

Ermanno Cardelli

Lezioni di Elettrotecnica

Reti Elettriche

Morlacchi Editore *U.P.*

ISBN: 978-88-9392-220-3

Prima edizione: ottobre 2020

© 2020 by Morlacchi Editore, Perugia. Tutti i diritti riservati.

È vietata la riproduzione, anche parziale, con qualsiasi mezzo effettuata, compresa la copia fotostatica, non autorizzata.

mail to: redazione@morlacchilibri.com
www.morlacchilibri.com

Finito di stampare nel mese di ottobre 2020 da LOGO srl, Borgoricco (PD).

INDICE

<i>Prefazione</i>	7
Cap. 1. RETI ELETTRICHE NEL DOMINIO DEL TEMPO	9
1.1 Reti a parametri concentrati	9
1.2 Bipoli passivi lineari e tempo invarianti	10
1.3 Bipoli attivi	13
1.4 Doppi bipoli	13
1.5 Analisi nel dominio del tempo di circuiti tipici	16
1.6 Grandezze periodiche	34
1.7 Grandezze alternative	36
1.8 Analisi di grandezze periodiche mediante la serie di Fourier	37
Cap. 2. RETI ELETTRICHE IN REGIME SINUSOIDALE	39
2.1 Grandezze sinusoidali	39
2.2 Rappresentazione vettoriale e simbolica delle grandezze sinusoidali	42
2.3 Rappresentazione simbolica di operazioni con grandezze sinusoidali isofrequenziali	45
2.4 Rappresentazione simbolica di bipoli	48
2.5 Rappresentazione simbolica delle leggi di Kirchhoff	56
2.6 Bipoli passivi equivalenti	59
2.7 Doppi bipoli passivi equivalenti	63
2.8 Reti a n-porte	65
2.9 Bipoli attivi equivalenti	68
2.10 Analisi di una rete con il metodo delle correnti di ramo	70
2.11 Analisi di una rete con il metodo delle correnti di maglia	73
2.12 Analisi di una rete con il metodo delle tensioni nodali	78
2.13 Sovrapposizione degli effetti	81
2.14 Metodi di sintesi delle reti	83
2.15 Rifasamento di un bipolo induttivo	98
2.16 Problemi inversi	102
2.17 Potenza elettrica in reti di bipoli lineari	105
2.18 Alcune considerazioni sulla potenza elettrica	114
2.19 Il rifasamento dal punto di vista energetico	116
2.20 Teorema di Boucherot	117
2.21 Analisi di una rete a scala	120

Cap. 3. SISTEMI TRIFASE	123
3.1 Tensioni trifase	123
3.2 Correnti trifase	125
3.3 Collegamenti nei sistemi trifase	128
3.4 Linee trifase	133
3.5 La potenza nei sistemi trifase simmetrici ed equilibrati	138
3.6 Analisi dei sistemi trifase simmetrici ed equilibrati	141
3.7 Analisi dei sistemi trifase dissimmetrici e squilibrati	146
3.8 Potenza assorbita da un carico trifase al variare della tensione applicata	149
3.9 Potenza assorbita e dati di targa di un carico trifase al variare della frequenza di alimentazione	152
3.10 Rifasamento di carichi trifase	153
3.11 Il campo magnetico rotante	158
Cap. 4. RETI ELETTRICHE LINEARI NEL DOMINIO DEL TEMPO ESERCIZI SVOLTI	161
Cap. 5. RETI ELETTRICHE LINEARI NEL DOMINIO DEL TEMPO ESERCIZI PROPOSTI	209
Cap. 6. RETI ELETTRICHE IN REGIME SINUSOIDALE ESERCIZI SVOLTI	215
Cap. 7. RETI ELETTRICHE IN REGIME SINUSOIDALE ESERCIZI PROPOSTI	299
Cap. 8. SISTEMI TRIFASE – ESERCIZI SVOLTI	319
Cap. 9. SISTEMI TRIFASE – ESERCIZI PROPOSTI	343

Prefazione

Questa nuova edizione del testo, riveduta, corretta ed ampliata rispetto alla precedente versione, contiene i principali argomenti per lo studio delle reti elettriche, di interesse per i corsi di laurea in Ingegneria industriale e in Ingegneria meccanica. Tali argomenti sono trattati in modo da fornire i fondamenti teorici ed i concetti fondamentali senza scendere in aspetti ed approfondimenti destinati ad allievi dei corsi di laurea che si interessano specificatamente del settore elettrico ed elettronico.

La trattazione è limitata alle sole reti lineari, sia nel dominio della frequenza che nel dominio del tempo. Lo studio delle reti nel dominio del tempo è limitato alla sola analisi col metodo differenziale. Maggiore spazio è invece dato all'analisi delle reti nel dominio della frequenza e in particolare alle reti in regime sinusoidale e ai sistemi trifasi.

Nel testo sono presenti, dopo la parte di teoria, applicazioni numeriche, sia svolte che proposte, anch'esse rivedute, corrette ed ampliate rispetto alla prima edizione del testo, che aiutano nella comprensione dei concetti esposti nella parte teorica.

L'Autore
Perugia, giugno 2020

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare il collega Antonio Faba che mi ha aiutato nella revisione del testo e l'ing. Simone Quandam Antonio che mi ha supportato nello svolgimento delle parti applicative e numeriche.

CAPITOLO 1

RETI ELETTRICHE NEL DOMINIO DEL TEMPO

1.1) RETI A PARAMETRI CONCENTRATI

Le reti elettriche a parametri **concentrati** sono modelli ottenuti collegando elementi circuitali concentrati, detti anche **bipoli** o **dipoli** elettrici. Tra questi distinguiamo i bipoli **passivi** quali **resistori**, **condensatori**, **induttori** ecc., ed i bipoli **attivi**, i **generatori**.

Un elemento elettrico può essere rappresentato dal suo parametro equivalente concentrato quando la propria dimensione può essere considerata trascurabile in confronto alla lunghezza d'onda corrispondente alla frequenza di funzionamento. Se d è la massima dimensione del circuito, c è la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche, λ è la lunghezza d'onda della più alta frequenza f di funzionamento del circuito, tale condizione è verificata se

$$d \ll \lambda = c/f \quad (1.1.1)$$

Per gli elementi concentrati, dal punto di vista circuitale non è necessaria alcuna informazione sulle loro dimensioni geometriche. Essi sono contraddistinti da due morsetti, e le equazioni di Maxwell si riducono alle seguenti relazioni:

-) La corrente che entra in un morsetto di un elemento è in ogni istante uguale alla corrente che esce dall'altro.

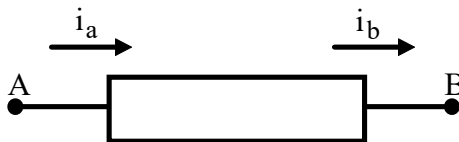


fig. 1.1.1

$$i_a(t) = i_b(t) \quad (1.1.2)$$

-) La somma algebrica di tutte le correnti che entrano in un nodo è nulla in ogni istante.

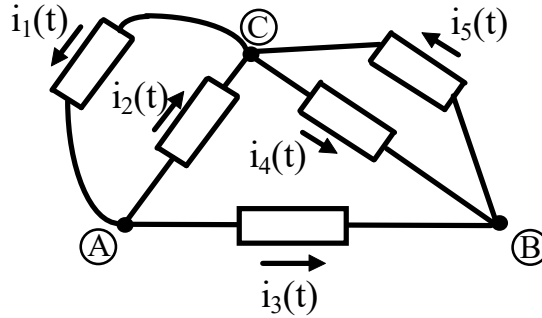


fig. 1.1.2

Ad esempio al nodo B:

$$i_3 + i_4 - i_5 = 0 \quad (1.1.3)$$

-) La somma algebrica delle tensioni in un qualsiasi percorso chiuso è nulla in ogni istante.

$$v_{AB} + v_{BC} + v_{CA} = 0 \quad (1.1.4)$$

Le relazioni (1.1.3) e (1.1.4) vengono comunemente dette **leggi di Kirchhoff** per i circuiti elettrici.

1.2) BIPOLI PASSIVI LINEARI E TEMPO INVARIANTI

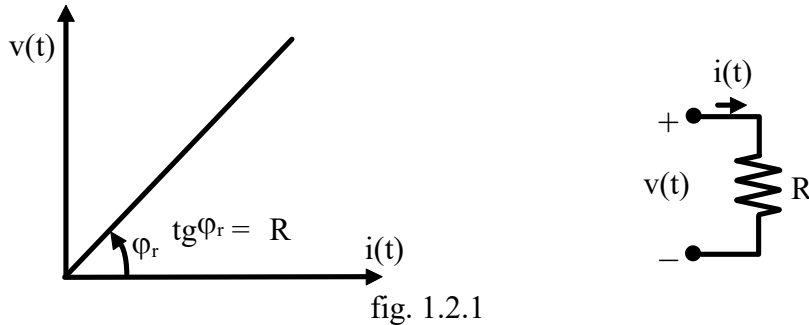
In questa parte relativa all'analisi delle reti elettriche sono presi in considerazione solamente bipoli **lineari** e **tempo invarianti**, che hanno la proprietà che il parametro elettrico che li contraddistingue è costante nel tempo e non dipende dalle condizioni di funzionamento. I principali bipoli elettrici passivi sono:

●) RESISTORE

Nel caso del resistore l'equazione costitutiva è:

$$v(t) = Ri(t) \quad (1.2.1)$$

Il parametro R è la **resistenza** del bipolo, che è in questo caso una costante. L'unità di misura della resistenza è l'Ohm [Ω]. La rappresentazione grafica dell'equazione costitutiva ed il simbolo del resistore sono mostrati in figura 1.2.1..



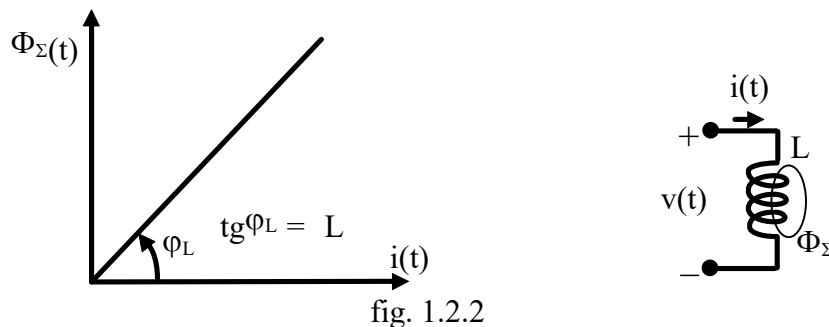
●) INDUTTORE

Per la definizione dell'induttore si può usare l'espressione:

$$L = \frac{\Phi_{\Sigma}(t)}{i(t)} \quad (1.2.2)$$

nella quale $\Phi_{\Sigma}(t)$ rappresenta il flusso magnetico concatenato con una bobina ed $i(t)$ è la corrente che percorre la bobina e genera tale flusso. Il parametro L è l'**induttanza** o **coefficiente di autoinduzione** del bipolo ed è in questo caso una costante. L'unità di misura dell'induttanza è l'Henry [H].

La rappresentazione grafica dell'equazione costitutiva dell'induttore ed il suo simbolo grafico sono mostrati in figura (1.2.2).



La relazione tra tensione e corrente viene derivata dalla relazione:

$$v(t) = -e(t) = \frac{d\Phi_{\Sigma}}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1.2.3)$$

con $e(t)$ forza controlettromotrice indotta.

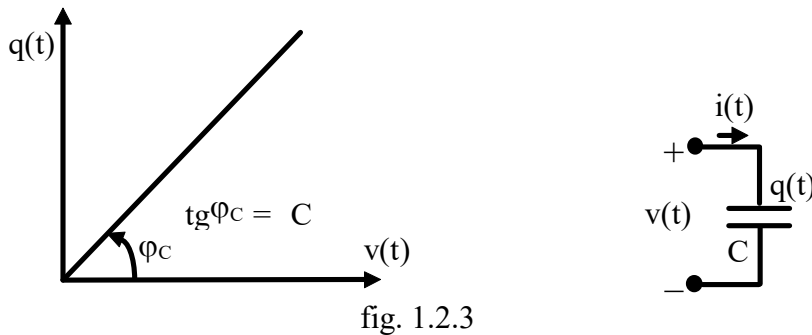
•) CONDENSATORE

In questo caso la relazione costitutiva da cui si parte è quella tra la tensione applicata e la carica contenuta in un condensatore:

$$q(t) = C v(t) \quad (1.2.4)$$

Il parametro C è la **capacità** del condensatore ed è in questo caso una costante. L'unità di misura della capacità è il Farad [F].

La rappresentazione grafica dell'equazione costitutiva ed il simbolo grafico del condensatore sono mostrati in figura 1.2.3.



Infine la relazione tra tensione e corrente nel bipolo capacitivo risulta:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt} \quad (1.2.5)$$

Nelle figure 1.2.1, 1.2.2 e 1.2.3 la rappresentazione grafica è limitata per semplicità ai soli valori positivi, ma l'equazione costitutiva è valida in tutto l'insieme dei numeri reali.