

Circuiti Elettrici

Un'introduzione per studenti di Fisica

Giulio D'Agostini

Dipartimento di Fisica, Università "La Sapienza", Roma

6 marzo 2015

Indice

1	Forze gravitazionali e forze elettriche	1
1.1	Forze fra ‘cariche’ puntiformi	1
1.1.1	Forze e campi	3
1.2	Energia potenziale e ‘potenziale’	5
1.2.1	Relazioni fra campo elettrico e potenziale elettrico	8
1.3	Un ‘circuito gravitazionale’	9
1.4	Peculiarità dell’ elettricità	10
1.4.1	Generatori di tensione	11
1.4.2	Cavi di connessione come superfici equipotenziali	14
1.4.3	Voltmetri (e multimetri)	14
1.4.4	Scorrimento di cariche in circuiti elettrici chiusi e misura dell’ intensità di corrente	15
1.5	Bilancio energetico in un circuito elettrico stazionario	18
1.6	Ricapitolando	20
1.7	Problemi	22
2	Circuiti in corrente continua	23
2.1	Punto della situazione	23
2.2	Rapporto tensione corrente: legge di Ohm	24
2.2.1	Flussi e gradienti	26
2.2.2	Conducibilità e conduttività	26
2.3	Effetto Joule	27
2.4	Resistenze in serie e resistenze in parallelo – prime considerazioni	27
2.5	Misure di resistenza	27
2.6	Circuiti con generatori e resistori posti in serie	28
2.6.1	Resistenze in serie e partitore di tensione	28
2.6.2	Un’ applicazione: ponte di Wheathstone bilanciato	31
2.7	Partizione dovuta ai cavi di alimentazione	32
2.7.1	Un esempio	32
2.7.2	Alcune note sulle applicazioni	33
	Monitor di tensione sui dispositivi elettronici	33
	Storielle di cavi ‘scadenti’	33
	Perché l’ energia elettrica viene trasportata ad alta tensione?	34
2.8	Circuiti con maglie e nodi	35
2.8.1	Circuiti risolvibili con riduzioni a serie e parallelo	35

	Resistenze in parallelo e partitore di corrente	36
	Soluzione numerica del circuito d'esempio	38
	Un rapido test	39
	Derivazione delle formule di combinazione in serie e parallelo da considerazione energetiche	39
2.8.2	Leggi di Kirchhoff	40
2.9	Applicazione all'esempio guida	41
2.9.1	Scelta delle equazioni	41
	Soluzione per le correnti	42
	Potenziali nei vari punti del circuito	43
2.10	Multimetro analogico	43
2.10.1	Amperometro	44
2.10.2	Voltmetro	45
2.10.3	Ohmetro	46
2.11	Perturbazioni introdotte da voltmetro e amperometro	46
2.11.1	Amperometro	47
2.11.2	Voltmetro	48
2.12	Note sui multimetri digitali	48
2.13	Ricapitolando	48
2.14	Problemi	49
3	Linearità dei circuiti e sue applicazioni	53
3.1	Linearità e 'principio' di sovrapposizione	53
3.1.1	Alcune variazioni sull'esempio guida	54
	Soluzione mediante riduzione a serie e paralleli (in virtù del principio di sovrapposizione)	54
	Corrente da B a C bypassando R_2	54
	Aggiungiamo un generatore esterno	55
3.2	Soluzione dei circuiti con metodi di algebra lineare	55
3.2.1	Applicazione all'esempio guida	57
3.2.2	Applicazione al partitore 'a stadi'	58
3.3	Teorema di Thevenin	59
3.4	Esempi e applicazioni	62
3.4.1	Applicazione all'esempio guida	62
3.4.2	Considerazioni energetiche	63
3.4.3	Variazione sul tema	63
3.5	Generatori reali di tensione	64
3.5.1	Caduta di potenziale e tensione ai capi di un generatore reale	64
3.5.2	Postilla alla formulazione del teorema di Thevenin	65
3.6	Parallelo di generatori reali di tensione	65
3.7	Trasferimento di potenza da un generatore reale a un carico	66
3.8	Perturbazione introdotte da voltmetro e amperometro	68
3.9	Ponte di Wheathstone sbilanciato	68
3.10	Ancora sui partitori	69
3.10.1	Partitore a più stadi rivisitato	69
3.10.2	Partitore ottimizzato in traferimento di potenza	71
3.10.3	Linea resistiva adattata	72

3.11	Ricapitolando	74
3.12	Problemi	75
4	Generatori di corrente	77
4.1	Generatori di tensione e generatori di corrente	77
4.2	Alcuni esempi	79
4.2.1	Semplici circuiti con generatori di corrente	79
4.2.2	Circuito ‘analogo’ del circuito guida	80
4.3	Principio di sovrapposizione rivisitato	80
4.4	Dall’equivalente di Thevenin all’equivalente di Norton	82
4.5	Generatori reali di corrente	83
4.5.1	Ulteriore postilla al teorema di Thevenin	84
4.5.2	Generatore di corrente simulato	84
4.6	Un <i>caveat</i> sul significato dei circuiti equivalenti	85
4.7	Serie e paralleli di generatori reali di corrente	86
4.7.1	Generatori in parallelo	86
4.7.2	Generatori in serie	87
	Circuito equivalente in virtù del principio di sovrapposizione	87
	Circuito equivalente mediante trasformazione “Thevenin/Norton”	90
4.8	Altri ‘principi’	90
4.8.1	Principio di sostituzione	90
4.8.2	Principio di reciprocità	90
4.9	Ricapitolando	90
4.10	Problemi	91
5	Condensatore e circuito RC	93
5.1	Modello matematico e analogie	93
5.1.1	Capacità elettrica, capacità termica e altre ‘capacità’	94
5.1.2	Condensatori in serie e in parallelo	95
5.1.3	Resistenza parassita	96
5.2	Corrente elettrica ‘attraverso’ un condensatore	96
5.3	Equazioni di carica e scarica	98
5.4	Fenomeni fisici dal comportamento temporale analogo al circuito RC	100
5.4.1	Moto in fluido viscoso	100
5.4.2	Processi di termalizzazione	101
5.4.3	Decadimenti radioattivi	101
5.4.4	Soluzione dell’equazione differenziale $\dot{z} \propto (z - z_L)$	101
5.5	Carica e scarica del condensatore	102
5.6	Risposta a onde quadre fra livelli di tensione arbitrari	105
5.7	Considerazioni energetiche	107
5.7.1	Carica	108
5.7.2	Scarica	111
5.7.3	Condensatori, molle e serbatoi	111
5.8	Alcuni problemini curiosi	112
5.8.1	Condensatori . . . nascosti	112
5.8.2	Apparenti non conservazione dell’energia	113

	Condensatore collegato direttamente ad un generatore	113
	Due condensatori carichi e successivamente collegati in parallelo	113
5.8.3	Condensatore come effettivo generatore di tensione . .	116
5.9	Effetto di una resistenza in parallelo alla capacità	116
5.9.1	Soluzione mediante teorema di Thevenin	117
5.9.2	Soluzione diretta	117
5.10	Rimasugli	120
5.11	Ricapitolando	120
5.12	Problemi	121
6	Primo contatto con il laboratorio	123
6.1	Nota introduttiva	123
6.1.1	Note sulla didattica [Estratto dalla Nota Interna N. 1094, pp. 76-77]	123
6.1.2	Elaborazione ‘statistica dei dati’? No, grazie	126
6.2	Semplici esperienze in corrente continua	127
6.2.1	Multimetri digitali e multimetri analogici	127
6.2.2	Semplici misure di resistenza, tensione e di corrente .	127
6.2.3	Resistenza di una ‘collanina’ di resistori	127
6.2.4	Partitore di tensione con diversi strumenti e diversi fondo scala	128
6.3	Carica e scarica del condensatore con cronometraggio manuale	129
6.3.1	Misure preliminari	130
6.3.2	Carica del condensatore	131
6.3.3	Scarica del condensatore ‘cortocircuitando l’ingresso’	131
6.3.4	Scarica del condensatore staccando l’ingresso	131
6.3.5	Carica del condensatore . . . senza che lo si osservi . . .	132
6.3.6	Prime analisi grafiche	132
6.3.7	Considerazioni teoriche	132
6.3.8	Spunti per l’analisi dei dati	135
6.4	Note sulle analisi grafiche	135
6.5	Ricapitolando	135
6.6	Problemi	136
7	RC in regime sinusoidale	137
7.1	Considerazioni preliminari	137
7.1.1	Segnali lentamente variabili	137
7.2	Equazione differenziale del circuito RC in regime sinusoidale	138
7.3	Soluzione trigonometrica – tensione ai capi di C	139
7.4	Tensione ai capi di R	142
7.4.1	Derivate ‘da fisico’ delle funzioni sinusoidali	142
7.4.2	Ampiezza e sfasamento di V_R	144
7.5	Circuiti RC e CR come filtri	146
7.5.1	Un semplice esempio di filtraggio	149
7.6	Perché i massimi e i minimi di V_C e V_R ‘scivolano’ lungo $f(t)$?	149
7.7	Bilancio energetico	152
7.8	Ampiezza e valore efficace di grandezze periodiche	155
7.8.1	Potenza istantanea	155

7.8.2	Potenza media	156
7.8.3	Ampiezza di tensione della 220 V	158
	Quanta carica elettrica ci arriva in casa dall'Enel? . . .	158
7.8.4	Valori efficaci	159
7.9	Filtri <i>RC</i> e <i>CR</i> come integratore e derivatore	160
7.9.1	Derivatore	160
7.9.2	Integratore	161
7.9.3	Applicazioni pratiche dei circuiti integratori e derivatori	163
7.10	Soluzione dell' <i>RC</i> mediante variabili complesse	165
7.10.1	Rappresentazione esponenziale dei numeri complessi .	165
7.10.2	Applicazione all' <i>RC</i> sinusoidale	167
7.11	Moto circolare uniforme nel piano complesso	169
7.12	Appendice 7a: Richiami sulle operazioni con numeri complessi	171
7.13	Appendice 7b: Esempi di analisi di Fourier	173
7.13.1	Risposta di un <i>RC</i> passa basso a un segnale di onda quadra	173
7.13.2	Risposta di un <i>RC</i> passa basso a un segnale triangolare	177
7.13.3	Risposta dell' <i>CR</i> passa alto	178
7.14	Ricapitolando	183
8	Misure in corrente alternata	185
8.1	Studio sperimentale della risposta dei circuiti a segnali periodici	185
8.2	Generatori di tensione variabile nel tempo	185
8.2.1	Parametri del segnale in uscita	186
8.2.2	Uscite	188
8.3	Oscilloscopio a raggi catodici: principio di funzionamento . .	189
8.3.1	Cannoncino di elettroni	189
8.3.2	Deflessione orizzontale e verticale	190
8.3.3	Visualizzazione di segnali in funzione del tempo . . .	194
8.3.4	Velocità del segnale di scansione orizzontale	195
8.3.5	Regolazione dell'ampiezza	197
8.3.6	Importanza dei segnali periodici	197
8.3.7	Trigger	197
8.3.8	Visualizzazione 'simultanea' di due tracce.	200
8.4	Uso dell'oscilloscopio	200
8.4.1	Monitor	201
8.4.2	Ingressi e scala verticale	201
8.4.3	Scala dei tempi	205
8.4.4	Trigger	205
8.5	Misure di sfasamento	207
8.5.1	Metodo del ritardo temporale	207
8.5.2	Metodo dell'ellisse	208
8.5.3	Pro e contro dei due metodi	211
8.6	Alcuni aspetti pratici	213
8.6.1	Effetti di partizione	214
8.6.2	Resistenza di ingresso dell'oscilloscopio	214
8.6.3	Capacità 'parassite'	214
8.6.4	Accoppiamento delle masse	216

8.7	Altro	218
8.8	Ricapitolando	218
9	Diodo: l'utilità di un oggetto dal comportamento curioso	219
9.1	Caratteristica tensione-corrente del diodo	219
9.2	Modellizzazioni del diodo	221
9.3	Circuiti raddrizzatori	223
9.4	Trasformatore da alternata a continua	225
9.5	Ponte a diodi	229
9.6	Complicazioni tecniche – Uso del trasformatore	230
9.7	Note sull'esercitazione	232
9.8	Ricapitolando	232
10	Induttanza: l'inerzia dei circuiti	233
10.1	Breve introduzione all'autoinduzione	233
10.2	Induttori in serie e in parallelo	237
10.3	Circuito RL sollecitato con una onda quadra	238
10.3.1	Considerazioni preliminari	238
10.3.2	Soluzione dell'equazione del circuito	239
10.3.3	Diseccitazione dell'induttore	239
10.3.4	Considerazioni energetiche	240
10.4	Oscillazioni di corrente quando il generatore commuta fra due livelli	241
10.5	Risposta ai capi di R nel caso di segnali leggermente variabili	241
10.6	Effetti dovuti alla resistenza interna dell'induttore	241
10.7	Circuito LC ideale	243
10.8	Scarica del condensatore su induttanza e resistenza	244
10.8.1	Considerazioni energetiche	246
10.8.2	Dinamica del circuito	247
10.8.3	Analogia meccanica	248
10.9	Oscillazioni smorzate	250
10.9.1	Coefficienti k_1 e k_2	251
10.9.2	Soluzione generale per $z(t)$ e sue grandezze derivate .	251
10.9.3	Classi di soluzioni	253
10.9.4	Oscillatore sovrasmorzato [$\gamma/2 > \omega_0$]	253
10.9.5	Oscillatore sottosmorzato [$\gamma/2 < \omega_0$]	254
10.9.6	Caso critico [$\gamma/2 = \omega_0$]	256
10.10	Applicazioni al circuito RCL	257
10.10.1	Caso sovrasmorzato	258
10.10.2	Caso sottosmorzato	260
10.11	Energia di un oscillatore smorzato	262
10.11.1	Caso sottosmorzato — fattore di merito	264
10.12	Transizioni da f_1 a f_2 (risposta a onda quadra fra tensioni qualsiasi)	267
10.13	Ricapitolando	268

11 RCL in regime sinusoidale	271
11.1 Introduzione	271
11.2 Oscillatore forzato — soluzione ‘standard’	272
11.3 Soluzione mediante variabili complesse	274
11.4 Metodo simbolico	276
11.4.1 Applicazione al circuito RC sinusoidale	278
11.4.2 Applicazione all’ RCL serie	278
11.5 Corrente nel circuito e tensione ai capi di R	279
11.5.1 Larghezza di banda	283
11.5.2 RCL come filtro passa banda	286
11.6 Impedenza in funzione della frequenza	288
11.7 Risposta ai capi di C e ai capi di L	289
11.7.1 Sfasamenti in funzione della frequenza	289
11.7.2 Analisi qualitativa delle ampiezze	290
11.7.3 Valori notevoli della funzione di trasferimento	291
11.7.4 Comportamento di $V_L(t) + V_C(t)$	293
11.7.5 Alcuni esempi	294
11.8 Effetti delle ulteriori resistenze del circuito	294
11.9 RCL parallelo	294
11.10 Potenza in corrente continua usando il metodo simbolico	294