

Un sistema di inseguimento per un impianto solare termodinamico a specchi di Fresnel

Nell'articolo viene descritto il progetto meccatronico del sistema di inseguimento del sole per un impianto solare termodinamico a specchi lineari di Fresnel. I requisiti imposti alla movimentazione si sono rivelati piuttosto inusuali, a causa della velocità di rotazione molto bassa degli specchi e della necessità di applicare coppie elevate per movimentare un vasto campo di specchi (160) mediante un unico attuatore. L'intero sistema di inseguimento, dalla dinamica elettrica dei motori all'elasticità torsionale degli specchi, è stato modellizzato e simulato nell'ambiente object-oriented Modelica/Dymola, per una prima verifica di progetto.

Gianni Ferretti
Giambattista Grusso
Gianantonio Magnani
Matteo Redaelli
Paolo Rocco

Keyword

Energia solare, motori a passo, sistemi di posizionamento, modellistica dinamica, specchi riflettori.

In conseguenza ai problemi posti su scala planetaria dall'aumento del consumo di energia e dai rischi ambientali, primo fra tutti il fenomeno del riscaldamento globale, gli impianti solari termodinamici, in particolare gli impianti a concentrazione solare, sono stati oggetto in anni recenti di molti programmi di ricerca ed investimenti mirati.

In quest'ambito, una delle ultime innovazioni è costituita dagli impianti a specchi di Fresnel [1], in cui vasti campi di gruppi modulari di specchi concentrano i raggi solari in un ricevitore stazionario posto ad alcuni metri di altezza (figura 1), contenente un secondo stadio di specchi (figura 2), che a sua volta concentra nuovamente i raggi riflessi in un assorbitore tubolare, percorso da acqua o da un altro liquido di raffreddamento.

Per mantenere il puntamento dei raggi riflessi sul ricevitore gli specchi devono essere ruotati attorno al loro asse longitudinale, a seguito della posizione del sole. A differenza degli eliostati degli impianti solari a ricevitore centrale, che richiedono la movimentazione lungo due assi di moto, tutti gli specchi sono soggetti alla stessa rotazione e differiscono solo nella posizione angolare iniziale per file di specchi. Il problema del posizionamento degli specchi (inseguimento solare) può quindi essere affrontato utilizzando un solo motore ed un solo stadio di riduzione per un numero considerevole di specchi, e quindi per una superficie riflettente più vasta (per esempio 100 m²), rispetto al caso degli eliostati. Questo aspetto, e la bassa velocità di inseguimento del sole, rendono il progetto del sistema di movimentazione piuttosto particolare.



Figura 1 - Impianto di generazione solare a specchi lineari di Fresnel (Ausra media department)

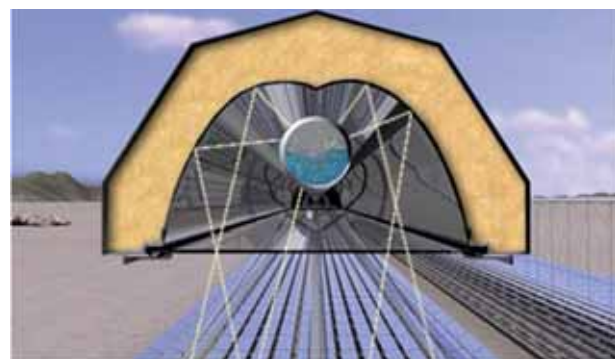


Fig 2 - Concentratore parabolico composto (CPC)

Infatti, la velocità di inseguimento molto bassa (solo $3,63 \times 10^{-5}$ rad/s) e la coppia di carico molto elevata necessaria alla movimentazione di un elevato numero di specchi (160), richiederebbero componenti costosi e di elevata qualità. In particolare, il rapporto di trasmissione richiesto in questa applicazione è molto maggiore di 50÷100, utilizzato generalmente nelle applica-

GLI AUTORI

G. Ferretti, G. Grusso, G. Magnani, M. Redaelli, P. Rocco - Politecnico di Milano, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Milano, Italia.

zioni standard. D'altro canto, l'utilizzo di due o più riduttori in serie aumenterebbe i costi ed introdurrebbe cedevolezze e giochi aggiuntivi nella catena di trasmissione. Per limitare il rapporto di trasmissione è necessario che il motore possa sviluppare una coppia elevata, ma la velocità di movimento molto bassa non consente l'adozione di motori a spazzole o brushless, a causa del loro comportamento altamente non lineare a bassa velocità. Queste considerazioni hanno suggerito la scelta di un motore a passo, rinunciando quindi all'obiettivo di un inseguimento continuo ed accettando un inseguimento a passi di ampiezza compatibile con i requisiti di precisione. Inoltre, i motori a passo forniscono coppie elevate di spunto e a bassa velocità e sono relativamente economici.

L'intero sistema di posizionamento è stato modellizzato e simulato nell'ambiente object-oriented Modelica/Dymola [2-4], per una prima verifica del progetto, e i primi risultati sono discussi in questo articolo. Grazie all'approccio modulare consentito da Modelica, si sono potuti prendere in considerazione i fenomeni dinamici più importanti dal punto di vista del progetto del sistema di inseguimento, cioè la dinamica del motore e dell'azionamento, la cedevolezza e il gioco della catena di trasmissione, l'elasticità torsionale strutturale e l'attrito nel riduttore e nei cuscinetti. Attualmente si sta predisponendo un prototipo di impianto a scala ridotta, che consentirà un ulteriore affinamento del modello di simulazione e del progetto complessivo.

Il lavoro è stato finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico nell'ambito del progetto Industria 2015 - FreeSun. In particolare, gli autori desiderano ringraziare il leader di progetto Fabbrica Energie Rinnovabili Alternative (Fera), Braitec, per il contributo al progetto cinematico, strutturale e meccanico e per la simulazione CFD degli effetti dovuti al vento, e Studio di Informatica (SDI), per il contributo al dimensionamento della catena di trasmissione e al progetto del sistema di controllo.

La prossima sezione descrive brevemente l'impianto solare in progettazione; la sezione successiva (Descrizione del modello) descrive il modello del sistema di inseguimento, considerando l'algoritmo di calcolo della posizione del sole, utilizzato sia nel modello che nell'implementazione, il modello del motore e dell'azionamento, il modello della catena di trasmissione, il modello del campo solare; nella penultima sezione vengono discussi alcuni risultati preliminari di simulazione; nell'ultima sezione si delineano alcune conclusioni.

Potenza elettrica generata	1÷1.2 MW
Potenza termica di picco	6 MW
Efficienza	17÷20%
Superficie	24000 m ²
Fluido di lavoro	Water
Temperatura del fluido in ingresso	150 °C
Temperatura del fluido in uscita	300 °C

Tabella 1 - Dati di impianto

Descrizione dell'impianto

In un impianto a specchi lineari di Fresnel (figura 1) i raggi solari sono focalizzati in ricevitori sopraelevati¹ mediante una serie di specchi lunghi, stretti e a bassa curvatura. Al

fine di concentrare ulteriormente la luce si utilizza un concentratore parabolico composto (CPC) (figura 2)

posto in cima al ricevitore. La luce solare concentrata porta ad ebollizione l'acqua che scorre nel ricevitore, generando vapore ad alta pressione che viene poi utilizzato direttamente nella generazione di potenza elettrica o convogliato in accumulatori di calore.

Un impianto a specchi lineari di Fresnel offre parecchi vantaggi, riassunti brevemente nel seguito. Prima di tutto, l'impianto richiede un minor volume di materiale, e quindi un minor peso, rispetto al caso di un progetto convenzionale delle lenti. Inoltre, il ricevitore è condiviso da parecchi specchi ed è stazionario, il che evita giunti nel circuito del fluido. Non è necessario che gli specchi sostengano il

ricevitore, sono quindi strutturalmente più semplici rispetto ad altri tipi di impianti solari e possono essere disposti in unità modulari. I riflettori sono posti ad un'altezza di 1÷1,5 m, consentendo un miglior sfruttamento del suolo. In particolare, per minimizzare l'ombreggiatura fra gli specchi è richiesto uno spazio ridotto (200÷300 mm): l'efficienza di utilizzo del suolo è circa del 60÷75% e si abbassa al 50% in caso di due unità adiacenti.

Le caratteristiche principali del prototipo di impianto considerato sono riportate nella tabella 1.

Descrizione del modello

Il modello complessivo del campo solare controllato, illustrato nella figura 3, è composto da cinque sottomodelli principali: un modulo che calcola la posizione del sole, i sottomodelli del motore e dell'azionamento e i sottomodelli della trasmissione e del campo di specchi.

Algoritmo di posizione solare

Il sottomodulo Solar Position implementa l'algoritmo che definisce la posizione del sole. In un sistema di coordinate orizzontale, in cui l'orizzonte locale

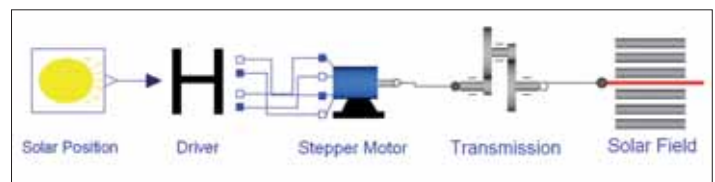


Figura 3 - Schema del modello complessivo (Modelica)

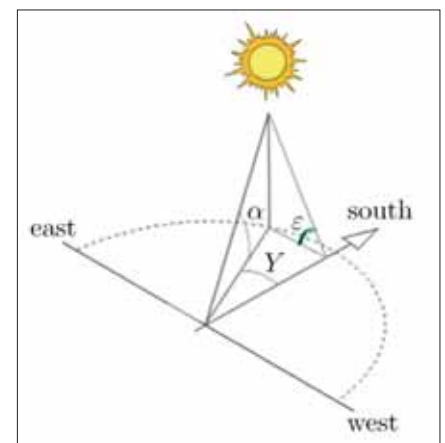


Figura 4 - Sistema di riferimento azimutale

¹Il ricevitore è posto ad un'altezza di 7÷8 m sopra il piano degli specchi.

dell'osservatore viene considerato come piano fondamentale (figura 4), la posizione del sole è individuata da due coordinate: l'azimuth Y e l'altezza α dove Y è l'angolo fra la proiezione sul piano fondamentale dei raggi solari e la direzione sud (positiva se posta ad est prima di mezzogiorno, negativa altrimenti) e α è l'angolo fra la direzione dei raggi solari ed il piano orizzontale. Poiché gli specchi sono allineati lungo la direzione nord-sud, l'inseguimento del sole si ottiene imponendo un'inclinazione dello specchio funzione dell'angolo di incidenza ε , definito come:

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{\tan \alpha}{\sin Y}\right)$$

Si sono considerati due diversi algoritmi: il *Solar Position Algorithm* (SPA), sviluppato da Reda e Andreas [5], e il *Computation of Solar Position* (CSP), sviluppato da Grena [6]. L'algoritmo SPA è basato sugli algoritmi astronomici riportati in Meeus [7]: ha una precisione di 0,0003 deg ed un periodo di validità che va dal 2000 AC al 6000 DC, mentre l'algoritmo CSP ha una precisione di $\pm 0,0027$ deg e una deviazione standard di $\pm 0,001$ deg, ed un periodo di validità che va dal 2003 al 2023. Entrambi gli algoritmi richiedono come dati in ingresso la data, il tempo universale (UT), il tempo coordinato universale (UTC), la corre-

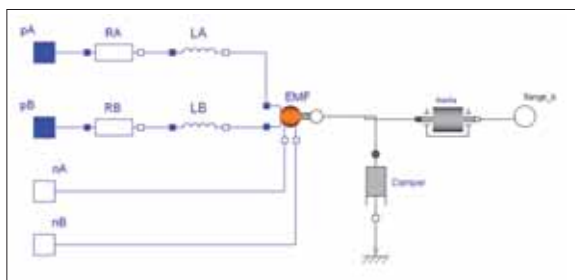


Figura 5 - Modello Modelica del motore a passo

zione temporale (DUT1), la longitudine, la latitudine, la pressione locale (media) e la temperatura, mentre l'algoritmo SPA richiede anche l'altitudine. L'algoritmo CSP è pertanto meno accurato ma è più efficiente dal punto di vista computazionale, e impiega 0,0063 ms per eseguire i calcoli, rispetto agli 0,0780 ms richiesti dall'algoritmo SPA sulla stessa mac-

china. D'altronde, un ritardo computazionale di 0,0780 ms è comunque trascurabile, anche in un'implementazione real-time, mentre l'intervallo di validità dell'algoritmo CSP è considerevolmente più breve del ciclo di vita ipotizzato per l'impianto (circa 20 anni). L'algoritmo SPA è stato quindi scelto per l'implementazione e la sua uscita è stata direttamente considerata come setpoint per il sistema di posizionamento degli specchi.

La rotazione massima giornaliera degli specchi durante il normale funzionamento è 90 deg, la velocità di rotazione è $3,63 \times 10^{-5}$ rad/s ed il massimo errore di inseguimento consentito è 3 mrad. In caso di condizioni ambientali critiche (vento forte, grandine, ecc.) gli specchi devono essere capovolti completamente e rapidamente, il che comporta una rotazione massima di 225 deg in un tempo massimo di 2 minuti.

Motore a passo e azionamento

Per far fronte alla velocità di rotazione molto bassa e ai requisiti di coppie elevate imposti dal controllo di moto del campo solare si è scelto un motore a passo ibrido: Sanyo Denki 103-H8223-6540, caratterizzato da un numero di 200 passi/giro (per un passo angolare di 1,8 deg) e da una coppia di picco $\tau_p = 7,9$ Nm. I motori a passo ibridi si possono considerare come un combinazione di due diversi tipi di motori: il motore a magneti permanenti ed il motore a riluttanza variabile. Questi motori consentono di mantenere il rotore in una posizione di equilibrio, sviluppando nel contempo una coppia elevata come i motori a magneti permanenti, evitando però il problema di un numero limitato di posizioni di equilibrio. Utilizzando lo stesso numero di denti di rotore, il motore ibrido può assestarsi in un numero di posizioni di equilibrio doppio rispetto al motore a riluttanza variabile, garantendo una risoluzione più elevata. Trascurando la mutua induttanza fra le due fasi e la variazione dell'autoinduttanza, il modello elettrico del motore a passo ibrido può essere

scritto come [8] nella figura 6 e nelle formule che seguono:

$$v_A = Ri_A + L \frac{di_A}{dt} + K_t \omega_m \sin(N_r \theta_m) \quad (1)$$

$$v_B = Ri_B + L \frac{di_B}{dt} + K_t \omega_m \cos(N_r \theta_m) \quad (2)$$

$$\tau_m = K_t \sin(N_r \theta_m) i_A + K_t \cos(N_r \theta_m) i_B \quad (3)$$

dove v_A, v_B, i_A, i_B sono rispettivamente le tensioni e le correnti di fase, R e L sono rispettivamente la resistenza e l'induttanza di fase, K_t è la costante di coppia, N_r è il numero di denti, ω_m and θ_m sono rispettivamente la velocità e l'angolo del rotore. Il modello è completato dal bilancio di coppia all'asse del rotore:

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} + D_m \omega_m = \tau_m - \tau_L$$

dove τ_L è la coppia di carico. Il modello Modelica del motore a passo è illustrato nella figura 5. Si noti in particolare che la forza controelettrica (ultimo termine in (1) e (2)) e la coppia elettromagnetica (3) sono definite nel sottomodello EMF. I dati relativi al motore a passo sono riportati nella tabella 2. Si sottolinea che, al fine di recuperare la perdita di passo, sul motore è stato montato un encoder a risoluzione relativamente bassa (1000 passi/giro).

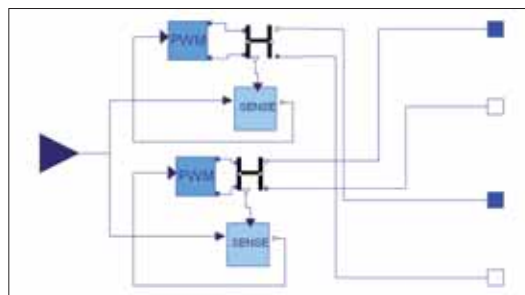


Figura 6 - Modello Modelica dell'azionamento H-bridge

Resistenza	R	0.2 Ω
Induttanza	L	$1.4 \cdot 10^{-3}$ H
Costante di coppia	K_t	0.9875 Vs/rad
Numero di denti	N_r	50
Inerzia del rotore	J_m	$4.35 \cdot 10^{-4}$ Kgm ²
Coefficiente di smorzamento	D_m	$6 \cdot 10^{-3}$ Nms/rad

Tabella 2 - Dati motore

Il principio di funzionamento di un motore a passo è piuttosto semplice: alimentando con impulsi di corrente gli avvolgimenti di statore, la posizione del rotore avanza fino alla posizione di equilibrio successiva, compiendo un passo. Il modello dell'azionamento non viene qui descritto per brevità, si rimanda al riferimento [9].

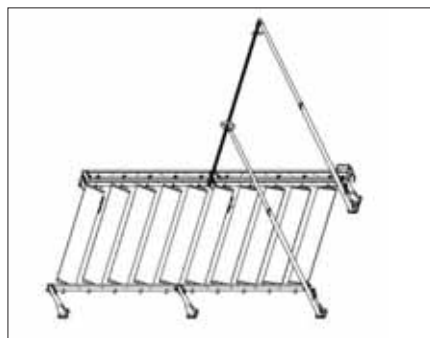


Figura 7 - Catena di trasmissione e specchi (Braitec Srl)

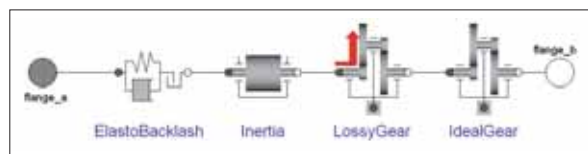


Figura 8 - Modello Modelica della catena di trasmissione

Trasmissione

La catena di trasmissione dalla flangia motore agli specchi è composta da un riduttore, da una coppia di ingranaggi e da un'asta, che movimenta tutti gli specchi in metà campo solare (figura 7). Nella figura 8 è riportato il modello Modelica relativo. Il modello LossyGear, descritto in [10], introduce un'efficienza variabile con il carico e la velocità, ma i dati caratterizzanti tale dipendenza non sono riportati sul data sheet del riduttore scelto (Wittenstein Alpha TP+ 110), pertanto è stata assunta un'efficienza nominale $\eta_g=0,92$. Il modulo IdealGear modella l'accoppiamento ad ingranaggi, mentre i valori stimati dei giochi introdotti dagli ingranaggi e dall'accoppiamento con l'asta sono stati riportati alla flangia di ingresso del riduttore e considerati nel modulo ElastoBacklash, ove risultano dominanti rispetto al gioco del riduttore (0,53636 rad rispetto a $2,9 \times 10^{-4}$ rad). I dati della catena di trasmissione sono riportati nella tabella 3.

È necessario sottolineare che un'elevata

Elasticità riduttore	K_g	650 Nm/arcmin
Coefficiente di smorzamento riduttore	D_g	10 Nms/rad
Gioco	δ_g	0.53665 rad
Momento di inerzia	J_g	$9.16 \cdot 10^{-4}$ Kgm ²
Efficienza riduttore	η_g	0.92
Rapporto di trasmissione riduttore	ρ_s	220
Rapporto di trasmissione ingranaggi	ρ_o	2.3

Tabella 3 - Dati della catena di trasmissione Campo solare

efficienza (0,92) rende reversibile il riduttore, aumentando il rischio di perdite del passo che si verificano quando la coppia di carico all'asse rotore supera la coppia di tenuta del motore a passo. Il rischio è inoltre accentuato dalla elevata inerzia complessiva del campo solare, conseguente al grande numero di specchi movimentati.

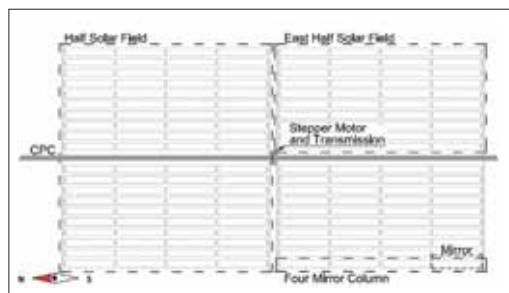
Campo solare

Il campo solare è costituito da 160 specchi (figura 9), suddivisi in due metà direttamente collegati alla catena di trasmissione; ciascuna metà è suddivisa in una parte est ed una parte ovest, a loro volta composte da una colonna di 4 specchi; la figura

10 mostra i modelli Modelica che corrispondono a ciascuna parte dell'impianto. Il modello FourMirrorColumn è caratterizzato da due principali parametri: la distanza d della colonna dall'asse centrale del campo (figura 11) e il valore della coppia dovuta al vento. La distanza d , insieme all'altezza h del CPC è necessaria al fine di calcolare la corretta inclinazione ξ degli specchi in funzione dell'angolo γ , calcolata dall'algorithm SPA e data da (figura 12):

$$\xi = \begin{cases} \beta + \frac{1}{2} \left(\gamma - \frac{\pi}{2} - \beta \right), & \text{mattino} \\ \beta - \frac{1}{2} \left(\beta + \frac{\pi}{2} - \gamma \right), & \text{pomeriggio} \end{cases}$$

dove $\beta = \arctan(d/h)$.



Al fine di valutare gli effetti del vento sulle prestazioni del posizionamento si è anche realizzata un'accurata analisi fluidodinamica, basata su un software CFD. I risultati dell'analisi, in termini delle coppie agenti sull'asse di ciascuno specchio nel caso di una velocità media del vento di 8 m/s

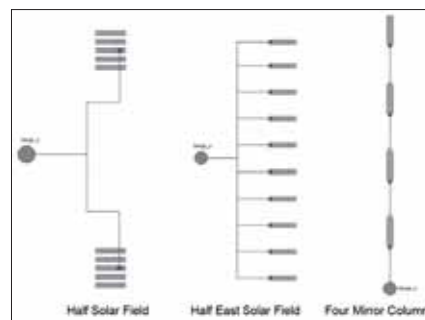


Figura 10 - Modello Modelica del campo solare

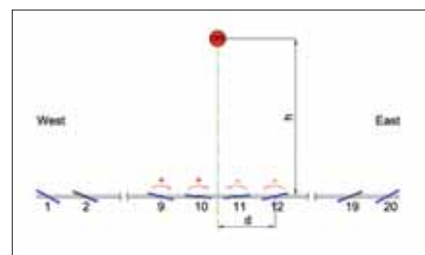


Figura 11 - Altezza e distanza dal CPC

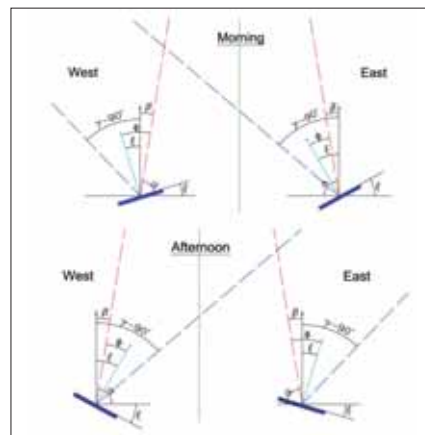


Figura 12 - Inclinazione degli specchi

sono riportati nella figura 13. Si noti che gli specchi più sollecitati sono naturalmente quelli relativi alla colonna più esterna (numero 20), ma coppie significative nascono anche sulle colonne numero 12 e 17.

Figura 9 - Campo solare

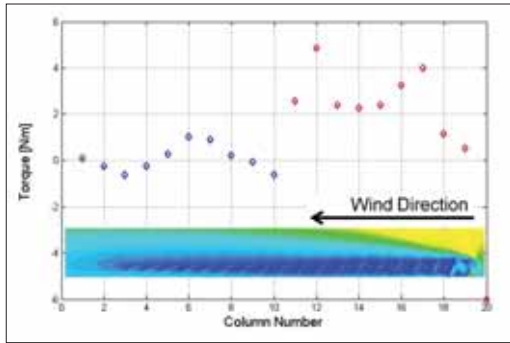


Figura 13 - Coppie dovute al vento (Braitec Srl)

La figura 14 mostra il modello Modelica di un singolo specchio, che considera l'elasticità torsionale del supporto, l'inerzia complessiva, l'attrito nei cuscinetti e una coppia data dalla somma di un termine di gravità, dovuta alla distanza del baricentro dall'asse di rotazione ed agli effetti del vento. Ciascun modello BearingFriction, a parte l'ultimo specchio della colonna, include due supporti consecutivi. I dati del modello sono riportati nella tabella 4.

Elasticità dello specchio	K_r	86867 Nm/rad
Coefficiente di smorzamento dello specchio	D_r	33 Nms/rad
Inerzia dello specchio	J_r	8 Kg m^2
Coppia di attrito di stiction	τ_s	0.0294 Nm
Coppia di attrito di Coulomb	τ_c	0.01471 Nm

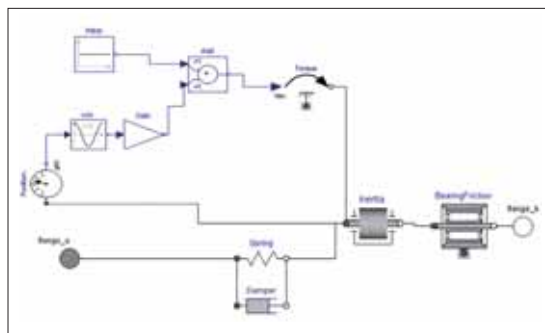


Figura 14 - Modello Modelica di uno specchio

La rigidità torsionale degli specchi non è stata stimata in base al progetto meccanico, è stata invece posta ad un valore tale da soddisfare i requisiti di progetto, che impongono un errore massimo di $1,5 \times 10^{-3}$ rad sul movimento angolare di ciascuno specchio (un errore massimo di $1,4 \times 10^{-3}$ rad è stato invece assegnato all'effetto combinato di motore, controllo e catena di trasmissione). Si consideri che lo spostamento angolare di regime del quarto specchio di una colonna rispetto all'uscita della trasmissione è determinato

dall'elasticità torsionale della colonna, dalla gravità, dal vento e dalle coppie di attrito:

$$\theta_4 = \theta_b + \frac{\tau_1 + 2\tau_2 + 3\tau_3 + 4\tau_4 + 16\tau_f}{K_r}$$

dove θ_4 , θ_b , τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_4 , K_r , sono rispettivamente l'inclinazione del quarto specchio, l'angolo di uscita della catena di trasmissione, la somma delle coppie di gravità e delle coppie dovute al vento agenti sull' i -esimo specchio della colonna, la coppia di attrito nei cuscinetti di supporto e l'elasticità torsionale dello specchio.

Il caso peggiore è rappresentato dalla colonna 20 di prima mattina, quando la coppia di gravità è massima² e la velocità media del vento è pari a 8 m/s, mentre la coppia di attrito è stata trascurata

Tabella 4 - Dati dello specchio

($\tau_f = 0,01471$ Nm), quindi, imponendo $\theta_4 - \theta_b = 1,5 \times 10^{-3}$ rad si ottiene $K_r = 86867$ Nm/rad.

Risultati di simulazione

Una prima indagine si è concentrata sugli effetti del PWM, che nei motori a passo può eccitare le risonanze del sistema e introdurre instabilità, causando anche cali di coppia e fermi motore. Inizialmente si è effettuato un confronto fra un driver di corrente ideale e un driver PWM in assenza di carico. Si sono imposti due passi al motore, per muoverlo alla velocità nominale sul carico di $3,63 \times 10^{-5}$ rad/s, cioè ad una velocità di 0,01836 rad/s del motore. Poiché la variazione dell'angolo motore è discretizzata in 200 passi/giro, si sono applicati due impulsi di corrente di ampiezza massima pari a 9° e di durata pari a 1,71 s. La figura 15 mostra un confronto fra le correnti di fase con e senza PWM, mentre nella figura 13

vengono confrontate le posizioni motore. È evidente che il PWM influenza la posizione motore con un'oscillazione alla stessa frequenza, cioè 100 kHz.

In un secondo esperimento di simulazione si è considerata la condizione più critica dal punto di vista del posizionamento, cioè una velocità media del vento di 8 m/s alle ore 9:00. La figura 17 mostra l'angolo del primo e del quarto specchio della ventesima colonna, insieme al segnale di riferimento e ai limiti sull'errore. Come ci si aspettava dalla stima della rigidità degli specchi l'errore sul posizionamento del quarto specchio è al limite inferiore.

Si sono anche indagati gli effetti di una velocità del vento variabile (figura 18), assegnando alla coppia dovuta al vento una variazione sinusoidale di frequenza pari a 1 Hz e di ampiezza pari alla massima coppia considerata negli esperimenti di simulazione precedenti.

Si sono successivamente verificati i requisiti di coppia all'uscita dal riduttore, da questo punto di vista la condizione

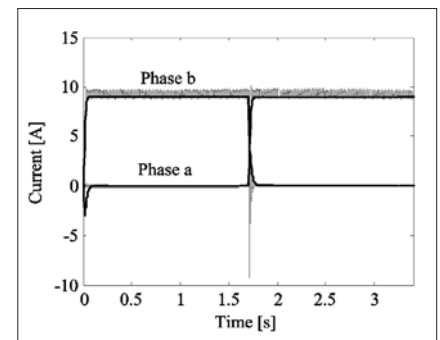


Figura 15 - Correnti di fase ideali (linea spessa) e correnti di fase PWM (linea sottile)

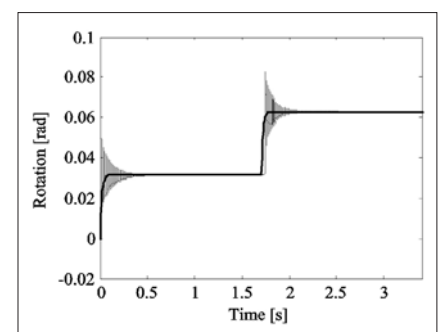


Figura 16 - Posizione motore con correnti ideali (linea spessa) e posizione motore con correnti di fase PWM (linea sottile)

²La coppia di gravità è trascurabile nella parte ovest dell'impianto di prima mattina, mentre è massima sulla parte est. La situazione opposta si verifica nel pomeriggio, mentre a mezzogiorno la coppia di gravità è trascurabile sull'intero impianto, poiché le coppie di gravità su entrambi i lati dell'impianto si bilanciano.

peggiore si verifica alle 16:00. I risultati sono riportati nella figura 19: si ottiene una coppia di picco di 840 Nm, considerando sempre una coppia massima dovuta al vento; si noti che il requisito di progetto sulla coppia massima all'uscita del riduttore è 2000 Nm.

Infine, si è indagato il valore limite della coppia di stiction nei supporti. La figura 20 confronta la posizione del quarto specchio ottenuta con i valori di coppia di stiction e Coulomb riportati nella tabella 4 e la stessa posizione ottenuta con un valore di stiction cinque volte maggiore. Come evidente, anche se i transitori sono ovviamente diversi, i passi sono tuttavia realizzati correttamente. Invece, con un valore di coppia di stiction 20 volte maggiore della coppia di Coulomb si verifica la perdita di alcuni passi e la somma degli errori commessi in ciascun passo fa divergere la posizione dal riferimento (figura 21).

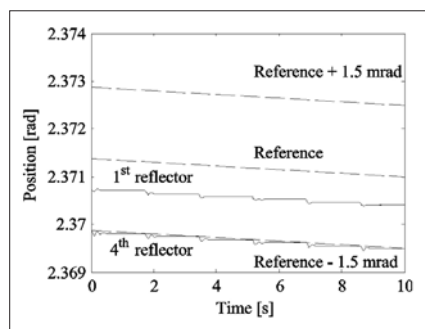


Figura 17 - Angolo del primo e del quarto specchio della colonna 20 con velocità del vento costante, riferimento d'angolo e limiti di errore (linee tratteggiate)

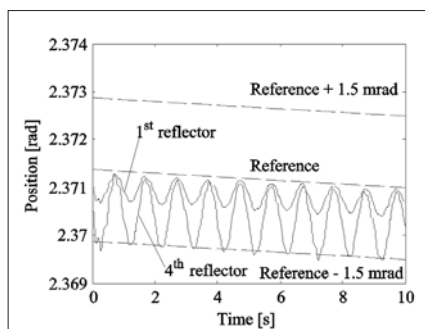


Figura 18 - Angolo del primo e quarto specchio della colonna 20 con coppia del vento sinusoidale, riferimento d'angolo e limiti di errore (linee tratteggiate)

Conclusioni

In questo articolo si è descritto il progetto meccatronico del sistema di inseguimento di un impianto solare a specchi di

Fresnel. I particolari requisiti di movimento rendono l'applicazione significativa da un punto di vista meccatronico: la velocità di rotazione degli specchi molto bassa e i valori elevati di coppia richiesti per la movimentazione di un vasto campo solare (160 specchi) mediante un unico attuatore non sono comuni nei problemi di controllo del moto. Queste particolarità hanno suggerito la scelta di un motore a passo come attuatore, al fine di mantenere una buona precisione a velocità molto basse (consentendo un moto discontinuo degli specchi), pur con l'utilizzo di un comune riduttore di tipo industriale.

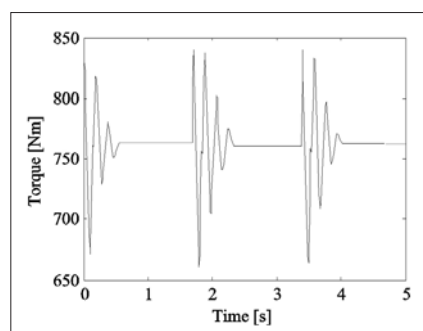


Figura 19 - Coppia di uscita del riduttore

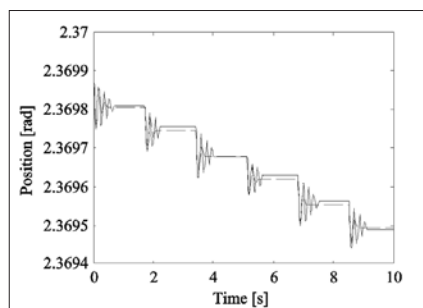


Figura 20 - Angolo del quarto specchio con $\tau_s=0,0294$ Nm (linea tratteggiata) e con $\tau_s=0,147$ Nm (linea continua)

Un altro aspetto affrontato è stata l'integrazione del progetto in un ambiente di modellistica e simulazione modulare object-oriented, basata sul linguaggio Modelica e sul software Dymola. È stato modellizzato l'intero impianto, dalla dinamica elettrica dell'azionamento all'elasticità torsionale degli specchi, utilizzabile per un ulteriore affinamento del progetto. Attualmente è in fase di costruzione un primo prototipo di impianto, che consentirà di validare il modello.

È opinione degli autori che l'interazione fra un'accurata modellistica e simulazione e l'indagine sperimentale sia uno degli aspetti caratterizzanti di un progetto meccatronico.

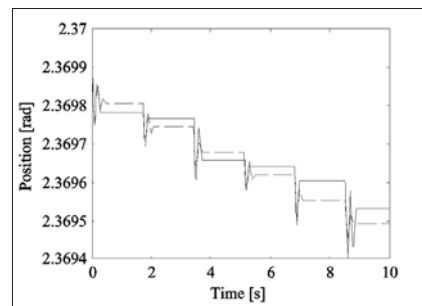


Figura 21 - Angolo del quarto specchio with $\tau_s=0,0294$ Nm (linea tratteggiata) e con $\tau_s=0,588$ Nm (linea continua)

Bibliografia

- [1] D.R. Mills, G.L. Morrison, "Compact linear Fresnel reflector solar thermal power plants", *Solar Energy*, 68(3), pp. 263-283, 2000.
- [2] The Modelica Association, "Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling. Language Specification Version 2.2", 2005. www.modelica.org.
- [3] S. Mattsson, H. Elmqvist, M. Otter, "Physical system modeling with Modelica", *Control Engineering Practice*, 6(4), pp. 501-510, 1998.
- [4] F.E. Cellier, C. Clauß, A. Urquía, "Electronic circuit modeling and simulation in Modelica", In *Eurosim 2007*, 1-10. Ljubljana, Slovenia, 2007.
- [5] I. Reda, A. Andreas, "Solar position algorithm for solar radiation applications", *Solar Energy*, 76(5), pp. 577-589, 2004.
- [6] R. Grena, "An algorithm for the computation of the solar position". *Solar Energy*, 82(5), pp. 462-470, 2008.
- [7] J. Meeus, *Astronomical Algorithms*, Willmann-Bell, Inc., Richmond, Virginia, USA, 2nd edition, 1999.
- [8] P. Acarnley, *Stepping motors: a guide to modern theory and practice*. IEE control engineering series. Peter Peregrinus LTD, New York, 1982.
- [9] C. Mi, H. Bai, C. Wang, S. Gargies, "Operation, design and control of dual H-bridge-based isolated bidirectional DCDC converter". *IET Power Electronics*, 1(4), pp. 507-517, 2008.
- [10] C. Pelchen, C. Schweiger, M. Otter, "Modeling and simulating the efficiency of gearboxes and of planetary gearboxes". In *2nd International Modelica Conference*, pp. 257-266. Oberpfaffenhofen, Germany, 2002.