

# DINAMICA E CONTROLLO DEI SISTEMI ENERGETICI

a. a. 2021/2022

**Prof. Mauro Venturini**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

2° 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 in ambiente Matlab®.

## **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 dinamico di un sistema di compressione: architettura, equazioni, functions, mappe di prestazione parametriche, moduli. Simulazioni col modello Simulink in caso di funzionamento stabile ed in presenza del pompaggio. Problematiche legate allo sviluppo di un modello dinamico a partire da dati sperimentali: problematiche relative alla misura di temperature, pressioni e portate, equazione stazionaria della valvola, metodologia di validazione.
- 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

- 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: generalità e significato fisico dei regolatori P, I e D.
- 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.
- 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.
- 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. Regolazione di turbine a gas bi-albero. Esempi di catena di regolazione in turbine a gas.

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

- 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.
- Regolazione di motori a combustione interna in catena aperta e in retroazione.
- Dinamica delle masse.
- Schema di regolazione globale.

#### Esercitazioni in laboratorio di informatica

- Implementazione in ambiente Matlab-Simulink dei modelli per la simulazione del funzionamento in stato non stazionario dei seguenti sistemi:
  - equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto del fluido;
  - motore pneumatico e motore elettrico;
  - sistema di regolazione del livello di un generatore di vapore;
  - sistema di regolazione del fuoco in un generatore di vapore;
- Analisi di sensibilità sui principali parametri che caratterizzano i diversi sistemi e verifica del tempo di risposta e della stabilità e precisione della risposta.
- Predisposizione di una relazione sintetica per la descrizione dei modelli di simulazione realizzati e delle analisi effettuate.

### 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

### Articoli scientifici

- Venturini, M., 2005, “Development and Experimental Validation of a Compressor Dynamic Model”, *ASME J. of Turbomachinery*, **127**(3), pp. 599-608. Erratum printed on *ASME J. of Turbomachinery*, **128**(1).
- Morini, M., Pinelli, M., Venturini, M., 2009, “Analysis of Biogas Compression System Dynamics”, *Applied Energy*, **86**, pp. 2466-2475.
- Simani, S., Alvisi, S., Venturini, M., 2014, “Study of the Time Response of a Simulated Hydroelectric System”, *Proc. 11th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis, ACD 2014*, 13-14 November 2014, Berlin, Germany. Paper ID 46, pp. 304-316. Pubblicato anche come Journal of Physics: Conference Series **570** (2014) 052003, doi:10.1088/1742-6596/570/5/052003.
- Simani, S., Alvisi, S., Venturini, M., 2016, “Fault Tolerant Control of a Simulated Hydroelectric System”, *Control Engineering Practice*, **51**, pp. 13-25. DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.03.010.