

Turbine eoliche H-Darrieus: pitch fisso o variabile?

Nel presente studio, è stata condotta un'analisi critica circa l'utilizzo di un angolo di pitch variabile come criterio di ottimizzazione per turbine eoliche H-Darrieus, valutandone gli effetti aerodinamici e soppesandone benefici e problematiche. Un'analisi comparativa, basata sulla produzione annua attesa di energia, ha in particolare evidenziato interessanti prospettive nell'utilizzo di un pitch fisso opportunamente selezionato come soluzione ottimale di design per queste macchine.

H-DARRIEUS WIND TURBINES: FIXED OR VARIABLE PITCH?

In the study, a critical investigation has been carried out on the benefits and drawbacks of a design solution including a variable pitch for H-Darrieus wind turbines. A comparative analysis, based on the attended annual energy yield, showed that a properly selected pitch preset could represent the best design solution for these rotors.

INTRODUZIONE

Nell'ambito di una rinnovata sensibilità verso le tecnologie di produzione di energia a basso impatto ambientale, i sistemi di generazione di piccola taglia basati su turbine eoliche stanno suscitando un crescente interesse. La propensione verso queste tecnologie è stata ulteriormente stimolata negli ultimi anni dai meccanismi d'incentivazione (ridotti peraltro dalla perdurante crisi economica) e dai nuovi possibili contesti applicativi in cui eventuali manufatti industriali potrebbero inserirsi su ampia scala (e.g. integrazione in edifici e, più in generale, inserimento nel contesto urbano [1-2]). Una delle tipologie di turbine che sembra in questo senso riscuotere il maggiore interesse in ambito microeolico è quella ad asse verticale, soprattutto grazie alla sua semplicità di funzionamento ed affidabilità, nonché alla possibilità di esplorare nuovi design costruttivi improntati ad un basso impatto visivo ed acustico. Come facilmente evincibile dai più recenti trend di mercato nel settore, la soluzione che meglio coniuga i suddetti requisiti è rappresentata dalla turbina Darrieus-H, intorno alla quale si assiste oggi ad una ripartenza tanto della ricerca sperimentale quanto di quella teorica [3]. L'effettiva diffusione di macchine di tipo Darrieus-H, è stata tuttavia

ostacolata fino ad oggi da alcune criticità intrinseche alla natura stessa della macchina, quali la difficoltà di avvio e il gap di rendimento rispetto alle convenzionali turbine ad asse orizzontale.

PITCH FISSO O PITCH VARIABILE?

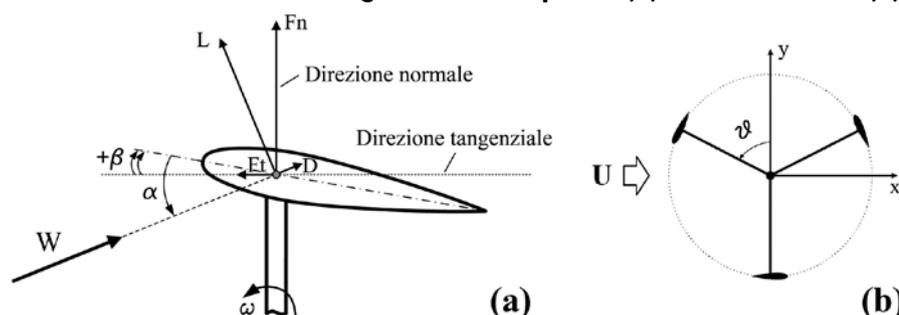
Il più basso rendimento delle turbine Darrieus è in massima parte legato ai complessi fenomeni aerodinamici che hanno luogo durante la rotazione del rotore. Come noto, infatti, l'angolo di incidenza sperimentato dai profili durante la loro rivoluzione intorno all'asse cambia continuamente con la posizione azimutale, invertendo anche il proprio segno durante il giro. I profili, pertanto, non riescono a lavorare con costanza nelle migliori condizioni aerodinamiche, andando altresì incontro all'insorgenza di ulteriori fenomeni instazionari quali l'insorgenza dello stallo dinamico o l'interazione dei vortici distaccatisi nella porzione sopravento del giro con le pale in quella sottovento.

Sulla base di tali presupposti, la ricerca ha sempre guardato con interesse all'utilizzo di un angolo di calettamento (pitch) variabile durante il giro (e.g. [4-5]), in modo da ripristinare le migliori condizioni di incidenza per una porzione maggiore del giro (Figura 1).

Più precisamente, sebbene tale concetto spesso non appaia troppo chiaro in molte analisi, la filosofia alla base di un pitch variabile dovrebbe essere improntata alla massimizzazione della forza tangenziale per ogni posizione azimutale (Eq. 1), ossia alla miglior composizione di lift a drag prodotti dal profilo secondo la convenzione di Figura 1.

$$F_{t(\vartheta)} = L \sin \alpha_{(\vartheta)} - D \cos \alpha_{(\vartheta)} \quad (1)$$

FIGURA 1 - Convenzione di angoli e forze sul profilo (a) e sulla macchina (b)



Per ottenere tale risultato, sicuramente auspicabile aerodinamicamente, occorrerebbe però derogare, in varia misura, ai requisiti di semplicità costruttiva ed affidabilità di queste macchine. A seconda della tecnica di controllo, infatti, potrebbero occorrere attuatori meccanici servocomandati o rotismi di varia natura per ruotare le pale. A simili soluzioni, si accompagnerebbero, d'altro canto, aggravii di costo notevoli, fortemente indiziati di intaccare l'appetibilità di tali macchine.

Infine, occorre tener presente che soprattutto le turbine di piccola e media dimensione sono costrette a ruotare molto velocemente per garantire un tip-speed ratio (TSR) adeguato (Eq. 2), cioè indicativamente almeno maggiore di 2, essendo i diametri a disposizione necessariamente contenuti.

$$TSR = \frac{\omega R}{U_{\infty}} \quad (2)$$

Tale evidenza porterebbe alla riduzione del tempo di risposta dell'eventuale attuatore meccanico, con un sensibile aumento della complessità del sistema.

EFFETTI DEL PITCH SULLE PRESTAZIONI DELLA TURBINA

Prima di valutare la fattibilità tecnica ed energetica dell'utilizzo di un pitch variabile, è opportuno chiarire quale sia il reale impatto aerodinamico di un angolo di calettamento variabile. L'effetto del pitch sulle performance delle turbine Darrieus è infatti piuttosto complesso e non solo limitato, come si potrebbe ipotizzare da una analisi superficiale, ad uno shift del profilo di coppia lungo il giro. Quando la turbina inizia a ruotare, infatti, un diverso angolo fra pala e velocità relativa influenza l'interazione aerodinamica fra pala e flusso in ogni posizione, facendo variare le forze di lift e drag prodotte ed inducendo contestualmente una diversa deflessione delle linee di flusso ed una variazione del modulo della velocità che impatta sulla zona sottovento del rotore [6].

Per analizzare simili interazioni, occorre pertanto fare uso di un modello che sia in grado di tenere in giusta considerazione tale variazione delle condizioni di flusso sul rotore. In questo studio, in particolare, si è fatto uso di un codice di ricerca di tipo BEM (Blade Element Momentum), con approccio Double Multiple Streamtubes [7]. Il codice VARDAR, sviluppato dall'Università di Firenze e validato con diverse campagne sperimentali in galleria del vento [8-9], ha infatti dimostrato, nonostante le approssimazioni del modello teorico, di essere pienamente in grado di simulare correttamente l'effetto del pitch [6].

Tramite il codice, sono state quindi in prima istanza analizzate le prestazioni al variare del pitch di un rotore Darrieus ad H scelto come caso studio. In analogia con quanto mostrato in [6], si è considerato un rotore a tre pale dritte avente un'area spazzata di 4 m², un rapporto altezza/diametro di 1.25 ed una solidità di 0.2. Il profilo delle pale considerato è un NACA0018 [3] e la macchina è stata testata, con una velocità del vento $U_{\infty}=9$ m/s, al variare dell'angolo di calettamento da 0° (pala ortogonale al

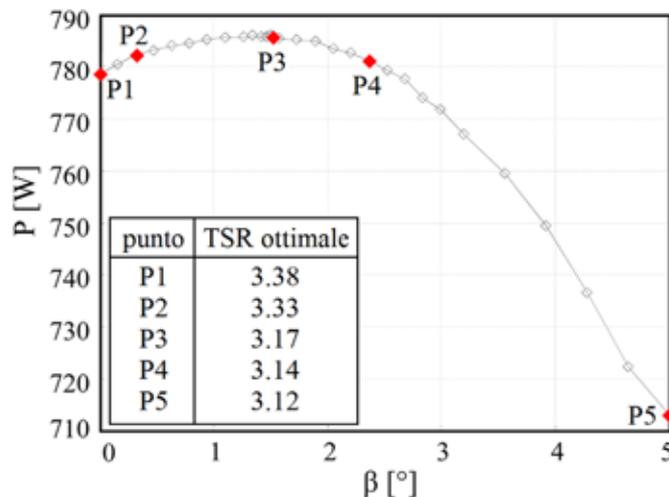


FIGURA 2 - Variazione della potenza del rotore analizzato in funzione dell'angolo di pitch

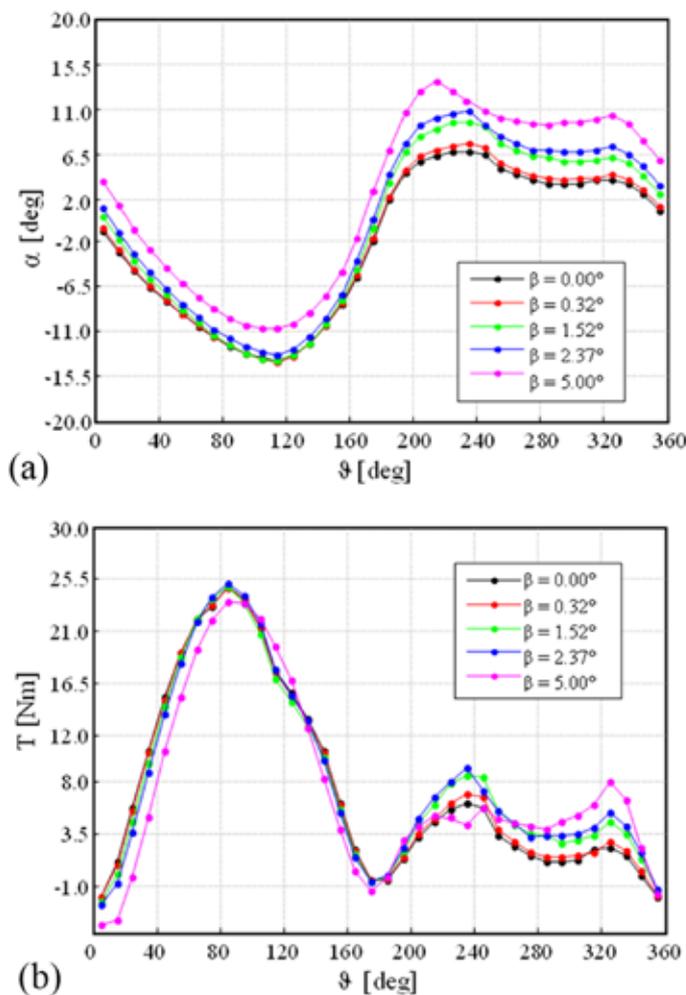


FIGURA 3 - Effetto dell'angolo di pitch: (a) Angoli di incidenza; (b) Profilo di coppia

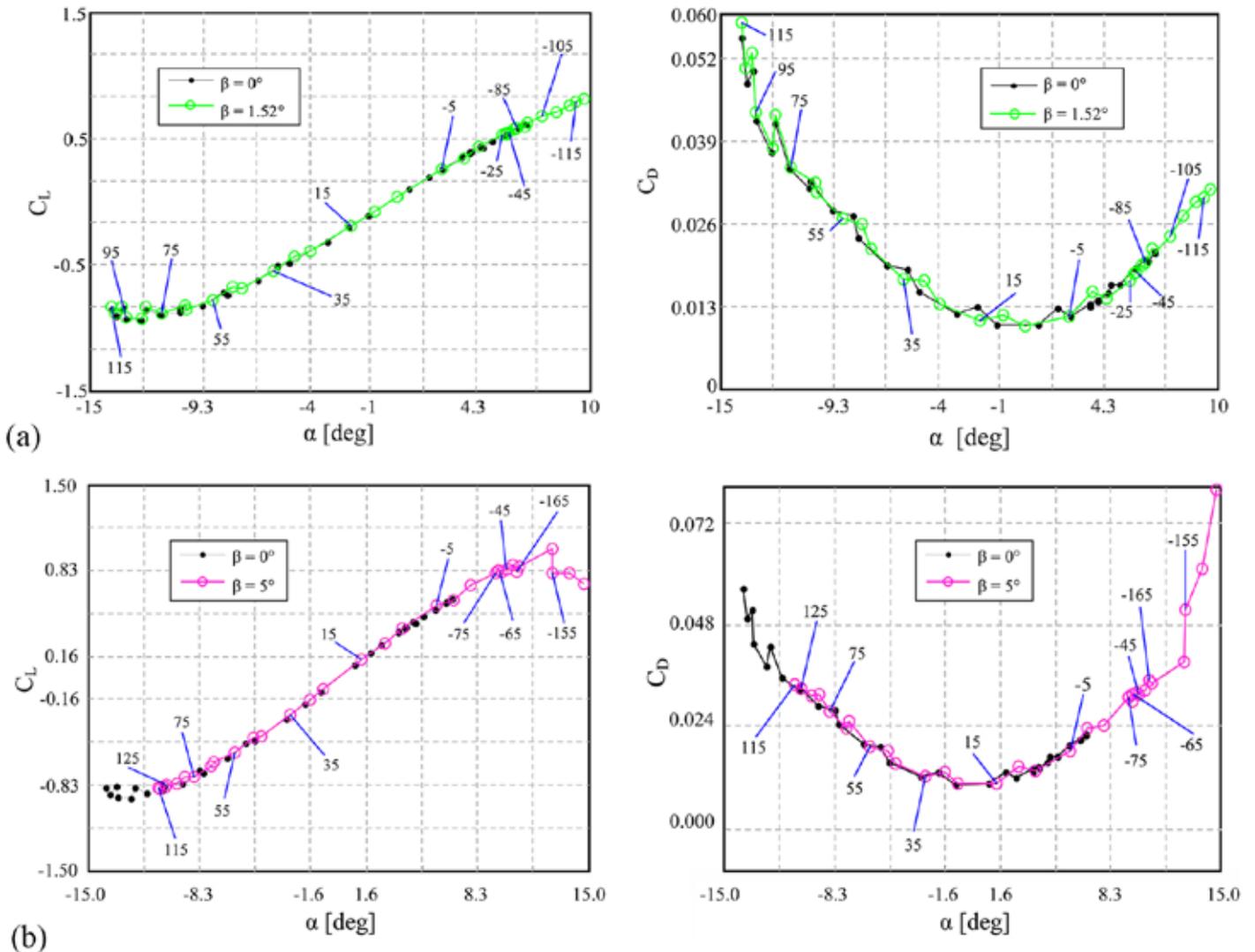


FIGURA 4 - Coefficienti di lift e drag sperimentati dal profilo in rotazione per il pitch ottimizzato $\beta=1.52$ (a) ed il pitch massimo $\beta=5.00$ (b). Per alcune posizioni significative, si riporta anche l'angolo azimutale a cui il coefficiente è sperimentato

raggio) a $+5^\circ$ (vedi Figura 1) con passo 0.01° . Un precedente lavoro [6] ha infatti mostrato che solo angoli di pitch positivi sono in grado di fornire incrementi di potenza sotto le condizioni della macchina di studio.

La Figura 2 riporta l'andamento calcolato della potenza del rotore in funzione dell'angolo di pitch. In dettaglio, i punti riportati in figura, rappresentano le potenze nominali massime alla velocità del vento considerata ottenibili con ogni calettamento considerato. Come verrà discusso in seguito, tali potenze non necessariamente vengono ottenute al medesimo TSR.

Nella medesima figura, sono stati anche evidenziati 5 punti operativi (evidenziati in rosso), corrispondenti rispettivamente al design con pitch nullo ($\beta=0^\circ$), ottimale ($\beta=1.52^\circ$) e massimo ($\beta=5^\circ$), più due punti intermedi ($\beta=0.32^\circ$ e $\beta=2.37^\circ$) posti al limite del tratto "piatto" della curva, ossia quello in cui la performance

risulta non inferiore rispetto a quella ottimale di più dello 0.4%. L'analisi dei risultati permette alcune interessanti annotazioni:

- La curva presenta un picco, ossia esiste un angolo di pitch diverso da zero che ottimizza le performance del rotore per la velocità del vento considerata.
- In prossimità del picco, la curva di variazione è piuttosto piatta. In questa zona, pertanto, il sistema risulta scarsamente influenzato da piccole variazioni attorno al pitch ottimale (ad es. dovute ad un piccolo errore di montaggio o ad imperfezioni geometriche).
- Come indicato in figura, la variazione dell'angolo di pitch della pala influenza in maniera globale le prestazioni del rotore, inducendo anche una variazione del TSR di funzionamento ottimale, in cui la potenza nominale è calcolata.

Per analizzare in ancora maggior dettaglio quanto emerso dall'a-

nalisi di Figura 2, in Figura 3 sono riportati gli andamenti dell'angolo di incidenza e del profilo di coppia in funzione dell'angolo azimutale per le cinque configurazioni evidenziate.

Dall'analisi di Figura 3, appare evidente come, secondo attese, l'angolo di pitch agisca in maniera globale sulle prestazioni della macchina. Oltre ad uno shift dell'angolo di incidenza sul profilo, e corrispondentemente, del profilo di coppia, infatti, la modifica delle condizioni fluidodinamiche della parte sopravento si riverbera in quella sottovento con una marcata variazione della coppia estratta, in modo assolutamente non lineare con l'angolo di calettamento.

Per comprendere ancora meglio la connessione fra la Figura 3a e la Figura 3b, occorre pertanto analizzare le forze di lift e drag realmente prodotte dai profili nelle diverse condizioni di incidenza. In particolare, la Figura 4 riporta i coefficienti di lift e drag, per le condizioni di pitch ottimale e pitch massimo, che il codice BEM estrapola dalle polari del profilo sulla base delle condizioni di flusso calcolate durante il giro. Tali coefficienti sono quindi confrontati con quelli relativi al caso base a pitch nullo. In Figura 4, sono inoltre riportate alcune posizioni azimutali significative alle quali si riferiscono i coefficienti plottati, al fine di localizzarli all'interno del movimento del rotore lungo il giro.

Dall'analisi, appare evidente come, nel caso di pitch ottimale, il profilo è portato a lavorare durante la rivoluzione in condizioni di lift più prossime a quelle ottimali per un significativo numero di angoli. In tali condizioni, anche il drag cresce leggermente ma, complessivamente, il profilo riesce a produrre una maggiore forza tangenziale. In caso di pitch eccessivo, si nota invece come il profilo raggiunga sì valori di lift fino a quelli massimi, ma in taluni casi li ecceda anche, sperimentando stallò. In tali condizioni, il drag cresce in modo significativo, vanificando in parte i benefici introdotti dalla variazione dell'incidenza attraverso il pitch.

ANALISI ENERGETICA

Le analisi condotte hanno dimostrato l'esistenza di effettivi benefici prestazionali garantiti da una ottimizzazione del pitch. D'altro canto, come già discusso, un controllo attivo del pitch si tradurrebbe in un forte incremento della complessità del sistema di controllo, di scarsa fattibilità pratica in macchine medio-piccole a causa dei ridotti tempi di intervento e delle relative sollecitazioni. Sulla base di tale scenario, nel presente studio si è deciso di confrontare diverse strategie di ottimizzazione del pitch, la cui realizzazione appare invece pienamente fattibile allo stato attuale della tecnologia. In dettaglio, le tre strategie scelte sono state:

- STRATEGIA A - Il pitch è variato durante il funzionamento della macchina ma solo in funzione della velocità del vento, mentre risulta costante durante il giro. Tale soluzione, potrebbe ottimizzare le performance della macchina soprattutto a basse velocità del vento, nelle quali l'escursione dell'angolo d'attacco risulta maggiore. Per la sua realizzazione, dunque, occorrerebbe comunque dotare le pale di un apposito sistema di variazione del calettamento, ed altresì di un semplice sensore di velocità di rotazione, essendo tale parametro direttamente correlato alla velocità del vento dalla curva di potenza della macchina [3].

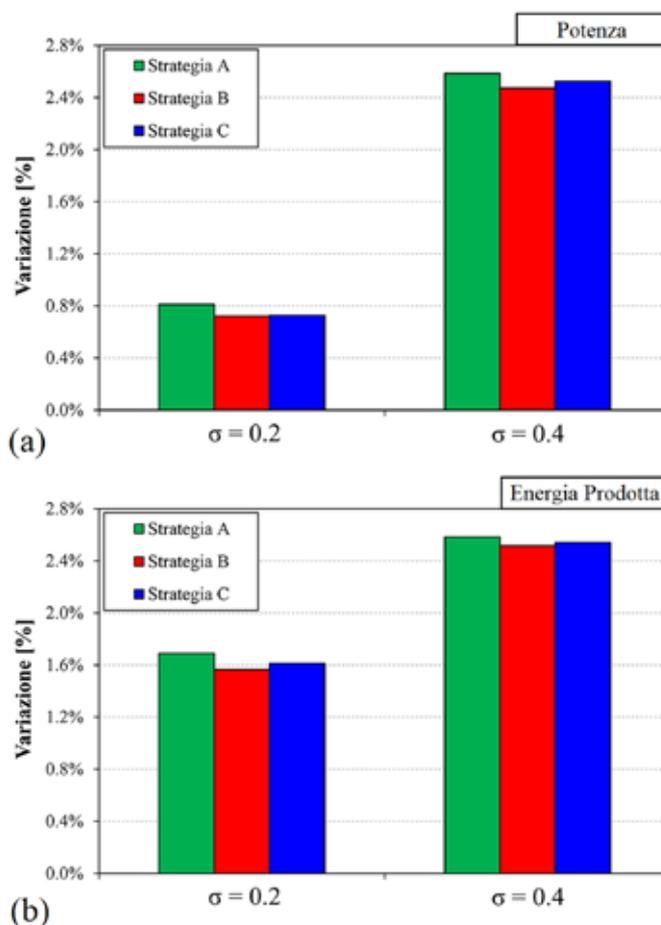
- STRATEGIA B - Alle pale è applicato un preset fisso di pitch in fase di design, calcolato come il pitch ottimale medio per tutte le velocità del vento dal cut-in al cut-out. Tale soluzione non necessita pertanto di alcun upgrade meccanico o di sistema di controllo.

- STRATEGIA C - L'ultima strategia contempla ancora l'utilizzo di un preset fisso di pitch alle pale, scelto però, in questo caso, come quello capace, secondo simulazioni, di garantire la massima energia annua prodotta per il sito di interesse [10].

Per la valutazione di tali strategie, in particolare, si sono assunte una velocità di cut-in di 3 m/s ed una di cut-out di 15 m/s, in quanto valori tipici per turbine medio-piccole [10]. Per quanto riguarda la Strategia C, si è inoltre assunto che nel sito di interesse sia presente una distribuzione di vento distribuita secondo Rayleigh (distribuzione di Weibull con fattore di forma 2) con una velocità media di 5 m/s, che risulta in linea con quanto ipoteticamente disponibile per simili installazioni.

Un precedente studio [6] ha identificato i valori di pitch relativi alle strategie B e C all'interno di una famiglia di turbine aventi tutte area spazzata 4 m², architettura Darrieus-H a tre pale con profili aerodinamici NACA0018 ed un rapporto altezza/diame-

FIGURA 5 - Variazione della potenza nominale a 15 m/s (a) e dell'energia annua prodotta (b) per due casi studio con solidità 0.2 e 0.4



tro di 1.25; le varie macchine di distinguevano per il valore della solidità, inclusa nel range fra 0.15 e 0.45.

Nel presente lavoro, si sono, nel dettaglio, considerate due macchine della suddetta famiglia, aventi rispettivamente solidità 0.2 e solidità 0.4, e si è proceduto a valutare gli effetti delle tre strategie di ottimizzazione in un'ottica energetica, ossia in termini di incremento dell'energia annua prodotta nel sito considerato (E), calcolata come i Eq. 3, in cui f rappresenta la frequenza con cui ogni velocità del vento si presenta nella distribuzione [10].

$$E = \sum_{U_{\infty}=\text{cut-in}}^{\text{cut-out}} c_P(U_{\infty}) \cdot U_{\infty}^3 \cdot f(U_{\infty}) \cdot 8760 \quad (3)$$

I valori ottimali di pitch per solidità 0.2 erano pari a 1.54° per la Strategia B e 1.42° per la Strategia C, mentre nel caso di solidità 0.4 erano pari a 1.92° per la Strategia B e 2.08° per la Strategia C. La somiglianza di tali valori a parità di solidità è da attribuirsi alla scarsa dipendenza del pitch ottimale dalla velocità del vento [6]. Come sarà mostrato in seguito, tuttavia, anche piccole variazioni dell'angolo possono apportare modifiche non trascurabili sulle prestazioni della turbina.

La Figura 5 compara quindi le tre strategie di ottimizzazione in termini di variazione della potenza nominale delle macchine e della loro energia annua prodotta rispetto alla configurazione di base a pitch nullo (pala con corda giacente sulla tangente alla traiettoria).

L'analisi condotta ha dimostrato che:

- Tutte le strategie considerate sono capaci di produrre un incremento sia della potenza nominale che dell'energia annua prodotta dalle macchine, sebbene tali incrementi siano comunque piuttosto ridotti.
- La Strategia A, in entrambe le condizioni, presenta i più alti incrementi di potenza ed energia prodotta. D'altro canto, tali incrementi appaiono estremamente esigui rispetto alle complicazioni meccaniche e di controllo richieste dal sistema di calettamento variabile.
- L'applicazione di un pitch fisso, opportunamente selezionato, in fase di design della macchina può garantire un, seppur contenuto, incremento delle prestazioni della turbina senza alcun costo aggiuntivo. Tale incremento risulta tanto più interessante quanto maggiore è la solidità della macchina. L'identificazione del valore ottimale del pitch rappresenta, in questo senso, un parametro essenziale di design delle turbine H-Darrieus.

CONCLUSIONI

Nel presente studio, si sono esaminati nel dettaglio gli effetti aerodinamici indotti dall'introduzione di un angolo di pitch variabile sulle performance di rotori Darrieus-H.

Si è dimostrato che, a motivo dell'interazione che si instaura in queste macchine fra l'estrazione di energia sopravento e le condizioni di flusso sottovento, l'effetto di una variazione dell'angolo di calettamento sulle prestazioni è molto complesso e non limitato ad uno shift del profilo di coppia. L'analisi ha altresì confermato

che esiste un angolo di pitch non nullo tale da ottimizzare le prestazioni: su tale base, la ricerca del suo valore ottimale risulta tecnicamente perseguibile.

Date, tuttavia, le discusse complicazioni tecniche legate ad una regolazione continua del pitch durante il giro, nel presente lavoro si sono analizzate tre diverse strategie di ottimizzazione, implicanti o una regolazione del calettamento solo in funzione della velocità del vento o un preset fisso applicato alle pale in fase di design. Tutte le strategie considerate sono state capaci di produrre un incremento sia della potenza nominale che dell'energia annua prodotta dalle macchine, sebbene tali incrementi siano stati comunque piuttosto ridotti.

In particolare, si è mostrato che un pitch fisso, opportunamente selezionato per massimizzare l'energia annua prodotta dal rotore nel sito di installazione atteso, potrebbe apportare un incremento "cost-free" delle performance di questi rotori e dunque rappresentare un fondamentale parametro aerodinamico da considerare in fase di design.

BIBLIOGRAFIA

1. Balduzzi F, Bianchini A, Carnevale EA, Ferrari L, Magnani S. *Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building*. *Applied Energy* 2012;97:921-9.
2. Bianchini A, Ferrari L, Magnani S. *Energy-yield-based optimization of an H-Darrieus wind turbine*. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012, Copenhagen (Denmark), June 11-15, 2012*.
3. Paraschivoiu I. *Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept*. Canada: Polytechnic International Press; 2002.
4. Kirke BK, Lazauskas L. *Limitations of fixed pitch Darrieus hydrokinetic turbines and the challenge of variable pitch*. *Renewable Energy* 2011;36:893-4.
5. Paraschivoiu I, Trifu O, Saeed F. *H-Darrieus Wind Turbine with Blade Pitch Control*. *Int. Journal of Rotating Machinery* 2009: 1-7.
6. Bianchini A., Ferrara, G., Ferrari, L., 2015, *Pitch Optimization in Small-size Darrieus Wind Turbines*, *Energy Procedia, Special Issue Proc. of the ATI Congress 2014*.
7. Paraschivoiu I, Delclaux F. *Double Multiple Streamtube Model with Recent Improvements*. *J. of Energy* 1983;7(3):250-5.
8. Bianchini A, Ferrari L, Magnani S. *Analysis of the Influence of Blade Design on the Performance of an H-Darrieus Wind Turbine*. *Proc. of the ASME-ATI-UIT 2010 Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems, Sorrento (Italy) May 16-18, 2010*.
9. Bianchini A, Ferrari L, Magnani S. *Start-up behavior of a three-bladed H-Darrieus VAWT: experimental and numerical analysis*. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011, Vancouver (Canada), June 6-10, 2011*.
10. Bianchini A., Ferrara, G., Ferrari, L., 2015, *Design guidelines for H-Darrieus wind turbines: Optimization of the annual energy yield*, *Energy Conversion and Management*, 89, pp. 690-707.