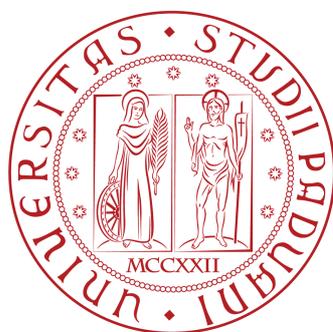


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

—
Department of Information Engineering
—

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN
INGEGNERIA DELL'AUTOMAZIONE

**SPV1020: CONVERTITORE
INTEGRATO PER PANNELLI
SOLARI**

**SPV1020: SINGLE CHIP
BOOST-CONVERTER FOR SOLAR
PANELS**

Relatore: Prof. Ing. **SILVERIO BOLOGNANI**

Laureando: **FABIO MIOTTI**

ANNO ACCADEMICO 2009/2010

“Due cose sono infinite: l’universo e la stupidità umana,
ma riguardo l’universo ho ancora dei dubbi.”
Albert Einstein

A Valentina.

Indice

1	Generalità sugli impianti fotovoltaici	4
1.1	Cenni storici	4
1.2	Principio di funzionamento	5
1.3	Applicazioni passate e presenti del fotovoltaico	6
1.4	Costo e durata di un impianto fotovoltaico	8
1.5	Tipologie di impianto fotovoltaico	10
1.5.1	SISTEMI STAND-ALONE	10
1.5.2	SISTEMI GRID-CONNECT	11
1.6	Efficienza di un impianto fotovoltaico	12
2	Esempi di controllo: MPPT	14
2.1	Definizioni e proprietà	14
2.2	Funzionamento di un Maximum Power Point Tracking	15
2.3	Vantaggi del Maximum Power Point Tracking	16
3	Descrizione di un nuovo componente	18
3.1	Introduzione	18
3.2	Descrizione dell'ST SPV-1020	19
3.3	Principali caratteristiche di questo nuovo componente	20
3.4	Le peculiarità del nuovo componente	21
3.5	L'evaluation board: STEVAL-ISV004V2	25

Bibliografia

Introduzione

Il settore fotovoltaico sta vivendo in questi momenti una rapida evoluzione su scala mondiale. La tecnologia solare è uno dei principali pilastri della cosiddetta rivoluzione verde per la risoluzione del complicato problema del riscaldamento globale.

I fattori che stanno favorendo la diffusione di questa tecnologia sono molteplici, e di svariate nature.

Prima tra tutti va menzionata la diminuzione del prezzo dei pannelli fotovoltaici, dovuta in gran parte agli interventi finanziari di molti governi che hanno concesso incentivi all'acquisto di questa tecnologia, ma anche al conseguente aumento degli investimenti nel settore che hanno ampliato la capacità produttiva mondiale, riducendone drasticamente il costo.

Un altro motivo importante è stato l'aumento del costo dell'energia tradizionale, che ha messo molti paesi nelle condizioni di valutare percorsi alternativi per la produzione di energia elettrica, portandoli ad investire nel nucleare e nelle cosiddette energie alternative, tra cui al primo posto figura appunto l'energia prodotta con impianti fotovoltaici.

Ultimo, ma non per importanza, lo sviluppo delle tecnologie in questo settore ha fatto in modo di creare sistemi versatili e compatti, che potessero adattarsi alle varie richieste dell'utenza.

Col passare degli anni, la ricerca in questo settore ha anche fatto sì che via via aumentassero i rendimenti delle stesse celle fotovoltaiche, adottando materiali ed accortezze capaci di aumentare in alcuni casi anche del 100% la produzione di energia elettrica, a parità di dimensione ed esposizione solare di uno stesso pannello solare. Ma il rendimento di un impianto non dipende unicamente dalla conformazione fisica del singolo pannello fotovoltaico, bensì da una lunga serie di parametri tra loro interdipendenti, legati ai rendimenti dei singoli componenti del sistema stesso, inteso nella sua più completa totalità.

In questa tesi verrà analizzato un nuovo componente elettronico, l'ST SPV-1020, un convertitore monolitico boost DC-DC, che implementando la strategia MPPT (Maximum Power Point Tracking), ottimizza in maniera sensibile la produzione di energia elettrica negli impianti fotovoltaici.

Capitolo 1

Generalità sugli impianti fotovoltaici

1.1 Cenni storici

Primo aspetto da analizzare con molta attenzione per capire a pieno l'attuale impiego massiccio degli impianti fotovoltaici, è sicuramente la storia della scoperta ormai secolare della foto conducibilità di alcuni materiali.

L'idea che dalla luce del sole si potesse ricavare energia elettrica risale a molti anni fa, già dalla prima metà del 1800. Si narra infatti, che nel 1839, Edmond Becquerel, fisico francese a quel tempo diciannovenne, durante uno dei suoi tanti esperimenti, avesse osservato il formarsi di una differenza di potenziale ai capi di due elettrodi di platino, uno illuminato e l'altro no.

In un primo momento questa scoperta era passata inosservata agli occhi dei grandi studiosi dell'epoca. Solo dal 1870 in poi iniziarono dei veri e propri studi sulla foto conducibilità.

Infatti in quegli anni alcune accurate prove di laboratorio sulle proprietà fisiche del selenio, effettuate dal noto studioso Willoughby Smith, aprirono le porte ad un serio e dettagliato studio sulla capacità di trasformare la luce in energia elettrica.

Pochi anni più tardi, nel 1876, due scienziati britannici, Adams e Day, osservano il selenio convertire la luce del sole direttamente in energia elettrica, senza riscaldare fluidi o mettere in rotazione parti mobili interconnesse con una dinamo. Era a dir poco una novità sensazionale, senza precedenti.

Queste piccole e grandi scoperte avevano fatto sì che già agli inizi del 1900 fosse stato possibile creare delle piccole celle fotovoltaiche, impiegando il selenio.

Il rendimento di queste prime celle al selenio, prodotte fin dalla prima decade del diciannovesimo secolo, si aggirava attorno all'1%. Il vero salto di qualità nella produzione dell'energia elettrica mediante le celle fotovoltaiche si ebbe però solo nella primavera del 1953 quando, studiando il silicio e le sue possibili applicazioni nell'elet-

tronica, Gerald Pearson, fisico presso i laboratori Bell, costruì involontariamente una cella solare a silicio molto più efficiente di quella al selenio. I materiali come il silicio, contrariamente al selenio, possono produrre una elevata quantità di energia elettrica se irraggiati dalla luce solare.

Questa caratteristica fisica ha permesso, oltre alla realizzare delle prime celle fotovoltaiche ad alto rendimento nella storia dell'uomo, anche a contribuire alla rapida diffusione di questa utile tecnologia ormai diffusa in moltissimi campi.

1.2 Principio di funzionamento

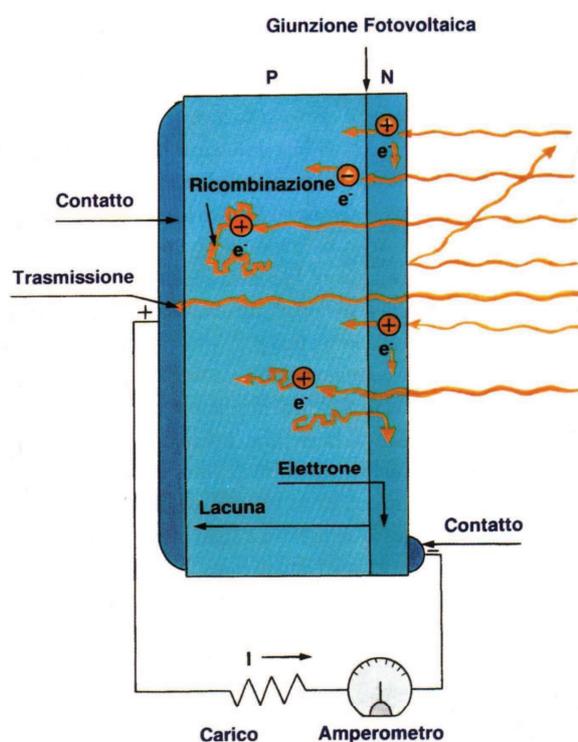


Figura 1.1: Funzionamento di una cella fotovoltaica

conduttore del pannello solare, normalmente realizzato utilizzando il silicio. Gli atomi di silicio del pannello solare compongono un reticolato cristallino tridimensionale di forma tetraedrica in cui ognuno di essi mette in comune uno dei suoi quattro elettroni

Il pannello fotovoltaico non è altro che una serie di singole celle fotovoltaiche collegate tra loro con l'intento di formare un cosiddetto modulo fotovoltaico in grado di trasformare la luce solare direttamente in energia elettrica.

Ogni singola cella fotovoltaica può produrre circa 1,5 W di potenza ad una temperatura di 25°C, detta anche temperatura standard.

Un modulo solitamente è costituito da 36 celle poste in serie che consentono di produrre quindi una potenza di circa 50 Watt. L'energia prodotta dal modulo prende il nome di potenza di picco.

La modularità dei pannelli fotovoltaici consente una vasta flessibilità di impieghi, sulla base delle reali esigenze dell'utente o sulle caratteristiche della superficie che si intende destinare all'impianto.

Ma come viene prodotta l'energia elettrica da un pannello fotovoltaico?

Il flusso luminoso proveniente dal Sole investe il materiale semicon-

di valenza. L'elettrone in comune è quello con orbita più esterna mediante il quale avviene la conduzione elettrica. Gli altri tre elettroni con orbita più interna sono invece fortemente legati al nucleo dell'atomo e non partecipano alla conduzione. Allo stato normale gli elettroni esterni si trovano in una fase di valenza e non dispongono dell'energia sufficiente per condurre elettricità. Quando però questo si verifica (grazie all'energia fornita dalla luce solare), l'elettrone passa dalla banda di valenza a quella di conduzione ed è libero di muoversi all'interno del reticolato grazie alla stretta vicinanza degli altri atomi di silicio. Nel passaggio di banda lascia dietro di sé una lacuna. Il movimento degli elettroni esterni in banda di conduzione e delle relative lacune continua fin quando è presente l'irraggiamento solare. L'energia elettrica in uscita dal modulo viene quindi passata per dispositivi *balance of system* per adattare la corrente (che fino ad ora ricordiamo essere corrente continua) e trasformarla in corrente alternata tramite il sistema di inverter.

L'energia così modificata è introdotta nella rete elettrica per alimentare il consumo di elettricità locale o per essere computata a credito da uno speciale contatore del gestore della rete elettrica.

1.3 Applicazioni passate e presenti del fotovoltaico

Basta uscire di casa per vedere come ormai i tetti di molte abitazioni, capannoni industriali, edifici pubblici siano stati dotati di pannelli fotovoltaici per trasformare la luce del Sole in energia elettrica alternata, usufruibile per tutte le normali attività quotidiane o vendibile alla società elettrica.

Ma come si è arrivati a tutto questo?

Per capirlo bisogna ripercorrere alcune tappe. Fin dai lontani anni '70, l'energia fotovoltaica è presente nella quotidianità dei paesi industrializzati. Una semplice applicazione dei pannelli fotovoltaici, molto in voga in quegli anni, era disponibile in alcuni modelli di calcolatrici tascabili o di orologi ricaricabili con energia solare. Piccole applicazioni, basate su potenze infinitesimali d'energia, dal centesimo al decimo di Watt, ma che hanno avuto un ruolo importante sulla diffusione di questa tecnologia: hanno dato l'opportunità ad un ampio pubblico di persone di conoscere questa importante invenzione. Seguì poi però un lungo periodo di stasi, durato quasi vent'anni: tra gli anni '80 e '90 infatti, complici anche il costo poco competitivo rispetto alle altre fonti di energia e la stabilità del prezzo del petrolio, non ci fu più lo stimolo iniziale a procedere nello sviluppo della tecnologia legata al fotovoltaico. Solo nel corso degli anni '90, a seguito di alcune pubblicazioni scientifiche sulla continua ed evidente crescita dei danni causati dall'inquinamento diffuso, si ricrearono le condizioni per riprendere in mano seriamente la necessità di investire sulla cosiddetta energia pulita delle fonti alternative. Nel frattempo la ricerca tecnologica aveva comunque fatto il suo corso, portando alla realizzazione di pannelli solari fotovoltaici con rendimenti



Figura 1.2: Prototipo di casa solare

sempre più elevati e con rapporto prezzo/rendimenti sempre più conveniente per chi decideva di investire su questo campo.

Ma come vengono utilizzati i pannelli solari al giorno d'oggi?

La loro versatilità ed adattabilità li porta ad essere la soluzione energetica migliore per una infinita vastità di casi. Differenti modi per connettere i pannelli con la rete, permettono di ottenere dei sistemi che si possono adattare alle più disparate necessità del singolo utente. Giusto a titolo di esempio, queste sono le più utilizzate classificazioni dei sistemi fotovoltaici:

1. **SISTEMI ISOLATI:** permettono di avere energia elettrica in luoghi remoti, dove un eventuale allaccio alla rete elettrica nazionale potrebbe rivelarsi troppo costoso o addirittura impossibile. Questa possibilità consente di posizionare macchine e dispositivi in contesti isolati o difficilmente raggiungibili. Molti sono gli esempi pratici che ci circondano che possono essere elencati: segnaletica stradale, baite o rifugi montani, illuminazione pubblica in località poco densamente abitate, il telemonitoraggio, i sistemi di irrigazione nelle aziende agricole, l'illuminazione nei parchi pubblici, la fornitura di energia per case isolate.
2. **SISTEMI CONNESSI ALLA RETE:** sono impianti in grado di produrre durante

il giorno energia elettrica, e durante la notte di prelevarla dalla rete elettrica nazionale. Questo evita la presenza di accumulatori di energia, molto costosi ed ingombranti. Inoltre da la possibilità di cedere l'energia elettrica prodotta in eccesso alla rete elettrica nazionale e ottenere in cambio una tariffa, compensando il costo della bolletta elettrica. Questo quadro si è ampliato radicalmente nel 2005, quando l'Italia ha approvato il primo conto energia in base al quale chiunque può rivendere l'energia prodotta dai pannelli solari ottenendo in cambio un profitto (attualmente è concesso al massimo compensare il costo della propria bolletta elettrica).

3. SISTEMI ANTI BLACK-OUT: l'energia elettrica prodotta dai pannelli solari può anche essere accumulata e rilasciata in modo programmato o durante i periodi di black-out, consentendo un supporto al sistema di continuità.

Per completare l'elenco dei vantaggi legati al fotovoltaico, non si può però di certo fermarsi alle infinite possibilità di utilizzazione di questi sistemi, aspetto fondamentale per una grande diffusione ma non l'unico. Dal punto di vista sociale, gli impianti fotovoltaici riducono la domanda di energia da altre fonti tradizionali contribuendo alla riduzione dell'inquinamento atmosferico (emissioni di anidride carbonica generate altrimenti dalle centrali termoelettriche). Non è da sottovalutare poi l'impatto sul paesaggio dettato dalla modularità dei pannelli solari che consente di integrare i moduli sulle superfici esistenti delle abitazioni, normalmente sui tetti, portandolo così di fatto a divenire pressochè nullo.

1.4 Costo e durata di un impianto fotovoltaico

Il costo finale di un impianto fotovoltaico di medie dimensioni può andare da un minimo di 8.000 euro in su, in funzione delle esigenze di consumo energetico e dalle caratteristiche della propria abitazione.

Con l'espansione del mercato fotovoltaico i nuovi pannelli garantiscono autonomia di funzionamento e rendimenti sempre più elevati. Il prezzo dei pannelli fotovoltaici tende costantemente a scendere facendo accedere alla domanda anche chi aveva scartato l'ipotesi in passato a causa dei costi troppo elevati.

Nel caso dei tetti piani, robusti e ben esposti alla luce solare il costo è notevolmente inferiore rispetto ai tetti inclinati o poco esposti. I costi inoltre non sono unicamente legati alla tipologia di edificio, ma bensì anche al mercato.

Il fotovoltaico è un mercato nascente in forte crescita e i prezzi sono soggetti alle tipiche regole della concorrenza e della domanda. Uno dei punti a svantaggio sul prezzo è stata la mancanza di una continuità nella domanda, spesso legata ad alcuni bandi di concorso regionali periodici.



Figura 1.3: Installazione di un impianto fotovoltaico

La decisione di introdurre il sistema del conto energia ha contribuito però ad un rapido incremento della domanda. Il conto energia, molto atteso anche dalle società di settore, ha favorito l'accesso sul mercato di nuove imprese competitive, con notevole vantaggio in termini di concorrenza. È sempre consigliabile infatti richiedere preventivi a più aziende specializzate prima di decidere a chi affidare l'installazione dell'impianto.

In ogni caso, tornando al fattore costo, come per qualsiasi altro impianto domestico anche un

impianto fotovoltaico può essere considerato per due importanti fattori:

1. costi iniziali di investimento per la realizzazione dell'impianto, l'acquisto moduli e dei dispositivi;
2. costi di esercizio, dove computare la manutenzione annuale.

I costi di manutenzione sono generalmente bassi e accessibili a tutti, e per impianti di medi o grandi viene spesso consigliato di stipulare dei contratti di assistenza con la ditta installatrice al momento dell'acquisto, per ottenere ulteriori riduzioni nella spesa.

La durata media di un impianto fotovoltaico oscilla tra i 25 e i 30 anni. I vantaggi economici sono quindi evidenti. Durante l'intera vita dell'impianto si possono eliminare parzialmente o, in alcuni casi, anche completamente i costi di acquisto dell'energia elettrica dall'ente fornitore, ottenendo anche dei surplus economici nel caso del conto energia.

I costi possono essere abbattuti usufruendo degli incentivi pubblici concessi per l'installazione dei pannelli fotovoltaici dalle Regioni o dallo Stato. In alcuni casi è stato possibile ottenere un contributo pari al 75% della spesa complessiva. Purtroppo i contributi statali si sono dimostrati inadeguati a coprire l'intera domanda e da gennaio 2011 non saranno più usufruibili. Alcune regioni hanno già annunciato però che continueranno a rifinanziare dei bandi per incentivare l'adozione di questa utile ed importante tecnologia.

Il futuro però si dice stia nella politica delle tariffe incentivate. Come molti esperti asseriscono, sarà sempre più preferibile un intervento pubblico sulle tariffe

di acquisto agevolate dell'energia prodotta dai pannelli solari in conto energia piuttosto che una politica dei contributi basata su fondi pubblici limitati e accessibili a pochi. Le tariffe agevolate sarebbero applicabili a tutti gli acquirenti dei pannelli e consentirebbero al mercato del fotovoltaico di crescere rapidamente.

1.5 Tipologie di impianto fotovoltaico

Come già anticipato nei precedenti paragrafi, vari modi di connettere gli stessi pannelli fotovoltaici con la rete elettrica nazionale, danno vita a diversi sistemi con diverse peculiarità e caratteristiche di utilizzo. Volendo classificare questi sistemi solari fotovoltaici, si possono dividere le varie tipologie in due grandi insiemi al fine di indicarne le peculiarità:

1. SISTEMI STAND-ALONE (o sistemi isolati/isola): questi sistemi fotovoltaici non sono connessi alla rete elettrica pertanto non cedono l'energia prodotta in eccesso alla rete ma la accumulano in apposite batterie locali.
2. SISTEMI GRID-CONNECT: questi sistemi hanno un collegamento diretto con rete elettrica e possono scambiare energia elettrica.

Ma ora analizziamoli nel dettaglio:

1.5.1 SISTEMI STAND-ALONE

Gli impianti fotovoltaici stand-alone, come anticipato, sono caratterizzati dall'assenza dell'allaccio alla rete di distribuzione dell'elettricità.

In questo caso l'impianto fotovoltaico ha l'onere di provvedere direttamente alla produzione e all'erogazione dell'elettricità necessaria per l'intero fabbisogno energetico.

Gli impianti fotovoltaici isolati hanno un'ampia applicazione e diffusione nel settore della segnaletica stradale e visiva e, più in generale, in tutte le applicazioni che per vari motivi si trovano ad essere troppo lontani da un punto di allacciamento alla rete elettrica nazionale.

Come funzionano i sistemi stand-alone?



Figura 1.4: Prototipo di auto elettrica alimentata da pannelli fotovoltaici: chiaro esempio di sistema STAND-ALONE

Il pannello fotovoltaico cattura l'energia solare nelle ore diurne ed alimenta una batteria accumulatore. Nelle ore notturne l'energia accumulata viene rilasciata per alimentare la lampada e il sistema elettronico di controllo.

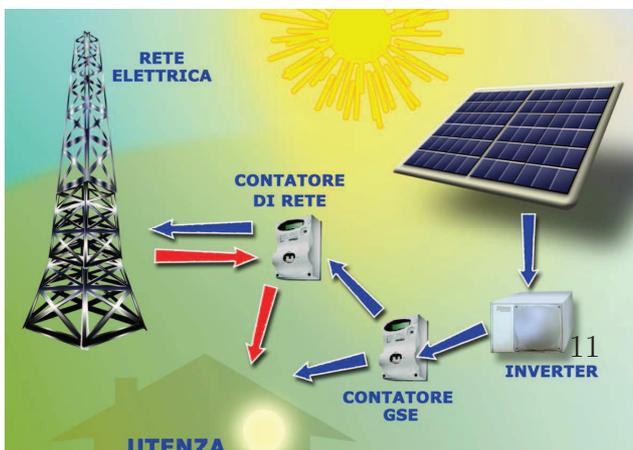
Quali elementi compongono un sistema stand-alone?

I componenti di un impianto fotovoltaico a isola sono i seguenti:

- CAMPO FOTOVOLTAICO: l'insieme dei moduli fotovoltaici dedicati alla raccolta dell'energia solare;
- REGOLATORE DI CARICA: è un sistema che serve a gestire e a stabilizzare l'energia prodotta. Normalmente l'energia elettrica che arriva dai moduli fotovoltaici ha una tensione stabilizzata di 12 o 24 Volts. Il regolatore di carica provvede a distaccare il campo fotovoltaico dalla batteria nel caso in cui quest'ultima sia carica e nei casi di bassa tensione (come nelle ore serali) o di ritorni di tensione dalla batteria al pannello.
- BATTERIA DI ACCUMULO: è il sistema chimico dedicato ad accumulare l'energia, prodotta dai moduli fotovoltaici e stabilizzata dal regolatore di carica, per consentire un uso differito nel tempo.
- INVERTER: il sistema di conversione della corrente continua in corrente alternata. La corrente in uscita dal Inverter ha normalmente una tensione standard pari a 110 o 220 volt per consentire l'alimentazione dei dispositivi elettronici di destinazione.

1.5.2 SISTEMI GRID-CONNECT

Gli impianti solari grid-connect, ovvero connessi alla rete, consentono di produrre energia elettrica dai pannelli solari immettendola nella rete elettrica nazionale. Questi impianti fotovoltaici sono situati laddove gi esiste un'utenza della rete nazionale in AC. L'elettricità consumata è conteggiata a debito, al contrario quella prodotta dai pannelli solari fotovoltaici è conteggiata a credito. Prima d'essere immessa nella rete elettrica l'energia prodotta dai pannelli è opportunamente convertita in corrente alternata.



Come funzionano i sistemi grid-connect?

L'energia prodotta dai pannelli solari è misurata mediante uno speciale contatore a credito.

Questo servizio, detto di net metering, è fornito dagli stessi gestori di rete. Il contatore a credito

Figura 1.5: Schema di funzionamento di un sistema GRID-CONNECT

è un sistema integrato con il contatore a debito, al fine di valutare se l'energia prodotta dai pannelli solari è autoconsumata dall'utente oppure immessa in rete. In Italia il sistema è regolamentato dalla normativa del cosiddetto Conto Energia.

Quali elementi compongono un sistema grid-connect?

I componenti di un impianto fotovoltaico a isola sono i seguenti:

- CAMPO FOTOVOLTAICO: come già spiegato è l'insieme dei moduli fotovoltaici dedicati alla raccolta dell'energia solare;
- INVERTER: il sistema di conversione della corrente continua in corrente alternata. La corrente in uscita dal Inverter ha normalmente una tensione standard pari a 110 o 220 volt per consentire l'alimentazione dei dispositivi elettronici di destinazione.
- SISTEMA ELETTRICO: è lo stesso impianto elettrico dell'edificio, composto da cavi, quadro elettrico e sistema di controllo. Deve essere adeguato alla potenza e alle condizioni di ambiente esterne.

1.6 Efficienza di un impianto fotovoltaico

Come ogni sistema, l'impianto fotovoltaico necessita di essere descritto non solo tecnicamente ma anche qualitativamente. Molte sono le variabili che influiscono nella produzione di energia elettrica a partire dall'irraggiamento solare.

Solo alcuni di questi sono così importanti da meritare di essere elencati. Quelli che seguono appunto sono i fattori che influenzano la produzione di energia in un impianto fotovoltaico in maniera maggiormente evidente:

1. SUPERFICIE DELL'IMPIANTO, oltre che l'inclinazione dei pannelli rispetto la luce solare;
2. POSIZIONE DEI PANNELLI RISPETTO AL SOLE, perchè il pannello deve essere rivolto in maniera tale da saper cogliere nell'arco della giornata la maggiore esposizione possibile ai raggi solari (è preferibile quindi sia rivolto a sud);
3. POTENZA DELLA RADIAZIONE SOLARE, che è diversa in base a fattori latitudinali e altitudinali;

4. EFFICIENZA DEI MODULI FOTOVOLTAICI, che in condizioni ottimali mediamente oscillano dal 10% al 12,5%;
5. EFFICIENZA DEL BOS, dove per BOS si intende l'insieme di tutti i componenti e di tutti i dispositivi necessari per trasformare e trasferire l'energia prodotta dai moduli fotovoltaici fino alla rete di utilizzazione.

Ed è appunto così, partendo da questa necessità di avere una alta efficienza in questo ultimo stadio prima dell'utenza utilizzatrice, che nel prossimo capitolo verrà analizzata un importante tecnica per l'ottimizzazione dell'energia prodotta dai moduli fotovoltaici: l'MPTT.

Capitolo 2

Esempi di controllo: MPPT

2.1 Definizioni e proprietà

L'irraggiamento solare che colpisce i moduli fotovoltaici ha un carattere fortemente variabile in funzione della latitudine, dell'orientamento del campo solare, della stagione e dell'ora del giorno.

Su ogni cella poi si possono determinare, nel corso della giornata, delle ombre che possono essere prevedibili, come nel caso di un edificio situato nelle vicinanze del campo solare o imprevedibili come quelle determinate dalle nuvole. Inoltre la quantità di energia prodotta da ciascuna cella fotovoltaica dipende dall'irraggiamento e dalla sua temperatura.

Da queste considerazioni nasce la necessità di individuare istante per istante quel particolare punto sulla caratteristica $V \times I$ del generatore fotovoltaico in cui risulti massimo il trasferimento di potenza verso rete.

Chiaramente, se si riesce a massimizzare la potenza erogata dall'impianto, si riesce a sfruttarlo al meglio, sia che questo sia connesso alla rete, sia stand-alone.

Il Maximum Power Point Tracking, che si abbrevia utilizzando il termine MPPT, é un dispositivo integrato negli inverter che, tipicamente, ad ogni istante legge i valori di tensione e corrente, ne calcola il prodotto (cioé la potenza in Watt) e, provocando piccole variazioni nei parametri di conversione (duty cycle), é in grado di stabilire per confronto se il modulo fotovoltaico sta lavorando in condizioni di massima potenza oppure no. A seconda del responso agisce ancora sul circuito per portare l'impianto in tale condizione ottimale. Il motivo per cui gli MPPT sono utilizzati é semplice: un impianto fotovoltaico senza MPPT puó funzionare comunque, ma a parità di irraggiamento solare fornisce meno energia.

2.2 Funzionamento di un Maximum Power Point Tracking

Come appena anticipato, l'irraggiamento solare su una superficie captante, quale può essere quella di un impianto fotovoltaico, ha carattere fortemente variabile essendo dipendente dalla posizione del sole rispetto a detta superficie. Per di più è aleatorio, essendo influenzato dalla presenza-assenza del sole. Una cella di un modulo fotovoltaico esibisce, per vari valori dell'irraggiamento solare, e per vari valori della temperatura, una famiglia di curve caratteristiche del tipo in figura qui sotto.

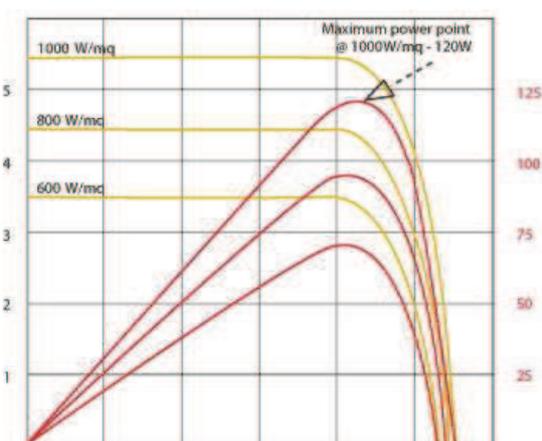


Figura 2.1: Curve caratteristiche

Sempre con riferimento alla figura precedente, il prodotto $V \times I$ è rappresentato per i tre valori dell'irraggiamento solare di cui sopra, tramite le tre curve a tratto più sottile. Come si vede, in accordo con quanto detto prima, tali curve esibiscono un massimo. Ad esempio, per $1000\text{W}/\text{mq}$, il punto di massima potenza corrisponde ad un valore di tensione pari a circa 36V e corrente di circa $5,5\text{A}$.

Graficamente, il punto di massima potenza corrisponde al punto di tangenza tra la caratteristica del pannello fotovoltaico, per un certo valore della radiazione solare, e l'iperbole di equazione $V \times I = \text{COSTANTE}$ corrispondente. Questo punto varia istantaneamente in funzione delle condizioni di irraggiamento solare, nonché dall'eventuale variazione di temperatura corrispondente.

L'MPPT ha il compito di individuare istante per istante questo punto, senza commettere errori, per permettere la più alta produzione di energia elettrica a partire dalla conformazione dell'impianto fotovoltaico stesso.

2.3 Vantaggi del Maximum Power Point Tracking

La caratteristica fondamentale di questi particolari regolatori di carica é la capacità di gestire e sfruttare costantemente il punto di massima potenza erogata dal pannello fotovoltaico in base all'irraggiamento solare a cui é sottoposto. I vantaggi dovuti a questa caratteristica sono molti, ma i principali vantaggi della tecnologia MPPT sono sintetizzabili in due punti:

1. MAGGIOR CORRENTE DISPONIBILE:

i regolatori MPPT sono in grado di utilizzare tutta la potenza (Watt) generata dal pannello fotovoltaico per caricare la batteria, a differenza invece dei regolatori tradizionali PWM che sfruttano soltanto la corrente (Ampere) generata dal pannello.

Giusto per comprendere al meglio questo concetto basta specificare alcune cose.

Partendo dal noto presupposto che la potenza (W) erogata da un pannello é il risultato del valore della corrente (A) erogata dal pannello moltiplicato per quello della tensione (V) generata dal pannello ($W = A \times V$), si pu dire che la tensione di lavoro generata da un pannello fotovoltaico tipicamente assume valori tra i 12 e i 18 Volt.

La tensione utile per la conversione é di 12 V, e la restante parte diventa quindi un surplus di tensione, che per questo motivo non viene considerato nei regolatori di carica tradizionali (a tecnologia PWM).

Nei regolatori MPPT tutta la tensione generata dal pannello viene utilizzata al fine di aumentare la corrente e quindi di conseguenza l'energia disponibile nella conversione.

Capita molto spesso che questa caratteristica permetta di aumentare la produzione di energia elettrica per piú del 30% in condizioni ottimali a paritá di pannello e di corrente erogata da quest'ultimo.

2. AMPIO RANGE DI TENSIONE ACCETTATA IN INGRESSO:

solitamente fino a 100V, a seconda dei modelli.

Questa caratteristica del regolatore MPPT é molto utile, ad esempio, per dare la possibilitá di caricare una batteria a 12V utilizzando un pannello fotovoltaico progettato per lavorare a 24V, senza perdite di potenza.

Infatti, ipotizzando di collegare un pannello progettato per lavorare a 24V (come ad esempio quelli utilizzati negli impianti fotovoltaici connessi alla rete elettrica nazionale in conto energia), che hanno quindi valori di tensione nell'ordine di 32-36V (valori tipici per potenze di pannello superiori a 160W), ecco come si comporta il regolatore MPPT (cosí come per l'esempio riportato sopra) con una corrente di 3A fornita dal pannello:

- la potenza erogata dal pannello sarà in questo caso di: $32,2V \times 3A = 96,6W$
- la corrente di carica della batteria (ad esempio con un valore di tensione di 12V della batteria) sarà di: $96,6W / 12V = 8A$

Si nota così con molta facilità come con una corrente di 3A prodotta da un pannello fotovoltaico a 34V riusciamo a caricare una batteria a 12V con una corrente di ben 8A, grazie al regolatore MPPT.

Un regolatore tradizionale PWM non avrebbe mai potuto effettuare questo aumento di corrente, limitandosi a trasferire soltanto i 3A generati dal pannello (che si sarebbe quindi comportato come un pannello di metà potenza).

Anche in questo caso il maggior costo del regolatore MPPT (rispetto ai modelli PWM) viene compensato dal fatto che un pannello da 180W (a 24V) costa sicuramente meno di 2 pannelli da 110W (a 12V), garantendo inoltre una maggiore corrente disponibile per la carica della batteria.

Capitolo 3

Descrizione di un nuovo componente

3.1 Introduzione

Si andrà ora ad analizzare uno degli ultimi componenti creati dalla compagnia ST. Giusto a titolo di premessa, la ST Microelectronics è la quinta società di semiconduttori al mondo, che vanta uno dei portafogli di prodotti più ampi del settore e fornisce ai clienti molteplici soluzioni innovative basate sui semiconduttori nell'intero spettro delle applicazioni elettroniche.

La società ha una presenza particolarmente forte nei settori del multimediale, delle applicazioni di potenza, della connettività e dei sensori. La ST è anche fortemente impegnata nella realizzazione di soluzioni capaci di ridurre i consumi di energia nell'uso di applicazioni domestiche e industriali. La SPV è una serie di componenti progettati per massimizzare la potenza generata dai pannelli fotovoltaici, indipendentemente dalla temperatura e dalla quantità di radiazione solare.

Questa serie si compone fino ad ora di tre diverse tipologie di elementi:

- l' SPV-1001T40, un cool-bypass per le applicazioni del fotovoltaico un bypass, utile come raddrizzatore con caratteristiche simili a quelle di un diodo Schottky, solo con caduta di tensione molto minore a quella di quest'ultimo;
- l' SPV-1020, un convertitore boost DC-DC progettato per massimizzare la potenza generata dai pannelli fotovoltaici sfruttando la strategia MPPT;
- l' SPV-1040, un componente utile a migliorare il controllo per la carica delle batterie nei sistemi fotovoltaici, qualcosa di simile ad un MPPT per impianti stand-alone.

In questa tesi verrà analizzato il secondo di questi tre componenti, l'ST SPV-1020, e la sua relativa evaluation board.

3.2 Descrizione dell'ST SPV-1020

Come anticipato, l'SPV1020 è un convertitore boost DC-DC monolitico, progettato per massimizzare la potenza generata da pannelli fotovoltaici, indipendentemente dalla temperatura e dalla quantità di radiazione solare.

L'ottimizzazione della conversione di potenza è ottenuta con una logica integrata, che esegue le caratteristiche dell'algoritmo utilizzato nella tecnologia MPPT, sulle celle fotovoltaiche collegate al convertitore.

Uno o più di questi convertitori possono essere alloggiati nella scatola di connessione dei pannelli fotovoltaici, in sostituzione dei diodi di bypass, e grazie al fatto che il punto di massima potenza è calcolata a livello locale, l'efficienza a livello di sistema sarà più alta di quella ottenibile da tipologie di impianto più convenzionali.

Per riuscire ad ottenere una soluzione applicativa redditizia e il più possibile miniaturizzata, SPV1020 incorpora al suo interno il MOSFET di potenza per gli switch attivi e per la rettificazione sincrona, minimizzando così di fatto il numero di dispositivi esterni e di corredo al convertitore stesso.



Figura 3.1: Rappresentazione schematica del componente ST SPV-1020

Questo componente funziona a frequenza fissa, in modalità PWM, dove il ciclo di lavoro viene in parte controllato da un'apposita parte logica embedded, per non turbare l'esecuzione dell'algoritmo MPPT. La frequenza di commutazione degli switch interni è impostata di default sul valore di frequenza di 100 kHz, ed è esternamente sintonizzabile; il ciclo di lavoro invece può variare dal 5% al 90%, con un passo fisso dello 0,2%.

La sicurezza di questo dispositivo è garantita anche da un circuito interno in grado di fermarlo in caso di sovra-tensione o di sovra-temperatura.

3.3 Principali caratteristiche di questo nuovo componente

Si elencano brevemente le caratteristiche dell'ST SPV-1020, già in parte enunciate nel precedente paragrafo:

- questo componente è un convertitore DC-DC boost converter, che funziona in modalità PWM.

La PWM, che tradotta in italiano significa modulazione a larghezza di impulso, è una tecnologia largamente utilizzata per regolare la potenza elettrica inviata ad un carico, per esempio negli inverter, per regolare la velocità dei motori in corrente continua e per variare la luminosità delle lampadine.

Il vantaggio di questa tecnica è che permette di ridurre drasticamente la potenza dissipata dal circuito limitatore rispetto all'impiego di transistor controllati analogicamente.

In un semiconduttore la potenza dissipata è determinata dalla corrente che lo attraversa per la differenza di potenziale presente ai suoi capi.

In un circuito PWM il transistor in un istante conduce completamente, riducendo al minimo la caduta ai suoi capi, oppure non conduce, annullando la corrente, ed in entrambi i casi la potenza dissipata è minima.

- Ciclo di lavoro controllato da un algoritmo del tipo MPPT con il 0,2% di precisione.

Come anticipato questo componente sfrutta l'algoritmo Maximum Power Point Tracking, per ottimizzare la produzione di energia elettrica a partire dai pannelli fotovoltaici, con le modalità descritte nel precedente capitolo;

- Campo di tensione 0-36 V.

L'SPV-1020 accetta ai suoi capi di ingresso una qualsiasi tensione compresa tra gli 0V ed i 36V.

Questa caratteristica lo rende molto versatile e soprattutto impiegabile sia negli impianti GRID-CONNECTED (che hanno tipicamente una tensione all'ingresso dell'inverter di 24 V), sia per quelli STAND-ALONE (che invece hanno una tensione in ingresso all'inverter all'incirca di 12 V).

- Protezione da sovratensione, sovracorrente e sovratemperatura.

Utile non solo a proteggere lo stesso componente, ma anche l'inverter e l'intera totalità dei componenti elettronici che compongono l'impianto fotovoltaico.

- Soft-start incorporato.

Un'ulteriore garanzia, che serve a proteggere tutta la circuiteria elettronica dell'impianto dalle frequenti sovracorrenti iniziali, causate dai componenti capacitivi ed induttivi del sistema.

- Fino al 98% di efficienza.

Una percentuale molto alta, nonchè molto difficile da raggiungere per qualsiasi impianto fotovoltaico.

- Passaggio automatico alla modalità BURST per una migliore efficienza in caso di bassa radiazione solare.

Per sfruttare anche le basse quantità di energia prodotte dai pannelli fotovoltaici, nei momenti di minore esposizione degli stessi alla luce del sole.

- Interfaccia SPI.

L'interfaccia Serial Peripheral Interface è un sistema di comunicazione tra un microcontrollore e altri circuiti integrati o tra più microcontrollori. In questo caso permette la comunicazione tra lo stesso SPV-1020 ed altri microcontrollore, al fine di gestire le sue funzioni di convertitori in modalità concertata ad eventuali altri componenti compatibili.

3.4 Le peculiarità del nuovo componente

Analizzando con attenzione i data-sheet di questa nuova produzione della ST, saltano all'occhio però ulteriori informazioni degne di nota.

Come spiegato, l'SPV1020 è un convertitore DC/DC boost a 4 fasi completamente integrato ad elevato rendimento, tipologia che può operare in un campo di tensione che va dai 6,5 V ai 36 V. Nell'immagine che segue viene riportato il diagramma a blocchi semplificato di una delle quattro fasi del componente.

A seguire si elencano le caratteristiche più importanti che fanno di questo componente una novità sotto molteplici aspetti:

1. Inizializzazione e modalità di avvio. Al fine di garantire una corretta adattabilità ai vari valori di potenza ammissibile, evitando eccessive oscillazione di tensione, il convertitore si avvia in modalità burst, attivando in sequenza le quattro fasi in cui la tensione di ingresso è superiore a 6,5 V. Un'ottima strategia di soft start che si può così riassumere brevemente:

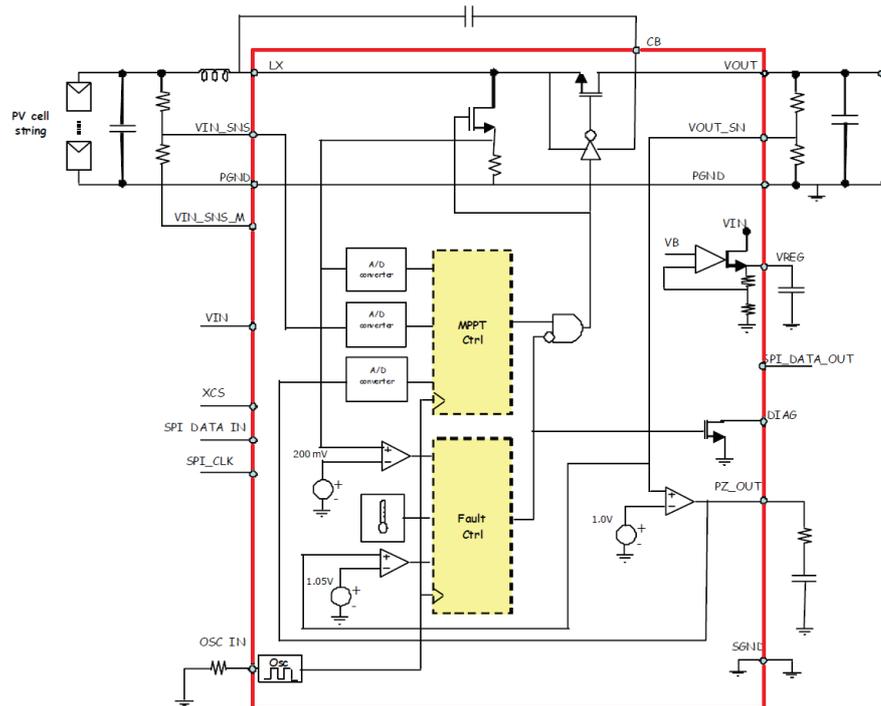


Figura 3.2: Diagramma a blocchi semplificato di una delle quattro fasi del componente

- all'inizio, solo la fase 1 inizia a lavorare in modalità burst, caricando il relativo induttore;
- questo processo di carica continua fino a quando il ciclo relativo alla fase 1 pu ritenersi ultimato, e quindi raggiunto il valore predefinito frequenza di commutazione di 100 kHz per questa fase;
- terminato questo iter per la prima delle quattro fasi, tutte le altre rimanenti fasi vengono progressivamente accese con la stessa modalità nella seguente sequenza: fase 3, fase 2 e, alla fine, fase 4.

Naturalmente, tutta la sequenza è in esecuzione se la potenza generata dalla stringa di celle FV è sempre in aumento, in caso contrario, la sequenza può tornare indietro e poi ripartire nuovamente in base alla necessità.

2. Oscillatore. La frequenza di commutazione interna predefinita è fissata al valore di 100 kHz. Se l'utente desidera impostare il valore predefinito, basta che circuiti il pin OSC con il pin VREG. In caso contrario, la frequenza di commutazione

può essere sintonizzato nella gamma che va dai 50 kHz a 200 kHz, collegando un resistore esterno tra il pin OSC e SGND, la cui resistenza si può calcolare a partire da una formula indicata nei data-sheet.

3. Tensione rilevabile in ingresso. Il dispositivo monitora attraverso il pin VIN_SNS la tensione in ingresso generata dalle celle fotovoltaiche: questo valore viene utilizzato per calcolare la potenza generata dai pannelli e quindi per impostare di conseguenza il PWM al punto di massima potenza. In funzione della tensione di ingresso deve essere ridimensionato il livello di tensione di riferimento (1,25 V) dell'ADC integrato nel SPV1020.
4. Tensione di uscita e relativa protezione da sovratensioni. Un altro controllo è fatto per la tensione in uscita dal pin VOUT_SNS. Questo pin viene utilizzato per monitorare la tensione di uscita al fine di regolare il valore massimo (che non può superare i 40 V) al fine di prevenire danni a causa di sovratensioni.
5. Protezione da sovracorrenti. Per garantire un funzionamento sicuro, il dispositivo è dotato di una protezione da sovracorrente. Quando per un qualsiasi motivo si venisse a verificare un superamento della soglia limite di corrente (circa 4,5 A), il relativo interruttore di alimentazione viene immediatamente spento, mettendo a riparo da ogni rischio il raddrizzatore sincrono e tutte le parte pi delicate dell'inverter.
6. Protezione da sovratemperature. Non poteva mancare neanche questa protezione: quando la temperatura rilevata raggiunge i 150°C, tutto il circuito di potenza viene subito spento. Il dispositivo entra in funzione nuovamente non appena la temperatura del silicio scende al di sotto dei 130°C.
7. Shut-down. In modalità di arresto, in inglese shut-down, permette di spegnere in convertitore non appena al pin SHUT giunge un segnale di livello alto.
8. Diagramma dei tempi. Nella figura che segue viene riportato il diagramma dei tempi del dispositivo, che viene fornito nel data-sheet, assieme alla tabella con i requisiti temporali tipici per una debita analisi delle tempistiche del componente.

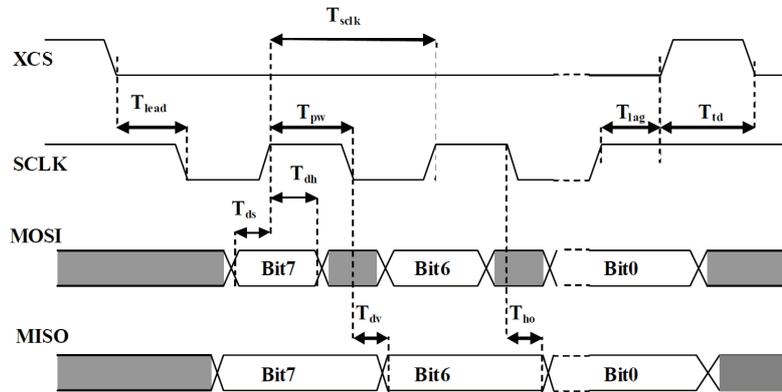


Figura 3.3: Diagramma dei tempi del dispositivo

Parameter	Description	Min	Max	Units
Fsclk	SCLK frequency		6	MHz
Tsck	SCLK period		167	ns
Tpw	SCLK pulse width	80		ns
Tlead	SS lead time	80		ns
Tlag	SS lag time	80		ns
Ttd	Sequential transfer delay	80		ns
Tds	MOSI data setup time	8		ns
Tdh	MOSI data hold time	8		ns
Tdv	MISO data valid time		20	ns
Tho	MISO data hold time	8		ns

Figura 3.4: Tabella riepilogativa delle tempistiche

3.5 L'evaluation board: STEVAL-ISV004V2

La scheda di dimostrazione STEVAL-ISV004V2 è un utile componente fornito dalla ST Microelectronics, utile a testare le prestazioni dell'integrato SPV-1020. Questa evaluation board, implementando un normale SPV-1020 con lo schema elettrico interno riportato nella pagina successiva, dà la possibilità di massimizzare la potenza generata da un piccolo pannello fotovoltaico, indipendente dalla temperatura e della quantità della radiazione solare.

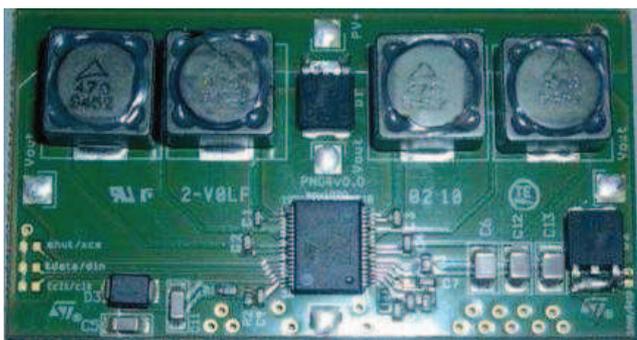


Figura 3.5: L'evaluation board STEVAL-ISV004V2.

Questa ottimizzazione, ottenuta mediante la conversione di potenza sfruttando l'algoritmo MPPT, può rivelarsi uno strumento fondamentale nell'analisi dell'SPV-1020 perchè permette di monitorare performance e criticità di quest'ultimo componente, quantificandone limiti e rendimento.

La precisione nell'esecuzione dell'algoritmo MPPT è sempre garantita da un ADC a 10 bit contenuto nell'SPV-1020, che contribuisce tra l'altro anche a migliorare il rapporto costo-efficacia e la miniaturizzazione del componente.

Questa evaluation board dà inoltre modo di osservare con attenzione l'inizializzazione delle 4 fasi del convertitore DC-DC, analizzando le tecniche utilizzate per evitare che l'attivazione del lato di potenza dell'SPV 1020 vada a limitare fortemente la vita del dispositivo stesso.

Per il resto, le caratteristiche dell'evaluation board STEVAL-ISV004V2 restano più o meno le stesse del componente SPV 1020, che si possono così brevemente elencare:

- commutazione PWM (duty cycle varia tra il 5% e il 90%, con 0,2% di precisione) con frequenza di default di 100 kHz da un oscillatore interno, che può però essere modificata tra i 50 kHz e i 200 kHz per mezzo di una resistenza esterna;
- la sicurezza delle applicazioni è garantita costantemente durante il funzionamento, per mezzo di apposite protezioni che possono fermare il PWM in caso di sovratensione di uscita, sovracorrente e sovratemperatura;
- tensione di esercizio: 6,5 V a 40 V;
- tensione massima di uscita: 40 V;

Conclusioni

Negli ultimi anni la nostra società ha assistito ad una costante diffusione su larga scala di tecnologie quali il fotovoltaico, l'eolico e le biomasse.

Le energie rinnovabili, in particolare il fotovoltaico, rappresentano il settore trainante del mercato energetico attuale.

Ciò è stato reso possibile grazie a meccanismi di incentivazione economica e ad una continua ricerca scientifica nel settore con l'intento di migliorare le tecnologie a disposizione, per ottimizzare la produzione e ridurre gli sprechi.

La forte domanda e l'estrema frizzantezza del settore inoltre hanno di conseguenza contribuito alla nascita di nuove figure professionali, nonché portato all'attenzione di numerose aziende la necessità di investire in questo ambito.

ST Microelectronics è una di queste aziende, che ha concentrato un ramo della sua produzione unicamente alla ricerca di nuove tecnologie per il fotovoltaico.

Da qui la scelta di creare una apposita serie di prodotti, la SPV, composta di soli componenti utili ad implementare le normali operazioni di un inverter per ottimizzare al massimo la produzione di energia elettrica a partire da impianti fotovoltaici.

Ultimo arrivato di questa serie è il microcontrollore SPV-1020, che fornendo un'ampia adattabilità alle varie tipologie di impianto fotovoltaico, si impone come utile soluzione all'annoso problema alle perdite di energia dell'inverter, mediante la strategia dell'MPPT.

In un periodo come il nostro, in cui l'uomo si trova sempre più ad immaginare un nuovo scenario energetico per un futuro che possa salvaguardare il pianeta, questo dispositivo assume una grande importanza oltre che un fondamentale punto di riflessione sulla necessità di affiancare una riduzione degli sprechi energetici alla produzione stessa dell'energia.

Questa tesi non vuole proporsi come sostituto al datasheet di questo componente, ma può essere un utile strumento per approcciare il microcontrollore ST SPV-1020, comprendendo lo spirito che ha portato alla sua invenzione e alla vasta adattabilità alle attuali tipologie di impianto fotovoltaico.

Invito pertanto chiunque, leggendo questa tesi, abbia maturato un certo interesse alla tematica trattata, ad approfondire il suo sapere visionando il datasheet del componente, nonché richiedendo nei vari punti vendita del prodotto il relativo materiale informativo: potrebbe rivelarsi una ricerca interessante, ma soprattutto utile a

noi tutti e alle generazioni future, che meritano anch'esse come noi l'opportunità di poter ammirare le meraviglie di questo pianeta, troppo spesso messe in secondo piano per portare avanti una politica energetica che con un minimo sforzo comune potrebbe essere notevolmente migliorata.

Bibliografia

- [1] “Go Green, il nuovo trend della comunicazione”
di Diego Masi, Fausto Lupetti editore

- [2] “Energia che c'è”
di Nicola G. Grillo, Geva Edizioni S.r.l.

- [3] “Impianti solari fotovoltaici a norme Cei”
di Groppi-Zuccaro, Editoriale Delfino

- [4] “Vivi con Stile”
di Andrea Poggio, edizioni Terre di Mezzo

- [5] “50 piccole cose da fare per salvare il mondo”
di Andreas Schlumberger, edizioni Apogeo

- [6] “Tecnologia”
di Gianni Arduino, edizioni Lattes

- [7] “Datasheet ST SPV-1020”
ST Microelectronics

- [8] “Datasheet ST STEVAL-ISV004V2”
ST Microelectronics

Ringraziamenti

Non mi è facile elencare in questa pagina tutte le persone che in questo momento vorrei ringraziare. Questo perchè per me la presente tesina non rappresenta una semplice tappa di una vita molto spesso simile ad una corsa ad ostacoli, ma si pone bensì come un momento di riflessione per fare il punto della situazione su innumerevoli cose che in questi ultimi tre anni, proprio dopo essermi iscritto all'università, sono inesorabilmente cambiate.

Tutto è diverso, e fortunatamente tutti questi cambiamenti sono ai miei occhi cambiamenti positivi.

Ma se proprio dovessi scrivere una lista di persone da ringraziare, non potrei che partire da chi nella vita mi è sempre stato vicino fin da quando ero giovane: e con queste parole intendo i miei genitori Anna Maria e Paolo, mia sorella Eleonora, le mie nonne Carmela e Carmela, tutti i parenti che ho e anche quelli che ora purtroppo non possono essere qui a condividere con me questo momento.

Col tempo altre persone sono entrate nella mia vita lasciando inesorabilmente il loro segno: la più importante tra tutte è Valentina, la mia fidanzata, che ha saputo condividere con me, in questi ultimi quattro anni assieme, grandissime emozioni e bellissimi ricordi.

Non posso però non ringraziare tutte le altre persone che hanno saputo a vario titolo ed in vari momenti darmi la loro massima fiducia, perchè è solo grazie a loro se oggi ho la fortuna di poter vivere a stretto contatto con due grandi maestri come Renato e Clodovaldo, da cui ho imparato molto e da cui soprattutto ho ancora molto da imparare.

Un ultimo grazie va a tutti i miei amici, nuovi e meno nuovi, che non sto ad elencare perchè sarebbe impossibile ma che, dal lunedì mattina alla domenica sera, sanno a vario titolo essere sempre presenti per rendere fantastiche le mie giornate.

Grazie di cuore.

Fabio Miotti