questa non viene più prodotta. In caso di mancata

produzione e di batterie completamente scariche o semplicemente se la corrente richiesta è maggiore di quella disponibile, esso necessita di un generatore di altro tipo, per esempio a combustione, per non lasciare l'impianto utilizzatore senza alimentazione.

Un sistema più efficace ed efficiente è l'impianto on-grid (*figura 7*), o grid-connected. È simile al precedente, ma in aggiunta ha un allaccio alla rete elettrica che permette di prelevare l'energia in difetto, potendo quindi fare a meno di un accumulo locale, e di reimmettere in rete l'energia in eccesso, rivendendola al gestore. L'elemento chiave in questa configurazione è l'inverter, che rende possibile trasformare la tensione continua prodotta dal campo fotovoltaico in tensione alternata compatibile con la rete convenzionale. Negli impianti più piccoli l'inverter funziona anche come dispositivo di interfaccia tra la rete e l'impianto, garantendo l'impianto dalla rete in caso di guasti o cadute di tensione.



FIGURA 7 - IMPIANTO GRID CONNECTED

7 – L'INVERTER

Un inverter è un dispositivo elettronico utilizzato per trasformare tensione e corrente continue in grandezze elettriche alternate.

Le tipologie di inverter sono tre e differiscono in base alla forma dell'onda da essi prodotta: ad onda quadra, ad onda sinusoidale modificata, ad onda sinusoidale pura.

L'inverter ad onda quadra è la tipologia più semplice ed economica, che permette di generare una semplice onda quadra, piena quindi di armoniche, che lo rende utilizzabile solamente per carichi resistivi; la seconda tipologia, quello ad onda modificata, utilizza il valore nullo come terzo livello di tensione, per migliorare il comportamento e renderla compatibile con carichi capacitivi ed in parte anche induttivi. L'onda sinusoidale pura approssima fedelmente una sinusoide attenuando il contenuto armonico, è la più complessa e costosa ma può alimentare tutti i tipi di carichi.



FIGURA 8 - TIPOLOGIE DI ONDE IN USCITA DA UN INVERTER

L'inverter può essere utilizzato per vari scopi, come regolare velocità e coppia di motori elettrici variandone ampiezza e tensione dell'alimentazione, o alimentare carichi convenzionali (230Vac) partendo da una sorgente continua, come nel caso di camper e barche.

Nel caso degli inverter per il fotovoltaico, il compito principale è quello di trasformare la tensione continua prodotta dal campo fotovoltaico in tensione alternata che rispetti gli standard di rete, in modo da poter alimentare i carichi convenzionali ed eventualmente anche la linea del gestore. L'inverter utilizza la rete come accumulatore illimitato, prelevando l'energia necessaria e immettendo quella in eccesso in base alla necessità.

L'inverter può essere connesso seguendo tre topologie di impianto diverse (*figura 9*): ad inverter centrale, a stringa di inverter, ad inverter integrato. Il primo è utilizzato principalmente per grandi impianti, nei quali l'utilizzo di un unico convertitore porta ad un netto risparmio economico. Ne è però svantaggiata l'efficienza, poiché tutte le stringhe sono connesse ad un unico MPPT che le gestisce nell'insieme; non si riesce quindi ad estrarre la massima potenza disponibile in ogni singola stringa. Questo problema non si presenta se si utilizzano le stringhe di inverter, dove ognuna ha il proprio MPPT dedicato che riesce a farla lavorare al massimo. Anche l'affidabilità è maggiore, poiché in caso di guasto non si interrompe l'intera produzione, ma solamente quella di una stringa. Alcuni pannelli, principalmente negli impianti più piccoli o in caso di esigenze particolari, dispongono di un inverter integrato: si ottiene da ognuno la massima produzione e si ha il massimo dell'affidabilità, anche se il costo in proporzione sale notevolmente.



FIGURA 9 - DA SINISTRA: INVERTER CENTRALE, STRINGA DI INVERTER, INVERTER INTEGRATO [7]

8-L'MPPT

8.1 - Utilità

Ai fini dell'utilizzo come generatore, si cerca di prelevare dal pannello fotovoltaico la maggiore potenza possibile. Dalla curva I(V), la potenza si ottiene calcolando il prodotto di tensione per corrente. Si può quindi ottenere la curva della potenza disponibile in funzione della tensione ai capi P(V); essa sarà differente per ogni valore di irraggiamento *(figura 10)*. Il punto di massima potenza disponibile (MPP) indicato in rosso si ha dove è massima l'area sottesa dal rettangolo avente come vertici l'origine e un punto della curva.



FIGURA 10 - CURVA P(V), IN SOVRAPPOSIZIONE ALLA CURVA I(V) PER TRE VALORI DI IRRAGGIAMENTO

L'MPP varia continuamente nel tempo in base ai parametri della cella, come irraggiamento e temperatura; è necessario che l'inverter regoli la sua impedenza in ingresso (dove è connesso l'array solare) per inseguire questo punto e far lavorare l'impianto a potenza prossima a quella di picco. Si utilizzano vari algoritmi chiamati MPPT, che si differenziano in base alla complessità, alla precisione e alla rapidità [8], [9], [10].

8.2 - Ombreggiamento parziale

Una situazione critica per l'MPPT è il caso di ombreggiamento parziale della stringa, che porta ad avere una curva con più di un massimo relativo. Ne sono esempi le figure seguenti, che rappresentano corrente disponibile e potenza prelevabile in funzione della tensione di ingresso ai capi di una stringa formata da tre pannelli. L'MPP è indicato da un cerchio rosso e si sposta in base al numero di pannelli in ombra e all'entità dell'ombreggiamento.

In *figura 11* si ha il caso ideale, con illuminazione uniforme su tutta la stringa. In *figura 12* si ha un pannello in ombra, che deve essere escluso per ottenere la massima potenza dagli altri due. Il punto di massima potenza si è spostato a tensione più bassa.



FIGURA 11 – CURVE I(V) E P(V) CON ILLUMINAZIONE IDEALE



FIGURA 12 - CURVE I(V) E P(V) CON UN PANNELLO IN OMBRA

Nelle figure successive abbiamo la possibilità che due pannelli si trovino in ombra. In base alla differenza di illuminazione tra i pannelli può essere conveniente escluderne uno *(figura 13)* o entrambi *(figura 14),* diminuendo ulteriormente la tensione in ingresso.



FIGURA 13 - UN PANNELLO IN OMBRA, UNO LEGGERMENTE IN OMBRA



FIGURA 14 - DUE PANNELLI IN OMBRA

Considerando una stringa composta da tre pannelli in serie simulati attraverso Matlab Simulink, interessata da un'ombra che copre un pannello per poi riscoprirlo nel giro di 20 minuti, si semplifica la variazione di irraggiamento come la spezzata in *figura 15*. L'irraggiamento passa da $1000W/m^2$, a $400W/m^2$ e nuovamente a $1000W/m^2$.



Quando uno dei pannelli diminuisce di molto il proprio contributo l'MPPT cambia punto di lavoro, diminuendo la tensione e portando la cella ombreggiata ad essere esclusa tramite il diodo di bypass, in modo da prelevare il massimo dai pannelli restanti. La tensione può essere poi ripristinata non appena le condizioni torneranno ad essere favorevoli. La curva di tensione risultante è quella in *figura 16*, dove è stato applicato l'MPPT di tipo PSO di cui tratteremo in seguito, con le oscillazioni verticali dovute alla ricerca di nuovi punti di massimo. Nella realtà si usano tempi di intervento più lunghi, che sono però stati accorciati nella simulazione per rendere l'algoritmo più veloce e mostrare meglio il suo funzionamento.



FIGURA 16 - ANDAMENTO DELLA TENSIONE CON MPPT (DI TIPO PSO)

La potenza prelevata è visibile in verde in *figura 17*; la riga orizzontale a 1335W indica la massima potenza a $1000W/m^2$.



L'importanza dell'MPPT è visibile dall'andamento della potenza prelevata in sua assenza. Sempre in *figura 17* è visibile in arancione la potenza che sarebbe stata nel periodo di bassa irradianza se avessimo lasciato la tensione d'ingresso fissa alla V_{mppt} calcolata per $1000W/m^2$; la linea rosa è il risultato della resa in pieno sole con la tensione calcolata per $400W/m^2$. Si nota che senza un inseguimento attivo si soffrono grossi cali di potenza.

9 – Algoritmi

9.1 - Perturb & Observe

L'algoritmo Perturb & Observe (*figura 18*) consiste nel variare leggermente lo stato del sistema modificando la tensione ai capi della stringa di un valore predefinito, andando poi a misurare la variazione di potenza che ne deriva. Se la potenza aumenta, si prosegue nella direzione scelta, se la potenza tende a diminuire, si inverte il verso della perturbazione.



FIGURA 18 - ALGORITMO PERTURB & OBSERVE [19]

Arrivati al punto di massimo, ad ogni perturbazione si avrà un calo di potenza associato e l'algoritmo oscillerà intorno ad esso senza stabilizzarsi.

L'algoritmo è molto funzionale e permette di raggiungere la vetta della curva, tuttavia non è esente da problemi. In base al valore della perturbazione applicata bisogna scegliere se privilegiare la rapidità di esecuzione o la precisione: un valore piccolo infatti rallenta di molto l'aggancio, mentre un valore grande causa marcate oscillazioni intorno al punto di massimo [11]. L'algoritmo soffre inoltre le rapide variazioni di irraggiamento, poiché se la variazione di potenza misurata durante l'osservazione è maggiore di quella dovuta allo spostamento dell'algoritmo, questa può portare alla scelta della direzione sbagliata, allontanandosi ulteriormente dal punto di massimo [12]. Inoltre, in caso di ombreggiamento parziale che forma una curva con più di un massimo relativo (*figure 12, 13, 14*), la ricerca rischia di stabilizzarsi intorno ad uno di essi senza raggiungere il massimo assoluto.

9.2 - INCREMENTAL CONDUCTANCE

L'algoritmo a conduttanza incrementale confronta la variazione di tensione imposta e la variazione di corrente che ne consegue [13]. Partendo dal presupposto che una pendenza positiva della curva P(V) indica una direzione crescente per la potenza e una pendenza negativa l'opposto, si avrà:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \qquad \text{per } V = V_{\text{mpp}}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \qquad \text{per } V < V_{\text{mpp}} \qquad (6)$$

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

con

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + \frac{V(dI)}{dV} \cong I + \frac{V\Delta I}{\Delta V}$$
(7)

si ottengono le seguenti relazioni:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \qquad \text{per } V = V_{\text{mpp}}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \qquad \text{per } V < V_{\text{mpp}} \qquad (8)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \qquad \text{per } V > V_{\text{mpp}}$$

Confrontando il valore della conduttanza (1/resistenza) misurata nel punto di lavoro attuale e quella incrementale dovuta allo spostamento effettuato, si può capire se ci si trova in un punto con tensione maggiore, uguale o minore rispetto alla tensione di MPP, e quindi scegliere la direzione da seguire per avvicinarsi ad essa, raggiunta la quale l'algoritmo si ferma fino alle successive variazioni (figura 19).



FIGURA 19 - ALGORITMO A CONDUTTANZA INCREMENTALE [17]

9.3 - FRACTIONAL OPEN-CIRCUIT VOLTAGE

L'algoritmo Fractional Open-Circuit Voltage si basa sul fatto che la tensione nel punto di massima potenza è legata da un fattore di proporzionalità alla tensione a circuito aperto.

$$V_{mpp} = k * V_{oc}$$

Il parametro k dipende dalla tipologia di pannello. Una volta misurata la tensione a circuito aperto V_{oc} , si può ricavare la V_{mpp} . Per effettuare questa misurazione è necessario un dispositivo che sconnette la stringa per il tempo necessario ogni volta che va effettuata la misura. Ciò comporta però un istantaneo azzeramento della potenza prodotta.

9.4 - PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

L'algoritmo Particle Swarm Optimization, o PSO, è un algoritmo di ottimizzazione e ricerca derivato dall'osservazione della natura. Osservando il movimento di gruppi di animali come sciami di insetti, banchi di pesci, o stormi di uccelli, si può osservare che essi si muovono seguendo delle precise logiche [14]. Andando a guardare il singolo individuo, esso decide come muoversi in modo da seguire la direzione del gruppo, non allontanandosi ma mantenendo la giusta distanza dagli altri. Per regolare la sua direzione e velocità si basa sulle proprie esperienze e su quelle dell'intero gruppo, sfruttando gli altri e contribuendo alla ricerca della direzione migliore da seguire.

L'algoritmo identifica ogni singolo animale in una particella, caratterizzata da proprie posizione e velocità, che si muove coerentemente con le altre alla ricerca del punto che massimizza la funzione obiettivo, che nel caso di un MPPT è la massima potenza ottenuta. Per fare ciò, l'algoritmo muove una particella alla volta nello spazio di ricerca, testando cioè possibili valori di tensione, misurando la potenza ottenuta e tenendo traccia sia della posizione migliore assoluta, sia della migliore di ogni singola particella.

Ogni particella varia la propria posizione considerando la propria posizione e velocità precedente, la distanza che la separa dal suo punto migliore trovato (*pBest*) e la distanza dal punto migliore trovato da tutto il gruppo di particelle (*gBest*). Ad ogni parametro è assegnato un peso: w quantifica l'inerzia associata al movimento della particella, $c_1 e c_2$ l'importanza da associare ai punti *pBest* e *gBest*.



FIGURA 20 - PSO, MOVIMENTO DELLE PARTICELLE

La formula di aggiornamento della posizione è la seguente:

$$p_i^{t+1} = p_i^t + v_i^{t+1} (9)$$

con

$$v_i^{t+1} = w * v_i^t + c_1 * rand_1^t * (pBest_i^t - p_i^t) + c_2 * rand_2^t * (GBest_i^t - p_i^t)$$
(10)

La scelta dei parametri è molto importante: una velocità troppo alta porta ad un algoritmo instabile che fatica a convergere, una velocità troppo bassa lo rende troppo lento [15].

È un algoritmo molto efficiente, algebricamente semplice e che necessita di pochi parametri; ne esistono diverse varianti [16].

9.5 - Importanza degli algoritmi

La differenza chiave tra i vari algoritmi MPPT non è il tempo necessario al primo allineamento con il punto di massimo, trascurabile se valutato sul lungo periodo come nel caso di un'intera giornata, ma la prontezza a reagire ad improvvisi cambiamenti della curva P(V) dovuti a repentine variazioni di irraggiamento, come ad esempio nuvole sporadiche. Inoltre, un buon MPPT deve essere in grado di cambiare posizione quando il punto di massimo attuale, pur rimanendo un massimo relativo e quindi a derivata nulla, viene superato da un altro. Queste variazioni possono essere dovute a fattori molto lenti, come piante o elementi architettonici che gradualmente mettono in ombra parte dell'impianto. Quando la curva P(V) passa per esempio da quella di *figura 13* a quella di *figura 14* o viceversa, l'inverter deve variare nettamente la sua tensione in ingresso, in modo da prelevare sempre la massima potenza disponibile.

10 – IMPLEMENTAZIONE

10.1 - CIRCUITO

Per la sperimentazione è stato realizzato un apposito circuito Simulink (*figura 21*), composto da tre pannelli fotovoltaici SunPower SPR-X20-445-COM in serie. Ogni pannello è formato da 128 celle in serie e caratterizzato da una tensione a circuito aperto di 90.5V, un MPP posizionato a 76.7V con 5.8° disponibili, per una potenza massima di 445W. È uno dei pannelli più potenti e costosi in circolazione ma, poiché simularlo non costa nulla, è stato scelto senza troppe remore. I tre pannelli in serie possono raggiungere una tensione massima a circuito aperto di 271.5V ed erogare al massimo 1335W. I parametri in ingresso richiesti dal modello sono la temperatura, mantenuta fissa per tutti a 25°C poiché la sua variazione ha un effetto minimo se confrontato con la variazione dell'irradianza; quest'ultima verrà infatti mantenuta costante a 1000 W/m^2 in due dei tre pannelli e variata in uno dei tre per simulare un ombreggiamento non uniforme e lo squilibrio che ne consegue.

Ogni pannello dispone di un diodo di bypass che entra in conduzione in caso di marcata diminuzione nella produzione, nel nostro caso quando il pannello è raggiunto da un'irradianza troppo bassa rispetto agli altri.



FIGURA 21 - CIRCUITO SIMULINK DELL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO

La tensione e la corrente in uscita dalla stringa vengono lette da due blocchi di misura e, poiché la simulazione è svolta a tempo continuo, è presente un blocco di memoria per evitare un feedback istantaneo. I dati acquisiti sono elaborati dalla funzione Matlab appositamente realizzata che simula il comportamento di un MPPT con algoritmo PSO e attraverso un generatore ideale di tensione provvede a forzare la tensione ai capi dei pannelli. Per avere un funzionamento ottimale la potenza prodotta deve essere la maggiore possibile, segno di una migliore resa dell'MPPT a parità di impianto hardware.

La funzione MPPT è rappresentata nel flow chart seguente.



FIGURA 22 – ALGORITMO MPPT CON PSO

10.2 - CODICE MATLAB

Il codice corrispondente è il seguente:

function [V mppt, P out] = my PSOv1(Vpv,Ipv) Np = 3:% numero particelle = numero pannelli Voc = 90.5: % V open circuit singolo pannello % Inizializzazione *persistent initialized;* % indica se le variabili zono inizializzate persistent V best % migliore posizione di ogni particella persistent Pow best; % migliore potenza di ogni particella persistent G best; % posizione di mogliore potenza globale % migliore potenza ottenuta globale persistent Pow G best; % inerzia persistent w; % peso pBest *persistent c1;* % peso gBest *persistent c2;* % vettore posizioni persistent pos; % vettore velocità persistent vel; % indice particelle persistent i; % attesa tra una iterazione e l'altra persistent attesa; *if (isempty (initialized))* % inizializzazione variabili *initialized* = 1*;* Pow best = zeros(1, Np);G best = Voc * Np / 2;Pow G best = 0: w = 0.4; c1 = 1.2: c2 = 1.2;pos = 0.75 * Voc * (1 : Np);V best = pos; *vel* = *zeros(1, Np);* i = 1;V mppt = pos(1);P out = 0; attesa = 1;return; end % Attesa di 50 iterazioni prima di variare il punto if (attesa ≥ 1 && attesa ≤ 50) V mppt = pos(i); $P_out = V_mppt * Ipv;$ attesa = attesa + 1;return; end attesa = 1; *Pow* now = Vpv * Ipv;% calcolo potenza P out = Pow now;% potenza attuale

% Aggiornamento valore di pBest if $(Pow \ now > Pow \ best(i))$ *Pow* best(i) = Pow now; V best(i) = pos(i);end vel(i) = aggiorna vel(vel(i), pos(i), V best(i), G best); $pos(i) = aggiorna \ pos(pos(i), vel(i));$ if (i == Np) % se sono all'ultima particella aggiorno gBest [M, j] = max(Pow best);if $(M > Pow \ G \ best)$ *Pow* G *best* = M; G best = V best(j); end end i = i + 1;% incremento indice particella attuale if (i > Np) i = 1;end V mppt = pos(i);P out = V mppt * Ipv;% Aggiornamento valore velocità function vel upd = aggiorna vel(vel, pos, P best, G best) vel upd = w * vel + c1 * rand * (P best - pos) + c2 * rand * (G best - pos);end % Aggiornamento posizione attuale function pos upd = aggiorna pos(pos, vel)pos upd = pos + vel;if (pos upd < 0)pos upd = 0;end if (pos upd > Voc * Np)pos upd = Voc * Np;end end return;

```
end
```

La posizione iniziale delle particelle è scelta a distanza di 0,75 * Voc, poiché la tensione di MPP è a circa 0.72-0.80 * Voc e a seconda di quanti pannelli sono ombreggiati, di conseguenza esclusi, la tensione obiettivo si troverà in prossimità di multipli di questo valore.

10.3 - SIMULAZIONE STATICA

Come prima simulazione si valuta l'allineamento dell'MPPT con il punto di massima potenza nel caso statico. Uno dei tre pannelli è illuminato da un flusso di $400W/m^2$ mentre gli altri due lavorano in piena illuminazione a $1000W/m^2$. Sono state testate diverse combinazioni dei parametri per misurare sperimentalmente quelli che massimizzano l'energia prodotta. In ogni prova è stato calcolato l'ITAE, (eq. 11) l'integrale dell'errore moltiplicato per il tempo trascorso, un parametro che permette di dare minor peso ai transitori che si estinguono rapidamente e di considerare maggiormente gli errori persistenti, cioè quelli che portano poi a una maggiore perdita energetica.

$$\int_0^T |e(t)| * t \, dt \tag{11}$$

Sono stati valutati anche l'errore percentuale tra la tensione finale e quella dell'MPP, la percentuale della potenza ottenuta in proporzione alla massima prelevabile e l'efficienza energetica in un intervallo di tempo normalizzato. La durata reale di questo intervallo dipenderà in fase implementativa dalla frequenza di lavoro dell'MPPT, e si potranno regolare la frequenza di esplorazione e l'attesa tra una esplorazione e l'altra.

Inizialmente è stato fatto variare il parametro w, mantenendo costanti i parametri c_1 e c_2 ad un valore di 1.2. Sono presenti le *figure 23, 24, 25*, rispettivamente con w = 0.1, w = 0.4, w = 0.8, per valutare graficamente le entità e la tipologia delle oscillazioni al variare di w. Si può dedurre che una maggiore inerzia porta a oscillazioni più durature nel tempo ritardando l'aggancio del punto di massimo, mentre nella prima immagine, la scelta di w = 0.1 non porta il PSO ad allinearsi con il valore massimo, e dopo un breve transitorio non si ottiene un risultato preciso. Conviene scegliere il valore minimo che permetta però di raggiungere con una buona precisione il punto di massimo, dato che valori troppo bassi diminuiscono la tendenza delle particelle a continuare la ricerca e trovare quindi valori migliori.













Dalla tabella sotto si evince che con w = 0.1 si hanno errori molto grandi dovuti, come detto in precedenza, all'inerzia troppo bassa che non permette un'accurata esplorazione. A partire da w = 0.2 si arriva ad un risultato prossimo alla perfezione, con un errore in tensione quasi nullo e una potenza finale pari quasi al 100%. Più si tende ad aumentare l'inerzia oltre questa soglia, più si sale con il tempo necessario ad agganciare il punto di massimo, con oscillazioni che portano ad aumentare l'ITAE e a diminuire sempre più l'energia ottenuta. Il valore migliore è quindi w = 0.2, che coniuga al meglio le necessità di avvicinarsi al meglio ed il prima possibile all'MPP.

I valori ottimali presi come riferimento con i parametri di irradianza specificati sopra sono 152.8V per la tensione, che moltiplicata per una corrente di 5.79A porta ad una potenza massima ottenibile di circa 885W; essi sono stati calcolati grazie all'ausilio dello strumento Simulink power_PVArray_PartialShading.

Parametri al	ITAE	Tensione	Errore tensione	Potenza	Potenza	Energia resa
variare di w		finale	finale	finale	finale/Pmax	per t = [0-1]s
$c_1 = c_2 = 1.2$						
<i>w</i> = 0.1	4.06	148.1V	3.08%	878W	99.14%	98.1%
<i>w</i> = 0.2	0.52	152.8V	<1‰	885W	≈100%	98.86%
<i>w</i> = 0.3	0.58	152.8V	<1‰	885W	≈100%	98.74%
<i>w</i> = 0.4	0.68	152.8V	<1‰	885W	≈100%	98.56%
w = 0.8	2.89	152.8V	<1‰	885W	≈100%	96.62%

Ottenuto il miglior valore per w, si passa a valutare al meglio i valori di c_1 e c_2 . Essi sono stati variati mantenendoli uguali tra loro, fissando w a 0.2. Nelle figure seguenti (26, 27, 28) sono presenti le simulazioni della V(t) con $c_1 = c_2$ per valori pari a 0.2, 1.4, 2.Si può notare che con un valore troppo basso le tre particelle tendono ad essere poco attratte dall'influenza del *gBest*, salvo poi raggiungerlo ed arrivare ad una convergenza con il trascorrere del tempo. Per valori crescenti la tensione tende sempre più rapidamente all'MPP, ma per valori eccessivi si hanno oscillazioni ampie e prolungate nel tempo, dovute all'eccessiva tendenza delle particelle a seguire le migliori posizioni, proprie e del gruppo.











FIGURA 28 - ANDAMENTO DI V(T) CON $c_1=c_2=2$

Dalla tabel	la seguente	si può nota	re numerica	mente il r	nassimo o	li energia	resa per
$c_1 = c_2 = 1.4$	che, unita	al minore	ITAE, rende	questo v	alore il pi	iù adatto a	al nostro
scopo.							

Parametri al	ITAE	Tensione	Errore	Potenza	Potenza	Energia
variare di $c_1=c_2$,		finale	tensione	finale	finale/Pmax	resa per
$\operatorname{con} w = 0.2$			finale			t=[0-1]
$C_1 = C_2 = 0.2$	2.77	152.6V	0.13%	885W	99.94%	96.28%
$C_1 = C_2 = 0.5$	5.42	147.4V	3.53%	876W	98.89%	97.33 %
$C_1 = C_2 = 0.8$	0.56	152.8V	<1‰	885W	≈100%	98.75%
C1=C2=1	0.57	152.8V	<1‰	885W	≈100%	98.77%
C ₁ =C ₂ =1.2	0.52	152.8V	<1‰	885W	≈100%	98.86%
C ₁ =C ₂ =1.3	0.51	152.8V	<1‰	885W	≈100%	98.87%
C1=C2=1.4	0.49	152.8V	<1‰	885W	≈100%	98.91%
C ₁ =C ₂ =1.5	0.58	152.8V	<1‰	885W	≈100%	98.73%
$C_1 = C_2 = 2$	1.43	152.8V	<1‰	885W	≈100%	97.49%

10.4 - SIMULAZIONE DINAMICA

Con lo scorrere del tempo nel PSO le particelle convergono al punto di massimo con oscillazioni decrescenti che renderebbero necessario variare la tensione di lavoro di ampiezze sempre minori, alla ricerca di una posizione migliore. In realtà, arrivati all'obiettivo con una buona precisione, non ha senso perseverare con la ricerca e si può interrompere l'algoritmo per eliminare ogni oscillazione. È stato scelto di arrestare l'algoritmo una volta che tutte le particelle sono racchiuse in un intervallo ampio l'1‰ del valore della potenza massima trovata.

Per permettere all'algoritmo di seguire il punto di massimo in caso di variazioni della curva è però necessario rilanciarlo. È stata eseguita una simulazione per valutare se le variazioni nella potenza misurata possono essere utilizzate per rilevare un cambiamento della curva, ma si è arrivati alla conclusione che all'aumentare dell'irradianza su un pannello in stato di bypass, la potenza nel punto misurato viene sorpassata dalla potenza nel nuovo punto di massimo senza causare variazioni di potenza apprezzabili nel vecchio punto di lavoro. Per potersi quindi accorgere della presenza di un nuovo massimo e della necessità di cambiare punto di lavoro è stato scelto di sondare periodicamente l'intero spazio di ricerca, rilanciando da zero l'algoritmo.

La parte di algoritmo aggiunta è la seguente, nella quale si imposta un flag per indicare il raggiungimento del punto di stabilità (che viene poi utilizzata per interrompere l'algoritmo), e una temporizzazione per il riavvio:

```
if (max(Pow_now) - min(Pow_now) < Pow_G_best * 0.001)
    stabile = 1;
end
if (stabile == 1 && attesa > 5000)
    [reset delle variabili utilizzate]
end
```

La reimpostazione avviene rilanciando la prima e l'ultima particella (nel caso esse siano tre, altrimenti andrebbero rilanciate tutte tranne una) con velocità pari a 1.2 * Voc, un valore scelto empiricamente che permette di posizionarsi oltre eventuali punti di massimo adiacenti per poterli valutare durante la convergenza delle particelle. Il risultato,

effettuato inseguendo la curva di irradianza vista precedentemente in *figura 15*, è il seguente, con parametri w = 0.2, c1 = c2 = 1.4.



10.5 - CONFRONTO CON P&O

L'algoritmo PSO è stato confrontato con un MPPT operante con l'algoritmo Perturb & Observe. Sono state eseguite una simulazione statica ed una dinamica con lo stesso impianto fotovoltaico delle simulazioni precedenti. Nella simulazione statica, che punta a misurare l'efficienza nel primo allineamento con il punto di massimo per un impianto non ombreggiato, il P&O si è dimostrato migliore, come prevedibile, poiché tende immediatamente verso l'obiettivo e con pochissime oscillazioni.



Se si confrontano numericamente i dati risultanti dagli esperimenti, si può notare che, nonostante i buoni risultati raggiunti dall'algoritmo PSO, il Perturb & Observe sembra nettamente migliore.

Tipo MPPT	ITAE	Tensione	Errore tensione	Potenz	Potenza	Energia resa per
		finale	finale	a finale	finale/Pmax	t=[0-1]
PSO	0.49	152.8V	<1‰	885W	≈100%	98.91%
P&O	0.18	152.8V	<1‰	885W	≈100%	99.76%

Nello specifico, la simulazione è stata svolta per un breve periodo e la differenza tra i due algoritmi è minima e destinata a diminuire con l'aumentare del periodo preso in esame. Entrambi gli algoritmi, al termine della ricerca, agganciano perfettamente il punto di massima potenza, e ogni valore di errore presente nella tabella sopra riportata verrà disperso su tutto l'intervallo di tempo per il quale il punto di massimo rimarrà costante.

La principale differenza tra i due algoritmi è presente nel caso dinamico, come nella situazione di ombreggiamento già presa in esame. L'algoritmo di P&O si regola per mantenere la massima potenza nell'intorno del punto di lavoro, ma non è in grado di

distinguere se esso è fermo su un massimo relativo. L'andamento della tensione comandata dal P&O è visibile in blu in *figura 32*, e si può notare che, se paragonata alla tensione del PSO, è molto meno variabile.



Questo errore si traduce in una grossa perdita energetica visibile in *figura 33*, nella quale la curva blu percorsa dal P&O è quasi prossima alla curva verde della potenza prelevabile in assenza di MPPT, con una tensione di ingresso costante. Nel caso di ombreggiamento localizzato si può quindi apprezzare la migliore resa di un algoritmo di tipo PSO (curva grigia).



11 – CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha portato ad approfondire i fondamenti di un impianto fotovoltaico, a partire dalla cella di silicio e da ciò che ne rende possibile il funzionamento, fino ad arrivare al pannello. È stato quindi analizzato il componente elettronico principale in un impianto fotovoltaico, l'inverter, che permette di rendere utilizzabile l'energia prodotta.

Sono molti i fattori che concorrono a determinare il rendimento di un impianto fotovoltaico, e ognuno di essi va ottimizzato per avere la massima quantità di energia disponibile a parità di superficie utilizzata o di spesa effettuata. È possibile però avere un notevole incremento delle prestazioni a costo quasi zero, ottimizzando la parte software che gestisce l'MPPT. L'MPPT permette infatti di prelevare la massima potenza istantanea disponibile dalla stringa, interfacciando l'inverter con una impedenza d'ingresso precisa e costantemente regolata. Normalmente la ricerca del punto di massima potenza è un'operazione relativamente semplice e che non necessita di particolari attenzioni, ma esistono situazioni che la rendono più complessa, come nel caso di un impianto parzialmente ombreggiato. L'MPPT deve ricercare il massimo lungo una curva che ha più di un massimo relativo e che può variare rapidamente.

Il PSO è un algoritmo di ottimizzazione che ben si presta allo scopo, poiché permette di scansionare rapidamente lo spazio di ricerca senza cadere in errore in caso di curva più complessa. Per valutarne sperimentalmente la validità e la possibilità di applicazione sono state eseguite varie simulazioni su Matlab Simulink, con un impianto fotovoltaico costituito da una stringa di tre pannelli.

Attraverso vari esperimenti sono stati trovati i parametri più adatti per il particolare contesto, che hanno massimizzato la velocità dell'algoritmo senza però pregiudicarne la sua precisione. È stata eseguita una simulazione ad illuminazione costante, con due pannelli totalmente esposti al sole e uno parzialmente in ombra, per valutare l'efficacia del PSO nell'allineamento con il punto di massimo. Ne è risultata una rapida convergenza al punto, anche se meno efficiente rispetto al classico algoritmo Perturb & Observe, poiché quest'ultimo tende rapidamente all'obiettivo senza le oscillazioni presenti invece nel PSO.

È stata effettuata anche una simulazione nel caso dinamico, con l'algoritmo chiamato a inseguire una netta variazione di illuminazione su uno dei tre pannelli. Per permettere di inseguire una tale variazione, è necessario rilanciare l'algoritmo azzerandolo, eseguendo una nuova ricerca centrata nell'ultimo punto trovato. In questo modo il PSO si è mostrato molto valido nell'inseguimento del punto in costante e ampio movimento. In situazioni come queste si nota l'efficacia dell'algoritmo, poiché la stessa simulazione eseguita con il P&O porta ad una perdita del punto di massimo, seguita da un importante calo nell'energia prelevata dall'impianto.

L'algoritmo PSO è risultato una valida opzione per la ricerca e l'inseguimento del punto di massimo in un inverter fotovoltaico, anche in caso di un impianto con ombreggiatura parziale, situazione che spesso mette in crisi algoritmi tradizionali come il Perturb & Observe.

BIBLIOGRAFIA

- K.N. NWAIGWE, P. MUTABILWA, E. DINTWA, An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids, "Materials Science for Energy Technologies", Volume 2, Issue 3, 2019.
- [2] R. RAJESH, M. CAROLIN MABEL, *A comprehensive review of photovoltaic systems*, "Renewable and Sustainable Energy Reviews", Volume 51, 2015.
- [3] J. J. NEDUMGATT, JAYAKRISHNAN K. B., UMASHANKAR S., VIJAYAKUMAR D., KOTHARI D.P., Perturb and Observe MPPT Algorithm for Solar PV Systems-Modeling and Simulation, 2011.
- [4] FILIPPO SPERTINO, Tecnologie Fotovoltaiche: Stato dell'arte, 2020.
- [5] NEELAM RATHORE, NARAYAN LAL PANWAR, FATIHA YETTOU & AMOR GAMA, A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications, "International Journal of Ambient Energy", 2019.
- [6] N. FEMIA, G. PETRONE, G. SPAGNUOLO, M. VITELLI, Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems, CRC Press, 2013.
- [7] VALERIO MICHIELAN, PAOLO TENTI, Analisi e sviluppo di una tecnica di controllo MPPT per convertitori boost basata su interpolazione lineare, 2011.
- [8] MOHAMED A. ELTAWIL, ZHENGMING ZHAO, *MPPT techniques for photovoltaic applications*, "Renewable and Sustainable Energy Reviews", Volume 25, 2013.
- [9] V. SALAS, E. OLÍAS, A. BARRADO, A. LÁZARO, Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems, "Solar Energy Materials and Solar Cells", Volume 90, Issue 11, 2006.

- [10] MACAULAY J., ZHOU Z., A Fuzzy Logical-Based Variable Step Size P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System, "Energies", 2018.
- [11] M. ALQARNI AND M. K. DARWISH, Maximum power point tracking for photovoltaic system: Modified Perturb and Observe algorithm, 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), London, 2012.
- [12] HANANE YATIMI, ELHASSAN AROUDAM, MPPT algorithms based modeling and control for photovoltaic system under variable climatic conditions, "Procedia Manufacturing", Volume 22, 2018.
- [13] I. V. BANU, R. BENIUGĂ AND M. ISTRATE, Comparative analysis of the perturband-observe and incremental conductance MPPT methods, 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, 2013.
- [14] JAMES KENNEDY, RUSSELL EBERHART, *Particle Swarm Optimization*, International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995.
- [15] KASHIF ISHAQUE, ZAINAL SALAM, MUHAMMAD AMJAD, SAAD MEKHILEF, An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)-Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation, IEEE, 2012.
- [16] M. ABDULKADIR, A. H. M. YATIM, S. T. YUSUF, An Improved PSO-Based MPPT Control Strategy for Photovoltaic Systems, "International Journal of Photoenergy", Hindawi Publishing Corporation, 2014.
- [17] seaward.com
- [18] alternative-energy-tutorials.com
- [19] mathworks.com