



# UNIVERSITÀ DI PAVIA

Anno Accademico 2020/2021

## COSTRUZIONI ELETTROMECCANICHE

<b>Anno immatricolazione</b>	2020/2021
<b>Anno offerta</b>	2020/2021
<b>Normativa</b>	DM270
<b>SSD</b>	ING-IND/32 (CONVERTITORI, MACCHINE E AZIONAMENTI ELETTRICI)
<b>Dipartimento</b>	DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E DELL'INFORMAZIONE
<b>Corso di studio</b>	INGEGNERIA ELETTRICA
<b>Curriculum</b>	Sistemi elettrici
<b>Anno di corso</b>	1°
<b>Periodo didattico</b>	Secondo Semestre (08/03/2021 - 14/06/2021)
<b>Crediti</b>	6
<b>Ore</b>	48 ore di attività frontale
<b>Lingua insegnamento</b>	Italiano
<b>Tipo esame</b>	ORALE
<b>Docente</b>	FROSINI LUCIA (titolare) - 6 CFU
<b>Prerequisiti</b>	Agli studenti di questo corso è richiesto il possesso o l'acquisizione di un'adeguata preparazione iniziale in merito alle seguenti conoscenze: elettrotecnica, sistemi elettrici trifase, campo magnetico rotante, principi di funzionamento delle principali macchine elettriche (trasformatore, macchina asincrona, macchina sincrona).
<b>Obiettivi formativi</b>	Il corso si propone di far acquisire agli studenti una conoscenza approfondita del funzionamento e degli aspetti costruttivi delle principali macchine elettriche (trasformatore, macchina a collettore, macchina asincrona, macchina sincrona) e una conoscenza di base dei motori sincroni a magneti permanenti e delle macchine a riluttanza variabile. Al termine del corso, gli studenti dovranno essere in grado di fornire i criteri generali per il dimensionamento di tali macchine elettriche, basati sullo sfruttamento ottimale dei materiali impiegati nella loro costruzione

e in relazione alle prestazioni richieste nei sistemi elettrici.

### 1. Richiami sui materiali magnetici, conduttori e isolanti

Materiali ferromagnetici dolci e duri, perdite per isteresi e per correnti parassite, lamierini in ferro-silicio standard e a cristalli orientati, cifra di perdita. Effetto pelle nei conduttori. Caratteristiche dei materiali isolanti (gassosi, liquidi, solidi), rigidità dielettrica, scariche parziali, classe termica.

### 2. Il trasformatore

Richiami sul circuito equivalente dei trasformatori. Aspetti costruttivi dei trasformatori (nucleo, avvolgimenti, sistemi di raffreddamento). Formule per il dimensionamento dei trasformatori e criteri di progetto. Gruppi angolari. Transitorio di corto circuito nei trasformatori. Transitorio di inserzione a vuoto nei trasformatori. Calcolo della reattanza di dispersione di un avvolgimento cilindrico di un trasformatore. Calcolo delle forze di Lorentz nel caso di corto circuito in un trasformatore. Trasformatori a nucleo corazzato. Accessori dei trasformatori in olio. Collegamento zig-zag.

### 3. La macchina a collettore

Aspetti costruttivi principali. Avvolgimenti di indotto embricati e ondulati. Campi magnetici prodotti dall'eccitazione e dalla reazione di indotto. Funzionamento della macchina a collettore come motore, forza elettromotrice indotta, espressione della coppia. Motore a eccitazione separata, motore a eccitazione serie, motore universale a collettore. La commutazione ideale e la commutazione con fenomeni induttivi: poli di commutazione. Saturazione per reazione di indotto: avvolgimenti compensatori. Altri aspetti costruttivi. Perdite nel motore a collettore.

### 4. Avvolgimenti in corrente alternata

Tipologie di avvolgimenti di statore in corrente alternata: concentrici e embricati, a singolo e a doppio strato, a passo normale e raccorciato. Esempi di realizzazione di avvolgimenti di statore. Forze magnetomotrici prodotte dagli avvolgimenti.

### 5. La macchina asincrona

Circuito equivalente del motore asincrono, bilancio di potenze, espressione della coppia elettromagnetica, caratteristica elettromeccanica, diagramma circolare. Caratteristiche costruttive e tipi di rotore. Funzionamento del rotore a doppia gabbia. Coppie parassite ed effetti del raccorciamento di passo. Normative sul rendimento e metodi per il suo miglioramento. Metodi di avviamento. Funzionamento del generatore asincrono e cenni sul DFIG. Dimensionamento di un motore asincrono trifase.

### 6. La macchina sincrona

Funzionamento del generatore sincrono: a vuoto e in parallelo con la rete. Fenomeno della reazione di indotto. Espressione della coppia elettromagnetica. Regolazione della potenza attiva e reattiva. Aspetti costruttivi: rotore (liscio e a poli salienti), avvolgimenti smorzatori, nucleo e avvolgimenti di statore, sistemi di eccitazione, sistemi di raffreddamento. Problematiche e soluzioni costruttive dei generatori

sincroni di elevata potenza. Determinazione dell'impedenza sincrona. Curve delle prestazioni limite (capability). Funzionamento del motore sincrono e curve a V.

#### 7. Il motore sincrono a magneti permanenti (brushless) e altre macchine speciali

Principi di funzionamento del motore brushless con tecnica di controllo trapezia (DC brushless) e sinusoidale (AC brushless). Curve di coppia. Coppie oscillanti di cogging e di ripple. Caratteristiche costruttive: rotore interno, esterno, assiale; a magneti superficiali (SPM) e interni (IPM); materiali per magneti permanenti. Principi di funzionamento delle macchine a riluttanza variabile e del motore a magneti permanenti alimentato da rete.

#### Metodi didattici

Il corso è organizzato in lezioni frontali, svolte mediante presentazioni in PowerPoint proiettate su schermo, e approfondimenti utilizzando la lavagna. Le presentazioni in PowerPoint consentono di mostrare agli studenti molte immagini di macchine elettriche e parti di esse, necessarie per raggiungere gli obiettivi formativi del corso. Le esercitazioni consistono nella presentazione della procedura di dimensionamento di alcune macchine elettriche, con valori numerici specifici per determinate applicazioni. Durante il corso vengono inoltre presentati in aula alcuni materiali e parti di macchine elettriche. Infine, le attività formative sono completate da alcuni seminari tenuti da personale tecnico, con solida preparazione industriale, e con una visita tecnica presso un'azienda costruttrice di macchine elettriche di elevata potenza.

Lezioni (ore/anno in aula): 42

Esercitazioni (ore/anno in aula): 6

#### Testi di riferimento

Le presentazioni in PowerPoint e altri documenti, preparati ed utilizzati dal docente durante il corso, sono resi disponibili agli studenti, in formato PDF, tramite la piattaforma KIRO. Tale documentazione è sufficientemente approfondita da costituire il testo di riferimento per il corso.

Per ulteriori approfondimenti, possono essere consultati i seguenti testi:

- Nicola Bianchi, Silverio Bolognani: "Metodologie di progettazione delle macchine elettriche", CLEUP, 2001.

- J.R. Hendershot Jr., TJE Miller, "Design of brushless permanent-magnet motors", Oxford University Press, 1995.

#### Modalità verifica apprendimento

L'esame consiste in una prova orale individuale, volta ad accertare le competenze acquisite relativamente ai contenuti del corso. La prova verte su almeno tre argomenti distinti e relativi a diverse macchine elettriche trattate durante il corso. La valutazione finale si basa sul grado di approfondimento e comprensione degli argomenti presentati e sulla capacità di integrare le conoscenze acquisite durante il corso.

#### Altre informazioni

L'esame consiste in una prova orale individuale, volta ad accertare le competenze acquisite relativamente ai contenuti del corso. La prova verte su almeno tre argomenti distinti e relativi a diverse macchine elettriche trattate durante il corso. La valutazione finale si basa sul grado di approfondimento e comprensione degli argomenti presentati e

**Obiettivi Agenda 2030 per lo  
sviluppo sostenibile**

sulla capacità di integrare le conoscenze acquisite durante il corso.

[\\$bl legenda sviluppo sostenibile](#)