فصل ۴:

یکسوسازهای تمام موج (تبدیل AC به DC)

۴-۱- یکسوساز تمام موج کنترل نشده تک فاز (دیودی)

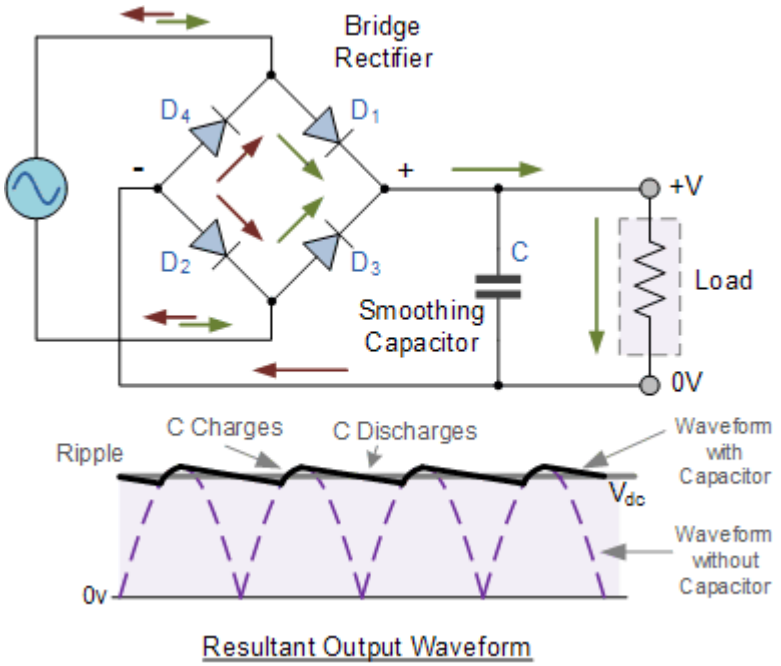
- تحلیل و شبیه سازی یکسوساز دیودی تمام موج با بار مقاومتی – القایی ***RL***

- تحلیل و شبیه سازی یکسوساز دیودی تمام موج با فیلتر ***LC***

۴-۲- یکسوساز تمام موج کنترل شده تک فاز

- تحلیل و شبیه سازی یکسوساز کنترل شده تک فاز بار مقاومتی – القایی ***RL***

۴-۳- یکسوساز کنترل نشده (دیودی) سه فاز

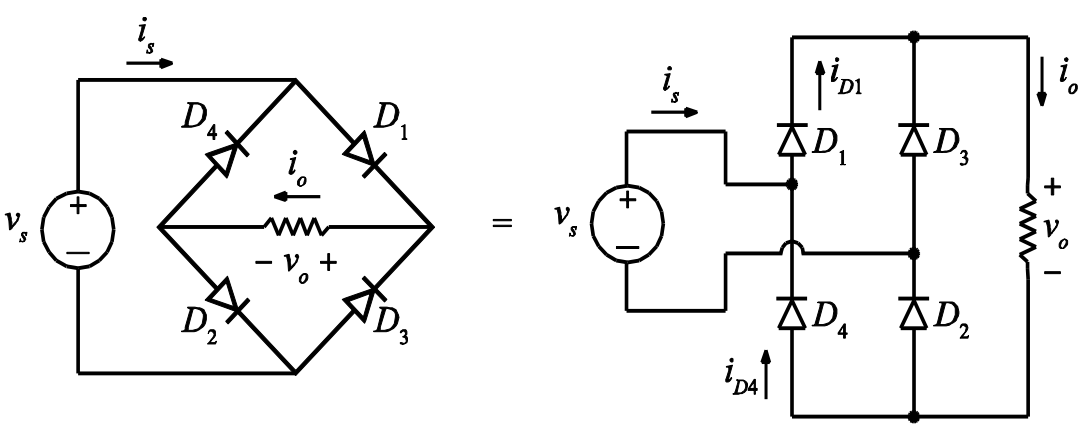


۴–۱– یکسوساز تمام موج کنترل نشده تک فاز (دیودی)

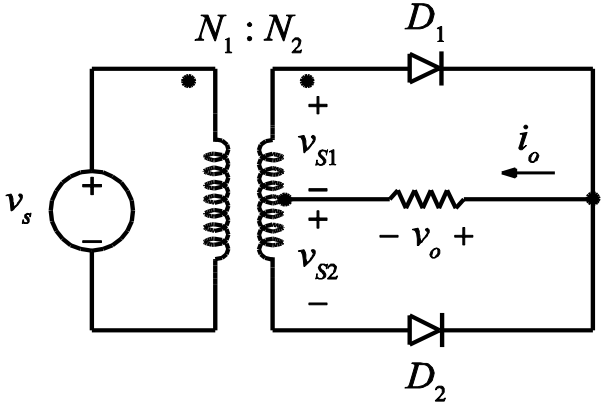
اصول تحلیل

- هدف یکسوساز تمام‌موج، ایجاد ولتاژ یا جریانی است که کاملاً DC باشد یا مؤلفه DC مشخصی داشته باشد. با وجودی که هدف یکسوساز تمام‌موج همان هدف یکسوساز نیم‌موج است، اما یکسوساز تمام‌موج دارای چند مزیت اساسی است. در یکسوساز تمام‌موج، جریان متوسط سمت AC صفر است و بنابراین مشکل جریان متوسط غیرصفر منبع، بخصوص در مورد ترانسفورمرها، از میان می‌رود. اساساً ریپل ولتاژ خروجی یکسوساز تمام‌موج از یکسوساز نیم‌موج کمتر است.

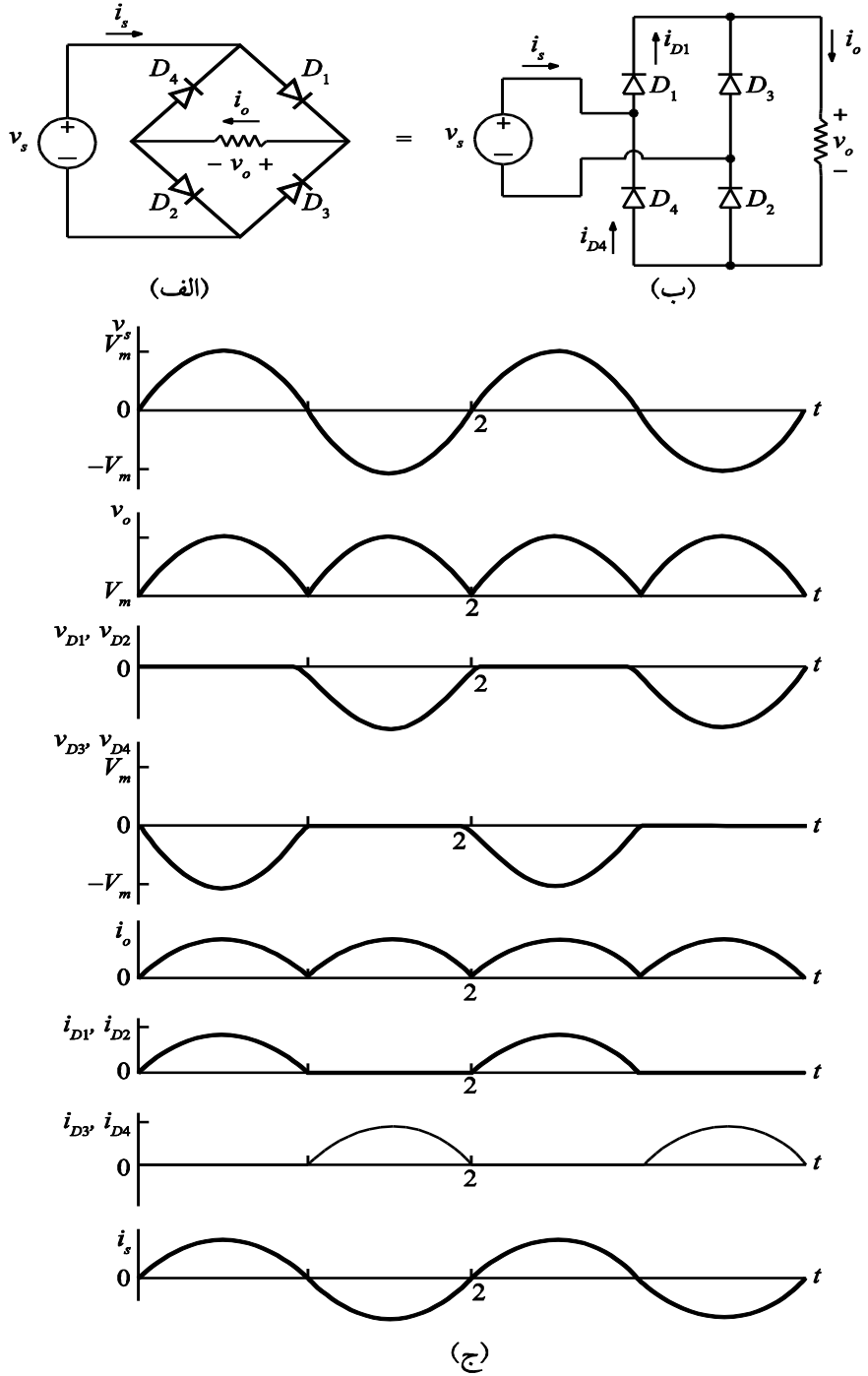
- یکسوساز پل (Bridge Rectifier) و یکسوساز با ترانسفورمر دارای سر وسط (Center-tapped Transformer)، دو یکسوساز تمام‌موج تک‌فاز پایه می‌باشند.



یکسوساز پل



یکسوساز با ترانسفورمر دارای سر وسط



شکل ۴-۱- یکسوساز تمام‌موج پل: الف) نمایش مداری، ب) نمایشی دیگر، ج) ولتاژها و جریان‌ها.

❑ **برای یکسوساز پل،** چند ویژگی اساسی وجود دارد:

۱- دیودهای D_1 و D_2 با هم و دیودهای D_3 و D_4 با هم هدایت می‌کنند. به‌کارگیری قانون ولتاژ کیرشهف در حلقه شامل منبع، دیود D_1 و دیود D_3 نشان می‌دهد که دیودهای D_1 و D_3 نمی‌توانند همزمان هدایت کنند. به‌روش مشابه، D_2 و D_4 نیز نمی‌توانند به‌صورت هم‌زمان هدایت کنند. جریان بار می‌تواند مثبت یا صفر باشد اما هرگز نمی‌تواند منفی شود.

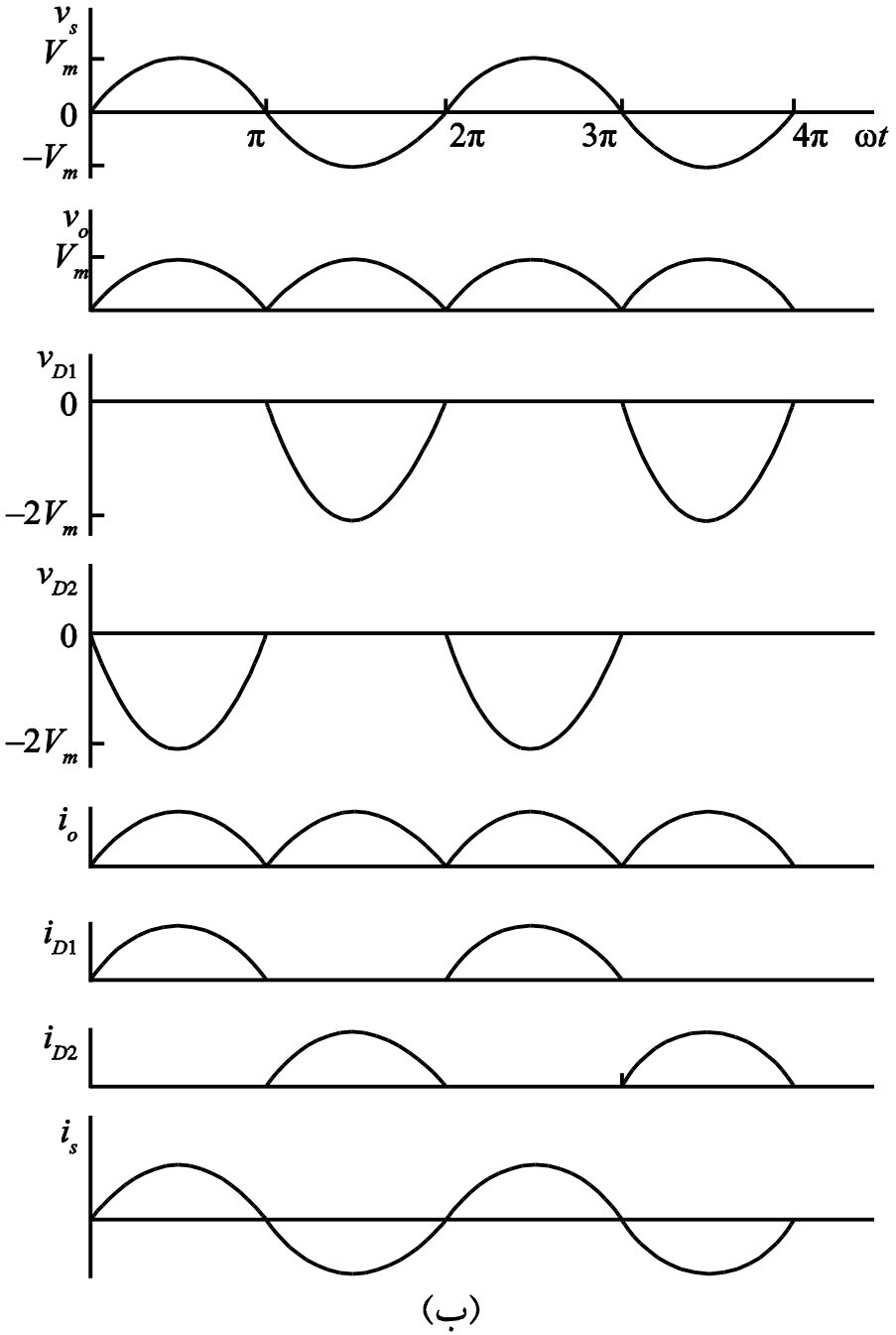
۲- هنگامی‌که دیودهای D_1 و D_2 روشن هستند، ولتاژ دو سر بار برابر با V_s+ بوده و هنگامی‌که دیودهای D_3 و D_4 روشن هستند، ولتاژ دو سر بار برابر با V_s- است.

۳- بیشینه ولتاژ دو سر یک دیود در بایاس معکوس، برابر با بیشینه ولتاژ منبع است. این موضوع را با به‌کارگیری قانون ولتاژ کیرشهف در حلقه شامل منبع و دیودهای D_1 و D_3 می‌توان نشان داد. در صورت هدایت دیود D_1، ولتاژ دو سر دیود D_3 برابر با $-V_s$ خواهد بود.

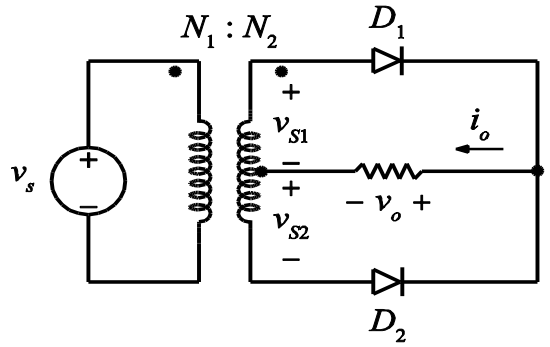
۴- جریان واردشونده به پل، برابر با $i_{D1} - i_{D4}$ است که در اطراف صفر متقارن می‌باشد. بنابراین جریان متوسط منبع، صفر می‌باشد.

۵- جریان مؤثر منبع، برابر با جریان مؤثر بار است. جریان منبع برای یک نیم‌دوره، همان جریان بار است و برای نیم‌دوره بعد، قرینه جریان بار می‌باشد. توان دوم جریان‌های بار و منبع یکسان می‌باشد و بنابراین مقدار مؤثر این دو جریان، با هم برابر هستند.

۶- فرکانس پایه ولتاژ خروجی 2ω است که ω فرکانس AC ورودی است. در هر دوره از ولتاژ ورودی، دو دوره از ولتاژ خروجی اتفاق می افتد. سری فوریه ولتاژ خروجی، حاوی مؤلفه DC و هارمونیک‌های زوج از فرکانس منبع است.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۲- یکسوساز تمام‌موج با ترانسفورمر دارای سر وسط. الف) مدار، ب) ولتاژها و جریان‌ها.

❑ **برای یکسوساز با ترانسفورمر سر وسط،** چند ویژگی اساسی وجود دارد:

۱- قانون ولتاژ کیرشهف نشان می‌دهد که در یک زمان، فقط یک دیود می‌تواند هدایت کند. جریان بار می‌تواند مثبت یا صفر باشد، اما هرگز نمی‌تواند منفی شود.

۲- هنگامی که دیود D_1 هدایت کند، ولتاژ خروجی $v_{s1}+$ بوده و هنگامی که دیود D_2 هدایت کند، ولتاژ خروجی $v_{s2}-$ می‌شود. ولتاژهای ثانویه ترانسفورمر، متناسب با ولتاژ اولیه و برابر با $v_{s1}= v_{s2}= v_s\ (N_2/2N_1)$ می‌باشند.

۳- به‌کارگیری قانون ولتاژ کیرشهف در مسیر سیم‌پیچ‌های ثانویه ترانسفورمر، D_1 و D_2 نشان می‌دهد که بیشینه ولتاژ دو سر یک دیود که در بایاس معکوس قرار می‌گیرد، دوبرابر بیشینه ولتاژ بار است.

۴- جریان در هر نیمه از سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورمر، به اولیه آن انعکاس می‌یابد و سبب می‌شود که متوسط جریان منبع صفر باشد.

۵- ترانسفورمر، باعث ایزولاسیون الکتریکی (Electrical Isolation) بین منبع و بار می‌شود.

۶- فرکانس پایه ولتاژ خروجی 2ω است زیرا در هر دوره از ولتاژ ورودی، دو دوره از ولتاژ خروجی اتفاق می افتد.

❑ **در مقایسه بین مدار یکسوساز پل و یکسوساز با ترانسفورمر دارای سر وسط** می توان به نکات زیر اشاره کرد:

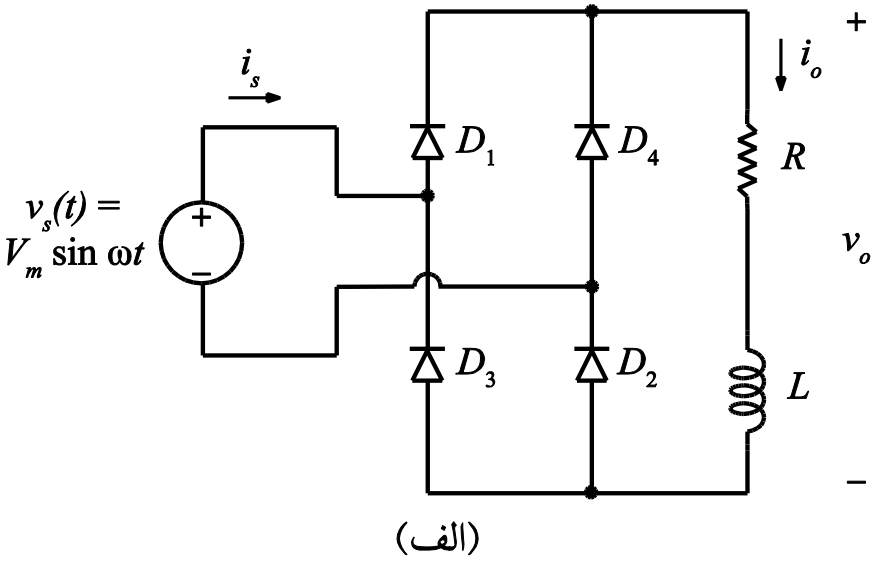
✓ ولتاژ بیشینه کمتر دیودها در یکسوساز تمام‌موج پل، باعث می‌شود که این مدار برای کاربردهای با ولتاژ بالا مناسب باشد.

✓ یکسوساز دارای ترانسفورمر دارای سر وسط، علاوه بر جداسازی الکتریکی، دارای یک افت ولتاژ دیودی بین منبع و بار است که آن را برای کاربردهای ولتاژ پایین و دارای جریان بزرگ مناسب می‌سازد.

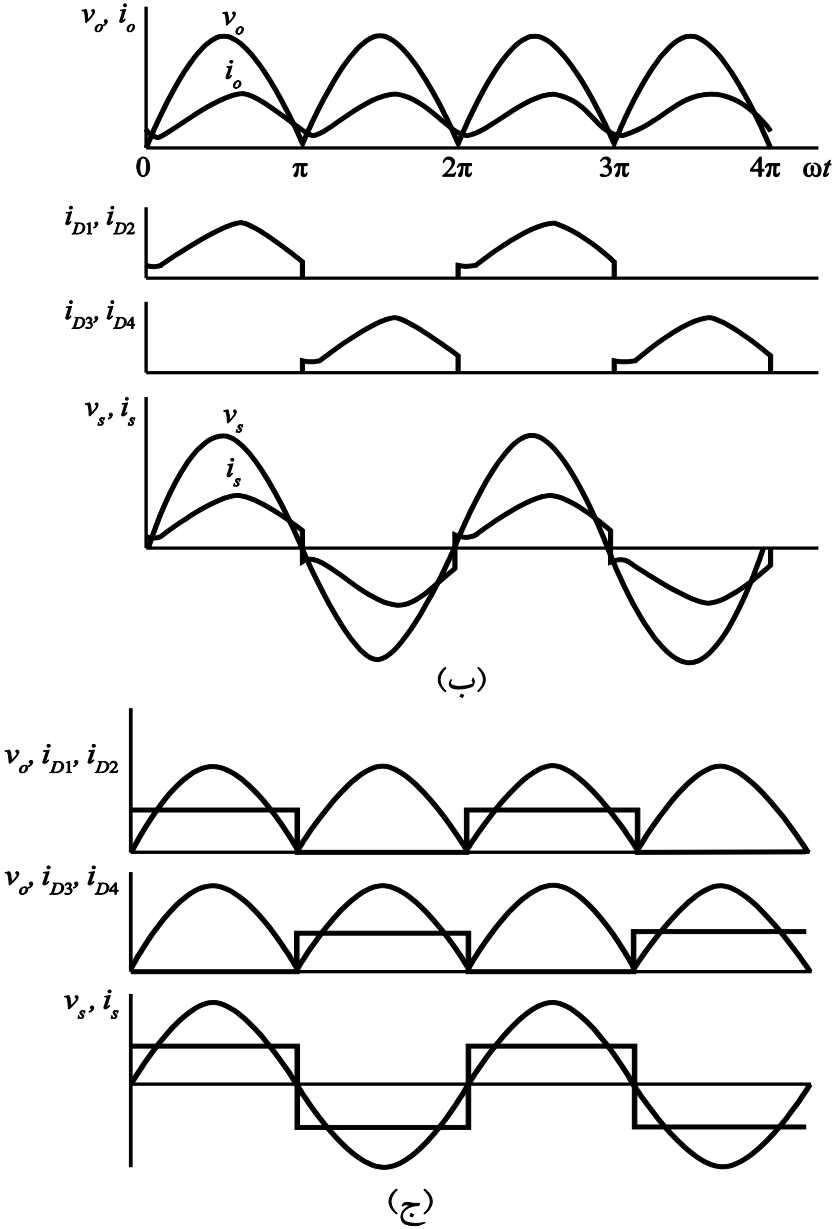
❑ **مباحث پیش رو، بر روی یکسوساز تمام‌موج پل متمرکز می‌شود، ولی به‌صورت کلی قابل اعمال به یکسوساز دارای ترانسفورمر دارای سر وسط نیز می‌باشد.**

تحلیل و شبیه سازی یکسوساز دیودی تمام موج با بار مقاومتی – القایی RL

- برای یک بار RL با اتصال سری، روش تحلیل، مانند یکسوساز نیم‌موج با دیود هرزگرد است. پس از یک حالت گذرا که در دوره راه‌اندازی رخ می‌دهد، جریان i_o به وضعیت حالت مانای متناوب خواهد رسید. برای مدار پل، هنگامی که منبع تغییر قطبیت می‌دهد، جریان از یک جفت از دیودها به یک جفت دیگر از دیودها انتقال می‌یابد. ولتاژ دو سر بار RL نیز همان‌گونه که برای بار مقاومتی دیده شد، یک سینوسی تمام‌یکسوشده است.



(الف)



(ب)

(ج)

شکل ۴-۳- الف) یکسوساز پل با بار RL، ب) ولتاژها و جریان‌ها، ج) جریان دیود و منبع، هنگامی‌که ضریب خودالقایی بزرگ بوده و جریان تقریباً ثابت است.

- ولتاژ سینوسی تمام‌یکسوشده دو سر بار را می‌توان توسط سری فوریه که شامل مؤلفه DC و هارمونیک‌های زوج است، بیان کرد:

$$v_o(t) = V_0 + \sum_{n=2,4\ldots}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \pi)$$

$$V_0 = \frac{2V_m}{\pi} \qquad \text{و} \qquad V_n = \frac{2V_m}{\pi}\left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n+1}\right)$$

- ✓ جریان در بار RL، از جمع آثار، با در نظر گرفتن هر فرکانس به‌صورت مجزا و ترکیب نتایج آن‌ها، به‌دست می‌آید. جریان DC و دامنه جریان هر فرکانس به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_0 = \frac{V_0}{R} \qquad I_n = \frac{V_n}{Z_n} = \frac{V_n}{|R + jn\omega L|}$$

- ✓ هرچه مرتبه هارمونیک n بزرگ‌تر می‌شود، دامنه ولتاژ کاهش می‌یابد. برای بار RL، با افزایش n، امپدانس Z_n بزرگ‌تر می‌شود. ترکیب کاهش V_n و افزایش Z_n، باعث کاهش شدید I_n با افزایش مرتبه هارمونیک می‌شود. **بنابراین، برای بیان جریان در بار *RL*، معمولاً فقط از مؤلفه DC و تعدادی کمی از مؤلفه های AC استفاده می‌شود.**

- در برخی کاربردها، ضریب خودالقایی بار نسبتاً بزرگ است یا با اضافه کردن یک ضریب خودالقایی خارجی بزرگ می‌شود. اگر امپدانس القایی، مؤلفه‌های AC سری فوریه جریان بار را به‌صورت مؤثری از بین ببرد، جریان بار اساساً DC خواهد بود. اگر $\omega L >> R$، آن‌گاه داریم:

$$i(\omega t) \approx I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{2V_m}{\pi R} \qquad \omega L \gg R$$

$$I_{\text{rms}} \approx I_o$$

مثال ۴-۱- یکسوساز تمام‌موج با بار *RL*

یک مدار یکسوساز پل، دارای یک منبع AC با V_m=۱۰۰V و فرکانس ۶۰Hz، و یک بار *RL* با مقادیر R=۱۰Ω و L=۱۰mH است. الف) جریان متوسط بار را تعیین کنید. ب) براساس مؤلفه اول AC سری فوریه، تغییرات پیک تا پیک جریان بار را تخمین بزنید. ج) توان جذب‌شده توسط بار و همچنین ضریب توان مدار را تعیین کنید. د) مقادیر متوسط و مؤثر جریان دیودها را به‌دست آورید. در نهایت، جریان مقدار مؤثر و توان جذب‌شده توسط بار را به‌وسیلهٔ شبیه‌سازی PSpice به‌دست آورید.

■ **حل**

الف) جریان متوسط بار، از مؤلفه DC در سری فوریه به‌دست می‌آید. ولتاژ دو سر بار، یک ولتاژ سینوسی یکسوشده تمام‌موج است. متوسط ولتاژ خروجی برابر است با:

$$V_0 = \frac{2V_m}{\pi} = \frac{2(100)}{\pi} = 63.7\ \text{V} \Rightarrow I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{63.7\ \text{V}}{10\ \Omega} = 6.37\ \text{A}$$

ب) دامنه مؤلفه های ولتاژ AC را برای n=2, 4 به صورت زیر داریم:

$$V_2 = \frac{2(100)}{\pi}\left(\frac{1}{1} - \frac{1}{3}\right) = 42.4\ \text{V} \Rightarrow I_2 = \frac{42.4}{|10 + j(2)(377)(0.01)|} = \frac{42.4\ \text{V}}{12.5\ \Omega} = 3.39\ \text{A}$$

$$V_4 = \frac{2(100)}{\pi}\left(\frac{1}{3} - \frac{1}{5}\right) = 8.49\ \text{V} \Rightarrow I_4 = \frac{8.49}{|10 + j(4)(377)(0.01)|} = \frac{8.49\ \text{V}}{18.1\ \Omega} = 0.47\ \text{A}$$

جریان I_2 خیلی بزرگ‌تر از I_4 و هارمونیک‌های مراتب بالاتر است. بنابراین، می‌توان از I_2 برای تخمین تغییرات پیک تا پیک جریان بار استفاده کرد و $\Delta i_o \approx 2(3.39) = 6.78\text{A}$ به‌دست می‌آید. تغییرات واقعی i_o، به‌دلیل هارمونیک‌های مراتب بالاتر، بیشتر می‌باشد.

ج) توان جذب‌شده توسط بار، از رابطه $I_{\text{rms}}^2 R$ به‌دست می‌آید. جریان مؤثر برابر است با:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum I_{n,rms}^2} = \sqrt{(6.37)^2 + \left(\frac{3.39}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0.47}{\sqrt{2}}\right)^2 + \cdots} \approx 6.81 \text{ A}$$

اضافه کردن جملات بیشتری از سری، چندان مفید نیست زیرا دامنه آنها کوچک است و اثر ناچیزی بر نتیجه خواهند داشت. توان بار برابر است با:

$$P = I_{\text{rms}}^2 \, R = (6.81)^2 (10) = 464 \text{ W}$$

مقدار مؤثر جریان منبع، همان جریان مؤثر بار است. ضریب توان برابر است با:

$$\text{pf} = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{\text{s,rms}} I_{\text{s,rms}}} = \frac{464}{\left(\frac{100}{\sqrt{2}}\right)(6.81)} = 0.964$$

د) هر دیود، برای نیمی از زمان هدایت می‌کند. بنابراین، می‌توان نوشت:

$$I_{\text{D,avg}} = \frac{I_{\text{o}}}{2} = \frac{6.37}{2} = 3.19 \text{ A}$$

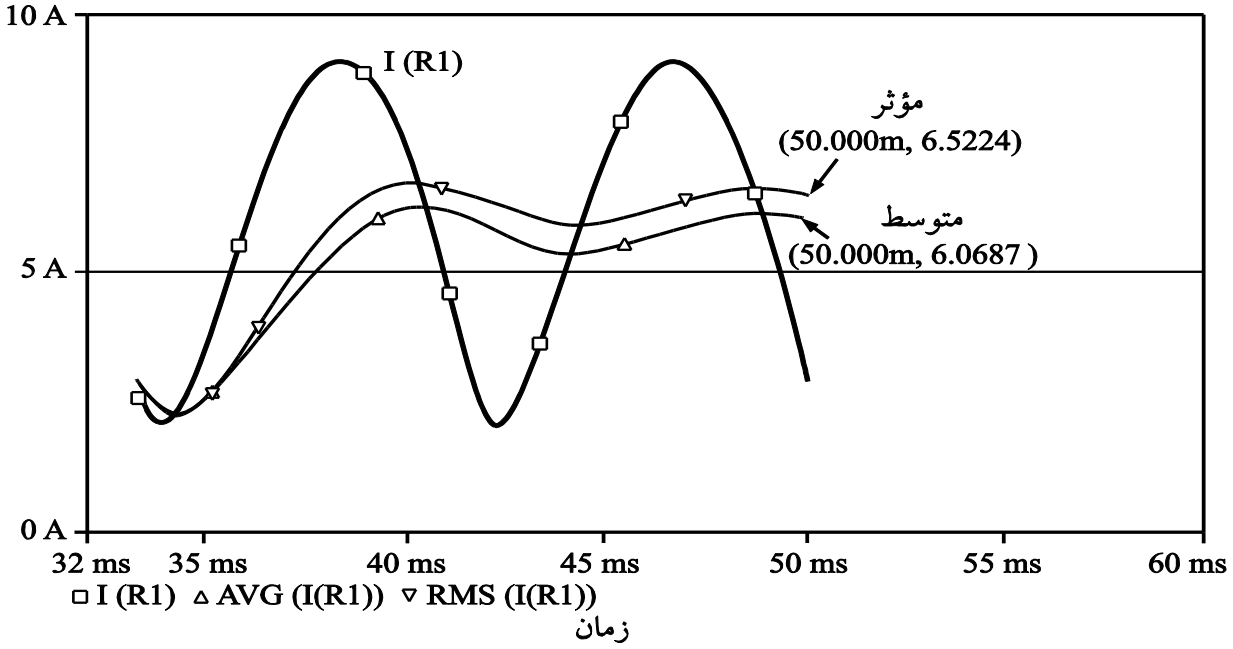
$$I_{\text{D,rms}} = \frac{I_{\text{rms}}}{\sqrt{2}} = \frac{6.81}{\sqrt{2}} = 4.82 \text{ A}$$

■ تحلیل با PSpice

شبیه‌سازی با PSpice، ولتاژ، جریان و توان خروجی را برای مدارهای یکسوساز تمام‌موج ارائه می‌نماید. می‌توان در تحلیل فوریه، توسط دستور FOUR یا با استفاده از Probe، محتوای هارمونیکی ولتاژها و جریان‌های بار و منبع را به‌دست آورد. مدل پیش‌فرض دیود، نتایجی را ارائه می‌کند که از نتایج تحلیلی فرض‌شده در دیود ایده‌آل متفاوت می‌باشند. برای یکسوساز تمام‌موج که دو دیود به‌صورت همزمان هدایت می‌کنند، به‌اندازه دو دیود افت ولتاژ ایجاد می‌شود. در بعضی کاربردها، این افت ولتاژ در خروجی ممکن است قابل توجه باشد. از آنجا که در مدارهای واقعی، در دیودها افت ولتاژ وجود دارد، نتایج PSpiceنمایندهٔ بهتری از عملکرد مدار نسبت به نتایج درحالتی که دیودهای ایده‌آل فرض‌شده‌اند، است (جهت شبیه‌سازی یک مدار ایده‌آل در PSpice، یک مدل دیودی با n=۰/۰۰۱ می‌تواند افت ولتاژ مستقیمی در حد میکروولت ایجاد کند که تقریبی از یک دیود ایده‌آل می‌باشد).

مدار PSpice برای شکل ۴-۳ با استفاده از VSIN برای منبع، Dbreak برای دیودها و R و L برای بار ایجاد شده است. یک تحلیل حالت گذرا با زمان اجرای ۵۰ms اجرا شده و برای به‌دست آوردن جریان حالت مانا، ذخیره داده‌ها پس از زمان ۳۳ms انجام شده است. خروجی Probe جهت تعیین ویژگی‌های عملکردی یکسوساز با استفاده از روش‌های مشابه ارائه‌شده در فصل‌های ۲ و ۳، مورد استفاده قرار گرفته است. برای به‌دست آوردن مقدار متوسط جریان بار، عبارت AVG(I(R1)) را وارد کنید. با استفاده از اشاره‌گر، جهت تعیین نقطه پایانی نمودار به‌دست آمده، جریان متوسط تقریباً ۶/۰۷A به‌دست می‌آید. خروجی Probe در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.

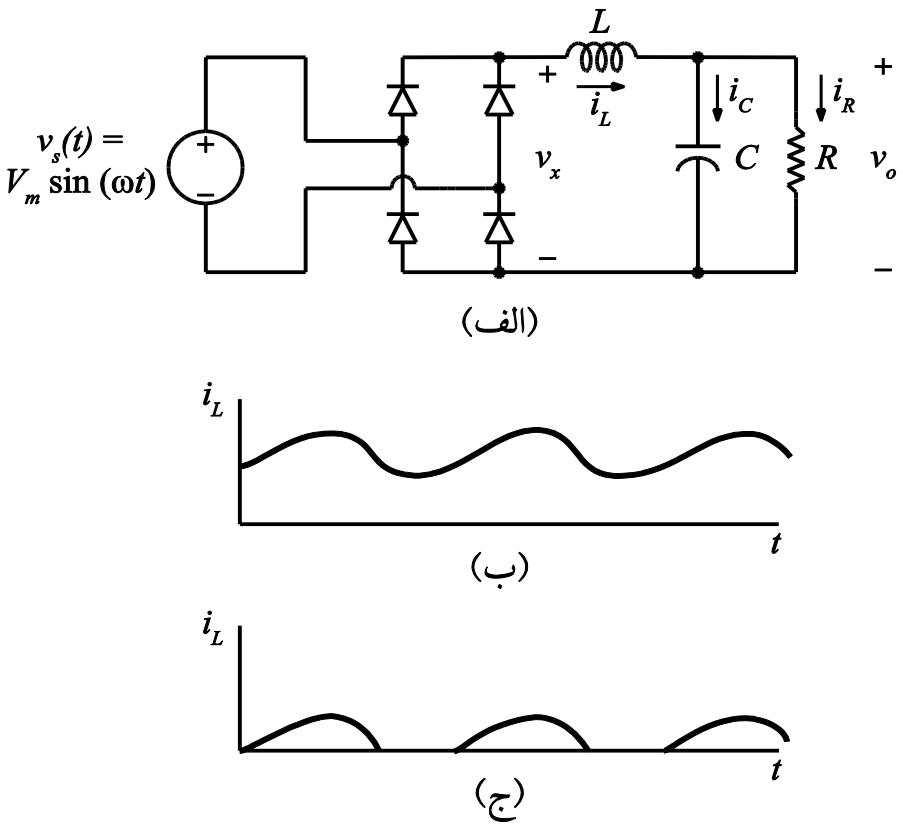
وارد کردن RMS(I(R1)) نشان می‌دهد که جریان مقدار مؤثر تقریباً ۵۲/۶A می‌باشد. توان جذب‌شده توسط مقاومت را می‌توان از رابطه $I_{\text{rms}}^2 R$ محاسبه کرد. همچنین توان متوسط بار را می‌توان به‌طور مستقیم از Probe با وارد کردن AVG(W(R1))، برابر با ۴۲۵/۴W به‌دست آورد، که این مقدار بسیار کمتر از ۴۶۴W به‌دست آمده در مثال ۴-۱ می‌باشد که در آن، دیودها ایده‌آل فرض‌شده بود. توان تحویل داده‌شده توسط منبع AC از AVG(W(V1)) برابر با ۴۴۴/۶W محاسبه می‌شود. هنگامی که دیودها ایده‌آل در نظر گرفته شوند توان ارائه‌شده توسط منبع AC برابر با توان جذب‌شده توسط بار بوده اما این تحلیل بیان می‌کند که توان جذب‌شده توسط دیودها در پل، برابر با ۱۹/۲W=۴۲۵/۵-۴۴۴/۶ می‌باشد. روشی دیگر جهت تعیین توان جذب‌شده توسط پل، وارد کردن AVG(W(D1)) جهت به‌دست آوردن توان جذب‌شده توسط دیود D_1 می‌باشد که برابر با ۴/۸W می‌شود. توان کل برای دیودها، چهاربرابر ۴/۸W، یعنی برابر با ۱۹/۲W می‌باشد. مدل‌های مناسب‌تر برای دیودهای قدرت می‌تواند منجر به تخمین دقیق‌تری از اتلاف توان در دیودها شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج به‌دست آمده براساس دیودهای ایده‌آل نشان می‌دهد که مدل‌های واقعی‌تر چگونه دیود باعث کاهش جریان و توان در بار می‌شوند.



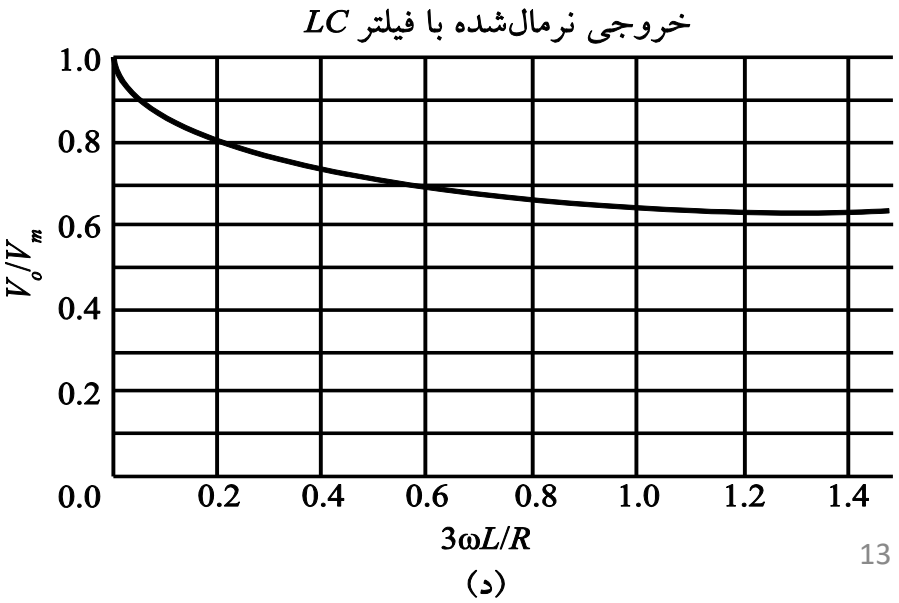
شکل ۴-۴- خروجی PSpice برای مثال ۴-۱.

تحلیل و شبیه سازی یکسوساز دیودی تمام موج با فیلتر LC

- ساختار دیگر یکسوساز تمام‌موج، دارای یک فیلتر LC می‌باشد. هدف فیلتر، تولید ولتاژ خروجی می‌باشد که نزدیک به DC خالص باشند. خازن، ولتاژ خروجی را در یک سطح ثابت نگه می‌دارد و القاگر، جریان دریافتی از یکسوساز را هموار کرده و بیشینه جریان دیودها را، نسبت به جریان‌های نشان داده‌شده در حالت فیلتر خازنی تنها، کاهش می‌دهد. مدار می‌تواند در حالت جریان‌پیوسته یا جریان‌گسسته عمل کند. در حالت جریان‌پیوسته، جریان القاگر همیشه مثبت است. مشخصه حالت جریان‌گسسته این است که جریان القاگر در هر دوره صفر می‌شود.



شکل ۴-۵- الف) یکسو ساز با خروجی فیلترشده با فیلتر LC، ب) جریان پیوسته القاگر، ج) جریان گسسته القاگر، د) خروجی نرمال‌شده.



❑ **تحلیل جریان پیوسته برای خروجی با فیلتر *LC*:** برای جریان پیوسته، ولتاژ در خروجی پل دیودی، یک موج سینوسی تمام‌یکسوشده است که دارای مقدار متوسطی برابر با $2V_m/\pi$ می‌باشد. از آن‌جا که ولتاژ متوسط دو سر القاگر در حالت مانا صفر می‌باشد، متوسط ولتاژ خروجی برای جریان پیوسته القاگر برابر است با:

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi}$$

✓ جریان متوسط القاگر، باید برابر با جریان متوسط مقاومت باشد زیرا جریان متوسط خازن صفر می‌باشد.

$$I_L = I_R = \frac{V_o}{R} = \frac{2V_m}{\pi R}$$

✓ تغییرات در جریان القاگر را می‌توان از اولین جمله AC در سری فوریه محاسبه کرد. مؤلفه اولیه ولتاژ AC، با $n = ۲$ به‌دست می‌آید. با فرض اتصال کوتاه بودن خازن در شرایط AC، ولتاژ هارمونیک V_2 در دو سر القاگر قرار می‌گیرد. دامنه جریان القاگر، برای $n = ۲$ برابر است با:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \approx \frac{V_2}{2\omega L} = \frac{4V_m/3\pi}{2\omega L} = \frac{2V_m}{3\pi\omega L}$$

✓ برای این که جریان همیشه مثبت باشد، دامنه مؤلفه AC باید کمتر از مؤلفه DC باشد (مقدار متوسط). با استفاده از معادلات بالا و حل آن برحسب L داریم:

$$I_2 < I_L \Rightarrow \frac{2V_m}{3\pi\omega L} < \frac{2V_m}{\pi R} \Rightarrow L > \frac{R}{3\omega}$$

$$\frac{3\omega L}{R} > 1 \qquad \text{برای جریان پیوسته}$$

✓ اگر $3\omega L/R>1$، جریان پیوسته بوده و ولتاژ خروجی برابر با $2V_m/\pi$ است.

❑ **تحلیل جریان گسسته برای خروجی با فیلتر *LC*:** برای جریان گسسته القاگر، شکل‌موج جریان در طی هر دوره به صفر می‌رسد. هنگام رسیدن ولتاژ خروجی پل به سطح ولتاژ خازن در $\omega t=\alpha$، جریان دوباره مثبت می‌شود.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{V_o}{V_m}\right)$$

✓ مادامی‌که جریان مثبت می‌باشد، ولتاژ دو سر القاگر برابر است با:

$$v_L = V_m \sin(\omega t) - V_o$$

✓ که ولتاژ خروجی V_o همچنان باید محاسبه شود. جریان القاگر، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$i_L(\omega t) = \frac{1}{\omega L}\int_{\alpha}^{\omega t} [V_m \sin(\omega t) - V_o]\, \mathrm{d}(\omega t)$$

$$= \frac{1}{\omega L}[V_m(\cos\alpha - \cos\omega t)] - V_o(\omega t - \alpha)$$

✓ توجه شود که فرمول بالا، برای $\alpha \le \omega t \le \beta$ در زمانی که $\beta < \pi$ است، صادق بوده و تا زمانی معتبر است که جریان در $\omega t = \beta$ به صفر برسد.

❑ راه به‌دست آوردن ولتاژ بار V_o، براساس این حقیقت است که متوسط جریان القاگر باید برابر با جریان مقاومت بار باشد. متأسفانه یک راه‌حل مستقیم در دسترس نبوده و یک روش تکراری موردنیاز می‌باشد. یک روند برای تعیین V_o به‌صورت زیر است:

۱- تخمین یک مقدار برای V_o که کمی کوچک‌تر از V_m بوده و حل آن برحسب α؛

۲- حل عددی برحسب β در رابطه جریان القاگر؛

$$i_L(\beta) = 0 = V_m(\cos\alpha - \cos\beta) - V_o(\beta - \alpha)$$

۳- حل برحسب جریان متوسط القاگر I_L؛

$$I_L = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\beta} i_L(\omega t)\, d(\omega t) \Rightarrow I_L = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{\omega L}[V_m(\cos\alpha - \cos\omega t) - V_0(\omega t - \alpha)]d(\omega t)$$

۴- حل برحسب ولتاژ بار V_o و براساس متوسط جریان القاگر به‌دست آمده از مرحله ۳؛

$$I_R = I_L = \frac{V_o}{R}$$

$$V_o = I_L R$$

۵- تکرار مراحل ۱ تا ۴ تا زمانی که مقدار محاسبه‌شده V_o در مرحله ۴، برابر با V_o تخمین زده شده در مرحله ۱ شود.

- توجه شود که ولتاژ خروجی برای جریان گسسته، بزرگ‌تر از جریان پیوسته می‌باشد. اگر باری وجود نداشته باشد خازن تا مقدار بیشینه منبع شارژ می‌شود و بنابراین حداکثر ولتاژ خروجی برابر با V_m می‌شود.

❑ مثال ۴-۲- یکسوساز تمام‌موج با فیلتر LC

یک یکسوساز تمام‌موج، دارای منبع $v_s(t) = 100\sin(377t)\,\text{V}$ بوده و یک فیلتر LC نیز مورد استفاده قرار گرفته است که در آن L=۵mH و C=۱۰۰۰۰μF می‌باشد. مقاومت بار، الف) ۵Ω، و ب) ۵۰Ω است. ولتاژ خروجی را برای هر مورد تعیین کنید.

■ حل

هنگامی جریان القاگر پیوسته است که:

$$R < 3\omega L = 3(377)(0.005) = 5.7\ \Omega$$

که نشان می‌دهد، جریان برای ۵Ω پیوسته بوده و برای ۵۰Ω گسسته است.

الف) برای R=۵Ω با جریان پیوسته، ولتاژ خروجی برابر است با:

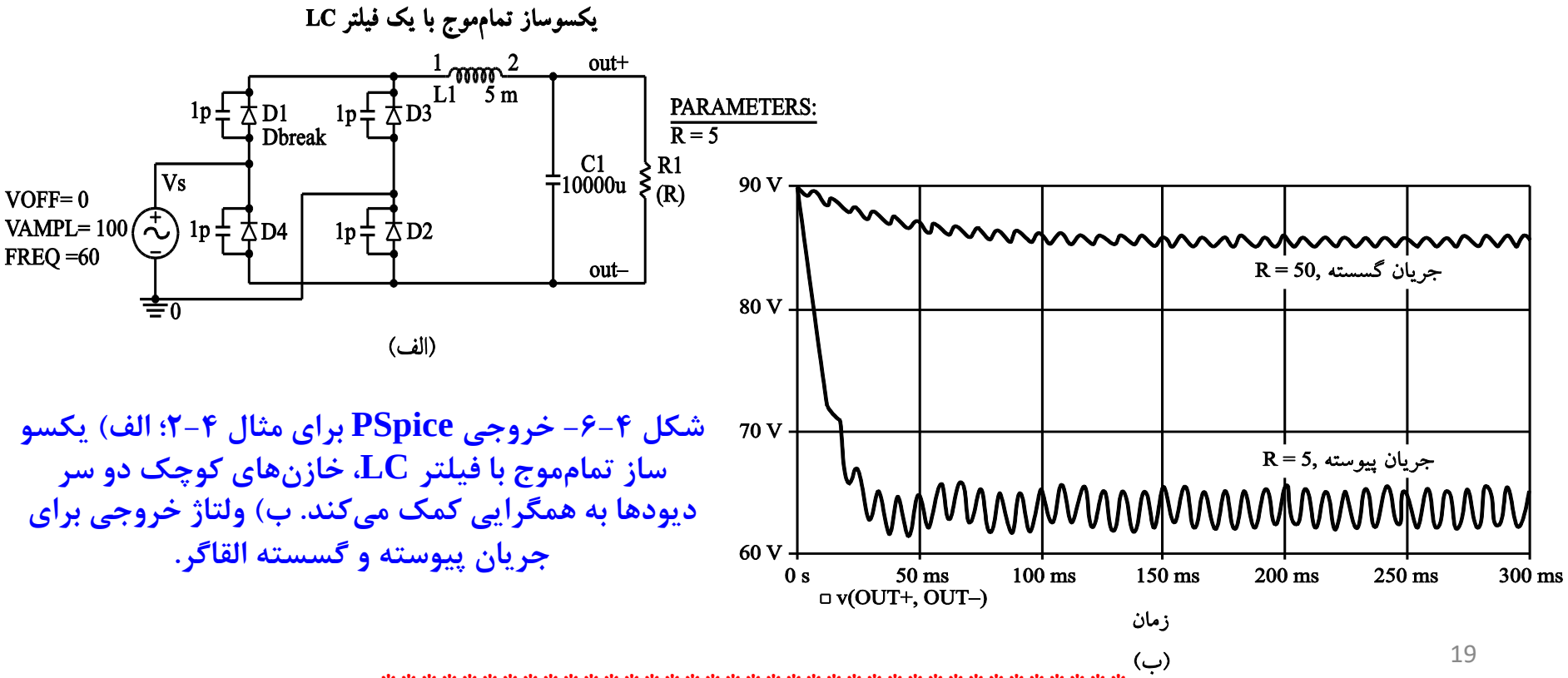
$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} = \frac{2(100)}{\pi} = 63.7\ \text{V}$$

ب) برای R=۵۰Ω با جریان گسسته، روشی تکراری جهت تعیین V_o استفاده می‌شود. ابتدا V_o را ۹۰V در نظر می‌گیریم. نتایج تکرار، به‌صورت زیر می‌باشد:

V_o تخمین زده شده	α	β	V_o محاسبه‌شده	
۹۰	۱/۱۲	۲/۴۸	۳۸/۸	تخمین خیلی بزرگ است.
۸۰	۰/۹۳	۲/۸۹	۱۵۹	تخمین خیلی کوچک است.
۸۵	۱/۱۲	۲/۷۰	۸۸/۲	تخمین کمی کوچک است.
۸۶	۱/۰۴	۲/۶۶	۷۶/۶	تخمین خیلی بزرگ است.
۸۵/۳	۱/۰۲	۲/۶۹	۸۴/۶	حل تقریبی

بنابراین V_o تقریباً ۸۵/۳V خواهد بود. در عمل، هنگام پیش‌بینی عملکرد یک مدار واقعی، ممکن است بررسی سه مقدار مشخص از ولتاژ خروجی، ناکافی باشد. در این حالت، با دانستن این که ولتاژ خروجی کمی بالاتر از ۸۵V می‌باشد، سه تکرار کافی به نظر می‌رسد. همچنین می‌توان خروجی را از نمودار شکل ۴-۵-د نیز محاسبه کرد.

برای ایجاد مدار، از VSIN برای منبع و Dbreak برای دیودها استفاده می‌شود. برای رسیدن به یک دیود ایده‌آل، مدل دیود با تغییر n=۰/۰۱ اصلاح می‌شود. ولتاژ اولیه خازن فیلتر برابر با ۹۰V قرار می‌گیرد و خازن‌های کوچکی در دو سر دیودها قرار داده می‌شود تا از مشکلات همگرایی جلوگیری کند. هردو مقدار R در یک شبیه‌سازی، با استفاده از جاروب پارامتری مورد آزمایش قرار می‌گیرد. تحلیل گذرا باید به‌اندازه کافی طولانی باشد تا اجازه مشاهده خروجی حالت مانا را بدهد. خروجی Probeبرای هردو مقاومت بار، در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. متوسط ولتاژ خروجی برای هر مورد با وارد کردن عبارت AVG(V(out +) -V(out-)) در Probe، پس از محدود کردن داده‌ها برای نمایش خروجی حالت مانا (پس از حدود ۲۵۰ms) به‌دست می‌آید و در نتیجه، V_o=۶۳/۶V برای R= ۵Ω(جریان پیوسته) و V_o =۸۴/۱V برای R =۵۰Ω (جریان گسسته) به‌دست می‌آید. این مقادیر به‌خوبی با راه‌حل‌های تحلیلی تطابق دارد.

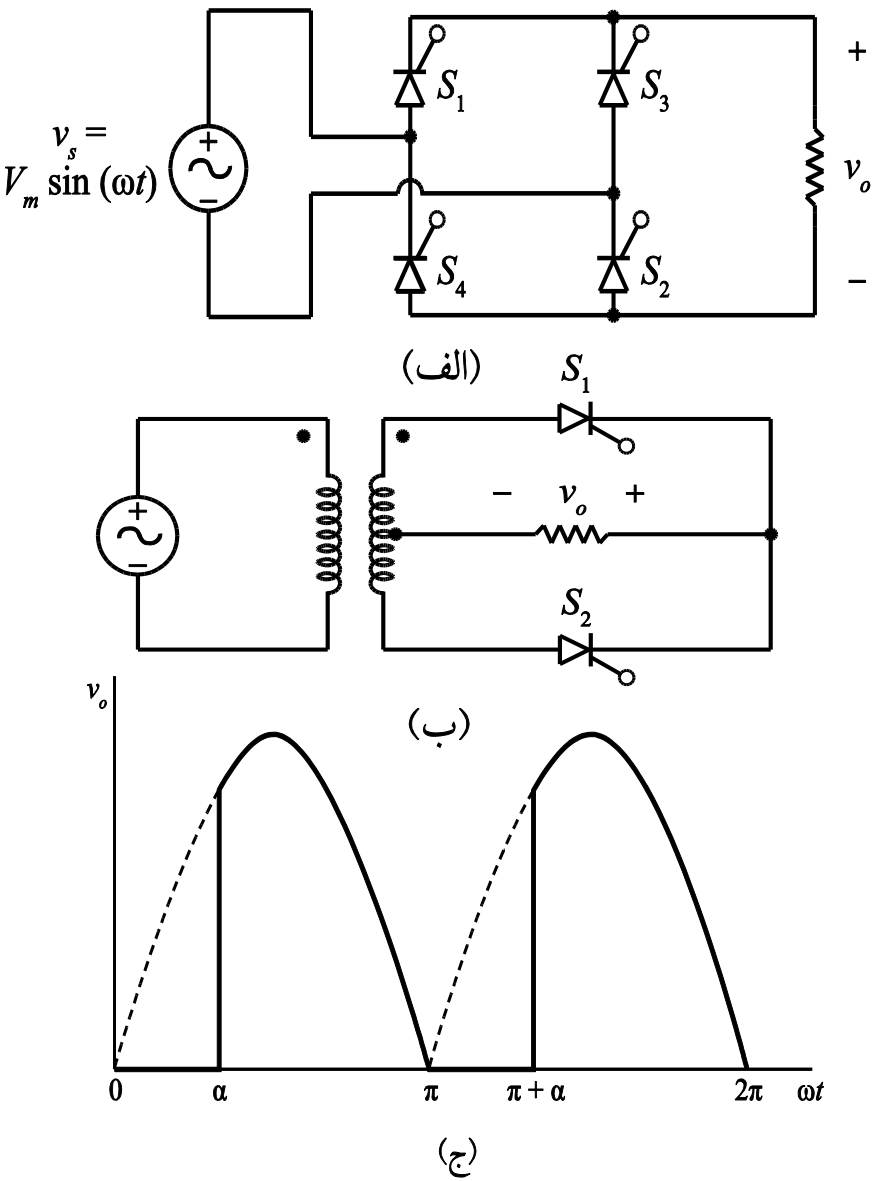


شکل ۴-۶- خروجی PSpice برای مثال ۴-۲؛ الف) یکسو ساز تمام‌موج با فیلتر LC، خازن‌های کوچک دو سر دیودها به همگرایی کمک می‌کند. ب) ولتاژ خروجی برای جریان پیوسته و گسسته القاگر.

۴-۲- یکسوساز تمام موج کنترل شده تک فاز

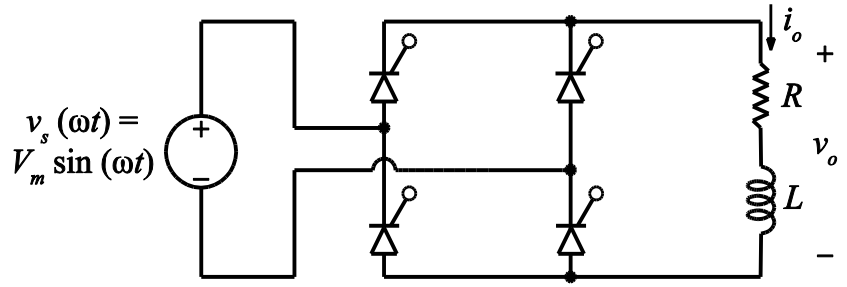
اصول تحلیل

- یک روش کارا برای کنترل خروجی یکسوساز تمام‌موج، جایگزین کردن کلیدهای کنترل‌شده مانند تایرستورها (SCRها) به‌جای دیودها می‌باشد. خروجی، با تنظیم زاویه تأخیر هر SCR کنترل می‌شود که منجر به ولتاژی در خروجی می‌شود که در یک بازه محدود، قابل تنظیم است.
- برای یکسوساز پل، SCRهای S_1 و S_2، هنگامی‌که قطبیت منبع مثبت می‌شود، در بایاس مستقیم قرار می‌گیرند. اما تا زمانی که سیگنال‌های گیت اعمال نشده است، هدایت نخواهند کرد. به‌طور مشابه، S_3 و S_4، هنگامی‌که قطبیت منبع منفی می‌شود، در بایاس مستقیم قرار می‌گیرند. اما تا زمانی که سیگنال‌های گیت اعمال نشده است، هدایت نخواهند کرد. برای یکسوساز با ترانسفورمر دارای سر وسط، S_1 زمانی در بایاس مستقیم قرار می‌گیرد که V_S مثبت بوده و S_2 زمانی در بایاس مستقیم قرار می‌گیرد که V_S منفی است. اما هیچ‌کدام تا سیگنال گیت را دریافت نکنند، هدایت نخواهند کرد.
  - ✓ زاویهٔ تأخیر α، زاویهٔ تأخیر میان بایاس مستقیم شدن SCR و اعمال سیگنال گیت می‌باشد. اگر زاویهٔ تأخیر صفر باشد، یکسوساز، درست مانند یکسوسازهای کنترل‌نشده دیودی رفتار خواهد کرد.

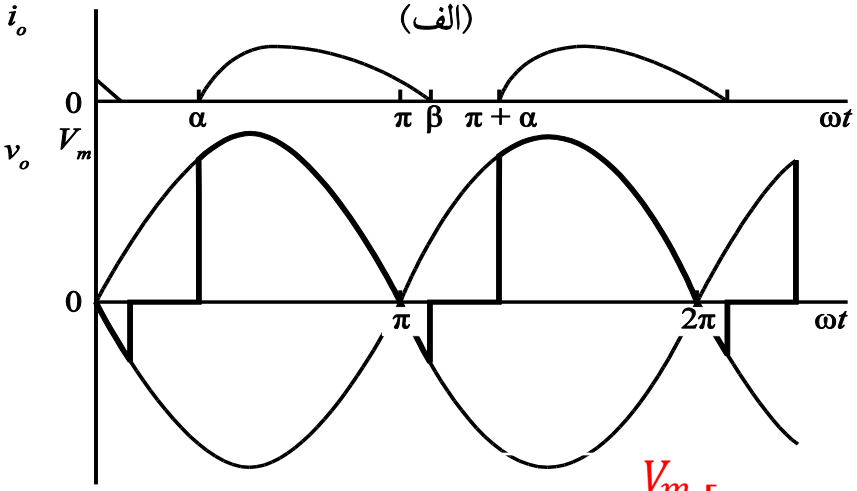


شکل۴-۷- الف) یکسوساز پل تمام‌موج کنترل‌شده، ب) یکسوساز تمام‌موج کنترل‌شده با ترانسفورمر دارای سر وسط، ج)خروجی برای یک بار مقاومتی.

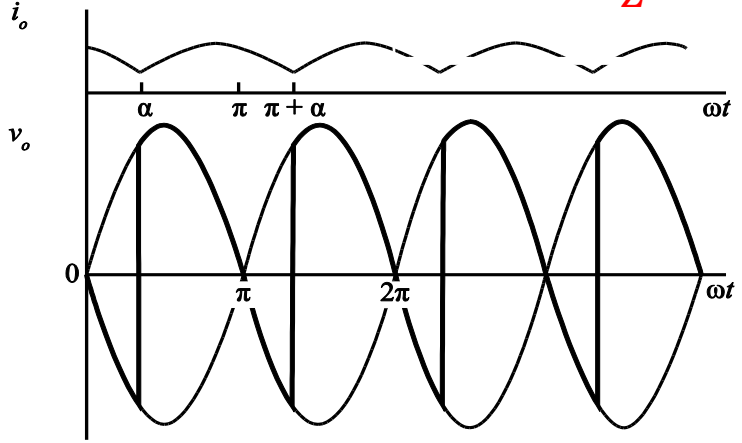
تحلیل و شبیه سازی یکسوساز کنترل شده تک فاز با بار *RL*



(الف)



(ب)



(ج)

❑ جریان بار برای یکسوساز تمام‌موج کنترل‌شده با یک بار *RL*، می‌تواند پیوسته یا گسسته بوده و هریک به تحلیل مجزایی برای خود نیاز دارد. با شروع تحلیل در $\omega t = 0$ با جریان بار صفر، SCRهای S_1 و S_2 در یکسوساز پل، بایاس مستقیم شده و S_3 و S_4، همان‌طور که قطبیت ولتاژ منبع مثبت می‌شود، بایاس معکوس می‌شوند. سیگنال‌های گیت برای S_1 و S_2، در زاویه $\omega t = \alpha$ اعمال شده و S_1 و S_2 روشن می‌شوند. با S_1 و S_2 روشن، ولتاژ بار برابر با ولتاژ منبع می‌شود. در این شرایط، **مدار مشابه با یکسوساز نیم‌موج کنترل‌شده می‌شود** که دارای تابع جریان زیر می‌باشد:

$$i_o(\omega t) = \frac{V_m}{Z}\left[\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta)e^{-(\omega t - \alpha)/\omega\tau}\right] \qquad \alpha \le \omega t \le \beta \qquad \textbf{(20-4)}$$

که

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}(\omega L/R) \qquad \tau = L/R$$

✓ تابع جریان بالا در $\omega t = \beta$ صفر می‌شود.

شکل ۴-۸- الف) یکسوساز کنترل‌شده با بار *RL*، ب) جریان گسسته، ج) جریان پیوسته.

❑ **حالت جریان گسسته:** اگر $\beta < \pi + \alpha$، جریان تا زمانی که $\omega t = \pi + \alpha$ شود، صفر باقی می‌ماند که در این لحظه، سیگنال‌های گیت به S_3 و S_4 که بایاس مستقیم می‌باشند، اعمال شده و S_3 و S_4 شروع به هدایت می‌کنند. این حالت، عملکرد جریان‌گسسته نامیده می‌شود.

جریان گسسته $\rightarrow \beta < \alpha + \pi$

✓ **تحلیل یکسوساز تمام‌موج کنترل‌شده که در حالت جریان‌گسسته عمل می‌کند، مشابه با یکسوساز نیم‌موج کنترل‌شده است به‌جز این که دوره جریان خروجی، به‌جای 2π rad، π rad می‌باشد.**

✓ زاویه خاموشی β به‌صورت زاویه‌ای که در آن جریان به صفر برمی‌گردد، تعریف می‌شود. وقتی که $\omega t = \beta$ داریم:

$$i(\beta) = 0 = \frac{V_m}{Z}\left[\sin(\beta - \theta) - \sin(\alpha - \theta)e^{(\alpha-\beta)/\omega\tau}\right]$$

✓ که برای به‌دست آوردن β، معادله باید به‌صورت عددی حل شود. زاویه β-α، به زاویه هدایت γ موسوم است.

✓ روابط مقادیر متوسط و مؤثر نیز برابرند با:

$$V_o = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\beta} V_m \sin(\omega t)\mathrm{d}(\omega t) = \frac{V_m}{2\pi}(\cos\alpha - \cos\beta)$$

$$I_o = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\beta} i(\omega t)\mathrm{d}(\omega t)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\beta} i^2(\omega t)\mathrm{d}(\omega t)}$$

❑ **حالت جریان پیوسته:** اگر جریان بار همچنان در $\omega t = \pi + \alpha$ مثبت باشد، هنگامی‌که سیگنال‌های گیت در تحلیل‌های بالا به S_3 و S_4 اعمال می‌شود، S_3 و S_4 روشن شده و S_1 و S_2 بالاجبار خاموش می‌شوند. از آنجا که شرایط اولیه جریان در نیم‌دوره دوم، صفر نمی‌باشد، تابع جریان تکرار نمی‌شود. در این حالت، رابطه جریان برای حالت مانای جریان گسسته که قبلاً بیان شد، معتبر نمی‌باشد.

✓ مرز میان جریان پیوسته و گسسته هنگامی روی می‌دهد که β برابر با $\pi + \alpha$ شود. برای عملکرد جریان‌پیوسته، جریان باید در $\omega t = \pi + \alpha$ بزرگ‌تر از صفر باشد.

$$i(\pi+\alpha) \geq 0 \Rightarrow \sin(\pi+\alpha-\theta) - \sin(\pi+\alpha-\theta)\, e^{-(\pi+\alpha-\alpha)/\omega\tau} \geq 0$$

✓ با حل آن برحسب α داریم (که می‌توان برای ارزیابی جریان بار، جهت پیوسته یا گسسته بودن آن، استفاده کرد):

$$\sin(\pi+\alpha-\theta) = \sin(\theta-\alpha)$$

$$\sin(\theta-\alpha)\left(1-e^{-(\pi/\omega\tau)}\right) \geq 0$$

$$\Rightarrow \alpha \leq \theta \Rightarrow \alpha \leq \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$ برای جریان پیوسته

✓ سری‌های فوریه، برای شکل‌موج ولتاژ در حالت جریان‌پیوسته، به‌صورت زیر بیان می‌شود (که در آن‌ها n=2, 4, 6, ... می‌باشد):

$$v_o(\omega t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \theta_n)$$

$$V_o = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\pi} V_m \sin(\omega t)\, d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi}\cos\alpha$$

$$a_n = \frac{2V_m}{\pi}\left[\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1}\right]$$

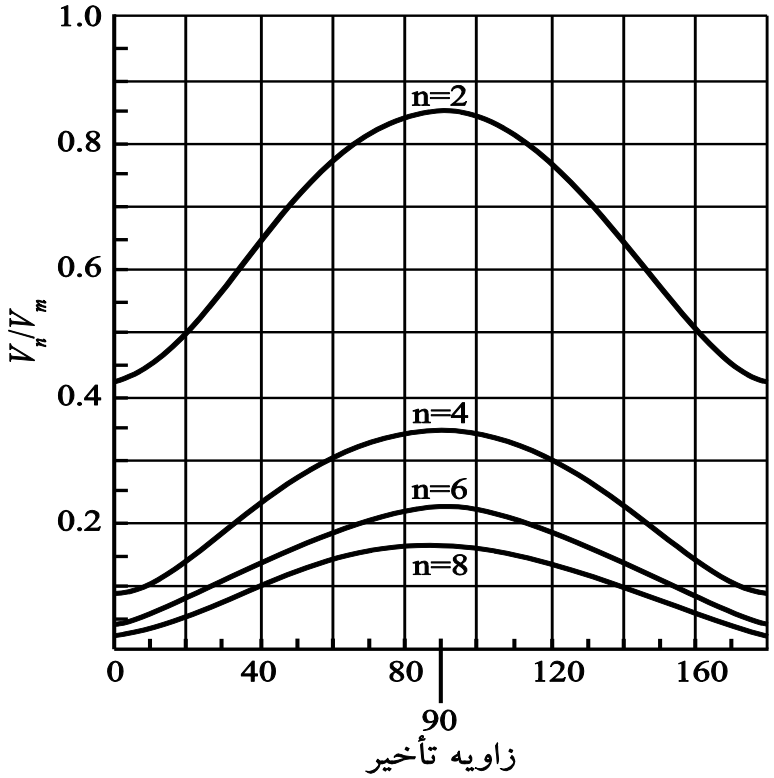
$$V_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$b_n = \frac{2V_m}{\pi}\left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1}\right]$$

✓ جریان مؤثر کل، با ترکیب جریان‌های مؤثر در هر فرکانس تعیین می‌شود.

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=2,4,6\ldots}^{\infty} \left(\frac{I_{\text{n}}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$I_0 = \frac{V_0}{R} \qquad \text{و} \qquad I_n = \frac{V_n}{Z_n} = \frac{V_n}{|R + jn\omega L|}$$



✓ با افزایش مرتبه هارمونیک، امپدانس (مقاومت ظاهری) برای القاگر افزایش می‌یابد. بنابراین، شاید برای محاسبه جریان مؤثر ضرورت داشته باشد تا تنها بعضی جملات سری محاسبه شوند. اگر القاگر بزرگ باشد، جملات AC کوچک شده و جریان اساساً DC خواهد بود.

شکل ۴-۹- ولتاژهای هارمونیکی خروجی به‌صورت تابعی از زاویه تأخیر برای یکسوساز تک‌فاز کنترل‌شده (حالت جریان پیوسته).

❑ مثال ۴-۳- یکسوساز تمام‌موج کنترل‌شده با جریان پیوسته

یک یکسوساز پل تمام‌موج کنترل‌شده، دارای منبع AC با مقدار مؤثر ولتاژ ۱۲۰V و فرکانس ۶۰Hz، و بار RL با مقادیر R=۱۰Ω و L=۱۰۰mH می‌باشد. زاویه تأخیر ۶۰° است. الف) پیوستگی جریان را بررسی کنید. ب) مقدار متوسط جریان را تعیین کنید. ج) توان جذب‌شده توسط بار را به‌دست آورید.

■ حل

الف) جهت بررسی این که جریان پیوسته یا گسسته می‌باشد، داریم:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) = \tan^{-1}\left[\frac{(377)(0.1)}{10}\right] = 75^\circ \Rightarrow \alpha = 60^\circ < 75^\circ \qquad \text{جریان پیوسته}$$

ب) مؤلفه DC ولتاژ برابر است با:

$$V_0 = \frac{2V_m}{\pi}\cos\alpha = \frac{2\sqrt{2}(120)}{\pi}\cos(60^\circ) = 54.0\ \text{V}$$

ج) دامنه جملات AC برابر است با (که در آن $Z_n=|R+jn\omega L|$ و $I_n=V_n/Z_n$):

n	a_n	b_n	V_n	Z_n	I_n
۰(DC)	—	—	۵۴/۰	۱۰	۵/۴۰
۲	-۹۰	-۹۳/۵	۱۲۹/۸	۷۶/۰	۱/۷۱
۴	۴۶/۸	-۱۸/۷	۵۰/۴	۱۵۱/۱	۰/۳۳
۶	-۳/۱۹	۳۲/۰	۳۲/۲	۲۲۶/۴	۰/۱۴

بنابراین، مقدار مؤثر جریان برابر است با:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{(5.40)^2 + \left(\frac{1.71}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0.33}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0.14}{\sqrt{2}}\right)^2 + \cdots} \approx 5.54\ \text{A}$$

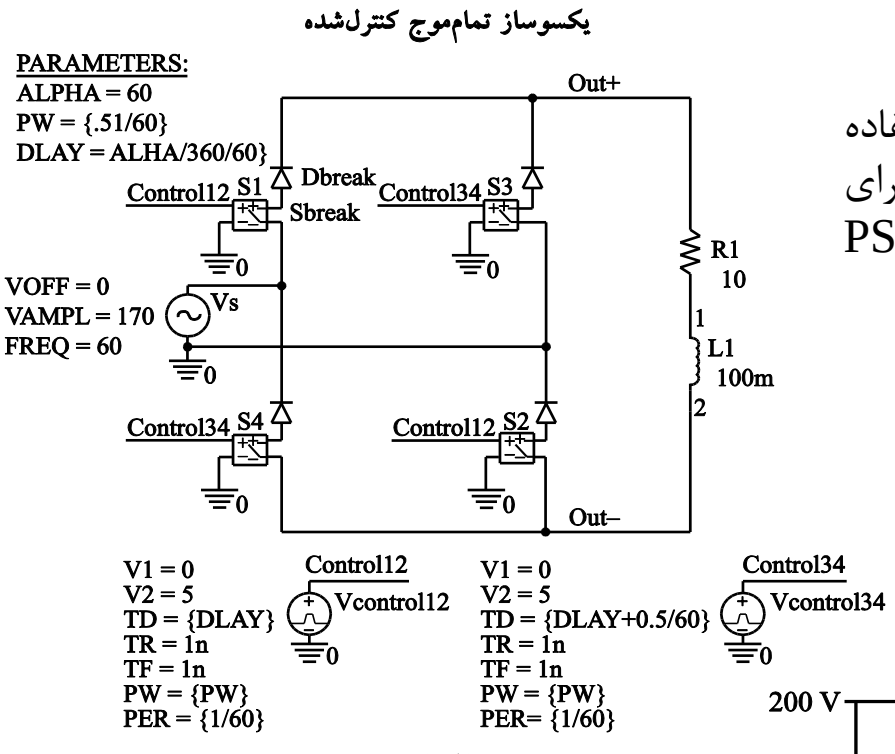
توان، از رابطه $I_{\text{rms}}^2 R$ به‌دست می‌آید.

$$P = (5.54)^2(10) = 307\ \text{W}$$

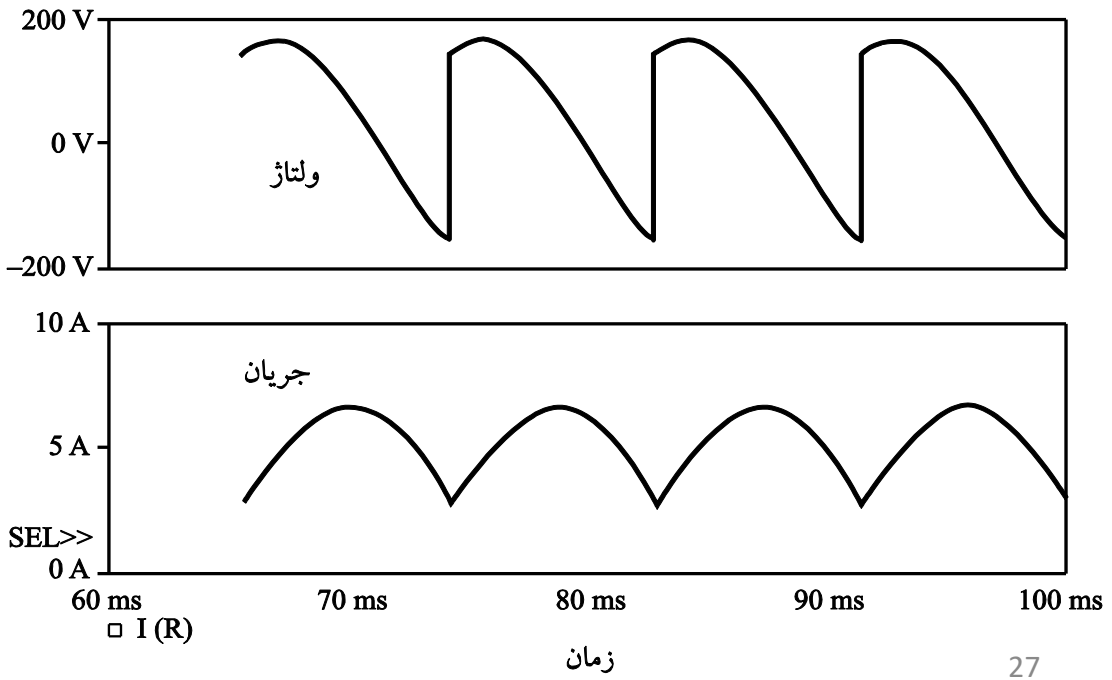
دقت شود که مقدار مؤثر جریان می‌تواند به‌طور تقریبی از مؤلفه DC و یک مؤلفه AC به‌دست آید (n=۲). جملات با فرکانس بالا، بسیار کوچک بوده و کمتر در توان جذبی بار مشارکت می‌کنند.

■ تحلیل با PSpice

یک مدار PSpice که از مدل کلید کنترل‌شده برای SCR استفاده می‌کند در شکل ۴-۱۰-الف نشان داده‌شده است (این مدار برای نسخه آزمایشی بسیار بزرگ بوده و نیازمند نسخه کامل از PSpice می‌باشد).



(الف)



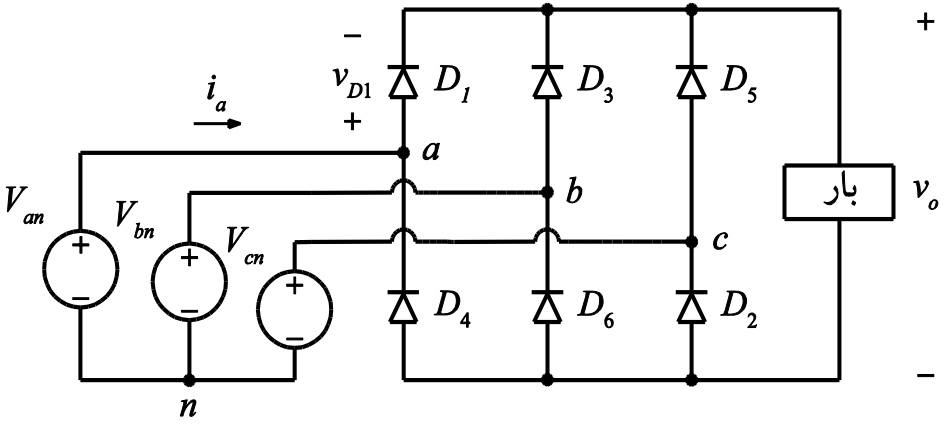
(ب)

شکل ۴-۱۰- الف) مدار PSpice برای یک یکسوساز تمام‌موج کنترل‌شده در مثال ۴-۳، ب) خروجی Probe و نمایش ولتاژ و جریان بار.

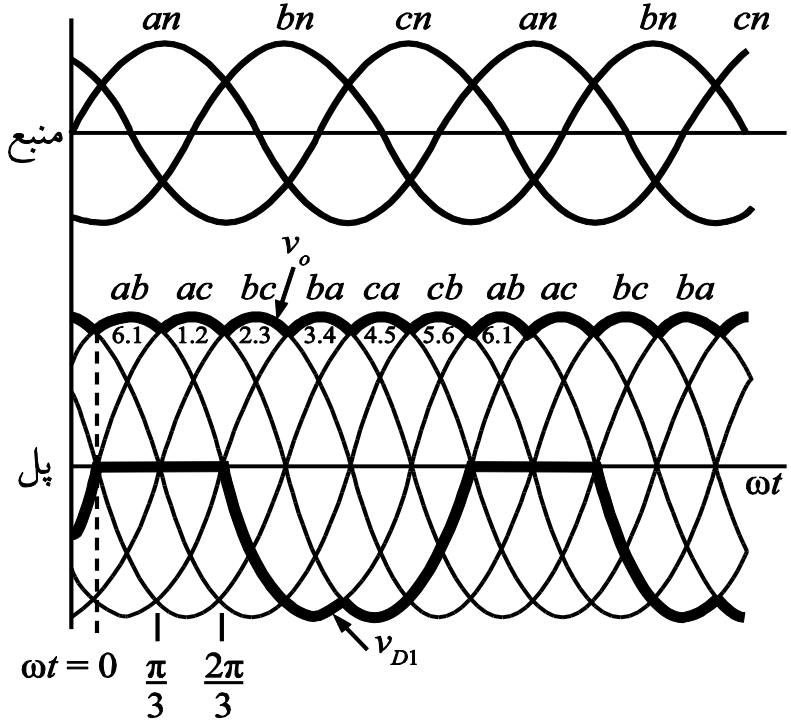
۴–۲– یکسوساز کنترل نشده (دیودی) سه فاز

- از یکسوسازهای سه‌فاز، به وفور در صنایع، برای ایجاد ولتاژ و جریان DC برای بارهای بزرگ استفاده می‌شود. منبع ولتاژ سه‌فاز متعادل بوده و دارای توالی فاز *abc* است. در تحلیل اولیه مدار، منبع و دیودها ایده‌آل فرض می‌شوند.

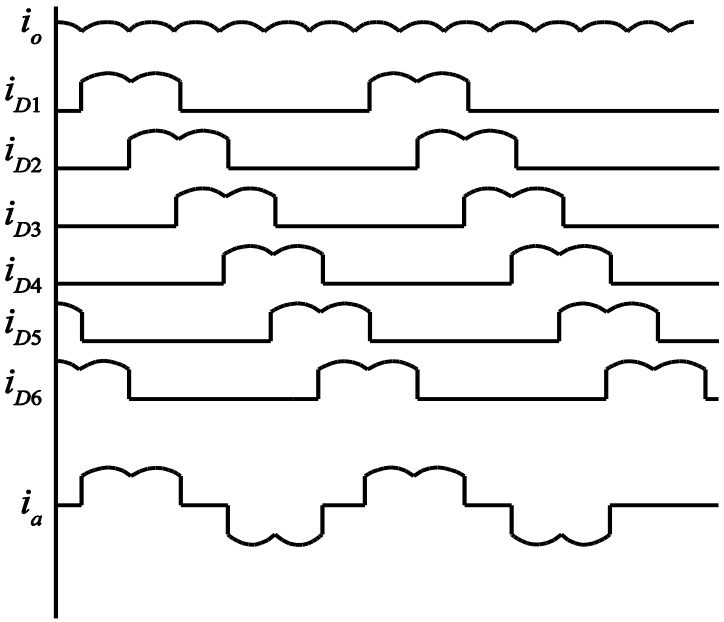
شکل ۴–۱۱– الف) یکسوساز تمام‌پل سه‌فاز، ب) ولتاژهای منبع و خروجی، ج) جریان‌ها برای یک بار مقاومتی.



(الف)



(ب)



(ج)

❑ **برای مدار یکسوساز سه فاز، چند ویژگی اساسی وجود دارد:**

۱- اعمال قانون ولتاژ کیرشهف در هر مسیری نشان می‌دهد که **یک دیود فقط می‌تواند از نیمه بالایی پل (D_1، D_3 یا D_5) در هر زمان هدایت کند.** آند دیودی که هدایت می‌کند، به ولتاژ فازی وصل می‌شود که در آن لحظه، بیشترین دامنه را داشته باشد.

۲- قانون ولتاژ کیرشهف همچنین نشان می‌دهد که **یک دیود فقط می‌تواند از نیمه پایین پل (D_2، D_4 یا D_6) در هر زمان هدایت کند.** کاتد دیودی که هدایت می‌کند، به ولتاژ فازی وصل می‌شود که در آن لحظه، کمترین دامنه را داشته باشد.

۳- از موارد ۱ و ۲ در بالا، می‌توان نتیجه گرفت که D_1 و D_4 همزمان نمی‌توانند هدایت کنند. به همین شکل، D_3 و D_6، و نیز D_5 و D_2 نمی‌توانند همزمان هدایت کنند.

۴- **ولتاژ خروجی دو سر بار، یکی از ولتاژهای خط منبع می‌باشد.** به‌عنوان مثال، هنگامی‌که D_1 و D_2 هدایت می‌کنند، ولتاژ خروجی، برابر با V_{ac} است. درضمن، این که کدام دیودها هدایت کنند، از روی این نکته که کدام ولتاژ خط در آن لحظه بیشترین است، تعیین می‌شود. برای مثال، وقتی که V_{ac} بیشترین ولتاژ خط می‌باشد، ولتاژ خروجی نیز V_{ac} است.

۵- شش ترکیب برای ولتاژ خط وجود دارد (سه‌فاز و در هر لحظه دو تا از آن‌ها). **با در نظرگرفتن ۳۶۰° برای هر دوره ولتاژ منبع، یک دوره گذار بالاترین ولتاژ خط به خط باید هر $360°/6=60°$ اتفاق بیفتد.** به‌دلیل شش تغییری که در هر دوره تناوب ولتاژ منبع اتفاق می افتد، این مدار به یکسوساز شش‌پالسه (Six-Pulse Rectifier) معروف است.

۶- **فرکانس پایه ولتاژ خروجی 6ω است** که ω فرکانس منبع سه‌فاز می‌باشد.

✓ دیودها به‌صورت جفت‌های (۶،۱)، (۱،۲)، (۲،۳)، (۳،۴)، (۴،۵)، (۵،۶)، (۶،۱)، و... هدایت می‌کنند. دیودها با توالی ۱،۶،۵،۴،۳،۲،۱، و... روشن می‌شوند.

- **جریان دیودهای روشن، همان جریان بار است.** برای تعیین جریان در هر فاز منبع، قانون جریان کیرشهف در گره‌های a، b و c اعمال می‌شود.

$$i_a = i_{D_1} - i_{D_4}$$
$$i_b = i_{D_3} - i_{D_6}$$
$$i_c = i_{D_5} - i_{D_2}$$

- از آنجا که هر دیود، یک‌سوم زمان را هدایت می‌کند، در نتیجه:

$$I_{D,\text{avg}} = \frac{1}{3} I_{o,\text{avg}}$$

$$I_{D,\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{o,\text{rms}}$$

$$I_{s,\text{rms}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{o,\text{rms}}$$

- توان ظاهری منبع سه‌فاز، برابر است با:

$$S = \sqrt{3}\, V_{L-L,\text{rms}}\, I_{s,\text{rms}}$$

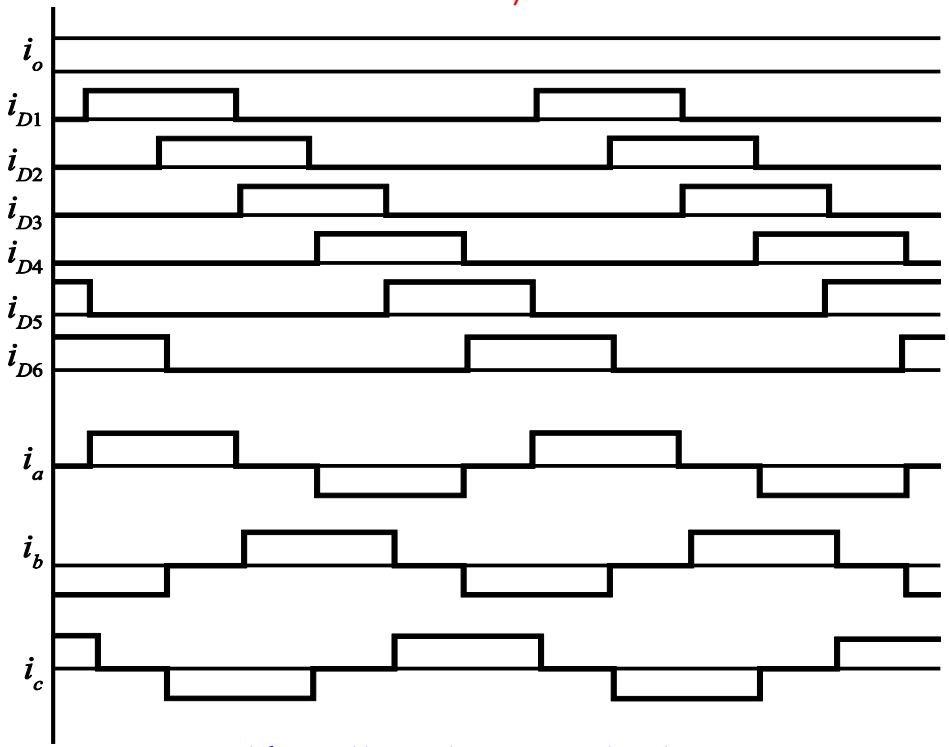
- **بیشینه ولتاژ معکوس دو سر یک دیود، برابر با بیشینه ولتاژ خط به خط است.** وقتی D_1 هدایت می‌کند، ولتاژ دو سر آن صفر است. وقتی D_1 خاموش است، در صورت روشن بودن D_3، ولتاژ دو سر آن V_{ab} بوده و در صورت روشن بودن D_5، ولتاژ دو سر آن V_{ac} خواهد بود.

- ولتاژ متناوب خروجی، به‌صورت $v_o(\omega t) = V_{m,L-L}\sin(\omega t)$ و برای $\pi/3 \le \omega t \le 2\pi/3$ تعریف می‌شود. دوره تناوب آن نیز $\pi/3$ است که برای محاسبه ضرایب سری فوریه مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به تقارن، ضرایب مؤلفه‌های سینوسی صفر می‌باشند. بنابراین، سری فوریه ولتاژ خروجی به این صورت بیان می‌شود:

$$v_o(t) = V_o + \sum_{n=6,12,18\ldots}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 t + \pi)$$

$$V_o = \frac{1}{\pi/3}\int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_{m,L-L}\sin(\omega t)d(\omega t) = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} = 0.955\,V_{m,L-L}$$

$$V_n = \frac{6V_{m,L-L}}{\pi(n^2-1)} \qquad n = 6, 12, 18, \ldots$$



شکل ۴-۱۲- جریان‌های یکسوساز سه‌فاز، هنگامی که خروجی فیلتر شده است.

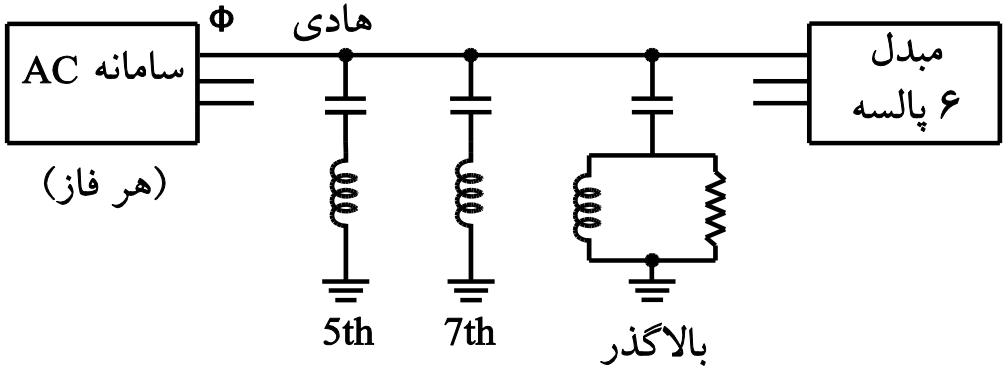
- ✓ که $V_{m,L\text{-}L}$ بیشینه ولتاژ خط به خط منبع سه‌فاز بوده و برابر با $\sqrt{2}\,V_{L\text{-}L,\text{rms}}$ است.
- ✓ از آنجا که ولتاژ خروجی متناوب، دورهٔ تناوبی برابر با یک‌ششم دوره تناوب ولتاژ تغذیه AC دارد، هارمونیک‌های خروجی، از مرتبه $6k\omega$ که k=1,2,3,… می‌باشد. یک مزیت یکسوساز سه‌فاز بر یکسوساز تک‌فاز این است که خروجی، ذاتاً یک ولتاژ DC است و هارمونیک‌های فرکانس بالا با دامنه کم باعث می‌شوند که فیلترها به‌صورتی مؤثر عمل کنند. در بسیاری از کاربردها، در یک بار که دارای یک القاگر به‌صورت سری باشد، جریان بار کاملاً DC است.

❑ سری فوریه جریان در فاز a از خط AC برابر است با:

$$i_a(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_o \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \ \ldots \right)$$

✓ که شامل مؤلفه‌هایی در فرکانس اصلی سامانه AC بوده و هارمونیک‌های آن از مرتبه $6k\pm1$ که $k=1,2,3,\ldots$ می‌باشد.

✓ از آنجا که این جریان‌های هارمونیکی ممکن است مشکلاتی در سامانه AC ایجاد کنند، غالباً فیلترهایی برای جلوگیری از ورود این هارمونیک‌ها به سامانه AC لازم است. **از فیلترهای تشدیدی جهت ایجاد مسیری به سمت زمین، برای هارمونیک‌های پنجم و هفتم که پایین‌ترین مرتبه و بزرگ‌ترین دامنه را دارند، استفاده می‌شود. هارمونیک‌های مرتبه بالاتر، با استفاده از یک فیلتر بالاگذر، کاهش می‌یابد.** این فیلترها از انتشار جریان‌های هارمونیکی در سامانه قدرت AC جلوگیری می‌کنند. اجزای فیلتر طوری انتخاب می‌شوند که در فرکانس سامانه قدرت، امپدانس بزرگی داشته باشند.



شکل ۴-۱۳- فیلترهایی برای هارمونیک‌های خط AC.

❑ یکسوساز سه‌فاز شش‌پالسه پل، بهبود قابل توجهی در کیفیت خروجی DC، نسبت به یکسوساز تک‌فاز، نشان می‌دهد. هارمونیک‌های ولتاژ خروجی کوچک بوده و فرکانس آن‌ها، شش‌برابر فرکانس منبع می‌باشد.

❑ مثال ۴-۴- یکسوساز سه فاز دیودی

یک یکسوساز سه‌فاز دیودی، دارای یک منبع سه‌فاز با ولتاژ مؤثر خط به خط ۴۸۰V است. بار، از اتصال سری یک مقاومت ۲۵Ω و یک القاگر ۵۰mH تشکیل شده است. مطلوب است تعیین: الف) سطح DC ولتاژ خروجی، ب) مؤلفه DC و اولین مؤلفه AC جریان بار ، ج) جریان مؤثر و متوسط دیودها، د) جریان مؤثر منبع، ه) توان ظاهری منبع.

■ حل

الف) ولتاژ DC خروجی پل برابر است با:

$$V_o = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} = \frac{3\sqrt{2}(480)}{\pi} = 648\ \text{V}$$

ب) متوسط جریان بار برابر است با:

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{648}{25} = 25.9\ \text{A}$$

اولین مؤلفه AC ولتاژ، در $n=6$ بوده و جریان آن نیز برابر است با:

$$I_6 = \frac{V_6}{Z_6} = \frac{0.0546\,V_m}{\sqrt{R^2 + (6\omega L)^2}} = \frac{0.0546\sqrt{2}(480)}{\sqrt{25^2 + [6(377)(0.05)]^2}} = \frac{37.0\ \text{V}}{115.8\ \Omega} = 0.32\ \text{A}$$

$$I_{6,\text{rms}} = \frac{0.32}{\sqrt{2}} = 0.23\ \text{A}$$

این مؤلفه و دیگر مؤلفه‌های AC، بسیار کوچک‌تر از مؤلفه DC بوده و قابل صرف‌نظر می‌باشند.

ج) مقدار مؤثر جریان بار، تقریباً با مقدار متوسط آن برابر است زیرا مؤلفه‌های AC کوچک می‌باشند. این مقادیر برابر هستند با:

$$I_{D,\text{avg}} = \frac{I_o}{3} = \frac{25.9}{3} = 8.63 \text{ A}$$

$$I_{D,\text{rms}} = \frac{I_{o,\text{rms}}}{\sqrt{3}} \approx \frac{25.9}{\sqrt{3}} = 15.0 \text{ A}$$

د) مقدار مؤثر جریان منبع نیز برابر است با:

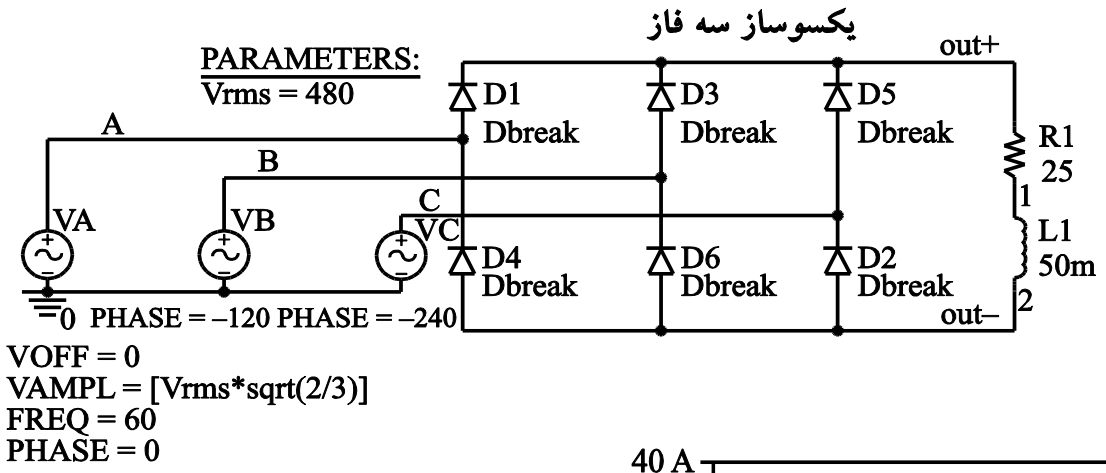
$$I_{s,\text{rms}} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right) I_{o,\text{rms}} \approx \left(\sqrt{\frac{2}{3}}\right) 25.9 = 21.2 \text{ A}$$

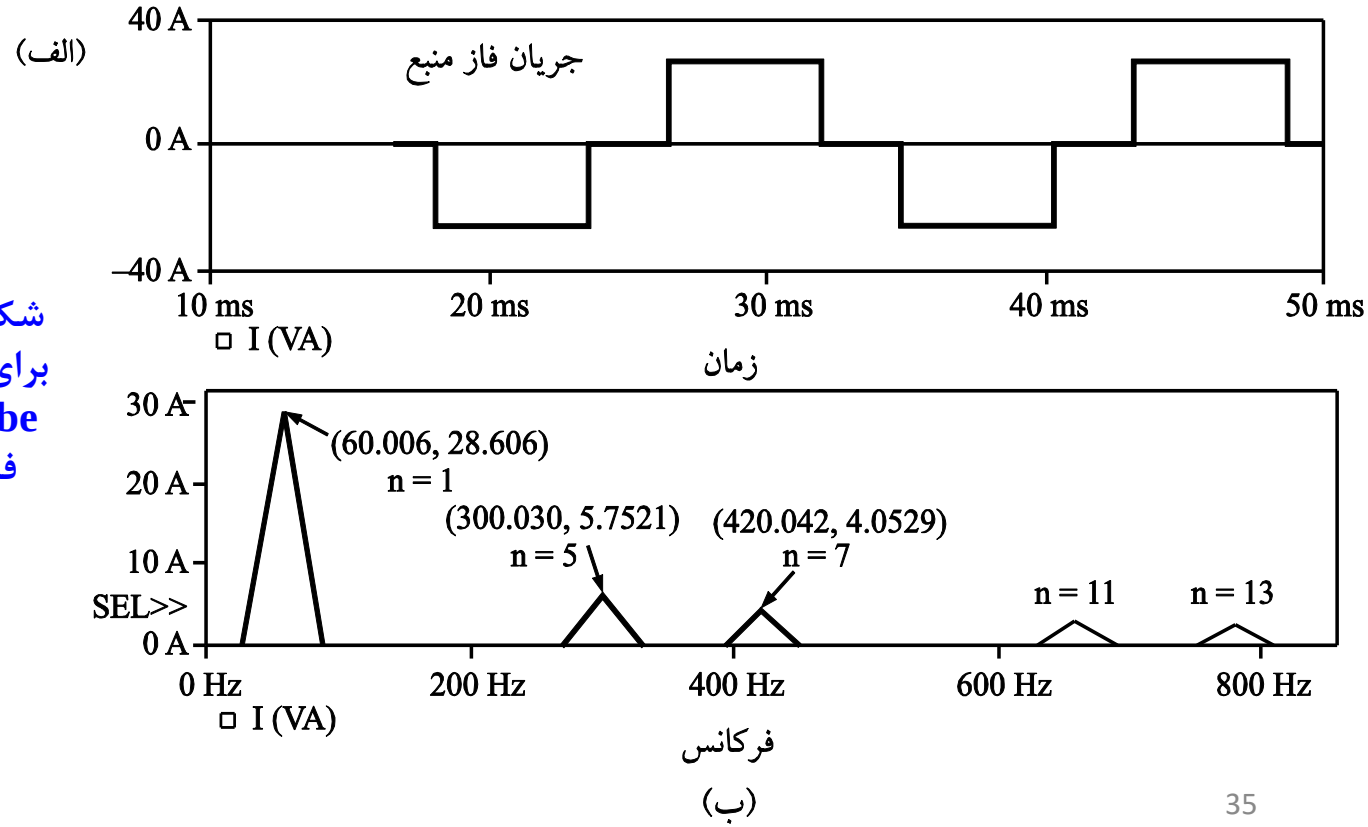
ه) توان ظاهری منبع، برابر است با:

$$S = \sqrt{3}\left(V_{L-L,\text{rms}}\right)\left(I_{s,\text{rms}}\right) = \sqrt{3}(480)(21.2) = 17.6 \text{ kVA}$$

■ تحلیل با PSpice

مداری برای این مثال در شکل ۴-۱۹-الف نشان داده شده است. از VSIN برای منابع استفاده شده است. Dbreak با $n=۰/۰۱$ رفتار یک دیود ایده‌آل را تقریب می زند. یک تحلیل حالت گذرا که از ۱۶/۶۷ms شروع شده و در ۵۰ms پایان می‌یابد، جریان‌های حالت مانا را ارائه می‌نماید.





شکل ۴-۱۴- الف) مدار PSpice برای یکسوساز سه‌فاز ب) خروجی Probe که شکل‌موج جریان یک فاز منبع و تحلیل فوریه آن را نشان می‌دهد.