



## فصل ۲۷- نوسانات الکترومغناطیسی و جریان متناوب

۱- مقدمه

۷- نوسانهای واداشته

۲- نوسانات LC ، بررسی کیفی

۸- سه مدار ساده

۳- قیاس الکتریکی - مکانیکی

۹- مدار RLC متوالی

۴- نوسانات LC ، بررسی کمی

۱۰- توان در مدارهای جریان متناوب

۵- نوسانهای میرا در مدار RLC

۱۱- مبدلها

۶- جریان متناوب

## ۶- جریان متناوب

اگر یک منبع نیروی محرکه الکتریکی خارجی به قدر کافی انرژی تأمین کند که اتلاف انرژی گرمایی را در مقاومت  $R$  جبران نماید، نوسانها در  $RLC$  میرا نخواهند شد. مدارهایی که در خانه‌ها، اداره‌ها و کارخانه‌ها به کار می‌روند شامل مدارهای  $RLC$  بی‌شماری هستند که این انرژی را از شرکتهای برق منطقه‌ای دریافت می‌کنند. در اغلب کشورها این انرژی به وسیله نیروهای محرکه الکتریکی و جریانهای نوسانی، موسوم به **جریان متناوب** یا به اختصار **ac**، تأمین می‌شود. (جریان غیر نوسانی باتری **جریان مستقیم** یا **dc** نامیده می‌شود.) این نیروهای محرکه الکتریکی و جریانهای نوسانی به طور سینوسی نسبت به زمان تغییر می‌کنند، جهت آنها (در امریکای شمالی) در هر ثانیه  $120$  مرتبه عوض می‌شود و در نتیجه دارای بسامد  $f = 60 \text{ Hz}$  هستند.

Direct current

در نگاه اول، این آرایش ممکن است عجیب باشد، دیده‌ایم که تندی رانش الکترونها در سیم‌کشی خانه‌ها، نوعاً

$4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  است. اکنون، اگر جهت آنها در هر  $\frac{1}{120} \text{ s}$  عوض شود، چنین الکترونیهایی در یک نیم چرخه فقط می‌توانند تقریباً  $3 \times 10^{-7} \text{ m}$  حرکت کنند. با این آهنگ، یک الکترون نوعی پیش از تغییر جهت نمی‌تواند از کنار بیش از  $10^6$  اتم در سیم گذر کند. پس، آیا عجیب نیست که الکترون بتواند به هر جایی برود؟

اگر چه این پرسش ممکن است نگران کننده باشد، اما نیازی به بررسی آن نیست. الکترونهاى رسانش مجبور نیستند «به هر جایی بروند». وقتی می‌گوییم که جریان در سیم یک آمپر است، منظور ما این است که بار از هر صفحه‌ای که سیم را قطع کند با آهنگ یک کولن بر ثانیه عبور می‌کند. تنیدی که حاملهای بار از صفحه می‌گذرند مستقیماً حائز اهمیت نیست، یک آمپر ممکن است به تعداد زیادی از حاملهای بار که خیلی به آهستگی حرکت می‌کنند یا به تعداد کمی که خیلی سریع حرکت می‌کنند، مربوط باشد. علاوه بر این، سیگنالی که برای معکوس کردن جهت‌ها به الکترونها می‌رسد - که از نیروی

محركه الكتریكى متناوب مولد كارخانه برق سرچشمه می گیرد - در امتداد سیم نزدیک به تندی نور انتشار می یابد. همه الكترونها، بدون توجه به اینکه در كجا واقع اند، تقریباً به طور همزمان دستور معكوس شدن جهت را دریافت می کنند. بالاخره، توجه داریم كه برای اغلب وسایل، مانند لامپ روشنایی و نان برشته كن، تا وقتی الكترونها به گونه ای حرکت كنند تا از طریق برخورد با اتمهای وسایل، انرژی به وسایل منتقل شود، جهت حرکت آنها اهمیتی ندارد.

مزیت اصلی جریان متناوب چنین است: وقتی جریان متناوب است، میدان مغناطیسی اطراف رسانا نیز متناوب است. این امر استفاده از قانون القای فارادی را امکانپذیر می کند، و این بدان معناست كه علاوه بر كارهای دیگر، چنانكه بعداً خواهیم دید می توان بزرگی یک اختلاف پتانسیل متناوب را با استفاده از دستگاهی به نام مبدل، بالابرد (افزایش داد) یا پایین آورد (كاهش داد). علاوه بر این، جریان متناوب نسبت به جریان

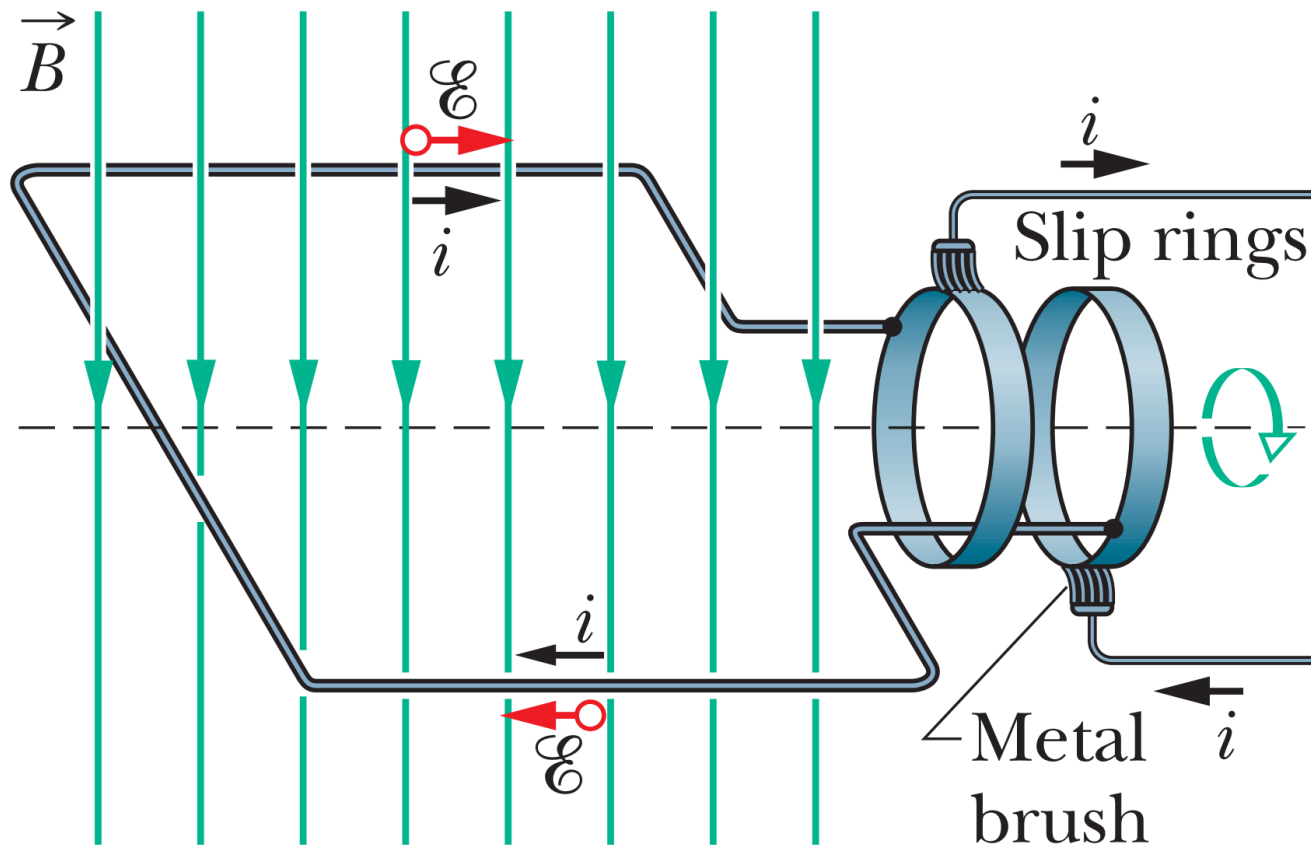
مستقیم (نا متناوب) با ماشینهای چرخان مانند مولدها و موتورها بیشتر سازگار است.

شکل ۶-۲۷ مدل ساده‌ای از یک مولد ac را نشان می‌دهد. وقتی یک حلقه رسانا در میان یک میدان مغناطیسی خارجی  $\vec{B}$  بچرخد، یک نیروی محرکه الکتریکی  $\mathcal{E}$  سینوسی در حلقه القا می‌شود

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega_d t \quad \star (27-28)$$

بسامه زاویه‌ای  $\omega_d$  نیروی محرکه الکتریکی برابر است با تندی زاویه‌ای چرخش حلقه در میدان مغناطیسی؛ فاز emf برابر  $\omega_d t$  و دامنه emf برابر  $\mathcal{E}_m$  است (زیرنویس برای مشخص کردن مقدار بیشینه است). وقتی حلقه چرخان قسمتی از یک مسیر رسانای بسته باشد، این emf یک جریان سینوسی (متناوب) با همان بسامد زاویه‌ای را در امتداد مسیر ایجاد (تحریک) می‌کند، که بسامد زاویه‌ای محرک نامیده می‌شود. می‌توانیم جریان را به صورت زیر بنویسیم

$$i = I \sin (\omega_d t - \phi) \quad (27-29)$$



شکل ۲۷-۶ ساز و کار اصلی مولد جریان متناوب یک حلقه رساناست که در یک میدان مغناطیسی خارجی می چرخد. در عمل، یک  $emf$  متناوب القایی در پیچهای با تعداد دور زیاد سیم به وسیله حلقه‌های لغزان متصل به قاب چرخان حاصل می شود. هر حلقه به یک سر سیم قاب متصل است و به وسیله یک جاروی رسانا که در مقابلش می لغزد به بقیه مدار مولد الکتریکی وصل شده است.

که در آن  $I$  دامنهٔ جریان ایجاد شده است. (فاز  $\omega_d t - \phi$  جریان به جای  $\omega_d t + \phi$  به طور قراردادی با علامت منفی نوشته شده است.) ثابت فاز  $\phi$  را در معادلهٔ ۲۷-۲۹ به این علت قرار داده‌ایم که جریان  $i$  ممکن است با نیروی محرکهٔ الکتریکی  $\mathcal{E}$  همفاز نباشد، (همان‌طور که خواهید دید، ثابت فاز به مشخصه‌های مداری مربوط است که مولد به آن بسته شده است.) همچنین می‌توانیم با قراردادن  $2\pi f_d$  به جای  $\omega_d$  در معادلهٔ ۲۷-۲۹ جریان  $i$  را بر حسب بسامد محرک  $f_d$  نیروی محرکهٔ الکتریکی بنویسیم.



## ۷- نوسانهای واداشته

دیدیم با شروع نوسان، بار، اختلاف پتانسیل و جریان در دو مدار نامیرای  $LC$  و میرای  $RLC$  (با مقاومت به حد کافی کوچک) با بسامد زاویه‌ای  $\omega = 1/\sqrt{LC}$  نوسان می‌کنند. چنین نوسانهایی، نوسانهای آزاد (آزاد از هر نیروی محرکه الکتریکی خارجی) نام دارند و بسامد زاویه‌ای  $\omega$ ، بسامد زاویه‌ای طبیعی مدار نامیده می‌شود.

وقتی  $emf$  متناوب خارجی با معادله  $27-28$  به یک مدار  $RLC$  متصل شود، نوسانهای بار، اختلاف پتانسیل و جریان، نوسانهای تحریک شده یا نوسانهای واداشته گفته می‌شوند. این نوسانها همواره در بسامد زاویه‌ای تحریکی  $\omega_d$  رخ می‌دهند.

بسامد زاویه‌ای طبیعی  $\omega$  یک مدار هر مقداری داشته باشد، نوسانهای واداشته بار، جریان و اختلاف پتانسیل در مدار همواره در بسامد زاویه‌ای تحریکی  $\omega_d$  رخ می‌دهد.

البته، همان‌طور که در بخش ۲۷-۹ خواهیم دید، دامنه نوسانها به میزان خیلی زیادی به نزدیکی  $\omega_d$  و  $\omega$  بستگی دارد. وقتی دو بسامد زاویه‌ای یکسان شوند - شرطی که تشدید نامیده می‌شود - دامنه  $I$  جریان در مدار بیشینه خواهد بود.

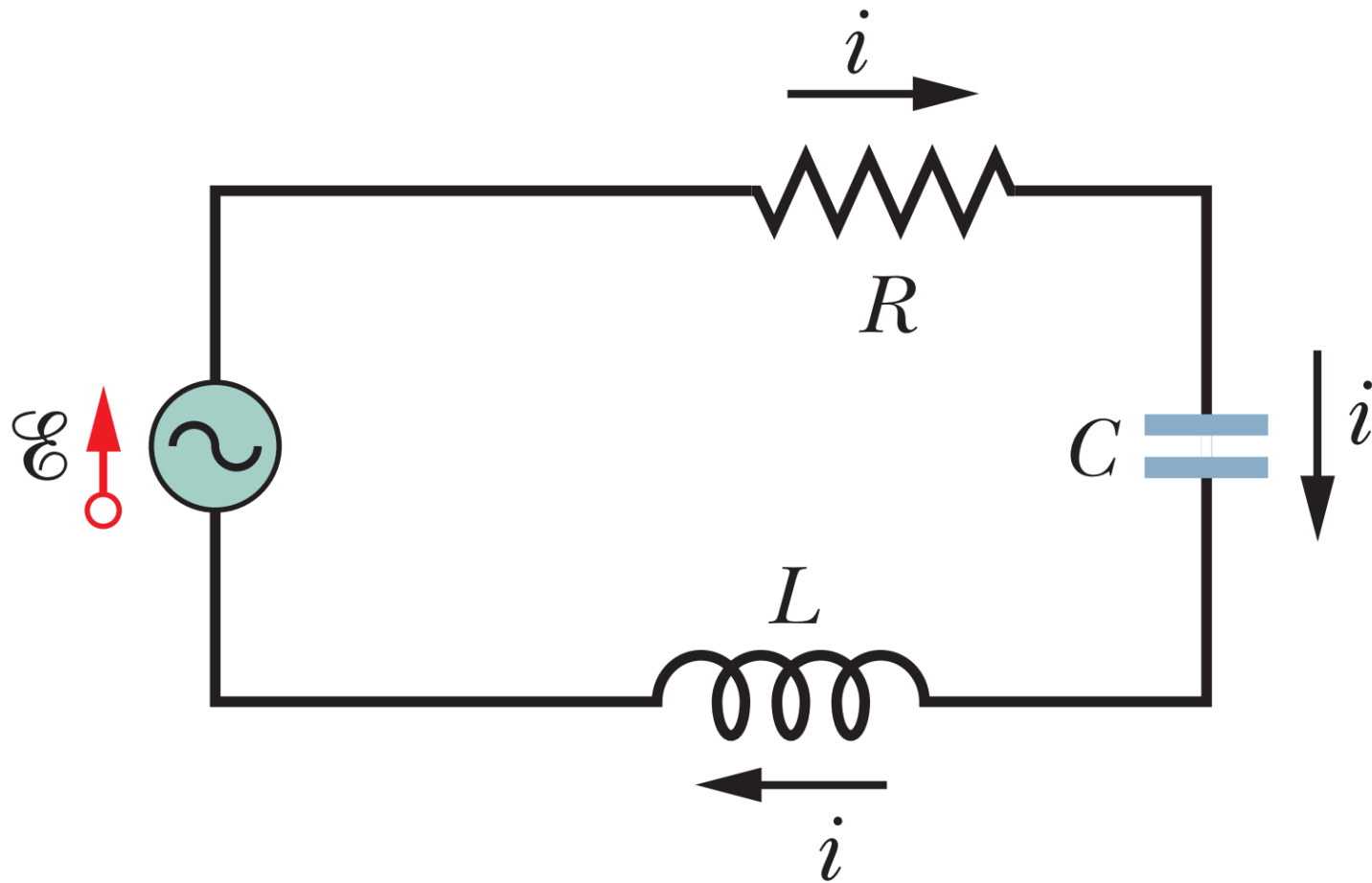
## ۸- سه مدار ساده

بعداً در این فصل، یک وسیلهٔ  $emf$  متناوب خارجی را به ترتیب شکل ۲۷-۷ به یک مدار  $RLC$  متوالی وصل می‌کنیم. سپس عبارتهایی برای دامنهٔ  $I$  و ثابت فاز  $\phi$  جریان نوسانی سینوسی بر حسب دامنهٔ  $\mathcal{E}_m$  و بسامد زاویه‌ای  $\omega_d$  نیروی محرکهٔ الکتریکی خارجی به دست می‌آوریم. ابتدا سه مدار ساده‌تر را در نظر می‌گیریم که هر یک دارای نیروی محرکهٔ الکتریکی خارجی و فقط عنصر مدار  $R$ ،  $C$  یا  $L$  هستند. با عنصر مقاومت (بار مقاومتی خالص) شروع می‌کنیم.

### بار مقاومتی

شکل ۲۷-۸ مداری را نشان می‌دهد که شامل یک مقاومت به اندازهٔ  $R$  و یک مولد  $ac$  با  $emf$  متناوب با معادلهٔ ۲۷-۲۸ است. بنابر قاعدهٔ حلقه داریم

$$\mathcal{E} - v_R = 0$$



شکل ۲۷-۷ یک مدار تک حلقه که شامل مقاومت، خازن و القاگر است. مولدی که، با موج سینوسی در دایره نشان داده شده است نیروی محرکه الکتریکی متناوبی ایجاد می کند که یک جریان متناوب به وجود می آورد؛ جهت های نیروی محرکه الکتریکی و جریان در اینجا فقط برای یک لحظه مشخص شده اند.



شکل ۲۷-۸ مقاومتی به دو سر یک مولد جریان متناوب متصل است.

با استفاده از معادله ۲۷-۲۸، خواهیم داشت

$$v_R = \mathcal{E}_m \sin \omega_d t$$

چون دامنه  $V_R$  اختلاف پتانسیل متناوب (یا ولتاژ) دو سر مقاومت با دامنه  $\mathcal{E}_m$ ، emf متناوب برابر است، می‌توانیم رابطه بالا را به صورت زیر بنویسیم

$$v_R = V_R \sin \omega_d t \quad (27-30)$$

از تعریف مقاومت ( $R = V/i$ )، اکنون می‌توانیم جریان  $i_R$  در مقاومت را به این صورت بنویسیم

$$i_R = \frac{v_R}{R} = \frac{V_R}{R} \sin \omega_d t \quad (27-31)$$

از معادله ۲۷-۲۹، همچنین می‌توان این جریان را به صورت زیر نیز نوشت

$$i_R = I_R \sin (\omega_d t - \phi) \quad (27-32)$$

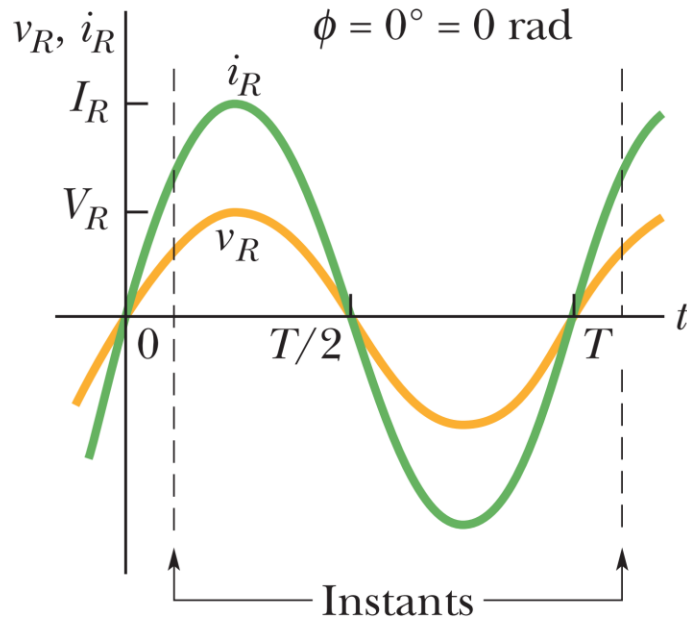
که در آن دامنه جریان  $i_R$  در مقاومت است. با مقایسه معادله‌های ۲۷-۳۱ و ۲۷-۳۲ ملاحظه می‌کنیم که، برای بار مقاومتی خالص ثابت فاز  $\phi=0$  است. هم‌چنین ملاحظه می‌کنیم که دامنه ولتاژ و دامنه جریان با رابطه زیر هم مربوط‌اند

$$V_R = I_R R \quad (\text{مقاومت}) \quad (27-33)$$

اگر چه این رابطه به مدار شکل ۲۷-۸ مربوط است، ولی در مورد هر مقاومتی در مدار متناوب صادق است.

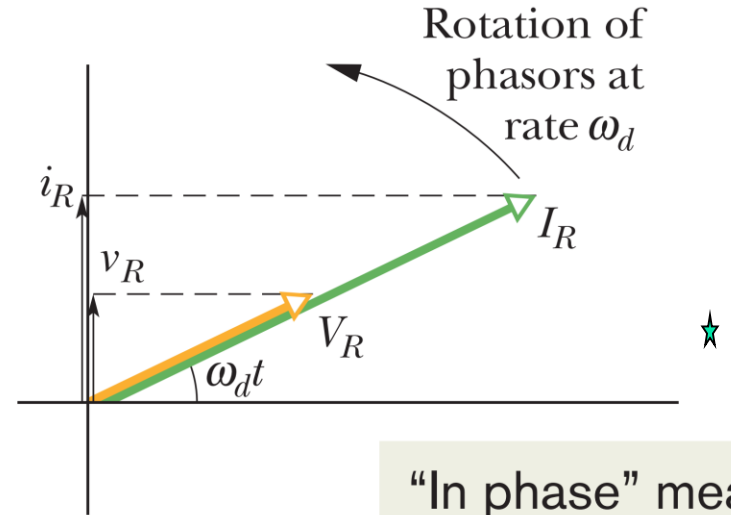
با مقایسه معادله‌های ۲۷-۳۰ و ۲۷-۳۱ می‌بینیم که کمیت‌های متغیر نسبت به زمان  $v_R$  و  $i_R$ ، هر دو تابع  $\sin \omega_d t$  با  $\phi=0$ ، هستند. به این ترتیب، این دو کمیت هم‌فازند، به این معنا که بیشینه (و کمینه) متناظر آنها در یک زمان رخ می‌دهد. شکل ۲۷-۹ الف که نموداری از  $v_R(t)$  و  $i_R(t)$  است، همین امر را نشان می‌دهد.

For a resistive load,  
the current and potential  
difference are in phase.



(a)

represented in (b)



(b)

“In phase” means  
that they peak at  
the same time.

شکل ۲۷-۹ (الف) جریان  $i_R$  و اختلاف پتانسیل  $v_R$  دو سر مقاومت، بر حسب زمان  $t$ ، در یک نمودار رسم شده‌اند. آنها همفازند و یک چرخه را در یک زمان تناوب  $T$  طی می‌کنند. (ب) نمودار بردار فاز همین امر در (الف) را نشان می‌دهد.



توجه کنید که در اینجا  $v_R$  و  $i_R$  کاهش نمی‌یابند چون مولد انرژی تلف شده در  $R$  را تأمین می‌کند.

کمیت‌های متغیر نسبت به زمان  $v_R$  و  $i_R$  را می‌توان به طور هندسی به وسیله بردارهای فاز (فازورها) نیز نشان داد. بردارهای فاز بردارهایی هستند که دور یک مبدأ می‌چرخند. آنهایی که بیانگر ولتاژ دو سر و جریان در مقاومت شکل ۲۷-۸ هستند در یک زمان اختیاری  $t$  در شکل ۲۷-۹ ب نشان داده شده‌اند. این بردارهای فاز دارای خواص زیرند:

**تندی زاویه‌ای:** هر دو بردار فاز به طور پادساعتگرد با تندی زاویه‌ای برابر با بسامد زاویه‌ای  $\omega_d$  مربوط به  $v_R$  و  $i_R$  دور مبدأ می‌چرخند.

**طول:** طول هر بردار فاز بیانگر دامنه کمیت متناوب است:  $V_R$  برای ولتاژ و  $I_R$  برای جریان.

**تصویر:** تصویر هر بردار فاز روی محور قائم بیانگر کمیت متناوب در زمان  $t$  است:  $v_R$  برای ولتاژ و  $i_R$  برای جریان.

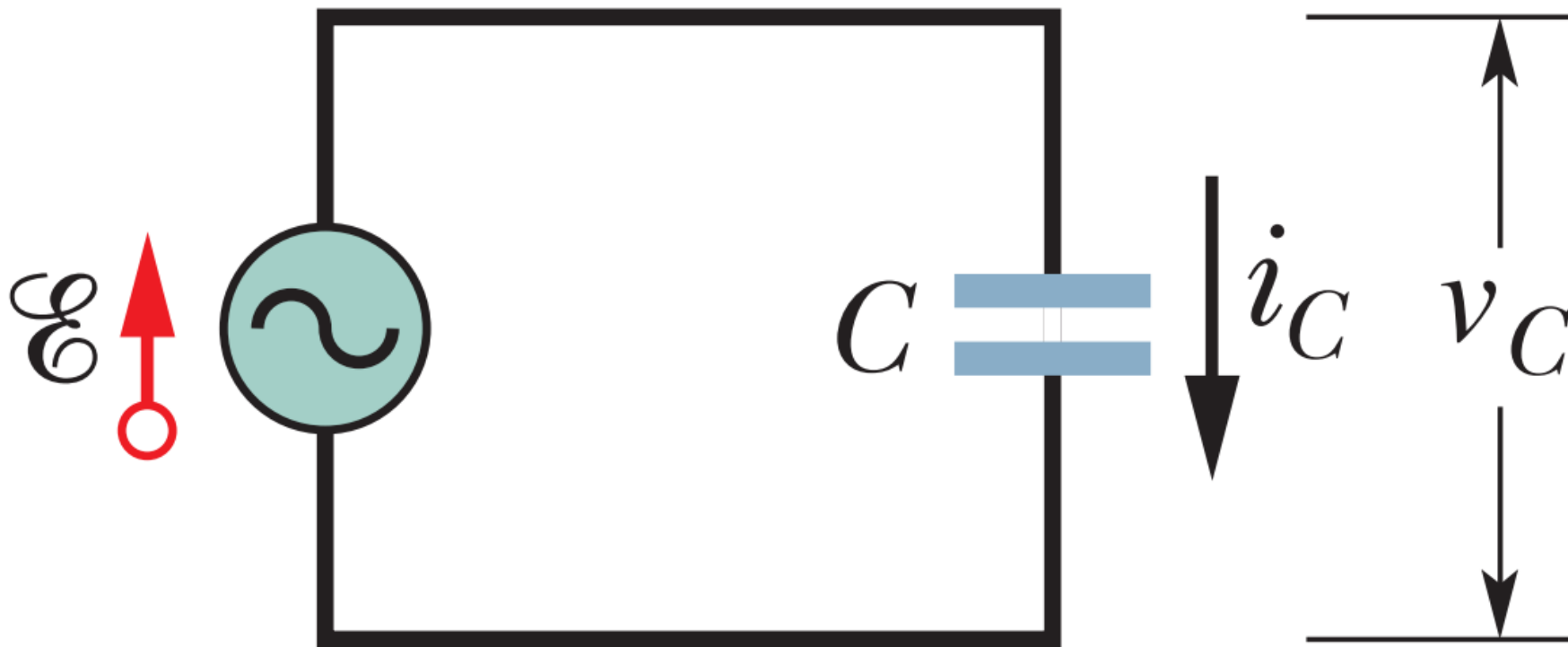
**زاویه چرخش:** زاویه چرخش بردار فاز با فاز کمیت

متناوب در زمان  $t$ ، برابر است. در شکل ۲۷-۹ ب، ولتاژ و جریان همفازند؛ بنابراین، بردار فاز آنها دارای فاز یکسان  $\omega_d t$  و زاویه چرخش یکسانی هستند و در نتیجه با هم می چرخند.

حال به طور ذهنی چرخش را پی گیری کنید. آیا می توانید ببینید که بردارهای فاز به گونه ای که  $\omega_d t = 90^\circ$  باشد چرخیده اند (آنها به طور قائم به سمت بالا هستند)، و بنابراین آنها درست بیانگر این هستند که  $v_R = V_R$  و  $i_R = I_R$  است؟ معادله های ۲۷-۳۰ و ۲۷-۳۲ نتیجه یکسانی به دست می دهند.

## بار خازنی

شکل ۲۷-۱۰ مداری را نشان می دهد که شامل یک خازن و یک مولد با emf متناوب با معادله ۲۷-۲۸ است. با به کار بردن قاعده حلقه و پیروی از روشی که برای به دست آوردن معادله ۲۷-۳۰



شکل ۲۷-۱۰ (الف) خازنی به دو سر یک مولد جریان متناوب متصل شده است.

انجام دادیم، در می‌یابیم که اختلاف پتانسیل دو سر خازن برابر است با

$$v_C = V_C \sin \omega_d t \quad (27-36)$$

که در آن  $V_C$  دامنه ولتاژ متناوب دو سر خازن است. از تعریف ظرفیت می‌توانیم رابطه زیر را نیز بنویسیم

$$q_C = C v_C = C V_C \sin \omega_d t \quad (27-37)$$

ولی، چون توجه ما به جای بار به جریان است، بنابراین، از معادله ۲۷-۳۷ مشتق می‌گیریم تا رابطه زیر به دست آید

$$i_C = \frac{dq_C}{dt} = \omega_d C V_C \cos \omega_d t \quad (27-38)$$

اکنون معادله ۲۷-۳۸ را از دو نظر اصلاح می‌کنیم. ابتدا به دلیل تقارن در نمادها، کمیت  $X_C$  را که واکنایی خازنی نامیده می‌شود به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$X_C = \frac{1}{\omega_d C} \quad (27-39) \quad \begin{array}{l} \text{(واکنایی خازنی)} \\ \text{= مقاومت خازنی} \end{array}$$

capacitive reactance

مقدار این کمیت نه تنها به خازن بستگی دارد بلکه به بسامد زاویه‌ای محرک  $\omega_d$  نیز بستگی دارد. از تعریف ثابت زمانی خازنی ( $\tau = RC$ ) می‌دانیم که یکای SI برای  $C$  می‌تواند به صورت ثانیه بر اهم بیان شود. با به کار بردن این در معادله ۲۷-۳۹ در می‌یابیم که یکای SI برای  $X_C$  درست مانند مقاومت  $R$ ، اهم است.

به عنوان دومین اصلاح، در معادله ۲۷-۳۸ مقدار  $\cos \omega_d t$  را با سینوس تغییر فاز یافته جایگزین می‌کنیم، یعنی

$$\cos \omega_d t = \sin (\omega_d t + 90^\circ)$$

با تغییر دادن منحنی سینوسی به اندازه  $90^\circ$  در جهت منفی، می‌توان این اتحاد را ثابت کرد.

با این دو اصلاح، معادله ۲۷-۳۸ به صورت زیر درمی‌آید

$$i_C = \left( \frac{V_C}{X_C} \right) \sin (\omega_d t + 90^\circ) \quad (40-27)$$

از معادله ۲۷-۲۹، همچنین می‌توانیم جریان  $i_C$  در خازن را به صورت زیر بنویسیم

$$i_C = I_C \sin (\omega_d t - \phi) \quad (41-27)$$

که  $I_C$  دامنه  $i_C$  است. با مقایسه معادله‌های ۲۷-۴۰ و ۲۷-۴۱، می‌بینیم که برای یک بار خازنی خالص ثابت فاز برای جریان برابر  $-90^\circ$  است. همچنین ملاحظه می‌کنیم که دامنه ولتاژ و دامنه جریان با این رابطه به هم مربوط‌اند

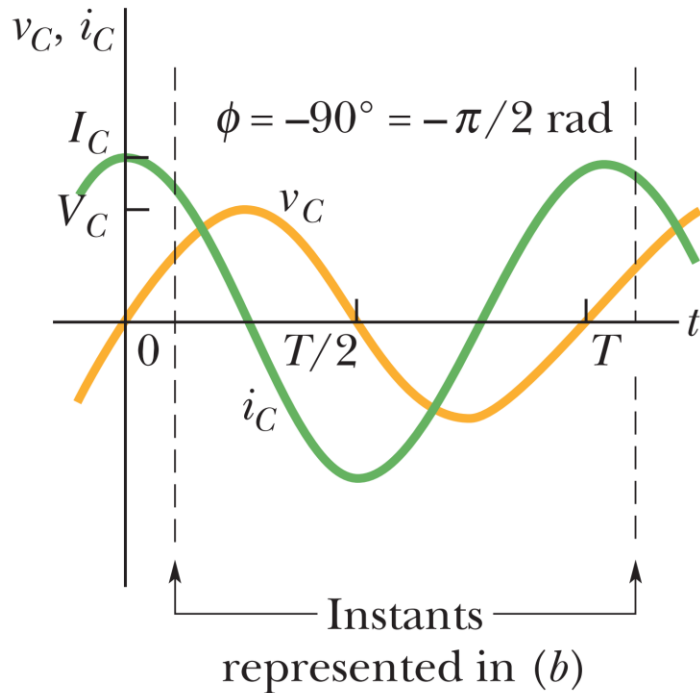
$$V_C = I_C X_C \quad (\text{خازن}) \quad (27-42)$$

اگر چه ما این رابطه را برای مدار شکل ۲۷-۱۰ به دست آوردیم، اما این رابطه برای هر خازن در هر مدار ac به کار می‌رود.

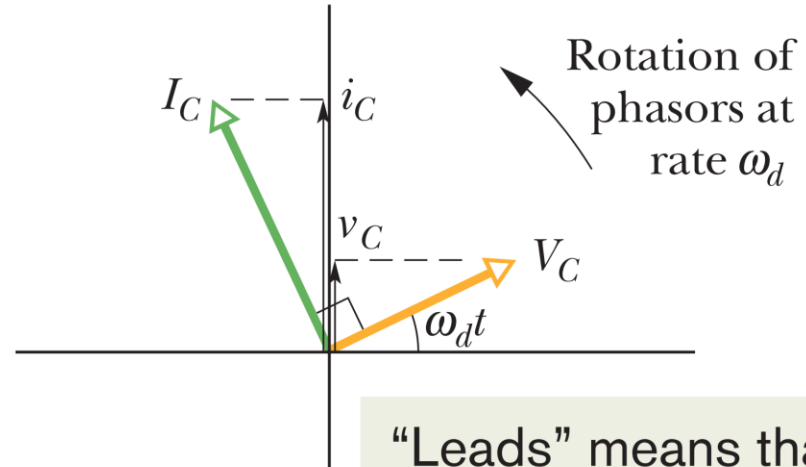
مقایسه معادله‌های ۲۷-۳۶ و ۲۷-۴۰ یا بررسی شکل ۲۷-۱۱ الف، نشان می‌دهد که کمیت‌های  $v_C$  و  $i_C$  به اندازه  $90^\circ$ ،  $\pi/2$  رادیان یا یک چهارم چرخه اختلاف فاز دارند. افزون بر این، می‌بینیم که  $i_C$  از  $v_C$  جلو می‌افتد، به این معنا که اگر جریان  $i_C$  و اختلاف پتانسیل  $v_C$  را در مدار شکل ۲۷-۱۰ در نظر بگیریم درمی‌یابیم که  $i_C$  به اندازه یک چهارم چرخه پیش از  $v_C$  به پیشینه‌اش می‌رسد.

رابطه بین  $i_C$  و  $v_C$  به وسیله نمودار بردار فاز شکل ۲۷-۱۱

For a capacitive load, the current leads the potential difference by  $90^\circ$ .



(a)



“Leads” means that the current peaks at an *earlier* time than the potential difference.

(b)

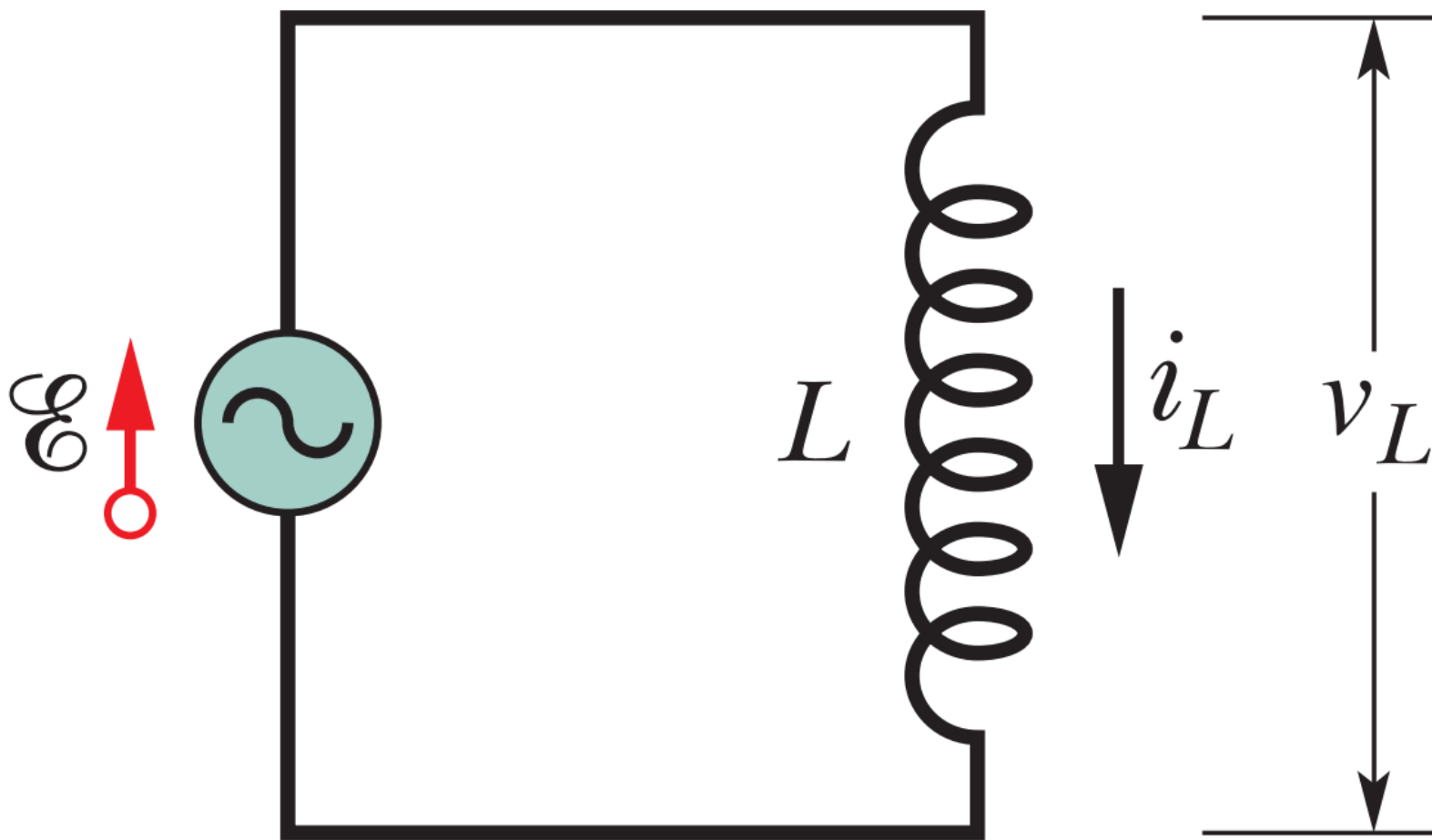
شکل ۲۷-۱۱ الف جریان در خازن  $(= \pi/2 \text{ rad})$  از ولتاژ جلو می‌افتد. (پ) نمودار بردار فاز همین امر را نشان می‌دهد.

ب نمایش داده شده است. همان‌طور که بردارهای فاز نشان می‌دهند، دو کمیت با هم با طور پادساعتگرد می‌چرخند، در واقع بردار فاز مربوط به  $I_C$  از بردار فاز مربوط به  $V_C$  به اندازه  $90^\circ$  جلو می‌افتد؛ یعنی، بردار فاز  $I_C$  یک چهارم چرخه پیش از  $V_C$  به محور قائم می‌رسد. باید متقاعد شوید که نمودار بردار فاز شکل ۲۷-۱۱ ب با معادله‌های ۲۷-۳۶ و ۲۷-۴۰ سازگار است.

## بار القاایی

شکل ۲۷-۱۲ مداری را نشان می‌دهد که شامل یک القاگر و مولدی با  $emf$  متناوب با معادله ۲۷-۲۸ است. با استفاده از قاعده حلقه و پیروی از روشی که برای به دست آوردن معادله ۲۷-۳۰ به کار بردیم، در می‌یابیم که اختلاف پتانسیل دو سر القاگر برابر است با





شکل ۲۷-۱۲ القاگری به دو سر یک مولد جریان متناوب متصل است.

$$v_L = V_L \sin \omega_d t \quad (۲۷-۴۵)$$

که در آن دامنه  $V_L$  دامنه  $v_L$  است. از معادله ۲۶-۳۵ ( $\mathcal{E}_L = -L di/dt$ )، می‌توانیم اختلاف پتانسیل دو سر القاگر  $L$  را که در آن جریان با آهنگ  $di/dt$  تغییر می‌کند به صورت زیر بنویسیم

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (۲۷-۴۶)$$

اگر معادله‌های ۲۷-۴۵ و ۲۷-۴۶ را ترکیب کنیم، داریم

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \sin \omega_d t \quad (۲۷-۴۷)$$

ولی، توجه ما به جای مشتق جریان نسبت به زمان به خود جریان است. جریان را با انتگرالگیری از معادله ۲۷-۴۷ به دست می‌آوریم

$$i_L = \int di_L = \frac{V_L}{L} \int \sin \omega_d t dt = -\left(\frac{V_L}{\omega_d L}\right) \cos \omega_d t \quad (۲۷-۴۸)$$

اکنون این معادله را از دو نظر اصلاح می‌کنیم. ابتدا، به علت تقارن در نمادگذاری، کمیت  $X_L$  را که واکنایی القایی القاگر نامیده می‌شود، به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$X_L = \omega_d L \quad (\text{واکنایی القایی}) \quad (27-49)$$

= مقاومت القایی

مقدار  $X_L$  به بسامد زاویه‌ای محرک  $\omega_d$  بستگی دارد. یکای ثابت زمانی القایی  $\tau_L$  بیانگر این است که یکای  $SI$  مربوط به  $X_L$ ، درست نظیر  $X_C$  و  $R$  اهم است.

### جدول ۲۷

رابطه‌های فاز و دامنه برای جریانها و ولتاژهای متناوب

عنصر مدار	نماد	مقاومت یا مقاومت ظاهری	فاز جریان	ثابت فاز (یا زاویه) $\phi$	رابطه دامنه
مقاومت	R	R	همفاز با $v_R$	۰	$V_R = I_R R$
خازن	C	$X_C = 1/\omega_d C$	$90^\circ$ از $v_C$ جلو می‌افتد	$-90^\circ$	$V_C = I_C X_C$
القاگر	L	$X_L = \omega_d L$	$90^\circ$ از $v_L$ عقب می‌ماند	$+90^\circ$	$V_L = I_L X_L$

دومین اصلاح این است که تابع  $-\cos \omega_d t$  را در معادله ۲۷-۴۸ با تغییر فازی در سینوس جایگزین می‌کنیم، یعنی

$$-\cos \omega_d t = \sin(\omega_d t - 90^\circ)$$

با جابه‌جا کردن منحنی سینوس به اندازه  $90^\circ$  در جهت مثبت، می‌توان این اتحاد را ثابت کرد. با این دو تغییر، معادله ۲۷-۴۸ به صورت زیر در می‌آید

$$i_L = \left( \frac{V_L}{X_L} \right) \sin(\omega_d t - 90^\circ) \quad (50-27)$$

از معادله ۲۷-۲۹ می‌توانیم معادله جریان در القاگر را به صورت زیر نیز بنویسیم

$$i_L = I_L \sin(\omega_d t - \phi) \quad (51-27)$$

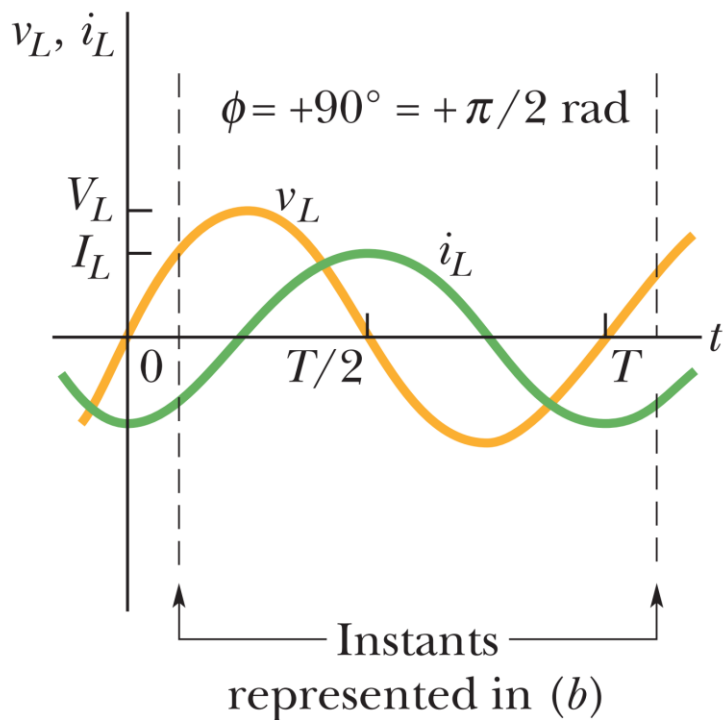
که در آن دامنه جریان  $i_L$  است. با مقایسه معادله‌های ۲۷-۵۰ و ۲۷-۵۱ می‌بینیم که برای بار القایی خالص، ثابت فاز  $\phi$  برای جریان برابر  $90^\circ +$  است. همچنین می‌بینیم که دامنه ولتاژ و دامنه جریان با رابطه زیر به هم مربوط‌اند

$$V_L = I_L X_L \quad (\text{القاگر}) \quad (52-27)$$

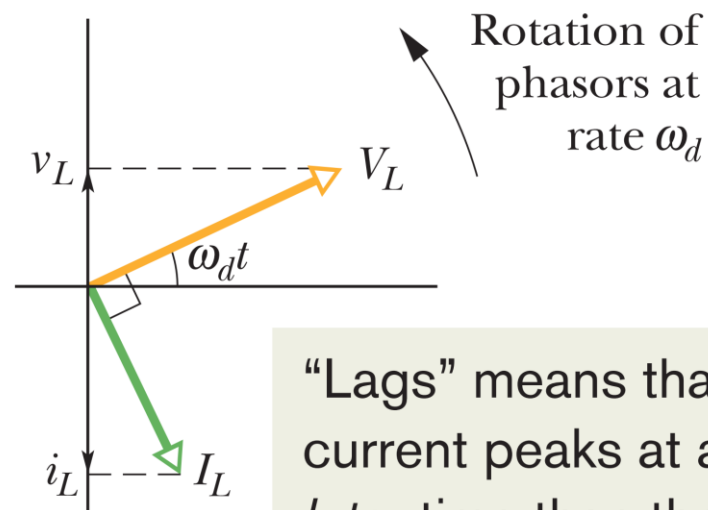
اگر چه ما این رابطه را برای مدار شکل ۲۷-۱۲ به دست آوردیم، اما این رابطه برای هر القاگری در هر مدار ac برقرار است.

مقایسه رابطه‌های ۲۷-۴۵ و ۲۷-۵۰، یا بررسی شکل ۲۷-۱۳ الف نشان می‌دهد که کمیت‌های  $i_L$  و  $v_L$  به اندازه  $90^\circ$  اختلاف فاز دارند. ولی، در این حالت  $i_L$  از  $v_L$  عقب می‌افتد؛ یعنی، اگر جریان  $i_L$  و اختلاف پتانسیل  $v_L$  در مدار شکل ۲۷-۱۲ را مورد توجه قرار دهیم، ملاحظه می‌کنیم که با یک چهارم چرخه تأخیر پس از رسیدن  $v_L$  به بیشینه‌اش،  $i_L$  به بیشینه‌اش می‌رسد. نمودار بردار فاز شکل ۲۷-۱۳ ب نیز همین امر را نشان می‌دهد. وقتی بردارهای فاز در شکل پادساعتگرد می‌چرخند، در واقع بردار فاز نشان داده شده با  $I_L$  نسبت به بردار فاز نشان داده شده با  $v_L$  به اندازه زاویه  $90^\circ$  عقب است. خود را متقاعد کنید که شکل ۲۷-۱۳ ب بیانگر معادله‌های ۲۷-۴۵ و ۲۷-۵۰ است.

For an inductive load, the current lags the potential difference by  $90^\circ$ .



(a)



“Lags” means that the current peaks at a *later* time than the potential difference.

(b)

شکل ۲۷-۱۳ (الف) جریان در القاگر ( $\pi/2 \text{ rad} = 90^\circ$ ) از ولتاژ عقب می‌افتد. (ب) نمودار بردار فاز همین امر را نشان می‌دهد.