

# DINAMICA, CONTROLLO E DIAGNOSI DEI SISTEMI DI CONVERSIONE DELL'ENERGIA B

a. a. 2012/2013

Titolare del corso: **Ing. Mauro VENTURINI**

Corso di Laurea Magistrale in Ing. Meccanica  
1° anno, 1° periodo

## **Finalità del corso**

Oggetto del corso è lo studio della dinamica e del controllo dei sistemi energetici (impianti a vapore, turbogas e sistemi cogenerativi) e delle macchine a fluido (in particolare, macchine operatrici a fluido comprimibile e motori alternativi a combustione interna).

Per i sistemi suddetti, sono forniti gli strumenti fisico-matematici e metodologici per l'analisi del loro comportamento in condizioni non-stazionarie e di fuori progetto, al fine di valutarne le logiche di controllo. Particolare attenzione viene rivolta alla modellizzazione dei sistemi considerati, presentando esempi di implementazione dei modelli in ambiente Matlab®.

Il corso offre inoltre gli strumenti metodologici per la diagnosi dello stato di funzionamento di sistemi energetici, con particolare riferimento alle turbine a gas.

## **Argomenti sviluppati.**

### Modellizzazione matematica dello stato non-stazionario di sistemi aperti

- Introduzione alla simulazione dinamica. Modello fisico, matematico e geometrico. Equazione generale di bilancio. Equazione di conservazione della massa. Equazione di conservazione della quantità di moto in direzione assiale. Equazione di conservazione della quantità di moto in direzione tangenziale (equazione di bilancio delle masse rotanti). Equazione di conservazione dell'energia.
- Modello dinamico di Greitzer (1976).

### Controllo di macchine operatrici e loro funzionamento fuori progetto

- Controllo di macchine operatrici. Punti di funzionamento stabile ed instabile per macchine operatrici.
- Stallo e pompaggio: fenomenologia, classificazione, interpretazione fisica ed effetto sulle prestazioni. Controllo dello stallo e del pompaggio. Modello elementare del pompaggio: schematizzazione fisica ed equazioni di bilancio. Determinazione della frequenza del pompaggio: influenza dei vari termini ed applicazione numerica.
- Implementazione di un modello di simulazione: scelta delle sezioni significative, equazioni del modello, scelta del solver. Mappe di prestazione parametriche. Equazione stazionaria della valvola. Problematiche relative alla misura di temperature, pressioni e portate. Equazione della coppia assorbita dal compressore e della coppia frenante. Modello per la simulazione in Simulink: modulo intake duct, compressor ed exhaust duct. Simulazioni col modello Simulink in caso di funzionamento stabile ed in presenza del pompaggio.
- Analisi della risposta di un sistema di compressione all'approssimarsi delle condizioni di surge: influenza del tipo di manovra (start-up, cambio di punto di funzionamento, shut-down), del driver (turbina a gas o motore elettrico) e del fluido elaborato (metano e biogas).

### Regolazione dei sistemi per la conversione dell'energia

- La gestione dei sistemi termoelettrici: richiesta di potenza e curva di carico, problematiche tecniche ed economiche, variazione del consumo specifico a carico parziale. Strategia "load-following", "two-shift-operation", pompaggio. Criterio del "pari costo incrementale".
- Introduzione sul luogo delle radici. Richiami ed esercizi sugli errori permanenti di un sistema. Richiami ed esercizi sugli errori permanenti di un sistema.
- Controllori PID: taratura col metodo di Ziegler-Nichols ad anello aperto e ad anello chiuso, problematiche operative e soluzioni. Esempio applicativo: taratura e analisi della risposta del sistema.
- Motore pneumatico a membrana per l'azionamento di valvole e motore elettrico in corrente continua. Esercizi numerici sui motori.

- Regolazione del generatore di vapore.
  - Regolazione di livello, schema funzionale, bilancio di massa nel separatore, funzioni compensatrici del regolatore, funzione di trasferimento motore pneumatico a membrana per l'azionamento della valvola. Motore elettrico in corrente continua per l'azionamento della valvola. Correlazione tra la valvola e la pompa per determinare la portata. Caratteristiche della pompa e del circuito, punto di funzionamento, regolazione al variare del grado di apertura e della velocità di rotazione. Schemi a blocchi logico e con funzioni di trasferimento della regolazione di livello, stabilità con il luogo delle radici. Precisione della risposta della regolazione di livello.
  - Applicazione con il software Simulink per la regolazione del livello in caldaia: calcolo delle funzioni di trasferimento dei componenti. Utilizzo del regolatore P: stabilità e calcolo dell'errore a regime. Regolazione del livello in caldaia: utilizzo di regolatore PI e PID (motore pneumatico) e di regolatore PID (motore elettrico).
  - Regolazione del fuoco in caldaia: equazione di bilancio. Regolazione del fuoco del generatore di vapore: bilancio energetico nel transitorio, energia interna del generatore di vapore, massa di acqua equivalente, ruolo della pressione di saturazione. Schema logico della regolazione della portata di combustibile, necessità della regolazione contemporanea della portata di aria. Schema a blocchi con funzioni di trasferimento della regolazione della portata di combustibile, stabilità con il luogo delle radici.
  - Applicazione con il software Simulink per la regolazione del fuoco in caldaia: calcolo delle costanti del sistema. Analisi del tempo di risposta, della stabilità e dell'errore permanente con regolatore P.
- Tachimetro di Watt: principio di funzionamento, determinazione della funzione di trasferimento. Influenza dei parametri sulla risposta del sistema. Esercizio numerico.
- Regolazione della potenza in turbine a gas monoalbero: schema realizzativo con catena primaria (azione sulla velocità di regolazione) e secondaria (controllo della temperatura allo scarico) e schema a blocchi logico. Cenno alla regolazione di turbine a gas bi-albero. Esempio applicativo di catena di regolazione in turbine a gas in esercizio.

#### Dinamica e controllo dei motori a combustione interna

- Accensione, combustione, detonazione, emissioni, EGR, catalizzatore trivalente, sonda lambda, normativa sulle emissioni.
- Dinamica di MCI: modello fisico, definizione del rendimento volumetrico, equazione di bilancio della massa nel condotto di aspirazione. Sistema speed-density.
- Mappatura del rendimento volumetrico. Regolazione di motori a combustione interna in catena aperta e in retroazione. Regolazione in transitorio.
- Equazioni semplificate per la modellizzazione della dinamica del combustibile.
- Dinamica delle masse.
- Schema di regolazione globale.

#### Determinazione dello stato di funzionamento di sistemi energetici

- Metodologia per la determinazione dello stato di funzionamento di un sistema energetico e per la validazione delle misure.
- Modello termodinamico basato sulla Gas Path Analysis e modello a scatola nera basato su reti neurali.
- Esempi di applicazione su dati di turbine a gas.

### **Testi consigliati**

- Bacchelli G., Danielli F., Sandrolini S., "Dinamica e controllo delle macchine a fluido", Pitagora Editrice, Bologna
- Negri di Montenegro G., Bianchi M., Peretto A., 2009, "Sistemi energetici e macchine a fluido Vol. 1", Pitagora Editrice, Bologna.
- Dabney J. B., Harman T. L., 2004, "Mastering Simulink", Pearson Prentice Hall.

### **Testi di consultazione**

- Bettocchi, R., Spina, P.R., - Propulsione aeronautica con turbogas - 2<sup>a</sup> Ed. - Pitagora Ed., Bologna, 2002.
- Cantore G. – Macchine – Progetto Leonardo (Ed. Esculapio), 1996.
- Cornetti, G. - Macchine idrauliche - Vol. 1, Ed. Il Capitello.
- Cornetti, G. - Macchine termiche - Vol. 2, Ed. Il Capitello.
- Lozza G., 1996, "Turbine a gas e cicli combinati", Progetto Leonardo, Bologna.
- Cohen H., Rogers G.F.C., Saravanamuttoo H.I.H. - Gas Turbine Theory - Longman, 1996.
- Horlock J.H. - Axial Flow Compressors - Butterworths, 1958.
- Osnaghi C. – Teoria delle turbomacchine – Progetto Leonardo, Bologna, 2002.
- Sandrolini S., Naldi G. – Macchine 1. Fluidodinamica e termodinamica delle turbomacchine – Pitagora, 1997.
- Sandrolini S., Naldi G. – Macchine 2. Le turbomacchine motrici e operatrici – Pitagora, 1998.
- Heywood J. B. - Internal combustion engine fundamentals - McGraw-Hill, 1988.
- Ferrari G. - Motori a combustione interna - Ed. Il Capitello, 1995.
- Minelli G., 1985, "Motori endotermici alternativi", Pitagora Editrice, Bologna.
- Brown F. T. - Engineering system dynamics - Marcel Dekker, 2001.
- Blair G. P. - Design and simulation of four-stroke engines - Society of Automotive Engineers, 1999.
- Singh K., Agnihotri G., 2001, "System Design through MATLAB, Control Toolbox and Simulink, Springer-Verlag".
- Magnaschi G., "Tecnologie dei sistemi di controllo", McGraw-Hill Libri Italia srl, Milano