

# Tesi

Giacomo Caiazzo

February 2023

## 1 Introduzione

L'industria 4.0 è una realtà che si fonda su due elementi cardine: la digitalizzazione e l'interconnessione dei diversi dispositivi presenti all'interno dell'ambiente industriale. L'obiettivo che si prefigge quindi l'industria 4.0 è quello di costruire ambienti industriali all'interno dei quali poter controllare ed ottimizzare ogni aspetto del processo produttivo e dove avere dispositivi capaci di comunicare e scambiare informazioni tra loro senza l'intervento di operatori umani.

### 1.1 La manutenzione predittiva

Nel contesto appena descritto, un ruolo di primaria importanza è ricoperto dalla manutenzione predittiva. Questa differisce essenzialmente dalla manutenzione preventiva, che si basa sull'esecuzione di attività di controllo e di manutenzione periodiche programmate al fine di evitare guasti futuri. La manutenzione predittiva, al contrario, si fonda sull'idea di individuare sul nascere eventuali problemi legati al funzionamento di diverse tipologie di macchinari, che se dovessero perdurare nel tempo potrebbero portare al danneggiamento degli stessi. Si parla quindi di una strategia che va ad abbattere notevolmente i costi legati ad operazioni di controllo periodiche, e che soprattutto può essere eseguita da sensori che siano in grado di riconoscere quando un macchinario o un componente si trovano a lavorare in condizioni di funzionamento anomalo.

## 2 Il monitoraggio dei motori elettrici

Il focus principale di questa tesi è la manutenzione predittiva dei motori elettrici, e in particolare modo dei motori ad induzione, più comunemente conosciuti come motori asincroni. I motori ad induzione rappresentano infatti uno dei punti focali dell'industria moderna, dal momento che circa il 90% dei processi industriali dipende da essi. Risulta quindi di fondamentale importanza monitorare le condizioni di salute dei motori. In funzione della natura della condizione di guasto o di malfunzionamento, è possibile operare una prima distinzione tra problemi di natura meccanica e di natura elettrica, mentre in base a dove è localizzato il guasto tra guasti al rotore o allo statore. L'insorgere di una di queste condizioni

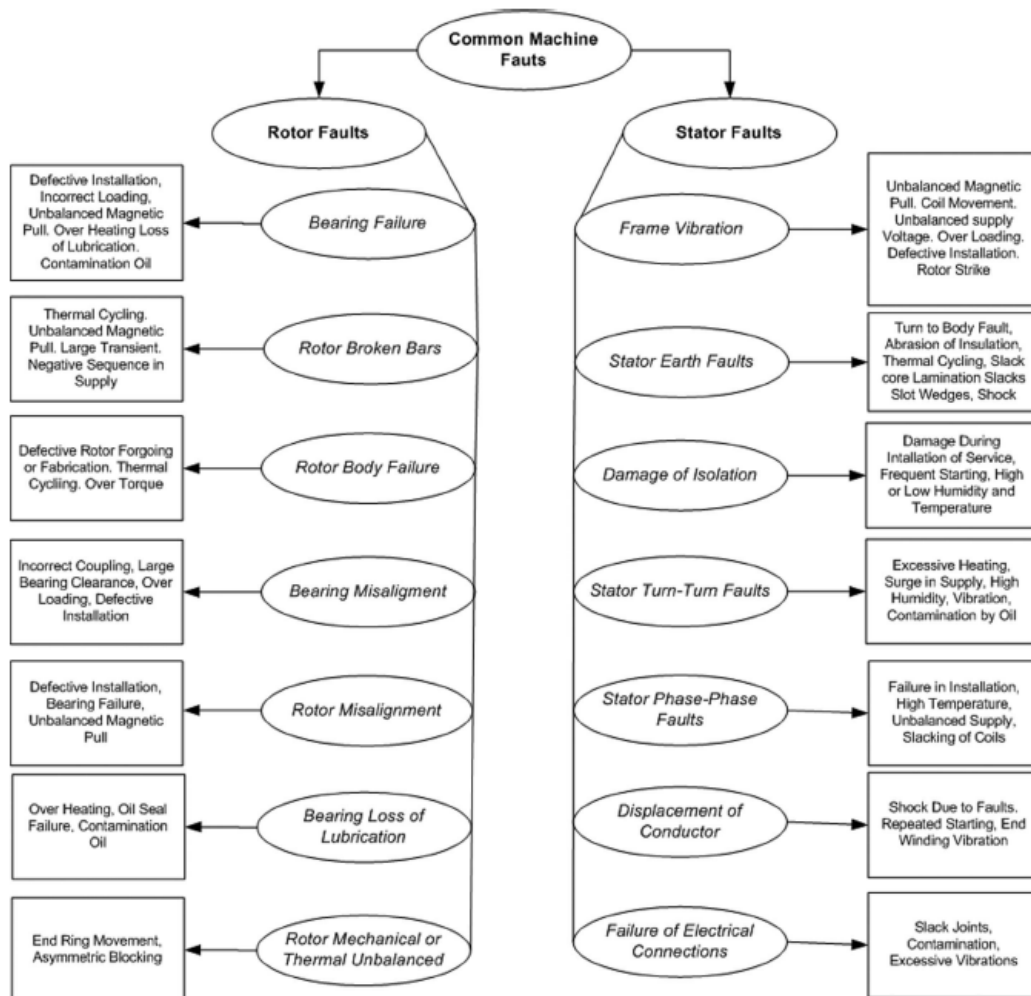


Figure 1: Tipologie di guasto e le loro cause

potrebbe portare il motore a lavorare in regime di funzionamento anomalo, causando gravi perdite in termini di rendimento e danneggiandone le componenti. Inoltre, nel caso peggiore, il motore potrebbe incorrere in un malfunzionamento

catastrofico. Bisogna quindi individuare le principali categorie di guasti che possono verificarsi all'interno di un motore chiamato ad operare per lunghi periodi di tempo. Tra queste, quelle di maggiore interesse sono:

- Danneggiamento dei cuscinetti: possono essere causati da vari fattori, come mancanza di lubrificazione, stress meccanici sulle sfere dei cuscinetti che possono portare al danneggiamento degli elementi rotanti.
- Danneggiamento della pista interna ed esterna
- Guasto dello statore o del rotore

Questi guasti porterebbero ad una serie di effetti negativi, quali ad esempio una maggiore quantità di calore generato, un maggior consumo di energia o un minor valore di coppia d'uscita. Risulta quindi essenziale essere in grado di monitorare le condizioni di salute di un motore, così da essere in grado di intervenire in maniera tempestiva qualora esso si trovasse a lavorare in condizioni non ordinarie e contenere la natura del danno. Definito quindi il target principale del lavoro di tesi, bisogna capire di quali strumenti abbiamo bisogno per effettuare la manutenzione predittiva dei motori elettrici.

## 2.1 Analisi delle vibrazioni

Sono diverse le tecniche che possono essere utilizzate per il monitoraggio delle condizioni di salute e di funzionamento dei motori elettrici. Una delle più popolari è la MCSA (motor current signature analysis). Questa tecnica si basa sul monitoraggio della corrente di statore del motore, e si propone di associare allo specifico guasto preso in esame un certo valore di segnale di corrente misurato. Il segnale viene processato attraverso la trasformata di Fourier veloce (FFT): analizzando lo spettro del segnale è possibile individuare quale condizione di guasto o di malfunzionamento insorge nel motore, in quanto ad ognuna di queste corrisponde una "firma" in termini di corrente che presenta delle armoniche all'interno dello spettro. Queste firme dipendono sia dalle caratteristiche del motore che dalle sue condizioni di funzionamento. Si tratta di una tecnica che ha dimostrato di poter ottenere buoni risultati, ma che presenta un grande svantaggio: per ogni specifica condizione di funzionamento anomalo è richiesta strumentazione dedicata ed un algoritmo per il riconoscimento automatico della stessa.

Un'altra tecnica adoperata nell'ambito della manutenzione predittiva è la vibration signature analysis (VSA); quasi il 100 % dei guasti nei motori si riflette infatti in variazioni nelle vibrazioni. La VSA, in maniera simile alla MCSA, ha lo scopo di riconoscere le condizioni di funzionamento anomalo del motore, e di associare a queste una firma in termini di vibrazioni a cui esso è soggetto. Ogni motore è caratterizzato da una vibrazione propria, e l'analisi spettrale di tali vibrazioni consente di monitorare le condizioni di salute del motore. L'analisi nel dominio della frequenza risulta estremamente efficace, in quanto rispetto a quella nel dominio del tempo fornisce informazioni più dettagliate riguardo

lo stato di funzionamento del motore. Come mostrato nella tabella 1, sono state stabilite delle correlazioni tra alcune specifiche componenti armoniche e possibili condizioni di guasto. Anche in questo caso, quindi, viene adoperata la FFT come strumento matematico di elaborazione dei dati raccolti, ovvero misure di accelerazione lungo i 3 assi. La tecnica che è stata scelta per il lavoro di tesi è la VSA. Pertanto, per eseguire delle misure che ci dessero informazioni utili riguardo lo stato di funzionamento del motore, è stato necessario l'utilizzo di un sensore che fosse in grado di misurare valori di accelerazione, dunque che fosse dotato di un accelerometro.

Current Vs Vibration Signature Analysis		
Details	CSA	VSA
Easy radial rotor displacement interpretation	✓	
Determining electrical faults	✓	
Implementation in harsh environment	✓	
Cost effective	✓	
Early mechanical fault identification		✓
Distinguish between several bearings in drive train		✓
Favorable signal to noise ratio		✓

Figure 2: Tabella 1 Current vs Vibration signature analysis

## 2.2 Kit di sviluppo STM

Per eseguire le misure di accelerazione è stato utilizzato un kit prodotto da STMicroelectronics, lo "STEVAL-BFA001V2B". Si tratta di un kit di progettazione pensato per il monitoraggio delle condizioni e la manutenzione predittiva, il cui layout soddisfa i requisiti IEC61000-4-2/4 e EN60947 per applicazioni industriali. Il kit consta di 3 componenti principali:

- Sensor board (IDP005V2)
- Communication adapter board (STEVAL-UKI001V2)
- Strumento di programmazione e debug (STLINK-V3MINI):

La sensor board è una scheda compatta che rappresenta l'hardware di misura e di controllo del kit. Su di essa troviamo diverse tipologie di sensori, come sensori di umidità, di temperatura o di pressione. Il dispositivo STLINK-V3MINI è invece una sonda di programmazione e debug stand-alone per i microcontrollori STM32. È composto da un modulo principale e da un adapter board che si interfaccia e si collega fisicamente alla sensor board. Il firmware, che lavora sul microcontrollore a 32 bit ad elevate prestazioni STM32F469AI, ARM Cortex-M4, contiene algoritmi dedicati per l'elaborazione avanzata di segnali nel dominio

del tempo e della frequenza. I risultati dell'analisi dei dati dei sensori possono essere inoltre visualizzati su un emulatore di terminale PC tramite connettività cablata.

### **2.2.1 Accelerometro IIS3DWB**

Come già accennato in precedenza, sulla sensor board è presente un vasto assortimento di sensori. Tra questi, quello utile per eseguire le misure di accelerazione è il sensore IIS3DWB, in quanto dotato di un accelerometro digitale a 3 assi capace di operare su un'ampia gamma di frequenze. La possibilità di operare su un intervallo di frequenze ultra-ampio, unito alla sensibilità molto stabile e la capacità di lavorare in un range di temperatura molto ampio (fino a 105°C), rendono il IIS3DWB ideale per il monitoraggio delle vibrazioni nelle applicazioni industriali. Questo dispositivo è installato direttamente sull'oggetto che vibra: in questo modo l'energia delle vibrazioni viene trasformata in un segnale elettrico proporzionale all'accelerazione istantanea dell'oggetto vibrante. L'IIS3DWB è un accelerometro capacitivo. Questo usa la variazione della capacità elettrica di un condensatore al variare della distanza tra le due armature per rilevare lo spostamento della massa. Il principio di funzionamento di questo dispositivo si basa sul posizionare un peso installato su una delle due molle. Uno dei due elementi elastici è fissato alle armature del condensatore, l'altra, invece, al peso. La forza che agisce sul sensore causa lo spostamento del peso sulle molle, in questo modo varia la distanza tra l'elemento capacitivo e la massa, e ha luogo una variazione della capacità. In particolare, l'IIS3DWB in particolare è realizzato con la tecnologia MEMS (micro electro-mechanical systems), la più utilizzata in questo ambito. Il sensore ha un intervallo di accelerazione a scala completa selezionabile di  $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$  g.