COMMITTENTE :
Elettrostudio Energia Srl

PROGETTAZIONE

IOZZO SCALVINI
INGEGNERIA

Via Corfù, 50
25124 Brescia (BS) ITALIA
ing.marascalvini@isingegneria.com
ing.nicolaiozzo@isingegneria.com
www.isingegneria.com

Progettisti: Ing. Scalvini Mara

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI BRESCIA
A 5809
Ingegnere
MARA SCALVINI
Civile ed Ambientale

Ing. Iozzo Nicola

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI BRESCIA
A 6685
Ingegnere
NICOLA IOZZO
Civile ed Ambientale

N° COMMESSA
1538

REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO IN COMUNE DI CALICE LIGURE (SV) DENOMINATO "STRINATE"

PROGETTO DEFINITIVO PER AUTORIZZAZIONE

ELABORATO

RELAZIONE SULL'ANALISI DI POSSIBILI INCIDENTI (DM10/09/10)

CODICE ELABORATO
01.12

NOME_FILE
1538-PD_A_01.12_REL_r00

FORMATO:

SCALA 1:-

REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE	REDATTO	VERIFICA	APPROVAZIONE
02					
01					
00	Luglio 2024	PRIMA EMISSIONE	D.G.	M.S.	N.I.

Cartiglio - Rev. 00

COPYRIGHT - TUTTI I DIRITTI SONO RISERVATI A NORMA DI LEGGE

IOZZO SCALVINI
INGEGNERIA

INDICE

1. Premessa 2
2. Cenni Sul Funzionamento Di Un Aerogeneratore 3
3. Aerogeneratore Tipo Di Riferimento 4
4. Classi Di Incidenti 5
5. Rottura/Deformazione Della Torre E Suo Scalzamento 6
6. Eventi Incidentali Da Lancio Di Ghiaccio 7
7. Eventi Incidentali Di Varia Natura 8
8. Fulminazione E Fuoco 8
9. Incidenti Con L'influenza Sull'ambiente 10
10. Incidenti Per Presenza Fisica Dell'aerogeneratore 10
11. Danni Per L'avifauna 10
12. Danni Conseguenti Ad Oggetti Esterni 11
13. Incidenti Meccanici 12
14. Rottura Della Pala 13
15. Gittata Di Un Corpo Rotante 16
16. Probabilita' Di Accadimento 17

1. PREMESSA

La presente relazione viene redatta nell'ambito della progettazione definitiva per l'autorizzazione alla realizzazione di un impianto Eolico denominato "Strinate" nel comune di Calice Ligure nella provincia di Savona.

Il Parco Eolico è composto da un aerogeneratore con potenza nominale di 2,7 MW con altezza mozzo pari a 116.5 m, diametro rotore pari a 117 m e altezza massima al top della pala pari a 175 m.

Questa tipologia di aerogeneratore è allo stato attuale quella ritenuta più idonea per il sito di progetto dell'impianto.

Di seguito la relazione di analisi sui possibili incidenti che possono causare potenziali rotture degli organi rotanti.

2. CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

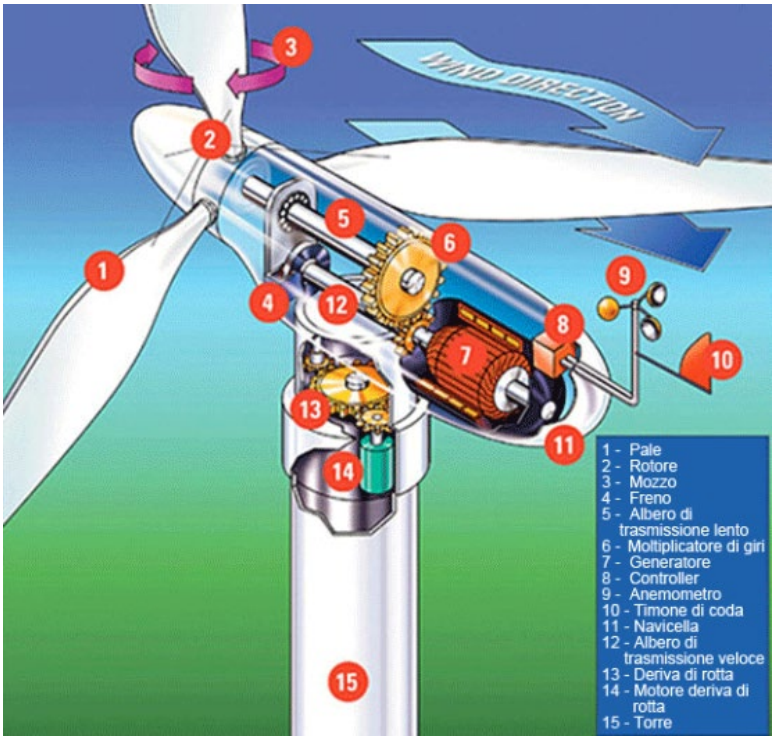
Le pale di un aerogeneratore sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore.

Vi è un sistema di controllo aerodinamico, chiamato imbardata, che permette il controllo della potenza ruotando le pale intorno al loro asse principale, modificando l'orientamento rispetto alla direzione del vento, per offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo, indipendentemente dalla direzione del vento, un verso orario di rotazione.

Questa considerazione servirà per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale e a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano.

Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva che individua la direzione del moto del corpo che si distacca. Mettendo in relazione tale traiettoria con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può rappresentare un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.

La navicella dell'aerogeneratore da un punto di vista meccanico si presenta come segue:



3. AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO

Le macchine di riferimento per il calcolo avranno le seguenti caratteristiche: ROTORE

- Diametro 117 m
- numero pale 3

TORRE

- tipo: tubolare
- struttura: sezioni collegate tramite flangiatura
- altezza 116.5 m

FUNZIONAMENTO

- cut-out 25 m/s (velocità del rotore gradualmente ridotta)
- Potenza 2.7 MW

4. CLASSI DI INCIDENTI

Gli eventi negativi, che influiscono sulla realizzazione dell'aereogeneratore, sono provocati specialmente e non unicamente da manifestazioni naturali. Anche azioni umane inconsulte ed impreviste, pur se in misura meno preponderante di quelle scatenate dalla natura, possono entrare nel ventaglio delle cause di incidente. Tra esse vanno considerate quelle che derivano da errore umano. Questo contributo non si può mai escludere dal novero delle ragioni, che sono origine di fatti spiacevoli, dannosi per le cose e pericolosi per i lavoratori. Per la maggior estensione temporale, che comprende tutta la vita della centrale, e per la maggior combinazione di azioni, che influenzano il comportamento strutturale e funzionale della macchina, ci si deve riferire con maggior insistenza al periodo di funzionamento. Non è detto che eventi negativi non possano colpire le fasi, che precedono l'avvio e l'andata a potenza delle turbine eoliche. Anzi, alcuni di essi possono essere tipici di tali periodi tanto che sovente vengono classificati nel novero degli incidenti sul lavoro.
La drastica ricomposizione delle categorie incidentali è indispensabile non soltanto per un ordine espositivo quanto per rispondere alla esigenza di una rigorosa classificazione.

5. ROTTURA/DEFORMAZIONE DELLA TORRE E SUO SCALZAMENTO

La distruzione della pala o di suoi frammenti può concludersi in un moto regolare fino al piano campagna o può in taluni casi finire con l'interagire con altre porzioni della torre eolica. L'urto anelastico, che ne consegue, può:

- provocare una lesione locale accompagnata da deformazione della sezione con eventuale ripercussione sulla stabilità della navicella, che potrebbe essere catapultata a terra (rovesciamento di navicella);
- incidere più profondamente sino a produrre inflessione della torre, che è un corpo contraddistinto da una relativa snellezza, essendo molto sviluppato in altezza, e la cui parte superiore potrebbe essere abbattuta.

Mentre nel primo caso non è detto che la navicella venga proiettata al suolo, nel secondo caso l'effetto finale è senz'altro di questo tipo. L'insieme delle forze statiche e dinamiche (azione del vento, vibrazioni scaricate dai carichi a quote superiori, come navicella, rotore e pale, che sono fuori controllo, etc.) possono portare a rottura o crollo della torre. È una conseguenza assai probabile, per la quale non valgono le modifiche ai parametri progettuali a meno di pesanti incrementi nei pesi (per maggiori spessori, diverse sezioni, irrigidimenti, etc.) e nei costi.

Un caso di incidente ancora più radicale e più grave può essere quello in cui è documentata la distruzione dell'aerogeneratore a seguito del rovesciamento completo dell'insieme turbina- fondazione. È evidente che il vento, sempre che sia stato soltanto questa la condizione eccezionale di carico, abbia trovato una debole attività contrastante, cioè anti-ribaltante, nel blocco di fondazione. Questo è rimasto compatto ed unito, come almeno avrebbe dovuto per rispondere al carico eolico. L' azione risultante del vento si manifesta e può essere ridotta ad una forza lungo l'asse del rotore. Ne consegue un rilevante momento flettente (forza risultante per altezza della turbina) da riportare necessariamente sul basamento. Se non è stato dimensionato in modo insufficiente lo spessore, lo è stata la superficie. Il risultato evidente è che il corpo di fondazione non sia riuscito ad offrire una massa adeguata e sufficiente per opporsi al momento d'origine eolica, quando il vento raggiunga il valore eccezionale sviluppatosi. È proprio in questo frangente che la fondazione deve provvedere a difendere la turbina, tenendola costantemente nel suo assetto verticale e con il piede ben saldo. Il rischio, imputabile a presenza di "oggetti da difendere", dislocati casualmente od in modo permanente entro il raggio di caduta, e di persone, stazionanti o transitanti nell'area, sarebbe indubbiamente elevato, a motivo delle energie in gioco.
Il cedimento della struttura di sostegno della navicella o di parziale deformazione della stessa è il terzo fenomeno registrato in termini numerici dopo la rottura delle pale ed i casi di fuoco.

Tuttavia, il riflesso economico e la dimensione del danno sono nettamente superiori a quelli riscontrabili con il distacco di una pala o di un frammento di esso.

Il rischio per la popolazione e per il personale appare essere nettamente inferiore, in quanto la eventuale caduta si risolve entro una distanza dal piede relativamente ridotta. Questo fenomeno sembra caratterizzare maggiormente le turbine con una età maggiore e pertanto con minore potenza.

6. EVENTI INCIDENTALI DA LANCIO DI GHIACCIO

La formazione di ghiaccioli, di croste, di lastrine ghiacciate e di piccoli o meno piccoli ammassi nevosi sulle superfici delle pale, sono da far risalire all'azione di stagioni fredde in zone climatiche rigide e solitamente settentrionali.
La formazione di ghiaccio lungo le pale non è da escludere e nemmeno sono da ignorare cadute o lanci di ghiaccio da aerogeneratori. Le distanze percorse in volo, dal corpo estraneo, dipendono da svariati fattori quali:

- dimensioni,
- conformazione e consistenza della massa ghiacciata;
- forza centrifuga raggiunta dalle pale e di conseguenza trasmessa alla formazione di ghiaccio;
- altezza della torre;
- punto dell'area spazzata dal rotore in cui la massa lascia la pala.

Anche le caratteristiche (presenza di "oggetti" da preservare, frequentazione umana, declivi/accidentalità del suolo, etc.) del sito circostante la turbina che sta producendo questo tipo di "missili", gioca un ruolo essenziale sul rischio di lesioni. Questo aspetto va considerato attentamente per discernere l'aggressività di tali cadute o dei conseguenti lanci sull'ambiente e, soprattutto, sull'uomo e sulle sue cose (costruzioni, auto, impianti vari, etc.).
Le normali turbine eoliche sono progettate per poter lavorare in un intervallo di temperature tipicamente comprese fra -20 e +40° C. Per le turbine che d'inverno operano in condizioni di freddo intenso - ad esempio perché installate in zone di montagna a determinate latitudini (caso di progetto) e/o altitudini - occorre essere preparati ad impedire, in caso di necessità, l'accumulo di ghiaccio. Il ghiaccio, infatti, non solo può rendere errate le misure anemometriche, ma soprattutto può danneggiare la struttura a causa del peso.
La soluzione in questo caso, per installazioni eoliche presso zone di montagna sottoposte a forti e repentini cali della temperatura, consiste in sistemi per il riscaldamento delle turbine o utilizzo di lubrificanti e leghe speciali. Se le basse temperature si accompagnano a una condizione di bassa velocità del vento, la turbina eolica necessita, per il riscaldamento, di una

fonte di elettricità esterna di potenza equivalente a circa il 3% della sua potenza nominale.

Negli ultimi anni, tuttavia, i principali produttori di aerogeneratori eolici, hanno sviluppato sistemi per ovviare a tale problema:

- turbine che integrano sistemi elettrici riscaldanti;
- turbine che sfruttano un sistema di circolazione di aria calda interna alle pale per il riscaldamento delle stesse.

Per quanto concerne l'impianto eolico "Strinate" si ritiene che, vista l'assenza di recettori sensibili in prossimità dell'impianto e visti i recenti sviluppi tecnologici apportati dai principali costruttori di aerogeneratori, il livello di rischio (inteso come mero prodotto tra pericolosità e livello di danno) possa essere ritenuto molto basso.

7. EVENTI INCIDENTALI DI VARIA NATURA

La categoria, nota con il termine inglese di "miscellaneous", è stata introdotta nello schema di banca dati del CWIF per dare una diversa e più coerente classificazione degli eventi iniziatori. Le rotture o le fermate provocate in componenti dell'aerogeneratore trovano accoglimento in questa sede, se non producono evidenti conseguenze strutturali che hanno già loro collocazione altrove. Tra gli altri eventi si annoverano le risultanze da mancata manutenzione, da disfunzioni elettriche per sovracorrenti, purché non si concludano in fuochi o elettrocuzioni (termine derivante dall'inglese "electrolocution" che denota la morte per elettro- shock), da incidenti durante le fasi di costruzione o di trasporto, da caduta di fulmini purché non sia seguita da danni alla turbina con rottura di pala o incendio.

8. FULMINAZIONE E FUOCO

La seconda categoria tra le due, che sono state evidenziate, è più insidiosa. Pur prendendo tutti i provvedimenti in grado di attenuare gli effetti dal momento che non si può agire sulle cause, se queste hanno origine da fenomeni meteo, cioè dalla natura, la gravità delle azioni deve essere analizzata e studiata. Difficilmente si potranno neutralizzare le azioni, si dovranno studiare soluzioni di contenimento, cioè predisporre tutto ciò che non consenta di pervenire a conseguenze catastrofiche. Un caso evidente di preoccupazioni è da assegnare alla caduta di un fulmine sulla turbina eolica. È una causa comune di rottura (ad es., sulla pala) o di

incendio per la presenza di sostanze infiammabili (materiale strutturale delle pale, olio per il raffreddamento, vapori combustibili, etc.), che sono presenti nelle realizzazioni eoliche.
Non essendo possibile provvedere se non raramente ad estinguere il fuoco laddove si è sviluppato ed è concentrato, si lascia bruciare completamente ciò che è stato attaccato dalle fiamme. L'operato delle Autorità locali (vigili del fuoco, polizia, etc.) si limita a circoscrivere la zona per il periodo di tempo, in cui i pericoli per la popolazione siano evidenti, e per lo spazio, la cui estensione sia determinata da reali manifestazioni dannose per cose o persone (lancio di pezzi, crolli, etc.).
A tal proposito la navicella è dotata di un sistema antincendio, che consiste di rilevatori di fumo e CO_2, i quali rivelano gli incendi e attivano un sistema di spegnimento ad acqua atomizzata ad alta pressione nel caso di incendi dei componenti meccanici e a gas inerte (azoto) nel caso di incendi dei componenti elettrici (cabine elettriche e trasformatore).
In aggiunta a ciò, il rivestimento della navicella contiene materiali autoestinguenti.

L'aerogeneratore è dotato inoltre di un completo sistema antifulmine, in grado di proteggere da danni diretti ed indiretti sia la struttura (interna ed esterna) che le persone. Il fulmine viene "catturato" per mezzo di un sistema di conduttori integrati nelle pale del rotore, disposti ogni 5 metri per tutta la lunghezza della pala. Da questi, la corrente del fulmine è incanalata attraverso un sistema di conduttori a bassa impedenza fino al sistema di messa a terra. La corrente di un eventuale fulmine è scaricata dal rotore e dalla navicella alla torre tramite collettori ad anelli e scaricatori di sovratensioni. La corrente del fulmine è infine scaricata a terra tramite un dispersore di terra. I dispositivi antifulmine previsti sono conformi agli standard della più elevata classe di protezione (Classe I), secondo lo standard internazionale IEC 61024-1.

9. INCIDENTI CON L'INFLUENZA SULL'AMBIENTE

Alla voce collisioni è doveroso subito citare il contatto con corpi aerei, ed in modo particolare con corpi volanti in grado, a certe altezze, di impattare sull'aerogeneratore. L'altezza massima, cui arriva la punta della turbina eolica di progetto, è pari a 175 m (116.5 m altezza del mozzo). Sbattere contro questo ostacolo per altro mobile e sottile dovrebbe essere occasione aberrante o particolarmente sfortunata in una vita razionalmente normale.
La turbina è equipaggiata, in accordo alle disposizioni dell'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile), con un sistema di segnalazione notturna/diurna per la segnalazione aerea. La segnalazione notturna consiste nell'utilizzo di una luce rossa da installare sull'estradosso della navicella dell'aerogeneratore mentre quella diurna consistente nella verniciatura della parte estrema della pala con tre bande di colore rosso ciascuna di 6 m per un totale di 18 m.

10. INCIDENTI PER PRESENZA FISICA DELL'AEROGENERATORE

Quanto citato nel paragrafo 4.5 potrebbe essere applicato anche per incidenti che non sono creati direttamente dalla turbina eolica. Queste possono infatti essere causa indiretta di incidenti nei riguardi dei veicoli stradali, in quanto la sensibilità da parte dei guidatori alla loro vista li distrae, spostando altrove l'attenzione da quanto o da come stanno guidando. La conclusione può essere un fuori strada od una qualche altra variante dell'incidente stradale.

11. DANNI PER L'AVIFAUNA

L'interazione con la avifauna stanziale o di passo è uno degli aspetti, che in molte riunioni di ecologisti compare come un elemento di più vivace discussione ed è pure un argomento che i concessionari di campi eolici tengono sotto controllo ed esaminano anche con campagne ad hoc. In realtà, è uno dei temi più controversi per gli impianti eolici, quando soprattutto siano localizzati in zone ad elevata vocazione naturalistica o nei loro pressi.
Indipendentemente dalla criticità o meno delle interazioni con l'avifauna, è opportuno sviluppare qualche considerazione per impostare la problematica degli eventuali rischi, cui possono essere soggetti i volatili a causa della installazione di turbine eoliche, e per informare circa le azioni che consentano di inserire campi eolici in aree protette, soggette ai regimi di parchi naturali. Con macchine delle dimensioni attuali il crescere della taglia porterebbe a velocità decrescenti, che, oltre ad una migliore visibilità dell'ostacolo da parte del volatile, indurrebbe minori decessi.

Valutazioni statistiche, esperite dal Ministero dell'Ambiente olandese, porterebbe a far annoverare il numero di morti corrispondenti ad un sito di 1000 MW in confronto con altre attività umane in grado di produrre effetti altrettanto negativi sulla vita dei volatili. Ciò porta alla seguente analisi:

- 1500 volatili morti per effetto delle azioni di caccia;
- 1000 volatili morti per effetto della presenza di tralicci elettrici;
- 2000 elementi deceduti per effetto della presenza di traffico di vario genere e tipo;
- 20 a causa dell'intervento di rotori eolici.

Dai numeri provenienti da tali studi si può evidenziare come la fonte eolica concorrerebbe solamente in minima parte all'impatto sull'avifauna, che essa subisce per una serie di attività umane, legate, o al proprio piacere o alle necessità vitali.

In conclusione, dalla letteratura consultata, si può affermare che gli impianti eolici rappresentano per l'avifauna un rischio contenuto, essendo stati riscontrati valori di mortalità inferiori a quelli derivanti da collisioni con altri manufatti quali strade, linee elettriche, torri per telecomunicazioni.

12. DANNI CONSEGUENTI AD OGGETTI ESTERNI

Per trattare l'argomento bisogna innanzitutto definire quali siano i criteri, che informano tale indagine. I danni possono coinvolgere la popolazione, l'ambiente o l'integrità dell'impianto eolico stesso, nel cui ambito territoriale si dovrebbero sviluppare gli incidenti. Una discussione di questo tipo è importante per determinare il concetto di rischio conseguente. È noto che il rischio sia la combinazione della intensità della rottura o dell'evento incidentale con l'entità dei danni provocati. Il passo successivo è circoscrivere con precisione l'ambito nel quale i danni siano provocati e possano essere valutati. Diverse sono le caratteristiche degli effetti, se gli "oggetti" da difendere e da conservare sono anch'essi differenti. Incidente ed effetti, marciano di pari passo, in quanto tramite la loro valutazione è possibile risalire alla rilevanza ed alla portata del rischio. Successivamente occorre riflettere ed indagare quali siano le ripercussioni, che gradualmente ed a seconda dell'entità dell'incidente possono ricadere sull'esterno dell'impianto, sull'ambiente e, infine, sulla popolazione. Sfortunatamente nelle centrali eoliche (facendo astrazione per la grande categoria delle anomalie, che potrebbero essere ritenute o siano configurabili come malfunzionamenti più o meno tenuti sotto controllo dai sistemi di regolazione, di allarme e di controreazione dell'impianto) la classe delle rotture o, meglio, delle cause, che intaccano l'integrità di parti

strutturali o funzionali dell'aerogeneratore, ha immediati riflessi sull'esterno della macchina. Sono certamente da preservare da azioni d'impatto almeno i corpi convoglianti o contenenti fluidi a diversa pericolosità (tubazioni/cisterne, gasdotti, oleodotti, etc.) sistemati in superficie o con ridotto interramento; le stazioni di distribuzione di combustibili (benzine, gas più o meno liquefatti, gas compressi, etc.); le vie di comunicazione (strade comunali/provinciali con esclusione di autostrade o delle vie di grandissimo traffico, che non dovrebbero trovarsi nelle immediate vicinanze del sito eolico), le ferrovie (ad uno o più binari);le dighe o gli sbarramenti (a piccola elevazione, di vari materiali specialmente se in terra, regolazione della portata di corsi d'acqua, etc.); le abitazioni e gli insediamenti civili.
Stando così le cose, un provvedimento ineludibile diviene la distanza dell'oggetto da difendere, che deve avere rispetto all'impianto eolico. Come capita spesso con le ripercussioni delle analisi di sicurezza il provvedimento primario è da collegare con la distanza, cui è posto o può essere sistemato l'oggetto da proteggere. Se esso preesiste, la relazione spaziale tra campo eolico ed oggetto si trasferisce sulla collocazione del campo eolico. È su quest'ultimo, che si devono affrontare e prendere le decisioni opportune per ovviare o per ridurre le conseguenze di eventuali incidenti, sorti nel suo ambito.

13. INCIDENTI MECCANICI

La classe degli eventi a natura meccanica è indubbiamente piuttosto affollata. Non tanto per la tendenza al cedimento, che possa essere insita nelle parti meccaniche o ne costituisca una estremizzazione, quanto piuttosto per la sensibilità che qualunque osservatore, presente su un sito eolico, ha verso corpi in movimento o in rotazione, come appunto sono le pale dell'aerogeneratore.
Non trattandosi di componenti statici, qualunque persona anche non dotata di specifiche cognizioni tecniche, che per motivi personali, o di lavoro, o di diporto si trovi a passare od a stazionare a distanze relativamente piccole da un aerogeneratore è disposto a dubitare.
I principali possono essere classificati come segue:

- separazione della pala dal rotore e/o rottura della stessa;
- deformazione di pala non separatasi dal mozzo;
- rottura e caduta di navicella e di torre;
- rovesciamento o abbattimento di turbina;
- lancio di ghiaccio, depositatosi sulle pale;
- collisioni con corpi estranei

14. ROTTURA DELLA PALA

Le modalità di rottura della pala possono essere assai diverse. Essendo un organo in rotazione è soggetto alla forza centripeta che va equilibrata con l'azione della struttura della torre stessa. Per minimizzare tale forza, la pala è costruita in materiale leggero; normalmente si utilizzano materiali compositi che sfruttano le caratteristiche meccaniche così da far fronte ai carichi aerodinamici imposti.

Le modalità di rottura sono classificabili in due gruppi:

1) Rottura della pala alla radice.
2) Rottura di frammento.

ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE

La rottura della pala alla radice è un evento che storicamente è risultato frequente (rispetto al numero di rotture totali) in quanto la sezione di attacco risulta assai "critica" dal punto di vista strutturale.

Le cause sono sostanzialmente due:

1) la discontinuità della struttura che passa da un carico distribuito sulle fibre alla flangia di attacco crea inevitabili concentrazioni tensionali che con l'andar del tempo può creare problemi di affaticamento con conseguente rottura. C'è da dire che i costruttori hanno ben chiaro il problema e che negli ultimi anni si sono introdotti diversi accorgimenti che hanno migliorato di molto le prestazioni.
2) la rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo. II longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni serrati opportunamente durante l'installazione della turbina.

Il precarico conferito ai bulloni durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei bulloni stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'evento si manifesta a causa di non corretti interventi di manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore. Per cui l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei bulloni ed al distacco della pala.

Per la stima della gittata massima dell'intera pala si impongono alcune ipotesi semplificative:

1) distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;

2) baricentro posizionato ad 1/3 della lunghezza della pala;
3) assenza di attriti viscosi durante il volo: questa ipotesi risulta conservativa considerando che in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche del 20%;
4) distacco in corrispondenza di un angolo di 315° rispetto alla verticale, che dal punto di vista teorico garantisce la massima gittata (moto in senso orario);
5) distacco alla rotazione di funzionamento massima;
6) vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
7) assenza di effetti di "portanza" del profilo alare.

Un esempio classico è la rottura di una pala per ragioni interne all'aerogeneratore. Il mancato o difettoso intervento del controllo di velocità, le rotture sul sistema di freno o sul moltiplicatore possono essere una causa comune di tale situazione. Il meccanismo di freno è previsto, sia per arrestare il rotore, sia per tenerlo fermo, quando il vendo soffia ad una velocità eccessiva (20/25 m/s) tale per cui la macchina deve essere tenuta f.s. per ragioni di sicurezza. Il sistema ad ingranaggi (gearbox) serve per moltiplicare i giri dell'albero lento in entrata in modo che l'albero veloce in uscita dall'apparecchio consenta al generatore elettrico di produrre l'elettricità attesa. Se entrambi dovessero andare in avaria, si dice che la macchina "vada in fuga". Il rotore tende ad accelerare il suo regime di rotazione e raggiunge parecchie volte il suo valore a funzionamento normale. In questo modo si creano dei carichi sulle pale in notevole eccesso rispetto a quelli di progetto. Le porzioni della pala che prima possono essere divelte, sono le parti estreme. Possono essere strappate dal resto e lanciate con una quantità di moto assai alta.

FRAMMENTO DI PALA

L'evento della rottura di un frammento consistente di pala risulta meno frequente. Per le caratteristiche del materiale strutturale, tende ad essere una rottura progressiva. Pertanto, nella maggior parte dei casi si ha una prima flessione della struttura con conseguente inevitabile urto con la torre (posta sottovento nella quasi totalità delle WTG). La conseguente rottura dà luogo a traiettorie varie che non sono deterministicamente calcolabili.

Nella maggior parte dei casi di lancio di piccoli frammenti di pala la causa registrata è la concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica. Tale fenomeno è stato considerato dai costruttori che hanno iniziato a dotare gli aerogeneratori di un sistema di convogliamento della corrente di fulminazione costituito da recettori metallici posti lungo la pala, da un cavo che

collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale. In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità della pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. È possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala. Per avere un ordine di grandezza sulla distanza raggiunta dai frammenti di una pala eolica, si fa riferimento allo studio "Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan". Secondo tale studio, la probabilità che un frammento staccatosi di pala staccatosi dalla turbina vada oltre i 50 m dalla torre è dell'ordine di $2*10^{-5}$.

Per avere una stima dei numeri, che descrivono l'importanza di ogni caso di incidenti, è opportuno ancora dedurre il quantitativo incidentale che è proprio di queste categorie di eventi meccanici con rotture di pala e che in un ideale elenco di frequenza incidentale occupa il primo posto. Nella realizzazione di questa serie di incidenti non si scevera tra le possibili cause e neppure sull'entità della rottura, in quanto può essere più significativo disporre di un dato che copra tutte le casistiche.

15. GITTATA DI UN CORPO ROTANTE

L'analisi per la combinazione dei carichi, per i materiali usati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura si fa riferimento alla norma CEI EN61400-1.

L'analisi è stata condotta per i seguenti casi:

- una pala eolica che si stacca;
- un pezzo di ghiaccio che potrebbe crearsi in inverno e che parte dall'estremità di una pala.

In qualsiasi caso, la gittata massima e la velocità all'impatto sono dei fattori determinanti per la stima del rischio.

La gittata massima dipende dal prodotto "raggio della pala x velocità di rotazione".

Il calcolo presenta comunque alcune complessità in quanto le variabili in gioco sono numerose ed il risultato può essere soltanto di tipo probabilistico in quanto legato alle modalità ed al momento del distacco. Infatti, un corpo lanciato in aria in presenza di forte vento potrebbe dar luogo ad effetti di "portanza" che possono prolungare i tempi di volo. L'effetto viscoso dell'aria, d'altra parte, ha un effetto opposto frenando il corpo durante il moto. Considerando, quindi, la natura della pala, avente un profilo aerodinamico, lo studio del moto risulta complesso, a causa di tutte le forze e dei momenti che nascono al momento del distacco e nell'interazione col vento. È da sottolineare comunque che nell'ultimo decennio, il tasso d'incidentalità è ancora diminuito a seguito dell'evoluzione tecnologica e del miglioramento delle macchine eoliche, malgrado l'aumento medio delle loro dimensioni.

Uno studio danese ha condotto su 18 mesi, tra il 1998 e i 1999, un'analisi riguardante le pale, le navicelle e le torri di 2.130 rotori, per una produzione complessiva di 540 MW. Su 3.195 anni cumulati di funzionamento, solo 7 incidenti hanno comportato la distruzione delle pale. Il tasso è dunque di un incidente ogni 457 anni-macchina. Si noti che la Danimarca presenta maggiori rischi di guasti e di sospensione della produzione a causa della presenza di brina e di ghiaccio.

Un altro studio danese a partire da dati registrati su 120 mesi tra il 1993 e il 2003 in un parco di 1.912 impianti mostra una probabilità di distruzione di 0,00083 impianti per anno. In ambito rurale, la correlazione di questa statistica (6x10-5/anno) con la probabilità di occupazione di un m^2 di terreno da parte di una persona individua una probabilità globale di ferire qualcuno molto bassa.

16. PROBABILITA' DI ACCADIMENTO

L'aerogeneratore, al pari di tutte le realizzazioni industriali e tecniche, pone all'attenzione dei responsabili una serie di danni potenziali. Per limitarli devono essere formulati criteri, che sarebbe meglio se fossero derivati da prescrizioni o da statuizioni pubbliche e da normative. Ad essi si dovrebbero attenere costruttori e gestori di campi eolici. Lo scopo sarebbe quello di ridurre i danni, derivanti da tali installazioni, sino ad un rischio residuale tecnico non eliminabile od accettabile. Nelle considerazioni entrerebbero sostanzialmente se non esclusivamente i requisiti di sicurezza, che l'impianto deve assicurare in tutte le fasi della propria vita (cioè, realizzazione, esercizio e dismissione oltre alla impostazione). È ovvio che in questo momento sono le prime due a farla da padrone. In mancanza di siffatte prescrizioni è prassi riferirsi ad una probabilità di rottura di 1006 eventi all'anno. Il dato numerico va inteso come un limite di soglia da raggiungere o da applicare. È stato per molto tempo il valore di accettabilità o di credibilità incidentale degli impianti nucleari, che prima di tutti e più di tutti hanno fatto della sicurezza il paradigma essenziale della loro esistenza nel panorama industriale dei nostri paesi. È naturale che se in un dato periodo di tempo, che è solitamente tagliato sull'anno, non si devono riconoscere eventi incidentali di quel tipo, che si sta considerando, la relativa probabilità di rottura assumerà il valore limite, che si è appena indicato, cioè 1006 eventi/anno. È ovvio che il valore del danno statistico della rottura di una torre per un convertitore eolico abbia singolarmente una probabilità maggiore. Essendo il processo di rottura della torre il risultato di una catena di eventi, la probabilità totale spettante a tale evento sarà la combinazione delle probabilità dei meccanismi intermedi, attraverso i quali si perviene al risultato. Ogni evento individuale della catena è visto con le sue conseguenze in modo che il prodotto della probabilità di occasione di ogni individuale evento fornisce la relativa probabilità di danno. Questo valore può essere messo in relazione con il valore di soglia, che dipende dall'oggetto individuale da proteggere. La relazione, che traduce il concetto ora esposto, si basa sulla seguente disuguaglianza.

$$P_{so} > P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4$$

nella quale per le singole quantità valgono le indicazioni precedenti e precisamente:

- P_{so} è il valore di soglia, che è relativo all'oggetto da difendere e che in linea generale potrebbe essere corrispondente al dato, già discusso in precedenza e cioè pari a 1006 o ben maggiore;
- P1 è la probabilità di occasione dell'evento incidentale accaduto alla turbina eolica;
- P2 è la probabilità di occasione dell'urto tra l'oggetto da proteggere e la pala;
- P3 è la probabilità di occasione della condizione di vento sfavorevole o dei condizionamenti ambientali;
- P4 la probabilità di occasione relativa ad altre cause, come tolleranze di costruzione

In conclusione, in relazione al rischio di rottura, si riportano le risultanze del documento "*Analysis Of RiskInvolved Incidents Of Wind Turbines*", allegato alla "*Guide for Risk-Based Zoning of Wind Turbines*", elaborato nel 2005 dall' ECN (Energy Research Centre of the Netherlands) sulla base dei dati relativi a produzione di energia eolica, incidenti e manutenzione raccolti dallo ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik) in Germania e dall' EMD (Energie- og Miljødata) in Danimarca. L'ECN ha analizzato le informazioni di incidenti registrate su un campione molto largo di turbine eoliche in Danimarca e Germania, determinando le frequenze di:

- rottura di una pala;
- rottura della punta e di piccole parti;
- rottura della torre alla base;
- caduta del rotore o della navicella
- caduta di piccole parti dal rotore o dalla navicella.

La probabilità di rottura della pala è stata suddivisa in diverse condizioni d'uso:

- alla velocità nominale;
- durante la frenata meccanica;
- in condizione di overspeed.

I risultati dell'analisi (riportati nella seguente figura) mostrano come la probabilità di rottura di una pala (0.84‰) sia inferiore al dato (2,6%) utilizzato più frequentemente in studi di questo genere. Per quanto riguarda la probabilità di rottura in overspeed, è stata utilizzata la stima di studi precedenti, determinata moltiplicando la probabilità di guasto della rete elettrica (5 volta in un anno) con la probabilità di rottura del primo sistema di frenata (10-3 per intervento) e del secondo sistema di frenata (10-3 per intervento) e per la probabilità di rottura della pala in queste condizioni (100%).

Part	Failure frequency per turbine per year			Maximum throw distance [m] (reported and confirmed)
	Expected Value	95% upper limit	Recommended Risk Analysis Value [1/yr]	
Entire blade	$6.3*10^{-4}$	$8.4*10^{-4}$	$8.4*10^{-4}$	150
Nominal rpm			***4.2*10^-4***	
Mechanical braking			***4.2*10^-4***	
Overspeed			***5.0*10^-6***	
Tip or piece of blade	$1.2*10^{-4}$	$2.6*10^{-4}$	**$2.6*10^{-4}$**	Half diameter
Tower	$5.8*10^{-5}$	$1.3*10^{-4}$	**$1.3*10^{-4}$**	Shaft height + half diameter
Nacelle and/or rotor	$2.0*10^{-4}$	$3.2*10^{-4}$	**$3.2*10^{-4}$**	Half diameter
Small parts from nacelle	$1.2*10^{-3}$	$1.7*10^{-3}$	**$1.7*10^{-3}$**	Half diameter

Frequenza di rottura e massima gittata segnalata