CAPITOLO

9

La corrente alternata e l'energia elettrica

«Speravo di fare dell'esperimento di Arago una nuova sorgente di elettricità, e non disperavo [...] di riuscire a costruire una nuova macchina elettrica.» — Michael Faraday, Experimental Researches in Electricity, Prima serie (1831), § 83 (traduzione della redazione)

OBIETTIVI

1. Spiegare come un alternatore produce una f.e.m. sinusoidale e calcolarne il valore massimo $\mathcal{f}_0 = NBS\omega$.
2. Definire il valore efficace di una corrente e di una tensione alternate e usarlo nei calcoli di potenza.
3. Descrivere il trasformatore e applicare le relazioni fra tensioni, correnti e numeri di spire.
4. Calcolare le perdite di una linea elettrica e spiegare perché l'energia viaggia ad alta tensione.
5. Descrivere la catena della rete elettrica e le fonti da cui le centrali ricavano l'energia.
6. Spiegare il campo magnetico rotante di Galileo Ferraris e il principio del motore a induzione.

INDICE DEL CAPITOLO

9.1 L'alternatore 2
9.2 I valori efficaci 6
9.3 Il trasformatore 9
9.4 Il trasporto dell'energia elettrica 13
9.5 Produrre l'energia elettrica e farla lavorare 15

Fisica 5 · Parte IV · Induzione e onde elettromagnetiche · versione 1.0
Capitolo 9: La corrente alternata e l'energia elettrica · pagine 253–278 del volume completo · estratto per lo studio

Infila la spina del bollitore nella presa, e l'acqua bolle in pochi minuti. Quell'energia è partita da una centrale forse a centinaia di chilometri, ha viaggiato su fili sospesi a tralicci alti come palazzi, a una tensione di centinaia di migliaia di volt, ed è arrivata nella tua cucina a 230 V. Lungo la strada la corrente ha cambiato verso cento volte al secondo, e nessuno se n'è accorto. Tre macchine rendono possibile questo viaggio: l'alternatore, che la produce; il trasformatore, che ne cambia la tensione; il motore, che alla fine la trasforma di nuovo in movimento.

Tutte e tre sono applicazioni dirette dell'induzione elettromagnetica del capitolo 8. In questo capitolo vedrai come una bobina che ruota in un campo magnetico produce una **corrente alternata**, cioè una corrente che inverte periodicamente il suo verso; che cosa significano i 230 V della presa; perché l'energia elettrica viaggia ad altissima tensione; e come l'italiano Galileo Ferraris, a Torino, trovò il modo di far girare un motore con la sola corrente alternata.

9.1 L'alternatore

9.1.1 Una bobina che ruota in un campo magnetico

Nel capitolo 8 hai visto che il flusso del campo magnetico attraverso una spira può cambiare in tre modi, e che il terzo, il cambiamento dell'angolo, è quello più facile da mantenere all'infinito: basta far ruotare la spira. Consideriamo una bobina rettangolare di N spire, ciascuna di area S, che ruota con velocità angolare costante ω attorno a un asse perpendicolare alle linee di un campo magnetico uniforme $\boldsymbol{B}$ (Figura 9.1). Le due estremità del filo sono saldate a due **anelli collettori** che ruotano con l'asse; su ciascun anello striscia una **spazzola**, un blocchetto conduttore fermo, e dalle spazzole partono i fili del circuito esterno. Questa macchina, che trasforma il lavoro meccanico di chi fa girare la bobina in energia elettrica, è un **alternatore**.

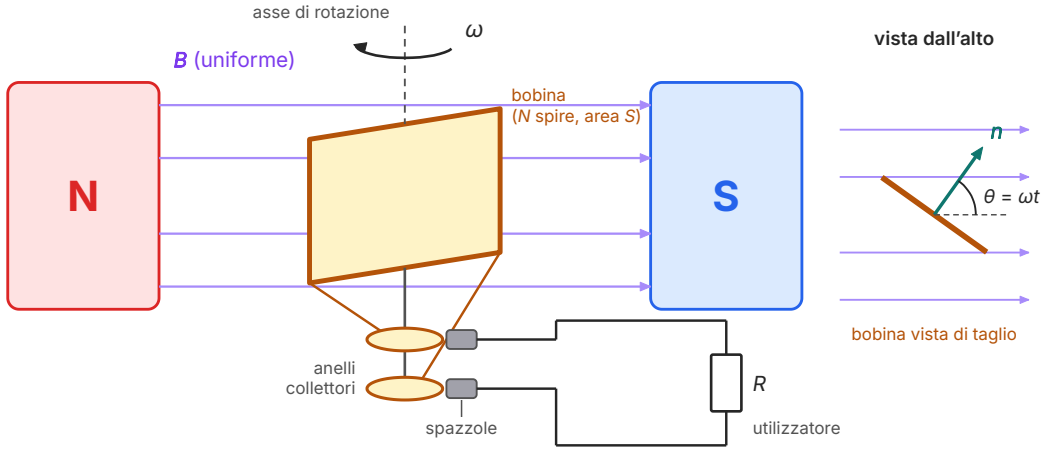


Figura 9.1 Schema di un alternatore elementare. Una bobina ruota con velocità angolare costante ω fra i poli di un magnete, in un campo magnetico uniforme; gli anelli collettori ruotano con la bobina e le spazzole, ferme, la collegano all'utilizzatore R. A destra, vista dall'alto: l'angolo θ fra la normale $\boldsymbol{n}$ alla bobina e il campo cresce in modo uniforme, $\theta = \omega t$.

DA RICORDARE

Dai volumi del terzo e del quarto anno: rotazioni e oscillazioni

Un corpo che ruota con velocità angolare costante ω descrive angoli uguali in tempi uguali: l'angolo, in radianti, cresce come $\theta = \omega t$. Un giro completo (2π rad) richiede il periodo T; il numero di giri al secondo è la frequenza $f = 1/T$, in hertz (Hz), e $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$, in rad/s (Fisica 3, capitolo 12).

L'ombra di un punto che si muove di moto circolare uniforme compie un moto armonico, e il suo grafico posizione-tempo è una sinusoide di periodo T (Fisica 4, capitolo 12). Nel corso di matematica del quarto anno le funzioni seno e coseno sono state definite proprio così, come coordinate di un punto che gira su una circonferenza.

Misuriamo il tempo a partire dall'istante in cui la normale alla bobina è parallela al campo. Dopo un tempo t la normale ha ruotato dell'angolo $\theta = \omega t$, e il flusso attraverso ciascuna spira è $\Phi = BS \cos \omega t$. Il flusso totale, $NBS \cos \omega t$, oscilla dunque fra $+NBS$ e $-NBS$ seguendo una sinusoide, esattamente come l'ombra di un punto che gira (Figura 9.2, in alto). È positivo quando le linee di campo attraversano la bobina da una faccia, negativo quando, dopo mezzo giro, la attraversano dall'altra.

9.1.2 La forza elettromotrice sinusoidale

Poiché il flusso cambia di continuo, per la legge di Faraday–Neumann nella bobina c'è in ogni istante una f.e.m. indotta. Il suo valore istantaneo è la rapidità di variazione del flusso, cambiata di segno, cioè la pendenza del grafico del flusso con il segno opposto. Dove il flusso è massimo o minimo, all'inizio e dopo mezzo giro, il grafico è per un istante orizzontale e la f.e.m. è nulla; dove il flusso passa per lo zero, con la bobina parallela alle linee di campo, cambia più rapidamente e la f.e.m. è massima. Con la matematica che imparerai quest'anno (la derivata, di cui hai letto nel capitolo 8) si dimostra che la f.e.m. è a sua volta una sinusoide:

$$f_{\text{em}} = f_0 \operatorname{sen} \omega t \qquad \text{con} \quad f_0 = NBS\omega$$

f_0 è il **valore massimo**, o valore di picco, della f.e.m.: si raggiunge due volte a ogni giro, una volta positivo e una volta negativo. La formula dice da che cosa dipende: dal numero di spire, dall'intensità del campo, dall'area della bobina e dalla rapidità con cui gira. Le unità tornano: $\text{T} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad/s} = \text{Wb/s} = \text{V}$. Una f.e.m. di questo tipo, e la corrente che fa circolare in un circuito, si dicono **sinusoidali**; la loro frequenza è quella di rotazione della bobina.

Anche se la dimostrazione richiede la derivata, possiamo controllare la formula con i soli strumenti del capitolo 8, calcolando la f.e.m. media su intervalli di tempo molto piccoli. Prendiamo una bobina con $NBS = 1{,}0$ Wb che compie 50 giri al secondo, per cui $\omega = 2\pi \cdot 50$ Hz $= 314$ rad/s e la formula prevede $f_0 = 1{,}0 \text{ Wb} \cdot 314 \text{ rad/s} = 314$ V. La Tabella 9.1 riporta, per alcuni istanti, il flusso totale 0,05 ms prima e 0,05 ms dopo, e la f.e.m. media $-\Delta(N\Phi)/\Delta t$ su quell'intervallo: coincide, entro l'arrotondamento, con $f_0 \operatorname{sen} \omega t$. Rimpicciolendo ancora l'intervallo l'accordo migliora.

Tabella 9.1 Verifica numerica della legge $f_{\text{em}} = f_0 \operatorname{sen} \omega t$ per la bobina della Figura 9.2 ($NBS = 1{,}0$ Wb, $f = 50$ Hz, $f_0 = 314$ V). Per ogni istante t si calcola il flusso totale 0,05 ms prima e 0,05 ms dopo, e la f.e.m. media $-\Delta(N\Phi)/\Delta t$ su quell'intervallo di 0,10 ms.

t (ms)	ωt	$N\Phi$ prima (Wb)	$N\Phi$ dopo (Wb)	$-\Delta(N\Phi)/\Delta t$ (V)	$f_0 \operatorname{sen} \omega t$ (V)
0,0	0°	0,99988	0,99988	0	0
2,5	45°	0,71813	0,69591	222	222
5,0	90°	0,01571	−0,01571	314	314
7,5	135°	−0,69591	−0,71813	222	222
10,0	180°	−0,99988	−0,99988	0	0
15,0	270°	−0,01571	0,01571	−314	−314

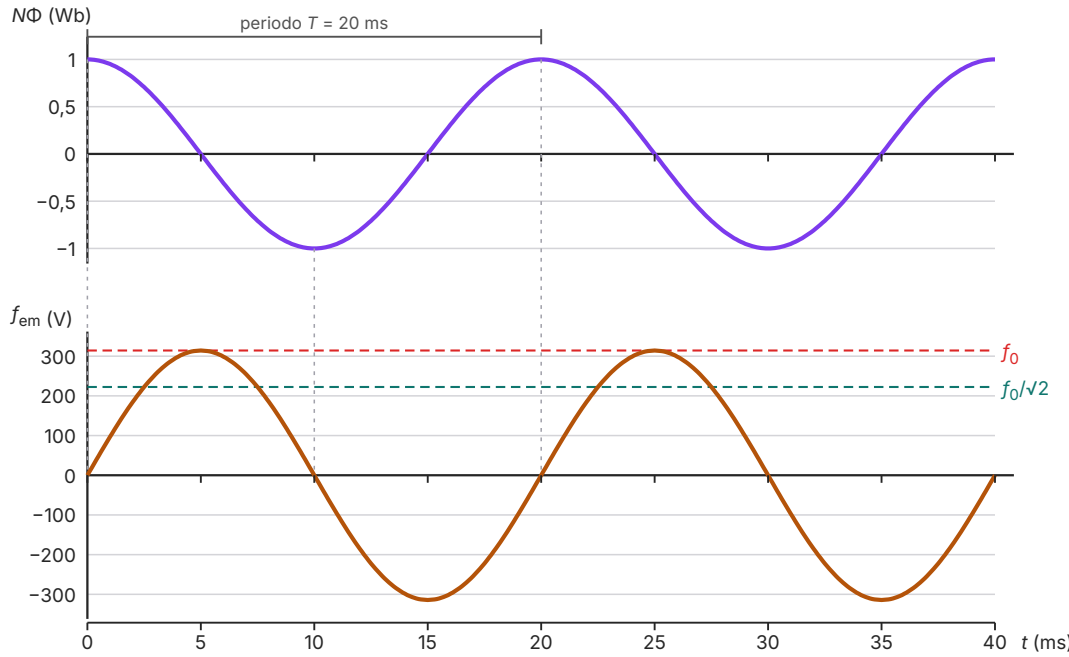


Figura 9.2 In alto, il flusso totale $N\Phi = NBS\cos\omega t$ attraverso la bobina di un alternatore con NBS = 1,0 Wb che compie 50 giri al secondo; in basso, la forza elettromotrice indotta $f_{em} = f_0 \operatorname{sen} \omega t$, con f_0 = 314 V (curve calcolate). Le linee tratteggiate verticali mostrano che la f.e.m. è nulla quando il flusso è massimo o minimo. Sono segnati il valore massimo f_0 e il valore efficace $f_0/\sqrt{2} \approx 222$ V.

ESEMPIO SVOLTO

Un alternatore da laboratorio

Problema. Una bobina di 100 spire rettangolari, di lati 20 cm e 10 cm, ruota a 50 giri al secondo in un campo magnetico uniforme di 0,50 T, con l'asse di rotazione perpendicolare al campo. Calcola a) la velocità angolare e il periodo, b) il flusso totale massimo, c) la f.e.m. massima, d) la f.e.m. 2,5 ms dopo l'istante in cui la bobina è perpendicolare al campo.

a) $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50$ Hz = 314 rad/s; $T = 1/f = 1/50$ Hz = 0,020 s = 20 ms.

b) $S = 0{,}20$ m $\cdot$ 0,10 m = 0,020 m^2; $NBS = 100 \cdot 0{,}50$ T $\cdot$ 0,020 m^2 = 1,0 Wb.

c) $f_0 = NBS\omega = 1{,}0$ Wb $\cdot$ 314 rad/s = 314 V $\approx 3{,}1 \times 10^2$ V.

d) A t = 2,5 ms la bobina ha ruotato di $\omega t = 314$ rad/s $\cdot$ 0,0025 s = 0,785 rad, cioè di 45° (un ottavo di giro): $f_{em} = 314$ V $\cdot \operatorname{sen} 45° = 222$ V.

Controllo. Sono proprio i valori della Tabella 9.1 e della Figura 9.2. Se la bobina girasse due volte più in fretta, raddoppierebbero sia la f.e.m. massima sia la frequenza: in un alternatore le due grandezze non si possono scegliere separatamente, a meno di cambiare N, B o S.

9.1.3 Gli alternatori delle centrali

Negli alternatori delle centrali la disposizione è rovesciata rispetto alla Figura 9.1: a ruotare è un grande elettromagnete, il **rotore**, mentre le bobine in cui si induce la f.e.m. sono avvolte sulla parte fissa, lo **statore**. Come hai visto nel capitolo 8, conta soltanto il moto relativo fra campo e bobine, e il risultato è lo stesso; in compenso la corrente prodotta, che è intensa, esce da collegamenti fissi e non deve passare per contatti striscianti. Il rotore è messo in rotazione da una **turbina**, una ruota a pale spinta dall'acqua, dal vapore, dai gas di combustione o dal vento.

In Europa la rete elettrica funziona alla frequenza di 50 Hz, in America del Nord a 60 Hz: tutti gli alternatori collegati a una rete devono girare in sincronia, e la frequenza è la stessa in ogni presa del continente. Un rotore con un solo polo nord e un solo polo sud deve compiere 50 giri al secondo, cioè 3000 giri al minuto; con più coppie di poli disposte lungo la circonferenza ogni giro produce più oscillazioni, e il rotore può girare più lentamente, come accade negli alternatori delle centrali idroelettriche.

La stessa macchina può funzionare anche al contrario. Il motore elettrico in corrente continua del capitolo 6 è una spira percorsa da corrente che ruota in un campo magnetico; se la si fa girare dall'esterno, il collettore a lamelle raddrizza la f.e.m. indotta, che non cambia più verso, e la macchina diventa una **dinamo**, un generatore di corrente continua. Le prime centrali, come quella di Edison che hai incontrato nel capitolo 5, usavano dinamo. Anche il generatore che si trova sul mozzo di molte biciclette produce in realtà una corrente alternata, la cui frequenza e il cui valore massimo crescono con la velocità.

9.2 I valori efficaci

9.2.1 La potenza in un resistore

Colleghiamo l'alternatore a un resistore di resistenza R, per esempio il filo di una stufetta. La tensione ai capi del resistore è $v = V_0 \operatorname{sen} \omega t$, e la corrente, per la prima legge di Ohm, è $i = v/R = I_0 \operatorname{sen} \omega t$, con $I_0 = V_0/R$: anch'essa sinusoidale e con la stessa frequenza. (Le lettere minuscole indicano i valori istantanei, che cambiano da un istante all'altro.) Il valore medio della corrente su un periodo è zero: per mezzo periodo le cariche avanzano in un verso, per l'altro mezzo tornano indietro. Eppure la stufetta scalda, perché la potenza dissipata per effetto Joule, $p = Ri^2$ (capitolo 5), dipende dal *quadrato* della corrente e non è mai negativa:

$$p = RI_0^2 \operatorname{sen}^2 \omega t$$

La potenza oscilla fra zero e il valore massimo RI_0^2, due volte a ogni periodo (Figura 9.3). Quanto vale in media? Un ragionamento di simmetria basta. Il grafico di $\operatorname{sen}^2 \omega t$ e quello di $\cos^2 \omega t$ sono la stessa curva spostata di un quarto di periodo, quindi su un periodo intero hanno la stes-

sa media. Ma in ogni istante $\text{sen}^2\omega t + \cos^2\omega t = 1$, e quindi la somma delle due medie è 1: ciascuna vale ½. La potenza media dissipata nel resistore è perciò

$$P_{\text{media}} = \tfrac{1}{2} R I_0^{\,2}$$

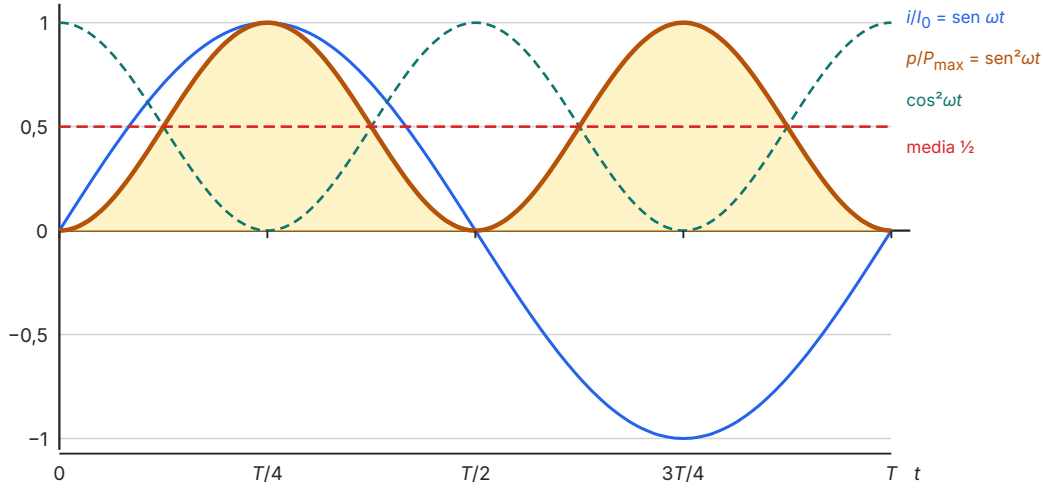


Figura 9.3 Corrente (in blu) e potenza dissipata in un resistore (in arancio) durante un periodo, in unità dei loro valori massimi (curve calcolate). La potenza non è mai negativa e oscilla con frequenza doppia di quella della corrente. Le curve $\text{sen}^2\,\omega t$ e $\cos^2\,\omega t$ (tratteggiata) sono uguali a meno di uno spostamento di un quarto di periodo e hanno somma 1 in ogni istante: la loro media è ½ (linea rossa). L'area colorata sotto la curva della potenza è proporzionale all'energia dissipata in un periodo.

9.2.2 Il valore efficace

Ci chiediamo ora: quale corrente *continua* produrrebbe nello stesso resistore lo stesso calore, nello stesso tempo? Deve dissipare la potenza $RI^2 = \tfrac{1}{2} R I_0^{\,2}$, cioè deve valere $I_0/\sqrt{2}$. Questo valore si chiama **valore efficace** della corrente alternata; lo stesso ragionamento vale per la tensione:

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707\, I_0 \qquad V_{\text{eff}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707\, V_0$$

Con i valori efficaci le formule della potenza del capitolo 5 restano valide anche in corrente alternata, purché si tratti di potenze medie: per un resistore $P_{\text{media}} = V_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} = R I_{\text{eff}}^{\,2} = V_{\text{eff}}^{\,2}/R$, e la prima legge di Ohm si scrive $V_{\text{eff}} = R I_{\text{eff}}$. È per questo che, quando si parla di corrente alternata, i valori indicati sono sempre quelli efficaci, se non è detto altrimenti; anche i voltmetri e gli amperometri per corrente alternata misurano valori efficaci. (In questo capitolo consideriamo solo circuiti puramente resistivi: con bobine e condensatori il discorso si complica, e non lo affronteremo.)

9.2.3 I 230 V della presa

La tensione fra la fase e il neutro della presa di casa (capitolo 5) è una tensione alternata a 50 Hz con valore efficace di 230 V. Il suo valore massimo è quindi $V_0 = \sqrt{2} \cdot 230\ \text{V} \approx 325\ \text{V}$: cento volte al secondo la tensione raggiunge 325 V, ora con un segno ora con l'altro, e cento volte al secondo passa per lo zero. Una lampadina a incandescenza alimentata dalla rete riceve dunque potenza nulla cento volte al secondo, ma il filamento non fa in tempo a raffreddarsi e la luce sembra costante.

ERRORE FREQUENTE

230 V non è la tensione massima

I 230 V della presa sono un valore *efficace*: la tensione massima è circa 325 V. Chi progetta un isolante o un condensatore da collegare alla rete deve considerare il picco, non il valore efficace. Allo stesso modo «una corrente di 10 A» in un circuito domestico è una corrente efficace, il cui valore massimo è circa 14 A.

Un secondo errore è pensare che, siccome la corrente alternata ha media nulla, in media «non trasporti niente». Non trasporta carica da un capo all'altro del circuito, è vero: gli elettroni oscillano avanti e indietro di una frazione di millimetro. Ma trasporta energia, perché la potenza dipende dal quadrato della corrente e la sua media non è nulla.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere il grafico di una tensione alternata

Problema. Usa la Figura 9.2 (in basso). Ricava dal grafico il periodo, la frequenza e la velocità angolare dell'alternatore, il valore massimo e il valore efficace della f.e.m. Se l'alternatore alimenta un resistore di 50 Ω, quali sono i valori massimo ed efficace della corrente e la potenza media?

Lettura. Due massimi successivi della f.e.m. distano 20 ms: $T = 20\ \text{ms} = 0{,}020\ \text{s}$, $f = 1/T = 50\ \text{Hz}$, $\omega = 2\pi f = 314\ \text{rad/s}$. Il valore massimo si legge sull'asse verticale: circa 314 V. Il valore efficace è $314\ \text{V}/\sqrt{2} = 222\ \text{V}$.

Calcolo. $I_0 = V_0/R = 314\ \text{V}/50\ \Omega = 6{,}28\ \text{A} \approx 6{,}3\ \text{A}$; $I_{\text{eff}} = 6{,}28\ \text{A}/\sqrt{2} = 4{,}44\ \text{A} \approx 4{,}4\ \text{A}$. Potenza media: $P = RI_{\text{eff}}^2 = 50\ \Omega \cdot (4{,}44\ \text{A})^2 = 987\ \text{W} \approx 0{,}99\ \text{kW}$, che è proprio la metà della potenza massima $RI_0^2 = 1{,}97\ \text{kW}$.

Osservazione. Sul grafico la linea del valore efficace non indica nessun valore «speciale» della curva: la f.e.m. vale 222 V in valore assoluto soltanto per un istante, quattro volte per periodo. Il valore efficace non si vede sul grafico: si calcola, perché riguarda l'energia.

9.3 Il trasformatore

9.3.1 Due bobine e un nucleo di ferro

Il **trasformatore** è il discendente diretto dell'anello di Faraday del capitolo 8. Su un nucleo di ferro chiuso, fatto di lamierini sottili isolati fra loro per ridurre le correnti di Foucault, sono avvolte due bobine (Figura 9.4): il **primario**, di N_1 spire, collegato a una tensione alternata V_1, e il **secondario**, di N_2 spire, collegato all'utilizzatore. Le due bobine non si toccano. La corrente alternata nel primario magnetizza il ferro, che convoglia quasi tutte le linee del campo magnetico attraverso entrambe le bobine; il flusso nel nucleo cambia di continuo, e in ogni spira del secondario si induce una f.e.m. alternata della stessa frequenza.

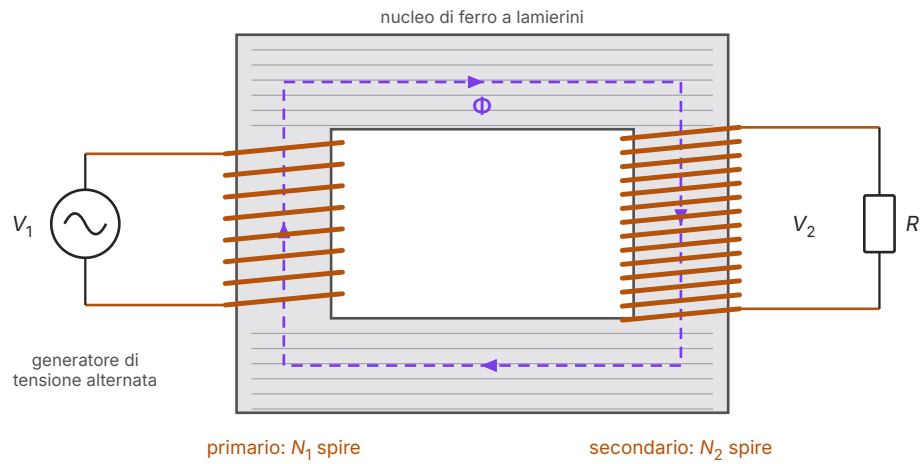


Figura 9.4 Schema di un trasformatore. La corrente alternata nel primario produce nel nucleo di ferro un flusso variabile Φ (in viola), che attraversa anche le spire del secondario e vi induce una f.e.m. alternata. Le due bobine sono collegate soltanto dal flusso nel nucleo. In questo disegno $N_2 > N_1$: il trasformatore innalza la tensione.

9.3.2 Il rapporto di trasformazione

Se tutte le linee di campo restano nel nucleo, ogni spira, del primario o del secondario, è attraversata dallo stesso flusso Φ, che varia con la stessa rapidità $\Delta\Phi/\Delta t$: in ogni spira si induce la stessa f.e.m. Nel secondario le f.e.m. delle N_2 spire si sommano e danno V_2; nel primario, se la resistenza del filo è trascurabile, la f.e.m. indotta nelle N_1 spire equilibra in ogni istante la tensione applicata V_1. Il rapporto fra le tensioni è quindi il rapporto fra i numeri di spire:

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

Il rapporto N_2/N_1 è il **rapporto di trasformazione**, e la relazione vale sia per i valori istantanei sia per quelli efficaci. Se il secondario ha più spire del primario la tensione aumenta, e il trasformatore è un **elevatore**; se ne ha meno la tensione diminuisce, e il trasformatore è un **abbassatore**. Un trasformatore con 2300 spire al primario e 120 al secondario, collegato alla rete a 230 V, dà al secondario 12 V.

Il trasformatore, però, non crea energia. In un **trasformatore ideale**, senza perdite, la potenza che esce dal secondario è uguale a quella che entra nel primario: $V_1 I_1 = V_2 I_2$, e quindi

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

Ciò che si guadagna in tensione si perde in corrente, e viceversa: un trasformatore che moltiplica la tensione per 10 divide la corrente per 10. I trasformatori reali si avvicinano molto a quello ideale: le loro perdite, dovute all'effetto Joule negli avvolgimenti, alle correnti di Foucault e alla magnetizzazione alternata del ferro, sono di solito una piccola frazione della potenza trasferita, e si manifestano come calore. Per questo un caricabatterie appoggiato alla presa è appena tiepido, mentre i grandi trasformatori delle centrali hanno bisogno di olio e ventilatori per essere raffreddati.

9.3.3 Perché serve la corrente alternata

Colleghiamo il primario a una batteria. Alla chiusura del circuito la corrente nel primario cresce, il flusso cambia e nel secondario compare un breve impulso; poi la corrente diventa costante, il flusso smette di cambiare e la tensione al secondario si annulla, come nell'anello di Faraday. Un trasformatore alimentato in corrente continua non trasforma nulla: per funzionare ha bisogno di un flusso che cambia di continuo, cioè di una corrente che cambia di continuo. Ed è per questo, come vedrai nel prossimo paragrafo, che la corrente alternata ha vinto.

ESEMPIO SVOLTO

Il trasformatore di un alimentatore

Problema. Un vecchio alimentatore contiene un trasformatore con 1150 spire al primario, collegato alla rete a 230 V; al secondario serve una tensione efficace di 12 V. a) Quante spire deve avere il secondario? b) Il secondario alimenta un apparecchio che assorbe una corrente efficace di 1,5 A: quale potenza riceve? c) Supponendo il trasformatore ideale, quale corrente circola nel primario?

a) $N_2 = N_1 \cdot V_2/V_1 = 1150 \cdot 12\ \text{V}/230\ \text{V} = 60$ spire.

b) $P = V_2 I_2 = 12\ \text{V} \cdot 1{,}5\ \text{A} = 18\ \text{W}$.

c) $I_1 = P/V_1 = 18\ \text{W}/230\ \text{V} = 0{,}078\ \text{A}$; oppure $I_1 = I_2 \cdot N_2/N_1 = 1{,}5\ \text{A} \cdot 60/1150 = 0{,}078\ \text{A} = 78\ \text{mA}$.

Osservazione. Il filo del primario, percorso da una corrente venti volte più piccola, può essere molto più sottile di quello del secondario. All'uscita del trasformatore la tensione è ancora alternata: per alimentare un apparecchio elettronico la si raddrizza con diodi (capitolo 5). Gli alimentatori moderni, più leggeri, funzionano a frequenze molto più alte, ma il principio del trasformatore è lo stesso.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Alternatore viene dal verbo *alternare*, dal latino *alternare*, «fare a turno», derivato di *alternus*, «l'uno dopo l'altro», a sua volta da *alter*, «l'altro (di due)». È la macchina che produce una corrente in cui i due versi si danno il cambio.

Trasformatore viene dal latino *transformare*, «cambiare di forma», composto di *trans*, «al di là», e *forma*. Il trasformatore non cambia l'energia, ma la «forma» in cui viaggia: molta tensione e poca corrente, o poca tensione e molta corrente.

Efficace viene dal latino *efficax*, «che produce effetto», da *efficere* (*ex* + *facere*), «portare a compimento». Il valore efficace di una corrente alternata è quello della corrente continua che produce lo stesso *effetto*, lo stesso calore in un resistore. In inglese si usa la sigla *rms*, *root mean square*, «radice della media dei quadrati»: il nome descrive il calcolo, quello italiano il significato.

L'unità della frequenza, l'**hertz**, porta il nome di Heinrich Hertz (1857–1894; Tabella A.9), che incontrerai nel capitolo 10 come scopritore delle onde elettromagnetiche.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: il rapporto di trasformazione

Materiali. Un trasformatore smontabile da laboratorio: un nucleo di ferro a lamierini a forma di U, chiuso da un giogo, e bobine intercambiabili da 100, 200, 400, 800 e 1600 spire; un alimentatore di tensione alternata a bassa tensione (6 V); due multimetri usati come voltmetri in corrente alternata.

Procedimento. Si infila sul nucleo la bobina da 400 spire come primario e la si collega all'alimentatore; un voltmetro misura V_1. Sull'altro braccio si infila una bobina come secondario, collegata soltanto al secondo voltmetro (secondario «a vuoto»), si chiude il nucleo con il giogo e si misura V_2. Si ripete con tutte le bobine disponibili come secondario (Tabella 9.2). Infine si ripete una misura senza il giogo, con il nucleo aperto.

Tabella 9.2 Tensione al secondario di un trasformatore da laboratorio con nucleo chiuso, primario di 400 spire alimentato con V_1 = (6,00 ± 0,03) V efficaci, secondario a vuoto (dati tipici).

N_2	N_2/N_1	V_2 (V)	V_2/V_1	$(V_2/V_1)/(N_2/N_1)$
100	0,25	1,44 ± 0,02	0,240	0,96
200	0,50	2,89 ± 0,03	0,482	0,96
400	1,00	5,76 ± 0,06	0,960	0,96
800	2,00	11,5 ± 0,1	1,917	0,96
1600	4,00	23,0 ± 0,2	3,833	0,96

Che cosa concludere. Il rapporto V_2/V_1 cresce in proporzione a N_2/N_1: raddoppiando le spire del secondario raddoppia la tensione, e l'ultima colonna è costante entro le incertezze, circa 0,96. Il grafico di V_2/V_1 in funzione di N_2/N_1 è una retta per l'origine con pendenza 0,96 ± 0,01, poco minore di 1, il valore del trasformatore ideale: una piccola parte delle linee di campo si chiude nell'aria senza attraversare il secondario, e una piccola parte della tensione si perde sulla resistenza del primario. Togliendo il giogo, con il nucleo aperto, V_2 scende a meno della metà del valore precedente: senza il ferro che le convoglia, molte linee di campo non arrivano al secondario.

Sicurezza. Si usa solo l'alimentatore a bassa tensione: la tensione di rete non si usa *mai*, e il primario non va mai collegato alla presa. Un trasformatore elevatore moltiplica la tensione: per questo il rapporto N_2/N_1 non supera 4 e il primario non riceve più di 6 V, e si tocca il circuito solo ad alimentatore spento. Le bobine si scaldano se restano collegate a lungo.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4. Riporta in un grafico V_2/V_1 in funzione di N_2/N_1 con le barre d'incertezza, traccia la retta per l'origine e ricava la pendenza con le rette

di massima e minima pendenza. Discuti perché la pendenza è minore di 1 e che cosa succede con il nucleo aperto. Come cambierebbero i risultati scambiando primario e secondario?

9.4 Il trasporto dell'energia elettrica

9.4.1 Le perdite nelle linee

Una centrale deve inviare una certa potenza P a una città lontana attraverso una linea di resistenza R. La potenza trasmessa è $P = VI$, dove V è la tensione efficace della linea e I la corrente efficace; ma i cavi della linea, percorsi dalla corrente I, si scaldano per effetto Joule e dissipano la potenza $P_{\text{persa}} = RI^2$. Poiché $I = P/V$,

$$P_{\text{persa}} = R\frac{P^2}{V^2}$$

A parità di potenza trasmessa e di linea, le perdite sono inversamente proporzionali al *quadrato* della tensione: raddoppiando la tensione si dimezza la corrente, e le perdite si riducono a un quarto (Figura 9.5). Per ridurre le perdite si potrebbe anche diminuire la resistenza della linea, ma per la seconda legge di Ohm (capitolo 4) occorrerebbero cavi più grossi, più pesanti e più costosi, e non si va lontano. La strada efficace è alzare la tensione. Si trattano qui le linee come semplici resistori, con i valori efficaci di tensione e corrente; le linee reali richiedono un'analisi più complessa, ma la conclusione non cambia.

ESEMPIO SVOLTO

La stessa potenza a 400 kV e a 20 kV

Problema. Una linea di resistenza complessiva 2,0 Ω deve trasportare la potenza di 50 MW. Calcola la corrente, la potenza persa e la caduta di tensione lungo la linea, se la tensione è a) 400 kV, b) 20 kV.

a) $I = P/V = 5{,}0 \times 10^7$ W/$(4{,}0 \times 10^5$ V) = 125 A. $P_{\text{persa}} = RI^2 = 2{,}0\ \Omega \cdot (125\text{ A})^2 = 3{,}1 \times 10^4$ W = 31 kW, lo 0,06% della potenza trasmessa. Caduta di tensione: $RI = 2{,}0\ \Omega \cdot 125$ A = 250 V, trascurabile rispetto a 400 kV.

b) $I = 5{,}0 \times 10^7$ W/$(2{,}0 \times 10^4$ V) = 2500 A. $P_{\text{persa}} = 2{,}0\ \Omega \cdot (2500\text{ A})^2 = 1{,}25 \times 10^7$ W = 12,5 MW: un quarto della potenza trasmessa se ne va in calore. La caduta di tensione è 5000 V, anch'essa un quarto della tensione.

Commento. La tensione è 20 volte maggiore, la corrente 20 volte minore e le perdite $20^2 = 400$ volte minori. Con 2500 A, inoltre, i cavi si surriscalderebbero. È la ragione per cui l'energia viaggia sulle lunghe distanze a centinaia di migliaia di volt.

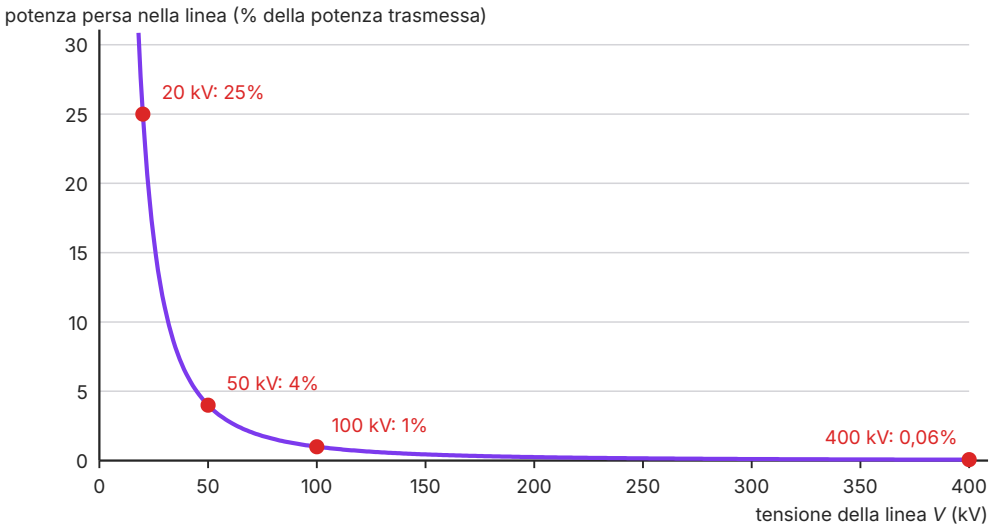


Figura 9.5 Potenza persa per effetto Joule in una linea di resistenza 2,0 Ω che trasporta 50 MW, in percentuale della potenza trasmessa, in funzione della tensione della linea: $P_{persa}/P = RP/V^2$ (curva calcolata). I punti segnano i valori dell'esempio svolto e due valori intermedi: dimezzando la tensione le perdite quadruplicano.

9.4.2 La rete elettrica

Ma le tensioni di centinaia di migliaia di volt sono pericolosissime e non possono entrare nelle case; gli alternatori, d'altra parte, non possono produrle direttamente, perché il loro isolamento non le reggerebbe. Ecco il ruolo del trasformatore. La **rete elettrica** funziona come una catena (Figura 9.6). Nella centrale l'alternatore produce corrente alternata a una tensione di qualche decina di migliaia di volt; un trasformatore elevatore la porta all'**alta tensione** delle linee di trasmissione, che in Italia arriva a 380 kV; le linee, sostenute dai tralicci, attraversano il paese collegando fra loro tutte le centrali e tutti i grandi centri di consumo. Nelle **sottostazioni** alla periferia delle città grandi trasformatori abbassano la tensione a 15–20 kV, la media tensione con cui l'energia viene distribuita nei quartieri e alle industrie. Infine, nelle cabine di trasformazione, spesso un piccolo edificio in fondo alla strada, la tensione scende ai 400 V e 230 V delle case.

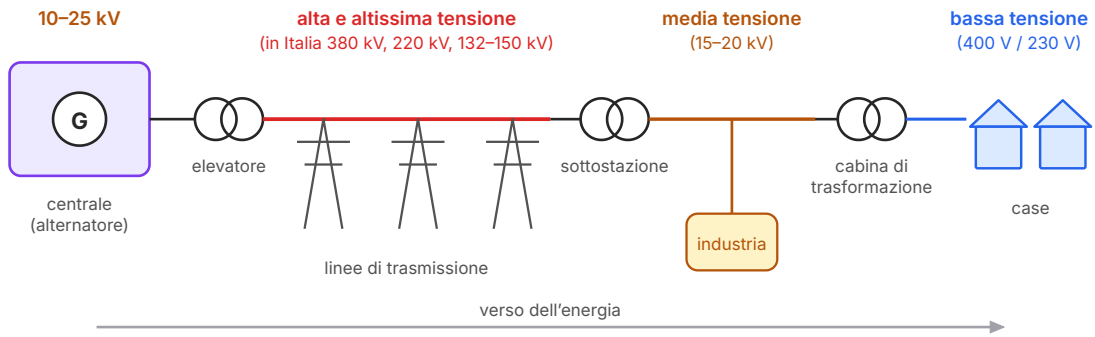


Figura 9.6 Schema della rete elettrica, dalla centrale alle case (non in scala). Ogni cambio di tensione è affidato a un trasformatore, indicato con due cerchi intrecciati: elevatore nella centrale, abbassatori nelle sottostazioni e nelle cabine. I valori di tensione sono quelli tipici della rete italiana.

Proprio la possibilità di cambiare la tensione con un apparecchio semplice, senza parti in movimento e con perdite piccole, ha fatto della corrente alternata la corrente delle reti elettriche di tutto il mondo. Oggi, grazie a convertitori elettronici, alcuni collegamenti molto lunghi o sottomarini usano la corrente continua ad altissima tensione; ma anche quelle linee partono e arrivano in una rete in corrente alternata.

9.5 Produrre l'energia elettrica e farla lavorare

9.5.1 Dalla fonte all'alternatore

Che cosa fa girare gli alternatori? Una **centrale elettrica** è una catena di trasformazioni di energia che, quasi sempre, termina in un alternatore. In una centrale *idroelettrica* l'acqua di un bacino scende lungo condotte forzate e la sua energia potenziale gravitazionale diventa energia cinetica, che spinge le pale della turbina. In una centrale *eolica* è il vento a far girare le pale. In una centrale *termoelettrica* il calore prodotto bruciando carbone, gas naturale o petrolio fa bollire l'acqua, e il vapore ad alta pressione e temperatura spinge una turbina; lo stesso fanno le centrali *geotermiche*, con il vapore che esce dal sottosuolo, e le centrali *nucleari*, in cui il calore viene dalla fissione dei nuclei di uranio, che studierai nel capitolo 14. L'Italia ha un primato in questo campo: a Larderello, in Toscana, nel 1904 si accesero alcune lampadine con l'elettricità prodotta da un generatore mosso dal vapore naturale.

Fanno eccezione le celle fotovoltaiche del capitolo 5, che trasformano direttamente la luce in energia elettrica senza parti in movimento, e le batterie; entrambe producono corrente continua, che per essere immessa nella rete viene trasformata in alternata da un apparecchio elettronico, l'**inverter**.

Le centrali termoelettriche sono macchine termiche e obbediscono al secondo principio della termodinamica: il rendimento di Carnot, $\eta_C = 1 - T_2/T_1$, con le temperature in kelvin, è un limite che nessuna centrale può superare (Fisica 4, capitolo 11). Con vapore a 560 °C (833 K) e un condensatore raffreddato a 30 °C (303 K) il limite è $1 - 303/833 \approx 0{,}64$; una centrale reale resta sensibilmente sotto, e più di metà del calore prodotto bruciando il combustibile finisce nell'ambiente, nell'acqua di un fiume o del mare, o nell'aria delle torri di raffreddamento. L'alternatore, invece, trasforma l'energia meccanica della turbina in energia elettrica con perdite piccole: il collo di bottiglia è nella trasformazione del calore in lavoro, non in quella del lavoro in energia elettrica.

COLLEGAMENTI

Educazione civica: fonti di energia e ambiente

Le fonti da cui si ricava l'energia elettrica si dividono in *non rinnovabili*, che si esauriscono perché la natura le ha accumulate in tempi lunghissimi (carbone, petrolio, gas naturale, uranio), e *rinnovabili*, che si ricostituiscono continuamente (sole, vento, acqua che il Sole fa evaporare e ricadere, calore della Terra). Le centrali a combustibili fossili emettono anidride carbonica, il principale gas responsabile dell'aumento dell'effetto serra e del riscaldamento globale, oltre a inquinanti dell'aria; le fonti rinnovabili non ne emettono durante il funzionamento, ma alcune, come il sole e il vento, producono energia in modo discontinuo, e la rete deve essere capace di immagazzinarla o compensarla. Le centrali nucleari non emettono anidride carbonica, ma pongono i problemi della sicurezza e delle scorie radioattive (capitolo 14): in Italia, dopo il referendum del 1987, le centrali nucleari furono chiuse, e il dibattito sul loro ruolo è tuttora aperto.

Nessuna fonte è priva di costi e di impatti, e le scelte energetiche di un paese mettono insieme fisica, economia, tutela dell'ambiente e del paesaggio, sicurezza degli approvvigionamenti. Per discuterne seriamente servono dati aggiornati e fonti affidabili, come le statistiche ufficiali sulla produzione di energia: un buon esercizio è cercarle e confrontarle, invece di affidarsi alle cifre che circolano senza fonte.

9.5.2 Il campo magnetico rotante di Galileo Ferraris

Restava un problema. Il motore in corrente continua del capitolo 6 ha bisogno di un collettore che inverta la corrente nella spira a ogni mezzo giro, ed è delicato; con la corrente alternata non funziona. Una rete in corrente alternata aveva bisogno di un motore adatto a lei, e la soluzione venne da Torino. Galileo Ferraris (1847–1897), che insegnava fisica tecnica al Museo Industriale della città, aveva studiato a fondo i primi trasformatori; nel 1885 ebbe l'idea di un **campo magnetico rotante**, la verificò sperimentalmente e la pubblicò nel 1888 in una memoria all'Accademia delle Scienze di Torino, intitolata *Rotazioni elettrodinamiche prodotte per mezzo di correnti alternate*.

L'idea si capisce con due coppie di bobine fisse, con gli assi perpendicolari, percorse da correnti alternate della stessa frequenza e della stessa intensità massima, ma *sfasate* di un quarto di periodo: la prima è massima quando la seconda è nulla, e viceversa (Figura 9.7). Al centro la prima coppia produce un campo orizzontale $B_1 = B_0 \cos \omega t$, la seconda un campo verticale $B_2 = B_0 \operatorname{sen} \omega t$. Il campo totale è la loro somma vettoriale: per il teorema di Pitagora il suo modulo è $\sqrt{(B_1^2 + B_2^2)} = B_0 \sqrt{(\cos^2 \omega t + \operatorname{sen}^2 \omega t)} = B_0$, sempre lo stesso, e l'angolo che forma con l'orizzontale è proprio ωt. Il campo non cambia intensità, ma *gira*, con la stessa velocità angolare della corrente: fa un giro a ogni periodo, cioè 50 giri al secondo con la corrente della rete. Due bobine ferme e due correnti alternate fanno quello che farebbe un magnete fatto ruotare.

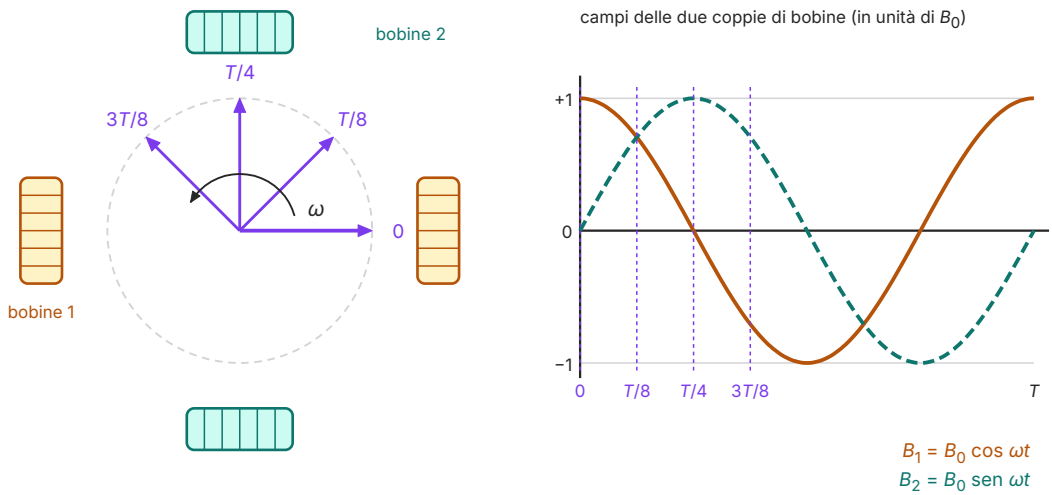


Figura 9.7 Il campo magnetico rotante. A sinistra: due coppie di bobine con gli assi perpendicolari; al centro il campo totale (in viola) negli istanti 0, $T/8$, $T/4$ e $3T/8$ ha sempre lo stesso modulo B_0 e ruota in verso antiorario. A destra: i campi delle due coppie di bobine in funzione del tempo, sfasati di un quarto di periodo (curve calcolate).

9.5.3 Il motore a induzione e il sistema trifase

Se nel campo rotante si mette un cilindro di rame libero di girare, il cilindro comincia a ruotare nello stesso verso del campo. Ferraris lo dimostrò proprio così. La ragione è l'induzione: il campo che gira fa variare il flusso attraverso il metallo, e vi induce correnti; per la legge di Lenz queste correnti si oppongono alla causa che le produce, cioè al moto relativo fra campo e cilindro, e lo riducono trascinando il cilindro dietro al campo. Il cilindro, però, non raggiunge mai la velocità del campo: se la raggiungesse, il flusso attraverso di lui smetterebbe di cambiare, le correnti indotte si annullerebbero e con esse la forza che lo trascina. Per questo il **motore a induzione**, o motore asincrono, gira sempre un po' più lentamente del campo, e più lentamente ancora quando deve vincere un carico maggiore. Il suo rotore non ha collegamenti elettrici, né

spazzole né collettore: è robusto, semplice ed economico, ed è il motore elettrico oggi più diffuso nell'industria, nelle pompe, nei ventilatori, in molti elettrodomestici e in molti treni.

Indipendentemente da Ferraris, negli stessi anni il serbo-americano Nikola Tesla (1856–1943) progettò motori a campo rotante e un sistema completo di distribuzione con più correnti alternate sfasate, che brevettò negli Stati Uniti e presentò in una conferenza nel maggio del 1888. Oggi la rete usa il **sistema trifase**: tre correnti alternate della stessa frequenza, sfasate fra loro di un terzo di periodo, che con tre bobine a 120° producono un campo rotante come quello della Figura 9.7. Le linee ad alta tensione hanno per questo tre conduttori, o gruppi di conduttori, e i grandi motori industriali sono alimentati in trifase; nelle case arriva di solito una sola delle tre fasi, con il neutro. L'unità di misura del campo magnetico, il tesla, porta il nome di Nikola Tesla.

APPROFONDIMENTO

La «guerra delle correnti»

Negli anni Ottanta dell'Ottocento le prime reti elettriche, come quella di Edison a New York, distribuivano corrente continua a bassa tensione: per le perdite nei cavi, una centrale poteva servire soltanto gli edifici entro un paio di chilometri. All'Esposizione di Torino del 1884 il francese Lucien Gaulard e l'inglese John Dixon Gibbs presentarono un sistema in corrente alternata con trasformatori, allora chiamati «generatori secondari», alimentando una linea sperimentale lunga decine di chilometri, fino a Lanzo; Galileo Ferraris ne studiò il funzionamento con misure accurate. L'imprenditore americano George Westinghouse acquistò i diritti dei loro brevetti per gli Stati Uniti, e nel 1886 il suo ingegnere William Stanley realizzò a Great Barrington, nel Massachusetts, un impianto di illuminazione con trasformatori. Nel 1888 Westinghouse acquistò anche i brevetti di Tesla sui motori a corrente alternata.

Edison difese con energia la corrente continua, insistendo sui pericoli delle alte tensioni alternate. Ma i vantaggi del trasformatore erano decisivi. Nel 1893 Westinghouse illuminò a corrente alternata l'Esposizione universale di Chicago, e si aggiudicò la costruzione degli alternatori della grande centrale idroelettrica delle cascate del Niagara, che dal novembre 1896 inviò energia alla città di Buffalo, a una quarantina di chilometri, con il sistema polifase di Tesla. Da allora le reti elettriche del mondo sono in corrente alternata. Nella storia della seconda rivoluzione industriale l'elettrificazione, con il motore elettrico che si affianca alla macchina a vapore e la luce elettrica nelle città, è uno dei capitoli centrali: la fisica di questo capitolo ne è il fondamento.

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Alternatore: una bobina di N spire di area S che ruota con velocità angolare ω (rad/s) in un campo B (T) produce la f.e.m. sinusoidale $f_{em} = f_0 \text{ sen } \omega t$, con valore massimo $f_0 = NBS\omega$, in volt. La frequenza è quella di rotazione: $\omega = 2\pi f$, $f = 1/T$ (Hz); la rete europea è a 50 Hz.

Valori efficaci: $I_{eff} = I_0/\sqrt{2}$, $V_{eff} = V_0/\sqrt{2}$. Sono i valori della corrente e della tensione continue che dissiperebbero in un resistore la stessa potenza media; con essi $P_{media} = V_{eff}I_{eff} = RI_{eff}^2$. La presa di casa: 230 V efficaci, circa 325 V di picco.

Trasformatore ideale: $V_2/V_1 = N_2/N_1$ e $I_2/I_1 = N_1/N_2$: cambia tensione e corrente, ma non la potenza ($V_1I_1 = V_2I_2$). Funziona solo con corrente alternata, perché serve un flusso variabile.

Trasporto: la potenza persa in una linea di resistenza R che trasporta la potenza P alla tensione V è $P_{persa} = RI^2 = RP^2/V^2$, in watt: alzando la tensione di un fattore k, le perdite diminuiscono di k^2.

Campo rotante: due campi perpendicolari $B_0 \cos \omega t$ e $B_0 \text{ sen } \omega t$ danno un campo di modulo costante B_0 che ruota con velocità angolare ω: è il principio del motore a induzione.

Con l'alternatore, il trasformatore e il motore l'elettromagnetismo dell'Ottocento è diventato la base materiale del mondo moderno. Ma la storia del campo elettromagnetico non è finita: nel prossimo capitolo scoprirai, con Maxwell, che un campo elettrico e un campo magnetico che cambiano possono staccarsi dai circuiti e viaggiare da soli nello spazio, alla velocità della luce.

SINTESI

- Una bobina che ruota con velocità angolare costante ω in un campo magnetico uniforme è attraversata da un flusso $NBS \cos \omega t$ e produce una f.e.m. sinusoidale $f_{em} = f_0 \operatorname{sen} \omega t$, con $f_0 = NBS\omega$: è l'alternatore. La f.e.m. è massima quando il flusso è nullo e nulla quando il flusso è massimo.
- Negli alternatori delle centrali ruota un elettromagnete (rotore), mosso da una turbina, e la f.e.m. si induce nelle bobine fisse (statore). La rete europea è a 50 Hz, quella nordamericana a 60 Hz.
- La corrente alternata in un resistore ha media nulla, ma la potenza $p = Ri^2$ non è mai negativa e ha media $\frac{1}{2} RI_0^2$, perché sen^2 e $\cos^2$ hanno la stessa media e somma 1.
- Il valore efficace è il valore della corrente continua che dissipa la stessa potenza media: $I_{eff} = I_0/\sqrt{2}$, $V_{eff} = V_0/\sqrt{2}$. La presa di casa fornisce 230 V efficaci, con picchi di circa 325 V.
- Nel trasformatore due bobine sono avvolte su un nucleo di ferro a lamierini; il flusso variabile prodotto dal primario induce una f.e.m. nel secondario: $V_2/V_1 = N_2/N_1$.
- Un trasformatore ideale conserva la potenza: $I_2/I_1 = N_1/N_2$. Non funziona in corrente continua, perché il flusso non cambia.
- Le perdite per effetto Joule in una linea sono RP^2/V^2: a parità di potenza trasmessa diminuiscono con il quadrato della tensione. Per questo l'energia viaggia ad alta tensione (in Italia fino a 380 kV).
- La rete elettrica è una catena: alternatore, trasformatore elevatore, linee ad alta tensione, sottostazioni, media tensione, cabine di trasformazione, bassa tensione (400 V e 230 V) nelle case.
- Le centrali idroelettriche, eoliche, termoelettriche, geotermiche e nucleari terminano tutte in un alternatore; il fotovoltaico produce corrente continua, convertita in alternata da un inverter. Le centrali termoelettriche sono limitate dal rendimento di Carnot.
- Galileo Ferraris (1885, pubblicato nel 1888) ottenne un campo magnetico rotante con due coppie di bobine fisse percorse da correnti alternate sfasate di un quarto di periodo; Nikola Tesla giunse a risultati simili in modo indipendente.
- Nel motore a induzione il campo rotante induce correnti nel rotore, che per la legge di Lenz viene trascinato dal campo, girando sempre un po' più lentamente. La rete usa il sistema trifase.
- Alla fine dell'Ottocento la «guerra delle correnti» fra la corrente continua di Edison e quella alternata di Westinghouse e Tesla fu vinta dalla corrente alternata, grazie al trasformatore.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Il valore efficace di una corrente alternata sinusoidale è:
   - **A.** il suo valore massimo
   - **B.** il suo valore medio su un periodo, che è zero
   - **C.** il valore della corrente continua che dissipa in un resistore la stessa potenza media
   - **D.** la metà del suo valore massimo

2. ● La frequenza della rete elettrica in Italia e nel resto d'Europa è:
   - **A.** 50 Hz
   - **B.** 60 Hz
   - **C.** 230 Hz
   - **D.** 314 Hz

3. ●● Se la velocità angolare della bobina di un alternatore raddoppia, a parità di campo, area e numero di spire, la f.e.m. massima e la frequenza:
   - **A.** restano invariate
   - **B.** raddoppia soltanto la frequenza
   - **C.** raddoppia soltanto la f.e.m. massima
   - **D.** raddoppiano entrambe

4. ● Il primario di un trasformatore viene collegato a una batteria. Dopo la chiusura del circuito, ai capi del secondario si misura:
   - **A.** una tensione costante maggiore di quella della batteria, se $N_2 > N_1$
   - **B.** una tensione costante uguale a quella della batteria
   - **C.** soltanto un breve impulso alla chiusura, poi nessuna tensione
   - **D.** una tensione alternata a 50 Hz

5. ●● Un trasformatore ideale abbassa la tensione da 230 V a 23 V. Rispetto al primario, nel secondario:
   - **A.** la corrente e la potenza sono dieci volte minori
   - **B.** la corrente è dieci volte maggiore e la potenza è la stessa
   - **C.** la corrente è la stessa e la potenza è dieci volte minore
   - **D.** la corrente è cento volte maggiore e la potenza è dieci volte maggiore

6. ●● Una linea trasporta la stessa potenza a una tensione doppia di prima. Le perdite per effetto Joule nei cavi:
   A. raddoppiano
   B. si dimezzano
   C. restano uguali
   D. si riducono a un quarto

7. ● Il campo magnetico rotante di Galileo Ferraris si ottiene con:
   A. due coppie di bobine fisse con gli assi perpendicolari, percorse da correnti alternate sfasate di un quarto di periodo
   B. una sola bobina percorsa da corrente continua
   C. un trasformatore con più spire al secondario che al primario
   D. un anello di ferro con due bobine, come quello di Faraday

Vero o falso

8. ● Il valore medio di una corrente alternata sinusoidale su un periodo è zero, ma la potenza media che essa dissipa in un resistore non è zero. V / F

9. ● La tensione della presa di casa non supera mai 230 V. V / F

10. ●● In un alternatore la f.e.m. è massima negli istanti in cui il flusso attraverso la bobina è massimo. V / F

11. ● Un trasformatore ideale elevatore aumenta la tensione e insieme la potenza erogata. V / F

12. ● In un motore a induzione il rotore gira un po' più lentamente del campo magnetico rotante. V / F

Applicare

13. ● Una bobina di 50 spire, ciascuna di area 0,012 m^2, ruota a 25 giri al secondo in un campo magnetico uniforme di 0,40 T, attorno a un asse perpendicolare al campo. Calcola la velocità angolare, il periodo e la f.e.m. massima.

14. ● Una tensione alternata ha valore massimo 17 V: calcola il suo valore efficace. Una corrente alternata ha valore efficace 2,0 A: calcola il suo valore massimo.

15. ● Completa. Un ferro da stiro con l'indicazione «230 V – 1800 W» assorbe una corrente efficace di _____ A, il cui valore massimo è _____ A.

16. ●● Usa la Figura 9.2. In quali istanti, fra 0 e 20 ms, la f.e.m. è nulla, e quanto vale in quegli istanti il flusso totale? Quanto vale la f.e.m. a $t = 15$ ms? Controlla il risultato con la Tabella 9.1.

17. ● Il primario di un trasformatore ha 920 spire ed è collegato a una tensione alternata di 230 V; il secondario ha 48 spire. Calcola la tensione al secondario. Quante spire dovrebbe avere il secondario per dare 6,0 V?

18. ● Completa. In un trasformatore ideale con 200 spire al primario e 1000 al secondario, la tensione al secondario è _____ volte quella al primario, e la corrente nel secondario è _____ di quella nel primario.

19. ●● Una linea a 132 kV trasporta la potenza di 10 MW; la sua resistenza complessiva è 3,0 Ω. Calcola la corrente nella linea, la potenza persa e la percentuale della potenza trasmessa che si perde.

Problemi

20. ●● Un asciugacapelli ha due posizioni, da 1000 W e da 2000 W, a 230 V; nelle due posizioni si comporta come un resistore. a) Calcola la resistenza nelle due posizioni. b) Calcola la corrente efficace e quella massima nella posizione da 2000 W. c) Quanta energia usa in 10 minuti alla massima potenza, in joule e in kWh (capitolo 5)?

21. ●●● Una centrale invia la potenza di 20 MW a una città attraverso una linea con conduttori di alluminio di sezione 400 mm^2; il percorso della corrente, andata e ritorno, è lungo 100 km (resistività dell'alluminio nella Tabella A.2). a) Calcola la resistenza della linea (capitolo 4). b) Calcola la potenza persa se la tensione è 20 kV e se è 150 kV. c) Quale tensione minima serve perché le perdite non superino l'1% della potenza trasmessa?

22. ●●● Una centrale termoelettrica produce 400 MW di potenza elettrica. Il vapore entra nella turbina a 560 °C e il condensatore è a 30 °C. a) Calcola il rendimento di Carnot fra queste temperature (Fisica 4, capitolo 11). b) Il rendimento complessivo della centrale, dal calore del combustibile all'energia elettrica, è 0,40: quanto calore riceve ogni secondo dal combustibile, e quanto ne cede all'ambiente? c) Quanta energia elettrica produce in un giorno, in kWh? d) Perché le centrali termoelettriche si costruiscono vicino a un fiume o al mare?

23. ●●● L'alternatore di una centrale produce 200 MW a una tensione efficace di 20 kV; un trasformatore elevatore porta la tensione a 400 kV. Supponi tutti i trasformatori ideali. a) Calcola il rapporto fra le spire del secondario e quelle del primario dell'elevatore. b) Calcola la corrente efficace in uscita dall'alternatore e quella nella linea. c) La linea ha resistenza 4,0 Ω: calcola la potenza persa. d) Che cosa accadrebbe se si collegasse l'alternatore direttamente alla stessa linea, senza trasformatore?

24. ●● Si vuole costruire un alternatore che, ruotando a 50 giri al secondo in un campo di 0,80 T, con una bobina di area 0,040 m^2, produca una f.e.m. massima di almeno 325 V. a) Quante spire servono, al minimo? b) Con quel numero di spire, quali sono il valore massimo e il valore efficace della f.e.m.?

Ragionare e argomentare

25. ●● Commenta la fonte. Nella Prima serie delle sue ricerche (1831) Faraday descrive un disco di rame fatto ruotare fra i poli di un grande magnete, con due contatti striscianti, uno sull'asse e uno sul bordo, collegati a un galvanometro, e conclude: «Qui dunque fu dimostrata la produzione di una corrente elettrica permanente per mezzo di magneti ordinari» (*Experimental Researches in Electricity*, § 90; traduzione della redazione). Nel paragrafo successivo osserva che, invertendo il verso di rotazione, si inverte anche il verso della corrente. Che cosa intende Faraday con «permanente»? In che cosa il suo disco si distingue dall'alternatore della Figura 9.1, che pure produce corrente finché gira? Come verificheresti la sua osservazione sul verso della corrente?

26. ●● Spiega perché un trasformatore non funziona se il primario è collegato a una batteria, e perché il suo nucleo è fatto di lamierini sottili isolati fra loro invece che di un blocco di ferro pieno.

27. ●●● Stima di Fermi. Una città di 100 000 abitanti richiede in media una potenza di circa 1 kW per abitante (dato di ipotesi). Stima la corrente efficace necessaria se l'energia arrivasse alla città a 230 V, e se arrivasse a 132 kV. Che cosa ne concludi sulla sezione dei cavi necessari nei due casi?

28. ● Trova l'errore. Uno studente scrive: «Un trasformatore elevatore porta la tensione da 230 V a 2300 V; quindi una lampada collegata al secondario riceve dieci volte più potenza di quella che riceverebbe collegata direttamente alla presa, e il trasformatore è una fonte di energia». Individua gli errori e correggili.

Verso l'esame

29. ●● **Dal documento.** Osserva la Figura 9.6. a) Quali fenomeni fisici permettono di cambiare la tensione in ciascuno dei passaggi indicati? b) Quale legge spiega perché l'energia viaggia sulle lunghe distanze ad alta tensione? c) Collega lo schema alla Storia: in quale periodo si formarono le prime reti elettriche e quale cambiamento produssero nelle città e nell'industria?

30. ●● **Trattazione sintetica.** In 10–15 righe spiega perché le reti elettriche usano la corrente alternata, partendo dalla legge di Faraday–Neumann e arrivando alle perdite nelle linee.

31. ●●● **Problema breve commentato.** Un caricabatterie con trasformatore abbassa la tensione da 230 V a 5,0 V e il suo secondario fornisce al circuito che ricarica il telefono una corrente efficace di 2,0 A. Supponi il trasformatore ideale. a) Calcola il rapporto N_1/N_2. b) Calcola la potenza erogata e la corrente nel primario. c) Calcola la corrente massima nel primario. Commenta il risultato: perché il cavo che collega il caricabatterie alla presa può essere sottile, e perché lo stesso cavo non andrebbe bene per una stufetta da 2000 W?

PER APPROFONDIRE

- [FAR] M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*: nella Prima serie (1831), dopo l'anello e il magnete, il disco di rame che ruota fra i poli di un magnete, il primo generatore elettrico mosso da un lavoro meccanico.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: il passaggio dalle forze ai campi, che rende comprensibile perché un campo che cambia produca correnti in un circuito lontano.
- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. II: i capitoli sull'induzione discutono generatori, trasformatori e motori, con molti esempi tecnici.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sulla corrente alternata e sui trasformatori offre problemi graduati sui valori efficaci e sul trasporto dell'energia.

Glossario del capitolo

Abbassatore
Trasformatore con meno spire al secondario che al primario, che riduce la tensione (e aumenta la corrente).

Alternatore
Generatore in cui una bobina ruota rispetto a un campo magnetico (o un campo ruota rispetto a bobine fisse) producendo una f.e.m. sinusoidale: $f_{em} = f_0 \text{ sen } \omega t$, con $f_0 = NBS\omega$.

Anelli collettori
Anelli conduttori fissati all'asse di una bobina rotante, su cui strisciano le spazzole che la collegano al circuito esterno.

Campo magnetico rotante
Campo di modulo costante la cui direzione ruota uniformemente; si ottiene con bobine fisse percorse da correnti alternate sfasate (Galileo Ferraris, 1885).

Centrale elettrica
Impianto che trasforma l'energia di una fonte (acqua, vento, combustibili, uranio, calore terrestre) in energia elettrica, di solito con una turbina e un alternatore.

Corrente alternata
Corrente che inverte periodicamente il suo verso; quella sinusoidale della rete europea ha frequenza 50 Hz.

Dinamo
Generatore di corrente continua: una bobina rotante in cui un collettore a lamelle raddrizza la f.e.m. indotta.

Elevatore
Trasformatore con più spire al secondario che al primario, che aumenta la tensione (e riduce la corrente).

Inverter
Apparecchio elettronico che trasforma una corrente continua (di pannelli fotovoltaici o batterie) in corrente alternata.

Motore a induzione
Motore in cui un campo magnetico rotante induce correnti nel rotore, che viene trascinato dal campo girando un po' più lentamente; detto anche asincrono.

Primario
Bobina di un trasformatore collegata alla tensione alternata di ingresso.

Rapporto di trasformazione
Rapporto N_2/N_1 fra le spire del secondario e del primario; in un trasformatore ideale è uguale a V_2/V_1 e a I_1/I_2.

Rete elettrica
Insieme di centrali, trasformatori e linee ad alta, media e bassa tensione che porta l'energia elettrica dai luoghi di produzione agli utilizzatori.

Rotore
Parte rotante di un alternatore o di un motore; lo statore è la parte fissa.

Secondario
Bobina di un trasformatore collegata all'utilizzatore, in cui si induce la tensione di uscita.

Sistema trifase
Sistema di tre correnti alternate della stessa frequenza, sfasate di un terzo di periodo, usato dalla rete elettrica; produce un campo rotante con tre bobine a 120°.

Trasformatore
Apparecchio formato da due bobine su un nucleo di ferro, che cambia la tensione di una corrente alternata: $V_2/V_1 = N_2/N_1$.

Valore efficace
Valore della corrente (o tensione) continua che dissipa in un resistore la stessa potenza media di quella alternata: $I_{eff} = I_0/\sqrt{2}$, $V_{eff} = V_0/\sqrt{2}$.

Valore massimo
Valore di picco V_0 o I_0 di una tensione o corrente sinusoidale; per la presa di casa circa 325 V.

Soluzioni

1. C. Il valore efficace è definito dall'energia: è la corrente continua che nello stesso resistore dissipa la stessa potenza media, $I_0/\sqrt{2}$. Il valore medio su un periodo è zero.

2. A. In Europa la rete è a 50 Hz; 60 Hz è la frequenza nordamericana, 230 V è il valore efficace della tensione, 314 rad/s la velocità angolare corrispondente a 50 Hz.

3. D. La frequenza è quella di rotazione; la f.e.m. massima $f_0 = NBS\omega$ è proporzionale a ω, quindi raddoppia anch'essa.

4. C. Con corrente costante il flusso nel nucleo non cambia e non c'è induzione: al secondario compare solo un breve impulso alla chiusura (e uno opposto all'apertura).

5. B. $I_2/I_1 = N_1/N_2 = V_1/V_2 = 10$; la potenza, in un trasformatore ideale, si conserva.

6. D. A parità di potenza la corrente si dimezza, e $P_{\text{persa}} = RI^2$ si riduce a un quarto.

7. A. Due campi perpendicolari $B_0 \cos \omega t$ e $B_0 \text{ sen } \omega t$ danno un campo di modulo costante che ruota con velocità angolare ω.

8. V. La corrente è positiva per mezzo periodo e negativa per l'altro mezzo, quindi ha media nulla; la potenza Ri^2 non è mai negativa e ha media $\frac{1}{2}\, RI_0{}^2$.

9. F. 230 V è il valore efficace; il valore massimo è $\sqrt{2} \cdot 230 \text{ V} \approx 325 \text{ V}$.

10. F. La f.e.m. è proporzionale alla rapidità di variazione del flusso, che è nulla quando il flusso è massimo (il grafico è orizzontale): in quegli istanti la f.e.m. è zero, ed è massima quando il flusso passa per lo zero.

11. F. Un trasformatore ideale conserva la potenza: se la tensione aumenta, la corrente diminuisce nella stessa proporzione. Un trasformatore reale ne perde un poco.

12. V. Se il rotore girasse alla stessa velocità del campo, il flusso attraverso di lui non cambierebbe, non ci sarebbero correnti indotte e nessuna forza lo trascinerebbe.

13. $\omega = 2\pi \cdot 25 \text{ Hz} = 157 \text{ rad/s}$; $T = 1/25 \text{ Hz} = 0{,}040 \text{ s}$; $f_0 = NBS\omega = 50 \cdot 0{,}40 \text{ T} \cdot 0{,}012 \text{ m}^2 \cdot 157 \text{ rad/s} = 38 \text{ V}$.

14. $V_{\text{eff}} = 17 \text{ V}/\sqrt{2} = 12 \text{ V}$; $I_0 = \sqrt{2} \cdot 2{,}0 \text{ A} = 2{,}8 \text{ A}$.

15. 7,8; 11. $I_{\text{eff}} = P/V_{\text{eff}} = 1800 \text{ W}/230 \text{ V} = 7{,}83 \text{ A} \approx 7{,}8 \text{ A}$; $I_0 = \sqrt{2} \cdot 7{,}83 \text{ A} = 11{,}1 \text{ A} \approx 11 \text{ A}$.

16. La f.e.m. è nulla a $t = 0$, 10 ms e 20 ms, quando il flusso totale vale rispettivamente +1,0 Wb, −1,0 Wb e +1,0 Wb (massimo o minimo). A $t = 15$ ms la bobina ha compiuto tre quarti di giro ($\omega t = 270°$): $f_{\text{em}} = 314 \text{ V} \cdot \text{sen } 270° = -314 \text{ V}$, in accordo con la Tabella 9.1.

17. $V_2 = V_1 \cdot N_2/N_1 = 230 \text{ V} \cdot 48/920 = 12 \text{ V}$. Per 6,0 V: $N_2 = 920 \cdot 6{,}0 \text{ V}/230 \text{ V} = 24$ spire.

18. 5; un quinto (1/5). $V_2/V_1 = 1000/200 = 5$ e $I_2/I_1 = 200/1000 = 1/5$.

19. $I = P/V = 1{,}0 \times 10^7 \text{ W}/(1{,}32 \times 10^5 \text{ V}) = 75{,}8 \text{ A} \approx 76 \text{ A}$; $P_{\text{persa}} = RI^2 = 3{,}0\ \Omega \cdot (75{,}8 \text{ A})^2 = 1{,}7 \times 10^4 \text{ W} = 17 \text{ kW}$, cioè lo 0,17% di 10 MW.

20. a) $R = V^2/P$: $(230 \text{ V})^2/1000 \text{ W} = 52{,}9\ \Omega \approx 53\ \Omega$; $(230 \text{ V})^2/2000 \text{ W} = 26{,}45\ \Omega \approx 26\ \Omega$. b) $I_{\text{eff}} = 2000 \text{ W}/230 \text{ V} = 8{,}7 \text{ A}$; $I_0 = \sqrt{2} \cdot 8{,}70 \text{ A} = 12 \text{ A}$. c) $E = P\Delta t = 2000 \text{ W} \cdot 600 \text{ s} = 1{,}2 \times 10^6 \text{ J}$; in kWh: $2{,}0 \text{ kW} \cdot (1/6) \text{ h} = 0{,}33 \text{ kWh}$ $(1{,}2 \times 10^6 \text{ J}/3{,}6 \times 10^6 \text{ J/kWh})$.

21. a) $R = \rho L/S = 2{,}65 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot\text{m} \cdot 1{,}00 \times 10^5 \text{ m}/(4{,}00 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = 6{,}6\ \Omega$. b) A 20 kV: $I = 2{,}0 \times 10^7 \text{ W}/(2{,}0 \times 10^4 \text{ V}) = 1000 \text{ A}$, $P_{\text{persa}} = 6{,}63\ \Omega \cdot (1000 \text{ A})^2 = 6{,}6 \text{ MW}$, un terzo della potenza. A 150 kV: $I = 133 \text{ A}$, $P_{\text{persa}} = 6{,}63\ \Omega \cdot (133 \text{ A})^2 = 1{,}2 \times 10^5 \text{ W} = 0{,}12 \text{ MW}$, lo 0,59%. c) $P_{\text{persa}}/P = RP/V^2 \le 0{,}010 \rightarrow V \ge \sqrt{(RP/0{,}010)} = \sqrt{(6{,}63\ \Omega \cdot 2{,}0 \times 10^7 \text{ W}/0{,}010)} = 1{,}2 \times 10^5 \text{ V} \approx 115 \text{ kV}$.

22. a) $T_1 = 833 \text{ K}$, $T_2 = 303 \text{ K}$: $\eta_C = 1 - 303/833 = 0{,}64$. b) Calore dal combustibile: $400 \text{ MW}/0{,}40 = 1{,}0 \times 10^3 \text{ MW} = 1{,}0 \times 10^9 \text{ J}$ ogni secondo; calore ceduto all'am-

biente: 1000 MW − 400 MW = 600 MW, cioè $6{,}0 \times 10^8$ J ogni secondo. c) $E = 4{,}0 \times 10^5$ kW · 24 h = $9{,}6 \times 10^6$ kWh. d) Per il secondo principio una macchina termica deve cedere calore a una sorgente fredda: il condensatore va raffreddato con grandi quantità d'acqua (o con torri di raffreddamento), e più bassa è la temperatura della sorgente fredda, più alto è il rendimento possibile.

23. a) $N_2/N_1 = V_2/V_1 = 400$ kV/20 kV = 20. b) Alternatore: $I = 2{,}0 \times 10^8$ W/$(2{,}0 \times 10^4$ V) = $1{,}0 \times 10^4$ A; linea: $I = 2{,}0 \times 10^8$ W/$(4{,}0 \times 10^5$ V) = 500 A (venti volte meno). c) $P_{\text{persa}} = 4{,}0\ \Omega \cdot (500\text{ A})^2 = 1{,}0 \times 10^6$ W = 1,0 MW, lo 0,5% della potenza. d) Con 10 000 A la formula darebbe $RI^2 = 4{,}0\ \Omega \cdot (1{,}0 \times 10^4\text{ A})^2 = 400$ MW, il doppio della potenza prodotta: impossibile. In realtà la caduta di tensione $RI = 40$ kV supererebbe la tensione dell'alternatore, la corrente non potrebbe raggiungere quel valore e all'altro capo della linea non arriverebbe quasi nulla, mentre i cavi si surriscalderebbero. Senza trasformatore il trasporto a quella distanza non si può fare.

24. a) $N = f_0/(BS\omega) = 325\text{ V}/(0{,}80\text{ T} \cdot 0{,}040\text{ m}^2 \cdot 314\text{ rad/s}) = 32{,}3$: servono almeno 33 spire (con 32 si avrebbero solo 322 V). b) $f_0 = 33 \cdot 0{,}80\text{ T} \cdot 0{,}040\text{ m}^2 \cdot 314\text{ rad/s} = 332$ V; valore efficace 332 V/$\sqrt{2}$ = 235 V.

25. Traccia di risposta. «Permanente» significa che la corrente non dura un istante, come quella indotta nell'anello alla chiusura del circuito, ma continua finché il disco gira: è il primo generatore che trasforma lavoro meccanico in una corrente continua e duratura. Nel disco ogni raggio taglia sempre le linee di campo nello stesso verso, e la corrente fra asse e bordo ha sempre lo stesso verso (è continua); nell'alternatore il flusso attraverso la bobina aumenta e diminuisce alternativamente, e la corrente inverte il verso a ogni mezzo giro. L'osservazione sul verso è una previsione della legge di Lenz e della regola della mano destra (la forza di Lorentz sulle cariche del disco cambia verso con la velocità); si verifica con un galvanometro a zero centrale, facendo girare il disco nei due versi e confrontando le deviazioni, uguali e opposte a parità di velocità.

26. Traccia di risposta. La f.e.m. nel secondario nasce solo se il flusso nel nucleo cambia; con una batteria la corrente nel primario, dopo un breve transitorio alla chiusura, è costante, il flusso non cambia e la tensione al secondario è nulla. Il nucleo è attraversato da un flusso alternato: in un blocco di ferro pieno, che è conduttore, si indurrebbero intense correnti di Foucault (capitolo 8), che scalderebbero il ferro e sprecherebbero energia. Dividendo il nucleo in lamierini isolati, paralleli alle linee di campo, i percorsi chiusi delle correnti parassite sono interrotti e le perdite si riducono molto.

27. Potenza: 100 000 · 1 kW = 1×10^8 W. A 230 V: $I = 1 \times 10^8$ W/230 V ≈ 4×10^5 A; a 132 kV: $I = 1 \times 10^8$ W/$(1{,}32 \times 10^5$ V) ≈ 8×10^2 A. A bassa tensione la corrente sarebbe circa 600 volte maggiore: per non avere perdite e riscaldamenti enormi (che crescono con I^2) servirebbero cavi di sezione enorme, di fatto impossibili su lunghe distanze. Ad alta tensione bastano conduttori di pochi centimetri quadrati di sezione.

28. Errori: un trasformatore non è una fonte di energia, e non moltiplica la potenza. In un trasformatore ideale $V_1I_1 = V_2I_2$: la potenza erogata dal secondario è uguale a quella assorbita dal primario, e viene dalla rete. Inoltre una lampada costruita per 230 V, collegata a 2300 V, non riceverebbe «dieci volte più potenza» in modo utile: a parità di resistenza la potenza crescerebbe di 100 volte (V^2/R), assorbita dalla rete attraverso il primario, e la lampada si brucerebbe. Correzione: «il trasformatore cambia tensione e corrente in proporzione inversa, conservando (idealmente) la potenza».

29. Traccia di risposta. a) L'induzione elettromagnetica nei trasformatori (mutua induzione): la corrente alternata nel primario produce un flusso variabile nel nucleo che induce una f.e.m. nel secondario, con $V_2/V_1 = N_2/N_1$; elevatore nella centrale, abbassatori nelle sottostazioni e nelle cabine. b) L'effetto Joule: a parità di potenza, alzando la tensione la corrente diminuisce e le perdite $RI^2 = RP^2/V^2$ diminuiscono con il quadrato della tensione. c) Le prime reti nascono negli anni Ottanta dell'Ottocento (Edison a New York nel 1882, Milano nel 1883) e si diffondono con la corrente alternata negli anni Novanta (Niagara, 1896): fanno parte della seconda ri-

voluzione industriale; la luce elettrica cambia le città e il lavoro serale, il motore elettrico consente di portare l'energia a ogni macchina della fabbrica e di spostare le industrie lontano dalle fonti di energia.

30. Traccia di risposta (10–15 righe). Per la legge di Faraday–Neumann una f.e.m. si induce solo se il flusso cambia. Un alternatore produce in modo naturale una f.e.m. sinusoidale, e una corrente alternata produce in un nucleo di ferro un flusso che cambia di continuo: è ciò che serve al trasformatore, che con due bobine avvolte sullo stesso nucleo cambia la tensione nel rapporto N_2/N_1, conservando idealmente la potenza. Con la corrente continua il flusso sarebbe costante e il trasformatore inutile. La possibilità di cambiare la tensione è decisiva per il trasporto: la potenza persa in una linea è $RI^2 = RP^2/V^2$, e a parità di potenza trasmessa diminuisce con il quadrato della tensione. Per questo l'energia si produce a qualche decina di kilovolt, viaggia a centinaia di kilovolt e arriva nelle case a 230 V, dove tensioni più alte sarebbero pericolose. Inoltre la corrente alternata alimenta in modo semplice i motori a induzione, grazie al campo rotante di Ferraris e Tesla. Fu questa combinazione a far vincere la corrente alternata nella «guerra delle correnti» di fine Ottocento.

31. a) $N_1/N_2 = V_1/V_2 = 230\ \text{V}/5{,}0\ \text{V} = 46$. b) $P = 5{,}0\ \text{V} \cdot 2{,}0\ \text{A} = 10\ \text{W}$; $I_1 = 10\ \text{W}/230\ \text{V} = 0{,}043\ \text{A} = 43\ \text{mA}$. c) $I_0 = \sqrt{2} \cdot 0{,}0435\ \text{A} = 0{,}061\ \text{A} = 61\ \text{mA}$. Commento: nel cavo della presa passano poche decine di milliampere, quindi l'effetto Joule nel cavo è trascurabile anche con un filo sottile. Una stufetta da 2000 W a 230 V assorbe invece 8,7 A, circa 200 volte di più: a parità di cavo il calore sviluppato nei fili, proporzionale a I^2, sarebbe circa 40 000 volte maggiore, e un filo sottile si surriscalderebbe. Per questo i cavi degli apparecchi di grande potenza sono più grossi.