

# الکترونیک صنعتی

مدرس: امیر بکتاش

Amir.baktash@gmail.com

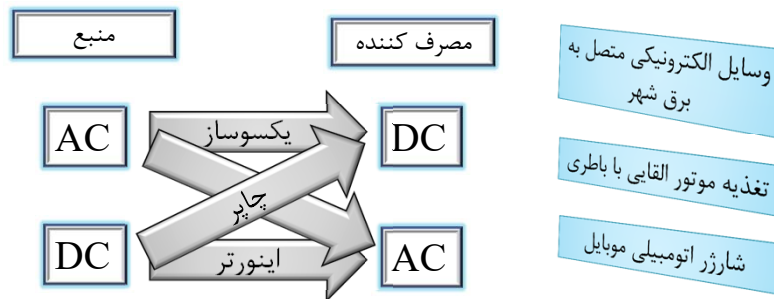
<http://research.iaun.ac.ir/pd/abaktash>

مرداد ۱۳۹۶

## مقدمه

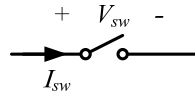
- الکترونیک صنعتی : بحث تبدیل انرژی از فرم منبع به فرم مورد نیاز مصرف کننده، مدارهای مورد نیاز و روشهای مورد استفاده.

- منابع و مصرف کننده ها یا به فرم dc هستند یا ac پس:



- همه این حالت های تبدیل انرژی با استفاده از المان های نیمه هادی صورت می گیرد (دیود، ترانزیستور و ...).

- المان های نیمه هادی تنها با سویچ زنی (روشن - خاموش شدن) تبدیل انرژی را انجام می دهند.



- در یک سویچ ایده آل

سویچ وصل:  $V_{sw} = 0, I_{sw} > 0, P_{sw} = 0$

سویچ قطع:  $V_{sw} > 0, I_{sw} = 0, P_{sw} = 0$

پس در حالت سویچینگ تلفات المان ایده آل صفر می باشد و در المان غیر ایده آل مینیمم است.

## منابع

۱- الکترونیک قدرت- نویسنده: محمد رشید- ترجمه دکتر افجه ای

۲- الکترونیک صنعتی- نویسنده: هارت- ترجمه دکتر

## یادآوری

۱- سه کمیت در شکل موج های متناوب:

شکل موج متناوب: شکل موجی که در هر دوره  $T$  ثانیه (یا  $2\pi$  رادیان) دوباره تکرار شود.  $T$  دوره تناوب نام دارد.

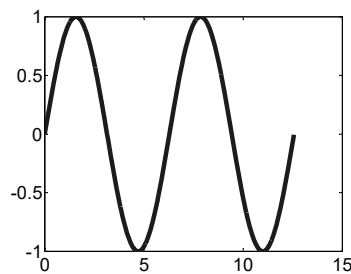
$$f(t) = f(t+T) \quad f(\omega t) = f(\omega t + 2\pi), \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

- مقدار پیک یا ماکزیمم ( $f_{max}, f_m, f_{peak}$ )

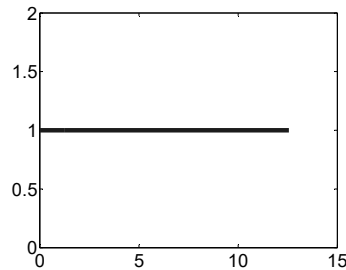
- مقدار متوسط یا میانگین ( $f_{ave}, f_{mean}, f_{dc}$ ): متوسط مقدار یک شکل موج متناوب را می دهد و برابر با حاصل جمع تمام نقاط شکل تقسیم بر تعداد آنها می باشد. که در حالت پیوسته می شود:

$$f_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t$$

## یادآوری

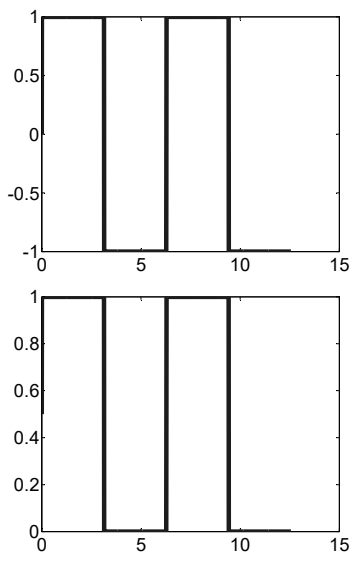


$$f_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f_m \sin \omega t \cdot d\omega t = 0$$



$$f_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} 1 \cdot d\omega t = 1$$

**یادآوری**



$$f_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} 1 \cdot d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -1 \cdot d\omega t = 0$$

$$f_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} 1 \cdot d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi} 0 \cdot d\omega t = 0.5$$

**یادآوری**

- مقدار موثر ( $f_{rms}$ ,  $f_{effective}$ ):

$$f_{rms} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt \right)^{0.5} = \left( \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t)^2 d\omega t \right)^{0.5}$$

در یک شکل سینوسی کامل با دامنه  $f_m$ :

$$f_{rms} = \left( \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (f_m \sin \omega t)^2 d\omega t \right)^{0.5} = \left( \frac{f_m^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} d\omega t \right)^{0.5} =$$

$$\left( \frac{f_m^2}{2\pi} \left( \frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right) \Big|_0^{2\pi} \right)^{0.5} = \left( \frac{f_m^2}{2\pi} \pi \right)^{0.5} = \frac{f_m}{\sqrt{2}}$$

### یادآوری

- مقدار موثر در یک تابع با مقدار ثابت  $f(t)=E$

$$f_{rms} = \left( \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E^2 d\omega t \right)^{0.5} = E$$

### یادآوری

- تئوری فوریه :

یک تابع متناوب با فرکانس  $\omega$  را می توان با یک مقدار ثابت به علاوه یک سری نامحدود از عبارات سینوس و کسینوسی با فرکانس  $n\omega$  بیان کرد که  $n$  یک عدد صحیح باشد.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

### یادآوری

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t$$

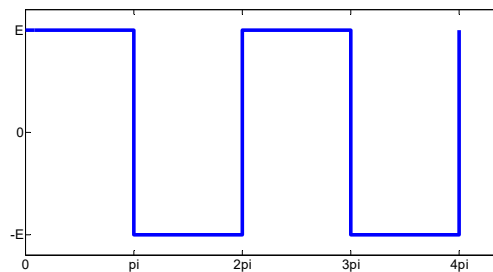
$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos n\omega t d\omega t$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin n\omega t d\omega t$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad , \quad \varphi_n = \tan^{-1}\left(\frac{a_n}{b_n}\right)$$

### یادآوری

- دامنه هارمونیک های اول و دوم را در شکل زیر مشخص کنید.



$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -E d\omega t = 0$$

### یادآوری

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E \cos n\omega t \, d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -E \cos n\omega t \, d\omega t =$$

$$\frac{1}{\pi} \left( \frac{E}{n} \sin n\omega t \right)_0^{\pi} + \frac{1}{\pi} \left( \frac{-E}{n} \sin n\omega t \right)_{\pi}^{2\pi} = 0$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E \sin n\omega t \, d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -E \sin n\omega t \, d\omega t =$$

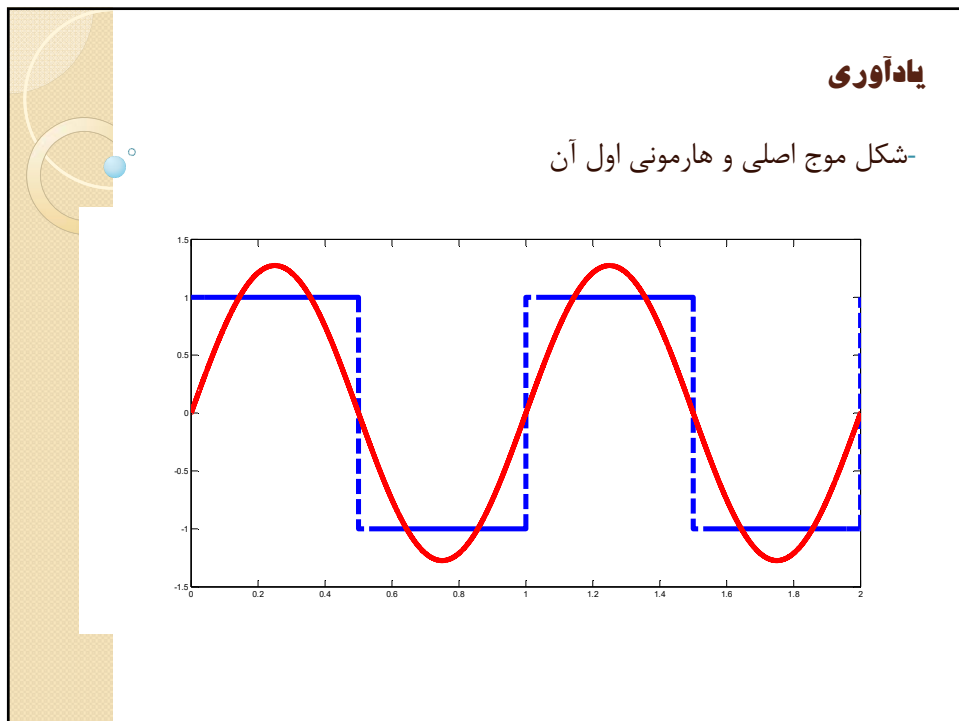
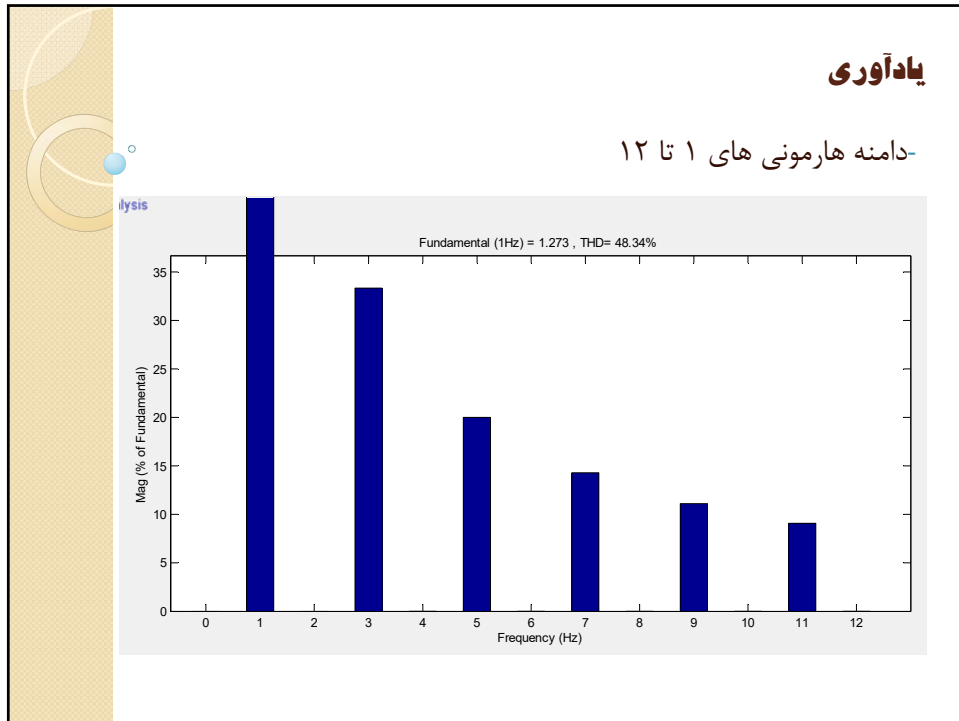
$$\frac{1}{\pi} \left( \frac{-E}{n} \cos n\omega t \right)_0^{\pi} + \frac{1}{\pi} \left( \frac{E}{n} \cos n\omega t \right)_{\pi}^{2\pi} = \begin{cases} \frac{4E}{\pi} & n=1 \\ 0 & n=2 \end{cases}$$

### یادآوری

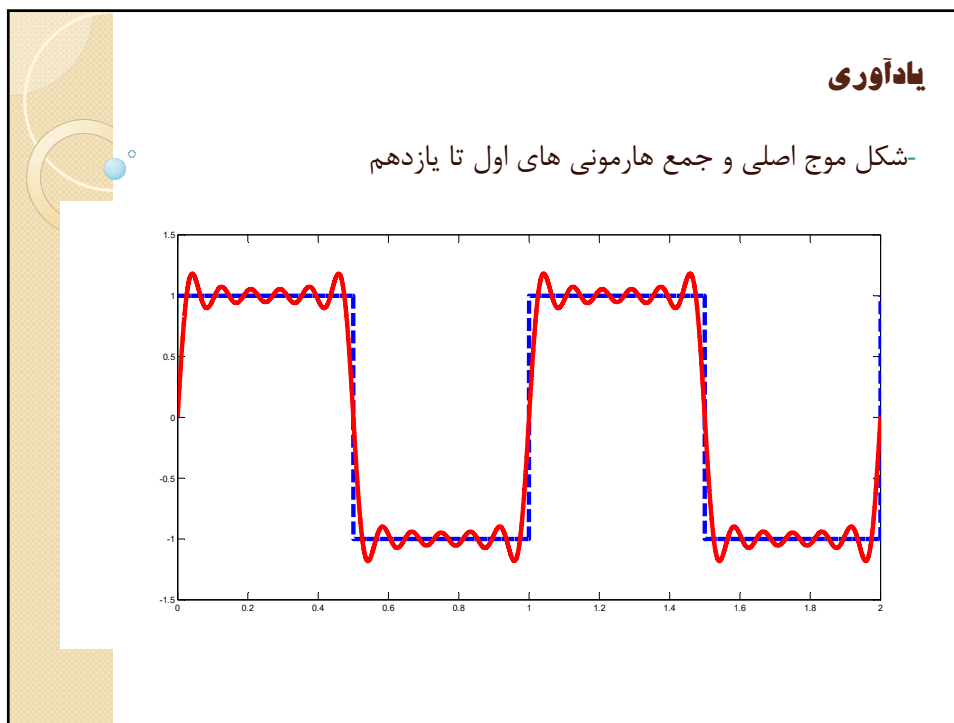
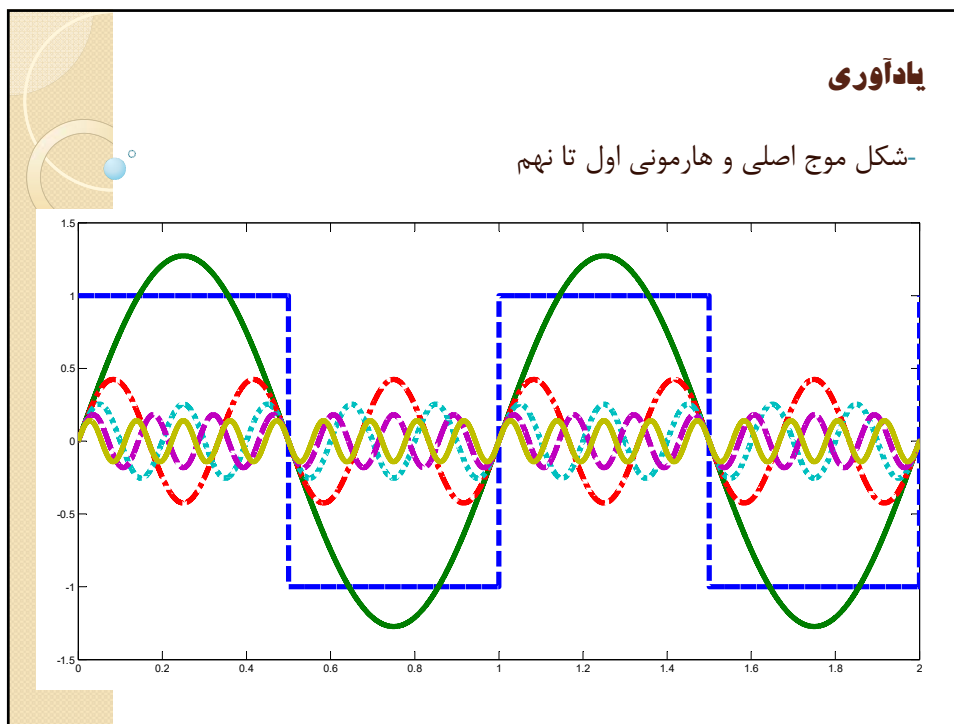
$$c_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = \frac{4E}{\pi} \quad \text{- دامنه هارمونیک اول:}$$

$$v_1(\omega t) = \frac{4E}{\pi} \sin \omega t \quad \text{- شکل موج هارمونیک اول:}$$

$$c_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} = 0 \quad \text{- دامنه هارمونیک دوم:}$$

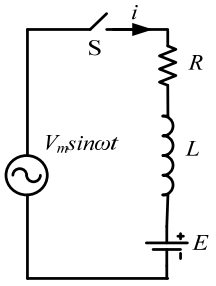






### یادآوری

- جریان در یک بار RLE:



$$L \frac{di}{dt} + Ri = V_m \sin \omega t - E$$

$$i(\omega t) = Ae^{\left(\frac{-R}{L\omega}\omega t\right)} + \frac{E}{R} + \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \phi)$$

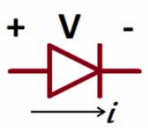
جواب ناشی از منبع ac ناشی از منبع dc عمومی مسئله

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


### دیود

المانی که از اتصال دو نیمه هادی نوع P و N تشکیل شده.

فقط در یک جهت به جریان اجازه عبور داده و از عبور جریان در جهت عکس ممانعت میکند.

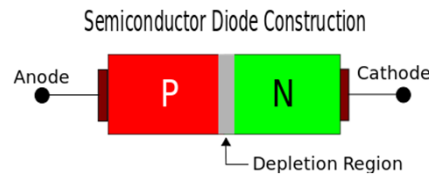


Semiconductor Diode Construction



## دیود

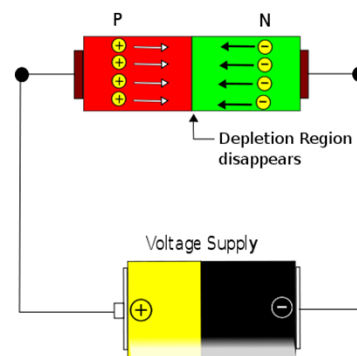
در محل اتصال دو نیمه هادی، حفره ها و الکترون ها با هم ترکیب شده و یک ناحیه تهی تشکیل می شود که مقاومت بالایی دارد.



## دیود

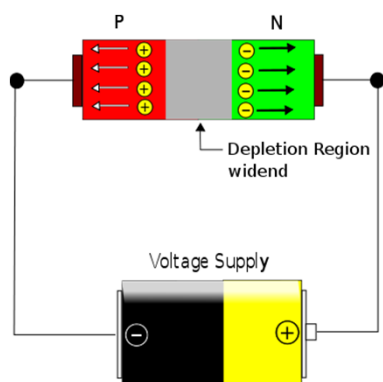
اتصال مستقیم باعث حذف ناحیه تهی شده و جریان جاری می شود.

ولتاژ لازم برای حذف ناحیه تهی در این اتصال  $V_f$  می باشد.



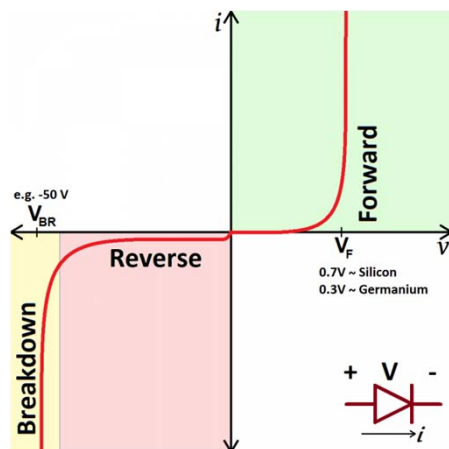
## دیود

اتصال معکوس باعث گسترش ناحیه تهی شده و جریان مسدود می شود.



## دیود

مشخصه ولتاژ- جریان دیود



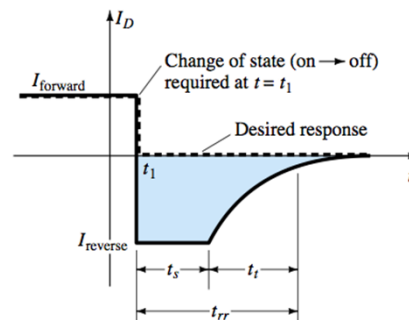
## دیود



## دیود

### زمان بازیابی معکوس: $t_{rr}$

با صفر شدن جریان، دیود سریعاً خاموش نشده و تا الکترون‌ها و حفره‌ها وضعیت خود را بازیابی کنند، مدتی طول میکشد.

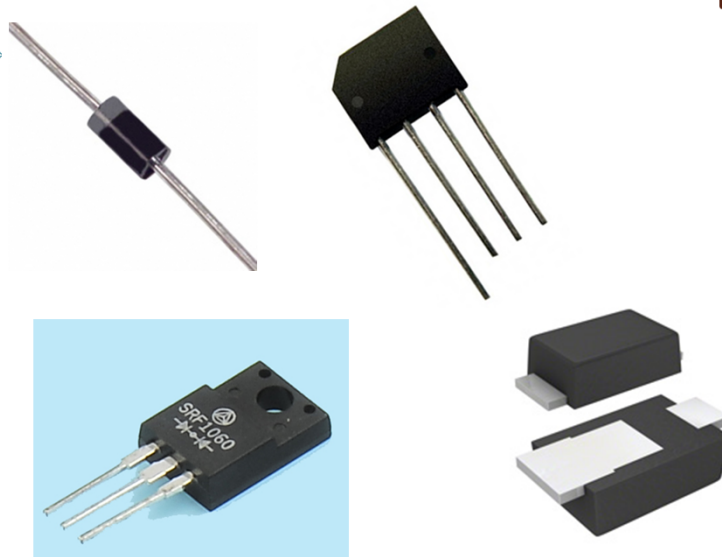


## دیود

### انواع دیودها بر اساس زمان بازیابی معکوس

- ۱- دیودهای عمومی (General): زمان بازیابی معکوس نسبتاً بالایی داشته (بیشتر از ۲۰ میکروثانیه) ولی رنج ولتاژ و جریان آنها نیز بالا میباشد.
- ۲- دیودهای سریع (Fast): زمان بازیابی معکوس در آنها کوچک میباشد (معمولاً کمتر از ۵ میکروثانیه) و نرخ ولتاژ و جریان آنها نیز کمتر است.
- ۳- دیودهای شاتکی (Schottky): زمان بازیابی معکوس آنها صفر است و نرخ ولتاژ و جریان آنها نیز پایین است.

## دیود



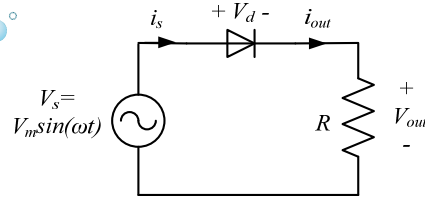


**دیود**

**دیود ایده آل:**

- اگر ولتاژ دو سر آن مثبت شود، وصل میشود.
- اگر وصل باشد، افت ولتاژی ندارد.
- با صفر شدن جریان، خاموش میشود.
- در حالت خاموش جریان آن صفر است.
- پس از ولتاژ مستقیم، مقاومت دیود، جریان معکوس، ولتاژ شکست و زمان بازیابی صرف نظر میکنیم.

## یکسوسازهای دیودی



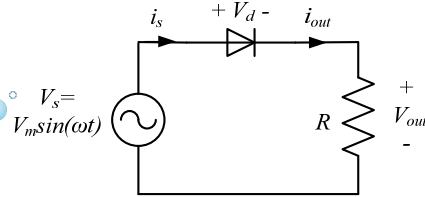
یکسوساز نیم موج تکفاز

در نیم سیکل اول (نیم سیکل مثبت) ولتاژ دیود مثبت شده، دیود وصل شده و ولتاژ منبع روی بار می افتد.

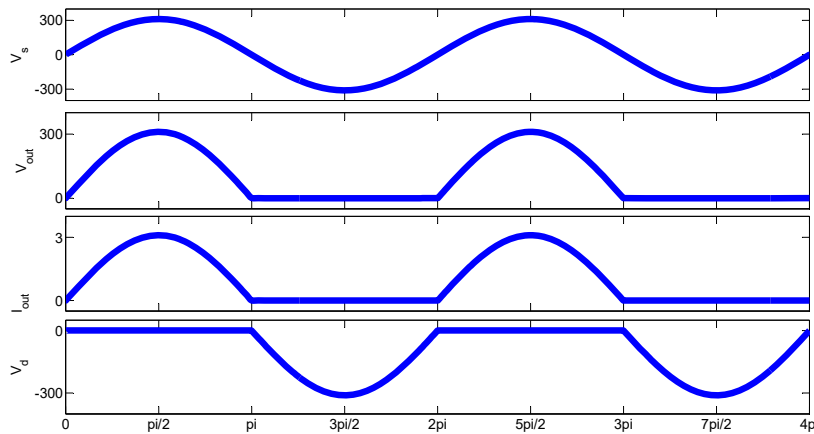
$$V_s = V_d + V_{out}$$

در نیم سیکل دوم (نیم سیکل منفی) ولتاژ دیود منفی شده، دیود قطع شده و ولتاژ منبع روی دیود می افتد.

## یکسوسازهای دیودی

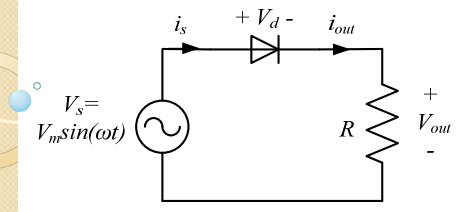


یکسوساز نیم موج تکفاز





### یکسوسازهای دیودی



یکسوساز نیم موج تکفاز

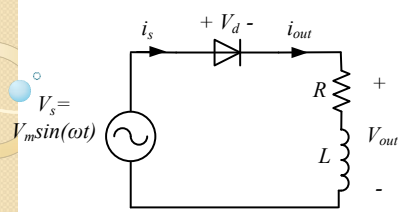
متوسط ولتاژ خروجی:

$$V_{out,dc} = V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{out} d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t d\omega t = \frac{V_m}{\pi}$$

متوسط جریان بار: چون شکل موج ولتاژ و جریان بار یکسان است و فقط در یک ضریب  $R$  با هم تفاوت دارند، پس:

$$I_{out,dc} = I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{V_m}{\pi R}$$

### یکسوسازهای دیودی



یکسوساز نیم موج تکفاز با بار  $RL$

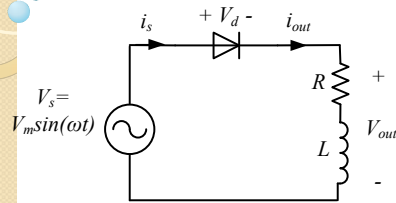
در نیم سیکل اول (نیم سیکل مثبت) ولتاژ دیود مثبت شده، دیود وصل شده و ولتاژ منبع روی بار می افتد.

رابطه جریان بار در این صورت برابر است با:

$$i_{out}(\omega t) = Ae^{\frac{-R}{L\omega}\omega t} + \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} \quad , \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{L\omega}{R}$$

## یکسوسازهای دیودی

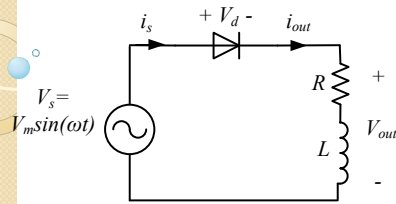


یکسوساز نیم موج تکفاز با بار  $RL$

از آنجایی که در لحظه صفر، جریان صفر است میتوان مقدار  $A$  را تعیین کرد.

$$i_{out}(\omega t = 0) = Ae^{\frac{-R}{L\omega}} + \frac{V_m}{Z} \sin(0 - \varphi) = 0 \rightarrow A = \frac{V_m}{Z} \sin(\varphi)$$

## یکسوسازهای دیودی



یکسوساز نیم موج تکفاز با بار  $RL$

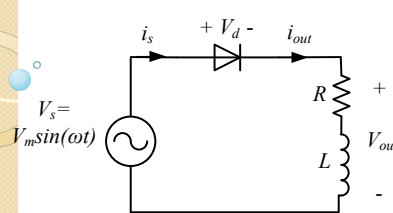
$$i_{out}(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \left( \sin(\varphi) e^{\frac{-R}{L\omega} \omega t} + \sin(\omega t - \varphi) \right) \quad \text{رابطه جریان:}$$

برای خاموش شدن دیود باید جریان آن صفر شود.

در زاویه  $\omega t = \pi$  به شرطی جریان صفر میشود که  $L=0$  باشد، در غیر اینصورت جریان صفر نشده و دیود خاموش نمیشود.

### یکسوسازهای دیودی

یکسوساز نیم موج تکفاز با بار  $RL$



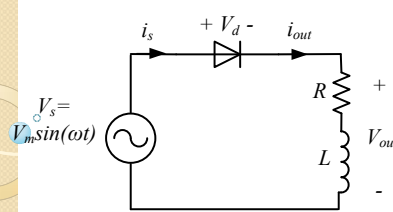
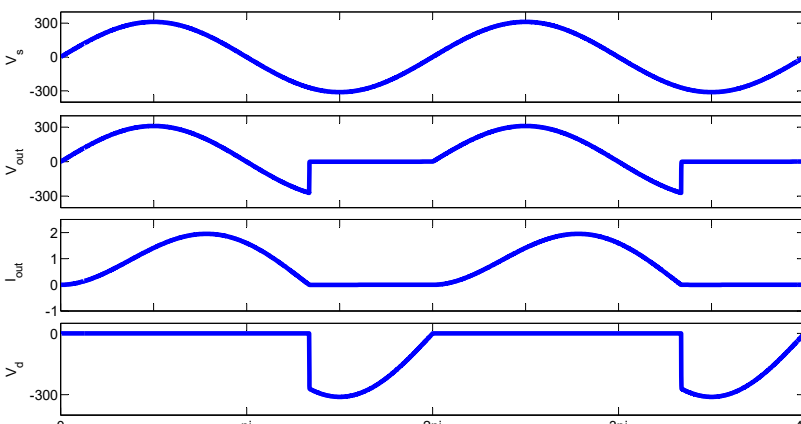
پس جریان در زاویه ای بزرگتر از  $\pi$  صفر میشود (زاویه  $\beta$ ) و تا صفر شدن جریان، دیود روشن میماند.

در زاویه  $\omega t = \beta$  دوباره جریان صفر میشود (مانند زاویه صفر) پس:

$$i_{out}(\omega t = \beta) = Ae^{\frac{-R}{L}\omega\beta} + \frac{V_m}{Z} \sin(\beta - \varphi) = 0$$

### یکسوسازهای دیودی

یکسوساز نیم موج تکفاز با بار  $RL$

در رابطه زیر مقدار جریان را برای  $\beta$  برابر  $180^\circ$  درجه تعیین کرده و سپس مشخص کنید در چه  $\beta$  جریان صفر میشود.

$$i_{out}(\omega t = \beta) = 10e^{-0.02\beta} + 20 \sin(\beta - 20^\circ)$$

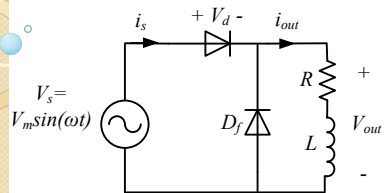
$$\beta = \pi \rightarrow i_{out} = ? \quad 16.2$$

$$\beta = 1.2\pi \rightarrow i_{out} = 3.76$$

$$\beta = 1.3\pi \rightarrow i_{out} = -1.96$$

$$\beta = 1.265\pi(\text{rad}) = 227.5^\circ$$

## یکسوسازهای دیودی

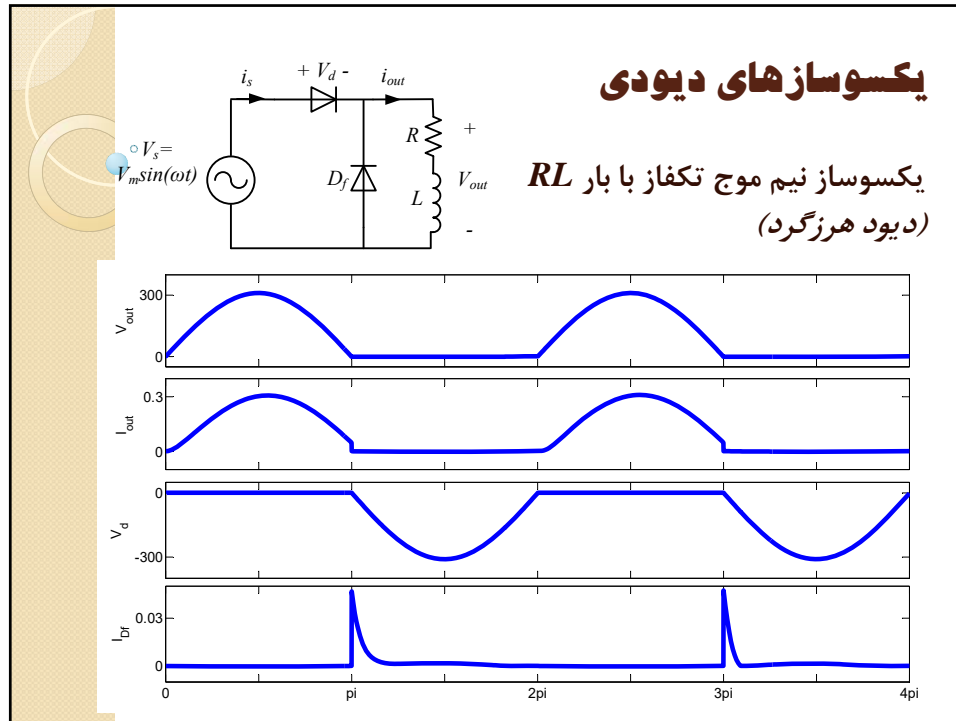


یکسوساز نیم موج تکفاز با بار  $RL$   
(دیود هرزگرد)

در نیم سیکل مثبت دیود اصلی وصل بوده و ولتاژ منبع روی بار می افتد. دیود هرزگرد در این زمان خاموش است.

در زاویه  $\omega t = \pi$  دیود هرزگرد روشن شده، دیود اصلی خاموش میشود و جریان بار را دیود هرزگرد هدایت می کند.

با صفر شدن جریان بار دیود هرزگرد نیز خاموش میشود.



### یکسوسازهای دیودی

پارامترهای کارآیی:

ورودی یک یکسوساز ac و خروجی آن dc است. پس در حالت ایده آل باید ولتاژ خروجی آن کاملاً صاف بوده و جریان ورودی آن سینوسی خالص باشد.

برای مقایسه وضعیت عملکرد یکسوسازهای مختلف از پارامترهای کارآیی استفاده می کنیم.

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} = \frac{V_{dc} \cdot I_{dc}}{V_{rms} \cdot I_{rms}}$$

۱- بازده یکسوسازی:

- یک شکل موج متناوب از بخش های dc و ac تشکیل شده است.
- مقدار موثر یک شکل موج به اثر کل شکل موج اشاره دارد.
- مقدار dc یک شکل موج به اثر متوسط شکل موج اشاره دارد.
- مقدار ac یک شکل موج به اثر مقادیر نوسانی شکل موج اشاره دارد.

$$V_{ac} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2}$$

- یک ولتاژ سینوسی خالص صرفا دارای نوسان است و dc آن صفر است.
- یک ولتاژ Dc خالص فقط مقدار dc داشته و نوسانات آن صفر است.

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} = \frac{V_{dc} \cdot I_{dc}}{V_{rms} \cdot I_{rms}}$$

در حالت ایده آل :  $\eta = 1$

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}}$$

در حالت ایده آل :  $FF = 1$

۲- ضریب شکل:

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}}$$

در حالت ایده آل :  $RF = 0$

۳- ضریب ریپل:

۴- اعوجاج هارمونیک کل (Total harmonic distortion):

$$THD = \frac{(I_{ac}^2 - I_{1,rms}^2)^{0.5}}{I_{1,rms}} = \frac{\sqrt{I_{2,rms}^2 + I_{3,rms}^2 + \dots}}{I_{1,rms}}$$

در حالت ایده آل :  $THD = 0$

مثال) یک یکسوساز نیم موج به منبع ۵۰۰ ولت متصل بوده و بار ۱۰ اهمی را تغذیه می کند. پارامترهای کارایی را برای این یکسوساز تعیین کنید.

$$V_s(\omega t) = 500\sqrt{2} \sin \omega t$$

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = \frac{500\sqrt{2}}{\pi} = 225.2 (V) \quad I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = 22.5 (A)$$

$$V_{rms} = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (V_m \sin \omega t)^2 \cdot d\omega t \right]^{0.5} = \left[ \frac{V_m^2}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \cdot d\omega t \right]^{0.5} =$$

$$\frac{V_m}{2} = 353.5 (V)$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = 35.3 (A)$$

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = 5.07 (kW)$$

$$\eta = 40.6\%$$

$$P_{rms} = V_{rms} I_{rms} = 12.48 (kW)$$

$$V_{ac} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2} = 272.5 (V)$$

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = 1.57 \quad , \quad RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = 1.21$$

محاسبه THD:

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1b}^2} \quad , \quad I_{1,rms} = \frac{I_1}{\sqrt{2}}$$

$$I_{1a} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_m}{R} \sin \omega t \cdot \cos \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{\pi R} \int_0^{\pi} \frac{1}{2} \sin 2\omega t \cdot d\omega t = 0$$

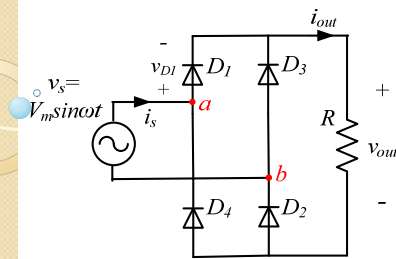
$$I_{1b} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_m}{R} \sin \omega t \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = 35.3(A)$$

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1b}^2} = 35.3(A) \quad , \quad I_{1,rms} = 24.9(A)$$

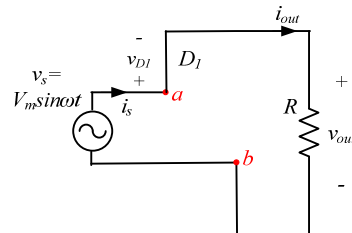
$$THD = \frac{\sqrt{I_{ac}^2 - I_{1,rms}^2}}{I_{1,rms}} = \frac{\sqrt{27.25^2 - 24.9^2}}{24.9} = 43.3\%$$

## یکسوسازهای دیودی

یکسوساز تمام موج تکفاز



در نیم سیکل مثبت از ولتاژ منبع، نقطه a بیشترین ولتاژ مدار را داشته و نقطه b کمترین ولتاژ مدار را دارد. بنابراین دیودهای ۱ و ۲ در بایاس مستقیم بوده و دیودهای ۳ و ۴ در بایاس معکوس قرار دارند.



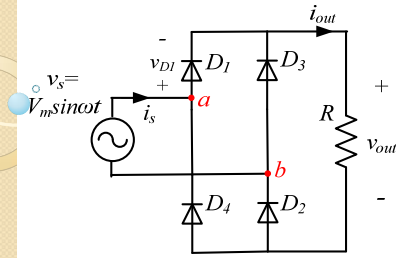
$$v_{out} = v_s \quad , \quad i_{out} = \frac{v_s}{R} = i_s$$

$$v_{D1} = 0$$

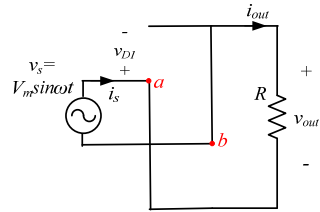


## یکسوسازهای دیودی

یکسوساز تمام موج تکفاز

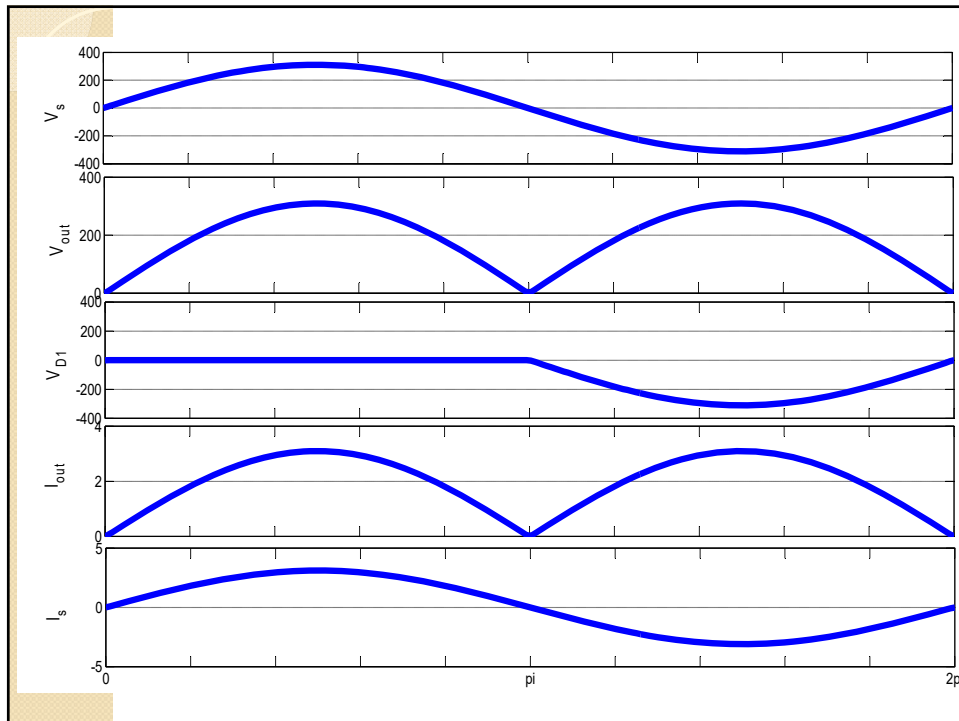


در نیم سیکل منفی از ولتاژ منبع، نقطه **b** بیشترین ولتاژ مدار را داشته و نقطه **a** کمترین ولتاژ مدار را دارد. بنابراین دیودهای ۳ و ۴ در بایاس مستقیم بوده و دیودهای ۱ و ۲ در بایاس معکوس قرار دارند.



$$v_{out} = -v_s, \quad i_{out} = \frac{-v_s}{R} = -i_s$$

$$v_{D1} = -v_{out} = v_s$$



یکسوساز تمام موج تکفاز

متوسط ولتاژ خروجی:

$$V_{dc} = 2 \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{2V_m}{\pi}$$

پارامترهای کارایی یکسوساز تمام موج:

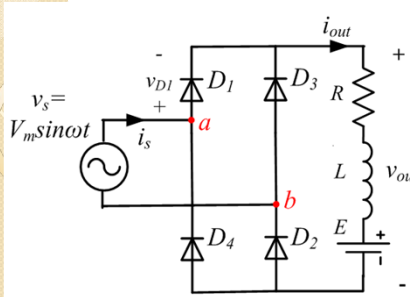
$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \quad \frac{V_m}{\pi}$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad \frac{V_m}{2}$$

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} = \%81 \quad \%40.6$$

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = 1.11 \quad 1.57$$

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = 0.48 \quad \%1.21$$



### یکسوساز تمام موج تکفاز با بار RLE

۱- حالت ناپیوسته:

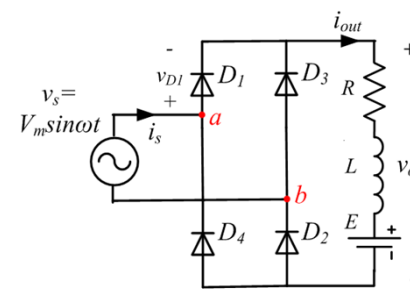
- خاصیت سلفی بار کم می باشد.

- در ابتدای هر نیم سیکل، دیودها در زاویه ای روشن می شوند که ولتاژ منبع با E برابر شده باشد.

$$V_m \sin \omega t \Big|_{\omega t = \alpha} = E \rightarrow \alpha = \sin^{-1} \left( \frac{E}{V_m} \right)$$

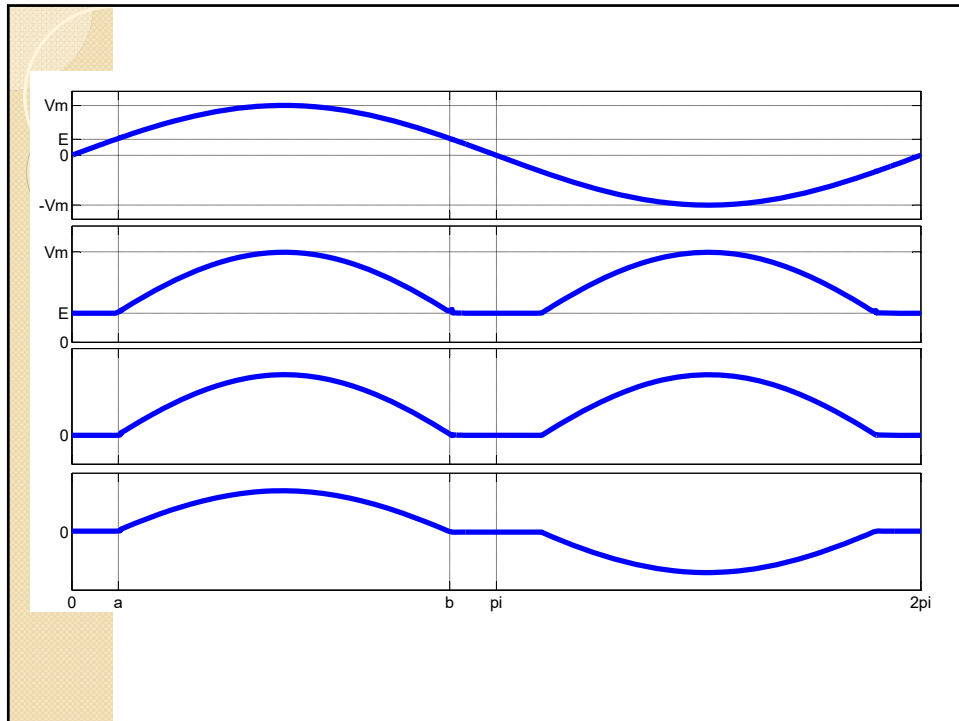
رابطه جریان بار:

$$i_{out}(\omega t) = A e^{\frac{-R}{L}\omega t} - \frac{E}{R} + \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \phi)$$



از آنجایی که در زاویه  $\alpha$  جریان صفر است، پارامتر A قابل محاسبه است.

جریان بار قبل از انتهای نیم سیکل دوباره صفر میشود. زاویه صفر شدن جریان را میتوان با صفر قرار دادن جریان بار تعیین کرد.



۲- حالت پیوسته:

- خاصیت سلفی بار زیاد است.

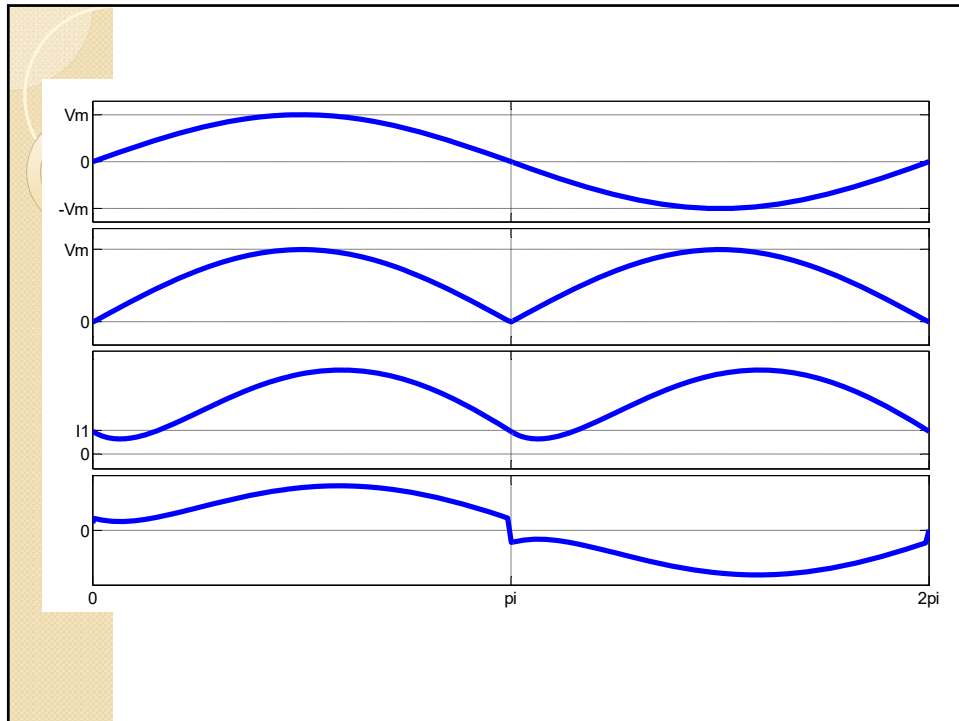
- در هر نیم سیکل، قبل از اینکه جریان بتواند صفر شود، نیم سیکل تمام شده و دیودهای هدایت کننده جریان تغییر میکنند.

- پس همواره دو دیود روشن بوده و جریان نیز هیچگاه صفر نمیشود.

- به دلیل تقارن جریان در ابتدا و انتهای هر نیم سیکل برابر بوده و مقدار آنرا  $I_1$  می نامیم.

- از حل دستگاه زیر  $I_1$  و  $A$  بدست می آیند.

$$\begin{cases} i_{out}(\omega t)|_{\omega t=0} = A - \frac{E}{R} - \frac{V_m}{Z} \sin(\varphi) = I_1 \\ i_{out}(\omega t)|_{\omega t=\pi} = A e^{-\frac{R}{L\omega}\pi} - \frac{E}{R} + \frac{V_m}{Z} \sin(\pi - \varphi) = I_1 \end{cases}$$



مثال:

منبع ولتاژ تکفاز ۲۲۰ ولت و ۵۰ هرتز توسط یک یکسوساز تمام موج دیودی به بار RLE با ۱۰۰ اهم، ۱۰ میلی هانری و ۱۰۰ ولت متصل شده است. رابطه جریان بار را تعیین کنید.

رابطه کلی جریان: 
$$i_{out}(\omega t) = Ae^{-31.84\omega t} - 1 + 3.11\sin(\omega t - 1.8^\circ)$$

با فرض پیوستگی جریان:

$$\begin{cases} i_{out}(\omega t)|_{\omega t=0} = A - 1 - 3.11\sin(1.8^\circ) = I_1 \\ i_{out}(\omega t)|_{\omega t=\pi} = Ae^{-31.84\pi} - 1 + 3.11\sin(180 - 1.8^\circ) = I_1 \end{cases}$$

با حل دستگاه:

$$I_1 = -0.9$$

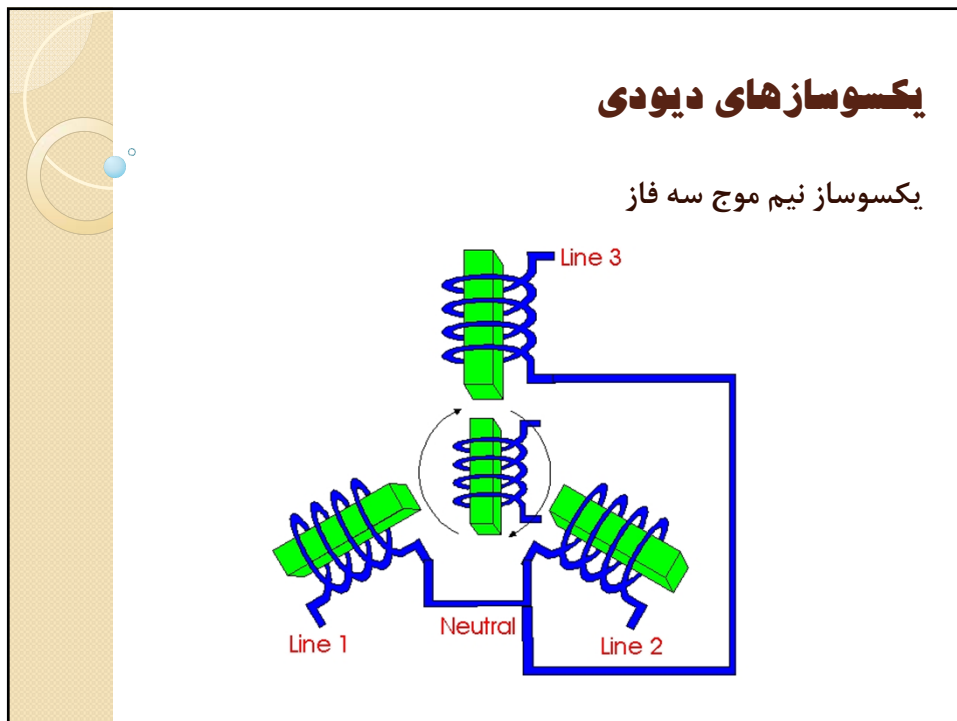
مقدار جریان منفی یعنی فرض پیوستگی اشتباه بوده و جریان گسسته است. پس:

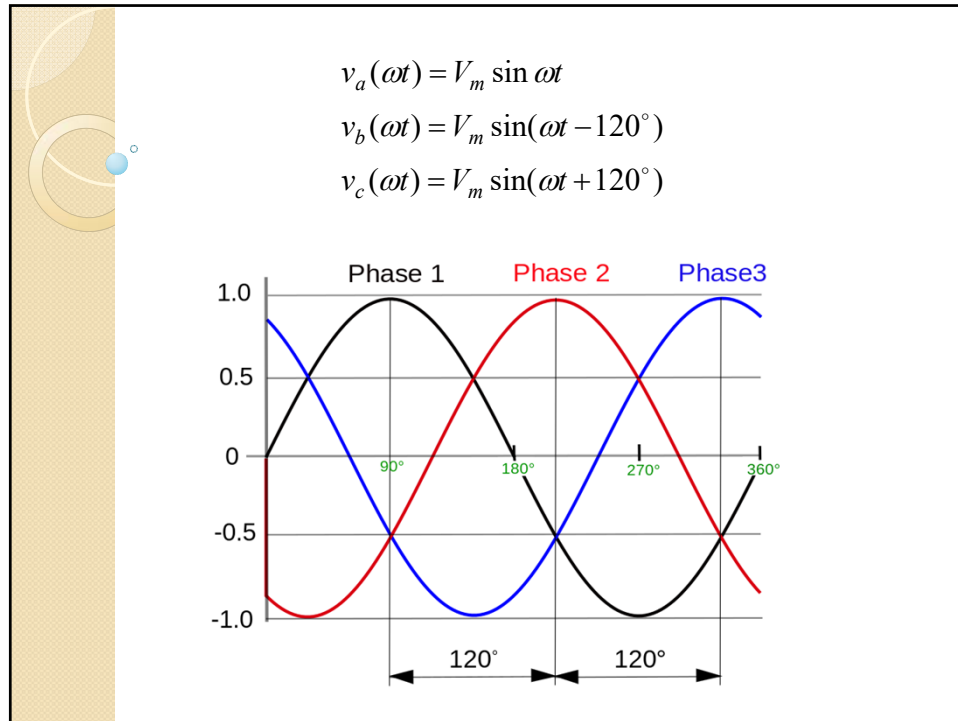
$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{100}{220\sqrt{2}}\right) = 18.75^\circ$$

$$i_{out}(\alpha) = Ae^{-31.84 \cdot (18.75 \cdot \frac{3.14}{180})} - 1 + 3.11 \sin(18.75^\circ - 1.8^\circ) = 0$$

→  $A = 3351$

زاویه صفر شدن مجدد جریان:

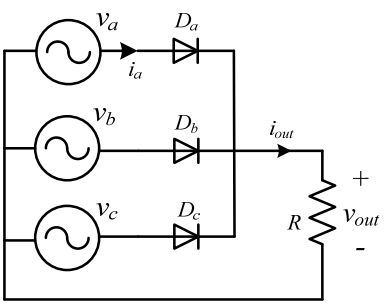
$$i_{out}(\beta) = Ae^{-31.84\beta} - 1 + 3.11 \sin(\beta - 1.8^\circ) = 0 \rightarrow \beta = 163^\circ$$




$$v_{ab}(\omega t) = v_a(\omega t) - v_b(\omega t) = V_m \sin \omega t - V_m \sin(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + 30^\circ)$$

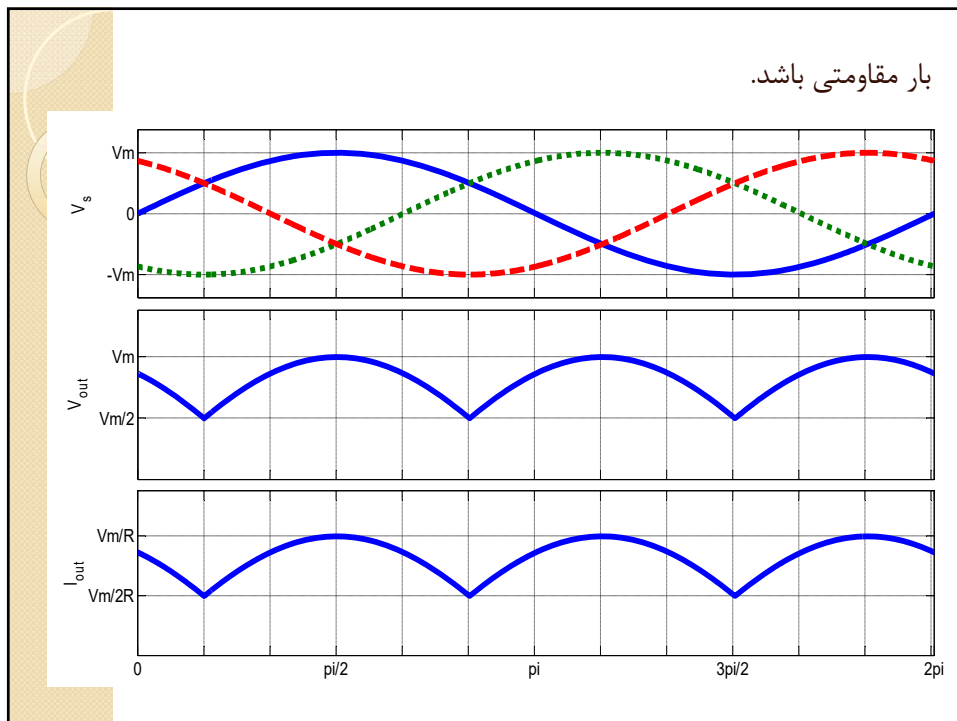
ولتاژ خط رادیکال ۳ برابر بزرگتر از ولتاژ می باشد.

یکسوساز نیم موج سه فاز

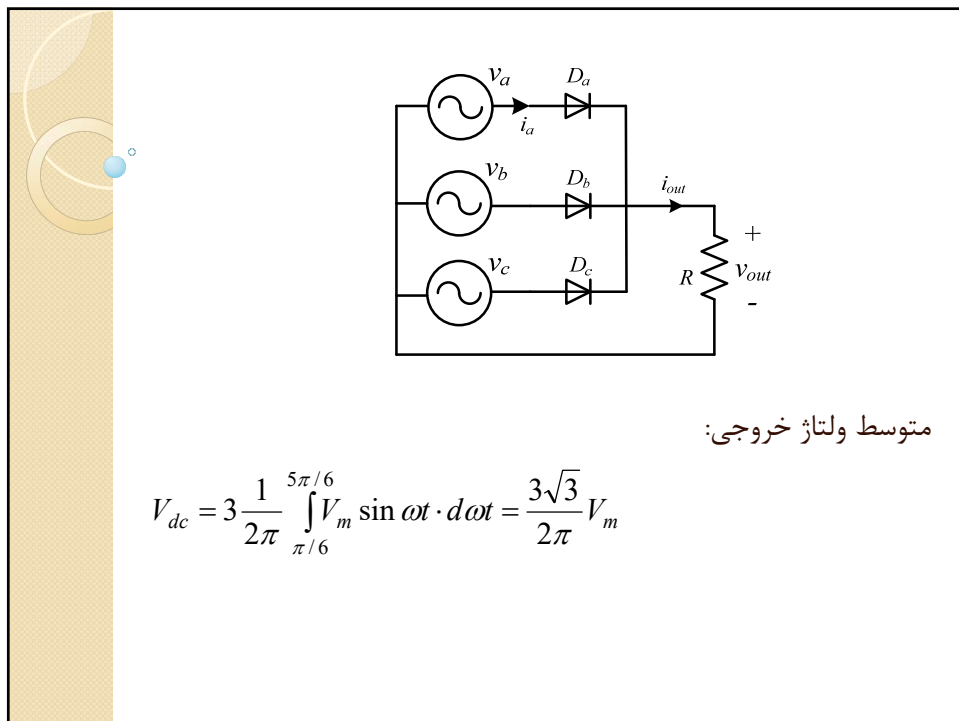
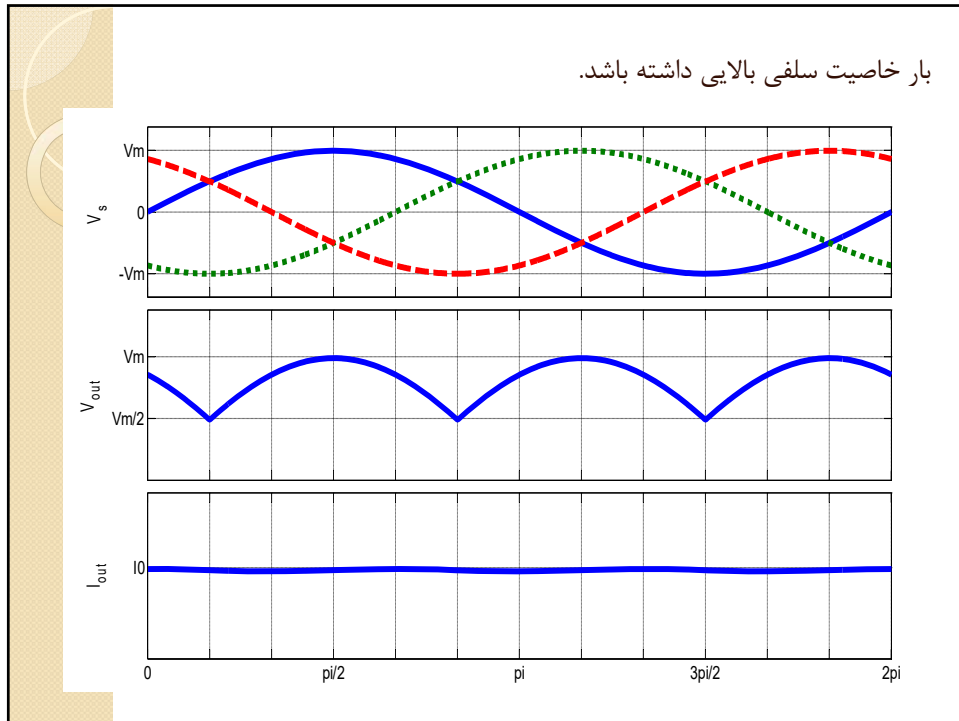


هر دیودی که روشن باشد ولتاژ همان فاز روی سر مثبت بار می افتد. ولتاژ سر منفی بار، ولتاژ نقطه نول یعنی صفر است.

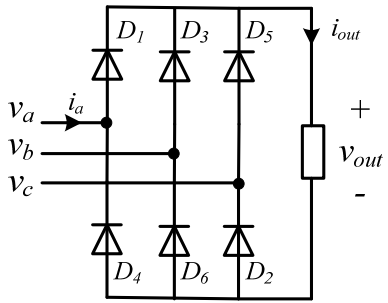
در هر لحظه دیودی روشن میشود که منبع متصل به آن بیشترین ولتاژ را داشته باشد.





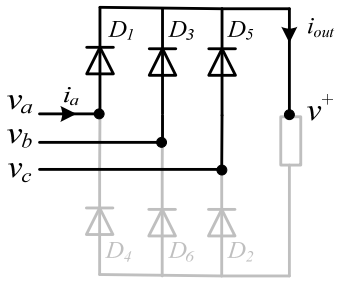
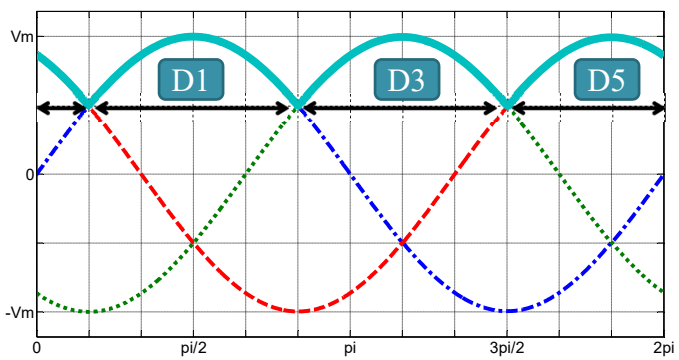


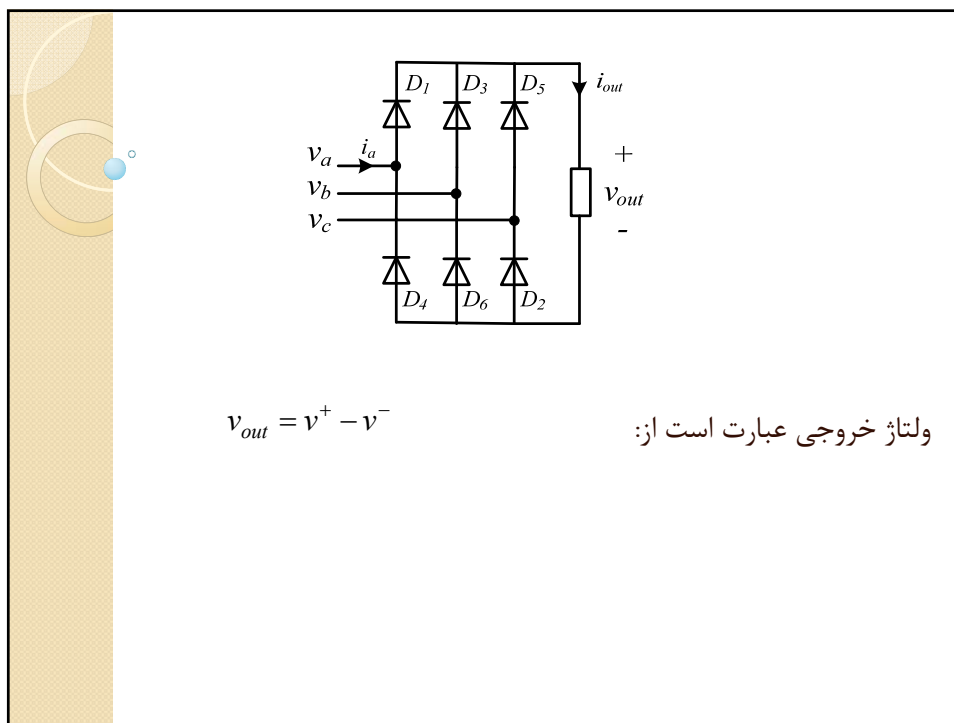
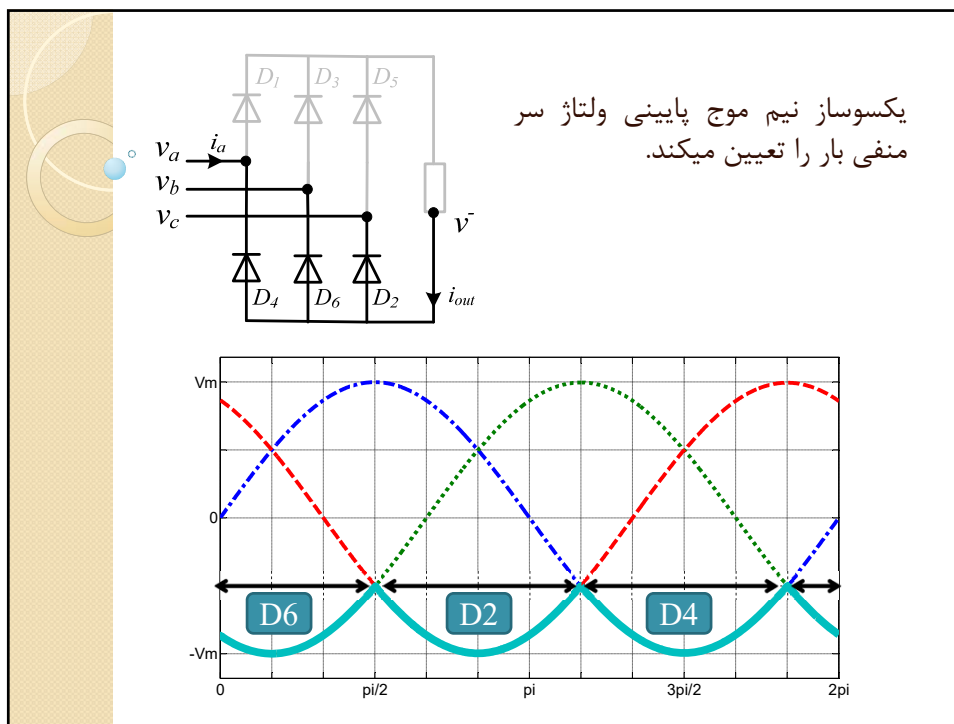
**یکسوساز تمام موج سه فاز**

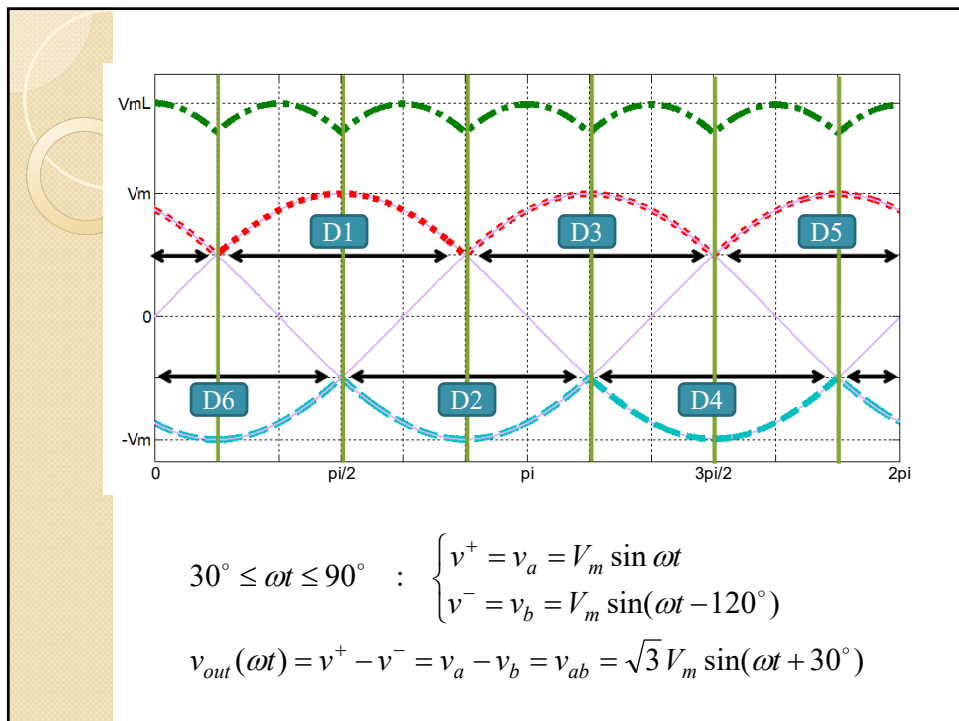
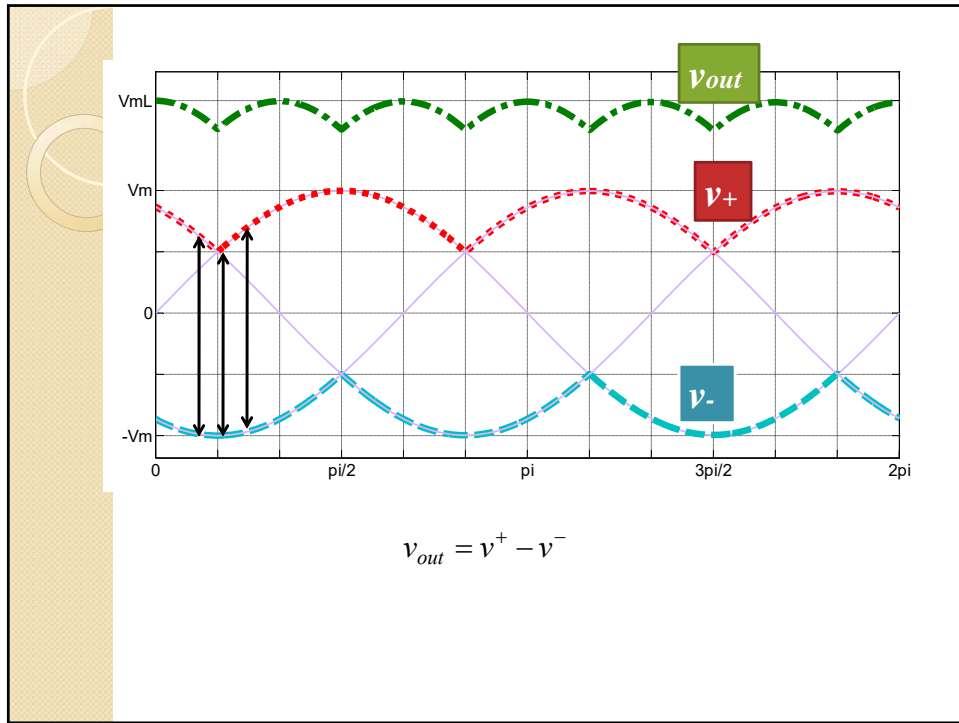


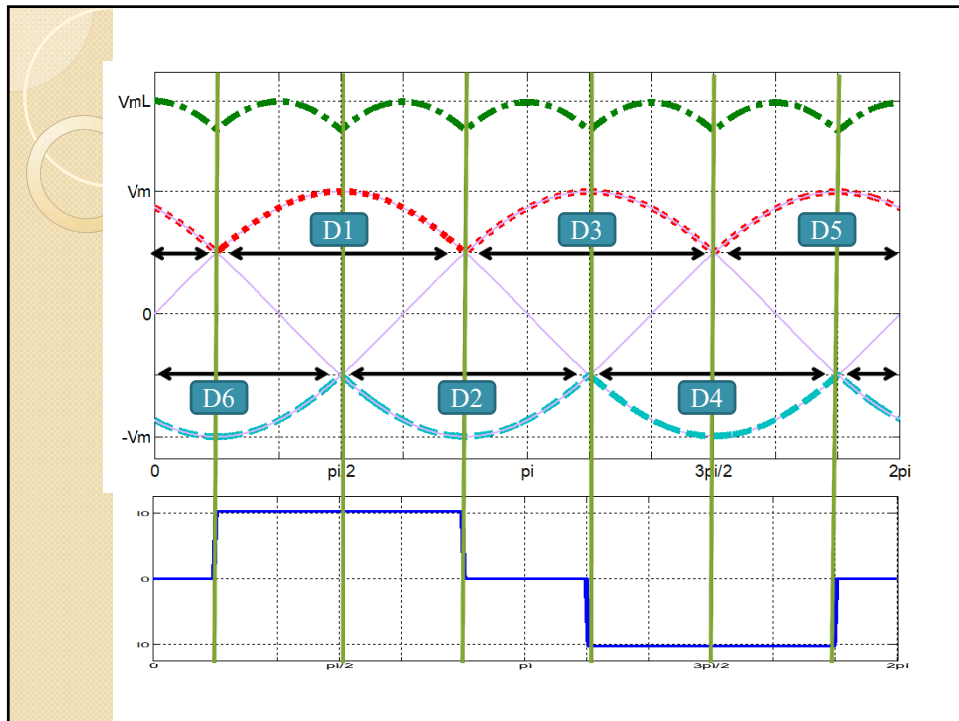
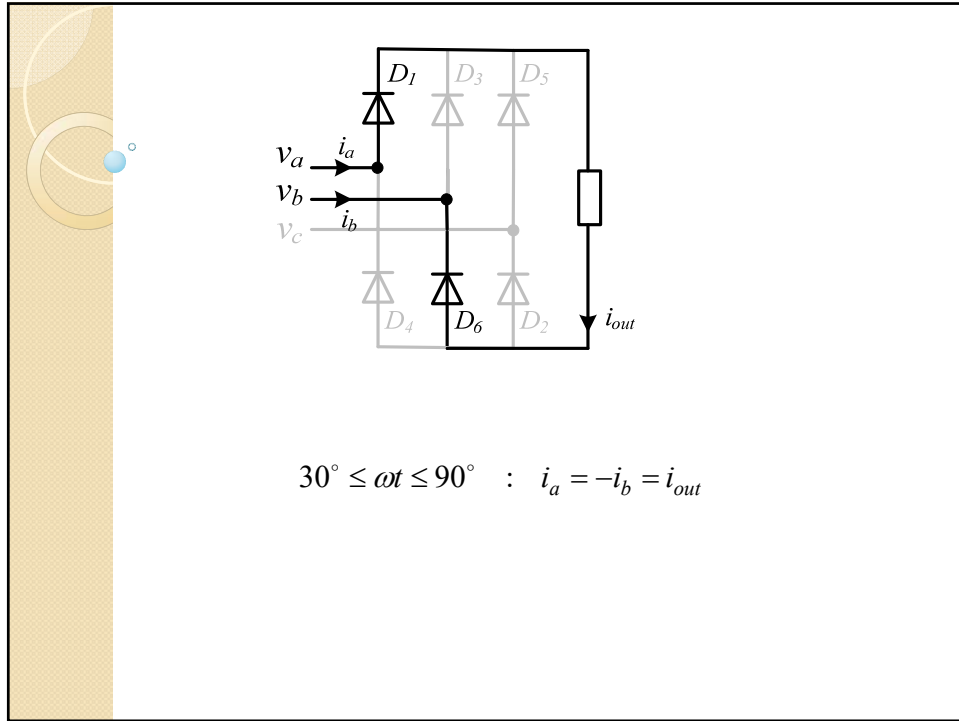
این یکسوساز را میتوان به دو یکسوساز نیم موج سه فاز تقسیم کرد و هر قسمت را جداگانه بررسی نمود.

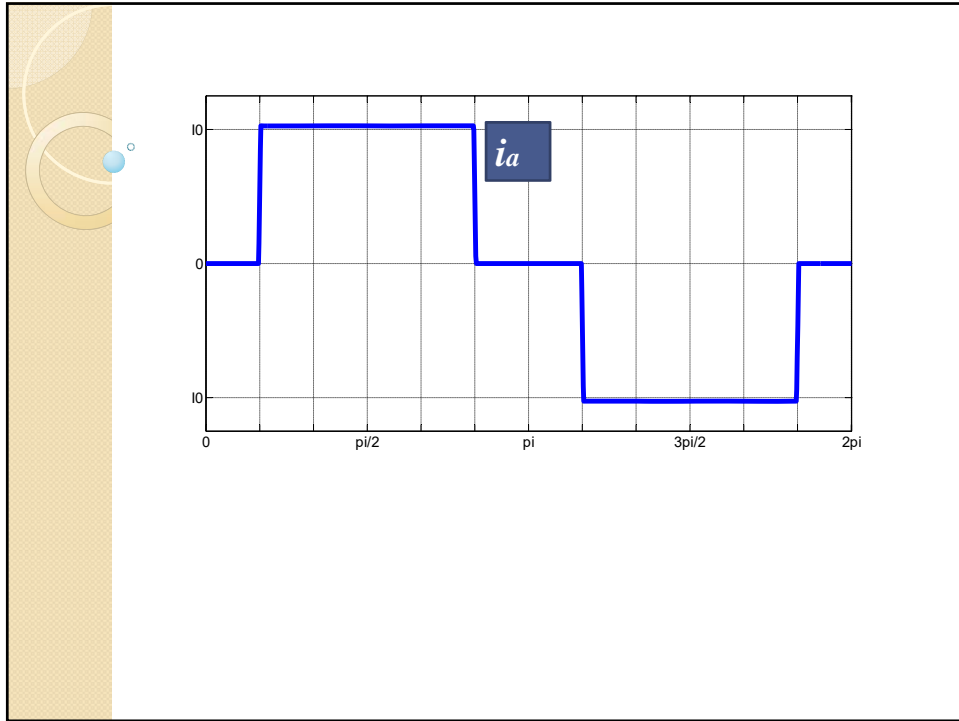
**یکسوساز نیم موج بالاتر ولتاژ سر مثبت بار را تعیین میکند.**



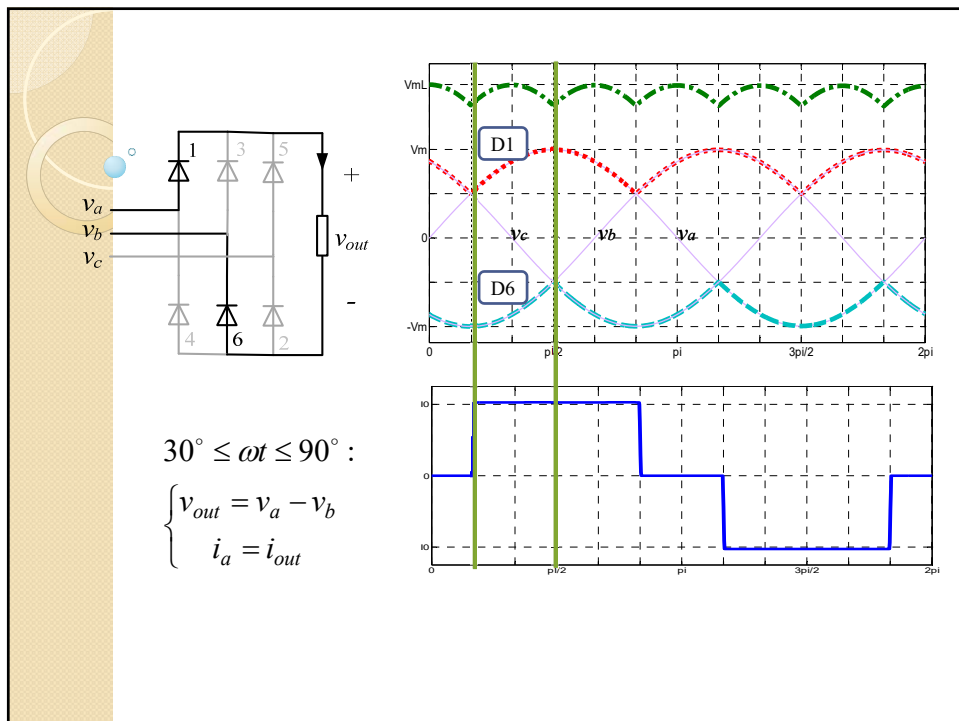
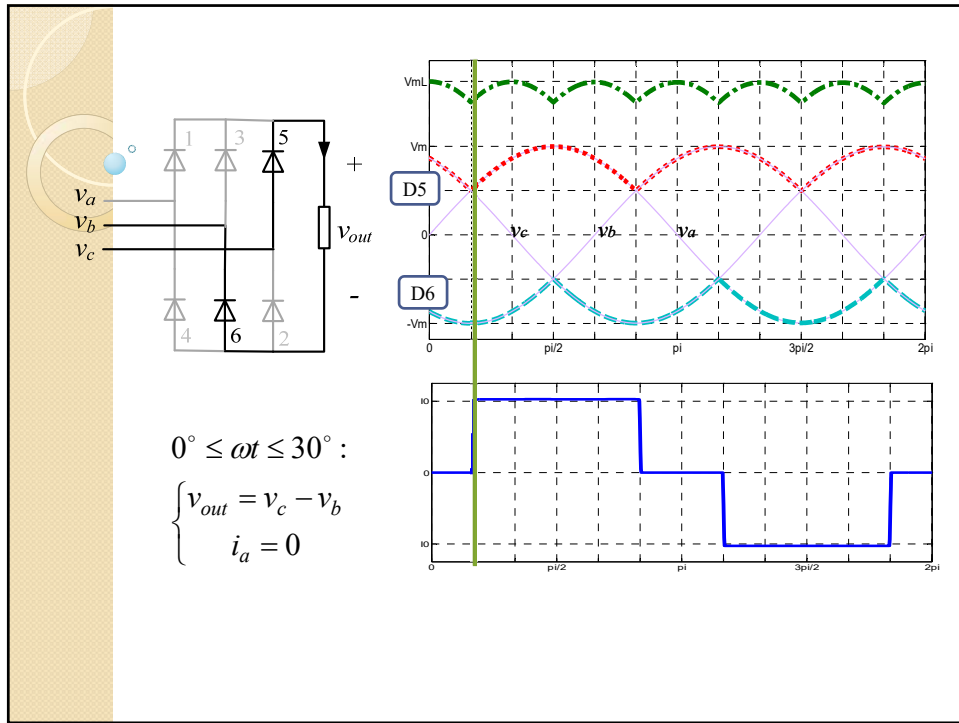


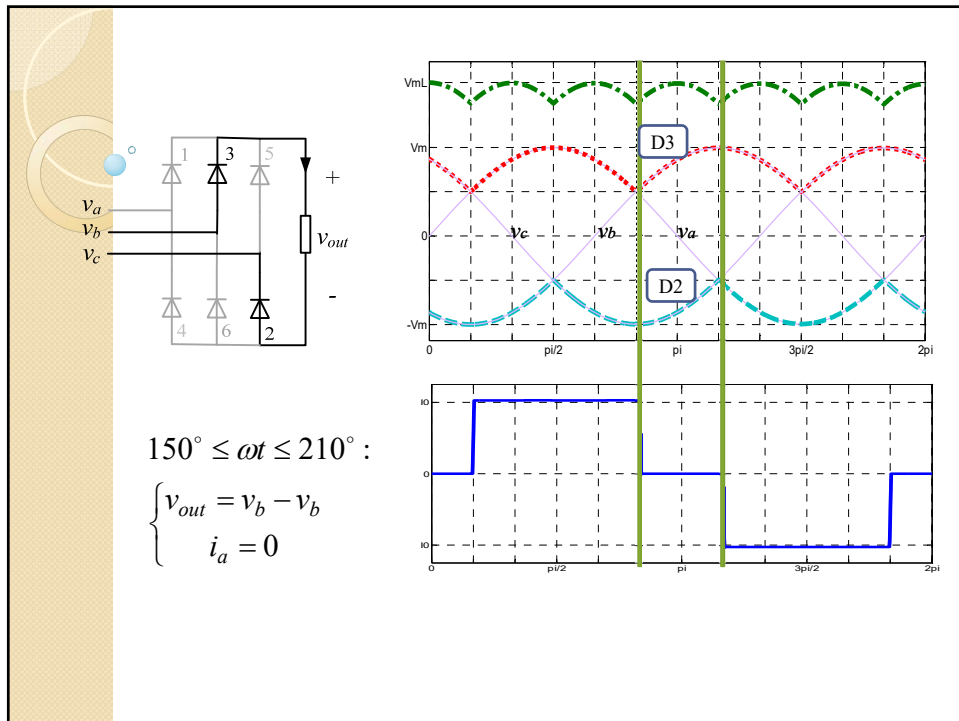
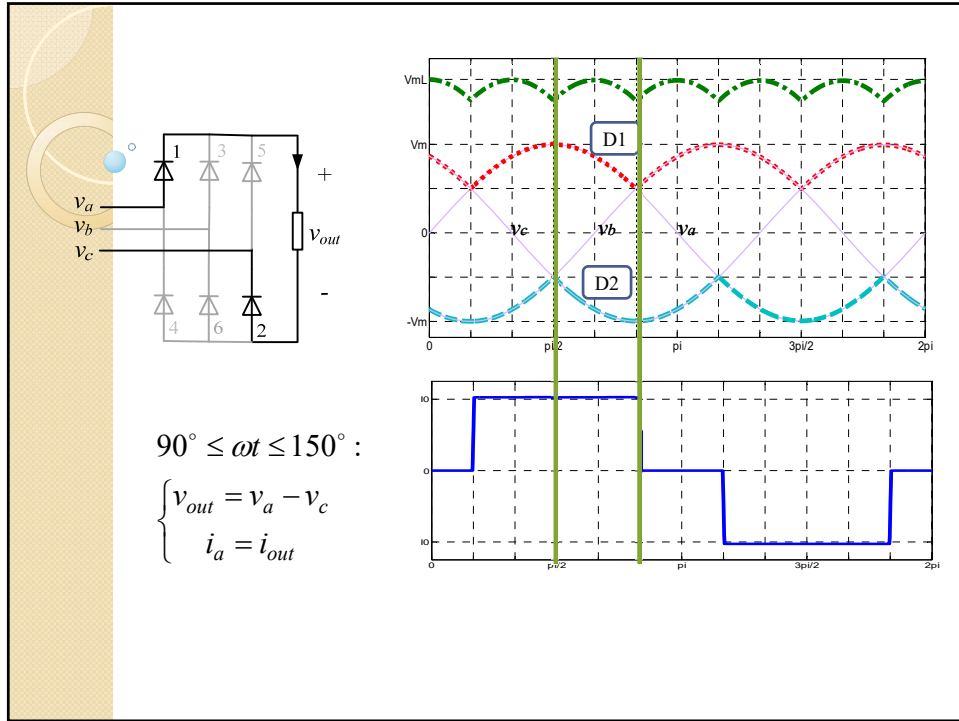




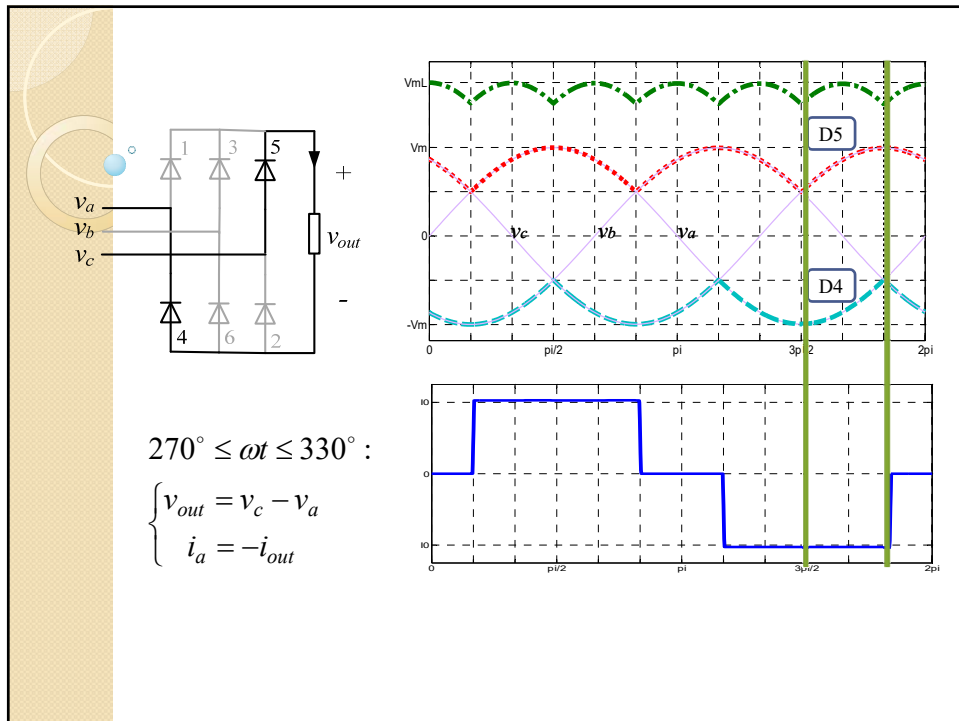
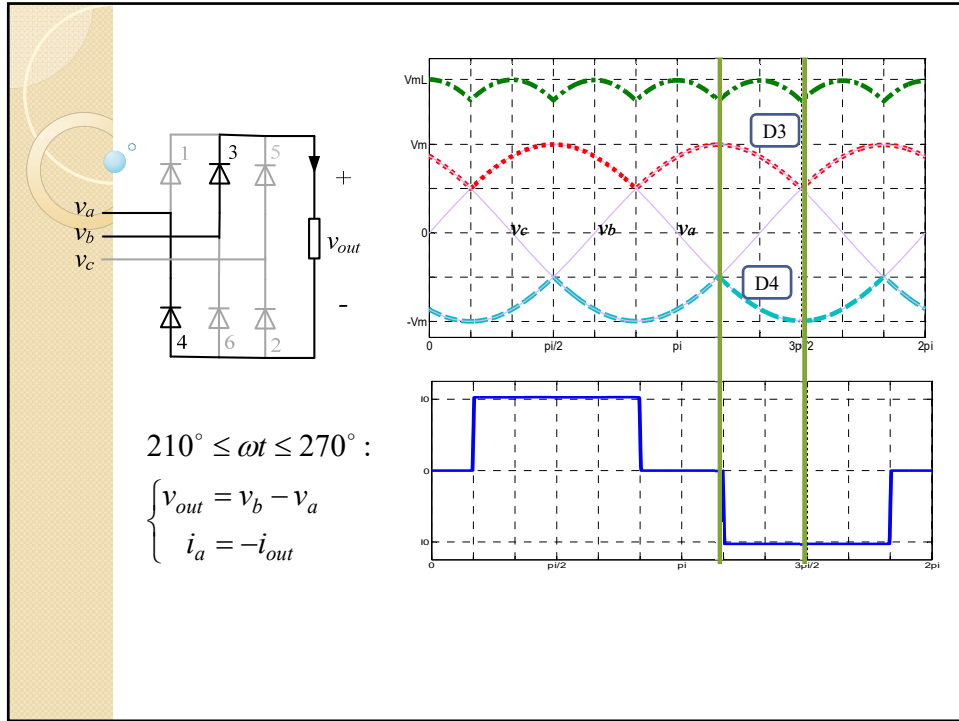
متوسط ولتاژ خروجی:

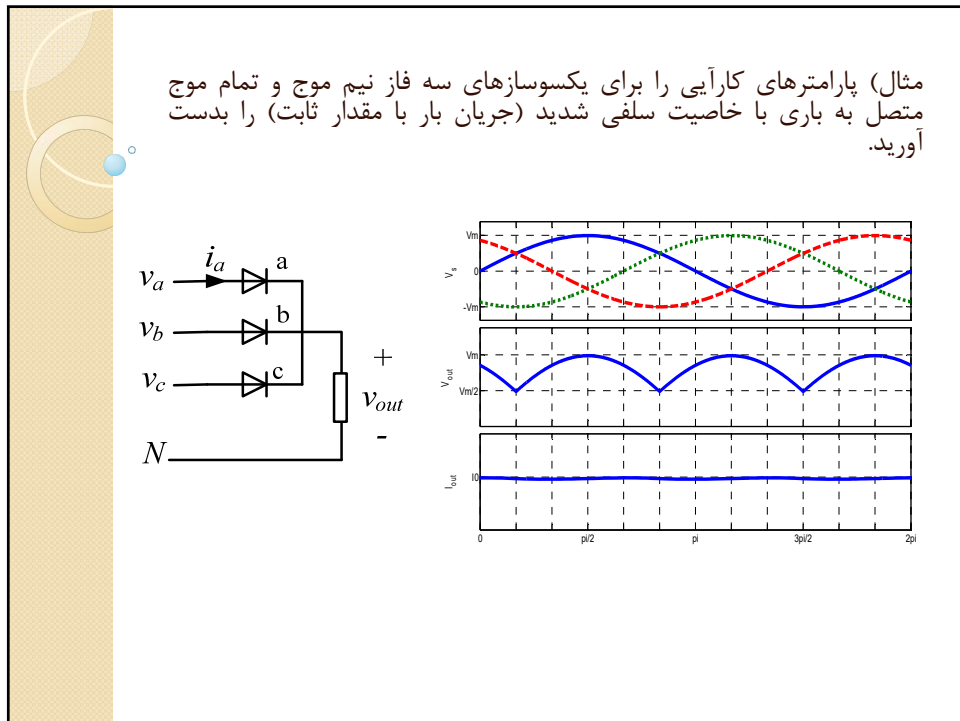
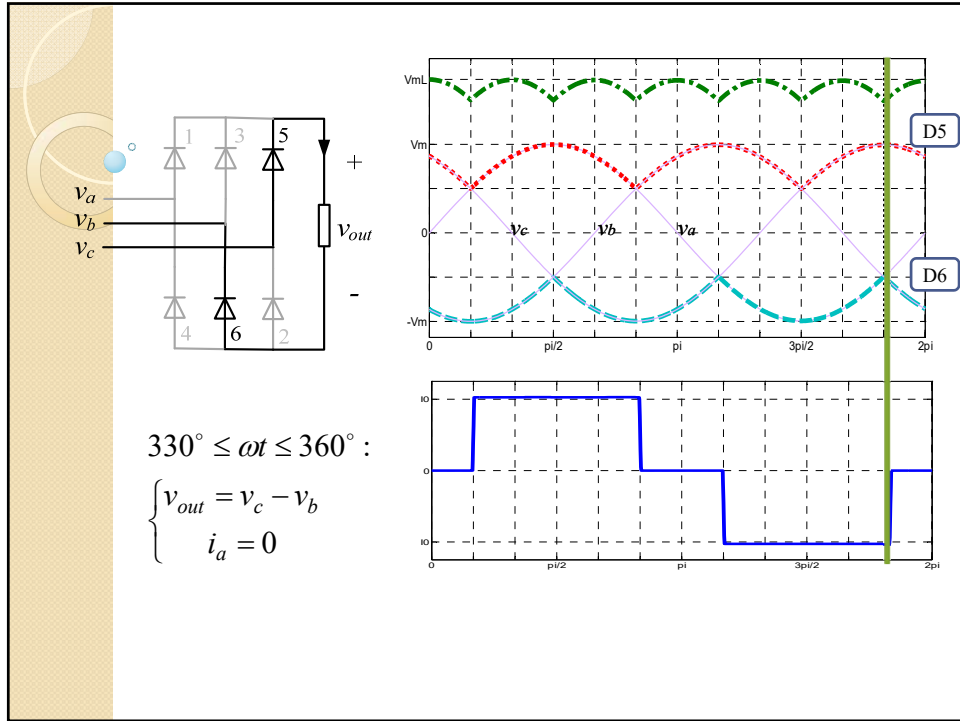
$$V_{dc} = 6 \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + 30^\circ) \cdot d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$











$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m = 0.827 V_m$$

$$V_{rms} = \left( \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} (V_m \sin \omega t)^2 \cdot d\omega t \right)^{0.5} = \left( \frac{3V_m^2}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \cdot d\omega t \right)^{0.5}$$

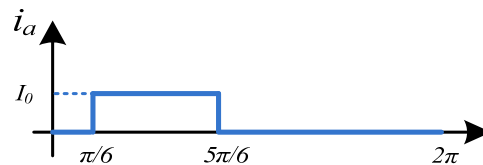
$$= 0.841 V_m$$

$$I_{dc} = I_{rms} = I_0$$

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} = \frac{V_{dc} \cdot I_{dc}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} = \%96.8 \quad V_{ac} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2}$$

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = 1.016 \quad , \quad RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = 0.182$$

برای محاسبه THD شکل موج جریان یکی از فازها را نیاز داریم.

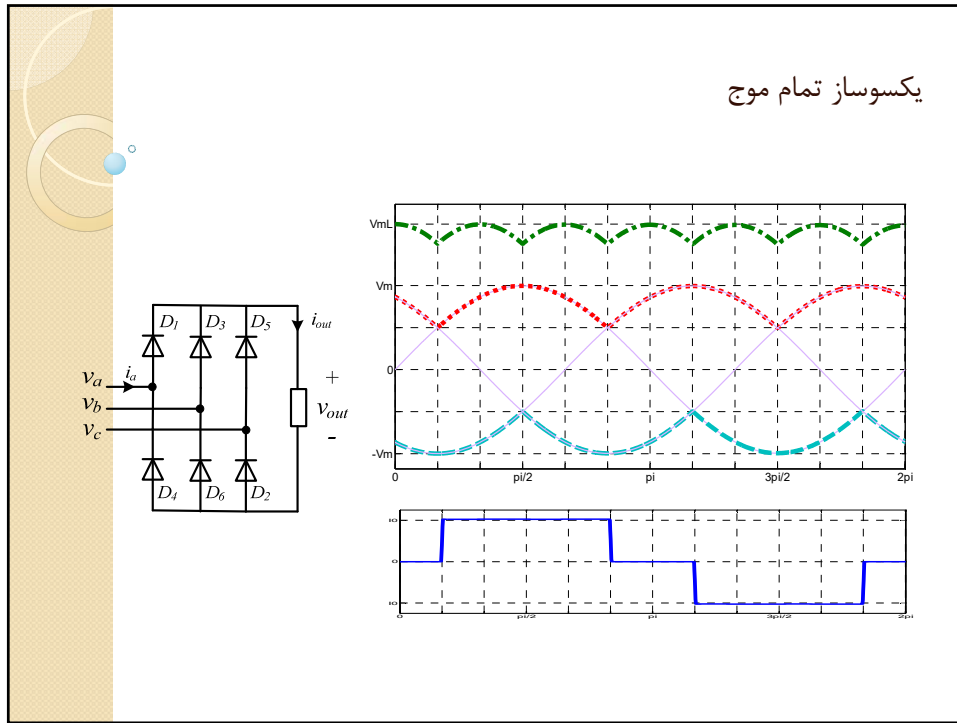


$$i_{a1} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_0 \cos \omega t \cdot d\omega t = 0 \quad i_{b1} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_0 \sin \omega t \cdot d\omega t = 0.55 I_0$$

$$i_1 = \sqrt{i_{a1}^2 + i_{b1}^2} = 0.55 I_0 \quad \rightarrow \quad i_{1,rms} = \frac{0.55 I_0}{\sqrt{2}} = 0.39 I_0$$

$$I_{dc} = \frac{I_0}{3} \quad , \quad I_{rms} = \frac{I_0}{\sqrt{3}} \quad \rightarrow \quad I_{ac} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{dc}^2} = 0.47 I_0$$

$$THD = \frac{\sqrt{I_{ac}^2 - i_{1,rms}^2}}{i_{1,rms}} = \%67$$



$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.654 V_m$$

$$V_{rms} = \left( \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/6}^{3\pi/6} (V_m \sin \omega t - V_m \sin(\omega t - 2\pi/3))^2 \cdot d\omega t \right)^{0.5} = 1.655 V_m$$

$$I_{dc} = I_{rms} = I_0$$

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} = \frac{V_{dc} \cdot I_{dc}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} = \%99.8$$

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = 1.008 \quad , \quad RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = 0.04$$

$$i_{a1} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_0 \cos \omega t \cdot d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{7\pi/6}^{11\pi/6} -I_0 \cos \omega t \cdot d\omega t = 0$$

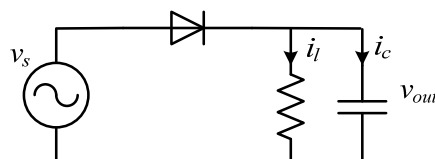
$$i_{b1} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} I_0 \sin \omega t \cdot d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{7\pi/6}^{11\pi/6} -I_0 \sin \omega t \cdot d\omega t = 1.1I_0$$

$$i_1 = \sqrt{i_{a1}^2 + i_{b1}^2} = 1.1I_0 \rightarrow i_{1,rms} = \frac{1.1I_0}{\sqrt{2}} = 0.78I_0$$

$$I_{dc} = 0, \quad I_{rms} = \frac{\sqrt{2}I_0}{\sqrt{3}} \rightarrow I_{ac} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{dc}^2} = 0.816I_0$$

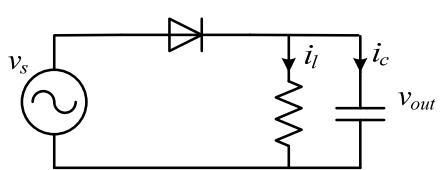
$$THD = \frac{\sqrt{I_{ac}^2 - i_{1,rms}^2}}{i_{1,rms}} = \%30.7$$

## فیلتر خازنی



یکسوساز نیم موج تکفاز

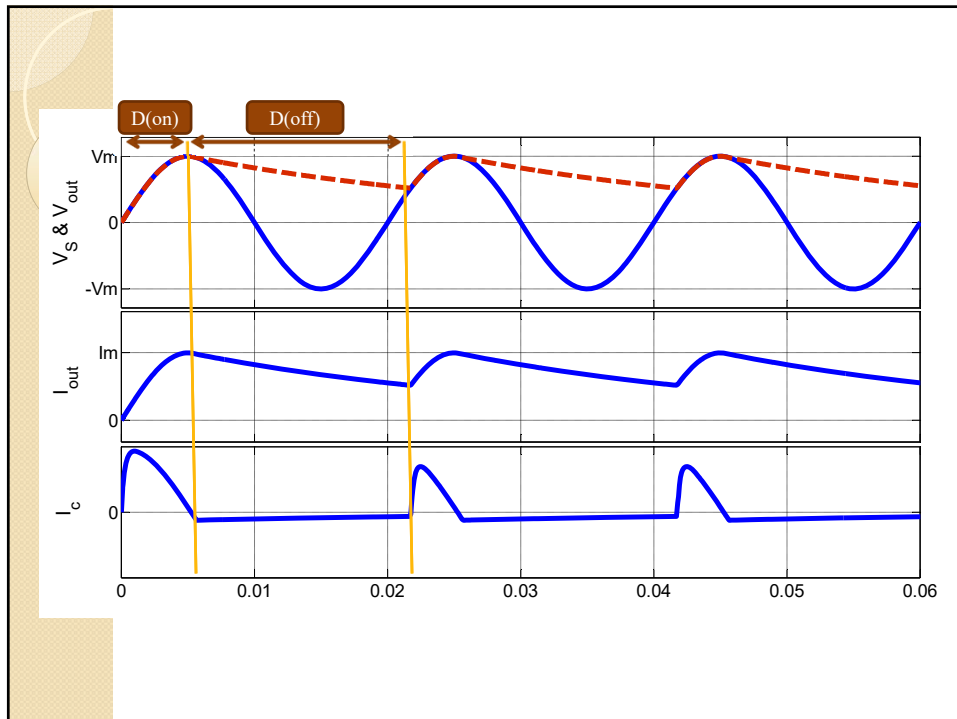
استفاده از فیلتر خازنی در خروجی یکسوسازها باعث صافتر شدن ولتاژ خروجی آنها می گردد.



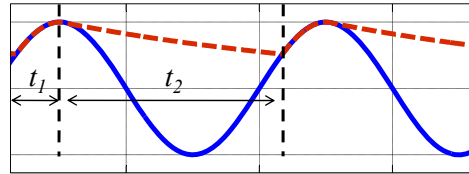
هرگاه ولتاژ منبع از ولتاژ خازن بیشتر باشد دیود روشن می شود. در اینصورت ولتاژ منبع انرژی بار را تامین کرده و خازن را شارژ می کند:

$$v_{out} = v_s = V_m \sin \omega t \quad , \quad i_s = i_c + i_l$$

هرگاه ولتاژ منبع کمتر از ولتاژ خازن گردد، دیود قطع شده و خازن شارژ شده انرژی بار را تامین میکند. در اینصورت ولتاژ خازن به شکل نمایی شروع به کاهش میکند.

$$v_{out} = v_c = V_m e^{-t/RC} \quad , \quad i_s = 0 \quad , \quad i_c = -i_l$$


اگر  $t_1$  زمان شارژ خازن و  $t_2$  زمان تخلیه آن باشد.



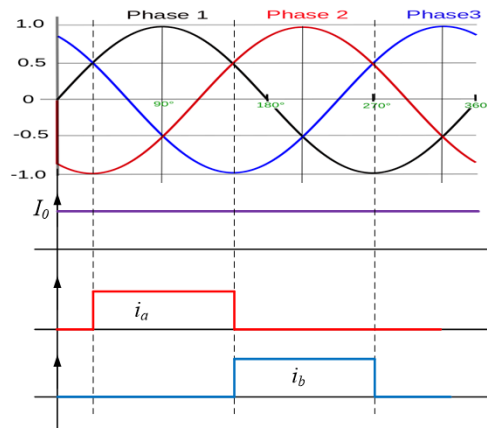
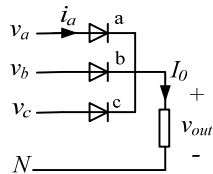
$$v_{out}(t_1) = V_m \quad \rightarrow \quad v_{out}(t) = V_m \cdot \exp\left(\frac{-t}{RC}\right)$$

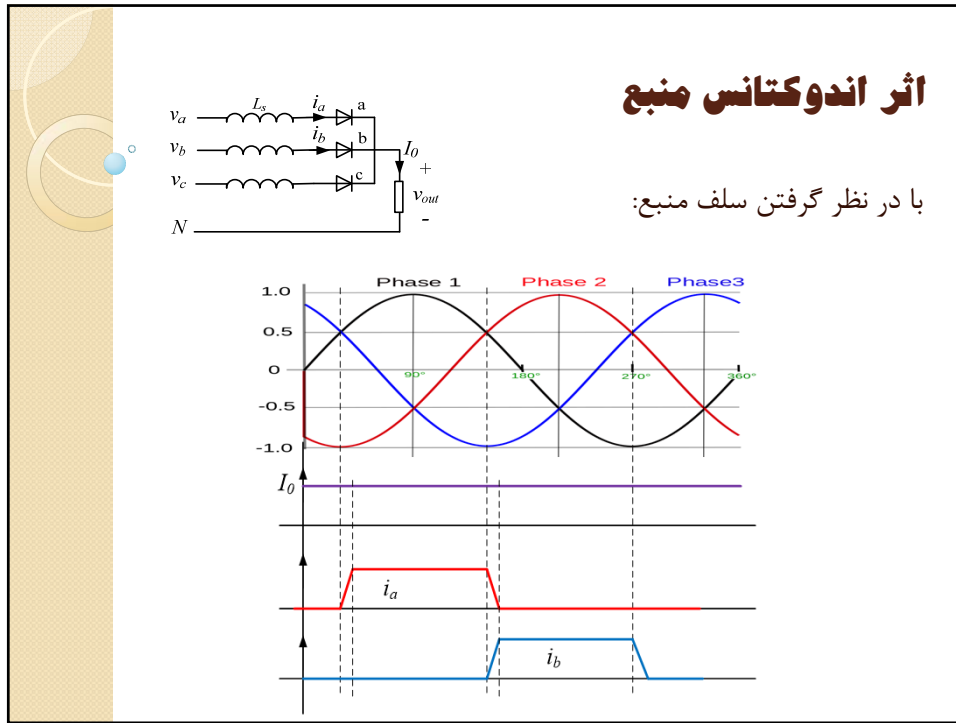
$$v_{r(p-p)} = v_{out}(t_1) - v_{out}(t_2) = V_m \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t_2}{RC}\right) \right] \rightarrow e^{-x} \approx 1 - x$$

$$v_{r(p-p)} \approx \frac{V_m}{fRC} \quad V_{dc} = V_m - \frac{v_{r(p-p)}}{2}$$

### اثر اندوکتانس منبع

اگر منبع ایده آل باشد:





انتقال جریان از یک دیود به دیود دیگر **کموتاسیون** نام دارد.  
 زاویه ای که هر دو دیود روشن هستند، زاویه **همپوشانی** نام دارد.  
 در هنگام همپوشانی:

$$v_{out} = v_a - v_{L1} \quad v_{L1} = L_1 \frac{di_a}{dt} = L_1 \frac{-I_0}{\Delta t}$$

$$v_{out} = v_b - v_{L2} \quad v_{L2} = L_2 \frac{di_b}{dt} = L_1 \frac{I_0}{\Delta t}$$

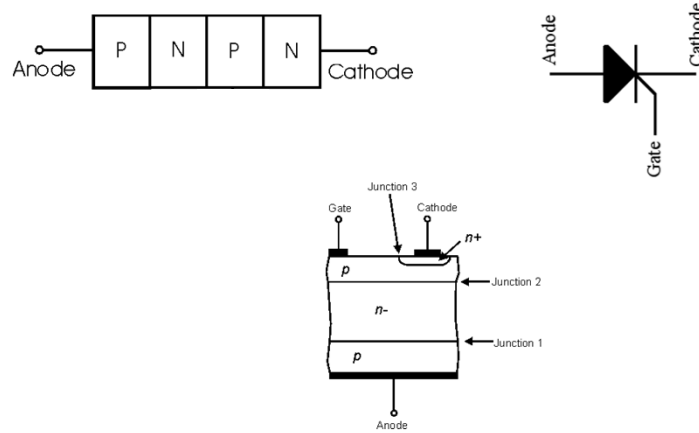
متوسط کاهش ولتاژ ناشی از همپوشانی (سه فاز نیم موج):

$$V_x = \frac{1}{T} 3 \int L_c \frac{di}{dt} dt = 3fLI_0 \quad (L_1 = L_2 = L_3 = L_c)$$

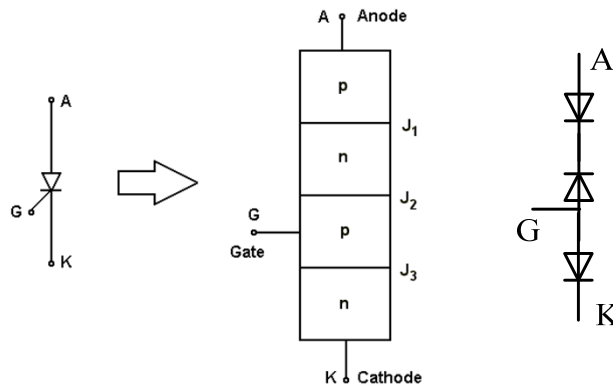


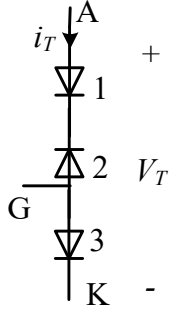
## تریستور

المانی که از اتصال چهار نیمه هادی نوع P و N تشکیل شده.



محل اتصال هر دو نیمه هادی، یک پیوند نام دارد. هر پیوند مشابه یک دیود می باشد. پس می توان تریستور را معادل سه دیود سری دانست.

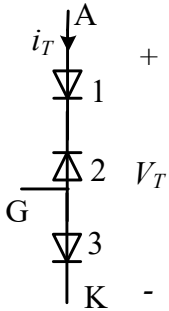




یک تریستور دارای سه ناحیه کاری می باشد.

۱- قطع در بایاس معکوس: هنگامی که ولتاژ A از K کمتر باشد دیودهای ۱ و ۳ در بایاس معکوس بوده و رفتار تریستور مانند رفتار یک دیود در بایاس معکوس است.

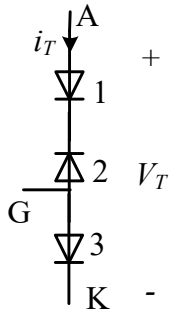
در این حالت جریان تریستور صفر بوده و تریستور اصطلاحاً خاموش است.

$$I_T = 0 \quad , \quad V_T < 0$$


۲- قطع در بایاس مستقیم: هنگامی که ولتاژ A از K بیشتر شود از آنجایی که دیود ۲ در بایاس معکوس است پس تریستور باز هم رفتاری مشابه یک دیود قطع از خود نشان می دهد.

در این حالت جریان تریستور صفر بوده و تریستور هنوز خاموش است.

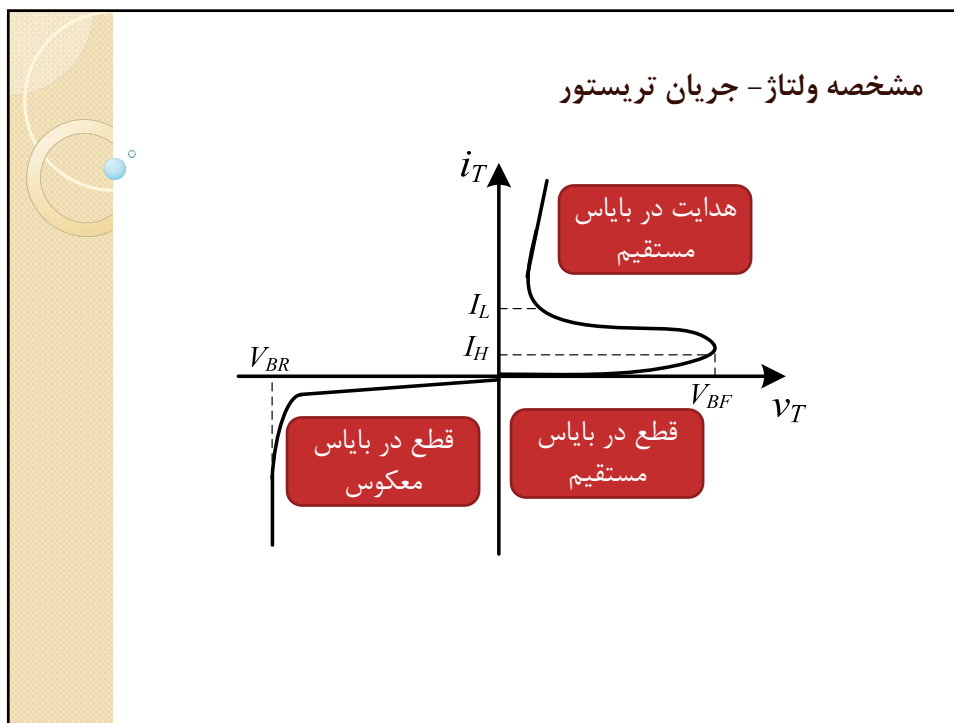
$$I_T = 0 \quad , \quad V_T > 0$$



۳- هدایت در بایاس مستقیم: با افزایش ولتاژ A نسبت به K جریان نشتی دیود ۲ افزایش یافته، پیوند ۲ شکسته می شود و شروع به هدایت می کند. پس در این حالت تریستور هدایت کرده و روشن می باشد.

$I_T > 0$  ,  $V_T = 0$

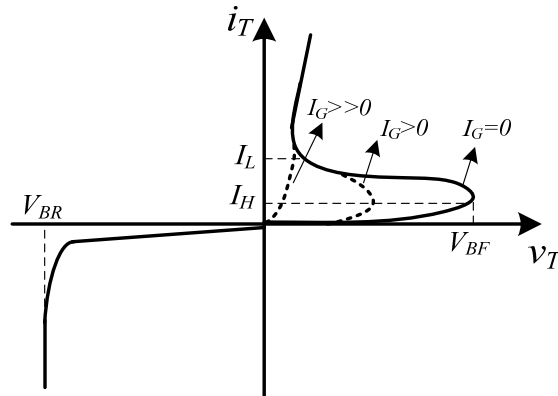
در این ناحیه چنانچه جریان تریستور از مقدار جریان قفل کننده  $I_L$  بیشتر شود تریستور روشن باقی خواهد ماند تا هنگامی که جریان آن به کمتر از مقدار جریان نگهدارنده  $I_H$  نرسد، روشن میماند.



### عملکرد پایه گیت:

اعمال جریان به پایه G می تواند پیوند دیود ۲ را تضعیف نماید. بنابراین این پیوند در ولتاژ کمتری شکسته شده و تریستور زودتر هدایت می کند.

اگر تریستور در بایاس مستقیم باشد با اعمال جریان مناسب در مدت زمان کافی به پایه گیت می توان تریستور را سریعاً تریستور را روشن نمود.



### حفاظت جریانی تریستور

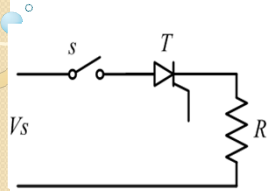
فرایند هدایت در نقاط مختلف تریستور به سرعت و همزمان نبوده و نقاطی با تاخیر بیشتری نسبت به دیگر نقاط روشن می شوند.

چنانچه نرخ تغییرات جریان در یک تریستور پس از روشن شدن بالا باشد، ممکن است مقدار این جریان به نقاطی که زودتر از بقیه روشن شده اند آسیب رسانده و باعث تخریب تریستور گردد.

در عمل باید تریستور را در برابر تغییرات بالای جریان محدود نمود.

برای این منظور از یک مدار RL کوچک سری با تریستور استفاده میشود.

## حفاظت ولتاژی تریستور

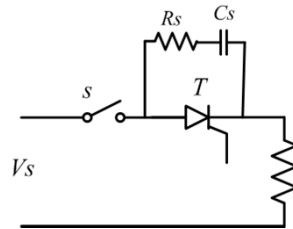


در مدار مقابل با وصل کلید S، ولتاژ منبع بر روی تریستور افتاده. اگر سرعت تغییرات ولتاژ دو سر تریستور از مقدار مشخصی بیشتر باشد، تریستور ناخواسته روشن میگردد.

برای رفع این مشکل یک مدار RC سری را با تریستور موازی می کنیم. این مدار موازی را اسنابر می گوئیم.

وجود خازن باعث می شود ولتاژ دو سر تریستور با تاخیر افزایش یافته و از سرعت تغییرات آن کاسته شود.

## حفاظت ولتاژی تریستور



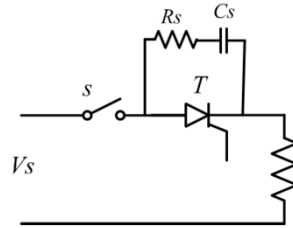
رابطه ولتاژ دو سر تریستور:

$$v_T(t) = V_s \left( 1 - \frac{R}{R + R_s} e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad \tau = (R + R_s)C_s$$

مقادیر خازن و مقاومت اسنابر باید در رابطه زیر صدق کند.

$$\left( \frac{dv_T}{dt} \right)_{th} = \frac{0.632RV_s}{(R + R_s)C_s}$$

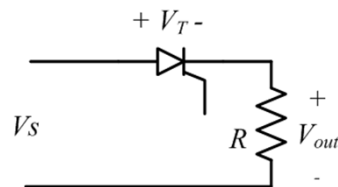
### حفاظت ولتاژی ترستور



هنگامی که ترستور وصل شود، تمامی انرژی ذخیره شده در خازن، در مقاومت اسنابر تلف می گردد.

$$E_C = \frac{1}{2} C_s V_s^2 \quad , \quad P_{loss} = \frac{1}{2} C_s V_s^2 f_{sw}$$

### یکسوسازهای ترستوری



یکسوساز نیم موج تکفاز

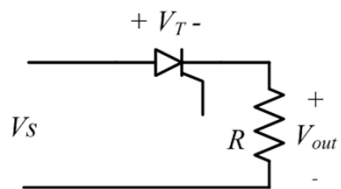
در نیم سیکل مثبت، ترستور در بایاس مستقیم می باشد. از آنجایی که هنوز جریانی به گیت اعمال نشده، پس ترستور قطع می باشد (قطع در بایاس مستقیم).

$$v_{out} = 0 \quad , \quad i_{out} = 0 \quad , \quad v_T = v_s$$

با اعمال جریان به گیت در زاویه  $\alpha$ ، ترستور روشن شده و اتصال کوتاه می شود.

$$v_{out} = v_s \quad , \quad i_{out} = \frac{v_s}{R} \quad , \quad v_T = 0$$

## یکسوسازهای تریستوری

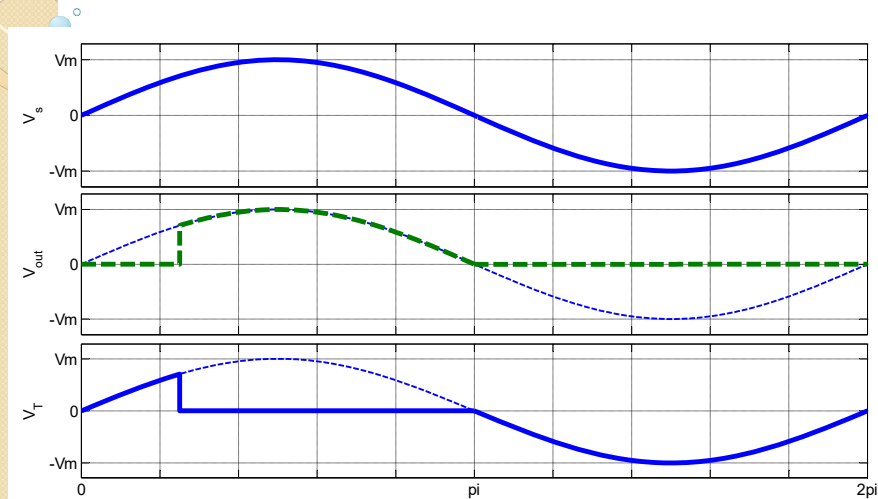


یکسوساز نیم موج تکفاز

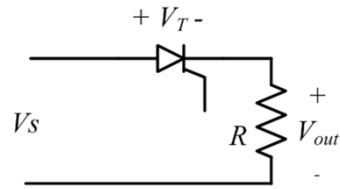
در نیم سیکل منفی، تریستور در بایاس معکوس بوده و قطع است.

$$v_{out} = 0 \quad , \quad i_{out} = 0 \quad , \quad v_T = v_s$$

## یکسوسازهای تریستوری



### یکسوسازهای تریستوری

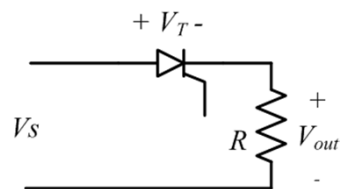


یکسوساز نیم موج تکفاز

متوسط ولتاژ خروجی:

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

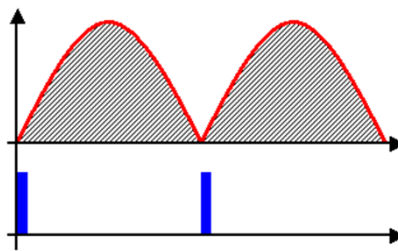
### یکسوسازهای تریستوری



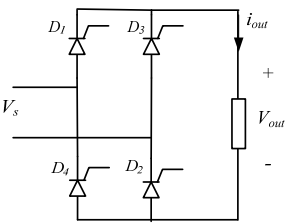
یکسوساز نیم موج تکفاز

تغییر ولتاژ با تغییر زاویه آتش:

$$\alpha = 0 \rightarrow \pi : V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} \rightarrow 0$$



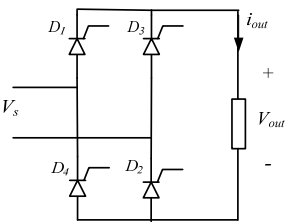




**یکسوساز تمام موج تکفاز**  
( بار مقاومتی )

در نیم سیکل مثبت تریستورهای ۱ و ۲ در بایاس مستقیم هستند و تریستورهای ۳ و ۴ در بایاس معکوس.

با اعمال جریان به گیت در زاویه  $\alpha$ ، تریستورهای ۱ و ۲ روشن شده و اتصال کوتاه می شود. تا قبل از روشن شدن تریستورها، خروجی صفر است و پس از آن:

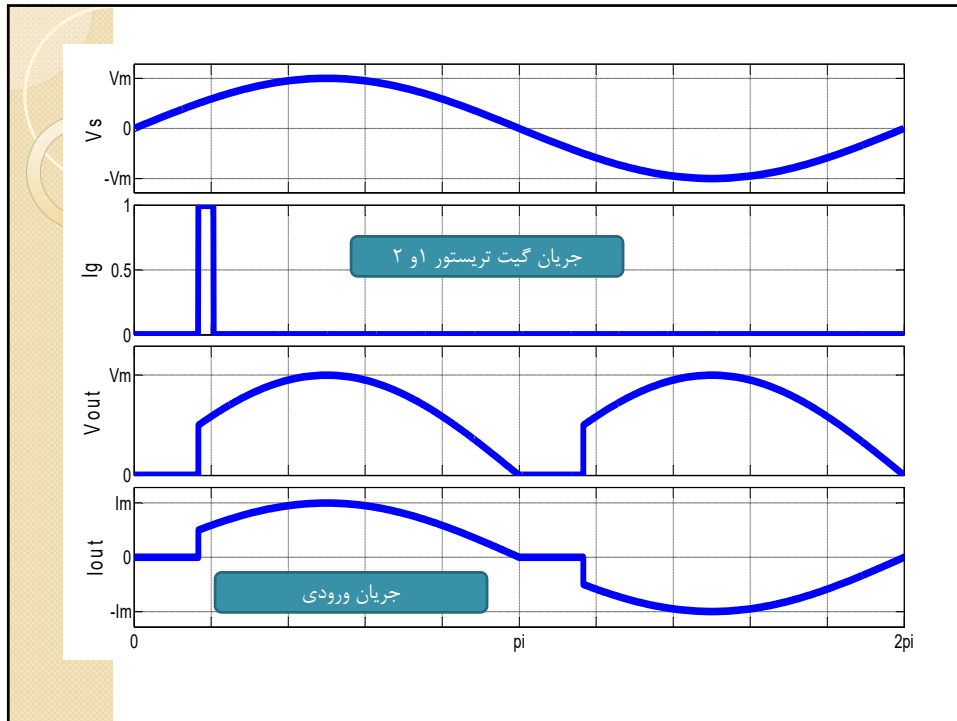
$$v_{out} = v_s \quad , \quad i_{out} = \frac{v_{out}}{R} \quad , \quad v_{T1,2} = 0$$


**یکسوساز تمام موج تکفاز**  
( بار مقاومتی )

در نیم سیکل منفی تریستورهای ۳ و ۴ در بایاس مستقیم هستند.

در این نیم سیکل نیز با  $\alpha$  درجه تاخیر تریستورها روشن می شوند. با روشن شدن تریستورها:

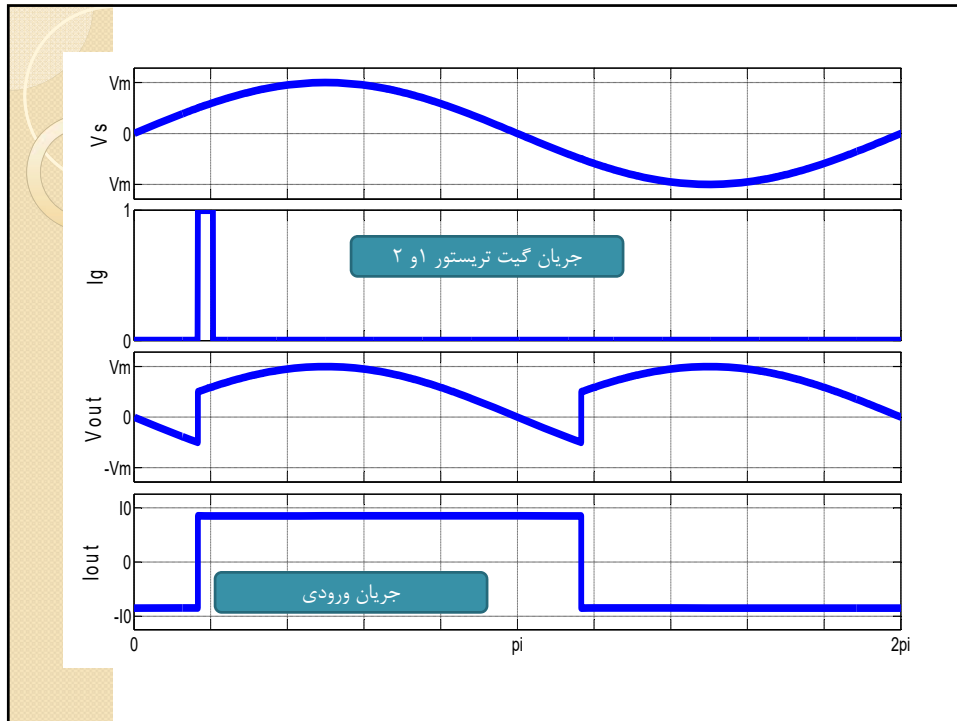
$$v_{out} = -v_s \quad , \quad i_{out} = \frac{v_{out}}{R} \quad , \quad v_{T3,4} = 0$$



**یکسوساز تمام موج تکفاز**  
( جریان بار ثابت )

چنانچه بار خاصیت سلفی زیادی داشته باشد و جریان آن پیوسته و تقریباً ثابت باشد:

تریستورهای ۱ و ۲ تنها زمانی خاموش می شوند که مسیر دیگری برای عبور جریان بار ایجاد شود یعنی زمانی که تریستورهای ۳ و ۴ روشن شوند. همینطور برای تریستورهای ۳ و ۴.



**یکسوساز تمام موج تکفاز**  
( جریان بار ثابت )

متوسط ولتاژ خروجی برای بار مقاومتی:

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

متوسط ولتاژ خروجی برای جریان خروجی ثابت:

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$$

بار با جریان ثابت :

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \rightarrow \begin{cases} \alpha = 0 \rightarrow V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \\ \alpha = \pi \rightarrow V_{dc} = -\frac{2V_m}{\pi} \end{cases}$$

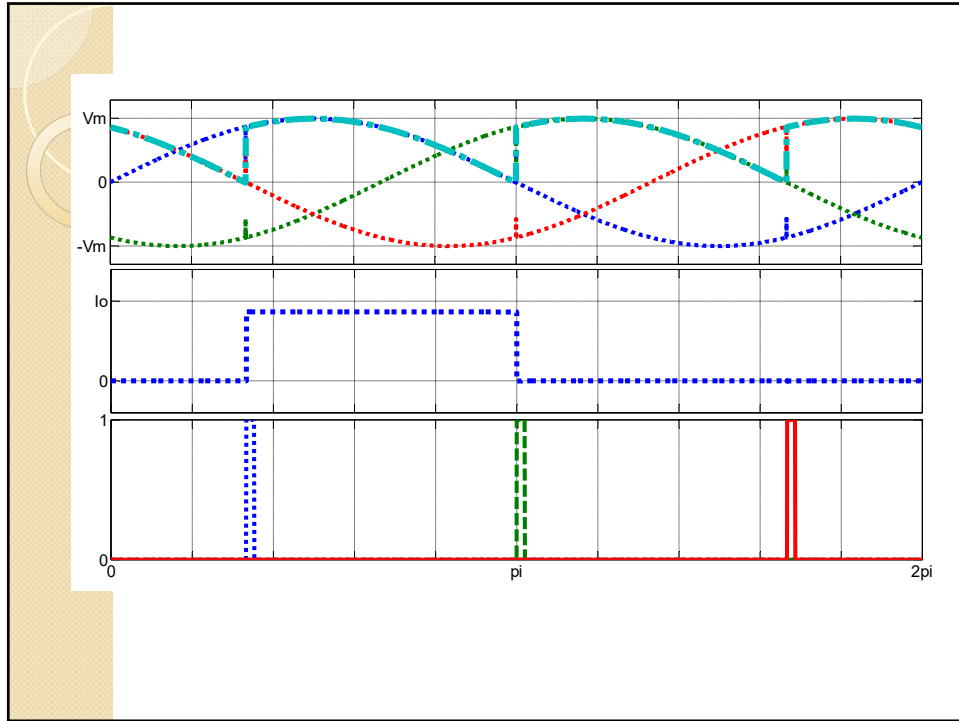
صفحه ولتاژ- جریان

یکسوساز نیم موج سه فاز  
( بار با جریان ثابت )

- هر تریستور با  $\alpha$  درجه تاخیر نسبت به نقطه ای که وارد بایاس مستقیم می شود، روشن می گردد.

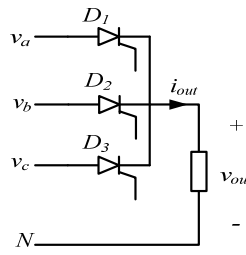
- پس از روشن شدن هر تریستور ولتاژ فاز متصل به آن روی بار افتاده و تریستور تا روشن شدن تریستور بعدی، روشن می ماند.

- پس هر تریستور باید به اندازه  $120^\circ$  درجه هدایت کند.



**یکسوساز نیم موج سه فاز**  
( بار با جریان ثابت )

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha+\pi/6}^{\alpha+5\pi/6} V_m \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos \alpha$$

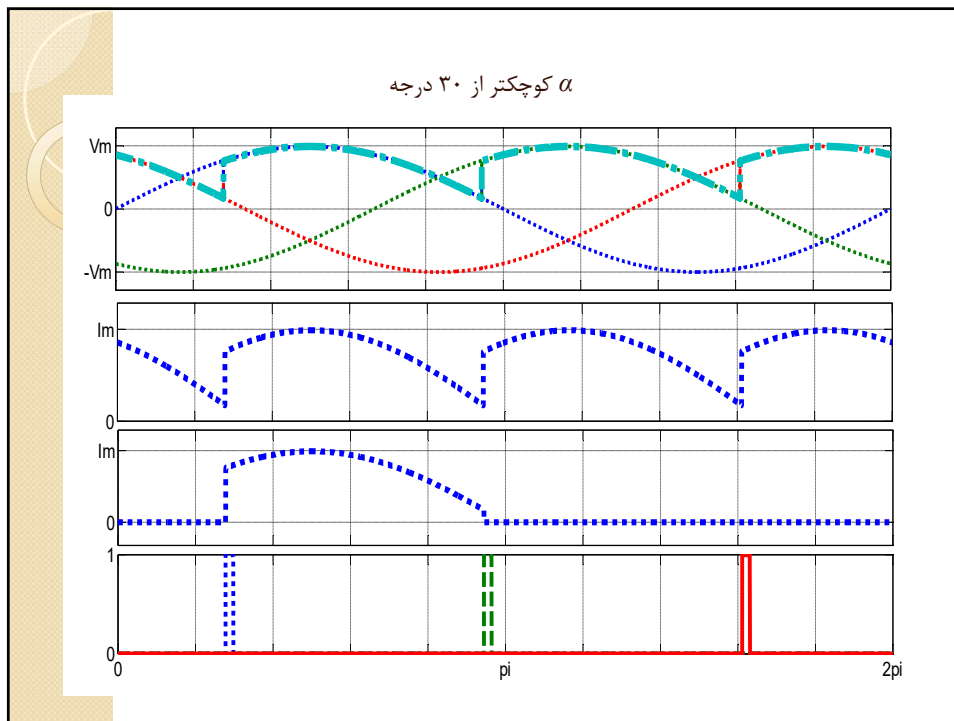


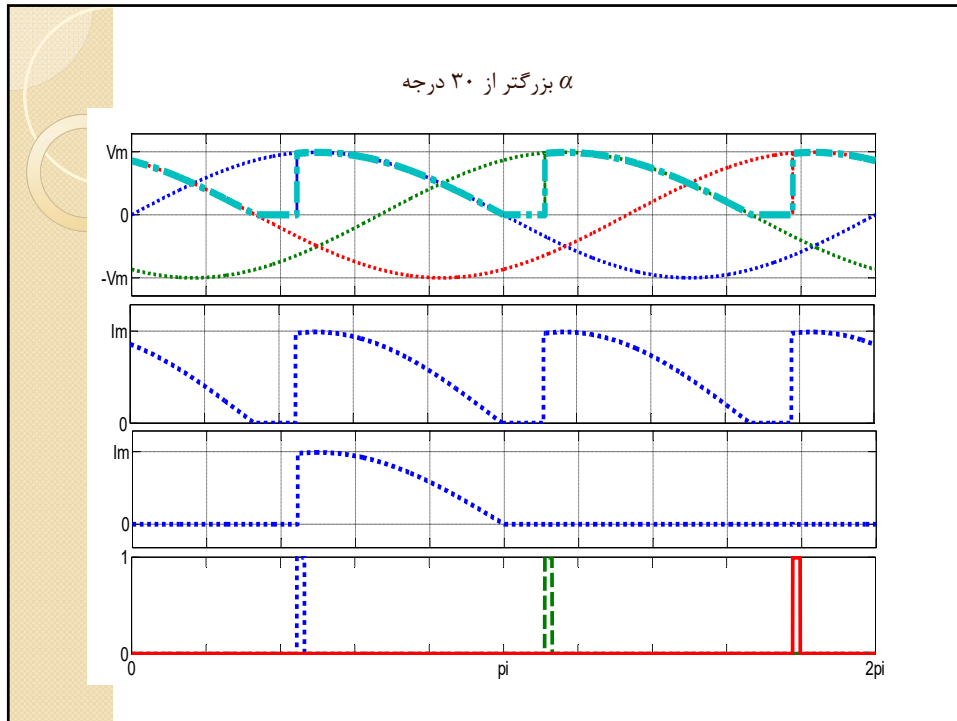
### یکسوساز نیم موج سه فاز

( بار مقاومتی )

- در بار مقاومتی جریان خروجی برای  $\alpha$  کوچکتر از  $30^\circ$  درجه پیوسته بوده و تحلیل مدار مانند قبل است.

- ولی چنانچه  $\alpha$  از  $30^\circ$  درجه بزرگتر باشد، جریان خروجی ناپیوسته شده و در لحظه ای که جریان صفر می شود، تریستوری که روشن بوده خاموش می شود. در اینحالت تحلیل مدار کمی متفاوت می شود.

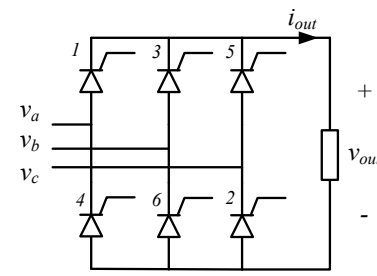




یکسوساز نیم موج سه فاز

-در صورتی که جریان بار ناپیوسته باشد :

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha+\pi/6}^{\pi} V_m \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{3V_m}{2\pi} [1 + \cos(\alpha + \pi/6)]$$



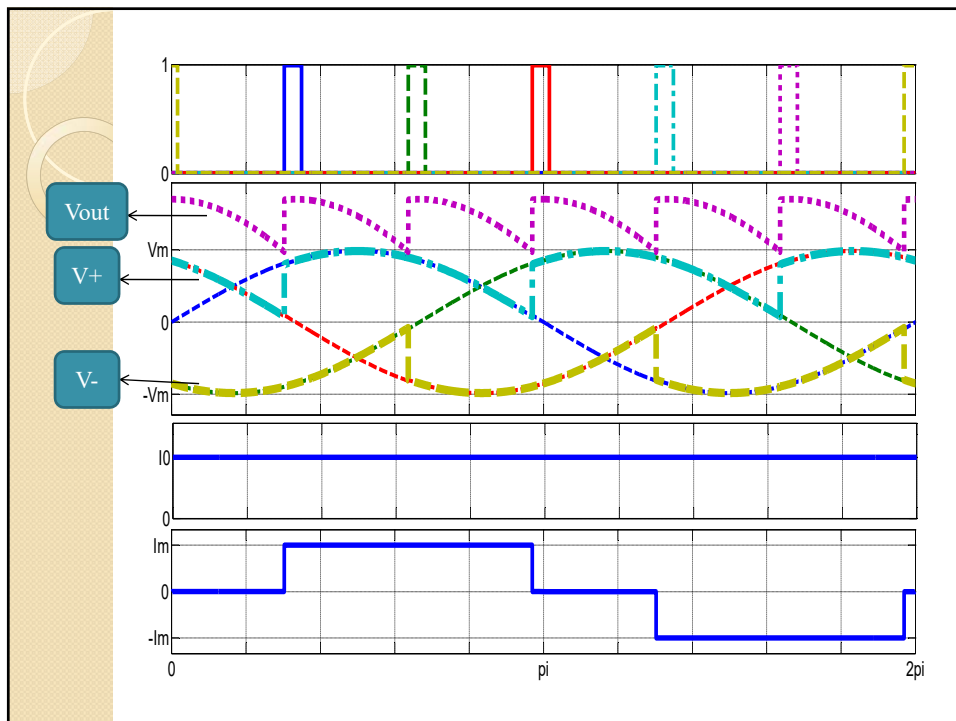
**یکسوساز تمام موج سه فاز**  
( بار با جریان ثابت )

- ترستورهای بالایی تشکیل یک یکسوساز سه فاز نیم موج داده که ولتاژ مثبتی را بر روی سر مثبت بار ایجاد می کنند.

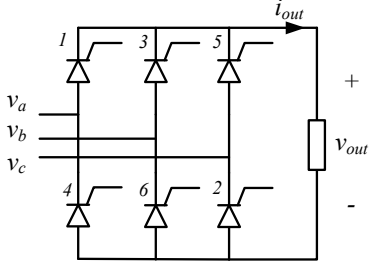
- ترستورهای پایینی نیز یک یکسوساز سه فاز نیم موج تشکیل داده که ولتاژ منفی بر روی سر منفی بار ایجاد می کنند.

- هر ترستور از جایی که وارد بایاس مستقیم می شود با آلفا درجه تاخیر روشن می شود.

- ولتاژ بار از اختلاف ولتاژ سر مثبت و منفی بار به دست می آید.







یکسوساز تمام موج سه فاز  
( بار با جریان ثابت)

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\alpha)$$

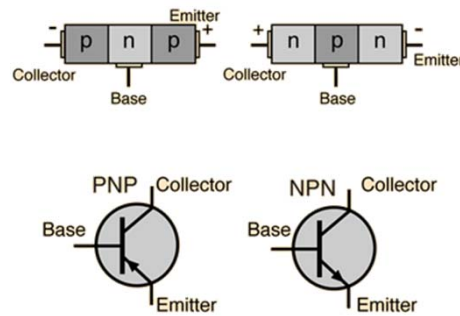
### ترانزیستورهای قدرت

ترانزیستورهای قدرت کلیدهایی هستند که روشن و خاموش شدن آنها، هر دو کنترل شده می باشد.

- ۱- ترانزیستورهای پیوند دوقطبی BJT
- ۲- ترانزیستورهای اثر میدانی با نیمه هادی اکسید فلزی MOSFET
- ۳- ترانزیستورهای دوقطبی با گیت عایق شده IGBT

## :BJT

دارای سه لایه نیمه هادی به فرم PNP یا NPN می باشد.



دارای سه ناحیه کاری است.

۱- ناحیه قطع: جریان اعمالی به بیس کافی نیست و ترانزیستور خاموش (قطع) می باشد.

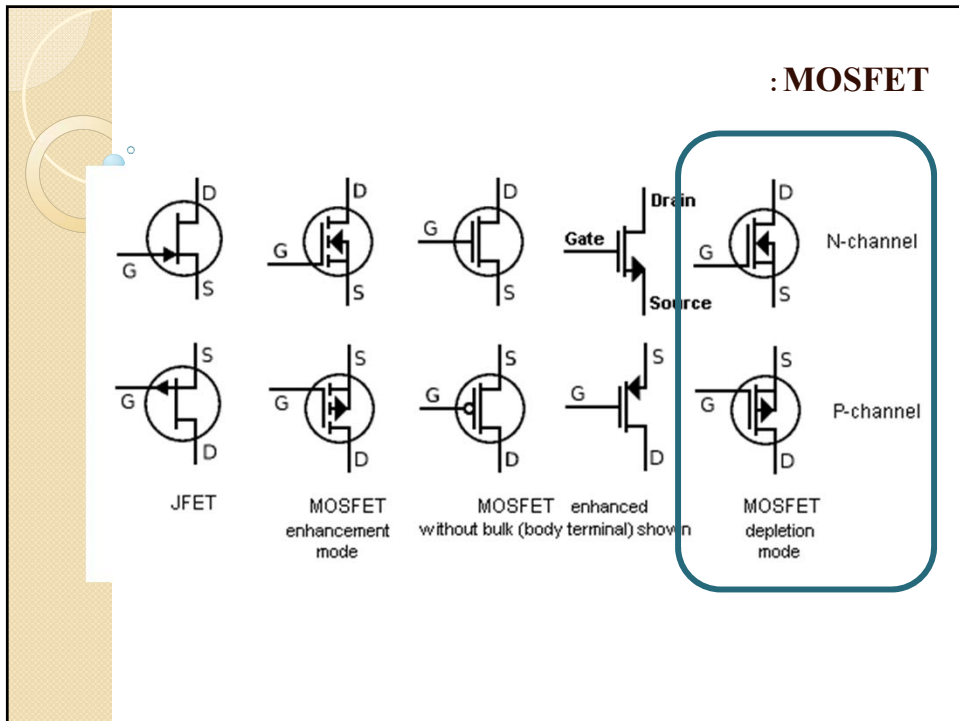
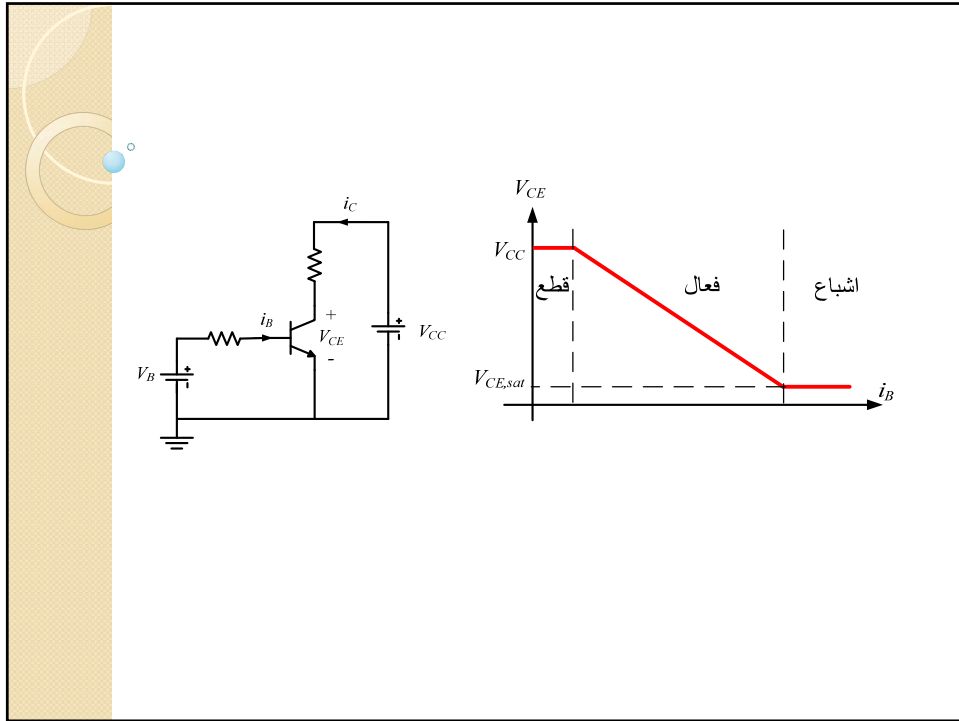
$$V_{CE} > 0 \quad , \quad i_C = 0$$

۲- ناحیه فعال: ترانزیستور مانند یک تقویت کننده عمل کرده و رابطه خطی بین جریان بیس و کلکتور برقرار است.

$$V_{CE} > 0 \quad , \quad i_C = \beta i_B > 0$$

۳- ناحیه اشباع: رابطه جریان بیس و کلکتور از حالت خطی خارج شده و ولتاژ کلکتور-امیتر کمترین مقدار خود را دارد.

$$V_{CE} = V_{CE,sat} \quad , \quad i_C < \beta i_B$$



دارای سه ناحیه کاری است.

۱- ناحیه قطع :  $V_{GS} < V_T$

۲- ناحیه فعال :  $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$

۳- ناحیه اشباع :  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$

$V_T$  ولتاژ آستانه ترانزیستور نام دارد و حداقل ولتاژ مورد نیاز برای روشن شدن است.

مقایسه MOSFET و BJT :

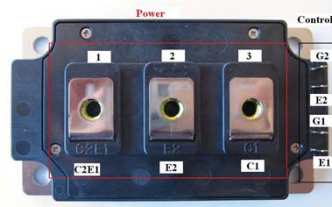
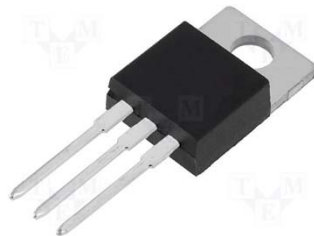
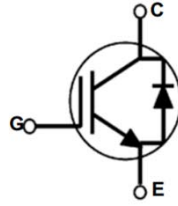
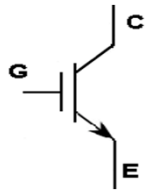
۱- BJTها المانهای کنترل شونده با جریان هستند و MOSFETها با ولتاژ.

۲- MOSFETها تلفات هدایت بیشتر و تلفات کلیدزنی کمتری نسبت به BJTها دارند.

۳- MOSFETها فرکانس کلیدزنی بالاتری دارند و BJTها نرخ ولتاژ-جریان بالاتری دارند.

## IGBT

• ساختار آنها ترکیبی از ساختار MOSFET و BJT است و از مزایای هر دو برخوردار است.

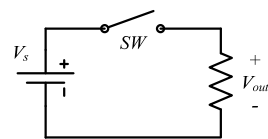


## مبدل های dc/dc (چاپرها)

چاپرها مبدلهای dc به dc هستند که خروجی آنها می تواند کمتر یا بیشتر از ورودی باشد.

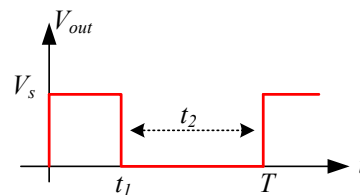
انواع:

- کاهنده
- افزایشده
- کاهنده- افزایشده
- فلای بک
- فوروارد
- ...

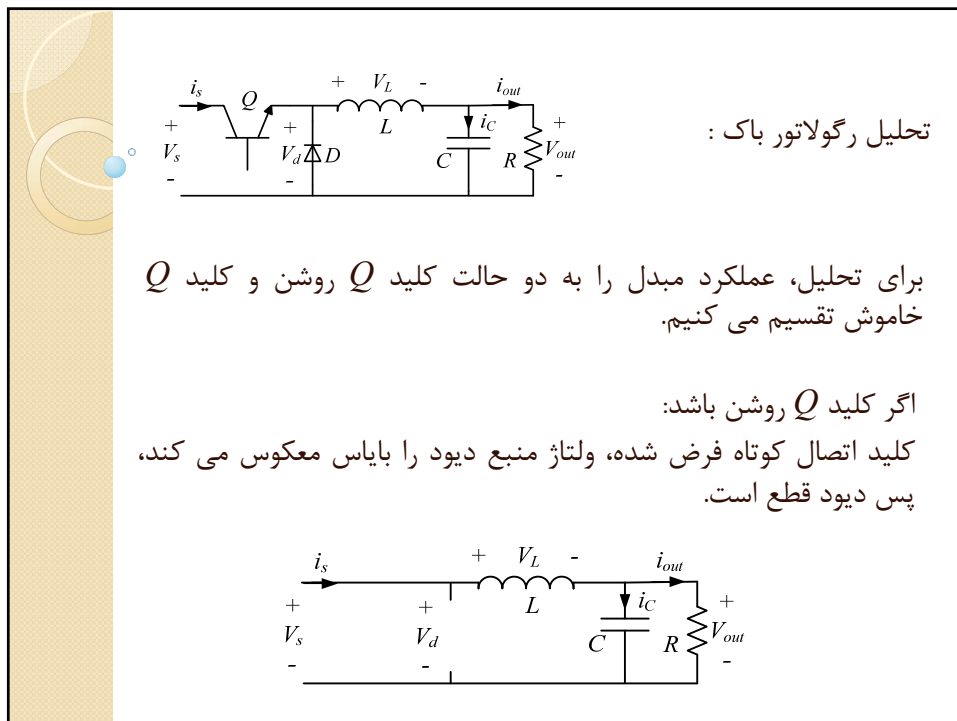
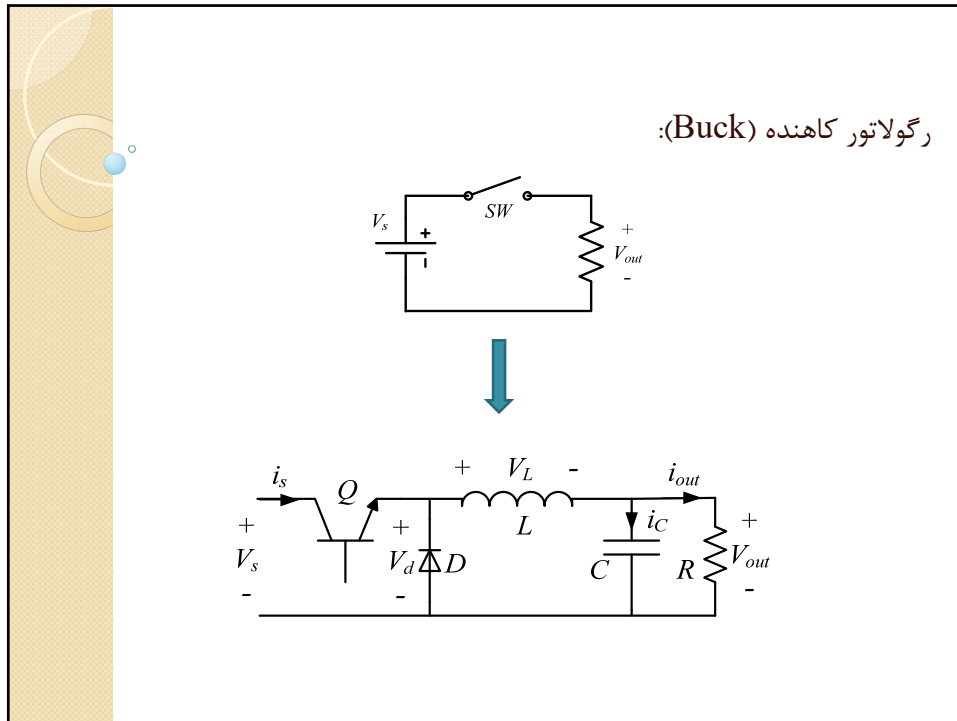


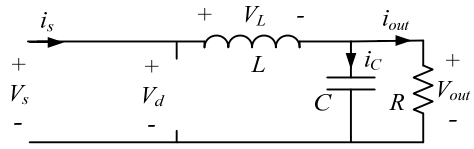
اساس کاهندگی چاپر :

در مدار بالا فرض کنید کلید  $SW$  برای مدت  $t_1$  ثانیه روشن و برای  $t_2$  ثانیه خاموش باشد.



$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} V_s \cdot dt = \frac{t_1}{T} \cdot V_s = k \cdot V_s$$





$$V_s = V_d \quad , \quad V_L = V_s - V_{out}$$

$$i_s = i_L \quad , \quad i_L = i_C + i_{out}$$

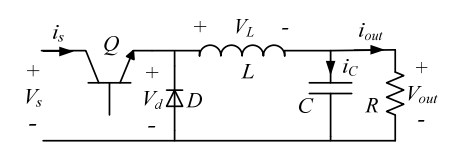
در رابطه ولتاژ دو سر سلف:

ولتاژ منبع و خروجی مقادیر ثابتی دارند.

ولتاژ منبع از خروجی بیشتر است.

جریان افزایشی

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_s - V_{out} \quad \rightarrow \quad V_L = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = V_s - V_{out}$$

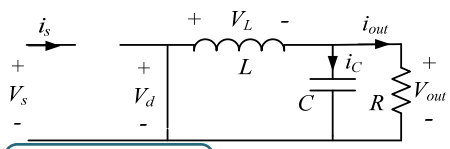
$$\xrightarrow{\Delta t = t_1} \quad \Delta i_L = \frac{t_1}{L} (V_s - V_{out}) \quad , \quad \Delta i_L = I_2 - I_1$$


اگر کلید  $Q$  خاموش باشد:

کلید مدار باز فرض شده، ولتاژ منبع از مدار جدا شده و جریان سلف، دیود را روشن می کند.

$$V_d = 0 \quad , \quad V_L = -V_{out} \quad , \quad i_s = 0 \quad , \quad i_L = i_C + i_{out}$$





جریان کاهشی

$$V_L = L \frac{di'_L}{dt} = -V_{out} \rightarrow V_L = L \frac{\Delta i'_L}{\Delta t} = -V_{out}$$

$$\xrightarrow{\Delta t = t_2} \Delta i_L = \frac{t_2}{L} V_{out}, \quad \Delta i'_L = -\Delta i_L = I_1 - I_2$$

با مساوی قرار دادن دو رابطه ۱ و ۲:

$$V_{out} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} V_s = k V_s$$

تلفات مدار صفر باشد:

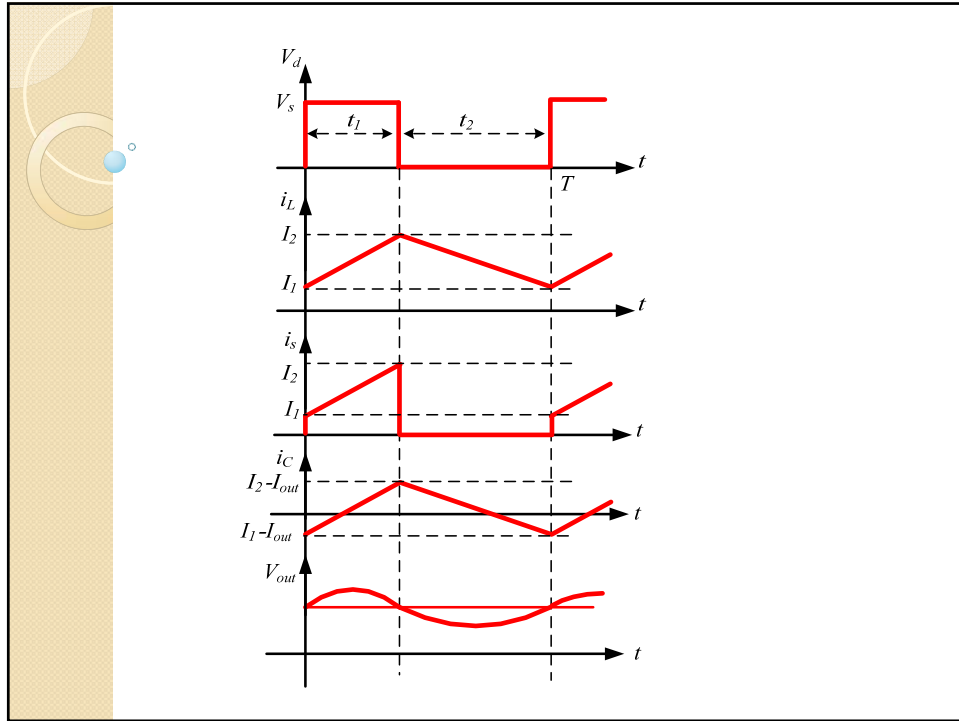
$$P_s = P_{out} \rightarrow i_s = k i_{out}$$

از روابط ۱ و ۲ همچنین داریم:

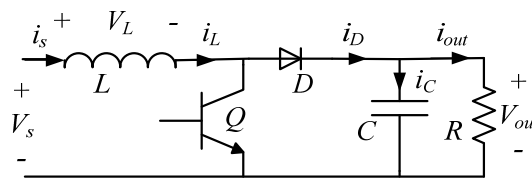
$$T = t_1 + t_2 = \frac{1}{f} \rightarrow \Delta i_L = \frac{V_s(1-k)k}{fL}$$

نوسان ولتاژ خروجی حول مقدار  $V_{out}$  عبارت است از:

$$\Delta v_{out} = \Delta v_C = \frac{V_s(1-k)k}{8LCf^2}$$



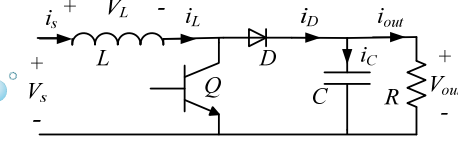
رگولاتور افزایشنده (BOOST)



در این رگولاتور متوسط ولتاژ خروجی بیشتر از ورودی میباشد.

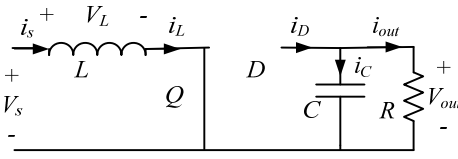
تغییر سطح ولتاژ با ذخیره انرژی الکتریکی در سلف و آزادسازی آن در خازن صورت میگیرد.

رگولاتور افزایشدهنده (BOOST)

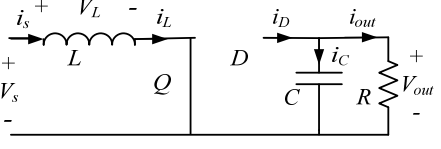


برای تحلیل عملکرد رگولاتور دو حالت وصل و قطع کلید را فرض می کنیم.

اگر کلید Q وصل باشد آنگاه:



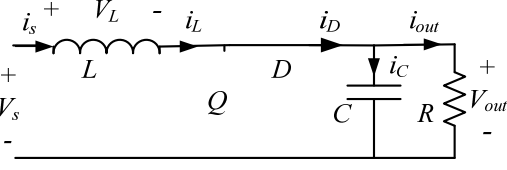
کلید اتصال کوتاه و دیود حتماً قطع است.

$$i_s = i_L \quad , \quad i_C = -i_{out} \quad , \quad V_L = V_s$$


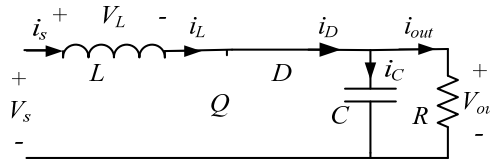
1

$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} = L \frac{\Delta i_L}{t_1} \rightarrow \Delta i_L = \frac{t_1}{L} V_s \quad , (\Delta i_L = I_2 - I_1)$$

اگر کلید Q قطع باشد پس دیود حتماً روشن میشود.



$$i_s = i_L = i_D \quad , \quad i_D = i_C + i_{out} \quad , \quad V_L = V_s - V_{out}$$



$$V_L = V_s - V_{out} = L \frac{di'_L}{dt} = L \frac{\Delta i'_L}{t_2} \rightarrow$$

$$\textcircled{۲} \Delta i'_L = \frac{t_2}{L} (V_s - V_{out}) \quad , (\Delta i'_L = I_1 - I_2 = -\Delta i_L)$$

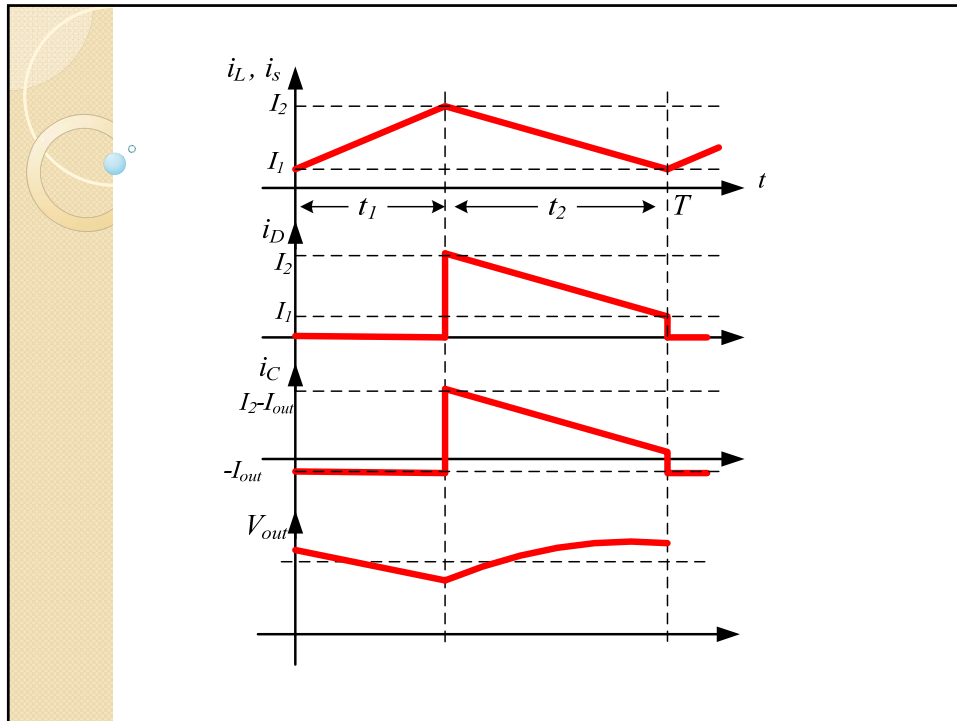
$$\textcircled{۲ \text{ او}} \Delta i_L = \frac{t_1}{L} V_s = \frac{t_2}{L} (V_{out} - V_s) \rightarrow V_{out} = \frac{1}{1-k} V_s$$

$$k = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \rightarrow V_{out} = \begin{cases} V_s \\ \infty \end{cases} \quad i_s = \frac{1}{1-k} i_{out}$$

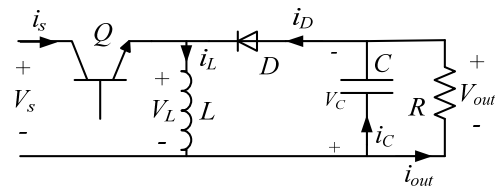
$$\textcircled{۲ \text{ او}} T = t_1 + t_2 = \frac{1}{f} \rightarrow \Delta i_L = \frac{V_s \cdot k}{fL}$$

$$\Delta V_C = \Delta V_{out} = \frac{I_{out} \cdot k}{fC}$$

- ❖ بدون استفاده از ترانسفورمر ولتاژ خروجی را افزایش میدهد.
- ❖ بازده بالایی دارد.
- ❖ حساسیت ولتاژ خروجی در برابر تغییرات k وقتی k به سمت ۱ میرود شدیداً افزایش مییابد.

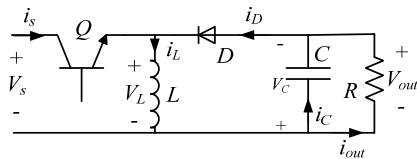


رگولاتور کاهنده - افزایشنده (Buck- Boost)

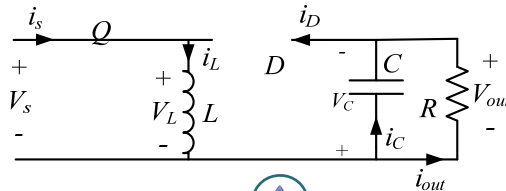


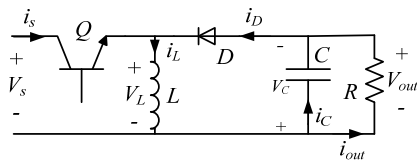
در این رگولاتور متوسط ولتاژ خروجی میتواند بیشتر یا کمتر از ورودی باشد.

پلاریته ولتاژ خروجی عکس پلاریته ولتاژ ورودی است.

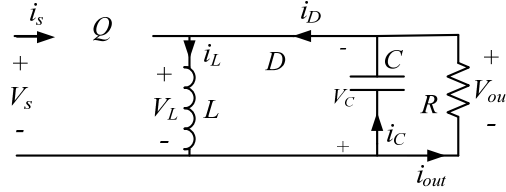


اگر کلید وصل باشد، دیود حتماً قطع است.



$$V_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} = L \frac{\Delta i_L}{t_1} \rightarrow \Delta i_L = \frac{t_1}{L} V_s, (\Delta i_L = I_2 - I_1)$$


اگر کلید قطع شود، دیود حتماً روشن می شود.



$$V_L = V_{out} = L \frac{di'_L}{dt} = L \frac{\Delta i'_L}{t_2} \rightarrow \Delta i'_L = \frac{t_2}{L} V_{out}$$

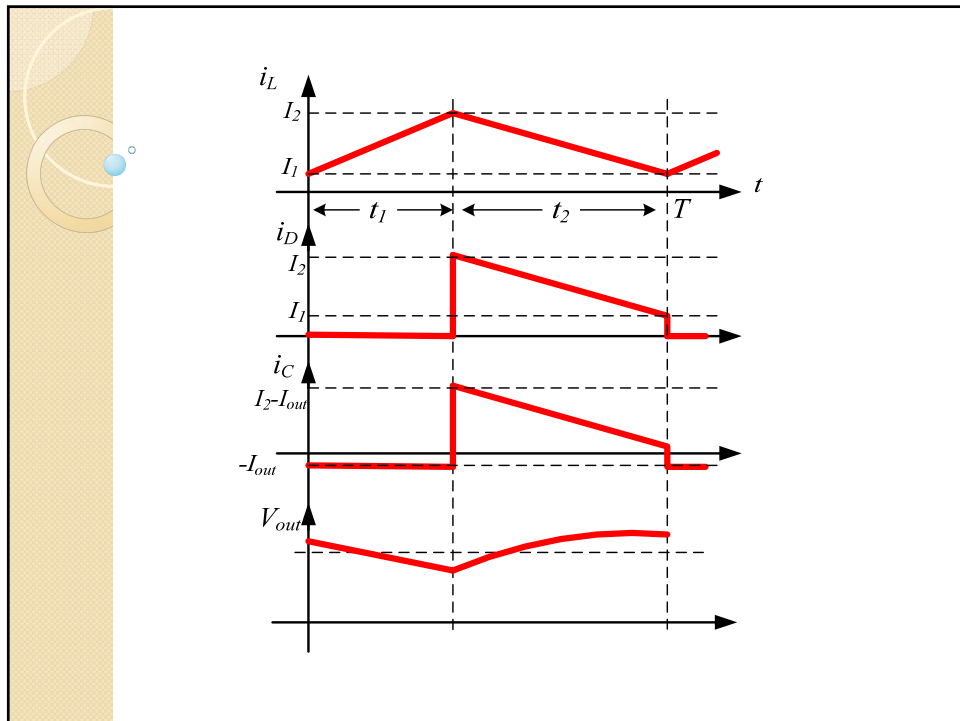
$$(\Delta i'_L = I_1 - I_2 = -\Delta i_L)$$

$\Delta i_L = \frac{t_1}{L} V_s = -\frac{t_2}{L} V_{out} \rightarrow V_{out} = -\frac{k}{1-k} V_s$

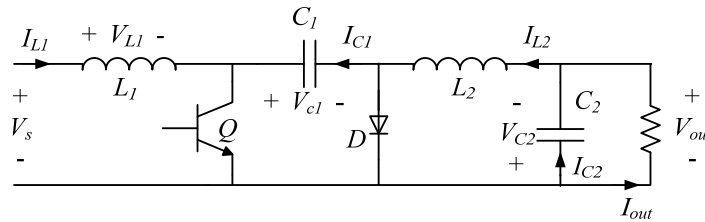
$k = \begin{cases} 0 \\ 0.5 \\ 1 \end{cases} \rightarrow V_{out} = \begin{cases} 0 \\ -V_s \\ -\infty \end{cases} \quad i_s = \frac{-k}{1-k} i_{out}$

$T = t_1 + t_2 = \frac{1}{f} \rightarrow \Delta i_L = \frac{V_s \cdot k}{fL}$

$\Delta V_C = \Delta V_{out} = \frac{I_{out} \cdot k}{fC}$



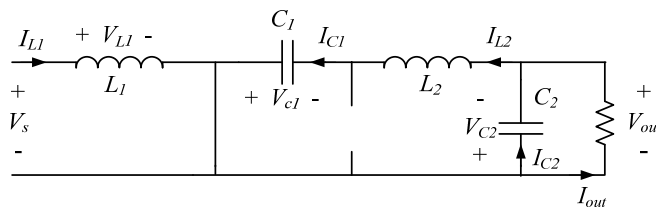
رگولاتور کیوک (Cuk)



در این رگولاتور متوسط ولتاژ خروجی میتواند بیشتر یا کمتر از ورودی باشد.

پلاریته ولتاژ خروجی عکس پلاریته ولتاژ ورودی است.

اگر سویچ وصل باشد. ولتاژ خازن C1 دیود را بایاس معکوس میکند و دیود قطع میشود.

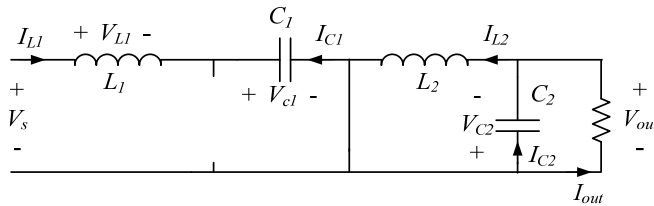


سلف L1 شروع به شارژ میکند و خازن C1 انرژی بار را تامین میکند.

$$V_L = V_s = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{t_1} \rightarrow \Delta i_{L1} = \frac{t_1}{L_1} V_s, (\Delta i_{L1} = I_2 - I_1)$$



اگر سویچ قطع باشد. خازن C1 از طریق منبع شارژ شده و بار از طریق انرژی L2 تغذیه میشود. دیود وصل می باشد.



به واسطه ولتاژ روی C1، جریان سلف L1 به طور خطی کاهش می یابد.

$$V_L = V_s - V_{C1} = -L_1 \frac{\Delta i_{L1}}{t_2}$$

متوسط ولتاژ خازن C1:

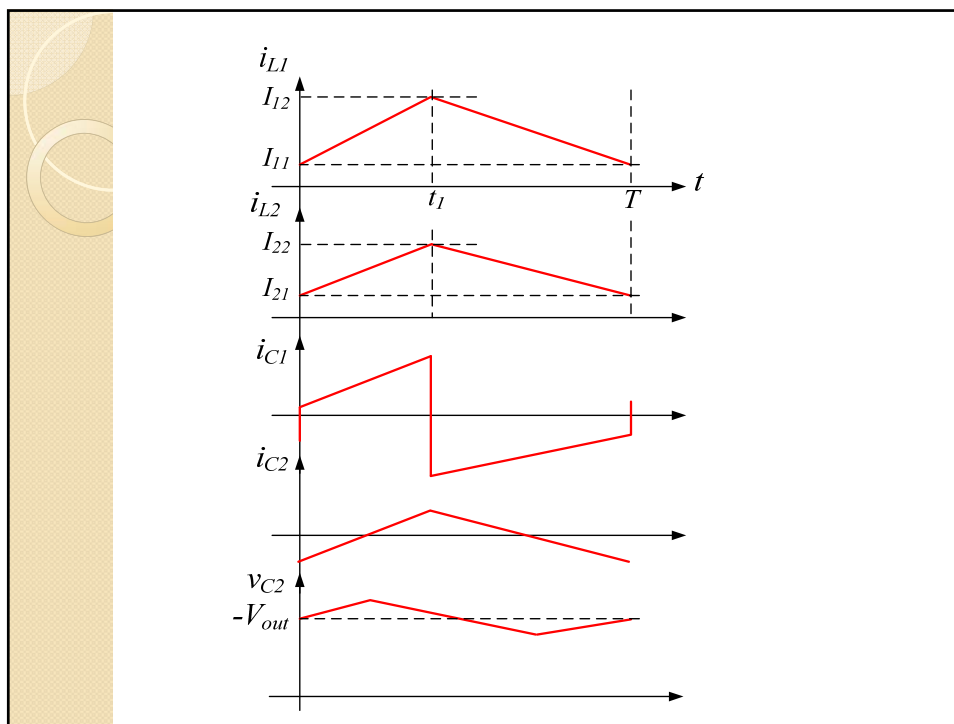
$$V_{C1} = \frac{V_s}{1-k}$$

جریان سلف L2 نیز به طور خطی در زمان t1 افزایش و در زمان t2 کاهش می یابد.

$$V_{C1} + V_{out} = L_2 \frac{\Delta i_{L2}}{t_1} \quad V_{out} = -L_2 \frac{\Delta i_{L2}}{t_2}$$

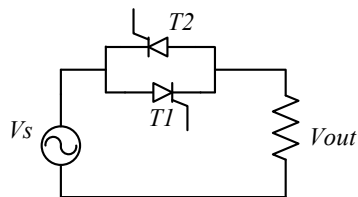
$$V_{C1} = -\frac{V_{out}}{k} \quad V_{out} = -\frac{kV_s}{1-k}$$

$$\Delta i_{L1} = \frac{kV_s}{fL_1} \quad \Delta i_{L2} = \frac{kV_s}{fL_2} \quad \Delta V_{C2} = \frac{kV_s}{8C_2L_2f^2}$$

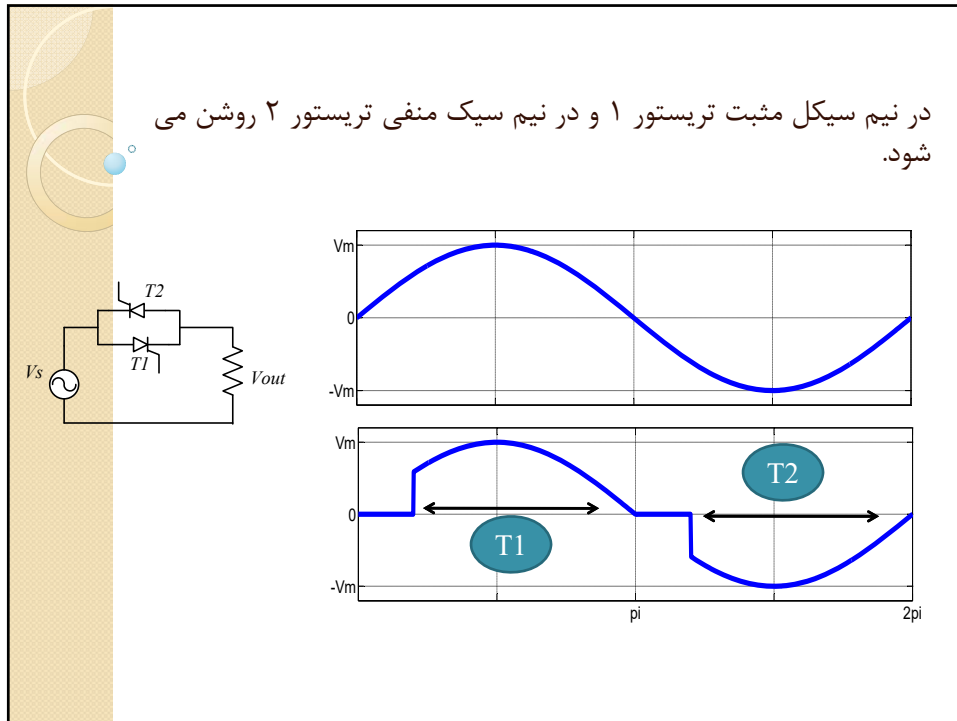


### کنترل ولتاژ متناوب

در این مبدل با کنترل تریستورها می توان مقدار موثر ولتاژ خروجی را کنترل نمود. (مبدل ac/ac)



در هر نیم سیکل یکی از دیودها با آلفا درجه تاخیر روشن میشود.



مقدار موثر ولتاژ خروجی:

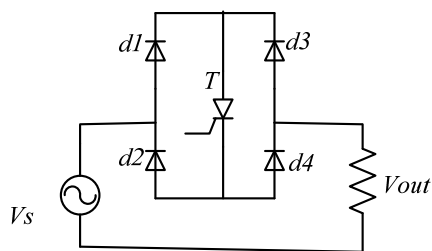
$$V_{out,rms} = \left[ \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_m \sin \omega t)^2 d\omega t \right]^{0.5} =$$

$$\frac{V_m}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{0.5}$$

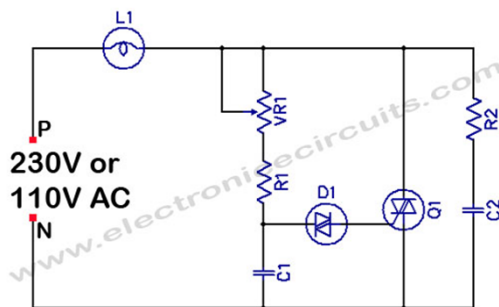
$$0 \leq \alpha \leq \pi \quad \Rightarrow \quad 0 \leq V_{out,rms} \leq \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

مشکل مبدل: نیاز به دو زمین مجزا برای کنترل تریستورها

راه حل: استفاده از مدار زیر

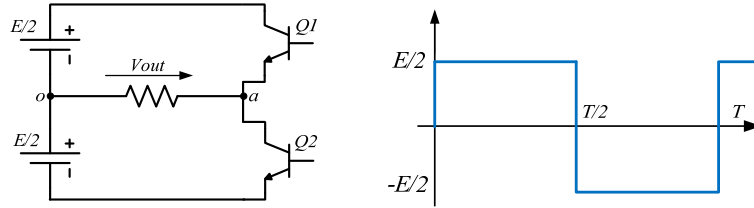


کاربرد: کنترل سرعت موتور AC- دایمر



## اینورتر تکفاز

اینورتر نیم پل مربعی:



هر کلید به مدت نصف دوره تناوب روشن می گردد.

$$V_{out,rms} = \left( \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \frac{E^2}{4} dt \right)^{0.5} = \frac{E}{2}$$

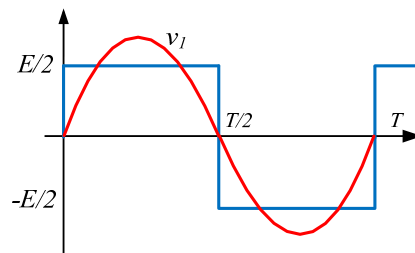
مقدار موثر ولتاژ خروجی:

$$v_{out}(\omega t) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{2E}{n\pi} \sin n\omega t$$

بسط سری فوریه ولتاژ خروجی:

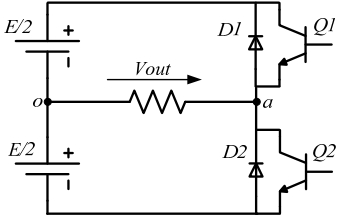
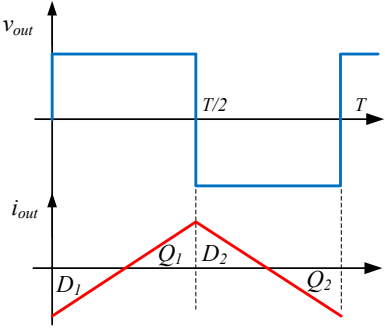
دامنه و مقدار موثر مولفه اصلی در ولتاژ خروجی:

$$v_1(\omega t) = \frac{2E}{\pi} \sin \omega t \rightarrow V_1 = \frac{2E}{\pi} \rightarrow V_{1,rms} = \frac{2E}{\pi\sqrt{2}} = 0.45E$$



بار با خاصیت سلفی:

جریان بار نمی تواند مانند ولتاژ سریعاً تغییر علامت دهد.  
به دیود هرزگرد نیاز است.

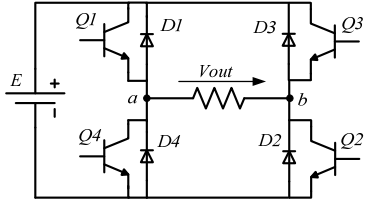
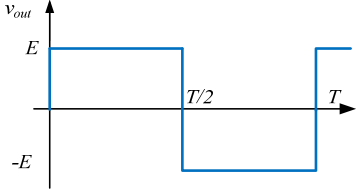



$$i_{out}(\omega t) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{2E}{n\pi\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1}(n\omega L / R)$$

رابطه جریان بار:

اینورتر پل مربعی:

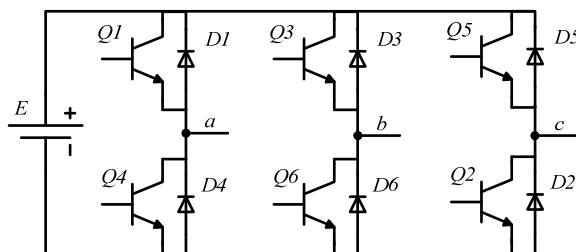
$$V_{out,rms} = \left( \frac{2}{T} \int_0^{T/2} E^2 dt \right)^{0.5} = E$$

$$v_{out}(\omega t) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} \sin n\omega t$$

$$v_1(\omega t) = \frac{4E}{\pi} \sin \omega t \rightarrow V_1 = \frac{4E}{\pi} \rightarrow V_{1,rms} = \frac{4E}{\pi\sqrt{2}} = 0.9E$$

$$i_{out}(\omega t) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4E}{n\pi\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) , \quad \varphi_n = \tan^{-1}(n\omega L / R)$$

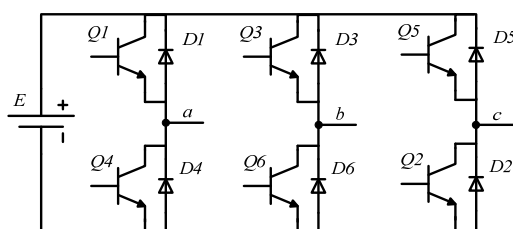
## اینورتر سه فاز



-هدایت ۱۸۰ درجه

- هدایت ۱۲۰ درجه

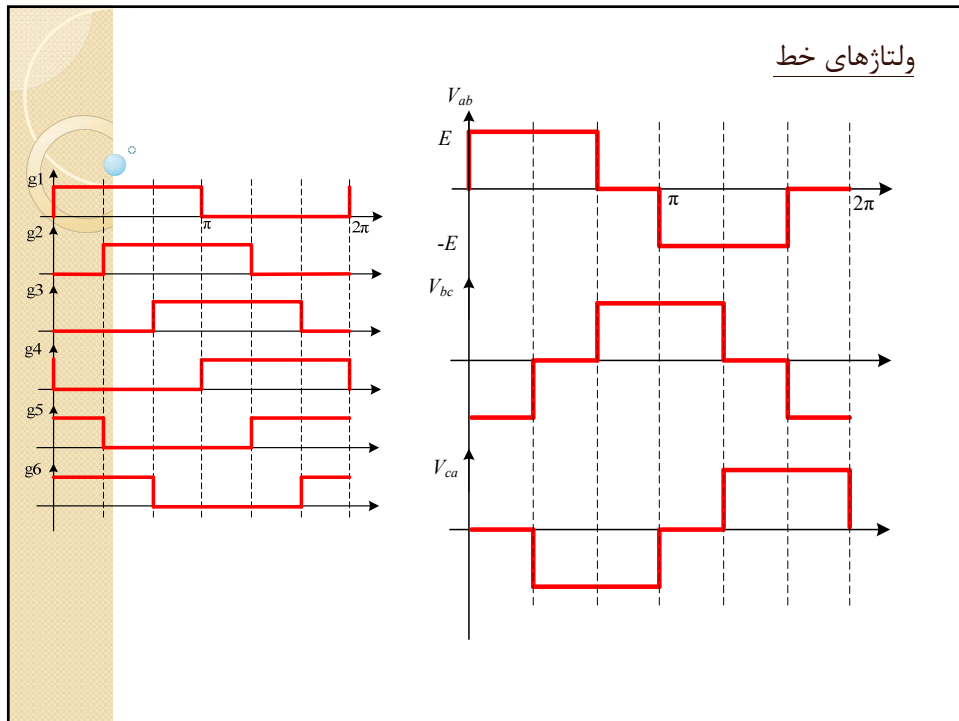
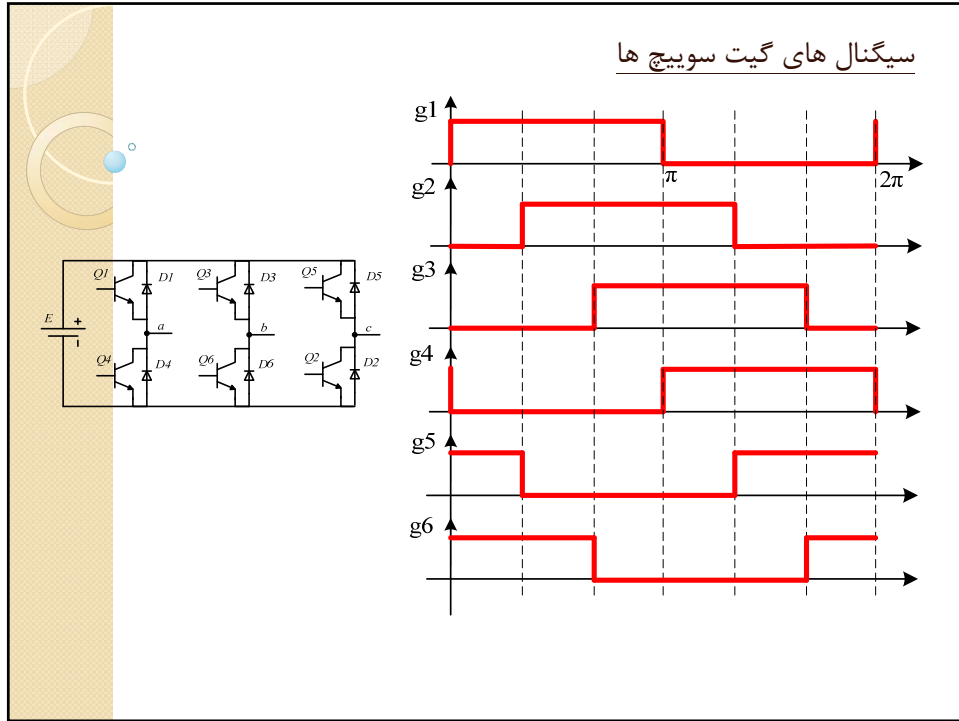
## هدایت ۱۸۰ درجه:



هر سویچ برای ۱۸۰ درجه هدایت می کند.

سویچ های بالایی باهم ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند و سویچ های پایینی نیز با هم.

هر دو سویچ روی یک شاخه باهم ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند.





ولتاژهای خط:

$$v_{ab}(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{4E}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \cdot \sin n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \right]$$

$$v_{bc}(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{4E}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \cdot \sin n\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

$$v_{ca}(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{4E}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \cdot \sin n\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right) \right]$$

هارمونیک های مضرب ۳ در ولتاژ خط وجود ندارند.

مقدار موثر ولتاژ خط:

$$V_{L,rms} = \left( \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} E^2 d\omega t \right)^{0.5} = \sqrt{\frac{2}{3}} E = 0.817E$$

مقدار موثر ولتاژ فاز:

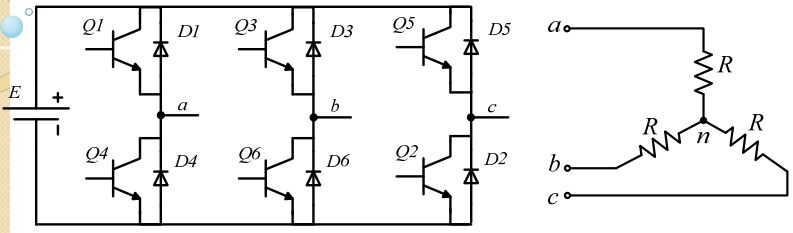
$$V_{p,rms} = \frac{V_{L,rms}}{\sqrt{3}} = 0.471E$$

تعیین ولتاژ فاز

$0 \leq \omega t < \frac{\pi}{3} : Q_1, Q_5, Q_6 \text{ (ON)}$

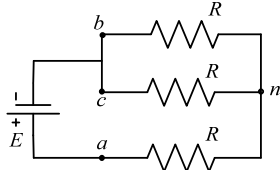
$$i = \frac{E}{\frac{3}{2}R} = \frac{2E}{3R} \rightarrow \begin{cases} v_{an} = v_{cn} = \frac{E}{3} \\ v_{bn} = -\frac{2E}{3} \end{cases}$$

تعیین ولتاژ فاز

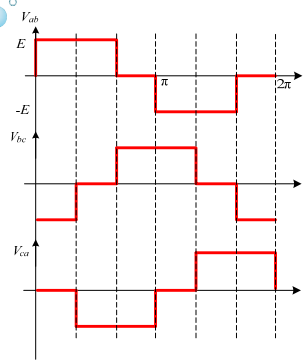
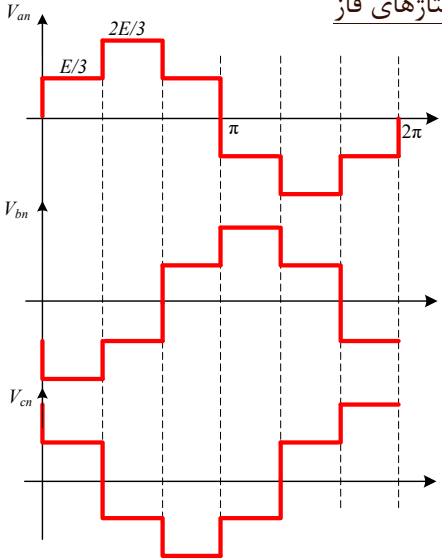


$$\frac{\pi}{3} \leq \omega t < \frac{2\pi}{3} : Q_1, Q_2, Q_6 (ON)$$

$$i = \frac{-2E}{3R} \rightarrow \begin{cases} v_{bn} = v_{cn} = \frac{-E}{3} \\ v_{an} = \frac{2E}{3} \end{cases}$$

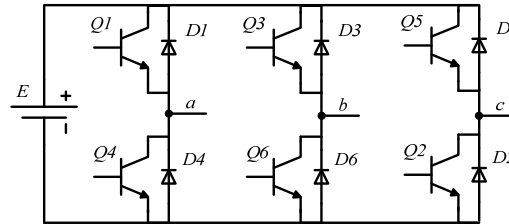


ولتاژهای فاز

از تفاضل دو به دو ولتاژهای فاز میتوان ولتاژهای خط را به دست آورد.

هدایت ۱۲۰ درجه:



هر سویچ برای ۱۲۰ درجه هدایت می کند.

در هر لحظه فقط دو سویچ روشن هستند.

ترتیب هدایت سویچ ها عبارت است از : ۱-۲، ۲-۳، ۳-۴، ۴-۵، ۵-۶، ۶-۱ و ۱-۲.

**مثال** یک اینورتر سه فاز با هدایت ۱۸۰ درجه و بار ستاره با مقاومت ۵ اهم و اندوکتانس ۲۳ میلی هانری مفروض است. فرکانس خروجی اینورتر ۶۰ هرتز و ولتاژ منبع ورودی ۲۲۰ ولت است. الف) ولتاژ و جریان خط را بر حسب سری فوریه بیان کنید. ب) مقادیر ولتاژ موثر خط، ولتاژ موثر فاز، ولتاژ موثر هارمونی اصلی خط، THD ولتاژ خط و جریان موثر خط را حساب کنید.

$$v_{ab}(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{4E}{n\pi} \cdot \cos \frac{n\pi}{6} \cdot \sin n\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \right] = \quad \text{حل: الف)}$$

$$242.58 \sin(377t + 30^\circ) - 48.52 \sin 5(377t + 30^\circ) - 34.66 \sin 7(377t + 30^\circ) + 22.05 \sin 11(377t + 30^\circ) + \dots$$

$$Z_{Ln} = \sqrt{R^2 + (nL\omega)^2} \quad , \quad \varphi_n = \tan^{-1}(nL\omega / R) \quad \rightarrow$$

$$i_a = 14 \sin(377t - 60^\circ) - 0.64 \sin(5 \times 377t - 83.4^\circ) - 0.33 \sin(7 \times 377t - 85.3^\circ) + 0.13 \sin(11 \times 377t - 87^\circ) + \dots$$

(ب)

$$V_{L,rms} = 0.8165 \times 220 = 179.63 (V)$$

$$V_{p,rms} = 0.4714 \times 220 = 103.7 (V)$$

$$V_{L1,rms} = \frac{242.58}{\sqrt{2}} = 171.53 (V)$$

$$V_{L,ac} = V_{L,rms} = 179.63 (V)$$

$$THD = \frac{\sqrt{V_{L,ac}^2 - V_{L1,rms}^2}}{V_{L1,rms}} = 31.09\%$$

محاسبه مقدار موثر جریان بار:

$$i_{a,rms} = \frac{\sqrt{14^2 + 0.64^2 + 0.33^2 + 0.13^2 + \dots}}{\sqrt{2}} \approx 9.91 (A)$$

## کنترل ولتاژ اینورترها

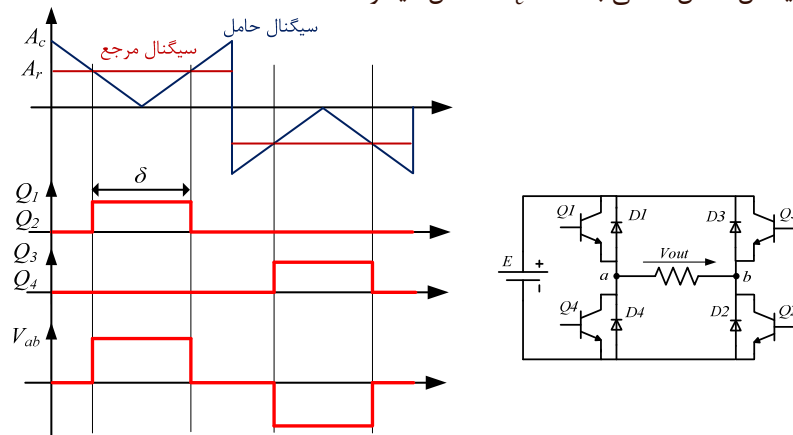
۱- غلبه بر تغییرات ولتاژ ورودی  
 ۲- تنظیم ولتاژ خروجی

مدولاسیون پهنای پالس: به منظور کنترل ولتاژ خروجی پهنای (عرض) پالس کنترل سوییچ ها تنظیم می شود.

۱- مدولاسیون پهنای پالس منفرد  
 ۲- مدولاسیون پهنای پالس چندگانه  
 ۳- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی

مدولاسیون پهنای پالس منفرد:

- هر نیم سیکل تنها یک پالس وجود دارد که پهنای آن تنظیم میشود.
- سیگنالهای کنترل از مقایسه یک سیگنال مرجع مربعی با دامنه  $A_r$  با یک سیگنال حامل مثلثی با دامنه  $A_c$  حاصل میشود.



فرکانس سیگنال مرجع، فرکانس ولتاژ خروجی را تعیین میکند.

با تغییر  $A_r$ ، پهنای پالس را می توان از ۰ تا ۱۸۰ درجه تغییر داد.

نسبت  $A_r$  به  $A_c$  شاخص مدولاسیون نام دارد.

$$M = \frac{A_r}{A_c}$$

مقدار موثر ولتاژ خروجی:

$$V_{ab,rms} = E \sqrt{\frac{\delta}{\pi}}$$

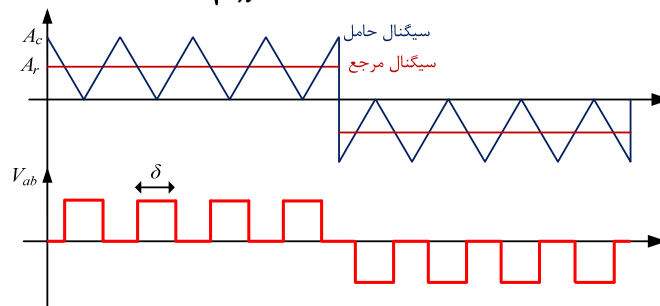
مدولاسیون پهنا‌ی پالس چندگانه:

- هر نیم سیکل چندین پالس وجود دارد که پهنا‌ی آن تنظیم میشود.
- فرکانس سیگنال مرجع، فرکانس ولتاژ خروجی را مشخص میکند.
- فرکانس سیگنال مرجع، تعداد پالسهای موجود در هر نیم سیکل را مشخص میکند.

$$p = \frac{f_c}{2f_r} \text{ : تعداد پالس در هر نیم سیکل}$$

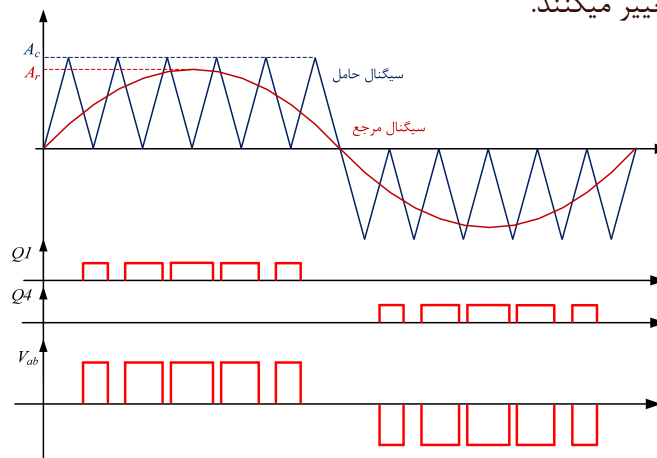
$$V_{ab,rms} = E \sqrt{\frac{p\delta}{\pi}}$$

موثر ولتاژ خروجی:



مدولاسیون پهنا‌ی پالس سینوسی:

- هر نیم سیکل چندین پالس وجود دارد که پهنا‌ی آنها تنظیم میشود.
- پهنا‌ی پالس ها برابر نبوده و متناسب با دامنه یک سیگنال مرجع سینوسی تغییر میکنند.



چنانچه  $p$  تعداد پالسها در یک نیم سیکل باشد، در این روش تمام هارمونیکهای تا مرتبه  $2p-1$  حذف میگردند.

