



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

|                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>DIPARTIMENTO</b>                                     | Ingegneria                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>ANNO ACCADEMICO OFFERTA</b>                          | 2019/2020                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>ANNO ACCADEMICO EROGAZIONE</b>                       | 2019/2020                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>CORSO DILAUREA MAGISTRALE</b>                        | INGEGNERIA ELETTRICA                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>INSEGNAMENTO</b>                                     | SISTEMI ELETTRICI PER L'ENERGIA                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>TIPO DI ATTIVITA'</b>                                | B                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>AMBITO</b>                                           | 50363-Ingegneria elettrica                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>CODICE INSEGNAMENTO</b>                              | 16941                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>SETTORI SCIENTIFICO-DISCIPLINARI</b>                 | ING-IND/33                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>DOCENTE RESPONSABILE</b>                             | IPPOLITO MARIANO      Professore Ordinario      Univ. di PALERMO<br>GIUSEPPE                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>ALTRI DOCENTI</b>                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>CFU</b>                                              | 9                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>NUMERO DI ORE RISERVATE ALLO STUDIO PERSONALE</b>    | 144                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>NUMERO DI ORE RISERVATE ALLA DIDATTICA ASSISTITA</b> | 81                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>PROPEDEUTICITA'</b>                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>MUTUAZIONI</b>                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>ANNO DI CORSO</b>                                    | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>PERIODO DELLE LEZIONI</b>                            | 1° semestre                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>MODALITA' DI FREQUENZA</b>                           | Facoltativa                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>TIPO DI VALUTAZIONE</b>                              | Voto in trentesimi                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>ORARIO DI RICEVIMENTO DEGLI STUDENTI</b>             | <b>IPPOLITO MARIANO<br/>GIUSEPPE</b><br>Martedì    08:00    10:00    DEIM, Edificio n.9, II piano, viale delle Scienze, Palermo<br>Mercoledì    12:00    13:00    DEIM, Edificio n.9, II piano, viale delle Scienze, Palermo<br>Venerdì    09:00    10:00    DEIM, Edificio n.9, II piano, viale delle Scienze, Palermo |

|                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>PREREQUISITI</b>                      | <p>Conoscenze di:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- metodi matematici per l'ingegneria e calcolo matriciale</li> <li>- fisica elettrica ed elettrotecnica</li> <li>- macchine elettriche (in particolare trasformatori e macchine sincrone)</li> <li>- fondamenti di elettronica</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>RISULTATI DI APPRENDIMENTO ATTESI</b> | <p><b>D.1 - Conoscenza e capacita' di comprensione:</b><br/>Lo studente, al termine del corso, avra' acquisito conoscenze e strumenti metodologici per comprendere e affrontare le principali problematiche di progetto e di esercizio dei sistemi elettrici di potenza. Piu' in particolare, lo studente avra' piena comprensione degli aspetti fisici, tecnici ed economici relativi al funzionamento dei sistemi elettrici, ne conoscerà le logiche e i criteri di progetto e verifica e avra' acquisito gli strumenti per l'analisi dei principali problemi di esercizio. Avra' inoltre acquisito le informazioni principali sull'attuale assetto del mercato dell'energia elettrica. Per il raggiungimento di tale obiettivo il corso comprende: lezioni frontali, esercitazioni, analisi e discussione di casi di studio.</p> <p><b>D.2 - Capacita' di applicare conoscenza e comprensione:</b><br/>Lo studente, al termine del corso, sara' in grado di individuare i modelli piu' idonei per lo studio dei diversi problemi correlati al funzionamento dei sistemi elettrici di potenza, sapra' pervenire alla formulazione analitica dei problemi suddetti e sara' in grado di applicare le tecniche risolutive specialistiche piu' consolidate. Per il raggiungimento di questo obiettivo il corso comprende un ciclo di esercitazioni, a carattere applicativo, oltre alla discussione guidata di casi concreti ispirati dal contesto elettrico e di mercato reale.</p> <p><b>D.3 - Autonomia di giudizio:</b><br/>Lo studente avra' acquisito uno spiccato senso critico nel valutare il grado di adeguatezza dei modelli di studio alle specificita' dei diversi problemi. Sapra' esaminare in autonomia le relazioni causa-effetto per la maggior parte degli stati di funzionamento possibili per il sistema elettrico, sia in condizioni ordinarie sia in particolari condizioni critiche.<br/>Per il raggiungimento di questo obiettivo parte del corso e' dedicata ad esercitazioni svolte in parte in autonomia; l'autonomia di giudizio sara' stimolata anche dalla discussione guidata sui casi oggetto di studio.</p> <p><b>D.4 - Abilita' comunicative:</b><br/>Lo studente sara' in grado di comunicare con competenza e proprieta' di linguaggio le problematiche complesse proprie dei sistemi elettrici di potenza, anche in contesti altamente specializzati. Per il raggiungimento di questo obiettivo il corso, in ogni sua parte, stimola le attitudini comunicative e la partecipazione attiva di ogni allievo. La verifica di questo obiettivo utilizza, in parte, gli esiti delle discussioni svolte durante il corso e, in massima parte, l'esame orale.</p> <p><b>D.5 - Capacita' d'apprendimento:</b><br/>Lo studente, al termine del corso, sara' in grado di affrontare in autonomia qualsiasi ulteriore percorso di apprendimento altamente specialistico sull'analisi e il controllo dei sistemi elettrici di potenza, che preveda l'approfondimento di tematiche complesse quali l'Optimal Power Flow, la stima dello stato, lo studio di sistemi non isocroni, etc...<br/>Per il raggiungimento di questo obiettivo il corso comprende lezioni frontali, esercitazioni guidate ed autonome, analisi e discussione di casi studio.</p> |
| <b>VALUTAZIONE DELL'APPRENDIMENTO</b>    | <p><b>MODALITA' DI ESAME:</b><br/>Prova scritta in itinere, durante la pausa infra-semestre (prova facoltativa).<br/>Prova finale scritta e orale (entrambe obbligatorie).</p> <p>La prova scritta in itinere (facoltativa per lo studente) ha la durata di due ore e comprende quesiti a risposta multipla e quesiti a risposta aperta sui contenuti e sulle applicazioni degli argomenti svolti sino alla data della prova. La valutazione e' in trentesimi.</p> <p>La prova finale scritta (obbligatoria), che ha la durata di 3 ore, consiste nella risoluzione di specifici esercizi che richiedono la formalizzazione e la risoluzione di casi applicativi riconducibili agli argomenti trattati durante il corso di lezioni ed esercitazioni. La valutazione e' in trentesimi.</p> <p>La prova orale consiste in un colloquio di durata compresa tra 30 e 40 minuti circa, con domande a risposta aperta, sull'intero programma del corso per gli studenti che non hanno svolto o non intendono avvalersi della prova in itinere, o sul programma svolto nella seconda parte del corso, per gli altri. Per sostenere la prova orale e' necessario superare (votazione maggiore o uguale a 18) la prova scritta.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       | <p>Il voto finale e' la media dei voti conseguiti nelle due prove finali obbligatorie e nella prova in itinere (se utile).</p> <p><b>CRITERI DI VALUTAZIONE</b><br/> Per ciascuna prova, l'attribuzione del voto dipende dal livello complessivo dei risultati raggiunti. Gli elementi che concorrono alla formazione del voto sono riconducibili al seguente schema (vedi quadro dei descrittori D.1-D.5).</p> <p><b>28-30 / 30 e lode</b><br/> D.1/D.2: piena padronanza dei contenuti; assenza di errori; correzione di imprecisioni o integrazione delle risposte in autonomia; corretta e rigorosa impostazione dei problemi; soluzioni complete, corrette ed efficaci; elementi di originalita'<br/> D.3/D.4/D.5: efficace rielaborazione delle conoscenze, autonomia e coerenza nell'orientarsi o esprimere giudizi in contesti disciplinari/interdisciplinari; ottima chiarezza espositiva, argomentazioni articolate; piena proprieta' di linguaggio.</p> <p><b>24-27</b><br/> D.1/D.2: buona padronanza dei contenuti; pochi lievi errori/omissioni, correzioni/integrazioni parzialmente guidate; buona impostazione dei problemi, soluzioni sostanzialmente corrette.<br/> D.3/D.4/D.5: buona coerenza nel collegare i concetti e nell'orientarsi in ambiti disciplinari o ad essi correlati; buona chiarezza nell'esposizione, corretta proprieta' di linguaggio.</p> <p><b>18-23</b><br/> D.1/D.2: sufficiente conoscenza dei contenuti, accettabile approccio ai problemi, soluzioni complessivamente adeguate; limitata autonomia, errori/omissioni non gravi;<br/> D.3/D.4/D.5: coerenza nell'orientarsi e collegare i concetti in ambito disciplinare, sebbene in modo incerto e guidato; sufficiente proprieta' di linguaggio, esposizione accettabile.</p> <p>inferiore a 18 (voto non attribuito)<br/> D.1-D.5: risultati di apprendimento non sufficienti.</p> |
| <b>OBIETTIVI FORMATIVI</b>            | <p>Gli obiettivi formativi del corso riguardano l'acquisizione di conoscenze e competenze per comprendere e affrontare le principali problematiche di progetto e di esercizio dei sistemi elettrici di potenza.</p> <p>A tal fine le attivita' del corso sono orientate ad approfondire i principali aspetti fisici, tecnici ed economici relativi al funzionamento di sistemi elettrici, le logiche e i criteri di progetto di linee elettriche di distribuzione e trasmissione dell'energia elettrica e gli strumenti per l'analisi dei principali aspetti di esercizio dei sistemi di potenza. Nel Corso sono trattati anche i principali temi riguardanti il mercato dell'energia elettrica.</p> <p>Al termine del corso, lo studente sara' in grado di individuare i modelli piu' idonei per lo studio dei diversi problemi correlati al funzionamento dei sistemi elettrici, sapra' pervenire alla formulazione analitica dei problemi suddetti e sara' in grado di applicare le tecniche risolutive specialistiche piu' consolidate. Sapra' inoltre esaminare in autonomia le relazioni causa-effetto per la maggior parte degli stati di funzionamento possibili per il sistema elettrico, sia in condizioni ordinarie sia in particolari condizioni critiche o di emergenza.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>ORGANIZZAZIONE DELLA DIDATTICA</b> | <p>Lezioni frontali; Esercitazioni in aula; Analisi e discussione di casi studio. Per alcuni argomenti e' previsto il contributo di ingegneri esperti di Enel e Terna.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>TESTI CONSIGLIATI</b>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Appunti dalle lezioni</li> <li>• Materiale di didattico distribuito durante il Corso</li> <li>• V. Cataliotti: "Impianti Elettrici" (Vol. I, Vol. II, Vol. III), Ed. S.F. Flaccovio, Palermo.</li> <li>• A. Paolucci, Lezioni di trasmissione dell'energia elettrica, Cleup, Padova.</li> <li>• P. Kundur, Power systems stability and control, McGraw-Hill, New York., 1994.</li> <li>• R. Marconato: "Electric Power Systems" (Vol I, Vol II), Ed. CEI.</li> <li>• J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby: "Power System Dynamics and Stability" Ed. Wiley.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

## PROGRAMMA

| ORE | Lezioni                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2   | Introduzione al Corso. Articolazione del Corso. Obiettivi. Il contesto elettrico nazionale ed internazionale.                                                                                                                                                                                                                                  |
| 2   | Definizioni, principali classificazioni e concetti di base sui sistemi elettrici per l'energia. Articolazione a caratterizzazione dei sistemi elettrici di potenza. Aspetti innovativi (mercato, generazione distribuita, storage, automation, mobilita' elettrica). Evoluzione verso il modello smartgrid.                                    |
| 3   | Cenni sul mercato dell'energia elettrica. Il Mercato del Giorno Prima. Il Mercato Infragiornaliero. Il Mercato del Servizio di Dispacciamento. Meccanismi di formazione del prezzo. Prezzo zonale e PUN. Analisi dei principali dati sull'operativita' dei mercati elettrici (e' previsto il contributo sul tema di ingegneri esperti di ENEL) |
| 2   | Metodo dei valori relativi. Scelta delle grandezze di riferimento. Vantaggi. Modalita' di impiego.                                                                                                                                                                                                                                             |

## PROGRAMMA

| ORE | Lezioni                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3   | Principali componenti delle linee elettriche aeree ed in cavo. Criteri di dimensionamento e di verifica per linee elettriche aeree ed in cavo. Cenni sul calcolo meccanico delle linee aeree (e' previsto il contributo sul tema di ingegneri esperti di Terna S.p.A.).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 10  | Le linee di trasmissione d'energia elettrica – Propagazione della tensione e della corrente in regime sinusoidale permanente. Modelli a parametri distribuiti e concentrati. Potenze attive e reattive. Potenza caratteristica o naturale. Linee a vuoto ed in cortocircuito: diagrammi polari. Diagramma di Baum e Perrine. Capacita' di trasporto. Effetti sulla capacita' di trasporto della compensazione shunt, della compensazione serie, del controllo dell'angolo di fase.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 7   | Analisi delle reti elettriche di potenza in regime permanente – Matrice delle ammettenze e delle impedenze nodali: formazione e riduzione di Kron. Variabili di stato, di disturbo, di controllo. Formulazione del problema di load-flow. Classificazione dei nodi (PV, PQ, nodi slack). Metodi iterativi per la soluzione delle equazioni di load-flow (Gauss-Seidel, Newton-Raphson). Tecniche di rilassamento del processo iterativo. Metodi semplificati. Load-flow in corrente continua. Il dispatching delle potenze attive. Cenni al problema OPF.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 10  | I problemi di regolazione nei sistemi elettici di potenza: regolazione della frequenza e della tensione. Regolazione della frequenza in aree di controllo isolate. Energia regolante dei carichi. I regolatori di velocita. Regolazione primaria e secondaria. Schemi a blocchi. Regolazione frequenza-potenza per aree interconnesse. Equazioni di Darrieus. Regolatori di rete. Schema a blocchi per due aree interconnesse. Condizioni di autonomia. Analisi a regime a mezzo delle caratteristiche statiche.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 7   | Regolazione della tensione. Variazioni di tensione nei nodi per variazioni di potenze reattive iniettate. Regolazione della tensione nei nodi generatori. Specifiche dei RAT. Regolazione con e senza compound. Regolazione della tensione nei nodi non generatori. Variatori di rapporto sottocarico. Boosters. Compensatori attivi. Compensatori sincroni. Compensatori statici: FACTS (SVC, STATCON, TCSC, ASC, UPFC). Sistema gerarchico di regolazione della tensione. Nodi pilota o sentinella. Regolazione primaria, secondaria e terziaria.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 4   | Le correnti di corto-circuito nei sistemi di potenza. Classificazioni. Effetti. Guasti simmetrici e dissimmetrici. Analisi del regime transitorio causato dal corto-circuito. Ipotesi e metodi di calcolo per guasti vicini e lontani dai generatori. Calcolo delle correnti di corto-circuito e delle tensioni post-guasto con il metodo matriciale. Applicazioni per guasti simmetrici e dissimmetrici.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 10  | Stabilita' del parallelo nei sistemi elettrici di potenza - Stabilita' statica: di linee, alternatori, sistemi. Equazione del moto dei generatori. Stabilita' dinamica e influenza del regolatore di tensione (cenni). Stabilita' transitoria. Criterio delle aree e applicazioni. Provvedimenti per migliorare la stabilita' statica, oscillatoria e transitoria dei sistemi di potenza.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| ORE | Esercitazioni                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 21  | Esercitazioni, applicazioni e analisi di casi studio sui diversi argomenti del corso: <ul style="list-style-type: none"> <li>- applicazioni del metodo dei valori relativi;</li> <li>- analisi in regime permanente di linee di trasmissione, modelli e diagrammi in ambiente Matlab;</li> <li>- risoluzione del problema di load-flow applicando vari metodi iterativi e semplificati; modelli in ambiente Neplan per l'analisi dei flussi potenza;</li> <li>- risoluzione del problema del dispatching (per via grafica e analitica)</li> <li>- calcolo delle variazioni di frequenza e delle potenze di interscambio in un sistema costituito da tre aree interconnesse;</li> <li>- applicazione del metodo matriciale al calcolo di correnti di corto-circuito;</li> <li>- calcolo dei limiti di stabilita' statica;</li> <li>- verifica della stabilita' transitoria con l'applicazione del criterio delle aree.</li> </ul> |