Corrente alternata

- La corrente si dice **alternata** (AC, ‘alternate current’); se il suo **verso di percorrenza nel circuito cambia periodicamente nel tempo**
- dunque a differenza della corrente continua (DC, ‘direct current’), la **corrente alternata non ha una polarità definita e un verso definito**
- Molti **usi comuni dell’energia elettrica si basano sulla corrente AC**; ad esempio la corrente proveniente dalle centrali elettriche che alimenta abitazioni, uffici, industrie, luoghi di lavoro è sempre AC
- Nella **rete cittadina l’intensità varia sinusoidalmente nel tempo**; per le reti europee la **frequenza è 50 Hz,** ovvero la corrente compie 50 cicli (periodi) al secondo; dunque essa cambia verso 100 volte al secondo; negli USA la frequenza è 60 Hz

Vantaggi della corrente alternata

- Si adatta meglio a **meccanismi rotanti, quali generatori e motori elettrici**
- Con la corrente, anche **il campo magnetico da essa generato cambia verso: ciò permette applicazioni pratiche basate sull’induzione magnetica**
- E’ funzionale all’utilizzo del **trasformatore**, uno strumento estremamente importante nell’elettronica moderna, in particolare per quanto riguarda il **trasporto di energia elettrica a grandi distanze**

Il circuito LC

- ✓ Il circuito *LC* è lo **strumento fondamentale** per la **generazione**, la **manipolazione,** e l'**utilizzo di correnti alternate**
- ✓ Connettendo il circuito *LC* ad un asta metallica, si ottengono **antenne trasmittenti e riceventi di onde elettromagnetiche**
- ✓ Nei circuiti *LC* sono presenti **induttori** e **condensatori** (in realtà la resistenza è ineliminabile, per cui sono sempre di fatto *RLC*).
- ✓ A differenza dei circuiti *RC* ed *RL*, caratterizzati da un breve regime transiente seguito dal regime di corrente costante, negli *LC* le **grandezze fondamentali variano indefinitamente nel tempo**
- ✓ **L'andamento temporale** delle grandezze fondamentali (carica, corrente e potenziali) è **sinusoidale**, con periodo (*T*) e frequenza di oscillazione (ω) caratteristiche del circuito; di conseguenza, anche il **campo elettrico** nel condensatore ed il **campo magnetico** nell'induttore **oscillano nel tempo**
- ✓ Vedremo che:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{LC}$$

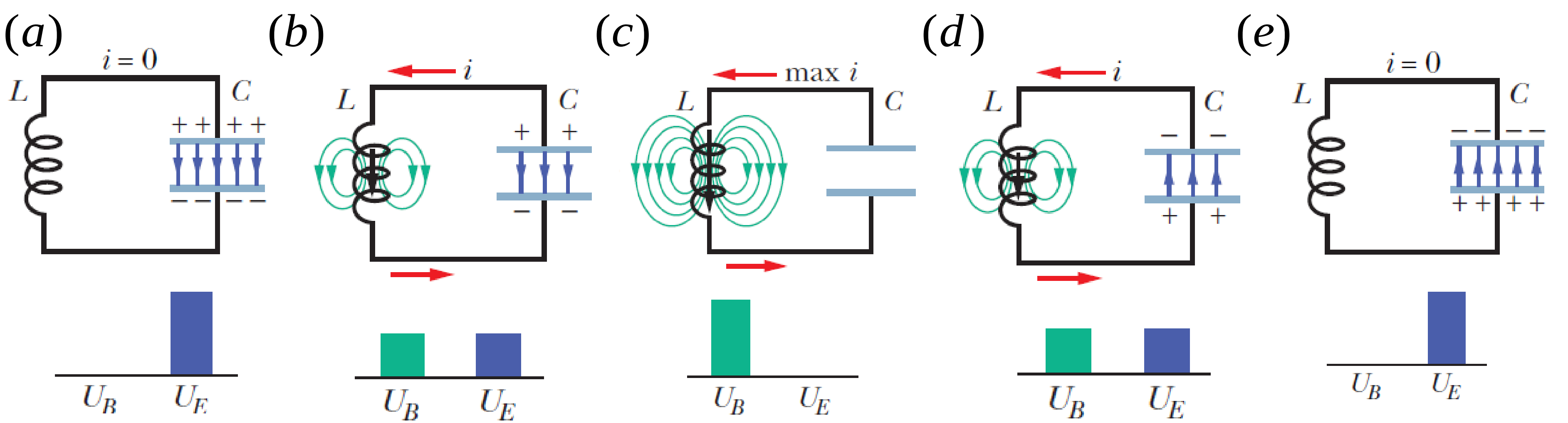
- ✓ Come in qualsiasi altro circuito, negli *LC* valgono in ogni istante le leggi di Kirchoff e, in assenza di resistenze, vale la **conservazione dell'energia totale**:

$$U_C + U_L = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C} + \frac{1}{2}Li^2$$

COSTANTE NEL TEMPO

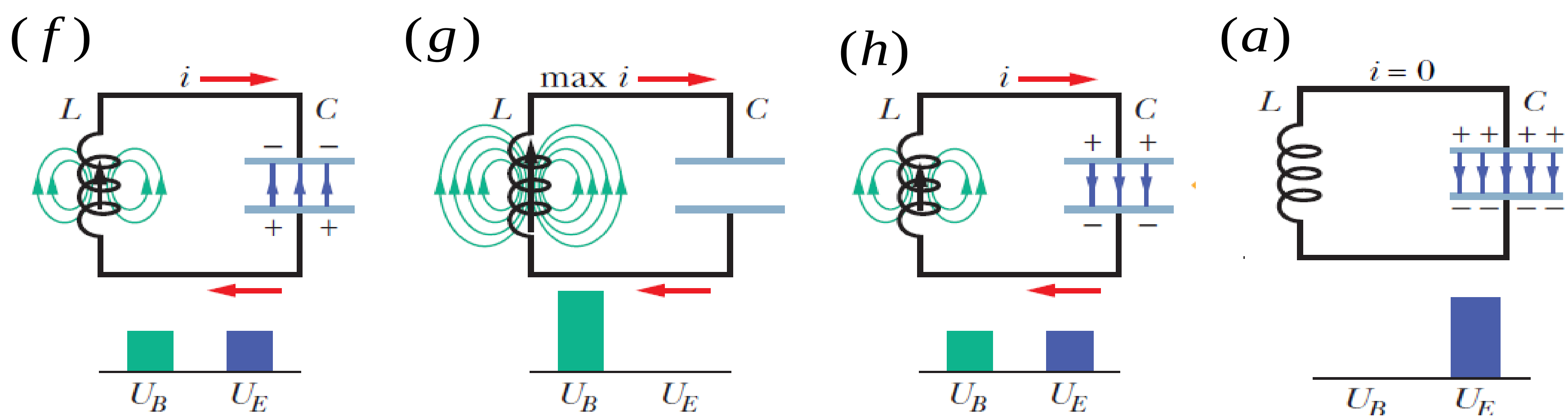
Il circuito LC: primo semiperiodo

a) Partiamo dalla configurazione iniziale i=0 con C **totalmente carico** (U_E massima) ed L **completamente scarico** (U_L =0)
b) la corrente fluisce in senso antiorario: C inizia a scaricarsi, e l'energia si trasferisce progressivamente da C ad L: U_E decresce ed U_L cresce ma $U_E + U_L$ rimane costante
c) C è **totalmente scarico**, i è massima, il campo magnetico in L è anch'esso al suo massimo valore; l'energia è totalmente accumulata in L.
d) la corrente inizia a decrescere: L reagisce compensando la diminuzione con la corrente indotta; i continua a fluire nello stesso verso, caricando i piatti di C con cariche opposte a quelle iniziali
e) C è **di nuovo totalmente carico**, ma con campo elettrico opposto a quello iniziale; corrente e campo magnetico in L sono nulli, tutta l'energia è di nuovo in C



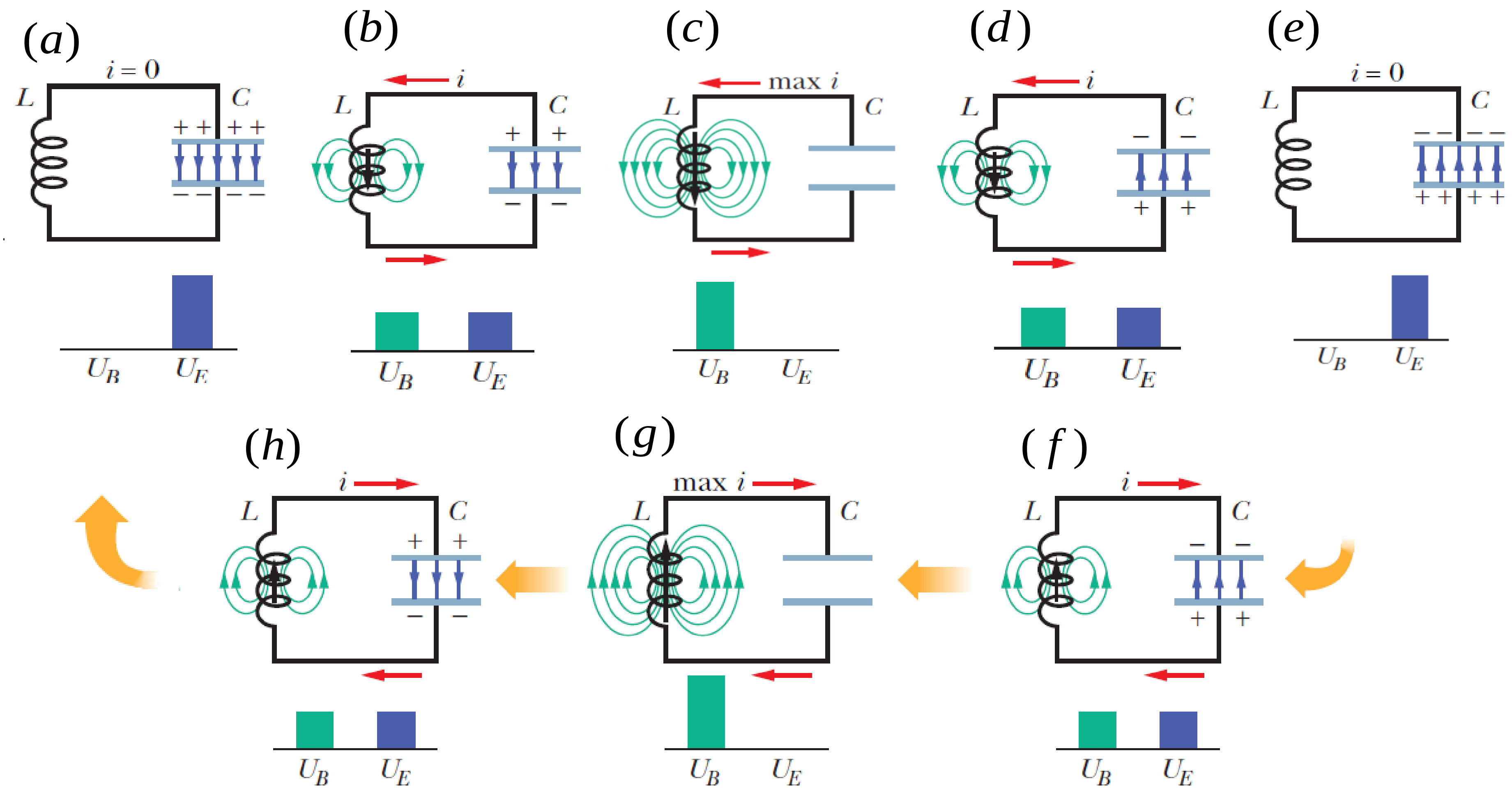
Il circuito LC: secondo semiperiodo

f) Inizia il processo inverso, caratterizzato da una corrente di verso orario: *C* si scarica, cresce la corrente ed il campo magnetico in *L*
g) corrente e campo magnetico sono di nuovo al loro massimo, *C* è scarico
h) la corrente diminuisce, inizia il processo di ricarica del condensatore che riporta il sistema allo stato di partenza (a)



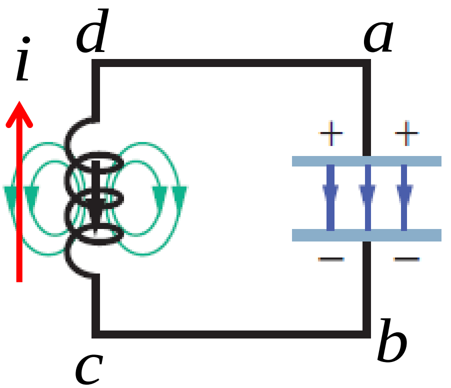
In assenza di resistenze che dissipano energia, il processo si ripete indefinitamente con una frequenza caratteristica.

Il circuito LC: periodo completo



Equazioni del circuito oscillatore *LC*

- Consideriamo il circuito ***LC*** in figura; nei circuiti AC non esiste un verso assoluto della corrente positiva; assumiamo convenzionalmente che la **corrente positiva scorra in verso orario,** e scriviamo l'equazione di Kirchoff:



$$\Delta V_C + \Delta V_L = 0 \quad \Rightarrow \frac{q}{C} + L\frac{di}{dt} = 0$$

Risolvendo rispetto alla carica sui piatti del condensatore, si ottiene:

$$\frac{q}{C} + L\frac{d^2q}{dt^2} = 0$$

- equazione differenziale del 2° ordine in *q(t)*, detta anche **equazione dell'oscillatore**
- Si dimostra che questa equazione è soddisfatta dalla funzione sinusoidale:

$$q(t) = Q\cos(\omega t + \phi)$$

- *Q* è il **valore massimo della carica sui piatti** del condensatore
- ω è la **frequenza caratteristica del circuito**
- ϕ è una **fase arbitraria** fissata dalla condizione iniziale: ponendo ϕ = 0 assumiamo che all'istante *t*=0 il condensatore sia totalmente carico

Equazioni dell'oscillatore LC

- ✓ Dimostrazione: calcoliamo le derivate della carica:

derivata 1°

$$\frac{dq}{dt} = -\omega Q \cos(\omega t + \phi)$$

derivata 2°

$$\frac{d^2q}{dt^2} = -\omega^2 Q \cos(\omega t + \phi)$$

- ✓ Sostituiamo nell'equazione dell'oscillatore:

$$-L\omega^2 Q \cos(\omega t + \phi) + \frac{1}{C} Q \cos(\omega t + \phi) = 0 \qquad \Rightarrow -\omega^2 L + \frac{1}{C} = 0$$

- ✓ L'equazione è soddisfatta per $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ **frequenza dell'oscillatore *LC***

- ✓ La frequenza angolare ha dimensione fisica uguale all'inverso del tempo:

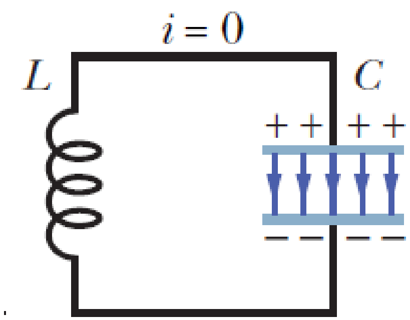
$$[L] = s\,\Omega \quad [C] = C/V \rightarrow [LC] = s\,\Omega C/V = s\,\Omega C/\Omega A = s^2$$

- ✓ Carica del condensatore: $q(t) = Q\cos(\omega t + \phi)$

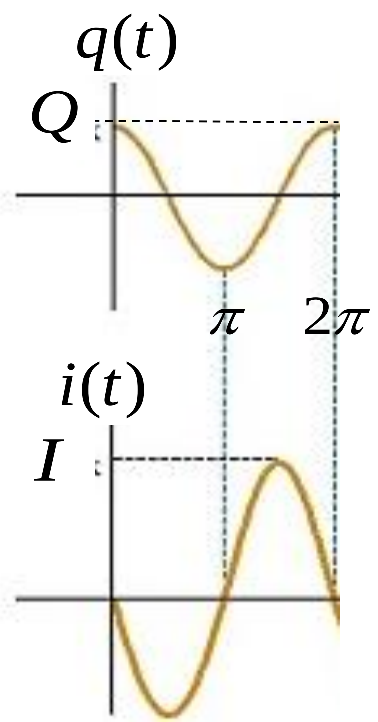
- ✓ Corrente nel circuito: $i(t) = -\omega Q \sin(\omega t + \phi) = -I \sin(\omega t + \phi)$

- ✓ *I* e *Q* sono i **valori massimi** di corrente e carica durante l'oscillazione

Oscillatore LC: la fase arbitraria



ϕ =0 t = 0



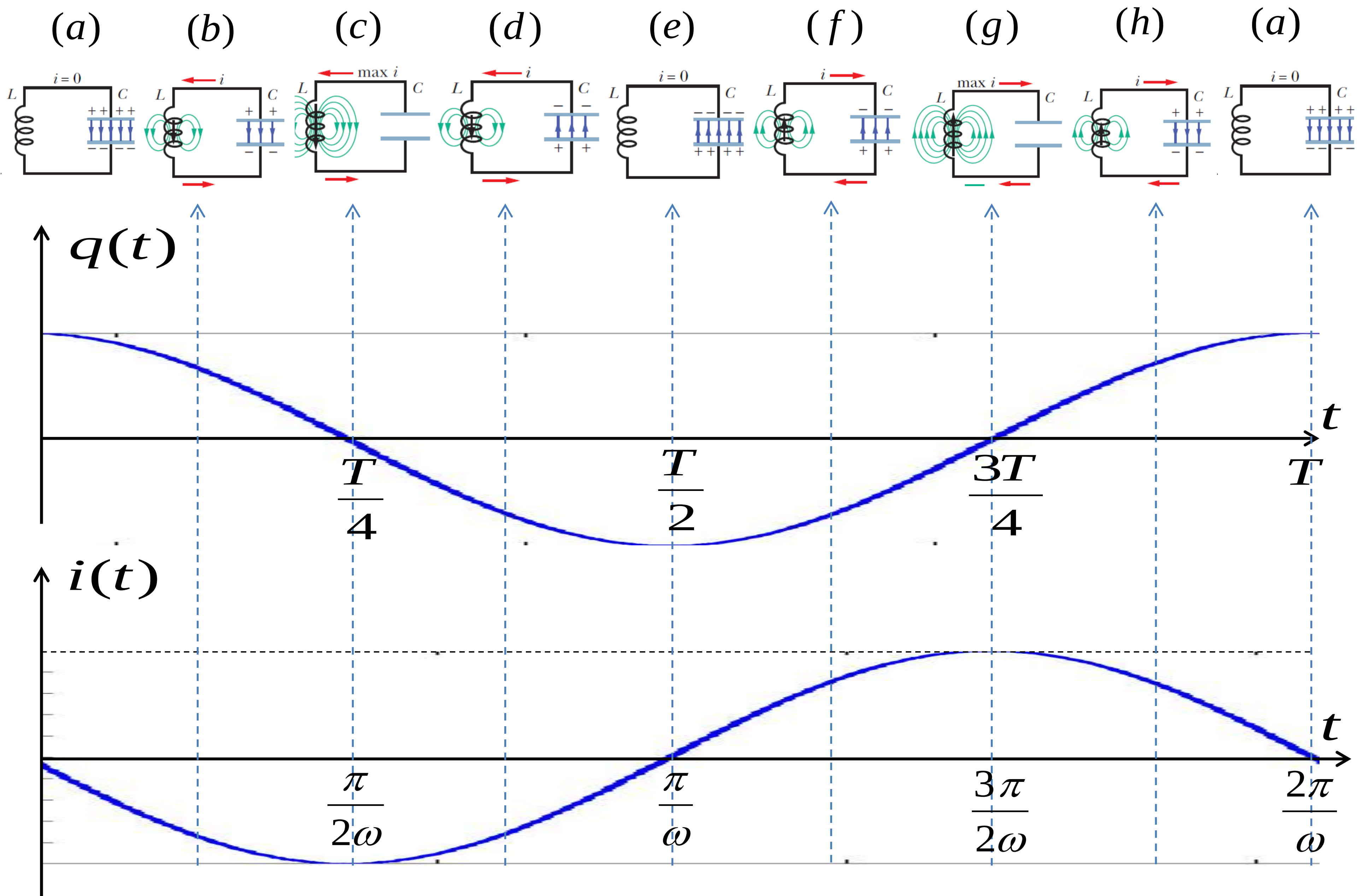
- ✓ Nella soluzione dell'oscillatore vi è una **fase indeterminata** ϕ, per cui qualsiasi valore di ϕ soddisfa allo stesso modo l'equazione di 2° ordine
- ✓ il valore di ϕ è **fissato dalla condizione iniziale**; ad esempio scegliendo ϕ =0 stabiliamo che per t = 0, C è totalmente carico e la corrente nulla:

$$q(t) = Q\cos(\omega t) \Rightarrow q(0) = Q$$

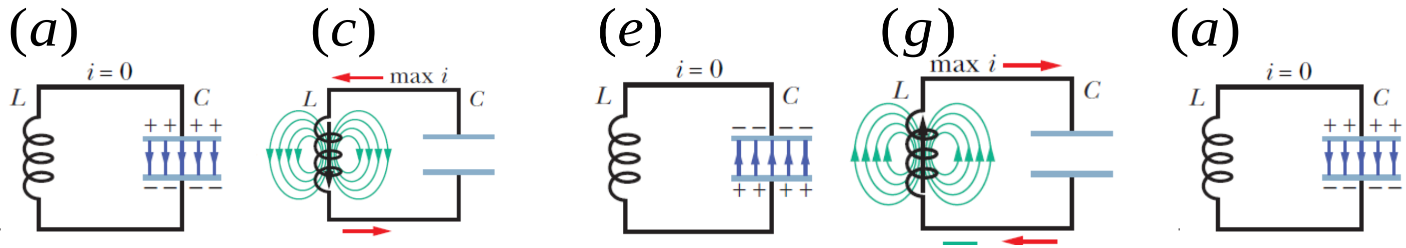
$$i(t) = -\omega Q\sin(\omega t) \Rightarrow i(0) = 0$$

- ✓ Avendo definito **positiva la corrente di verso orario**, il segno – implica che all'inizio la corrente scorre in verso antiorario
- ✓ *q(t)* e *i(t)* differiscono, oltre che per l'ampiezza dell'oscillazione, per una **fase uguale ad ¼ di periodo**: quando *q(t)* = $\pm\, Q$ la corrente è nulla; quando *i(t)* = $\pm\, I$ la carica sui piatti è nulla
- ✓ Scegliere $\phi \neq 0$ significa traslare *i(t)* e *q(t)* lungo l'asse del tempo, ovvero iniziare l'oscillazione da un'altra situazione; ad esempio per $\phi = \pi$ l'istante t = 0 corrisponde dalla configurazione con *q(t)*=-*Q*, *i(t)*=0

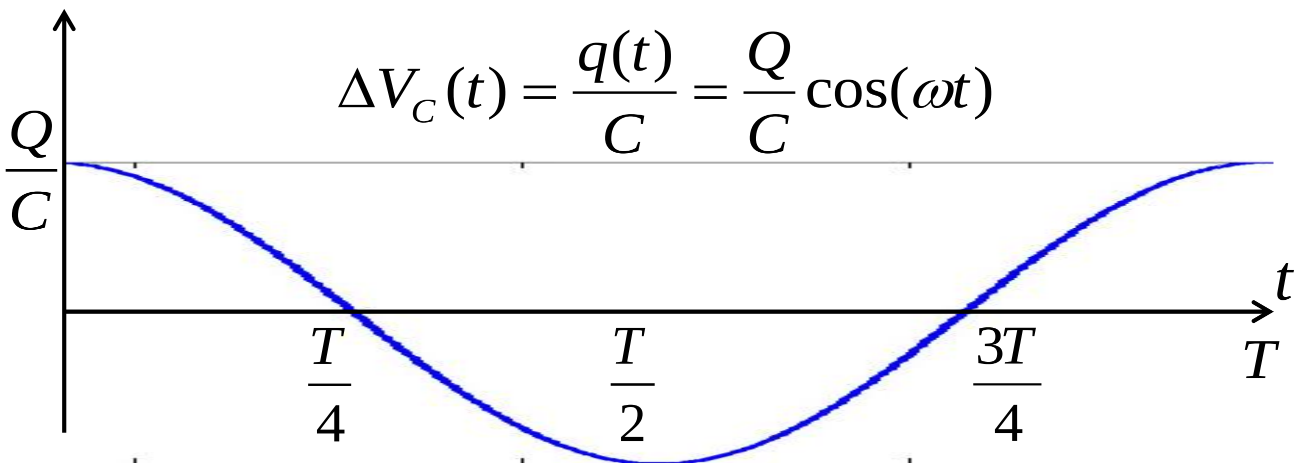
Oscillatore LC: carica e corrente



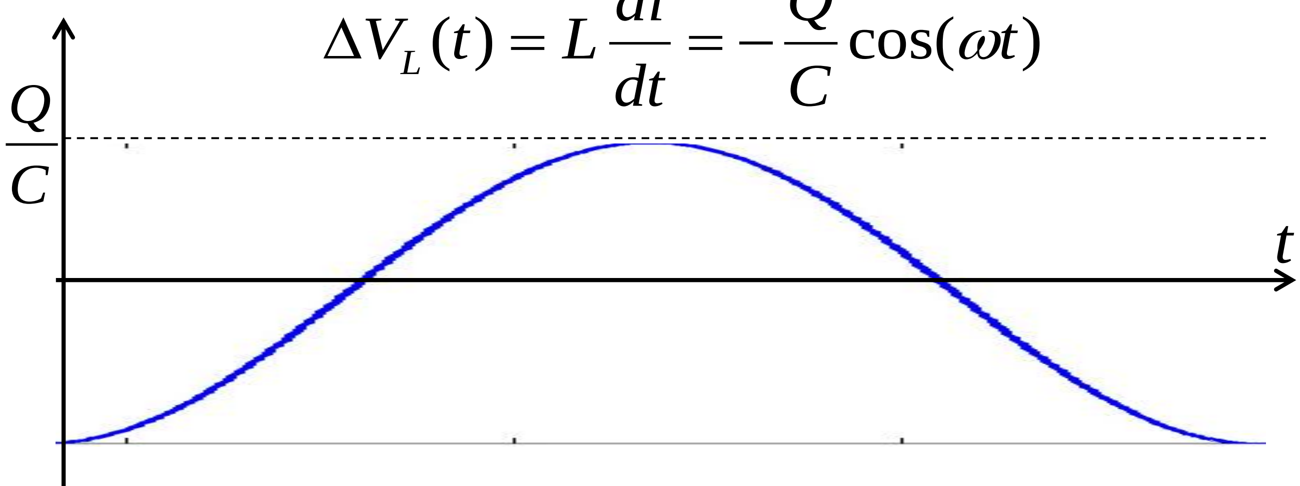
Oscillatore LC: i potenziali



$$\Delta V_C(t) = \frac{q(t)}{C} = \frac{Q}{C}\cos(\omega t)$$



$$\Delta V_L(t) = L\frac{di}{dt} = -\frac{Q}{C}\cos(\omega t)$$



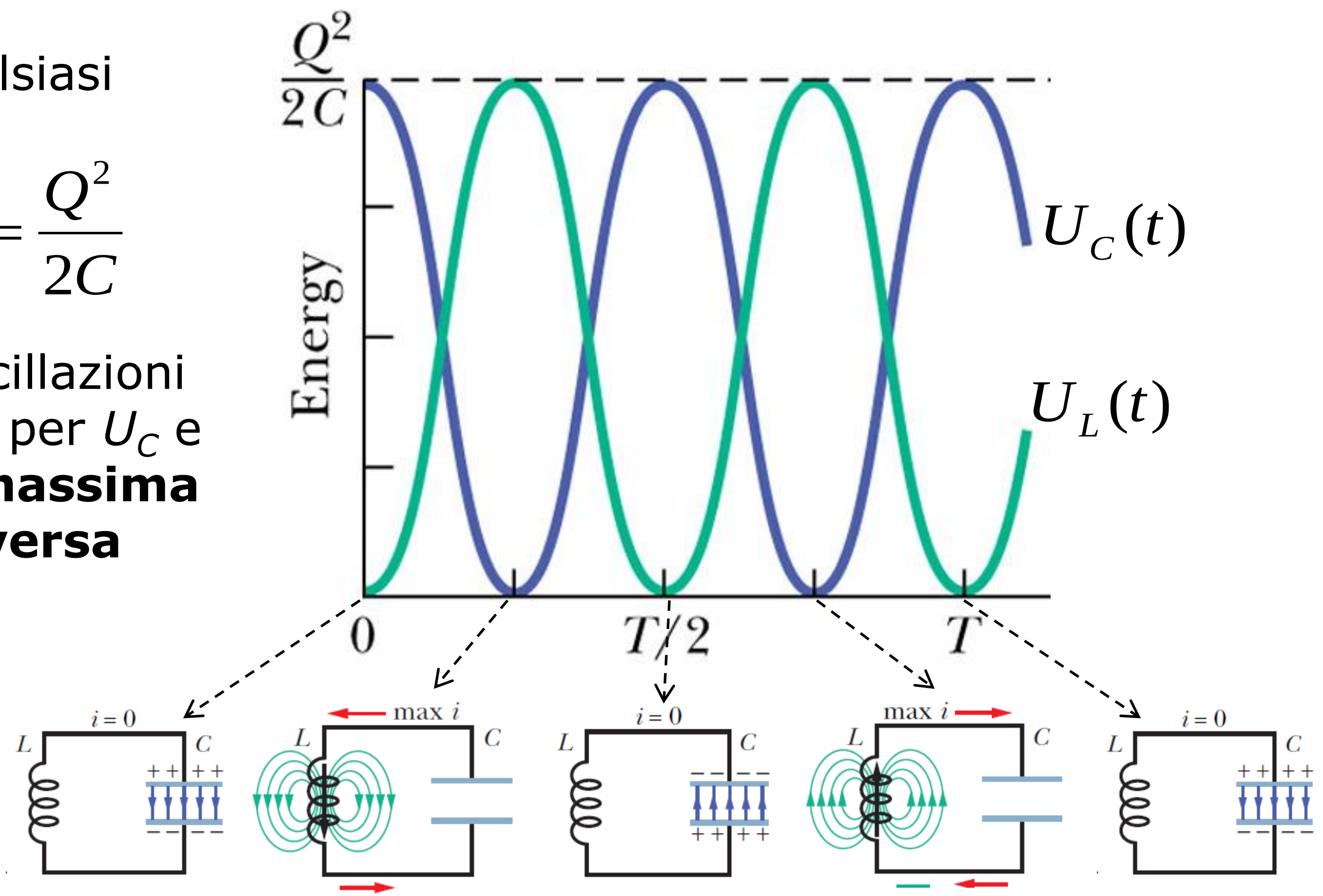
Le d.d.p. ai capi di *C* ed *L* sono uguali in ampiezza ma di segno opposto, ovvero differiscono per una **fase uguale ad ½ di periodo**. In questo modo ad ogni istante la loro somma è sempre nulla, come imposto dall’equazione di Kirchoff

Oscillatore LC: l'energia

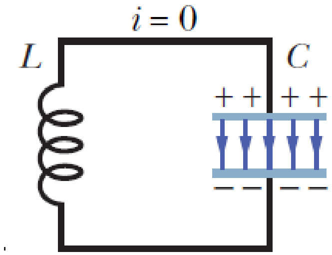
- Energia elettrica: $U_C(t) = \frac{q(t)^2}{2C} = \frac{Q^2}{2C}\cos^2(\omega t)$
- Energia magnetica: $U_L(t) = \frac{Li(t)^2}{2} = \frac{\omega^2 Q^2 L}{2}\sin^2(\omega t) = \frac{Q^2}{2C}\sin^2(\omega t)$
- **L'energia totale è conservata:** in qualsiasi istante *t*:

$$U_C(t) + U_L(t) = \frac{Q^2}{2C}$$

- l'ampiezza delle oscillazioni $Q^2/(2C)$ è la stessa per U_C e U_L; **quando U_C è massima U_L è nulla, e viceversa**



Problema 31.1



Consideriamo un circuito *LC* con *L* =20 mH e C =2 μF; all'istante *t*=0 il condensatore è totalmente carico, con la carica positiva sul piatto superiore, e tensione ΔV_C= 50 V

- ❑ Calcolare la frequenza caratteristica, il periodo, la carica massima, la corrente massima, e l'energia immagazzinata nel circuito:

✓ frequenza in radianti:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{20\,mH \times 2\,\mu F}} = \frac{1}{\sqrt{4 \times 10^{-8}\,s^2}} = 0.5 \times 10^4\,\frac{rad}{s} = 5000\,\frac{rad}{s}$$

✓ frequenza: $\upsilon = \dfrac{\omega}{2\pi} = 796\,Hz$

✓ periodo: $T = 1/\upsilon = 1.26\,ms$

✓ carica massima: $Q = C\,\Delta V = 2\,\mu F \times 50\,V = 100\,\mu C$

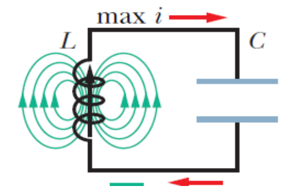
✓ corrente massima: $I = \omega Q = \dfrac{5000}{s} \times 100\,\mu C = 0.5\,A$

✓ Energia: $U = \dfrac{Q^2}{2C} = \dfrac{1}{2} L\,I^2 = 10\,mH \times (0.5A)^2 = 2.5\,mJ$

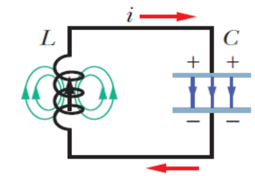
Problema 31.1

- Calcolare la carica del condensatore agli istanti t= 1 s, 5 s, 8 s; calcolare intensità e verso (orario o antiorario) della corrente agli stessi istanti

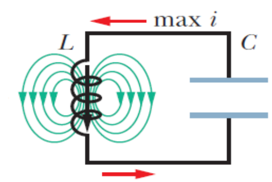
$$t = 1s \quad \begin{cases} q = Q\cos(5000\, rad) = 100\mu C \times 0.155 = 15.5\mu C \\ i = -I\sin(5000\, rad) = -0.5A \times (-0.987) = 0.49A \end{cases}$$



$$t = 5s \quad \begin{cases} q = Q\cos(25000\, rad) = 100\mu C \times 0.701 = 70.1\mu C \\ i = -I\sin(25000\, rad) = -0.5A \times (-0.71) = 0.36A \end{cases}$$



$$t = 8s \quad \begin{cases} q = Q\cos(40000\, rad) = 100\mu C \times 0.323 = 32.3\mu C \\ i = -I\sin(40000\, rad) = -0.5A \times 0.94 = -0.47A \end{cases}$$



✓ per t = 1 s e t = 5 s la corrente è positiva (verso orario); per t = 8 s la corrente è negativa (antioraria)

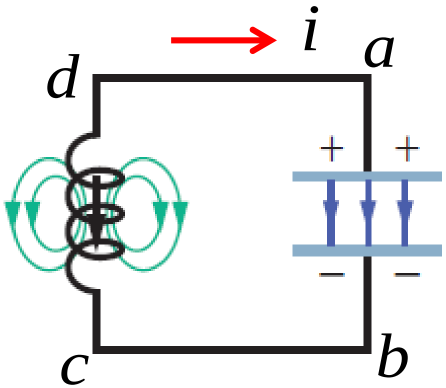
✓ 5000 radianti corrispondono a 5000/2π =795.77 oscillazioni; eliminando le oscillazioni complete, si ottiene 0.77 oscillazioni, corrispondenti ad una fase 0.77×2π = 1.55 π; siamo quindi vicini alla condizione *i(t)* massima e positiva e carica ai piatti nulla (fase "g" dell'oscillazione);

✓ 25000/2π =3978.87, corrispondente alla fase 0.87×2π = 1.75 π; siamo tra 3/2 π e 2π, nella fase "h" dell'oscillazione

✓ 40000/2π =6366.2, corrispondente alla fase 0.2×2π = 0.4 π; dunque poco prima di π/2; la corrente è vicina al suo massimo negativo, fase "c"

Problema 31.1

- Calcolare la f.e.m. autoindotta agli istanti t= 1 s, 5 s, 8 s; ad ogni istante indicare se la corrente autoindotta è concorde o discorde con la corrente presente in quegli istanti nel circuito



$$\frac{di}{dt} = -\omega^2 Q\cos(\omega t)$$

$$\mathscr{E}_L = -L\frac{di}{dt} = \frac{Q}{C}\cos(\omega t) = 50V\cos(\omega t)$$

$t = 1s \quad \mathscr{E}_L = 50V\cos(5000\,rad) = 50V \times 0.155 = 7.73V$ concorde con *i*

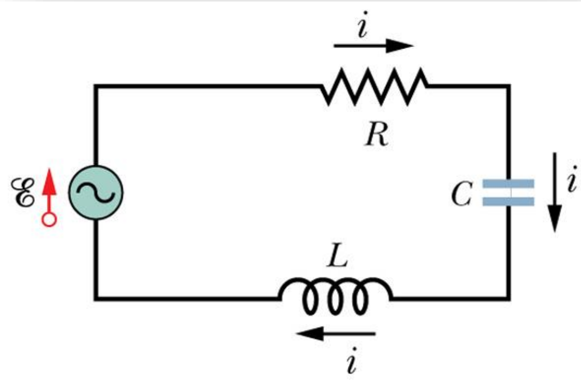
$t = 5s \quad \mathscr{E}_L = 50V\cos(25000\,rad) = 50V \times 0.70 = 35V$ concorde con *i*

$t = 8s \quad \mathscr{E}_L = 50V\cos(40000\,rad) = 50V \times 0.32 = 16.13V$ discorde da *i*

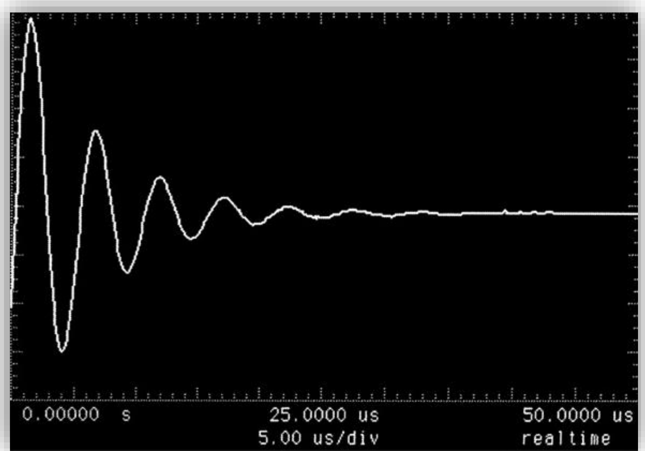
✓ per *t* =1 s, *t* =5 s *i(t)* è positiva (oraria), *di/dt* è negativa: la corrente si riduce, per cui la corrente autoindotta è concorde con *i(t)*

✓ per *t* = 8 s *i(t)* è negativa (antioraria), *di/dt* è negativa: ciò significa che *i(t)* **in valore assoluto è in aumento** per cui la corrente autoindotta deve essere discorde da *i(t)*

Il circuito ‘reale’ RLC



- ✓ Nel circuito *LC*, l’energia oscilla indefinitamente, **trasferendosi da condensatore ad induttore e viceversa**
- ✓ Ovviamente nei circuiti reali c’è sempre una seppur piccola resistenza; dunque, un ***LC* in realtà è sempre *RLC***.
- ✓ Le resistenze dissipano energia, per cui **l’effettivo andamento è oscillatorio smorzato**, come nel grafico della corrente in figura: dopo alcune oscillazioni l’energia iniziale del circuito è totalmente dissipata e la corrente si estingue
- ✓ Per avere oscillazioni durevoli nel tempo è necessario inserire nel circuito un **generatore di corrente alternata**, variabile sinusoidalmente nel tempo, che compensi la perdita di energia dovuta alle resistenze

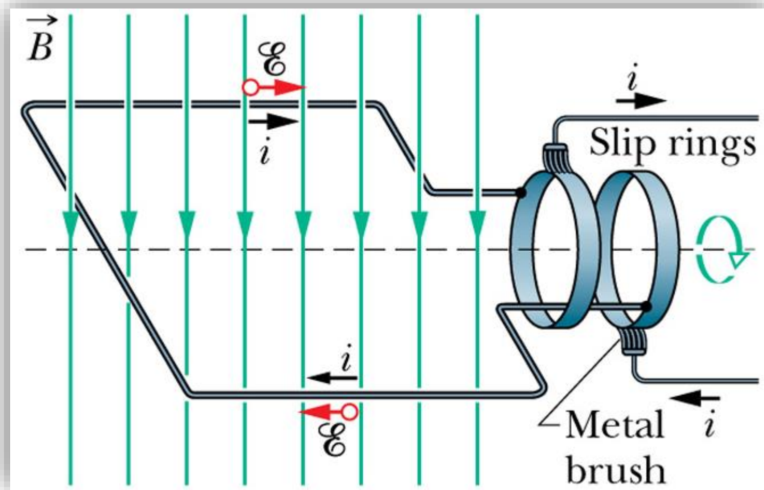


Al fine di avere la massima ampiezza di corrente è necessario che il generatore eroghi una corrente di frequenza ω_g uguale alla frequenza caratteristica del circuito *LC*, ovvero che sia:

$$\omega_g = \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

condizione di risonanza

Il generatore di corrente alternata



- ✓ Una spira conduttiva è immersa in un campo magnetico uniforme
- ✓ Una **forza meccanica** ruota la spira con frequenza uniforme ω_g
- ✓ Ne deriva un flusso magnetico variabile nel tempo attraverso il piano *A* della spira:

$$\Phi_B(t) = BA\cos\left(\omega_g t\right)$$

- ✓ e dunque una **f.e.m. indotta ed una corrente indotta** generate nella spira:

$$\mathscr{E}(t) = -\frac{d\Phi_B}{dt} = BA\omega_g \sin(\omega_g t) = \mathscr{E}_{\max} \sin(\omega_g t)$$

$$i(t) = \frac{\mathscr{E}_{\max}}{R}\sin(\omega_g t) = I\sin(\omega_g t)$$

- ✓ Vediamo che f.e.m. e corrente indotta sono **alternate**, ed hanno **stesso andamento sinusoidale e stessa frequenza** della variazione del flusso, ovvero della rotazione meccanica della spira
- ✓ Gli estremi della spira terminano con due **anelli conduttori connessi mediante delle spazzole metalliche al circuito esterno**: durante la rotazione della spira le spazzole restano in contatto col resto del circuito, permettendo alla corrente prodotta di trasferirsi all'esterno

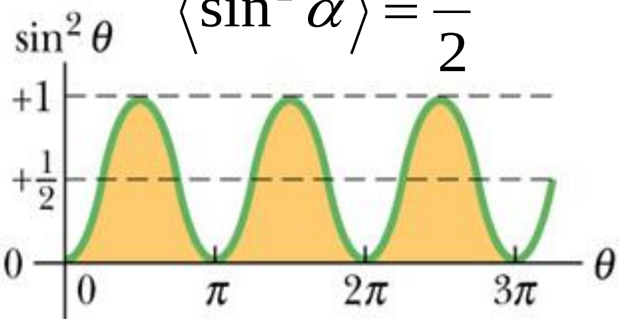
Potenza media nel circuito RLC

- ✓ Nel circuito *RLC* la **potenza istantanea dissipata su *R*** è:

$$P(t) = Ri^2(t) = RI^2 \sin^2(\omega_g t)$$

- ✓ Dalla potenza istantanea calcoliamo la **potenza media** dissipata su *R* nel tempo di un periodo (il valor medio di $\sin^2$ e $\cos^2$ è 1/2):

$$\langle \sin^2 \alpha \rangle = \frac{1}{2}$$



$$\overline{P} = R\overline{i^2} = RI^2 \langle \sin^2(\omega_g t) \rangle = R\frac{I^2}{2}$$

- ✓ Possiamo riscrivere questo risultato in modo più compatto utilizzando il concetto di **valore quadratico medio*:*** per la corrente:

$$I_{qm} = \sqrt{\langle i^2(t) \rangle} = \sqrt{\frac{I^2}{2}} = \frac{I}{\sqrt{2}} \qquad \Rightarrow \overline{P} = R\, I_{qm}^2$$

- ✓ Ritroviamo quindi la stessa formula della potenza valida per le grandezze costanti nel tempo, considerando però valori quadratici medi
- ✓ Per qualsiasi grandezza variabile sinusoidalmente nel tempo, **il valore quadratico medio corrisponde al valore massimo diviso √2**

Potenza media nel circuito RLC

- Dalla **potenza istantanea erogata dal generatore**:

$$P(t) = i(t)\,\mathscr{E}_g(t) = I\,\mathscr{E}_{\max}\sin^2(\omega_g t)$$

- Ricaviamo la **potenza media erogata dal generatore**:

$$\overline{P} = R\overline{i^2} = I\,\mathscr{E}_{\max}\left\langle \sin^2(\omega_g t)\right\rangle = I\,\mathscr{E}_{\max}\frac{1}{2} = \frac{I}{\sqrt{2}}\frac{\mathscr{E}_{\max}}{\sqrt{2}} = I_{qm}\,\mathscr{E}_{qm}$$

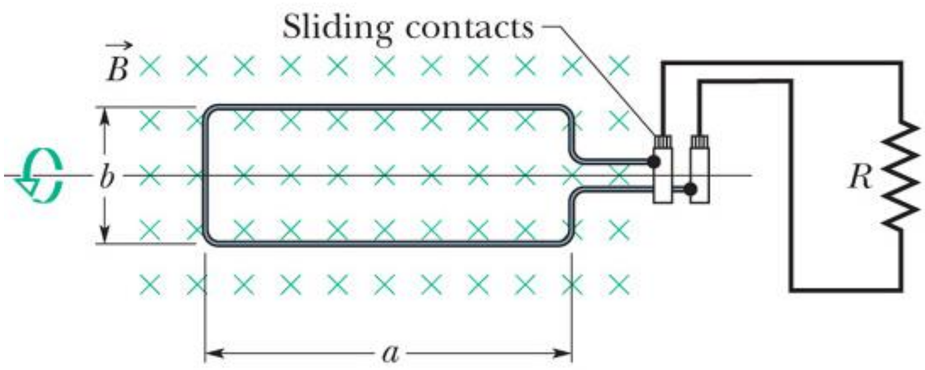
- Avendo definito valori quadratici medi:

$$\mathscr{E}_{qm} = \frac{\mathscr{E}_{\max}}{\sqrt{2}} \qquad I_{qm} = \frac{I}{\sqrt{2}} \qquad \Delta V_{qm} = \frac{\Delta V_{\max}}{\sqrt{2}}$$

- Se si considerano valori quadratici medi, **le relazioni fondamentali tra le grandezze di un circuito AC (leggi di Ohm e di Kirchoff) hanno la stessa forma di quelle di un circuito DC**
- i valori tipici di tensione e corrente negli AC sono sempre riferiti a valori *qm*; per esempio, nelle abitazioni ΔV_{qm}=220 V; I_{qm} = 16 A

Problema 30.13

- ✓ Un generatore di corrente alternata è composto da una bobina rettangolare con N=100 spire, di lati *a* = 50 cm e *b* = 30 cm, immersa in un campo magnetico uniforme di intensità *B*=1 T, perpendicolare uscente dalla pagina; il generatore è connesso ad un carico resistivo esterno *R*=1 KΩ
- ✓ A *t*=0 il sistema è in equilibrio, col campo magnetico parallelo alla normale del piano della spira; la spira viene poi messa in rotazione attorno all'asse orizzontale con frequenza uniforme ν = 100 Hz
- ✓ Calcolare i valori **massimi e quadratici medi** di f.e.m. e corrente indotta nella bobina, e la **potenza media** erogata dal generatore



Durante la rotazione, il flusso magnetico attraverso l'area della bobina è dato da:

$$\Phi_B = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = BA\cos(\theta)$$

All'istante iniziale l'angolo tra campo e vettore areale è nullo, per cui deve essere:

$$\theta = \omega t = 2\pi\nu t \quad \Rightarrow \quad \Phi_B = BA\cos(\omega t)$$

Problema 30.13

✓ la f.e.m. indotta nella bobina:

$$\mathscr{E}_i = -N\frac{d\Phi_B}{dt} = NabB\omega\sin(\omega t) = \mathscr{E}_{\max}\sin(\omega t)$$

✓ i valori di picco di f.e.m. e corrente indotta sono:

$$\mathscr{E}_{\max} = NabB\omega = 100\times 0.15\,m^2\times 1T\times 2\pi\times\frac{100}{s} = 9.4\,kV \qquad I = \frac{\mathscr{E}_{\max}}{R} = 9.4\,A$$

i valori di picco si hanno per sin(θ)=±1, ovvero θ = ± π/2 , ovvero quando la normale al piano della spira ed il campo magnetico sono perpendicolari

✓ I valori quadratici medi: $\mathscr{E}_{qm} = 6.65\,kV$ $\qquad I_{qm} = 6.65\,A$

✓ La potenza media prodotta dal generatore:

$$\overline{P} = I_{qm}\,\mathscr{E}_{qm} = 6.65\,A\times 6.65\,kV = 44.18\,kW$$

Trasmissione di Energia

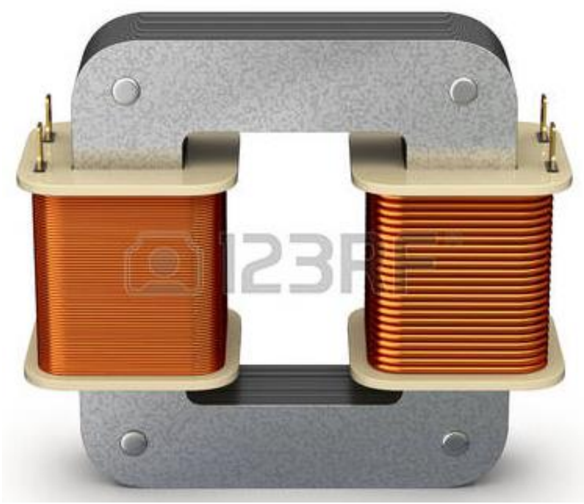
- ✓ Si è visto che, nei circuiti AC (in seguito omettiamo il pedice 'qm', dando per scontato che correnti e tensioni siano valori *qm*):

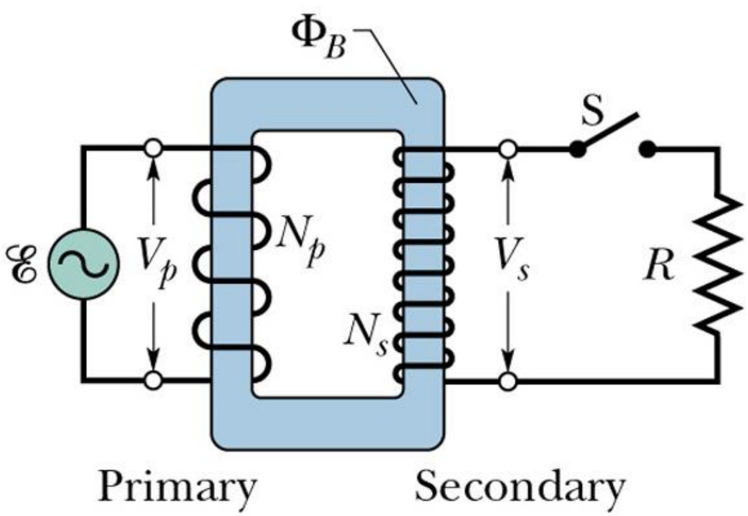
$$\overline{P} = \Delta V \, I$$

- ✓ Ovviamente la **stessa potenza media può essere erogata da correnti elevate a basso voltaggio, oppure basse correnti ad alta tensione**
- ✓ Per ragioni di sicurezza ed efficienza, è preferibile avere, sia nell'impianto di produzione (la centrale termoelettrica o idroelettrica), sia nel luogo di utilizzo (abitazione o ufficio), **basse d.d.p. e alte correnti.**
- ✓ Di contro, se l'energia deve essere **trasportata attraverso grandi distanze**, per la legge di Joule è molto sconveniente avere alte correnti, poiché la potenza dissipata lungo il cavo dipende dal quadrato della corrente; si preferisce dunque trasportare **piccole correnti ad alta tensione (fino a 500 KV !)**
- ✓ Il problema è risolto mediante l'uso del **trasformatore**, uno strumento in grado di **trasformare potenze elettriche di alta tensione e basso voltaggio in bassa tensione ed alto voltaggio, e viceversa**
- ✓ **Il trasformatore funziona soltanto con correnti AC:** dunque per il trasporto di energia su grandi distanze la corrente AC è preferita alla DC

Il trasformatore ideale

- ✓ Il funzionamento del trasformatore ideale si basa sull'induzione magnetica e **funziona soltanto per correnti alternate** (AC); di contro, trasformare correnti continue (DC) richiede metodi molto più complessi

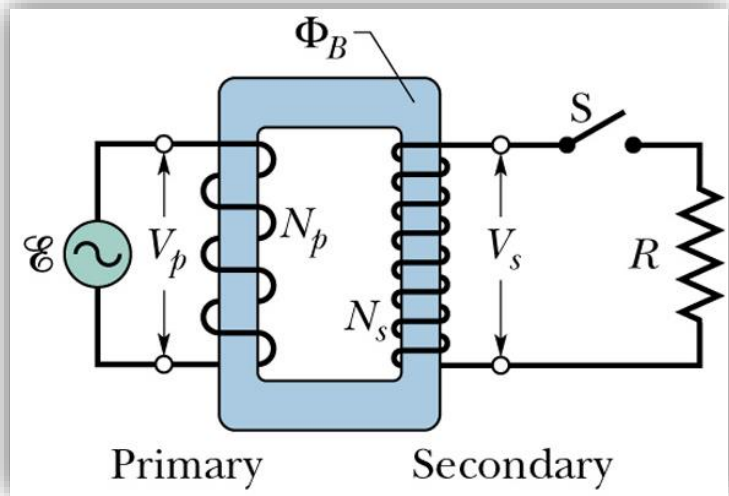




- ✓ Il trasformatore è costituito da **2 bobine avvolte attorno ad un nucleo di ferro**; la bobina primaria ha N_p spire, quella secondaria N_s spire. La **primaria è connessa con un generatore di corrente alternata**, la **secondaria è chiusa su un carico resistivo**.
- ✓ La corrente alternata nel circuito primario produce un **campo magnetico ed un flusso variabile** Φ_B nella bobina primaria; poiché il **ferro è un materiale ferromagnetico**
- ✓ il flusso Φ_B si trasmette uniformemente in tutto il nucleo di ferro; dunque **nella regione della bobina secondaria è presente lo stesso flusso** Φ_B; ne deriva che **su ogni singola spira delle due bobine agisce la stessa f.e.m.**

Trasformazione della tensione

- ✓ Dall'uguaglianza del flusso magnetico attraverso ciascuna spira delle due bobine, segue che le d.d.p. ai capi della bobina nel circuito primario (ΔV_p) e secondario (ΔV_s) sono:



$$\Delta V_p = N_p \frac{d\Phi_B}{dt} \qquad \Delta V_s = N_s \frac{d\Phi_B}{dt}$$

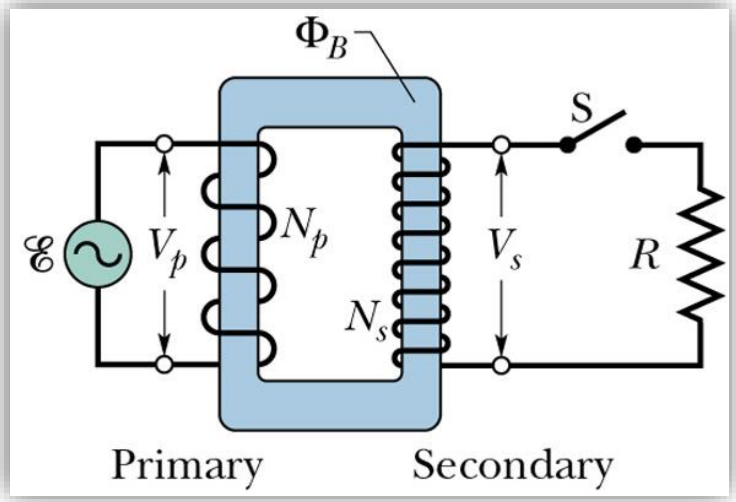
$$\Rightarrow \frac{\Delta V_s}{\Delta V_p} = \frac{N_s}{N_p} \Rightarrow \Delta V_s = \Delta V_p \left(\frac{N_s}{N_p} \right)$$

Legge di trasformazione della tensione

- ✓ ΔV_p è fissata dal generatore, per cui possiamo considerarla la **tensione di input**; ΔV_s è la **tensione di output** ottenuta dalla trasformazione, e dipende dal rapporto tra le spire delle bobine
- ✓ per $N_s > N_p$ il trasformatore è detto **elevatore**, poiché eleva la tensione d'ingresso ΔV_p ad un valore più alto
- ✓ se invece $N_p > N_s$ il trasformatore riduce la tensione d'ingresso ed è detto **riduttore;** in figura vediamo chiaramente lo schema di un elevatore

Trasformazione della corrente

- ✓ Determiniamo le correnti nel circuito primario (I_p) e secondario (I_s) utilizzando il **principio di conservazione dell'energia**
- ✓ Sappiamo che le induttanze non dissipano energia se supponiamo trascurabili le loro resistenze interne rispetto al carico *R*; dunque, **tutta la potenza erogata dal generatore nel circuito primario deve essere dissipata sulla resistenza del circuito secondario**.



- ✓ potenza erogata nel primario:

$$P_g = I_p \mathscr{E}_g = I_p \Delta V_p$$

- ✓ potenza dissipata nel secondario:

$$P_d = I_s^2 R = I_s \Delta V_s$$

- ✓ conservazione dell'energia:

$$I_p \Delta V_p = I_s \Delta V_s$$

$$\Rightarrow I_s = I_p \left(\frac{\Delta V_p}{\Delta V_s} \right) = I_p \left(\frac{N_p}{N_s} \right)$$

Legge di trasformazione della corrente