

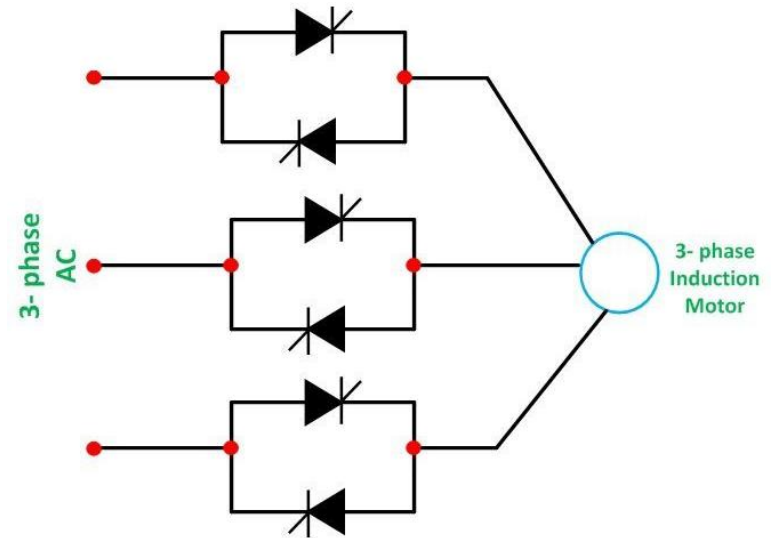
# فصل ۵:

## کنترل کننده های ولتاژ AC (مبدل های AC/AC)

۵-۱- کنترل کننده های ولتاژ AC تک فاز

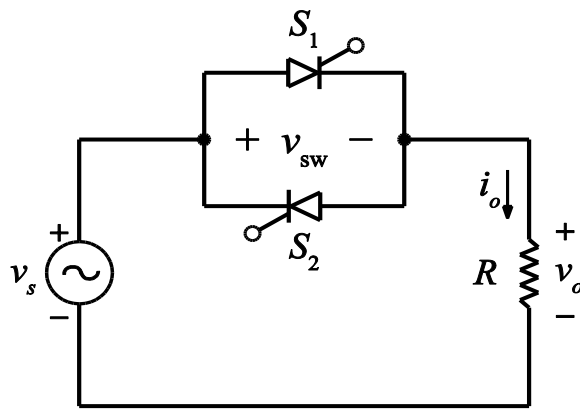
- تحلیل و شبیه سازی کنترل کننده تک فاز با یک بار  $RL$

۵-۲- کنترل کننده های ولتاژ سه فاز

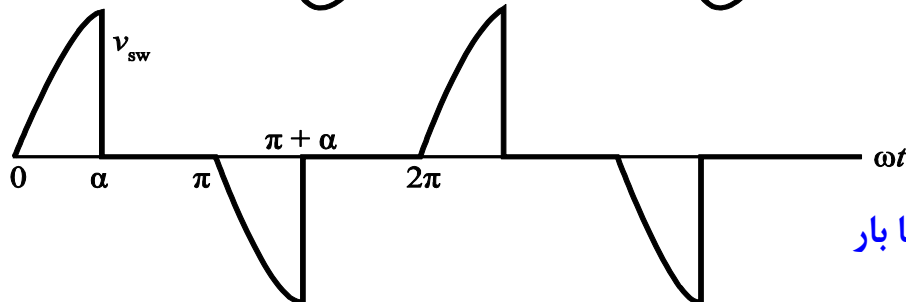
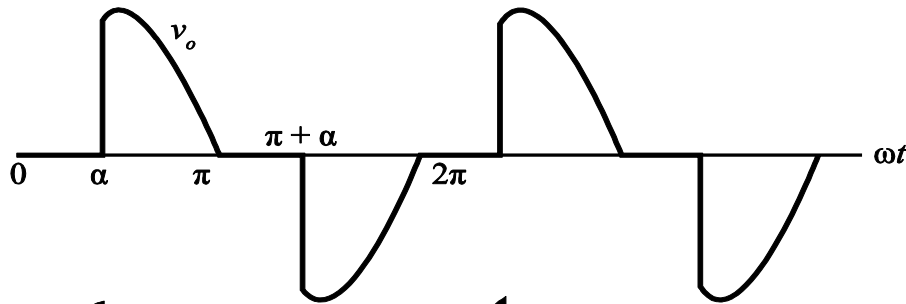
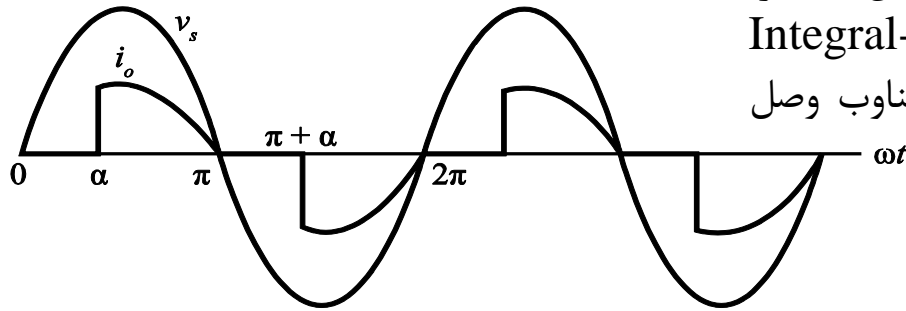


## ۵-۱- کنترل کننده‌های ولتاژ AC تک فاز

□ یک کنترل کننده ولتاژ AC، تبدیلی است که ولتاژ، جریان، و توان متوسط تحویلی به یک بار AC، از یک منبع AC، را کنترل می‌نماید. کلیدهای الکترونیکی در فواصل منظم، منبع و بار را به هم متصل یا از هم جدا می‌کنند. در الگویی از کلیدزنی که به کنترل فاز (Phase Control) موسوم است، در هر دوره تناوب منبع، کلیدزنی اتفاق می‌افتد و تأثیر آن حذف بخشی از شکل موج منبع، قبل از رسیدن به بار، می‌باشد. روش دیگر کنترل، به کنترل تمام دوره (Integral-Cycle Control) موسوم است که در آن، منبع برای چند دوره تناوب وصل بوده و یا برای چند دوره قطع است.



(الف)



(ب)

✓ کلیدهای الکترونیکی، به صورت تایریستورهای (SCRها) موازی نشان داده شده است. این آرایش SCRها، عبور جریان دوجتهه در بار را ممکن می‌سازد. این اتصال SCR، موازی - معکوس (Antiparallel) نامیده می‌شود زیرا SCRها جریان را در دو جهت مخالف انتقال می‌دهند. یک تریاک، معادل با دو SCR موازی - معکوس می‌باشد. کلیدهای کنترل شده دیگر را نیز می‌توان به جای SCRها مورد استفاده قرار داد.

شکل ۵-۱-الف) کنترل کننده ولتاژ AC تک فاز با بار مقاومتی با کنترل فاز، (ب) شکل موجها.

□ **اصول عملکرد یک کنترل کننده ولتاژ تک فاز** که از روش کنترل فاز استفاده می کند، کاملاً شبیه به یکسوساز نیم موج کنترل شده است. در این حالت، جریان بار، هم شامل نیم دوره مثبت و هم شامل نیم دوره منفی است. تجزیه و تحلیلی شبیه به آنچه برای یکسوساز نیم موج کنترل شده انجام شد، می تواند برای نیمی از دوره عملکرد کنترل کننده ولتاژ AC انجام شود. اگر اعمال سیگنال گیت  $S_2$  یک نیم دوره بعد از  $S_1$  باشد، تجزیه و تحلیل نیم دوره منفی، به جز برای علامت جبری ولتاژ و جریان، دقیقاً مثل نیم دوره مثبت است. سپس به دلیل تقارن، می توان نتایج را برای توصیف عملکرد در تمام دوره تناوب تعمیم داد. کنترل کننده های ولتاژ AC مبتنی بر کنترل فاز، دارای کاربردهای عملی متعددی از جمله مدارهای تنظیم نور (دیمر) و کنترل سرعت موتورهای القایی می باشند. منبع ولتاژ ورودی، از نوع AC بوده و خروجی نیز AC است (البته غیر سینوسی) و بنابراین مدار، در دسته مبدل های AC به AC طبقه بندی می شود.

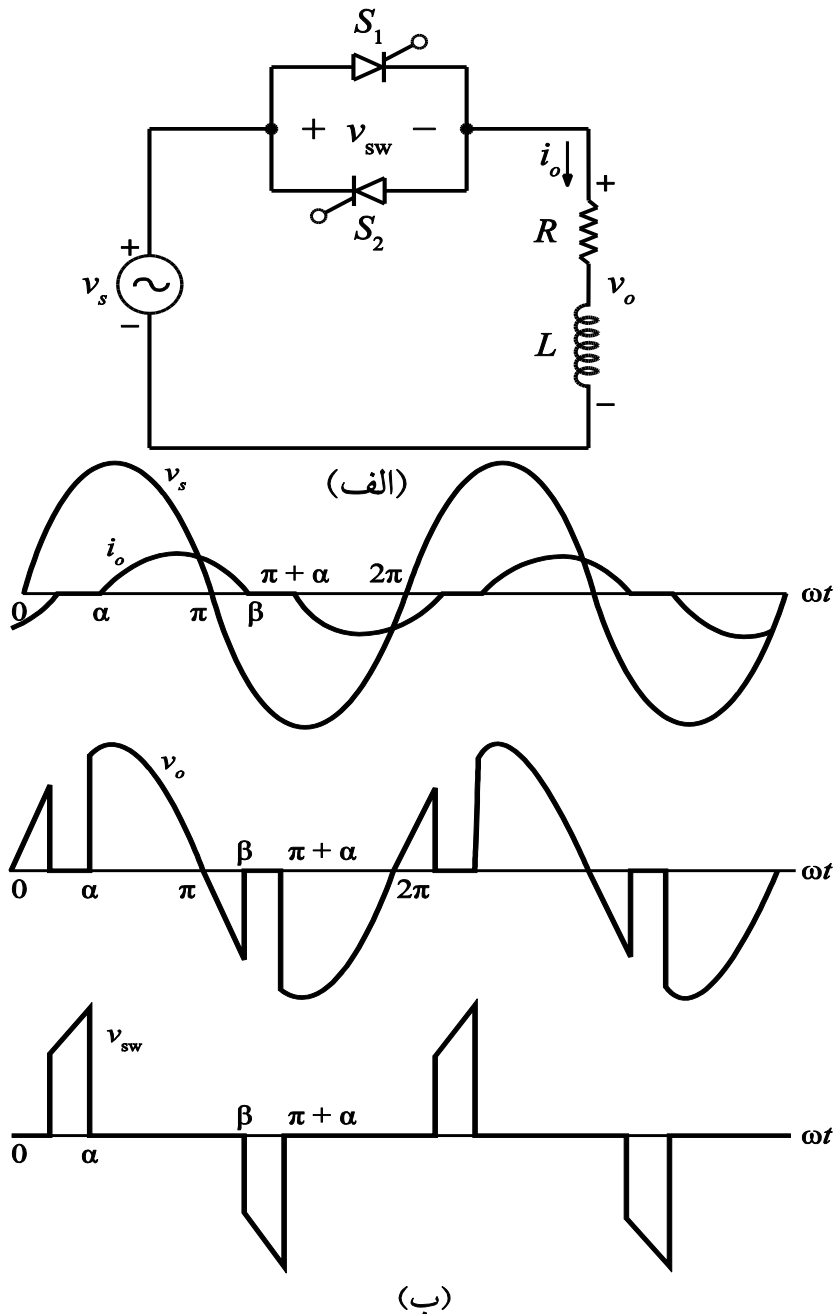
□ برخی از ویژگی های اساسی در مورد مدار **کنترل کننده ولتاژ تک فاز** عبارتند از:

- ۱- SCRها نمی توانند به صورت هم زمان هدایت کنند.
- ۲- هنگامی که یکی از SCRها روشن است، ولتاژ بار همان ولتاژ منبع است. هنگامی که هر دو SCR خاموش هستند، ولتاژ بار صفر است.
- ۳- هنگامی که هر کدام از SCRها روشن باشد، ولتاژ دو سر کلید ( $V_{sw}$ ) صفر بوده و وقتی که هیچ یک از SCRها روشن نباشد، ولتاژ آن برابر با ولتاژ منبع است.
- ۴- از آنجا که SCRها برای دوره های زمانی مساوی روشن هستند، جریان متوسط منبع و بار صفر است. جریان متوسط یک SCR غیر صفر است زیرا جریان SCR تک جهت می باشد.
- ۵- اگر SCRها برای دوره های زمانی مساوی روشن باشند، جریان مؤثر هر SCR،  $1/\sqrt{2}$  برابر جریان مؤثر بار است.

## تحلیل و شبیه سازی کنترل کننده تک فاز با یک بار $RL$

□ در این مدار، هنگامی که سیگنال گیت  $S_1$  در  $\omega t = \alpha$  اعمال می شود، قانون ولتاژ کیرشهف برای مدار، به این صورت بیان می شود:

$$V_m \sin(\omega t) = Ri_o(t) + L \frac{di_o(t)}{dt}$$



✓ این ترکیب از  $SCR$ ها، همانند یک رله نیمه هادی عمل می کند که با استفاده از کنترل گیت  $SCR$ ها، اتصال بار را به منبع وصل یا قطع می کند. هنگامی که سیگنال گیتی اعمال نشود، بار از منبع جدا می شود و هنگامی که سیگنال گیت به صورت پیوسته اعمال شود، بار دارای ولتاژی مشابه منبع است. در عمل، سیگنال گیت می تواند به جای یک سیگنال DC پیوسته، یک سری از پالس های با فرکانس بالا باشد.

✓ حل این معادله برای به دست آوردن جریان برابر است با:

$$i_o(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_m}{Z} [\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta)e^{(\alpha - \omega t)/\omega\tau}] & \alpha \leq \omega t \leq \beta \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \text{و} \quad \theta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right)$$

✓ زاویه خاموشی  $\beta$ ، زاویه‌ای است که در آن جریان به صفر برمی‌گردد. در  $\omega t = \beta$  داریم (که باید به صورت عددی بر حسب  $\beta$  حل شود):

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

□ یک سیگنال گیت در  $\omega t = \alpha + \pi$  به  $S_2$  اعمال شده و جریان بار منفی می‌شود، اما شکلی شبیه به نیم‌دوره مثبت دارد. زاویه هدایت به این صورت تعریف می‌شود:

$$\gamma = \beta - \alpha$$

□ بازه بین  $\pi$  و  $\beta$  هنگامی است که ولتاژ منبع منفی بوده و جریان بار هنوز مثبت می‌باشد و در این حالت  $S_2$  نمی‌تواند روشن شود زیرا در بایاس مستقیم نیست. اعمال سیگنال گیت  $S_2$ ، حداقل تا زمانی که جریان  $S_1$  در  $\omega t = \beta$  به صفر برسد، باید به تأخیر افتد. در نتیجه، زاویه تأخیر حداقل برابر با  $\beta - \pi$  می‌باشد.

$$\alpha \geq \beta - \pi$$

✓ شرایط حدی، وقتی که  $\beta - \alpha = \pi$ ، از بررسی معادله جریان خاموشی به دست می‌آید. وقتی  $\alpha = \theta$  باشد، معادله مذکور به این صورت می‌شود:

$$\sin(\beta - \alpha) = 0$$

$$\Rightarrow \beta - \alpha = \pi$$

✓ بنابراین، هنگامی که  $\alpha = \theta$ ، داریم:

$$\gamma = \pi$$

✓ اگر  $\alpha < \theta$  باشد،  $\gamma = \pi$  است و مقرر می‌کند که سیگنال گیت تا بعد از  $\omega t = \theta$  باید ادامه می‌یابد.

✓ در حالت حدی، هنگامی که  $\gamma = \pi$ ، یک SCR همیشه هدایت کرد و ولتاژ دو سر بار برابر با ولتاژ منبع است. در این حالت، ولتاژ و جریان بار سینوسی بوده و مدار با استفاده از روش فازوری برای مدارهای AC تجزیه و تحلیل می‌شوند. توان تحویلی به بار، به صورت پیوسته بین دو مقدار حدی که متناظر با ولتاژ کامل منبع و صفر است، قابل کنترل می‌باشد.

□ با دانستن این مطلب که مربع شکل موج جریان هر  $\pi$  رادیان تکرار می‌شود، مقدار مؤثر جریان بار برابر است با:

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

✓ توان جذب شده توسط بار از معادله زیر به دست می‌آید:

$$P = I_{o,rms}^2 R$$

□ مقدار مؤثر جریان در هر SCR برابر است با:

$$I_{SCR,rms} = \frac{I_{o,rms}}{\sqrt{2}}$$

✓ مقدار متوسط جریان بار صفر بوده ولی هر SCR نیم‌دوره از شکل موج جریان را انتقال می‌دهد و متوسط جریان SCR برابر است با:

$$I_{SCR,avg} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i_o(\omega t) d(\omega t)$$

□ شبیه‌سازی کنترل‌کننده ولتاژ AC تک‌فاز با PSpice بسیار مشابه به شبیه‌سازی یکسوساز نیم‌موج کنترل‌شده است. SCR با استفاده از یک دیود و یک کلید کنترل‌شده با ولتاژ مدل‌سازی می‌شود. دیودها، جریان‌ها را به مقادیر مثبت محدود می‌کنند و بنابراین رفتار SCR را تکرار می‌کنند. دو کلید متمم یکدیگر هستند و هریک برای نیمی از دوره تناوب، بسته می‌باشند. این مدار به نسخه کامل نرم‌افزار Schematic Capture نیازمند است اما فایل متنی CIR بر روی نسخه آزمایشی PSpice A/D قابل اجرا است.

### □ مثال ۵-۱- کنترل‌کننده ولتاژ AC تک‌فاز با بار $RL$

برای یک کنترل‌کننده ولتاژ تک‌فاز، مقدار مؤثر ولتاژ منبع  $120\text{V}$  و فرکانس  $60\text{Hz}$  است. بار، یک ترکیب  $RL$  سری با مقادیر  $R=20\Omega$  و  $L=50\text{mH}$  می‌باشد. زاویه تأخیر  $\alpha = 90^\circ$  است. مطلوب است تعیین: الف) عبارتی برای جریان بار برای اولین نیم‌دوره، ب) جریان مؤثر بار، ج) جریان مؤثر SCR، د) جریان متوسط SCR، ه) توان تحویلی به بار، و) ضریب توان.

■ حل

الف) با توجه به مشخصه‌های موجود می‌توان نوشت:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{(20)^2 + [(377)(0.05)]^2} = 27.5\Omega$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) = \tan^{-1}\frac{(377)(0.05)}{20} = 0.756 \text{ rad}$$

$$\omega\tau = \omega\left(\frac{L}{R}\right) = 377\left(\frac{0.05}{20}\right) = 0.943 \text{ rad} \quad , \quad \frac{V_m}{Z} = \frac{120\sqrt{2}}{27.5} = 6.18 \text{ A}$$

$$\alpha = 90^\circ = 1.57 \text{ rad} \quad , \quad \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta)e^{\alpha/\omega\tau} = 23.8 \text{ A}$$

جریان برابر است با:

$$i_o(\omega t) = 6.18\sin(\omega t - 0.756) - 23.8e^{-\omega t/0.943} \text{ A} \quad \alpha \leq \omega t \leq \beta$$

زاویه خاموشی  $\beta$  از حل عددی  $i(\beta) = 0$  در معادله بالا به دست می آید که برابر است با:

$$\beta = 3.83 \text{ rad} = 220^\circ$$

توجه کنید که زاویه هدایت  $\gamma = \beta - \alpha = 2.26 \text{ rad} = 130^\circ$  بوده که کمتر از مقدار حدی  $180^\circ$  می باشد.

(ب) مقدار مؤثر جریان بار برابر است با:

$$I_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{1.57}^{3.83} [6.18\sin(\omega t - 0.756) - 23.8e^{-\omega t/0.943}]^2 d(\omega t)} = 2.71 \text{ A}$$

(ج) مقدار مؤثر جریان در هر SCR برابر است با:

$$I_{SCR,rms} = \frac{I_{o,rms}}{\sqrt{2}} = \frac{2.71}{\sqrt{2}} = 1.92 \text{ A}$$

(د) جریان متوسط هر SCR برابر است با:

$$I_{SCR,avg} = \frac{1}{2\pi} \int_{1.57}^{3.83} [6.18\sin(\omega t - 0.756) - 23.8e^{-\omega t/0.943}] d(\omega t) = 1.04 \text{ A}$$

(ه) توان جذب شده توسط بار برابر است با:

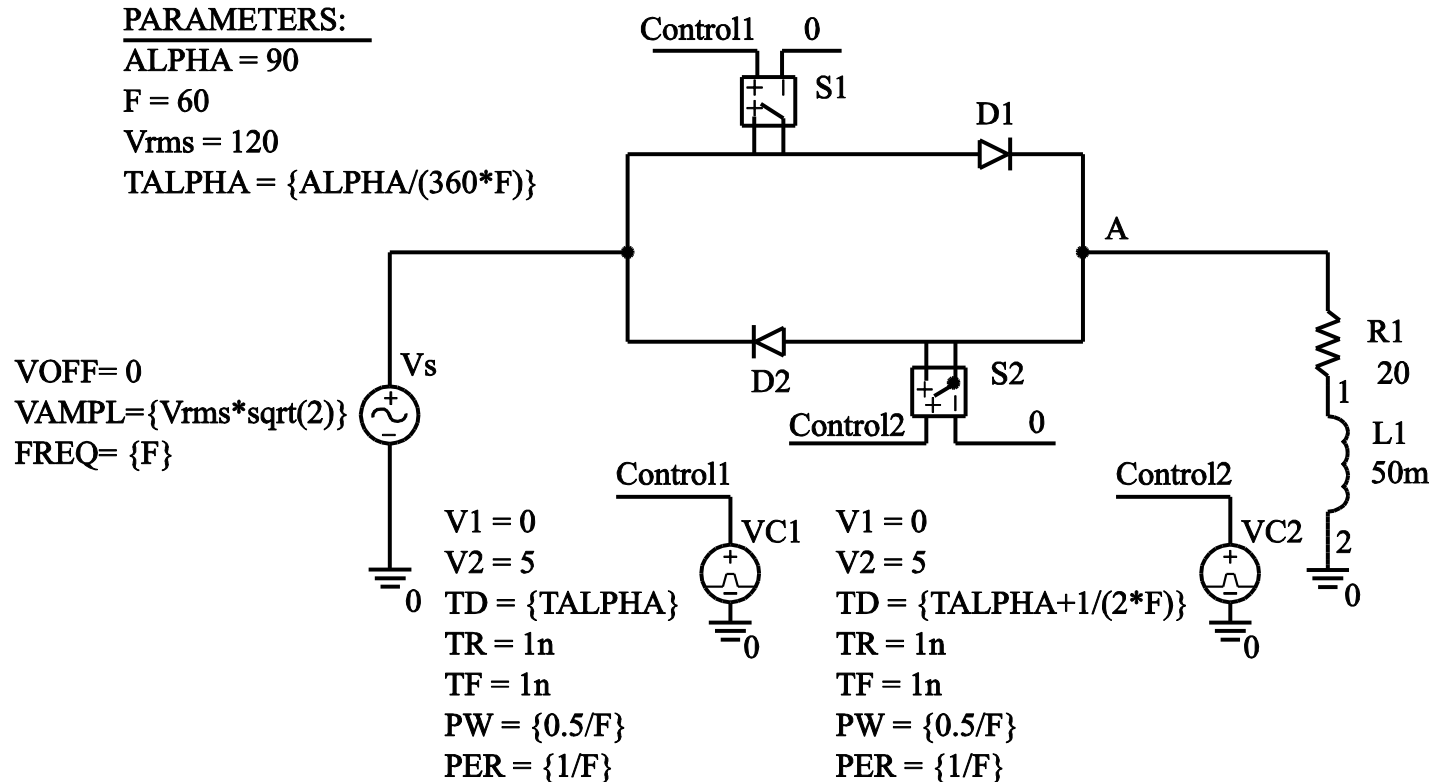
$$P = I_{o,rms}^2 R = (2.71)^2 (20) = 147 \text{ W}$$

(و) ضریب توان از رابطه  $P/S$  محاسبه می شود.

$$\text{pf} = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{s,rms} I_{s,rms}} = \frac{147}{(120)(2.71)} = 0.45 = 45\%$$

مدار شبیه‌سازی در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. این مدار به نسخه کامل Schematic Capture نیازمند است. فایل مدار PSpice برای نسخه آزمایشی A/D به صورتی که در ادامه آمده قابل اجرا است.

### کنترل کننده ولتاژ AC



شکل ۳-۵- نمایش مدار کنترل کننده ولتاژ AC تک فاز. برای این مدار به نسخه کامل Schematic Capture نیاز است.

# SINGLE-PHASE VOLTAGE CONTROLLER (voltcont.cir)

\*\*\* OUTPUT VOLTAGE IS V(3), OUTPUT CURRENT IS I(R) \*\*\*

\*\*\*\*\* INPUT PARAMETERS \*\*\*\*\*

```
.PARAM VS = 120 ;source rms voltage
.PARAM ALPHA = 90 ;delay angle in degrees
.PARAM R = 20 ;load resistance
.PARAM L = 50mH ;load inductance
.PARAM F = 60 ;frequency
.PARAM TALPHA = {ALPHA/(360*F)} PW {0.5/F} ;converts angle to time delay
```

\*\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION \*\*\*\*\*

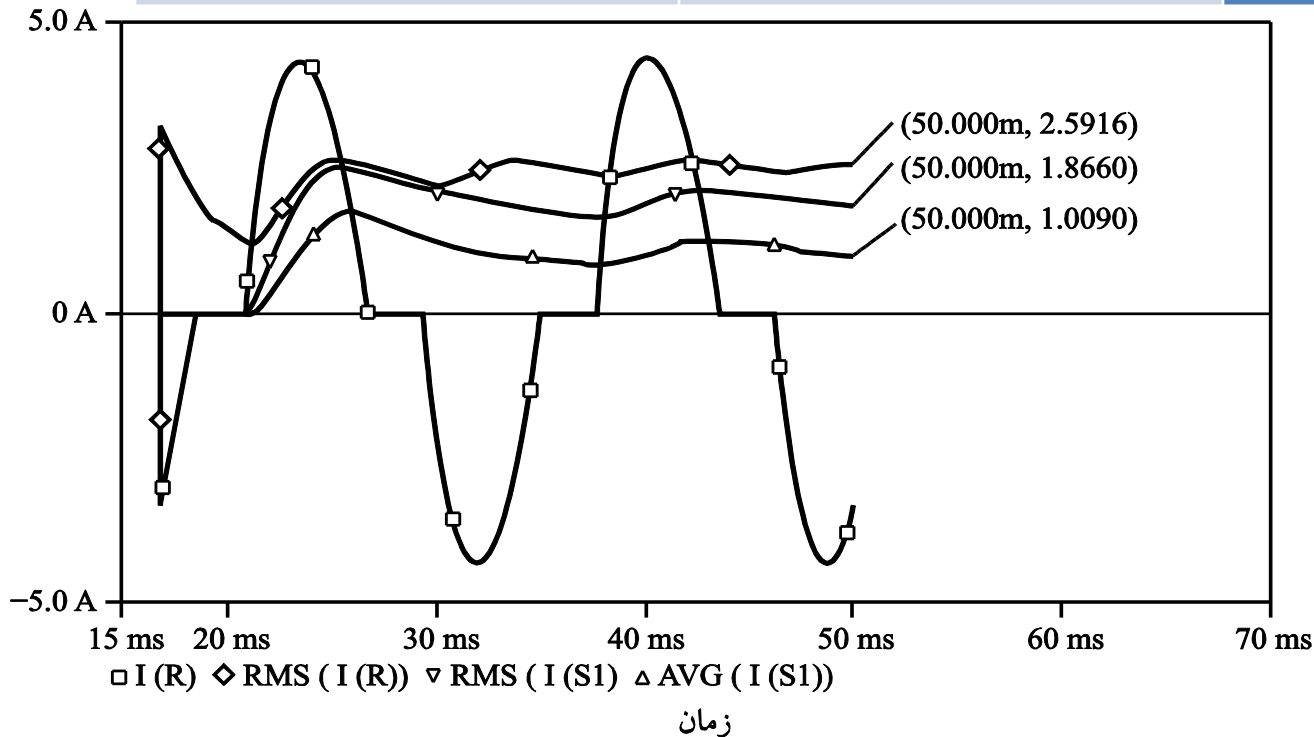
```
VS 1 0 SIN(0 {VS*SQRT(2)} {F})
S1 1 2 11 0 SMOD ; FORWARD SCR
D1 2 3 DMOD ; REVERSE SCR
S2 3 5 0 11 SMOD
D2 5 1 DMOD
R 3 4 {R}
L 4 0 {L}
```

\*\*\*\*\* MODELS AND COMMANDS \*\*\*\*\*

```
.MODEL DMOD D
.MODEL SMOD VSWITCH (RON=.01)
VCONTROL 11 0 PULSE(-10 10 {TALPHA} 0 0 {PW} {1/F}) ;control for both switches
.TRAN .1MS 33.33MS 16.67MS .1MS UIC ;one period of output
.FOUR 60 I(R) ;Fourier Analysis to get THD
.PROBE
.END
```

با استفاده از فایل ورودی برای شبیه‌سازی در PSpice A/D، خروجی Probe برای جریان بار و کمیت‌های وابسته، در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است. کمیت‌های زیر از Probe به‌دست آمده است:

نتایج	دستور ورودی در Probe	کمیت
۲/۵۹ A	RMS(I (R))	جریان مؤثر بار
۱/۸۷ A	RMS(I (S1))	جریان مؤثر SCR
۱/۰۱ A	AVG(I(S1))	جریان متوسط SCR
۱۳۴ W	AVG(W(R))	توان بار
۳۱/۷٪	(از فایل خروجی)	اعوجاج هارمونیک کل (THD)



شکل ۴-۵ - خروجی Probe  
برای مثال ۴-۵.

\*\*\*\*\*

## ۵-۲- کنترل کننده‌های ولتاژ سه فاز

□ در مدار یک کنترل کننده ولتاژ AC سه فاز با بار اتصال ستاره مقاومتی، توان تحویلی به بار با تغییر زاویه تأخیر  $\alpha$  روی هر SCR کنترل می‌شود. شش عدد SCR با توالی ۱-۲-۳-۴-۵-۶ و در بازه‌های  $60^\circ$  روشن می‌شوند. سیگنال‌های گیت، در تمامی زاویه هدایت ممکن می‌توانند اعمال می‌شوند.

□ ولتاژ لحظه ای دو سر هر فاز بار، با توجه به این که کدام یک از SCRها هدایت می‌کنند، تعیین می‌شود. در هر لحظه ممکن است که سه، دو و یا هیچ کدام از SCRها روشن باشد. ولتاژ لحظه‌ای بار نیز ممکن است ولتاژ خط به خنثی (سه عدد از SCRها روشن)، نصف ولتاژ خط به خط (دو عدد از SCRها روشن) و یا صفر (همه SCRها خاموش) باشد.

✓ هنگامی که سه عدد از SCRها (یکی در هر فاز) روشن باشند، همه ولتاژهای سه فاز به منبع متصل می‌شوند که متناظر با اتصال یک منبع سه فاز متعادل به یک بار سه فاز متعادل است. ولتاژ هر فاز بار، برابر با ولتاژ خط به خنثی است. به عنوان مثال، اگر کلیدهای  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_6$  روشن باشند، خواهیم داشت:  $V_{an} = V_{AN}$  و  $V_{bn} = V_{BN}$  و  $V_{cn} = V_{CN}$ .

شکل ۵-۵- کنترل کننده ولتاژ سه فاز با بار مقاومتی با اتصال ستاره.

✓ هنگامی که دو عدد از SCRها روشن است، ولتاژ خط به خط آن دو فاز، به صورت مساوی بین دو مقاومت بار که به منبع متصل شده‌اند، تقسیم می‌شود. به عنوان مثال، اگر کلیدهای  $S_1$  و  $S_2$  روشن باشند، خواهیم داشت:  $V_{an} = V_{AC}/2$ ،  $V_{bn} = 0$  و  $V_{cn} = V_{CA}/2$ . این که کدام SCR هدایت می‌کند، به زاویه تأخیر و ولتاژ منبع در هر لحظه بستگی دارد.

□ ولتاژهای بار برای یک کنترل کننده ولتاژ AC سه فاز با بار  $RL$  نیز دارای این مشخصه هستند که یا ولتاژ خط به خنثی، یا نصف ولتاژ خط به خط، و یا صفر می باشند. تجزیه و تحلیل برای بار  $RL$  بسیار پیچیده تر از بار مقاومتی است و شبیه سازی، نتایجی را ارائه می دهد که به دست آوردن آنها به صورت تحلیلی بسیار مشکل است.

## □ مثال ۵-۲- شبیه سازی یک کنترل کننده ولتاژ AC سه فاز با PSpice

از PSpice برای به دست آوردن توان تحویلی به یک بار سه فاز با اتصال ستاره (Y) استفاده کنید. هر فاز بار، یک اتصال  $RL$  سری با  $R=10\Omega$  و  $L=30\text{mH}$  می باشد. مقدار مؤثر ولتاژ خط به خط منبع سه فاز برابر با  $480\text{V}$  و فرکانس آن  $60\text{Hz}$  می باشد. زاویه تأخیر  $75^\circ$  است. مقدار مؤثر جریان های خط، توان جذب شده توسط بار، توان جذب شده توسط SCR ها و THD جریان های منبع را تعیین کنید.

■ حل

یک فایل ورودی PSpice مربوط به A/D برای کنترل کننده ولتاژ سه فاز، با اتصال ستاره و بار  $RL$ ، به صورت زیر است:

THREE-PHASE VOLTAGE CONTROLLER-R-L LOAD (3phvc.cir)

\*SOURCE AND LOAD ARE Y-CONNECTED (UNGROUNDING)

\*\*\*\*\* INPUT PARAMETERS \*\*\*\*\*

.PARAM Vs = 480 ; rms line-to-line voltage  
 .PARAM ALPHA = 75 ; delay angle in degrees  
 .PARAM R = 10 ; load resistance (y-connected)  
 .PARAM L = 30mH ; load inductance  
 .PARAM F = 60 ; source frequency

\*\*\*\*\* COMPUTED PARAMETERS \*\*\*\*\*

.PARAM Vm = {Vs\*SQRT(2)/SQRT(3)} ; convert to peak line-neutral volts  
 .PARAM DLAY = {1/(6\*F)} ; switching interval is 1/6 period  
 .PARAM PW = {.5/F} TALPHA\_{ALPHA/(F\*360)}  
 .PARAM TRF = 10US ; rise and fall time for pulse switch control

\*\*\*\*\* THREE-PHASE SOURCE \*\*\*\*\*

VAN 1 0 SIN(0 {VM} 60)

VBN 2 0 SIN(0 {VM} 60 0 0 -120)

VCN 3 0 SIN(0 {VM} 60 0 0 -240)

\*\*\*\*\* SWITCHES \*\*\*\*\*

S1 1 8 18 0 SMOD ; A-phase

D1 8 4 DMOD

S4 4 9 19 0 SMOD

D4 9 1 DMOD

S3 2 10 20 0 SMOD ; B-phase

D3 10 5 DMOD

S6 5 11 21 0 SMOD

D6 11 2 DMOD

S5 3 12 22 0 SMOD ; C-phase

D5 12 6 DMOD

S2 6 13 23 0 SMOD

D2 13 3 DMOD

\*\*\*\*\* LOAD \*\*\*\*\*

RA 4 4A {R} ; van = v(4,7)

LA 4A 7 {L}

RB 5 5A {R} ; vbn = v(5,7)

LB 5A 7 {L}

RC 6 6A {R} ; vcn = v(6,7)

LC 6A 7 {L}

\*\*\*\*\* SWITCH CONTROL \*\*\*\*\*

```
V1 18 0 PULSE(-10 10 {TALPHA} {TRF} {TRF} {PW} {1/F})
V4 19 0 PULSE(-10 10 {TALPHA+3*DLAY} {TRF} {TRF} {PW} {1/F})
V3 20 0 PULSE(-10 10 {TALPHA+2*DLAY} {TRF} {TRF} {PW} {1/F})
V6 21 0 PULSE(-10 10 {TALPHA+5*DLAY} {TRF} {TRF} {PW} {1/F})
V5 22 0 PULSE(-10 10 {TALPHA+4*DLAY} {TRF} {TRF} {PW} {1/F})
V2 23 0 PULSE(-10 10 {TALPHA+DLAY} {TRF} {TRF} {PW} {1/F})
```

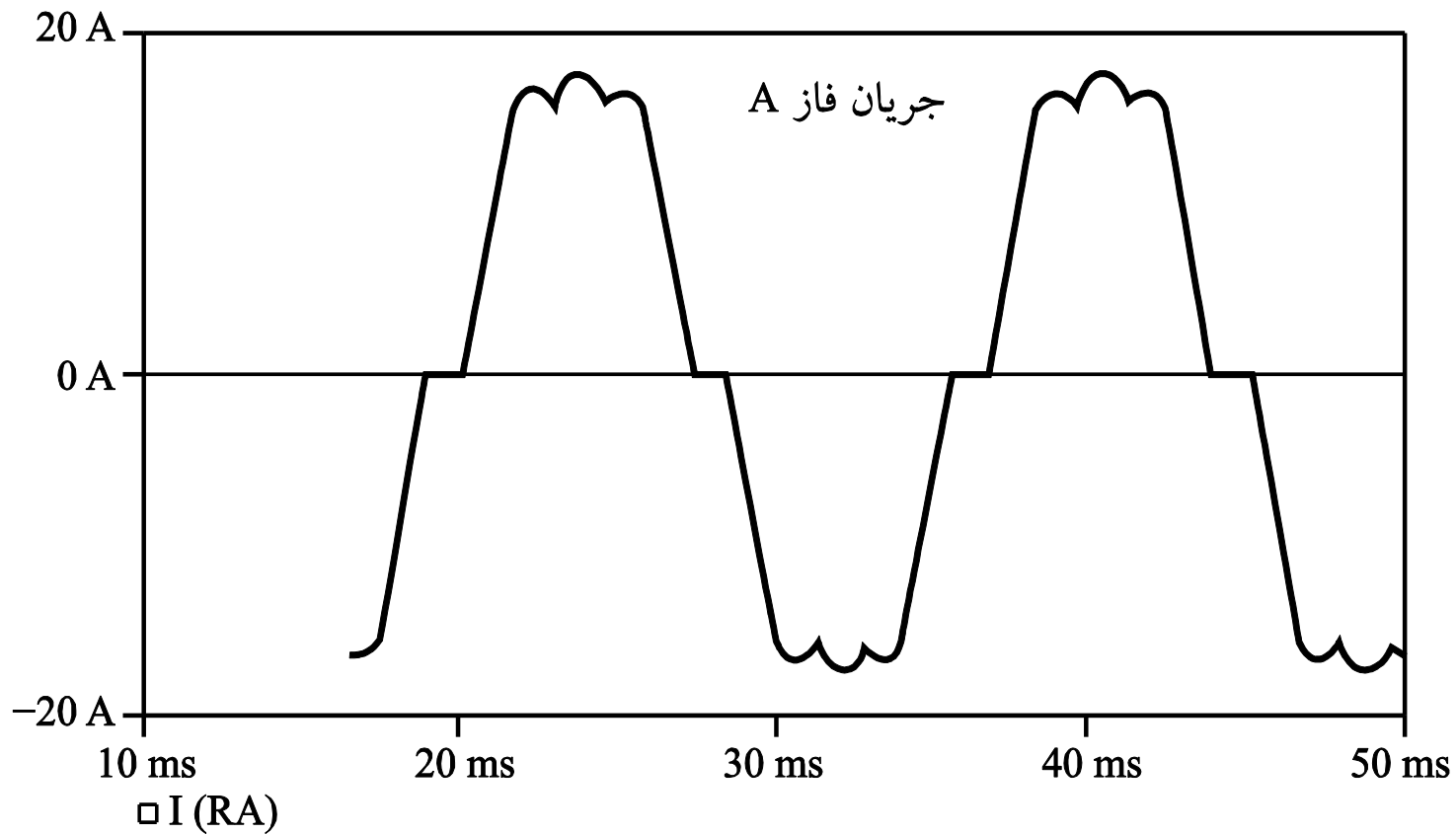
\*\*\*\*\* MODELS AND COMMANDS

\*\*\*\*\*

```
.MODEL SMOD VSWITCH(ROn=0.01)
.MODEL DMOD D
.TRAN .1MS 50MS 16.67ms .05MS UIC
.FOUR 60 I(RA) ; Fourier analysis of line current
.PROBE
.OPTIONS NOPAGE ITL5=0
.END
```

خروجی Probe برای حالت مانای جریان یکی از فازها، در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. جریان مؤثر خط و توان جذب شده توسط SCRها با وارد کردن عبارتهای مناسبی در Probe به دست می آیند. THD جریان منبع از تحلیل فوریه در فایل خروجی تعیین می شود. نتایج به صورت خلاصه در جدول پیش رو ارائه شده است.

نتایج	دستور ورودی در Probe	کمیت
۱۲/۸۶ A	RMS(I(RA))	جریان مؤثر خط
۴۹۶۰W	3*AVG(V(4,7)*I(RA))	توان بار
۳۵/۱W	6*AVG(V(1,4)*I(S1))	توان کلی جذب شده توسط SCR
۱۳/۱٪	(از فایل خروجی)	THD جریان منبع



زمان

شکل ۵-۹- خروجی Probe برای مثال ۵-۲.

\*\*\*\*\*