



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE E TECNOLOGIE

Laboratorio di Elettronica
Note del corso

Lorenzo LIUZZO

Bachelor's Degree:	Physics
Academic Year:	2022/2023
Course:	Electronics Laboratory
Professor:	Valentino LIBERALI

Contents

1	Grandezze elettriche e circuiti elettrici	2
2	Grandezze elettriche variabili nel tempo, condensatore e induttore, circuiti RC del primo ordine	5
3	Trasformata di Fourier, risposta in frequenza e diagrammi di Bode	7
4	Amplificatore operazionale	8
5	Circuiti con amplificatori operazionali	10
6	Semiconduttori e diodi a giunzione	11
7	Transistore bipolare a giunzione	12
8	Algebra di Boole, porte logiche, circuiti aritmetici	13
9	Tecnologia CMOS	14

1 Grandezze elettriche e circuiti elettrici

Definizione 1.1: Carica elettrica

La carica elettrica Q è una proprietà fondamentale della materia che indica il passaggio di corrente elettrica per tempo:

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A s}$$

La carica elettrica può essere sia positiva sia negativa, ed è quantizzata, cioè tutte le cariche sono multipli della carica elementare:

$$q = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Le cariche elettriche sono sempre soggette ad una forza elettrica, detta *di Coulomb*, pari a

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \hat{r}$$

Definizione 1.2: Corrente elettrica

La corrente elettrica, o intensità di corrente elettrica, I , è data dal movimento di cariche mobili e matematicamente si esprime come la derivata della carica elettrica rispetto al tempo:

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

La corrente si misura in serie con l'amperometro.

Definizione 1.3: Differenza di potenziale

La tensione V tra due punti è l'integrale di linea del campo elettrico su un percorso qualsiasi che congiunga i due punti:

$$V_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

La tensione si misura in parallelo con il voltmetro.

Definizione 1.4: Potenza

La potenza P è il prodotto tra la tensione e la corrente:

$$P = VI$$

La potenza si misura in watt. Ha segno positivo se il bipolo aumenta l'energia immagazzinata, negativo se la diminuisce.

Definizione 1.5: Energia elettrica

L'energia elettrica viene distribuita attraverso la rete di distribuzione con un sistema trifase a quattro conduttori: tre hanno tensioni sinusoidali sfasate tra loro di $\frac{2\pi}{3}$, il quarto, detto neutro, è collegato a terra e costituisce il potenziale zero di riferimento. Il valore medio della tensione di rete è zero, mentre il valore efficace (root-mean-square rms) è 230 V. Le apparecchiature elettriche devono rispettare determinate specifiche di sicurezza:

- classe I: messa a terra di protezione
un circuito elettrico monofase ha tutte le parti in tensione isolate per il livello di tensione nominale, mentre l'involucro metallico dell'apparecchiatura è collegato a terra. Inoltre, sono posizionati due interruttori differenziali (o salvavita) che rilevino lo squilibrio tra la corrente di fase e la corrente di guasto. Un interruttore differenziale deve aprire il circuito quando la differenza tra le correnti è maggiore o uguale a 30 mA, cioè la soglia di pericolosità della corrente per il corpo umano.
- classe II: doppio isolamento
Gli apparecchi a doppio isolamento non richiedono la messa a terra e sono costruiti in modo che un singolo guasto non possa causare il contatto con tensioni pericolose.

- classe III: bassissima tensione di sicurezza
Una tensione non superiore a 25 V in alternata o 50 V in continua non rappresenta un pericolo per il corpo umano. Si consiglia di non superare il ± 12 per i circuiti che vedremo in laboratorio.

Definizione 1.6: Bipoli elettrici

I circuiti elettrici sono formati da elementi circuitali interconnessi tra di loro. I più semplici elementi circuitali sono dispositivi a due terminali, o bipoli.

Al bipolo è applicata la differenza di potenziale V e attraverso di esso fluisce la corrente elettrica I . I due terminali vengono contrassegnati con i simboli $+$ ed $-$. La tensione si misura dal polo negativo a quello positivo. La corrente si considera positiva quando entra nel bipolo $+$.

Definizione 1.7: Nodo

Un nodo è un punto di un circuito elettrico in cui si incontrano due o più bipoli.

Definizione 1.8: Maglia

Una maglia è un percorso chiuso attraverso due o più bipoli di un circuito.

Definizione 1.9: Resistore e legge di Ohm

Il più semplice bipolo lineare è il resistore, caratterizzato da proporzionalità diretta tra tensione e corrente (*Legge di Ohm*):

$$V = RI$$

dove R è la resistenza che si misura in Ohm:

$$1\Omega = 1V/A = 1kgm^2/(A^2s^3)$$

Definizione 1.10: Generatori

Un generatore è un bipolo attraverso il quale si genera una tensione. Un generatore di tensione presenta una tensione fissata fra i suoi terminali. Il più semplice generatore di tensione costante nel tempo è una pila o batteria.

Definizione 1.11: Multimetro

Un multimetro è uno strumento di misurazione in grado di misurare tensione, corrente e resistenza. I multimetri possono essere analogici e digitali, palmari o da banco.

La corrente (sia in alternata sia in continua) si misura in serie, quindi bisogna aprire il circuito ed inserire l'amperometro in serie.

La tensione (sia in alternata sia in continua) si misura in parallelo, quindi bisogna mettere in parallelo il voltmetro. Misurare la tensione è più comodo rispetto alla misura di corrente.

Definizione 1.12: Alimentatore

Un alimentatore funziona in modo simile ad un generatore ideale e fornisce una differenza di potenziale di circa 30 V. Se vogliamo una corrente o positiva o negativa, si effettua manualmente un collegamento a terra tra il terminale e l'alimentatore.

Definizione 1.13: Partitore di tensione

Un partitore di tensione è costituito da due o più componenti passivi collegati in serie. Se ai capi della serie viene applicata una tensione, essa si ripartirà ai capi dei componenti in base al loro valore.

Definizione 1.14: Cortocircuito

Il cortocircuito è un collegamento tra due nodi effettuato con un generatore di tensione nulla. In un cortocircuito la tensione ai capi del generatore è nulla, quindi la corrente può assumere qualsiasi valore.

Definizione 1.15: Circuito aperto

Un generatore di corrente spento è percorso da una corrente nulla e tensione qualsiasi. Il circuito aperto è un collegamento tra due nodi effettuato con un generatore di corrente nulla.

Definizione 1.16: Leggi di Kirchhoff

La somma algebrica delle correnti in un nodo di un circuito è zero:

$$\sum_i I_i = 0$$

La somma algebrica delle tensioni in una maglia di un circuito è zero:

$$\sum_j V_j = 0$$

Definizione 1.17: Partitore di tensione

Un partitore di tensione è costituito da due o più componenti passivi collegati in serie. Se ai capi della serie viene applicata una tensione, essa si ripartirà ai capi dei componenti in base al loro valore.

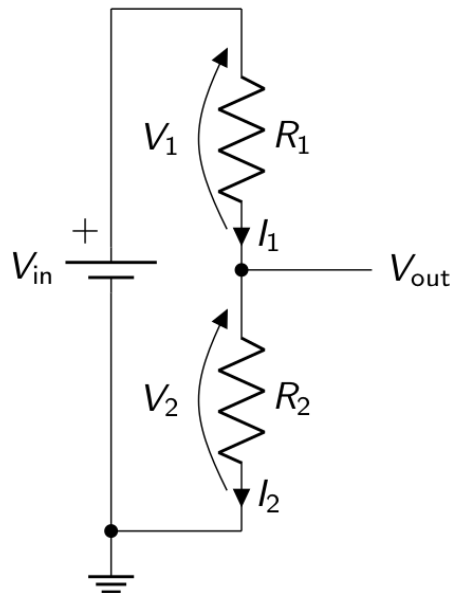


Figure 1: Partitore di tensione

2 Grandezze elettriche variabili nel tempo, condensatore e induttore, circuiti RC del primo ordine

Definizione 2.1: Segnale

Una grandezza elettrica che varia nel tempo secondo una legge determinata costituisce un segnale.

I segnali possono essere di tensione oppure di corrente.

Un segnale è analogico quando il suo contenuto di informazione varia con continuità, potendo assumere un'infinità di valori possibili (entro un certo intervallo). Un segnale è digitale quando il suo contenuto di informazione varia in modo discreto, potendo assumere soltanto un numero finito di valori possibili.

Un segnale è periodico quando si ripete identicamente dopo un intervallo di tempo detto periodo.

Definizione 2.2: Valore medio e valore efficace

Il valore medio di un segnale periodico è il valore medio di una sua singola oscillazione:

$$V_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt$$

Il valore efficace di un segnale periodico è il valore della tensione continua che, applicata ad un resistore, produce la stessa potenza dissipata dal resistore stesso quando è attraversato dal segnale periodico:

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}$$

Definizione 2.3: Energia interna

Elementi circuitali il cui comportamento non dipende solo dal valore istantaneo delle grandezze elettriche, ma anche dai valori assunti in precedenza, mantengono al loro interno un'informazione legata al loro funzionamento passato. L'informazione è fisicamente immagazzinata sotto forma di energia variabile nel tempo $w(t)$. L'energia assorbita da un bipolo all'istante t è:

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau$$

Definizione 2.4: Condensatore

Il condensatore è costituito da due superfici metalliche parallele separate da un isolante. La carica immagazzinata è proporzionale alla tensione applicata:

$$q(t) = C v(t)$$

La costante C è la capacità del condensatore, che si misura in farad (F):

$$1 \text{ F} = 1 \text{ C V}^{-1}$$

Per un condensatore a facce piane e parallele di area S poste ad una distanza d l'una dall'altra, con un dielettrico di costante dielettrica relativa ϵ , la capacità è:

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

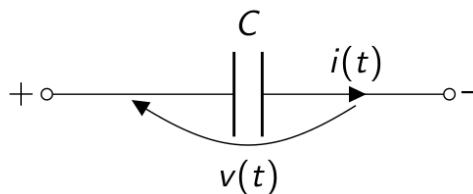


Figure 2: Condensatore

Nel condensatore la corrente è proporzionale alla derivata della tensione:

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

mentre la tensione è proporzionale all'integrale della corrente:

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau + v(0)$$

L'energia immagazzinata nel condensatore è:

$$w(t) = \frac{1}{2} C v^2(t)$$

mentre la potenza istantanea è:

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = C v(t) \frac{dv(t)}{dt}$$

Definizione 2.5: Induttore e legge di Faraday-Henry

L'induttore è costituito da un avvolgimento di filo conduttore, detto solenoide. All'interno dell'avvolgimento si ha un flusso magnetico Φ proporzionale alla corrente nel filo:

$$\Phi(t) = L i(t)$$

La costante L è l'induttanza dell'induttore, che si misura in henry (H):

$$1 \text{ H} = 1 \text{ V s A}^{-1}$$

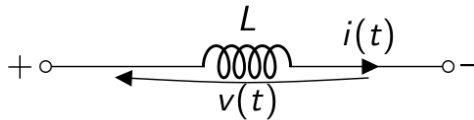


Figure 3: Induttore

Una variazione nel tempo del flusso magnetico produce una differenza di potenziale ai capi dell'induttore (legge di Faraday-Henry):

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

La tensione è dunque proporzionale alla derivata della corrente, mentre la corrente è proporzionale all'integrale della tensione:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v(\tau) d\tau + i(0)$$

L'energia immagazzinata nell'induttore è:

$$w(t) = \frac{1}{2} L i^2(t)$$

quindi la potenza istantanea è:

$$p(t) = L i(t) \frac{di(t)}{dt}$$

3 Trasformata di Fourier, risposta in frequenza e diagrammi di Bode

4 Amplificatore operazionale

Definizione 4.1: Generatori dipendenti

Un generatore dipendente è un elemento che genera una grandezza elettrica (tensione o corrente) il cui valore è funzione di un'altra grandezza elettrica (tensione o corrente) presente nel circuito. I generatori dipendenti sono “doppi bipoli”, cioè hanno una coppia di terminali di ingresso per la variabile di controllo e una coppia di terminali di uscita per la grandezza generata. Convenzionalmente, nelle figure i terminali di ingresso sono a sinistra e i terminali di uscita sono a destra.

Definizione 4.2: Generatore di tensione controllato in tensione

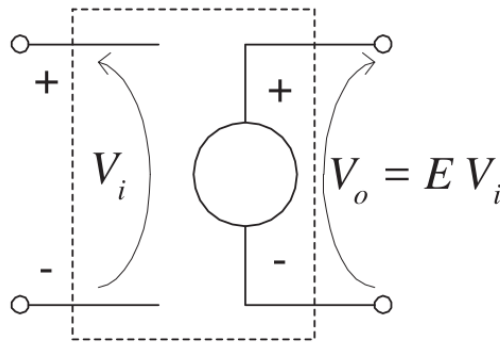


Figure 4: VCVS

Definizione 4.3: Generatore di corrente controllato in corrente

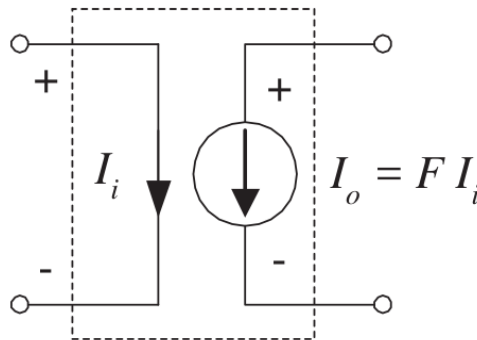


Figure 5: CCCS

Definizione 4.4: Generatore di corrente controllato in tensione

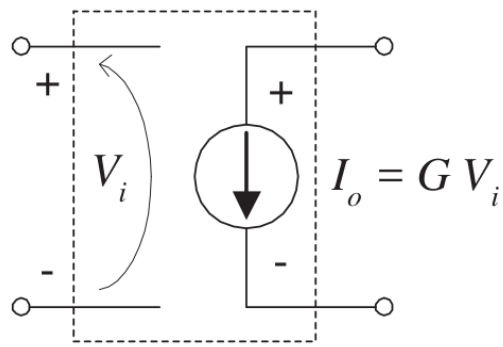


Figure 6: VCCS

Definizione 4.5: Generatore di tensione controllato in corrente

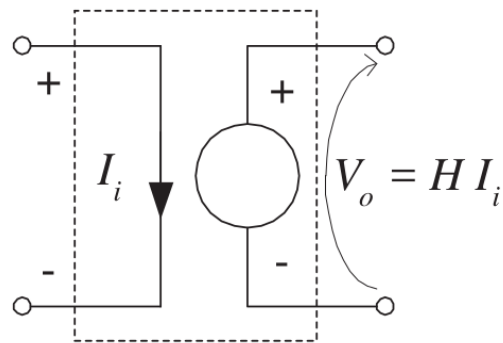


Figure 7: CCVS

5 Circuiti con amplificatori operazionali

6 Semiconduttori e diodi a giunzione

7 Transistore bipolare a giunzione

8 Algebra di Boole, porte logiche, circuiti aritmetici

9 Tecnologia CMOS