Ultimo aggiornamento: November 1, 2026

🗺️ Percorso di quattro anni · Anno 3, Autunno

Informazioni sul corso

Questo corso gratuito ha 10 unità e 6 laboratori. Sono i totali reali, non un programma più lungo accorciato.

Un controllo è un numero o un risultato di codice in una pagina del corso che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero stampato e quello ricalcolato devono coincidere.

> Questo è lo schema di un corso gratuito di autoapprendimento scritto da Saving Planets. Non è un corso universitario, non dà crediti accademici e nessuna scuola è coinvolta.
>
> I contenuti seguono un corso semestrale del secondo anno di analisi dei circuiti con laboratorio. Si ispira ai temi e alla profondità di MIT 6.002 Circuits and Electronics (gratuito su MIT OpenCourseWare), Georgia Tech ECE 2040 Circuit Analysis e Purdue ECE 20001 Electrical Engineering Fundamentals I, e al testo gratuito OpenStax University Physics Volume 2 e alle simulazioni PhET, a cui rimandiamo dove sono utili. Nessuno di questi autori o istituti approva questa pagina.
>
> Cosa aggiungiamo: ogni unità è collegata a un vero lavoro nell'energia pulita con una fonte pubblica citata (illuminazione LED, pannelli solari e inverter, accumulo a batterie, ricarica dei veicoli elettrici, data center e rete elettrica), ogni numero della pagina viene ricalcolato da uno script di verifica prima di andare online, e ogni laboratorio ha una simulazione PhET gratuita o una versione casalinga sicura a bassa tensione.
>
> Seguilo in ordine. Ogni unità ha obiettivi, idee chiave, equazioni, esempi passo per passo, esercizi con soluzioni complete, errori comuni, flashcard e un quiz. I tuoi progressi sono salvati solo in questo browser.

Come questo corso aiuta a salvare il pianeta

I circuiti sono il modo in cui l'energia pulita arriva alle persone. I pannelli solari producono corrente continua che gli inverter trasformano in corrente alternata, le batterie la accumulano, trasformatori e linee elettriche la trasportano, e luci, motori e caricatori efficienti la usano.

Ogni punto percentuale di perdita in un filo, un trasformatore o un convertitore è energia che è stato necessario produrre da qualche parte. L'analisi di questo corso è quella che gli ingegneri usano per ridurre quelle perdite. Ogni unità termina con una breve sezione con fonti. I valori che non provengono da una fonte sono indicati come valori di esempio.

Per gli insegnanti

Puoi insegnare questo corso, oppure lasciare che uno studente lo faccia da solo. È gratis. Saving Planets non dà un voto né crediti scolastici.

- Questa pagina è l'intero corso: 10 unità e 6 laboratori (ENGR 214 + ENGR 214L).
- Prevedi 15 settimane, circa 6–9 ore a settimana, comprese le settimane di laboratorio.
- Segui il calendario di 15 settimane. Leggi l'unità, fai la pratica su carta, poi apri la risposta. Nella settimana di laboratorio, fai il laboratorio o la versione a casa.
- Un controllo è un numero o un risultato di codice nella pagina che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero che vedi e quello ricalcolato devono coincidere.
- Usa Stampa questa pagina, oppure scarica la guida di studio PDF. Il formulario è verso la fine.
- Chiedi: in che modo questa unità aiuta le persone e il pianeta? Ogni unità ha un riquadro verde con un fatto e la sua fonte.
- Copia il modello di guida per insegnanti e scrivi il nome della classe, il tempo che hai e le domande che farai. Apri il modello di guida per insegnanti

Prima di iniziare

Prerequisiti

- Fisica II: carica, campo elettrico, potenziale, corrente, resistenza, capacità, induttanza e legge di Faraday.
- Analisi I e II: derivate e integrali; le unità 7 e 8 risolvono equazioni differenziali del primo e del secondo ordine.
- Numeri complessi (ripassati nell'unità 9) per i fasori; Algebra lineare aiuta con le equazioni nodali e alle maglie.
- Equazioni differenziali può essere seguito in parallelo a questo corso.

Come studiare

- Disegna ed etichetta prima il circuito: potenziali di nodo, correnti di ramo con frecce e segni di polarità su ogni elemento.
- Usa la convenzione degli utilizzatori: la corrente che entra dal morsetto + significa che l'elemento assorbe potenza.
- Scrivi la LKC ai nodi o la LKT lungo le maglie, conta incognite ed equazioni, poi risolvi (a mano per 2 × 2, con le matrici oltre).
- Verifica ogni risposta: la potenza assorbita deve essere uguale a quella erogata, e i limiti ($t = 0$, $t \to \infty$, $\omega \to 0$ o ∞) devono avere senso.
- Usa le unità SI: V, A, Ω, W, F, H, s, e fai attenzione ai prefissi (mA, kΩ, μF, mH).
- Fai ogni esercizio su carta prima di aprire la risposta e ripeti i quiz qualche giorno dopo.

Che cosa ti serve

- Un computer o un tablet per le simulazioni PhET gratuite (funzionano nel browser).
- Un multimetro digitale (i modelli economici misurano V, A e Ω).
- Una breadboard senza saldature, cavetti, un portabatterie 2 × AA (3 V) e batterie AA.
- Resistori (100 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ), un condensatore da 1000 µF con tensione nominale di almeno 6.3 V, e LED.
- Facoltativo: un misuratore di potenza da presa per confrontare lampadine ed elettrodomestici (si inserisce nella presa a muro; non aprirlo).
- Occhiali di sicurezza, un cronometro o un telefono e un foglio di calcolo.

Programma suggerito di 15 settimane

Circa 6-9 ore a settimana: lettura, esercizi e, nelle settimane di laboratorio, il laboratorio.

Settimana	Unità	Argomenti	Lettura
1	Grandezze ed elementi circuitali: carica, corrente, tensione, potenza, energia e legge di Ohm	Carica, corrente, tensione, potenza, convenzione dei segni, generatori	MIT 6.002; OpenStax UP2 9.4
2	Grandezze ed elementi circuitali: carica, corrente, tensione, potenza, energia e legge di Ohm	Legge di Ohm, resistività, energia in kWh; Laboratorio A	UP2 9.4, 10.1
3	Leggi di Kirchhoff, resistori in serie e in parallelo, partitori di tensione e di corrente	LKC, LKT, serie e parallelo, partitori, strumenti di misura; Laboratorio B	UP2 10.2–10.3
4	Analisi sistematica: metodi dei potenziali di nodo e delle correnti di maglia	Metodo dei potenziali di nodo e supernodi	MIT 6.002
5	Analisi sistematica: metodi dei potenziali di nodo e delle correnti di maglia	Metodo delle correnti di maglia, supermaglie, generatori dipendenti	MIT 6.002; UP2 10.3
6	Teoremi sui circuiti: linearità, sovrapposizione, trasformazione dei generatori, Thevenin, Norton e massimo trasferimento di potenza	Sovrapposizione, trasformazione dei generatori, Thevenin, Norton, massima potenza; Laboratorio C	MIT 6.002
7	Amplificatori operazionali	Amplificatori operazionali; esercitazione per il parziale	MIT 6.002
8	Condensatori e induttori	Condensatori, induttori, energia, integratori	UP2 8.1, 14.2

Settimana	Unità	Argomenti	Lettura
9	Circuiti del primo ordine: transitori RC e RL	Risposte libere e al gradino RC e RL	UP2 10.5, 14.4
10	Circuiti del primo ordine: transitori RC e RL	Problemi di commutazione ed energia di commutazione digitale; Laboratorio D	MIT 6.002
11	Circuiti del secondo ordine: risposte libera e al gradino dei circuiti RLC	RLC serie e parallelo, smorzamento, oscillazione LC	UP2 14.5–14.6
12	Regime sinusoidale: fasori e impedenza	Sinusoidi, fasori, impedenza	UP2 15.2–15.3
13	Regime sinusoidale: fasori e impedenza	Analisi nodale, alle maglie e di Thevenin in AC, filtri; Laboratorio E	MIT 6.002; UP2 15.3, 15.5
14	Potenza in AC, fattore di potenza, risonanza, trasformatori e sistemi trifase	Potenza in AC, fattore di potenza, trasformatori, trifase; Laboratorio F	UP2 15.4–15.6
15	Ripasso	Ripasso ed esercitazione finale	Tutte le unità

I tuoi progressi

Spunta unità e laboratori man mano che li finisci, e fai i quiz. Progressi e punteggi sono salvati solo in questo browser e non ci vengono mai inviati.

Unità

Grandezze ed elementi circuitali: carica, corrente, tensione, potenza, energia e legge di Ohm

Carica e corrente, la tensione come energia per unità di carica, potenza ed energia, la convenzione degli utilizzatori, generatori ideali indipendenti e dipendenti, resistenza e resistività, legge di Ohm e potenza nei resistori.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Collegare carica, corrente, tensione, potenza ed energia con le unità corrette.
- Applicare la convenzione degli utilizzatori per stabilire se un elemento assorbe o eroga potenza.
- Usare la legge di Ohm e R = ρL/A.
- Calcolare i consumi di energia in kWh e confrontare apparecchi.

Concetti chiave

- La corrente è la velocità del flusso di carica, i = dq/dt, in ampere (1 A = 1 C/s). La tensione è l'energia per unità di carica tra due punti, in volt (1 V = 1 J/C).
- Potenza p = vi. Con la convenzione degli utilizzatori (la corrente entra dal morsetto +), p > 0 significa che l'elemento assorbe potenza e p < 0 che la eroga. In ogni circuito, potenza totale assorbita = potenza totale erogata.
- Un generatore di tensione ideale mantiene la sua tensione qualunque sia la corrente; un generatore di corrente ideale mantiene la sua corrente qualunque sia la tensione. I generatori dipendenti sono comandati da una tensione o corrente altrove e modellano transistor e amplificatori.
- Legge di Ohm v = iR. Un resistore assorbe sempre la potenza p = i²R = v²/R. La resistenza di un filo R = ρL/A cresce con la lunghezza e diminuisce con la sezione; la conduttanza G = 1/R si misura in siemens.
- Energia w = ∫p dt; a potenza costante w = Pt. I fornitori fatturano in chilowattora: 1 kWh = 3.6 MJ.

Equazioni chiave

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

`i=dq/dt`

Corrente

$$p = vi$$

`p=vi`

Potenza

$$v = iR, \;\; p = i^2 R = \frac{v^2}{R}$$

v=iR,\ \ p=i^2R=(v^2)/(R)

Legge di Ohm e potenza nel resistore

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

R=(ρ L)/(A)

Resistenza di un conduttore

Esempi svolti passo passo

Esempio 1.1 Una stufetta da 4 Ω è collegata a 12 V. Trova la corrente e la potenza.

1. i = v/R = 12/4 = 3 A.
2. p = vi = 12 × 3.

Risposta: i = 3 A, p = 36 W.

Esempio 1.2 Trova la resistenza di 10 m di filo di rame con sezione di 1 mm² (ρ = 1.68 × 10⁻⁸ Ω·m).

1. A = 1 mm² = 1 × 10⁻⁶ m².
2. R = ρL/A = 1.68 × 10⁻⁸ × 10/10⁻⁶.

Risposta: R = 0.168 Ω.

Esempio 1.3 Una lampadina a incandescenza da 60 W viene sostituita da un LED che consuma il 75% di energia in meno. Entrambi funzionano 3 ore al giorno per un anno. Trova l'energia risparmiata.

1. Potenza del LED = 0.25 × 60 = 15 W.
2. Incandescenza: 60 × 3 × 365 = 65700 Wh = 65.7 kWh; LED: 16.4 kWh.

Risposta: Circa 49.3 kWh risparmiati per lampadina all'anno.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Una corrente di 2 A scorre per 30 s. Quanta carica passa?

   q = it = 60 C.

2. Una lampada assorbe 0.5 A da 120 V. Trova la sua potenza e la sua resistenza.

   p = 60 W, R = 240 Ω.

3. Un elemento ha v = 5 V e i = −2 A entrante dal morsetto +. Assorbe o eroga potenza?

   p = −10 W: eroga 10 W.

4. Quanti joule ci sono in 2 kWh?

   7.2×10^6 J.

Errori concettuali comuni

Mito: La corrente viene consumata da un resistore.

In realtà: La carica si conserva; esce la stessa corrente che entra. Si converte l'energia, non la corrente.

Mito: La tensione esiste in un punto.

In realtà: La tensione è sempre tra due punti; un «potenziale di nodo» si misura rispetto a una massa scelta.

Mito: La potenza è sempre vi con segno più.

In realtà: Usa la convenzione degli utilizzatori per avere il segno giusto.

Flashcard

Corrente

i = dq/dt, in A.

Tensione

Energia per unità di carica, in V = J/C.

Potenza

p = vi.

Convenzione degli utilizzatori

Corrente entrante dal morsetto +: p > 0, assorbe.

Legge di Ohm

kWh

v = iR.

3.6 MJ.

Quiz di autoverifica

1. 1 A equivale a...

1 J/s

1 C/s

1 V/s

1 W/V²

1 C/s. Carica al secondo.

2. Raddoppiare la tensione su un resistore moltiplica la sua potenza per...

1

2

4

½

4. p = v²/R.

3. Raddoppiare la lunghezza di un filo (stessa sezione) cambia la sua resistenza di un fattore...

½

1

2

4

2. R = ρL/A.

4. 1 kWh equivale a...

1000 J

3600 J

3.6 MJ

60 kJ

3.6 MJ. 1000 W × 3600 s.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L'illuminazione è il posto più semplice per vedere potenza ed energia all'opera. La guida all'illuminazione efficiente del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti dice che i LED usano almeno il 75 per cento di energia in meno delle lampadine a incandescenza, non emettono quasi calore e durano 25 volte di più.

Con p = vi e w = Pt, l'esempio svolto mostra cosa significa per una lampadina: sostituire una a incandescenza da 60 W con un LED da 15 W, usato 3 ore al giorno, fa risparmiare circa 49.3 kWh l'anno. Moltiplica per le decine di lampadine di una casa e i milioni di case di un paese, e diventano visibili le centrali che non devono mai entrare in funzione.

Su Saving Planets: Fisica II · Soluzioni

Fonti: U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf) · OpenStax UP2, 9.4 Ohm's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 9.4 Ohm's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law): Sezione di un manuale gratuito.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Lezioni sull'astrazione circuitale e la legge di Ohm.
- PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): Interattivo.
- OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force): Generatori e resistenza interna.

Guarda la lezione

Lecture 22: Energy and Power (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-22/) (in inglese)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d’uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Leggi di Kirchhoff, resistori in serie e in parallelo, partitori di tensione e di corrente

Nodi, rami e anelli, leggi di Kirchhoff delle correnti e delle tensioni, collegamenti in serie e in parallelo, resistenza equivalente, partitori di tensione e di corrente, trasformazioni triangolo–stella, e misure con voltmetri e amperometri.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Scrivere LKC e LKT per qualsiasi circuito.
- Ridurre reti serie–parallelo a una resistenza equivalente.
- Usare partitori di tensione e di corrente.
- Spiegare come si collegano gli strumenti e come caricano un circuito.

Concetti chiave

- LKC: la somma delle correnti uscenti da qualsiasi nodo è zero (la carica si conserva). LKT: la somma delle tensioni lungo qualsiasi anello chiuso è zero (l'energia si conserva).
- Gli elementi in serie portano la stessa corrente; le resistenze si sommano: R_eq = R_1 + R_2 + …. Gli elementi in parallelo hanno la stessa tensione; le conduttanze si sommano: 1/R_eq = 1/R_1 + 1/R_2 + …; per due resistori R_1R_2/(R_1 + R_2).
- Partitore di tensione: v_2 = v·R_2/(R_1 + R_2). Partitore di corrente (due resistori): i_1 = i·R_2/(R_1 + R_2); la quota maggiore passa nel resistore più piccolo.
- La trasformazione triangolo–stella (Δ–Y) risolve i ponti che non sono né in serie né in parallelo: R_Y = (prodotto dei due resistori Δ adiacenti)/(somma di tutti e tre).
- Un voltmetro va in parallelo e deve avere resistenza molto alta; un amperometro va in serie e deve avere resistenza molto bassa.

Equazioni chiave

$$\sum i_{\text{out}} = 0$$

i_out=0

KCL

$$\sum v = 0 \text{ around a loop}$$

v=0\ around a loop

KVL

$$R_s = R_1 + R_2, \;\; R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

`R_s=R_1+R_2,\ \ R_p=(R_1R_2)/(R_1+R_2)`

Serie e parallelo

$$v_2 = v\frac{R_2}{R_1 + R_2}, \;\; i_1 = i\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

`v_2=v(R_2)/(R_1+R_2),\ \ i_1=i(R_2)/(R_1+R_2)`

Partitori di tensione e di corrente

Esempi svolti passo passo

Esempio 2.1 Resistori da 100, 200 e 300 Ω sono in serie su 12 V. Trova la corrente e la tensione sul resistore da 200 Ω.

1. R_eq = 600 Ω; i = 12/600 = 0.02 A.
2. v = 0.02 × 200.

Risposta: i = 20 mA, v_{200} = 4 V.

Esempio 2.2 Un generatore da 9 V alimenta un partitore con R_1 = 10 kΩ in alto e R_2 = 5 kΩ in basso. Trova v_out su R_2.

1. v_out = 9 × 5/(10 + 5).

Risposta: v_out = 3 V.

Esempio 2.3 Una corrente di 6 A si divide tra 2 Ω e 4 Ω in parallelo. Trova ciascuna corrente.

1. $i_{2\Omega}$ = 6 × 4/(2 + 4) = 4 A.
2. $i_{4\Omega}$ = 6 × 2/6 = 2 A; verifica 4 + 2 = 6.

Risposta: 4 A in 2 Ω e 2 A in 4 Ω.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova 6 Ω ‖ 3 Ω.

   18/9 = 2 Ω.

2. Tre resistori da 30 Ω sono in parallelo. Trova R_eq.

   10 Ω.

3. Trova R_eq di 10 Ω in serie con (20 Ω ‖ 20 Ω).

   10 + 10 = 20 Ω.

4. Tre correnti entrano in un nodo: 2 A, 3 A e −1 A. Quale corrente esce?

   4 A.

Errori concettuali comuni

Mito: La resistenza in parallelo è maggiore del resistore più piccolo.

In realtà: È sempre minore del più piccolo.

Mito: Un partitore di tensione funziona con qualsiasi carico.

In realtà: Un carico su R_2 è in parallelo con esso e abbassa v_out a meno che la sua resistenza sia molto maggiore.

Mito: Un amperometro va ai capi dell'elemento.

In realtà: Ai capi, un amperometro a bassa resistenza è quasi un cortocircuito; va in serie.

Flashcard

KCL

Le correnti uscenti da un nodo hanno somma 0.

KVL

Le tensioni lungo un anello hanno somma 0.

Serie

Le R si sommano; stessa corrente.

Parallelo

Le G si sommano; stessa tensione.

Partitore di tensione

$v_2 = vR_2/(R_1 + R_2)$.

Partitore di corrente

$i_1 = iR_2/(R_1 + R_2)$.

Quiz di autoverifica

1. La LKC esprime la conservazione...

energia

carica

della potenza

flusso

carica. La carica non può accumularsi in un nodo.

2. Due resistori uguali R in parallelo danno...

2R

R

R/2

R^2

R/2. R·R/(2R).

3. Gli elementi in serie condividono la stessa...

tensione

la corrente

della potenza

la resistenza

la corrente. Un solo percorso.

4. Un voltmetro ideale ha resistenza...

zero

infinita

1 Ω

uguale al carico

infinita. Non deve assorbire corrente.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

I pannelli solari sono circuiti in serie e in parallelo. La Energy Information Administration statunitense spiega che una cella FV può produrre solo 1 o 2 watt, quindi le celle sono collegate elettricamente in pannelli a tenuta stagna, i pannelli sono collegati in campi da due a centinaia di pannelli, e il numero di pannelli stabilisce quanta elettricità un campo può generare. Le celle producono corrente continua, e gli inverter la convertono nella corrente alternata usata in rete.

Il collegamento in serie somma le tensioni e quello in parallelo somma le correnti. Come esempio, celle da 0.5 V e 3 A (1.5 W, nell'intervallo di 1–2 W dell'EIA) danno 30 V a 3 A, cioè 90 W, quando 60 sono collegate in serie. LKC e LKT spiegano anche perché una sola cella in ombra in una stringa in serie può abbassare l'intera stringa, ed è per questo che i pannelli includono diodi di bypass.

Su Saving Planets: Fisica II · Parker Solar Probe

Fonti: U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php) · OpenStax UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): LKC e LKT.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Lezioni di analisi di base dei circuiti.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Interattivo.

☐ **Ho finito questa unità**

Analisi sistematica: metodi dei potenziali di nodo e delle correnti di maglia

Scelta di un nodo di riferimento, scrittura della LKC in termini di potenziali di nodo, supernodi, correnti di maglia e LKT, supermaglie, circuiti con generatori dipendenti, e risoluzione a mano e con le matrici dei sistemi lineari risultanti.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Scrivere e risolvere le equazioni ai potenziali di nodo, supernodi compresi.
- Scrivere e risolvere le equazioni alle correnti di maglia, supermaglie comprese.
- Trattare i generatori dipendenti in entrambi i metodi.
- Scegliere il metodo che dà meno equazioni.

Concetti chiave

- Metodo dei potenziali di nodo: scegli un nodo di massa, assegna un nome agli altri potenziali di nodo, scrivi la LKC in ogni nodo diverso dal riferimento usando la legge di Ohm (la corrente da a a b attraverso R è (v_a − v_b)/R) e risolvi.
- Un generatore di tensione tra due nodi diversi dal riferimento forma un supernodo: scrivi una LKC per la regione combinata più l’equazione del generatore v_a − v_b = V_s.
- Metodo delle correnti di maglia (circuiti planari): assegna una corrente in senso orario a ogni finestra e scrivi la LKT lungo ogni maglia; un resistore condiviso porta la differenza delle due correnti di maglia.
- Un generatore di corrente condiviso da due maglie forma una supermaglia: una LKT lungo l’anello combinato più l’equazione del generatore.
- Un circuito con N nodi richiede N − 1 equazioni di nodo; un circuito con M maglie richiede M equazioni di maglia. Scegli l’insieme più piccolo. Le equazioni formano Gv = i o Ri = v, un sistema lineare.

Equazioni chiave

$$\sum_{\text{branches}} \frac{v_n - v_k}{R_{nk}} = i_{\text{source into } n}$$

`_branches_n-v_kR_nk=i_source into n`

LKC al nodo n

$$\sum_{\text{mesh}} R\,(i_m - i_{\text{adj}}) = \sum v_{\text{sources}}$$

`_mesh R (i_m-i_adj)= v_sources`

LKT lungo la maglia m

$$G\mathbf{v} = \mathbf{i}$$

Forma matriciale nodale

$$R\mathbf{i} = \mathbf{v}$$

Forma matriciale alle maglie

Esempi svolti passo passo

Esempio 3.1 Un generatore da 10 V alimenta il nodo 1 attraverso 2 Ω. Il nodo 1 ha 4 Ω verso massa e 2 Ω verso il nodo 2; il nodo 2 ha 4 Ω verso massa e un generatore da 1 A entrante. Trova v_1 e v_2.

1. Nodo 1 (×4): $2(v_1 - 10) + v_1 + 2(v_1 - v_2) = 0$, quindi $5v_1 - 2v_2 = 20$.
2. Nodo 2 (×4): $2(v_2 - v_1) + v_2 - 4 = 0$, quindi $-2v_1 + 3v_2 = 4$.
3. det = 15 − 4 = 11; $v_1 = (60 + 8)/11$, $v_2 = (20 + 40)/11$.

Risposta: $v_1 = 6.182$ V, $v_2 = 5.455$ V.

Esempio 3.2 La maglia 1 ha un generatore da 10 V e 2 Ω; la maglia 2 ha 6 Ω; le maglie condividono 4 Ω. Trova le correnti di maglia e la corrente nel resistore condiviso.

1. Maglia 1: $6i_1 - 4i_2 = 10$. Maglia 2: $-4i_1 + 10i_2 = 0$.
2. det = 60 − 16 = 44; $i_1 = 100/44$, $i_2 = 40/44$.

Risposta: $i_1 = 2.273$ A, $i_2 = 0.909$ A; il resistore condiviso porta 1.364 A.

Esempio 3.3 Un generatore da 5 V si trova tra i nodi a e b ($v_a - v_b = 5$). Il nodo a ha 1 Ω verso massa, il nodo b ha 4 Ω verso massa, e 2 A vengono iniettati nel supernodo. Trova v_a e v_b.

1. LKC del supernodo: $v_a/1 + v_b/4 = 2$.
2. Sostituisci $v_a = v_b + 5$: $v_b + 5 + v_b/4 = 2$, quindi $1.25v_b = -3$.

Risposta: $v_b = -2.4$ V, $v_a = 2.6$ V.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Quante equazioni di nodo servono per un circuito con 5 nodi?

   4.

2. Un unico nodo a potenziale v è collegato tramite 2 Ω a 6 V e tramite 2 Ω a massa. Trova v.

   $(v - 6)/2 + v/2 = 0$: $v = 3$ V.

3. Due maglie condividono un resistore da 3 Ω; $i_1 = 2$ A e $i_2 = 0.5$ A, entrambe in senso orario. Trova la corrente nel resistore condiviso.

   1.5 A nel verso di i_1.

4. Scrivi $5v_1 - 2v_2 = 20$, $-2v_1 + 3v_2 = 4$ come $Gv = i$.

   $G = [[5, -2], [-2, 3]]$, $i = (20, 4)$.

Errori concettuali comuni

Mito: La LKC si può scrivere anche al nodo di riferimento.
In realtà: Dà un'equazione dipendente; usa N − 1 nodi.

Mito: Le correnti di maglia sono le correnti di ramo.
In realtà: Solo sui rami esterni; i rami condivisi portano differenze.

Mito: La corrente di un generatore di tensione è zero perché non ha resistenza.
In realtà: La sua corrente è fissata dal resto del circuito; per questo si usano i supernodi.

Flashcard

Nodo di riferimento

Massa, v = 0.

Metodo dei potenziali di nodo

LKC in N − 1 nodi.

Supernodo

Generatore di tensione tra due nodi.

Metodo delle correnti di maglia

LKT lungo ogni finestra.

Supermaglia

Generatore di corrente condiviso da due maglie.

Gv = i

Equazioni nodali in forma matriciale.

Quiz di autoverifica

1. Quante equazioni ai potenziali di nodo servono per un circuito con 4 nodi?

2

3

4

5

3. N − 1.

2. Un generatore di tensione tra due nodi diversi dal riferimento richiede...

una supermaglia

un supernodo

un cortocircuito

la sovrapposizione

un supernodo. Unisci i due nodi.

3. La corrente in un resistore condiviso dalle maglie 1 e 2 è...

$i_1 + i_2$

$i_1 - i_2$

$i_1 i_2$

zero

$i_1 - i_2$. Entrambe circolano in senso orario nella propria maglia.

4. Le equazioni di nodo formano...

un'equazione differenziale

un sistema lineare Gv = i

un’equazione di secondo grado

solo un determinante

un sistema lineare Gv = i. I circuiti resistivi lineari sono sistemi lineari.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La rete elettrica è un enorme problema di analisi nodale. L’EIA spiega che la rete statunitense è fatta di migliaia di miglia di linee ad alta tensione e milioni di miglia di linee a bassa tensione che collegano migliaia di centrali a centinaia di milioni di clienti. All’inizio del 20° secolo operavano più di 4000 aziende isolate; oggi i 48 stati contigui funzionano come tre grandi interconnessioni, Est, Ovest ed ERCOT, collegate per offrire più percorsi al flusso di energia.

L’EIA osserva che l’offerta deve eguagliare la domanda in ogni istante e che le autorità di bilanciamento le mantengono allineate. I gestori di rete lo fanno con modelli di flusso di potenza le cui equazioni sono la versione in AC del metodo dei potenziali di nodo di questa unità, risolta per migliaia di sbarre, e la stessa analisi indica ai pianificatori dove servono nuove linee per collegare eolico e solare lontano dalle città.

Su Saving Planets: Algebra lineare · Soluzioni

Fonti: U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff’s rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Lezioni sul metodo dei nodi e la sovrapposizione.
- OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff’s rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): Circuiti a più anelli.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Verifica i tuoi potenziali di nodo.
- Interactive Linear Algebra (Georgia Tech) (https://textbooks.math.gatech.edu/ila/): Risolvere i sistemi lineari.

Guarda la lezione

Lecture 2: Basic Circuit Analysis Method (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-2/) (in inglese)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d’uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Teoremi sui circuiti: linearità, sovrapposizione, trasformazione dei generatori, Thevenin, Norton e massimo trasferimento di potenza

Linearità e sovrapposizione, trasformazioni dei generatori, circuiti equivalenti di Thevenin e Norton, calcolo di R_Th spegnendo i generatori o con un generatore di prova, e il teorema del massimo trasferimento di potenza.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Usare la sovrapposizione per analizzare circuiti con più generatori.
- Convertire tra generatori di tensione e di corrente.
- Trovare gli equivalenti di Thevenin e Norton.
- Scegliere un carico per il massimo trasferimento di potenza e calcolare tale potenza.

Concetti chiave

- Linearità: in un circuito di resistori e generatori, ogni tensione e corrente è una combinazione lineare dei valori dei generatori. Sovrapposizione: trova la risposta a ciascun generatore indipendente da solo (gli altri generatori di tensione cortocircuitati, quelli di corrente aperti) e somma.
- Trasformazione dei generatori: un generatore di tensione V in serie con R equivale, ai suoi morsetti, a un generatore di corrente V/R in parallelo con R.
- Teorema di Thevenin: ogni rete lineare a due morsetti si comporta come un generatore V_Th in serie con R_Th. V_Th è la tensione a vuoto; R_Th è la resistenza vista con i generatori indipendenti spenti (o V_oc/i_sc).
- Teorema di Norton: la stessa rete è un generatore di corrente I_N = i_sc in parallelo con R_N = R_Th; V_Th = I_N R_Th.
- Massimo trasferimento di potenza: un carico riceve la massima potenza quando R_L = R_Th, e allora P_max = V_Th²/(4R_Th). Il rendimento in quel punto è solo del 50%, quindi i sistemi elettrici sono progettati invece per R_L ≫ R_source.

Equazioni chiave

$$v = \sum_k v^{(k)}$$

v=_k v^(k)

Sovrapposizione

$$V_{Th} = v_{oc}, \;\; R_{Th} = \frac{v_{oc}}{i_{sc}}$$

V_Th=v_oc,\ \ R_Th=_oci_sc

Equivalente di Thevenin

$$I_N = \frac{V_{Th}}{R_{Th}}$$

I_N=_ThR_Th

Corrente di Norton

$$P_{\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{Th}} \text{ at } R_L = R_{Th}$$

P_=_Th^24R_Th\ at\ R_L=R_Th

Massimo trasferimento di potenza

Esempi svolti passo passo

Esempio 4.1 Un generatore da 12 V in serie con 4 Ω alimenta i morsetti a–b, con 12 Ω tra a e b. Trova gli equivalenti di Thevenin e Norton.

1. V_Th = 12 × 12/(4 + 12) = 9 V (partitore).
2. R_Th = 4 ∥ 12 = 48/16 = 3 Ω (generatore cortocircuitato).
3. I_N = 9/3.

Risposta: V_Th = 9 V, R_Th = 3 Ω; I_N = 3 A.

Esempio 4.2 Per quel circuito, trova la potenza su un carico da 6 Ω e la massima potenza possibile sul carico.

1. i = 9/(3 + 6) = 1 A; P = 1² × 6 = 6 W.
2. Massimo con R_L = 3 Ω: P_max = 9²/(4 × 3).

Risposta: 6 W; P_max = 6.75 W con 3 Ω.

Esempio 4.3 Un nodo è collegato a un generatore da 10 V tramite 5 Ω, a massa tramite 5 Ω, e riceve un generatore di corrente da 2 A. Trova il potenziale del nodo per sovrapposizione.

1. Solo 10 V (2 A aperto): il partitore dà 5 V.
2. Solo 2 A (10 V cortocircuitato): 2 × (5 ‖ 5) = 5 V.
3. Somma le due.

Risposta: v = 10 V. Verifica con la LKC: (10 − 10)/5 + 2 = 10/5.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Converti un generatore da 6 V in serie con 2 Ω nella forma di Norton.

   3 A in parallelo con 2 Ω.

2. Una rete ha v_oc = 15 V e i_sc = 5 A. Trova R_Th.

   3 Ω.

3. Quale carico riceve la massima potenza da V_Th = 20 V, R_Th = 5 Ω, e quanta?

   R_L = 5 Ω, P = 400/20 = 20 W.

4. La sovrapposizione può sommare le potenze?

   No: la potenza non è lineare; somma tensioni o correnti, poi calcola la potenza.

Errori concettuali comuni

Mito: Spegnere un generatore di tensione significa rimuoverlo.
In realtà: Sostituiscilo con un cortocircuito; un generatore di corrente diventa un circuito aperto.

Mito: Massimo trasferimento di potenza significa massimo rendimento.
In realtà: Con R_L = R_Th metà della potenza si perde in R_Th.

Mito: I generatori dipendenti si spengono per calcolare R_Th.
In realtà: Mantieni i generatori dipendenti; usa un generatore di prova per trovare R_Th.

Flashcard

Sovrapposizione	**Trasformazione dei generatori**
Somma le risposte a ciascun generatore da solo.	V in serie con R ↔ V/R in parallelo con R.

Thevenin

V_Th in serie con R_Th.

Norton

I_N in parallelo con R_N.

R_Th

v_oc/i_sc.

Potenza massima

$V_{Th}^2/(4R_{Th})$ con $R_L = R_{Th}$.

Quiz di autoverifica

1. Per trovare R_Th, i generatori di tensione indipendenti si sostituiscono con...

circuiti aperti

cortocircuiti

resistori

generatori di corrente

cortocircuiti. Zero volt è un cortocircuito.

2. V_Th è la...

corrente di cortocircuito

tensione a vuoto

sempre la tensione del generatore

tensione sul carico

tensione a vuoto. Si misura senza nulla collegato.

3. Il massimo trasferimento di potenza si ha quando...

$R_L = 0$

$R_L = R_{Th}$

$R_L \to \infty$

R_L = 2R_Th

R_L = R_Th. Carico adattato.

4. Il rendimento al massimo trasferimento di potenza è...

25%

50%

75%

100%

50%. Uguale potenza in R_Th e R_L.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Le celle solari si comportano come generatori il cui punto di lavoro tipo Thevenin cambia con la luce solare e la temperatura, quindi la loro elettronica cerca continuamente il carico che assorbe più potenza. La parte di luce solare convertita in elettricità è migliorata costantemente: l'EIA riporta che i pannelli FV commerciali avevano in media meno del 10% di efficienza a metà degli anni 1980, circa il 15% nel 2015, e oggi si avvicinano al 25% per i moduli più avanzati, mentre celle sperimentali e spaziali hanno raggiunto quasi il 50%.

L'EIA riporta anche che gli impianti FV su scala industriale degli Stati Uniti hanno generato circa 292 miliardi di kWh nel 2025, rispetto a 6 milioni di kWh nel 2004, e i piccoli impianti su tetto circa 93 miliardi di kWh. Adattare ogni stringa di pannelli al suo punto di lavoro migliore, l'idea alla base del massimo trasferimento di potenza, è parte di come quei chilowattora vengono ricavati da ogni metro quadrato.

Su Saving Planets: Fisica II · Spazio

Fonti: U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php) · MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Lezioni sugli equivalenti di Thevenin e Norton.

- OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force): Resistenza interna e tensione ai morsetti.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Misura v_oc e i_sc.
- OpenStax UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel): Resistenza equivalente.

Guarda la lezione

Lecture 3: Superposition, Thévenin and Norton (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-3/) (in inglese)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d'uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Amplificatori operazionali

L’amplificatore operazionale ideale e le sue due regole, amplificatori invertente e non invertente, inseguitori di tensione, amplificatori sommatore e differenziale, saturazione, stadi in cascata, e amplificatori operazionali in sensori e misure.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Applicare le regole dell’amplificatore operazionale ideale con retroazione negativa.
- Analizzare circuiti invertente, non invertente, inseguitore, sommatore e differenziale.
- Riconoscere la saturazione e i suoi limiti.
- Progettare un amplificatore semplice per il segnale di un sensore.

Concetti chiave

- Un amplificatore operazionale amplifica la differenza tra i suoi ingressi con un guadagno molto elevato. Con retroazione negativa, le regole ideali sono: nessuna corrente entra negli ingressi, e le due tensioni di ingresso sono uguali ($v_+ = v_-$).
- Amplificatore invertente: v_o = −(R_f/R_in)v_in. Amplificatore non invertente: v_o = (1 + R_f/R_g)v_in. Inseguitore di tensione (buffer): v_o = v_in quasi senza prelevare corrente dalla sorgente.
- Amplificatore sommatore: $v_o = -R_f(v_1/R_1 + v_2/R_2 + \ldots)$. Amplificatore differenziale con rapporti uguali: $v_o = (R_2/R_1)(v_2 - v_1)$.
- L’uscita non può superare le tensioni di alimentazione; oltre, l’amplificatore satura e le regole lineari non valgono più.
- Stadi in cascata moltiplicano i loro guadagni, e poiché l’uscita di un amplificatore operazionale si comporta come un generatore di tensione ideale, uno stadio non è caricato dal successivo.

Equazioni chiave

$$v_+ = v_-,\ \ i_+ = i_- = 0$$

`v_+=v_-,\ \ i_+=i_-=0`

Regole dell’amplificatore operazionale ideale (retroazione negativa)

$$v_o = -\frac{R_f}{R_{in}} v_{in}$$

`v_o=-_fR_inv_in`

Amplificatore invertente

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) v_{in}$$

v_o=(1+(R_f)/(R_g))v_in

Amplificatore non invertente

$$v_o = -R_f \sum_k \frac{v_k}{R_k}$$

v_o=-R_f_k(v_k)/(R_k)

Amplificatore sommatore

Esempi svolti passo passo

Esempio 5.1 Un amplificatore invertente ha R_in = 10 kΩ e R_f = 100 kΩ. Trova il guadagno e v_o per v_in = 0.2 V.

1. Guadagno = −100/10 = −10.
2. v_o = −10 × 0.2.

Risposta: Guadagno −10, v_o = −2 V.

Esempio 5.2 Progetta un amplificatore non invertente con guadagno 10 usando R_g = 1 kΩ.

1. 1 + R_f/R_g = 10, quindi R_f/R_g = 9.

Risposta: R_f = 9 kΩ.

Esempio 5.3 Un amplificatore sommatore ha R_f = R_1 = R_2 = 10 kΩ, v_1 = 1 V e v_2 = 2 V. Trova v_o. E se l'alimentazione è ±12 V e il guadagno viene aumentato in modo che la risposta ideale sia −15 V?

1. v_o = −10k(1/10k + 2/10k) = −3 V.
2. L'uscita non può scendere sotto l'alimentazione di −12 V.

Risposta: v_o = −3 V; con il guadagno maggiore satura vicino a −12 V.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova il guadagno di un amplificatore invertente con R_f = 47 kΩ e R_in = 4.7 kΩ.

   −10.

2. Un inseguitore di tensione ha v_in = 1.5 V. Trova v_o.

   1.5 V.

3. Due stadi con guadagni −10 e 5 sono in cascata. Trova il guadagno complessivo.

   −50.

4. Un amplificatore differenziale con $R_2/R_1 = 4$ ha $v_2 = 1.2$ V e $v_1 = 1.0$ V. Trova v_o.

   4 × 0.2 = 0.8 V.

Errori concettuali comuni

Mito: Gli ingressi dell'amplificatore operazionale assorbono la corrente del circuito.
In realtà: Idealmente nessuna corrente entra negli ingressi; scorre in R_f.

Mito: $v_+ = v_-$ sempre.
In realtà: Solo con retroazione negativa e fuori saturazione.

Mito: Il guadagno può essere grande quanto si vuole.
In realtà: L'uscita è limitata dalle alimentazioni e dalla banda reale dell'amplificatore.

Flashcard

Amplificatore operazionale ideale

$v_+ = v_-$, nessuna corrente di ingresso.

Invertente

−R_f/R_in.

Non invertente

1 + R_f/R_g.

Inseguitore

Buffer a guadagno 1.

Sommatore

−R_f Σ v_k/R_k.

Saturazione

Uscita limitata dalle alimentazioni.

Quiz di autoverifica

1. Con retroazione negativa, un amplificatore operazionale ideale crea...

$v_+ = 0$

$v_+ = v_-$

$v_o = 0$

$i_o = 0$

$v_+ = v_-$. Cortocircuito virtuale.

2. Un amplificatore invertente con $R_f = 20\ k\Omega$, $R_{in} = 5\ k\Omega$ ha guadagno...

4

−4

5

−5

−4. $-R_f/R_{in}$.

3. Un inseguitore di tensione serve a...

sommare segnali

disaccoppiare una sorgente

invertire

integrare

disaccoppiare una sorgente. Guadagno 1, nessun carico.

4. Il guadagno minimo di un amplificatore non invertente è...

0

1

−1

10

1. 1 + R_f/R_g ≥ 1.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Una rete più intelligente comincia dalla misura, e misurare piccoli segnali è il compito dell'amplificatore operazionale. L'EIA spiega che la rete intelligente combina la tecnologia digitale con il sistema elettrico tradizionale così che fornitori e clienti possano inviare e ricevere informazioni, aiutando i fornitori a ridurre le perdite di elettricità e a individuare e risolvere i problemi più in fretta, e che dispositivi intelligenti sulle linee e nelle sottostazioni permettono di gestire la tensione in modo più efficiente e di localizzare rapidamente un guasto.

Ogni contatore intelligente e sensore di linea porta il minuscolo segnale di un sensore di corrente o di un partitore di tensione a un intervallo leggibile da un convertitore digitale, usando proprio gli amplificatori invertente, non invertente e differenziale di questa unità. L'EIA aggiunge che i dispositivi intelligenti possono avvisare i clienti quando i prezzi sono alti, così da spostare i consumi lontano dai momenti di domanda molto alta.

Su Saving Planets: Introduzione alla programmazione · Soluzioni

Fonti: U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Lezioni sull'astrazione dell'amplificatore operazionale.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Reti di resistori per fissare il guadagno.
- OpenStax UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel): Partitori usati nella retroazione.
- OpenStax UP2, 9.4 Ohm's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law): Ripasso.

Guarda la lezione

Lecture 19: The Operational Amplifier Abstraction (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-19/) (in inglese)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d’uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Condensatori e induttori

Capacità e induttanza, le loro relazioni corrente–tensione, energia immagazzinata, continuità della tensione del condensatore e della corrente dell'induttore, collegamenti in serie e in parallelo, comportamento in regime stazionario DC, e integratori e derivatori con amplificatore operazionale.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Usare i = C dv/dt e v = L di/dt.
- Calcolare l'energia immagazzinata in condensatori e induttori.
- Combinare condensatori e induttori in serie e in parallelo.
- Trovare tensioni e correnti in regime stazionario DC in circuiti con C e L.

Concetti chiave

- Un condensatore immagazzina energia in un campo elettrico: q = Cv, i = C dv/dt, w = ½Cv². La sua tensione non può saltare istantaneamente; in regime stazionario DC si comporta come un circuito aperto.
- Un induttore immagazzina energia in un campo magnetico: v = L di/dt, w = ½Li². La sua corrente non può saltare istantaneamente; in regime stazionario DC si comporta come un cortocircuito.
- I condensatori in parallelo si sommano; in serie si combinano come resistori in parallelo. Gli induttori si combinano come i resistori: in serie si sommano, in parallelo si combinano i reciproci.
- Un amplificatore operazionale con un condensatore in retroazione integra: v_o = −(1/RC)∫v_in dt. Scambiando R e C si ottiene un derivatore.
- Condensatori e induttori ideali immagazzinano e restituiscono energia senza perdite; quelli reali hanno una piccola resistenza e perdite.

Equazioni chiave

$$i = C\frac{dv}{dt}, \quad w = \tfrac{1}{2}Cv^2$$

`i=Cdv/dt,\ \ w=12Cv^2`

Condensatore

$$v = L\frac{di}{dt}, \quad w = \tfrac{1}{2}Li^2$$

`v=Ldi/dt,\ \ w=12Li^2`

Induttore

$$C_p = C_1 + C_2, \quad \frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

C_p=C_1+C_2,\ \ (1)/(C_s)=(1)/(C_1)+(1)/(C_2)

Collegamenti di condensatori

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_{in}\, dt$$

v_o=-1/RC v_in dt

Integratore con amplificatore operazionale

Esempi svolti passo passo

Esempio 6.1 La tensione di un condensatore da 10 μF sale a 2 V/ms. Trova la sua corrente.

1. dv/dt = 2000 V/s.
2. i = 10 × 10⁻⁶ × 2000.

Risposta: i = 20 mA.

Esempio 6.2 Trova l'energia in un condensatore da 1000 μF a 3 V e in un induttore da 0.2 H percorso da 3 A.

1. w_C = ½ × 10⁻³ × 3² = 4.5 × 10⁻³ J.
2. w_L = ½ × 0.2 × 3².

Risposta: 4.5 mJ e 0.9 J.

Esempio 6.3 Un generatore DC da 12 V alimenta 2 Ω in serie con un induttore, con un resistore da 4 Ω in parallelo a un condensatore in uscita (regime stazionario). Trova la corrente nell'induttore e la tensione sul condensatore.

1. In DC l'induttore è un cortocircuito e il condensatore è aperto.
2. i = 12/(2 + 4) = 2 A; v_C = 2 × 4.

Risposta: i_L = 2 A, v_C = 8 V.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova 6 µF e 3 µF in serie.

   2 µF.

2. La corrente di un induttore da 50 mH varia a 100 A/s. Trova la sua tensione.

   5 V.

3. Trova 4 mH e 6 mH in serie.

   10 mH.

4. Quanta carica accumula un condensatore da 100 µF a 9 V?

   q = 0.9 mC.

Errori concettuali comuni

Mito: Un condensatore lascia passare la DC.
In realtà: In regime stazionario DC blocca la corrente (circuito aperto).

Mito: La corrente di un induttore può cambiare istantaneamente.
In realtà: Servirebbe una tensione infinita; la corrente è continua.

Mito: I condensatori si combinano come i resistori.
In realtà: Si combinano al contrario: in parallelo si sommano.

Flashcard

Condensatore

$i = C\,dv/dt$.

Induttore

$v = L\,di/dt$.

Energia del condensatore

$\frac{1}{2}Cv^2$.

Energia dell'induttore

$\frac{1}{2}Li^2$.

Regime stazionario DC

C aperto, L cortocircuito.

Integratore

$v_o = -(1/RC)\int v_{in}\,dt$.

Quiz di autoverifica

1. In regime stazionario DC un induttore si comporta come...

un circuito aperto

un cortocircuito

un resistore

un generatore

un cortocircuito. di/dt = 0 quindi v = 0.

2. Raddoppiare la tensione di un condensatore moltiplica la sua energia per...

2

4

½

1

4. $w \propto v^2$.

3. Quale non può cambiare istantaneamente?

la corrente del condensatore

la tensione del condensatore

la tensione dell'induttore

la corrente del resistore

la tensione del condensatore. Servirebbe una corrente infinita.

4. Due condensatori da 10 µF in parallelo danno...

5 µF

10 µF

20 µF

100 µF

20 µF. I condensatori in parallelo si sommano.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Accumulare energia è ciò che permette di usare l'energia solare ed eolica dopo il tramonto o quando il vento cala. L'EIA ha riportato nell'agosto 2026 che la capacità di accumulo a batterie su scala industriale degli Stati Uniti è cresciuta in media del 70% l'anno negli ultimi tre anni, raggiungendo 43.6 GW a fine 2025, e che gli operatori hanno aggiunto altri 8.3 GW nel primo semestre 2026, arrivando a quasi 52 GW, con circa 54 GW in più previsti nei prossimi due anni e mezzo.

L'EIA osserva che gli impianti solari ospitano le unità di batterie più grandi e che il solare più accumulo permette di immagazzinare energia quando i prezzi sono bassi e di scaricarla quando sono alti. Le batterie accumulano energia chimicamente, ma i condensatori e gli induttori di questa unità sono in ogni inverter e caricabatterie, livellando le correnti e immagazzinando energia per microsecondi alla volta mentre la potenza viene convertita tra DC e AC.

Su Saving Planets: Fisica II · Soluzioni

Fonti: U.S. EIA: Battery storage capacity averaged 70% growth over the last three years (Aug. 7, 2026) (https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=67925) · OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 14.2 Self-inductance and inductors (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-2-self-inductance-and-inductors): Induttanza.
- PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics): Interattivo.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Lezioni su condensatori e sistemi del primo ordine.

☐ **Ho finito questa unità**

Circuiti del primo ordine: transitori RC e RL

Risposte libere e al gradino dei circuiti RC e RL, la costante di tempo, la soluzione generale x(t) = x(∞) + [x(0) − x(∞)]e^(−t/τ), problemi di commutazione ed energia nella commutazione digitale.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Trovare i valori iniziali e finali in una commutazione.
- Calcolare le costanti di tempo τ = RC e τ = L/R.
- Scrivere e usare la soluzione generale del primo ordine.
- Stimare energia e potenza di commutazione nei circuiti digitali.

Concetti chiave

- Un circuito con un solo condensatore o un solo induttore (più resistori e generatori DC) obbedisce a un'equazione differenziale del primo ordine. La sua risposta passa esponenzialmente da un valore iniziale a un valore finale.
- Costante di tempo: τ = R_Th C per un circuito RC e τ = L/R_Th per un circuito RL, dove R_Th è la resistenza vista da C o L.
- Soluzione generale: x(t) = x(∞) + [x(0⁺) − x(∞)] e^(−t/τ). Dopo una τ la variazione è completa al 63.2%; dopo 5τ al 99.3%.
- Usa la continuità: v_C(0⁺) = v_C(0⁻) e i_L(0⁺) = i_L(0⁻). Trova x(∞) dal regime stazionario DC (C aperto, L cortocircuito).
- Caricare una capacità C fino a V attraverso un resistore preleva CV² dalla sorgente: ½CV² viene immagazzinato e ½CV² si perde in calore. I chip digitali caricano capacità minuscole miliardi di volte al secondo, quindi la loro potenza dinamica è circa P = αCV²f.

Equazioni chiave

$$\tau = RC, \;\; \tau = \frac{L}{R}$$

τ=RC,\ \ τ=L/R

Costanti di tempo

$$x(t) = x(\infty) + [x(0^+) - x(\infty)]e^{-t/\tau}$$

x(t)=x(∞)+[x(0^+)-x(∞)]e^-t/τ

Risposta generale del primo ordine

$$v_C(t) = V\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

`v_C(t)=V(1-e^-t/RC)`

Carica RC da zero

$$P_{dyn} \approx \alpha C V^2 f$$

Potenza di commutazione digitale

Esempi svolti passo passo

Esempio 7.1 Un condensatore da 1000 µF si carica attraverso 10 kΩ da un generatore da 3 V, partendo da 0 V. Trova τ, v_C a t = τ e il tempo per raggiungere il 99.3% di 3 V.

1. τ = $10^4 \times 10^{-3}$ = 10 s.
2. v_C(τ) = 3(1 − e^{-1}) = 3 × 0.632.
3. Il 99.3% richiede 5τ.

Risposta: τ = 10 s, v_C(τ) = 1.90 V, circa 50 s.

Esempio 7.2 Un induttore da 0.5 H in serie con 10 Ω viene collegato a 20 V a t = 0. Trova τ, la corrente finale e i(0.1 s).

1. τ = 0.5/10 = 0.05 s; i(∞) = 20/10 = 2 A.
2. i(0.1) = 2(1 − e^(−0.1/0.05)) = 2(1 − e^{-2}).

Risposta: τ = 50 ms, i(∞) = 2 A, i(0.1 s) = 1.73 A.

Esempio 7.3 Un condensatore carico si scarica attraverso un resistore con τ = 10 s. Quando la sua tensione arriva a metà del valore iniziale?

1. V_0e^(−t/τ) = V_0/2 dà t = τ ln 2.

Risposta: t = 6.93 s.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova τ per 2 kΩ e 50 µF.

   0.1 s.

2. Dopo 3τ, quale frazione della variazione è completa?

   $1 - e^{-3} = 95.0\%$.

3. Trova τ per 20 mH e 4 Ω.

   5 ms.

4. Chip di esempio: C commutata efficace = 1 nF, V = 1 V, f = 1 GHz, α = 1. Trova P, e P a 0.8 V.

   1 W; 0.64 W, il 36% in meno.

Errori concettuali comuni

Mito: La tensione del condensatore salta quando l'interruttore si chiude.
In realtà: La tensione del condensatore è continua; la sua corrente può saltare.

Mito: La risposta è completa dopo una costante di tempo.
In realtà: Una τ è il 63.2%; usa circa 5τ per «finito».

Mito: τ usa solo la resistenza del generatore.
In realtà: Usa la resistenza di Thevenin vista dal condensatore o dall'induttore.

Flashcard

Costante di tempo RC

$\tau = RC$.

Costante di tempo RL

$\tau = L/R$.

Soluzione generale

x(∞) + [x(0) − x(∞)]e^(−t/τ).

Una τ

Il 63.2% della variazione.

Cinque τ

99.3%.

Potenza di commutazione

$P \approx \alpha CV^2 f$.

Quiz di autoverifica

1. τ per un circuito RC è...

R/C

RC

1/RC

√(RC)

RC. In secondi.

2. Dopo una costante di tempo un condensatore in carica raggiunge circa...

37%

50%

63%

99%

63%. $1 - e^{-1}$.

3. Abbassare del 20% la tensione di alimentazione di un chip riduce la potenza dinamica di circa...

20%

36%

50%

64%

36%. $0.8^2 = 0.64$.

4. La corrente dell'induttore a $t = 0^+$ è uguale a...

sempre zero

il suo valore a 0^-

il valore finale

V/R

il suo valore a 0^-. Continuità.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Ogni bit che un computer commuta carica e scarica una minuscola capacità attraverso una resistenza, ed è per questo che l'informatica usa così tanta elettricità. Un rapporto del Berkeley Lab per il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti ha rilevato che i data center hanno consumato circa il 4.4% dell'elettricità totale degli Stati Uniti nel 2023, che il loro consumo è salito da 58 TWh nel 2014 a 176 TWh nel 2023, e che dovrebbero usare da 325 a 580 TWh, cioè dal 6.7% al 12% dell'elettricità del paese, entro il 2028, con una crescita trainata in gran parte dai server per l'SI.

La formula della potenza di commutazione di questa unità mostra la leva principale dei progettisti di chip: la potenza cresce con il quadrato della tensione di alimentazione, quindi una tensione più bassa del 20% riduce la potenza dinamica del 36% (esempio). Il ricercatore principale del rapporto dice che sapere cosa guida la crescita aiuta a individuare opportunità di efficienza.

Su Saving Planets: Introduzione alla programmazione · Equazioni differenziali

Fonti: Berkeley Lab: Report evaluates increase in electricity demand from data centers (Jan. 2025) (https://newscenter.lbl.gov/2025/01/15/berkeley-lab-report-evaluates-increase-in-electricity-demand-from-data-centers/) · OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 14.4 RL circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-4-rl-circuits): Transitori negli induttori.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Lezioni sui transitori del primo ordine e sull'energia dei circuiti digitali.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Guarda i condensatori caricarsi.

Guarda la lezione

Lecture 12: Capacitors and First-Order Systems (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-12/) (in inglese)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d’uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Circuiti del secondo ordine: risposte libera e al gradino dei circuiti RLC

Circuiti RLC serie e parallelo, l'equazione caratteristica, la frequenza neperiana α e la pulsazione di risonanza ω_0, risposte sovrasmorzata, criticamente smorzata e sottosmorzata, fattore di qualità e scambio di energia LC.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Scrivere l'equazione del secondo ordine per circuiti RLC serie e parallelo.
- Calcolare α, ω_0 e ω_d e classificare lo smorzamento.
- Trovare la forma della risposta e le sue costanti dalle condizioni iniziali.
- Collegare Q alle oscillazioni e alla perdita di energia.

Concetti chiave

- Un circuito con un induttore e un condensatore obbedisce a un'equazione del secondo ordine. Per un RLC serie: α = R/(2L), $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Per un RLC parallelo: α = 1/(2RC), stessa ω_0.
- Radici $s = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$. Sovrasmorzato ($\alpha > \omega_0$): due radici reali, nessuna oscillazione. Criticamente smorzato ($\alpha = \omega_0$): ritorno più rapido senza sovraelongazione. Sottosmorzato ($\alpha < \omega_0$): oscillazione smorzata a $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$.
- Un circuito LC ideale (R = 0) scambia energia tra il campo elettrico del condensatore e il campo magnetico dell'induttore indefinitamente a ω_0.
- Fattore di qualità per un RLC serie: $Q = \omega_0 L/R = (1/R)\sqrt{L/C}$. Un Q alto significa risonanza stretta e oscillazioni lunghe.
- Resistenza critica per un RLC serie: $R = 2\sqrt{L/C}$.

Equazioni chiave

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

α=R/2L,\ \ ω_0=1

Parametri dell'RLC serie

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

s_1,2=-αα^2-ω_0^2

Radici caratteristiche

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

`ω_d=ω_0^2-α^2`

Pulsazione smorzata

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R}$$

`Q=(ω_0L)/(R)`

Fattore di qualità (serie)

Esempi svolti passo passo

Esempio 8.1 Un RLC serie ha R = 10 Ω, L = 10 mH e C = 10 μF. Trova ω_0, f_0, α e il tipo di smorzamento.

1. $\omega_0 = 1/\sqrt{(10^{-2} \times 10^{-5})} = 1/\sqrt{10^{-7}} = 3162$ rad/s; $f_0 = \omega_0/2\pi$.
2. $\alpha = 10/(2 \times 0.01) = 500\ s^{-1} < \omega_0$.

Risposta: $\omega_0 = 3162$ rad/s, $f_0 = 503.3$ Hz, $\alpha = 500\ s^{-1}$: sottosmorzato.

Esempio 8.2 Per lo stesso circuito trova ω_d e Q.

1. $\omega_d = \sqrt{(3162^2 - 500^2)} = \sqrt{(10^7 - 2.5 \times 10^5)}$.
2. $Q = 3162 \times 0.01/10$.

Risposta: ω_d = 3122.5 rad/s, Q = 3.16.

Esempio 8.3 Quale resistenza renderebbe quel circuito criticamente smorzato?

1. $R = 2\sqrt{(L/C)} = 2\sqrt{(0.01/10^{-5})} = 2\sqrt{1000}$.

Risposta: R = 63.2 Ω.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Un RLC serie ha $\alpha = 200\ s^{-1}$ e $\omega_0 = 100$ rad/s. Classificalo.

   Sovrasmorzato.

2. Trova ω_0 per L = 1 mH, C = 1 µF.

   31623 rad/s (5.03 kHz).

3. Un RLC parallelo ha R = 1 kΩ e C = 1 µF. Trova α.

   $1/(2 \times 10^3 \times 10^{-6}) = 500\ s^{-1}$.

4. Raddoppiare R in un RLC serie cambia Q di un fattore...

   Un fattore ½.

Errori concettuali comuni

Mito: α ha la stessa formula per RLC serie e parallelo.
In realtà: Serie $\alpha = R/2L$; parallelo $\alpha = 1/(2RC)$.

Mito: Criticamente smorzato significa oscillante.
In realtà: È il confine: nessuna oscillazione, assestamento più rapido.

Mito: ω_d è uguale a ω_0.
In realtà: ω_d è più bassa ogni volta che c'è smorzamento.

Flashcard

Frequenza neperiana

$\alpha = R/2L$ (serie).

Pulsazione di risonanza

$\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$.

Sovrasmorzato

$\alpha > \omega_0$.

Sottosmorzato

$\alpha < \omega_0$, oscilla a ω_d.

R critica

$2\sqrt{(L/C)}$ (serie).

Q

$\omega_0 L/R$.

Quiz di autoverifica

1. Sottosmorzato significa...

$\alpha > \omega_0$

$\alpha = \omega_0$

$\alpha < \omega_0$

solo $R = 0$

$\alpha < \omega_0$. Radici complesse.

2. ω_0 per un circuito LC è...

LC

1/LC

$1/\sqrt{(LC)}$

$\sqrt{(L/C)}$

$1/\sqrt{(LC)}$. Pulsazione di risonanza.

3. Aumentare R in un RLC serie rende la risposta...

più oscillante

più smorzata

invariata

instabile

più smorzata. α cresce.

4. In un circuito LC ideale l'energia...

si perde come calore

si scambia tra C e L

resta in C

cresce

si scambia tra C e L. Nessuna resistenza.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

I circuiti risonanti permettono ai veicoli elettrici di ricaricarsi senza cavo. L'Alternative Fuels Data Center del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti spiega che la ricarica induttiva usa un campo elettromagnetico per trasferire elettricità a un veicolo elettrico, che alcune stazioni wireless funzionano già a potenze paragonabili al livello 2, che è più diffusa per trasporto pubblico e flotte a potenza più alta, e che il DOE fa ricerca sulla ricarica wireless ad alta potenza.

I caricatori wireless accordano una bobina (L) e un condensatore (C) su ciascun lato alla stessa $\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$ così che l'energia si scambi in modo efficiente attraverso il traferro, e un Q alto mantiene basse le perdite. È l'idea circuitale dietro i caricatori wireless per trasporto pubblico e flotte descritti dall'AFDC.

Su Saving Planets: Fisica II · Equazioni differenziali

Fonti: U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations) · OpenStax UP2, 14.6 RLC series circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-6-rlc-series-circuits)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 14.5 Oscillations in an LC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-5-oscillations-in-an-lc-circuit): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 14.6 RLC series circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-6-rlc-series-circuits): Oscillazioni smorzate.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Lezioni sui sistemi del secondo ordine.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Costruisci un circuito LC.

Guarda la lezione

Lecture 15: Second-Order Systems (part 1) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-15-part-1/) (in inglese)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d'uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Regime sinusoidale: fasori e impedenza

Sinusoidi, ampiezza, frequenza, fase e valori efficaci, numeri complessi, fasori, impedenza e ammettenza di R, L e C, analisi dei circuiti in corrente alternata con la legge di Ohm, LKC, LKT, metodi nodale e di Thevenin in forma fasoriale, e basi della risposta in frequenza.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Convertire tra sinusoidi nel dominio del tempo e fasori.
- Calcolare le impedenze di R, L e C a una frequenza data.
- Analizzare circuiti in alternata con le versioni fasoriali dei metodi in continua.
- Descrivere come l'impedenza cambia con la frequenza in filtri semplici.

Concetti chiave

- Una sinusoide v(t) = V_m cos(ωt + φ) ha ampiezza V_m, pulsazione ω = 2πf e fase φ. Il suo valore efficace è V_m/√2; i 120 V domestici degli Stati Uniti sono un valore efficace a 60 Hz, con un picco di circa 170 V.
- Un fasore è il numero complesso V = V_m∠φ che contiene ampiezza e fase. In regime sinusoidale permanente, d/dt diventa una moltiplicazione per jω.
- Impedenza Z = V/I: Z_R = R, Z_L = jωL, Z_C = 1/(jωC) = −j/(ωC). Gli induttori si comportano come cortocircuiti a bassa frequenza e circuiti aperti ad alta frequenza; i condensatori fanno il contrario.
- Tutti gli strumenti della continua (serie/parallelo, partitori, analisi nodale e alle maglie, Thevenin e Norton) funzionano con impedenze e aritmetica complessa.
- Un filtro passa-basso RC lascia passare le basse frequenze e attenua le alte; la sua frequenza di taglio (a metà potenza) è ω_c = 1/(RC).

Equazioni chiave

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

```
V_rms=(V_m)/(2)
```

Valore efficace di una sinusoide

$$Z_R = R,\ Z_L = j\omega L,\ Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

```
Z_R=R,\ Z_L=jω L,\ Z_C=(1)/(jω C)
```

Impedenze

$$\mathbf{V} = \mathbf{I}Z$$

Legge di Ohm fasoriale

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

ω_c=1/RC

Taglio di un filtro RC

Esempi svolti passo passo

Esempio 9.1 Esprimi v(t) = 170 cos(377t) V come fasore e trova il suo valore efficace e la frequenza.

1. V = 170∠0° V (picco).
2. V_rms = 170/√2; f = 377/(2π).

Risposta: V_rms = 120.2 V a f = 60.0 Hz.

Esempio 9.2 A 60 Hz trova l'impedenza di un induttore da 0.1 H e di un condensatore da 100 μF.

1. ω = 2π × 60 = 377.0 rad/s.
2. Z_L = j × 377.0 × 0.1; Z_C = −j/(377.0 × 10^{-4}).

Risposta: Z_L = j37.70 Ω, Z_C = −j26.53 Ω.

Esempio 9.3 Un generatore da 120 V (efficaci), 60 Hz alimenta 30 Ω in serie con 0.1 H. Trova la corrente e la sua fase.

1. Z = 30 + j37.70 Ω; |Z| = √(30^2 + 37.70^2) = 48.18 Ω, ∠51.49°.
2. I = 120/48.18 a −51.49°.

Risposta: I = 2.491 A efficaci, in ritardo di 51.49° rispetto alla tensione.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova il valore efficace di una sinusoide con picco di 10 V.

7.071 V.

2. Trova l’impedenza di 1 μF a ω = 1000 rad/s.

   −j1000 Ω.

3. Trova la frequenza di taglio di un filtro RC con R = 1 kΩ e C = 1 μF.

   ω_c = 1000 rad/s (159.2 Hz).

4. Converti 3 + j4 in forma polare.

   5∠53.13°.

Errori concettuali comuni

Mito: 120 V in alternata significa 120 V di picco.
In realtà: È il valore efficace; il picco è circa 170 V.

Mito: Le impedenze si sommano come moduli.
In realtà: Somma i numeri complessi: 30 + j40 ha modulo 50, non 70.

Mito: I fasori valgono per qualsiasi forma d’onda.
In realtà: Si applicano al regime sinusoidale permanente a una sola frequenza.

Flashcard

Fasore

V_m∠φ.

RMS

V_m/√2.

Z_L

jωL.

Z_C

1/(jωC).

Legge di Ohm fasoriale

V = IZ.

Taglio RC

ω_c = 1/RC.

Quiz di autoverifica

1. L’impedenza di un induttore è...

$j\omega L$

$1/(j\omega L)$

ωL

L/ω

$j\omega L$. $v = L\, di/dt \rightarrow j\omega L$.

2. A frequenza molto alta un condensatore si comporta come...

un circuito aperto

un cortocircuito

un resistore

un induttore

un cortocircuito. $|Z_C| = 1/(\omega C) \rightarrow 0$.

3. Il valore efficace di un'onda sinusoidale è il suo picco moltiplicato per...

0.5

0.637

0.707

1.414

0.707. $1/\sqrt{2}$.

4. In un circuito RL la corrente...

è in anticipo sulla tensione

è in ritardo sulla tensione

è in fase

è zero

è in ritardo sulla tensione. Angolo di fase induttivo.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Ricaricare un veicolo elettrico a casa è un problema di circuiti in alternata. L'Alternative Fuels Data Center spiega che la ricarica in alternata di livello 1 usa una presa da 120 V, presuppone circa 1.9 kW e aggiunge circa 5 miglia di autonomia all'ora, quindi 8 ore possono ripristinare circa 40 miglia per un veicolo di taglia media. Il livello 2 in alternata usa 240 V (abitazioni) o 208 V (commerciale); la maggior parte dei caricatori domestici di livello 2 funziona fino a 30 A, fornisce 7.2 kW e circa 25 miglia di autonomia all'ora, e richiede un circuito dedicato da 40 A secondo l'articolo 625 del National Electrical Code.

Sono valori efficaci: 1.9 kW a 120 V corrispondono a circa 15.8 A, e 7.2 kW a 240 V a 30 A. L'AFDC aggiunge che nel 2023 quasi l'80% dei punti di ricarica pubblici era di livello 2, e che le unità di livello 2 vanno da 2.9 a 19.2 kW. La maggior parte dei proprietari di veicoli elettrici ricarica soprattutto a casa.

Su Saving Planets: Fisica II · Soluzioni

Fonti: U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations) · OpenStax UP2, 15.2 Simple AC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-2-simple-ac-circuits)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 15.2 Simple AC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-2-simple-ac-circuits): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 15.3 RLC series circuits with AC (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-3-rlc-series-circuits-with-ac): Impedenza e fase.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Lezioni sul regime sinusoidale permanente e sull'impedenza.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Interattivo.

Guarda la lezione

Lecture 16: Sinusoidal Steady State (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-16/) (in inglese)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d'uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Potenza in AC, fattore di potenza, risonanza, trasformatori e sistemi trifase

Potenza istantanea e media, potenza attiva, reattiva e apparente, il triangolo delle potenze, il fattore di potenza e il suo rifasamento, risonanza serie e larghezza di banda, trasformatori ideali, sistemi trifase equilibrati, e perché la rete trasmette ad alta tensione.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare potenza attiva, reattiva e apparente e il fattore di potenza.
- Dimensionare un condensatore per il rifasamento.
- Analizzare trasformatori ideali e carichi trifase equilibrati.
- Spiegare le perdite di trasmissione con I^2R.

Concetti chiave

- Potenza media (attiva) P = V_rms I_rms cos θ in watt, dove θ è l'angolo tra tensione e corrente. Potenza reattiva Q = V_rms I_rms sin θ in VAR. Potenza apparente S = V_rms I_rms in VA, e $S^2 = P^2 + Q^2$.
- Fattore di potenza fp = cos θ = P/S. I motori sono induttivi (fp in ritardo). Un condensatore in parallelo fornisce localmente potenza reattiva, alzando il fp e riducendo la corrente che il fornitore deve erogare: $C = Q/(\omega V^2)$ per un rifasamento completo.
- Alla risonanza serie $\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$ le reattanze si annullano, l'impedenza è solo R e la corrente è massima; la larghezza di banda è ω_0/Q.
- Un trasformatore ideale con rapporto spire $N_1{:}N_2$ ha $V_2/V_1 = N_2/N_1$ e $I_2/I_1 = N_1/N_2$, quindi la potenza in ingresso è uguale a quella in uscita.
- Trifase equilibrato: tre sinusoidi sfasate di 120°. Potenza totale P = √3 V_L I_L cos θ, costante nel tempo. Le perdite di linea sono I^2R, quindi aumentare la tensione di k a parità di potenza riduce la corrente di k e le perdite di k^2.

Equazioni chiave

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos\theta, \quad Q = V_{rms} I_{rms} \sin\theta$$

P=V_rmsI_rmsθ,\ \ Q=V_rmsI_rmsθ

Potenza attiva e reattiva

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad \text{pf} = \frac{P}{S}$$

S^2=P^2+Q^2,\ \ pf=P/S

Triangolo delle potenze

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

(V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)=(I_1)/(I_2)

Trasformatore ideale

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\theta$$

P_3=3 V_LI_Lθ

Potenza trifase equilibrata

Esempi svolti passo passo

Esempio 10.1 Un motore assorbe 20 A efficaci da 240 V efficaci con fattore di potenza 0.8 in ritardo. Trova S, P e Q.

1. S = 240 × 20 = 4800 VA.
2. P = 4800 × 0.8; sin θ = 0.6, quindi Q = 4800 × 0.6.

Risposta: S = 4.8 kVA, P = 3.84 kW, Q = 2.88 kVAR.

Esempio 10.2 Quale condensatore in parallelo rifaserebbe quel motore a fattore di potenza unitario a 60 Hz?

1. Il condensatore deve fornire Q = 2880 VAR.
2. C = Q/(ωV²) = 2880/(377.0 × 240²).

Risposta: C = 132.6 μF; la corrente di linea scende da 20 A a 16 A.

Esempio 10.3 Una linea con 5 Ω di resistenza trasporta 10 MW. Confronta la perdita I²R a 100 kV e a 20 kV (fattore di potenza unitario, esempio monofase).

1. A 100 kV: I = $10^7/10^5$ = 100 A, perdita = 100^2 × 5 = 50 kW (0.5%).
2. A 20 kV: I = 500 A, perdita = 500^2 × 5 = 1.25 MW (12.5%).

Risposta: 5 volte la tensione riduce le perdite di 25 volte.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Un carico ha P = 6 kW e Q = 8 kVAR. Trova S e fp.

   S = 10 kVA, pf = 0.6.

2. Un trasformatore abbassa 7200 V a 240 V. Trova N_1:N_2.

   30:1.

3. Trova la potenza di un carico trifase equilibrato a 480 V che assorbe 100 A con fp 0.9.

   $\sqrt{3} \times 480 \times 100 \times 0.9 = 74.8$ kW.

4. Un RLC serie ha $\omega_0 = 1000$ rad/s e Q = 20. Trova la larghezza di banda.

   50 rad/s.

Errori concettuali comuni

Mito: La potenza reattiva non compie lavoro, quindi non conta.
In realtà: Aumenta comunque la corrente, e la corrente causa perdite I^2R in cavi e trasformatori.

Mito: Un trasformatore funziona in continua.
In realtà: Ha bisogno di un flusso variabile; la continua non lo produce.

Mito: La potenza trifase è tre volte quella monofase con la tensione concatenata.
In realtà: P = √3 V_L I_L cos θ.

Flashcard

Potenza attiva

P = VI cos θ (W).

Potenza reattiva

Q = VI sin θ (VAR).

Potenza apparente

S = VI (VA).

Fattore di potenza

P/S.

Trasformatore

Trifase

$V_2/V_1 = N_2/N_1$.

$P = \sqrt{3}\, V_L\, I_L \cos\theta$.

Quiz di autoverifica

1. Il fattore di potenza è uguale a...

Q/S

P/S

S/P

P/Q

P/S. cos θ.

2. Aumentare di 10 volte la tensione di trasmissione (stessa potenza) riduce le perdite I^2R di...

10×

100×

√10×

nessuna

100×. La corrente scende di 10×; perdita $\propto I^2$.

3. Un carico induttivo si rifasa con...

un resistore in serie

un condensatore in parallelo

un induttore in parallelo

un trasformatore

un condensatore in parallelo. I condensatori forniscono potenza reattiva.

4. Un trasformatore abbassatore con rapporto 10:1 rende la corrente secondaria...

10× più piccola

10× più grande

uguali

100× più grande

10× più grande. La potenza si conserva.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La rete trasporta energia ad alta tensione per contenere le perdite I^2R. L'EIA spiega che le linee di trasmissione ad alta tensione portano l'elettricità su lunghe distanze perché una tensione più alta rende la trasmissione a lunga distanza più efficiente e meno costosa, che le linee di distribuzione a tensione più bassa la consegnano ai clienti, e che i trasformatori nelle sottostazioni alzano e abbassano la tensione tra le fasi. L'EIA stima che le perdite di trasmissione e distribuzione siano state in media circa il 5% dell'elettricità trasmessa e distribuita negli Stati Uniti dal 2018 al 2022.

L'esempio svolto mostra la fisica: una tensione cinque volte maggiore riduce le perdite di venticinque volte. Il rifasamento, i trasformatori efficienti e le nuove linee a lunga distanza verso le risorse eoliche e solari, che l'EIA elenca tra le sfide della rete, erodono tutti quel 5%. L'AFDC osserva che le tensioni trifase comuni negli Stati Uniti sono 208/120 V e 480/277 V, diffuse nei siti commerciali e industriali, e che i caricatori rapidi in continua di solito hanno un ingresso trifase in alternata.

Su Saving Planets: Soluzioni · Fisica II

Fonti: U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3) · OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 15.4 Power in an AC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-4-power-in-an-ac-circuit): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 15.5 Resonance in an AC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-5-resonance-in-an-ac-circuit): Risonanza e larghezza di banda.
- OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers): Trasformatori e trasmissione.
- PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law): L'induzione dietro i trasformatori.

☐ **Ho finito questa unità**

Esercizi

Questi esercizi stanno dentro ogni unità. Falli su carta, poi apri la risposta.

1. Grandezze ed elementi circuitali: carica, corrente, tensione, potenza, energia e legge di Ohm
   4 esercizi
2. Leggi di Kirchhoff, resistori in serie e in parallelo, partitori di tensione e di corrente
   4 esercizi
3. Analisi sistematica: metodi dei potenziali di nodo e delle correnti di maglia
   4 esercizi
4. Teoremi sui circuiti: linearità, sovrapposizione, trasformazione dei generatori, Thevenin, Norton e massimo trasferimento di potenza
   4 esercizi
5. Amplificatori operazionali
   4 esercizi
6. Condensatori e induttori
   4 esercizi
7. Circuiti del primo ordine: transitori RC e RL
   4 esercizi
8. Circuiti del secondo ordine: risposte libera e al gradino dei circuiti RLC
   4 esercizi
9. Regime sinusoidale: fasori e impedenza
   4 esercizi
10. Potenza in AC, fattore di potenza, risonanza, trasformatori e sistemi trifase
    4 esercizi

Il laboratorio (Circuits lab)

Il laboratorio è la parte pratica del corso. Qui è gratuito e solo per esercitarsi, senza crediti.

Ogni laboratorio si può svolgere in una simulazione PhET gratuita o con un portabatterie da 3 V. Non lavorare mai sull'impianto elettrico di casa o sulle prese a muro: la tensione di rete può uccidere. Non cortocircuitare una batteria e monta i condensatori elettrolitici con la polarità corretta.

Riferimento per la sicurezza: OpenStax University Physics Volume 2, 10.6 Household wiring and electrical safety (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-6-household-wiring-and-electrical-safety)

Laboratorio A: legge di Ohm e multimetro

SETTIMANA 2

Obiettivo: Misurare correttamente tensione, corrente e resistenza, mostrare che la corrente è proporzionale alla tensione per un resistore e ricavare R dalla pendenza.

$$v = iR, \quad p = vi$$

```
v=iR, p=vi
```

Legge di Ohm e potenza

Procedimento

1. Apri PhET Ohm’s Law e Circuit Construction Kit: DC; costruisci una batteria e un resistore e aggiungi un voltmetro (in parallelo) e un amperometro (in serie).
2. A casa: su una breadboard collega un resistore da 1 kΩ a una pila AA (1.5 V) e poi a due (3 V). Misura v ai capi del resistore e i in serie con il multimetro sulla portata mA.
3. Misura il resistore da solo con la portata Ω (alimentazione scollegata) e confronta con v/i.
4. Traccia i in funzione di v; la pendenza è 1/R. Calcola la potenza in ciascun caso.

Tabella dei dati

v (V)	i (mA) per 1 kΩ	p (mW)
1.5	1.5	2.25
3.0	3.0	9.0

Valori ideali per un resistore da 1 kΩ; le pile nuove misurano poco più di 1.5 V ciascuna e i resistori rientrano nella loro tolleranza (spesso ±5%).

Calcolo di esempio

1. R = v/i = 3.0/0.003 = 1000 Ω.
2. p = vi = 3.0 × 0.003 = 9 mW, molto al di sotto della potenza nominale di un resistore da ¼ W.

> **Sicurezza**
>
> - Usa solo portabatterie da 1.5–3 V; non collegare mai nulla a una presa a muro.
> - Non collegare mai il multimetro sulla portata di corrente direttamente ai capi di una batteria: è un cortocircuito.

Alternativa a casa o virtuale

- La versione su breadboard è il laboratorio a casa.

PhET: Ohm’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law) · PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc)

Legame con il pianeta: La stessa misura v·i è quella che fa un misuratore da presa o un contatore intelligente per mostrare dove va l’energia; il DOE dice che i LED consumano almeno il 75% in meno delle lampadine a incandescenza. U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio B: leggi di Kirchhoff, serie e parallelo, e partitori

SETTIMANA 3

Obiettivo: Verificare LKT e LKC con misure, controllare la resistenza equivalente serie e parallelo, e vedere un partitore di tensione abbassarsi sotto carico.

$$\sum v = 0, \quad \sum i = 0, \quad v_2 = v\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

`v=0, i=0, v_2=v(R_2)/(R_1+R_2)`

LKT, LKC e il partitore

Procedimento

1. Monta 1 kΩ e 2 kΩ in serie a 3 V (PhET o breadboard). Misura la corrente e ogni tensione; verifica che le tensioni sommino quella del generatore.
2. Rimonta due resistori da 1 kΩ in parallelo a 3 V. Misura la corrente in ciascun ramo e nel filo del generatore; verifica la LKC.
3. Tratta la coppia in serie come un partitore e misura v ai capi del resistore da 2 kΩ.
4. Collega un «carico» da 2 kΩ ai capi del resistore da 2 kΩ e misura di nuovo; spiega il calo con il parallelo.

Tabella dei dati

Circuito	Corrente	Tensioni
1 kΩ + 2 kΩ in serie	1.0 mA	1.0 V e 2.0 V
1 kΩ ‖ 1 kΩ	3.0 mA ciascuno, 6.0 mA in totale	3.0 V
Partitore caricato con 2 kΩ	1.5 mA dal generatore	1.5 V in uscita

Valori ideali per un generatore da 3 V.

Calcolo di esempio

1. Serie: i = 3/3000 = 1 mA; 1 V + 2 V = 3 V (LKT).
2. Partitore caricato: 2 kΩ ‖ 2 kΩ = 1 kΩ, quindi v_out = 3 × 1/(1 + 1) = 1.5 V invece di 2 V.

> **Sicurezza**
>
> - Solo portabatterie a bassa tensione; togli la batteria prima di ricablare.

Alternativa a casa o virtuale

- La versione su breadboard è il laboratorio a casa.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc)

Legame con il pianeta: L'EIA spiega che le celle fotovoltaiche sono collegate in pannelli e campi; le stringhe in serie sommano la tensione e quelle in parallelo sommano la corrente, come qui. U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio C: l’equivalente di Thevenin di una batteria e la massima potenza

SETTIMANA 6

Obiettivo: Modellare una batteria reale come V_Th in serie con R_Th misurandone la tensione a vuoto e sotto carico, poi prevedere il carico per la massima potenza.

$$R_{Th} = \frac{v_{oc} - v_L}{i_L}, \quad P_{\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{Th}}$$

R_Th=_oc-v_Li_L, P_=_Th^24R_Th

Thevenin da due misure

Procedimento

1. In PhET Circuit Construction Kit: DC, assegna alla batteria una resistenza interna e misura la sua tensione a vuoto e con un resistore di carico.
2. A casa: misura la tensione a vuoto di un pacco da 2 × AA. Poi collega un resistore da 22 Ω di almeno 1 W solo per pochi secondi e leggi la tensione.
3. Calcola i_L = v_L/22 Ω e R_Th, e prevedi P_max.
4. In PhET, varia la resistenza di carico e conferma che la potenza è massima quando R_L = R_Th.

Tabella dei dati

Grandezza	Valore di esempio
v_oc	3.20 V
v_L (22 Ω)	3.10 V
i_L	0.141 A
R_Th	0.71 Ω

Valori di esempio per pile alcaline nuove; le pile usate mostrano una R_Th molto più grande.

Calcolo di esempio

1. i_L = 3.10/22 = 0.1409 A; R_Th = 0.10/0.1409 = 0.71 Ω.
2. Potenza sul carico = 3.10 × 0.1409 = 0.437 W, quindi usa un resistore da 1 W. Un carico adattato R_L = 0.71 Ω sarebbe quasi un cortocircuito e scalderebbe le pile: non provarlo a casa, solo in PhET.

> **Sicurezza**
>
> - Collega il carico da 22 Ω solo per pochi secondi; il resistore e le pile si scaldano.

- Non cortocircuitare mai i morsetti della batteria.

Alternativa a casa o virtuale

- Il passaggio delle due misure è il laboratorio a casa; la scansione della potenza è solo in PhET.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc) · OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force)

Legame con il pianeta: L'EIA riporta che l'efficienza dei moduli fotovoltaici è passata da meno del 10% a metà degli anni 1980 a quasi il 25% oggi; far lavorare ogni pannello al suo carico ottimale fa parte dello sfruttamento di quella produzione. U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio D: carica RC e costante di tempo

SETTIMANA 10

Obiettivo: Osservare un condensatore che si carica attraverso un resistore, misurare la costante di tempo e confrontarla con τ = RC.

$$v_C(t) = V\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

`v_C(t)=V(1-e^-t/RC)`

Carica RC

Procedimento

1. In PhET Circuit Construction Kit: AC, costruisci una batteria, un resistore, un condensatore e un interruttore; usa il grafico della tensione per osservare v_C.
2. A casa: metti un condensatore da 1000 µF (tensione nominale 6.3 V o più, terminale negativo verso il − della batteria) in serie con 10 kΩ a 3 V. Leggi v_C con il multimetro ogni 10 s.
3. Trova l'istante in cui v_C raggiunge il 63.2% della tensione finale; quello è τ.
4. Traccia ln(1 − v_C/V) in funzione di t; la pendenza è −1/τ. Scarica il condensatore attraverso il resistore prima di riporlo.

Tabella dei dati

t (s)	0	10	20	30	50
v_C (V)	0	1.90	2.59	2.85	2.98

Valori ideali per R = 10 kΩ, C = 1000 µF e V = 3 V. I condensatori elettrolitici hanno spesso una tolleranza di ±20%, e il multimetro stesso carica leggermente il circuito.

Calcolo di esempio

1. τ = 10^{4} × 10^{-3} = 10 s.
2. v_C(10 s) = 3(1 − e^{-1}) = 1.90 V; v_C(50 s) = 3(1 − e^{-5}) = 2.98 V.

> **Sicurezza**
>
> - Monta i condensatori elettrolitici con la polarità corretta e sotto la loro tensione nominale; se invertiti possono scoppiare. Indossa gli occhiali.

Alternativa a casa o virtuale

- La versione su breadboard è il laboratorio a casa.

PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac) · PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics)

Legame con il pianeta: Il Berkeley Lab riporta che i data center hanno usato circa il 4.4% dell'elettricità degli Stati Uniti nel 2023; ogni commutazione logica al loro interno è una minuscola carica RC come questa. Berkeley Lab: Report evaluates increase in electricity demand from data centers (Jan. 2025) (https://newscenter.lbl.gov/2025/01/15/berkeley-lab-report-evaluates-increase-in-electricity-demand-from-data-centers/)

☐ **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio E: risonanza RLC

SETTIMANA 13

Obiettivo: Alimentare un circuito RLC serie con un generatore in alternata a diverse frequenze, trovare il picco di risonanza e confrontarlo con $\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$.

$$|I| = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

`|I|=^2+(ω L-1/ω C)^2`

Corrente in un RLC serie

Procedimento

1. In PhET Circuit Construction Kit: AC (o il suo Virtual Lab), costruisci un generatore in alternata, un resistore, un induttore e un condensatore in serie con un amperometro.
2. Imposta R = 10 Ω, L = 10 mH e C = 10 μF se disponibili, oppure annota i valori usati da PhET, e calcola f_0.
3. Varia la frequenza del generatore attorno a f_0 e registra l'ampiezza della corrente.
4. Traccia |I| in funzione di f, trova il picco e i punti a metà potenza, e confronta la larghezza di banda con ω_0/Q.

Tabella dei dati

f (Hz)	400	503	600
|I| (A) per 10 V	0.563	1.000	0.667

Valori calcolati per R = 10 Ω, L = 10 mH, C = 10 μF e un generatore di ampiezza 10 V.

Calcolo di esempio

1. $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{(10^{-2} \times 10^{-5})}) = 503.3$ Hz; a f_0, $|Z| = R = 10$ Ω, quindi $|I| = 1$ A.
2. At 400 Hz: X_L = 25.13 Ω, X_C = 39.79 Ω, |Z| = 17.76 Ω, |I| = 0.563 A.

> **Sicurezza**
>
> - Solo simulazione: non costruire circuiti in alternata alimentati dalla rete.

Alternativa a casa o virtuale

- Per sicurezza questo laboratorio è solo in PhET; nessun cablaggio a casa.

PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac) · PhET: Circuit Construction Kit: AC – Virtual Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac-virtu

al-lab)

Legame con il pianeta: L'AFDC afferma che i caricatori induttivi per veicoli elettrici trasferiscono potenza tramite un campo elettromagnetico; circuiti LC accordati come questo rendono efficiente il trasferimento. U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio F: misurare la potenza attiva a casa e trasformatori in PhET

SETTIMANA 14

Obiettivo: Usare un misuratore di potenza da presa per confrontare la potenza attiva di lampadine ed elettrodomestici, stimare l'energia annua ed esplorare i rapporti di tensione dei trasformatori in PhET.

$$w = Pt, \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

```
w=Pt, (V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)
```

Energia e trasformatore ideale

Procedimento

1. Inserisci un misuratore di potenza in una presa a muro e collega una lampada al misuratore (non aprire mai il misuratore né la lampada). Registra i watt con una lampadina a incandescenza o alogena e poi con un LED di luminosità simile.
2. Se il misuratore mostra VA e fattore di potenza, registrali anche per un caricabatterie del telefono e un ventilatore.
3. Stima i kWh annui con 3 ore al giorno e confronta.
4. In PhET Faraday's Law, cambia il numero di spire della bobina e la velocità del magnete, e collega la tensione indotta a N e alla rapidità di variazione del flusso.

Tabella dei dati

Lampadina	P (W)	kWh/anno a 3 h/giorno
Incandescenza	60	65.7
LED (luce simile)	9	9.9

Letture di esempio; la guida del DOE dice che i LED usano almeno il 75% di energia in meno delle lampadine a incandescenza. Le tue lampadine daranno i tuoi numeri.

Calcolo di esempio

1. 60 W × 3 h × 365 = 65.7 kWh; 9 W danno 9.86 kWh.
2. Risparmio = 85% per questo LED di esempio, coerente con «almeno il 75%».

> **Sicurezza**
>
> - Usa solo un misuratore da presa in commercio ed elettrodomestici con spina; non toccare mai i contatti della presa né aprire i dispositivi. Lascia raffreddare le lampadine calde prima di maneggiarle.

Alternativa a casa o virtuale

- Il passaggio del misuratore da presa è il laboratorio a casa; i trasformatori si esplorano in PhET.

PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law) · OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers)

Legame con il pianeta: L'EIA stima le perdite di trasmissione e distribuzione a circa il 5%; ogni watt risparmiato alla lampadina evita anche quelle perdite a monte. U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf) · U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3)

☐ **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Serie di esercizi per gli esami

Cronometrati: circa 10 minuti per problema. Poi confronta con le soluzioni complete.

Esercizi di preparazione all'esame intermedio (unità 1–5)

1. Trova la resistenza equivalente di 12 Ω in parallelo con (4 Ω + 2 Ω).

    1. 12 × 6/(12 + 6).

    Risposta: 4 Ω.

2. Un generatore da 24 V alimenta 3 kΩ e 1 kΩ in serie. Trova la tensione ai capi di 1 kΩ.

    1. Partitore: 24 × 1/4.

    Risposta: 6 V.

3. Un nodo è collegato a 12 V tramite 4 Ω, a massa tramite 12 Ω, e riceve 2 A da un generatore di corrente. Trova la sua tensione.

    1. (v − 12)/4 + v/12 = 2, quindi 4v = 60.

    Risposta: 15 V.

4. Una rete ha v_oc = 18 V e i_sc = 6 A. Trova R_Th e la potenza massima che può erogare.

    1. R_Th = 3 Ω; P = $18^2/(4 \times 3)$.

    Risposta: 3 Ω e 27 W.

5. Un amplificatore invertente ha R_f = 33 kΩ e R_in = 3.3 kΩ. Trova v_o per v_in = −0.4 V.

    1. Guadagno = −10.

Risposta: +4 V.

Serie di esercizi finale (tutte le unità)

1. Un condensatore da 20 μF si carica da 0 V attraverso 5 kΩ verso 10 V. Trova τ e v_C a 0.2 s.

    1. τ = 0.1 s; $10(1 - e^{-2})$.

    Risposta: τ = 0.1 s, v_C = 8.65 V.

2. Un RLC serie ha R = 40 Ω, L = 0.1 H e C = 100 μF. Classifica la risposta e trova ω_d se oscilla.

    1. $\alpha = 200\ s^{-1}$; $\omega_0 = 316.2$ rad/s.

    Risposta: Sottosmorzato, ω_d = 244.9 rad/s.

3. Trova l'impedenza di 20 Ω in serie con 100 μF a 60 Hz.

    1. Z_C = −j26.53 Ω.

    Risposta: $Z = 20 - j26.53\ \Omega = 33.22\angle -52.99°\ \Omega$.

4. Un carico assorbe 12 A efficaci da 120 V efficaci con fp 0.85 in ritardo. Trova P e Q.

    1. S = 1440 VA; $\sin\theta = 0.5268$.

    Risposta: P = 1224 W, Q = 758.6 VAR.

5. Un trasformatore 20:1 ha 2400 V sul primario e un carico di 10 A sul secondario. Trova V_2 e I_1.

    1. $V_2 = 2400/20$; $I_1 = 10/20$.

    Risposta: 120 V e 0.5 A.

6. Trova la potenza di un carico trifase equilibrato a 208 V che assorbe 50 A con fattore di potenza unitario.

    1. √3 × 208 × 50.

    Risposta: 18.01 kW.

Formulario

$$i = dq/dt,\ p = vi,\ v = iR \qquad R = \rho L/A,\ p = i^2R = v^2/R$$

$$\sum i = 0,\ \sum v = 0 \qquad R_s = \sum R,\ 1/R_p = \sum 1/R$$

$$v_2 = vR_2/(R_1+R_2) \qquad V_{Th} = v_{oc},\ R_{Th} = v_{oc}/i_{sc},\ P_{\max} = V_{Th}^2/(4R_{Th})$$

$$v_o = -(R_f/R_{in})v_{in},\ v_o = (1+R_f/R_g)v_{in} \qquad i = C\,dv/dt,\ v = L\,di/dt,\ w = \tfrac{1}{2}Cv^2,\ \tfrac{1}{2}Li^2$$

$$\tau = RC,\ L/R;\ x(t) = x(\infty) + [x(0) - x(\infty)]e^{-t/\tau} \qquad \alpha = R/2L,\ \omega_0 = 1/\sqrt{LC},\ \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

$$Z_L = j\omega L,\ Z_C = 1/(j\omega C),\ V_{rms} = V_m/\sqrt{2} \qquad P = VI\cos\theta,\ Q = VI\sin\theta,\ S^2 = P^2 + Q^2$$

$$V_2/V_1 = N_2/N_1,\ P_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta$$

Costanti

Costante	Valore
1 chilowattora (kWh)	3.6 × 10⁶ J
1 cavallo vapore (elettrico)	746 W
Carica elementare e	1.602 × 10⁻¹⁹ C
Fornitura domestica negli Stati Uniti	120 V e 240 V a 60 Hz
Valore efficace di un’onda sinusoidale	V_rms = V_peak/√2 ≈ 0.7071 V_peak
1 ampere-ora (Ah)	3600 C

Fonte: NIST Guide to the SI, Appendix B.9: conversion factors (https://www.nist.gov/pml/special-publication-811/nist-guide-si-appendix-b-conversion-factors/nist-guide-si-appendix-b9)

Testi e simulazioni gratuiti

Usa questi libri, lezioni e simulazioni gratuiti insieme al corso.

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Video delle lezioni, appunti, esercizi e laboratori gratuiti del MIT.
- OpenStax University Physics Volume 2, 10.3 Kirchhoff’s rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): Capitolo gratuito di manuale sui circuiti in continua.
- OpenStax University Physics Volume 2, 15.3 RLC series circuits with AC (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-3-rlc-series-circuits-with-ac): Capitolo gratuito di manuale sui circuiti in alternata.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Costruisci e misura circuiti in continua.

- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Condensatori, induttori e generatori in alternata.
- PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): V = IR in modo interattivo.

Glossario

Potenza apparente
S = V_rms I_rms, in VA.

Condensatore
Elemento con i = C dv/dt che immagazzina energia in un campo elettrico.

Impedenza
Rapporto complesso V/I in regime sinusoidale permanente.

Induttore
Elemento con v = L di/dt che immagazzina energia in un campo magnetico.

KCL
Le correnti uscenti da un nodo hanno somma zero.

KVL
Le tensioni lungo una maglia hanno somma zero.

Maglia
Un anello che non contiene altri anelli.

Nodo
Un punto in cui si collegano due o più elementi.

Equivalente di Norton
Generatore di corrente I_N in parallelo con R_N.

Amplificatore operazionale
Amplificatore differenziale ad alto guadagno usato con retroazione.

Convenzione degli utilizzatori
La corrente entra dal morsetto + di un elemento che assorbe potenza.

Fasore
Numero complesso che dà ampiezza e fase di una sinusoide.

Fattore di potenza
cos θ = P/S.

Fattore di qualità
Q = ω_0L/R, nitidezza della risonanza.

RMS
Valore quadratico medio; V_m/√2 per una sinusoide.

Potenza reattiva
Q = V_rms I_rms sin θ, in VAR.

Supernodo
Due nodi uniti da un generatore di tensione, trattati insieme nella LKC.

Equivalente di Thevenin
Generatore di tensione V_{Th} in serie con R_{Th}.

Costante di tempo
$\tau = RC$ o L/R.

Trasformatore
Bobine accoppiate che cambiano la tensione alternata secondo il rapporto spire.

Griglia di autovalutazione

Non si assegnano voti né crediti. Usala per valutare onestamente a che punto sei in ogni unità.

Livello	Come si presenta
4 · Padronanza	Etichetta i circuiti in modo completo, sceglie un metodo efficiente (partitori, nodale, maglie, Thevenin, fasori), verifica il bilancio di potenza e i casi limite, e lavora in sicurezza in laboratorio.
3 · Competente	Risolve gli esercizi con qualche errore occasionale di segno o di unità.
2 · In sviluppo	Segue gli esempi svolti ma confonde serie e parallelo, o la convenzione dei segni.
1 · Principiante	Inserisce numeri nelle formule senza uno schema etichettato; deve rivedere l'unità.

Pesi suggeriti se vuoi un punteggio

Parte	Peso
Esercizi	20%
Laboratori	25%
Serie di esercizi di metà corso	25%
Serie di esercizi finale	30%

Punta al livello 3 o superiore in ogni unità prima di passare al corso successivo.

Corsi correlati

- Algebra lineare MATH 230
- Aerodinamica I AERO 310

- Analisi III MATH 210
- Tutti i corsi