

Prefazione

Nate dalle dispense del corso di **Introduzione ai Circuiti**, che l'autore tiene presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, queste *note* partono dai principi di base dell'*elettromagnetismo* e portano l'allievo a scoprire prima il modello circuitale con le sue proprietà e i suoi limiti, e poi ad apprendere le principali tecniche di analisi dei circuiti lineari tempo invarianti.

Gli elementi di teoria dei circuiti esposti in queste note costituiscono non solo uno strumento per comprendere e progettare dispositivi e circuiti (elettrici ed elettronici) ma anche un esempio dell'approccio tipico dell'ingegneria alla modellistica di sistemi complessi.

Queste note sono rivolte agli allievi dei corsi di laurea di primo livello della Classe dell'Informazione e agli allievi del corso di laurea di primo livello in Ingegneria Elettrica.

Giovanni Miano è professore ordinario di **Elettrotecnica** presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli Federico II.

Prima edizione

Napoli, 30 settembre 2001

Seconda Edizione

Napoli, 15 settembre 2002

Terza Edizione

Napoli, 3 luglio 2003

Giovanni Miano

Unità di misura

In queste note useremo per le grandezze fisiche circuitali le unità di misura del Sistema Internazionale, noto come SI, e riportate in Tabella 1.

Grandezza	Unità fondamentale	Simbolo
tempo	secondo	s
frequenza	hertz	Hz
tensione elettrica	volt	V
intensità di corrente elettrica	ampere	A
carica elettrica	coulomb	C
flusso del campo magnetico	weber	Wb
potenza	watt	W
energia	joule	J
resistenza, reattanza, impedenza	ohm	Ω
conduttanza, suscettanza, ammettenza	siemens	S
induttanza	henry	H
capacità	farad	F

Tab. 1 Le unità di misura del SI per le grandezze fisiche di un circuito.

I valori delle grandezze fisiche di un circuito spaziano su diversi ordini di grandezza. Per questa ragione si fa largo uso dei fattori moltiplicativi riportati in Tabella 2.

Fattore	Prefisso	Prefisso
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	chilo	K
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f

Tab. 2 Fattori moltiplicativi di uso comune.

Indice

Prefazione

Sistemi di Unità di Misura

1. Il Modello Circuitale

1.1	Introduzione	1
1.2	I circuiti elettrici	3
1.3	La carica elettrica	10
1.4	L'intensità della corrente elettrica	14
1.5	La tensione elettrica	24
1.6	Circuiti di bipoli	29
1.6.1	L'intensità della corrente elettrica di un componente con due terminali	30
1.6.2	La tensione elettrica di un componente con due terminali	39
1.6.3	Il bipolo elettrico	42
1.6.4	Convenzione dell'utilizzatore e del generatore	44
1.7	Le leggi di Kirchhoff	45
1.7.1	Legge di Kirchhoff per le correnti	47
1.7.2	Legge di Kirchhoff per le tensioni	50
1.8	La potenza e l'energia elettrica	56
1.9	Bipoli passivi e bipoli attivi	61
1.10	I bipoli fondamentali	62
1.10.1	Resistore lineare	63
1.10.2	Generatori ideali	72
1.10.3	Circuiti resistivi semplici	78
1.10.4	Corto circuito e circuito aperto	78
1.10.5	Interruttore	80
1.10.6	Resistori non lineari	81
1.10.7	Bipoli adinamici passivi e attivi	83
1.10.8	Generatori reali	84
1.10.9	Condensatore	87
1.10.10	Induttore	95
1.10.11	Circuiti dinamici semplici	101

1.11	Alcune riflessioni sui limiti di validità del modello circuitale	102
------	--	-----

2. **Analisi di Circuiti Semplici**

2.1	Introduzione	105
2.2	Circuito resistivo lineare “semplice”	107
2.3	Circuito resistivo non lineare “semplice”	112
2.3.1	Metodo grafico	114
2.3.2	Metodo di Newton Raphson	117
2.4	Circuito dinamico del primo ordine lineare	121
2.4.1	Evoluzione libera e scarica del condensatore (dell’induttore)	125
2.4.2	Evoluzione generica ed evoluzione forzata	131
2.4.3	Generatore stazionario e carica del condensatore (dell’induttore)	134
2.4.4	Generatore sinusoidale	138
2.5	Circuito dinamico non lineare del primo ordine	143
2.6	Circuito dinamico del secondo ordine lineare	149
2.6.1	Evoluzione libera	153
2.6.2	Modi di evoluzione naturali	155
2.6.3	Evoluzione generica	161

3. **Proprietà delle Equazioni di Kirchhoff**

3.1	Introduzione	165
3.2	Grafo di un circuito	165
3.3	Elementi di topologia dei circuiti: albero, coalbero, maglia, anello e insieme di taglio	168
3.4	Insiemi di taglio	178
3.5	Matrice di incidenza, matrice di maglia ed equazioni di Kirchhoff	181
3.5.1	Matrice di incidenza	181
3.5.2	Matrice di maglia	186
3.6	Equazioni di Kirchhoff indipendenti	188
3.6.1	Indipendenza delle equazioni di Kirchhoff per le correnti	189

3.6.2	Matrice di incidenza ridotta	192
3.6.3	Indipendenza delle equazioni di Kirchhoff per le tensioni	193
3.6.4	Matrice di un insieme di maglie fondamentali	195
3.7	Il sistema di equazioni fondamentali	196
3.8	Potenziali di nodo	205
3.9	Metodo delle correnti di maglia	217
3.10	Conservazione delle potenze elettriche	220
3.11	Teorema di Tellegen	224

4. Circuiti Resistivi

4.1	Equivalenza, connessioni in serie e connessioni in parallelo	229
4.1.1	Resistori connessi in serie	232
4.1.2	Resistori lineari connessi in serie; formule del partitore di tensione	234
4.1.3	Resistori connessi in parallelo	236
4.1.4	Resistori lineari connessi in parallelo; formule del partitore di corrente	237
4.1.5	Generatori ideali connessi in serie	244
4.1.6	Generatori ideali connessi in parallelo	245
4.1.7	Resistore connesso in serie a un generatore ideale di tensione	246
4.1.8	Resistore connesso in parallelo a un generatore ideale di corrente	247
4.1.9	Equivalenza tra un generatore “reale” di tensione e un generatore “reale” di corrente	247
4.2	Circuiti resistivi lineari e sovrapposizione degli effetti	253
4.2.1	Circuiti resistivi lineari con un solo generatore	253
4.2.2	Resistenza equivalente di un bipolo di resistori lineari	256
4.2.3	Circuiti resistivi lineari più generatori: sovrapposizione degli effetti	263
4.3	Generatore equivalente di Thévenin-Norton	270
4.4	Non amplificazione delle tensioni e delle correnti	285
4.5	Caratteristica di trasferimento	290

5. Elementi Circuitali a più Terminali

5.1	Elementi circuitali con N terminali	293
5.1.1	Intensità di corrente e tensioni descrittive di un N – polo	294
5.1.2	Leggi di Kirchhoff per circuiti con N – poli	299
5.1.3	Potenza elettrica assorbita da un N – polo	302
5.2	Doppi bipoli	304
5.3	Generatori controllati lineari	307
5.4	Giratore	314
5.5	Trasformatore ideale	316
5.5.1	Adattamento in potenza	318
5.6	Doppi bipoli di resistori lineari	319
5.6.1	Matrice delle resistenze e proprietà	320
5.6.2	Matrice delle conduttanze e proprietà	326
5.6.3	Matrice ibrida e proprietà	328
5.6.4	Matrice di trasmissione e proprietà	332
5.6.5	Doppi bipoli in cascata	334
5.7	Sintesi di un doppio bipolo lineare	335
5.7.1	Configurazione a “T”	335
5.7.2	Configurazione a “II”	337
5.7.3	Trasformazione stella-triangolo	338
5.8	Reciprocità	342
5.9	Circuiti mutuamente accoppiati (trasformatore)	345
5.9.1	Relazioni caratteristiche di due circuiti mutuamente accoppiati	345
5.9.2	Accoppiamento perfetto	351
5.9.3	Circuito equivalente di due circuiti perfettamente accoppiati	353
5.9.4	Circuito equivalente di due circuiti non perfettamente accoppiati	355

6. Analisi in Regime Permanente

6.1	Circuiti dinamici in regime permanente	357
6.2	Circuiti in regime stazionario	359
6.3	I fasori	362
6.3.1	Proprietà di unicità	366

6.3.2	Proprietà di linearità	367
6.3.3	Regola di derivazione	367
6.4	Analisi dei circuiti in regime sinusoidale tramite il metodo dei fasori	368
6.4.1	Metodo dei fasori	368
6.4.2	Circuiti di impedenze	372
6.5	Metodo dei potenziali di nodo e delle correnti di maglia	378
6.6	Potenza ed energia in regime sinusoidale	380
6.6.1	Potenza elettrica istantanea in regime sinusoidale	380
6.6.2	Potenza elettrica media ed energia	381
6.6.3	Potenza elettrica complessa, potenza reattiva e potenza apparente	383
6.6.4	Conservazione delle potenze complesse, potenze medie e potenze reattive	385
6.6.5	Potenza virtuale complessa e teorema di Tellegen	387
6.7	Alcune proprietà degli elementi circuitali in regime sinusoidale; diagrammi fasoriali	388
6.7.1	Diagrammi fasoriali	389
6.7.2	Resistore	390
6.7.3	Induttore	392
6.7.4	Condensatore	393
6.7.5	Generatori ideali	395
6.7.6	Giratore, trasformatore ideale, trasformatore e generatori controllati	395
6.8	Proprietà dei circuiti di impedenze	397
6.8.1	Bipoli di impedenze	397
6.8.2	Impedenze connesse in serie e in parallelo, partitore di tensione, partitore di corrente	401
6.8.3	Bipolo RC serie	404
6.8.4	Bipolo RL serie	407
6.8.5	Bipolo RLC serie (parallelo)	409
6.8.6	Sovrapposizione degli effetti nel dominio dei fasori	413
6.8.7	Generatore equivalente di Thévenin-Norton	413
6.8.8	Trasformazioni stella-triangolo	416
6.8.9	Doppi bipoli di impedenze, reciprocità	418
6.9	Reti in regime periodico e quasi-periodico	423

6.9.1	Sovrapposizione di un regime stazionario e di un regime sinusoidale	423
6.9.2	Sovrapposizione di regimi regime sinusoidali con diverse pulsazioni	425
6.10	Risposta in frequenza di un circuito e funzione di rete	429
6.10.1	Filtro passa-basso	437
6.10.2	Filtro passa-alto	439
6.10.3	Filtro passa-banda	441
6.10.4	Filtro taglia-banda	447
6.11	Cenni sui sistemi elettrici di potenza e sulle reti elettriche trifase	448
6.11.1	Trasmissione dell'energia elettrica	451
6.11.2	Rifasamento	452
6.11.3	Trasmissione dell'energia elettrica in alta tensione	454
6.11.4	Sistemi trifase	457
6.12	Cenni sui numeri Complessi	464

7. Circuiti Dinamici

7.1	Introduzione	471
7.2	Equazioni di stato e circuito resistivo associato	472
7.2.1	Circuiti RC del primo ordine	473
7.2.2	Circuiti RL del primo ordine	478
7.2.3	Circuiti RLC secondo ordine	480
7.2.4	Circuiti RL e RC del secondo ordine	485
7.3	Continuità delle grandezze di stato di un circuito	491
7.4	Soluzione di circuiti del primo ordine	494
7.4.1	Circuiti del primo ordine tempo-invarianti	495
7.4.2	Evoluzione libera ed evoluzione forzata	497
7.4.3	Considerazioni energetiche	498
7.4.4	Regime permanente e transitorio	500
7.4.5	Regime stazionario e regime sinusoidale	503
7.4.6	Regime periodico e regime aperiodico	505
7.4.7	Circuito con generatore impulsivo	507
7.4.8	Circuito tempo-variante con interruttore	514
7.5	Soluzione di circuiti del secondo ordine	517
7.5.1	Considerazioni energetiche	525

7.5.2	Regime permanente e transitorio	526
7.5.3	Regime stazionario e regime sinusoidale	527
7.5.4	Condensatori (induttori) connessi in serie e in parallelo	536
7.6	Circuiti risonanti	542
7.7	Analisi di circuiti con generatori impulsivi	549