

La collaborazione tra DINFO e Nuovo Pignone sui sistemi di controllo avanzati e diagnosi dei guasti per turbomacchine

Michele Basso, Giovanni Donati, Alberto Tesi

Baker Hughes Company è una multinazionale attiva nel settore dei servizi, delle tecnologie e delle attrezzature per l'industria petrolifera e del gas. Baker Hughes in Italia opera principalmente tramite la società Nuovo Pignone, specializzata nella progettazione e produzione di turbomacchine, e si occupa di fornire soluzioni innovative per l'estrazione, la produzione e il trasporto di risorse energetiche. La consolidata partnership tra il DINFO e Nuovo Pignone si è concentrata in tempi recenti sulla ricerca avanzata con oggetto le turbomacchine equipaggiate con cuscini magnetici attivi (Active Magnetic Bearings – AMB). L'obiettivo è il miglioramento delle prestazioni e la diagnosi dei guasti, sfruttando maggiormente le potenzialità dei cuscini magnetici attivi come 'smart devices'.

Nel corso dell'ultimo decennio, gli AMB hanno registrato un crescente impiego in diverse applicazioni rotodinamiche, spaziando dalle pompe turbomolecolari di dimensioni ridotte per applicazioni mediche ai grossi compressori per applicazioni nell'ambito dell'energia, con potenze nell'ordine dei megawatt. Gli AMB sono composti da una serie di elettromagneti progettati per far levitare il rotore rispetto allo statore. A differenza dei tradizionali cuscini a rotolamento o ad olio, gli AMB eliminano completamente gli attriti tra statore e rotore, con conseguenti vantaggi per il sistema. L'assenza di attrito consente velocità di rotazione più elevate, aumenta l'efficienza del sistema, elimina la necessità di ingombranti sistemi di lubrificazione e, riducendo l'usura, la necessità di frequenti manutenzioni preventive. Queste caratteristiche rendono l'utilizzo degli AMB molto conveniente per applicazioni sottomarine ed 'off-shore'. Nelle turbomacchine ci sono tipicamente due cuscinetti radiali, ciascuno con due assi di controllo, e un cuscinetto reggispinta con un asse di controllo. In Figura 9 è riportato uno schema di un AMB radiale (di tipo eteropolare) e di una turbomacchina equipaggiata con AMB (expander-compressor). La Figura

Michele Basso, University of Florence, Italy, michele.basso@unifi.it, 0000-0002-1526-7715
Giovanni Donati, University of Florence, Italy, giovanni.donati@unifi.it, 0000-0001-9316-6779
Alberto Tesi, University of Florence, Italy, alberto.tesi@unifi.it, 0000-0002-0234-5999

Referee List (DOI 10.36253/fup_referee_list)

FUP Best Practice in Scholarly Publishing (DOI 10.36253/fup_best_practice)

Michele Basso, Giovanni Donati, Alberto Tesi, *La collaborazione tra DINFO e Nuovo Pignone sui sistemi di controllo avanzati e diagnosi dei guasti per turbomacchine*. © Author(s), CC BY 4.0, DOI 10.36253/979-12-215-0975-5.07, in Stefano Selleri, Alberto Tesi, Enrico Vicario (edited by), *Ingegneria Industriale & Ingegneria dell'Informazione per il territorio fiorentino – 2. Ingegneria dell'Informazione*, pp. 31-34, 2026, published by Firenze University Press, ISBN 979-12-215-0975-5, DOI 10.36253/979-12-215-0975-5

10 mostra una foto di un expander-compressor prodotto da Baker Hughes Company equipaggiato con AMB.

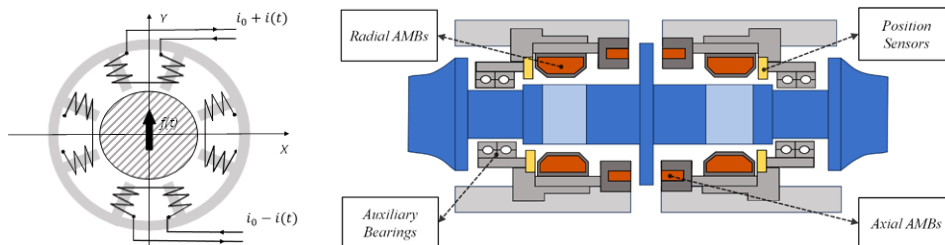


Figura 9 – Schematico di un impianto AMB (expander-compressor) e di un cuscinetto magnetico radiale (eteropolare).

Gli elettromagneti di cui sono composti gli AMB sono controllati in corrente in modo da generare forze diverse sul rotore di materiale ferromagnetico: regolando tali correnti è possibile generare diverse forze sul rotore in modo da mantenerlo al centro del traferro. A causa dell'instabilità intrinseca degli AMB, i sistemi AMB sono sempre inseriti in un sistema ad anello chiuso. Tale sistema ad anello chiuso è riassunto dalla Figura 11. Il design del controllore e la scelta degli altri componenti del sistema ad anello chiuso determinano il comportamento dinamico e le performance del sistema AMB, ovvero lo smorzamento e la rigidità dei cuscinetti.

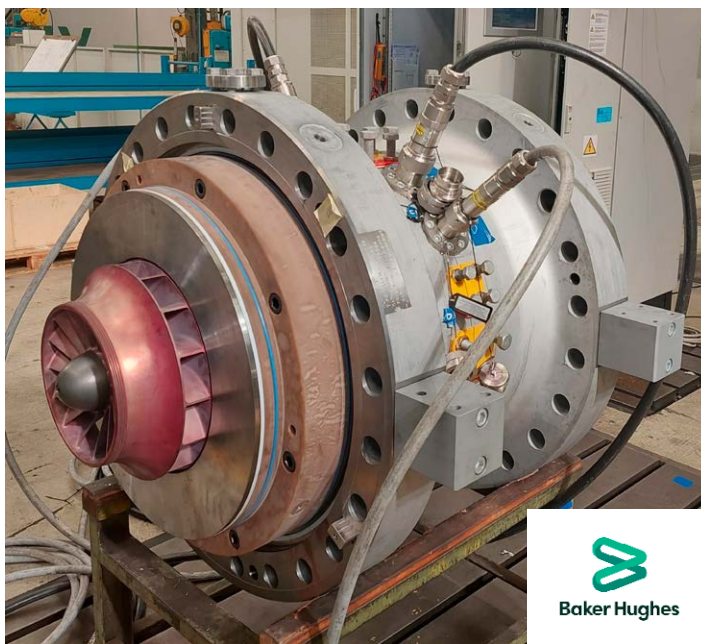


Figura 10 – Foto di una turbomacchina (expander-compressor) equipaggiata con AMB prodotta da Baker Hughes Company.

Nonostante le numerose alternative presenti in letteratura, i PID restano tra le strutture di controllo più utilizzate nelle applicazioni industriali di AMB. In particolare, i sistemi di controllo PID avanzati (regolatori PID coadiuvati da reti di compensazio-

ne del I e II ordine in serie) sono diventati popolari per la loro versatilità, precisione, efficienza ed efficacia in termini di costi nell'industria. La loro adattabilità a processi in evoluzione, come nei sistemi di turbomacchine con dinamiche variabili nel tempo, li rende ideali. Tuttavia, la fase di tuning di questi controllori è critica e complessa, richiedendo iterazioni manuali basate sull'esperienza. In questo contesto, l'attività di ricerca svolta in collaborazione è stata incentrata nel determinare un metodo efficace per il tuning automatico dei controllori PID avanzati, offrendo un nuovo approccio per ottimizzare le prestazioni del sistema e conformarsi alle normative vigenti. Poiché il metodo di tuning automatico sviluppato è basato sul modello del sistema, uno degli aspetti fondamentali della ricerca svolta è stato quello di sviluppare una procedura di identificazione accurata del modello a partire dai dati sperimentali. L'approccio di tuning automatico sviluppato si basa su algoritmi di ottimizzazione non-smooth per determinare i parametri dei PID avanzati. Il tuning automatico è volto ad ottimizzare certi requisiti prestazionali ed allo stesso tempo garantire i requisiti minimi imposti dalle normative, tenendo in considerazione alcuni parametri incerti del sistema (come la velocità di rotazione del rotore), per garantire una certa robustezza a variazioni nel processo e a possibili incertezze nelle misure.

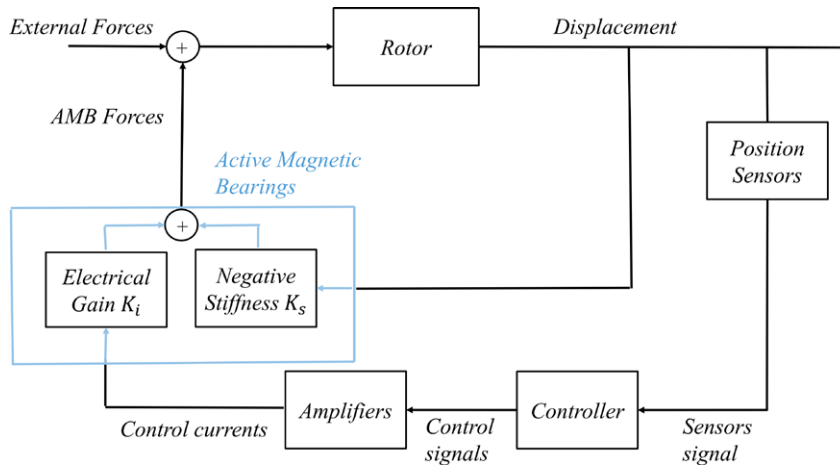


Figura 11 – Diagramma a blocchi di un sistema AMB ad anello chiuso.

Per quanto riguarda i guasti, un'altra parte dell'attività di ricerca si è incentrata sullo sviluppo di tecniche di diagnosi dei guasti tramite l'utilizzo di reti neurali convoluzionali (Convolutional Neural Network – CNN). Tradizionalmente, la diagnosi dei guasti si basava sull'analisi dei segnali nel dominio del tempo e della frequenza. Tuttavia, l'attività di ricerca svolta propone un approccio che sfrutta un dizionario dei guasti costituito da immagini di segnali, nel dominio del tempo, per addestrare una semplice rete neurale convoluzionale. Prendendo come sorgenti i segnali elettrici disponibili, delle orbite generalizzate vengono costruite e convertite in immagini 2D discrete che vengono utilizzate per riempire un dizionario dei guasti. Per sfruttare la conoscenza memorizzata nel dizionario dei guasti, è stato sviluppato un classificatore basato su CNN, particolarmente adatto per la classificazione delle immagini, ed addestrato con gli esempi nel dizionario dei guasti. In caso di guasto, la rete neurale addestrata ha lo scopo di identificare il componente difettoso e il tipo di guasto che si è verificato. Il dizionario dei guasti è stato ottenuto tramite simulazioni del modello del sistema AMB regolato in modo da rappresentare accuratamente il sistema reale. Ri-

petto ad altri metodi proposti in letteratura che si basano sull'analisi dei segnali nel dominio del tempo, l'approccio proposto, perdendo la dipendenza dal tempo, sfrutta il potenziale degli AMB come sistemi intelligenti, permettendo di sviluppare un sistema diagnostico senza costi computazionali eccessivi.