

Corsi di Studio in Ingegneria Elettronica, delle Telecomunicazioni e Informatica

Programma dell'Insegnamento di Introduzione ai Circuiti

n. 6 Crediti Formativi Universitari (CFU)

A.A. 2017/2018

Prof. Antonio Quercia

1. Il modello circuitale.

Circuiti elettrici. Grandezze elettriche e circuitali. Equazione di conservazione della carica e legge di Faraday-Neumann. Limite lentamente variabile: concetto di bipolo. Relazione caratteristica di un bipolo. Convenzione dell'utilizzatore e del generatore. Limite lentamente variabile: leggi di Kirchhoff delle tensioni e delle correnti (LKT e LKC). Lavoro elettrico elementare scambiato da un bipolo nel limite lentamente variabile. Potenza elettrica.

Limiti del modello circuitale: condizione necessaria per la sua validità. Bipoli a-dinamici: resistore lineare, generatore ideale di tensione e di corrente, corto circuito, circuito aperto, interruttore. Resistore fisico, effetto Joule, dipendenza della resistenza dalla temperatura. Generatore reale, potenza erogata dal generatore reale di tensione in funzione della corrente e caso duale del generatore reale di corrente. Meccanismi fisici nei generatori: campo elettromotore. Resistori non lineari: diodo e diodo tunnel. Bipoli controllati in tensione e bipoli controllati in corrente. Bipoli a-dinamici passivi, strettamente passivi (dissipativi) e attivi. Bipoli dinamici. Capacitore lineare, limiti del modello, concetto di memoria, capacitore a facce piane parallele, capacitori non lineari, potenza assorbita, energia immagazzinata, energia assorbita, variabile di stato. Bipoli conservativi. Induttore lineare, limiti del modello, induttore lungo, induttori non lineari, potenza assorbita, energia immagazzinata, energia assorbita, variabile di stato. Capacitore e induttore tempo variante.

2. Proprietà dei circuiti. Circuiti semplici.

Grafo di un circuito, grafo orientato, equazioni topologiche, relazione di incidenza, sottografo, grafo connesso, maglia, maglia orientata, albero, coalbero, insiemi di maglie fondamentali, unione di due maglie. Grafo planare, esempi di circuiti i cui grafi associati sono non planari: circuito raddrizzatore trifase a ponte, circuiti raddrizzatori polifasi a ponte. Anello, anelli di un grafo planare, unicità dell'insieme degli anelli di un grafo planare. Insieme di taglio ('macronodo'), legge di Kirchhoff per un macronodo. Matrici topologiche, matrice d'incidenza A_a , corrispondenza biunivoca tra un generico albero ed $n-1$ colonne indipendenti di A_a , equazioni LKC in forma matriciale, sparsità della matrice A_a . Matrice di maglia B_a , equazioni LKT in forma matriciale. Equazioni, identità, sistema di equazioni ben posto, equazioni incompatibili.

Proprietà di indipendenza delle equazioni di Kirchhoff per le correnti *per circuiti con grafo connesso*, matrice di incidenza ridotta. Proprietà di indipendenza delle equazioni di Kirchhoff per le tensioni *per circuiti con grafo connesso*, indipendenza delle LKC agli anelli per circuiti con grafo planare, matrice di un insieme di maglie fondamentali, equazioni LKT indipendenti in forma matriciale. Forma canonica delle equazioni circuitali, soluzione con sistema $Lx=d$ con matrice L sparsa. Metodi per la soluzione di sistemi lineari, impraticabilità del metodo di Cramer.

Circuiti mal posti (generatori di tensione/corrente in parallelo/serie, resistenze negative). Potenziali di nodo, potenziali nodali e potenziale elettrico, equazioni di tableau, matrice delle conduttanze di nodo, metodo dei potenziali di nodo modificato e matrice corrispondente. Metodo dei potenziali di nodo ridotto. Dualità nelle reti resistive (non lineari e lineari). Metodo delle correnti di maglia. Trattamento dei generatori di corrente nel metodo delle correnti di maglia. Conservazione dell'energia, teorema di conservazione delle potenze elettriche e teorema di Tellegen. Teoremi di non amplificazioni delle tensioni e delle correnti.

3. Circuiti a-dinamici lineari

Circuiti a-dinamici. Equivalenza tra bipoli. Resistori controllati in corrente connessi in serie, resistori lineari connessi in serie e partitore di tensione. Resistori controllati in tensione connessi in parallelo, resistori lineari connessi in parallelo e partitore di corrente. Generatori ideali connessi in serie e in parallelo, casi patologici. Generatori reali ed equivalenza. Circuiti resistivi lineari con un solo generatore. Resistenza equivalente di un bipolo di resistori lineari. Circuito di caratterizzazione del bipolo, segno della resistenza equivalente per un circuito di bipoli passivi. Proprietà di sovrapposizione degli effetti, esprimibilità di una qualsiasi tensione o corrente come combinazione lineare delle sorgenti (soluzione $x=L^{-1}d$ nei casi non patologici, per i quali L è invertibile). Non validità della proprietà di sovrapposizione per le potenze. Sovrapposizione in presenza di generatore controllato. Generatore equivalente di Thevenin-Norton. Riduzione con Thevenin di circuito contenente un diodo. Trasformazioni stella-triangolo.

4. Ausili e complementi

Misure, errore assoluto, errore relativo, propagazione degli errori nelle misure indirette, esempi. Cifre significative, cancellazione numerica, esempio: formula classica (numericamente instabile) per la soluzione dell'equazione quadratica, e formula corretta.

Algebra dei numeri complessi. Formula di Eulero ottenuta considerando lo sviluppo in serie delle funzioni seno, coseno ed esponenziale. Rappresentazione esponenziale di un numero complesso. Operatore di rotazione. Estensione dei numeri complessi, cenni sui quaternioni di Hamilton e sui multivectors.

Introduzione all'ambiente di programmazione dinamico Matlab. Cenni sul linguaggio dinamico ad alte prestazioni Julia.

5. Circuiti dinamici lineari a regime

Circuiti dinamici lineari a regime, termine transitorio e termine di regime permanente. Circuiti in regime stazionario, strumenti di misura per il regime stazionario. Circuiti in regime sinusoidale: grandezze sinusoidali. Corrispondenza tra funzioni sinusoidali e fasori. Proprietà di unicità, linearità, derivazione. Metodo dei fasori, circuiti di impedenze. Corrispondenza con il seno. Confronto tra il metodo di soluzione nel dominio del tempo e quello dei fasori. Esempio: rete a ponte in regime sinusoidale. Energia e potenza in regime sinusoidale, potenza fluttuante, potenza media. Lavoro elettrico scambiato da un bipolo in un intervallo molto maggiore del periodo. Unità di misura per l'energia elettrica nei sistemi elettrici di potenza. Confronto tra il kWh e l'energia meccanica richiesta per tipici spostamenti di masse nel campo di gravità terrestre (esempio persona che sale le scale). Potenza reattiva. Potenza complessa, potenza apparente, conservazione delle potenze complesse.

Diagrammi fasoriali. Proprietà dei bipoli di impedenze, bipoli serie RC ed RL. Circuiti RLC serie e parallelo, risonanza, fattore di qualità, condizioni per la risonanza, considerazioni energetiche sul circuito risonante, definizione energetica del fattore di qualità. Formula di Millmann nel caso generalizzato con impedenze in serie/parallelo ai generatori e più generatori nello stesso ramo.

Determinazione dell'equazione differenziale in una specifica grandezza incognita a partire dalla corrispondente relazione nel dominio fasoriale (esempio: circuito RLC serie e parallelo). Sovrapposizione dei regimi stazionario e sinusoidale per un circuito dissipativo, non validità della sovrapposizione degli effetti per la potenza istantanea. Sovrapposizione di regimi sinusoidali con pulsazioni diverse e sovrapposizione delle potenze medie.

Cenni su serie e trasformata di Fourier e su trasformata wavelet. Cenni su proiezione (troncamento della serie di Fourier) e interpolazione (determinazione dei coefficienti mediante utilizzo della FFT). Filtraggio. Cenni sull'approssimazione di funzioni con polinomi di Chebishev e con funzioni razionali. Cenni sull'approssimazione ottima con errore equioscillante e suo utilizzo per la sintesi di filtri analogici e numerici. Esempi di realizzazione di filtri passa basso, passa alto, passa banda, elimina banda. Frequenza/e di taglio a 3dB.

Valore efficace di una grandezza comunque variabile. Significato del valore efficace. Circuiti per la distribuzione dell'energia elettrica. Strumenti di misura per il regime sinusoidale. Efficienza energetica nel trasporto dell'energia. Approssimazione della linea elettrica ignorando effetti induttivi e capacitivi. Confronto della resistenza della linea con l'impedenza dell'utilizzatore. Strategie per aumentare l'efficienza del trasporto dell'energia elettrica. Fattore di potenza. Compensazione della potenza reattiva (rifasamento). Trasformatore ideale. Trasporto in alta tensione dell'energia elettrica, circuito di Tesla monofase.

Generatori monofase e trifase. Circuito equivalente di un generatore trifase. Generatori trifase simmetrici (diretti ed inversi). Tensioni stellate e concatenate. Sistema trifase a 4 fili (con resistenza di linea sulle 3 fasi e sul ritorno) ottenuto come 'unione' di 3 sistemi monofase. Inutilità del filo di ritorno nei sistemi trifase simmetrici ed equilibrati. Sistemi trifase (a 3 fili) simmetrici ed equilibrati e circuito monofase equivalente. Misura della potenza attiva ed inserzione Aron. Misura della potenza reattiva con inserzione Aron nel caso simmetrico ed equilibrato. Circuito monofase equivalente di un circuito trifase simmetrico ed equilibrato. Sistemi trifase (a 3 fili) squilibrati: calcolo dello spostamento del centro stella dell'utilizzatore squilibrato con la formula di Millmann. Potenza istantanea erogata dal generatore trifase e assorbita dal carico, in particolare nel caso di sistema di tensioni simmetrico e carico equilibrato la potenza fluttuante è nulla.

Cenni sui trasformatori trifase, impiego del collegamento a stella al secondario per il recupero del neutro. Cenni sull'analisi qualitativa dei circuiti raddrizzatori monofase e trifase. Cenni sui trasformatori trifase a doppio secondario e applicazione ai raddrizzatori polifase a doppio ponte in configurazione serie e parallelo. Cenni sul circuito di Tesla trifase.

5. Elementi circuitali a più terminali

Elementi circuitali a più terminali. Grandezze descrittive di un N-polo e grafo associato. Leggi di Kirchhoff per gli elementi ad N terminali. Relazioni caratteristiche, potenza assorbita, conservazione delle potenze elettriche e conservazione delle potenze virtuali per elementi ad N terminali.

Doppi Bipoli, condizioni di porta, potenza assorbita. Doppi bipoli a-dinamici e dinamici, lineari e nonlineari. Le 4 tipologie di generatori controllati lineari e loro sovrabbondanza. Realizzazione di un resistore *attivo* e di un amplificatore di potenza. Trasformatore ideale e non validità dei teoremi di non amplificazione. Trasporto di una resistenza al primario o al secondario. Realizzazione di un trasformatore ideale mediante generatori controllati. Trasporto al primario o al secondario di un bipolo di Thevenin. Adattamento in potenza senza trasformatore e con trasformatore. Giratore e sue applicazioni, realizzazione del giratore mediante generatori controllati. Doppi bipoli di resistori lineari. Proprietà di reciprocità. Matrici delle conduttanze, delle resistenze, ibrida e di trasmissione, e loro proprietà, per un doppio bipolo di resistori lineari; proprietà valide quando i resistori sono passivi. Collegamenti di doppi bipoli. Doppi bipoli lineari non inerti. Sintesi di un doppio bipolo resistivo

lineare. Sintesi di un doppio bipolo con generatori controllati. Forma vettoriale dei teoremi di Thevenin e di Norton e loro rappresentazione equivalente per le due varianti del caso reciproco (con R_{12} o $G_{12} > 0$ e < 0) e nel caso generale con generatori controllati.

Cenni sulla trasmissione di informazione mediante segnali elettrici: utilizzo della linea bifilare twistata e del cavo coassiale per ridurre i disturbi.

Trasformatore. Nucleo ferromagnetico, lamierini metallici, avvolgimenti primario e secondario. Relazioni caratteristiche, coefficienti di auto e mutua induzione. Potenza assorbita ed energia immagazzinata nel trasformatore, conservatività e passività, grandezze di stato, condizione di fisica realizzabilità, coefficiente di accoppiamento. Condizione di accoppiamento perfetto. Energia immagazzinata, variabile di stato unica in condizioni di accoppiamento perfetto, circuiti equivalenti, induttanza magnetizzante. Trasformatore reale, perdite nel ferro e nel rame. Doppi bipoli di impedenze. Matrici delle impedenze, delle ammettenze, ibrida e di trasmissione, e loro proprietà.

6. Dinamica dei circuiti lineari e tempo invarianti

Ordine di un circuito dinamico. Esistenza e unicità della soluzione del problema di Cauchy, soluzione generale dell'equazione omogenea associata e soluzione particolare, proprietà fondamentale delle funzioni esponenziali. Dinamica di circuiti fondamentali, circuito RC, circuito RL.

Dinamica di circuiti fondamentali del secondo ordine, circuito RLC serie e parallelo. Funzionamento a regime, termine transitorio e soluzione di regime. Evoluzione libera e forzata. Applicabilità della sovrapposizione degli effetti rispetto ai generatori indipendenti in condizioni dinamiche (solo per il calcolo dell'evoluzione forzata e del regime permanente). Evoluzione libera e modi naturali del circuito RLC. Proprietà dei modi naturali, evoluzione libera aperiodica smorzata, evoluzione libera armonica smorzata, evoluzione libera critica, evoluzione libera armonica. Proprietà energetiche, stabilità e soluzione di regime, circuiti dissipativi e conservativi, legame tra stretta passività degli elementi a-dinamici costituenti il circuito e dissipatività (valida in assenza di condensatori connessi in serie tra loro e/o di induttori connessi in parallelo tra loro, si veda più avanti), esempi in cui sono presenti elementi a-dinamici non strettamente passivi come il circuito aperto e il corto circuito (capacitore in serie a circuito aperto, induttore in parallelo a corto circuito). Concetto generale di circuito dissipativo e di circuito conservativo. Circuiti stabili, asintoticamente stabili, instabili. Legame tra dissipatività e regime. Regime stazionario, regime sinusoidale, regime periodico, regime aperiodico. Proprietà di sovrapposizione delle potenze medie per il regime periodico.

Possibile non esistenza della soluzione di regime per circuiti passivi ma non dissipativi, esempio circuito LC forzato sinusoidalmente in risonanza e paragone con moto dell'altalena con ampiezza massima di oscillazione crescente nel tempo. Capacitori ed induttori in serie e in parallelo, altri esempi di circuiti passivi ma non dissipativi (serie di due condensatori e di un resistore, parallelo di due induttori e di un resistore).

Formulazione con le equazioni di stato. Circuito resistivo associato. Equazioni in forma canonica per un circuito del secondo ordine. Continuità dell'energia e delle grandezze di stato. Continuità delle grandezze di stato nei circuiti accoppiati e nei circuiti perfettamente accoppiati.

Utilizzo della tempo invarianza di un circuito per determinarne la dinamica nel caso di traslazione temporale del forzamento. Analisi ad intervalli. Circuiti dinamici di ordine n . Forma matriciale delle equazioni di stato e problema di Cauchy associato. Modello ABCD. Calcolo della matrice di transizione $\exp(At)$ quando A è diagonalizzabile in termini degli autovalori e autovettori di A . Matrice diagonale degli autovalori e modello dinamico nelle variabili di stato trasformate disaccoppiate. Modi naturali per circuiti di ordine n . Cenni sulla forma di Jordan. Evoluzione libera e risposta forzata per circuiti dinamici di ordine n . Risposta a regime permanente e risposta transitoria per circuiti dinamici di ordine n .

Sussidi didattici

- Testo di riferimento: M. de Magistris, G. Miano, Circuiti, Springer.
- Dispense didattiche, disponibili sul sito www.elettrotecnica.unina.it.
- Ulteriori esercizi svolti disponibili sul suddetto sito alle pagine dei vari docenti.
- Testi di consultazione:
 - o P. Horowitz, W. Hill, The Art of Electronics, 2015, Cambridge University Press.
 - o L.O. Chua, C.A. Desoer, E.S. Kuh, Circuiti lineari e non lineari, Jackson.
 - o M. Guarnieri, A. Stella: Principi ed Applicazioni di Elettrotecnica Voll. I e II, Ed. Progetto Padova.
 - o G. Miano, Lezioni di Elettrotecnica, ed. CUEN.

Modalità d'esame

L'esame prevede una prova scritta ed una prova orale conclusiva. La prova scritta consiste nella soluzione di alcuni problemi. E' necessario risolvere completamente tutti i problemi proposti per il superamento della prova scritta, la quale dovrà inoltre essere presentata in maniera chiara e comprensibile. Ad esempio: si evitino caratteri e pedici troppo piccoli o riportati con stile corsivo da interpretare, tutte le grandezze a cui si fa riferimento devono essere chiaramente indicate anche sul circuito al quale si riferiscono. La valutazione della prova scritta è articolata in tre fasce, A, B, C, con la seguente tabella di corrispondenza in voti (espressi in trentesimi)

A: 30-27

B: 26-22

C: 21-18.

È prevista un'ulteriore fascia di valutazione (D) per prove scritte non sufficienti e che tuttavia presentino un debito eventualmente recuperabile in sede di prova orale. Per tale fascia, una volta recuperato il debito, la valutazione complessiva non potrà comunque superare quella della fascia C.

Durante la prova orale occorre innanzitutto dimostrare di saper risolvere i problemi proposti nella prova scritta (e non solo quelli) con metodi alternativi. Ad esempio: gli allievi che intendono usare sempre e solo la sovrapposizione non potranno superare l'esame; occorre essere a proprio agio con il metodo dei potenziali nodali modificato e con quello ridotto e con il metodo delle correnti di maglia modificato (si veda la dispensa). La prova orale poi prosegue con la discussione di vari argomenti del programma.

Esempi di prove scritte (in molti casi anche svolte) sono disponibili sul sito: www.elettrotecnica.unina.it.

Le prenotazioni per la prova scritta sono obbligatorie, e andranno effettuate con le modalità riportate sul sito: www.elettrotecnica.unina.it.