

# INTRODUZIONE ALLA DIAGNOSTICA DI MACCHINE E AZIONAMENTI ELETTRICI

Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'informazione  
Università di Pavia  
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

## Programma e modalità d'esame

Il corso è da 3 CFU, circa 30 ore tra lezioni e possibili seminari, indicativamente 2 ore alla settimana, più qualche recupero.

Può essere inserito nel piano di studi come insegnamento a sé stante.

L'esame consiste in una prova orale.

Il materiale didattico è reso disponibile tramite:

- [www.unipv.it/dmae](http://www.unipv.it/dmae) (attualmente aggiornato all'a.a. 2016/17);
- Piattaforma KIRO (le dispense presenti sono aggiornate all'a.a. 2016/17; verranno eventualmente aggiornate quest'anno di volta in volta, poco prima o poco dopo ciascuna lezione).

2

L. Frosini

## Indice

- ✚ Cos'è la diagnostica
- ✚ Gli oggetti della "nostra" diagnostica
- ✚ Diagnostica e protezione
- ✚ Diagnostica e monitoraggio
- ✚ Diagnostica e manutenzione
- ✚ Manutenzione reattiva, preventiva, predittiva

3

L. Frosini

## Cos'è la diagnostica?

La diagnostica è una procedura di "traduzione" delle informazioni derivanti dalla misura di parametri e dalla raccolta di dati relativi a una macchina (o un sistema) in informazioni sui guasti effettivi o incipienti della macchina stessa.

In altri termini, la diagnostica è il complesso delle attività di analisi e di sintesi che, utilizzando i rilievi di determinate grandezze fisiche, caratteristiche della macchina sorvegliata, consentono di trarre informazioni significative sulle condizioni della macchina stessa e sulla relativa tendenza nel tempo, per valutazioni e previsioni sulla sua affidabilità a breve e lungo termine.

Gli obiettivi della diagnostica sono:

- **individuazione** ("detection"),
  - **localizzazione** ("isolation"),
  - **identificazione** ("identification")
- } del guasto.

4

## Obiettivi della diagnostica

Il problema generale della diagnostica è individuare se un guasto specifico è presente o meno sulla base di informazioni disponibili, preferibilmente senza ispezioni intrusive della macchina.

Questo problema può essere descritto con un approccio statistico come un problema di test delle ipotesi:

- Ipotesi nulla  $H_0$ : il guasto A è presente.
- Ipotesi alternativa  $H_1$ : il guasto A non è presente.

Il test delle ipotesi è soggetto a due tipi di errore:

- errore di tipo I: si verifica quando l'ipotesi nulla  $H_0$  è respinta ma in verità tale ipotesi è vera. Sulla base delle informazioni disponibili, si decide che il guasto A non è presente, ma in realtà il guasto A è presente: la macchina non viene fermata e riparata prima che il guasto si manifesti effettivamente.

➔ Possibili conseguenze catastrofiche in caso di guasto non previsto.

5

## I passi della diagnostica

- errore di tipo II: si verifica quando l'ipotesi nulla  $H_0$  è accettata ma in verità tale ipotesi è falsa. Sulla base delle informazioni disponibili, si decide che il guasto A è presente, ma in realtà il guasto A non è presente: la macchina viene fermata e riparata inutilmente.

➔ Inutili spese economiche.

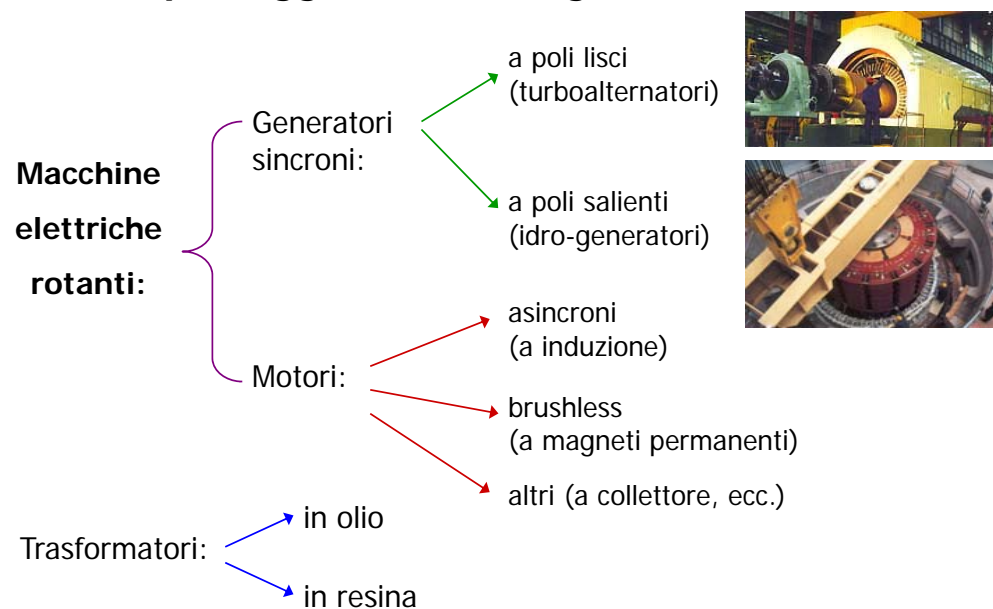
Un programma di diagnostica si sviluppa secondo i seguenti passi:

- **acquisizione** dati ("data acquisition"),
- **elaborazione** dati ("data processing"),
- presa di **decisione** ("decision-making").

I metodi per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati e per la scelta della "soglia" che differenzia la situazione di "guasto" dalla situazione di "sano" per un componente possono influenzare pesantemente le probabilità di commettere un errore in fase di presa di decisione.

6

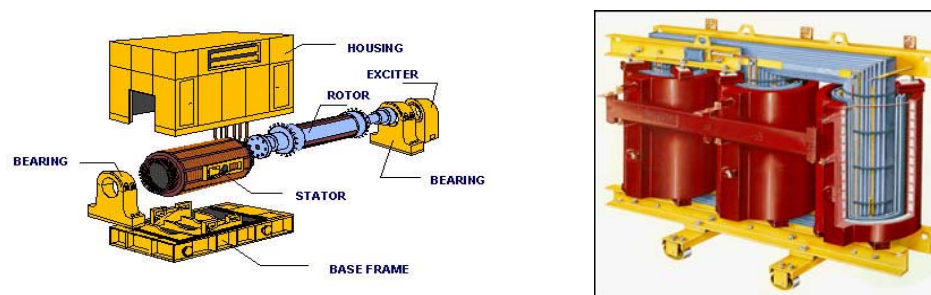
## Principali oggetti della diagnostica elettrica:



7

## Di quali parti sono composte le macchine elettriche?

- **MECCANICA**: carcassa, supporti, cuscinetti;
- **MAGNETICA**: nucleo (lamierini);
- **ELETTRICA**: avvolgimenti;
- **ISOLAMENTO**: nastrature, resine, vernici, olio;
- **RAFFREDDAMENTO**: gas (aria, idrogeno), liquidi (acqua, olio).



8

## Con quali materiali sono fatte le macchine elettriche? (1/4)

**Ferro** di tipo "strutturale" (acciaio): carcasse, corpo del rotore, alberi, cuscinetti, flange, scudi, ecc.

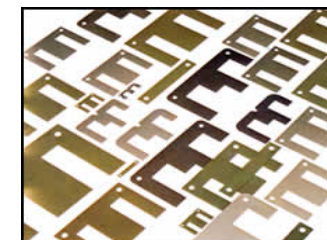
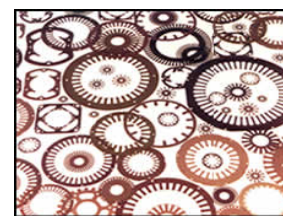


Per alcune di queste parti possono essere utilizzati anche alluminio e ghisa.

9

## Con quali materiali sono fatte le macchine elettriche? (2/4)

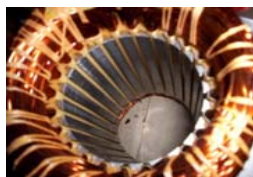
**Ferro** di tipo magnetico (ferro-silicio): lamierini per il nucleo.



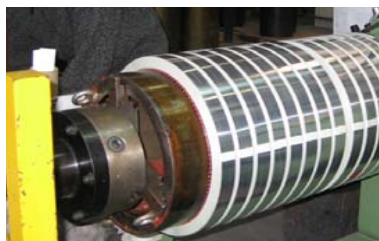
10

## Con quali materiali sono fatte le macchine elettriche? (3/4)

**Rame:** avvolgimenti, barre di rotore.



**Alluminio:** avvolgimenti, barre di rotore.



11

## Con quali materiali sono fatte le macchine elettriche? (4/4)

**Materiali isolanti:**

carta, resine, mica, poliammide, olio, ...



12



## La diagnostica delle macchine elettriche rotanti

**IMPORTANTE:** Il funzionamento delle macchine elettriche rotanti non può essere considerato separatamente da:

- il funzionamento delle macchine meccaniche ad esse collegate lungo la linea d'asse (turbine o altri motori primi per i generatori; pompe, ventilatori o altri tipi di carichi per i motori);
- il tipo di accoppiamento meccanico (giunti, ingranaggi, cinghie, ecc.);
- l'eventuale sistema di controllo ad esso collegato (inverter, ecc.).

Questi sistemi meccanici ed elettronici possono:

- indurre guasti nella macchina elettrica;
- provocare cambiamenti in alcune grandezze della macchina elettrica (ad es. nelle correnti), anche in assenza di guasto;
- essere soggetti loro stessi a guasti indotti dalla macchina elettrica.

13

## Diagnostica e ...

Il concetto di diagnostica è legato ai concetti di:

- ⊗ AFFIDABILITÀ ("reliability")
- ⊗ PROTEZIONE ("protective relaying")
- ⊗ MANUTENZIONE ("maintenance")
- ⊗ MONITORAGGIO DELLE CONDIZIONI ("condition monitoring")

Sul concetto di AFFIDABILITÀ torneremo la prossima lezione.

Le apparecchiature di PROTEZIONE rappresentano una prima forma di monitoraggio: sono progettate per intercettare i malfunzionamenti ("**fault**") quando questi accadono e intraprendere azioni per minimizzare i danni prima che avvenga il guasto vero e proprio ("**failure**").

14

## Diagnostica e protezione (1/4)

La PROTEZIONE delle macchine e dei sistemi elettrici è affidata agli **apparecchi di manovra**, in grado di effettuare la manovra di interruzione della corrente.

Per svolgere la funzione completa di protezione, un apparecchio di manovra deve essere associato ad un altro componente, capace di percepire la presenza di una condizione di funzionamento anormale e di comandare, di conseguenza, l'apparecchio di manovra stesso all'intervento.

Il **relè** svolge tale funzione: esso costituisce l'elemento sensibile del sistema di protezione. Il suo compito è tenere sotto controllo una grandezza indicativa delle condizioni di funzionamento del sistema (tensione, corrente, temperatura, ecc.) e comandare l'intervento di un opportuno apparecchio di manovra, quando tale grandezza assume valori fuori dai valori ammissibili.

15

## Diagnostica e protezione (2/4)

In generale, il segnale fornito dal trasduttore sarà nella forma di una corrente o una tensione e verrà interpretato dal relè come accettabile o non accettabile, a seconda del **valore soglia** prefissato dal progettista del relè o dal responsabile manutenzione.

Se viene superato il valore soglia prefissato, il relè comanderà un'azione elettromeccanica, che spesso avrà come risultato la sconnessione della macchina elettrica, e segnalerà che il malfunzionamento (o il guasto) è stato identificato.

Questa è la visione più semplice dei dispositivi di protezione.

Molte apparecchiature di protezione hanno un'ampia gamma di funzioni e sono programmabili per permettere criteri più sofisticati per avviare procedure di interruzione. Ad es., è opportuno bloccare il riavviamento di un motore fino a quando questo si è raffreddato a un livello accettabile.

16

## Diagnostica e protezione (3/4)

Alcuni tipi di sistemi di protezione sono:

- protezione contro i guasti di terra,
- protezione di sovracorrente,
- protezione di minima/massima tensione,
- protezione di sovravelocità,
- protezione contro eccessiva vibrazione,
- protezione di sovraccarico termico.



È importante notare che la protezione è progettata per agire solo DOPO che il malfunzionamento è accaduto, quindi non ha una vera e propria funzione "preventiva": è come l'ambulanza ai piedi di un dirupo, non la recinzione che impedisce di cadere! Tuttavia, proprio come un'ambulanza, spesso il sistema di protezione permette di salvaguardare le macchine da danni ulteriori.

17

## Diagnostica e protezione (4/4)

L'azione esecutiva del sistema di protezione è in genere la sconnessione della macchina dall'alimentazione: questa azione è accettabile se la macchina è facilmente dissociabile dal processo in cui è coinvolta (ossia, se è presente una riserva) o se lavora isolata.

Se invece la macchina è vitale per il funzionamento di un processo, allora si avrà una fermata non programmata dell'intero processo. Le perdite derivanti da questa fermata potranno essere significativamente maggiori di quelle risultanti da una fermata programmata.

Inoltre, in genere il costo della macchina è inferiore al costo provocato da una fermata dell'impianto. Per questo la manutenzione è più efficace quando è pianificata per revisionare molte macchine nel corso di una sola interruzione.

Pertanto, il MONITORAGGIO dovrebbe avere come obiettivo non la singola macchina, ma l'intera salute del processo di cui essa fa parte.

18

## Diagnostica e monitoraggio (1/2)

Per MONITORAGGIO delle condizioni si intende la continua valutazione della salute dell'impianto e delle apparecchiature durante tutta la loro vita utile. Il monitoraggio e la protezione sono ovviamente tra loro collegati, ma l'approccio alla realizzazione di ciascuno di essi è piuttosto diverso.

**Il monitoraggio dovrebbe essere progettato al fine di "anticipare" i malfunzionamenti, mentre la protezione è essenzialmente retroattiva.**

Il monitoraggio può, in molti casi, avere anche lo scopo di fornire una prima protezione, ma la sua reale funzione deve essere sempre quella di tentare di riconoscere lo sviluppo di malfunzionamenti in uno stadio precoce. Questo avviso anticipato è ovviamente desiderabile, perché dà al personale della manutenzione maggiore libertà di programmare le fermate nel modo più conveniente, col risultato di diminuire i tempi morti e le perdite economiche.

19

## Diagnostica e monitoraggio (2/2)

Abbiamo appena detto che gli avvisi anticipati di malfunzionamenti forniti dal monitoraggio sono "ovviamente" desiderabili.

Ma lo sono veramente?

Dobbiamo giustificare questa affermazione, perché la realizzazione di un sistema di monitoraggio può comportare una spesa considerevole.

Ci sono altre domande a cui rispondere.

Per esempio, una volta che si è scelto di imbarcarsi in un programma di monitoraggio, quale forma si dovrebbe scegliere? Un monitoraggio intermittente, o regolare a intervalli prefissati, o continuo?

Se si impiega una programma di manutenzione a intervalli prefissati, è necessario monitorare "tutto"?

Il monitoraggio può generare una grande quantità di dati: come possono essere usate queste informazioni al meglio per minimizzare future spese?

20

## Diagnostica e manutenzione

Infine, e forse quel che più importa, quanto è necessario spendere per il monitoraggio al fine di renderlo veramente efficace?

Ovviamente non è facile rispondere a queste domande, ma durante il corso cercheremo di dare alcune indicazioni, considerando le spese per la manutenzione, riparazione e sostituzione delle macchine a cui le aziende devono far fronte e i costi che le diverse strategie di manutenzione implicano.

Si possono distinguere quattro strategie di manutenzione:

- 1) Manutenzione REATTIVA (o ad evento);
- 2) Manutenzione PREVENTIVA (o periodica);
- 3) Manutenzione PREDITTIVA (o basata sulle condizioni);
- 4) Manutenzione PRO-ATTIVA.

## Manutenzione reattiva



La manutenzione REATTIVA interviene in seguito alla segnalazione di un malfunzionamento della macchina o ad un evento più grave (guasto) col conseguente arresto della stessa.

La manutenzione reattiva comporta spesso dei costi molto elevati, sia per la mancata produzione sia per la riparazione della macchina stessa: per esempio, un guasto di un cuscinetto, con conseguente blocco dell'albero che supporta, può danneggiare anche l'albero e i supporti, trasformando un intervento di minore entità in un intervento impegnativo in termini di costi e di tempi.

La manutenzione reattiva può essere efficace solo se c'è una notevole ridondanza e se l'arresto di una singola macchina non provoca il guasto del sistema completo.

## Manutenzione preventiva

La manutenzione PREVENTIVA – intesa in senso stretto – individua i componenti critici di una macchina e, secondo uno scadenziario, provvede a sostituirli indipendentemente dalle loro condizioni.

Pertanto, essa talvolta interviene su componenti che sono ancora ben lontani dalla fine della loro vita operativa.

In realtà, col termine “manutenzione preventiva” si intende anche la pianificazione periodica delle seguenti attività:

- controlli ordinari: generalmente un'ispezione visiva della macchina;
- revisioni parziali, in cui si eseguono attività diagnostiche e un controllo visivo accurato (senza lo sfilamento di parti rotanti, nel caso di motori o generatori);
- revisioni generali, con sfilamento dei rotori, attività diagnostiche diffuse e grossi interventi manutentivi.

## Manutenzione preventiva

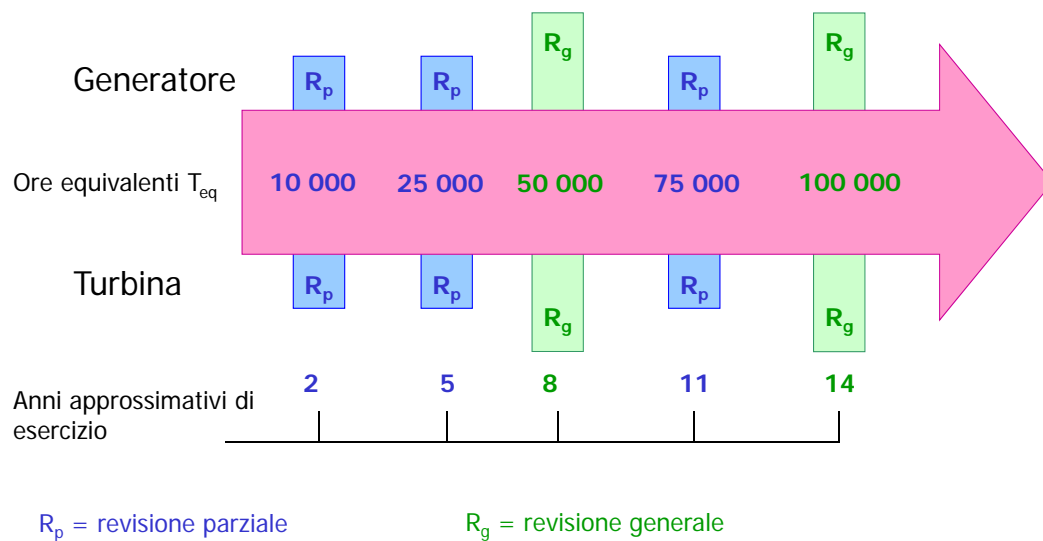
Tali attività sono in genere pianificate sulla base delle cosiddette ore equivalenti. Per le macchine elettriche rotanti, quali i generatori delle centrali, viene valutato in modo convenzionale un numero di ore  $T_{avv}$  di esercizio equivalente agli avviamenti dei gruppi (20 h/avviamento per i turboalternatori, 10 h/avviamento per gli idro-generatori). Tale numero, moltiplicato per il numero degli avviamenti  $n_{avv}$ , viene sommato alle ore reali di esercizio  $T_{es}$  per ottenere le ore equivalenti totali di esercizio:

$$T_{eq} = T_{es} + T_{avv} * n_{avv}$$

Quando le ore equivalenti accumulate hanno raggiunto determinati valori, si eseguono le attività di manutenzione precedentemente descritte.

In generale, per ridurre le ore di fermata di un gruppo al minimo indispensabile, si cerca di coordinare le attività di manutenzione tra motore primo (turbina) e generatore.

## Manutenzione preventiva



25

## Manutenzione preventiva



Nel caso di motori ritenuti "critici" all'interno di un processo a ciclo continuo, quale ad es. una raffineria, si effettuano interventi di manutenzione preventiva (revisioni) in occasione delle fermate programmate degli impianti (generalmente ogni 4 o 5 anni):

- smontaggio completo del motore con estrazione del rotore (controllo barre);
- pulizia parti meccaniche e sostituzione cuscinetti a rotolamento (controllo usura tolleranze ed eventuale sostituzione dei cuscinetti a bronzine);
- eventuale pulizia degli avvolgimenti e ripristino verniciatura;
- controllo chiusura di cava;
- controllo isolamento elettrico;
- prova a vuoto su banco o in campo con rilievo vibrazioni.

26

## Manutenzione preventiva

I rilievi effettuati durante le revisioni sono utilizzati per aggiornare la pianificazione degli interventi di manutenzione preventiva.

Altri interventi di manutenzione preventiva effettuati più frequentemente sui motori sono:

- lubrificazione (olio, grasso) dei cuscinetti a rotolamento secondo scadenze in ore di marcia, come da indicazione del costruttore;
- pulizia dei fasci tubieri dei refrigeranti aria/aria, con cadenza generalmente annuale.

27

## Manutenzione preventiva

La manutenzione preventiva presenta due aspetti negativi:

- per ovvi motivi economici, gli interventi di manutenzione non possono essere molto frequenti (alcuni distano diversi anni l'uno dall'altro);
- durante le fasi di revisione si cerca di effettuare tutte le attività preventive possibili, anche se non strettamente indispensabili o giustificate da danni reali o incipienti: ciò ha come conseguenza costi elevati e tempi lunghi durante le fasi manutentive.

28

## Manutenzione predittiva

La manutenzione PREDITTIVA, per mezzo di misure e analisi effettuate sulla macchina, intende determinare col massimo grado di affidabilità possibile le reali condizioni di funzionamento, sia globali sia dei singoli componenti.

La manutenzione predittiva consente di riconoscere con relativo anticipo i componenti che iniziano a degradarsi o l'insorgere di malfunzionamenti, permettendo di pianificare gli interventi compatibilmente con la produzione e dando il tempo di approvvigionare quanto necessario.

Nel caso di processi complessi, il monitoraggio di alcune parti critiche dell'impianto può portare benefici significativi.

Questi benefici derivano da un aumento dell'efficienza dell'impianto, da una riduzione delle perdite per fermate e da una riduzione dei costi di sostituzione.

## Manutenzione predittiva

L'operatore dell'impianto può inoltre essere continuamente aggiornato riguardo le prestazioni della sua macchina. Questo lo aiuterà a migliorare la disponibilità operativa e l'efficienza dell'impianto.

Inoltre occorre considerare che **una migliore manutenzione produce una maggiore sicurezza**.

Nel lungo termine, il monitoraggio permette all'operatore di costruire una base di dati che può essere utilizzata per un'analisi di tendenza e per apportare ulteriori miglioramenti nella programmazione della manutenzione.

Tali informazioni possono essere anche impiegate vantaggiosamente dai costruttori delle macchine e dai progettisti dell'impianto al fine di migliorare ulteriormente l'affidabilità dei propri prodotti.

## Manutenzione predittiva

La manutenzione predittiva può richiedere un monitoraggio continuo, ma anche semplicemente settimanale, mensile, semestrale, a seconda del tipo di grandezza rilevata e del tipo di macchina.



### IMPORTANTE:

Non bisogna trascurare un altro tipo di monitoraggio, ossia la costante attenzione da parte del personale operativo nella conduzione delle macchine: molte segnalazioni (temperature, rumori anomali, vibrazioni) portano a controlli puntuali e spesso a interventi manutentivi che possono essere catalogati come di tipo predittivo.

## Manutenzione predittiva e preventiva

Generalmente la soluzione adottata per la manutenzione è un compromesso tra quella predittiva e quella preventiva, calibrando quest'ultima anche grazie alle misure effettuate per la manutenzione predittiva.

La manutenzione preventiva verrà applicata ai componenti che per scelta o per sicurezza si continuerà a sostituire su base temporale (ad es. componenti di basso costo quali i cuscinetti a rotolamento).

L'efficacia della manutenzione predittiva dipende anche dalla quantità di dati raccolti, dalla frequenza delle misure e dai dati costruttivi dei macchinari che si hanno a disposizione.

La spesa per il monitoraggio dipende dal valore del processo in cui la macchina lavora: la sua stima varia tra l'1% e il 10% del valore capitale dell'impianto da monitorare.



## Manutenzione pro-attiva

La manutenzione pro-attiva, detta anche manutenzione migliorativa, è una politica di manutenzione che prevede interventi di revisione finalizzati a migliorare il valore o la prestazione di un sistema o di una parte di esso.

Questa azione manutentiva non è subordinata a malfunzionamenti, ma deriva da esigenze di miglioramento espresse sia dall'utilizzatore sia dal manutentore, concorrendo ad aumentare il valore del sistema e a migliorarne le prestazioni.

In questo punto risiede la differenza rispetto agli altri tipi di manutenzione, che hanno come obiettivo il ripristino delle condizioni di operatività precedenti il malfunzionamento.

## Cosa e quando monitorare



La domanda "COSA monitorare?" ha due implicazioni: quali macchine e quali parametri.

Riguardo QUALI MACCHINE, una volta l'idea era che difficilmente macchine elettriche di potenza inferiore a 20 kW beneficiassero del monitoraggio. Tuttavia, vi sono eccezioni date da piccole macchine che hanno una funzione vitale nelle prestazioni di un sistema più ampio.

Le macchine che lavorano a supporto di centrali elettriche (motori che azionano pompe di acqua alimento e di acqua di raffreddamento, e ventilatori per raffreddamento ad aria forzata) traggono benefici dal monitoraggio, sebbene non necessariamente da un monitoraggio continuo, se esiste un elevato margine di componenti di riserva.

Bisogna inoltre tener conto che un monitoraggio ben riuscito può permettere una grande riduzione dei componenti di riserva a magazzino.

## Cosa e quando monitorare

Macchine come i turboalternatori necessitano invece un monitoraggio continuo, perché una loro fermata non programmata provocherebbe un ingente danno economico per la perdita di produzione di energia.

Pertanto, ci sono macchine a cui il monitoraggio è sempre applicabile, mentre per altre macchine occorre fare una valutazione accurata prima di decidere.

Bisogna infatti tener conto della complessità del sistema di monitoraggio e del costo per il suo mantenimento:

una scarsa progettazione del sistema di monitoraggio o un suo scarso mantenimento possono dare origine a un gran numero di falsi allarmi, che alla fine renderebbero inutili (o addirittura dannose) le informazioni rilevate dal sistema stesso.

## Cosa e quando monitorare

Riguardo QUALI PARAMETRI, vedremo che ci sono alcune grandezze che sono da decenni tradizionalmente monitorate (correnti, tensioni, temperature, livelli di vibrazione dei cuscinetti) e altre che sono state introdotte più recentemente, grazie alla disponibilità di nuovi sensori (flusso disperso).

La domanda "QUANDO monitorare?" richiede considerazioni riguardo la convenienza economica e considerazioni di sicurezza che passano sopra alle valutazioni economiche.

La valutazione della convenienza economica è piuttosto complessa, ma in generale il monitoraggio è utile quando il risparmio netto annuale aumenta grazie al suo impiego.

Bisogna tener conto che i costi del monitoraggio includono: l'indagine iniziale, i costi di acquisto e installazione dei sensori, l'addestramento del personale, i costi associati all'acquisizione dei dati.