



RELAZIONE DI CALCOLO GITTATA MASSIMA

Cliente/Customer PAN ANEMOS MAGNA GRECIA S.R.L.	Commessa/Job 10139.1	Emesso da MARIO MELE
---	-----------------------------	------------------------------------

00	23/11/2009	EMISSIONE			
			Ing. M.MELE	Ing. M. MELE	Ing. V. Mastrangelo
Rev	Data	Descrizione	Preparato	Verificato	Approvato
Autorizzazione Emissione					

PREMESSA

L'obiettivo della presente relazione, a cura dell'ing. Mario MELE, regolarmente iscritto all'Albo degli Ingegneri della provincia di Taranto, è quello di determinare la massima distanza che una pala in fase di distacco di un aerogeneratore raggiunge mentre la macchina è in funzione.

In letteratura sono annoverati pochissimi casi di danni causati dalle pale delle turbine in caso di rottura accidentale. Si tratta infatti di una circostanza eccezionale e comunque i rischi connessi, soprattutto per la salute pubblica, sono estremamente bassi.

Sono davvero remote le possibilità che una pala di un aerogeneratore possa, attraverso la sua rottura, causare danni.

Questo accade quando la scelta delle aree idonee all'installazione degli aerogeneratori viene effettuata tenendo in conto una distanza minima dalle abitazioni e dai luoghi in cui le frequentazioni umane sono assidue.

La distanza minima da rispettare tra le turbine eoliche e i manufatti abitati, imposta dalla normativa vigente è sempre maggiore della distanza necessaria ad assicurare la salute pubblica.

Questa distanza varia generalmente in funzione della grandezza della macchina, della forma, del peso della velocità del rotore, dell'altezza della turbina, ma comunque non supera mai i 300 metri (*WindFarm Safety in Australia, May 2004*).

La possibilità che parti della turbina, o frammenti di ghiaccio, formatisi su di essa, cadano entro un raggio di 210 metri è pari a 1:10.000.000, valore paragonabile alla possibilità della caduta di un fulmine (Taylor and Rand, 1991).

Il distacco o la rottura della pala sono eventi che si verificano per condizioni operative al di fuori del normale range di funzionamento delle macchine.

Gli aerogeneratori che si utilizzeranno sono provvisti di sistemi di sicurezza che intervengono quando le condizioni di funzionamento sono tali da compromettere la funzionalità della macchina e la sicurezza pubblica.

CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Gli aerogeneratori che si prevedono di installare nel parco eolico nel comune di Mottola sono di potenza nominale 2,3-2,5MW con altezza al mozzo di circa 100 m e rotore di diametro pari a 100 m ed una velocità di rotazione massima a regime di 14,90 rpm e velocità in cut-out 20,00 m/sec e di potenza nominale 2MW con altezza al mozzo di circa 80,00 m e rotore di diametro pari a 93,00 m ed una velocità di rotazione massima a regime di 16,70 rpm e velocità in cut-out 25,00 m/sec.

In generale, ciascun aerogeneratore è composto da una torre, che sostiene alla sua sommità la navicella alla quale è collegato il rotore tripala della turbina, che ha il compito di convertire l'energia cinetica del vento in energia elettrica, mediante un generatore posto all'interno della navicella.

Gli aerogeneratori producono energia elettrica a bassa tensione e sono collegati, tramite cavi di potenza, a trasformatori Bassa Tensione/Media Tensione inseriti all'interno delle torri stesse degli aerogeneratori insieme agli altri apparati strumentali allo scopo di evitare la costruzione della cabina macchina al piede di ciascuna torre così come previsto dal Regolamento Regionale 4 Ottobre 2006 n.16.

L'aerogeneratore comincia a produrre energia elettrica utile solo quando la velocità del vento supera un certo valore di soglia detto di cut-in (o inserimento, attorno ai 5 m/s). A mano a mano che la velocità del vento aumenta, aumenta pure la potenza resa, sino a quando raggiunge il valore nominale della velocità. Se la velocità del vento cresce oltre il valore detto di cut-off (o fuori servizio), l'aerogeneratore viene staccato per motivi di sicurezza.

Lo studio della gittata di un elemento rotante dell'aerogeneratore si basa sull'ipotesi di considerare l'elemento come un corpo rigido, ovvero un insieme di particelle soggette a forze tali da mantenere costanti nel tempo le loro distanze relative. Pertanto, il moto di un corpo rigido è traslatorio quando tutte le particelle che costituiscono il corpo subiscono lo stesso spostamento qualsiasi sia l'intervallo di tempo considerato. In un moto traslatorio, rettilineo o curvilineo, ogni segmento che congiunge due punti qualunque del corpo rigido, durante il movimento resta parallelo a se stesso, quindi tutti i punti descrivono traiettorie uguali e sovrapponibili. Il moto traslatorio di un corpo rigido resta dunque conosciuto quando è noto il moto di uno qualunque dei suoi punti.

Nella cinematica del moto rotatorio, considerando un corpo rigido incernierato ad un asse di rotazione fisso, un qualsiasi punto del corpo fuori dell'asse di rotazione può muoversi solo nel piano perpendicolare all'asse, mantenendosi a distanza costante da questo, quindi: il moto di un corpo rigido è rotatorio attorno ad un asse fisso se ogni particella del corpo si muove lungo una circonferenza e i centri di tutte le circonferenze si trovano su una retta chiamata asse di rotazione.

Tutti i punti del corpo rigido in rotazione si muovono con la stessa velocità angolare, pertanto si considera il centro di applicazione della velocità il baricentro del corpo, che si considera posizionato al centro della stessa.

Nel nostro studio si considera il moto del corpo bidimensionale, traslatorio e curvilineo, rappresentato da un punto materiale (baricentro) lanciato in aria obliquamente sottoposto all'accelerazione di gravità costante g diretta verso il basso ed ad velocità iniziale data dalla rotazione delle pale.

Lo studio della gittata massima degli elementi rotanti viene effettuato ipotizzando una condizione conservativa del moto in cui vengono trascurate le forze di resistenza che agiscono sulla pala.

Parco eolico comune di Mottola (TA)
Relazione di calcolo gittata massima

Semplificare la trattazione del moto significa effettuare lo studio nelle condizioni peggiorative, poiché in assenza di forze viscosse la condizione sopra definita è quella che dà la massima gittata. Ciò è vero finché si trascura la resistenza esercitata dall'aria sul corpo in movimento, che agendo in verso opposto alla velocità, tende costantemente a diminuire la velocità del corpo.

Il moto reale è difficilmente schematizzabile in quanto dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio) della pala.

Le ipotesi fatte in questo studio considerano il caso peggiore "worse case", di distacco dal rotore con un angolo di 45° sul piano verticale.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate agenti sulla pala.

La pala, quindi, quando inizierà il suo moto continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto). L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità.

La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano. La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco iniziale.

Il presente studio deve essere ricondotto alla composizione di due movimenti sopra un sistema di assi cartesiani noto con l'asse x coincidente con l'asse orizzontale alla base dell'aerogeneratore, ovvero il suolo, e l'asse y coincidente con l'asse verticale centrale dell'aerogeneratore; dove si considera:

- **V₀** la velocità iniziale del punto materiale rotante con velocità angolare ω e posizionato nel baricentro della pala di lunghezza r ;
- **β** l'angolo formato dal vettore V con l'asse orizzontale al momento $t=0$;
- **h** l'altezza dal suolo del centro del mozzo;

Il moto di caduta libera di un corpo può essere descritto dalle equazioni parametriche della traiettoria di un corpo in caduta libera:

$$x(t) = x_0 + V_x t$$

$$y(t) = y_0 + V_y t - \frac{1}{2} g t^2$$

la traiettoria risultante è una parabola con asse parallelo all'asse y ed eliminando il parametro t si ottiene l'equazione della traiettoria in termini di x ed y .

dove

- $V_x = V_0 \cos \beta$ è la componente orizzontale della velocità, che resta costante e uguale al suo valore iniziale durante l'intero volo.
- $V_y = V_0 \sin \beta - gt$ è la componente verticale della velocità, che cambia invece con il tempo (t), durante l'intero volo.
- $x = (V_0 \cos \beta) t + x_0$ è la componente orizzontale dello spostamento e x_0 rappresenta la coordinata del punto materiale sull'asse x all'istante $t=0$:
 $x_0 = -\frac{1}{2} r \sin \beta$
- $y = (V_0 \sin \beta) t - \frac{1}{2} g t^2 + y_0$ è la componente verticale dello spostamento e y_0 rappresenta la coordinata del punto materiale sull'asse y, all'istante $t=0$:
 $y_0 = \frac{1}{2} r \cos \beta + h$

L'equazione del moto bidirezionale è quindi:

$$y = y_0 + \operatorname{tg} \beta (x - x_0) - [g (x - x_0)^2 / (2 V_0 \cos \beta)^2]$$

La gittata sarà data dalla risoluzione dell'equazione posto $y=0$ al variare dell'angolo β e rappresenta la distanza longitudinale percorsa da un corpo lanciato in aria, avente quindi velocità con componente vettoriale in ascissa e in ordinata.

Lo studio del calcolo della gittata massima viene eseguito sulla pala di potenza nominale di 2,5MW con altezza una velocità di rotazione massima a regime di 14,90 rpm e velocità in cut-out 20,00 m/sec.

I dati della pala sono:

la lunghezza della pala	$r=50\text{m};$
l'altezza del mozzo dal terreno	$h=100\text{m};$
la velocità angolare massima	$\omega =14,90 \text{ giri/minuto};$
la velocità tangenziale al baricentro della pala	$V=39,00\text{m/sec}$
accelerazione di gravità	$g=9,81\text{m/sec}^2$

Il valore delle grandezze note e rappresentate nella schematizzazione è pari a:

$$c = (r/2) \cos 45^\circ = 17,68 \text{ m}$$

$$hc = h + c = 117,68 \text{ m}$$

Il valore della velocità al momento della rottura della pala è pari a: $\omega = 14,90 \text{ rpm}$ e $V = (r/2) \omega = 39,00 \text{ m/sec}$

In condizioni reali **la gittata massima diminuirà quadraticamente con la velocità di distacco**

Considerando ancora il moto del corpo bidimensionale sottoposto all'accelerazione di gravità costante g diretta verso il basso, alla velocità iniziale data dalla rotazione delle pale e le forze di resistenza che agiscono sulla pala che agendo in verso opposto alla velocità, tende costantemente a diminuire la velocità del corpo e quindi la gittata massima della pala in fase di distacco; Il moto reale dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio) della pala.

Infatti l'equazione del moto bidirezionale permette ancora di calcolare la gittata massima in condizioni reali, che risulta pari a: **$G = 107,5 \text{ m}$** con un tempo di volo pari a circa: **$T = 3,72 \text{ sec}$**

Per avvalorare ulteriormente il risultato ottenuto è possibile far riferimento allo studio Vestas dal titolo "Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento" (Gennaio 2007).

Lo studio in questione determina la distanza che una pala di un aerogeneratore raggiunge nel caso di distacco dal mozzo mentre la macchina è in funzione ed è stato effettuato su due tipologie di aerogeneratori: VESTAS V80 e V90 da 3MW.

Tutte le condizioni di rottura sono state assunte avvenire quando il rotore è in posizione upwind e con una velocità del vento pari a 25 m/s.

Questa condizione è anch'essa conservativa in quanto dà la massima gittata fuori dal piano. Sono state calcolate tre traiettorie nelle seguenti ipotesi:

Caso 1: Moto irrotazionale

Assenza di moti intorno agli assi XX, YY e ZZ. L'asse XX è allineato con la traiettoria.

L'asse YY giace sul piano verticale. Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- Nessuna forza di portanza agisce nella direzione in-plane;
- La massima resistenza è generata nella direzione out-of-plane;
- La resistenza nel piano agisce sulla sezione nel piano XZ.

Caso 2: Moto irrotazionale

L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano orizzontale. Quando la pala ha raggiunto questa posizione non ci sono ulteriori moti intorno agli assi XX, YY e ZZ.

In questo caso la traiettoria risultante è del tipo "a giavellotto". Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il caso teorico peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- La traiettoria in alto è aumentata dalla forza di portanza generata dalla pala, per cui la gittata è maggiore che in assenza di portanza.

Tre casi sono stati modellati:

2a. L'effetto della portanza sul tempo di volo è zero. La soluzione (approssimata) per questo è data dal caso 1 solo nella direzione in-plane.

2b. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%.

2c. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%, in questo caso si ottiene il maggior tempo di volo.

Caso 3: Moto irrotazionale complesso

In questo caso si studia il moto della pala al distacco del rotore nel suo complesso considerando anche i moti di rotazione intorno agli assi XX, YY e ZZ. Questo caso è il caso più reale della traiettoria di una pala.

La rotazione della pala intorno all'asse ZZ è causata dalla conservazione del momento della quantità di moto. L'incidenza del vento out-of-plane sulla pala genera un momento intorno all'asse YY (centro di massa e centro aerodinamico della pala non sono coincidenti). Il vento incidente out-of-plane sulla pala genera ancora un momento intorno all'asse XX (centro di massa della sezione di pala lungo la corda non coincide con il centro aerodinamico). La resistenza della pala sia in-plane che out-of-plane è generata dalla rotazione intorno agli assi XX e YY. Per semplificare lo studio si è assunta l'area della pala pari alla stessa in direzione XY moltiplicata per il quadrato del coseno di 45°.

La portanza in-plane è generata dalla rotazione intorno al piano XX. In questo caso si è assunto un aumento del 10% del tempo di volo dovuto alla portanza.

Tre casi sono stati modellati per tener conto dell'effettivo valore della resistenza:

3a. C_d (in-plane e out-of-plane) = 0,5

3b. C_d (in-plane e out-of-plane) = 1,0

3c. C_d (in-plane e out-of-plane) = 1,5.

Si può concludere dicendo che

I Casi 1, 2a, 2b e 2c dimostrano che, se la traiettoria di volo è Irrotazionale, allora la distanza raggiunta dalla pala da 39 m (V80) sarà di ca. 130 m, dalla pala da 40 m (V82) sarà di circa 105 m e da 44 m (V90 1.8MW-2MW) sarà di ca. 108 m, mentre dalla pala da 44 m (V90 3MW) sarà di ca. 96 m, il caso peggiore per la gittata è il caso 1 (2a) per il tempo invece è il 2c. (Il Caso 3 mostra che, quando il flusso è rotazionale, la distanza raggiunta dalla pala sarà di ca. 106 m per la V80).

CONCLUSIONI

Il nostro studio ha dimostrato che il funzionamento della macchina, in regime di cut-off, **la gittata massima diminuisce quadraticamente con la velocità di distacco.**

Parco eolico comune di Mottola (TA)
Relazione di calcolo gittata massima

Il calcolo di gittata nei casi di distacco di frammenti o porzioni di guscio, risulta problematico e privo di basi computazionali, in quanto lo stabilire le dimensioni del pezzo di guscio distaccato è del tutto aleatorio e non dipendente da una causa specifica come quelle collegabili ad una discontinuità, un difetto di progettazione o di realizzazione della pala.

RIFERIMENTI:

"Wachusett Mountain State Reservation", comments (John P. Mollica, April 2004) e precisamente alla sezione 3 dal titolo, **Structural Integrity & Safety**, al punto 3.6 che contiene il calcolo della gittata massima della pala effettuato della Michigan State University.

Il tecnico