

## 1 Lezione del 25-09-24

### 1.1 Introduzione

Il corso di elettrotecnica riguarda lo studio dei **circuiti elettrici** e dei **macchinari elettrici**.

#### 1.1.1 Analisi dei circuiti elettrici

Le leggi di Maxwell vanno a descrivere come si evolvono, nel tempo e nello spazio, i campi elettrici e magnetici. Purtroppo, le equazioni di Maxwell sono equazioni differenziali e legate fra di loro, ergo si possono spesso avere solo soluzioni numeriche. Esistono però casi particolari in cui si possono fare semplificazioni considerevoli.

Un **circuito elettrico** è formato da fili conduttori e **componenti circuitali**. All'interno di un circuito si va a descrivere un'onda elettrica:

$$\psi(s, t)$$

rappresentata come una funzione di spazio e tempo. Poniamo ad esempio la funzione, sulla sola posizione  $x$ :

$$\psi(x, t) = y \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t \right)$$

Questa funzione ha comunque due variabili: la posizione  $x$  e il tempo  $t$ . Immaginiamo di prendere un punto  $x_0$  sul circuito elettrico:

$$\psi(t) = y \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} x_0 - \frac{2\pi}{T} t \right)$$

Con  $x_0 = 0$ , annulliamo il primo termine. A questo punto abbiamo ottenuto una funzione in una sola variabile:

$$\psi(x_0, t) = y \sin \left( -\frac{2\pi}{T} t \right)$$

ovvero una sinusoide invertita che oscilla fra un massimo di  $y$  e un minimo di  $-y$ .

Questo significa che, mettendoci sul punto  $x_0 = 0$  del circuito elettrico, notiamo che il valore dell'onda elettrica varia nel tempo seguendo questa funzione sinusoidale.

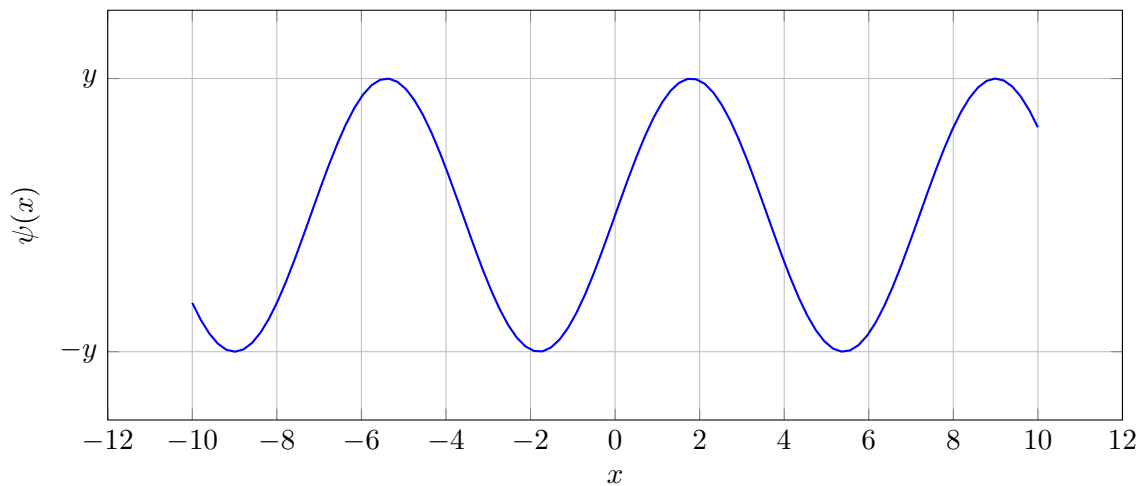
Possiamo fare il processo inverso: fissiamo il tempo  $t$ , e vediamo come varia l'onda elettrica su diverse posizioni  $x$  nel circuito. Abbiamo, simbolicamente:

$$\psi(x) = y \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t_0 \right)$$

da cui ricaviamo l'equazione in una sola variabile  $t$ :

$$\psi(x) = y \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} x \right)$$

ovvero una sinusoide che, come prima, oscilla fra un massimo di  $y$  e un minimo di  $-y$ . Si riporta un grafico:



Questo significa che, all'istante  $t_0 = 0$  notiamo che il valore dell'onda elettrica varia sulla lunghezza del circuito seguendo ancora questa funzione sinusoidale.

Possiamo provare a calcolare lunghezza d'onda e periodo di questa oscillazione: visto che il periodo del seno è  $2\pi$ , abbiamo che nello spazio la lunghezza d'onda è  $\lambda$  e nel tempo il periodo è  $T$ .

Proviamo a calcolare  $\lambda$ : sappiamo che la lunghezza d'onda equivale alla velocità di propagazione sulla frequenza dell'oscillazione, ovvero:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Posti i valori  $300 \cdot 10^6$  m/s per  $v$  e 50 Hz per  $f$  (la frequenza della rete elettrica), abbiamo:

$$\lambda = \frac{3.00 \cdot 10^6 \text{ m/s}}{50 \text{ Hz}} = 6000 \text{ km}$$

Questa lunghezza d'onda diventa rilevante in trasmissioni elettriche su larga scala.

Possiamo fare considerazioni diverse se prendiamo in esempio le comunicazioni radio: lì si parla di frequenze  $f \gg 50$  Hz, nell'ordine dei megahertz o gigahertz.

L'elevata velocità della corrente ci permette di fare un'importante approssimazione e considerare **circuiti a parametri concentrati**. Quest'ipotesi, in inglese *lumped element model*, ci permette di ignorare l'estensione fisica del circuito, e quindi le variazioni delle funzioni d'onda sulla variabile spazio  $s$ , concentrandosi sulla variabile tempo  $t$ .

## 1.2 Grandezze

Si usano le seguenti grandezze:

### 1.2.1 Intensità di corrente

#### 1.1: Corrente elettrica

Si indica con  $I$  la corrente elettrica, misurata in Ampere [A], e definita come la variazione di carica:

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

Si prende come positivo il verso in cui si muovono i portatori di carica positive, anche se sappiamo nella stragrande maggioranza dei casi i portatori di carica essere negativi, e quindi il movimento vero e proprio degli elettroni in direzione opposta.

Notiamo che se un segmento di circuito da  $A$  a  $B$  si ha una corrente  $I_{AB}$ , vale:

$$I_{AB} = -I_{BA}$$

### 1.2.2 Differenza di potenziale

#### 1.2: Differenza di potenziale

Si indica con  $V$  la differenza di potenziale o *tensione*, misurata in Volt [V], e definita come il lavoro necessario a spostare una carica elementare positiva da un punto  $A$  ad un punto  $B$  sulla carica:

$$V_{AB}(t) = \frac{L_{AB}(t)}{q(t)}$$

Il segno del potenziale è definito come *positivo* quando si deve vincere il campo magnetico per spingere la carica, ergo il campo elettrico svolge lavoro *negativo* sulla carica. Come prima, su segmenti di circuito da  $A$  a  $B$  vale:

$$V_{AB} = -V_{BA}$$

### 1.2.3 Riferimenti associati e non associati

I componenti circuitali, presi a sé, vengono detti **dipoli elettrici**, dal fatto che hanno 2 poli. Di un dipolo elettrico si può misurare la differenza di potenziale ai capi e la corrente che vi scorre attraverso.

Quando si parla di tensione, o si parla di differenze di potenziale, o si assume un riferimento (lo zero del potenziale). Non possiamo sapere a priori se il potenziale al capo di un dipolo è maggiore del potenziale all'altro capo: bisogna prima scegliere una direzione e poi vedere se il segno ricavato è concorde o meno con la nostra scelta.

Lo stesso vale per la corrente. I riferimenti concordi al verso della corrente si dicono **associati**, quelli discordi si dicono **non associati**.

### 1.2.4 Potenza elettrica

#### 1.3: Potenza elettrica

Si indica con  $P$  la potenza elettrica, misurata in Watt [W] e definita come il prodotto:

$$P = IV$$

fra corrente e tensione.

Anche la potenza ha un segno, che in questo caso si riferisce a potenza *erogata* o *dissipata*. La potenza calcolata sui riferimenti associati positiva è dissipata, quella negativa è erogata. Viceversa, la potenza calcolata sui riferimenti non associati positiva è erogata, quella negativa è dissipata.

### 1.2.5 Energia

#### 1.4: Energia

Si indica con  $W$  (non Watt!) l'energia, misurata in Joule [J], o in Kilowatt/ora (KW/h), e definita come l'integrale sul tempo della potenza:

$$W = \int_{-\infty}^t P dt$$

### 1.3 Leggi di Kirchoff

Iniziamo col dare dei nomi a particolari punti del circuito elettrico: i punti di incontro di più fili prendono il nome di **nodi**, e i fili che collegano i dipoli ai nodi prendono il nome di **rami**. Da questo abbiamo che nei nodi si incontrano 3 o più rami.

Da qui possiamo definire la legge:

#### 1.1: Prima legge di Kirchoff

La somma algebrica delle correnti dei rami tagliati da una linea chiusa è uguale a 0. In particolare, la somma algebrica delle correnti entranti e uscenti da un nodo è uguale a 0.

Definiamo quindi il concetto di **maglia**: una maglia è un percorso chiuso di nodi e rami, ovvero un sottoinsieme di rami tali per cui spostandosi da un nodo all'altro si percorre ogni ramo una sola volta. Sulle maglie si ha:

#### 1.2: Seconda legge di Kirchoff

La somma algebrica delle cadute di potenziale lungo una maglia è uguale a 0.

## 2 Lezione del 26-09-24

### 2.1 Dipolo elettrico

Abbiamo introdotto i componenti circuitali come **dipoli elettrici**. In particolare, diciamo che un dipolo elettrico è un componente, con una certa differenza di potenziale  $V_{AB}$  ai suoi capi e una corrente  $i_{AB}(t)$  che vi scorre all'interno, tale per cui si può definire una funzione del tipo:

$$V_{AB} = f(i_{AB}(t))$$

Possiamo individuare alcune caratteristiche importanti dei dipoli:

- **Linearità**: un dipolo si dice lineare se la funzione che lega voltaggio e corrente è lineare. Tutti i dipoli che studieremo sono lineari (resistenze, capacitori, ecc...). Esistono però svariati dipoli che hanno risposte non lineari ai voltaggi/correnti a cui vengono sottoposti (diodi (risposte diverse a direzioni diverse della corrente), amplificatori operazionali, ecc...).
- **Tempo invarianza**: un dipolo si dice tempo invariante quando le sue caratteristiche non variano nel tempo.

- **Memoria:** un dipolo si dice dotato di memoria quando i suoi valori di corrente e tensione attuali dipendono da valori di corrente e tensioni ad un'istante  $t$  precedente. I dipoli dotati di memoria presentano solitamente *cicli di isteresi*.
- **Passività/attività:** si dice **passivo** un dipolo che dissipa potenza, e **attivo** un dipolo che la eroga. Più propriamente, si ha che un dipolo è passivo quando l'energia su di esso, presa un riferimento associato, è  $\geq 0$ .

## 2.2 Resistori

Un resistore è un componente circuitale caratterizzato dalla legge di Ohm ( $J = \sigma E$ ), e quindi formato da un materiale *ohmico* che ha risposta lineare in densità di corrente alle variazioni del campo. Si indica come:



### 2.1: Prima legge di Ohm

Il voltaggio è legato alla corrente, in un resistore, secondo la relazione:

$$V_R(t) = R i_R(t)$$

dove  $R$  prende il nome di **resistenza**, misurata in Ohm  $[\Omega]$ , definita come:

$$R = \frac{V}{i}$$

### 2.2.1 Resistenza e resistività

Conosciamo la legge di Ohm sui materiali ohmici riportata prima. Da questa legge si ricava:

### 2.2: Seconda legge di Ohm

La resistenza di un filo di lunghezza  $l$  e sezione  $s$  è data da:

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

dove  $\rho$  prende il nome di **resistività**, misurata in Ohm per metro  $[\Omega \cdot \text{m}]$ .

Questo significa che la resistenza cresce con il crescere della lunghezza, e diminuisce con il crescere della sezione.

In verità questa non sono le uniche caratteristiche che influenzano la resistenza: un apporto significativo è dato anche dalla **temperatura**, alla quale la resistenza ha proporzionalità quasi lineare, ma che noi ignoreremo.

### 2.2.2 Conduttanza e conducibilità

Conviene definire altre due unità di misura: l'inverso della resistenza, detta **conduttanza**, che si misura in Siemens  $[\Omega^{-1} = \text{S}]$ , o in **mho**  $[\text{U} = \Omega^{-1}]$ :

$$G = \frac{1}{R}$$

e l'inverso della resistività, detta **conducibilità**, che si misura in  $[\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$ :

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

I resistori sono inoltre:

- Tempo invarianti (a patto di trascurare la temperatura);
- Senza memoria;
- Passivi (dissipano potenza per **effetto Joule**). Ciò si può dimostrare calcolando la potenza dalla prima legge di Ohm:

$$p(t) = v_{AB}(t) \cdot i_{AB}(t) = R i_{AB}^2(t) \geq 0$$

e calcolando l'energia come integrale:

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(t) dt \Rightarrow w(t) > 0$$

### 2.2.3 Circuiti aperti/chiusi

Le resistenze, soprattutto nei loro casi limite, aiutano a modellizzare varie parti di un circuito:

- **Cortocircuito**: indicato da una resistenza nulla, ergo:

$$V_{AB}(t) = 0 \Leftrightarrow R = 0$$

Modellizza il filo ideale, ergo ciò che per noi è un ramo.

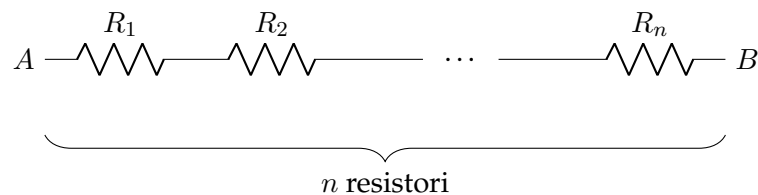
- **Circuito aperto**: indicato da una corrente nulla, ergo:

$$i_{AB} = 0 \Leftrightarrow R = +\infty$$

Modellizza interruzioni nel circuito: si può dimostrare che la corrente attraverso un'interruzione in un circuito è nulla sfruttando la prima legge di Kirchhoff: una linea chiusa che comprende il nodo finale di un'interruzione avrà un ramo entrante e 0 uscenti, ovvero corrente entrante nulla.

### 2.2.4 Resistenze in serie

Poniamo di avere una configurazione di resistenze del tipo:



Vogliamo calcolare una resistenza  $R_{eq}$  che valga quando la resistenza cumulativa di tutte e  $n$  le resistenze. Abbiamo allora che la corrente lungo ogni resistenza  $i(t)$  è costante, mentre ogni resistenza contribuisce al potenziale  $V_{AB}$  con una certa caduta di potenziale  $V_1(t), V_2(t), \dots, V_n(t)$ . Si applica quindi la prima legge di Ohm:

$$V_{AB} = V_1 t + V_2 t + \dots + V_n t = R_1 \cdot i(t) + R_2 \cdot i(t) + \dots + R_n \cdot i(t) = i(t) \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n)$$

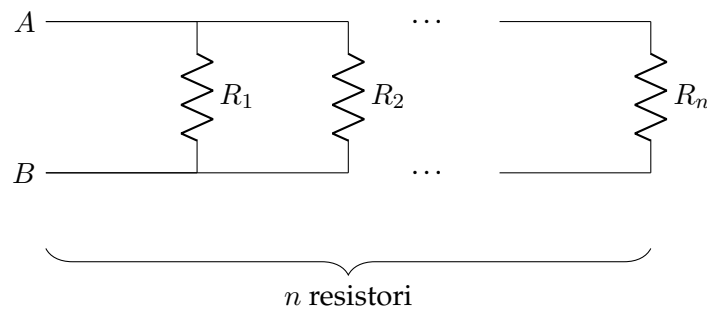
quindi, da  $V_{AB} = i(t) R_{eq}$  si ha:

### 2.3: Resistenze in serie

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

#### 2.2.5 Resistenze in parallelo

Poniamo di avere le resistenze in parallelo invece che in serie:



Vogliamo ancora calcolare una resistenza  $R_{eq}$  che valga quando la resistenza cumulativa di tutte e  $n$  le resistenze. Qui abbiamo che la differenza di potenziale lungo ogni resistenza  $V(t)$  costante. Si applica ancora la prima legge di Ohm:

$$i = i_1(t) + i_2(t) + \dots + i_n(t) = \frac{V_{AB}(t)}{R_1} + \frac{V_{AB}(t)}{R_2} + \dots + \frac{V_{AB}(t)}{R_n}$$

conviene raccogliere e passare alle conduttanze:

$$G_{eq} = V_{AB}(t)(G_1 + G_2 + \dots + G_n) = G_{eq} \cdot V_{AB}(t)$$

Ora, se  $G = \frac{1}{R}$ :

$$R_{eq} = G_{eq}^{-1} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)^{-1}$$

quindi, si ha:

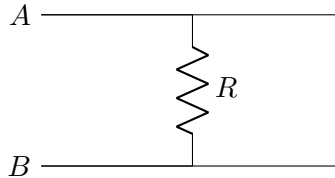
### 2.4: Resistenze in parallelo

$$R_{eq} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)^{-1}$$

### 3 Lezione del 27-09-24

#### 3.0.1 Resistenza e cortocircuito in parallelo

Poniamo di avere la configurazione:



Dove un resistore è in parallelo ad un corto circuito. Intuitivamente, tutta la corrente passerà dal cortocircuito, e non dalla resistenza. Possiamo modellizzare questo fatto in due modi:

- Attraverso la formula per le resistenze in parallelo, avremo che:

$$R_{eq} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad R_1 = 0 \Rightarrow R_{eq} = \frac{0}{R_2} = 0$$

ergo resistenza nulla.

La prima trasformazione è necessaria in quanto rimuove i vincoli sul dominio di  $R_1$  e  $R_2$  (che altrimenti non potrebbero essere 0).

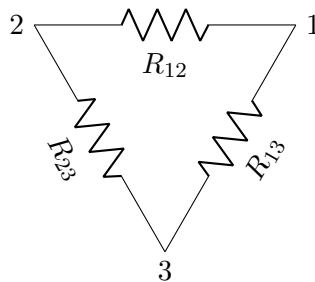
- Notiamo che A e B sono effettivamente allo stesso potenziale, ergo abbiamo differenza di potenziale  $V_{AB} = 0$  ai capi della resistenza. Applicando quindi la prima legge di Ohm  $V_{AB} = i(t)R$  si ha  $i(t) = 0$ , cioè corrente costante nulla sulla resistenza.

#### 3.1 Altre configurazioni di resistenze

Esistono altri modi di configurare le resistenze, che permettono di studiare circuiti su cui i metodi studiati finora non funzionano.

##### 3.1.1 Resistenze a triangolo

Nelle resistenze a triangolo, una singola maglia di 3 nodi forma un triangolo con i lati 3 resistenze:





### 3.1.2 Resistenze a stella

Nelle resistenze a stella, più resistenze vengono collegate, da un'estremo, ad un singolo nodo centrale:



Si possono trasformare resistenze a triangolo in resistenze a stella aggiungendo un nodo centrale  $O$  e collegandovi i 3 nodi già esistenti attraverso le resistenze interne:

#### 3.1: Resistenze da stella a triangolo

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$$

$$R_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$$

$$R_3 = \frac{R_{23}R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$$

Allo stesso modo, si possono trasformare resistenze a stella in resistenze a triangolo unendo i nodi fra di loro attraverso le resistenze esterne:

#### 3.2: Resistenze da triangolo a stella

$$R_{12} = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_3}$$

$$R_{13} = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_2}$$

$$R_{22} = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_1}$$

### 3.2 Algoritmo per la resistenza equivalente

A questo punto, si possono semplificare circuiti di resistori arbitrari applicando l'algoritmo:

#### Algoritmo 1 Calcolo della resistenza equivalente

```

while ci sono > 1 resistenze do
    Semplificare le resistenze in serie
    Semplificare le resistenze in parallelo
    Se non hai semplificato niente, trasforma un triangolo in stella o viceversa.
end while
    
```

La resistenza equivalente è a volte detta anche *resistenza vista*. Questo perchè l'intero circuito si comporterà, per una qualsiasi rete esterna, come un singolo resistore di resistenza  $R_{eq}$ , ovvero avrà la stessa **risposta** di un singolo resistore di resistenza  $R_{eq}$ . Analiticamente, questo significa che la funzione  $f$  in  $v(t) = f(i(t))$  (o la sua inversa) sono uguali per i due circuiti.

## 4 Lezione del 02-10-24

### 4.1 Generatori

I generatori sono i componenti che spostano le cariche attraverso le reti elettriche. Dividiamo i generatori in due macrocategorie, in base alle loro caratteristiche:

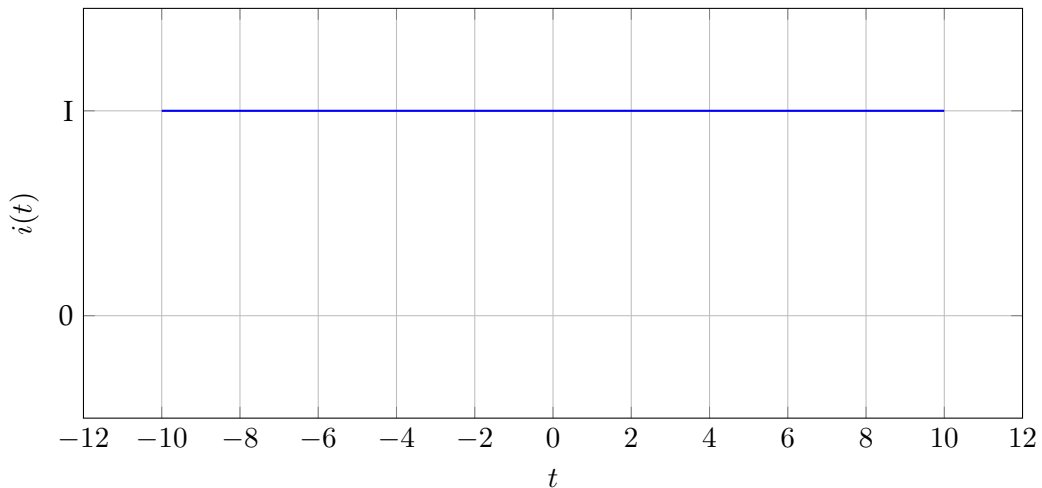
- **Indipendenti:** hanno sempre le stesse caratteristiche, e portano energia all'interno del circuito;
- **Dipendenti:** hanno caratteristiche *pilotate* da altri fattori del circuito, non portano energia in esso e quindi non sono diversi dagli altri dipoli passivi già visti.

Inoltre dividiamo entrambe in altre due categorie, in base al tipo di operazione che svolgono:

- **Generatori di tensione:** mantengono i loro capi a differenza di potenziale costante;
- **Generatori di corrente:** mantengono una corrente costante al loro interno.

Infine, dividiamo in due ulteriori modalità di operazione:

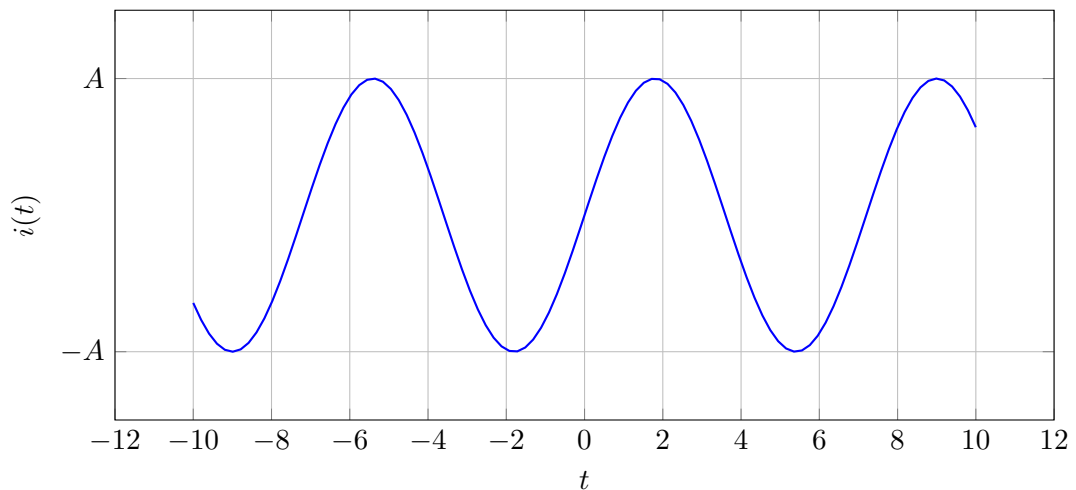
- **Corrente continua:** mantengono la corrente costante. Si dicono C.C. (Corrente Continua), o D.C. (Direct Current). Il grafico della corrente sarà:



- **Corrente alternata:** mantengono la corrente in regime sinusoidale. Si dicono C.A. (Corrente Alternata), o A.C. (Alternating Current). Il grafico della corrente alternata è stato già visto all'inizio del corso, ha equazione:

$$i(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$$

con  $A$  ampiezza e  $T$  periodo, e grafico:



Esistono poi altri regimi di applicazione della corrente, che vedremo per casi specifici (impulsi, gradini, ecc...).

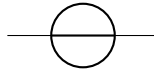
Riportiamo intanto ogni combinazione delle prime quattro tipologie nel dettaglio.

#### 4.1.1 Generatori di tensione

Un generatore di tensione (o voltaggio) ideale è un componente circuitale che mantiene i suoi capi  $A$  e  $B$  ad una differenza di potenziale  $V_{AB}$  costante, ovvero:

$$v(t) = E(t) = V$$

dove con  $E$  si indica la forza elettromotrice. Si indica come:



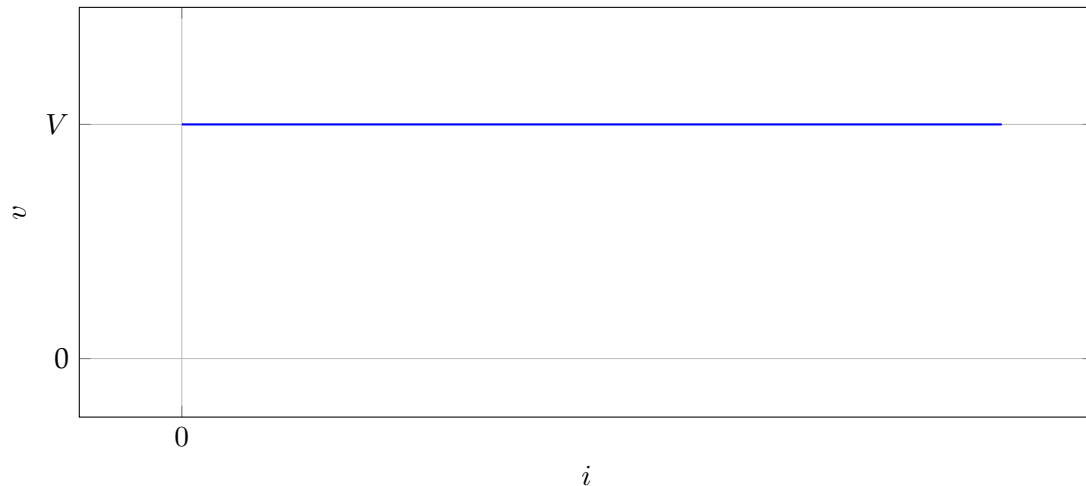
Si nota che a voltaggio nullo, un generatore di tensione equivale a un corto circuito (un filo ideale).

#### Correlazione con la corrente

La tensione erogata da un generatore di tensione è costante, qualsiasi sia la corrente che lo attraversa:

$$v(i) = \text{const.}$$

Il grafico di correlazione corrente-voltaggio sarà quindi:



### Correlazione con la potenza

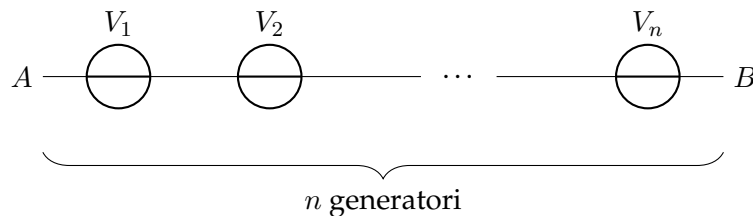
Tradizionalmente si descrivono i generatori di tensione attraverso riferimenti non associati di corrente e tensione. Resta il fatto che la potenza:

$$p(t) = v(t)i(t) = E(t)i(t)$$

quando è erogata dal generatore, è  $> 0$ .

### Collegamenti in serie

Per sommare i contributi al voltaggio di più generatori di voltaggio, li disponiamo in serie:

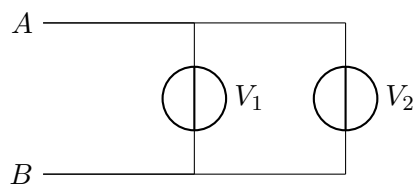


Abbiamo che il contributo totale dei generatori equivale a quello di un singolo generatore  $E_T$  di voltaggio:

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

### Collegamenti in parallelo

Non si possono collegare generatori di voltaggio in parallelo, a meno che questi non abbiano lo stesso voltaggio (e quindi risultino in movimento nullo di carica):



Dove si ha, dall'applicazione della seconda legge di Kirchhoff:

$$V_1 - V_2 = 0 \Rightarrow V_1 = V_2$$

che sarebbe altrimenti violata.

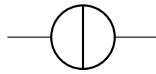
Nella realtà, se si provasse a collegare due generatori di tensione di voltaggio diverso in parallelo, questi proverebbero a imporre la loro differenza di potenziale sui due rami del circuito, creando forti correnti, e probabilmente causando danni termici ad esso o a loro stessi.

#### 4.1.2 Generatori di corrente

Un generatore di corrente ideale è un componente circuitale che mantiene attraverso di sé una corrente costante, ovvero:

$$i(t) = I$$

Si indica come:



Si nota che a corrente nulla, un generatore di corrente equivale a un circuito aperto.

#### Correlazione con il voltaggio

Un generatore di corrente mantiene la stessa corrente qualsiasi sia il voltaggio.

$$i(v) = \text{const.}$$

Il grafico di correlazione corrente-voltaggio sarà quindi:



#### Correlazione con la potenza

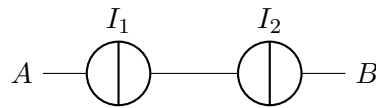
Come per i generatori di tensione, si descrivono i generatori di corrente attraverso riferimenti non associati di corrente e tensione. Resta comunque il fatto che la potenza:

$$p(t) = v(t)i(t) = v(t)I(t)$$

quando è erogata dal generatore, è  $> 0$ .

#### Collegamenti in serie

Non si possono collegare generatori di corrente in serie, a meno che questi non abbiano la stessa carica (e quindi risultino in movimento uniforme di carica):



Dove si ha, dall'applicazione della prima legge di Kirchhoff:

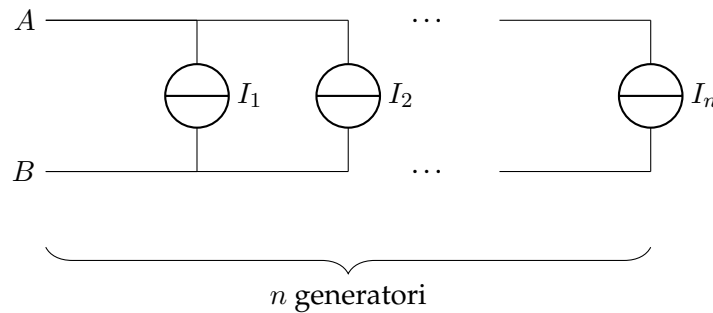
$$I_1 - I_2 = 0 \Rightarrow I_1 = I_2$$

che sarebbe altrimenti violata.

Come prima, questa situazione non è effettivamente modellizzabile nella realtà usando il modello studiato. In verità il generatore di corrente in sé per sé è più uno strumento teorico che serve a modellizzare fenomeni diversi (transistor, amplificatori, ecc...).

### Collegamenti in parallelo

Per sommare i contributi alla corrente di più generatori di corrente, li disponiamo in parallelo:



Abbiamo che il contributo totale dei generatori equivale a quello di un singolo generatore  $E_T$  di corrente:

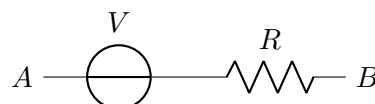
$$I_T = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

### 4.1.3 Resistenza interna

Possiamo combinare i componenti visti finora per creare modelli più realistici. Innanzitutto, è improbabile che un generatore reali applichi resistenza nulla alle cariche che vi scorrono dentro. Aggiungiamo quindi una resistenza (solitamente piccola per i generatori di tensione ed elevata per i generatori di corrente) al generatore, che chiameremo **resistenza interna**. Questa resistenza rappresenterà la potenza che viene dissipata per effetto Joule.

La resistenza si disporrà come segue per i diversi tipi di generatore:

- **Generatore di tensione:** resistenza in serie;



- **Generatore di corrente:** resistenza in parallelo.



Notiamo che i casi visti prima come impossibili, di generatori di tensione in parallelo e di generatori di corrente in serie, sono rappresentabili quando si rilascia l'ipotesi che i generatori siano ideali e si introducono resistenze interne.

#### 4.1.4 Generatori dipendenti

I generatori dipendenti, detti anche controllati o pilotati, sono particolari tipi di generatore il cui voltaggio (o corrente) dipende dal valore del voltaggio (o corrente) di un'altra punto del circuito, scalato di un qualche coefficiente. Si indicano come i generatori indipendenti ma all'interno di un rombo invece che di un cerchio.

Abbiamo quindi 4 tipi fondamentali di generatori dipendenti:

- **Generatori di tensione**, si indicano come:



- **Generatore di tensione pilotato in tensione:** comandato dalla funzione:

$$v(t) = \alpha \cdot v(t)$$

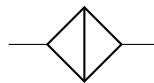
su un punto arbitrario dove si calcola  $i(t)$ .

- **Generatore di tensione pilotato in corrente:** comandato dalla funzione:

$$v(t) = \alpha \cdot i(t)$$

su un punto arbitrario dove si calcola  $v(t)$ .

- **Generatori di corrente**, si indicano come:



- **Generatore di corrente pilotato in tensione:** comandato dalla funzione:

$$i(t) = \alpha \cdot v(t)$$

su un punto arbitrario dove si calcola  $v(t)$ .

- **Generatore di corrente pilotato in corrente:** comandato dalla funzione:

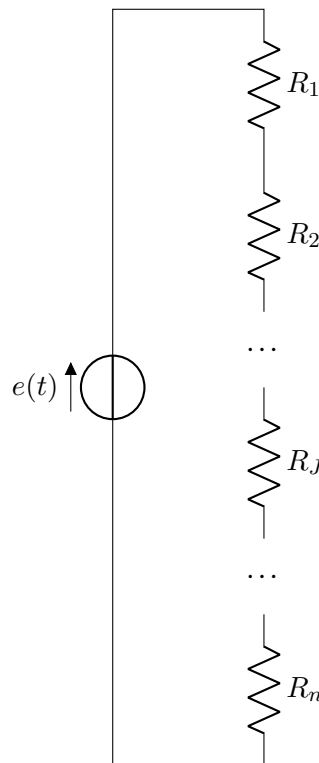
$$i(t) = \alpha \cdot i(t)$$

su un punto arbitrario dove si calcola  $i(t)$ .

Bisogna notare che, come già riportato, un generatore dipendente non è diverso da un dipolo passivo in termini di potenza: non porta nessuna energia esterna all'interno del circuito. Si può anzi dire che è necessario avere almeno un generatore indipendente per avere spostamento di carica all'interno del circuito.

## 4.2 Partitore di tensione

Analizziamo il seguente circuito:



Reti di questo tipo prendono il nome di **partitori di tensione**, e hanno lo scopo di partizionare una certa differenza di potenziale in diverse frazioni proprie.

Poniamo di voler calcolare la caduta di potenziale su una particolare resistenza, diciamo la  $R_J$ . Avremo allora, dalla seconda legge di Kirchhoff:

$$-e(t) + R_1(t)i(t) + R_2(t)i(t) + \dots + R_J(t)i(t) + \dots + R_n(t)i(t) = 0$$

che raccogliendo la corrente comune diventa:

$$e(t) = (R_1 + R_2 + \dots + R_J + R_n)i(t) = i(t) \sum_{i=1}^n R_i$$

somma delle resistenze per corrente. A questo punto possiamo applicare la legge di Ohm per ottenere la caduta di potenziale:

$$V_J(t) = R_J i(t) = e(t) \frac{R_J}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

cioè il rapporto fra la resistenza interessata e la resistenza complessiva del circuito, moltiplicata per la tensione.

Vediamo l'esempio di un partitore di tensione con due resistenze, in due casi particolari:





- **Caso 1:**  $R_1 = R_2$

Applicando la formula per  $V_1$ , si avrà:

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} e(t) = \frac{1}{2} e(t) = \dots = V_2$$

uguale per  $V_2$ , cioè a resistenze uguali partizioniamo il voltaggio in parti uguali.

- **Caso 2:**  $R_2 = 0$

Prendiamo il caso dove una resistenza è nulla, ergo corrisponde ad un cortocircuito. Avremo, dalla formula per  $V_1$ :

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + 0} e(t) = e(t)$$

cioè l'intero potenziale si distribuisce su  $R_1$ . Su  $R_2$  avremo invece:

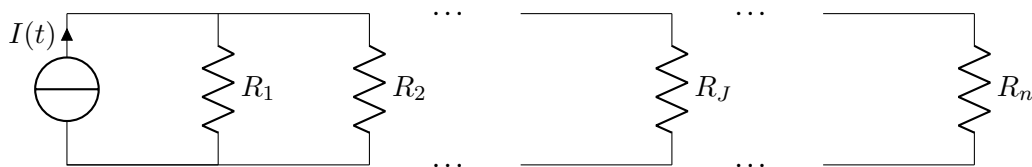
$$V_2 = \frac{0}{R_1 + 0} e(t) = 0$$

cioè, non c'è caduta di potenziale su  $V_2$ .

Questi ultimi due calcoli, che potevamo chiaramente svolgere applicando semplicemente la legge di Ohm, dimostrano comunque che le leggi funzionano anche in questi casi semplici.

### 4.3 Partitore di corrente

Analizziamo quindi il seguente circuito:



Reti di questo tipo hanno uno scopo simile a quello della rete vista prima, solo riguardo alla corrente: prendono infatti il nome di **partitori di corrente**.

Poniamo di voler calcolare la corrente su una singola resistenza. Potremo dire che la corrente complessiva è, dalla prima legge di Kirchhoff:

$$I_T(t) = I_1(t) + I_2(t) + \dots + I_J(t) + \dots + I_n(t)$$

Un'altro modo di ottenere queste correnti è dalla legge di Ohm, usando le conduttanze invece delle resistenze:

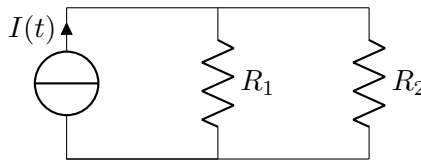
$$I = \frac{V}{R} \Rightarrow I = GR, \quad I(t) = v(t) \sum_{i=1}^n G_i$$

A questo punto, possiamo dire che la corrente nella J-esima resistenza vale:

$$I_J(t) = v(t)G_J = I(t) \frac{G_J}{\sum_{i=1}^n G_i}$$

cioè il rapporto fra la conduttanza (della resistenza) interessata e la conduttanza complessiva del circuito, moltiplicata per la corrente.

Vediamo, come prima, l'esempio di un partitore di corrente con due resistenze, in due casi particolari:



- **Caso 1:**  $R_1 = R_2$

Applicando la formula per  $I_1$ , si avrà:

$$I_1 = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} I(t) = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}} I(t) = \frac{R_1 + R_2}{R_1(R_1 + R_2)} I(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I(t) = \frac{1}{2} I(t) = \dots = I_2$$

uguale per  $I_2$ , cioè a resistenze uguali partizioniamo la corrente in parti uguali.

- **Caso 2:**  $R_2 = 0$

Prendiamo il caso dove una resistenza è nulla, ergo corrisponde ad un cortocircuito. Avremo, dalla formula per  $I_1$ :

$$I_1 = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} I(t) = \dots = \frac{R_2}{R_1 + 0} I(t) = 0$$

cioè, non c'è corrente su  $R_1$ . Su  $R_2$  avremo invece:

$$I_2 = \dots = \frac{R_1}{R_1 + 0} I(t) = I(t)$$

cioè, l'intera corrente passa dal cortocircuito.

Come prima, questi calcoli dimostrano che le leggi funzionano anche su casi semplici.

## 5 Lezione del 03-10-24

### 5.1 Principio di sovrapposizione degli effetti

Possiamo sfruttare la linearità delle equazioni che descrivono i circuiti visti finora per dimostrare il seguente risultato:

### 5.1: Principio di sovrapposizione

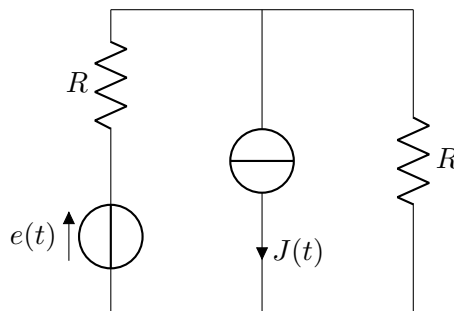
La risposta di una rete alla sollecitazione di più generatori indipendenti può essere ottenuta considerando ciascun generatore *separatamente attivo* e sommando algebricamente le risposte.

Nel dettaglio, in un circuito con generatori di voltaggio e tensione, questo significa prendere ogni generatore, uno per volta, e considerarlo come l'unico attivo, disattivando gli altri. Disattivare un generatore significa impostare il voltaggio (o la corrente) emessa a 0. Quindi:

- **Generatori di tensione:** disattivare significa trasformare in cortocircuiti ( $e(t) = 0$ );
- **Generatori di corrente:** disattivare significa trasformare in circuiti aperti ( $I(t) = 0$ ).

Algebricamente, se vogliamo ricavare la corrente o il voltaggio su una maglia di un circuito con  $n$  generatori, possiamo porla come la somma delle  $I'_x + I''_x + \dots + I^n_x$  correnti ( $V'_x + V''_x + \dots + V^n_x$  voltaggi) ricavati da ogni generatore preso singolarmente.

Facciamo un'esempio:



Poniamo di voler calcolare la potenza dissipata dal resistore destro. Potremo applicare quanto ricavato da Ohm, ergo:

$$P_R = RI_x^2$$

con  $I_x$  la corrente che passa sul resistore destro.

Questa corrente si calcola agilmente attraverso il principio di sovrapposizione. Poniamo quindi  $I_x = I'_x + I''_x$ , con  $I'_x$  data dal generatore di tensione  $e(t)$ , e  $I''_x$  data dal generatore di corrente  $J(t)$ .

Calcoliamo quindi le correnti trovate in entrambi i casi:

- $I'_x$ , **generatore di tensione attivo.** Si ha che il generatore di corrente, disattivato, equivale al circuito aperto, ergo l'unica maglia è quella che collega in serie le due resistenze. Da qui si calcola velocemente che:

$$I'_x = \frac{e(t)}{2R}$$

oppure si applica la seconda legge di Kirchhoff:

$$e(t) - I'_x R - I'_x R = 0$$

da cui si ricava lo stesso risultato.

- $I''_x$ , **generatore di corrente attivo**. Si ha che il generatore di tensione, disattivato, equivale al circuito chiuso, ergo abbiamo quello che è effettivamente un partitore di corrente formato da due resistenze in parallelo. Visto che le due resistenze sono uguali, possiamo dire che la corrente è partizionata ugualmente, facendo attenzione ai segni (il generatore di corrente ha direzione opposta al generatore di tensione), cioè:

$$I''_x = -J(t) \frac{G_R}{G_{tot.}} = -J(t) \frac{R}{R + R} = -\frac{J(t)}{2}$$

A questo punto otteniamo la corrente totale come:

$$I_x = I'_x + I''_x = \frac{e(t)}{2R} - \frac{J(t)}{2}$$

e la potenza come:

$$P_R = R \left( \frac{e(t)}{2R} - \frac{J(t)}{2} \right)^2$$

## 6 Lezione del 04-10-24

### 6.1 Metodo del tableau

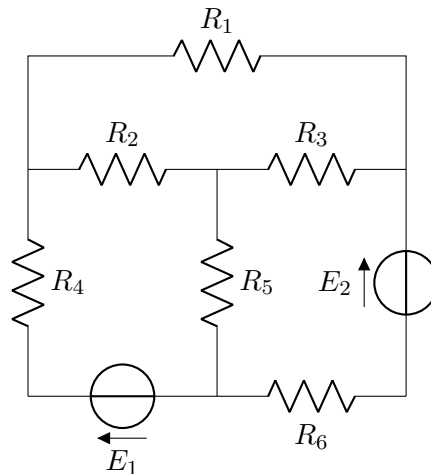
Vediamo un metodo generale per la risoluzione completa di un circuito, detto metodo delle correnti di ramo, o *del tableau*. Di base, si hanno  $r$  incognite per  $r$  rami, ergo le correnti che passano nei rispettivi rami. Applichiamo quindi il seguente algoritmo:

1. Dare un nome a tutti i nodi ( $A_1, A_2, \dots, A_n$ );
2. Dare un nome a tutte le correnti di ramo ( $I_1, I_2, \dots, I_n$ ). Si noti che in questo passaggio il verso delle correnti è puramente arbitrario: il segno positivo o negativo della corrente trovata ci darà il verso rispetto al riferimento (associato o meno) scelto.
3. Scrivere  $n - 1$  equazioni per  $n - 1$  nodi applicando la prima legge di Kirchhoff. Si scelgono  $n - 1$  equazioni perché, essendo la corrente vincolata dalla legge di Kirchhoff, la  $n$ -esima equazione sarà linearmente dipendente alle altre, ergo ridondante in informazioni riguardo al circuito.
4. Scrivere  $r - n + 1$  equazioni con la seconda legge di Kirchhoff. La prima maglia si sceglie a caso, mentre le successive maglie si scelgono cancellando un ramo della maglia scelta al passaggio scorso. Questa procedura è, ancora una volta, necessaria per evitare la dipendenza lineare delle equazioni trovate.

Seguendo questi passaggi, si trova un sistema lineare in  $r$  variabili con  $r$  equazioni, che sappiamo essere determinato e risolvibile come:

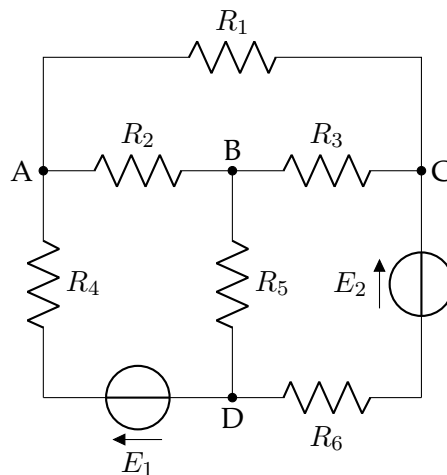
$$Ax = b \Rightarrow x = A^{-1}b$$

Prendiamo in esempio il seguente circuito:

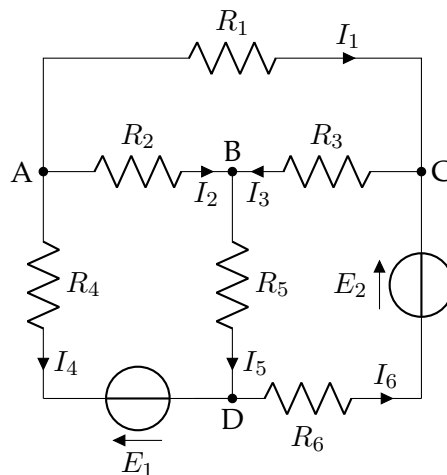


Eseguiamo i passi in ordine.

1. Innanzitutto, si danno i nomi  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  ai nodi del circuito:



2. Quindi, si danno i nomi  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$  e  $I_6$ , e i versi di percorrenza alle correnti sui rispettivi rami:



3. A questo punto possiamo applicare la prima legge di Kirchoff su  $n - 1$  nodi, diciamo  $A$ ,  $B$  e  $C$ :

$$A : I_1 + I_2 + I_4 = 0$$

$$B : I_2 + I_3 = I_5$$

$$C : I_1 + I_6 = I_3$$

La legge di Kirchoff applicata al nodo  $D$  qui sarebbe inutile, in quanto fornirebbe:

$$D : I_5 + I_4 = I_6$$

che potevamo già ottenere sostituendo la  $C$  alla  $B$ :

$$C : I_2 + I_3 = I_5 \Rightarrow I_2 + I_1 + I_6 = I_5$$

e a questo punto usando la  $A$  come  $I_1 + I_2 = -I_4$ :

$$\Rightarrow -I_4 + I_6 = I_5 \Rightarrow I_5 + I_4 = I_6$$

4. Completiamo il sistema introducendo  $r - n + 1 = 3$  equazioni ricavate applicando la seconda legge di Kirchoff in senso antiorario. Dovremo prendere i segni delle cadute di potenziale tenendo conto della direzione della corrente scelta su quel ramo.

Prendiamo innanzitutto la maglia in basso a sinistra:

$$-E_1 + R_5 I_5 + R_2 I_2 - R_4 I_4 = 0$$

ed eliminiamo il ramo di corrente  $I_4$ . Quindi prendiamo la maglia formata dalla parte superiore e dalla parte in basso a destra del circuito:

$$E_2 + R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0$$

ed eliminiamo il ramo di corrente  $I_5$  o  $I_6$  (è irrilevante per il prossimo passaggio), in quanto prenderemo come ultima la maglia in alto:

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_3 I_3 = 0$$

Conclusi questi passaggi, abbiamo ricavato il sistema lineare:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_4 = 0 \\ I_2 + I_3 = I_5 \\ I_1 + I_6 = I_3 \\ -E_1 + R_5 I_5 + R_2 I_2 - R_4 I_4 = 0 \\ E_2 + R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0 \\ R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_3 I_3 = 0 \end{cases}$$

Possiamo ricavare le matrici  $A$ ,  $x$  e  $b$  del sistema, ed esprimerlo come  $Ax = b$ :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & R_2 & 0 & -R_4 & R_5 & 0 \\ R_1 & -R_2 & 0 & 0 & -R_5 & -R_6 \\ R_1 & -R_2 & R_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{pmatrix}}_x = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_1 \\ -E_2 \\ 0 \end{pmatrix}}_b$$

Il sistema si risolve con qualsiasi metodo di risoluzione di sistemi lineari.

Notiamo come il metodo del tableau ci permette di notare due fatti già visti sui circuiti.

Innanzitutto, abbiamo che fra i termini noti  $b$  compaiono solo le correnti e i voltaggi dei generatori indipendenti. Senza di questi, il sistema sarebbe di equazioni omogenee, e quindi ammetterebbe unica soluzione 0. Questa affermazione è equivalente a quella già vista: sono i generatori indipendenti a portare energia dentro il circuito.

Possiamo poi dire che il metodo del tableau è compatibile col principio di sovrapposizione. Presi separatamente i generatori, infatti, avremo  $x', x'', \dots, x^n$  soluzioni date da  $b', b'', \dots, b^n$  vettori  $b$ , ergo:

$$x = x' + x'' + \dots + x^n = A^{-1}b' + A^{-1}b'' + \dots + A^{-1}b^n$$

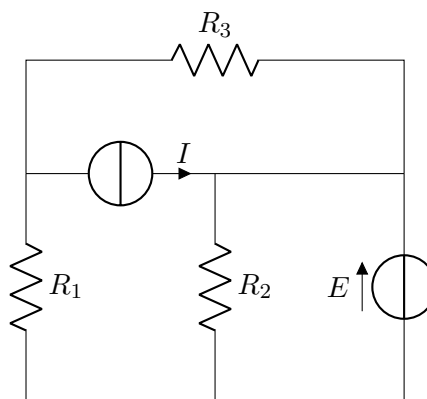
Intuitivamente, la matrice  $A$  rappresenta la risposta del circuito a diversi stimoli  $b', b'', \dots, b^n$ . Nell'esempio, questi sono i generatori indipendenti:

$$b' : \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad b'' : \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -E_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

### 6.1.1 Circuiti con generatori di corrente

Quando si applica il metodo del tableau ad un circuito con generatori di corrente, bisogna notare che questi riducono il numero di incognite (le correnti) del sistema, cioè portano il numero di correnti di ramo a  $r - N_I$  dove  $N_I$  è il numero di generatori di corrente. In seguito, bisogna fare attenzione a tagliare preliminarmente i rami contenenti generatori di correnti prima di eseguire il punto 4) dell'algoritmo, visto che il potenziale su quei rami potrebbe essere qualsiasi.

Prendiamo in esempio il seguente circuito:



Si ricava che i nodi e le correnti sono le seguenti, facendo attenzione alla disposizione di  $B$ , che viene detto **macronodo**. Un nodo del genere è utile in quanto il potenziale di ogni suo punto è effettivamente equivalente.



Calcoliamo quindi la prima legge di Kirchhoff sui nodi A e B:

$$A : I + I_1 + I_3 = 0$$

$$B : I + I_3 = I_2 + I_4$$

Adesso calcoliamo la seconda legge di Kirchhoff sulle maglie. Abbiamo detto che dobbiamo ignorare i rami contenenti generatori di corrente. Questo è vero perché provando, ad esempio, il ramo in basso a sinistra, avremmo:

$$-V_I - R_1 I_1 + R_2 I_2 = 0$$

dove  $V_I$  è la differenza di potenziale sul generatore di corrente, che sappiamo può essere qualsiasi.

Usiamo quindi altre due maglie: quella data dalle maglie in alto e in basso a sinistra, e quella in basso a destra:

$$R_3 I_3 - R_1 I_1 + R_2 I_2 = 0$$

$$-E + R_2 I_2 = 0$$

Ricaviamo il sistema:

$$\begin{cases} I + I_1 + I_3 = 0 \\ I + I_3 = I_2 + I_4 \\ R_3 I_3 - R_1 I_1 + R_2 I_2 = 0 \\ -E + R_2 I_2 = 0 \end{cases}$$

ovvero:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 \\ -R_1 & R_2 & R_3 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -I \\ -I \\ 0 \\ E \end{pmatrix}$$

### 6.1.2 Circuiti con generatori pilotati

I generatori pilotati possono esprimere nuove incognite, in quanto la grandezza pilota è una corrente o una tensione ricavata su qualche ramo del circuito. Inoltre, bisogna comunque tagliare fuori dal circuito o meno la sorgente in base al fatto che essa sia di voltaggio o di corrente, come avevamo già visto per i generatori indipendenti.

Prendiamo in esempio il seguente circuito:





dove compare una sorgente pilotata in corrente di corrente. Per quanto riguarda le maglie, la considereremo come una qualsiasi sorgente indipendente di corrente. La grandezza pilota, invece, è una corrente ( $I_4$ ) comune: fosse stata un voltaggio, avremmo dovuto esplicitarla con una variabile ed un'equazione a sé (ad esempio  $v_{CD} = R_4 I_4$ ).

Disponiamo quindi nodi e cariche (si noti anche qui il macronodo  $D$ ):



Calcoliamo con la prima legge di Kirchhoff:

$$A : I_1 = I_2 + I_5$$

$$B : I_2 = I_3 + J_1$$

$$D : I_5 + J_1 + I_4 = I_1 + \alpha I_4$$

e con la seconda, applicata alla maglia sinistra e alle tre rimanenti (ricordando che i generatori di corrente vanno ignorati):

$$E_1 + R_1 I_1 = 0$$

$$-E_1 - E_2 + R_4 I_4 + R_3 I_3 + R_2 I_2 = 0$$

da cui il sistema:

$$\begin{cases} I_1 = I_2 + I_5 \\ I_2 = I_3 + J_1 \\ I_5 + J_1 + I_4 = I_1 + \alpha I_4 \\ E_1 + R_1 I_1 = 0 \\ -E_1 - E_2 + R_4 I_4 + R_3 I_3 + R_2 I_2 = 0 \end{cases}$$

ovvero:

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 - \alpha & 1 \\ R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & R_3 & R_4 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ J_1 \\ -J_1 \\ -E_1 \\ E_1 + E_2 \end{pmatrix}$$

## 7 Lezione del 09-10-24

### 7.1 Teorema di Thevenin

Poniamo di avere un certo dipolo, inteso come una sottorete con due morsetti. All'interno del dipolo avremo resistori, generatori di corrente e generatori di tensioni. Quello che vogliamo fare è rappresentare la sottorete con un circuito semplificato, come avevamo fatto con circuiti di solo resistori.

Pensiamo di mettere un generatore di corrente fra i morsetti del dipolo, in modo da imporre una certa corrente, e calcolare la tensione risultante. Facendo misure diverse a correnti diverse, dovremmo essere in grado di trovare un legame fra tensione  $v(t)$  e corrente  $i(t)$  attraverso, ad esempio, la legge di Ohm. A questo punto sapremmo sostituire l'intera rete con un singolo dispositivo che rappresenti la sua risposta interna a qualsiasi stimolo esterno.

Questo è quello che ci permette di fare il teorema di Thevenin:

#### 7.1: Teorema di Thevenin

Qualsiasi circuito lineare, visto da due morsetti, è equivalente a un generatore di tensione in serie a un resistore.

- La **resistenza di Thevenin**  $R_{th}$ , equivale alla resistenza vista da dai morsetti calcolata dopo aver disattivato tutti i generatori indipendenti della sottorete;
- La **tensione di Thevenin**  $V_{th}$ , è pari al valore della tensione a vuoto misurata fra i morsetti, dove per tensione a vuoto si intende la tensione della sottorete isolata da altri circuiti. Questo equivale a **tagliare** fuori i rami del circuito che vanno ai morsetti, compresi eventuali dipoli presenti su quei rami (non vi scorrerà alcuna corrente).

Poste  $R_{th}$  e  $V_{th}$ , si può dire che la correlazione fra voltaggio e corrente del circuito è:

$$v(t) = V_{th} - R_{th}i(t)$$

dove il segno meno alla corrente è lì perchè, all'aumentare della corrente fatta passare attraverso i morsetti (considerando, per il principio di sovrapposizione, i generatori interni disattivati), aumenta la differenza di potenziale fra di loro ( $v_{load} = R_{th}i(t)$ ), e quindi diminuisce quella sul generatore equivalente di Thevenin  $v(t)$ . Infatti,  $V_{th}$  era stata definita come la differenza di potenziale a vuoto fra i morsetti, e quindi dovrà essere:

$$v_{load} + v(t) = V_{th}$$

## 7.2 Teorema di Norton

Il teorema di Thevenin ammette un duale: come possiamo usare un generatore di tensione, possiamo infatti usare un generatore di corrente per rappresentare un'intera sottorete. Formuliamo quindi:

### 7.2: Teorema di Norton

Qualsiasi circuito lineare, visto da due morsetti, è equivalente a un generatore di corrente in parallelo a un resistore.

- La **resistenza di Norton**  $R_{no}$ , equivale alla resistenza di Thevenin, cioè alla resistenza vista da dai morsetti calcolata dopo aver disattivato tutti i generatori indipendenti della sottorete;
- La **corrente di Norton**  $I_{no}$ , è pari al valore della corrente misurata su un ramo (posto da noi per effettuare la misura) che unisce i morsetti.

Con Norton, anziché la differenza di potenziale a vuoto  $V_{th}$  ricavata per Thevenin, si considera la corrente che scorrerebbe fra i morsetti se fossero collegati fra di loro. Avremo quindi che la corrente al variaggio della differenza di potenziale fra le maglie è:

$$i(t) = I_{no} - \frac{v(t)}{R_{no}}$$

Questo perché, come prima, dovrà essere che la corrente fra i morsetti, disattivati i generatori interni,  $i_{load}$  e la corrente sul circuito equivalente di Norton  $i(t)$  sono legate da:

$$i_{load} + i(t) = I_{no}$$

Possiamo stabilire una relazione fra la resistenza e la tensione di Thevenin,  $R_{th}$  e  $V_{th}$ , e la resistenza e la corrente di Norton,  $R_{no}$  e  $I_{no}$ :

$$\begin{cases} R_{th} = R_{no} \\ V_{th} = I_{no} \cdot R_{no} \end{cases}$$

In ogni caso, vale  $R_{th} = R_{no} = R_{eq}$  del circuito.

Si può quindi ricavare il corollario:

### 7.3: Corollario da Thevenin e Norton

Un generatore di corrente in parallelo a una resistenza equivale ad un generatore di tensione in serie alla stessa resistenza (salvo casi limite).

### 7.2.1 Generatori dipendenti

Nel caso si incontrino generatori di corrente o di tensione dipendenti, bisogna considerare che potrebbe essere impossibile applicare Thevenin o Norton su una parte di circuito, poiché la grandezza pilota del generatore potrebbe trovarsi nell'altra parte del circuito.

Nel caso questo sia possibile, invece, si adotta un **generatore di prova** che può essere arbitrariamente di tensione o di corrente. Potremo infatti ricavare l'una dall'altra come:

$$R_{eq} = \frac{V_p}{I_p}$$

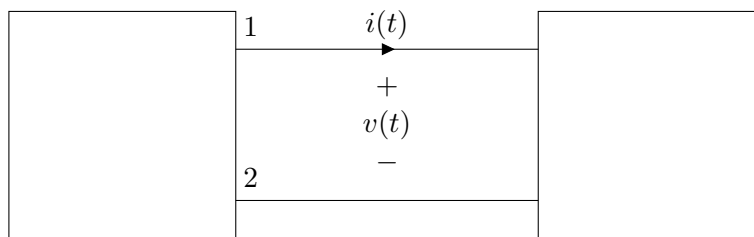
dalla legge di Ohm.

## 8 Lezione del 10-10-24

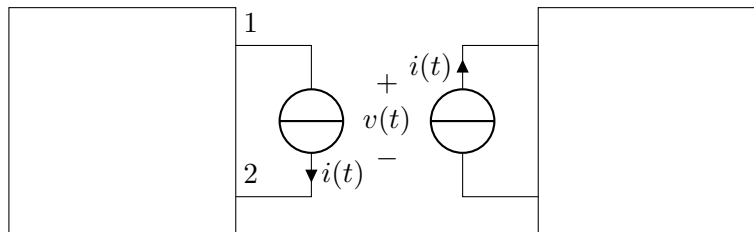
### 8.1 Dimostrazione di Thevenin

Avevamo detto che, attraverso Thevenin, si può trasformare qualsiasi rete come vista da due morsetti in una rete equivalente formata da un resistore e un generatore di tensione in serie. Dimostriamo questo risultato.

Supponiamo di avere un circuito elettrico che andiamo a dividere in due sottoreti. Poniamo di voler semplificare una di queste sottoreti (magari quella di sinistra), presi due morsetti, 1 e 2, che la collegano all'altra. Avremo che da questi morsetti passa una corrente  $i(t)$  e che essi si trovano ad una differenza di potenziale  $v(t)$ .

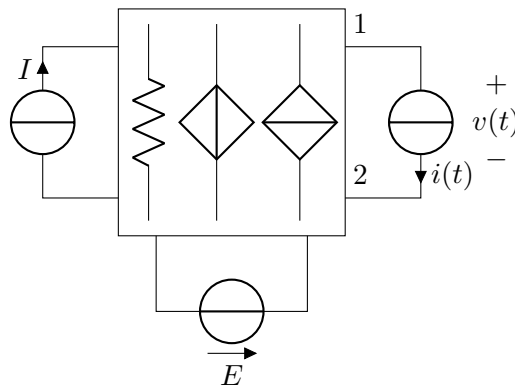


Possiamo quindi pensare di separare le due sottoreti, e di sostituire ai morsetti dei generatori di corrente che replicano la corrente  $i(t)$  vista prima. Se la tensione ai capi dei generatori resta  $v(t)$ , allora i circuiti non sono cambiati.



Questo prende il nome di **principio di sostituzione**.

A questo punto possiamo dire che all'interno delle sottoreti troveremo dipoli attivi (generatori di tensione e di corrente), e passivi (resistori e generatori pilotati di tensione e di corrente):



Si decide di applicare il principio di sovrapposizione, ponendo il voltaggio dato dai generatori interni come  $v'(t)$  e quello dato dal generatore esterno come  $v''(t)$ , da cui:

$$v(t) = v'(t) + v''(t)$$

Staccate dal resto del circuito si ha che le sottoreti portano i morsetti a tensione  $v'(t) = v_0(t)$ . Incluso il generatore di corrente di prima, possiamo pensare di disattivare i generatori dipendenti propri della sottorete, per ricavare un'altra tensione  $v''(t)$ . Visto che il circuito è formato effettivamente da componenti passivi, possiamo calcolare una resistenza vista, che chiamiamo  $R_{12}$ . Abbiamo allora che, incluso il generatore di corrente di prova  $i(t)$ :

$$v''(t) = -R_{12} \cdot i(t)$$

dove il segno meno è dato dal fatto che abbiamo preso il generatore esterno come un riferimento non associato (spinge carica dal potenziale positivo a quello negativo), e quindi la tensione totale è:

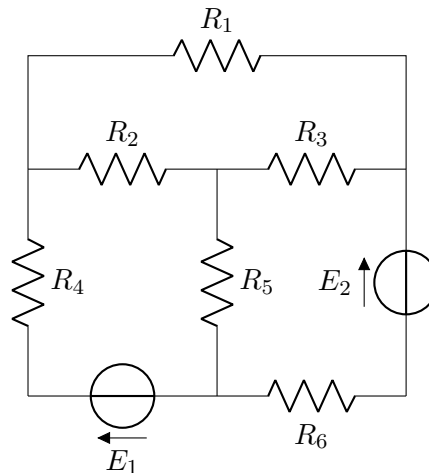
$$v(t) = v_0(t) - R_{12} \cdot i(t)$$

Questo equivale a rappresentare il circuito come un generatore di tensione  $v_{TH} = v_0(t)$  in serie ad una resistenza  $v_{TH} = R_{12}$ .

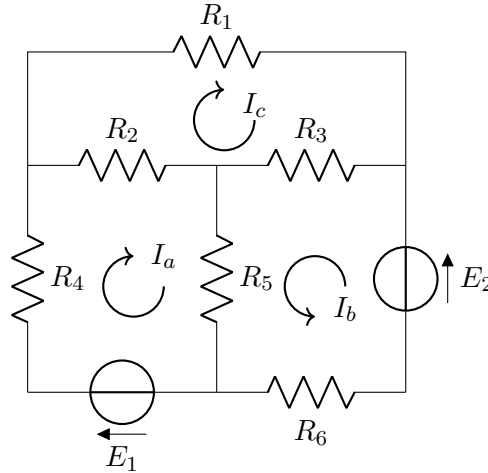
## 8.2 Metodo delle correnti di maglia

Vediamo un metodo alternativo per la risoluzione dei circuiti, simile a quello delle correnti di ramo ma che genera meno variabili. Questo metodo presuppone di prendere, anziché le correnti su ogni ramo, un numero minore di correnti, prese su intere maglie. Le maglie vengono scelte secondo lo stesso metodo del tableau: dopo aver usato una maglia, se ne taglia un ramo.

Prendiamo in esempio il circuito:



Avevamo già risolto questa rete usando il metodo del tableau, che potremmo dire "metodo delle correnti di ramo", trovando un sistema lineare dalla prima e seconda legge di Kirchhoff. Il problema di tale metodo era la grande quantità di variabili: una per ogni ramo. Appliciamo adesso il metodo delle correnti di maglia. Scegliamo ogni maglia a sé stante: in basso a sinistra, in basso a destra e in alto. Diamo un nome alla corrente su ognuna di queste maglie, rispettivamente  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ . Le direzioni delle correnti sono come in figura (scelte ad arbitrio):



Iniziamo con la maglia in basso a sinistra: percorsa in senso orario, avremo che la seconda legge di Kirchhoff dà:

$$E_1 - R_4 I_a + R_2(I_c - I_a) + R_5(-I_a - I_b) = 0$$

dove si nota che per dipoli percorsi da più correnti di maglia, si prende come corrente la somma algebrica delle correnti sulla base del loro segno. Applichiamo quindi lo stesso metodo alle altre due maglie, percorrendo quella in basso a destra in senso antiorario e quella in alto in senso orario:

$$E_2 + R_3(-I_b - I_c) + R_5(-I_b - I_a) - R_6 I_b = 0$$

$$-R_1 I_c + R_3(-I_c - I_b) + R_2(I_a - I_c) = 0$$

Da cui si ricava il sistema lineare:

$$\begin{cases} E_1 - R_4 I_a + R_2(I_c - I_a) + R_5(-I_a - I_b) = 0 \\ E_2 + R_3(-I_b - I_c) + R_5(-I_b - I_a) - R_6 I_b = 0 \\ -R_1 I_c + R_3(-I_c - I_b) + R_2(I_a - I_c) = 0 \end{cases}$$

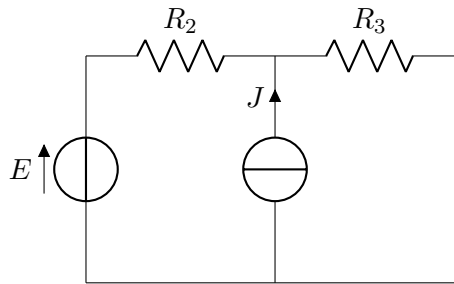
in forma matriciale:

$$\begin{pmatrix} -R_4 - R_2 - R_5 & -R_5 & R_2 \\ -R_5 & -R_3 - R_5 - R_6 - R_3 & -R_1 - R_3 - R_2 \\ R_2 & -R_3 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -E_1 \\ -E_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Come sempre, questo sistema si risolve con qualsiasi metodo di risoluzione dei sistemi lineari.

### 8.2.1 Circuiti con generatori di corrente

Notiamo un caso particolare per l'applicazione di questo problema: nel caso il circuito contenga generatori di corrente, bisogna evitare di introdurre tensioni incognite, come nel metodo del tableau. Si sceglie quindi una maglia contenente il generatore di corrente per prima, e poi si taglia quel ramo. Prendiamo ad esempio:



Qui il generatore di corrente  $J$  genera una differenza di potenziale  $V_J$ , che non vogliamo come incognita. Prenderemo quindi per prima una maglia che lo contiene (in questo caso qualsiasi tranne la più esterna), e poi taglieremo il suo ramo. Ad esempio, prendendo prima la maglia a destra, si ha al primo passo:

$$-E + RI_x + 2R(I_x + J) = 0$$

dove si è potuto chiamare l'unica corrente incognita  $I_x$ .

Non ci è effettivamente negato scegliere di scegliere le maglie in quest'ordine, ma se lo facciamo, allora non dobbiamo usare la corrente  $J$  nel calcolo, ma introdurre una corrente incognita per ogni maglia. Ad esempio, se volessimo considerare le due maglie a sinistra ( $I_s$ ) e a destra ( $I_d$ ) separatamente:

$$RI_s + E - V_J = 0$$

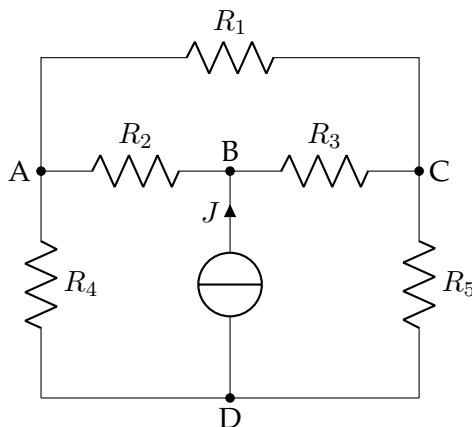
$$J = I_x + I_b$$

## 9 Lezione del 11-10-24

### 9.1 Metodo delle tensioni di nodo

Vediamo ora un metodo per la risoluzione dei circuiti dove le incognite non sono le correnti (come nel tableau o nelle correnti di maglia), ma le tensioni. Calcoleremo quindi le **tensioni di nodo**, che sappiamo essere relative a qualche zero del potenziale, attraverso la conduttanza anziché la resistenza.

Prendiamo in esempio il circuito:



dove abbiamo già evidenziato i nodi. Da qui possiamo proseguire in due modi:

- **Col nodo di riferimento:** prendiamo D come nodo di riferimento, e impostiamo il suo potenziale  $V_D$  a 0. Le incognite saranno quindi  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$ . Scriviamo un'equazione per il potenziale  $V_A$ :

$$V_A \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right) - \frac{V_B}{R_2} - \frac{V_C}{R_1} = 0$$

Il primo termine è detto **termine di auto ammettenza**, ed è dato dal prodotto del potenziale sul nodo  $V_i$  e la somma delle conduttanze su tutti i rami connessi al nodo. Il termini successivi sono detti **termini di mutua ammettenza**, e sono dati dalla legge di Ohm applicata ai rami connessi al nodo.

Nel caso uno dei rami contenga un generatore di corrente, si esclude dall'auto e mutua ammettenza e si mette come termine noto sul lato destro dell'equazione.

Ad esempio, sul nodo B avremo:

$$V_B \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - \frac{V_A}{R_2} - \frac{V_C}{R_3} = J$$

dove la  $J$  è la corrente erogata dal generatore di corrente sul ramo BD, che abbiamo detto non compare nei termini di auto o mutua ammettenza. Si noti che il segno positivo significa corrente *entrante* sul nodo, altrimenti si avrebbe segno negativo.

Infine, sul nodo C avremo:

$$V_C \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R-5} \right) - \frac{V_A}{R_1} - \frac{V_B}{R_3} = 0$$

Abbiamo quindi un sistema sulle 3 tensioni (abbiamo detto che la tensione D vale 0):

$$\begin{cases} V_A \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right) - \frac{V_B}{R_2} - \frac{V_C}{R_1} = 0 \\ V_B \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - \frac{V_A}{R_2} - \frac{V_C}{R_3} = J \\ V_C \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R-5} \right) - \frac{V_A}{R_1} - \frac{V_B}{R_3} = 0 \end{cases}$$

che possiamo portare in forma matriciale:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_3} \\ -\frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R-5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ J \\ 0 \end{pmatrix}$$

e che possiamo risolvere.

- **Senza nodo di riferimento:** possiamo decidere di continuare senza alcun riferimento del potenziale. Abbiamo già trovato le equazioni del potenziale sui primi 3 nodi, quindi impostiamo l'equazione per  $V_D$ :

$$V_D \left( \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) - \frac{V_A}{R_4} - \frac{V_C}{R_5} = J$$

e inseriamola nel sistema precedente:

$$\begin{cases} V_A \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right) - \frac{V_B}{R_2} - \frac{V_C}{R_1} = 0 \\ V_B \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - \frac{V_A}{R_2} - \frac{V_C}{R_3} = J \\ V_C \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R-5} \right) - \frac{V_A}{R_1} - \frac{V_B}{R_3} = 0 \\ V_D \left( \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) - \frac{V_A}{R_4} - \frac{V_C}{R_5} = -J \end{cases}$$



in forma matriciale, abbiamo un sistema in 4 variabili con 3 equazioni:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_4} \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_3} & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} & -\frac{1}{R_5} \\ -\frac{1}{R_4} & 0 & -\frac{1}{R_5} & \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ J \\ 0 \\ -J \end{pmatrix}$$

Sappiamo dal teorema di Rouché-Capelli che questo sistema è indeterminato, o almeno ammette soluzioni su una retta, quindi per un certo fattore di spostamento  $\lambda$ . Questo rappresenta semplicemente il fatto che non abbiamo scelto uno zero del potenziale: il potenziale dei nodi non esiste se non in riferimento agli altri, quindi qualsiasi valore  $\lambda$  aggiunto non cambia i risultati. Scegliamo il valore  $\lambda = 0$  per convenienza, che equivale a impostare  $V_D$  a zero.

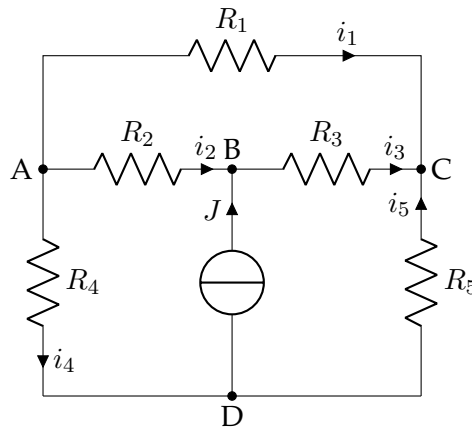
A questo punto, vogliamo risolvere effettivamente il circuito, e quindi trovare le tensioni e le correnti di ramo. Per le tensioni, prendiamo semplicemente le differenze di potenziale sui nodi:

$$V_{AB} = V_A - V_B, \quad \text{ecc...}$$

mentre per le correnti applichiamo la legge di Ohm sul ramo scelto. Ad esempio, sul ramo AB avremo:

$$V = IR, \quad I_{AB} = \frac{V_{AB}}{R_2}$$

Un caso particolare è rappresentato dalla tensione su BD. In questo caso si ha un generatore di corrente, e nessuna resistenza, quindi  $I_{BD}$  è ben definito, ma non  $V_{BD}$ . Quello che vogliamo fare è calcolare la caduta di potenziale  $V_J = V_{BD}$  sul generatore di corrente. Per fare ciò applichiamo la seconda legge di Kirchhoff, magari applicata in senso orario sulla maglia in basso a sinistra, con le direzioni di corrente:



Si ha quindi:

$$V_J + R_2 i_2 - R_4 i_4 = 0 \quad V_J = R_4 i_4 - R_2 i_2$$

Abbiamo così determinato tutte le tensioni e tutte le correnti.

### 9.1.1 Circuiti con generatori di tensione

- **Generatori ideali di tensione**

Il dipolo particolare quando si applica il metodo delle tensioni di nodo è il generatore ideale di tensione. In questo caso, possiamo semplificare il sistema: se il generatore collega un nodo al nodo di riferimento, allora il voltaggio del nodo è uguale al voltaggio erogato dal generatore, tenendo conto dei segni in base alle direzioni delle tensioni erogate.

Se si hanno serie di generatori di tensione, si può applicare ripetutamente questa regola sui nodi coinvolti nella serie.

Nel caso non si possano scegliere agevolmente nodi di riferimento che prendono serie di generatori di tensione, si può impostare:

$$E = V_A - V_B$$

dove  $E$  è la tensione erogata dal generatore, e  $V_A$  e  $V_B$  le tensioni sui nodi che collega, ancora una volta opportunamente segnate in base alle direzioni delle tensioni erogate.

- **Generatori reali di tensione**

Un caso particolare è determinato dai generatori reali di tensione, cioè i generatori ideali in serie a resistenze. In questi casi conviene trasformare i generatori nei loro equivalenti di Norton, e risolvere. Si ha che per un generatore reale di voltaggio  $V$  e resistenza  $R$ , l'equivalente di Norton è un generatore di corrente  $\frac{V}{R}$  in parallelo ad una resistenza  $R$ .

## 10 Lezione del 17-10-24

### 10.1 Condensatori

Introduciamo un nuovo dipolo: il **condensatore** o *capacitore*. Si indica come:



ed è costituito da due armature di materiale conduttore, inframezzate da un **dielettrico**.

Il verso di percorrenza nei condensatori, come nei resistori, è irrilevante. La loro funzione è quella di accumulare energia, secondo la legge:

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

dove  $C$  è la **capacità**, misurata in Farad (F).

Nota la superficie delle armature e la distanza fra di esse, si può calcolare la capacità come:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{s}{d}$$

Nel caso di dielettrici, si indica con  $\varepsilon_0$  la costante dielettrica introdotta e si scrive:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{s}{d}$$

Si ricorda che il Farad è un'unità di misura molto grande, e solitamente si usano i sottomultipli:

Diciamo che il condensatore ideale è:

Simbolo	Ordine
mF	$10^{-3}$
$\mu$ F	$10^{-6}$
nF	$10^{-9}$
pF	$10^{-12}$

- **Lineare:** dalla legge  $q(t) = C \cdot v(t)$ ;
- **Tempo-invariante:** trascurando cambi di temperatura, si comportano come i resistori;
- **Con memoria:** visto che legano tensione a carica, dobbiamo prendere la corrente come derivata della carica:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{d}{dt}(C \cdot v(t)) = C \frac{dv(t)}{dt}$$

Possiamo quindi integrare:

$$v(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{C} \cdot i(\tau) d\tau = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau = \frac{1}{C} \left[ \int_{-\infty}^{t_0} i(\tau) d\tau + \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \right] = v(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau$$

Abbiamo quindi che la tensione sul condensatore dipende dalle tensioni precedenti  $v(t_0)$ , ergo è un componente con memoria.

- **Passivo:** anche qui possiamo definire  $p(t)$  e derivare:

$$p(t) = v_C(t)i_C(t) = v_C(t) \cdot C \frac{dv_C(t)}{dt}$$

da cui si ottiene che  $p(t)$  ha qualsiasi segno. Vediamo quindi l'energia:

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t C v_C(\tau) \frac{dv_C(\tau)}{d\tau} d\tau = C \int_{-\infty}^t v_C(\tau) dv_C(\tau) = C \left[ \frac{1}{2} v_C^2(\tau) \right]_{-\infty}^t$$

da cui si ha, risolvendo:

$$w(t) = \frac{1}{2} C v_C^2(t) - \frac{1}{2} C v_C^2(-\infty)$$

Assumendo  $v_C^2(-\infty) = 0$ , cioè condensatore inizialmente scarico, si ha  $w(t) \geq 0$ , ergo è un componente passivo. Solo nel caso in cui parte da carico il condensatore può (temporaneamente) erogare energia.

Notiamo un caso particolare: se siamo in continua,  $i_C(t) = \frac{C dv_C(t)}{dt} = 0$  e il condensatore si comporta come un **aperto**.

## 10.2 Induttori

Introduciamo un nuovo dipolo: l'**induttore** o *induttanza*. Si indica come:



ed è costituito da spire di materiale ferromagnetico avvolte attorno a un dielettrico.

La loro funzione è ancora quella di accumulare energia, secondo la legge:

$$\phi(t) = L \cdot i_L(t)$$

dove  $L$  è l'**induttanza**, misurata in Henry (H), e  $\phi$  è il **flusso magnetico**, misurata in Weber (Wb). L'induttanza dipende dalla geometria dell'induttore, e ad esempio in un solenoide di  $N$  spire di superficie  $s$  su una lunghezza  $l$  è:

$$L = \mu \cdot \frac{S}{l} \cdot N^2 = \mu_0 \cdot \mu_r \frac{S}{l} N^2$$

Vediamo quindi le proprietà:

- **Lineare:** sempre per la legge  $\phi(t) = L \cdot i_L(t)$ ;
- **Tempo-invariante:** il flusso interno dipende solo dalla corrente;
- **Con memoria:** possiamo derivare la legge:

$$v_L(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{d(Li_L(t))}{dt} = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_L(t)$$

e ricavare e derivare la corrente  $i_L(t)$ :

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v_L(\tau) d\tau = i_L(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v_L(\tau) d\tau$$

da dove si ricava che, come il condensatore, l'induttore ha memoria di uno stato iniziale a  $t_0$ .

- **Passivo:** ritroviamo la potenza:

$$p(t) = v_C(t)i_C(t) = L \frac{di_C(t)}{dt} \cdot i_L(t)$$

da cui si ottiene che  $p(t)$  ha qualsiasi segno. Vediamo quindi l'energia:

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t L \frac{di_L(\tau)}{d\tau} \cdot i_L(\tau) d\tau = L \int_{-\infty}^t i_L(\tau) di_L(\tau)$$

da cui si ha:

$$w(t) = \frac{1}{2} Li_L^2(t) - \frac{1}{2} Li_L^2(-\infty)$$

Come prima, assumendo  $i_L^2(\infty) = 0$ , cioè induttore inizialmente scarico, si ha  $w(t) \geq 0$ , e che l'induttore è un componente passivo (salvo parte da carico).

Vediamo qui un caso particolare: se siamo in continua,  $v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = 0$ , ergo l'induttore si comporta come un cortocircuito.

### 10.2.1 Induttori mutuamente accoppiati

Si possono avere due induttanze accoppiate fra di loro attraverso l'effetto del magnetico generato da entrambe sulle reciproche spire, cioè:

$$\begin{cases} \phi_1(t) = \phi_{1.1} \pm \phi_{1.2} = L_1 \cdot i_1(t) \pm M i_2(t) \\ \phi_2(t) = \dots = L_2 \cdot i_2(t) \pm M i_1(t) \end{cases}$$

dove  $M$  prende il nome di **coefficiente di mutua induzione**. Si ha quindi, derivando:

$$\begin{cases} v_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} \pm M \frac{di_2(t)}{dt} \\ v_2(t) = L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \pm M \frac{di_1(t)}{dt} \end{cases}$$

Gli induttori mutuamente accoppiati vengono detti **quadripoli** o **doppi dipoli**, in quanto hanno effettivamente 4 poli.

Si calcola la potenza semplicemente sommando le potenze sulle singole induttanze:

$$\begin{aligned} p(t) &= v_1(t)i_1(t) + v_2(t)i_2(t) \\ &= \left( L_1 \frac{di_1(t)}{dt} \pm M \frac{di_2(t)}{dt} \right) \cdot i_1(t) + \left( L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \pm M \frac{di_1(t)}{dt} \right) \cdot i_2(t) \\ &= L_1 i_1(t) \frac{di_1(t)}{dt} + L_2 i_2(t) \frac{di_2(t)}{dt} \pm M \left( i_1(t) \frac{di_2(t)}{dt} + i_2(t) \frac{di_1(t)}{dt} \right) \end{aligned}$$

E l'energia integrando la potenza:

$$\begin{aligned} w(t) &= \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau \\ &= L_1 \int_{-\infty}^t i_1(\tau) \frac{di_1(\tau)}{d\tau} d\tau + L_2 \int_{-\infty}^t i_2(\tau) \frac{di_2(\tau)}{d\tau} d\tau \pm M \int_{-\infty}^t \left[ i_1(\tau) \frac{di_2(\tau)}{d\tau} + i_2(\tau) \frac{di_1(\tau)}{d\tau} \right] d\tau \\ &= L_1 \cdot \frac{1}{2} i_1^2(t) + L_2 \cdot \frac{1}{2} i_2^2(t) \pm M \int_{-\infty}^t \frac{d(i_1(\tau) \cdot i_2(\tau))}{d\tau} d\tau = L_1 \cdot \frac{1}{2} i_1^2(t) + L_2 \cdot \frac{1}{2} i_2^2(t) \pm M i_1(t) i_2(t) \end{aligned}$$

Si può dimostrare che  $M \leq \sqrt{L_1 L_2}$ , e nel caso  $M = \sqrt{L_1 L_2}$  si parla di **accoppiamento ideale**. Nel caso peggiore si ha quindi:

$$w = \frac{1}{2} L_1 i_1^2(t) + \frac{1}{2} L_2 i_2^2(t) - \sqrt{L_1 L_2} i_1(t) i_2(t) = \frac{1}{2} \left( \sqrt{L_1} i_1(t) - \sqrt{L_2} i_2(t) \right)^2 \geq 0$$

ergo, salvo carichi iniziali, le induttanze mutuamente accoppiate sono componenti **passivi**.