

SISTEMA BIPV ISOLATO TERMICAMENTE ABBINATO AL COMPORTAMENTO DEI MODULI A-SI

Angelo Bernasconi, Domenico Chianese, Ivano Pola, Enrico Burà
SUPSI (Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana), LEEE, CH-6952 Canobbio
Phone: +41/58/666 6351, Email: leee@supsi.ch, Homepage: www.lee.supsi.ch

ABSTRACT

In un sistema BIPV (Building Integrated Photovoltaic system = sistema fotovoltaico integrato nell'edificio) con celle c-Si, la ventilazione è importante per mantenere le celle più fredde possibile. Per consentire una buona ventilazione perciò in genere si preferisce montare i moduli separatamente dal tetto esistente. In caso di tetti inclinati, i moduli sono posti sopra il tetto esistente e per i tetti piani invece sono montati su strutture inclinate, dimensionate per resistere alle sollecitazioni del vento, ma in nessuno dei due casi si può parlare di vere integrazioni costruttive.

In questo documento analizziamo il comportamento del rendimento energetico di un sistema PV (fotovoltaico) di 15.36kWp, costituito da moduli flessibili a tripla giunzione in film sottile di silicio amorfo, integrati in un sistema di copertura monostrato costituito da una membrana a base di poliolefine flessibili (FPO) che svolge la funzione di sistema di impermeabilizzazione.

Rispetto ai moduli c-Si, il sistema BIPV isolato termicamente si accorda perfettamente al comportamento termico delle tecnologie a-Si.

SISTEMA BIPV

I sistemi PV integrati nell'edificio (BIPV) combinano in modo armonioso le funzioni architettoniche dei materiali costruttivi (protezione, estetica...) e la produzione elettrica. Il materiale PV assume un nuovo ruolo con una doppia funzione: architettonica e produttiva.

Per i sistemi fotovoltaici (PV) è richiesta un'elevata qualità architettonica, in particolare per quanto riguarda i 7 criteri di integrazione definiti dallo IEA PVPS Task 7 [1]. Questi criteri, che sono di aiuto per l'integrazione del PV durante il progetto dell'edificio e definiscono la qualità architettonica dei progetti BIPV, sono importanti per l'architetto per determinare il motivo per cui un progetto BIPV è, oppure non è, esteticamente piacevole.

Unire insieme più funzioni in un solo elemento porta spesso a compromessi che limitano una delle due funzioni.

Per esempio nel sistema BIPV con celle c-Si, la ventilazione è importante per mantenere le celle il più fredde possibile e con un alto livello di efficienza. Questo limite complica l'integrazione nell'edificio dei moduli PV in silicio cristallino e comporta maggiori costi di installazione. Per consentire una buona ventilazione generalmente è preferibile montare i moduli separatamente dal tetto esistente.

In caso di tetti inclinati, i moduli vengono posizionati sopra il tetto esistente e in caso di tetti piani sono montati su strutture inclinate dimensionate per resistere alle sollecitazioni del vento, ma in nessuno dei due casi si può parlare di vere integrazioni costruttive.

Perciò è necessario fare uno sforzo per trovare elementi costruttivi PV che si adattino a vari tipi di integrazione.

TETTI PIANI

Il tetto piano è un particolare tipo di tetto, non adeguato ad un design di BIPV di buona qualità con elementi che svolgano doppia funzione. Comunque è possibile utilizzare un sistema di copertura monostrato, costituito da una membrana a base di poliolefine flessibili (FPO) che svolge la funzione di sistema di impermeabilizzazione.

In questo settore i sistemi di copertura monostrato oggi ammontano a ca. il 20-25% del mercato dei tetti piani in Europa.

Le FPO (conosciute anche come TPO, Poliolefine termoplastiche) hanno un buon profilo ecologico e buone caratteristiche di lunga durata. In normali condizioni hanno un'aspettativa di vita di oltre 40 anni. I manti impermeabili a base di FPO sono perciò compatibili con i moduli PV, che hanno un'aspettativa di vita di almeno 25 anni o più.

I manti impermeabili di copertura possono essere saldati fra di loro mediante aria calda, creando una connessione persino più resistente del manto stesso.

Le connessioni si realizzano con sovrapposizione dei teli adiacenti, dove la larghezza della sovrapposizione cambia in funzione del sistema di posa della copertura: fissata meccanicamente, totalmente incollata o zavorrata.

Le caratteristiche meccaniche dei manti impermeabili in FPO consentono la combinazione con i moduli flessibili a-Si a tripla giunzione.

I moduli realizzati con film sottile di silicio amorfo possono fare il loro ingresso nel vasto mercato dei tetti piani e nel mercato dei rifacimenti con un nuovo sistema integrato che vanta buone caratteristiche architettoniche.

Perché è una soluzione promettente per la buona qualità del Sistema BIPV?

In relazione agli aspetti fisici e meccanici, è opportuno citare i seguenti punti:

- Migliore qualità architettonica rispetto alle strutture o supporti inclinati con zavorra antivento
 - Flessibilità del materiale e del sistema
 - Peso ridotto
 - Assenza di vetro
 - Robustezza
 - Nessun supporto e nessuna zavorra antivento
- Al contrario, vi sono altri aspetti che sono collegati alle particolari caratteristiche del silicio amorfo:
- Miglior comportamento con parziale ombreggiatura
 - Migliori coefficienti di temperatura
 - Meccanismi di rigenerazione del silicio a temperature elevate

Queste caratteristiche verranno discusse in dettaglio nei capitoli successivi.

Stampa del documento presentato al 4th World Conference on PV Energy Conversion(WCPEC), Hawaii (US), Maggio 2006

DESCRIZIONE DEL SISTEMA

In questa installazione combiniamo il manto Sarnafil TG66/TS77 con un modulo UNISOLAR a-Si a tripla giunzione. Dal 1989 la Sarnafil ha posato oltre 35.000.000 di m² di questo tipo di manti. Il sistema di copertura è fissato meccanicamente con tecnologie normalmente utilizzate per la realizzazione di tetti piani.

Gli elementi che formano l'isolamento termico della copertura hanno un angolo inclinato di 3°, che permette alla pioggia di defluire. L'isolamento termico non consente la ventilazione dei moduli solitamente richiesta per i moduli PV in silicio cristallino. Ciò comporta il riscaldamento del modulo e di conseguenza introduce un cambiamento nei parametri PV.

I moduli Sarnafil – PV (denominati Solar Roof) sono composti da 2 moduli flessibili a-Si connessi in serie. Ogni modulo a-Si 22-L-B ha una lunghezza di 5,5m, con P_n = 128Wp; V_m = 33V; I_m = 3.88°; V_{oc} = 47.6; I_{sc} = 4.8°.

L'impianto con potenza di 15.36kWp è composto da 3 inverter SB5000TL ed ogni inverter ha tre MPPT indipendenti. Ad ogni inverter sono connesse 4 stringhe con configurazione 2+1+1. Ogni stringa è composta da 5 moduli Solar Roof-PV. L'edificio stesso è orientato di 14° a sud mentre le serie hanno orientamento est-ovest con una inclinazione, quasi orizzontale, di 3°.



Figura 1: Moduli PV in film sottile, integrati nei manti in poliolefine che svolgono la funzione di sistema di impermeabilizzazione.

Per poter fare confronti, accanto all'impianto PV principale sono stati installati 3 piccoli impianti open-rack con moduli a-Si e c-Si.

Due moduli Unisolar US64 a-Si a tripla giunzione sono stati situati a 3° di pendenza e sono stati collegati in modo da formare un impianto di 128 Wp. Due moduli sc-Si sono stati installati uno con 3° e l'altro con 20° di pendenza.

I parametri principali - elettrici, meteorologici e termici - sono registrati ogni minuto.

MODULO DI COMPORTAMENTO DELLA TEMPERATURA

Il miglioramento nella potenza di energia si ottiene grazie al basso coefficiente di temperatura (γ) e all'elevata rigenerazione termica dei moduli a-Si. Un tipico impianto di moduli a-Si open-rack mostra un recupero di una parte della performance iniziale durante l'esposizione all'aperto.

Due meccanismi reversibili possono adeguatamente rappresentare questo fenomeno:

- 1) L'iniziale degradazione accelerata della prestazione del modulo a-Si è connessa al meccanismo di elevata attivazione di energia, che richiede elevate temperature del modulo (>80°C) per invertire il processo;
- 2) Un meccanismo di degradazione lenta con una attivazione lenta di energia che può quindi essere facilmente invertita con una temperatura dei moduli più bassa (>40°C).

Questi due meccanismi, insieme a un coefficiente di temperatura più basso rispetto ai moduli c-Si, possono compensare le perdite dovute alla posizione quasi orizzontale dei moduli integrati nella copertura.

La temperatura delle celle dell'impianto mostra una punta massima di 80°C e la temperatura media aumenta fino a 40-45°C oltre la temperatura ambiente che arriva fino a 35°C. (Figura 2).

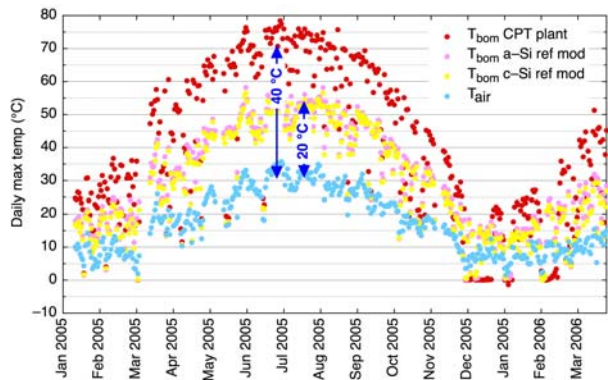


Figura 2: Ambiente massimo giornaliero e temperatura della faccia inferiore del modulo (T_{bom}) di moduli a-Si isolati termicamente (Impianto CPT) e di moduli c-Si open-rack.

Per i moduli montati open-rack, la temperatura media è di 20°C superiore alla temperatura ambiente.

Da una parte, l'elevata temperatura dei moduli isolati termicamente crea maggiori perdite di potenza dovute al coefficiente di temperatura negativo, ma d'altra parte:

la maggiore temperatura raggiunge il livello in cui il meccanismo di principale degradazione può essere invertito e si può osservare una migliore rigenerazione termica.

La figura 3 mostra il comportamento della potenza standard del modulo c-Si (open-rack, inclinazione 3°), dell'impianto CPT (moduli a-Si isolati termicamente) e del modulo di riferimento a-Si (open-rack, inclinazione 3°) per l'irraggiamento solare nel range tra 790 e 810 W/m² (Aprile 2005-Marzo 2006) rispetto alla temperatura, e consente di determinare i coefficienti di temperatura.

In questa rappresentazione grafica si può notare che la potenza decresce quando la temperatura dei moduli c-Si aumenta, e decresce con doppia velocità rispetto ai moduli a-Si. In altre parole, l'aumento della temperatura nei moduli a-Si è due volte maggiore dal momento che i moduli c-Si open-rack genererebbero le stesse perdite di potenza.

Stampa del documento presentato al 4th World Conference on PV Energy Conversion(WCPEC), Hawaii (US), Maggio 2006

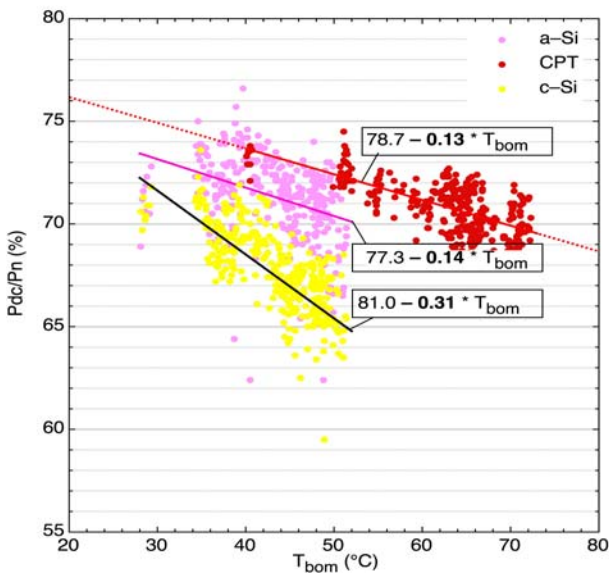


Figura 3: potenza standard rispetto alla temperatura dei moduli (coefficiente di temperatura γ) a Gi: 790-810 W/m² (Aprile 2005-Marzo 2006).

La figura 4 mostra che la temperatura dei moduli dell'impianto CPT supera il valore di 40°C per più di 1000 ore all'anno, dove più di 300 ore di operatività sono attestate sopra i 60°C, ma solo poche ore sono attestate sopra gli 80°C e oltre.

Perciò il secondo livello di completa rigenerazione dei moduli non viene praticamente mai raggiunto.

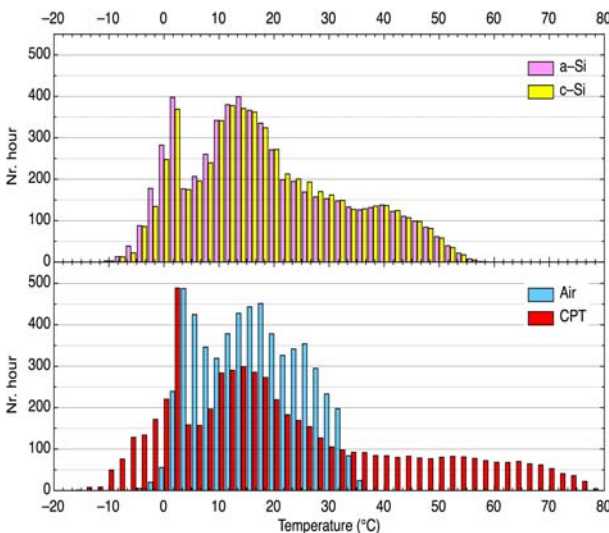


Figura 4:
In alto: tempo operativo rispetto alla temperatura dei moduli a-Si open-rack e c-Si open-rack.
In basso: tempo operativo rispetto alla temperatura ambiente e alla temperatura dei moduli CPT (dalle ore 5 alle 22).
Facciamo notare che i moduli dell'impianto di riferimento, non isolati termicamente, non superano mai i 60°C nella stessa condizione climatica.

PRODUZIONE DI ENERGIA

Nei primi due anni di operatività, l'energia annua incidente ($H_o = 1318 \text{ kWh/m}^2$) è stata maggiore rispetto ai dati meteorologici standard di 10 anni (1143 kWh/m^2). Nel periodo invernale i moduli in silicio amorfo subiscono una degradazione completa, che viene parzialmente recuperata nella stagione calda.

La produzione annuale dell'impianto principale, misurata nel periodo tra Dicembre 2003 e Dicembre 2005 è stata di 16'579 kWh (cioè $Y_f = 1079 \text{ kWh/kWp}$).

In confronto, i moduli c-Si dell'impianto situato in Ticino hanno prodotto in media 1073 kWh/kWp durante gli ultimi due anni.

Questo significa che i migliori comportamenti termici e processi di rigenerazione – con annealing - delle tecnologie a-Si, rispetto alle c-Si, possono compensare le perdite dovute al posizionamento quasi orizzontale in copertura.

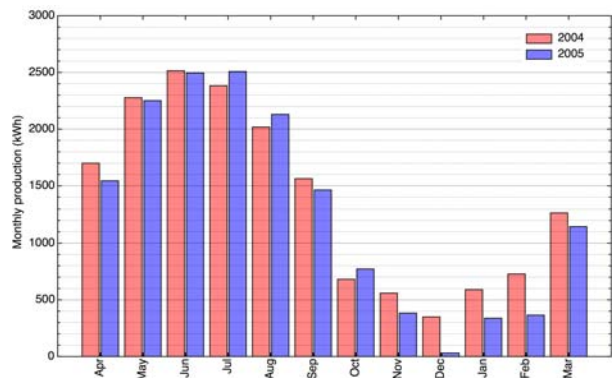


Figura 5: Confronto mensile dell'impianto di produzione CPT durante due periodi: Aprile04-Marzo05, Aprile05 – Marzo06.

Durante la stagione invernale 2005-2006 (vedere figura 5), a partire da Novembre e durante i 3 mesi seguenti, la neve ha parzialmente coperto l'impianto, compromettendone parzialmente la produzione.

L'effetto della neve può essere osservato anche nella Figura 2, dove si nota che la temperatura del modulo dell'impianto CPT durante la fine della stagione invernale è stato vicino agli 0°C per un lungo periodo. La superficie isolata termicamente non ha consentito alla neve sui moduli di sciogliersi, contrariamente ai moduli di riferimento. Infatti, l'aria che circonda i moduli open-rack, scalda i moduli e scioglie la neve. Tra i mesi di Dicembre e Marzo 2006, l'impianto ha perso circa 100 kWh/kWp (vedere tabella 1).

Di conseguenza il rendimento finale è stato più basso nel secondo anno di attività, come si può vedere in dettaglio nella tabella 2, dove sono riportati i valori delle stringhe #1, 5 e 9 che hanno la stessa inclinazione ed orientamento dei moduli di riferimento (3° in clinazione e 76° est).

Stampa del documento presentato al 4th World Conference on PV Energy Conversion(WCPEC), Hawaii (US), Maggio 2006

Month	Yfdc S1+5+9 [kWh/kWp]	Yfdc a-Si 3° [kWh/kWp]	Yfdc c-Si 3° [kWh/kWp]	Yfdc c-Si 20° [kWh/kWp]
Nov-04	39	-	-	-
Dec-04	24	-	-	-
Jan-05	41	29	30	55
Feb-05	50	49	51	75
Mar-05	88	87	87	75
Apr-05	108	105	105	114
May-05	155	151	147	118
Jun-05	175	170	163	162
Jul-05	176	169	160	161
Aug-05	149	142	135	143
Sep-05	102	96	93	72
Oct-05	53	49	49	64
Nov-05	25	28	28	51
Dec-05	2	22	24	43
Jan-06	23	30	33	56
Feb-06	24	42	46	65
Mar-06	79	71	82	78

Tabella 1: produzione normalizzata di energia mensile (rendimento finale) per l'impianto CPT (stringhe #1,5 e 9) ed i moduli di riferimento.

	april 04-march 05 (kWh/kWp)	april 05-march 06 (kWh/kWp)
CPT plant (3°) Strings #1, 5, 9	1144	1072
a-Si US64 (3°)	-	1076
c-Si ASI100 (3°)	-	1066
c-Si ASI100 (20°)	-	1125

Tabella 2: produzione normalizzata di energia (rendimento finale) per l'impianto CPT (stringhe #1,5 e 9) ed i moduli di riferimento.

PERCENTUALE DI RENDIMENTO (PR) (PERFORMANCE RATIO)

La percentuale di rendimento (PR) dell'impianto CPT supera l'80% nei periodi caldi (da metà Marzo alla fine di Ottobre). Per l'irraggiamento giornaliero più basso di 5 kWh/m² il PR può superare il 90%. Nel periodo più caldo, il PR medio per la parte ac (PRac) è stato del 86.2%, mentre il PRac annuale nel 2005 è stato del 77.5% (2004: 83.5%).

Nella stagione invernale la percentuale di rendimento è chiaramente inferiore e si colloca tra il 60% e l'80%. Comunque normalmente il periodo invernale (Novembre-Febbraio) influisce poco sulla produzione totale dell'impianto (soltanto il 13%). Questo è principalmente dovuto alla riduzione del rendimento a-Si a basse temperature, minore energia incidente (l'irraggiamento maggiore di 5 kWh/m² non è possibile a causa della posizione quasi orizzontale dei moduli) e maggiori perdite ottiche dei moduli posizionati sul tetto piano (vedere figura 6).

La riduzione del PR annuale nel 2005 rispetto al 2004 è stata causata dalla neve che ha coperto il sistema per un periodo di tempo eccezionalmente lungo. Comunque, anche se il rendimento dell'impianto è stato penalizzato dalla neve, il suo PR annuale è stato ancora tra i migliori impianti PV nella stessa zona (sud della Svizzera).

Da Luglio fino ad Ottobre (vedere figure 6) i moduli a-Si isolati termicamente (CPT) hanno un 5% di PRdc maggiore dei moduli a-Si di riferimento.

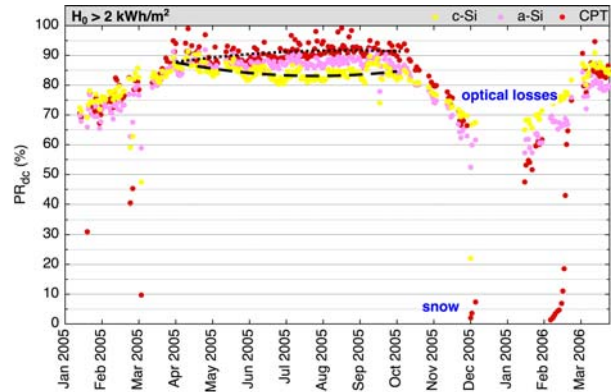


Figura 6: PRdc giornaliero dal 1.1.2005 al 1.4.2006, per un irraggiamento $H_i > 2 \text{ kWh/m}^2$.giorno.

I moduli c-Si hanno invece un PRdc che decresce durante l'estate come risultato dell'aumento della temperatura. Durante l'inverno l'effetto da perdite ottiche è dominante per tutti i moduli.

CONCLUSIONI

- I Sistemi PV integrati nell'edificio (BIPV) combinano in modo armonioso le funzioni architettoniche dei materiali da costruzione e la produzione elettrica.
- Per la buona qualità di un progetto BIPV sono necessari nuovi materiali adatti alle necessità architettoniche.
- Le caratteristiche meccaniche dei manti impermeabili FPO consentono la combinazione con moduli flessibili a tripla giunzione in film sottile di silicio amorfo a-Si.
- I moduli a-Si isolati termicamente raggiungono gli 80°C e la temperatura principale aumenta fino a 40-45° oltre la temperatura ambiente a 1000 W/m².
- La produzione annuale dell'impianto principale (Yf = 1079 kWh/kWp) è simile a quella di un impianto c-Si open-rack, inclinata 30°.
- Rispetto ai moduli c-Si, le proprietà termiche delle tecnologie a-Si si adattano meglio al comportamento di un sistema BIPV isolato.
- L'isolamento termico della faccia inferiore dei moduli non permette alla neve di sciogliersi come nel caso di moduli montati su strutture ventilate.

RIFERIMENTI

- [1] H. Kaand and T. Reijenga, "Photovoltaics in an Architectural Context", *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2004.
- [2] D. Chianese et al., "Flat roof integration of a-Si modules laminated together with flexibles polyolefines membranes", *20th EPVSEC*, 2005, Barcelona (S).

RINGRAZIAMENTI

Questo progetto è finanziato dall'Ufficio Federale dell'Energia (UFE), da AET (Azienda Elettrica Ticinese) – proprietaria dell'impianto, dal Canton Ticino – sezione logistica, dalla Sarnafil International e da Sarnafil Ticino.