40. CORRENTE ALTERNATA

40.1. L'oscilloscopio

L'emissione di elettroni da un catodo incandescente trova un'applicazione importante nel cannone elettronico, che è una parte essenziale di un oscilloscopio. La Fig. 40.1 mostra un cannone elettronico costituito da un catodo riscaldato elettricamente e un anodo metallico carico positivamente in cui è stato praticato un piccolo foro (abbiamo tralasciato le parti del cannone elettronico che regolano l'intensità, la centratura e la focalizzazione del fascio). Il cannone elettronico è racchiuso in un contenitore di vetro in cui è stato fatto il vuoto spinto.

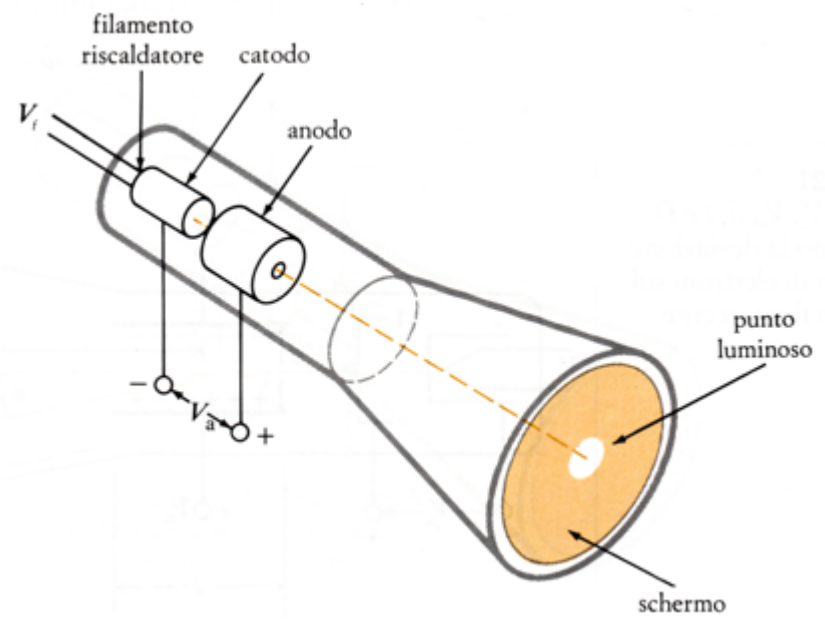

Fig. 40.1. Un cannone elettronico. L'anodo carico positivamente attrae gli elettroni dall'estremità del catodo incandescente. L'estremità destra del contenitore di vetro in cui è stato fatto il vuoto, lo schermo, è rivestito con una sostanza fluorescente che diventa luminosa quando viene colpita dal fascio di elettroni che ha attraversato il foro nell'anodo.

Benché la maggior parte degli elettroni che provengono dal catodo incandescente vada a urtare contro l'anodo, quelli che si muovono direttamente verso il foro lo attraversano e viaggiano mantenendosi nel fascio finché non incontrano qualche ostacolo. Un cannone elettronico siffatto produce un fascio di elettroni che si muovono dentro un oscilloscopio; esso viene usato anche in numerosi altri dispositivi, come tubi per raggi X, televisori, radar e monitor per elaboratori.

Supponiamo di inserire nel tubo due piccole placche metalliche orizzontali in modo che il fascio di elettroni passi fra esse (Fig. 40.2). Se una placca è carica positivamente e l'altra negativamente, gli elettroni vengono deviati verticalmente verso la placca positiva e colpiscono lo schermo fluorescente in un punto diverso (Fig. 40.2). Anche una sola pila per torcia elettrica collegata alle placche provoca una deviazione

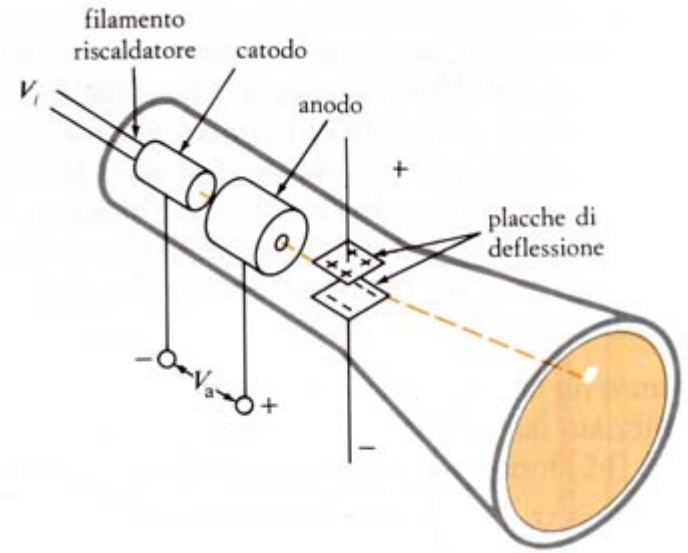

Fig. 40.2. Il cannone elettronico si può utilizzare come voltmetro collocando una coppia di placchette metalliche orizzontali davanti al foro dell'anodo. Se, per esempio, collochiamo una carica positiva sulla placchetta superiore e una carica negativa sulla placchetta inferiore, il fascio di elettroni verrà deflesso verso l'alto. La deviazione del punto luminoso rispetto al centro dello schermo fluorescente è una misura della carica sulle placchette e della differenza di potenziale fra di esse.

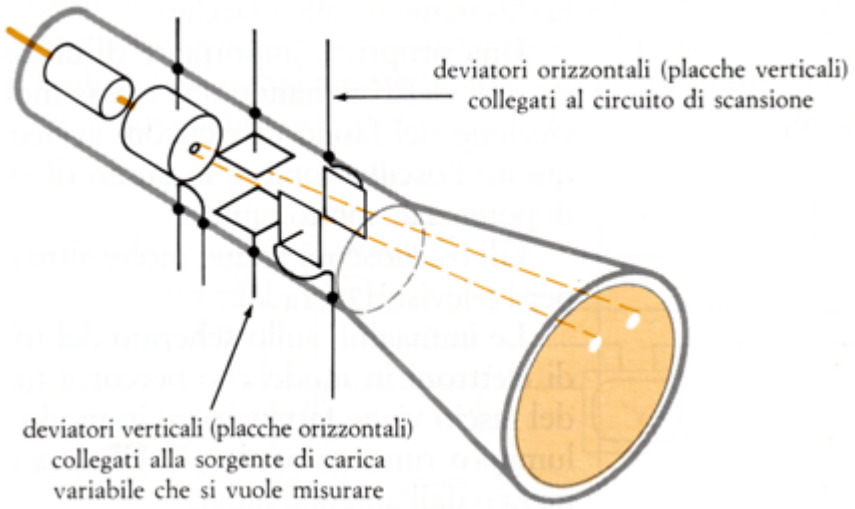

Fig. 40.3. Un tubo oscilloscopico contiene anche una coppia di placchette metalliche verticali per produrre una deviazione orizzontale del fascio di elettroni. Quando si collocano cariche su queste placchette, il punto luminoso si sposta orizzontalmente sullo schermo fluorescente del tubo.

visibile del punto luminoso sullo schermo; di conseguenza questo dispositivo può essere usato come voltmetro per misurare le differenze di potenziale.

Con una semplice aggiunta al tubo illustrato nella Fig. 40.2 di una seconda coppia di placche metalliche disposte in modo da deviare il fascio orizzontalmente (Fig. 40.3), otteniamo un oscilloscopio con cui possiamo studiare in modo particolareggiato come varia con il tempo una differenza di potenziale variabile.

Un apposito circuito, circuito di «scansione», posto nell'interno dell'oscilloscopio carica gradualmente questa coppia di placche, aumentando la differenza di potenziale fra esse e poi le scarica bruscamente, ricominciando a ricaricarle immediatamente dopo.

Durante questo processo di carica graduale il punto luminoso determinato dall'arrivo degli elettroni sullo schermo si sposta orizzontalmente attraverso lo schermo a velocità costante; poi, durante la scarica, il punto luminoso ritorna rapidamente al punto di partenza.

Fig.40.4.

Contemporaneamente, la prima coppia di placche produce una deviazione verticale corrispondente in ogni istante alla differenza di potenziale tra esse. Come conseguenza delle due deviazioni il punto luminoso traccia una curva che fornisce una rappresentazione grafica del modo in cui la differenza di potenziale tra le placche verticali varia in funzione del tempo (Fig. 40.4).

Alcuni oscilloscopi sono costruiti in modo che la differenza di potenziale che si vuole analizzare possa essere applicata direttamente alle placche deflettrici, se lo si ritiene opportuno; generalmente però la tensione viene applicata a un amplificatore la cui uscita è collegata alle placche deflettrici.

La sensibilità può così essere variata e si può rendere molto maggiore di quella che si ottiene quando la differenza di potenziale viene applicata direttamente alle placche.

Una proprietà importante di un oscilloscopio è la rapidità di risposta. Gli elettroni hanno una massa molto piccola e di conseguenza la deviazione del fascio di elettroni avviene pressoché istantaneamente. Per questo l'oscilloscopio è in grado di visualizzare variazioni di differenza di potenziale molto rapide.

L'oscilloscopio è uno strumento di misura elettronico che consente di visualizzare, su un grafico bidimensionale, l'andamento nel dominio del tempo dei segnali elettrici ed effettuare misure a lettura diretta di tensione (rappresentata sull'asse verticale) e periodo (con il tempo rappresentato sull'asse orizzontale). Per mezzo di un oscilloscopio analogico è possibile ricavare la misura di grandezze quali corrente, potenza ed energia del segnale, mentre un oscilloscopio digitale, grazie alla possibilità di memorizzare una forma d'onda campionata, permette di effettuarne una lettura diretta per mezzo di calcoli sui campioni in memoria. Generalmente l'oscilloscopio si utilizza per analizzare segnali periodici.

La frequenza massima dei segnali visualizzabili, così come la risoluzione temporale, ovvero la più rapida variazione rilevabile, dipende dalla banda passante dello strumento, a sua volta dipendente dalla

qualità e in ultima analisi dal costo. Si spazia dalle decine di MHz adatti per lavorare con segnali audio e televisivi, ai costosi modelli digitali da diversi GHz.

Può essere considerato uno strumento universale. Tramite opportuni trasduttori, si può analizzare qualsiasi fenomeno fisico, anche eventi casuali e non ripetitivi.

Fig. 40.5.

Un oscilloscopio classico (Fig. 40.5) è normalmente costituito da un scatola (*case*) rettangolare su cui è presente uno schermo e numerose manopole e pulsanti di comando. Allo schermo è sovrapposto un reticolo allo scopo di favorire la lettura dei dati. Ogni intervallo del reticolo è chiamato *divisione*: sull'asse orizzontale le divisioni sono solitamente 10, sull'asse verticale variano da 6 in su in funzione della geometria dello schermo. Questa modalità costruttiva è rimasta invariata per decenni fino all'avvento degli oscilloscopi digitali dotati di microprocessore, e di conseguenza in grado di poter installare a bordo veri e propri sistemi operativi i quali, uniti alla tecnologia degli schermi sensibili al tocco, hanno cambiato radicalmente l'aspetto e l'operatività di questo strumento.

I segnali da misurare o analizzare vengono prelevati tramite appositi connettori coassiali presenti sul pannello, la loro tipologia standardizzata varia in base alla frequenza del segnale in analisi, da BNC adatto per frequenze relativamente basse, o tipo N, utilizzato quando le frequenze in gioco sono più elevate, fino al tipo SMA, SMB ed altri, adatti a veicolare segnali con frequenze dell'ordine delle decine di GHz. Ai connettori d'ingresso possono essere collegate le sonde, accessori particolari usati per prelevare segnali dai circuiti studiati.

In modalità semplice, un punto luminoso percorre lo schermo da sinistra a destra a velocità costante, ridisegnando ripetutamente una linea orizzontale. La velocità di scansione è selezionabile per mezzo di una manopola presente sul pannello, la quale comanda il circuito chiamato *base dei tempi*: questo circuito genera precisi intervalli di tempo, che vanno da pochi secondi a qualche nanosecondo; i valori, espressi in unità di tempo per divisione, sono riportati sulla manopola.

In assenza di segnale, la traccia è solitamente al centro dello schermo, e l'applicazione di un segnale all'ingresso, provoca la deflessione verso l'alto o verso il basso, in funzione dalla polarità del segnale. La scala verticale è espressa in volt per divisione e può essere regolata da decine a millesimi di volt (sono comunque disponibili modelli in grado di effettuare misure dell'ordine dei microvolt). L'altezza iniziale del grafico (offset) può comunque essere decisa dall'utente, così come è possibile escludere la componente in corrente continua presente nel segnale in esame, nonché scegliere l'impedenza di ingresso.

In questo modo si ottiene la visualizzazione di un grafico di tensione in funzione del tempo. Se il segnale è periodico, è possibile ottenere una traccia stabile regolando la base dei tempi in modo da coincidere con la frequenza del segnale o un suo sottomultiplo. Per esempio, se si ha in ingresso un segnale sinusoidale a 50 Hz, si può regolare la base dei tempi in modo che una scansione orizzontale avvenga in 20 millisecondi. Questo sistema è chiamato *sweep continuo* (in italiano spazzata continua, nel senso di continuità di una funzione).

L'oscillatore della base dei tempi, non essendo sincronizzato con il segnale in analisi, impedisce di avere la traccia del segnale stabile e ferma, perciò questa, la si vedrà fluttuare sullo schermo più o meno velocemente da destra a sinistra o viceversa.

Per ottenere una traccia stabile gli oscilloscopi moderni dispongono di una funzione chiamata *trigger* (innesco): questo circuito, inventato nel 1946 dai due fondatori della società Tektronix, fa partire la scansione solo in corrispondenza del verificarsi di un evento sul segnale in ingresso, per esempio il superamento di una soglia di tensione positiva o negativa. Dopo avere completato la scansione da sinistra a destra, l'oscilloscopio rimane in attesa di un nuovo evento. In questo modo la visualizzazione rimane

sincronizzata al segnale e la traccia è perfettamente stabile. La soglia di sensibilità del trigger, così come altri parametri, è regolabile dall'utente.

Il circuito del trigger può essere configurato per mostrare una sola scansione di un segnale non periodico, come un singolo impulso o sequenze di impulsi non ripetitivi. È possibile introdurre un ritardo tra l'evento e l'inizio della visualizzazione, in modo da analizzare parti del segnale che altrimenti sarebbero fuori dal campo di visualizzazione.

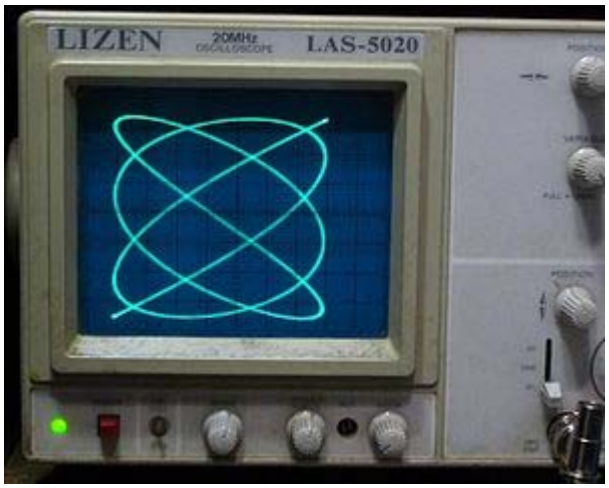

Fig 40.6.

Molti oscilloscopi permettono di escludere la base dei tempi e fornire all'asse orizzontale un segnale esterno: è la **modalità X-Y**, utile per visualizzare le relazioni di fase tra due segnali in ambito radiotelevisivo. Applicando due segnali sinusoidali in rapporto armonico di frequenza agli ingressi, sullo schermo vengono visualizzate particolari figure, chiamate figure di Lissajous (Fig. 40.6), con le quali è possibile conoscere i rapporti di fase e di frequenza tra essi.

Molti oscilloscopi hanno due o più ingressi verticali, consentendo di visualizzare diversi segnali contemporaneamente. Le regolazioni verticali sono separate mentre la base dei tempi ed il trigger è comune.

40.2. Produzione di corrente alternata con campi magnetici. Alternatori.

Le applicazioni dell'energia elettrica per forza motrice, illuminazione e riscaldamento sono oggi quasi totalmente fondate sulla utilizzazione delle correnti alternate.

Ciò deriva principalmente una certa semplicità delle relative macchine generatrici, e soprattutto dalla possibilità, insita nelle caratteristiche delle correnti alternate, di trasformare la corrente da bassa ad alta tensione, e viceversa, per mezzo di dispositivi di elevato rendimento, quali sono i trasformatori statici.

Le macchine generatrici di corrente alternata, chiamate comunemente *alternatori*, si basano concettualmente sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica e furono realizzate subito dopo la scoperta di Faraday del 1831.

Per comprendere il principio del funzionamento di un alternatore, consideriamo una spira rigida di area *A* ruotante con velocità angolare ω costante intorno a un asse *aa'* all'interno di un campo magnetico uniforme, di induzione **B** (Fig. 40.7).

Gli estremi della spira sono collegati a due anelli *C* e *C'*, detti collettori, sui quali poggiano due spazzole (di carbone) che rappresentano i poli del generatore. Le spazzole strisciano sui collettori che ruotano insieme alla spira.

Sappiamo già che dalla rotazione di una spira in un campo magnetico si origina una corrente indotta, se la spira fa parte di un circuito chiuso, e in ogni caso una f.e.m. indotta. Nel nostro esempio, la f.e.m.

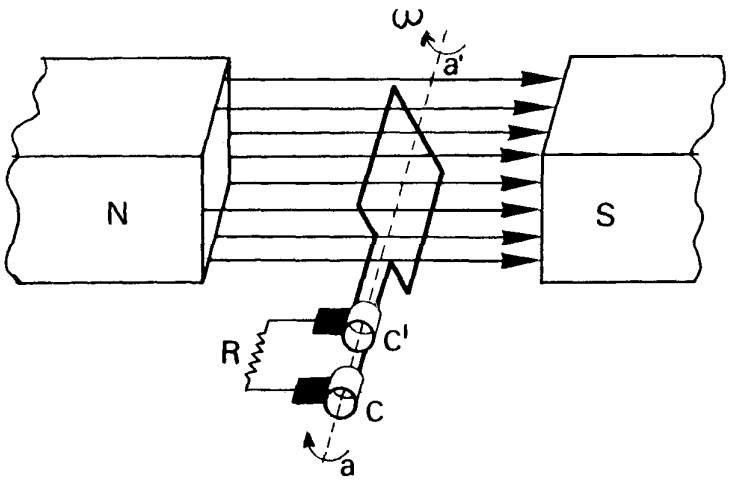

Fig. 40.7. Schema di alternatore. Facendo ruotare una spira in un campo magnetico uniforme si ottiene energia elettrica a spese dell'energia meccanica impiegata per far ruotare la spira.

indotta è la d.d.p. tra le spazzole; collegando queste in modo da avere un circuito chiuso si produce una corrente. In altri termini, la spira in rotazione è generatore di tensione i cui poli sono le spazzole. Vogliamo ora esaminare f.e.m. indotta da un punto di vista quantitativo. Consideriamo inizialmente la spira orientata come in Fig.40.8(*a*), cioè perpendicolarmente alle linee di forza del campo magnetico. Inoltre, la normale al piano della spira è orientata nello stesso verso del campo magnetico, in modo che il flusso del campo magnetico, concatenato col circuito della spira, assuma il valore massimo $\Phi_{max}(\mathbf{B}) = B \cdot A$. Dopo che la spira ha descritto un quarto di giro (Fig. 40.8(*b*)), il flusso è nullo, in quanto la spira è parallela alle linee di forza del campo magnetico, per cui essa non è attraversata da alcuna linea di forza. Il tempo impiegato perché la spira descriva un quarto di giro, cioè un angolo uguale a $\pi/2$, è $\pi/2\omega$, che si ricava dalla relazione $\pi/2 = \omega \cdot t$ tra angolo, velocità angolare e tempo. Pertanto, nel primo quarto di giro, cioè nell'intervallo di tempo $t = \pi/2\omega$ dall'istante iniziale, il flusso dell'induzione magnetica diminuisce da $\Phi_{max} = B \cdot A$ a zero.

Nel secondo quarto di giro, poiché le linee di forza entrano dalla faccia della spira opposta a quella precedente, il flusso diminuisce ulteriormente da zero fino a $-\Phi_{max} = -B \cdot A$ (Fig. 40.8(*c*)). Il flusso diventa $-B \cdot A$ dopo un tempo *t* tale da aversi $\pi = \omega \cdot t$, cioè dopo un tempo uguale a π/ω.

Da questo istante, il flusso inizia ad aumentare, variando da $-B \cdot A$ a zero nel terzo quarto di giro (Fig.40.8(*d*)) per raggiungere alla fine dell'ultimo quarto di giro, cioè dopo una rotazione di 2π, il valore iniziale $\Phi_{max} = B \cdot A$ (Fig. 40.8(*e*)). Il tempo complessivamente impiegato a compiere un giro completo è il periodo del moto rotatorio $T = 2\pi/\omega$.

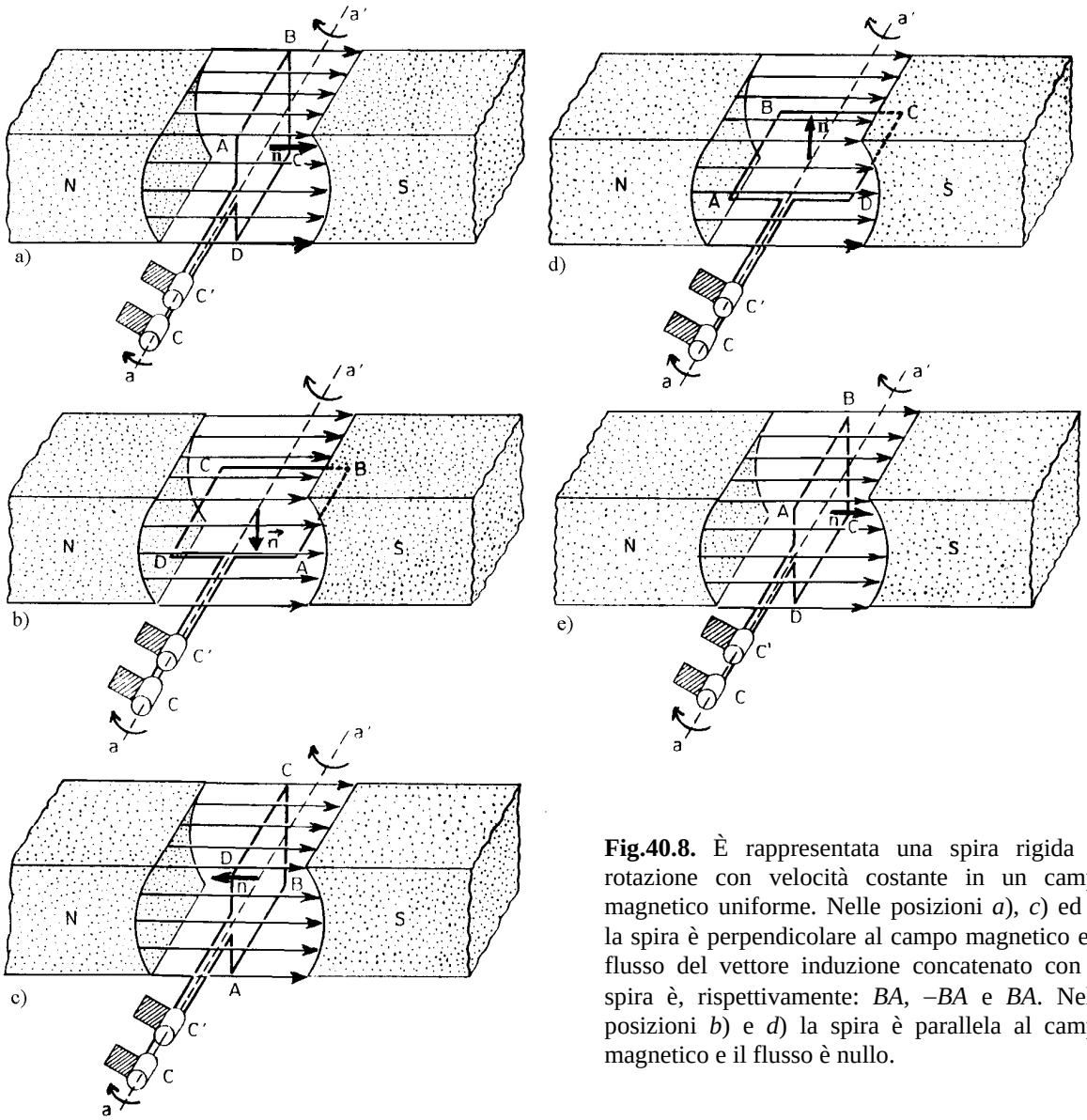

Fig.40.8. È rappresentata una spira rigida in rotazione con velocità costante in un campo magnetico uniforme. Nelle posizioni *a*), *c*) ed *e*) la spira è perpendicolare al campo magnetico e il flusso del vettore induzione concatenato con la spira è, rispettivamente: *BA*, *–BA* e *BA*. Nelle posizioni *b*) e *d*) la spira è parallela al campo magnetico e il flusso è nullo.

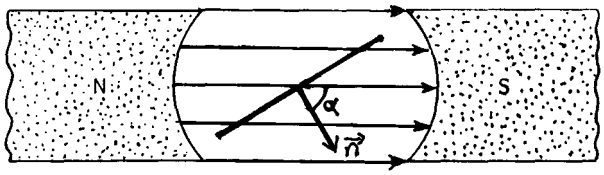

Fig. 40.9. È rappresentata la spira in rotazione della figura precedente, vista di fianco. L'angolo α di rotazione della spira è anche l'angolo tra la normale al suo piano e il vettore **B**.

In Fig. 40.9 è rappresentata la spira di fianco, dopo che è ruotata, a partire dalla posizione iniziale, di un angolo generico α; se il tempo impiegato per questa rotazione è t, risulta $\alpha = \omega \cdot t$.
Poiché l'angolo α di cui è ruotata la spira è anche l'angolo formato dalla normale alla spira col vettore **B**, il flusso dell'induzione magnetica concatenato con la spira è $\Phi(\mathbf{B}) = BA\cos\alpha$, cioè:

[40.1] $$\Phi(\mathbf{B}) = BA\cos\omega t$$

La [40.1] ci permette di calcolare il flusso concatenato con la spira dopo un tempo t generico. Come casi particolari per $t = 0$, $\pi/2\omega$, π/ω, $3\pi/2\omega$, $2\pi/\omega$, si hanno le cinque posizioni già considerate nella Fig. 40.8, in corrispondenza delle quali il flusso è $B{\cdot}A$, 0, $-B{\cdot}A$, 0 e $B{\cdot}A$ rispettivamente.

La f.e.m. indotta nella spira si calcola, per la legge di Faraday-Neumann-Lenz, come derivata cambiata di segno del flusso $\Phi(\mathbf{B})$ concatenato con la spira in un istante t generico. Perciò, la f.e.m. indotta è:

[40.2] $$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi(\mathbf{B})}{dt} = -\frac{d}{dt}(BA\cos\omega t) = \omega BA\sin\omega t$$

che si può così riscrivere

[40.3] $$\varepsilon_i = \varepsilon_0 \sin\omega t$$

in cui $\varepsilon_0 = \omega BA$ è il massimo valore della f.e.m.

Si produce quindi tra le due estremità della spira, cioè tra i due collettori C e C', una d.d.p. variabile sinusoidalmente nel tempo, chiamata **f.e.m. alternata**.

Nella Fig. 40.10 sono rappresentati in funzione del tempo sia il flusso magnetico concatenato con la spira che la f.e.m. alternata indotta.

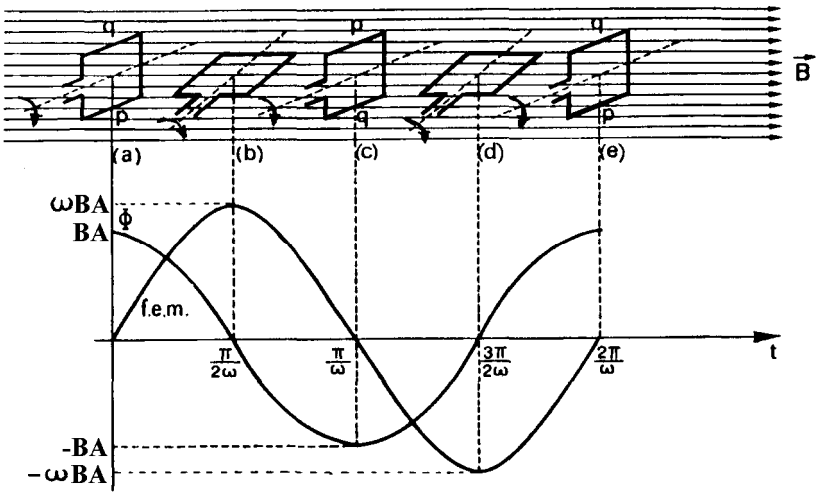

Fig. 40.10. In corrispondenza dell'orientazione della spira nel campo magnetico uniforme **B**, sono rappresentati in un diagramma il flusso Φ e la f.e.m. in funzione del tempo t. In particolare, quando Φ è massimo o minimo, la f.e.m. è nulla; quando invece Φ è nullo la f.e.m. è massima o minima.

Si può osservare che, ogniqualvolta il piano della spira passa per la posizione verticale, in cui la giacitura è chiamata anche *piano d'inversione*, la f.e.m. si inverte di segno. Le spazzole a contatto con i collettori sono perciò alternativamente positive e negative e cambiano polarità dopo mezzo periodo.

Per alimentare un circuito esterno è sufficiente inserirlo tra le due spazzole. Per un circuito ohmico, detta R la resistenza totale, si ha una corrente, anch'essa alternata, d'intensità $i = \varepsilon/R$, cioè del tipo:

[40.4] $$i_i = i_0 \sin\omega t$$

in cui $i_0 = \varepsilon_0 / R$ è il valore massimo dell'intensità di corrente. La velocità angolare ω della spira che ruota, detta anche **pulsazione**, è legata alla **frequenza** ν e al periodo T della f.e.m. e dell'intensità di corrente dalla relazione:

[40.5] $$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$$

Finora abbiamo spiegato il principio di funzionamento dei dispositivi che producono tensioni alternate. Gli alternatori utilizzati su scala industriale per la produzione dell'energia elettrica differiscono solo tecnicamente da quello schematizzato con una singola spira in rotazione in un campo magnetico uniforme.

40.3. Valori efficaci.

A volte le correnti alternate che si utilizzano differiscono anche notevolmente dalle correnti sinusoidali descritte sinora, anche se queste ultime sono le più usate. Si possono ottenere vari tipi di c.a., ma in ogni caso si puntualizza che, oltre ad essere periodiche, devono godere della proprietà che la somma dei valori istantanei in un periodo è zero, cioè devono essere a valor medio nullo:

[40.6] $$i_{medio} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t)dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_0 \sin(\omega t)dt = 0$$

Poiché il valore istantaneo di una corrente o di una tensione alternata varia nel tempo, dobbiamo definire per esse un parametro che caratterizza in pratica la grandezza in esame.

La potenza elettrica dissipata in un resistore con resistenza R è $R \cdot i^2$ e non dipende dal verso in cui fluisce la corrente: la stessa potenza elettrica è dissipata sia da una corrente $+i$ sia da una corrente $-i$. Se la corrente è alternata, per calcolare la potenza dissipata sotto forma di calore in un resistore si deve tenere conto del fatto che l'intensità della corrente (o, più correttamente, il valore di i^2) varia nel tempo, perciò si deve calcolare la potenza media P_m (*). Se si vuole il valore medio di i^2:

[40.7] $$\left(i^2\right)_{medio} = \left(i_0^2 \sin^2(\omega t)\right)_{medio}$$

dove la media deve essere calcolata su un intero periodo.

Si può dimostrare matematicamente (o si può vedere nella Fig. 40.11) che il valore medio del quadrato di una funzione seno o coseno è $\frac{1}{2}$ (data la simmetria). Perciò

[40.8] $$\left(i^2\right)_{medio} = \frac{1}{2} i_0^2 .$$

Estraendo la radice quadrata di $\left(i^2\right)_{medio}$ si ottiene il **valore quadratico medio** $i_{qm} = \sqrt{\left(i^2\right)_{medio}}$, chiamato più comunemente **valore efficace** $i_{eff} = i_{qm} = \sqrt{\left(i^2\right)_{medio}}$, dell'intensità di corrente. Il valore efficace dell'intensità di corrente alternata equivale al valore dell'intensità di corrente continua che avrebbe lo stesso effetto termico fluendo nello stesso resistore di resistenza R. Perciò l'intensità efficace della corrente alternata è:

[40.9] $$i_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} i_0 = 0.707 \cdot i_0 .$$

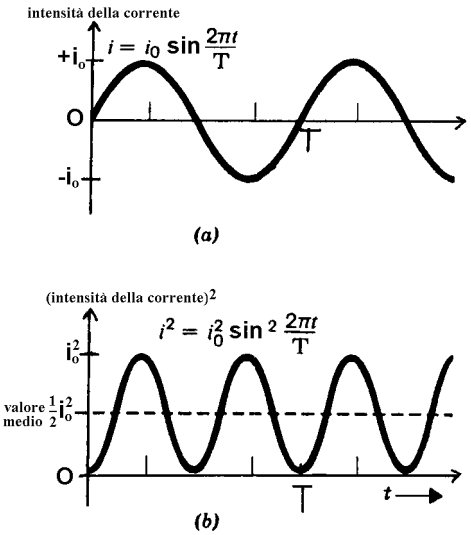

Fig. 40.11. (*a*) L'intensità della corrente elettrica alternata che fluisce attraverso un resistore varia nel tempo con andamento sinusoidale. (*b*) Il quadrato dell'intensità della corrente alternata è sempre positivo ed ha un valore medio pari a $\frac{1}{2} i_0^2$.

(*) Per la potenza media si deve tener conto che $P_m = \left(R \cdot i^2\right)_m = R \cdot \left(i^2\right)_m$

Quindi la potenza media dissipata è:

[40.10] $$P_m = R \cdot i_{eff}^2 = \frac{1}{2} R \cdot i_0^2 .$$

Anche la tensione ai capi del resistore è soggetta ad una variazione sinusoidale, e quindi:

[40.11] $$V_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_0 = 0.707 \cdot V_0 .$$

La corrente alternata che alimenta gli ordinari impianti elettrici domestici ha V_0 = 310 V e quindi la tensione efficace è V_{eff} = 220 V. Ecco perché si parla di "linea a 220 V".

Usando la legge di Ohm la [40.10] si può riscrivere nel seguente modo:

[40.12] $$P_m = \frac{V_{eff}^2}{R} = \frac{1}{2}\frac{V_0^2}{R} = \frac{1}{2} i_0 V_0 .$$

Gli strumenti di misura in c.a. sfruttano l'effetto termico della corrente che, dipendendo da i^2, non dipende dal verso della corrente.

Esempio

Qual è il valore massimo della intensità della corrente alternata che determina una dissipazione di potenza di 60 W in una lampada elettrica che ha una resistenza di 100 Ω?
Soluzione:

$$i_0 = \sqrt{\frac{2P}{R}} = \sqrt{\frac{2 \times 60\,\text{W}}{100\,\Omega}} = 1.1\,\text{A}$$

Quesiti

40.1. Un riscaldatore a filo di nichelcromo con una resistenza di 21 Ω (a 1000 °C) è collegato ad una presa dell'impianto elettrico domestico. Se il riscaldatore opera alla temperatura di funzionamento (1000 °C), quanta potenza viene dissipata?

40.2. Negli Stati Uniti, prima che la frequenza della corrente alternata venisse standardizzata a 60 Hz, alcune centrali elettriche generavano corrente a 25 Hz. Considerando il funzionamento di una lampadina a incandescenza, suggerisci un motivo per cui fu scartata la frequenza più bassa.

40.3. L'indotto di un generatore di corrente alternata ruota con una velocità angolare di 12 s^{-1} e la corrente che attraversa R risulta avere un'intensità di 4 A. Quale sarà l'intensità della corrente se la velocità di rotazione viene aumentata a 30 s^{-1}?

40.4. Un televisore a colori assorbe un'intensità di corrente di 2 A da un ordinario impianto elettrico domestico (220 V, c.a.). Se il televisore è fatto funzionare in media 4 h al giorno, qual è il costo di funzionamento mensile se l'energia elettrica costa 0.13 €/kWh?

40.5. Un riscaldatore elettrico ha una potenza nominale di 1400 W ed è alimentato da una linea a corrente alternata a 220 V. Qual è la resistenza del riscaldatore?

40.4. Il trasformatore.

La potenza dissipata in un carico resistivo in corrente continua è data dalla relazione $P = i \cdot V$. Ciò significa che per realizzare una determinata potenza vi è una grande varietà di scelte, da correnti relativamente grandi associate a differenze di potenziale relativamente piccole fino alla situazione opposta, purché il prodotto della corrente e della differenza di potenziale resti costante. Analogamente per circuiti a corrente alternata la potenza media dissipata è data dalla eq. $P_m = i_{eff} \cdot V_{eff}$ e si può ripetere lo stesso discorso riguardo ai valori relativi di i_{eff} e V_{eff} (supponiamo che il carico sia puramente resistivo).

È evidente che nei sistemi di distribuzione di potenza elettrica è preferibile aver a che fare con differenze di potenziale relativamente basse sia in produzione (impianto elettrico di potenza) che in ricezione (case, industrie), sia per motivi di sicurezza che per motivi tecnici di progettazione. Per esempio nessuno acquisterebbe un tostapane elettrico o un trenino elettrico per i bambini che funzionassero a 10kV, tanto per dire.

D'altronde nella trasmissione di energia elettrica dall'impianto di produzione all'utenza si ricerca la minima corrente possibile (e quindi la massima differenza di potenziale possibile) allo scopo di minimizzare le dissipazioni di potenza ohmiche $R \cdot i^2$ lungo la linea di trasmissione. Un valore come V_{eff} = 350 kV non è inconsueto. In sostanza vi è un contrasto tra le esigenze di una trasmissione efficiente da un lato e dall'altro di una produzione e utilizzazione sicure. Quindi per le esigenze tecniche della progettazione è necessario un dispositivo che possa aumentare o diminuire la differenza di potenziale in un circuito mantenendo praticamente costante il prodotto $i \cdot V$.

Tale dispositivo è il trasformatore di corrente alternata della Fig. 40.12. Non vi è per la corrente continua un dispositivo corrispondente altrettanto semplice. In Fig. 40.12 si mostrano due avvolgimenti solenoidali attorno ad un nucleo di ferro dolce. L'avvolgimento *primario*, con N_1 spire, è collegato ad un generatore di corrente alternata la cui f.e.m. $\varepsilon(t)$ è data da $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin \omega t$. L'avvolgimento *secondario*, con N_2 spire, è un circuito aperto finché l'interruttore S è aperto, come supponiamo per ora. Quindi non c'è corrente secondaria. Ammettiamo inoltre che le resistenze degli avvolgimenti primario e secondario e anche le «perdite» magnetiche nel nucleo di ferro siano trascurabili. Per evitare che nel nucleo nascano forti correnti indotte, provocate dalla variazione di flusso, esso viene realizzato con lamelle di ferro "dolce" (cioè ferro abbastanza puro), isolate elettricamente una dall'altra di solito con una vernice isolante. L'ottimo infatti sarebbe che il nucleo fosse costituito da materiale ferromagnetico, ma non conduttore di elettricità, onde evitare queste *correnti parassite* (dette anche correnti di Foucault) che riscaldano il trasformatore e quindi dissipano energia. In pratica, se sono ben progettati, trasformatori di grande efficienza possono presentare perdite di energia dell'ordine dell'1%, per cui la nostra ipotesi di un trasformatore ideale non è irrealistica.

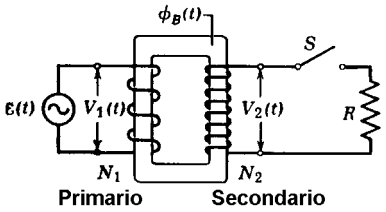

Fig. 40.12. Un trasformatore ideale con due avvolgimenti attorno allo stesso nucleo di ferro dolce.

Nelle suddette ipotesi l'avvolgimento primario è puramente induttivo.

Supponiamo ora che nell'avvolgimento primario circoli corrente alternata. Questa corrente genera entro il nucleo un campo magnetico alternato, che interessa sia il primario sia il secondario. Le variazioni di flusso, e quindi le f.e.m. efficaci V_1 e V_2 che insorgono nel primario e nel secondario, saranno proporzionali al rispettivo numero di spire N_1 e N_2 dei due avvolgimenti. (Questo purché il flusso disperso sia nullo, e quindi l'intensità di **B** sia uguale in ogni punto del circuito magnetico.) Osserviamo che la f.e.m. V_1 ha il carattere di una *forza contro-elettromotrice*, in quanto si deve ad essa il fatto che il primario non mette in corto circuito la linea di alimentazione, cosa che avverrebbe se il primario stesso fosse invece alimentato in corrente continua, poiché la sua resistenza ohmica è molto bassa. (Per comprendere questo punto, si pensi di voler impedire ad una batteria di entrare in corto circuito quando i suoi due poli vengono collegati direttamente con un grosso filo di rame. Per evitare ciò, si può inserire un'altra batteria con le polarità opposte, la quale agirà da forza contro-elettromotrice rispetto alla prima.)

Esprimiamo ora il valore delle due f.e.m. indotte. Il flusso che attraversa il primario vale $N_1B(t)A$, mentre il flusso che attraversa il secondario allo stesso istante vale $N_2B(t)A$. (Con A si intende ovviamente l'area abbracciata da una spira.) Quindi possiamo scrivere:

[40.13*a*] $$V_1(t) = -N_1 A(\Delta B(t)/\Delta t);$$

[40.13*b*] $$V_2(t) = -N_2 A(\Delta B(t)/\Delta t).$$

Dalle [40.13] si ricava:

[40.14] $$\frac{V_1(t)}{V_2(t)} = \frac{N_1}{N_2}$$

da cui ovviamente:

[40.15] $$\frac{V_{1eff}}{V_{2eff}} = \frac{N_1}{N_2}.$$

È questa una relazione fondamentale del trasformatore, valida a rigore solo quando nel secondario non circola corrente (infatti, nelle considerazioni viste sopra non si è mai fatto intervenire l'effetto della corrente i_2, che pure sotto carico vi sarebbe). Ricordiamo infine, sebbene forse non occorrerebbe, che un trasformatore può funzionare indifferentemente in un senso o nell'altro, a seconda che si voglia abbassare od elevare la tensione. Per cui riscrivendo la [40.15] come

[40.16] $$V_{2eff} = (N_2/N_1)V_{1eff}.$$

Se $N_2 > N_1$, lo diremo *trasformatore amplificante*; se $N_2 < N_1$ lo diremo *trasformatore riducente*.

Finora abbiamo supposto che il circuito secondario fosse aperto e di conseguenza non ci fosse trasmissione di potenza nel trasformatore. Però se ora chiudiamo l'interruttore S, realizziamo una situazione più pratica in cui l'avvolgimento secondario è collegato ad un carico resistivo *R* (Fig. 40.12). Nel caso più generale il carico dovrebbe contenere anche elementi induttivi e capacitivi, ma ci limitiamo a questo caso particolare.

Se non vi sono dissipazioni di energia, la potenza che entra nel primario è la stessa che si ha al secondario (principio di conservazione dell'energia). Naturalmente, questa è una condizione ideale, che trascura il riscaldamento del ferro e delle resistenze:

[40.17] $$V_{1eff} \cdot i_{1eff} = V_{2eff} \cdot i_{2eff}.$$

Per cui in un trasformatore ideale con carico resistivo, combinando la [40.15] con la [40.17], si ottiene:

[40.18] $$\frac{i_{1eff}}{i_{2eff}} = \frac{N_2}{N_1}$$

che è la relazione di trasformazione per le correnti.

Quesiti

40.6. Un trasformatore serve per abbassare la d.d.p. di rete (220 V) a 6.3 V. Se il primario è costituito da 500 spire, quante dovranno essere le spire del secondario?

40.7. Un trasformatore installato in una centralina funziona a V_1 =8.0 kV nel primario e distribuisce energia elettrica ad un certo numero di case vicine, a V_2 =120 V.
(*a*) Quanto vale il rapporto N_1/N_2 tra il numero di spire del primario e del secondario?
(*b*) Se il consumo medio di potenza nelle case in un certo periodo di tempo è 70 kW, quanto valgono le correnti quadratiche medie (valori efficaci delle correnti) negli avvolgimenti primario e secondario del trasformatore? Si assuma un trasformatore ideale e un carico resistivo.
(*c*) Quanto vale il carico resistivo equivalente *R* del circuito secondario? [R.67;0.58kA;8.8A;0.21Ω]

40.8. Un trasformatore ha un avvolgimento primario di 500 spire e uno secondario di 10 spire.
(*a*) Se la V_1 del primario è 120 V (valore quadratico medio), quanto vale V_2 per il secondario se esso è a circuito aperto?
(*b*) Se ora il secondario è collegato ad un carico resistivo di 15 Ω, quanto valgono i_1 e i_2?

40.5. Trasporto di energia a distanza.

Lo schema di utilizzazione nella rete prevede il trasporto dell'energia elettrica a grandi distanze mediante linee elettriche come quelle che vedete nelle campagne.

Ora, se l'alternatore fornisce una corrente i alla *tensione* V, la potenza in gioco è $V \cdot i$, perché la carica $i \cdot \Delta t$ viene trasportata attraverso la tensione V nel tempo Δt. Ma, se la linea elettrica (che è lunga!) ha resistenza R, una parte di questa potenza va perduta nella linea sotto forma di calore a causa dell'effetto Joule: la potenza perduta è $R \cdot i^2$. Quindi, all'utilizzatore arriva una potenza

[40.19] $$P_{ut} = V \cdot i - R \cdot i^2 .$$

È evidente la convenienza di utilizzare basse resistenze, cioè usare buoni conduttori di diametro quanto più grande possibile; ma, soprattutto, bisogna mettersi in condizioni di lavorare con alte tensioni e basse correnti, perché aumentando V e diminuendo i si può mantenere costante il prodotto $V \cdot i$ e fare diminuire molto, invece, il termine $R \cdot i^2$. Questa è la ragione della convenienza di avere linee ad *alta tensione* per il trasporto della corrente dalle centrali elettriche ai luoghi di utilizzazione.

Per ottenere un trasporto di energia in linee ad alta tensione, si usa uno schema come quello mostrato nella Fig. 40.13, in cui un trasformatore "di salita" porta la tensione del generatore dal valore "basso" in ingresso a quello "alto" della linea; poi, un trasformatore "di discesa" fa l'operazione inversa per l'immissione in uscita nella rete di utilizzazione cittadina.

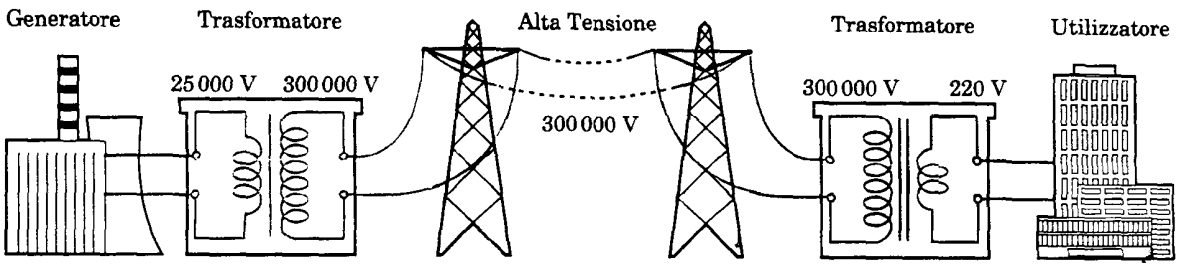

Fig. 40.13. Dalla centrale alla città, con una linea ad alta tensione. Con la linea ad alta tensione si riduce lo spreco di energia sotto forma di calore dissipato per effetto Joule.

Quesiti

40.9. Quale deve essere al massimo la resistenza di una linea elettrica perché ad una potenza di ingresso di 200 MW alla d.d.p. di 45 kV corrisponda una potenza di uscita di 180 MW? [1Ω]

40.10. Rifacendosi al caso precedente: se la linea è lunga 100 km, e viene usato un conduttore di rame, quale deve essere la sezione del conduttore, per ottenere il risultato richiesto? La resistività del rame a 20 °C è 1.7×10^{-8} Ω·m. [R. 0.17 dm^2]

40.11. Un generatore di corrente alternata fornisce potenza ad un carico resistivo ad una lontana fattoria tramite una linea di trasmissione a due cavi. Nella fattoria un trasformatore riduce la differenza di potenziale dal suo valore (quadratico medio) V_t di trasmissione ad un valore molto più basso, non pericoloso e adatto per l'uso che se ne vuol fare. La resistenza della linea di trasmissione è di 0.30 Ω/cavo e la potenza fornita alla fattoria 250 kW (potenza dell'alternatore). Calcolare la caduta di tensione lungo la linea di trasmissione e la potenza dissipata nella linea sotto forma di energia termica. Si assuma: (*a*) V_t = 80 kV, (*b*) V_t = 8.0 kV e (*c*) V_t = 0.80 kV e si discuta l'accettabilità di ciascuna scelta. [R. (*a*) 1.9 V, 5.9 W; (*b*) 19 V, 0.58 kW; (*c*) 0.19 kV, 58 kW]

40.12. La tensione d'uscita massima di un certo generatore di corrente alternata installato in una centrale elettrica è 100000 V. L'energia elettrica è convogliata ad una rete di distribuzione agli utenti per mezzo di una linea di trasporto che ha una resistenza di 4 Ω e porta un'intensità di corrente massima di 100 A. (*a*) Qual è la potenza media erogata dal generatore? (*b*) Quale percentuale della potenza erogata va perduta per riscaldamento per effetto Joule nella linea di trasporto?
[R. (*a*) 5 MW; (*b*) 0.4%]

40.6. Produzione dl corrente continua con campi magnetici. Dinamo

I generatori di corrente continua per mezzo di campi magnetici sono le **dinamo**, il cui primo modello fu ideato da Pacinotti (1859). Il prototipo di dinamo realizzato da Pacinotti era un completamento dei dispositivi, costruiti subito dopo la scoperta dell'induzione elettromagnetica, che davano a differenza degli alternatori, una **corrente unidirezionale**, avente sempre la stessa polarità, anche se non d'intensità rigorosamente costante.

Per capire il funzionamento tali dispositivi, osserviamo che nell'alternatore (Fig. 40.14) i collettori *C* e *C'*, e quindi anche le spazzole, cambiano polarità nell'istante in cui la spira è perpendicolare al campo magnetico. Perciò, se riusciamo in qualche modo a cambiare le connessioni delle due spazzole con i collettori nello stesso istante si ottiene una f.e.m. avente la stessa polarità.

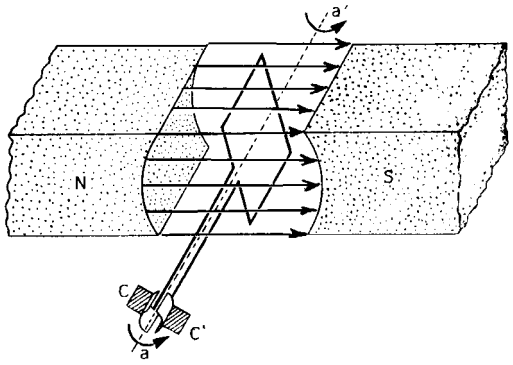

Fig. 40.14. Nello stesso istante in cui i due collettori *C* e *C'*, costituiti da due semianelli, cambiano polarità, s'invertono i collegamenti con le spazzole che di conseguenza sono sempre una positiva e l'altra negativa.

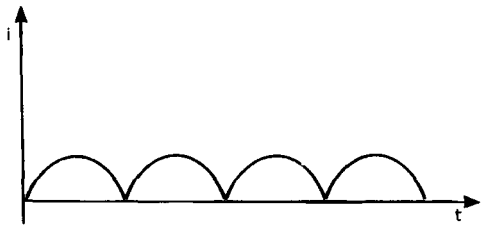

Fig. 40.15. Rappresentazione della corrente pulsante ottenuta in un circuito inserito fra le spazzole del dispositivo precedente.

Si raggiunge tale obiettivo costruendo il collettore con due semianelli (Fig. 40.14) che sono alternativamente positivi e negativi cambiando polarità, come gli anelli del collettore dell'alternatore, ogni mezzo periodo, nell'istante in cui la spira passa per il piano d'inversione. Nello stesso istante, però, le spazzole invertono il collegamento con i semianelli, conservando perciò sempre la stessa polarità. In un circuito esterno inserito tra le due spazzole si ha allora una corrente unidirezionale, ma d'intensità variabile, detta anche **corrente pulsante**, rappresentata in Fig. 40.15. Si intuisce come, dalla sovrapposizione di correnti pulsanti che raggiungono i valori massimi e minimi in istanti, diversi, e quindi opportunamente sfasate, si possa ottenere con buona approssimazione una corrente continua.

È quello che si realizza con l'anello di Pacinotti sul quale sono avvolte molte bobine collegate in serie (Fig. 40.16). Le bobine avvolte sull'anello sono metallicamente a contatto con altrettante lamelle di rame isolate tra loro e disposte su una superficie cilindrica che costituisce il collettore della dinamo. L'indotto costituito dall'anello con le bobine e dal collettore ruota nel campo magnetico prodotto da un elettromagnete di cui in figura sono visibili i poli Nord e Sud. La somma delle f.e.m. indotte prodotte nelle bobine viene prelevata da due spazzole *S* e *S'* sulle quali striscia il collettore in rotazione. La Fig. 40.17 rappresenta, in funzione del tempo, tre f.e.m. pulsanti e la loro somma. In pratica, con l'aumentare delle bobine la f.e.m. totale diventa con buona approssimazione costante.

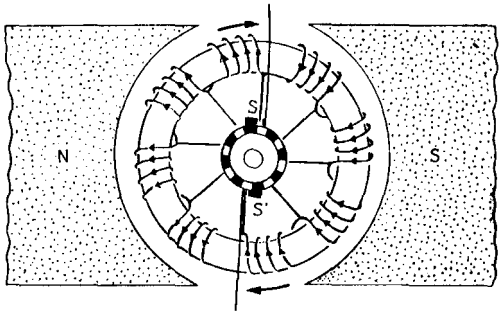

Fig. 40.16. Anello di Pacinotti in rotazione in un campo magnetico.

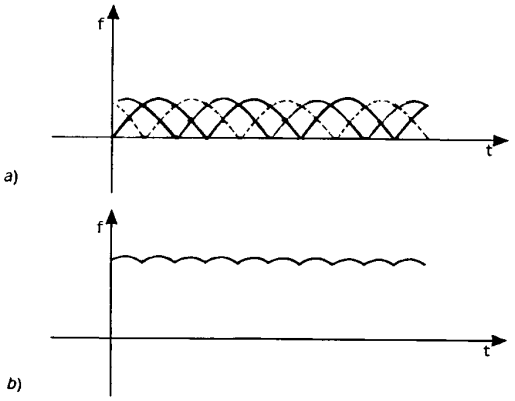

Fig. 40.17. (*a*) Rappresentazione delle f.e.m. indotte in tre bobine di un anello, di Pacinotti. (*b*) Andamento della f.e.m. risultante.

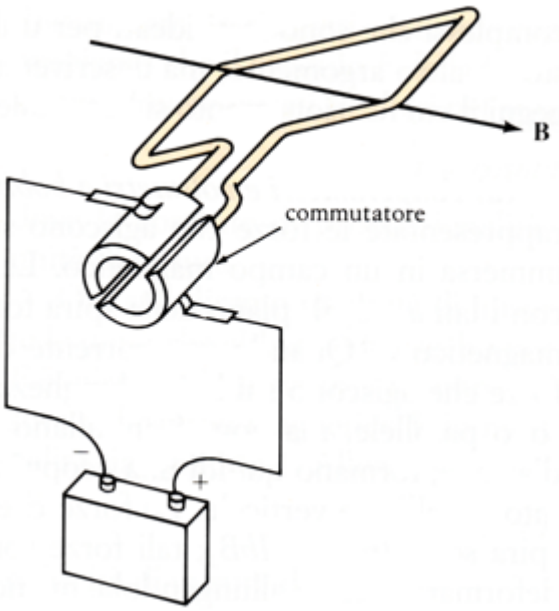

Fig. 40.18. Un motore elettrico a corrente continua è dotato di un commutatore che inverte il verso della corrente ogni mezzo giro.

40.7. Motori elettrici

Finora abbiamo visto come si può produrre corrente alternata con gli alternatori o corrente "quasi continua" con l'anello di Pacinotti o con la dinamo. In questi dispositivi l'energia meccanica viene trasformata in energia elettrica.

Se nella macchina elettrica schematizzata in Fig. 40.8 o in quella di Fig. 40.14 si collegano i collettori *C* e *C'* a un generatore di f.e.m. rispettivamente alternata o continua si realizza un motore elettrico cioè una macchina in grado di trasformare energia elettrica in energia meccanica. Un motore elettrico contiene una bobina mobile, percorsa da corrente e immersa in un forte campo magnetico.

Il campo magnetico di un motore a corrente continua può essere fornito da un magnete permanente oppure da un elettromagnete, costituito da una bobina percorsa da corrente e contenente al suo interno un nucleo di ferro. La bobina, montata su un asse, è immersa in un campo magnetico (Fig. 40.18). Se la corrente percorresse la bobina sempre nello stesso verso, la bobina non continuerebbe a ruotare, ma raggiungerebbe una posizione di equilibrio. Il motore a corrente continua è invece dotato di un congegno (il commutatore di Fig. 40.18 costituito da due semianelli) per invertire il verso della corrente nella bobina ogni mezzo giro. La bobina ruota per mezzo giro, poi la corrente si inverte e la bobina ruota per un altro mezzo giro, e così via.

I motori reali non hanno un'unica bobina, ma contengono un gruppo di bobine disposte in modo da generare forze in grado di produrre un effetto continuo (in maniera analoga a quello che avviene nell'anello di Pacinotti). Inoltre, le bobine sono avvolte intorno a un nucleo di ferro per aumentare il campo magnetico.

Da notare che contrariamente agli alternatori e all'anello di Pacinotti che si basano sulla induzione elettromagnetica, nei motori elettrici il campo magnetico serve per generare il momento torcente che fa ruotare il dispositivo.

Quesiti

40.13. (*a*) Qual è la posizione della bobina nella Fig. 40.18 rispetto al campo magnetico quando il commutatore inverte il verso della corrente nella bobina?
(*b*) Perché si deve invertire il verso della corrente nella bobina?

40.14. Come si potrebbe invertire il verso di rotazione della bobina del motore a corrente continua illustrato nella Fig. 40.18?