

# Proposta di manutenzione per aerogeneratori di nuova generazione

La crescente diffusione di tali apparecchiature impone la creazione di modelli manutentivi standardizzati che ne ottimizzino l'esercizio. L'articolo si orienta in tale prospettiva

Salvatore Mura  
Università di Cagliari  
A. Soro  
Università di Cagliari

Nel presente lavoro vengono riportati i risultati relativi al monitoraggio delle prestazioni di un parco eolico per la definizione, in base ai dati rilevati ed a quelli reperibili in letteratura, di un piano manutentivo specifico per aerogeneratori di media e grande taglia di nuova generazione. Lo scopo è quello di migliorare il rapporto in essere di global service tra ente gestore e azienda installatrice e di manutenzione al fine di ottimizzarne i costi.

Negli ultimi anni, in seguito a quanto ratificato nel protocollo di Kyoto, si sta fortemente incentivando la ricerca, lo sviluppo e l'uso di nuove fonti di energia rinnovabile alternative ai tradizionali combustibili fossili. Tra le fonti rinnovabili l'impiego dell'energia eolica per la produzione di energia elettrica è ormai una realtà consolidata, ciò soprattutto per la facilità di trasformazione dell'energia cinetica, posseduta dalle masse d'aria in movimento, in energia elettrica disponibile per il normale consumo.

Tali macchine risultano costituite essenzialmente da un rotore, atto alla sottrazione di una quota parte dell'energia posseduta dall'aria in movimento, e da un generatore, necessario alla trasformazione di tale energia, in energia elettrica. Gli altri componenti e le loro funzioni sono:

l'albero lento: ha il compito di trasmettere la rotazione del rotore al moltiplicatore di giri;

il moltiplicatore di giri: consente l'innalzamento della velocità di rotazione dell'albero lento e quindi della velocità del rotore in ingresso, in modo tale da garantire al ge-

neratore una velocità adeguata per la produzione di energia elettrica;

- l'albero veloce: consente il collegamento e la trasmissione del moto, dal moltiplicatore di giri al generatore;

- il trasformatore: consente l'immissione diretta in rete dell'energia elettrica generata;

- il sistema di imbardata: ha il compito di regolare l'angolazione della navicella rispetto alla direzione del vento, ossia di tenere costantemente l'asse del rotore parallelo alla direzione del vento;

- il sistema del passo: agisce sull'angolo di inclinazione delle pale rispetto alla direzione del vento, in modo tale da garantire ad ogni velocità del vento, un elevato rendimento aerodinamico;

- il sistema PLC di controllo e gestione: gestisce completamente ed autonomamente tutte le attività della macchina, dalla produzione di energia all'individuazione di eventuali avarie.

Queste macchine hanno oramai raggiunto elevate prestazioni, grazie soprattutto all'utilizzo di sistemi elettronici evoluti, capaci di gestire completamente ed autonomamente tutte le fasi della produzione.

*Scopo del presente lavoro, anche in considerazione del presunto maggior impiego delle macchine suddette, è quello di sopperire alla carenza di una tecnica manutentiva preventiva specifica. Attualmente infatti si ricorre, quasi esclusivamente, ad una manutenzione a guasto. L'interesse primario per tali centrali è quello della produzione di energia elettrica da immettere in rete. Pertanto deve essere garantita la massima disponibilità in esercizio di tali unità, ciò al fine di ridurre al minimo i tempi di "fuori servizio". Per realizzare tale obiettivo si è proceduto al monitoraggio di una centrale eolica, appartenente all'Enel Green Power, situata in località Alta Nurra (SS), dotata di sette aerogeneratori di grande taglia tipo Vestas V66 da 1,75 Mw di potenza cadauno, avviata nel periodo Luglio-Agosto 2002 e per la quale è in atto un contratto di global service.*

## 1. Analisi dell'impianto

Il monitoraggio delle prestazioni è stato finalizzato alla ricerca dei principali parametri statistici, quali tasso di gua-

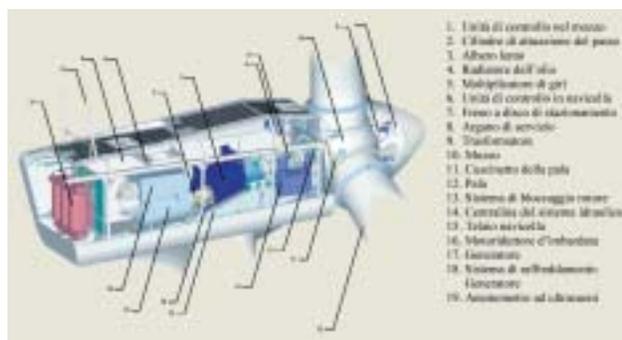


Fig. 1 Moderno aerogeneratore di grande taglia

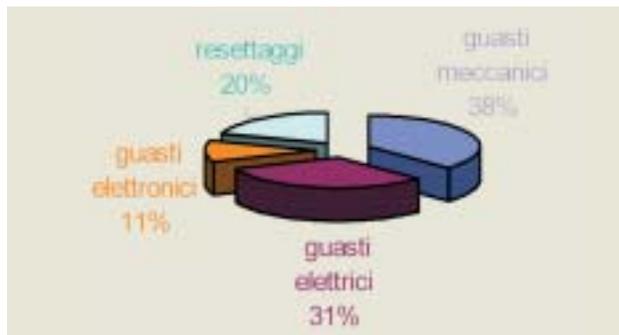


Fig. 2 Incidenza percentuale guasti

sto ed affidabilità, necessari per la comprensione del reale comportamento delle macchine nelle varie condizioni di utilizzo e per la successiva impostazione di un piano manutentivo specifico.

### 1.1 Tasso di guasto

I principali parametri statistici dell'impianto sono stati rilevati dai Service Report manutentivi redatti dai manutentori che attualmente operano sulle macchine. I dati relativi ai guasti registrati sono stati scomposti in quattro distinte categorie in funzione dell'avaria riscontrata e di conseguenza della componentistica impiegata per la relativa riparazione.

- guasti di apparati meccanici,
- " " elettrici,
- " " elettronici
- interventi di resettaggio e riavvio da parte del manutentore senza impiego di materiali.

Dalla loro analisi è stato possibile trarre una prima indicazione sul tipo di avaria che si manifesta con maggior frequenza. Nella fig.2, è riportata l'incidenza percentuale per tipo di guasto riscontrato sulle macchine. Come si può notare, l'incidenza maggiore spetta ai guasti meccanici ed elettrici.

Per l'individuazione dei tassi di guasto si considera la singola macchina come un *sistema riparabile che percorre cicli di funzionamento-guasto*. In tale logica, il valore del tasso di guasto lo si esprime mediante la:

$$\lambda = \frac{\text{n}^\circ \text{ avarie}}{\text{tempo di corretto funzionamento}} \quad (1)$$

dove il numero di avarie rappresenta il numero di interventi manutentivi effettuati in seguito all'arresto della macchina nell'arco temporale di un anno, mentre il tempo di corretto funzionamento rappresenta l'intervallo di tempo in cui la macchina funziona e/o è disponibile per il funzionamento. Per semplificare la trattazione si è supposto che le macchine siano nel periodo di vita utile, di conseguenza, il tempo di corretto funzionamento lo si ottiene sottraendo all'intervallo temporale di osservazione, pari ad un anno, le ore di fermo per avarie, quelle per mancanza di tensione nella rete di media tensione e le pri-

me 500 ore di vita, corrispondenti al periodo iniziale di rodaggio dell'intero impianto.

Differenziando, come già accennato in precedenza, i diversi tipi di anomalie riscontrate a seconda della sostituzione di componentistica meccanica, elettrica, elettronica, o a seconda dell'intervento dell'operatore per resettare la macchina, si sono calcolati tramite la (1), i valori del tasso di guasto e del relativo MTBF, in base all'analisi dei dati raccolti in un anno di esercizio delle macchine in esame:

Tabella 1 - Riassunto dati di esercizio

Block Name	$\lambda$ (guasti/ora)	MTBF (ore)	MTBF (giorni)
Meccanico	0.000293	3413	142,2
Elettrico	0.000251	3984	166
Elettronico	0.000092	10869,6	452,9
Reset	0.000156	6410,3	267,1

Come si può notare, i guasti meccanici ed elettrici, presentano una frequenza di avvenimento notevolmente più elevata rispetto alle altre tipologie considerate; ricordando infatti che l'MTBF rappresenta il tempo medio tra due guasti successivi, si vede come dopo un tempo in media pari a 140 giorni, si manifesti un guasto meccanico, mentre dopo circa 166 giorni se ne manifesti uno elettrico. Più lunghi i tempi per le altre due tipologie di guasto. In realtà, i guasti manifestati durante il periodo in analisi, anche se in numero elevato, non sono stati gravi e/o critici, sia dal punto di vista dei componenti sostituiti, sia dal punto di vista dei tempi di arresto.

### 1.2 Affidabilità

Avendo supposto un tasso di guasto costante, l'espressione dell'affidabilità è data dalla:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$$

il cui andamento è rappresentato da un esponenziale decrescente. Seguendo la stessa impostazione utilizzata per la tipologia dei guasti, si è valutata anche l'affidabilità, in funzione della componentistica meccanica, elettrica ed elettronica, sostituendo di volta in volta nella formula precedente, il valore specifico di  $\lambda$  riportato nella tab.1.

Nel grafico successivo sono stati messi a confronto i quattro andamenti affidabilistici menzionati: si può notare, conseguentemente a quanto visto nella fig.2 e nella tab.1, che l'affidabilità della componentistica meccanica e l'affidabilità della componentistica elettrica, pregiudicano in maggior misura il corretto funzionamento delle macchine, rispetto alla restante componentistica elettronica ed agli interventi di resettaggio.

Appare quindi evidente che, nel momento in cui si debba impostare un piano manutentivo, occorra concentrare maggiori attenzioni alla componentistica meccanica, risultata meno affidabile, con interventi mirati e dettati dalle reali ore di utilizzo e dalle condizioni di carico.

Dall'analisi dei service report è anche emerso un dato

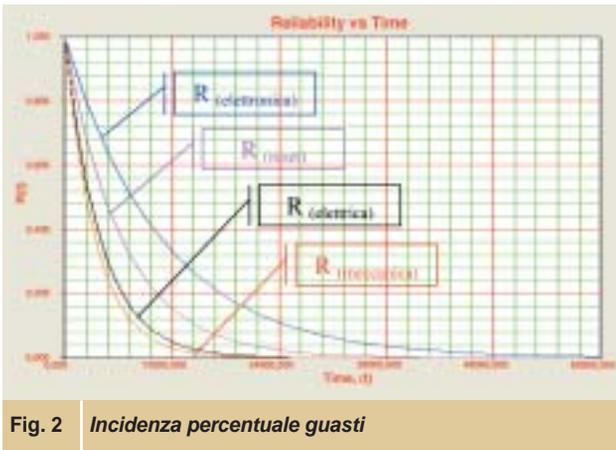


Fig. 2 Incidenza percentuale guasti

rilevante abbastanza interessante: i guasti, dopo un anno di attività delle macchine, hanno interessato nella quasi totalità dei casi, il generatore ed alcuni componenti del sistema del passo. Nel valutare il piano di manutenzione a questi due sistemi dovrà essere diretta una particolare attenzione.

## 2. Piano di manutenzione

**La proposta di manutenzione è redatta seguendo le impostazioni della norma UNI 10336 “Criteri di progettazione della manutenzione”.**

La scelta della politica ottimale viene effettuata, oltre che in funzione dei costi, anche in funzione della categoria del bene da mantenere. È fondamentale allora la scelta del bene da introdurre in una adeguata politica manutentiva, e tale scelta è effettuata in base a diversi criteri, a seconda del tipo di realtà impiantistica ed industriale che si va ad affrontare.

La normativa, al fine di ricavare la politica manutentiva che meglio si adatta ad un generico sistema in esame, specifica precise fasi di lavoro:

1. individuazione dei sistemi critici;
2. analisi dei guasti, loro effetti e criticità;
3. formulazione del piano di intervento;

### 2.1 Individuazione dei sistemi critici

Per la definizione della criticità dei sistemi, in base all'esame della normativa in materia di progettazione della manutenzione (UNI 10336) e vista la politica gestionale attuata dall'azienda, si è ricorso all'utilizzo della disponibilità:

**“Si considera componente critico, per gli aerogeneratori in oggetto, quel componente, organo o sistema che in seguito al suo degrado fisico e funzionale, con conseguente avaria e/o rottura, ne riduce la disponibilità”.**

Tale affermazione scaturisce dal fatto che la produzione di energia è funzione di parametri ambientali esterni, e che il livello di produzione può essere aumentato con interventi di tipo manutentivo, atti a rendere disponibile la macchina nei periodi di alta ventosità, in cui si ottiene una elevata produzione di energia elettrica.

Utilizzando per la disponibilità l'espressione:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Dove per l'individuazione e definizione dei sistemi critici, si sono utilizzati i seguenti parametri:

- **frequenza dei guasti (MTBF);**
- **tempo medio di ripristino (MTTR);**
- **tipologia del funzionamento: continuo o discontinuo.**

La scelta di tali parametri è indirizzata verso l'affidabilità del sistema complessivo: appare di conseguenza logico considerare critici, e analizzare più a fondo, quei sistemi che manifestano il maggior numero di avarie, e che quindi necessitano di interventi manutentivi più frequenti. Per quanto riguarda la frequenza delle avarie, i valori su cui si basa l'analisi successiva, sono estrapolati principalmente da una ricerca bibliografica, tendente all'individuazione dei principali parametri statistici dei singoli componenti costituenti le macchine, e ove possibile, dai dati reali di esercizio, anche se questi risultano evidentemente insufficienti per l'impostazione di una corretta politica manutentiva, data la recente installazione dell'impianto. I parametri statistici rilevati dalla letteratura, quali tassi di guasto, affidabilità, MTBF calcolati per ogni singolo sistema, e successivamente per l'intero aerogeneratore, sono stati poi messi a confronto con quelli provenienti da un anno di esercizio. I risultati della trattazione suddetta sono oggetto di altra pubblicazione. (\*)

Per valutare l'MTTR, si sono invece fatte considerazioni di tipo costruttivo, ossia ricordando che l'MTTR è funzione, oltre che dei tempi di riparazione propriamente detti, anche dei tempi di smontaggio e rimontaggio e dei tempi di approvvigionamento dei pezzi, si è assegnato un valore qualitativo in base alla complessità costruttiva del componente, alla dislocazione dello stesso all'interno della navicella, ed al tempo di approvvigionamento dei materiali e dei ricambi necessari.

Come esempio si potrebbe pensare ai cilindri di attuazione del passo che sono situati all'interno del mozzo, quindi in una posizione non facilmente raggiungibile, o al generatore che è racchiuso in un involucro necessario al suo raffreddamento, o alle pale del rotore, che nel caso di avaria grave con necessità di sostituzione, oltre a dover essere smontate tramite l'utilizzo di una gru da 70m, devono essere fatte arrivare direttamente dalla Danimarca. Ne consegue, che per mantenere un'elevata disponibilità, è necessario tenere un MTTR il più basso possibile.

Infine si analizza il terzo parametro di scelta. Esso deriva da considerazioni sul funzionamento delle macchine, ossia dal fatto che alcuni organi lavorano incessantemente o quasi per tutto l'anno, mentre altri sono soggetti ad un numero di ore di lavoro nettamente minore. Essendo l'usura funzione del numero di ore di esercizio, quei componenti a basso “coefficiente di utilizzazione” provocheranno presumibilmente minori problematiche e pertanto necessiteranno di un numero di interventi minore. Si pre-

Tabella 2 - Tabella per analisi multicriterio

	Frequenza guasti (peso ---- )	MTTR (peso ---- )	Funzionamento continuo (peso ----- )	Indice di criticità $\Sigma P \times V$	Ordine di criticità
Rotore					
Gruppo albero lento		Indici di valutazione			
.....					
Rotore					

si ad esempio ai motoriduttori di imbardata, che, come risulta dall'analisi delle ore di funzionamento, hanno lavorato su tutte le macchine, mediamente meno di 200 ore annue. Differente è invece l'utilizzo di altri componenti o sistemi, come ad esempio il sistema PLC che monitorizza senza sosta la macchina, o al sistema del passo che rimane anch'esso sempre in attività.

Ai parametri ora analizzati è stato assegnato un peso legato all'incidenza del parametro stesso sulla affidabilità. Ricordando che lo studio della criticità è stato incentrato o indirizzato verso l'affidabilità e disponibilità, i pesi assegnati ai tre parametri sono nell'ordine: 50% alla frequenza dei guasti, 30% all'MTTR e 20% alle caratteristiche di funzionamento.

Per la ricerca del sistema critico, si è proceduto tramite una analisi qualitativa di tipo multicriterio sviluppata con l'ausilio della tab.2. Nella prima colonna sono stati riportati i vari sistemi in cui è stato suddiviso l'aerogeneratore, mentre nella prima riga sono stati riportati gli "indicatori di criticità" definiti in precedenza, ossia quei termini in base alla quale si identificano le parti critiche.

Ad ogni parametro è stato naturalmente assegnato un peso percentuale, necessario per focalizzare l'importanza dello stesso. In corrispondenza dell'incrocio tra le righe e le colonne, (sistemi-parametri) si colloca un indice qualitativo necessario alla valutazione della correlazione al parametro interessato, da parte del sistema in esame. Tale indice, poiché non deriva da complessi calcoli numerici, è, come già accennato, di tipo qualitativo, è varia da 1 a 3: il termine 1 indica una bassissima correlazione al parametro, il termine 2 indica una media correlazione al parametro, il termine 3 indica una elevata correlazione al parametro.

Noti i parametri ed i relativi pesi  $P_i$ , e noti gli indici di valutazione  $V_i$ , per ogni singolo sistema, si può calcolare l'indice di criticità tramite la seguente:

$$\text{Indice di Criticità} = \Sigma_i P_i * V_i \quad (2)$$

ed una volta ordinati i sistemi in esame in modo decrescente in base a tali indici, si individuano le macchine o sistemi critici, in base al valore stesso dell'indice.

I risultati di tale analisi, per i singoli aerogeneratori, sono riportati nella tab.3, in cui i sistemi sono già ordinati in funzione della loro criticità:

Si analizzi come esempio esplicativo delle valutazioni

Tabella 3 - Risultato analisi componenti critici aerogeneratore

	Frequenza guasti (peso 50%)	MTTR (peso 30%)	Funzionamento continuo (peso 20%)	Indice di criticità $\Sigma P \times V$	Ordine di criticità
Rotore	3	3	3	300	1
Generatore	3	3	2	280	2
Sistema del passo	3	2	3	270	3
Moltiplicatore	2	3	3	250	4
Gruppo albero lento	2	3	3	250	4
Sistema idraulico Moltiplicatore	3	1	3	240	5
PLC	3	1	3	240	5
Trasformatore	2	3	2	230	6
Sistema di imbardata	3	2	1	230	6
Sistema raffredd. Moltiplicatore	2	1	2	170	7
Freno a disco	2	1	1	150	8
Gruppo albero veloce	1	1	3	140	9

effettuate nella tabella, il sistema rotore: per esso si prevede dai dati ricavati in letteratura un' elevata frequenza di guasto, tempi elevati di riparazione, questo in considerazione della difficoltà da parte dell'operatore ad arrivare nel sistema, sia considerando il caso di un avaria grave per la quale occorrerebbe far intervenire una gru. Inoltre il rotore è uno degli elementi che lavorano per il maggior numero di ore durante l'anno. In base a queste considerazioni, a tale sistema, sono stati assegnati indici di valutazione massimi in ogni categoria.

Una volta individuati i sistemi critici, si procede ad una ulteriore analisi per l'individuazione dell'appropriata politica manutentiva. Uno studio completo in tal senso, è stato effettuato sul "generatore", che è secondo nella lista di criticità.

## 2.2 Generatore

Per questo tipo di macchine non è stato possibile reperire in alcun modo dati e informazioni, né dal manutentore ne

dalla ditta costruttrice, che potessero indicare una strategia da seguire per la scelta della politica manutentiva. Non conoscendo le reali modalità di guasto, ne naturalmente le cause e gli effetti, si è tentato, tenendo per buona la manutenzione preventiva attuale indicata dal costruttore, di attuare una manutenzione aggiuntiva a questa, ma di tipo predittivo ed avente scopo conoscitivo dell'impianto, implementando una tecnica di monitoraggio che permetta di identificare le cause e gli effetti, le azioni da seguire e i controlli da effettuare nel caso di un evento di guasto.

Per cercare di conoscere i principali difetti e i componenti più propensi al guasto si è ricorso nuovamente alla letteratura.

### I guasti evidenziati sui motori elettrici

Molti dei guasti dei motori elettrici sono di natura meccanica. Dati storici sui guasti, rilevati dalla IEEE negli USA e riportati in fig.4, indicano che la rottura dei cuscinetti pesa per circa il 37% sul totale dei guasti dei motori. La seconda maggior causa è attribuita agli avvolgimenti statorici e rotorici, per circa il 33% del totale.

Entrambe le cause valgono perciò il 70% dei guasti sui motori elettrici.

### Guasti rilevati durante le manutenzioni o prove

L'Osservatorio IEEE ha effettuato un'attenta analisi dei guasti, giungendo ad identificare e classificare la serie di cause e concause alla base della generazione dei guasti.

Nel caso degli avvolgimenti statorici, l'interruzione dell'isolamento è la causa visibile, mentre le cause scatenanti sono il "normale invecchiamento", la presenza di "condensa", la "contaminazione", attribuibili al contesto esterno. Queste pesano complessivamente per il 35%.

Appare quindi evidente come la vita delle macchine possa essere prolungata con azioni corrette di manutenzione predittiva, attraverso il monitoraggio e l'attenzione alla percezione dei sintomi premonitori di guasto. Questi segnali, talvolta deboli, devono essere noti e rilevabili attraverso opportune metodologie e modalità operative, oggetto della manutenzione preventiva.

### 2.3 Piano manutentivo proposto

Precedentemente si è accertato che il generatore, per le macchine in esame, rappresenta un sistema critico e si so-

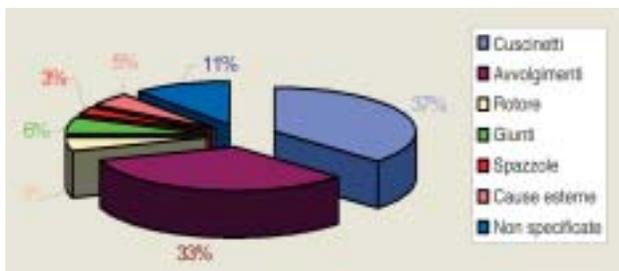


Fig. 4 Localizzazione guasti sui motori elettrici

no individuate le principali cause che potrebbero creare problemi, fra queste:

- *dalla letteratura*: probabili avarie sugli avvolgimenti e sui cuscinetti;

- *dall'analisi dei service report manutentivi*: avarie riscontrate sugli avvolgimenti, sul gruppo dei contatti rotanti (circuito di eccitazione del rotore), sull'unità di ventilazione dei contatti rotanti

*Sostanzialmente si ha quindi una forte convergenza fra i dati riportati in letteratura e quelli riscontrati in un anno di esercizio delle macchine.*

Si vuole ora proporre una tecnica di monitoraggio capace di evidenziare eventuali segnali deboli premonitori di un imminente guasto.

Si è pensato di utilizzare una manutenzione preventiva su condizione, ossia con monitoraggio del sistema ad intervalli di tempo variabili e dipendenti dai segnali registrati di volta in volta.

Nella seguente tabella sono riportati il tipo di controllo da effettuare e la relativa frequenza iniziale:

Componente	Tipo di controllo	Frequenza ispezione
Cuscinetti	Vibrazione	1000 ore
Avvolgimenti	Termografia Analisi isolante	1000 ore
Gruppo contatti rotanti	Termografia	

L'impostazione delle frequenze iniziali di ispezione deriva dall'assunto dell'impostazione del valore di affidabilità del sistema completo "generatore", all'80%. Per il calcolo si considera il tasso di guasto ricavato dalla letteratura risultato pari a 0,000224 guasti/ora; con tale valore, applicando la seguente:

$$t = \frac{-\lg R}{\lambda}$$

si perviene al limite di affidabilità imposto, dopo un intervallo di tempo di 1000 ore, che corrisponde proprio alla frequenza delle ispezioni riportato in tabella.

L'intervallo considerato presuppone 1000 ore di effettivo funzionamento, ossia un tempo dipendente dalle reali ore di utilizzo e rilevabile nell'unità di controllo posta a base torre delle macchine. Si fa notare che tale piano di monitoraggio, deve intendersi integrativo del piano manutentivo impostato dal costruttore del generatore stesso ed avente frequenza semestrale.

Il piano manutentivo è impostato per il periodo di un anno. Alla fine di questo periodo occorre effettuare una rivisitazione del piano stesso alla luce dei risultati ottenuti.

Riepilogando, per il sistema "generatore", si calendarizza la seguente manutenzione, in aggiunta degli interventi di manutenzione preventiva, con cadenza semestrale, prescritti dal costruttore che sono:

1. controllo connessione cavi;
2. controllo e lubrificazione cuscinetti;
3. controllo gruppo contatti rotanti;
4. sostituzione spazzole in carbonio;
5. verifica integrità e pulizia filtro ventola contatti rotanti; oltre ai seguenti impostati con cadenza pari a 1000 ore di funzionamento effettivo:
6. controllo termografico di tutte le parti elettriche (connessioni, interruttori, contatti rotanti)
7. controllo dello stato dell'isolante dei conduttori;
8. controllo vibratorio dei cuscinetti;

La procedura di monitoraggio, attraverso analisi vibratoria e termografica, si può successivamente estendere a tutti i componenti critici e non dell'aerogeneratore, come ad esempio a tutte le parti rotanti (cuscinetti albero lento, cuscinetti pompe idrauliche e ventilatori, cuscinetti moltiplicatore, rotismi moltiplicatore) e le parti elettriche ed elettroniche (interruttori, connessioni elettriche, verifica stato conduttori, controllo trasformatore, controllo schede elettroniche). Naturalmente, le frequenze delle ispezioni sono variabili a seconda del componente interessato, ma comunque calcolabili secondo la metodologia e lo schema utilizzato per il generatore.

L'analisi dei dati delle successive vibration history consente la formulazione di un programma di manutenzione predittiva basato sull'analisi delle vibrazioni.

La procedura di monitoraggio si dovrà sviluppare nelle fasi seguenti e dovrebbe coinvolgere per alcuni aspetti il costruttore:

#### **1) analisi dei parametri di progettazione e collaudo;**

ogni componente meccanico (moltiplicatore, generatore, sistema del passo), è sottoposto inizialmente dal produttore e successivamente dalla Vestas, ad una serie di collaudi per la verifica delle tolleranze, delle condizioni operative e dei range di utilizzo impostati in fase di progettazione. Questi limiti quantitativi, per ogni tipologia di macchina, sono riportati in apposita documentazione allegata ai manuali di utilizzo e manutenzione. La loro analisi è essenziale per definire la tipologia di strumentazione adottabile, le tarature e le impostazioni necessarie degli strumenti di diagnostica, il posizionamento dei sensori. In particolare, per la misura delle vibrazioni, è essenziale l'analisi suddetta in fase di collaudo al banco della macchina, in quanto permette di confrontare i parametri di partenza, macchina perfettamente funzionante, con quelli in esercizio al fine di verificare lo stato di salute della macchina;

#### **2) monitoraggio dei sistemi o dei componenti;**

Come già detto si adottano principalmente due tecniche di monitoraggio: la analisi delle vibrazioni e la termografia. A fianco a tali tecniche si può anche effettuare, attraverso l'utilizzo di un multimetro, l'analisi dell'isolante dei conduttori statorici e rotorici.

**-Vibrazioni.** La presenza di una qualsiasi anomalia in un sistema dinamico dà luogo ad una variazione dell'intensità vibratoria del sistema stesso. In alcuni casi posso-

no manifestarsi picchi di intensità tale da superare il “rumore di fondo” proprio del sistema.

Alcune fra le tecniche di analisi vantaggiosamente utilizzate per la misura delle vibrazioni dei cuscinetti e disponibili in commercio, sono:

- *Livelli globali*: questi indicatori sono facili da utilizzare per il monitoraggio in generale dell'usura dei cuscinetti a rotolamento con velocità di rotazione maggiori di 300 rpm. Le soglie di severità devono essere fissate per ogni velocità di rotazione e per ogni carico.

- *Defect factor*: questo specifico indicatore, avente una sola scala di valutazione indipendente dalla velocità di rotazione, può essere applicato a motori, pompe e ventilatori. Il Defect Factor mette in evidenza gli effetti delle cricche a fatica e delle usure estese degli elementi rotanti. Esso non è affidabile alle basse velocità di rotazione.

- *Kurtosis*: questo indicatore statistico è adatto per l'analisi delle difettosità a basse velocità di rotazione. Ma le macchine non devono essere sede di shocks continui o transienti (ingranaggi di forni rotanti, riduttori per cicli pesanti, ecc.). Normalmente questo indicatore deve essere usato con valori globali rms e segnali temporali.

- *Concatenazione dello spettro*: fornisce tutte le informazioni sulle vibrazioni della macchina. Attraverso la funzione di ricerca automatica delle frequenze dei difetti cursori armonici e delle bande laterali è possibile individuare i difetti dei cuscinetti a partire dallo stadio primitivo di evoluzione.

- *Spettro envelope*: questo metodo di calcolo deve essere effettuato su di una zona di risonanza dello spettro della vibrazione (esso deve operare su di uno spettro a larga banda). Il metodo fornisce buoni risultati per il 90% dei casi analizzati e non lavora correttamente per il restante 10% dei casi a causa di: errato filtraggio dell'area di calcolo, numero insufficiente di shocks in alta frequenza.

- *Metodi indiretti*: l'analisi delle scatole ingranaggi, attraverso l'elaborazione delle frequenze di ingranamento, può fornire informazioni complementari sui meccanismi di usura dei cuscinetti. In particolare, attorno alla frequenza di ingranamento, si manifestano le componenti della modulazione soprattutto quando il gioco del cuscinetto diventa importante. I risultati delle diagnosi migliorano quando si prende in considerazione la struttura meccanica nella sua interezza.

- **Termografia**. Il principio si basa sulla misura della distribuzione dell'energia irradiata da una superficie, correlata alla variazione di temperatura e/o emissività superficiale dell'oggetto in esame. Un'anomalia in tale distribuzione di temperature è indicativa di un possibile difetto.

Il metodo termografico trova oggi applicazione in numerosi settori, tra i quali vi è sicuramente quello della manutenzione, dove tale tecnica viene utilizzata nelle seguenti applicazioni:

- Ispezione di linee elettriche e sottostazioni.
- Ispezione di quadri elettrici per individuazione punti caldi.



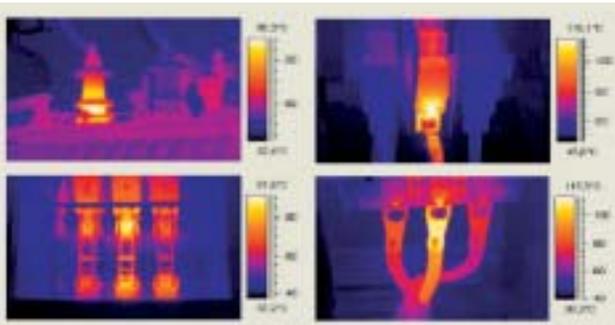


Fig. 5 Applicazione della termografia in ambito elettrico

- Ispezione di componenti elettrici.
- Individuazione di surriscaldamento per usura, disallineamento o mancanza di lubrificazione di cuscinetti e motoriduttori
- Controllo temperatura dei componenti di centrali oleodinamiche (olio, pompa, motore, valvole, accumulatori, filtri, ecc.).
- Controllo di organi meccanici in movimento ed individuazione delle zone calde causa attrito o mancanza lubrificazione.
- Quadri di comando e trasformatori
- Azionamenti di motori elettrici

### 3) confronto dei dati;

lo stato di salute di una specifica macchina o componente deve essere valutato confrontando le misure ottenute sul campo attraverso l'utilizzo di apposita strumentazione, con i limiti quantitativi imposti in fase di progettazione;

**4) registrazione dati e anomalie in un database;** è di fondamentale importanza per l'applicazione corretta delle metodiche manutentive su condizione la realizzazione di un database che inglobi tutte le informazioni rilevate dall'impianto. Con i dati ricavati dal monitoraggio è possibile modificare gli intervalli delle future ispezioni, predisporre la sostituzione di componenti, avere in qualsiasi momento un trend di dati confrontabili, implementare ed ottimizzare il sistema di manutenzione.

## Conclusioni

Vista la necessità di realizzare una metodica manutentiva capace di limitare gli interventi a guasto e quindi di aumentare la disponibilità di tali macchine si propone, come indispensabile, la realizzazione di una attività di monitoraggio da affiancare alla normale manutenzione preventiva a cadenza semestrale attualmente in atto in un rapporto di global service fra fornitore e gestore.

La metodica proposta tende ad allargare la conoscenza sulle condizioni d'impiego e di deterioramento e vuole essere adattabile alle specifiche condizioni operative e di funzionamento delle macchine di un parco eolico.

Una tale manutenzione, incentrata sull'affidabilità e sulla disponibilità delle macchine se applicata correttamente nei termini e nei modi specificati è capace di:

- fornire maggiori informazioni sulle cause e sugli effetti dei guasti, rendendo più agevole la gestione dell'impianto,
- garantire una diminuzione delle anomalie derivanti dal naturale deterioramento degli organi di una macchina aumentando di conseguenza la disponibilità,
- garantire una maggiore efficienza e integrità di tutti i componenti delle macchine in questione,
- diminuire il numero e i tempi di intervento a guasto,
- diminuire i costi di manutenzione. Tutto ciò in sintonia con le strategie aziendali tese all'ottimizzazione dei costi della manutenzione ed alla massimizzazione della disponibilità delle macchine di produzione. ■

## Bibliografia

A.I.MAN (Associazione Italiana di Manutenzione) XX Congresso Nazionale "Strumenti e Partners per una Manutenzione di Eccellenza" Bologna, 20-21 Febbraio 2003

A. Baldin-L.Furlanetto-A.Roversi-F.Turco: "Manuale della manutenzione degli impianti industriali" a cura di A. Roversi

L.Furlanetto: "Manuale della manutenzione degli impianti industriali e dei servizi" a cura di L.Furlanetto

Enciclopedia di direzione e organizzazione aziendale: sezione II - volume VII - tomo II: "Gli impianti industriali: la manutenzione e il rinnovo" a cura di A. Baldin

F.Galetto: "Affidabilità: teoria e metodi di calcolo" volume primo.

"Impiantistica italiana" n° 1 Gennaio/Febrero 2003

Norme UNI 10366: "Criteri di progettazione della manutenzione"

S. Mura - P. Mameli "Un modello per l'analisi affidabilistica, a mezzo software, di un impianto eolico di nuova generazione partendo dal valore del tasso di guasto dei suoi componenti principali" *Manutenzione Tecnica e Management*, aprile 2004

Salvatore Mura, si laurea a Cagliari in Ingegneria Meccanica nel 1971. Unitamente all'attività accademica, svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica in qualità di professore associato titolare dei corsi di «Gestione degli Im-



pianti Industriali» e «Manutenzione e Sicurezza», svolge attività libero professionale come consulente e progettista nel settore degli Impianti civili ed industriali e nel campo del management energetico.

A.Soro: neolaureato in ingegneria meccanica presso l'Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica. Stage presso Enel Green Power

## gli Autori