



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi delle metodologie di progettazione multi-obiettivo di convertitori SMPPT e sviluppo di un tool dedicato

G. Adinolfi, G. Graditi, A. Merola, V. Palladino

ANALISI DELLE METODOLOGIE DI PROGETTAZIONE MULTI-OBIETTIVO DI CONVERTITORI SMPPT E SVILUPPO DI UN TOOL DEDICATO

G. Adinolfi, G. Graditi, A. Merola, V. Palladino (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Denerazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: Ricerca su tecnologie fotovoltaiche innovative

Obiettivo: Sviluppo di tool di progettazione e studio di dispositivi attivi innovativi per convertitori smppt

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri ENEA



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 BACKGROUND.....	5
1.2 I VANTAGGI DI UNA CONCEZIONE DISTRIBUITA DEI SISTEMI DI GENERAZIONE FOTOVOLTAICA.....	5
1.3 LA PROGETTAZIONE DI CONVERTITORI SMART MAXIMUM POWER POINT TRACKING.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	6
3 ARCHITETTURE E CONFIGURAZIONI TOPOLOGICHE DI CONVERTITORI SMPPT.....	8
3.1 ARCHITETTURA "MASTER-SLAVE" DI CONVERTITORI SMPPT.....	8
4 METODOLOGIE DI PROGETTAZIONE MULTI-OBIETTIVO DI CONVERTITORI SMPPT.....	11
4.1 LA PROGETTAZIONE MULTI-OBIETTIVO.....	11
4.1.1 <i>La progettazione multi-obiettivo mediante algoritmi evolutivi</i>	11
4.2 METODOLOGIE DI PROGETTAZIONE MULTI-OBIETTIVO.....	13
4.2.1 <i>Multi-objective Optimization Evolutionary Algorithm</i>	13
4.2.2 <i>Multi-objective Genetic Algorithm</i>	14
4.2.3 <i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm</i>	15
4.2.4 <i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i>	16
4.2.5 <i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>	17
4.2.6 <i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm II</i>	18
5 FUNZIONI OBIETTIVO PER LA PROGETTAZIONE OTTIMIZZATA DI CONVERTITORI SMPPT.....	19
5.1 EFFICIENZA DEI CONVERTITORI SMPPT.....	19
5.2 AFFIDABILITÀ DEI CONVERTITORI SMPPT.....	22
5.2.1 <i>Connessione di tipo serie</i>	25
5.2.2 <i>Connessione di tipo parallelo</i>	26
5.2.3 <i>Connessione di tipo serie-parallelo</i>	26
5.2.4 <i>Affidabilità di convertitori SMPPT ponderata</i>	26
5.3 PREZZO DEI CONVERTITORI SMPPT.....	26
6 RET: RELIABLE ELECTRO THERMAL CONVERTER DESIGN TOOL PER APPLICAZIONI SMPPT.....	28
6.1 L'INTERFACCIA GRAFICA.....	28
6.2 LA STRUTTURA DEL PROGRAMMA.....	29
6.3 I DATI INIZIALI.....	30
6.4 SCELTA TOPOLOGIA CIRCUITALE.....	32
6.5 SELEZIONE RANDOM COMPONENTI ELETTRONICI DEL CONVERTITORE.....	33
6.6 ROUTINE DI PROGETTAZIONE ELETTRO-TERMICA.....	33
6.7 ROUTINE DI RELIABLE-THERMAL DESIGN.....	34
6.8 VALUTAZIONE ECONOMICA.....	34
6.9 ALGORITMO EVOLUTIVO PER LA PROGETTAZIONE MULTI-OBIETTIVO.....	34
7 CONCLUSIONI.....	36
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	37
9 INDICE DELLE FIGURE.....	39
10 INDICE DELLE TABELLE.....	40

Sommario

Il presente report "Analisi delle metodologie di progettazione multi-obiettivo di convertitori SMPPT e sviluppo di un tool dedicato" descrive le attività di ricerca svolte nell'ambito del PAR 2015 per la "Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio", e, nel dettaglio, del progetto di Ricerca su Tecnologie Fotovoltaiche Innovative.

L'obiettivo ultimo è quello di progettare convertitori Smart Maximum Power Point Tracking (SMPPT) "ottimi". Un convertitore Smart Maximum Power Point Tracking è un convertitore DC-DC che viene collocato a bordo di un modulo fotovoltaico o di un gruppo di moduli. Lo scopo è quello di massimizzare le prestazioni dell'intero sistema fotovoltaico, ottimizzando la potenza estratta da ciascun modulo fotovoltaico e rendendo i generatori indipendenti gli uni dagli altri onde evitare il decadimento del rendimento di stringa, e quindi di impianto, a fronte del malfunzionamento e/o guasto di un singolo pannello.

Il design dei convertitori Smart Maximum Power Point Tracking, anche denominati "ottimizzatori di potenza", rappresenta una fase cruciale e delicata sotto diversi aspetti. In primis, le specifiche richiedono alti valori di rendimento e affidabilità, ma anche un prezzo contenuto; si tratta di requisiti non semplici da perseguire contestualmente. A ciò bisogna aggiungere che il convertitore opera in punti di lavoro strettamente legati alle grandezze climatiche e, quindi, continuamente variabili nell'arco della giornata. Altro aspetto da non sottovalutare riguarda il fatto che il numero di componenti commerciali, tra cui individuare un set idoneo, è estremamente numeroso. La ricerca esaustiva di tutte le possibili combinazioni dei dispositivi disponibili al fine di pervenire alla progettazioni di soluzioni "feasible" potrebbe richiedere tempi molto lunghi.

In questo documento vengono, pertanto, presentate alcune metodologie di progettazione multi-obiettivo per selezionare un insieme di dispositivi idoneo alla realizzazione di un ottimizzatore di potenza DC-DC in grado di garantire alti livelli qualitativi ed un buon rapporto qualità/prezzo.

Il report è articolato in 6 capitoli. A valle della descrizione delle diverse fasi di ricerca riportata nei capitoli I e II, l'attenzione viene, poi, concentrata, nel capitolo III, sull'architettura ed i livelli gerarchici tra convertitori al fine di fornire soluzioni SMPPT che possano essere impiegate in contesti energetici diversi: impianti fotovoltaici, micro-grid, Net Zero Energy Building.

Segue, nel capitolo 4, una trattazione sui metodi di progettazione multi-obiettivo adottabili e, nel capitolo 5, lo studio delle funzioni di merito o funzioni di fitness in base alle quali valutare le prestazioni dei convertitori SMPPT. Viene, infine, presentata, nel capitolo VI, la struttura del tool di progettazione di convertitori SMPPT proposto. Reliable Electro-Thermal (RET) design tool è lo strumento software di ausilio al progettista nel design di soluzioni ottime di convertitori SMPPT caratterizzati da elevati livelli prestazionali in termini di rendimento ed affidabilità e ad un prezzo contenuto. L'idea è quella di individuare soluzioni che, a fronte di un modesto investimento economico, possano garantire la massimizzazione della produzione energetica e la continuità di esercizio di un'installazione fotovoltaica.

1 Introduzione

1.1 Background

Bisogna tener ben presente che le curve caratteristiche Potenza vs Tensione di un generatore fotovoltaico presentano un unico Maximum Power Point in cui le prestazioni del modulo sono massime. Il punto di massima potenza dipende da numerose variabili tra cui soleggiamento e temperatura che variano istante per istante, ma anche presenza di polveri, mismatch o ombre. Ai fini della massimizzazione della resa energetica dei generatori fotovoltaici, è necessario che essi lavorino sempre in corrispondenza del Maximum Power Point. Questo aspetto è particolarmente delicato se pensiamo che, oltre alle condizioni operative continuamente variabili, le prestazioni di un singolo modulo fotovoltaico risentono anche del comportamento degli altri generatori ad esso connessi. Niente ci assicura che i generatori fotovoltaici stiano effettivamente lavorando in corrispondenza del Maximum Power Point. Il guasto o l'ombreggiamento parziale o totale di uno dei moduli fotovoltaici che costituiscono la stringa possono inficiare le prestazioni dell'intero impianto. Il verificarsi di simili problematiche più volte al giorno o per diversi generatori del sistema fotovoltaico installato può causare una riduzione significativa della resa dell'installazione con conseguenti ricadute anche sul Return on Investment.

1.2 I vantaggi di una concezione distribuita dei sistemi di generazione fotovoltaica

Criticità come quelle descritte nel precedente paragrafo si verificano molto frequentemente. Per far fronte a tali situazioni, sono state ideate e proposte diverse architetture. C'è stato, infatti, il passaggio da una concezione centralizzata dell'installazione fotovoltaica a soluzioni di tipo distribuito. Dal caso in cui un unico convertitore DC-AC "convertiva e controllava" tutta la potenza dell'impianto si è passati alla soluzione in cui ogni stringa era controllata da un inverter fino alle ultime configurazioni di tipo distribuito che prevedono l'utilizzo di un convertitore dedicato ad ogni singolo generatore fotovoltaico. In tal modo, il convertitore Distributed Maximum Power Point Tracking (DMPPT) viene utilizzato per convertire la tensione in uscita dal generatore fotovoltaico in una tensione adatta a garantire il massimo trasferimento di potenza mediante l'adattamento d'impedenza e l'inseguimento, istante per istante, del Maximum Power Point. L'affermarsi di nuovi scenari energetici, quali micro reti, distretti e/o cluster energetici, Net Zero Energy Building ha determinato la necessità di avere a disposizione un sistema versatile capace di fornire anche servizi aggiuntivi rispetto alla funzione primaria di tracking. Così il convertitore DMPPT evolve diventando un dispositivo "intelligente" in grado, cioè, di monitorare le principali grandezze della produzione fotovoltaica, di trasmettere dati, di segnalare guasti o richiedere interventi di manutenzione, di attivare allarmi, etc.. Il convertitore ripensato in questo modo si identifica nella sua accezione "SMPPT" e rappresenta uno dei nodi di generazione e comunicazione delle nuove reti elettriche. Il vantaggio principale risiede nella migliore integrazione in rete della generazione fotovoltaica grazie al dialogo ed alla collaborazione che gli ottimizzatori SMPPT forniscono con Smart Meter, altri dispositivi di rete e sistemi di accumulo

1.3 La progettazione di convertitori Smart Maximum Power Point Tracking

La progettazione di convertitori SMPPT deve essere eseguita mediante opportune metodologie al fine di considerare i diversi aspetti tecnologici e sistemici. Il tradizionale approccio progettuale dei convertitori DC-DC consiste nell'identificazione dei componenti elettronici della topologia circuitale adatti al soddisfacimento delle specifiche in condizione operative note e fisse. Le condizioni di lavoro che caratterizzano gli ottimizzatori di potenza sono dipendenti, invece, dalle condizioni climatiche (irraggiamento, temperatura, velocità del vento) che variano continuamente nell'arco della giornata. Il convertitore SMPPT ha come funzione fondamentale quella di massimizzare la potenza del generatore fotovoltaico in tutte le condizioni di esercizio. Esso deve, quindi, garantire ottime prestazioni in tutte le possibili condizioni di funzionamento. Non è possibile, quindi, stabilire delle specifiche e richiederne la compliance in un unico caso specifico. Individuare, tra numerosissimi possibili componenti commerciali, il

set di dispositivi più idoneo rappresenta una fase molto delicata della progettazione. Ottenere un convertitore che assicuri buone prestazioni in tutte le condizioni operative è un'operazione molto complessa ancor di più se si considera che le funzioni di merito del dispositivo SMPPT sono "contrastanti" tra di loro. Si richiede, infatti, che i convertitori SMPPT siano caratterizzati da alti rendimenti, che il loro funzionamento sia affidabile nel lungo periodo e che il loro prezzo sia contenuto in modo da non incidere in maniera significativa sull'investimento complessivo dell'impianto fotovoltaico. Funzioni obiettivo, queste, difficilmente ottenibili in un unico convertitore. In realtà, adottando metodi e criteri di ottimizzazione multi-obiettivo è possibile, mediante algoritmi evolutivi, pervenire ad una soluzione in grado di soddisfare le specifiche richieste e garantire elevati standard qualitativi. Le funzioni di fitness adottate sono relative all'aspetto energetico, affidabilistico ed economico, ma, senza perdita di generalità, è possibile adottare anche funzioni di merito relative all'ingombro o al peso dell'ottimizzatore. Nel caso oggetto di studio, il tool informatico RET propone una progettazione incentrata sull'aspetto termico ed affidabilistico senza trascurare l'elemento economico.

2 Descrizione delle attività svolte

A valle di questa breve introduzione sulle problematiche della progettazione e sulle caratteristiche dei convertitori SMPPT si procederà con la descrizione delle attività svolte durante il primo anno dell'attività di ricerca. L'attenzione dei ricercatori è stata, in questo primo periodo, focalizzata sull'analisi di metodologie di progettazione multi-obiettivo di convertitori SMPPT. Tali metodologie saranno utilizzate nell'ambito del tool RET per il design di convertitori SMPPT ottimi, ossia in grado di garantire elevati livelli prestazionali ed un buon rapporto tra le performance energetiche e le risorse economiche impiegate. Nel dettaglio, l'attività è stata organizzata in quattro fasi successive, di seguito brevemente descritte.

- *Prima fase:* studio e analisi di architetture e configurazioni topologiche di convertitori SMPPT utilizzabili in diversi contesti energetici quali impianti fotovoltaici destinati ad utenze residenziali e/o industriali, micro reti elettriche in corrente continua, edifici o cluster di edifici a consumo energetico nullo.
- *Seconda fase:* studio e analisi delle principali metodologie di progettazione multi-obiettivo per i convertitori SMPPT. L'attenzione è stata concentrata su diversi algoritmi evolutivi mettendone in evidenza i punti di forza e i possibili elementi critici. In questa fase dell'attività di ricerca sono stati studiati i seguenti algoritmi: Multiobjective Evolutionary Algorithm, Multiobjective Genetic Algorithm, Non dominated Sorting Genetic Algorithm (I e II) e Strength Pareto Evolutionary Algorithm (I e II).
- *Terza fase:* definizione delle funzioni di merito o di fitness per la valutazione delle prestazioni di convertitori SMPPT. In questa fase sono state considerate le funzioni di merito inerenti il rendimento e l'affidabilità dell'ottimizzatore di potenza e la valutazione delle risorse economiche necessarie alla realizzazione del convertitore.
- *Quarta fase:* definizione delle routine e subroutine del tool RET per la progettazione di convertitori SMPPT "ottimi". In particolare, viene descritto lo schema del software proposto e le principali funzioni da implementare nelle routine e subroutine. Nel dettaglio, il software guida il progettista alla scelta di alcune opzioni tra cui quella dello scenario energetico, dell'architettura, della topologia da progettare. Il tool si avvale, poi, delle serie storiche di dati climatici (soleggiamento, temperatura ambiente, velocità del vento) monitorate da centraline meteo ed opportunamente acquisite in alcune località dell'Italia Meridionale. Il tool RET analizza la frequenza annuale delle diverse condizioni climatiche al fine di individuare le condizioni operative che si verificano con maggiore frequenza. Questi dati vengono utilizzati per

determinare la temperatura sul retro del generatore fotovoltaico, che risulta significativa ai fini del design del convertitore SMPPT, giacché porta congiuntamente in conto gli effetti dei diversi parametri meteorologici. Vengono, poi, definiti il ciclo elettro-termico e quello per la valutazione delle prestazioni affidabilistiche di ciascuna soluzione. Un algoritmo evolutivo provvede, poi, alla generazione di popolazioni di soluzioni fino a pervenire ad un insieme di possibili convertitori SMPPT. L'obiettivo finale è quello di sviluppare uno strumento di ausilio al progettista per l'individuazione della soluzione "ottima" di convertitore SMPPT tra le diverse soluzioni di progetto, senza la necessità di una ricerca esaustiva tra tutte le possibili combinazioni di componenti elettronici commerciali che richiederebbe tempi considerevoli.

3 Architetture e configurazioni topologiche di convertitori SMPPT

Negli ultimi anni, è stato possibile assistere all'affermarsi di nuovi scenari energetici quali micro reti elettriche in DC, reti intelligenti ed edifici a consumo zero. Contemporaneamente è aumentata la penetrazione della Generazione Distribuita da fonti rinnovabili. In questo scenario, il ruolo del convertitore DMPPT può essere differente. A seconda, infatti, che si decida di utilizzare tale ottimizzatore di potenza nell'ambito di una semplice installazione fotovoltaica con scambio su posto o in un Net Zero Energy Balance (NetZEB), il convertitore DMPPT può offrire servizi diversi. L'elettronica digitale montata a bordo dell'ottimizzatore determina il superamento del concetto di convertitore DMPPT e dell'affermarsi della nuova concezione di ottimizzatore "Smart DMPPT" ossia in grado di assicurare oltre alla sua funzione principale di inseguimento del Maximum Power Point (MPP) anche servizi aggiuntivi, quali monitoraggio e delle principali grandezze di produzione energetica, diagnostica di guasti e/o malfunzionamenti, azioni di riconfigurazione, etc.. Alla base di ciascuna di queste funzioni vi è uno scambio di dati. In dettaglio, il convertitore SMPPT si propone come stadio "intermedio" di acquisizione e comunicazione di informazioni. Negli impianti fotovoltaici installati in contesti residenziali e/o industriali, il convertitore SMPPT svolge il suo ruolo di tracker, ma si occupa anche di acquisire tensioni e correnti del modulo, di comunicare con gli altri dispositivi SMPPT, di segnalare guasti. In un NetZEB, invece, l'ottimizzatore smart può essere utilizzato sia per la generazione, sia per il monitoraggio dei consumi al fine di garantire, in ogni istante, un corretto balance. In una micro grid, il ruolo del convertitore SMPPT è, infine, anche quello di acquisire dati e informazioni che possono essere di utilità per altri dispositivi e sistemi di rete (meter, accumulatori, etc.)

3.1 Architettura "Master-Slave" di convertitori SMPPT

L'analisi delle connessioni fisiche e funzionali presenti nei diversi scenari energetici precedentemente considerati ha portato all'individuazione di una possibile architettura adottabile per i convertitori SMPPT. Si tratta di uno schema gerarchico in cui i convertitori SMPPT sono collocati a diversi livelli ed hanno ruoli diversi. Consideriamo un impianto fotovoltaico, quale può essere quello collocato sul tetto di una abitazione o di una fabbrica. In questo caso, ogni generatore fotovoltaico sarà dotato di un proprio ottimizzatore di potenza per l'inseguimento del MPP. Oltre alla sua funzione di inseguitore, il convertitore SMPPT effettuerà il monitoraggio, l'acquisizione e la comunicazione dei dati. Le informazioni trasmesse da ognuno dei convertitori SMPPT dell'impianto saranno collezionate da un convertitore SMPPT "collettore". Un'architettura che ben si adatta ad una simile configurazione è quella di tipo "Master-Slave" (Fig.1) in cui il convertitore "Master" inoltra ai dispositivi "Slave" richieste di dati di produzione energetica ed informazioni inerenti il loro corretto funzionamento. Il dispositivo SMPPT "Master" elabora, a sua volta, i dati che riceve per attivare specifiche funzionalità e/o azioni.

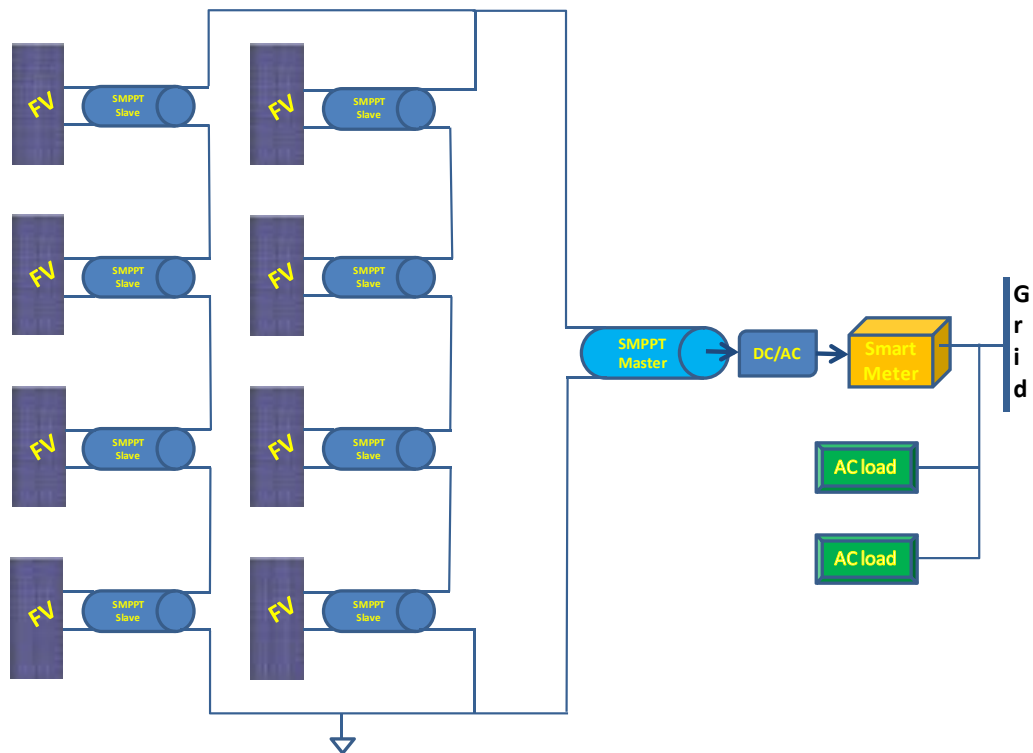


Figura 1. Architettura Master-Slave di convertitori SMPPT in un impianto fotovoltaico.

L'architettura Master-Slave di convertitori SMPPT risulta idonea anche per micro reti DC e per edifici o cluster di edifici a consumo zero. Come è stato rappresentato schematicamente in Fig. 2, in una micro rete DC, i convertitori SMPPT possono essere collocati sia nei punti di generazione, quali moduli fotovoltaici, celle a combustibile (FC), etc., sia in corrispondenza dei carichi.

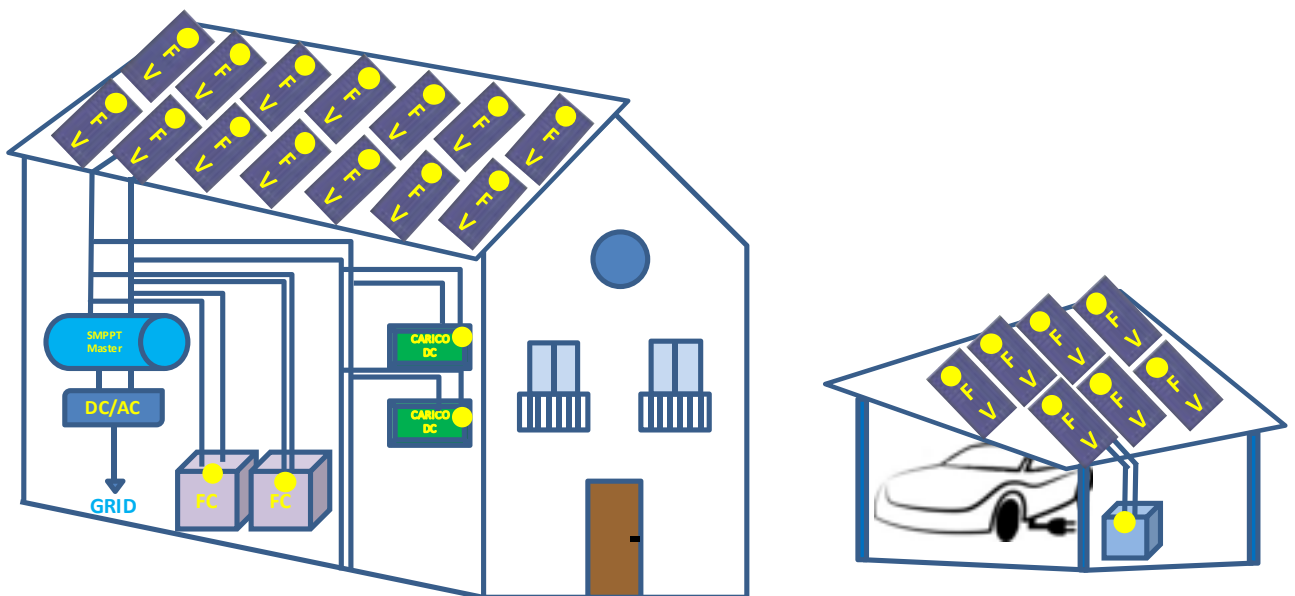


Figura 2. Architettura di convertitori SMPPT in una micro rete DC.

In questo modo, i dispositivi Slave comunicano al Master la loro condizione di funzionamento in tempo reale ed il Master elabora, a sua volta, i dati ricevuti al fine di comprendere quali strategie energetiche perseguire. Istante per istante, esso deve valutare e prendere opportune decisioni in riferimento alla

possibilità di consumare l'energia in DC disponibile, di immagazzinarla o di convertirla in AC mediante il convertitore DC-AC ed immetterla in rete. Il Master deve, poi, comunicare con il “contatore intelligente” (Smart Meter) al fine di accordarsi sul prelievo di energia o l'immissione in rete. A seconda della specifica posizione e del ruolo che il convertitore svolge nella micro rete, la tendenza sarà quella di sfruttare alcune specifiche funzioni messe a disposizione dall'elettronica montata a bordo dell'ottimizzatore e di non utilizzare o sfruttare poco delle altre. I convertitori SMPPT possono risultare utili anche nell'ambito dei Net ZEB (Fig.3). Distinguendo, infatti, tali dispositivi, anche in questo caso, in convertitori Master e convertitori Slave, l'interazione tra questi favorirà la comunicazione tra i diversi dispositivi di generazione e i carichi presenti nell'edificio al fine di ottenere un corretto balance tra energia prodotta e consumata istante per istante. Se, infatti, in tempo reale, i convertitori SMPPT Slave comunicano l'entità della produzione e le richieste energetiche dei carichi al Master, quest'ultimo può prendere adeguate decisioni nell'ottica del "bilanciamento dell'energia" dell'edificio. Ci saranno, quindi, istanti in cui il convertitore Master deciderà di assorbire energia dalla rete per mancante o insufficiente produzione interna all'edificio o al cluster di edifici. In altri momenti della giornata, esso deciderà, invece, di immettere energia in rete per assenza di domanda ed i sistemi di stoccaggio dell'energia risultano già carichi. Il Master assume, quindi, il ruolo di elemento "controllore e decisore" centrale. Le sue azioni sono intraprese su esigenze di carattere energetico e/o economico a seconda delle impostazioni scelte dall'utente.

E' bene sottolineare che il convertitore SMPPT rappresenta un dispositivo versatile in grado di attuare servizi aggiuntivi di ausilio all'utente e/o ai sistemi collegati alla rete elettrica. A ciò bisogna aggiungere che sia i dispositivi SMPPT di tipo Master, sia quelli di tipo Slave sono collocati in un apposito alloggiamento di ingombro contenuto sul retro dei moduli fotovoltaici, celle a combustibile, batterie o carichi, etc. e non determinano, quindi, alcuna alterazione dal punto di vista estetico dei sistemi di generazione, storage o assorbimento dell'energia, presenti in un edificio.

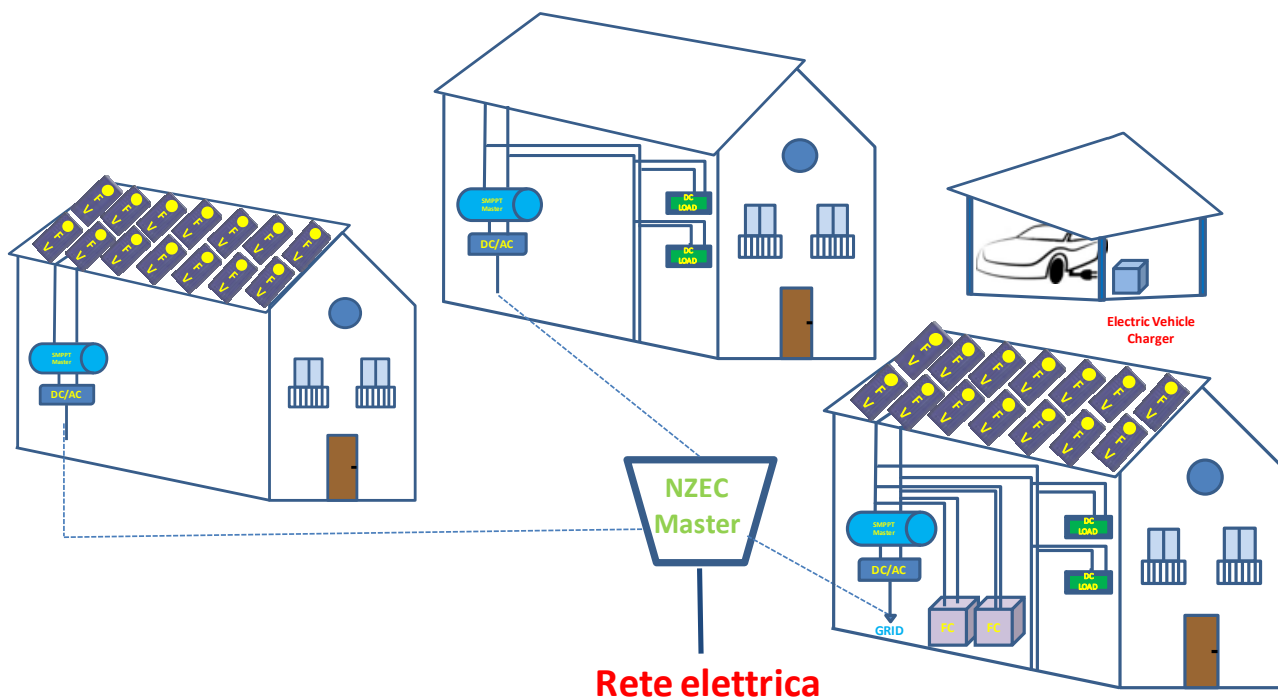


Figura 3. Architettura di convertitori SMPPT in un Net Zero Energy Cluster.

4 Metodologie di progettazione multi-obiettivo di convertitori SMPPT

4.1 La progettazione multi-obiettivo

I progettisti di convertitori SMPPT mirano ad ottenere dispositivi caratterizzati da elevati livelli prestazionali in termini di rendimento, affidabilità e prezzo. Come sottolineato anche nei precedenti capitoli, si tratta di specifiche "contrastanti" tra loro. Ciò significa che optare per un componente può migliorare il convertitore da un determinato punto di vista e, nello stesso tempo, peggiorare il soddisfacimento di uno degli altri requisiti di progetto.

Richiedere, infatti, che l'ottimizzatore assicuri elevati livelli prestazionali in termini di rendimento ed affidabilità, non sempre è in accordo con l'esigenza di mantenere il costo basso. Analogamente, optare per un dispositivo caratterizzato da tempi di risposta rapidi, non sempre è compatibile con la richiesta di un convertitore caratterizzato da basse perdite di potenza. E' necessario accettare una situazione di compromesso tra i diversi requisiti. Si tratta di riuscire ad individuare un set di componenti elettronici per una specifica topologia circuitale che risulti vantaggioso in modo da ottimizzare la progettazione del dispositivo SMPPT sotto diversi aspetti.

In questo documento vengono, pertanto, prese in considerazione diverse metodologie di progettazione multi-obiettivo, descrivendone le caratteristiche, i punti di forza e le possibili criticità. Negli ultimi anni, i metodi di ottimizzazione multi-obiettivo sono stati ampiamente utilizzati in ambito industriale. La loro diffusione è stata determinata ed incoraggiata anche dall'incremento dei calcolatori elettronici e soprattutto dal miglioramento delle prestazioni di questi calcolatori.

Un primo approccio multi-obiettivo è quello di tipo classico in cui si ha una riduzione del problema multi-obiettivo all'analisi di più problemi di ottimizzazione con un solo obiettivo. La soluzione viene, in questo caso, individuata fornendo un grado di preferenza tra gli obiettivi ed applicando una delle tecniche stocastiche o deterministiche di ottimizzazione mono obiettivo. In alternativa, è possibile applicare un ulteriore approccio basato sulla teoria degli ottimi di Pareto. In tal caso, nessuna preferenza viene espressa e, di conseguenza, non si perviene ad un'unica soluzione, ma ad un insieme di possibili soluzioni. Sarà, poi, il "progettista-decisore" ad individuare la soluzione più idonea tra tutte quelle disponibili in base alla sua esperienza, a richieste del committente e/o in base al requisito più stringente.

Numerose sono le metodologie di ottimizzazione multi-obiettivo presentate in letteratura. Nel prosieguo di questo documento vengono riportate le principali tecniche di ottimizzazione multi-obiettivo evidenziandone vantaggi e svantaggi. Saranno, nel dettaglio, analizzati gli approcci di tipo evolutivo. Numerosi sono le potenzialità applicative di questi algoritmi e, infatti, negli ultimi anni, il loro utilizzo per la soluzione di problemi di ottimizzazione è stato, in diversi ambiti, preferito all'approccio classico.

4.1.1 La progettazione multi-obiettivo mediante algoritmi evolutivi

Gli algoritmi evolutivi traggono ispirazione dalla Teoria di Evoluzione della specie di Darwin secondo la quale solo gli individui "più adatti" all'ambiente sono in grado di sopravvivere e riprodursi, trasmettendo alla generazione successiva le proprie caratteristiche.

Gli algoritmi evolutivi si sviluppano, quindi, a partire da una popolazione iniziale A_0 costituita da un certo numero di individui selezionati in maniera casuale. Viene, poi, valutata l'idoneità o fitness di ciascuna soluzione della popolazione iniziale per individuare "i genitori" migliori. Attraverso operazioni di riproduzione, ricombinazione, mutazione e selezione, viene generata, a partire da A_0 una "popolazione figlia" A_1 . Viene, a questo punto, ripetuta la valutazione della funzione fitness con la selezione degli individui "migliori". Iterando questo procedimento, si otterrà un individuo "ottimo" o una soluzione "ottima" del problema considerato. Ai fini della comprensione della procedura che caratterizza gli algoritmi generici si è parlato genericamente di funzione "fitness" (anche denominata funzione obiettivo), è bene sottolineare che, nel caso di algoritmi genetici multi-obiettivo, ogni singolo individuo viene "valutato" in base a due o più funzioni fitness.

Alla conclusione del ciclo iterativo, l'algoritmo evolutivo fornirà un insieme di soluzioni che rispettano il concetto di "ottimalità" secondo Vilfredo Pareto. Un punto è "ottimo" se, volendo diminuire una funzione obiettivo tra quelle che stiamo considerando in un particolare problema applicativo, si deve accettare un conseguente aumento di almeno una delle altre funzioni obiettivo considerate. A seconda che si tratti di un problema di massimizzazione o minimizzazione, saranno individuate le soluzioni non dominate cioè quelle soluzioni rispetto alle quali nessuna delle altre risulti contemporaneamente migliore per tutte le funzioni fitness considerate.

Il vantaggio degli algoritmi evolutivi rappresentato dalla capacità di gestire cospicue popolazioni di individui è certamente di grande ausilio nei problemi di ottimizzazione tipici degli ambiti applicativi dell'ingegneria. Avvalersi di uno strumento basato su algoritmi evolutivi risulta valido anche nel caso della progettazione di convertitori switching, come testimonia la letteratura di settore. In dettaglio, in [1] l'intento degli autori è quello di individuare la soluzione che garantisca la migliore efficienza. In [2] e [3] la potenza degli algoritmi genetici viene sfruttata per una ottimizzazione di tipo multi-obiettivo dove le funzioni di fitness sono, in questo caso, legate dalla minimizzazione dell'ingombro di un convertitore di potenza, alla minimizzazione del costo ed alla massimizzazione del rendimento. In ambito fotovoltaico, gli algoritmi evolutivi sono stati utilizzati per migliorare le caratteristiche e le prestazioni degli inverter [4]-[7]. Alla luce di quanto fin qui esposto, si ritiene che la progettazione di convertitori SMPPT con l'elevato numero di componenti elettronici utilizzabili, le funzioni obiettivo "contrastanti" e le condizioni operative continuamente variabili possa trarre giovamento dall'utilizzo di algoritmi evolutivi.

Si intende a questo punto, sottolineare la presenza, nel tool di progettazione oggetto di questa attività di ricerca, di elementi innovativi rispetto a quanto già presentato in letteratura. In dettaglio, il tool proposto permetterà di progettare convertitori SMPPT utilizzabili in diversi contesti energetici come impianti fotovoltaici per ambiti residenziali ed industriali, micro reti DC o Net Zero Energy Building (NZEB). La progettazione con ottimizzazione multi-obiettivo valuterà diverse funzioni di merito per esprimere quantitativamente l'idoneità di una specifica soluzione a funzionare in maniera efficiente ed affidabile senza un significativo impatto economico per una specifica installazione. Il processo iterativo implementato coinvolgerà, infatti, parametri come il rendimento ed il prezzo, già precedentemente utilizzati come grandezze da ottimizzare. A queste, sarà, aggiunta la grandezza "affidabilità" valutata secondo uno dei Reliability Prediction Model internazionalmente riconosciuti. E' bene sottolineare che, in questo caso, la funzione obiettivo relativa all'affidabilità, viene considerata fin dalle prime fasi del processo di design. Tale funzione di fitness non viene, come in molti altri progetti, valutata a posteriori, con il rischio di trovarsi di fronte a soluzioni altamente performanti dal punto di vista energetico, ma che potrebbero non assicurare una certa continuità di esercizio a causa di alti valori del tasso di guasto. Il Tempo di Guasto entra a far parte delle variabili coinvolte nella routine di progettazione elettro-termica alla stessa stregua delle altre funzioni di merito.

Un ulteriore aspetto innovativo della metodologia di progettazione proposta è rappresentata dall'individuazione delle condizioni operative dei convertitori SMPPT. Come sarà esplicitato meglio nel seguito del documento, il convertitore SMPPT deve funzionare ad alte prestazioni in tutte le possibili condizioni di funzionamento che, a loro volta, variano continuamente e non sono "standardizzate" o presentate come riferimento dalla normativa di settore.

Per far fronte ad una situazione così ampia ed in mancanza di relative indicazioni, si è deciso di avvalersi delle serie storiche di dati climatici (soleggiamento, temperatura ambiente, velocità del vento) monitorate da centraline meteo ed opportunamente acquisite. E' stata, nel dettaglio, analizzata la frequenza annuale delle diverse condizioni climatiche per alcune località dell'Italia Meridionale al fine di individuare le condizioni operative caratterizzate da una maggiore frequenza di accadimento.

A partire da questi dati è stato possibile, mediante opportune formule riportate in seguito, calcolare la temperatura del generatore fotovoltaico e sul retro del generatore fotovoltaico. E' bene sottolineare che la progettazione e la conseguente determinazione delle prestazioni di un convertitore SMPPT viene, in tal modo, effettuata sulla base di condizioni operative che non solo sono reali, ma che risultano rappresentative di quelle operative. Esse sono, inoltre, in grado di portare in conto, contemporaneamente, le variazioni della temperatura ambiente, del soleggiamento e della velocità del vento che si verificano

durante una giornata in un sito di installazione. Si ritiene, infatti, che un processo di design basato sulla temperatura del generatore fotovoltaico o su quella ambiente possa introdurre un livello di approssimazione poco accettabile in un ambito simile.

4.2 Metodologie di progettazione multi-obiettivo

In questo paragrafo vengono presentate le principali metodologie utilizzate nella progettazione multi-obiettivo e viene condotta un'analisi comparativa prestazionale. Si tratta di metodi evolutivi particolarmente usati nel caso di problemi di ottimizzazione multi-obiettivo complessi per i quali metodologie basate sulla programmazione lineare o sul concetto di gradiente non sarebbero del tutto adeguate.

4.2.1 Multi-objective Optimization Evolutionary Algorithm

Il Multi-objective Optimization Evolutionary Algorithm (MOEA) è utilizzato e garantisce buone prestazioni in numerosi ambiti applicativi. Tale algoritmo risulta, infatti, di semplice implementazione giacché non richiede una conoscenza dettagliata del dominio del caso in esame. D'altra parte, basandosi su una generazione "random" degli individui delle popolazioni, assicura la mappatura completa delle possibili soluzioni e la conseguente individuazione di quelle non dominate.

Il passo iniziale del MOEA consiste nella generazione degli N individui della popolazione iniziale. Viene, poi, valutata la fitness di tali individui in base alle funzioni obiettivo del problema. Durante la fase successiva, viene assegnato il rank mediante l'approccio dominance ranking o quello dominance count. Nel primo caso, ad ogni soluzione viene attribuita un rank pari al numero di individui da cui è dominato, maggiorato di una unità. Nel dominance count, il rank assegnato al singolo individuo è, invece, pari al numero delle soluzioni dominate. Le soluzioni non dominate saranno caratterizzate da un elevato valore del rank. A ciò bisogna aggiungere che vengono utilizzate particolari tecniche per garantire la diversità tra le soluzioni e per evitare la convergenza in un'unica soluzione. Si tratta, in particolare, di tecniche di segmentazione (niching), di fitness sharing e di crowding.

A valle di queste operazioni iniziali vengono, iterativamente, generate popolazioni di individui "figli" mediante i meccanismi di ricombinazione e mutazione e viene, nuovamente, valutata la fitness ed assegnato il rank a ciascuna soluzione. A questo punto, le soluzioni dominate sono rimosse e gli individui non dominati vengono memorizzati. Questi ultimi vengono confrontati con le soluzioni non dominate archiviate alle precedenti iterazioni per la determinazione del fronte di Pareto. In Fig. 4 viene riportato lo pseudo-codice dell'algoritmo evolutivo fin qui descritto.

Algoritmo MOEA
1: Inizializzazione della Popolazione iniziale P e dell'archivio P ^{iv}
2: Valutazione della Funzione Obiettivo degli individui di P
3: Attribuzione del Rank
4: Calcolo del Niche Count
5: Shared Fitness o Crowding
6: While (not MAX numero di generazioni)
7: Selezione degli individui migliori di P: P -> P ⁱ
8: Ricombinazione e Mutazione degli individui in P ⁱ : P ⁱ -> P ⁱⁱ
9: Valutazione della Funzione Obiettivo degli individui Figli P ⁱⁱ
10: Attribuzione del Rank (P ⁱ U P ⁱⁱ) -> P ⁱⁱⁱ basato su Pareto-dominanza
11: Calcolo del Niche Count
12: Assegnazione Shared Fitness o Crowding
13: P ⁱⁱⁱ -> P
14: Copia P ⁱⁱⁱ -> P ^{iv} basato su Pareto-dominanza
15: End While

Figura 4. Pseudo-codice MOEA.

4.2.2 Multi-objective Genetic Algorithm

Una variante del precedente algoritmo è rappresentata dal Multi-objective Genetic Algorithm (MOGA) introdotto dal Fonseca e Fleming. La differenza sostanziale rispetto al suo predecessore consiste nella modalità di attribuzione del rank. In questo caso, il rank di una soluzione della i-esima generazione è pari al numero di cromosomi da cui questa risulta dominata all'interno della popolazione. Tutti gli individui non dominati della popolazione presenteranno rank unitario. In particolare, in seguito all'ordinamento della popolazione in base al rank viene attribuita la funzione fitness. Lo svantaggio del MOGA è dovuto alla sua convergenza prematura. Tale problematica è stata ridotta con l'introduzione da parte di Fonseca e Fleming, di un meccanismo di sharing applicato direttamente ai valori della fitness. Nella seguente figura, viene riportato lo pseudo-codice del MOGA.

Algoritmo MOGA

```
1: Inizializzazione della Popolazione Pi
2: Valutazione delle Funzioni Obiettivo
3: Identificazione del Rank
4: Calcolo del Niche Count
5: Assegnazione Linearly Scaled Fitness
6: Shared Fitness
7: for i=1 to numero MAX di generazioni do
8: Selezione mediante Stochastic Universal Sampling
9: Crossover a Single Punto
10: Mutazione
11: Valutazione della Funzioni Obiettivo
12: Attribuzione del Rank
13: Calcolo del Niche Count
14: Assegnazione Linearly Scaled Fitness
15: Shared Fitness
16: End for
```

Figura 5. Pseudo-codice MOGA.

4.2.3 Nondominated Sorting Genetic Algorithm

Un'ulteriore variante dell'originario algoritmo MOEA è rappresentato dal Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) caratterizzato da una classificazione della popolazione in base al soddisfacimento del criterio di dominazione di Pareto. Nel dettaglio, la popolazione viene suddivisa in soluzioni non dominate e soluzioni dominate. Gli individui non dominati vengono collocati in un'unica categoria ed hanno tutti la stessa possibilità di riprodursi. Questo processo viene iterato fino a che tutti gli individui risultano classificati. Man mano che si procede, l'insieme individuato di individui non dominati viene accantonato e ne viene trovato un altro. Le soluzioni del primo fronte saranno, però, caratterizzate da un migliore valore della fitness e risulteranno, quindi, riprodotte più volte. A garantire la diversità delle soluzioni c'è l'impiego del meccanismo di sharing che incide, però, notevolmente sulla complessità computazionale dell'algoritmo. A ciò bisogna aggiungere che la strategia NSGA soffre di un sistema di classificazione degli individui non efficiente. Questi due fattori hanno determinato lo sviluppo dell'algoritmo NSGA-II che ha soppiantato il precedente. In Fig.6 viene riportato lo pseudo-codice dell'algoritmo NSGA-II.

Algoritmo NSGA- I
1: Inizializzazione della Popolazione P^i
2: Valutazione delle Funzioni Obiettivo
3: Assegnazione del Rank
4: Calcolo del Niche Count
5: Assegnazione Shared Fitness
6: for $i=1$ to numero MAX di generazioni do
7: Selezione mediante Stochastic Universal Sampling
8: Crossover a Single Punto
9: Mutazione
10: Valutazione delle Funzioni Obiettivo
11: Attribuzione del Rank
12: Calcolo del Niche Count
13: Assegnazione della Shared Fitness
14: End for

Figura 6. Pseudo-codice NSGA-I.

4.2.4 Nondominated Sorting Genetic Algorithm II

L'algoritmo NSGA-II ideato nel 2000 da Deb fu proposto come "successore" della metodologia NSGA per superare le criticità degli algoritmi evolutivi legati alla complessità computazionale ed al criterio di classificazione degli individui. NSGA-II si basa sul concetto di non-dominanza: tutti gli individui di una popolazione ad una determinata generazione vengono classificati in base alla non-dominanza secondo un ordine ascendente. I migliori individui non dominati vengono collocati all'interno di una stessa classe cui viene attribuito rank unitario. Essi vengono, poi, momentaneamente accantonati per replicare lo stesso procedimento sugli individui rimanenti in modo da ottenere le soluzioni non dominate di rank pari a 2, 3 e così via. E' chiaro che al termine dell'esecuzione dell'algoritmo tutti gli individui saranno classificati e apparterranno ad un determinato rank. La complessità computazionale diminuisce ad ogni esecuzione perché minore è il numero degli individui coinvolti.

Lo pseudo-codice dell'algoritmo NSGA-II viene riportato in Fig.7.

Viene, quindi, creata una popolazione in maniera randomica. Segue la valutazione delle funzioni di fitness con la classificazione degli individui in rank in base al concetto di non dominanza. In particolare, ogni soluzione sarà confrontata con tutte le altre per attribuire correttamente il suo livello di "non-dominazione" e collocarla nella giusta classe. Identificati gli individui appartenenti al rank 1, questi vengono momentaneamente archiviati per identificare gli altri rank. Si procede, poi, con l'ordinamento ascendente della popolazione. A questo punto ha inizio un ciclo che porterà alla generazione delle popolazioni figlie mediante gli operatori di selezione, ricombinazione e mutazione. Vengono, in seguito, valutate le funzioni fitness per gli individui discendenti e viene effettuata la classificazione. Anche la popolazione figlia sarà ordinata in maniera ascendente rispetto alla non-dominanza. L'algoritmo è in grado, a questo punto della procedura, di creare la "mating pool" ossia una popolazione costituita da genitori e figli cui verrà applicata la stessa operazione di ordinamento ascendente in modo da ottenere delle famiglie denominate "fronti non dominati". Le soluzioni appartenenti al fronte non dominato di rank pari ad uno risulteranno le migliori.

Algoritmo NSGA- II

```
1: Inizializzazione della Popolazione Pi
2: Generazione random della popolazione con dimensione Ni
3: Valutazione delle Funzioni Obiettivo
4: Identificazione del Rank
5: Generazione degli individui figli
6: Selezione per torneo
7: Ricombinazione e Mutazione
8: for i=1 to MAX numero di generazioni do
9:     for ogni Genitore e Figlio della popolazione do
10:         Attribuzione del Rank
11:         Creazione set di fronti non dominati
12:         Loop per aggiungere soluzioni alla generazione successiva partendo dal primo fronte -
            crowding distance tra punti su ogni fronte
13:     End for
14:     Selezione mediante elitismo sui fronti di minore rank
15:     Creazione della nuova generazione
16:     Selezione per torneo
17:     Ricombinazione e Mutazione
18: End for
```

Figura 7. Pseudo-codice NSGA-II.

4.2.5 Strength Pareto Evolutionary Algorithm

Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) rappresenta un'ulteriore metodologia utilizzabile per i problemi di ottimizzazione multi-obiettivo. Essa si avvale di una popolazione e di un archivio esterno inizialmente vuoto. Gli elementi di questa popolazione iniziale vengono valutati in base alla non-dominanza e gli individui non dominati vengono copiati nell'archivio esterno, mentre quelli dominati vengono rimossi. L'archivio viene sempre mantenuto di dimensione pari al fronte non dominato. Qualora fosse più grande, esso sarebbe riportato alle dimensioni opportune mediante un'operazione di clustering. A valle di tale procedimento, viene valutata la fitness di ogni individuo presente in archivio e si procede con la selezione. In questo caso viene effettuata la selezione per accoppiamento, ciò significa che gli individui della popolazione e quelli archiviati concorrono alla selezione mediante un torneo. Seguono crossover e mutazione, a valle delle quali la popolazione dei genitori viene sostituita da quella dei discendenti. L'efficacia dell'algoritmo SPEA è limitata sostanzialmente da tre fattori. La fitness assegnata agli individui dominati da una stessa soluzione dell'archivio esterno ha valore identico, ignorando completamente quelli che sono i rapporti di non dominanza pur presenti tra gli individui dominati.

Altro problema è la mancanza di uno stimatore di affollamento, in SPEA l'informazione sulla densità viene utilizzata solo in fase di clustering dell'archivio esterno. Va, inoltre, sottolineato che adeguare, di volta in volta, la dimensione dell'archivio esterno a quella del fronte non dominato può determinare la perdita di soluzioni di frontiera. Lo pseudo-codice di questo algoritmo è riportato in Fig.8.

Algoritmo SPEA
1: Inizializzazione della Popolazione P^i
2: Creazione di un archivio esterno vuoto A
3: for $i=1$ to numero di generazioni do
4: Copia non dominati nell'archivio e rimozione di quelli denominati
5: Clustering per ridimensionare l'archivio (se necessario)
6: Valutazione funzione fitness degli individui della popolazione P^i e dell'archivio A
7: Selezionare per torneo
8: Replacement per selezionare individui da (P^i+A)
9: Mating pool
10: CrossOver e Mutazione su mating pool
11: End for

Figura 8. Pseudo-codice SPEA.

4.2.6 Strength Pareto Evolutionary Algorithm II

Strength Pareto Evolutionary Algorithm II (SPEA-II) rappresenta una metodologia di ottimizzazione proposta per il superamento dei problemi del predecessore SPEA.

SPEA-II è caratterizzato da un raffinato metodo di assegnazione della fitness denominato "fine grained". Esso calcola per ogni individuo quante sono le soluzioni che lo dominano ed il numero degli individui che esso stesso domina. La strategia introdotta incorpora in sé anche il concetto di densità delle soluzioni. A ciò bisogna aggiungere che la dimensione dell'archivio non viene, di volta in volta, cambiata. Essa è fissa e quando il numero delle soluzioni non dominate è inferiore alla dimensione dell'archivio vengono utilizzati individui dominati per saturare lo spazio a disposizione. In SPEA-II viene, inoltre, introdotta la tecnica del troncamento per rimuovere alcuni elementi quando il loro numero supera la dimensione dell'archivio garantendo la presenza di soluzioni di frontiera. Viene, infine, sottolineata un'ulteriore differenza rispetto a SPEA. In SPEA-II solo gli individui dell'archivio esterno partecipano alla selezione per accoppiamento. Lo pseudo-codice di SPEA-II è riportato in Fig.9.

Algoritmo SPEA II
1: Inizializzazione della Popolazione P^i
2: Creazione di un archivio esterno vuoto A
3: for $i=1$ to numero di generazioni do
4: Calcolo fitness elementi di P^i e A
5: Copia degli individui non dominati in archivio
6: Troncamento per riportare l'archivio A alla sua dimensione originaria: se A non pieno, vengono usati dominati
7: Selezionare per torneo
8: Replacement
9: Mating pool
10: CrossOver e Mutazione su mating pool
11: End for

Figura 9. Pseudo-codice SPEA II.

5 Funzioni obiettivo per la progettazione ottimizzata di convertitori SMPPT

La fase di progettazione di convertitori SMPPT rappresenta uno step molto delicato in quanto le prestazioni di tali dispositivi influenzano le prestazioni dell'intero impianto fotovoltaico. Numerosi sono, infatti, gli aspetti da tener presenti per ottenere un convertitore caratterizzato da elevate prestazioni in termini sia energetici sia affidabilistici, ma anche in grado di soddisfare i requisiti economici (o di ingombro). Vediamo, quindi, nel dettaglio, quali sono le funzioni obiettivo da perseguire per la progettazione di convertitori SMPPT "ottimi".

5.1 Efficienza dei convertitori SMPPT

L'efficienza è una delle specifiche più stringenti per i sistemi di conversione e, quindi, anche dei dispositivi SMPPT. La formula per il calcolo del rendimento di un sistema è riportata nell'Eq.1.

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (1)$$

dove :

- P_{loss} è la potenza dissipata all'interno del convertitore per effetto Joule, perdite di commutazione, etc;
- P_{in} è la potenza in ingresso al convertitore.

La potenza in ingresso al convertitore è quella fornita dal generatore fotovoltaico nelle diverse condizioni operative che si susseguono durante il giorno.

E' chiaro, quindi, che il rendimento dell'intero impianto fotovoltaico dipende da numerosi fattori, quali il tipo e la tecnologia di generatore fotovoltaico, l'esposizione e la posizione geografica dei moduli fotovoltaici, la presenza di ombreggiamenti, le condizioni operative di temperatura e soleggiamento, etc..

A ciò bisogna aggiungere che il rendimento dell'intero impianto fotovoltaico è determinato anche dal rendimento del singolo convertitore SMPPT. I sistemi di conversione che sono attualmente impiegati in diversi ambiti, presentano rate di tensioni e correnti diversi per le varie applicazioni, ma, in tutti i casi, si richiede che l'efficienza sia elevata. Nel dettaglio, le perdite di potenza P_{loss} di un convertitore DC-DC sono determinate dalle dissipazioni dei singoli componenti elettronici che lo costituiscono.

L'espressione per il calcolo dell'efficienza può essere, in questo caso, molto complessa giacché dipende dalle grandezze caratteristiche dei singoli componenti elettronici del convertitore, ma anche in maniera non lineare dalla combinazione dei parametri dei diversi dispositivi.

Bisogna tener presente che la formula riportata nell'Eq.1 non tiene, in alcun modo, conto delle condizioni continuamente variabili che caratterizzano il funzionamento di un convertitore in applicazioni fotovoltaiche, né che tale dispositivo funziona solo durante le ore diurne.

Calcolare il rendimento di un convertitore SMPPT secondo la precedente espressione potrebbe non essere significativo, poiché il valore calcolato risulterebbe valido solo in relazione ad una specifica condizione di funzionamento. Nemmeno optare per una valutazione di "caso peggiore" risulterebbe corretto, giacché il generatore fotovoltaico, nell'arco della sua vita utile, non lavora prevalentemente in quella specifica condizione. D'altra parte, effettuare il calcolo nella condizione di funzionamento migliore potrebbe avere solo un significato ingannevole. E' necessario, pertanto, definire una modalità adeguata per la valutazione del rendimento dei convertitori oggetto di questo studio.

Attualmente, a livello normativo, non è stata ancora definita una formula o una procedura univoca per il calcolo dell'efficienza dei convertitori DC-DC utilizzati in applicazioni fotovoltaiche. Diverso risulta, invece, il caso degli inverter, per i quali l'indice prestazionale internazionalmente definito, fin dal 1991, è il rendimento europeo, la cui formula viene riportata nell'Eq.2.

$$\eta_{eu} = 0.03\eta_{5\%} + 0.06\eta_{10\%} + 0.13\eta_{20\%} + 0.1\eta_{30\%} + 0.48\eta_{50\%} + 0.2\eta_{100\%} \quad (2)$$

dove $\eta_{i\%}$ è l'efficienza misurata all' $i\%$ della potenza nominale.

Questa formula richiede la misura dell'efficienza in sei specifiche condizioni di funzionamento del generatore fotovoltaico. Tali condizioni sono univocamente definite in base alla potenza nominale del modulo fotovoltaico. I pesi che caratterizzano la formula del rendimento Europeo sono stati determinati in base alla distribuzione tipica del soleggiamento nel Nord-Ovest della Germania. Tali valori sono fissi e indipendenti dalla posizione e dalla latitudine dell'impianto fotovoltaico. Nel caso di impianti installati alle latitudini tipiche del nostro Paese risulta certamente più rappresentativa la formula (Eq. 3) del rendimento definito[8] dal Californian Energy Commission η_{CEC} :

$$\eta_{CEC} = 0.04\eta_{10\%} + 0.05\eta_{20\%} + 0.12\eta_{30\%} + 0.21\eta_{50\%} + 0.53\eta_{75\%} + 0.05\eta_{100\%} \quad (3)$$

Si potrebbero, in alternativa, determinare i nuovi coefficienti della formula del rendimento europeo sulla base della distribuzione reale di irraggiamento e di temperatura dei Paesi del Sud Europa dal momento che sono caratterizzati da condizioni favorevoli per la produzione energetica da fonte solare. Va, a tal fine, evidenziato che, studiando i dati raccolti dalle diverse centraline meteorologiche, è possibile trovarsi di fronte a due condizioni operative che presentano lo stesso valore di irraggiamento, ma due diversi valori di temperatura. Nel dettaglio, il software proposto si avvale delle serie storiche di dati climatici (soleggiamento, temperatura ambiente, velocità del vento) monitorate da centraline meteo ed opportunamente acquisite in alcune località dell'Italia Meridionale. Il tool analizza la frequenza annuale delle diverse condizioni climatiche al fine di individuare le condizioni operative che si verificano con maggiore frequenza. Questi dati sono, poi, utilizzati per pervenire alla conoscenza di una grandezza, la temperatura sul retro del generatore fotovoltaico, che risulta particolarmente significativa ai fini del design dei convertitori SMPPT ed è in grado di considerare congiuntamente il soleggiamento, la temperatura ambiente e la velocità del vento e le loro variazioni.

A titolo di esempio, in Fig. 10 vengono riportate le distribuzioni di temperatura ambiente e soleggiamento su base mensile per la località di Portici (Centro Ricerche ENEA).

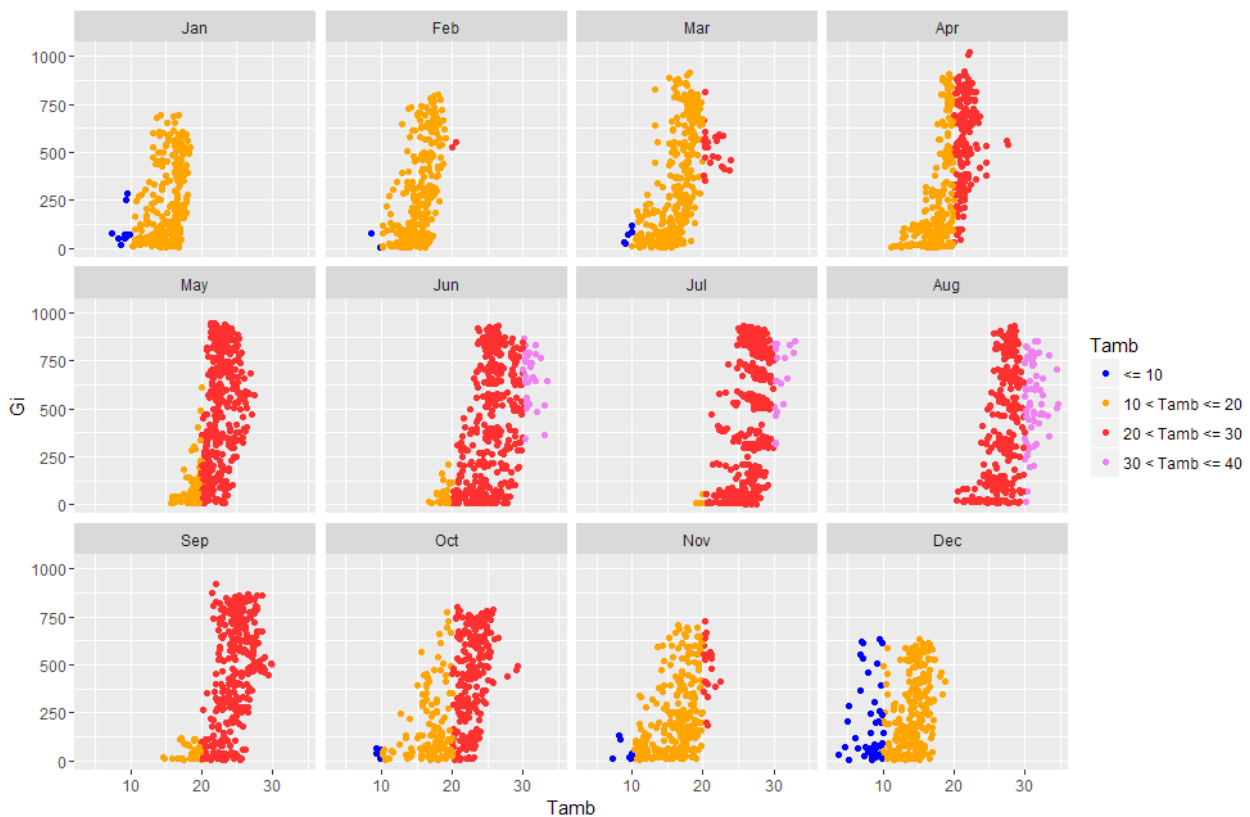


Figura 10. Distribuzione annuale temperatura ambiente e soleggiamento.

A partire dai dati acquisiti saranno calcolati i valori della temperatura del generatore fotovoltaico e della temperatura sul retro del modulo fotovoltaico. Queste due grandezze incidono significativamente sul rendimento del convertitore; si è pensato, quindi, di riformulare l'espressione dell'efficienza SMPPT portando in conto proprio la temperatura del retro modulo. Avvalendosi di una formula "ponderata", come nel caso del rendimento europeo o californiano, i valori dell'efficienza vengono calcolati, in questo caso, in corrispondenza delle condizioni operative reali più significative ed i "pesi" di tale formula sono determinati dalla frequenza con cui ognuna di tali condizioni di funzionamento si verifica durante un periodo annuale. Nel dettaglio, il tool proposto procede alla valutazione del rendimento del convertitore SMPPT mediante l'Eq.4.

$$\eta_{SMPPT} = \alpha_1 \eta_1 + \alpha_2 \eta_2 + \dots \dots \dots \alpha_N \eta_N \quad (4)$$

dove $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N$ sono i valori di efficienza del convertitore SMPPT calcolati in corrispondenza delle N condizioni operative significative ed i coefficienti $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ indicano la frequenza con cui ciascuna delle condizioni di funzionamento considerate si verifica in un periodo annuale.

Nell'ambito della progettazione multi-obiettivo di convertitori SMPPT, l'efficienza è, come sottolineato più volte, una funzione di merito che deve essere massimizzata.

5.2 Affidabilità dei convertitori SMPPT

Un altro importante parametro da considerare per valutare le prestazioni di un convertitore è l'affidabilità, che è un indice della capacità di un dispositivo e/o di un sistema di garantire, con un certo livello di probabilità, un funzionamento senza guasti per un determinato intervallo temporale (Eq. 5).

$$R(t) = \Pr\{T > t\} \quad (5)$$

dove:

R = affidabilità o reliability del dispositivo/sistema

T = tempo di vita del dispositivo/sistema

t = tempo di missione

L'affidabilità $R(t)$ di un dispositivo è un numero compreso nel range (0-1). In Fig. 11 è stato riportato il grafico della funzione $R(t)$ dove si può notare che la probabilità di un corretto funzionamento di un sistema è alta ad inizio vita e decresce, poi, con l'aumentare del tempo di missione. In realtà, la funzione $R(t)$ richiede uno studio accurato che tenga conto, a seconda dello specifico dispositivo da testare, di diversi parametri che possono inficiarne l'affidabilità. Prima in ambito militare, poi anche in quello industriale, l'attenzione sull'aspetto "reliability" è costantemente cresciuta e, a riguardo, sono stati elaborati numerosi Reliability Prediction Model. Nonostante il numero di modelli di previsione di affidabilità applicabili, non esiste un modello "migliore" in assoluto. In riferimento alla specifica applicazione ed al dispositivo che si va, di volta in volta, a considerare è possibile individuare il Reliability Prediction Model più adeguato a rappresentare quelle che sono le caratteristiche dell'oggetto di studio.

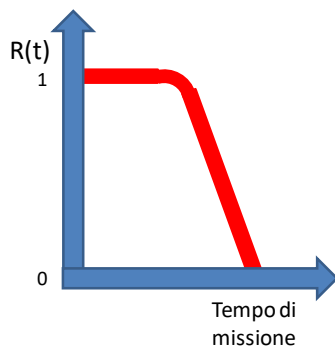


Figura 11. Grafico della funzione affidabilità $R(t)$.

Alcuni modelli di affidabilità, come il Military Handbook 217, il PRISM® ed il 217Plus, furono sviluppati per applicazioni di tipo militare, altri come Fides e Telcordia nel settore dell'avionica e delle telecomunicazioni.

I Reliability Prediction model maggiormente usati sono:

- Military Handbook 217 (MIL-HDBK-217): si tratta di un modello sviluppato dalla Marina Militare Americana nel 1965. Era l'unico reliability prediction model disponibile e diventò, in breve tempo, internazionalmente riconosciuto, tanto da essere definito "standard de facto". Attualmente è ancora il modello più usato. Esso include dispositivi tipici degli apparati militari, ma anche dell'industria delle telecomunicazioni. Il tasso di guasto viene determinato solo sulla base di un tasso base e di una serie di fattori quali quello termico, ambientale, etc. Il MIL-HDBK-217 non considera dati di test su campo o in laboratorio ai fini della valutazione di affidabilità di un sistema.
- Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment SR-332 (Telcordia): modello sviluppato presso AT&T Bell Labs nel 1997. Esso è specificamente pensato per la componentistica elettronica e fu ideato per la valutazione dell'affidabilità di sistemi utilizzati nel settore delle telecomunicazioni. Esso, a differenza del MIL-HDBK-217, considera dati di test in campo ed in laboratorio.

- FIDES Guide 2004: modello sviluppato da un gruppo di industrie francesi nei settori dell'aeronautica e della difesa (FIDES Group). La metodologia FIDES si basa non solo sull'analisi statistica dei dati di guasto storici raccolti sul campo, ma anche sulla fisica del guasto di un sistema.
- RIAC Handbook 217Plus: Il modello, pubblicato nel 2006, è stato sviluppato dal Reliability Information Analysis Center (RIAC) della United States Department of Defence come successore del MIL-HDBK-217. In realtà, il 217Plus considera diversi tassi base di guasto per ogni meccanismo di rottura di uno specifico dispositivo.

Molti di questi modelli permettono di calcolare la reliability in una condizione specifica di funzionamento [9-16]. Questi metodi sono adatti per un gran numero di campi applicativi caratterizzati da un worst case o un caso nominale di funzionamento. Nelle applicazioni fotovoltaiche non è possibile individuare né una condizione operativa nominale né un worst case. I sistemi fotovoltaici lavorano, infatti, in condizioni continuamente variabili in termini di irradianza, temperatura ambiente, velocità del vento, umidità, etc. In prima analisi, si potrebbe effettuare un'analisi di affidabilità basandosi sul caso peggiore, ma il risultato non caratterizzerebbe correttamente un impianto fotovoltaico, giacché quella di worst case non è certamente la condizione che si verifica in maniera prevalente. L'ulteriore difficoltà è determinata dall'operatività dei sistemi fotovoltaici che non è, come in altre applicazioni, continua. Un impianto fotovoltaico non funziona, infatti, 24 ore al giorno per 365 giorni all'anno, ma risulta operativo un numero di ore variabili che dipende da numerosi fattori, quali: soleggiamento, stagione, posizione geografica, etc.

L'analisi delle prestazioni affidabilistiche condotta nell'ambito di questa attività di ricerca è stata effettuata mediante il modello RIAC Handbook 217Plus, ritenuto idoneo per la specifica applicazione per la sua capacità di distinguere la modalità di funzionamento operativa da quella non operativa (operating and non-operating temperatures, Duty Cycles, Cycling Rate, etc). Tale modello consente, infatti, di tenere in conto sia l'affidabilità di un sistema continuamente in funzione, sia di un sistema che funziona solo una parte del giorno e/o della notte.

Gli indici di prestazioni affidabilistiche maggiormente utilizzati sono:

- Failure Rate o Tasso di guasto λ : rappresenta la frequenza con cui un dispositivo e/o un sistema presenta un guasto;
- il Mean Time Between Failure (MTBF): rappresenta il valore atteso del tempo tra un guasto ed il successivo. Negli apparati che hanno un tempo medio al verificarsi di un guasto (Mean Time To Failure) elevato o che possono essere riparati velocemente, il MTBF è pari al MTTF.

Il RIAC Handbook 217Plus [17-19] valuta il failure rate di un dispositivo come il prodotto di un tasso di guasto base λ_b e di alcuni fattori π_i che rappresentano i possibili stress [20-23] e le possibili sollecitazioni che influenzano il comportamento affidabilistico del componente e/o sistema che si sta analizzando.

In un ambito come quello fotovoltaico, la valutazione di affidabilità dei componenti e del convertitore SMPPT risulta di sostanziale importanza; essa viene, pertanto, presa in considerazione fin dalle prime fasi del design. La reliability entra, pertanto, a far parte delle specifiche di progetto e non viene calcolata, come in molti altri casi, a valle della progettazione del convertitore nella sua totalità.

Nel dettaglio, nell'ambito di questa attività di ricerca, l'attenzione è stata orientata allo sviluppo di convertitori costituiti da un filtro d'ingresso, una sezione switching ed un filtro d'uscita.

E' necessario, quindi, calcolare la reliability di condensatori, componenti magnetici e dispositivi switching nel dettaglio MOSFET e diodi.

Nella Tabella I vengono riportate le formule del modello 217Plus per il calcolo dei failure rate dei componenti elettronici di interesse.

Tabella I. Formule del tasso di guasto di componenti elettronici (217Plus).

Dispositivo	Tasso di guasto[RIAC-HDBK-217Plus]
MOSFET	$\lambda_{MOS} = \pi_G (\lambda_{OB} \pi_{DCO} \pi_{TO} \pi_S + \lambda_{EB} \pi_{DCN} \pi_{TE} + \lambda_{TCB} \pi_{CR} \pi_{DT}) + \lambda_{SJB} \pi_{SJD} + \lambda_{EOS}$
Diodo	$\lambda_{diode} = \pi_G (\lambda_{OB} \pi_{DCO} \pi_{TO} \pi_S + \lambda_{EB} \pi_{DCN} \pi_{TE} + \lambda_{TCB} \pi_{CR} \pi_{DT}) + \lambda_{SJB} \pi_{SJD} + \lambda_{EOS}$
Condensatore	$\lambda_C = \pi_G \pi_C (\lambda_{OB} \pi_{DCO} \pi_{TO} \pi_S + \lambda_{EB} \pi_{DCN} \pi_{TE} + \lambda_{TCB} \pi_{CR} \pi_{DT}) + \lambda_{SJB} \pi_{SJD} + \lambda_{EOS}$
Induttore	$\lambda_{Inductor} = \pi_G (\lambda_{OB} \pi_{DCO} \pi_{TO} + \lambda_{EB} \pi_{DCN} \pi_{TE} + \lambda_{TCB} \pi_{CR} \pi_{DT}) + \lambda_{EOS}$

dove:

- λ_{OB} tasso di guasto base in condizioni operative
- λ_{EB} tasso di guasto base, fattore ambientale
- λ_{TCB} tasso di guasto base, Temperature Cycling
- λ_{SJB} tasso di guasto base, saldature
- λ_{EOS} tasso di guasto, OverStress Elettrici
- π_G fattore dovuto al reliability growth
- π_{DCO} fattore per Duty Cycle, condizioni operative
- π_{TO} fattore effetto termico, condizioni operative
- π_S fattore per Stress
- π_{DCN} fattore per Duty Cycle, condizioni nonoperative
- π_{TE} fattore for effetto termico, environmental
- π_{CR} fattore per Cycling Rate
- π_{DT} fattore per delta Temperatura
- π_{SJD} fattore per variazioni termiche dei punti di saldatura.

A valle del calcolo dei failure rate dei singoli componenti elettronici è necessario valutare il tasso di guasto dello stadio di potenza del convertitore SMPPT nella sua interezza.

Bisogna, a tal fine, studiare la specifica topologia per comprendere la modalità di connessione tra i diversi componenti. Le connessioni possono essere di tipo serie (Fig. 12a), parallelo (Fig.12b) o ibride (Fig.12c).

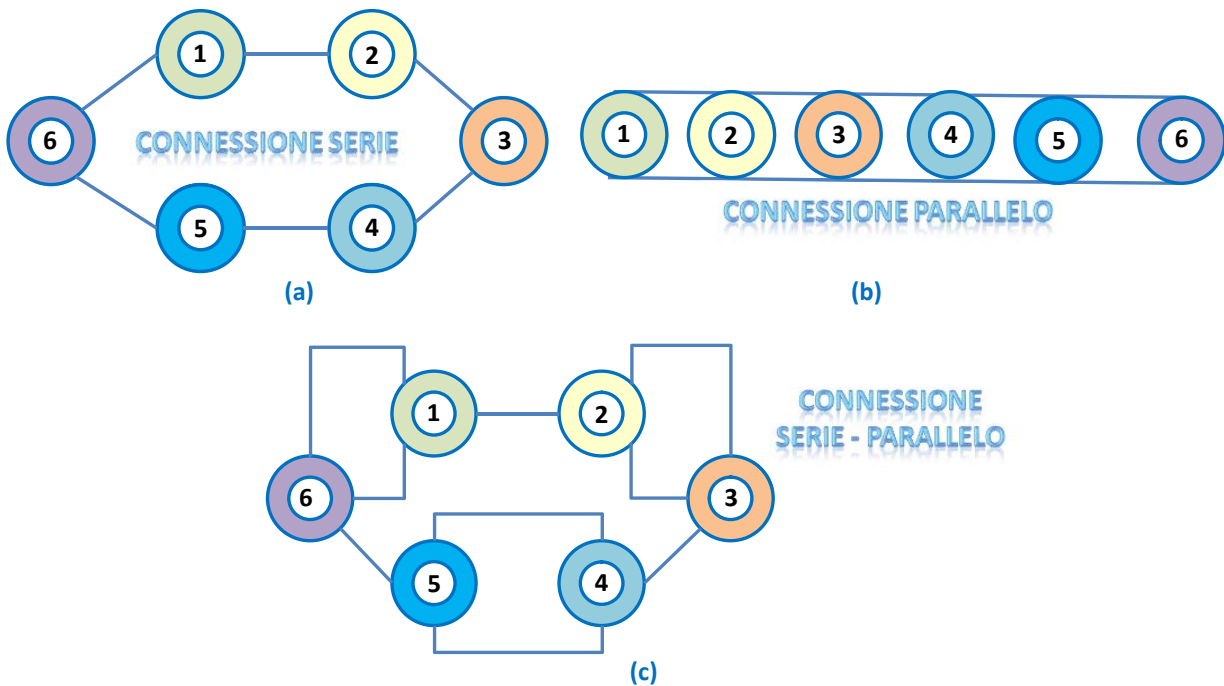


Figura 12. a. Connessione di tipo serie; b. Connessione di tipo parallelo; c. Connessione serie/parallelo.

5.2.1 Connessione di tipo serie

I sistemi e/o dispositivi caratterizzati da connessioni di tipo serie funzionano solo quando tutte le loro singole parti sono funzionanti. In tal caso l'evento "funzionamento corretto" del sistema è dato dall'intersezione degli eventi "buon funzionamento" delle i -parti:

$$S = A_1 \cap A_2 \cap A_3 \dots \cap A_N \quad (6)$$

dove:

A_i = evento "funzionamento corretto" dell' i -esima parte del sistema

S = evento funzionamento corretto del sistema

Nell'ipotesi che gli eventi A_i siano stocasticamente indipendenti, l'affidabilità R del sistema "serie" può essere calcolata mediante l'Eq. 7.

$$R_s = \Pr\{S\} = \prod_{i=1}^N \Pr\{A_i\} = \prod_{i=1}^N R_i \quad (7)$$

Il tasso di guasto del sistema sarà calcolato dalla sommatoria dei failure rate dei singoli componenti del sistema (Eq. 8).

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(t) \quad (8)$$

E' bene sottolineare che l'affidabilità di un sistema "serie" è minore dell'affidabilità di ogni suo singolo elemento:

$$R_s = \Pr\{S\} < \min [\Pr\{A_1\}, \dots, \Pr\{A_N\}] \quad (9)$$

5.2.2 Connessione di tipo parallelo

Un sistema caratterizzato da una struttura di tipo "parallelo" risulta non funzionante solo quando tutte le sue parti sono danneggiate. L'Eq.10, di seguito riportata, sottolinea, infatti, che se \bar{A}_i è l'evento "funzionamento non corretto" dell'i-esima parte del sistema, l'evento \bar{U} "funzionamento non corretto" del sistema è dato dall'intersezione dei diversi \bar{A}_i .

$$\bar{U} \equiv \bar{A}_1 \cap \bar{A}_2 \cap \bar{A}_3 \dots \dots \dots \cap \bar{A}_N \quad (10)$$

Nell'ipotesi che gli eventi \bar{A}_i siano stocasticamente indipendenti, l'inaffidabilità F del sistema "parallelo" può essere calcolata mediante l'Eq. 11.

$$F_p = \Pr\{\bar{S}\} = \prod_{i=1}^N \Pr\{\bar{A}_i\} = \prod_{i=1}^N F_i \quad (11)$$

ed, infine, l'affidabilità dell'intero sistema mediante l'Eq. 12:

$$R_s = \Pr\{S\} = 1 - \prod_{i=1}^N F_i \quad (12)$$

5.2.3 Connessione di tipo serie-parallelo

Nei sistemi che presentano struttura ibrida vanno calcolate le funzioni di affidabilità ed inaffidabilità delle diverse sotto-parti serie e o parallelo al fine di pervenire alla reliability complessiva.

5.2.4 Affidabilità di convertitori SMPPT ponderata

Analogamente a quanto proposto precedentemente per l'efficienza di convertitori SMPPT, anche nel caso della valutazione di affidabilità, si suggerisce una formula ponderata del MTBF relativa alle condizioni operative reali più significative per i siti dell'Italia Meridionale. In particolare, il tool proposto calcola, ad ogni iterazione, il MTBF della soluzione individuata applicando la formula qui proposta e riportata nell'Eq.13.

$$MTBF_{SMPPT} = \beta_1 MTBF_1 + \beta_2 MTBF_2 + \dots \dots \dots \beta_N MTBF_N \quad (13)$$

dove $MTBF_1, MTBF_2, \dots, MTBF_N$ sono i valori di affidabilità del convertitore SMPPT calcolati in corrispondenza delle N condizioni operative significative ed i coefficienti $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$ indicano la frequenza con cui ciascuna delle condizioni di funzionamento considerate si verifica in un periodo annuale.

Il MTBF è chiaramente uno degli obiettivi da massimizzare nella progettazione multi-obiettivo di convertitori SMPPT.

5.3 Prezzo dei convertitori SMPPT

Nell'ottica di progettare un convertitore SMPPT caratterizzato da un adeguato trade-off tra requisiti tecnici ed economici, è stata considerata come ulteriore funzione obiettivo "il prezzo" dell'ottimizzatore di potenza. Esso è pari alla somma dei prezzi unitari in dollari dei singoli componenti elettronici che costituiscono il convertitore SMPPT senza tener conto di eventuali economie di scala o sconti relativi all'acquisto di grandi quantità di dispositivi. La formula del prezzo è riportata nell'Eq. 14.

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots \dots + p_N \quad (14)$$

dove:

- p_j è il prezzo unitario del j -esimo componente

- N è il numero totale dei componenti del convertitore

Il prezzo rappresenta un obiettivo da minimizzare nella progettazione multi-obiettivo di convertitori SMPPT a differenza delle funzioni di merito descritte precedentemente. L'obiettivo è ,infatti, quello di individuare soluzioni che non incidano notevolmente sulla spesa economica complessiva da sostenere per l'installazione di un impianto fotovoltaico.

6 RET: Reliable Electro Thermal converter design tool per applicazioni SMPPT

Nell'ambito delle attività di ricerca sulle metodologie di progettazione multi-obiettivo è stato proposto un tool dedicato alla progettazione di convertitori SMPPT. Tale software, denominato RET - Reliable Electro Thermal converter design - è stato sviluppato in ambiente Matlab® Release 2016a. Esso effettua il design di convertitori "ottimi" caratterizzati da un buon trade-off tra i requisiti tecnici di progetto e le specifiche di natura economica. Nel prosieguo di questo documento saranno descritte, nel dettaglio, le routine e subroutine del tool che consente di considerare anche gli stress elettrici e termici che possono essere causa di deterioramento delle prestazioni del convertitore SMPPT.

L'obiettivo è quello di pervenire ad un modello molto accurato del convertitore in modo da ridurre al minimo gli errori di valutazione delle perdite ed ottenere, in fase di simulazione, informazioni precise sulle prestazioni dell'ottimizzatore di potenza in termini di efficienza, affidabilità e prezzo.

6.1 L'interfaccia grafica

RET è stato dotato di un'interfaccia grafica per una migliore interazione con il progettista. E' bene sottolineare che non si tratta di una progettazione "automatica", ma di una progettazione "assistita". L'idea è quella di sfruttare la potenza di calcolo del computer per analizzare un numero elevato di possibili soluzioni che il singolo progettista impiegherebbe molto tempo a studiare. Ci si avvale, poi, dell'esperienza del designer per individuare, tra tutte le possibili soluzioni, quella "ottima".

Attualmente RET è dotato di un'interfaccia molto semplice che, attraverso la visualizzazione a video di alcuni parametri e mediante alcuni quesiti al progettista, procede verso l'individuazione dei convertitori elettronici feasible per la specifica applicazione.



Figura 13. L'interfaccia grafica del tool RET.

6.2 La struttura del programma

Il software realizzato ha la struttura riportata schematicamente nella seguente figura.

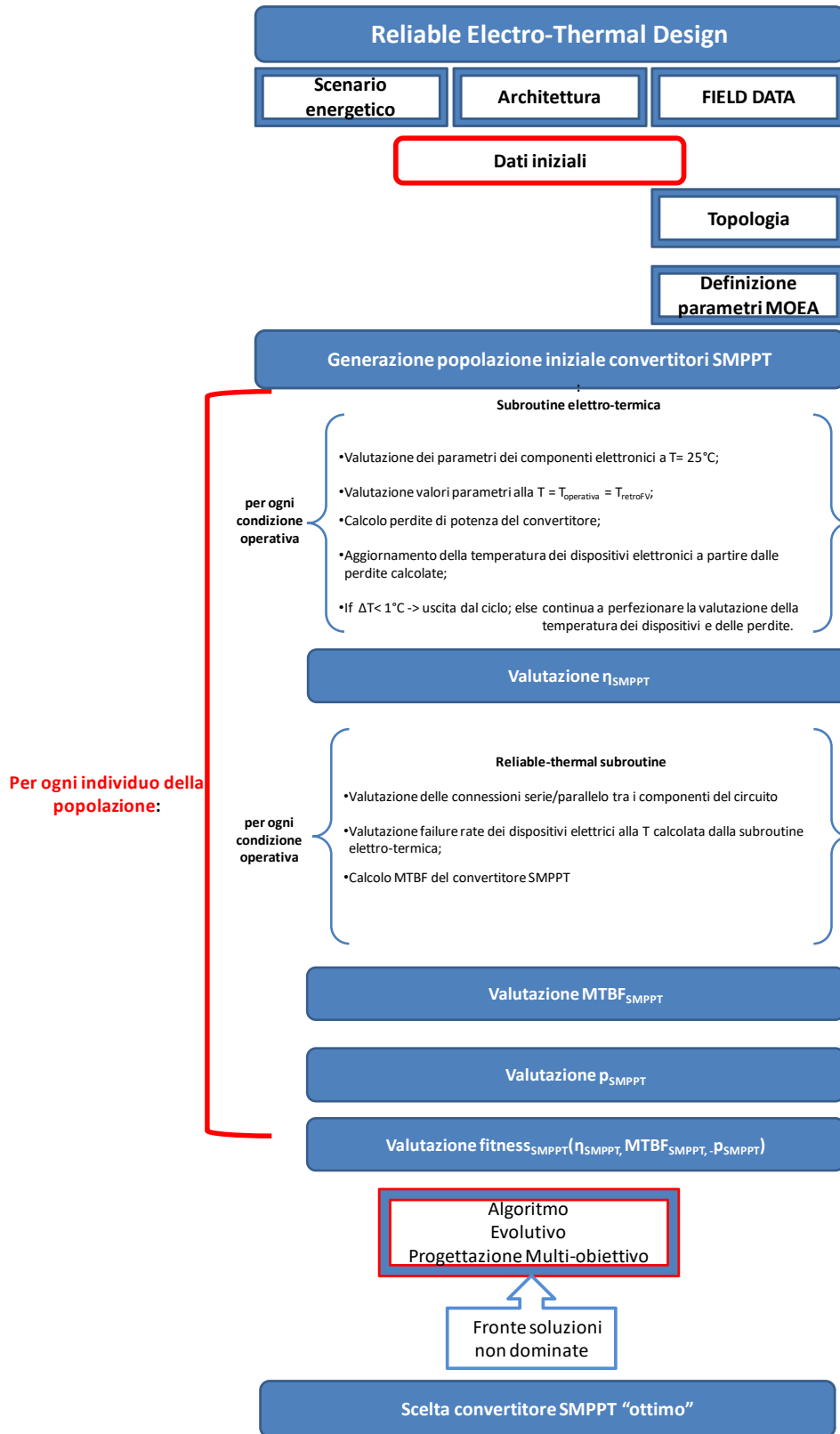


Figura 14. Schema sintetico del tool RET.

Il punto di partenza è rappresentato dalla scelta del sistema energetico per il quale si vuole progettare il convertitore SMPPT. RET permette, infatti, di ottenere il design di ottimizzatori di potenza destinati ad un impianto fotovoltaico asservito ad un'utenza domestica oppure all'utilizzo in una microgrid DC o in un Net Zero Energy Building. Secondo il caso specifico cambiano, infatti, le funzioni ausiliarie di cui deve essere dotato il convertitore SMPPT.

In questa prima fase dell'attività di ricerca è stato implementato il software relativo alla progettazione di ottimizzatori di potenza per impianti fotovoltaici realizzati mediante la struttura gerarchica Master-Slave, descritta precedentemente (Fig.15).

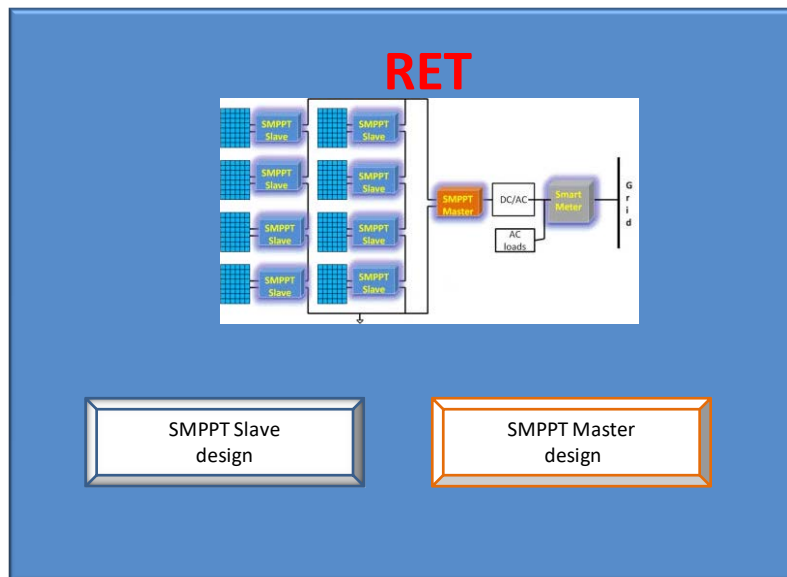


Figura 15. RET: interfaccia di progettazione per Master-Slave SMPPT.

E' stato creato un primo database contenente i dati di generatori fotovoltaici commerciali. L'utente può scegliere il tipo di modulo fotovoltaico o, eventualmente, inserire manualmente i dati nominali e relativi alle Standard Test Conditions (STC) riportati nel datasheet dei costruttori di moduli.

A valle dell'acquisizione di tali dati, il software richiede informazioni relative alla specifica configurazione dell'impianto. Nel dettaglio, nella sezione "FIELD DATA", il progettista può optare se specificare il numero di generatori fotovoltaici che costituiscono ogni stringa, il numero delle stringhe dell'impianto ed il tipo di connessione adottato. In alternativa, è possibile saltare questa fase ed indicare solo lo specifico generatore fotovoltaico cui si intende dedicare l'ottimizzatore.

RET permette, in questo modo, di progettare convertitori SMPPT sia per nuove installazioni in fase di definizione, sia per impianti fotovoltaici già esistenti. I dati della sezione "FIELD DATA" consentiranno, in una fase successiva, di ricostruire le curve caratteristiche del modulo/impianto selezionato e simulare le prestazioni del convertitore SMPPT progettato.

6.3 I dati iniziali

A valle delle impostazioni sull'impianto o sul generatore fotovoltaico, RET ha bisogno di informazioni relative alle condizioni di funzionamento. In questo documento abbiamo sottolineato più volte che i dispositivi fotovoltaici lavorano in condizioni operative continuamente variabili e fortemente dipendenti delle condizioni climatiche. E' stata precedentemente evidenziata la difficoltà di individuare condizioni nominali di funzionamento e come queste ultime possano dal luogo a convertitori che funzionano bene nel caso specifico, ma le cui prestazioni non eccellono, o addirittura sono poco soddisfacenti, in tutti gli altri condizioni operative.

Per far fronte a questo problema, l'idea perseguita nell'implementazione del software RET è stata quella di studiare gli archivi di serie storiche di dati atmosferici (temperatura ambiente, irraggiamento, velocità del vento) per alcune località dell'Italia Meridionale al fine di individuare le condizioni operative che più frequentemente si presentano.

È chiaro che l'ottimizzatore di potenza deve garantire elevate prestazioni, soprattutto in quelle condizioni che si verificano con maggiore frequenza. Perdere, infatti, energia in quelle condizioni, significa inficiare le prestazioni annuali dell'intero impianto.

Vengono riportati, a titolo di esempio, i dati relativi alle condizioni operative monitorate ed acquisite da una delle centraline meteo considerate per un anno di acquisizione. Sono stati studiati sia i valori di temperatura ambiente, sia quelli del soleggiamento e le relative frequenze di accadimento nel corso dell'anno. Ripetendo, con maggiore dettaglio, la "classificazione" delle condizioni operative per diversi anni e diverse località, è possibile pervenire a profili di soleggiamento e temperatura ambiente che risultano significativi per l'applicazione di metodologie di progettazione "ottima" di convertitori SMPPT.

Tabella II. Ore operative per le diverse condizioni di funzionamento.

Soleggiamento [W/sqm]	Temperatura ambiente [°C]			
	T<=10	10<T<=20	20<T<=30	30<T<=40
G<=200	58	1128	656	3
200 < G <= 400	11	343	443	15
400 < G <= 600	4	290	425	38
600 < G <= 800	4	179	500	46
800 < G <= 1000	0	32	357	12

A ciò bisogna aggiungere che il convertitore SMPPT Master viene collocato nel vano dove si trovano l'inverter e lo smart meter, il convertitore SMPPT Slave viene, invece, collocato sul retro del modulo. Dal punto di vista della progettazione questa rappresenta una condizione critica per le temperature raggiunte in condizioni di esercizio e per la dissipazione di calore. È chiaro che bisogna pervenire ad un modello del convertitore molto accurato dal punto di vista termico che permetta di valutare con precisione, anche l'eventuale necessità di adottare opportuni dissipatori. Viene, a tal fine, proposta una subroutine di RET che, a partire dalle serie storiche di dati climatici, calcola la temperatura del generatore fotovoltaico, quella sul retro del modulo ed i valori di tensione V_{MPP} e di corrente I_{MPP} . Nel dettaglio, in questo documento, la temperatura del modulo fotovoltaico viene denominata T_{genFV} . Essa può essere ricavata dai dati di temperatura ambiente, soleggiamento e velocità del vento mediante la seguente Eq. 15 [24]:

$$T_{genFV} = \left(\left(\frac{G}{G_0} \right) * (T_1 e^{bw} + T_2) + T_a \right) + \frac{G}{G_0} \Delta T \quad (15)$$

dove:

- T_a = temperatura ambiente [°C]
- G = irraggiamento [W/m^2]
- G_0 = irraggiamento a $1000 W/m^2$
- w = velocità del vento a 10m di altezza [m/s]
- $T_1, T_2, b, \Delta T$ = coefficienti e dati empirici che dipendono dal tipo di generatore fotovoltaico [°C].

Nella Tabella III vengono riportati i valori di $T_1, T_2, b, \Delta T$ per due tipi di moduli diversi. Nel primo caso, il retro del generatore fotovoltaico è in vetro, nel secondo in Tedlar.

Tabella III. Coefficienti empirici per il calcolo della T_{genFV} di generatori fotovoltaici.

Tipo	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	b	ΔT (°C)
Glass/cell/glass	25.0	8.2	-0.112	2
Glass/cell/Tedlar	19.6	11.6	-0.223	3

La temperatura sul retro del generatore fotovoltaico T_{retroFV} si ottiene mediante l'Eq. 16 di seguito riportata:

$$T_{retroFV} = T_{genFV} - \frac{G}{G_0} \Delta T \tag{16}$$

La grandezza T_{retroFV} risulta di grande interesse da parte del progettista. Essa permette, infatti, di modellare in maniera accurata la topologia circuitale scelta portando in conto congiuntamente l'effetto sia della temperatura, sia dell'irraggiamento sui parametri funzionali del convertitore SMPPT.

A partire dalle condizioni atmosferiche e dai dati del generatore fotovoltaico scelto è possibile, poi, calcolare le grandezze caratteristiche del generatore e/o impianto fotovoltaico, ossia i valori della tensione V_{MPP} e della corrente I_{MPP}. Tali grandezze vengono calcolate dal tool RET mediante il modello a singolo diodo [25] di un generatore fotovoltaico.

6.4 Scelta topologia circuitale

In letteratura numerosi sono gli studi e le analisi comparative[26-29] sulle topologie circuitali adottabili per convertitori SMPPT. Certamente, tra tutte le soluzioni proposte, la topologia buck (abbassatore di tensione) e quella boost (innalzatore di tensione), pur essendo le più semplici, rappresentano le soluzioni più adottate in quanto garantiscono un buon compromesso tra prestazioni e prezzo.

RET prevede la possibilità di progettare questi due tipi di convertitori nelle loro versioni Diode Rectification, Synchronous Rectification ed Interleaved Rectification. In Fig.16 viene mostrata l'interfaccia per la scelta della progettazione di convertitori di tipo boost. Il tool RET avvia, poi, la progettazione multi-obiettivo mediante algoritmo evolutivo.

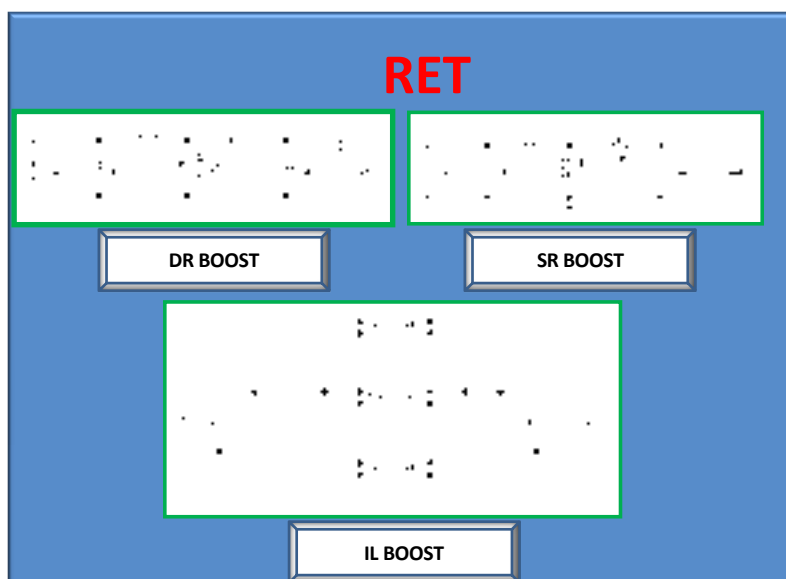


Figura 16. RET: interfaccia di progettazione per convertitori SMPPT di tipo boost.

6.5 Selezione random componenti elettronici del convertitore

In seguito alla selezione della topologia da adottare è possibile avviare la subroutine "SELEZIONE" per l'individuazione dei componenti elettronici dell'ottimizzatore di potenza del convertitore SMPPT. Nel tool RET particolare attenzione è dedicata allo stadio di potenza dell'ottimizzatore. E' stato, a tal fine, creato un database per ciascuna tipologia di componenti elettronici dell'ottimizzatore (componenti magnetici, dispositivi switching, elementi capacitivi, etc.). Tali database sono stati popolati con i parametri funzionali di dispositivi commerciali adatti per la specifica applicazione e necessari all'implementazione del modello elettro-termico utilizzato dal software RET. L'ingente numero di componenti disponibili in commercio avrebbe richiesto una ricerca esaustiva con miliardi di combinazioni da analizzare. In particolare, ad ogni iterazione della subroutine, il tool effettua la scelta di un set di componenti elettronici nei diversi database. A titolo di esempio, nel caso della progettazione di un Diode Rectification boost (Fig.17), la subroutine "SELEZIONE" effettua la selezione randomatica di un induttore nel database dei componenti magnetici, di un diodo, un condensatore per il filtro d'ingresso ed uno per l'uscita ed, infine, un MOSFET nei rispettivi database.

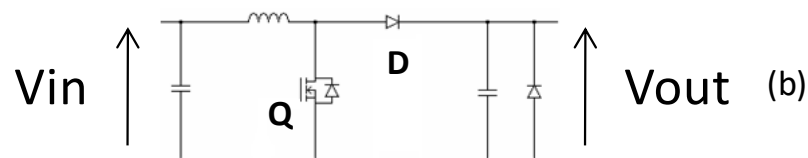


Figura 17. Diode Rectification boost.

A valle della scelta dei componenti, il software procede con la verifica dell'idoneità di tali componenti che sono stati scelti senza imporre alcun vincolo. Nel dettaglio, il software va a verificare la corrente di saturazione dei componenti magnetici, controlla che le tensioni e le correnti di rate dei diversi dispositivi siano rispettati con un certo margine di sicurezza e verifica il soddisfacimento sui ripple delle tensioni in ingresso ed uscita dal convertitore SMPPT.

Nei casi in cui uno dei dispositivi scelti non risulta idoneo, RET procede con una nuova scelta random all'interno del corrispondente database. Quando RET individua una combinazione idonea di componenti elettronici, la fornisce alla routine elettro-termica.

6.6 Routine di progettazione elettro-termica

L'attenzione del progettista è focalizzata sull'individuazione di componenti elettronici adeguati al raggiungimento di alti livelli prestazionali. La fase di scelta dei componenti elettronici del convertitore SMPPT risulta delicata per due aspetti:

- i datasheet riportano i parametri principali dei componenti elettronici misurati nel funzionamento dei singoli dispositivi;
- i dati riportati nel datasheet sono stati misurati ad un valore standard di temperatura, generalmente, pari a 25°C.

L'analisi iniziale del progettista, basata sulla scheda tecnica, considera le prestazioni del singolo componente elettronico, ma nulla rivela sul funzionamento congiunto tra quel dispositivo e gli altri della configurazione topologica scelta. Di qui la necessità di affiancare al lavoro del progettista quello del computer per l'analisi, vista nei paragrafi precedenti, delle possibili soluzioni, intese come combinazioni di componenti elettronici che garantiscano il soddisfacimento dei vincoli di progetto.

D'altra parte, le specifiche di progetto di convertitori SMPPT richiedono ottimizzatori che garantiscono elevati valori di efficienza in tutte le condizioni di funzionamento, soprattutto in quelle particolarmente "stressanti" per i dispositivi utilizzati.

Ai fini di una valutazione precisa del rendimento nelle diverse condizioni operative, non è sufficiente acquisire i valori dei parametri funzionali forniti dal datasheet, ma è necessario inglobare nel modello in maniera opportuna le condizioni climatiche e le loro variazioni delle. Questo aspetto è stato precedentemente affrontato in questo documento e sono state inserite le modalità di calcolo della T_{genFV} e della $T_{retroFV}$. È importante, a questo punto, inglobare nel tool RET non solo i parametri dei componenti elettronici forniti dai costruttori a 25°C, ma occorre anche implementare delle opportune funzioni che, portando in conto l'effetto termico sui diversi dispositivi, calcolino le reali condizioni termiche dei componenti.

Lo sviluppo di un modello accurato del convertitore deve, infatti, considerare sia le perdite di potenza, sia le variazioni dei parametri dei diversi componenti dell'ottimizzatore. Il nucleo del tool RET è costituito da una routine di progettazione elettro-termica schematicamente riportata in Fig.14. A valle della generazione della popolazione iniziale viene lanciata tale routine per ognuno degli individui di tale popolazione e per ognuna delle condizioni di funzionamento individuate dalla routine "Dati iniziali". Nel dettaglio, RET avvia un ciclo termico. In fase iniziale i valori attribuiti ai parametri funzionali dei dispositivi sono quelli riportati nei datasheet. Tali parametri sono inseriti nel modello PWM Switch della topologia scelta. In tale routine vengono, poi, calcolate le perdite di ognuno dei dispositivi elettronici del convertitore, considerando anche la potenza dissipata dai gate driver e dalla scheda di controllo.

La fase finale di ogni iterazione è rappresentata dal calcolo del rendimento η_{SMPPT} . Si tratta di un calcolo complesso se consideriamo che ogni componente del circuito è caratterizzato da effetti dissipativi e, a sua volta, risente della presenza e dei parametri degli altri dispositivi del convertitore oltre all'influenza che, su di esso, esercita $T_{retroFV}$. Ci troviamo in presenza di una combinazione articolata dei parametri funzionali che risulta difficilmente analizzabile senza l'ausilio del calcolatore elettronico e di un ambiente di calcolo e sviluppo.

Il valore delle perdite di potenza per una stessa condizione operativa deve essere valutato in maniera più precisa calcolando, alla luce del procedimento fin qui svolto, nuovamente i parametri funzionali dei componenti.

Si itera il procedimento fin qui descritto, più volte, fino a che si riscontra una variazione ΔT della temperatura sui diversi dispositivi inferiore alla soglia di 1°C. A quel punto il ciclo termico termina e sono noti tutti i parametri e le grandezze necessarie alla valutazione della funzione di fitness η_{SMPPT} .

6.7 Routine di reliable-thermal design

Alla luce delle condizioni operative maggiormente significative e della variazione intrinsecamente portata in conto da $T_{retroFV}$ è possibile valutare in maniera accurata anche la reliability della singola soluzione. A seconda della specifica soluzione topologica adottata, il tool RET imposta correttamente quelle che sono le connessioni serie e parallelo tra i componenti del circuito e procede, poi con il calcolo dei tassi di guasto delle connessioni, così ottenute, fino a pervenire alla valutazione del $MTBF_{SMPPT}$ per tutto il convertitore nella sua interezza.

6.8 Valutazione economica

A questo punto della procedura si procede con la valutazione del prezzo del convertitore SMPPT. Per ognuna delle soluzioni appartenenti alla popolazione iniziale viene applicata l'Eq.14 e si ottengono, quindi, tutte le informazioni da fornire all' algoritmo evolutivo per l'individuazione delle soluzioni migliori.

6.9 Algoritmo evolutivo per la progettazione multi-obiettivo

A questo punto della procedura tutte le grandezze e le funzioni necessarie all'algoritmo evolutivo per la progettazione multi-obiettivo sono state calcolate per gli individui della popolazione iniziale. Il tool RET

procede, quindi, con la definizione dei parametri caratteristici ed avvia la fase evolutiva del processo. Procede, quindi, con la generazione delle popolazioni "figlie", l'avvio della routine elettro-termica e di quella per la valutazione dell'affidabilità, il calcolo delle relative fitness function, l'individuazione delle soluzioni non dominate fino alla formazione del fronte di Pareto, fasi queste già precedentemente descritte nel capitolo 4. Al termine della procedura, il progettista avrà a disposizione un certo numero di soluzioni non dominate, ciascuna delle quali rappresenta un possibile convertitore SMPPT. Il designer sceglie, tra tutte, la soluzione "ottima" in base a quelle che, nello specifico contesto, ritiene le esigenze di progetto più stringenti.

7 Conclusioni

Nel presente documento vengono presentate le attività svolte durante il primo anno dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA.

L'attenzione è stata concentrata, in queste prime fasi, sulla valutazione dell'architettura di convertitori SMPPT e sul necessario ampliamento delle funzionalità dei dispositivi DMPPT per il loro impiego in diversi scenari energetici, quali Net Zero Energy Building, micro reti in corrente continua.

Sono state analizzate le principali metodologie di progettazione multi-obiettivo al fine di pervenire al design di convertitori SMPPT in grado di garantire elevati livelli prestazionali a fronte di risorse economiche contenute. L'individuazione del fronte delle soluzioni commerciali "ottime" è stata effettuata applicando algoritmi evolutivi ed utilizzando funzioni di fitness relative ai livelli di efficienza, affidabilità e prezzo dei convertitori.

E' stato, infine, proposto il tool Reliable Electro-Thermal design in grado di coadiuvare il lavoro del progettista nel design di convertitori SMPPT a partire da database di componenti elettronici. Si tratta, in particolare, di dispositivi magnetici, di condensatori e di componenti switching necessari alla realizzazione delle diverse soluzioni topologiche e disponibili in commercio.

Alla luce dei risultati dello studio mediante simulazioni fisico-numeriche di dispositivi switching basati su nuovi materiali e tecnologie innovative condotto dal Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, delle Infrastrutture e dell'Energia Sostenibile (DIIES) dell'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, nel prosieguo delle attività, il tool sarà in grado di progettare convertitori SMPPT anche mediante l'impiego di nuovi componenti elettronici realizzati con caratteristiche ad hoc. Nel seguito delle attività di ricerca, il tool informatico qui proposto sarà implementato fino alla realizzazione di una piattaforma informatica per la progettazione di convertitori SMPPT dotati di funzioni aggiuntive rispetto a quelle essenziali.

8 Riferimenti bibliografici

1. C. K. Chew, S. R. R. Kondapalli, "Modelling, analysis, simulation and design optimization (Genetic Algorithm) of dc-dc converter for uninterruptible power supply applications", IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 28 Nov.-1 Dec. 2005 Malaysia, vol. 1, pp. 1530-1535.
2. H. Visairo, M.A. Medina, J.M Ramirez, "Use of Evolutionary Algorithms for Design Optimization of Power Converters", 22nd International Conference on Electrical Communications and Computers, 27 - 29 Feb 2012 Mexico, vol.1, pp .268-272, 2012.
3. U. Badstuebner, J. Biela, W. Kolar J, "Design of an 99%-efficient, 5kW, phase-shift PWM DC-DC converter for telecom applications", IEEE Applied Power Electronics Conference, 21 Feb. 2010 Palm Spring California, vol. 1, pp. 773-780.
4. S. B. Kjaer, F. Blaabjerg, "Design optimization of a single phase inverter for photovoltaic applications", 34th IEEE Annual Power Electronics Specialist Conference (PESC), 15-19 June 2003 Acapulco Messico, vol.3, pp. 1183-1190.
5. L. Quan, P. Wolfs, "The Power Loss Optimization of a Current Fed ZVS Two-Inductor Boost Converter With a Resonant Transition Gate Drive", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21 (Sett. 2006), pp. 1253-1263, USA.
6. M. Hanen, A. Kaiçar, M. Hervé, A. Anis, "Multi-Objective Optimization of Power Converter Sizing Based on Genetic Algorithms: Application to Photovoltaic Systems", International Review on Modelling & Simulations, vol. 5 issue 2, pp. 826-839, 2012.
7. M. Mirjafari, R.S. Balog, R. Turan, "Multiobjective Optimization of the DC-DC Stage of a Module-Integrated Inverter Based on an Efficiency Usage Model", IEEE Journal of Photovoltaics, vol.4 (May 2014), no.3, pp. 906-914, USA.
8. I. Ongun, E. Özdemir, "Weighted efficiency measurement of PV inverters: introducing η_{IZMIR} ", Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, n. 5- 6 (2013), vol. 15, pp. 550-554, Romania.
9. J. Jones, J. Hayes, "A Comparison of Electronic ReliabilityPrediction Models", IEEE Transactions on Reliability, n. 2, vol. 48 (June 1999), pp. 127-134, USA.
- 10.M. Economou, "The Merits and Limitations of ReliabilityPredictions", Reliability and Maintainability, Annual Symposium - RAMS, 26-29 Jan. 2004, USA.
- 11.Handbook of Military 217F, 1991, Washington.
- 12.Telcordia, "Reliability prediction procedure for electronic equipment", SR.332, Issue 2, Mar.2016, Sweden.
- 13.Handbook of 217 "PlusTM Reliability Prediction Models", Dec. 2014, Quanterion Solutions, New York.
- 14.FIDES, "Reliability methodology for electronic systems", Guide 2004, Issue A, Europa.
- 15.H. Calleja, F. Chan, I. Uribe, "Reliability-Oriented Assessment of a DC-DC Converter for Photovoltaic Applications", IEEE Power Electronics Specialist Conference 2007, June 2007 Orlando, pp.1522-1527.
- 16.X. Tian, "Design for Reliability and Implementation on Power Converters", Reliability and Maintainability Symposium Proceedings, January 2005 Palm Harbor FL. USA, pp.89-95.
- 17.M. Held, and K. Fritz., "Comparison and evaluation of newest failure rate prediction models: FIDES and RIAC 217Plus", Microelectronics Reliability, vol.49 (September 2009), pp.967-971, Serbia.
- 18.D. Nicholls, "An Introduction to the RIAC 17PlusTM Component Failure Rate Models", Journal of the Reliability Information Analysis Center, First Quarter 2007, NY.
- 19.D. Nicholls, "The 217PlusTM Capacitor and Diode Failure Rate Models", Journal of the Reliability Information Analysis Center, Second Quarter 2007, NY.
20. G. Graditi, G. Adinolfi, "Energy performances and reliability evaluation of an optimized DMPPT boost converter", IEEE International Conference on Clean Electrical Power, 14-16 June 2011 Ischia (Italy), pp.69-72.
- 21.D. Nicholls, "The 217PlusTM Integrated Circuit and Inductor Failure Rate Models", Journal of the Reliability Information Analysis Center, Third Quarter 2007, NY.

- 22.D. Nicholls, "An overview of the 217Plus™ System Reliability Assessment Methodology", Journal of the Reliability Information Analysis Center, Fourth Quarter 2006, NY.
- 23.G. Graditi, G. Adinolfi, "Temperature Influence on Photovoltaic Power Optimizer Components Reliability", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion vol. 1, 20-22 June 2012 Sorrento (Italy), pp.1113-1118.
- 24.D. L. King, J. A. Kratochvil, W. E. Boyson, W. I. Bower, "Field Experience with a new performance characterization procedure for Photovoltaic arrays", Proceedings 2nd World conference and exhibition on photovoltaic solar energy conversion, July 1998, Austria.
- 25.M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. Ruppert Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", IEEE Transactions on Power Electronics, n. 5 vol. 24 (May2009), USA.
- 26.D. Ahmadi, S. A. Mansour, J. Wang, "Circuit topology study for distributed MPPT in very large scale PV power plants, Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE, 6-11 March 2011, Fort Worth, TX, USA.
- 27.N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, "Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems", CRC Press Reference (18 December 2012) - 366 Pages - 260 B/W Illustrations ISBN 9781466506909 - CAT# K14643, USA.
- 28.G. Graditi, G. Adinolfi, "Performances analysis of different DMPPT boost converters", 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 5-9 September 2011, Hamburg, Germany.
- 29.B. J. Saharia, M. Manas, S. Sen, "Comparative Study on Buck and Buck-Boost DC-DC Converters for MPP Tracking for Photovoltaic Power Systems", Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), Second International Conference, 12-13 Feb. 2016, Ghaziabad, India.

9 Indice delle figure

Figura 1. Architettura Master-Slave di convertitori SMPPT asserviti ad un impianto fotovoltaico.	9
Figura 2. Architettura di convertitori SMPPT in una micro rete DC.	9
Figura 3. Architettura di convertitori SMPPT in un Net Zero Energy Cluster.	10
Figura 4. Pseudo-codice MOEA.	14
Figura 5. Pseudo-codice MOGA.	15
Figura 6. Pseudo-codice NSGA-I.	16
Figura 7. Pseudo-codice NSGA-II.	17
Figura 8. Pseudo-codice SPEA.	18
Figura 9. Pseudo-codice SPEA II.	18
Figura 10. Distribuzione annuale Temperatura ambiente e s soleggiamento.	21
Figura 11. Grafico della funziona affidabilità R(t).	22
Figura 12. a. Connessione di tipo serie; b. Connessione di tipo parallelo; c. Connessione serie/parallelo. ...	25
Figura 13. L'interfaccia grafica del tool RET.	28
Figura 14. Schema sintetico del tool RET.	29
Figura 15. RET: interfaccia di progettazione per Master-Slave SMPPT.	30
Figura 16. RET: interfaccia di progettazione per convertitori SMPPT di tipo boost.	32
Figura 17. Diode Rectification boost.	33

10 Indice delle tabelle

Tabella I. Formule del tasso di guasto di componenti elettronici (217Plus).	24
Tabella II. Ore operative per le diverse condizioni di funzionamento.	31
Tabella III. Coefficienti empirici per il calcolo della TgenFV di generatori fotovoltaici.	32