

Sviluppo di un prototipo di veicolo ibrido solare

Development of a Prototype of Hybrid Solar Vehicle

I.Arsie^{1,a}, M.Cacciato^{2,b}, G.Petrone^{3,c}, G.Rizzo^{1,d}, A.Senatore^{1,e}, M.Sorrentino^{1,f}, G.Spagnuolo^{3,g}

¹DIMEC, Università di Salerno, 84084 Fisciano (Salerno), Italy

²DISES, Università di Catania, Italy

³DIIE, Università di Salerno, 84084 Fisciano (Salerno), Italy

^aiarsie@unisa.it, ^bmcacciato@diees.unict.it, ^cgpetrone@unisa.it, ^dgrizzo@unisa.it, ^ea.senatore@unisa.it,
^fmsorrentino@unisa.it, ^ggspagnuolo@unisa.it

Sommario. L'articolo presenta i risultati di un'attività di ricerca sui veicoli ibridi solari, che ha portato allo sviluppo di un prototipo dimostrativo presso l'Università di Salerno. Tali veicoli, nati dalla integrazione di pannelli fotovoltaici in un veicolo ibrido elettrico, possono dare rilevanti contributi alla riduzione di consumi ed emissioni, in particolare per un utilizzo in ambito urbano. Obiettivo che diventa sempre più realistico, grazie alla riduzione del costo ed all'incremento di rendimento dei pannelli ed all'aumento tendenziale, pur tra fluttuazioni varie, del costo del petrolio e del combustibile. L'interesse industriale è testimoniato, tra l'altro, dal recente lancio di un modello di vettura ibrida dotata di un pannello fotovoltaico finalizzato ad alimentare l'impianto di condizionamento, con benefici sui consumi. Per massimizzare i benefici di questa tecnologia, non ci si può però limitare ad aggiungere pannelli fotovoltaici a veicoli ibridi esistenti, richiedendosi piuttosto una sostanziale riprogettazione del sistema veicolo-motopropulsore e, soprattutto, del sistema di gestione energetica e di controllo.

Il lavoro presenta marcate caratteristiche interdisciplinari, avendo visto la collaborazione di ricercatori di diversi settori. Nell'articolo sono presentati i principali risultati relativi allo sviluppo di un prototipo di veicolo ibrido con struttura serie, ed alle metodologie studiate nel corso del progetto: in particolare, le analisi di progetto ottimizzato, lo studio delle strategie di gestione energetica e di gestione real-time sia del sistema moto-propulsore che dei pannelli fotovoltaici (MPPT), lo studio dei convertitori per questa tipologia di veicolo e lo studio e lo sviluppo di un tetto solare auto-orientabile per le fasi di parcheggio.

Abstract.

The paper focuses on the outcomes of a research carried out on Hybrid Solar Vehicles (HSV). Within such an activity, a demonstrative HSV prototype was developed at University of Salerno. HSV cars, which result from the integration of hybrid powertrains with photovoltaic panels (PV), were demonstrated to substantially contribute to lowering both fuel consumptions and tailpipe emissions, especially in urban driving. The latter goal nowadays appears to be even easier to achieve, thanks to the decreasing and increasing trends of PV panels and barrel price, respectively. HSV technical, as well as economical, feasibility is confirmed by the recent launch of a commercial hybrid car assisted by a solar kit to power the air-conditioning system, showing significant benefits in terms of fuel economy. Nevertheless, turning to HSV technology can be even more beneficial if not only PV panels are added to a base hybrid architecture, but if also a substantial re-design of the whole vehicle-powertrain system is performed.

This activity shows highly interdisciplinary features as it involves experts belonging to different research fields. Specifically in this work, the main research and methodological outcomes achieved throughout the prototype development phase are presented and discussed in detail. Particular emphasis is given on: optimal design analyses; definition of suitable energy management strategies, as well as real-time control policies, for both the engine-generator group and photovoltaic panels (e.g. MPPT); design of suitable power converters for HSVs; development of an automated sun-tracking roof to maximize solar energy contribution during parking phases.

Keywords: Veicoli ibridi, Energia Solare, Tetto fotovoltaico, Convertitori di potenza, Prototipo.

1 Introduzione

I motivi che spingono verso la ricerca di soluzioni alternative per la mobilità individuale sono ormai evidenti: il depauperamento delle risorse fossili, l'incremento e le fluttuazioni del prezzo del petrolio, il deficit energetico nazionale, l'inquinamento delle aree urbane, l'effetto serra e le variazioni climatiche. Ma perché puntare proprio sui veicoli ibridi solari? Perché, almeno a giudizio degli autori, possono costituire uno dei modi migliori per mettere insieme due delle soluzioni più efficaci, anche sul breve termine, al problema energetico e ambientale: i veicoli ibridi ed il fotovoltaico [1]. L'uso di pannelli fotovoltaici, che stanno avendo una grande diffusione per gli impianti fissi, era fino a pochi anni fa relegato nel campo automobilistico a pochi costosi prototipi, sperimentati con successo nell'outback australiano ma certamente poco adatti all'utilizzo quotidiano (Fig. 1). Lo scetticismo sull'uso dell'energia solare in ambito automobilistico era anche dovuto alla radicata abitudine a ragionare in termini di potenza: quella di un pannello solare di dimensioni comparabili con un tetto di una vettura normale è dell'ordine dei 300 W, almeno 50 volte minore della potenza di una vettura media. Ragionamento tanto elementare quanto fuorviante: se si fanno i conti in termini di energia, si vede che un pannello può lavorare quasi alla massima potenza per molte ore al giorno, se opportunamente controllato e orientato, potendo accumulare anche 2-3 kWh, mentre una buona metà degli automobilisti, secondo recenti statistiche, si muove prevalentemente in ambito urbano (con una potenza media inferiore ai 10 kW) e per non più di un'ora al giorno, e con un consumo energetico giornaliero dell'ordine dei 10 kWh, considerando un parziale recupero dell'energia della frenata: in queste condizioni il contributo solare può rappresentare anche il 30% dell'energia richiesta per la trazione [2][3].

L'obiettivo è quindi non quello di rendere la vettura del tutto autonoma, quanto di integrare il fotovoltaico nell'ambito di un veicolo ibrido elettrico destinato ad un uso prevalentemente urbano, ma riducendone drasticamente consumi ed emissioni. Obiettivo che diventa sempre più realistico, grazie alla riduzione del costo (Fig. 2) ed all'incremento di rendimento dei pannelli, ed all'aumento tendenziale, pur tra fluttuazioni varie, del costo del petrolio e del combustibile. L'interesse industriale è testimoniato dal recente lancio di una versione solare della Toyota Prius, dove l'energia raccolta è finalizzata ad alimentare l'impianto di condizionamento, con benefici sui consumi.



Fig. 1 - Un prototipo di vettura solare

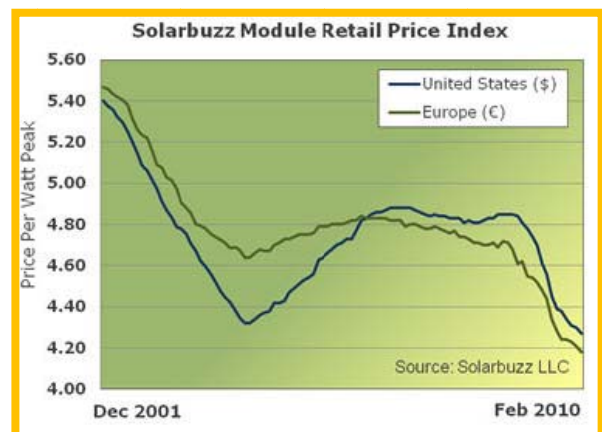


Fig. 2 – Andamento dei costi del fotovoltaico

Ma, nonostante le interessanti potenzialità, nei confronti dei veicoli ibridi solari non c'è stato fino a pochi anni fa lo sforzo di ricerca che pure si è visto in settori analoghi: un esempio su tutti, quello delle vetture ad idrogeno, beneficiate da una grande pubblicità e da cospicui finanziamenti, ma sulla cui applicabilità a breve-medio termine gravano molti interrogativi irrisolti. E non solo per problemi di costi (che possono ridursi con la diffusione della tecnologia), ma per ragioni più sostanziali (l'idrogeno non è presente in natura allo stato puro, e per produrlo serve più energia di quanta non

ne venga poi restituita con il suo utilizzo). Queste considerazioni collocherebbero l'uso dell'idrogeno per l'autotrazione quantomeno in una prospettiva temporale più lontana rispetto ad altre soluzioni, come, appunto, quella dei veicoli ibridi solari.

Gli studi svolti dagli autori con tecniche di progetto ottimizzato, considerando anche pesi addizionali e costi, hanno evidenziato come la fattibilità economica sia conseguibile in uno scenario di medio termine, e come i migliori benefici legati all'introduzione del fotovoltaico si ottengano non con l'impianto di pannelli solari sui veicoli ibridi esistenti, ma piuttosto con una sostanziale riprogettazione del sistema di controllo, se non dell'intero veicolo [2] [3].

1.1 Struttura dell'articolo

Dopo una presentazione delle caratteristiche del prototipo, sono analizzati i principali aspetti legati alla ottimizzazione ed al controllo dei flussi energetici, evidenziando alcune significative differenze rispetto ai classici veicoli ibridi elettrici. Sono quindi presentate le problematiche e le soluzioni adottate per il controllo dei pannelli fotovoltaici e per l'adozione di adeguati convertitori di potenza. E' poi presentato lo stato dell'attuale ricerca sullo sviluppo di un tetto solare mobile da azionare durante le fasi di parcheggio.

2 Il prototipo di veicolo ibrido solare.

Un prototipo di veicolo ibrido solare con struttura serie è stato allestito presso l'Università di Salerno, nell'ambito di un progetto europeo con finalità anche didattico-divulgative [1]. L'attività di sviluppo, poi proseguita nel corso di un progetto PRIN [5], è partita da un veicolo elettrico Piaggio Porter (Fig. 3)¹, i cui principali dati tecnici sono riassunti in Tab. 1 [1]. Il prototipo è stato equipaggiato con una serie di sensori che comunicano con una centralina di controllo programmabile NI cRIO®, al fine di condurre campagne sperimentali finalizzate ad eseguire le seguenti attività: i) identificazione dei principali sottomodelli matematici (e.g. gruppo generatore, motore elettrico ecc.) da implementare nel modello dinamico complessivo; ii) acquisizione dati e monitoraggio; iii) attuazione delle strategie di controllo oggetto delle analisi presentate nelle sezioni precedenti. In Fig. 3 e Fig. 4 sono riportati una vista d'insieme del prototipo, sperimentato con successo durante il Green Prix 2007², ed un particolare del gruppo moto-generatore. Un'ampia documentazione, anche in termini di foto e video, è disponibile sui siti dei progetti di ricerca citati [4][5].



Fig. 3 - Il prototipo di veicolo ibrido solare.



Fig. 4 - Il Gruppo moto-generatore

¹ Il Porter elettrico è stato donato al gruppo di ricerca dall'Automobile Club Salerno. Altre aziende hanno inoltre offerto la propria collaborazione all'allestimento del prototipo: CIMEP, per le lavorazioni meccaniche, e Saggese, per la costruzione del supporto ai pannelli fotovoltaici.

² Edizione della storica Targa Florio dedicata ai veicoli ecologici.

Veicolo	Piaggio Porter	Batterie	16 Modules Pb-Gel 12 V
Lunghezza	3.370 m	Massa	500 Kg
Larghezza	1.395 m	Capacità	130 Ah
Altezza	1.870 m	Pannelli fotovoltaici	Silicio Policristallino
Peso	1750 kg	Superficie	1.44 m ²
Generatore elettrico	PRAMAC S600 (400 cc Diesel, generatore sincrono trifase)	Efficienza	0.13
Potenza massima	6 kVA	Motore elettrico	BRUSA MV 200 – 84 V
Consumo specifico	300 g/kWh	Potenza in continuo	9 KW
Peso a secco	112 kg	Potenza massima	15 KW

Tab. 1 - Dati tecnici del prototipo di veicolo ibrido solare sviluppato presso l'Università di Salerno.

3 Ottimizzazione e controllo dei flussi energetici

Sebbene gli HSV abbiano molti punti in comune con gli HEV, per i quali sono stati presentati nell'ultima decade numerosi studi sulla gestione e il controllo [1][8][9][10], sono da tenere debitamente in conto alcune differenze significative tra questi tipi di veicoli. In particolare, la presenza di pannelli solari e, nel caso del prototipo sviluppato, l'adozione di una struttura serie possono rendere necessario studiare e sviluppare soluzioni specifiche per ottimizzare la gestione e il controllo di un HSV [23].

Come è noto, nella maggior parte degli HEV si adotta una strategia di sostentamento della carica: alla fine di un percorso di guida l'obiettivo è quello di ripristinare lo stato di carica della batteria iniziale. Con un HSV si deve tener conto della ricarica delle batterie, attraverso i pannelli fotovoltaici, durante le ore di parcheggio. In questo caso, l'obiettivo è quindi quello di ripristinare lo stato iniziale di carica entro la fine dell'intera giornata (i.e. ore di guida + ore di parcheggio), piuttosto che dopo un percorso di guida [3].

Inoltre, la configurazione serie adottata per questo prototipo³ suggerisce di far funzionare il motore in modo intermittente e tendenzialmente a punto fisso, ossia in corrispondenza del minimo consumo di combustibile. In tal caso, il sistema costituito dal motore a combustione interna (MCI) e dal generatore elettrico (EG) può essere progettato e ottimizzato per massimizzare l'efficienza, le emissioni e il rumore nel punto di lavoro, laddove negli attuali motori automobilistici la massima efficienza è sacrificata alla necessità di garantire stabilità e buone prestazioni in tutte le condizioni di funzionamento. Nel caso di funzionamento intermittente del MCI bisogna tener conto degli effetti su consumi ed emissioni imputabili al verificarsi di transitori termici nel motore e nel catalizzatore [3][11][12].

Nell'articolo [3] gli autori hanno proposto una metodologia per la definizione delle strategie di accensione/spengimento del MCI basate su un'analisi di ottimizzazione vincolata. In particolare sono stati tenuti in conto i consumi di carburante e la relativa dipendenza dallo stato termico del motore, lo stato di carica del pacco batterie ed anche il contributo energetico dei pannelli fotovoltaici nelle fasi di sosta del veicolo. Le simulazioni condotte su dei cicli di guida standard hanno messo in evidenza come l'integrazione della tecnologia ibrida con quella solare consenta una riduzione consistente di consumi ed emissioni. I risultati presentati in Tab. 2 dimostrano l'importanza di tener conto dei transitori termici nella fase di sviluppo delle strategie di gestione energetica ottimale di un HSV serie. La Fig. 7 indica altresì che la gestione start/stop del MCI su un HSV a funzionamento intermittente non corrisponde necessariamente alla condizione operativa più efficiente del solo MCI, ciò proprio in virtù dell'interazione con il pacco batterie e degli effetti

³ Una disamina di vantaggi e svantaggi della configurazione serie rispetto alla più diffusa configurazione parallela adottata di norma negli HEV è anche reperibile in letteratura [1] e nei lavori degli autori [2][3].

connessi ai transistori termici [12]. Analisi di scenario effettuate con i modelli validati sul prototipo sviluppato permettono infine di valutare i benefici ottenibili con interventi sui pannelli solari, sulla batteria e sul peso del veicolo, a confronto con le prestazioni di un veicolo ibrido convenzionale (Fig. 5).

3.1 Sviluppo di una strategia di controllo implementabile on board

Sviluppi successivi dell'attività condotta dal gruppo di ricerca hanno riguardato la messa a punto di una strategia di controllo *Rule-Based* (RB) per la gestione energetica ottimale a bordo di HSV serie a funzionamento intermittente [13]. L'architettura di controllo RB è costituita da due loop principali: uno esterno, che determina, in funzione del contributo solare atteso durante la fase di parcheggio, lo stato di carica della batteria (SOC) da raggiungere al termine della fase di guida; il secondo interno, i cui obiettivi sono, da una parte, l'individuazione dello scheduling ottimale del gruppo generatore, e, dall'altra, il controllo dell'oscillazione del SOC intorno al valore finale indicato dal primo ciclo. Pertanto, il secondo ciclo fornisce la potenza media da far erogare all'ICE in funzione dei valori medi di potenza richiesta alle ruote e potenza solare. La potenza mediamente richiesta per la trazione può essere stimata utilizzando modelli previsionali a rete neurale, nonché i dati precedentemente memorizzati dalla centralina di controllo od ancora le informazioni derivate dal GPS. Il contributo solare previsto può essere invece stimato partendo da database già disponibili ovvero attraverso un opportuno processamento dei dati acquisiti a bordo. Le prestazioni ottenibili dall'architettura RB sono state analizzate attraverso un'approfondita analisi di simulazione. Si è anche effettuato un confronto fra i consumi simulati con la strategia RB e quelli ottenuti attraverso un'analisi di ottimizzazione di tipo batch basata su algoritmi genetici [14]. Tale confronto porta a concludere l'elevata potenzialità offerta dalla strategia RB proposta per eseguire in tempo reale la gestione energetica su veicoli ibridi solari. L'algoritmo di controllo RB è attualmente in fase di implementazione su un'unità di controllo NI® cRIO, con l'obiettivo di validare sperimentalmente i risultati numerici sul prototipo HSV sviluppato dall'Università di Salerno. In Fig. 6 e Fig. 8 sono illustrati alcuni rilievi sperimentali acquisiti nel corso di una prova su strada, dalla cui analisi emergono le potenzialità dell'architettura NI® cRIO per l'implementazione e lo sviluppo ulteriore della strategia RB per il controllo real-time di un veicolo ibrido solare in configurazione serie.

Caso	Consumo di benzina [Kg]
a)	1.4559
b)	1.5361
c)	1.5185

Tab. 2 – Impatto dei transistori termici sui consumi. a) Variabili decisionali ottimizzate senza transistori termici; b) Variabili ottenute nel caso a) ma con simulazione dei transistori termici; c) Variabili decisionali ottimizzate considerando i transistori termici [12].

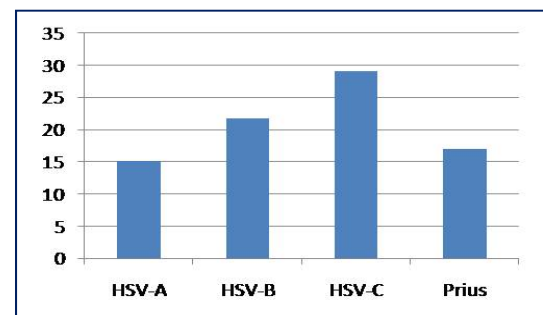


Fig. 5 – Percorrenza [km/l] su ciclo ECE. A: Prototipo attuale; B: con rendimento pannelli al 18% e Batteria 75 Ah; C: come B con riduzione peso 20% e batterie al Litio; D: Toyota Prius

Si è quindi passati all'analisi dei benefici ottenibili dalla previsione dell'energia solare attesa nelle fasi di parcheggio sulle performance energetiche e di gestione di un HSV. In un recente studio [14] è stato dimostrato come un'opportuna modulazione dello stato di carica finale da raggiungere al termine della fase di guida consenta di garantire il raggiungimento di obiettivi potenzialmente contrastanti quali: massimizzazione dell'energia captata dai pannelli durante la fase di guida;

massima efficienza energetica complessiva del sistema di propulsione HSV; affidabilità e durata delle batterie.

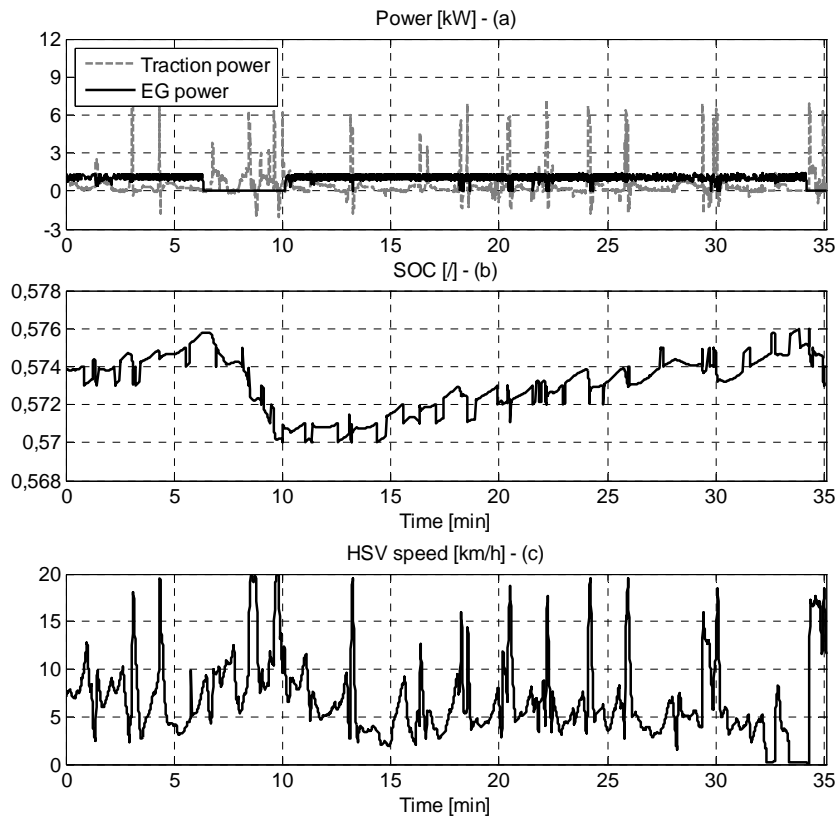


Fig. 6 – Segnali acquisiti dall’unità di controllo e acquisizione dati NI® cRIO durante la prova su strada del prototipo HSV.

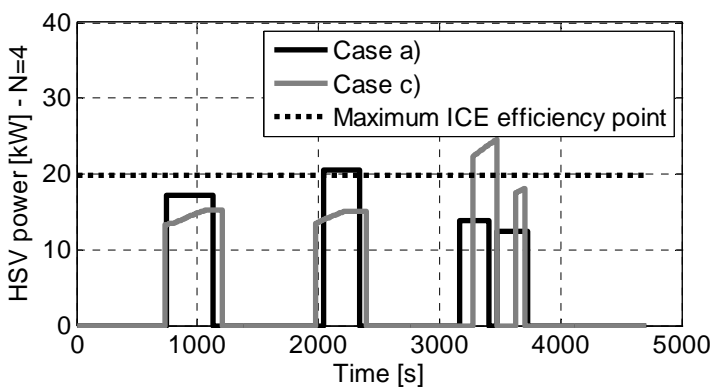


Fig. 7 – Andamenti della potenza erogata dal gruppo MCI-GE simulati nei casi a) and c) descritti in Tabella I [7].

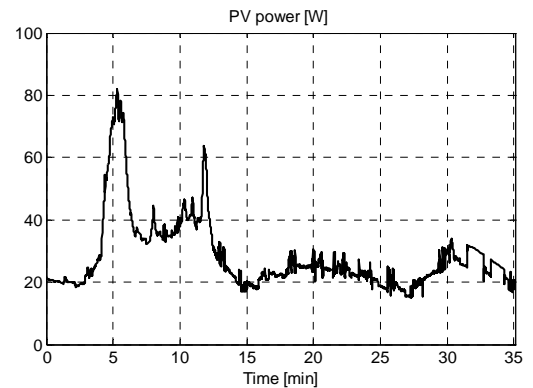


Fig. 8 – Potenza erogata dai pannelli fotovoltaici durante la prova su strada del prototipo HSV.

4 Il controllo dei pannelli fotovoltaici

E’ ben noto che la caratteristica corrente-tensione di un modulo fotovoltaico ha un comportamento fortemente non lineare e dipendente dalle condizioni di irraggiamento e temperatura. Pertanto, per massimizzare la potenza estratta dalla sorgente, è necessario regolarne continuamente il punto di lavoro (Fig. 9). In tutte le applicazioni fotovoltaiche tale funzionalità è realizzata attraverso un circuito elettronico di potenza controllato mediante un algoritmo di inseguimento del punto di massima potenza (Maximum Power Point Tracking MPPT). Con riferimento allo schema di Fig. 10,

l'algoritmo Perturba e Osserva (P&O), uno dei più utilizzati nelle applicazioni pratiche, opera attraverso una logica di controllo secondo la quale il ciclo di servizio (d) del convertitore switching viene incrementato/decrementato di una quantità Δd in funzione dell'incremento/decremento subito dalla potenza estratta dalla sorgente fotovoltaica. Le prestazioni dell'algoritmo sono fortemente dipendenti dalla scelta della frequenza con la quale si perturba il valore del ciclo di servizio e dell'ampiezza della perturbazione stessa [19]. La complessità del processo di ottimizzazione di tali parametri è legata al fatto che essi sono interdipendenti e legati in modo non lineare ai parametri del circuito di conversione e del campo fotovoltaico, nonché alle condizioni ambientali in cui esso si troverà a lavorare [20].

Le prestazioni del generatore fotovoltaico e dell'algoritmo per il MPPT sono fortemente influenzate dalla presenza di ombre o fattori che determinano la disuniformità del comportamento di celle o gruppo di celle che compongono l'array. Tali fenomeni, infatti, non solo penalizzano la produttività energetica delle celle che sono realmente ombreggiate o che operano in condizioni differenti dalle altre, ma inducono un decadimento delle prestazioni anche di tutte le altre. L'ombreggiamento parziale, così come altri fattori che creano disuniformità di condizioni operative tra le celle, vengono definiti fenomeni di *mismatch* ed essi comportano una deformazione della curva potenza-tensione che può portare il controllore MPPT all'inseguimento di un punto di massima potenza relativo e non di quello assoluto. Nella Fig. 11 infatti sulla curva in verde, rappresentativa di un array fotovoltaico parzialmente ombreggiamento, sono evidenziati due possibili punti nei quali il controllo MPPT riscontra la presenza di un picco di potenza: risulta evidente che nel punto più a destra il sistema non lavora alla sua massima potenza [22].

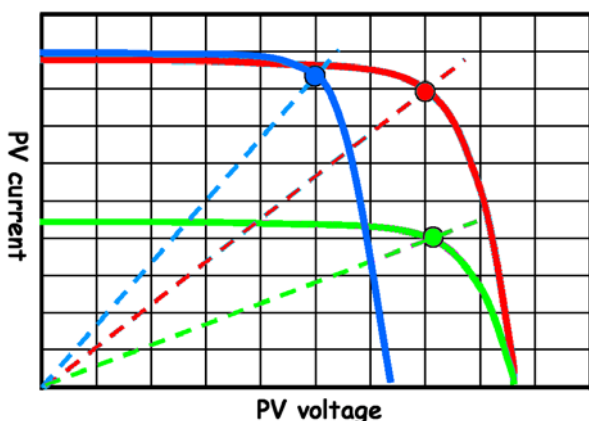


Fig. 9 - Caratteristiche Corrente-Tensione di un modulo fotovoltaico, a vari livelli di irraggiamento e temperatura (Rosso: 1000W/m², 0°C; Blu: 1000W/m², 40°C; Verde: 500W/m², 0°C)

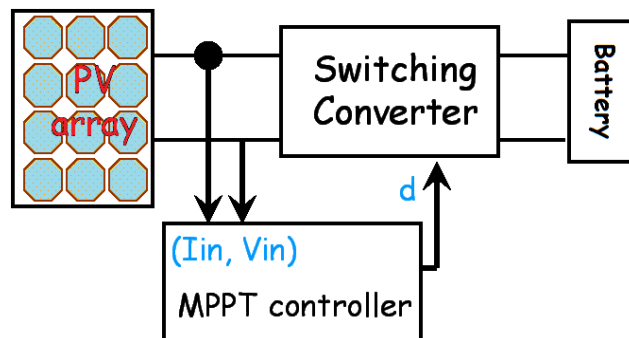


Fig. 10 - Schema di controllo di un convertitore per il Maximum Power Point Tracking

Nel caso di integrazione di moduli fotovoltaici su veicoli o imbarcazioni, specialmente se a vela, tali problematiche diventano di maggiore entità poiché, considerando il veicolo in movimento, le variazioni di irraggiamento e la presenza di ombre sono totalmente imprevedibili e avvengono con velocità di gran lunga superiori a quelle di un'applicazione stazionaria; ciò richiede una circuiteria di controllo e tecniche di identificazione del punto di massima potenza che siano altamente prestazionali.

Per massimizzare la produttività energetica in tali condizioni è possibile innanzi tutto sviluppare algoritmi di MPPT molto veloci in grado di inseguire le variazioni di irraggiamento determinate dal veicolo in movimento: questo risultato è stato conseguito ottimizzando le prestazioni della tecnica MPPT P&O seguendo le indicazioni proposte in [19].

Un approccio alternativo prevede il frazionamento delle celle in sottoinsiemi molto piccoli, ad esempio costituiti da 9 celle ciascuno, ad ognuno dei quali è dedicato un micro-convertitore dc/dc equipaggiato con un controllore MPPT che opera indipendentemente dagli altri. Questa misura

riduce in maniera drastica i fenomeni di *mismatch* che si determinano quando un sottoinsieme di celle è ombreggiato e consente di far lavorare ogni sottoinsieme nel suo punto di massima potenza [21]. Nella Fig. 12 è riportato uno schema indicativo della soluzione utilizzata nel prototipo di veicolo ibrido solare [24].

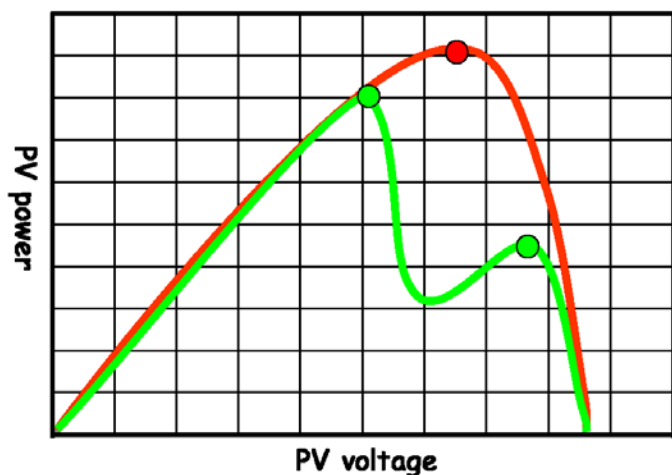


Fig. 11 - Curva caratteristica Potenza-Tensione di un modulo fotovoltaico (in Rosso Irraggiamento e Temperatura uniformi per tutte le celle; in Verde stessa configurazione con il 30% delle celle ombreggiate)

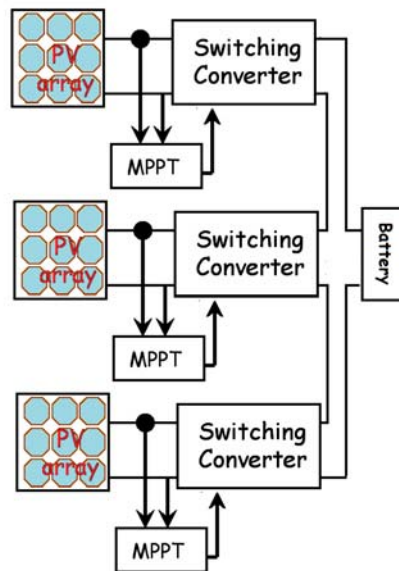


Fig. 12 - Schema di connessione di un sistema MPPT distribuito

5 Convertitori Elettronici di Potenza per un veicolo ibrido solare

In generale, il ruolo dei Convertitori Elettronici di Potenza (CEP) è quello di consentire l'interfacciamento di sorgenti di energia e carichi elettrici regolando e ottimizzando, tramite il controllo delle grandezze in gioco, i flussi energetici. Nel caso di Veicoli Elettrici Solari (VES) o di veicoli ibridi solari (HSV), i CEP sono chiamati a collegare i pannelli fotovoltaici installati sul veicolo con il sistema di trazione, massimizzando l'energia elettrica prodotta dai pannelli. Il principale problema presentato da questa particolare applicazione è costituito dall'ombreggiamento parziale dei pannelli e dalla elevata dinamica dei fenomeni ad esso collegati, causati dal movimento del veicolo. Un altro aspetto, non meno importante, riguarda l'esigenza del carico. Nel caso dei VES, infatti, i CEP sono collegati alle batterie di trazione. Indipendentemente dal grado di "ibridizzazione" del veicolo, che impatta sulla capacità complessiva degli accumulatori, e dal tipo di tecnologia delle batterie, tutti i sistemi di accumulo richiedono degli accorgimenti per l'equalizzazione della carica. Infatti, il mantenimento dello stesso stato di carica sulle singole batterie consente di ottenere le massime prestazioni dal sistema e di allungarne il tempo di vita.

I problemi legati all'ombreggiamento parziale possono essere minimizzati suddividendo il campo dei pannelli in più porzioni, ciascuna delle quali collegata ad un proprio CEP. Ogni CEP è controllato in modo massimizzare la potenza estratta dalla fonte solare tramite un algoritmo di inseguimento del punto di massima potenza (MPPT). Così facendo, se una porzione del campo fotovoltaico rimane in ombra, solo questa parte genererà meno energia, mentre il resto del sistema continuerà a lavorare alla massima potenza corrispondente alla radiazione solare in quell'istante. In considerazione del movimento del veicolo, è certa l'insorgenza di ombreggiamento parziale legati alla presenza di ostacoli alla componente diretta della luce solare. La dinamica di tali eventi è molto più elevata di quella che si verifica negli impianti fotovoltaici stazionari, dove l'ombreggiamento parziale è spesso causato da alberi, antenne e comignoli, la cui ombra varia lentamente nel corso

della giornata. Pertanto, l'algoritmo di MPPT utilizzato è stato opportunamente sviluppato per l'applicazione in oggetto.

In considerazione delle problematiche su menzionate, nell'ambito della ricerca PRIN 2006, è stato sviluppato un CEP multi-uscita con controllo MPPT integrato ad elevata dinamica ed in grado di caricare le batterie collegate ad un livello di potenza inversamente proporzionale al livello di carica. Uno schema ed una immagine del convertitore sviluppato sono riportati in Fig. 13. Il convertitore è del tipo fly-back a più uscite con uno *snubber* rigenerativo in grado di limitare la sovratensione sul dispositivo di potenza allo spegnimento. L'algoritmo di controllo è stato implementato utilizzando un microprocessore a 8 bit a basso costo. La presenza del trasformare ad alta frequenza implica l'isolamento galvanico dei diversi gruppi di pannelli limitando la tensione massima di ciascun gruppo, aumentando il grado di sicurezza del sistema [25] [26].

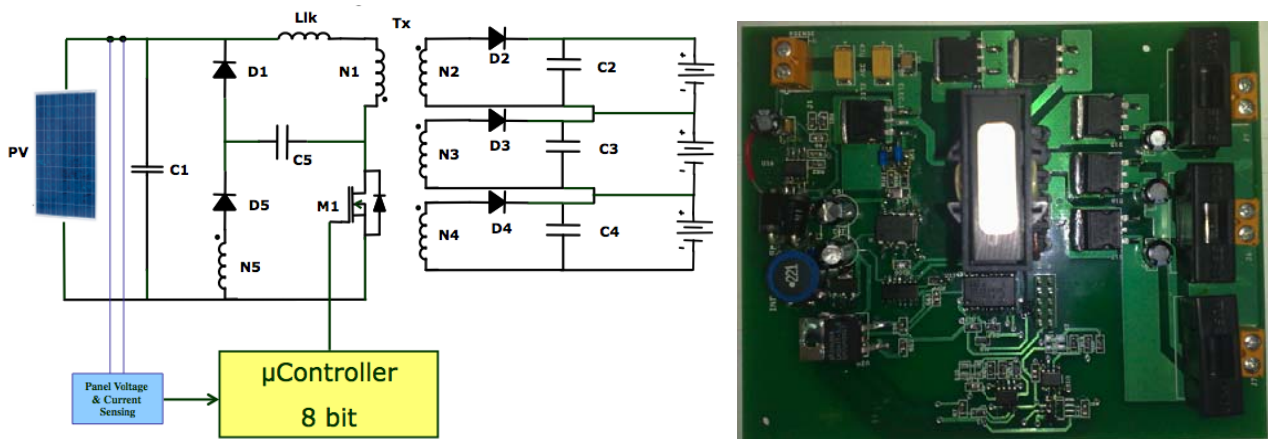


Fig. 13 - Schema del convertitore e prototipo realizzato.

6 Un tetto solare mobile

La possibilità di introdurre un tetto fotovoltaico orientabile ha aperto un altro interessante fronte di ricerca in cui è chiara l'intersezione tra controlli, azionamento, CAD parametrico, cinematica di macchine parallele. L'analisi coinvolge nuove specifiche dalle quali non è possibile prescindere: i) l'orientazione del veicolo durante le fasi di sosta non è prestabilita, ii) la dissipazione per perdite aerodinamiche nonchè il peso addizionale andrebbero contenuti, iii) l'orientazione perfetta, quella ossia ipotizzabile mediante un ideale inseguitore bi-assiale, non può essere ottenuta per via di vincoli cinematici ed eventuali interferenze.

Per valutare i possibili vantaggi conseguenti l'adozione di un tetto solare orientabile rispetto alla convenzionale soluzione del tetto orizzontale, è possibile considerare la time-history della radiazione solare negli USA lungo gli ultimi 30 anni, mediante simulatori disponibili in rete (www.nrel.gov/rredc/pvwatts). I risultati, mostrati in Fig. 17 per differenti latitudini, descrivono l'incremento percentuale di energia catturata in un anno solare rispetto alla condizione di tetto fisso ed orizzontale. L'ambizione di dotare il veicolo ibrido di tetto fotovoltaico orientabile è, sin da un primo esame della figura, ampiamente giustificata [17].

L'analisi sinora condotta dal gruppo di ricerca ha interessato anche la determinazione dell'energia da spendere per l'attuazione del moto del tetto, al fine di avere una stima del vantaggio energetico "netto". Dal punto di vista geometrico-cinematico, il modello CAD 3D implementato, così come il prototipo in scala successivamente realizzato, considerano la soluzione offerta da una PKM di tipo triaglido a tre gradi di libertà [16] con gambe a lunghezza fissa. L'attuazione rettilinea sulla base avviene mediante accoppiamenti vite-dado guidato, mentre una coppia cinematica di tipo sferico completa il collegamento tra la singola gamba ed il tetto orientabile. Il pilotaggio dei motori del prototipo da laboratorio mostrato in Fig. 15, avviene mediante un PLC [18].

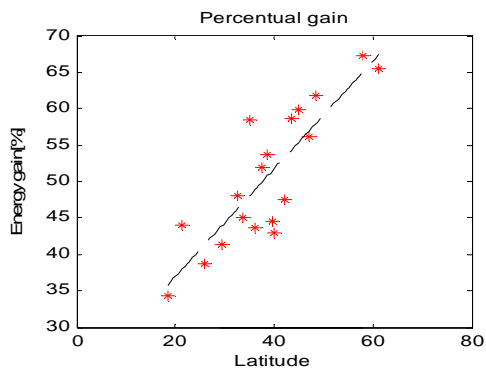


Fig. 14 - Incremento percentuale dell'energia solare raccolta da un ideale tetto solare orientabile secondo due assi rispetto ad una posizione fissa (orizzontale)

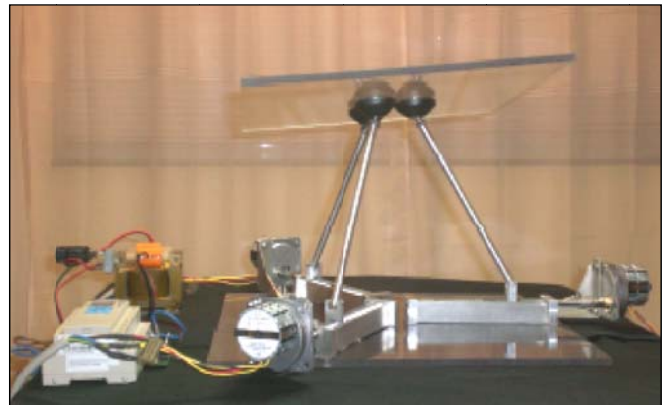


Fig. 15 - Prototipo in scala del tetto orientabile

E' ipotizzabile, inoltre, l'adozione di un modulo GPS che fornisca alla centralina le informazioni sulla posizione del veicolo (latitudine, longitudine) ed orientazione (azimuth), così come l'orario e la data corrente. La posizione del sole, una volta calcolata, diviene variabile di ingresso per l'algoritmo chiamato a calcolare la coppia di angoli (β_x, β_y) che il tetto forma col piano orizzontale, mentre la terza coordinata indipendente, quota verticale del baricentro, è da valutare tenendo conto dell'interferenza con la struttura fissa del veicolo e dell'energia spesa per la movimentazione. Un possibile schema di controllo in feedback, con compensazione in avanti "feed-forward", è mostrato in figura Fig. 16 .

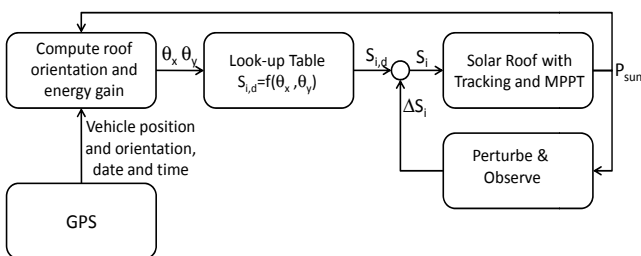


Fig. 16 - Schema di controllo del tetto solare orientabile

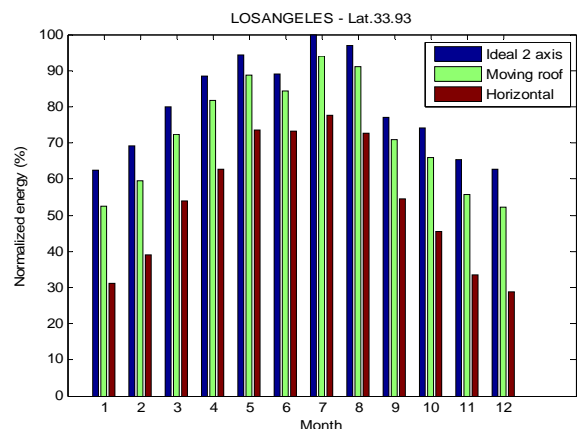


Fig. 17 - Energia raccolta con le diverse configurazioni di tetto solare

Dalle prime simulazioni per la valutazione dell'energia necessaria per orientare il tetto emerge che, assumendo un incremento di energia solare intercettata pari al 30% per effetto di un assetto prossimo all'ortogonalità con i raggi solari, con un tetto dal peso di 500 N e una roto-traslazione di durata media di un minuto, l'energia spesa sarebbe totalmente recuperata in soli 23 s di esposizione. L'istogramma che segue mostra, con riferimento alla città di Los Angeles, l'energia normalizzata catturata dal tetto in posizione orizzontale, il valore corrispondente ad un tetto azionato secondo due assi indipendenti in assenza di vincoli, ed il caso reale "moving roof". I risultati, ed altri in corso di pubblicazione, mostrano come il tetto solare reale, se opportunamente ottimizzato nella geometria e adeguatamente controllato, possa ottenere benefici molto prossimi al modello di tetto solare ideale pienamente orientabile, con un contributo rilevante in termini di risparmio di combustibile.

Conclusioni

La realizzazione di un prototipo funzionante, pur con le limitazioni imposte da un budget limitato, ha permesso di dimostrare le potenzialità dei veicoli ibridi solari nel ridurre consumi ed emissioni climalteranti, soprattutto per un tipico utilizzo urbano. Il prototipo, che costituisce un prodotto con notevole valenza pratica e simbolica, ha anche attratto attenzione e contributi di privati e di enti attorno alla ricerca, ed ha rappresentato un laboratorio mobile per lo sviluppo di studi interdisciplinari e di collaborazioni tra diversi gruppi di ricerca.

Gli sviluppi più recenti, da condurre nell'ambito di un progetto PRIN 2008 [6], riguardano la possibilità di convertire in ibridi solari gli autoveicoli convenzionali, con un notevole impatto potenziale sul parco circolante e sui risparmi energetici complessivi⁴.

Come considerazione più generale, si può constatare come la ricerca di soluzioni alternative per l'emergenza energetico-ambientale ed il conseguente ricorso alle energie rinnovabili aprano nuovi ambiti di ricerca, con marcate caratteristiche inter-disciplinari, e che difficilmente potrebbero essere ricondotti ai tradizionali recinti dei "gruppi scientifico-disciplinari" o delle vecchie "cattedre". A tal riguardo, appaiono ineludibili dei seri aggiornamenti di prospettiva nell'ambito del sistema accademico italiano, anche per non penalizzarne ulteriormente la competitività e la collocazione internazionale.

Bibliografia

- [1] Letendre S., Perez R., Herig C. (2003), Vehicle Integrated PV: A Clean and Secure Fuel for Hybrid Electric Vehicles, Proc. of the American Solar Energy Society Solar 2003 Conference, June 21-23, 2003, Austin, TX.
- [2] Arsie I., Pianese C., Rizzo G., Sorrentino M., Veicoli ibridi solari - progetto ottimizzato e gestione dei flussi energetici. Pubblicata in Brusaglino G., Pede G., Vitale E., Sistemi di propulsione elettrica ed ibrida: dalla sorgente a bordo all'attuazione meccanica. Pagg. 469-496, Roma: ENEA, 2009, ISBN/ISSN: 8882862054.
- [3] I. Arsie, G. Rizzo, M. Sorrentino, "Optimal Design and Dynamic Simulation of a Hybrid Solar Vehicle", SAE TRANSACTIONS - Journal of Engines, Vol. 115-3 (2007), pp. 805-811.
- [4] Leonardo Project I/05/B/F/PP-154181, "Energy Conversion Systems and Their Environmental Impact", <http://www.dimec.unisa.it/Leonardo>
- [5] Progetto PRIN "Integrazione di sistemi fotovoltaici in autoveicoli convenzionali ed ibridi", http://www.dimec.unisa.it/prin/PRIN_2006.htm
- [6] Progetto PRIN "Modellazione e sviluppo di un sistema prototipale per la ibridizzazione di autoveicoli convenzionali", http://www.dimec.unisa.it/prin/PRIN_2008.htm
- [7] I. Arsie, M. Graziosi, C. Pianese, G. Rizzo, M. Sorrentino, "Control Strategy Optimization for Hybrid Electric Vehicles via Provisional Load Estimate", Review of Automotive Engineering, Vol. 26 (2005), pp. 341-348.
- [8] P. Pisu, G. Rizzoni, "A Comparative Study Of Supervisory Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 15 (2007), No. 3, pp. 506-518.
- [9] B.K. Powell, K.E. Bailey, S.R. Cikanek, "Dynamic modeling and Control of Hybrid Vehicle Powertrain Systems", IEEE Transactions on Control Systems, Vol. 18 (1998), No. 5, 1998.
- [10] A. Sciarretta, L. Guzzella, Control of Hybrid Electric Vehicles". IEEE Control Systems Magazine, Vol. 27 (2007), No. 2, pp. 60-70.
- [11] H. Ohn, S. Yu, K.D. Min, "Effects of Spark Ignition Timing and Fuel Injection Strategy for Combustion Stability on HEV Powertrain During Engine Restart and Deceleration Driving", Proc. of IFAC World Congress 2008, July 6-11, Seoul (South Korea), pp. 5658-5663.

⁴ La metodologia proposta è stata recentemente brevettata da parte dell'Università di Salerno.

- [12] I. Arsie, G. Rizzo, M. Sorrentino, "Effects of Engine Thermal Transients on the Energy Management of Series Hybrid Solar Vehicles", *Control Engineering Practice* (2010), doi:10.1016/j.conengprac.2010.01.015.
- [13] G. Rizzo, M. Sorrentino, I. Arsie, "Rule-Based Optimization of Intermittent ICE Scheduling on a Hybrid Solar Vehicle", SAE paper 2009-24-0067, 9th International Conference on Engines & Vehicles (ICE2009), September 13-18 2009, Capri, Italy. Accepted for publication on SAE 2009 Transactions.
- [14] M. Sorrentino, I. Arsie, R. Di Martino, G. Rizzo, "On the Use of Genetic Algorithm to Optimize the On-Board Energy Management of a Hybrid Solar Vehicle", *Oil & Gas Science and Technology – Revue de L'IFP*, DOI:10.2516/ogst/2009035.
- [15] G. Rizzo, M. Sorrentino, "Introducing Sunshine Forecast to Improve On-Board Energy Management of Hybrid Solar Vehicles", IFAC Symposium Advances in Automotive Control, July 12 - 14 2010, Munich, Germany.
- [16] Legnani G. (2003), *Robotica Industriale*, Casa Editrice Ambrosiano, Milano.
- [17] Pisanti C. (2008), Sviluppo di un modello matematico di un tetto solare mobile per un veicolo ibrido solare. Master thesis, University of Salerno.
- [18] Coraggio G. (2008), Progettazione di un tetto solare mobile per un veicolo ibrido solare. Master thesis, University of Salerno.
- [19] N.Femia, G.Petrone, G.Spagnuolo, M.Vitelli: "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method". *IEEE Transactions On Power Electronics*. vol. 20, No. 4 July 2005 pp. 963-973 ISSN: 0885-8993. doi:10.1109/TPEL.2005.850975.
- [20] N.Femia, D.Granozio, G.Petrone, G.Spagnuolo, M.Vitelli: "Predictive & Adaptive MPPT Perturb and Observe Method". *IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems*, vol. 43, No. 3 July 2007, pp. 934-950
- [21] N.Femia, G.Lisi, G.Petrone, G.Spagnuolo, M.Vitelli: "Distributed Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays. Novel Approach and System Analysis" *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 55, No. 7, July 2008, pp. 2610 - 2621.
- [22] G.Petrone, G.Spagnuolo, M.Vitelli: "Analytical model of mismatched photovoltaic fields by means of Lambert W-function", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.91, N.18, November 2007, pp.1652-1657.
- [23] Preitl Z., Bauer P., Kulcsar B., Rizzo G., Bokor J. (2007) Control Solutions for Hybrid Solar Vehicle Fuel Consumption Minimization In: *Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Istanbul, Turkey, June 13-15, 2007.
- [24] G Adinolfi, I Arsie, R Di Martino, A Giustiniani, G Petrone, G Rizzo, M Sorrentino (2008) "A Prototype of Hybrid Solar Vehicle: Simulations and On-Board Measurements", *Proc.of Advanced Vehicle Control Symposium AVEC 2008*, October 6-9, 2008, Kobe (Japan) 917-922 Society of Automotive Engineers of Japan - ISBN: 978-4-904056-21-9
- [25] I. Arsie, M.Cacciato, A.Consoli, G.Petrone, G. Rizzo, M.Sorrentino, G.Spagnuolo, (2006), "Hybrid Vehicles and Solar Energy: a Possible Marriage?", *International Conference on Automotive Technologies ICAT 2006*, November 17-18, 2006, Istanbul.
- [26] Cacciato M., Consoli A, Scarcella G, Scelba G. (2007). Accurate Implementation of a State of Charge Estimator for Hybrid and Electric Vehicle Battery Packs. *2nd International Workshop on Hybrid Vehicles*. 14 September, 2007. (pp. 1-6). Salerno, Italy.