UNIVERSITÀ DI PISA

DINAMICA E CONTROLLO DEI SISTEMI ELETTRICI

STEFANO BARSALI

Anno accademico	2022/23
CdS	INGEGNERIA ELETTRICA
Codice	951II
CFU	12

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
CONTROLLO DEGLI IMPIANTI DI PRODUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA	ING-IND/33	LEZIONI	60	STEFANO BARSALI ANDREA POSSENTI ANTONIO TRIVELLA
DINAMICA DEI SISTEMI ELETTRICI	ING-IND/33	LEZIONI	60	STEFANO BARSALI

Obiettivi di apprendimento

Conoscenze
Gli studenti saranno in grado di comprendere l'intero processo di produzione e trasmissione dell'energia elettrica a partire dalle metodologie utilizzate per lo sfruttamento delle diverse fonti energetiche, dalle differenti tipologie di impianti di produzione, comprese le principali finalità e logiche di controllo, fino alla comprensione del comportamento dinamico del sistema elettrico, e ai criteri adottati per definire i sistemi di regolazione e protezione

Modalità di verifica delle conoscenze
L'esame finale verte sulla verifica dell'acquisizione di una visione complessiva del sistema elettrico, del suo comportamento dinamico e delle ragioni che hanno condotto allo sviluppo dei moderni sistemi di regolazione.

Prerequisiti (conoscenze iniziali)
Materie di base dell'ingegneria in generale (analisi, fisica, meccanica, fisica tecnica, controlli automatici) e dell'ingegneria elettrica in particolare (elettrotecnica, macchine elettriche, fondamenti di sistemi eletrtici per l'energia)

Indicazioni metodologiche
Lezioni in aula comprensive di esercitazioni e seminari

Programma (contenuti dell'insegnamento)
MODULO DI DINAMICA DEI SISTEMI ELETTRICI
Richiami sulla trasformata di sequenza. Introduzione della trasformata di Park, vettore di Park. Scelta dei coefficienti della trasformazione, trasformata della derivata, legami tra trasformata di Park e trasformata di sequenza. Caso di regime sinusoidale. Espressione del vettore di Park in funzione dei fasori delle grandezze di sequenza. Caso di regime sinusoidale di sola sequenza diretta, espressione della potenza complessa. Trasformata di Park di un componente statico.
Macchina sincrona: ipotesi di modello, equazioni di equilibrio elettrico e magnetico, considerazioni sulle auto e mutue induttanze. Applicazione della trasformata di Park, matrice delle auto e mutue induttanze, separazione degli assi. Riporto allo statore e costruzione dei circuiti equivalenti di asse diretto, quadratura e omopolare; definizione delle funzioni di trasferimento operatoriali di asse diretto. Definizione delle funzioni di trasferimento operatoriali di asse diretto e quadratura; definizione delle costanti di tempo del circuito equivalente di asse diretto e quadratura. Costanti di tempo e loro ordine di grandezza; caso di macchina con rotore laminato a poli salienti e con rotore isotropo, massiccio e laminato. Impiego del sistema in "per unit", ordine di grandezza delle reattanze; diagrammi di Bode delle induttanze operatoriali. Costruzione dello schema a blocchi del modello della macchina sincrona (macchine a rotore laminato e massiccio, isotrope e anisotrope); variabili di stato, equazioni in forma normale, diagrammi di Bode tipici per le induttanze di alcuni alternatori. Equazioni meccaniche e ordine di grandezza delle costanti di inerzia; schema a blocchi della parte meccanica. Modelli dinamici di ordine ridotto, condizioni di funzionamento a regime.
Sistemi di regolazione della tensione delle macchine sincrone: schema del regolatore e tipologie di sistemi di eccitazione; ceiling; modello del I ordine elettromagnetico del sincrono funzionante con potenza attiva nulla. Precisione a regime e specifiche statiche sul regolatore. Retroazione transitoria nei sistemi con macchine rotanti e regolatori elettromeccanici. Sistemi con macchine rotanti e regolatori elettronici; eccitatrice statica; approssimazione alle medie frequenze dei sistemi di regolazione più comuni. Stabilità transitoria. Cenno ai segnali stabilizzanti
Sistemi di regolazione della frequenza: schema; regolazione con e senza errore a regime; stabilità. Gruppi idroelettrici: modellazione della condotta forzata e funzione di trasferimento turbina più condotta. Risposta ad un gradino e ad una rampa di apertura della valvola. Stabilità del sistema a fase non minima e sintesi del regolatore dei gruppi idroelettrici. Schemi tipici dei regolatori: taco-accelerometrico e con retroazione transitoria. Gruppi termoelettrici: schema del circuito acqua-vapore. Funzione di trasferimento del risuriscaldatore; Schema a blocchi, risposta al

gradino di apertura della valvola del vapore. Risposta al gradino di carico e interpretazione del comportamento delle turbine di alta pressione e di media e bassa pressione.
Impianti con turbine a gas: Configurazione dei principali anelli di controllo di potenza/velocità e temperatura. Risposta di un gruppo regolato ad un gradino di carico. Regolazione primaria della frequenza: composizione della risposta di più gruppi; schema equivalente dell'intero sistema. Regolazione secondaria della frequenza: Obiettivi della regolazione secondaria in un sistema interconnesso. Schema complessivo regolazione primaria e secondaria. Risposta al gradino di carico, composizione delle risposte della regolazione primaria e secondaria.
Linee di trasmissione: Richiamo del modello delle linee di trasmissione: equazione dei telegrafisti, soluzione generale. Linee a regime sinusoidale: caso di linea non dissipativa, funzionamento su impedenza, effetto Ferranti. Impedenza caratteristica e potenza caratteristica. Onde sulle linee: soluzione delle equazioni, puntualizzazioni sulle convenzioni sui segni; riflessione e rifrazione; coefficienti di riflessione e rifrazione di linee aperte, in corto, su impedenza caratteristica, su capacità e su induttanza. Caso linea-cavo con onda a gradino. Energizzazione di linea aperta e di linea chiusa in corto alimentata con generatore ideale di tensione costante. Energizzazione di linea aperta e in corto con generatore reale di tensione costante. Cenno allo studio delle linee multifilari.
Scariche atmosferiche: caratteristiche della scarica. Scarica diretta e inversa sulle linee. Effetto delle scariche atmosferiche su linee aeree. Intervento delle protezioni distanziometriche. Guasti autoestinguenti. Scarica atmosferica sul sistema linea-cavo: effetto autoschermante del cavo, effetto delle scariche inverse in prossimità della giunzione.
Transitori di apertura del corto circuito: tensione di ristabilimento con circuito R, L, C e RLC, TRV, RRRV, fattore di amplificazione per apertura primo polo. Caso di guasto ai morsetti dell'interruttore e di guasto su linea corta (guasto chilometrico).
Sistemi di trasmissione HVDC: condizioni economiche e caratteristiche generali. Richiamo del funzionamento del ponte di Graetz trifase in condizioni ideali e in presenza di rete induttiva con potenza di corto circuito finita. Fenomeno della commutazione e calcolo dell'abbassamento di tensione DC per effetto della commutazione. Invarianza dell'abbassamento della tensione DC per effetto della commutazione dall'angolo di accensione, equivalente circuitale del convertitore. Caratteristiche esterne dei convertitori, controllo ad alfa costante, controllo a gamma costante, controllo di corrente; connessione dei due convertitori, cenni sulla stabilità ed effetto della potenza di cortocircuito delle reti in alternata.
Esercitazioni: Costruzione del modello dinamico della macchina sincrona in Matlab/Simulink. Schemi a blocchi delle equazioni elettromagnetiche delle equazioni elettriche delle equazioni meccaniche. Collegamento dei blocchi relativi alla parte elettromagnetica, elettrica e meccanica. Antitrasformazione delle grandezze di Park. Esempio di funzionamento in corto circuito; riduzione dell'ordine dinamico e considerazioni. costruzione del modello semplificato della connessione ad una rete prevalente; riferimento di rete e cambiamento di riferimento; funzionamento in parallelo alla rete. Gradino di coppia e di tensione di eccitazione. Pendolazioni elettromeccaniche. Transitori di guasto, eliminazione e richiusura con verifica dei tempi di intervento. Regolatori di tensione e segnali stabilizzanti
MODULO DI CONTROLLO DEGLI IMPIANTI DI PRODUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA
Fonti primarie di energia. Risorse e riserve. Fonti rinnovabili: solare, eolica, idraulica, geotermica, biomasse; sviluppo della produzione elettrica da ciascuna fonte, situazione italiana. Combustibili fossili: caratteristiche, risorse e riserve, petrolio, carbone, gas naturale; costi di produzione e stime delle riserve. Bilancio energetico. Criteri di confronto delle fonti. Consumi elettrici. Caratterizzazione: indice di penetrazione elettrica, intensità elettrica, PIL e domanda elettrica. Bilancio elettrico : bilanci elettrici storici italiani, bilancio elettrico mondiale. Copertura del fabbisogno elettrico nei diversi paesi, evoluzione della produzione elettrica europea. Copertura dei diagrammi di carico. Definizione dei servizi di rete e codice di rete. Servizi di rete e impianti di produzione. Impatto delle fonti rinnovabili sulla regolazione di rete.
Esemplificazione del comportamento degli impianti di produzione in occasione di grosse perturbazioni di rete. Analisi degli eventi di black out del 2003 in Italia e all'estero. Esigenze di regolazione. Approccio probabilistico ai criteri di gestione della portata delle linee elettriche
Impianti termoelettrici: Cicli termodinamici: Metodi d'approccio: ambientale, economico, ingegneristico; Funzioni di stato termodinamico e diagramma T-s; Trasformazioni termodinamiche: sistemi chiusi; Ciclo termodinamico e rendimento; Ciclo di Carnot e ciclo di Rankine; Rendimento dei cicli reali; Verifiche di rendimento da bilancio termico, metodo diretto e indiretto; Trasformazioni termodinamiche: sistemi aperti. Ciclo rigenerativo: condensatore a superficie, portata di raffreddamento, opere di presa, calcolo della superficie e del vuoto. Circuito acqua-vapore: Caldaie a corpo cilindrico, internals del Corpo cilindrico, anello di circolazione, circolazione assistita. Caldaie ad attraversamento forzato: dinamica dell'evaporatore, instabilità di condotti paralleli. Caldaia UP: lay out, Profili di temperatura fumi, scambio termico nei banchi, dinamica nei banchi, materiali e avarie.
Combustione: bruciatori frontale e tangenziali Controllo delle emissioni: interventi primari: de-nox; staging, bruciatori low-nox. Costo combustibile e prezzo di vendita, Circuito aria-gas: ventilatori prementi e azionamenti, Caldaie a pressione bilanciata, ricircolo gas, pre-riscaldatori. Impianti di trattamento fumi: impianto de-NOx catalitico, impianto de-SOx, de-polverizzatori.
Turbine a vapore: triangoli di velocità, pressioni negli stadi, gestione di apertura delle valvole, rendimento, gestione delle espansioni, modulazione delle portate, rendimenti di espansione, temperature, fatica oligociclica, sollecitazioni, risonanze, esercizio flessibile e costi. Ciclo rigenerativo: condensatore a superficie, portata di raffreddamento, opere di presa, calcolo della superficie e del vuoto. Torre di evaporazione. Pre-riscaldatori BP e AP, degasatore a miscela, calore ceduto all'acqua. Pompa acqua alimento, funzionamento e regolazione velocità, sistemi trattamento e condizionamento acqua.
Ciclo rigenerativo: condensatore a superficie, portata di raffreddamento, opere di presa, calcolo della superficie e del vuoto. Torre di evaporazione. Pre-riscaldatori BP e AP, degasatore a miscela, calore ceduto all'acqua. Cenno all'Heat release computer.
Impianti turbogas in ciclo semplice: rendimenti, turbogas di prima, seconda e terza generazione, rapporto di compressione ottimo, raffreddamento turbina, controllo delle emissioni, effetto delle condizioni esterne, problemi di stallo del compressore. avviamento, regolazione potenza e temperatura, partecipazione alla regolazione di rete, load rejection, caratteristiche turbine commerciali. Cicli combinati: criteri di scelta generali, struttura GVR, impianti di cogenerazione, caratteristiche, configurazioni e layout, partecipazione alla regolazione, regolazione di potenza e temperatura, gestione in emergenza e riavviamento. Schemi di impianti repowering con turbogas.
Energia geotermica: le principali aree del mondo, dell'Italia e della Toscana. I sistemi idrotermali e rocce calde secche. Campi geotermici ad acqua dominante e a vapore dominante, caratteristiche del fluido. Classificazione dei fluidi geotermici. Impianti geotermoelettrici: Ciclo di utilizzazione dei fluidi. i principali schemi di funzionamento della centrale, contropressione, condensazione e ciclo binario. Soluzioni adottate in relazione alle caratteristiche del fluido. Consumo specifico di vapore, grado di utilizzazione della risorsa. Studio di riconoscimento geotermico, Studio di prefattibilità, Studio di fattibilità. Progetto di sviluppo. Potenzialità del campo, numero ed ubicazione dei pozzi da perforare, numero delle postazioni, stima dell'energia producibile nella vita della centrale. Valutazione economica dell'investimento. Gli impianti minerari e di superficie. La perforazione dei pozzi con impianti a tavola rotary, il cantiere, gli impianti, il profilo del pozzo. Aspetti tecnico economici relativi alla costruzione e gestione di impianti geotermoelettrici. Gli usi diretti dell'energia geotermica: convenienza della produzione di energia elettrica e dell'uso diretto; possibili forme di utilizzazione diretta.

Impianti idroelettrici: le risorse idriche, curva idrodinamica, diagramma cronologico e curva di durata delle portate. Definizioni. Diagrammi di durata della portata salto potenza ecc. per un impianto ad acqua fluente. Diagrammi di regolazione degli impianti a serbatoio. Le traverse e le opere di presa. Le opere di presa, le traverse, le dighe classificazione costruttiva e normativa. Opere di trasporto criteri per il dimensionamento ottimale. Condotte forzate classificazione calcolo del diametro di massima convenienza. La teoria dell'Allievi, celerità ritmo sovrapressioni. Centrale idroelettrica: dispositivi di chiusura, regolatori di livello, limitatori di pressione, accumulatori, regolatori di pressione. Dimensionamento del pozzo piezometrico. Suddivisione funzionale ed architettonica. La turbina idraulica: rendimento, numero di giri caratteristico, le pelton, francis, kaplan, elica ed a bulbo. Campo di impiego. Criteri di scelta della turbina
Cenni ai componenti elettrici di centrale: Montante di macchina (rigido e flessibile). Turboalternatori: sviluppo, sistemi di raffreddamento. Alternatori per impianti idraulici. Sistemi di eccitazione. Trasformatori. Condotti sbarre. Regolazione della tensione. Curve di capability. Schemi di connessione con la rete. Schemi di alimentazione dei servizi ausiliari. Protezioni elettriche
Caratteristiche dinamiche impianti turbogas e cicli combinati e dei loro sistemi di regolazione: regolazione di velocità, di temperatura e di limitazione di temperatura. Modellazione impianto turbogas. Schema regolazione Ansaldo e modello di Rowen. Modellazione impianto turbogas in Matlab/Simulink. Effetto delle limitazioni di temperatura sulla risposta dinamica in rete interconnessa. Simulazione del funzionamento in isola ed effetto delle limitazioni di temperatura sulla risposta dinamica in isola.
Modello dinamico di impianto a vapore: ipotesi fondamentali ed equazioni descrittive dell'evaporatore; stima della costante di tempo dell'evaporatore; modellazione banchi SH e RH; stima della costante di tempo dell'RH; modellazione turbine; regolatore di velocità. Implementazione modello impianto a vapore in Matlab/Simulink. Simulazione impianto non regolato in rete interconnessa. Simulazione impianto con sola regolazione di velcoità in rete isolata. Sistemi di regolazione in turbina segue e caldaia segue. Simulazione impianto a vapore in regolazione di velocità e in regolazione caldaia segue. Identificazione delle funzioni di trasferimento modello interagente. Introduzione alla regolazione coordinata. Imposizione della non interazione. Sintesi del regolatore non interagente. Regolatore di pressione e regolatore di carico. Regolazione coordinata, verifica non interazione. Frequency bias e Integratore Locale di Frequenza

Bibliografia e materiale didattico

Appunti del docente resi disponibli alla pagina http://www2.ing.unipi.it/~a009343/
Testo di consultazione: R.Marconato "Electric power systems" CEI

Modalità d'esame

Esame orale

Ultimo aggiornamento 29/07/2022 12:23