جزوه درس:

الکترونیک صنعتی

استاد:

امیر بکتاش

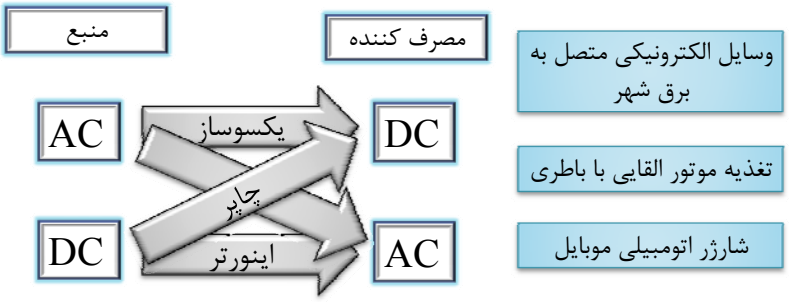
http://research.iaun.ac.ir/pd/abaktash

مرداد ۱۳۹۴

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:

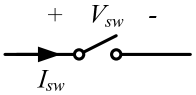


1

- 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 سوییچ زنی (روشن – خاموش شدن) تبدیل انرژی را انجام می دهند.

- در یک سوییچ ایده آل



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

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

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

2

یادآوری

۱- سه کمیت در شکل موج های متناوب:

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

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

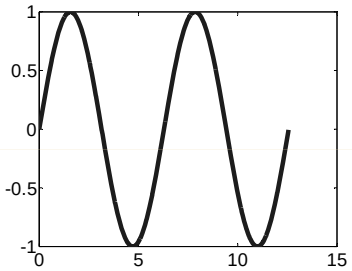
- مقدار پیک یا ماکزیمم (f_{max}, f_m, f_{peak})
- مقدار متوسط یا میانگین ($f_{ave}, f_{mean}, f_{dc}$) : متوسط مقدار یک شکل موج متناوب را می دهد و برابر با حاصل جمع تمام نقاط شکل تقسیم بر تعداد آنها می باشد. که در حالت پیوسته می شود:

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

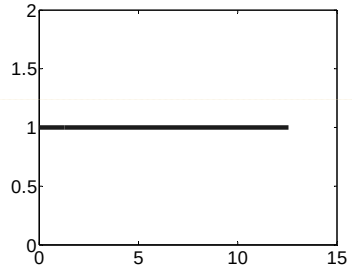
3

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکناش

یادآوری



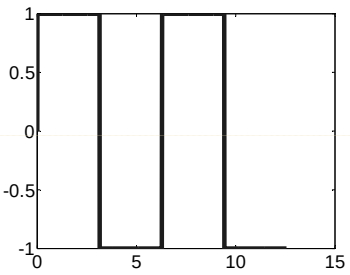
$$f_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f_m \sin\omega t \cdot d\omega t = 0$$



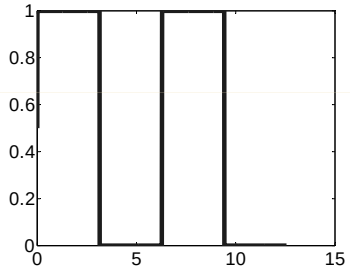
$$f_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} 1 \cdot d\omega t = 1$$

4

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:

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

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

یادآوری

- تئوری فوریه :

-یک تابع متناوب با فرکانس ω 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

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

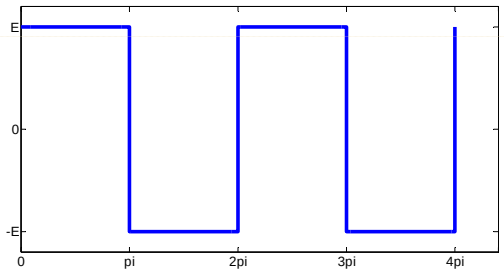
$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos n\omega t\, d\omega t$$

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

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

یادآوری

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



یادآوری

یادآوری

- دامنه هارمونیک اول :

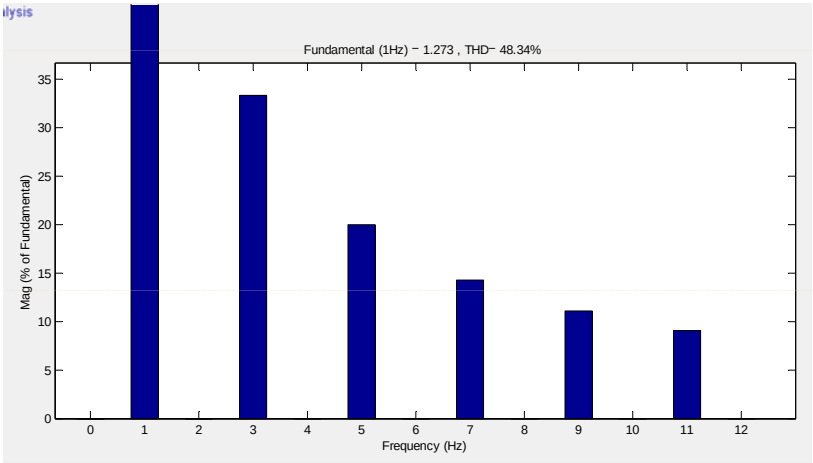
-شکل موج هارمونیک اول :

- دامنه هارمونیک دوم:

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکتاش

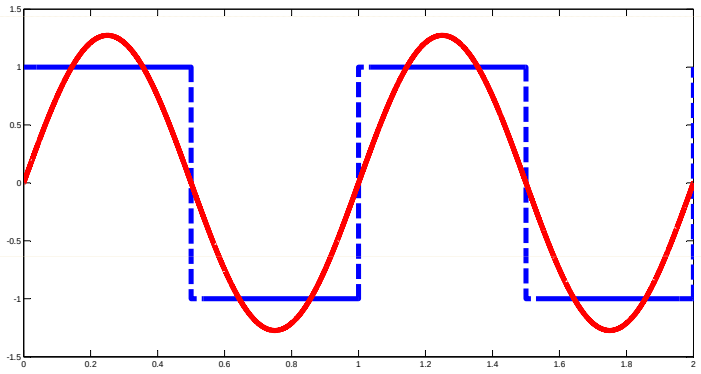
یادآوری

-دامنه هارمونی های ۱ تا ۱۲



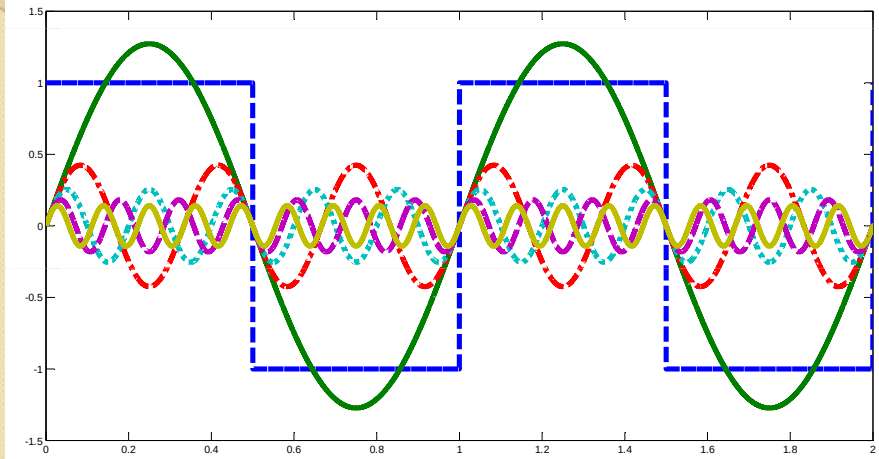
یادآوری

-شکل موج اصلی و هارمونی اول آن



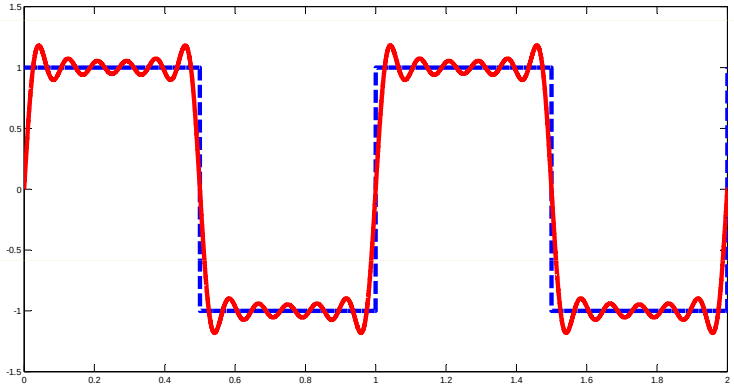
یادآوری

-شکل موج اصلی و هارمونی اول تا نهم



یادآوری

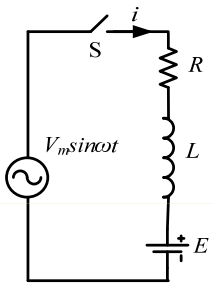
-شکل موج اصلی و جمع هارمونی های اول تا یازدهم



15

یادآوری

- جریان در یک بار RLE:



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

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

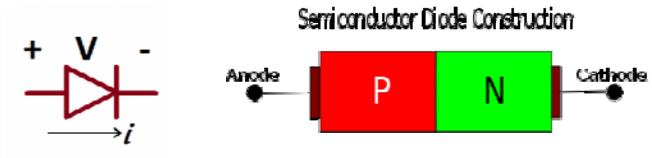
$$Z=\sqrt{R^2+(L\omega)^2}\quad,\quad \varphi=\tan^{-1}(\frac{L\omega}{R})$$

16

دیود

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

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

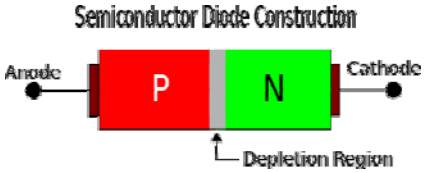


17

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکناش

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.

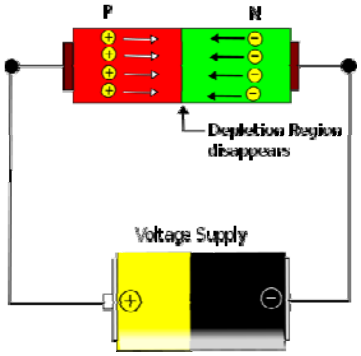


18

دیود

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

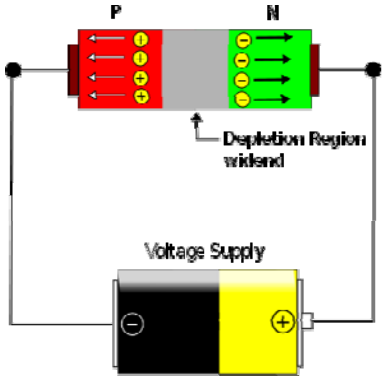
ولتاژ لازم برای حذف ناحیه تهی در این اتصال Vf می باشد.



19

دیود

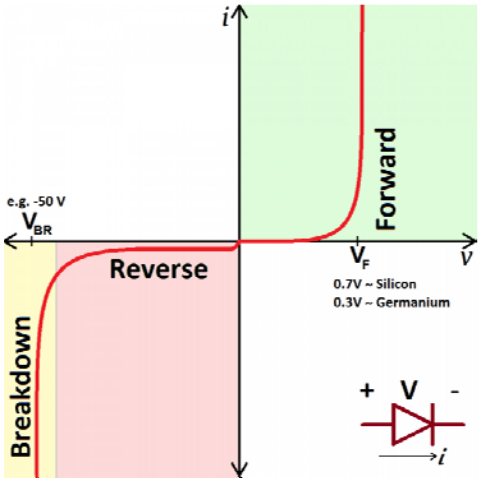
اتصال معکوس باعث گسترش ناحیه تهی شده و جریان مسدود می شود.



20

دیود

مشخصه ولتاژ- جریان دیود



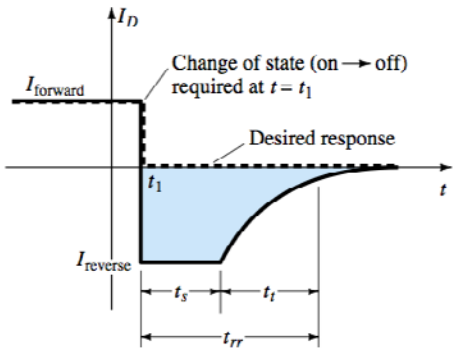
21

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکناش

دیود

زمان بازیابی معکوس: Reverse recovery time (t_{rr})

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



22

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.

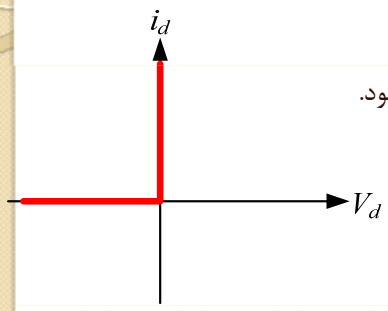
۲- دیودهای سریع (Fast): زمان بازیابی معکوس در آنها کوچک میباشد (معمولاً کمتر از ۵ میکروثانیه) و نرخ ولتاژ و جریان آنها نیز کمتر است.

۳- دیودهای شاتکی(Schottky): زمان بازیابی معکوس آنها صفر است و نرخ ولتاژ و جریان آنها نیز پایین است.

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکتاش

دیود

دیود ایده آل:

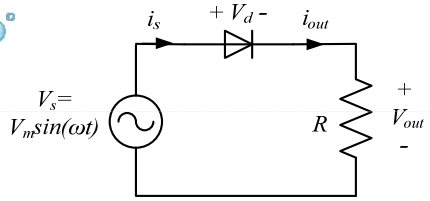


- اگر ولتاژ دو سر آن مثبت شود، وصل میشود.
- اگر وصل باشد، افت ولتاژی ندارد.
- با صفر شدن جریان، خاموش میشود.
- در حالت خاموش جریان آن صفر است.

-پس از ولتاژ مستقیم، مقاومت دیود، جریان معکوس، ولتاژ شکست و زمان بازیابی صرفنظر 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.

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

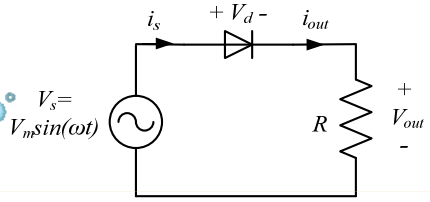
در نیم سیکل دوم (نیم سیکل منفی) ولتاژ دیود منفی شده، دیود قطع شده و ولتاژ منبع روی دیود می افتد.

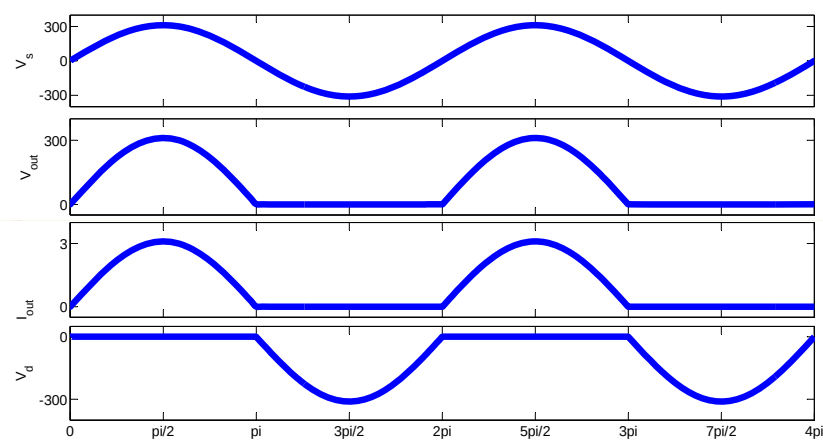
25

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکتاش

یکسوسازهای دیودی

یکسوساز نیم موج تکفاز

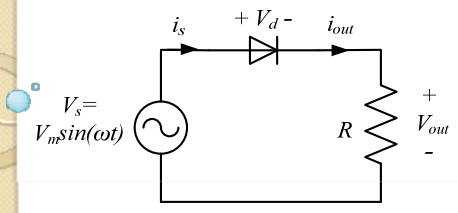




26

یکسوسازهای دیودی

یکسوساز نیم موج تکفاز



متوسط ولتاژ خروجی:

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

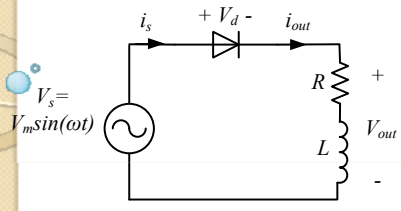
متوسط جریان بار: چون شکل موج ولتاژ و جریان بار یکسان است و فقط در یک ضریب R با هم تفاوت دارند، پس:

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

27

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:

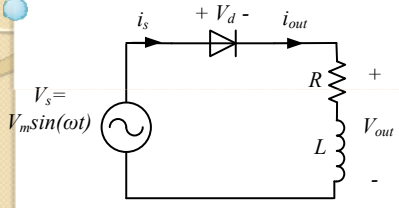
$$i_{out}(\omega t) = Ae^{\frac{-R}{L\omega}\omega t} + \frac{V_m}{Z}\sin(\omega t - \varphi)$$

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

28

یکسوسازهای دیودی

یکسوساز نیم موج تکفاز با بار *RL*



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

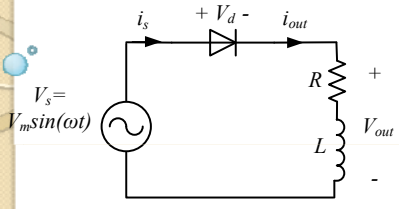
$$i_{out}(\omega t=0)=Ae^{\frac{-R}{L\omega}0}+\frac{V_m}{Z}\sin(0-\varphi)=0 \quad \rightarrow \quad A=\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)$$

29

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکتاش

یکسوسازهای دیودی

یکسوساز نیم موج تکفاز با بار *RL*



رابطه جریان:

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

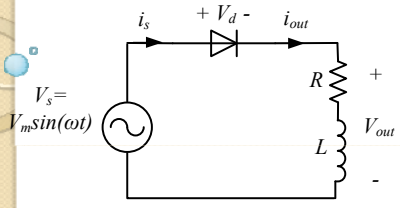
برای خاموش شدن دیود باید جریان آن صفر شود.

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

30

یکسوسازهای دیودی

یکسوساز نیم موج تکفاز با بار *RL*



پس جریان در زاویه ای بزرگتر از π صفر میشود (زاویه β) و تا صفر شدن جریان، دیود روشن میماند.

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

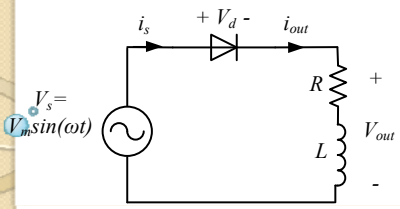
$$i_{out}(\omega t = \beta) = Ae^{\frac{-R}{L\omega}\beta} + \frac{V_m}{Z}\sin(\beta - \varphi) = 0$$

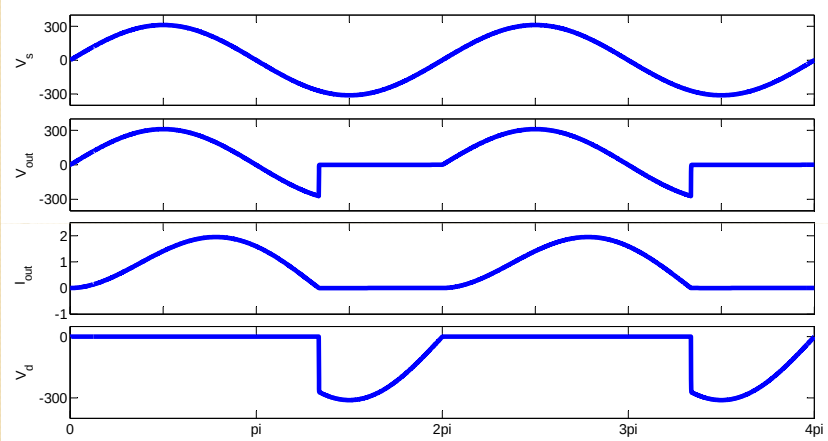
31

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکناش

یکسوسازهای دیودی

یکسوساز نیم موج تکفاز با بار *RL*



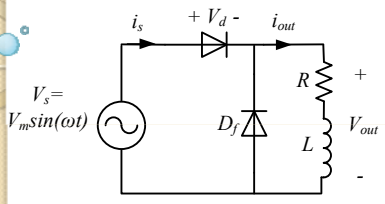


32

در رابطه زیر مقدار جریان را برای β برابر ۱۸۰ درجه تعیین کرده و سپس مشخص کنید در چه β جریان صفر میشود.

یکسوسازهای دیودی

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



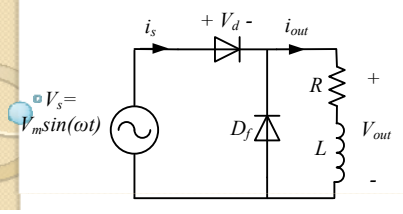
در نیم سیکل مثبت دیود اصلی وصل بوده و ولتاژ منبع روی بار می افتد. دیود هرزگرد در این زمان خاموش است.

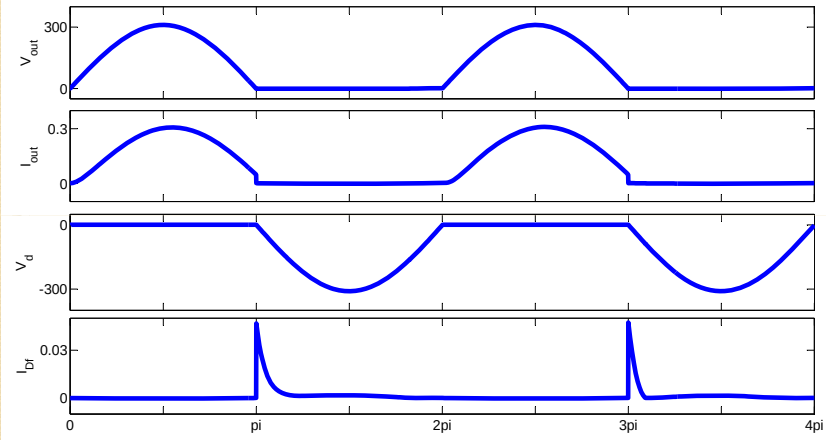
در زاویه $\omega t=\pi$ دیود هرزگرد روشن شده، دیود اصلی خاموش میشود و جریان بار را دیود هرزگرد هدایت می کند.

با صفر شدن جریان بار دیود هرزگرد نیز خاموش میشود.

یکسوسازهای دیودی

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





35

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.

۱- بازده یکسوسازی:

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

36

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 acیک 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 dcآن 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 : $\eta = 1$

37

۲- ضریب شکل:

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

در حالت ایده آل : $FF = 1$

۳- ضریب ریپل:

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

در حالت ایده آل : $RF = 0$

۴- اعوجاج هارمونیکی کل (Total harmonic distortion):

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

در حالت ایده آل : $THD = 0$

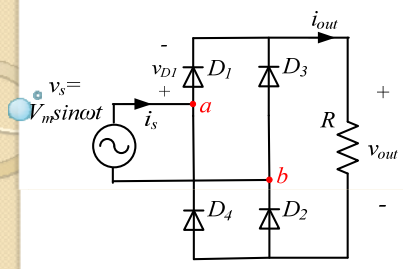
38

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

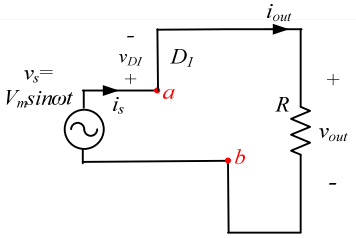
محاسبه THD:

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 ۱و ۲ در بایاس مستقیم بوده و دیودهای ۳و۴ در بایاس معکوس قرار دارند.

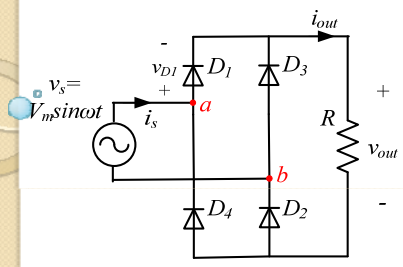


$$v_{out} = v_s \quad , \quad i_{out} = \frac{v_s}{R} = i_s$$

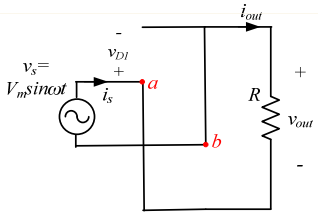
$$v_{D1} = 0$$

یکسوسازهای دیودی

یکسوساز تمام موج تکفاز

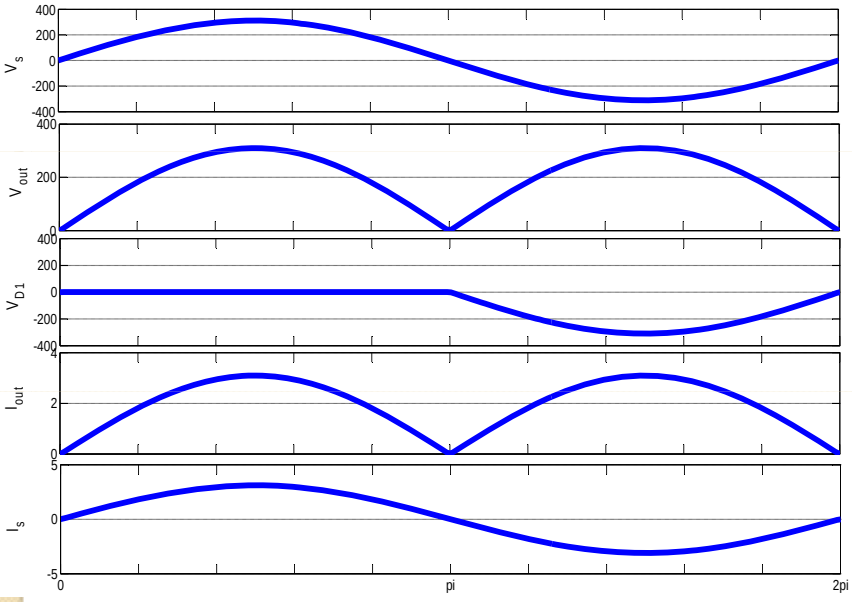


در نیم سیکل منفی از ولتاژ منبع، نقطه b بیشترین ولتاژ مدار را داشته و نقطه a کمترین ولتاژ مدار را دارد. بنابراین دیودهای ۳و ۴ در بایاس مستقیم بوده و دیودهای ۱و۲ در بایاس معکوس قرار دارند.

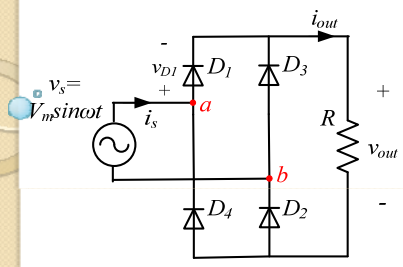


$$v_{out} = -v_s \quad , \quad i_{out} = \frac{-v_s}{R} = -i_s$$

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



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 کارآیی یکسوساز تمام موج:

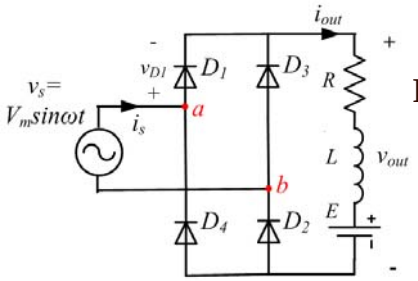
$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \quad \frac{V_m}{\pi}$$

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

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

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

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



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.

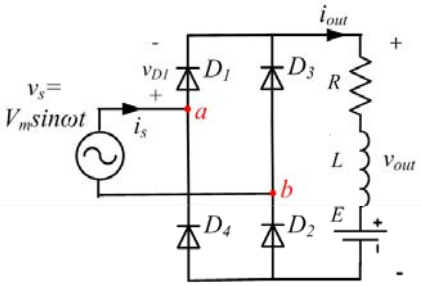
$$V_m \sin \omega t\big|_{\omega t=\alpha} = E \quad \rightarrow \quad \alpha = \sin^{-1}(\frac{E}{V_m})$$

رابطه جریان بار:

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

47

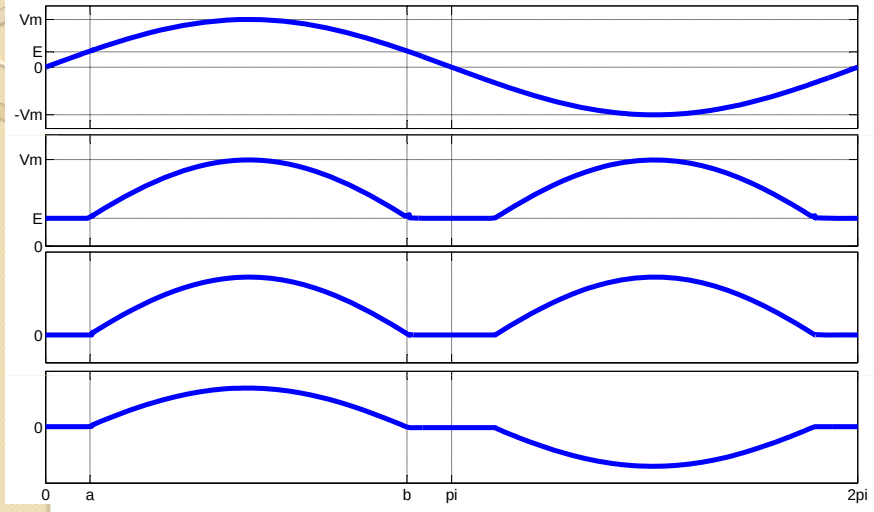
درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکناش



از آنجایی که در زاویه α 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.

48



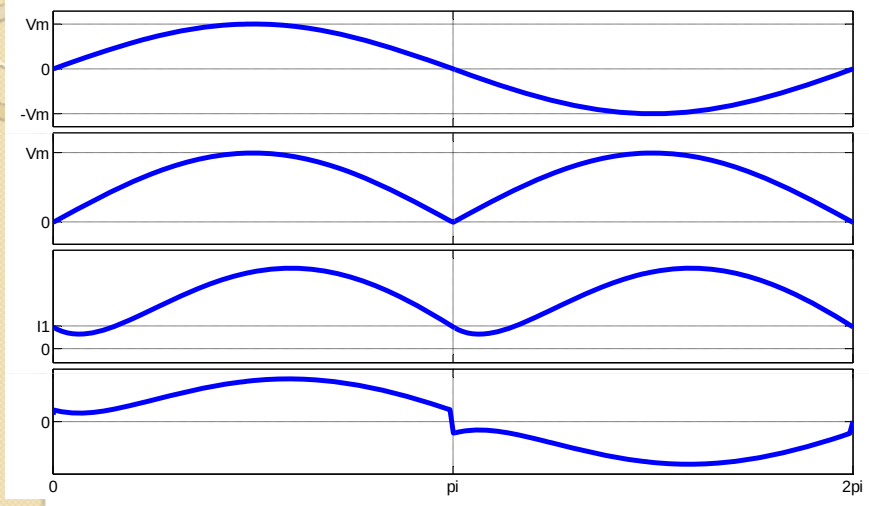
49

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 I1 می نامیم.
- از حل دستگاه زیر I1 و A بدست می آیند.

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

50



51

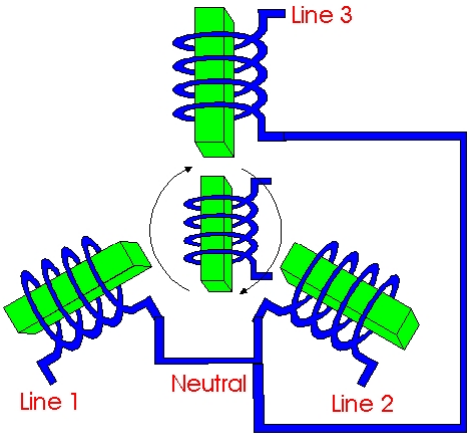
مثال:

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.

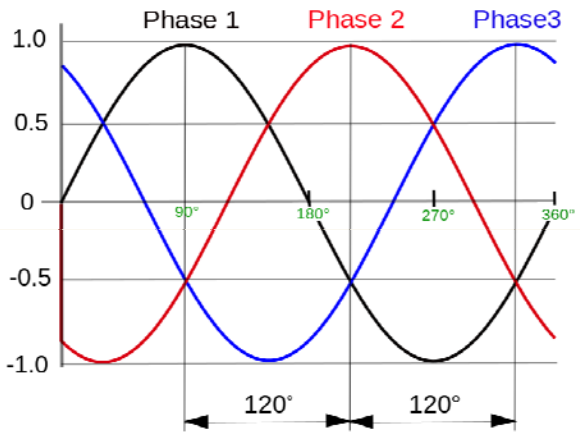
52

یکسوسازهای دیودی

یکسوساز نیم موج سه فاز



$$v_a(\omega t) = V_m \sin \omega t$$
$$v_b(\omega t) = V_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$
$$v_c(\omega t) = V_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$



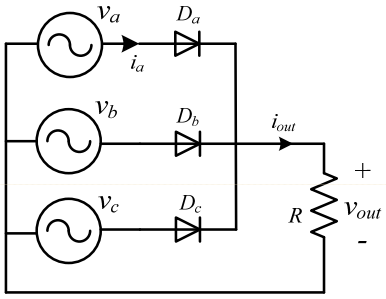
55

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

ولتاژ خط رادیکال ۳ برابر بزرگتر از ولتاژ می باشد.

56

یکسوساز نیم موج سه فاز



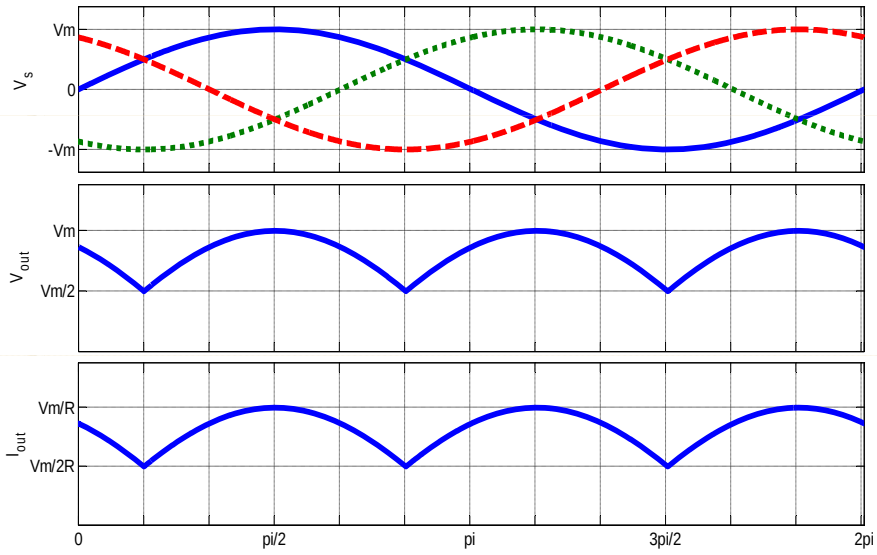
هر دیودی که روشن باشد ولتاژ همان فاز روی سر مثبت بار می افتد.
ولتاژ سر منفی بار، ولتاژ نقطه نول یعنی صفر است.

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

57

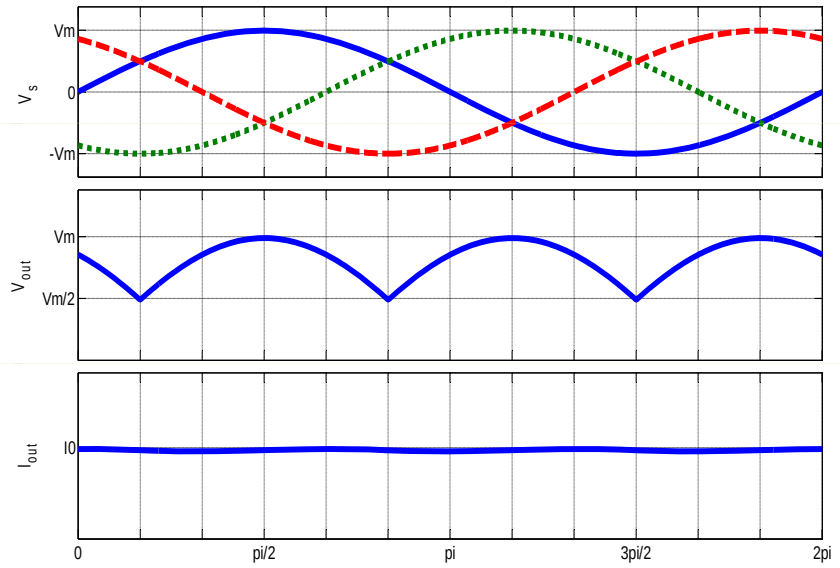
درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکتاش

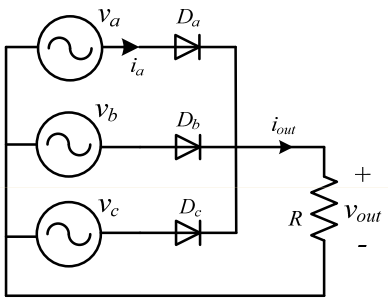
بار مقاومتی باشد.



58

بار خاصیت سلفی بالایی داشته باشد.

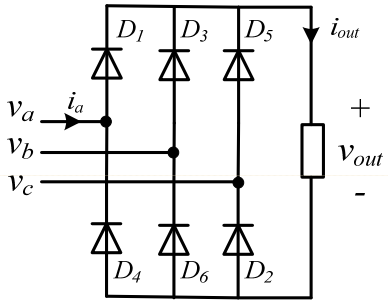




متوسط ولتاژ خروجی:

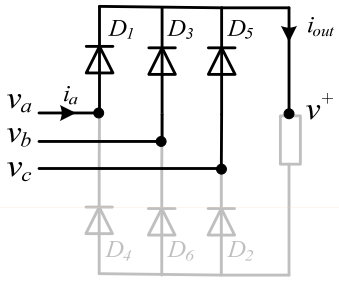
$$V_{dc} = 3\frac{1}{2\pi}\int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_m \sin\omega t \cdot d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m$$

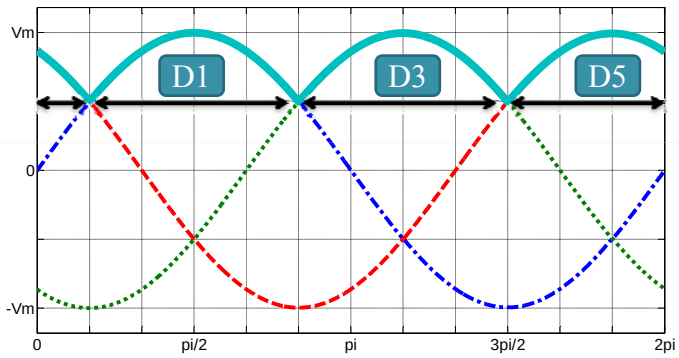
یکسوساز تمام موج سه فاز



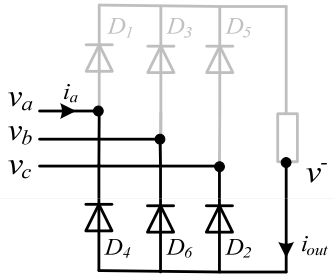
این یکسوساز را میتوان به دو یکسوساز نیم موج سه فاز تقسیم کرد و هر قسمت را جداگانه بررسی نمود.

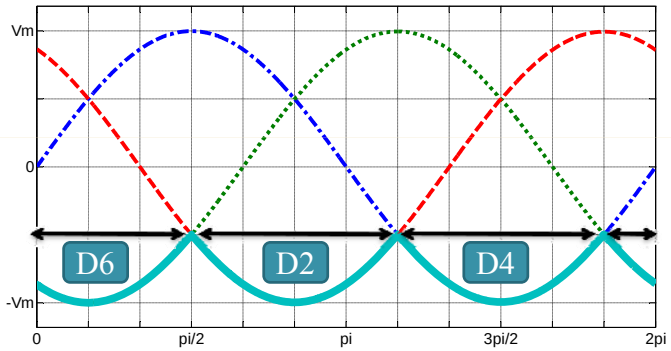
یکسوساز نیم موج بالایی ولتاژ سر مثبت بار را تعیین میکند.

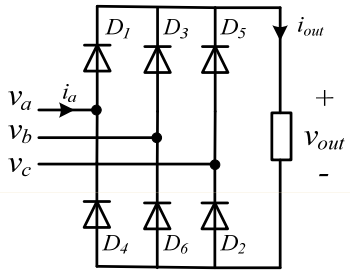




یکسوساز نیم موج پایینی ولتاژ سر منفی بار را تعیین میکند.

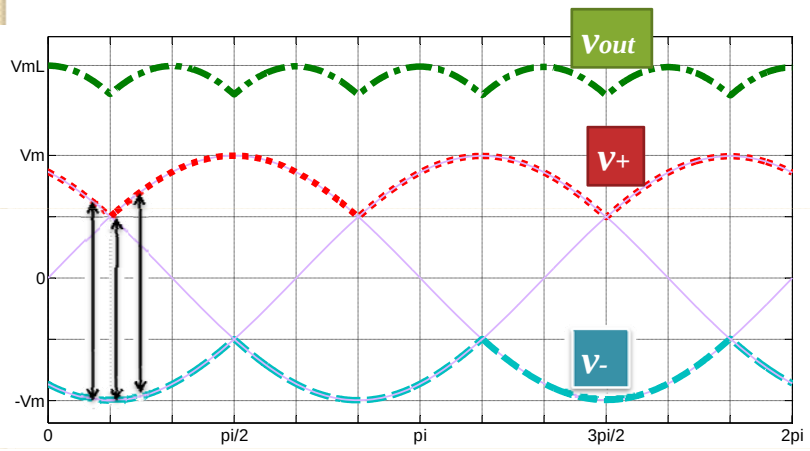






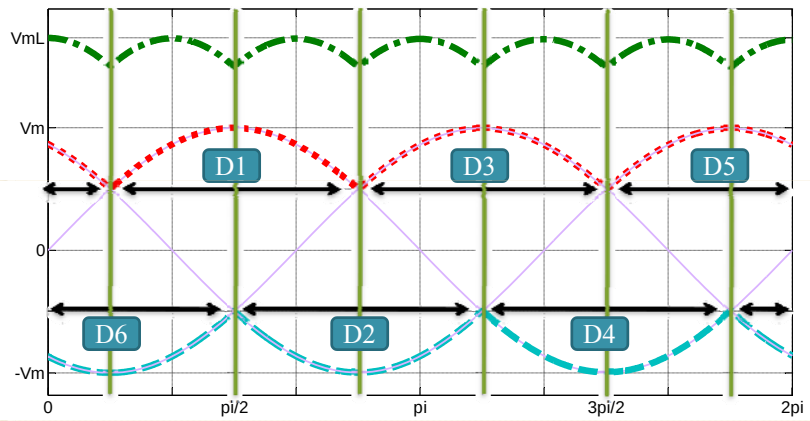
ولتاژ خروجی عبارت است از:

$$v_{out} = v^+ - v^-$$



$$v_{out} = v^+ - v^-$$

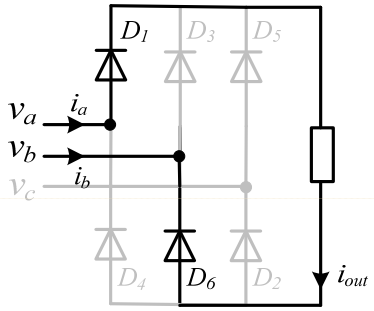
65



$$30^\circ \le \omega t \le 90^\circ \quad : \quad \begin{cases} v^+ = v_a = V_m \sin \omega t \\ v^- = v_b = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \end{cases}$$

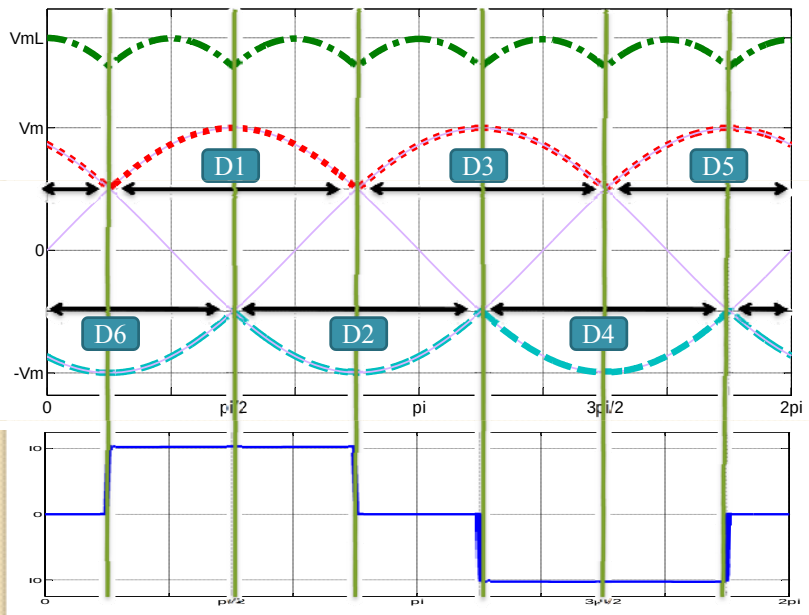
$$v_{out}(\omega t) = v^+ - v^- = v_a - v_b = v_{ab} = \sqrt{3}\, V_m \sin(\omega t + 30^\circ)$$

66

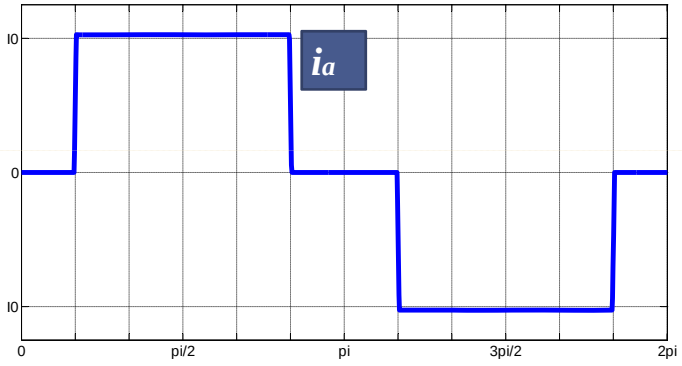


$$30^\circ \le \omega t \le 90^\circ \quad : \quad i_a = -i_b = i_{out}$$

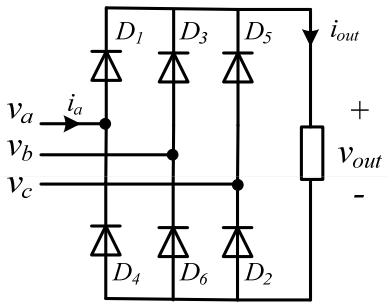
67



68



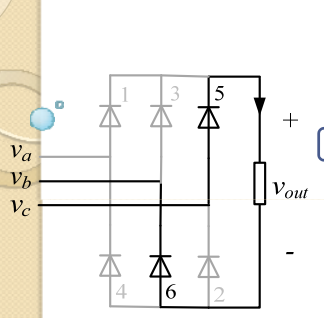
69

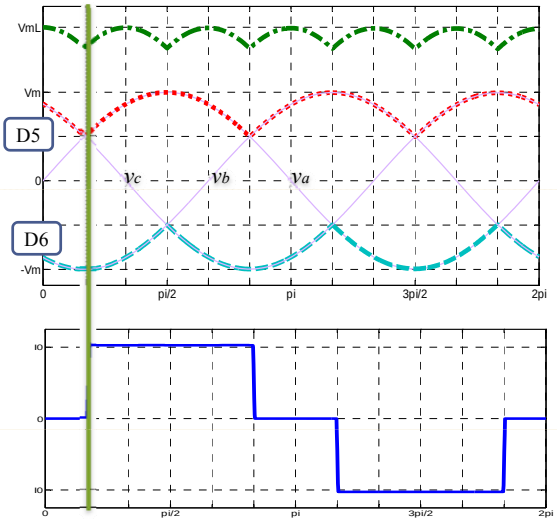


متوسط ولتاژ خروجی:

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

70



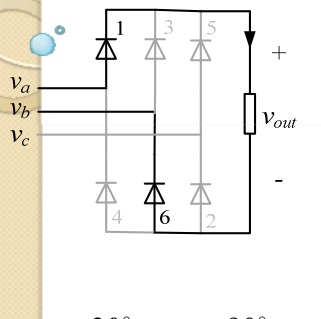


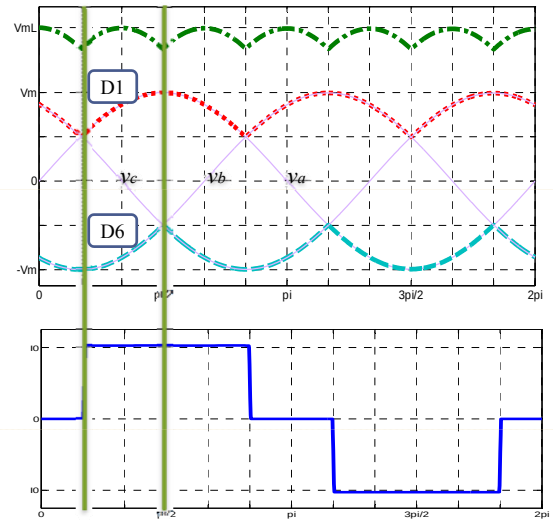
$$0^\circ \le \omega t \le 30^\circ :$$

$$\begin{cases} v_{out} = v_c - v_b \\ i_a = 0 \end{cases}$$

71

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد - بکتاش

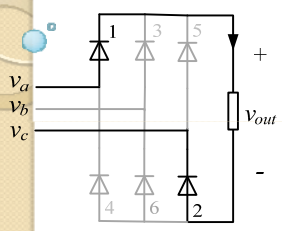


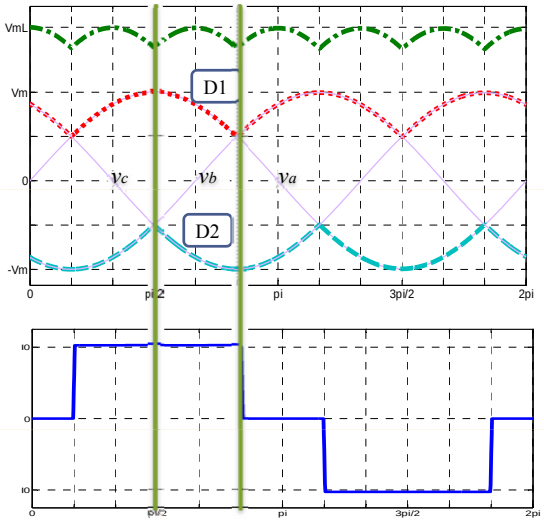


$$30^\circ \le \omega t \le 90^\circ :$$

$$\begin{cases} v_{out} = v_a - v_b \\ i_a = i_{out} \end{cases}$$

72

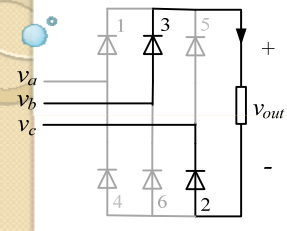


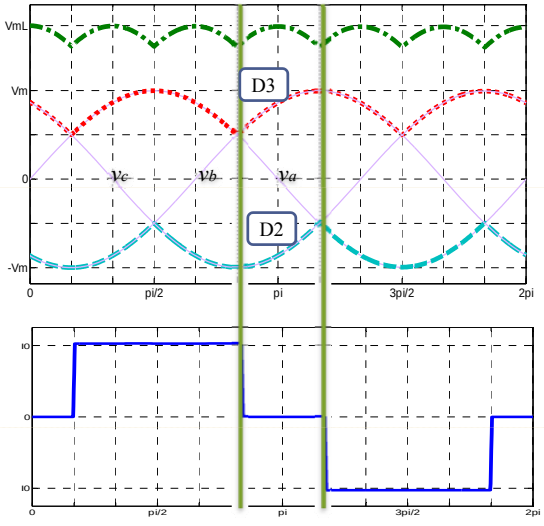


$$90^\circ \le \omega t \le 150^\circ :$$

$$\begin{cases} v_{out} = v_a - v_c \\ i_a = i_{out} \end{cases}$$

73

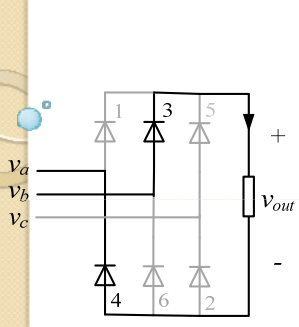


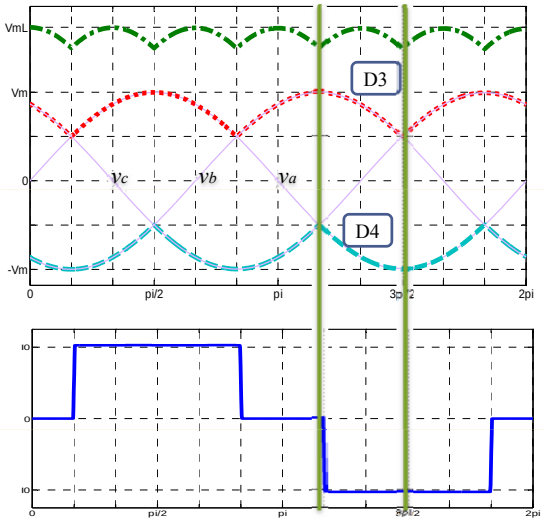


$$150^\circ \le \omega t \le 210^\circ :$$

$$\begin{cases} v_{out} = v_b - v_b \\ i_a = 0 \end{cases}$$

74



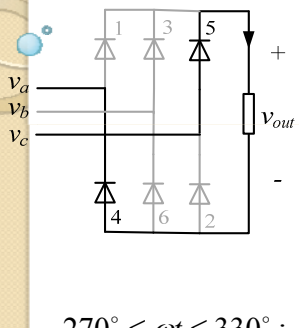


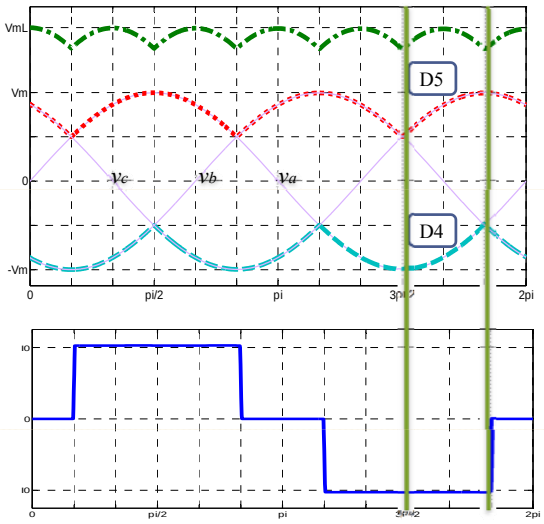
$$210^\circ \le \omega t \le 270^\circ :$$

$$\begin{cases} v_{out} = v_b - v_a \\ i_a = -i_{out} \end{cases}$$

75

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد - بکتاش

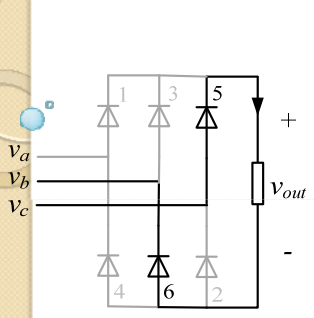


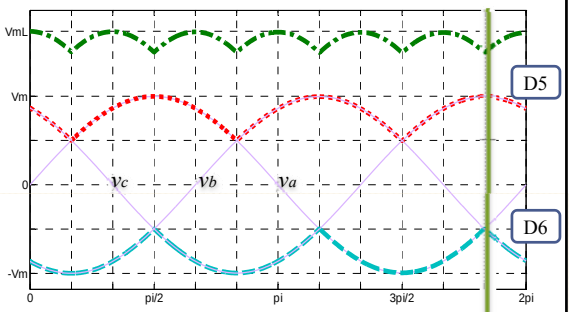


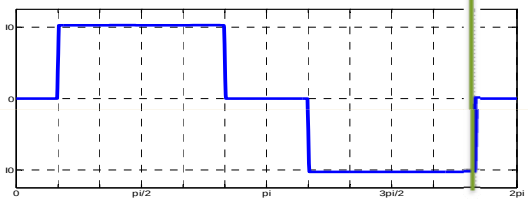
$$270^\circ \le \omega t \le 330^\circ :$$

$$\begin{cases} v_{out} = v_c - v_a \\ i_a = -i_{out} \end{cases}$$

76





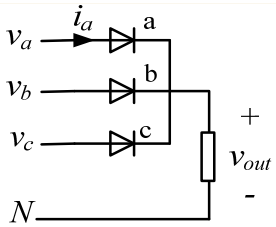


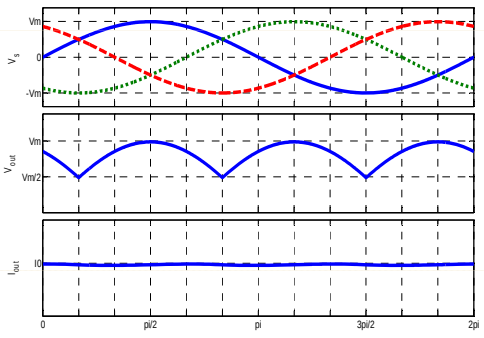
$$330^\circ \le \omega t \le 360^\circ :$$

$$\begin{cases} v_{out} = v_c - v_b \\ i_a = 0 \end{cases}$$

77

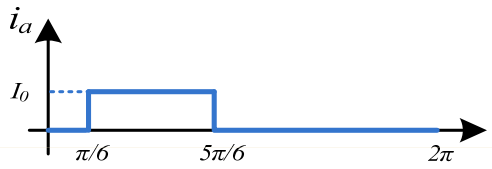
مثال) پارامترهای کارآیی را برای یکسوسازهای سه فاز نیم موج و تمام موج متصل به باری با خاصیت سلفی شدید (جریان بار با مقدار ثابت) را بدست آورید.



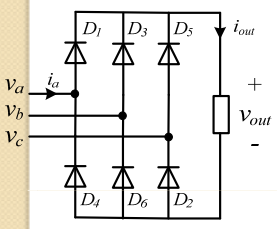


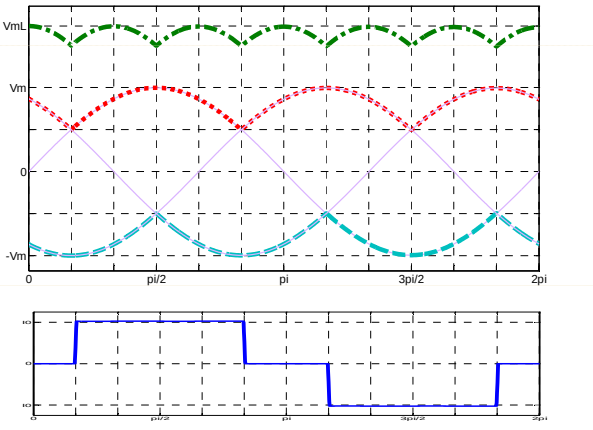
78

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



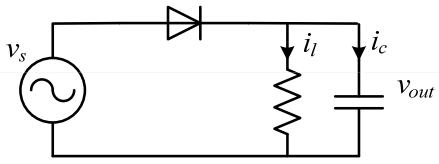
یکسوساز تمام موج



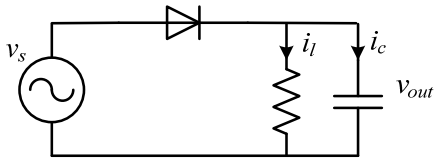


فیلتر خازنی

یکسوساز نیم موج تکفاز



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

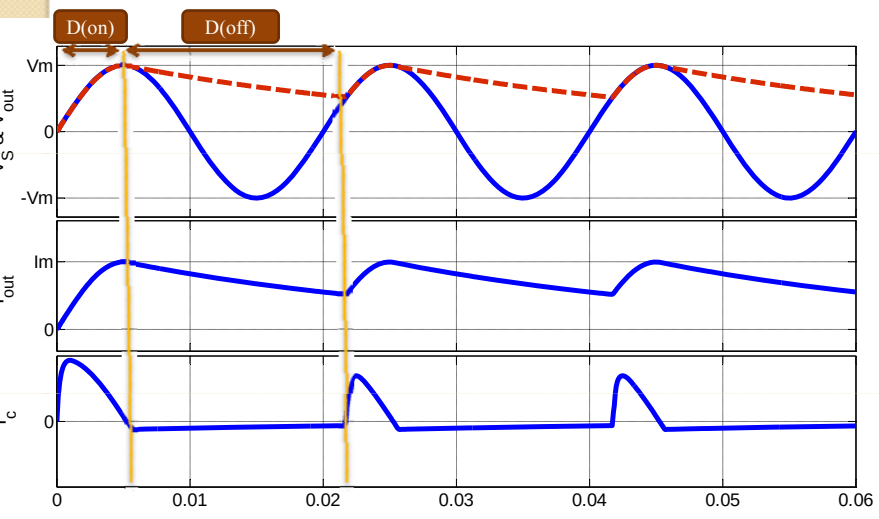


هرگاه ولتاژ منبع از ولتاژ خازن بیشتر باشد دیود روشن می شود. در اینصورت ولتاژ منبع انرژی بار را تامین کرده و خازن را شارژ می کند:

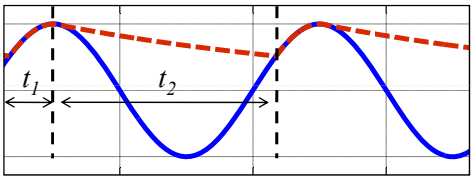
$$v_{out} = v_s = V_m \sin \omega t \quad , \quad i_s = i_c + i_l$$

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.



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

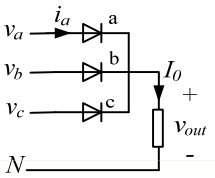
$$v_{r(p-p)} = v_{out}(t_1) - v_{out}(t_2) = V_m\left[1 - \exp(\frac{-t_2}{RC})\right] \rightarrow e^{-x} \approx x - 1$$

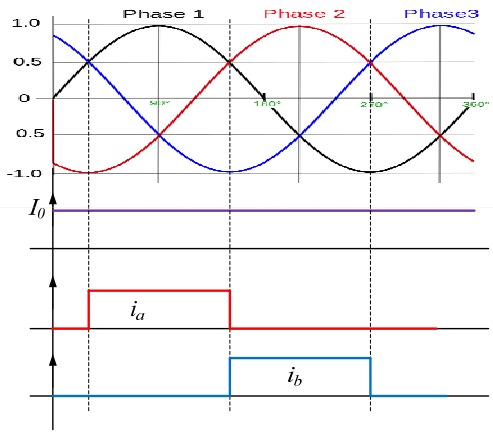
$$v_{r(p-p)} \approx \frac{V_m}{fRC} \qquad V_{dc} = V_m - \frac{v_{r(p-p)}}{2}$$

87

اثر اندوکتانس منبع

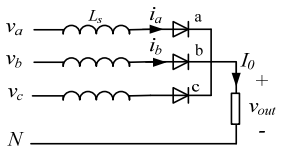
اگر منبع ایده آل باشد:



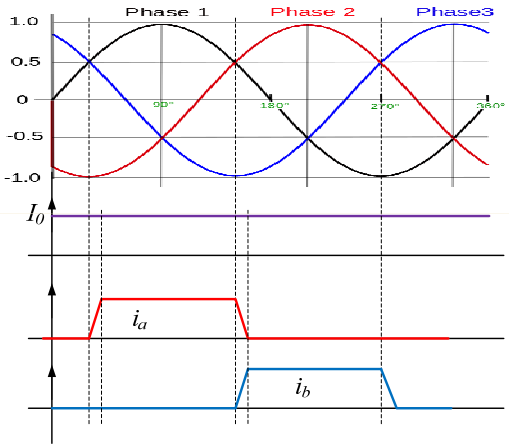


88

اثر اندوکتانس منبع



با در نظر گرفتن سلف منبع:



89

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:

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

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

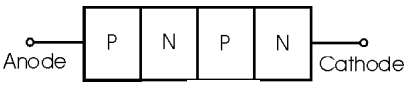
متوسط کاهش ولتاژ ناشی از همپوشانی (سه فاز نیم موج):

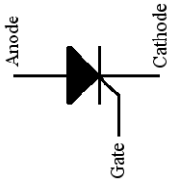
$$V_x = \frac{1}{T} 3 \int L_c \frac{di}{dt} dt = 3 f L I_0 \qquad (L_1 = L_2 = L_3 = L_c)$$

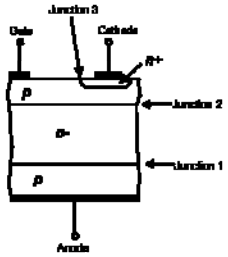
90

تریستور

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

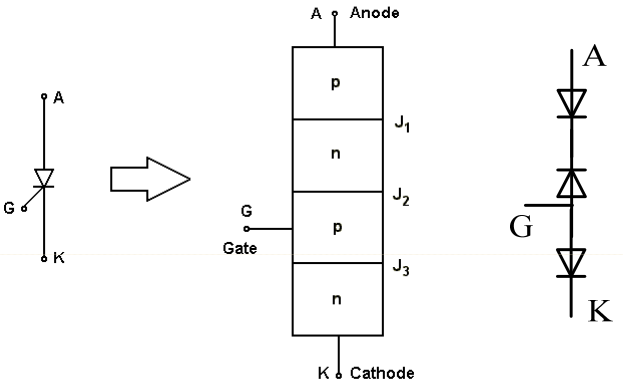






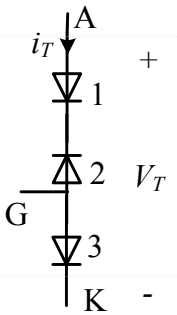
91

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.



92

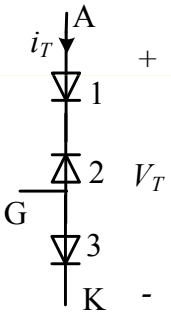
یک تریستور دارای سه ناحیه کاری می باشد.



۱- **قطع در بایاس معکوس**: هنگامی که ولتاژ A از K کمتر باشد دیودهای ۱و 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.

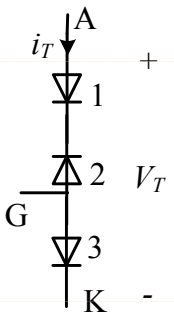
$$I_T = 0 \quad , \quad V_T < 0$$



۲- **قطع در بایاس مستقیم**: هنگامی که ولتاژ A از K بیشتر شود از آنجایی که دیود۲ 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.

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

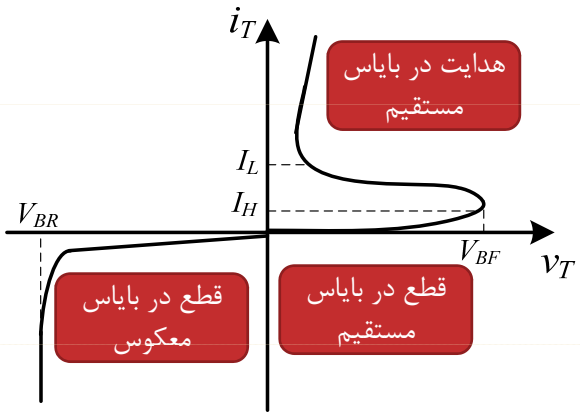


۳- **هدایت در بایاس مستقیم**: با افزایش ولتاژ A نسبت به K جریان نشتی دیود ۲ افزایش یافته، پیوند ۲ شکسته می شود و شروع به هدایت می کند. پس در این حالت تریستور هدایت کرده و روشن می باشد.

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

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

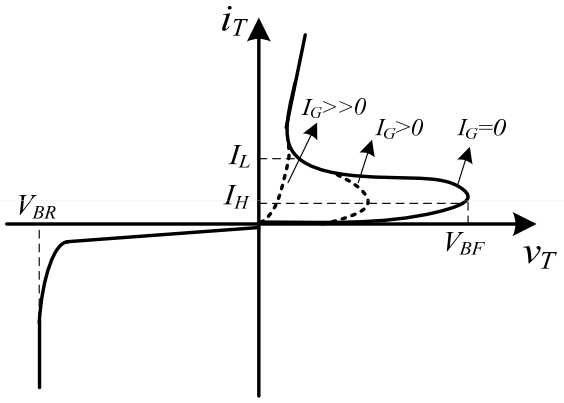
مشخصه ولتاژ- جریان تریستور



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 توات سریعاً تریستور را روشن نمود.



97

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد - بکناش

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.

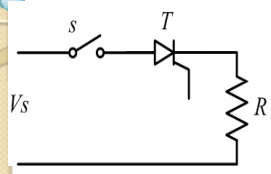
چنانچه نرخ تغییرات جریان در یک تریستور پس از روشن شدن بالا باشد، ممکن است مقدار این جریان به نقاطی که زودتر از بقیه روشن شده اند آسیب رسانده و باعث تخریب تریستور گردد.

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.

98

حفاظت ولتاژی تریستور

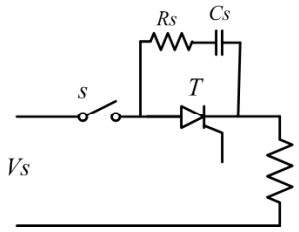


در مدار مقابل با وصل کلید s، ولتاژ منبع بر روی تریستور افتاده. اگر سرعت تغییرات ولتاژ دو سر تریستور از مقدار مشخصی بیشتر باشد، تریستور ناخواسته روشن میگردد.

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

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

حفاظت ولتاژی تریستور



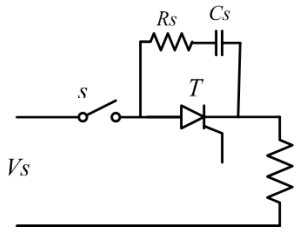
رابطه ولتاژ دو سر تریستور:

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

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 تریستور

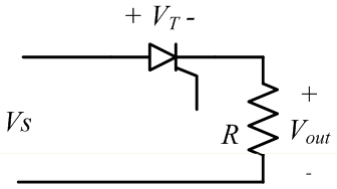


هنگامی که تریستور وصل شود، تمامی انرژی ذخیره شده در خازن، در مقاومت اسنابر تلف می گردد.

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

101

یکسوسازهای تریستوری



یکسوساز نیم موج تکفاز

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

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

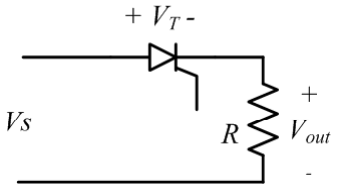
با اعمال جریان به گیت در زاویه α، تریستور روشن شده و اتصال کوتاه می شود.

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

102

یکسوسازهای تریستوری

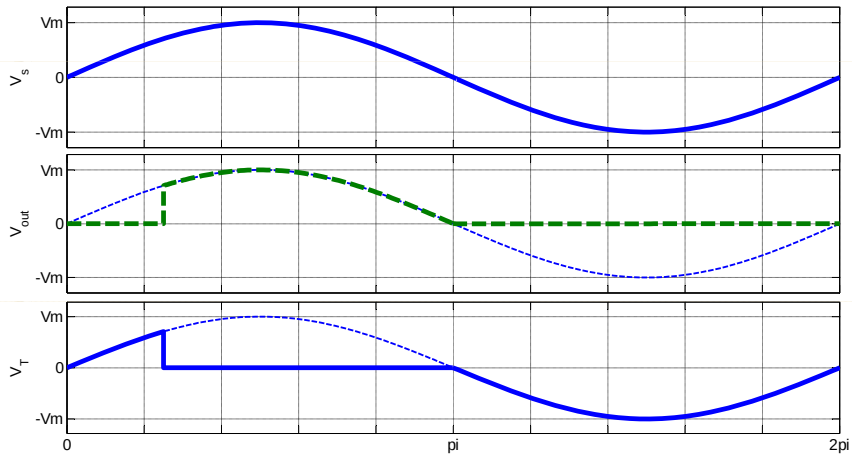
یکسوساز نیم موج تکفاز



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

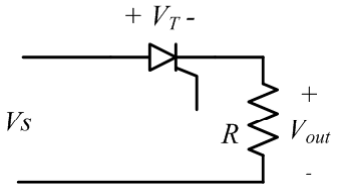
$$v_{out} = 0 \quad , \quad i_{out} = 0 \quad , \quad v_T = v_s$$

یکسوسازهای تریستوری



یکسوسازهای تریستوری

یکسوساز نیم موج تکفاز



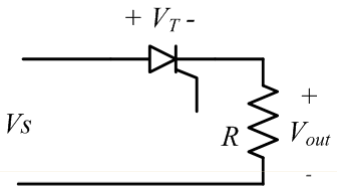
متوسط ولتاژ خروجی:

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

105

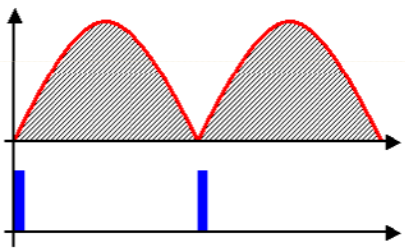
یکسوسازهای تریستوری

یکسوساز نیم موج تکفاز

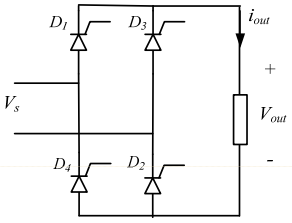


تغییر ولتاژ با تغییر زاویه آتش:

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



106



یکسوساز تمام موج تکفاز

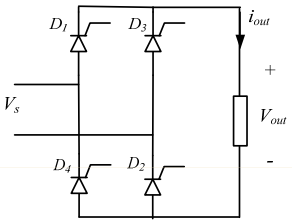
(بار مقاومتی)

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 α، تریستورهای ۱و ۲ روشن شده و اتصال کوتاه می شود. تا قبل از روشن شدن تریستورها، خروجی صفر است و پس از آن:

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

107



یکسوساز تمام موج تکفاز

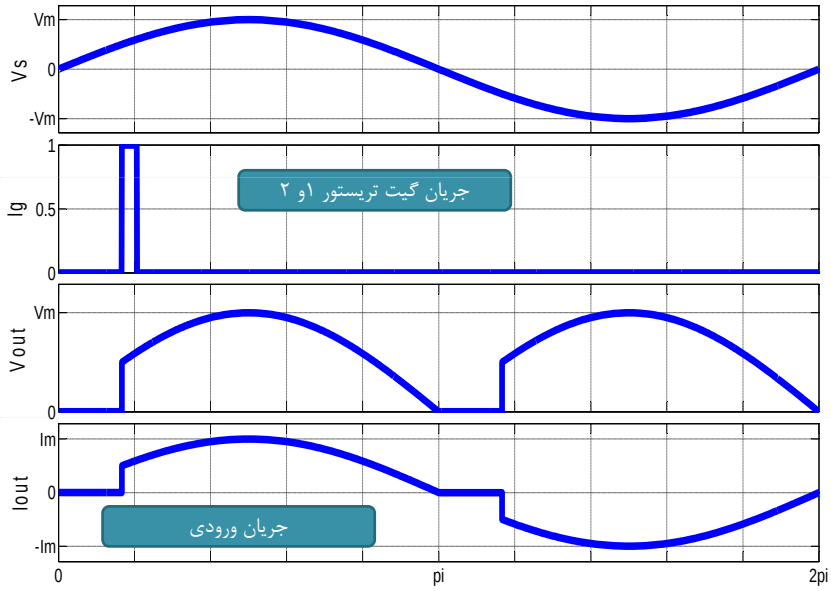
(بار مقاومتی)

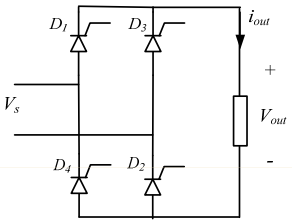
در نیم سیکل منفی تریستورهای ۳ و ۴ در بایاس مستقیم هستند.

در این نیم سیکل نیز با α درجه تاخیر تریستورها روشن می شوند. با روشن شدن تریستورها:

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

108



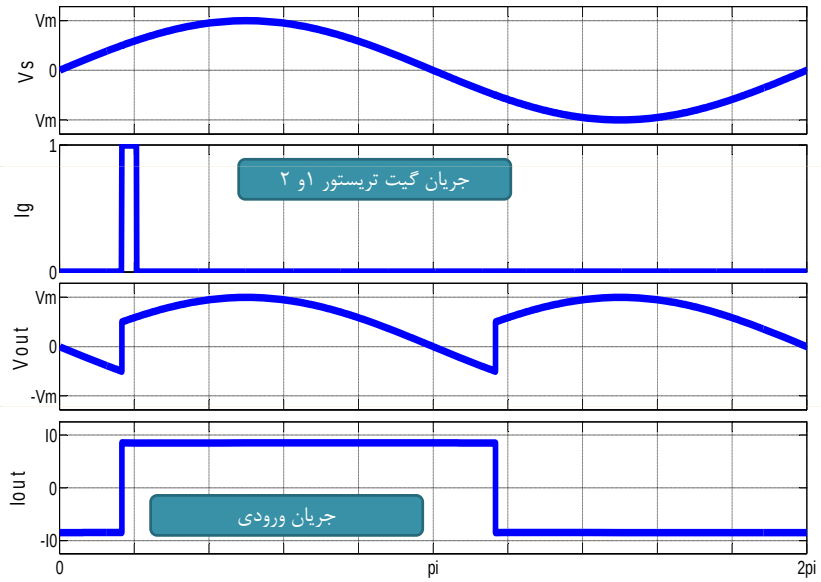


یکسوساز تمام موج تکفاز

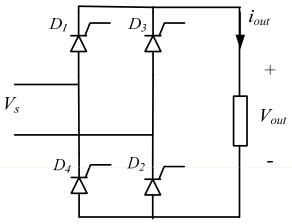
(جریان بار ثابت)

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.



111



یکسوساز تمام موج تکفاز

(جریان بار ثابت)

متوسط ولتاژ خروجی برای بار مقاومتی:

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

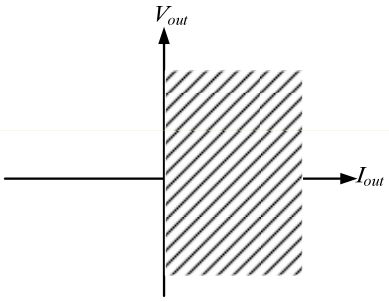
متوسط ولتاژ خروجی برای جریان خروجی ثابت:

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

112

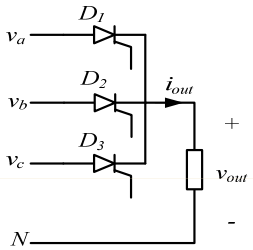
بار با جریان ثابت :

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



صفحه ولتاژ- جریان

113

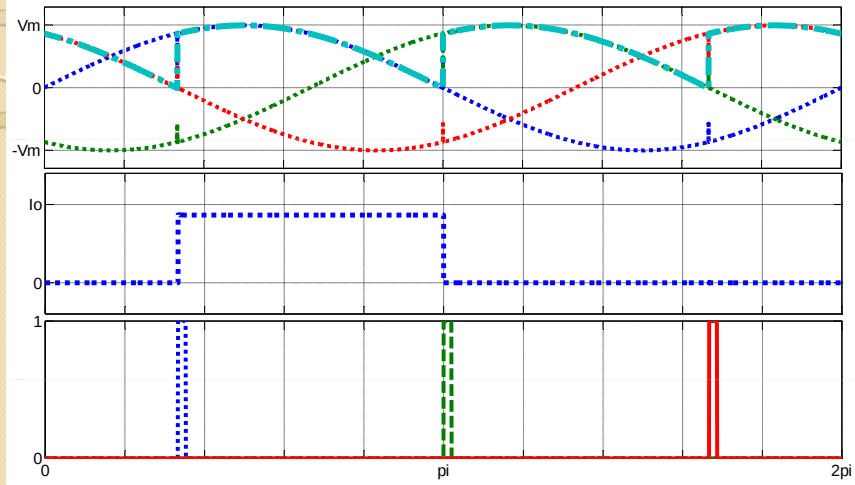


یکسوساز نیم موج سه فاز

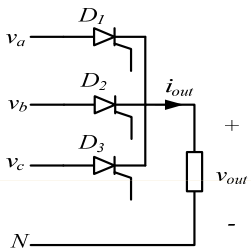
(بار با جریان ثابت)

- هر تریستور با α 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 ۱۲۰ درجه هدایت کند.

114



115



یکسوساز نیم موج سه فاز

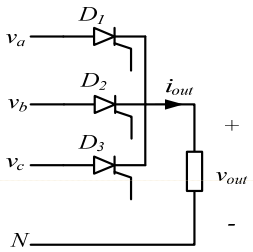
(بار با جریان ثابت)

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

116

یکسوساز نیم موج سه فاز

(بار مقاومتی)

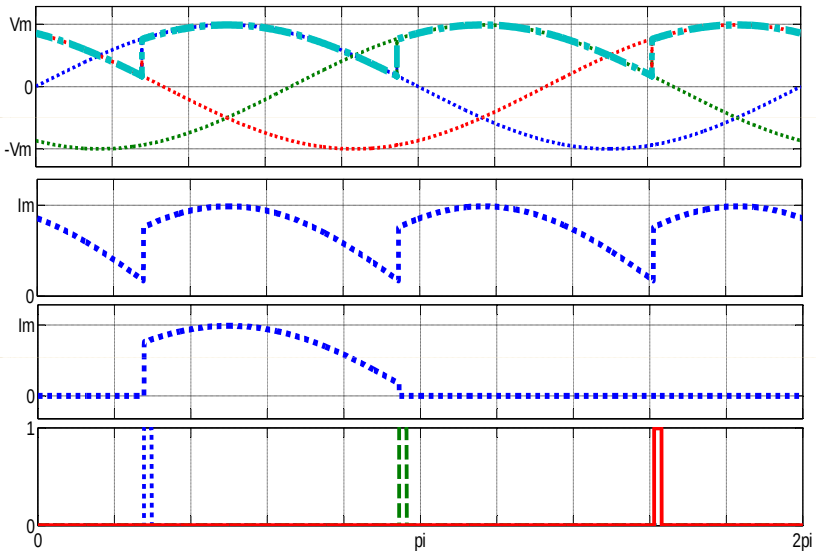


- در بار مقاومتی جریان خروجی برای α کوچکتر از ۳۰ درجه پیوسته بوده و تحلیل مدار مانند قبل است.
- ولی چنانچه α از ۳۰ درجه بزرگتر باشد، جریان خروجی ناپیوسته شده و در لحظه ای که جریان صفر می شود، تریستوری که روشن بوده خاموش می شود. در اینحالت تحلیل مدار کمی متفاوت می شود.

117

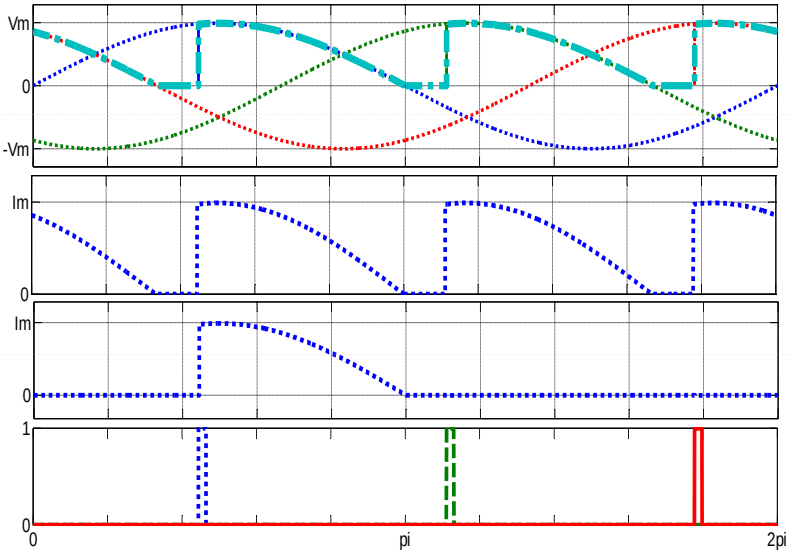
درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکتاش

α کوچکتر از ۳۰ درجه

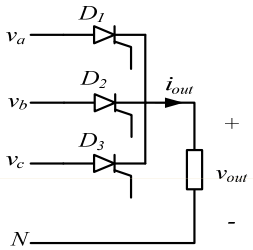


118

α بزرگتر از ۳۰ درجه



یکسوساز نیم موج سه فاز

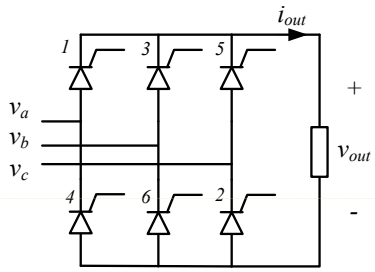


-در صورتی که جریان بار ناپیوسته باشد :

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

یکسوساز تمام موج سه فاز

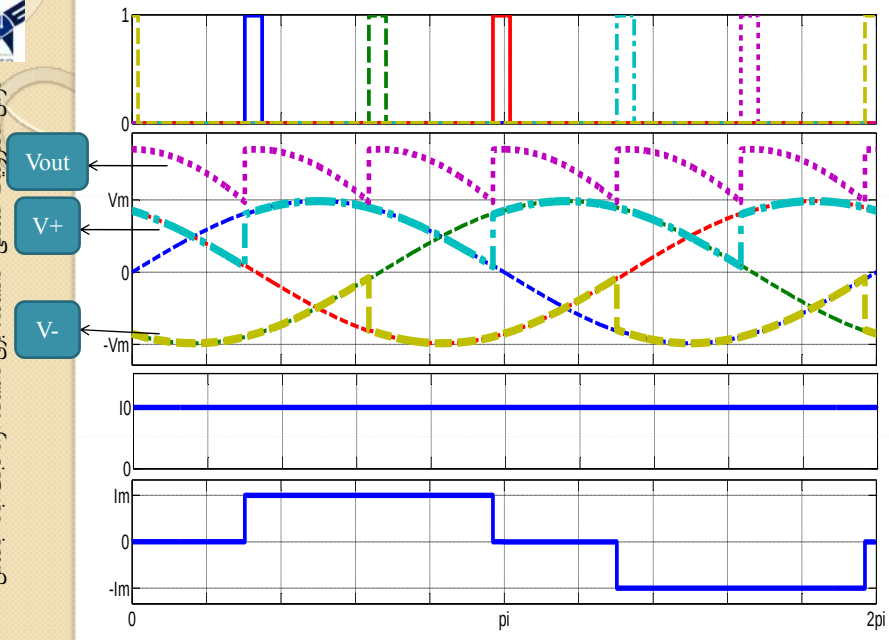
(بار با جریان ثابت)



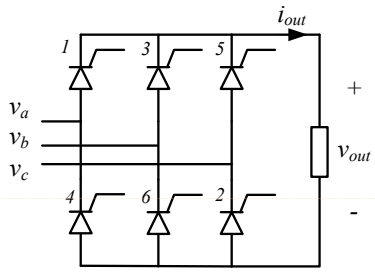
- تریستورهای بالایی تشکیل یک یکسوساز سه فاز نیم موج داده که ولتاژ مثبتی را بر روی سر مثبت بار ایجاد می کنند.
- تریستورهای پایینی نیز یک یکسوساز سه فاز نیم موج تشکیل داده که ولتاژ منفی بر روی سر منفی بار ایجاد می کنند.
- هر تریستور از جایی که وارد بایاس مستقیم می شود با آلفا درجه تاخیر روشن می شود.
- ولتاژ بار از اختلاف ولتاژ سر مثبت و منفی بار به دست می آید.

121

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکتاش



122



یکسوساز تمام موج سه فاز

(بار با جریان ثابت)

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

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکتاش

ترانزیستورهای قدرت

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

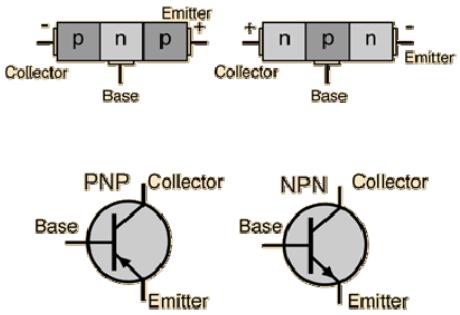
۱- ترانزیستورهای پیوند دوقطبی BJT

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.

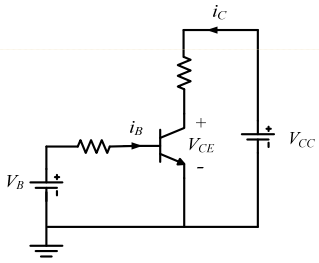
$$V_{CE} > 0 \quad , \quad i_C = 0$$

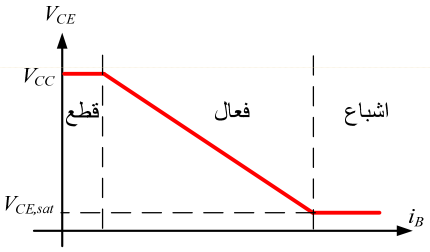
۲- ناحیه فعال: ترانزیستور مانند یک تقویت کننده عمل کرده و رابطه خطی بین جریان بیس و کلکتور برقرار است.

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

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 : $V_{DS} \le V_{GS} - V_T$

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

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

مقایسه MOSFET و BJT :

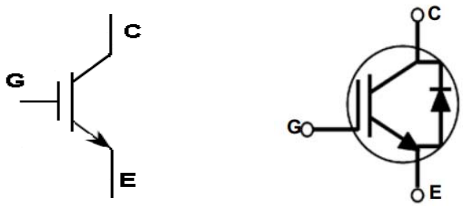
۱- BJTها المانهای کنترل شونده با جریان هستند و MOSFETها با ولتاژ.

۲- MOSFET ها 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.



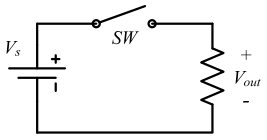
مبدل های dc/dc (چاپرها)

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

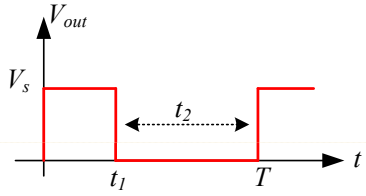
انواع:

- کاهنده
- افزاینده
- کاهنده- افزاینده
- فلای بک
- فوروارد
- ...

اساس کاهندگی چاپر :

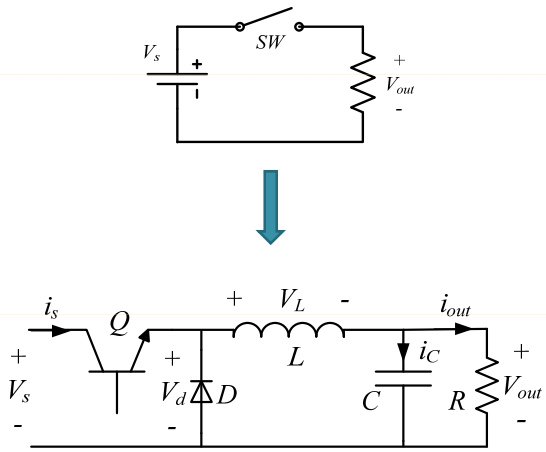


در مدار بالا فرض کنید کلید SW برای مدت $t1$ ثانیه روشن و برای $t2$ ثانیه خاموش باشد.

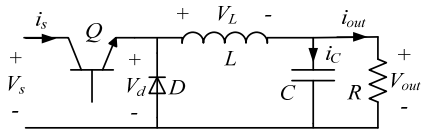


$$V_{dc} = \frac{1}{T}\int_0^{t_1} V_s \cdot dt = \frac{t_1}{T} \cdot V_s = k \cdot V_s$$

رگولاتور کاهنده (Buck):



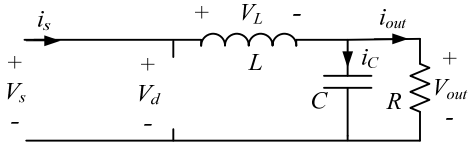
تحلیل رگولاتور باک :

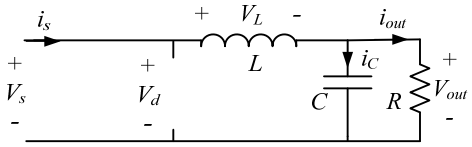


برای تحلیل، عملکرد مبدل را به دو حالت کلید Q روشن و کلید Q خاموش تقسیم می کنیم.

اگر کلید Q روشن باشد:

کلید اتصال کوتاه فرض شده، ولتاژ منبع دیود را بایاس معکوس می کند، پس دیود قطع است.





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

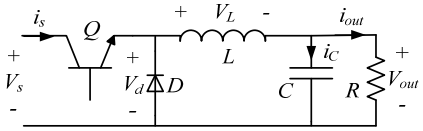
در رابطه ولتاژ دو سر سلف:

ولتاژ منبع و خروجی مقادیر ثابتی دارند.

ولتاژ منبع از خروجی بیشتر است.

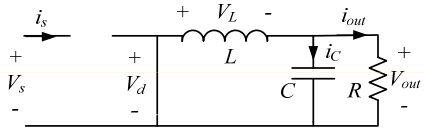
$$V_L = L\frac{di_L}{dt} = V_s - V_{out} \quad \rightarrow \quad V_L = L\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = V_s - V_{out}$$
$$\xrightarrow{\Delta t = t_1} \quad \Delta i_L = \frac{t_1}{L}(V_s - V_{out}) \quad , \quad \Delta i_L = I_2 - I_1$$

135



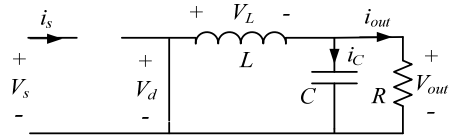
اگر کلید Q خاموش باشد:

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



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

136



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

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

با مساوی قرار دادن دو رابطه ۱و ۲ :

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

تلفات مدار صفر باشد :

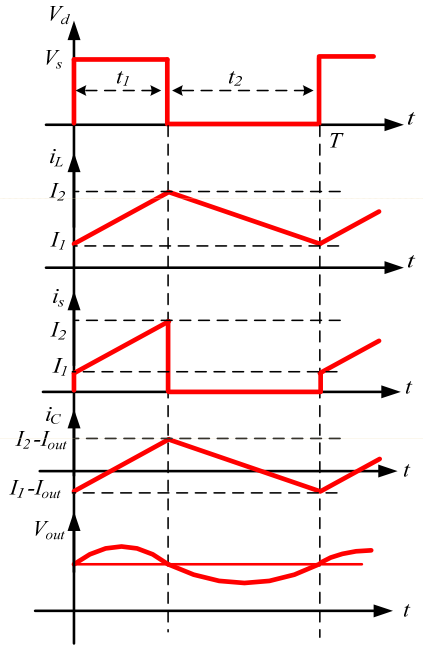
$$P_s = P_{out} \quad \rightarrow \quad i_s = ki_{out}$$

از روابط ۱ و ۲ همچنین داریم :

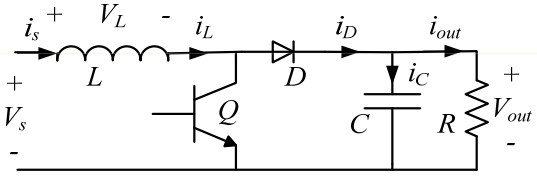
$$T = t_1 + t_2 = \frac{1}{f} \quad \rightarrow \quad \Delta i_L = \frac{V_s(1-k)k}{fL}$$

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

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



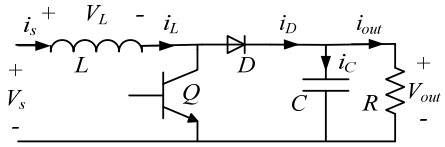
رگولاتور افزاینده (BOOST)



در این رگولاتور متوسط ولتاژ خروجی بیشتر از ورودی میباشد.

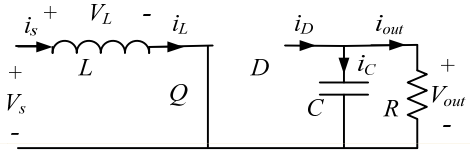
تغییر سطح ولتاژ با ذخیره انرژی الکتریکی در سلف و آزادسازی آن در خازن صورت میگیرد.

رگولاتور افزاینده (BOOST)



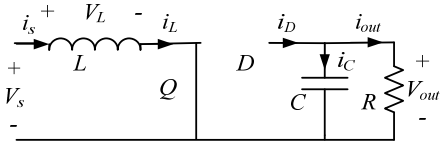
برای تحلیل عملکرد رگولاتور دو حالت وصل و قطع کلید را فرض می کنیم.

اگر کلید Q وصل باشد آنگاه:



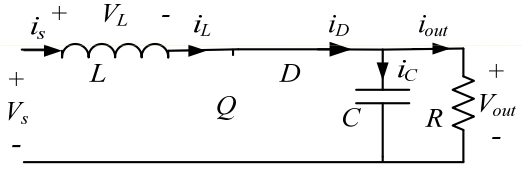
کلید اتصال کوتاه و دیود حتماً قطع است.

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

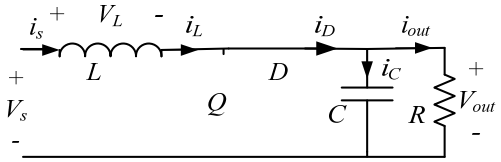


$$V_L = V_s = L\frac{di_L}{dt} = L\frac{\Delta i_L}{t_1} \rightarrow \Delta i_L = \frac{t_1}{L}V_s \quad ,(\Delta i_L = I_2 - I_1)$$

اگر کلید Q قطع باشد پس دیود حتماً روشن میشود.



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



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

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

۱ و ۲ $$\Delta i_L = \frac{t_1}{L}V_s = \frac{t_2}{L}(V_{out} - V_s) \quad \rightarrow \quad V_{out} = \frac{1}{1-k}V_s$$

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

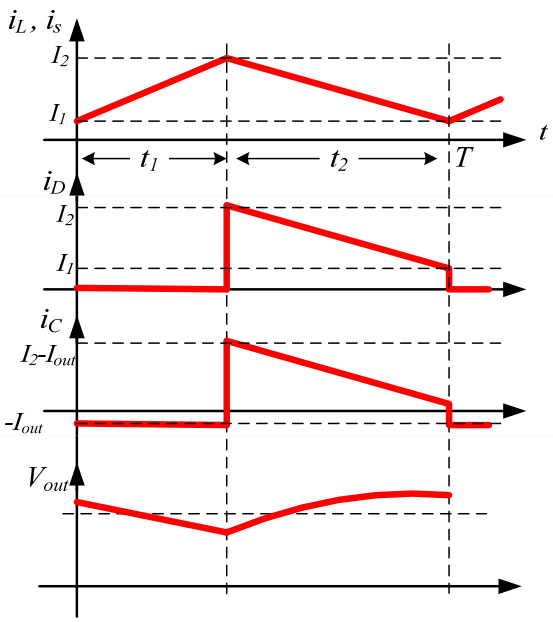
143

۱ و ۲ $$T = t_1 + t_2 = \frac{1}{f} \quad \rightarrow \quad \Delta i_L = \frac{V_s \cdot k}{fL}$$

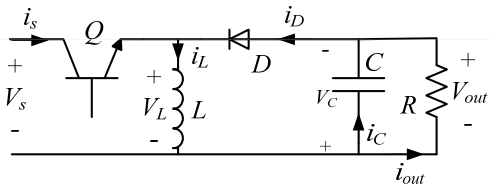
$$\Delta V_C = \Delta V_{out} = \frac{I_{out} \cdot k}{fC}$$

- 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.

144

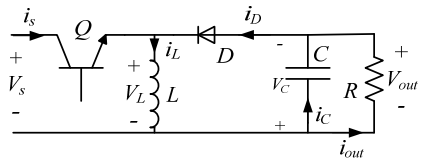


رگولاتور کاهنده - افزاینده (Buck- Boost)

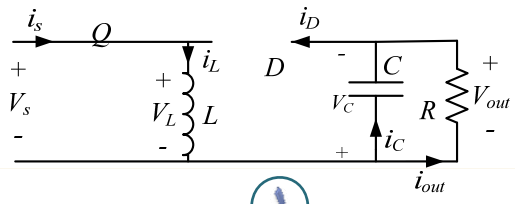


در این رگولاتور متوسط ولتاژ خروجی میتواند بیشتر یا کمتر از ورودی باشد.

پلاریته ولتاژ خروجی عکس پلاریته ولتاژ ورودی است.

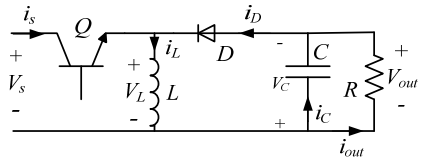


اگر کلید وصل باشد، دیود حتماً قطع است.

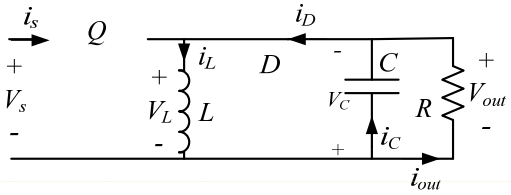


۱

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



اگر کلید قطع شود، دیود حتماً روشن می شود.



۲

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

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

او ۲

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

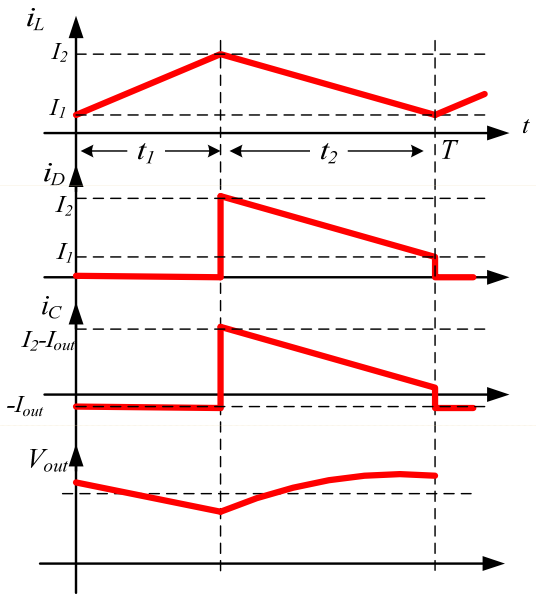
$$k = \begin{cases} 0 \\ 0.5 \\ 1 \end{cases} \quad \rightarrow \quad V_{out} = \begin{cases} 0 \\ -V_s \\ -\infty \end{cases} \qquad i_s = \frac{-k}{1-k} i_{out}$$

او ۲

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

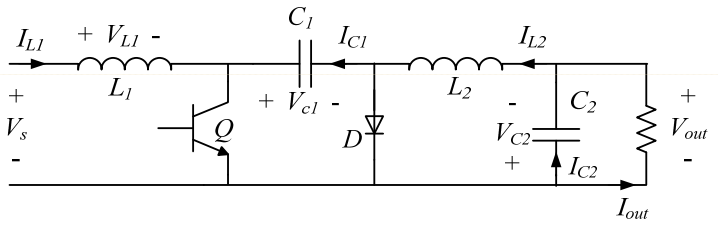
$$\Delta V_C = \Delta V_{out} = \frac{I_{out} \cdot k}{fC}$$

149



150

رگولاتور کیوک (Cuk)

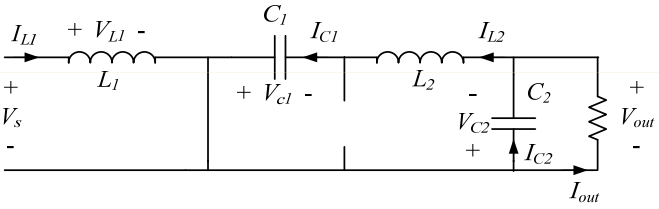


در این رگولاتور متوسط ولتاژ خروجی میتواند بیشتر یا کمتر از ورودی باشد.

پلاریته ولتاژ خروجی عکس پلاریته ولتاژ ورودی است.

151

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

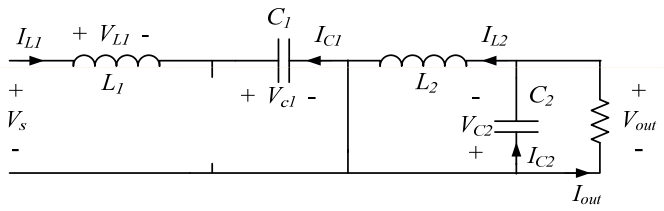


سلف L1 شروع به شارژ میکند و خازن C1 انرژی بار را تامین میکند.

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

152

اگر سوییچ 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:

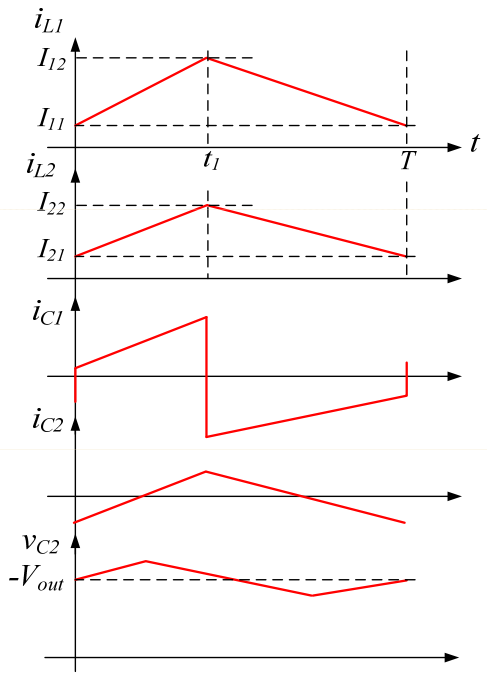
$$V_{C1} = \frac{V_s}{1-k}$$

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

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

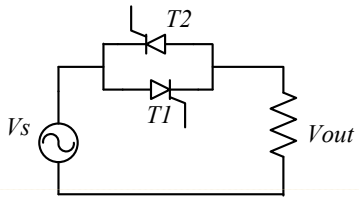
$$V_{C1} = -\frac{V_{out}}{k} \qquad V_{out} = -\frac{kV_s}{1-k}$$

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



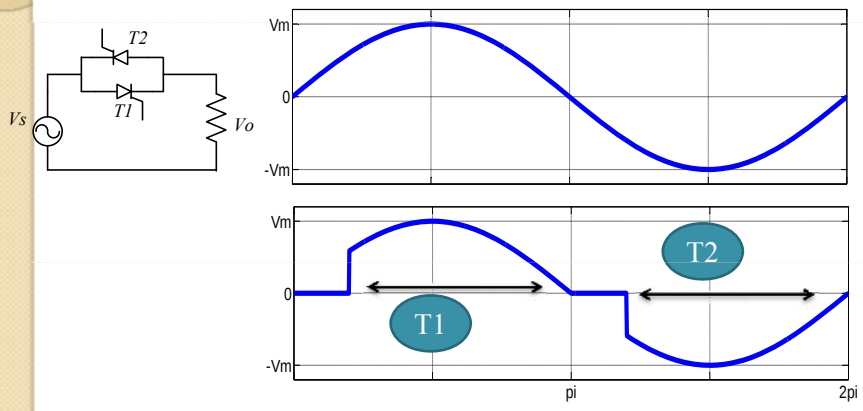
کنترل ولتاژ متناوب

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.

در نیم سیکل مثبت تریستور ۱ و در نیم سیک منفی تریستور ۲ روشن می شود.



157

مقدار موثر ولتاژ خروجی:

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

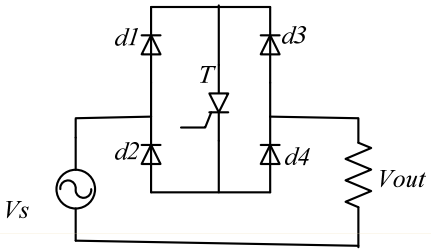
$$\frac{V_m}{\sqrt{2}}\left[\frac{1}{\pi}\left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}\right)\right]^{0.5}$$

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

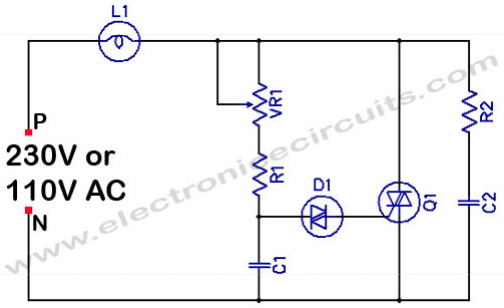
158

مشکل مبدل: نیاز به دو زمین مجزا برای کنترل تریستورها

راه حل: استفاده از مدار زیر

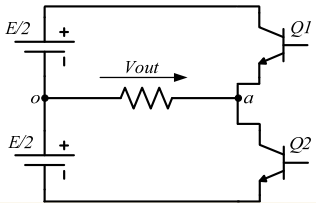


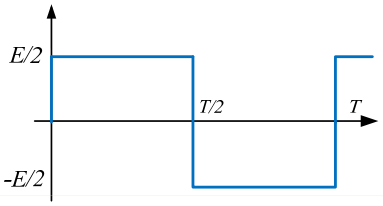
کاربرد : کنترل سرعت موتور Ac- دیمر



اینورتر تکفاز

اینورتر نیم پل مربعی:





هر کلید به مدت نصف دوره تناوب روشن می گردد.

مقدار موثر ولتاژ خروجی:

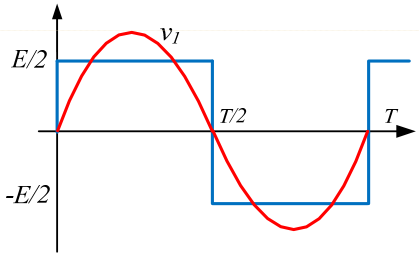
$$V_{out,rms}=\left(\frac{2}{T}\int_0^{T/2}\frac{E^2}{4}dt\right)^{0.5}=\frac{E}{2}$$

بسط سری فوریه ولتاژ خروجی:

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

دامنه و مقدار موثر مولفه اصلی در ولتاژ خروجی:

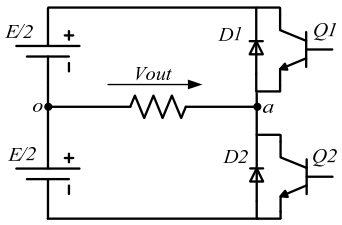
$$v_1(\omega t)=\frac{2E}{\pi}\sin\omega t \quad\rightarrow\quad V_1=\frac{2E}{\pi} \quad\rightarrow\quad V_{1,rms}=\frac{2E}{\pi\sqrt{2}}=0.45E$$

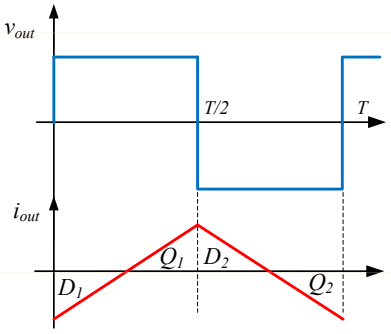


بار با خاصیت سلفی:

جریان بار نمی تواند مانند ولتاژ سریعاً تغییر علامت دهد.

به دیود **هرزگرد** نیاز است.





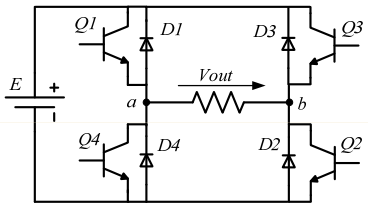
رابطه جریان بار:

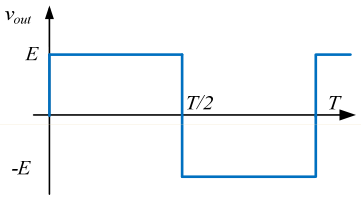
$$i_{out}(\omega t)=\sum_{n=1,3,\ldots}^{\infty}\frac{2E}{n\pi\sqrt{R^2+(n\omega L)^2}}\sin(n\omega t-\varphi_n)$$

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

163

اینورتر پل مربعی:





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

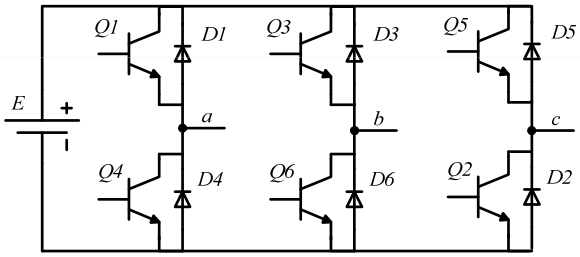
$$v_{out}(\omega t)=\sum_{n=1,3,\ldots}^{\infty}\frac{4E}{n\pi}\sin n\omega t$$

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

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

164

اینورتر سه فاز

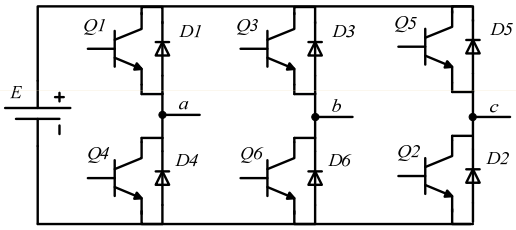


-هدایت ۱۸۰ درجه

- هدایت ۱۲۰ درجه

165

هدایت ۱۸۰ درجه:



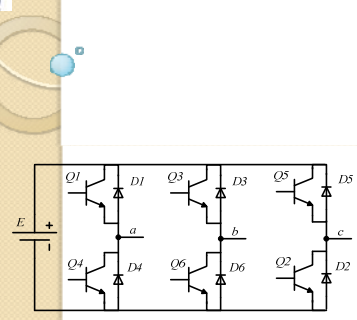
هر سوییچ برای ۱۸۰ درجه هدایت می کند.

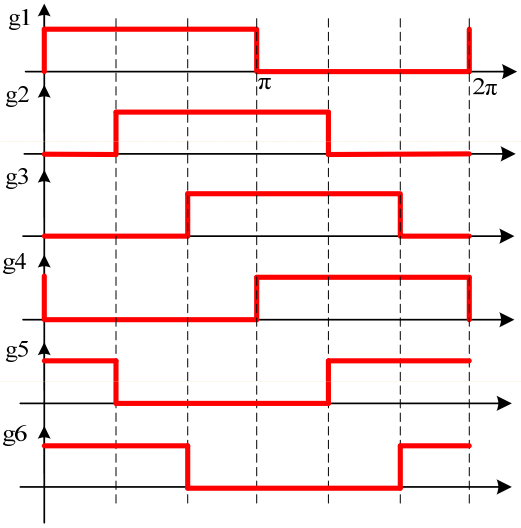
سوییچ های بالایی باهم ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند و سوییچ های پایینی نیز با هم.

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

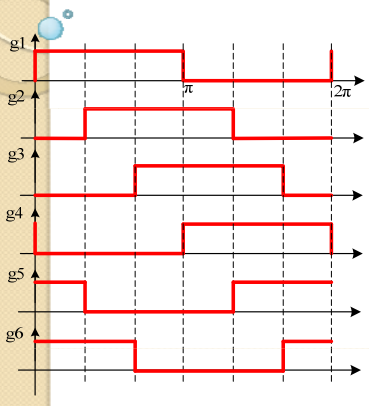
166

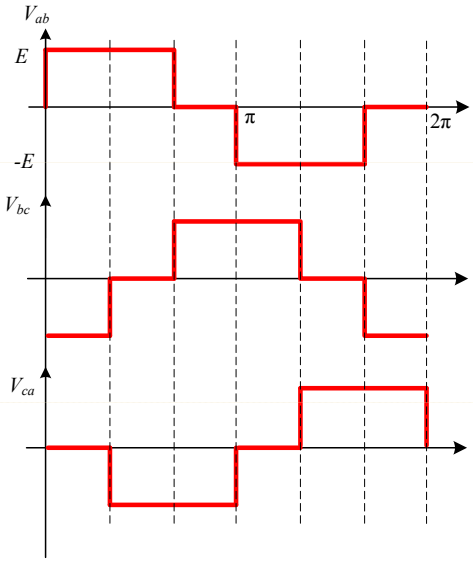
سیگنال های گیت سوییچ ها





ولتاژهای خط





ولتاژهای خط:

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

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

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

هارمونیک های مضرب ۳ در ولتاژ خط وجود ندارند.

مقدار موثر ولتاژ خط:

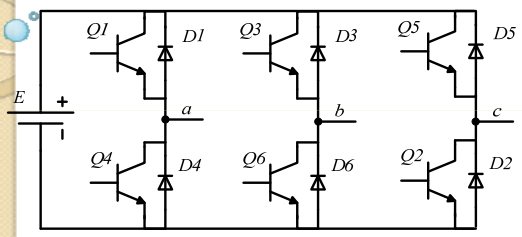
$$V_{L,rms}=\left(\frac{2}{2\pi}\int_0^{2\pi/3}E^2 d\omega t\right)^{0.5}=\sqrt{\frac{2}{3}}E=0.817E$$

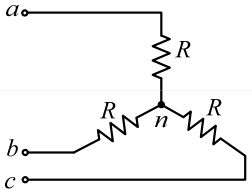
مقدار موثر ولتاژ فاز:

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

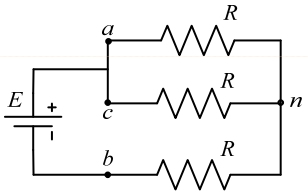
169

تعیین ولتاژ فاز





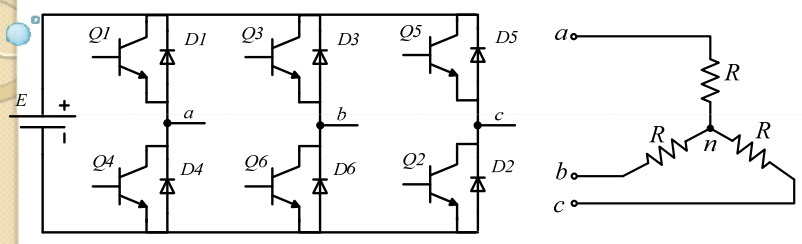
$$0\le\omega t<\frac{\pi}{3}\quad:\quad Q_1,Q_5,Q_6\ (ON)$$



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

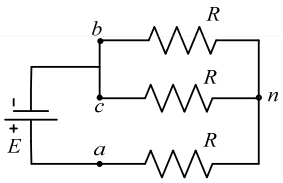
170

تعیین ولتاژ فاز

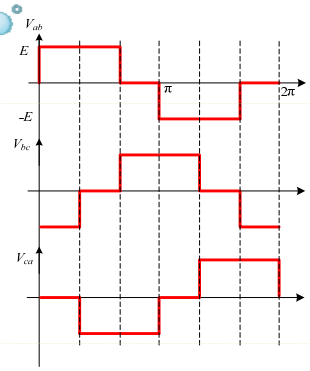


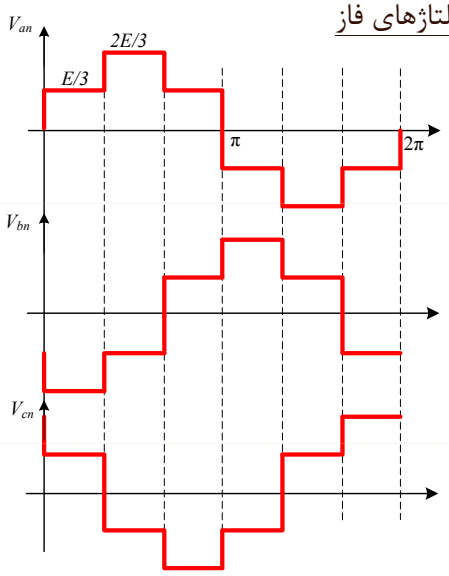
$$\frac{\pi}{3} \le \omega t < \frac{2\pi}{3} \quad : \quad Q_1, Q_2, Q_6 \ (ON)$$

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



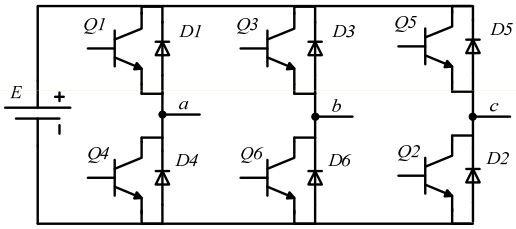
ولتاژهای فاز





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

هدایت ۱۲۰ درجه:



هر سوییچ برای ۱۲۰ درجه هدایت می کند.

در هر لحظه فقط دو سوییچ روشن هستند.

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

173

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد- بکناش

مثال) یک اینورتر سه فاز با هدایت ۱۸۰ درجه و بار ستاره با مقاومت ۵ اهم و اندوکتانس۲۳ 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.

حل: الف)

174

کنترل ولتاژ اینورترها

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

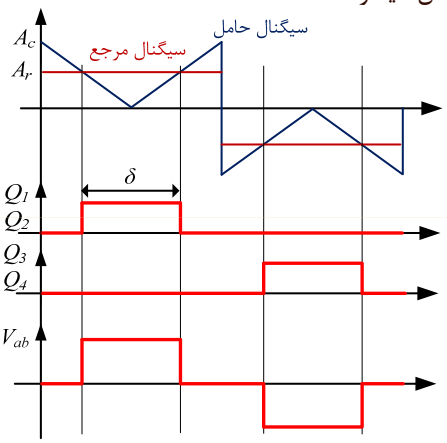
مدولاسیون پهنای پالس: به منظور کنترل ولتاژ خروجی پهنا (عرض) پالس کنترل سوییچ ها تنظیم می شود.

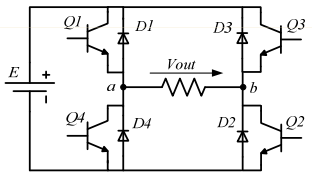
۱- مدولاسیون پهنای پالس منفرد
۲- مدولاسیون پهنای پالس چندگانه
۳- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی

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.





177

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:

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

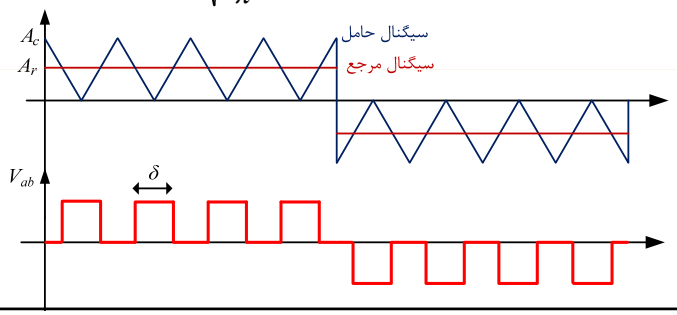
178

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.

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

-موثر ولتاژ خروجی: $V_{ab,rms} = E\sqrt{\frac{p\delta}{\pi}}$

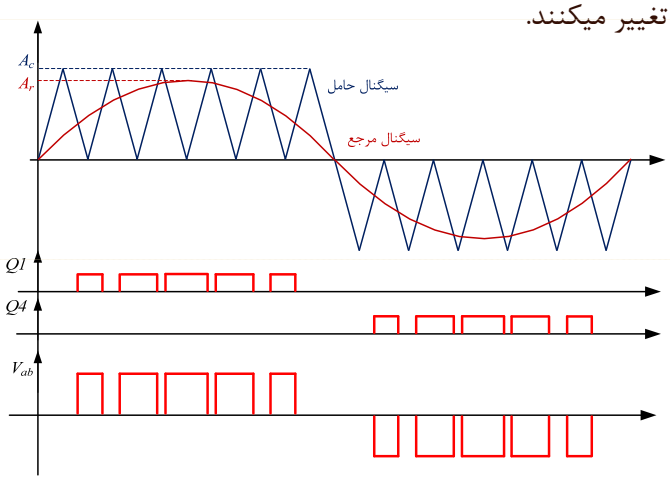


179

درس الکترونیک صنعتی - دانشکده برق دانشگاه آزاد نجف آباد - بکتاش

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.



180

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