

فصل پنجم

مدارهای L-C جریان متناوب

هدف‌های رفتاری: در پایان این فصل از هنرجو انتظار می‌رود:

- ۱- منحنی‌ها و دیاگرام‌برداری جریان، ولتاژ و مقاومت ظاهری در مدار L-C سری و موازی را رسم کند.
- ۲- مقادیر مقاومت ظاهری، اختلاف فاز، جریان – ولتاژ و توان‌ها را در مدارهای L-C سری و موازی محاسبه کند.
- ۳- مفهوم رزنанс را شرح دهد و فرکانس رزنанс را در مدارهای L-C سری و موازی محاسبه کند.
- ۴- منحنی تغییرات امپدانس Z و جریان I، مدارهای L-C سری و موازی را در تغییرات فرکانس رسم کند.
- ۵- معادلات زمانی ولتاژ و جریان عناصر در مدارهای L-C سری و موازی را به دست آورد.

۱-۵- مقدمه

همکار گرامی در این فصل نیز برای ایجاد انگیزه بیشتر برای هنرجویان، در ابتدای شروع فصل از کاربردهای متداول مدارهای L-C برای آنها نمونه‌هایی برشمارید.
مدارات نوسان‌ساز، فرستنده‌های تلویزیونی و رادیویی و تزریق خازن در شبکه‌های با بار سلفی جهت اصلاح ضریب قدرت و استفاده از بانک‌های خازنی در این خصوص مواردی است که می‌توان به آنها اشاره نمود.

نکته بسیار مهمی که در رابطه با اتصال خازن و سلف باید آن را یادآوری کنیم این است که چه در حالت سری و چه در حالت موازی این دو المان رفتاری خلاف همدیگر دارند.
در اتصال سری بردار ولتاژها در خلاف جهت همدیگر و در حالت موازی بردار جریان‌ها مقابل همدیگر بوده و اختلاف زاویه 180° می‌سازند.
این خاصیت باعث می‌شود تا این دو عنصر الکتریکی اثر همدیگر را خنثی و تضعیف نمایند.

۵-۵-۱ مدار L-C سری

در مدار L-C سری هر کدام از راکتانس سلفی X_C یا خازنی X_L بزرگتر باشد کیفیت سلفی یا خازنی مدار را تعیین می کند از همین مقایسه مقدار C یا L نیز مشخص می شود.

دالنه باشد. از آن جا که هر دو عنصر در شبکه توان راکتوپ مداره می کنند، به دلیل این متفاوتی آنها می توان توان راکتوپ شبکه را کاهش داد و مقدار آن را به صفر رسانند. مدارهای L-C در شبکهها بهصورت اتصال سری، موازی یا اتصال سری موازی به کار گرفته می شوند. در این فصل، اتصال سری و موازی مدارهای L-C را به طور جداگانه بررسی می کنیم.



شکل ۵-۱. مدار سری L-C

۱-۱-۱ مدار الکتریکی L-C سری که از یک عنصر خالص خازنی و یک عنصر خالص سلفی تشکیل می شود. مطلبی شکل ۵-۱ است. در این مدار، جریان هر دو عنصر ریکسان است، اگر برای رسم دیاگرام برداری، جریان را از تپار ذره و لذار دو سر سلف از جریان i جلوتر و لذار در سر خازن از جریان i عقب از خواهد بود. دیاگرام برداری و لذار با فرض $V_L > V_C$ مطابق شکل ۵-۲ رسم می شود.

۱-۱-۲ مدار سری اتصال مدار L-C
برای از شکل ۵-۱ می توان مقدار ولتاژها را V_L و V_C را بدست آورد.

$$V_L = i_L X_L = i_L \cdot L \omega \quad (5-1)$$

$$V_C = i_C X_C = i_C \cdot \frac{1}{C \omega} \quad (5-2)$$

از شکل ۵-۱ دیاگرام برداری ولتاژها و شکل ۵-۱ مدار L-C سری می توان نوشت:

$$\vec{V}_e = \vec{V}_L + \vec{V}_C \quad V_e = i_L Z$$

$$V_e = V_L - V_C \quad (5-3)$$

۳۳۶

چون مثل همه مدارهای سری مبنا جریان است و در اینجا ولتاژ سلف نسبت به جریان مدار 90° پیش فاز و ولتاژ خازن 90° پس فاز است و جمعاً 180° درجه الکتریکی با همدیگر زاویه می سازند که طبق روابط خوانده شده در فصل بردارها برآیند این دو بردار با تفاضل آنها معادل است یعنی:

$$V_e = V_L - V_C \quad (\text{در صورتی که } X_L > X_C)$$

به همین دلیل مقدار امپدانس کل Z برابر است با:

$$Z = X_L - X_C$$

(الف)

مقدایر توان‌ها در مدار L-C سری: چون عنصر اکتیو (مقاومت) در این مدار نداریم پس
توان اکتیو نیز مصرف نمی‌شود و خواهیم داشت: $P_e = W_e$

با جایگذاری این روابط ۱-۵ و ۲-۵ در رابطه ۳-۵ مطابق با است:

$$I_e \times Z = X_L I_e - X_C I_e \quad (3-6)$$

$$Z = X_L - X_C \quad (3-7)$$

دیگر صورتی که $V_C > V_L$ باشد رابطه ۳-۷ و ۵-۶ مصوبت زیر می‌شود:

$$V_s = V_C - V_L$$

$$Z = X_C - X_L$$

نتیجه: همان طور که مشاهده می‌کند، در رابطه ۳-۶ اخلاق فاز برقیان و ولتاژ همراه ۴-۷ مطابق باشد، اگر $X_L > X_C$ باشد، پس $\phi = 90^\circ$ و مدار پس از I_e از $X_C = X_L$ باشد، ۴-۸ مطابق باشد و مدار پس از X_L باشد، پس ضرب توان مؤثر و خروجی به ترتیب $\cos \phi = 1$ و $\sin \phi = 1$ است. و فنی ضرب توان مؤثر معتبر نمود، در مدار L-C همچوئی توان اکتیو مصرف نمی‌شود. بنابراین:

$$P_e = V_s I_e \cos \phi \quad (3-8)$$

برای محاسبه توان راکتیو می‌توان نوشت:

$$P_{d_L} = I_e^2 X_L$$

$$P_{d_C} = -I_e^2 X_C$$

$$P_d = P_{d_L} + P_{d_C} = I_e^2 X_L - I_e^2 X_C$$

$$P_d = I_e^2 (X_L - X_C) \quad (3-9)$$

رابطه ۳-۹ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$P_d = \pm V_s I_e \sin \phi = \pm V_s I_e \sin \theta = \pm V_s I_e \quad V.A.R. \quad (3-10)$$

نتیجه: با ازای $X_C > X_L$ توان راکتیو با علامت + و با ازای $X_L > X_C$ توان راکتیو با علامت - منفی می‌شود.

از آنجا که $I_e = V_s / Z$ است، بنابراین:

$$P_d = P_d = V_s I_e \quad (3-11)$$

۱۱۹

ولی در عوض به دلیل وجود دو عنصر راکتیو سلف و خازن توان راکتیو این دو المان به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{مصرف کننده توان راکتیو } P_{d_L} = X_L I_e^2 \rightarrow$$

$$\text{تولیدکننده توان راکتیو } P_{d_C} = -X_C I_e^2 \rightarrow$$

چون رفتار این دو المان مخالف یکدیگر است.

$$\text{کل } P_d = P_{d_L} - P_{d_C} = \pm V_s I_e \sin 90^\circ = \pm V_s I_e$$

و در نهایت توان ظاهری مدار از قدر مطلق توان راکتیو به دست می‌آید.

$$P_s = |P_d| = V_s I_e$$

(ب)

معادله زمانی ولتاژ کل : اگر $X_L > X_C$ مدار سلفی است بنابراین ولتاژ پیش فاز (به اندازه 90°) خواهد بود.

$$V = +V_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

و در صورتی که $X_L < X_C$ مدار خازنی و ولتاژ مدار پس فاز (به اندازه 90°) خواهد بود.

$$V = +V_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

مثال ۷ یک سری مجموعه مدارهای **کاپاکسی** فرض می کنیم جریان مشترکی با

مدارهای زمانی ولتاژ در سر مکافت به صورت $I = I_m \sin(100\pi t)$ عبور می کند.

مدارهای زمانی ولتاژ در سر مکافت به صورت $V_L = X_L I_m \sin(100\pi t + \frac{\pi}{4})$ و ولتاژ در سر

خازن به صورت $V_C = X_C I_m \sin(100\pi t - \frac{\pi}{4})$ خواهد شد. ولتاژ میان همواره از جمع جبری در

ولتاژ تقطیری V_L و V_C دست می آید. بنابراین، ولتاژ کل برآور است با :

$$V(t) = X_L I_m \sin(100\pi t + \frac{\pi}{4}) + X_C I_m \sin(100\pi t - \frac{\pi}{4}) \quad (5.1)$$

با توجه به این که $\sin(100\pi t + \frac{\pi}{4}) = -\cos(100\pi t)$ و $\sin(100\pi t - \frac{\pi}{4}) = \cos(100\pi t)$ است رابطه V - I - t :

صورت زیر برآور می شود :

$$V = X_L I_m \cos(100\pi t) - X_C I_m \cos(100\pi t)$$

$$V = (X_L - X_C) I_m \cos(100\pi t)$$

با توجه به قانون احتمال $(X_L - X_C) > X_C$ می شود. اگر $V_m = (X_L - X_C) I_m$ باشد رابطه ولتاژ کل :

به صورت زیر برآور می شود :

$$V = +V_m \cos(100\pi t + \frac{\pi}{4}) \quad (5.2)$$

و در صورتی که $X_L < X_C$ مدار، رابطه ولتاژ V - I - t به صورت زیر برآور می شود :

$$V = V_m \sin(100\pi t - \frac{\pi}{4})$$

مثال ۸ یک مدار $L-C$ سری با $L = 100\mu H$ و خازن C مفروض است. اگر معادله ولتاژ

و ولتاژهای جریان $I = I_m \sin(2\pi f t)$ باشد، طبقت خازن C چگونه است؟

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{100\pi f}{1} = 314 \Omega \quad (\text{راهنمایی})$$

$$\phi = \theta_L - \theta_C = (-90^\circ) - (-90^\circ) = 0^\circ$$

۱۴۰

فرض بر خالص بودن سلف و خازن می باشد.

پس به هنرجویان مذکور شویم که برای حل مسائل مربوط به $L-C$ سری ابتدا نوع مدار را مشخص کنیم که تشخیص آن از مقایسه X_L و X_C به سادگی میسر است.

در مثال ۱ صفحه ۱۲۰ کتاب درسی چون ولتاژ مدار به اندازه 90° نسبت به جریان پس فاز است

پس مدار در مجموع خاصیت خازنی دارد و $Z = X_C - X_L$

(ج)

حالت تشدید یا رزنانس در مدار $L-C$ سری : با تغییر فرکانس، مقدار C و مقدار L مدار در وضعیتی قرار می‌گیرد که مقدار راکتانس سلف و خازن با هم دیگر برابر می‌شوند یعنی $X_L = X_C$ و از آنجا خواهیم داشت $Z = |X_L - X_C| = \Omega$ و جزیان به بیشتر مقدار خود خواهد رسید.

حالات تشدیدی راکتانس (فرکانس) در رابطه با ω است. اینها را مقدار $L-C$ سری می‌نامند. مدار $L-C$ سلسله کرده است. مجموع $Z = \frac{1}{\omega C}$ است. خازن $X_C = \frac{1}{\omega C}$ است. مدار $L-C$ سلسله کرده است. مجموع $Z = \omega L + \frac{1}{\omega C}$ است. خازن $X_C = \frac{1}{\omega C}$ است. مقدار L و C تغییر می‌کند. از آنجا که طرفت مدار سطح موزار مقدار خازن با تغییر ضربت است، با تغییر فرکانس دو صفحه‌ی خازن، تغییر مدار سطح موزار مقدار خازن با تغییر ضربت دیگر نیز می‌توان طرفت مدار را تغییر داد. در اندکانس یک مقدار، تغییر دور و سطح مطلع صفحه‌ها و طول موزار بروین (طبقه) و ضرسی بخود مقدار خازن، مدار L و تغییر می‌دهد. در هر صورت، با تغییر کمیت‌های L و C می‌توان وضعیت اندکانس را تغییر داد. از $Z = \frac{1}{\omega C}$ می‌شود. در این حالت، اندکانس کسته باز و از صفر می‌شود و حداقل جریان در مدار $L-C$ سری جذب شود. این جزیان، با جریان اتصال کوتاه مدار $L-C$ برای این است و سلف و خازن با هم مدار را به اتصال کوتاه می‌کنند. این حالت از وضعیت مدار $L-C$ سری را که با $Z = \frac{1}{\omega C}$ می‌شود.

حالات تشدیدی راکتانس گویند. در حالات تشدید خواهیم داشت:

$$Z = \omega L + \frac{1}{\omega C} = \omega RL + \frac{1}{\omega C} \quad (2-11)$$

$$\omega RL = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \omega^2 LC = 1 \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ rad/s} \quad (2-12)$$

اگر در مدار $L-C$ سری L و C ثابت باشند، با تغییرات فرکانس ω وضعیت تشدیدی اندکانس می‌شود. به فرکانسی که وضعیت تشدید را ایجاد می‌کند، فرکانس راکتانس یا **فرکانس تشدید** گویند و آنرا با f_r نشان می‌دهند. از رابطه $\omega = 2\pi f_r$ فرکانس تشدید به صورت روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega^2 LC = 1 \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$L\omega^2 C = 1 \Rightarrow \omega^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

$$T_{fr} = \frac{1}{\omega} = \sqrt{LC}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-13)$$

تمام

این حالت رزنانس نامیده می‌شود و فرکانسی که در این فرکانس این اتصال کوتاه رخ می‌دهد فرکانس تشدید نامیده می‌شود به هنرجویان حتماً یادآوری کنیم که مدار به حالت اتصال کوتاه می‌رود.

$$X_L = X_C \rightarrow L\omega = \frac{1}{C\omega} \rightarrow LC\omega^2 = 1 \rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

در مثال آورده شده در صفحه ۱۲۳ (مثال ۲)، یکی از مواردی که هنرجویان با آن دچار زحمت می‌شوند محاسبه مقدار فرکانس رزنانس (تشدید) است.

در رابطه‌ی $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ بر حسب فرازد و آن بر حسب هرز است:



مثال ۵-۱۲ مدار C-SR، مطالع شکل ۵-۵

فرض است: همان طور که مشاهده شد، هر سه کیفیت A

و L و C در مدار فازی تکبر است. مطلوب است:

a) مقدار اندوکتانسی S، b) در صورتی که در

آنستید ایجاد کند و ظرفیت خازن برابر با

$$C = 1 \mu F$$

c) آنرا بر حسب فرکانس زرآنس $f = 1 + Hz$ بر صورتی که

باشد.

c) در صورتی که $C = 1 - \mu F$ و $L = 1 mH$ باشد فرکانس زرآنس چقدر است؟

را حل:

$$X_C = X_L \Rightarrow 1/X_L = \frac{1}{\omega LC} \Rightarrow L = \frac{1}{\omega^2 C} \quad \text{--- ۱}$$

$$L = \frac{1}{\pi^2 f^2 C} = \frac{1}{\pi^2 (1+Hz)^2 \times 1 \times 10^{-6}} = 15 / 100 mH$$

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{\pi^2 f^2 L} = \frac{1}{\pi^2 (1+Hz)^2 \times 15 / 100} = 25 / 100 \mu F \quad \text{--- ۲}$$

$$f_r = \frac{1}{\sqrt{\omega LC}} = \frac{1}{\pi \sqrt{(1+Hz)^2 \times 15 / 100 \times 10^{-6}}} = 15 / 100 Hz \quad \text{--- ۳}$$

نکته: نسبت فرکانس ای اندوکتانسی و ظرفیت خازنی مدار C-SR، در مدار C

تووجه به رابطه $Z = \omega XL = \frac{1}{\omega CR}$ اگر فرکانس $f = 1$ نوو، اندوکتانس Z از نهایت می‌شود (نحوه ۱)

مدار $\frac{1}{\omega CR} = 0$ می‌شود و $Z = \infty$ می‌شود. بدین معنی فرکانس برای صفر است. پس

مدار از جریان DC خودنمایی نمایند و خازن در جریان DC در حالت پایدار غشای مدار باز را خواهد

داشت. اگر اندوکتانس $Z = \infty$ نوو، هیچ نوع جریانی از مدار غبور نمی‌شود و $i = 0$ خواهد شد.

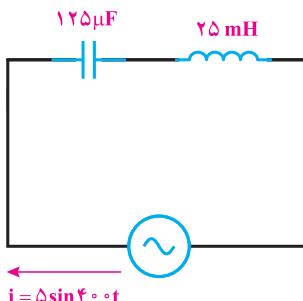
۱۲۴

برای حل این فرکانس بهتر است ابتدا با استفاده از ماشین حساب و با رعایت نمادهای علمی
برای میلی‌هارزی و میکروفاراد (ضریب اندوکتانس و ظرفیت خازن) مقدار زیر را بدیکال و جذر آن را
به دست آورده سپس در مقدار 2π ضرب نمایند و در انتها با معکوس کردن مقدار با استفاده از کلید
 X^{-1} مقدار f_r به دست می‌آید.

$$6 / 28 \times 10^{-3} \times \pi \times \sqrt{1 / 125 \mu F \times 25 mH} = 6 / 28 \times 10^{-3}$$

$$6 / 28 \times 10^{-3} [X^{-1}] = 159 / 23 HZ$$

۱۲-۵- حل تمرین مشابه تمرین ۱ صفحه ۱۲۹ کتاب درسی (شکل ۱)



شکل ۱

هدف : نوشتن معادله ولتاژ دو سر L و C
گام ۱) ابتدا مقادیر اهمی L و C را می نویسیم.

$$X_L = L\omega = 1 \cdot \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = 4 \cdot \Omega$$

گام ۲) در نظر گرفتن I_e مقادیر مؤثر ولتاژ دو سر L و C را می یابیم.

$$I_e = \frac{5}{\sqrt{2}}$$

$$V_L = I_e \cdot X_L = I_e L \omega = \frac{5}{\sqrt{2}} \times 25 \times 1 \cdot 10^{-3} \times 400 = \frac{5}{\sqrt{2}} \text{ V}$$

$$V_C = I_e \cdot X_C = I_e \times \frac{1}{C\omega} = \frac{5}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{125 \times 1 \cdot 10^{-6} \times 400} = \frac{5 \times 10^4}{\sqrt{2} \times 125 \times 4} = 50\sqrt{2} \text{ V}$$

گام ۳) نوشتن معادلات زمانی برای ولتاژ دو سر L و C

- اگر بردار جریان I_e را مبنای قرار دهیم ولتاژ دو سر سلف 90° از جریان جلوتر و ولتاژ دو سر خازن 90° از جریان عقب تر خواهد بود.

$$V_L(t) = V_{L_m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = 5 \cdot \sin(40 \cdot t + \frac{\pi}{2})$$

$$V_C(t) = V_{C_m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = 10 \cdot \sin(40 \cdot t - \frac{\pi}{2})$$

(ب)

هدف : نوشتن معادله ولتاژ منبع

- برای نوشتن معادله ولتاژ منبع کافی است معادلات زمانی دو سر سلف و خازن را با هم جمع کنیم.

گام ۱) جمع معادلات دو سر سلف و خازن

$$V(t) = V_L(t) + V_C(t)$$

$$V(t) = 5 \cdot \sin(40 \cdot t + \frac{\pi}{2}) + 10 \cdot \sin(40 \cdot t - \frac{\pi}{2})$$

گام ۲) با استفاده از روابط زیر، ۲ معادله را به معادلات مشابهی می توان تبدیل کرد.

$$\begin{cases} \sin(\alpha - \frac{\pi}{2}) = -\cos \alpha \\ \sin(\alpha + \frac{\pi}{2}) = \cos \alpha \end{cases}$$

به دلیل اینکه $X_L < X_C$ می‌باشد، معادله ولتاژ 90° عقب‌تر از جریان مبنا می‌باشد.

$$V(t) = 5 \cdot \cos \omega t - 1 \cdot \cos \omega t = -5 \cdot \cos 40^\circ t$$

(پ)

هدف : محاسبه توان‌های مدار

گام ۱) تعیین ضریب توان مؤثر و غیر مؤثر

به دلیل اینکه $X_L < X_C$ می‌باشد $\varphi = -90^\circ$ خواهد بود.

$$X_L < X_C \rightarrow \varphi = -90^\circ \rightarrow \cos(-90^\circ) = 0$$

گام ۲) محاسبه توان‌ها

$$P_e = V_e \cdot I_e \cos \varphi = 0$$

توان غیر مؤثر مدار از طریق سلف و خازن ایجاد می‌شود.

برای محاسبه توان غیر مؤثر مدار می‌توان، توان غیر مؤثر سلف و خازن را به تنهایی محاسبه کرد

و در نهایت جمع کرد.

$$P_{dL} = I_e^2 \cdot X_L = \left(\frac{5}{\sqrt{2}}\right)^2 (10) = 125 \text{ V.A}$$

$$P_{dc} = -I_e^2 \cdot X_C = -\left(\frac{5}{\sqrt{2}}\right)^2 (20) = -25 \text{ V.A}$$

$$P_d = P_{dL} + P_{dc} = 125 - 25 = -125 \text{ V.A}$$

$$P_d = V_e I_e \sin \varphi = -125 \text{ (VAR)}$$

$$P_s = |P_d| = V_e \cdot I_e = 125 \text{ (V.A)}$$

(ت)

هدف : محاسبه فرکانس رزنانس

در فرکانس رزنانس مقادیر مقاومت خازنی و مقاومت سلفی با هم برابر می‌باشند.

$$\text{فرکانس رزنانس از رابطه } f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ محاسبه می‌شود.}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{25 \times 10^{-3} \times 125 \times 10^{-6}}} = 90 \text{ HZ}$$

(ث)

هدف : رسم دیاگرام برداری ولتاژها

$$V_{L_m} = 5 \text{ V}$$

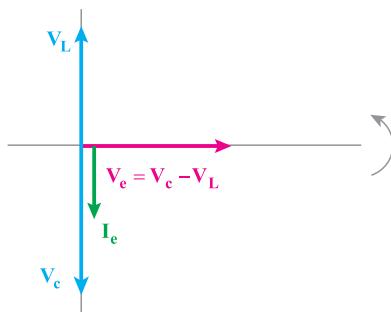
$$V_{c_m} = 10 \text{ V}$$

گام ۱) I_e را مبدأ قرار می‌دهیم.

ولتاژ دو سر سلف از جریان 90° جلوتر و ولتاژ دو سر خازن از جریان 90° عقب تر خواهد بود.

گام ۲) رسم دیاگرام برداری ولتاژها

(ولتاژ کل) به طرف پایین می‌باشد به دلیل اینکه $V_C > V_L$ است. (شکل ۵-۲)

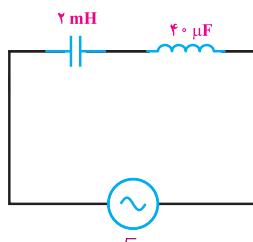


شکل ۵-۲

۵-۲-۵- حل تمرین شماره ۲ صفحه ۱۲۹ کتاب درسی (شکل ۵-۳)

(الف)

هدف : محاسبه معادله زمانی جریان کل



$$V = 10 \sqrt{2} \sin 30^\circ V$$

شکل ۵-۳

گام ۱) ابتدا مقادیر اهمی L و C را می‌نویسیم.

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{40 \times 10^{-9} \times 2500} = 1 \cdot \Omega$$

$$X_L = L\omega = 2 \times 10^{-3} \times 2500 = 5 \cdot \Omega$$

گام ۱) با توجه به گام ۱ می‌توان اختلاف فاز را به صورت زیر مشخص کرد.

$$X_L < X_C \rightarrow \phi = -90^\circ$$

گام ۲) محاسبه امپدانس کل مدار

$$Z = |X_L - X_C| = |5 - 1| = 5 \cdot \Omega$$

گام ۳) تعیین معادله جریان با توجه به مقادیر جریان و

$$I_m = \frac{V_m}{Z} = \frac{1 \cdot \sqrt{2}}{5} = 2\sqrt{2} \cdot A$$

$$\phi = \theta_V - \theta_I \rightarrow -90^\circ = -\theta_I \rightarrow \theta_I = 90^\circ$$

$$i(t) = 2\sqrt{2} \sin(2500t + 90^\circ)$$

(ب)

هدف: نوشتند معادله ولتاژ دو سر L و C

گام ۱) با توجه به جریان عبوری از مدار می‌توانیم ولتاژ عبوری از مدار را بیابیم.

$$V_{L_m} = I_m \cdot X_L = 2\sqrt{2} \times 5 = 10\sqrt{2} \cdot V$$

$$V_{C_m} = I_m \cdot X_C = 2\sqrt{2} \times 1 = 2\sqrt{2} \cdot V$$

گام ۲) نوشتند معادله ولتاژ دو سر L و C

اگر جریان مبنای قرار بگیرد، معادله ولتاژ دو سر سلف 90° جلوتر و معادله ولتاژ دو سر خازن 90° عقبتر است.

$$V_L(t) = V_{L_m} \sin(\omega t + 90^\circ + \frac{\pi}{2}) = 10\sqrt{2} \sin(2500t + 180^\circ)$$

$$V_C(t) = V_{C_m} \sin(\omega t + 90^\circ - \frac{\pi}{2}) = 2\sqrt{2} \sin(2500t)$$

(پ)

هدف: محاسبه توانهای مدار

گام ۱) یافتن مقادیر ضریب توان مؤثر و غیر مؤثر

$$X_C > X_L \rightarrow \phi = -90^\circ \rightarrow \cos(-90^\circ) = 0, \sin(-90^\circ) = -1$$

گام ۲) محاسبه تک تک توانهای مدار با استفاده از روابط مربوطه

$$P_e = V_e \cdot I_e \cos \phi = 0$$

$$P_d = V_e \cdot I_e \sin \phi = \frac{10\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \times \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \sin(-90^\circ) = -20 \text{ V.A.R}$$

$$P_s = |P_d| = V_e I_e = 20 \text{ V.A}$$

(ت)

هدف : فرکانس رزنانس

در فرکانس رزنانس مقادیر مقاومت خازنی و مقاومت سلفی با هم برابر می باشند.

$$\text{فرکانس رزنانس از رابطه } f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^{-6}}} = 562/69 \text{ HZ}$$

(ث)

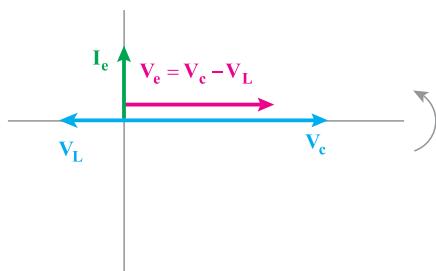
هدف : رسم دیاگرام برداری ولتاژها

گام ۱) I_e را مبنی قرار می دهیم.

ولتاژ دوسر سلف از جریان 90° جلوتر و ولتاژ دو سر خازن از جریان 90° عقب تر خواهد بود.

گام ۲) رسم دیاگرام برداری ولتاژها

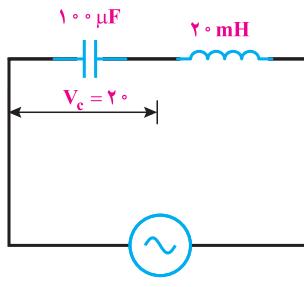
V_e (ولتاژ کل) برآیند دو ولتاژ V_L و V_C می باشد و در این تمرین $V_L < V_C$ می باشد و V_e (ولتاژ برآیند) در جهت V_C خواهد بود. (شکل ۵-۴)



شکل ۵-۴

۵-۲-۵- حل تمرین ۳ صفحه ۱۲۹ کتاب درسی (شکل ۵-۵)

هدف : نوشتن معادله ولتاژ و جریان



$$\omega = 50 \text{ Rad/sec}$$

شکل ۵

گام ۱) ابتدا مقادیر اهمی L و C را می‌نویسیم.

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{1.0 \times 10^{-6} \times 50} = 2.0 \Omega$$

$$X_L = L\omega = 2.0 \times 10^{-3} \times 50 = 1.0 \Omega$$

گام ۲) با توجه به گام ۱ می‌توان اختلاف فاز را به صورت زیر مشخص کرد.

خاصیت خازنی

$$X_L < X_C \rightarrow \phi = -90^\circ$$

$$\phi = \theta_V - \theta_I \rightarrow -90^\circ = \theta_V - 0^\circ \rightarrow \theta_V = -90^\circ$$

گام ۳) محاسبه امپدانس کل مدار

$$Z = |X_C - X_L| = |2.0 - 1.0| = 1.0 \Omega$$

گام ۴) محاسبه مقدار جریان ولتاژ کل

$$I_C = \frac{V_C}{X_C} = \frac{2}{2} = 1 \text{ A}$$

در مدار سری تمامی جریان‌ها با هم برابر و هم فاز می‌باشند.

$$I_e = I_C = I_L = 1 \text{ A}$$

$$I(t) = \sqrt{2} \sin(50t + 90^\circ)$$

جریان منبع را مینا قرار می‌دهیم

$$i(t) = \sqrt{2} \sin(25t + 90^\circ)$$

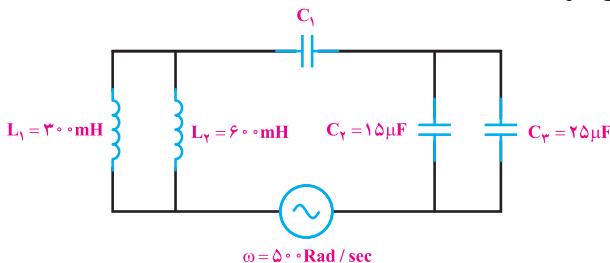
گام ۵) نوشتمن معادله ولتاژ جریان

$$V_e = Z \cdot I_e = 1.0 \times 1 = 1.0 \text{ V}$$

$$V(t) = 1.0 \sqrt{2} \sin(50t + 90^\circ)$$

۴-۲-۵ - حل تمرین ۶ صفحه ۱۳۰ کتاب درسی (شکل ۶)

هدف : تعیین میزان C_1 در حالت تشید



شکل ۶

در حالت تشید $X_L = X_C$ می باشد، پس کافی است X_L کل و یا X_C کل را بیابیم و با هم برابر قرار دهیم.

گام ۱) تعیین مقاومت معادل سلفی کل

$$X_{L_1} = L\omega = 3.0 \times 10^{-3} \times 50 = 15 \Omega$$

$$X_{L_y} = L\omega = 6.0 \times 10^{-3} \times 50 = 30 \Omega$$

$$X_L = (X_{L_1} \parallel X_{L_y}) = \frac{15 \times 30}{45} = 10 \Omega$$

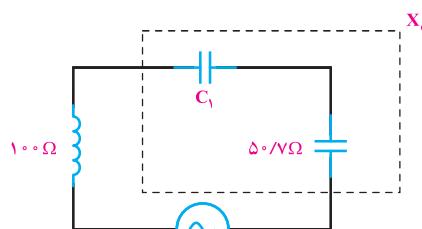
گام ۲) تعیین مقاومت معادل خازنی کل

$$X_{C_1} = \frac{1}{15 \times 10^{-6} \times 50} = \frac{10^4}{75} = 133 \Omega$$

$$X_{C_y} = \frac{1}{25 \times 10^{-6} \times 50} = \frac{10^4}{25 \times 5} = 80 \Omega$$

$$X_C = (X_{C_1} \parallel X_{C_y}) = \frac{133 \times 80}{213} = 49.5 \Omega$$

گام ۳) با در نظر گرفتن $X_L = X_C$ می توان X_C را محاسبه کرد و در نهایت C_1 قابل محاسبه است (شکل ۷).



شکل ۷

$$X_L = X_C$$

$$100 = X_C + 50 / \sqrt{3}$$

$$X_C = 100 - 50 \times \sqrt{3} = 49/\sqrt{3} \Omega$$

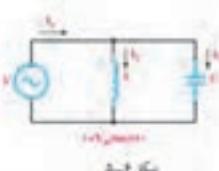
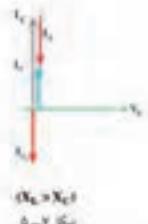
$$X_{C_1} = \frac{1}{C_1 \omega} \rightarrow C_1 = \frac{1}{X_{C_1} \omega} = \frac{1}{500 \times 49/\sqrt{3}}$$

۵-۳- مدار L-C موازی

برای تحلیل مدارهای L-C موازی ولتاژ را مینا در نظر می‌گیریم و روی جریان‌ها مطالعه می‌کنیم
در اینجا نیز جریان‌های سلف و خازن 180° اختلاف فاز دارند.

۵-۴- مدار L-C موازی

مدار الکتریکی L-C موازی در شکل ۵-۷ نشان داده است. در این مدار، ولتاژ توسر هر دو عضو C و L با هم برابر است. جریان در داخل مدار مجموع سلسله (I_L) از ولتاژ منبع به المداری (I_C) عضله و جریان خازنی (I_C) از ولتاژ منبع $\sqrt{3}$ بیشتر است. جریان کل I₀ از جمع برداری توسر جریان I_C و I_L بدست می‌آید. جون توسر جریان I₀ (جریان کل) را از رابطه I₀ = I_C + I_L = I_C + I₀ برای احتساب خازن مدار، می‌توان جریان I_C (جریان کل) را از رابطه I_C = I₀ - I_L برای احتساب آورده، دوباره برداری جریان‌های مدار L-C موازی در میانی ولتاژ در شکل ۵-۷ بافرض $X_L > X_C$ درست نموده است.



۵-۵- تحلیل مدار L-C موازی از شکل‌های ۵-۶ و ۵-۷

محاسبه ایندیکس می‌توان ترکیب:

$$I_L = \frac{V_L}{X_L}, \quad I_C = \frac{V_C}{X_C}, \quad Z = \frac{V_L}{I_0}, \quad I_0 = \frac{V_L}{Z}$$

$$I_0 = I_C - I_L \Rightarrow \frac{V_L}{Z} = \frac{V_C}{X_C} - \frac{V_L}{X_L}$$

بافرض $X_L > X_C$

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \rightarrow Z = \frac{X_L \cdot X_C}{X_L - X_C} \quad (5-12)$$

در صورتی که $X_L < X_C$ باشد، در رابطه $5-12$ جای X_L و X_C در سفرج کسر با هم

۱۹۳

جريان کل مدار از تفاضل جریان سلف و خازن تحصیل می‌شود. مانند مدارهای L-C سری ابتدا بهتر است نوع مدار از نظر خاصیت سلفی یا خازنی مشخص شود.

برای این کار هر کدام از مقادیر راکتانس سلفی X_L یا X_C کوچک‌تر بود کیفیت مدار را از نظر سلفی یا خازنی مشخص می‌کند بدلیل کوچک‌تر بودن راکتانس، جریان آن راکتانس بیشتر خواهد بود و در اتصال L-C موازی جریان‌ها تعیین کننده کیفیت مدار هستند (بر خلاف C-L سری که ولتاژ بیشتر تعیین کننده بود).

$$\text{اگر} \quad \begin{cases} X_L < X_C \rightarrow (I_L > I_C) \\ X_C < X_L \rightarrow (I_C > I_L) \end{cases}$$

(الف)

فرکانس رزنانس در این مدار کاملاً شبیه حالت سری است فقط در حالت سری و قمی حالت تشدید داشته باشیم مدار به حالت اتصال باز (مدار باز) و در حالت موازی در فرکانس رزنانس مدار به حالت اتصال کوتاه تبدیل می‌شود.

(ب)

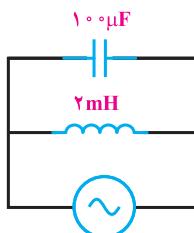
توان اکتیو در مدار L-C موازی نیز صفر است ولی دو توان راکتیو P_{d_L} و P_{d_C} برای خازن و سلف وجود دارد.

تذکرہ: در مثال‌هایی که گفته می‌شود جریان یک شاخه چند برابر جریان شاخه دیگر است صریحاً به خازنی یا سلفی بودن مدار اشاره دارد (شبیه مثال ۳ صفحه ۱۲۷ کتاب درسی)

۱-۳-۵- حل تمرین شماره ۷ صفحه ۱۳۰ کتاب درسی (شکل ۵-۸)

(الف)

هدف : محاسبه معادله جریان دو شاخه



$$V = 100 \sin 250t$$

شکل ۵-۸

گام ۱) تعیین جریان ماکریم هر شاخه

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{100 \times 10^{-3} \times 250} = \frac{100}{25} = 4 \Omega$$

$$X_L = L\omega = 2 \times 10^{-3} \times 2500 = 5 \Omega$$

مدار خازنی است $X_C < X_L \rightarrow$

$$I_{C_m} = \frac{V_m}{X_C} = \frac{100}{4} = 25 A$$

$$I_{L_m} = \frac{V_m}{X_L} = \frac{100}{5} = 20 A$$

گام ۲) نوشتند معادله جریان هر شاخه

جریان در داخل مقاومت سلفی (I_L) از ولتاژ شبکه به اندازه 90° عقب تر و جریان خازنی (I_C) از ولتاژ 90° جلو تر است.

$$I_C(t) = I_{C_m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = 25 \sin(2500t + 90^\circ)$$

$$I_L(t) = I_{L_m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = 20 \sin(2500t - 90^\circ)$$

(ب)

هدف : نوشتند معادله جریان منبع

$$I_L > I_C \text{ می باشد } \dot{I}_L > \dot{I}_C$$

گام ۱) چون در جریان \overline{I}_L و \overline{I}_C دارای یک راستا هستند 180° اختلاف فاز دارند، می توان جریان I (جریان کل) را از نفاضل $I = I_C - I_L$ به دست آورد.

$$I_e = I_{C_m} - I_{L_m} = 25 - 20 = 5 A$$

گام ۳) نوشتند معادله جریان کل

$$I(t) = 5 \sin(2500t + 90^\circ)$$

(پ)

هدف : محاسبه توان های مدار

گام ۱) یافتن مقادیر ضریب توان مؤثر و غیر مؤثر

$$X_L > X_C \rightarrow \varphi = 90^\circ \rightarrow \cos(90^\circ) = 0, \sin(90^\circ) = 1$$

گام ۲) محاسبه تک تک توان های مدار با استفاده از روابط مربوطه

$$P_d = V_e \cdot I_e \sin \varphi = \frac{100}{\sqrt{2}} \times \frac{5}{\sqrt{2}} \sin(90^\circ) = 250 V.A.R$$

$$P_e = V_e \cdot I_e \cos \phi = 0$$

$$P_s = |P_d| = V_e I_e = 25 \text{ V} \cdot \text{A}$$

(ت)

هدف : محاسبه فرکانس رزنانس

در فرکانس رزنانس مقادیر مقاومت خازنی و مقاومت سلفی با هم برابر می‌باشند.

$$\text{فرکانس رزنانس از رابطه } f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ محاسبه می‌شود.}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-6}}} = 355 / 88 \text{ HZ}$$

(ث)

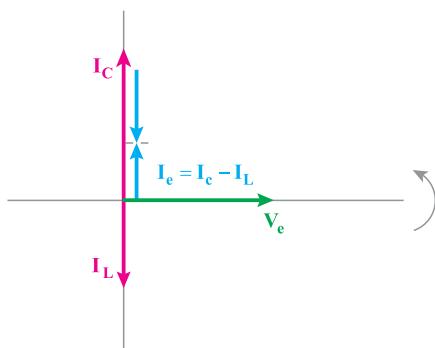
هدف : رسم دیاگرام برداری ولتاژها

گام ۱) V_e را مبنا قرار می‌دهیم (در مدارات موازی)

جريان در داخل مقاومت سلفی (I_L) از ولتاژ شبکه به اندازه 90° عقب‌تر و جريان خازنی (I_C) از ولتاژ 90° جلوتر است.

گام ۲) رسم دیاگرام برداری ولتاژها

جريان کل به طرف بالا می‌باشد، به دليل اينكه $I_L > I_C$ است (شکل ۵-۹).

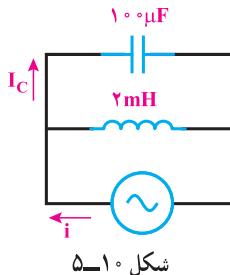


شکل ۵-۹

۵-۳-۵- حل تمرین ۹ صفحه ۱۳۱ کتاب درسی (شکل ۱۰-۵)

(الف)

هدف : تعیین معادله ولتاژ منبع



شکل ۱۰

در مدارات موازی ولتاژ تمام شاخه‌ها برابر هستند.

با محاسبه ولتاژ ماکریم هر شاخه و با استفاده از θ_v می‌توان معادله ولتاژ منبع را بنویسیم.

گام ۱۱) محاسبه مقدار مقاومت سلفی و مقاومت خازنی معادل مدار

$$X_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{100 \times 10^{-6} \times 250} = \frac{100}{25} = 4 \Omega$$

$$X_L = L\omega = 2 \times 10^{-3} \times 250 = 5 \Omega$$

گام ۱۲) با توجه به مقدار I_C می‌توان V_{C_m} را به صورت زیر بیابیم.

$$V_{C_m} = I_{C_m} \times X_C = 4 \times 2 \sqrt{2} = 8 \sqrt{2} V$$

گام ۱۳) φ را با در نظر گرفتن $X_C < X_L$ می‌بایس.

$$X_C < X_L \rightarrow I_C > I_L \rightarrow \varphi = 90^\circ$$

برای معادلات ولتاژ و جریان منبع به کار می‌روند.

در مدارات موازی ولتاژ مبنای باشد.

$$\varphi = \theta_V - \theta_I \rightarrow 90^\circ = \theta_V - \theta_I \rightarrow \theta_I = -90^\circ$$

گام ۱۴) نوشتن معادله ولتاژ منبع

$$V_{C_m} = V_{L_m} = V_{e_m}$$

$$V(t) = V_m \sin(\omega t + \theta_V) \rightarrow V(t) = 8\sqrt{2} \sin(250^\circ t)$$

(ب)

هدف: تعیین معادله جریان منبع

گام ۱۵) جریان ماکریم تک شاخه‌ها را می‌بایس.

$$I_{C_m} = 2\sqrt{2} A$$

$$I_{L_m} = \frac{V_{L_m}}{X_L} = \frac{8\sqrt{2}}{5} = 1.6\sqrt{2} A$$

گام ۲) جریان ماکزیمم منع، حاصل جمع برداری دو جریان به دست آمده در گام اول می باشد.

$$I_{L_m} = \sqrt{I_{C_m}^2 + I_{L_m}^2} = \sqrt{(2\sqrt{2})^2 + (1/\sqrt{2})^2} = 3/6 \text{ A}$$

گام ۳) با توجه به θ_I معادله جریان منع را می نویسیم.

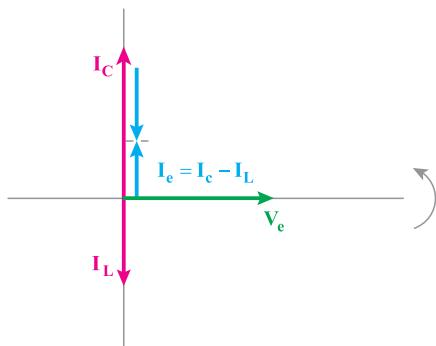
$$i(t) = I_{e_m} \sin(\omega t + \theta_I) = 3/6 \sin(25^\circ \cdot t - 90^\circ)$$

(پ)

هدف : رسم دیاگرام برداری مدار

با توجه به اینکه $X_L > X_C$ می باشد در نتیجه $I_C > I_L$ می باشد و جهت جریان منع (I_e) به سمت (I_C) می باشد.

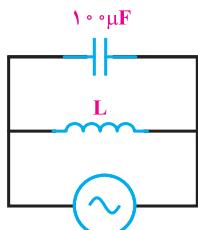
در مدارات موازی ولتاژ را مبنا قرار می دهیم. (شکل ۵-۱۱)



شکل ۵-۱۱

۵-۳-۵- حل تمرین شماره ۱۰ صفحه ۱۳۲ کتاب درسی (شکل ۵-۱۲)

هدف : یافتن L در حالت تشدید



$$\omega = 400 \text{ Rad/sec}$$

شکل ۵-۱۲

گام ۱) $X_L = X_C$ (برای ایجاد حالت تشدید)

$$X_L = X_C$$

$$\omega = \frac{1}{C\omega} \rightarrow L = \frac{1}{C\omega^2}$$

گام ۲) فرکانس تشدید را جایگزین کرده و L را می‌یابیم.

$$L = \frac{1}{100 \times 10^{-6} \times 4000^2} = \frac{1}{1600} = 0.62 \text{ mH}$$

۴-۳-۵- حل تمرین شماره ۱۱ صفحه ۱۳۲ کتاب درسی

هدف : محاسبه C و L با توجه به معلومات مسئله

$$I_C = 5I_L \quad , \quad V = 100 \sin 25^\circ t \quad , \quad i = 8 \sin(25^\circ t + \frac{\pi}{2})$$

گام ۱) با توجه به رابطه جریان سلف و خازن، رابطه بین مقاومت‌های سلفی و مقاومت خازنی را می‌یابیم.

$$I_e = \frac{V_e}{\sqrt{2}} A \quad , \quad V_e = \frac{100}{\sqrt{2}} V$$

$$\begin{cases} I_L = \frac{V_e}{X_L} = \frac{100}{X_L} \\ I_C = \frac{V_e}{X_C} = \frac{100}{X_C} \end{cases} \rightarrow I_L = 5I_C \rightarrow \frac{100}{X_L} = \frac{100}{X_C}$$

$$X_L = 5X_C$$

گام ۲) Z را می‌توان از دو رابطه، یکی با توجه به معادلات جریان و ولتاژ و دیگری با استفاده از X_L و X_C یافت، در نهایت می‌توان X_L و X_C را محاسبه کرد.

$$Z = \frac{V_m}{I_m} = \frac{100}{8}$$

$$Z = \frac{X_L \cdot X_C}{|X_L - X_C|} = \frac{X_L \cdot 5X_C}{|5X_C \cdot X_L|} = \frac{5X_C^2}{4X_C} = \frac{5}{4} X_C \rightarrow \frac{100}{8} = \frac{5}{4} X_C$$

$$X_C = 10 \Omega \quad , \quad X_L = 5X_C = 50 \Omega$$

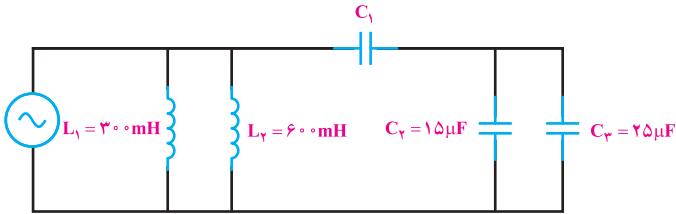
گام ۳) C و L با استفاده از مقاومت سلفی و خازنی قابل محاسبه می‌باشند.

$$X_C = \frac{1}{C\omega} \rightarrow C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2500 \times 10} = 40 \mu F$$

$$X_L = L\omega \rightarrow L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{5^\circ}{25^\circ} = \frac{1}{5^\circ} = 2^\circ \text{ mH}$$

۵-۳-۵- حل تمرین شماره ۱۲ کتاب صفحه ۱۳۲ (شکل ۱۳)

هدف : تعیین میزان C در حالت تشدید



شکل ۱۳

در حالت تشدید $X_L = X_C$ می باشد، پس کافی است $X_L = X_C$ کل و X_L کل را بیابیم و با هم برابر قرار

دهیم.

گام ۱) تعیین مقاومت معادل سلفی کل

$$X_{L_1} = L\omega = 3.0 \times 10^{-3} \times 500 = 15 \Omega$$

$$X_{L_2} = L\omega = 6.0 \times 10^{-3} \times 500 = 30 \Omega$$

$$X_L = (X_{L_1} \parallel X_{L_2}) = \frac{15 \times 30}{45} = 10 \Omega$$

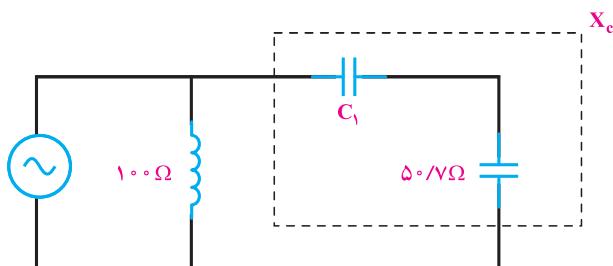
گام ۲) تعیین مقاومت معادل خازنی کل

$$X_{C_1} = \frac{1}{15 \times 10^{-6} \times 500} = \frac{10^4}{75} = 133 \Omega$$

$$X_{C_2} = \frac{1}{25 \times 10^{-6} \times 500} = \frac{10^4}{25 \times 5} = 80 \Omega$$

$$X_C = (X_{C_1} \parallel X_{C_2}) = \frac{133 \times 80}{210} = 49.5 \Omega$$

گام ۳) با در نظر گرفتن $X_L = X_C$ می توان X_C را محاسبه کرد و در نهایت C قابل محاسبه است (شکل ۱۴).



$$\omega = 5 \text{ rad/sec}$$

شکل ۵-۱۴

راه دیگر نیز استفاده از معادل قراردادن ظرفیت معادل خازن‌ها برای محاسبه X_{C_t} و معادل کردن آن با X_{L_t} می‌باشد.

$$X_L = X_C$$

$$100 = X_{C_1} + 50/V$$

$$X_{C_1} = 100 - 50/V = 49/3 \Omega$$

$$X_{C_1} = \frac{1}{C_1 \omega} \rightarrow C_1 = \frac{1}{X_{C_1} \omega} = \frac{1}{50 \times 49/3}$$

$$C_1 = 4 \mu F$$

۶-۳-۵- حل تمرین ۱۴ صفحه ۱۳۲ کتاب درسی

هدف: رسم منحنی تابع تغییرات امپدانس و جریان مدار C-L در حالت سری و موازی با مشخصات زیر

$$L = 1.0 \text{ mH}, C = 1.0 \mu F \text{ در محدوده فرکانس } 5 \text{ KHZ}$$

گام ۱) یافتن (f_r) فرکانس تشدید

فرکانس تشدید در مدار C-L موازی و C-L سری یکسان است.

$$X_L = X_C$$

$$L\omega = \frac{1}{C\omega} \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1.0 \times 10^{-3} \times 1.0 \times 10^{-6}}} = 159 \text{ HZ}$$

در مدارات C-L سری با توجه به اینکه $Z = 2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}$ شود، امپدانس Z بینهایت

می شود، یعنی مدار از جریان DC تغذیه می کند و خازن، نقش مدار باز است.

اگر $Z = \infty$ ، شود هیچ نوع جریانی از مدار عبور نمی کند و $I = 0$ خواهد بود.

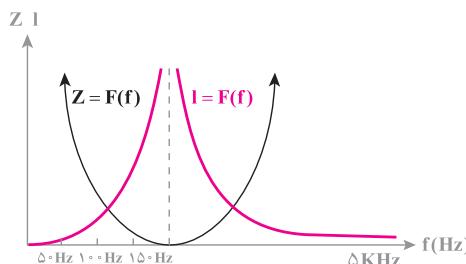
وقتی فرکانس برابر f_c فرکانس تشید و $Z = \infty$ شده و جریان I به مقدار ∞ می رسد.

اگر $Z = \infty$ ، تغییرات بار الکتریکی در صفحات خازن خیلی شدید می شود و خازن

$(\frac{1}{2\pi f C})$ عمل اتصال کوتاه شده و $2\pi f L$ به مقدار خیلی زیاد (∞) میل کرده و مدار $C-L$ سری

را عمل باز می کند، در کل $Z = \infty$ و $I = 0$ می شود.

گام ۲) منحنی تغییرات $I = F(f)$ و $Z = F(f)$ در مدار سری به صورت زیر خواهد بود (شکل ۵-۱۵).



شکل ۵-۱۵

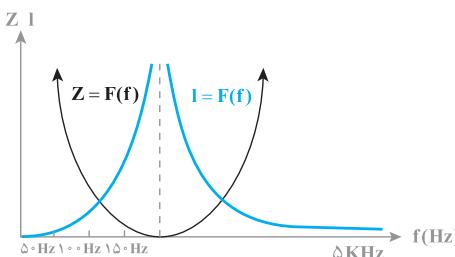
در مدارات $C-L$ سری با توجه به اینکه $Z = 2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}$ و اگر $f = 0$ شود، امپدانس Z صفر

می شود و در این حالت از مدار جریان I_{SC} عبور خواهد کرد.

خازن به علت تغییرات شدید بار اتصال کوتاه شده و مدار را اتصال کوتاه می کند و $Z = \infty$ می شود.

و مجدداً جریان مدار به جریان I_{SC} می رسد.

منحنی تغییرات $I = F(f)$ و $Z = F(f)$ در مدار موازی به صورت زیر خواهد بود (شکل ۵-۱۶).



شکل ۵-۱۶