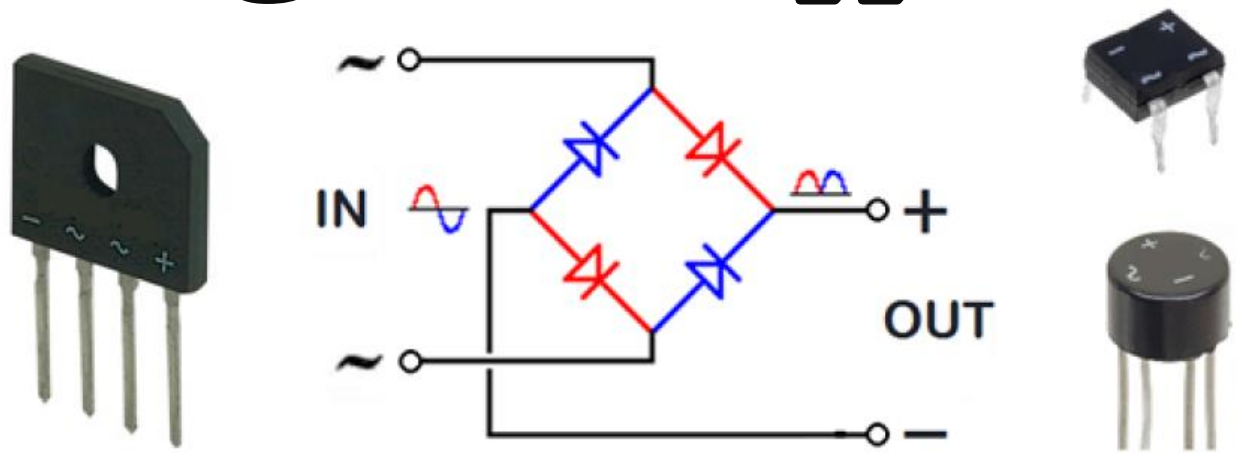
الکترونیک صنعتی



فصل اول

دیودها و یکسوکننده‌های کنترل نشده

Diodes and Uncontrolled Rectifiers

مدرس: احمد توکلی

Ahmad Tavakoli Email:atavakoli53@gmail.com

مقدمه

- *الکترونیک قدرت* ترکیبی از قدرت، الکترونیک و کنترل است.
- *کنترل* به بررسی مشخصه های دینامیک و حالت پایدار سیستمهای با حلقه بسته می پردازد.
- *قدرت*، وسایل قدرت استاتیک و گردنده را که در تولید، انتقال و توزیع توان الکتریکی بکار گرفته می شود بررسی می کند.
- *الکترونیک*، مدارها و وسایل پردازشگر یا پردازنده سیگنالها را بررسی می کندکه برای بدست آوردن هدفهای کنترلی مطلوب مورد استفاده قرار می گیرند.
- الکترونیک قدرت را می توان بصورت کاربرد های الکترونیک حالت جامد در کنترل و تبدیل توان الکتریکی نیز تعریف کرد.

عناصر نیمه‌هادی قدرت

- عناصر نیمه‌هادی قدرت به ۵ طبقه تقسیم می‌شوند:

۱- دیودهای قدرت

۲- تریستورها

۳- ترانزیستورهای پیوند دو قطبی (BJT)

٤- MOSFET های قدرت

۵- ترانزیستورهای دوقطبی با گیت عایق شده (IGBT) و ترانزیستورهای با القای استاتیک (SIT)

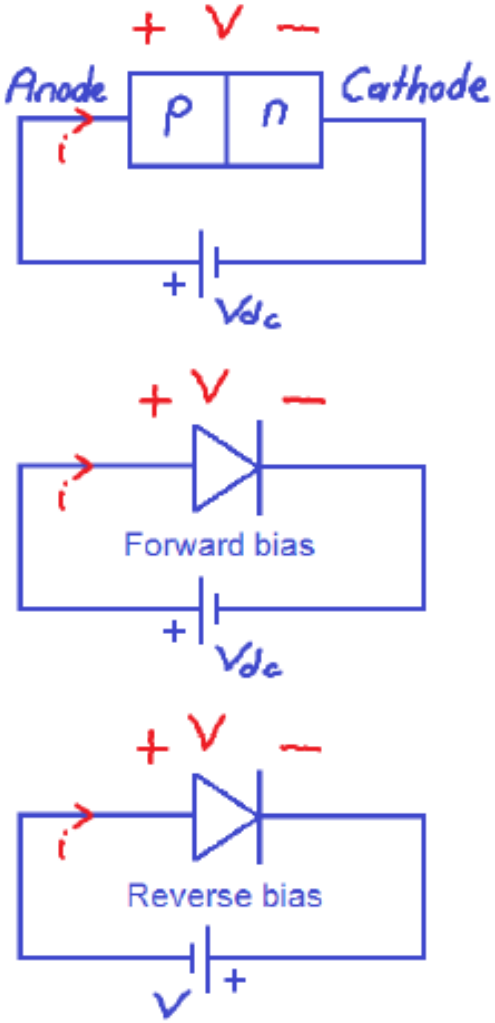
انواع مدارهای الکترونیک قدرت

- جهت کنترل توان الکتریکی یا تغییر توان، تبدیل توان الکتریکی از یک شکل به شکل دیگر لازم است و مشخصات کلید زنی عناصر قدرت اجازه چنین تبدیلاتی را می‌دهد. مبدل‌های استاتیک قدرت این تبدیلات توان را انجام می دهند.

- مدارهای الکرونیک قدرت را می توان در شش گروه طبقه بندی کرد:

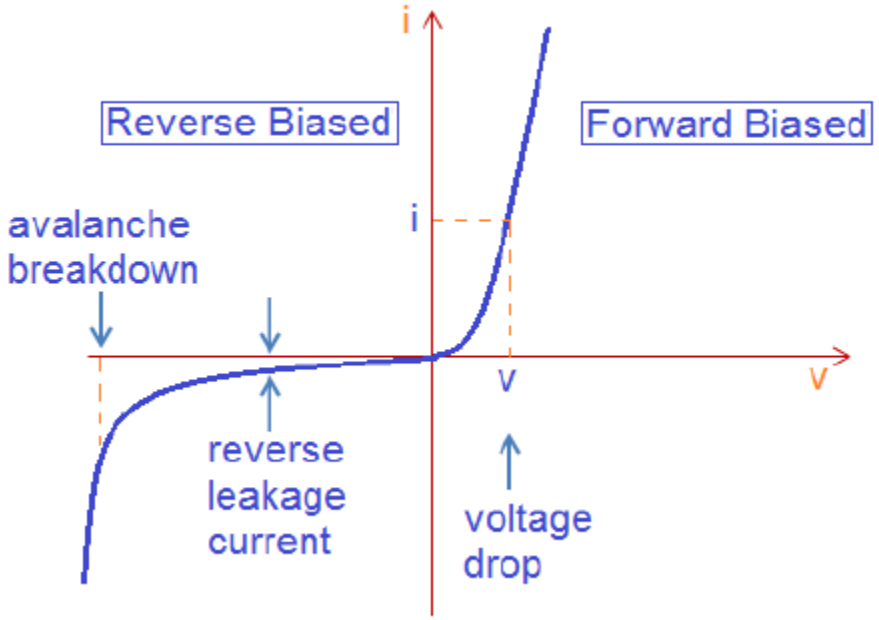
❖ یکسوکننده‌های دیودی
❖ مبدل‌های **ac** به **dc** (یکسوکننده‌های کنترل شونده)
❖ مبدل‌های **ac** به **ac** (کنترل کننده‌های ولتاژ **ac**)
❖ مبدل‌های **dc** به **dc** (چاپرهای **dc**)
❖ مبدل‌های **dc** به **ac** (اینورتر)
❖ کلید های استاتیک

دیودهای نیمه‌هادی قدرت



- دیود قدرت یک قطعه دو پایانه با پیوند **pn** است.
- بایاس مستقیم: وقتی ولتاژ آند مثبت‌تر از کاتد باشد، دیود هدایت می‌کند. مقدار این افت ولتاژ کوچک است و به فرایند ساخت و دمای پیوند بستگی دارد.
- بایاس معکوس: وقتی ولتاژ کاتد مثبت‌تر از آند باشد، دیود قطع خواهد بود. در این حالت یک جریان معکوس کم (جریان نشتی) وجود دارد که به تدریج با افزایش ولتاژ معکوس بیشتر می‌شود.

منحنی مشخصه V-I دیودهای قدرت



- معادله دیود شاکلی:

$$I_D = I_S\left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1\right)$$

V_D: ولتاژ دیود

I_D: جریان دیود

I_S: جریان نشتی (حدود میکرو آمپر یا نانوآمپر)

n: ثابت تجربی، ضریب دیود، بین ۱ تا ۲

V_T: ولتاژ حرارتی

$$V_T = \frac{KT}{q}$$

k: ثابت بولتزمن $k = 1.38 \times 10^{-23}\ J/K$

q: بار الکترون $q = 1.6 \times 10^{-19}\ C$

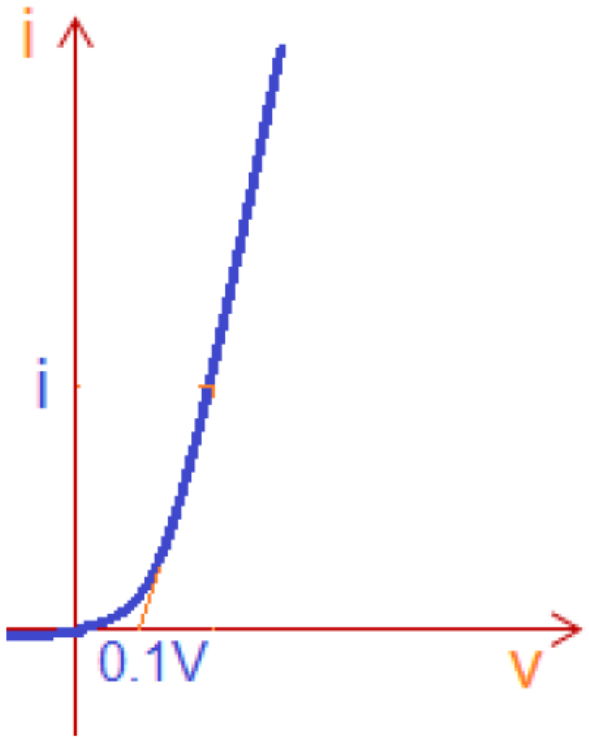
T: دما بر حسب درجه کلوین $(°K)$

ولتاژ حرارتی در دمای $25°C$ برابر است با:

$$V_T = \frac{KT}{q} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times (298)}{1.6 \times 10^{-19}} = 25.8\ mV$$

ناحیه بایاس مستقیم $V_D > 0$

- تا وقتی V_D کوچکتر از ولتاژ آستانه است جریان I_D بسیار کوچک است.
- وقتی V_D بزرگتراز ولتاژ آستانه شود، دیود به‌طور کامل هدایت می‌کند.
- حالت $0 < V_D < V_{threshold}$:



فرض می‌کنیم: $V_D = 0.1\,V\,, n = 1\,, V_T = 25.8\,mV$

$$I_D = I_S\left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1\right) = I_S\left(e^{\frac{0.1}{(1)(25.8\times10^{-3})}} - 1\right)$$

$$= I_S(48.23 - 1) = 47.23 I_S$$

✓ چون I_S بسیار کوچک است، I_D نیز بسیار کوچک خواهد بود.

- حالت $V_D \gg V_{threshold}$:

$$I_D = I_S\left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1\right) \cong I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} \Longrightarrow I_D \gg I_S$$

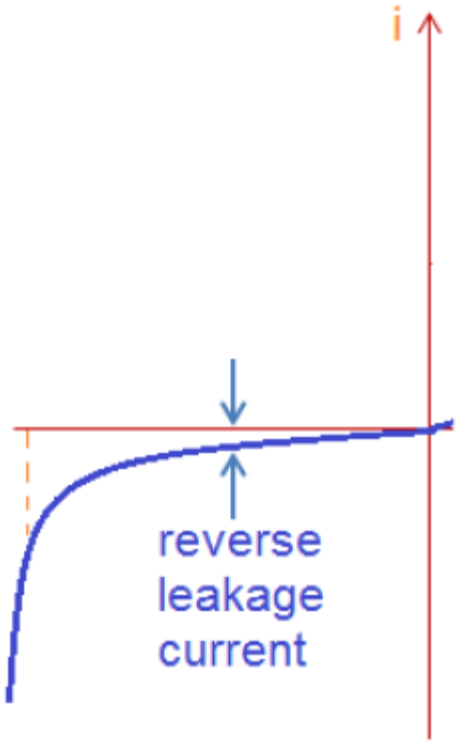
✓ I_D بسیار بزرگتر از I_S است.

ناحیه بایاس معکوس

- اگر $V_D < -0.1\,V$ شود، قسمت نمایی معادله دیود بسیار کوچکتر از یک می‌شود.

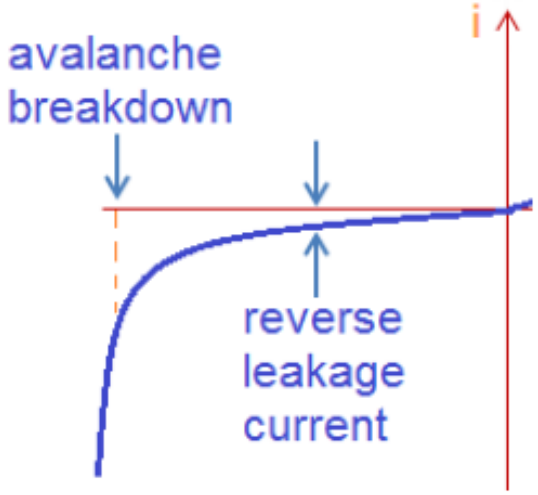
$$I_D = I_S\left(e^{\frac{-V_D}{nV_T}} - 1\right) \cong -I_S$$

- جریان دیود در جهت معکوس برقرار می‌شود.
- جریان معکوس دیود، جریان نشتی نام دارد.
- در دیود واقعی، با افزایش ولتاژ معکوس، جریان نشتی هم افزایش پیدا می‌کند.



ناحیه شکست بهمنی

- اگر ولتاژ معکوس دیود از مقدار مشخصی بیشتر شود، ناحیه سد می‌شکند.
- این ولتاژ، ولتاژ شکست (V_{BR}) نام دارد.
- اگر ولتاژ معکوس مقدار کمی بیشتر از V_{BR} شود، جریان معکوس سریعاً افزایش پیدا می‌کند.
- استفاده از دیود در این ناحیه مخرب نیست، به شرطی که تلفات توان در محدوده ایمن تعیین شده در دیتاشیت کارخانه سازنده باشد.
- جریان معکوس در ناحیه شکست باید محدود شود.
- دیود زنر در این ناحیه مورد استفاده قرار می‌گیرد.



نقطه کار دیود در یکسوکننده‌ها باید دور از این ناحیه انتخاب شود.

مثال ۱

- افت ولتاژ یک دیود قدرت در بایاس مستقیم در جریان $I_D = 300\,A$ برابر $V_D = 1.2\,V$ است. اگر $n = 2$ و $V_T = 25.8\,mV$ باشد، مقدار جریان اشباع معکوس را محاسبه کنید.

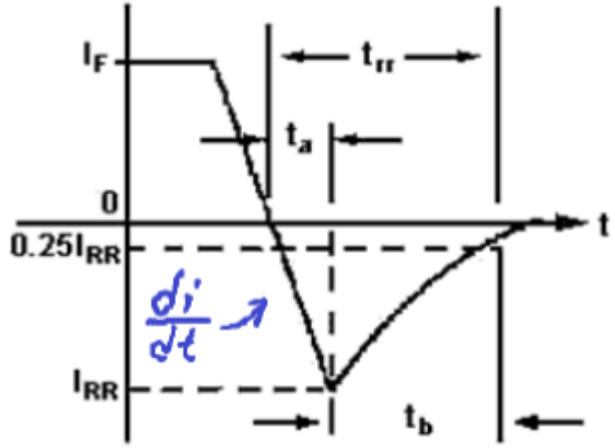
- حل:

$$I_D = I_S\left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1\right)$$

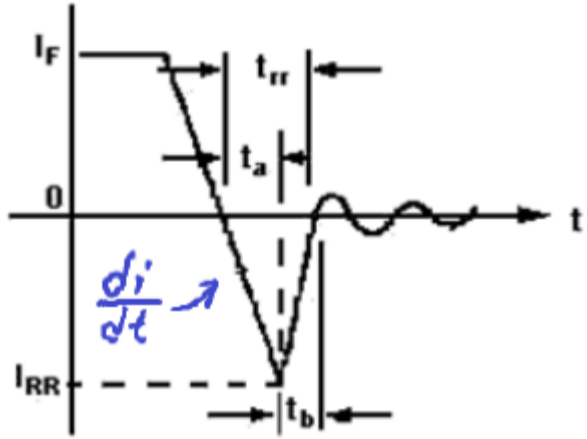
$$300 = I_S\left(e^{\frac{1.2}{2(0.0258)}} - 1\right)$$

$$I_S = 2.3837 \times 10^{-8}\,A$$

مشخصات بازیابی معکوس



بازیابی نرم



بازیابی ناگهانی

- اگر جریان بایاس مستقیم دیود به صفر کاهش یابد، به دلیل وجود حامل‌های اقلیت که در محل پیوند PN ذخیره شده‌اند، دیود همچنان هدایت می‌کند.
- حامل‌های اقلیت برای ترکیب شدن مجدد با بارهای مخالف و خنثی شدن به مدت زمان معینی نیاز دارند. این زمان، زمان بازیابی معکوس (t_{rr}) نام دارد، (**Reverse Recovery Time**).
- زمان بازیابی معکوس دارای دو مولفه t_a و t_b است:

$$t_{rr} = t_a + t_b$$

- t_a ناشی از ذخیره بار در منطقه تخلیه پیوند است.
- t_b ناشی از ذخیره بار در توده ماده نیمه هادی است.
- ماکزیمم جریان معکوس برابراست با:

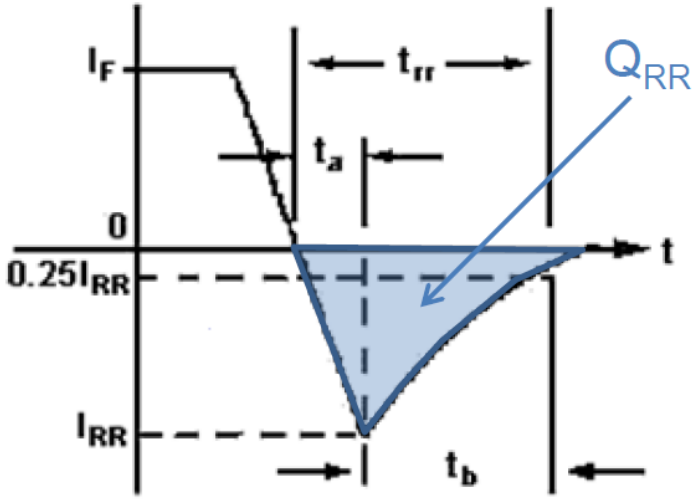
$$I_{RR} = t_a \frac{di}{dt}$$

- زمان بازیابی معکوس به دما، جریان مستقیم (I_F) و شیب کاهش جریان مستقیم (di/dt) بستگی دارد.

بار بازیابی معکوس Q_{RR}

- Q_{RR} مقدار بار الکتریکی است که در طی زمان بازیابی در جهت معکوس از دیود عبور می‌کند. مقدار Q_{RR} تقریباً برابر است با:

$$Q_{RR} \cong \frac{1}{2} I_{RR}(t_a + t_b) = \frac{1}{2} I_{RR} t_{rr}$$



- با جایگزینی I_{RR} در این معادله داریم:

$$Q_{RR} = \frac{1}{2} t_a t_{rr} \frac{di}{dt}$$

- اگر از t_b در مقابل t_a صرفنظر کنیم،

$$t_{rr} = t_a + t_b \cong t_a$$

- در نتیجه:

$$t_{rr} = \sqrt{\frac{2Q_{RR}}{\frac{di}{dt}}} \quad , I_{RR} = \sqrt{2Q_{RR}\frac{di}{dt}}$$

مثال ۲

- زمان بازیابی معکوس یک دیود قدرت برابر با $t_{rr} = 3\mu s$ و میزان پایین افتادن جریان دیود $di/dt = 30\,A/\mu s$ است. محاسبه کنید:

الف) بار ذخیره شده Q_{RR}

ب) جریان پیک معکوس I_{RR}

- حل:

الف)

$$Q_{RR} = \frac{1}{2}\frac{di}{dt}t_{rr}^2 = \frac{1}{2}\left(30 \times \frac{1A}{10^{-6}s}\right)\left(3 \times 10^{-6}\right)^2 = 135\mu s$$

ب)

$$I_{RR} = \sqrt{2Q_{RR}\frac{di}{dt}} = \sqrt{2(135 \times 10^{-6})\left(30 \times \frac{1A}{10^{-6}s}\right)} = 90A$$

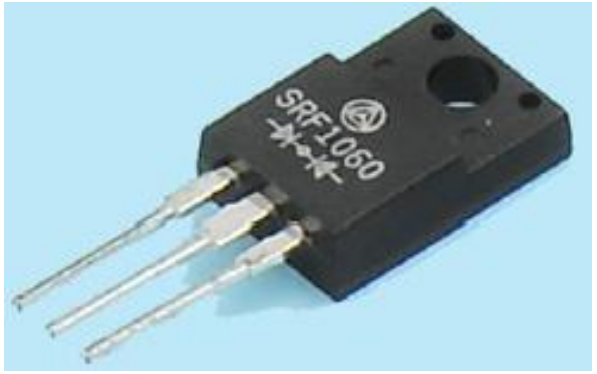
انواع دیودهای قدرت

- دیودهای ایده‌آل زمان بازیابی معکوس ندارند.
- کاهش زمان بازیابی معکوس باعث افزایش هزینه ساخت دیود می‌شود.
- در بسیاری از کاربردها اثرات زمان بازیابی معکوس اهمیت زیادی ندارد و می‌توان از دیودهای ارزان استفاده کرد.
- با توجه به مشخصه‌های بازیابی و روش‌های ساخت، دیودهای قدرت به سه گروه تقسیم می‌شوند:

دیودهای استاندارد یا همه منظوره:

- زمان بازیابی معکوس نسبتاً زیاد (حدود 25μs)
- استفاده در کاربردهای سرعت پایین (کمتر از یک کیلوهرتز) مانند یکسوکننده‌ها و مبدل‌های دیودی که زمان بازیابی اهمیت چندانی ندارند
- محدوده جریان کمتر از یک آمپر تا چند هزار آمپر و محدوده ولتاژ ۵۰ ولت تا ۵ کیلو ولت

انواع دیودهای قدرت



دیودهای بازیابی سریع:

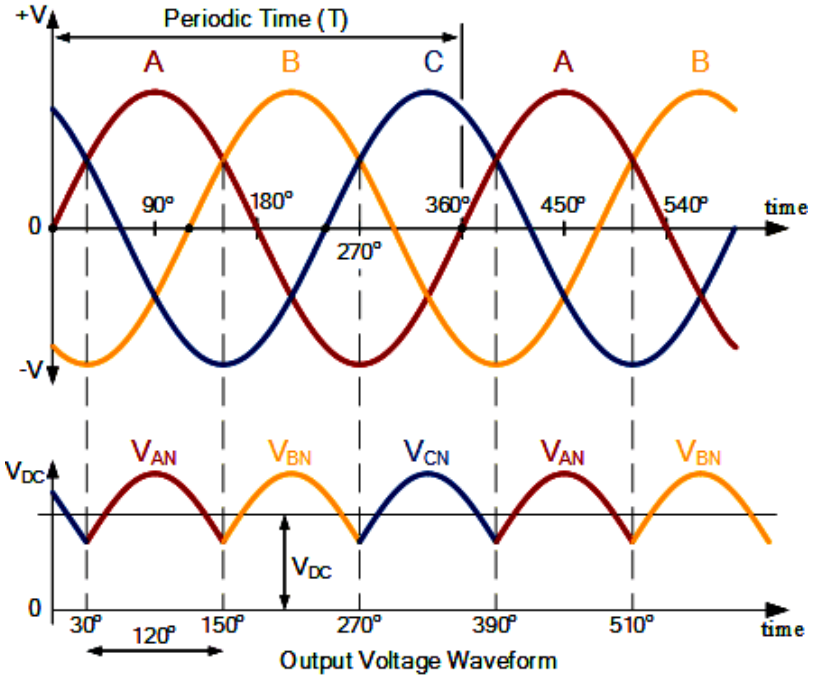
- زمان بازیابی معکوس کوچک (کمتر از 5μs)
- کاربرد در مبدل‌های dc به dc و dc به ac
- محدوده جریان از یک آمپر تا چند صد آمپر و محدوده ولتاژ از ۵۰ ولت تا ۳ کیلو ولتکمتر

دیودهای شاتکی :

- حل مشکل ذخیره بار در پیوند به دلیل نوع پیوند دیود شاتکی (پیوند فلز–نیمه هادی به جای پیوند نیمه هادی–نیمه هادی)
- افت ولتاژ مستقیم کمتر از دیودهای معمولی
- جریان نشتی بیشتر از دیودهای پیوند pn
- کاربرد در منابع تغذیه dc با ولتاژ کم و جریان بالا
- محدوده جریان یک آمپر تا ۳۰۰ آمپر و حداکثر ولتاژ مجاز کمتر از ۱۰۰ ولت

یکسوکننده‌ها

- هدف از طراحی مدارهای یکسوکننده (**Rectifier Circuits**)، به‌دست آوردن ولتاژ **dc** از ولتاژ متناوب (**ac**) است. به عبارت دیگر، یکسوکننده‌ها « ***مبدل‌های ac به dc*** » هستند.
- عملاً ولتاژ **dc** خروجی یکسوکننده کاملاً یکنواخت (صاف) نیست و دارای مولفه ریپل (**Ripple**) بر روی ولتاژ **dc** است.



شکل موج یکسوکننده سه‌فاز نیم‌موج کنترل‌نشده

- مدارهای یکسوکننده به دو گروه اصلی یکسوکننده‌های نیم‌موج (**Half-wave**) و یکسوکننده‌های تمام‌موج (**Full-wave**) تقسیم می‌شوند.
- مدارهای یکسوکننده را با توجه به مشخصه‌های کنترلی آن‌ها به سه دسته کنترل‌نشده (**Uncontrolled**) نیمه‌کنترل‌شده (**Half controlled**) و تمام‌کنترل‌شده (**Fully-controlled**) تقسیم می‌کنند.

پارامترهای کارآیی یکسوکننده‌ها

به‌طور معمول، کارآیی یک یکسوکننده از روی پارامترهای زیر تعیین می‌شود:

- مقدار متوسط ولتاژ خروجی (بار): V_{dc}
- مقدار متوسط جریان خروجی (بار): I_{dc}
- توان dc خروجی:

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} \quad (۱)$$

- مقدار موثر ولتاژ خروجی: V_{rms}
- مقدار موثر جریان خروجی: V_{rms}
- توان ac خروجی:

$$P_{ac} = V_{rms} I_{rms} \quad (۲)$$

- بازده (Efficiency) یا نسبت یکسوسازی (Rectification Ratio) که مقایسه یکسوکننده‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \quad (۳)$$

- ولتاژ خروجی ترکیبی از دو مولفه است: ۱) مقدار dc ۲) مولفه ac یا ریپل
- مقدار موثر مولفه ac ولتاژ خروجی (V_{ac}) برابر است با:

$$V_{ac} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2} \quad (٤)$$

پارامترهای کارآیی یکسوکننده‌ها

- ضریب شکل (Form Factor - FF) که نمایانگر شکل ولتاژ خروجی است:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} \qquad (۵)$$

- ضریب ریپل(Ripple Factor - RF) که نمایانگر مقدار ریپل است:

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} \qquad (۶)$$

- با جایگزینی رابطه (٤) در رابطه (٦) می‌توان نوشت:

$$RF = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{dc}}\right)^2 - 1} = \sqrt{FF^2 - 1} \qquad (۷)$$

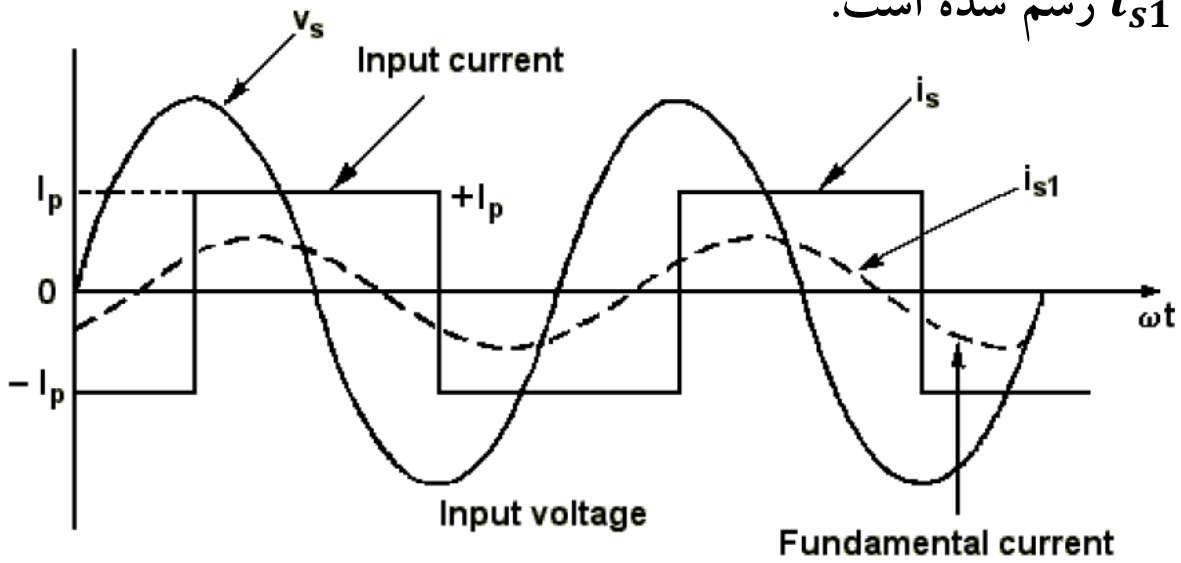
- ضریب کارکرد ترانسفورماتور (Transformer Utilization Factor - TUF) که نشان‌دهنده نسبت ابعاد ترانسفورماتور در مقایسه با زمانی که توان ac خالص را به بار تحویل می‌دهد، است:

$$TUF = \frac{P_{dc}}{V_S I_S} \qquad (۸)$$

در این رابطه، V_S و I_S به‌ترتیب ولتاژ و جریان موثر ثانویه ترانسفورماتور هستند.

پارامترهای کارآیی یکسوکننده‌ها

- در یکسوکننده‌های با بار سلفی شدید می‌توان جریان بار را صاف در نظر گرفت. بنابراین جریان اولیه ترانسفورماتور به‌صورت موج مربعی خواهد شد.
- در شکل زیر، شکل موج ولتاژ سینوسی ورودی V_s ، جریان ورودی i_s و هارمونیک (مولفه) اولیه جریان ورودی i_{s1} رسم شده است.



- زاویه میان مولفه‌های اولیه جریان و ولتاژ ورودی، زاویه تغییر مکان (**Displacement Angle**) نام دارد و با علامت ϕ نشان داده می‌شود. ضریب تغییر مکان (**Displacement Factor - DF**) یا ضریب تغییر مکان توان (**Displacement Power Factor - DPF**) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DPF = \cos\phi \quad (۹)$$

پارامترهای کارآیی یکسوکننده‌ها

- ضریب هارمونی جریان ورودی (Harmonic Factor - HF) یا اعوجاج هارمونیکی کل (Displacement Power Factor - THD) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$THD = \sqrt{\frac{I_s^2 - I_{s1}^2}{I_{s1}^2}} = \sqrt{\left(\frac{I_s}{I_{s1}}\right)^2 - 1} \quad (۱۰)$$

- در این رابطه، I_s مقدار موثر جریان ورودی و I_{s1} مقدار موثر مولفه اولیه جریان ورودی است.
- ضریب توان ورودی (Power Factor - PF) برابر است با:

$$PF = \frac{V_s I_{s1}}{V_s I_s} \cos\phi = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos\phi \quad (۱۱)$$

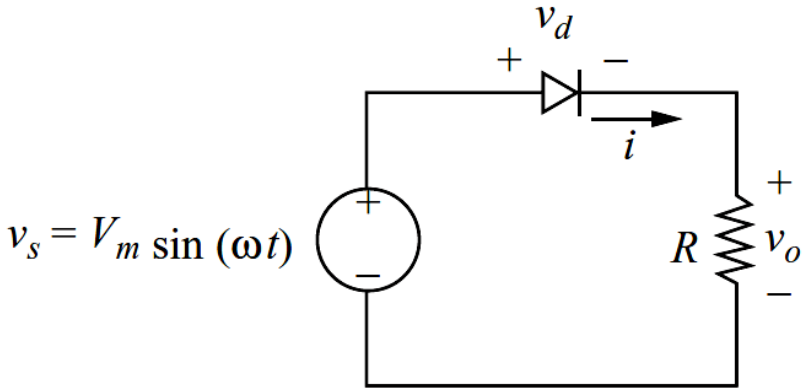
- ضریب صعود جریان ورودی (Crest Factor - CF) که بیانگر میزان پیک جریان ورودی $I_{s(peak)}$ در مقایسه با مقدار موثر آن است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CF = \frac{I_{s(peak)}}{I_s} \quad (۱۲)$$

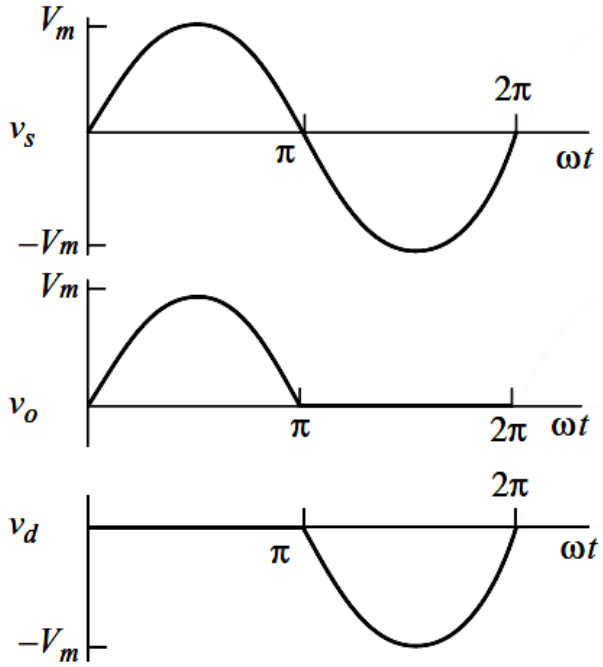
- در مدار یکسوکننده ایده‌آل:

$$PF = 1 \text{ و } DPF = 1 \text{ ، } THD = 0 \text{ ، } TUF = 1 \text{ ، } RF = 0 \text{ ، } V_{ac} = 0 \text{ ، } \eta = 100\%$$

یکسوکننده تکفاز نیم‌موج



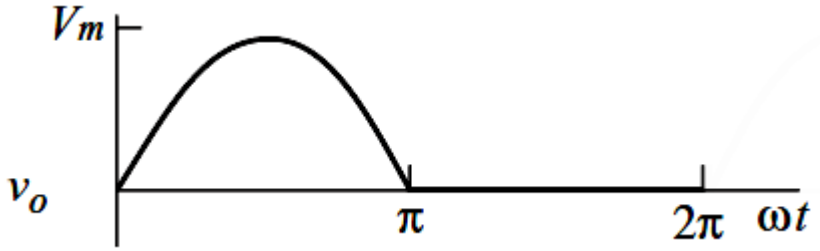
- این نوع یکسوساز، ساده‌ترین نوع یکسوساز است.
- دیود D_1 در طی نیم‌سیکل مثبت هدایت کرده و ولتاژ ورودی در دو سر بار قرار می‌گیرد. در این نیم‌سیکل، افت ولتاژ مستقیم کوچکی در دو سر دیود قرا می‌گیرد.
- در طی نیم‌سیکل منفی دیود D_1 در حالت قطع بوده و ولتاژ خروجی برابر صفر است.



اشکالات یکسوساز نیم‌موج:

- ✓ ولتاژ DC خروجی پیوسته نیست و دارای هارمونیک است.
- ✓ جریان ورودی سینوسی نیست.
- ✓ جریان خروجی ترانسفورماتور دارای مولفه DC است. وجود مولفه DC در جریان ترانسفورماتور ممکن است باعث اشباع ترانسفورماتور شود. به همین خاطر از یکسوکننده نیم‌موج اغلب در توان‌های پایین استفاده می‌شود.

یکسو کننده تکفاز نیم‌موج



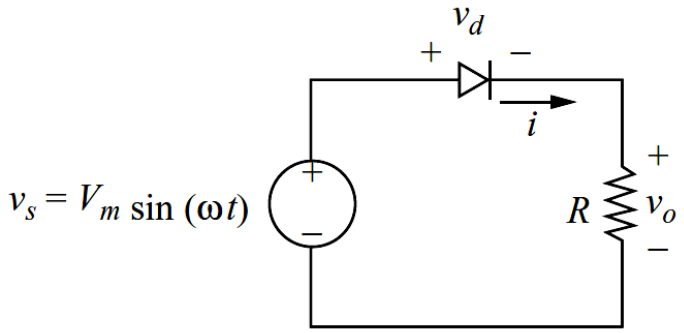
- ولتاژ متوسط خروجی:

$$V_{dc} = \frac{1}{T}\int_0^T v_L(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} V_m \sin \omega t\, dt = \frac{-V_m}{\omega T}\left(\cos\frac{\omega T}{2} - 1\right) \xrightarrow{\omega=\frac{2\pi}{T}} V_{dc} = \frac{V_m}{\pi}$$

- ولتاژ موثر خروجی:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(v_L(t)\right)^2 dt} == \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{T/2} (V_m \sin \omega t)^2 dt} \Rightarrow V_{rms} = \frac{V_m}{2}$$

مثال ۳



- در مدار یکسوساز نیم‌موج مطلوب است:

الف) راندمان (η)، ب) FF، پ) RF، ت) TUF،

ث) PIV دیود D_1 و ج) CF جریان ورودی.

- حل:

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = 0.318V_m \quad , \quad I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{0.318V_m}{R} \quad , \quad P_{dc} = V_{dc}I_{dc} = \frac{(0.318V_m)^2}{R}$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{2} = 0.5V_m \quad , \quad I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{0.5V_m}{R} \quad , \quad P_{ac} = V_{rms}I_{rms} = \frac{(0.5V_m)^2}{R}$$

الف)

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{(0.318V_m)^2}{(0.5V_m)^2} = 40.5\%$$

راندمان کم

ب)

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{0.5V_m}{0.318V_m} = 1.57 = 157\%$$

پ)

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{(1.57)^2 - 1} = 1.21 = 121\%$$

ضریب ریپل بسیار زیاد

ادامه مثال ۳

ت)

✓ مقدار موثر ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور:

$$V_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707V_m$$

✓ مقدار موثر جریان ثانویه ترانسفورماتور که همان جریان موثر بار است: (V_{rms} ولتاژ موثر خروجی است)

$$I_s = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{0.5V_m}{R}$$

✓ مقدار توان ظاهری (S) یا ولت-آمپر (VA) ترانسفورماتور (حاصلضرب ولتاژ موثر ترانسفورماتور در جریان موثر ترانسفورماتور):

$$S = V_s I_s = 0.707V_m \times \frac{0.5V_m}{R} = \frac{0.3535V_m^2}{R}$$

✓ ضریب بهره‌برداری ترانسفورماتور:

$$TUF = \frac{P_{dc}}{S} = \frac{(0.318V_m)^2/R}{0.3535V_m^2/R} = \frac{(0.318)^2}{0.3535} = 0.286$$

یعنی ترانسفورماتور باید $1/0.286 = 3.496$ بزرگتر از زمانی باشد که به بار ac خالص وصل می‌شود.

ث) حداکثر ولتاژ معکوس دیود (PIV):

$$PIV = V_m$$

ج) ضریب صعود جریان ورودی (CF):

$$CF = \frac{I_{s(peak)}}{I_s} = \frac{V_m/R}{0.5V_m/R} = 2$$

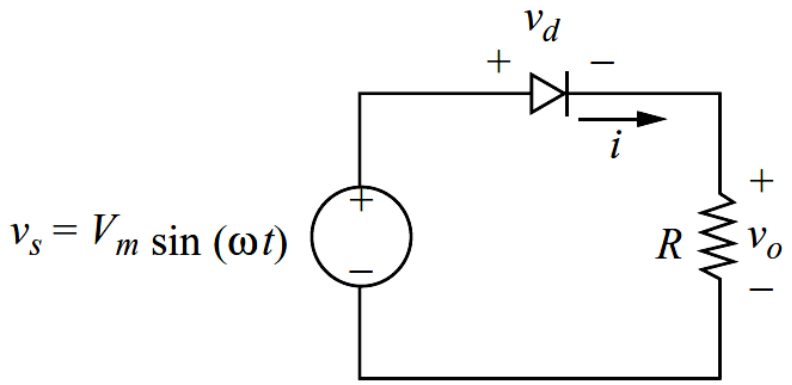
مثال ٤

- در مدار یکسوساز زیر ولتاژ منبع برابر با $120Vrms$ در فرکانس $60Hz$ است. همچنین مقاومت بار برابر با 5Ω است. مطلوب است محاسبه:

الف) جریان متوسط بار

ب) توان متوسط دریافت شده توسط بار

پ) ضریب توان مدار



- حل:

الف) $V_{o,m} = V_{S,m} = \sqrt{2}V_{S,rms} = \sqrt{2} \times 120 = 169.7\,V$

$$V_{o,dc} = \frac{V_{o,m}}{\pi} = \frac{169.7}{\pi} = 54\,V$$

$$I_{o,dc} = \frac{V_{o,dc}}{R} = \frac{54}{5} = 10.8\,A$$

ب)
$$V_{o,rms} = \frac{V_{o,m}}{2} = \frac{169.7}{2} = 84.9\,V$$

$$P = \frac{V_{o,rms}^2}{R} = \frac{(84.9)^2}{5} = 1440\,W$$

پ)

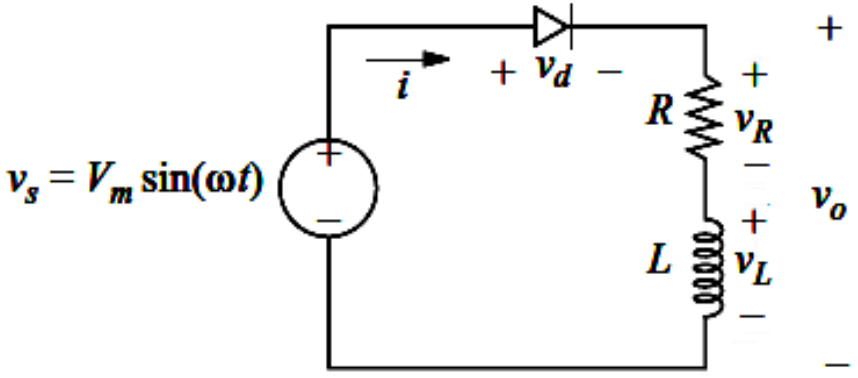
$$S = V_{S,rms}I_{S,rms} = 120 \times 17 = 2040\,VA$$

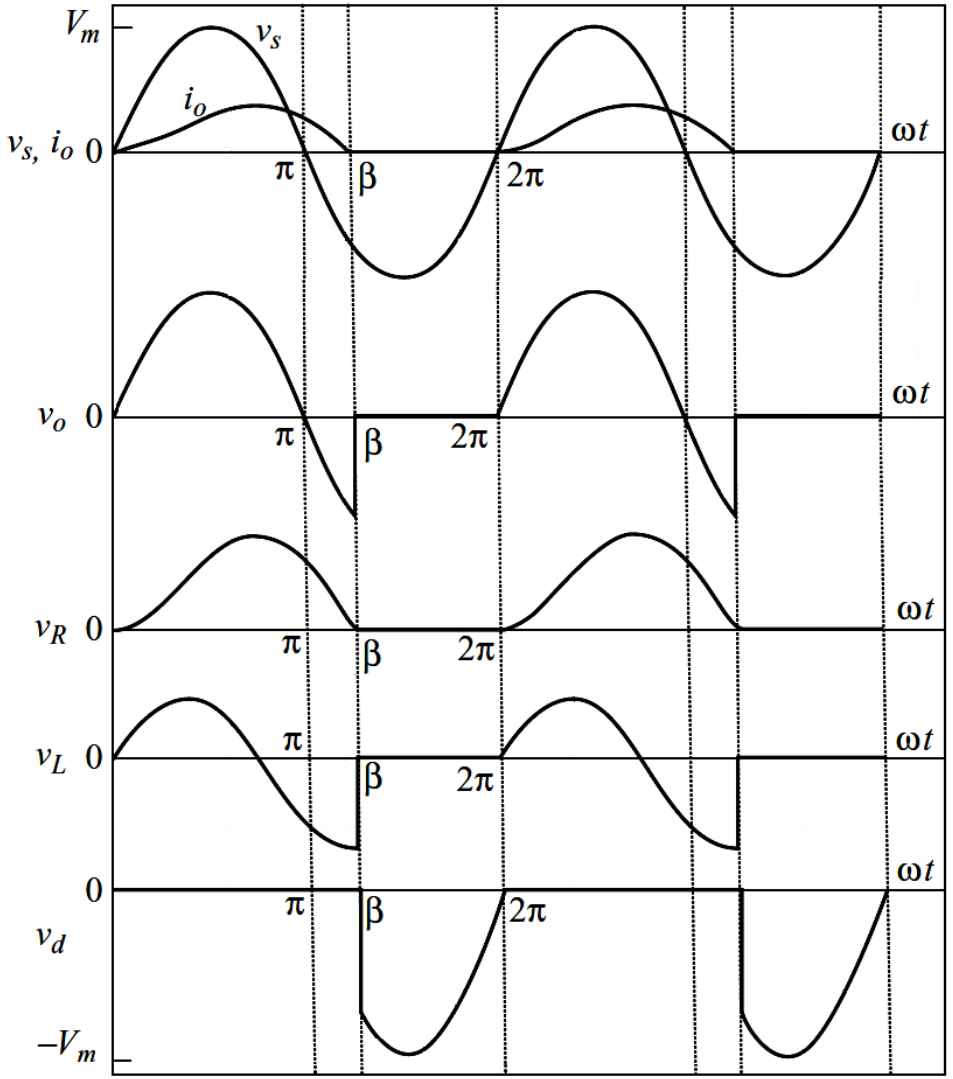
$$PF = \frac{P}{S} = \frac{1440}{2040} = 0.707$$

S : توان ظاهری منبع

P : توان متوسط بار

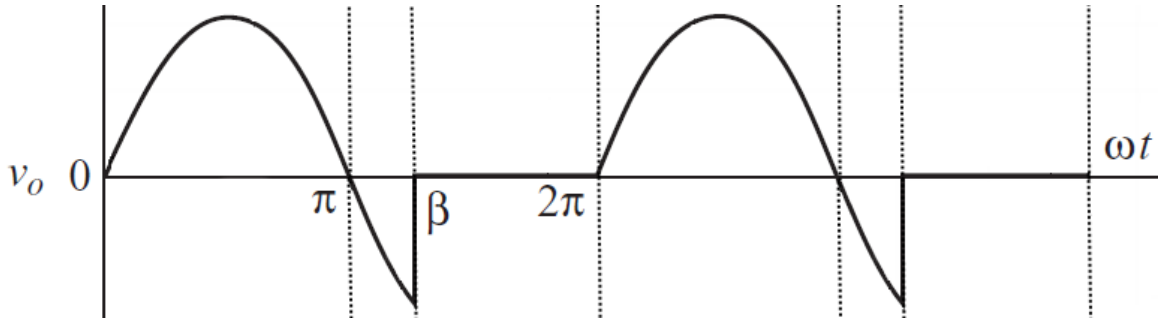
یکسوکننده تکفاز نیم‌موج با بار اهمی- سلفی





- در این مدار به‌خاطر خاصیت سلفی بار، دیود بیشتر از ۱۸۰° هدایت می‌کند تا زمانی که جریان مدار صفر شود.

یکسوکننده تکفاز نیم‌موج با بار اهمی- سلفی



- ولتاژ متوسط خروجی برابر است با:

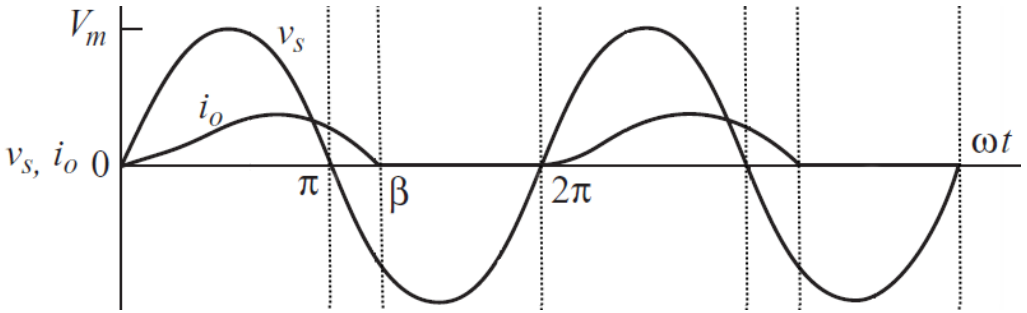
$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\beta} V_m \sin\omega t.\, d(\omega t) \Longrightarrow V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi}(1-\cos\beta)$$

نکته: با افزایش خاصیت سلفی بار، ولتاژ متوسط خروجی کاهش پیدا می‌کند.

- جریان متوسط بار برابر است با:

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$$

یکسوکننده تکفاز نیم‌موج با بار اهمی- سلفی



- معادله کلی جریان در مدار یکسوکننده نیم موج با بار **RL** برابر است با:

$$i(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_m}{Z}\left[\sin(\omega t - \theta) + \sin(\theta)e^{-\omega t/\omega\tau}\right] & \text{for } 0 \le \omega t \le \beta \\ 0 & \text{for } \beta \le \omega t \le 2\pi \end{cases}$$

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

- وقتی که $\omega t = \beta$ باشد، $i = 0$ می‌شود:

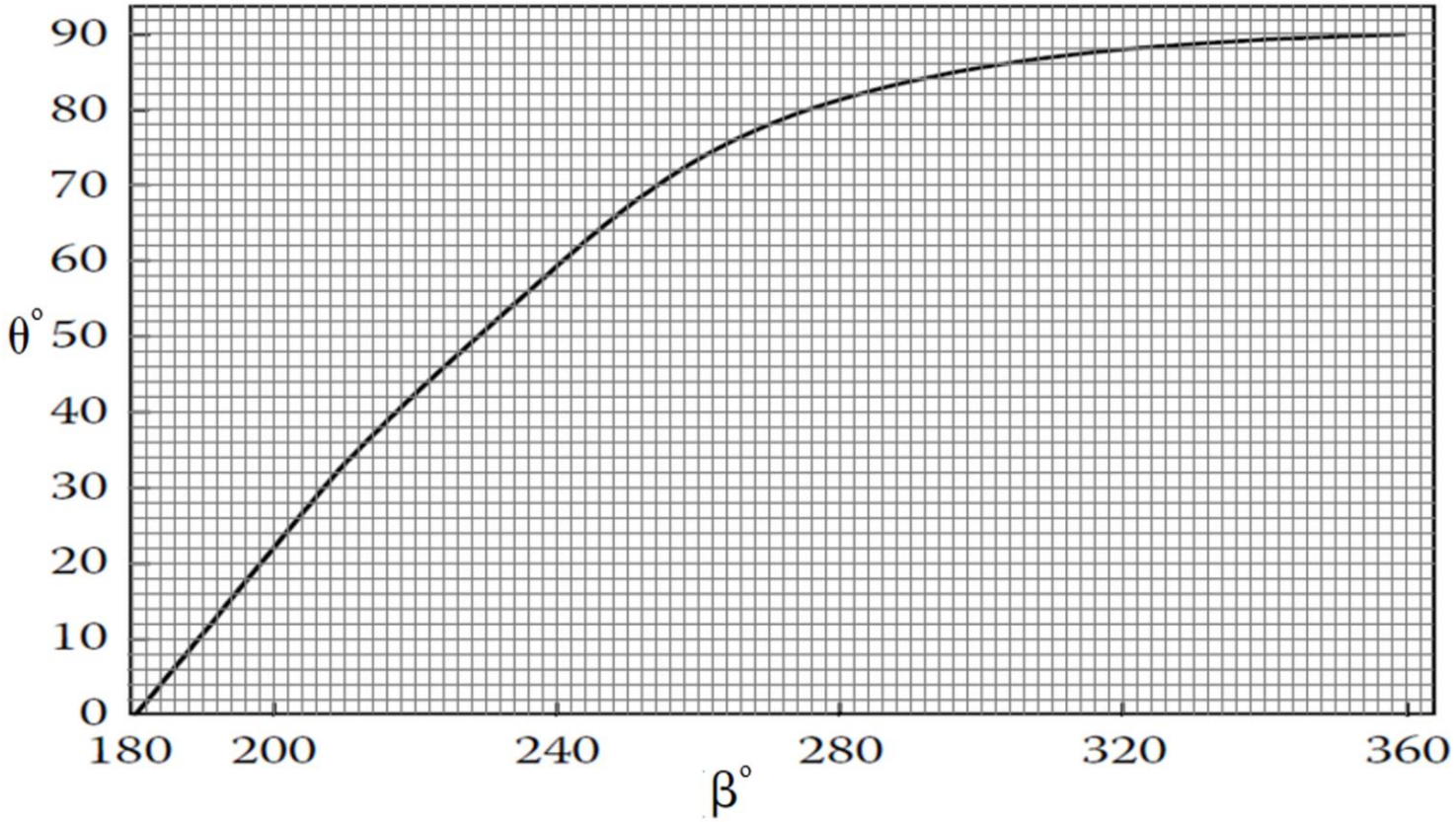
$$i(\beta) = \frac{V_m}{Z}\left[\sin(\beta - \theta) + \sin(\theta)e^{-\beta/\omega\tau}\right] = 0$$

- بنابراین:

$$\sin(\beta - \theta) + \sin(\theta)e^{-\beta/\omega\tau} = 0$$

یکسوکننده تکفاز نیم‌موج با بار اهمی- سلفی

- مقدار β را می‌توان با شبیه‌ساز **MATLAB** یا با روش‌های عددی مثل روش تکرار به‌دست آورد.
- با استفاده از منحنی زیر و با داشتن θ می‌توان مقدار β را به‌دست آورد.



مثال ۵

- در مدار یکسوساز نیم‌موج $V_m = 100V$,$\omega = 377\,rad/s$,$L = 0.1H$,$R = 100\Omega$ است. مطلوب است محاسبه: الف) معادله جریان بار ب) ولتاژ متوسط خروجی پ) جریان متوسط بار
- حل:

$$Z = [R^2 + (\omega L)^2]^{0.5} = 106.9\,\Omega$$
$$\theta = \tan^{-1}(\omega L/R) = 20.7^\circ = 0.361 \text{ rad}$$
$$\omega t = \omega L/R = 0.377 \text{ rad}$$

$$(a) \quad i(\omega t) = 0.936 \sin(\omega t - 0.361) + 0.331 e^{-\omega t/0.377} \text{ A} \quad \text{for } 0 \le \omega t \le \beta$$

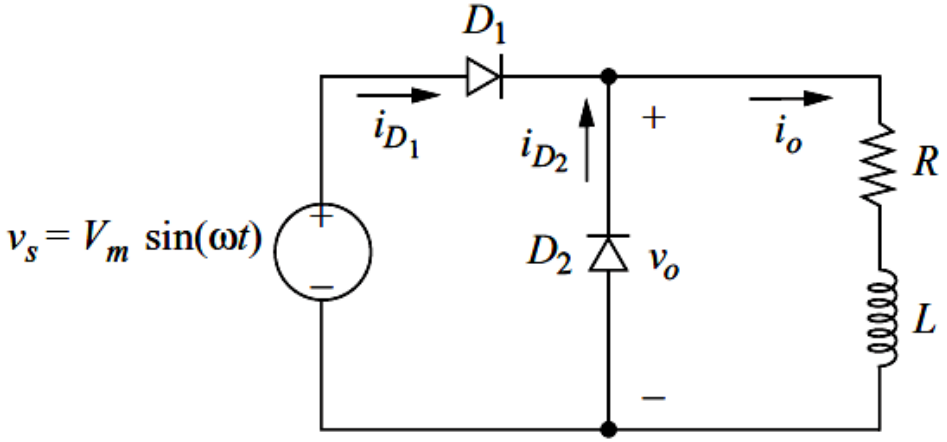
$$\sin(\beta - 0.361) + \sin(0.361) e^{-\beta/0.377} = 0$$

Using a numerical root-finding program, β is found to be 3.50 rad, or 201°

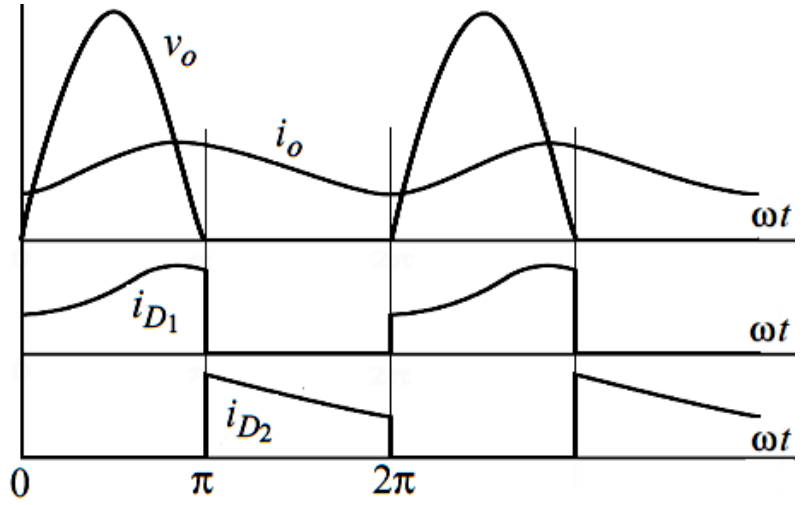
$$(b) \quad V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi}(1 - \cos\beta) = \frac{100}{2\pi}(1 - \cos 201^\circ) = 30.77\ V$$

$$(c) \quad I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{30.77}{100} = 0.3077\ A$$

اضافه کردن دیود هرزگرد



- دیود هرزگرد D_2 مانع از ظاهر شدن ولتاژ منفی روی بار می‌شود.
- انرژی مغناطیسی ذخیره شده افزایش می‌یابد.
- در لحظه $\omega t = \pi$ جریان از دیود D_1 به دیود D_2 منتقل می‌شود. این پروسه، کموتاسیون نام دارد.
- اگر ثابت زمانی ($\tau = L/R$) به اندازه کافی بزرگ باشد، جریان بار می‌تواند پیوسته باشد.



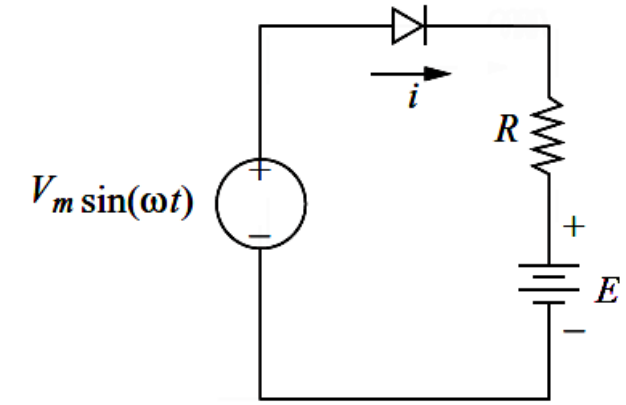
- ولتاژ متوسط خروجی برابر است با:

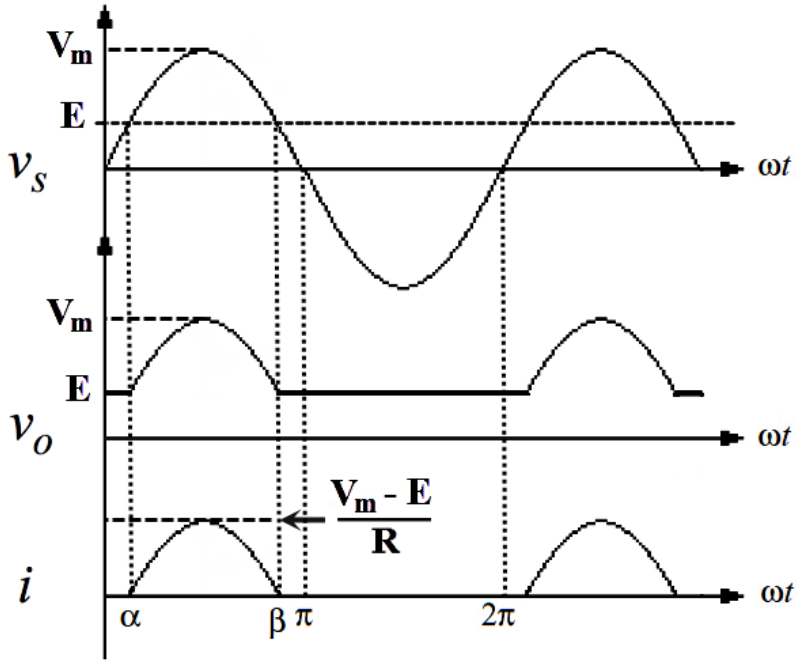
$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin\omega t.\, d(\omega t) \Longrightarrow V_{dc} = \frac{V_m}{\pi}$$

- جریان متوسط بار برابر است با: $I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$

نکته: ولتاژ متوسط خروجی در این مدار برابر با مدار با بار مقاومتی خالص است.

یکسوکننده نیم موج با بار RE (شارژر باتری)





- وقتی $V_s > E$ ، دیود هدایت می‌کند:

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

$$\beta = 180 - \alpha$$

- زاویه هدایت (δ) برابراست با:

$$\delta = \beta - \alpha$$

- محاسبه مقدار مقاومت محدود کننده جریان (R):

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\beta} \frac{V_m \sin\omega t - E}{R}\, d(\omega t) \qquad \beta = \pi - \alpha$$

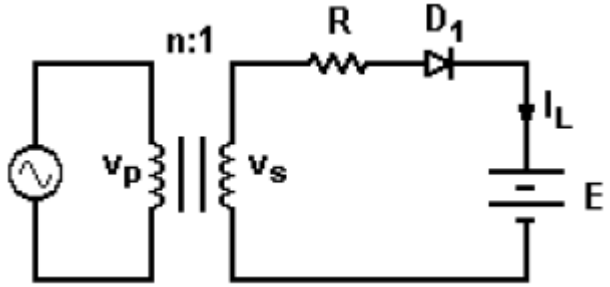
$$= \frac{1}{2\pi R}\left(2V_m \cos\alpha + 2E\alpha - \pi E\right)$$

$$R = \frac{1}{2\pi I_{dc}}\left(2V_m \cos\alpha + 2E\alpha - \pi E\right)$$

مثال ٦

- در مدار شارژر باتری زیر، ولتاژ باتری $E = 12V$ است. جریان متوسط باید $I_{dc} = 5A$ باشد. اگر ولتاژ موثر اولیه ترانسفورماتور $V_P = 120V, 60Hz$ و نسبت دور ترانسفورماتور $n = 2:1$ باشد، مطلوب است محاسبه:
- الف) زاویه هدایت دیود (δ) ب) مقدار مقاومت محدود کننده جریان پ) PIV دیود

حل:



الف) زاویه هدایت دیود:

- E= 12 V
- V_p= 120 V
- V_m =√2 V_s= 84.85 V

for V_s > E the diode D_1 conducts

$$V_m \sin\alpha = E \Rightarrow \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{E}{V_m}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{12}{84.85}\right) = 8.13°$$

$$\beta = 180 - \alpha = 180 - 8.13 = 171.87°$$

The conduction angle

$$\delta = \beta - \alpha = 171.87 - 8.13 = 163.74°$$

مثال ٦ (ادامه)

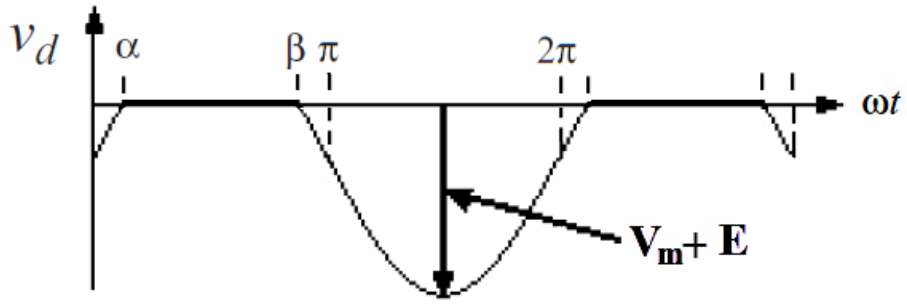
ب) مقدار مقاومت محدود کننده جریان:

$$R = \frac{1}{2\pi I_{dc}}\left(2V_m \cos\alpha + 2E\alpha - \pi E\right)$$

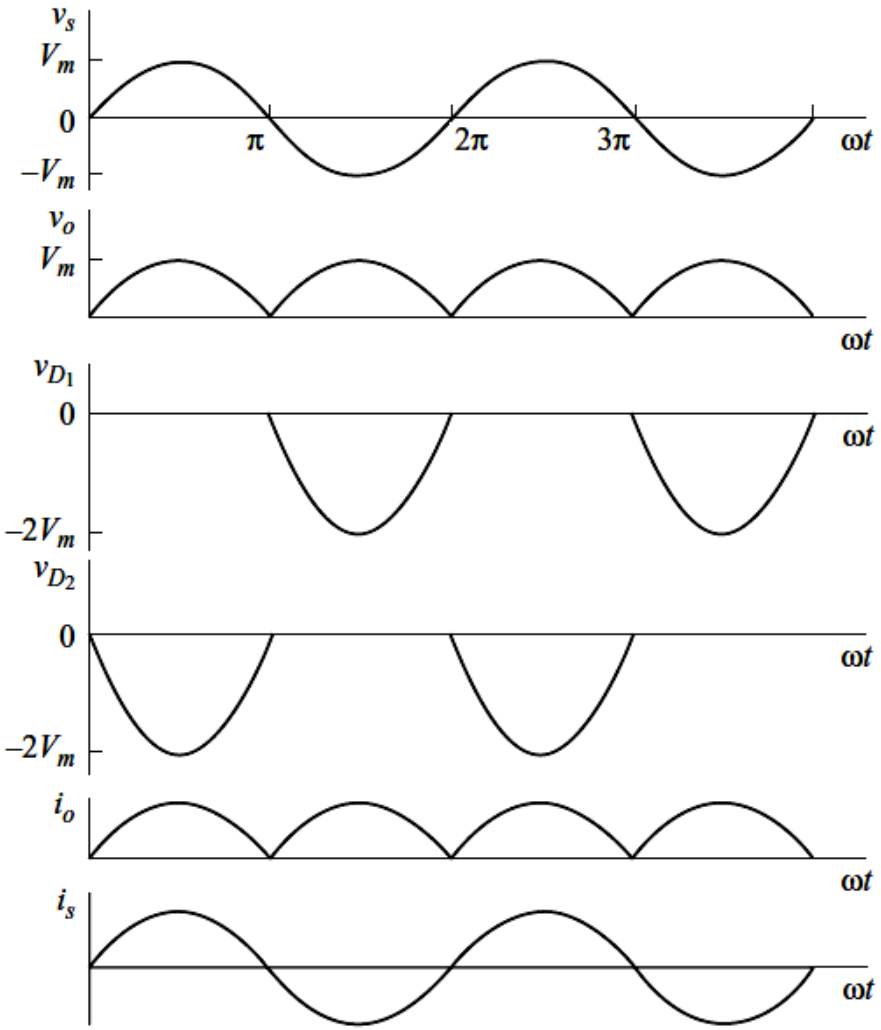
$$= \frac{1}{2\pi 5}\left(2(84.85)\cos 8.13° + 2(12)(0.1419) - \pi 12\right) = 4.26\Omega$$

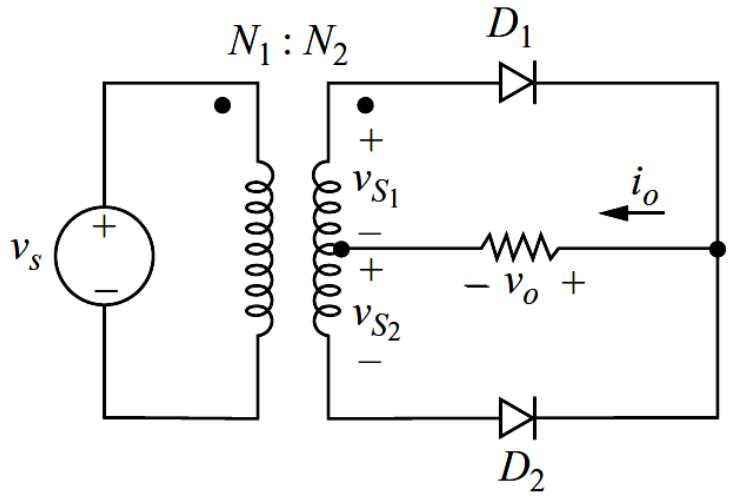
پ) PIV دیود:

PIV $= V_m + E = 84.85 + 12 = 96.85V$



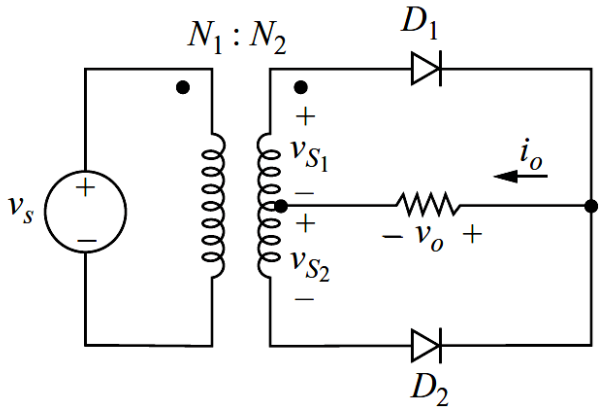
یکسوکننده تک‌فاز تمام موج سر وسط





- هر نیمه ترانسفورماتور مانند یک یکسوکننده نیم موج عمل می‌کند.
- جریان **dc** از ترانسفورماتور عبور نمی‌کند. (مشکل اشباع شدن ترانسفورماتور وجود ندارد)
- **PIV** هر یک از دیودها برابر با $2V_m$ است.

یکسوکننده تک‌فاز تمام موج سر وسط



- ولتاژ متوسط خروجی:

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

- جریان متوسط بار: $I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$

- ولتاژ موثر خروجی:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} [V_m \sin\omega t]^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} [V_m \sin\omega t]^2 d(\omega t)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

- جریان موثر بار: $I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R}$

مثال ۷

- A full wave center tap rectifier has a purely resistive load of R. Determine; a) Efficiency, b) Form factor, c) Ripple factor, d)Transformer utilization factor, e) Peak inverse voltage of the diode, f) Crest factor of input current
- Solution:

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0.6366V_m \qquad V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707V_m$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{0.6366V_m}{R} \qquad I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{0.707V_m}{R}$$

$$P_{dc} = V_{dc}I_{dc} = \frac{(0.6366V_m)^2}{R} \qquad P_{ac} = V_{rms}I_{rms} = \frac{(0.707V_m)^2}{R}$$

a) $$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{(0.6366V_m)^2}{(0.707V_m)^2} = 81\%$$

b) $$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{0.707V_m}{0.6366V_m} = 1.11 or 111\%$$

مثال ۷ (ادامه)

c) $RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1.11^2 - 1} = 0.482 \; or \; 48.2\%$

d)

- Rms voltage of transformer secondary is $V_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707 V_m$
- Rms value of transformer secondary current is equal to rms value of the load current $I_s = \frac{0.5 V_m}{R}$
- The Volt-ampere rating (VA) of transformer $VA = 2 V_s I_s = 2 \cdot 0.707 V_m \frac{0.5 V_m}{R} = \frac{0.707 V_m^2}{R}$
- Transformer utilization factor

$$TUF = \frac{P_{dc}}{V_s I_s} = \frac{0.6366^2}{0.707} = 0.573 \; (57.3\%)$$

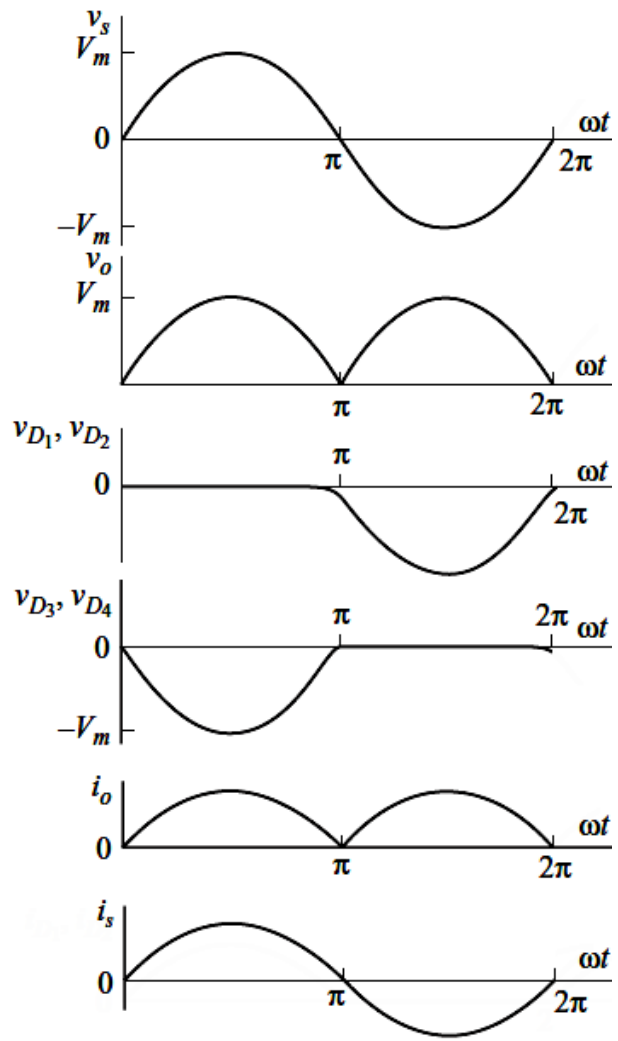
Transformer should be 1/0.573=1.74 times larger than that when it delivers pure ac power to a load.

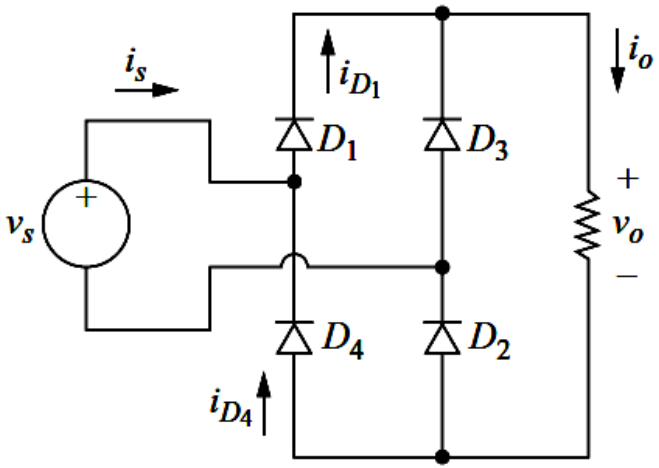
e) The peak reverse blocking voltage $PIV = 2V_m$

f) Crest factor, $CF = \frac{I_{s,peak}}{I_s} = \frac{V_m / R}{0.707 V_m / R} = 1.4142$

Trans. input current →

یکسوکننده تک‌فاز تمام موج پل





- **بار اهمی**
- **PIV** هر دیود برابر با V_m است.
- ولتاژ و جریان متوسط خروجی:

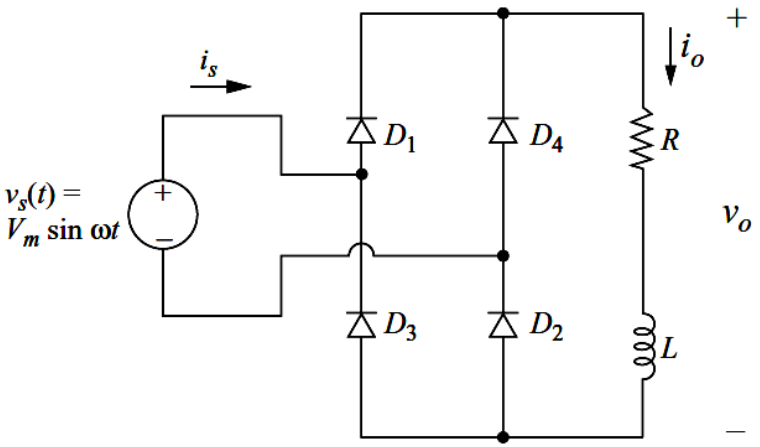
$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \qquad I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$$

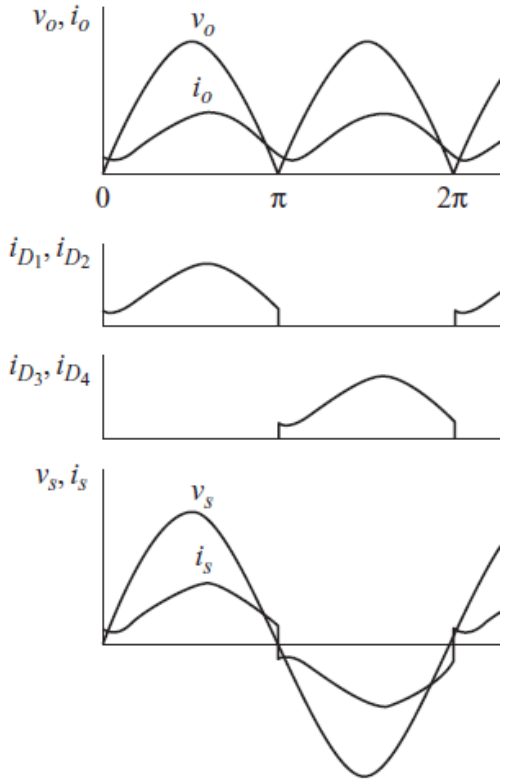
- ولتاژ و جریان موثر خروجی:

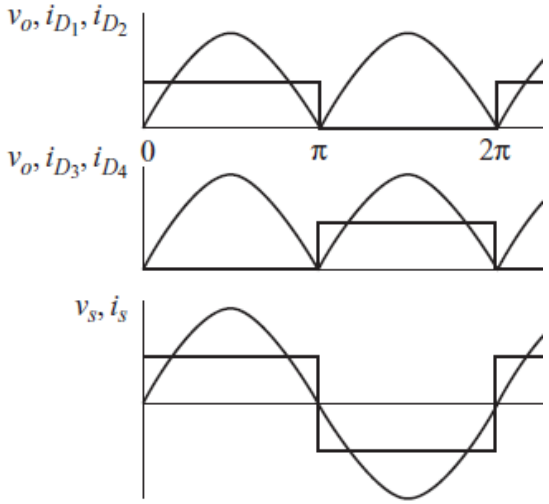
$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \qquad I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R}$$

یکسوکننده تک‌فاز تمام موج پل

- **بار اهمی – سلفی**

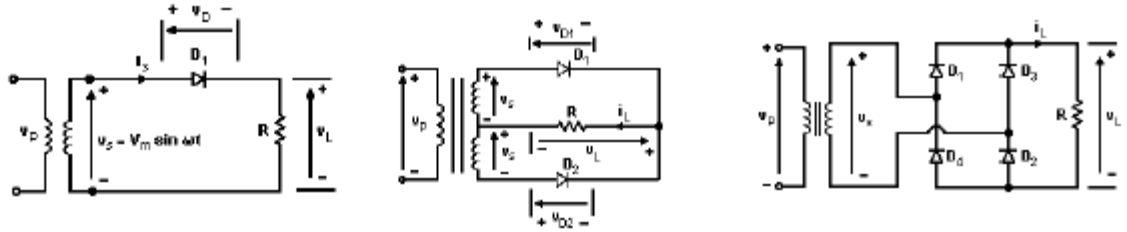






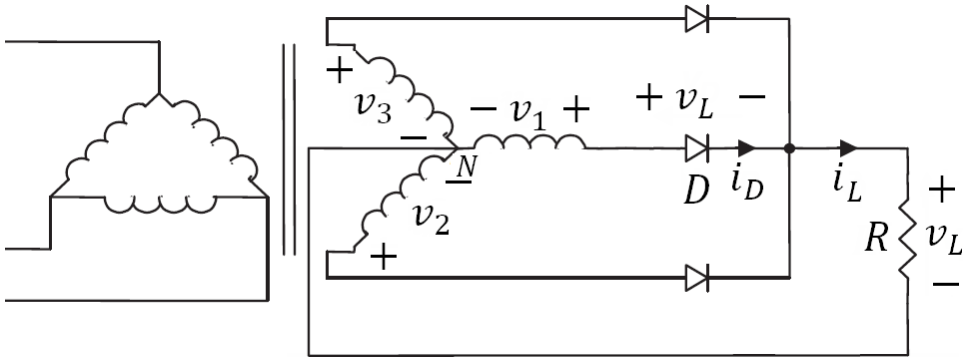
وقتی خاصیت سلفی زیاد باشد، جریان بار تقریباً ثابت و صاف است

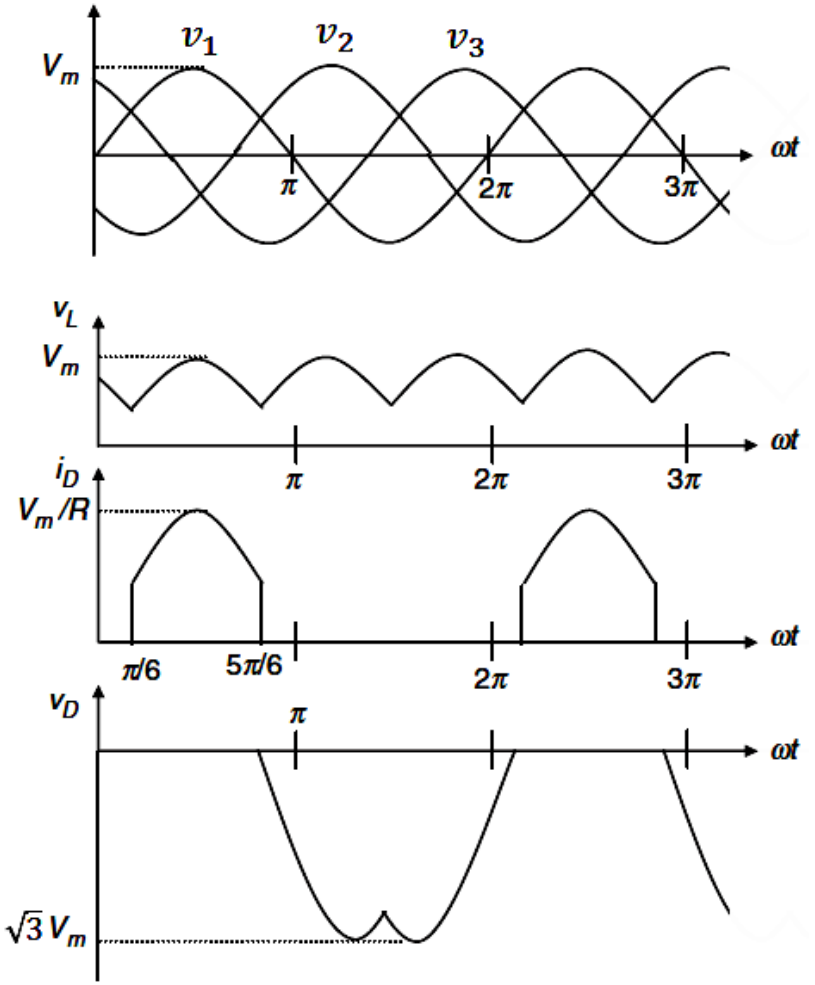
مقایسه یکسوکننده‌های تک‌فاز



Performance Parameter	Rectifier (R Load) Half-Wave	Full-Wave Transformer Rectifier (R Load) Center-Tapped	Full-Wave Transformer Rectifier (R Load) Bridge
Efficiency (η)	40.5%	81%	81%
Form Factor (FF)	157%	111%	111%
Ripple Factor (RF)	121%	48.2%	48.2%
Transformer Utilization Factor (TUF)	28.6%	57.32%	81.1%
Peak Inverse Voltage (PIV)	V_m	$2V_m$	V_m
Crest Factor (CF)	2	1.414	1.414

یکسو کننده سه‌فاز نیم‌موج با بار اهمی

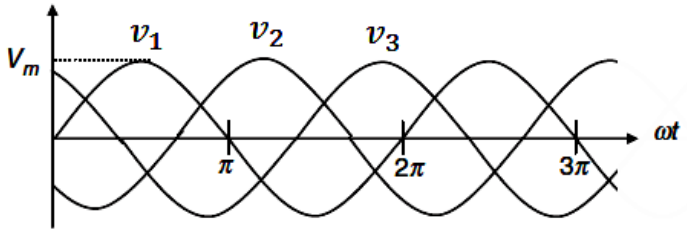




- در اتصال چند فازه، فاصله زمانی بین تکرار سیکل‌ها کمتر از اتصال تک‌فاز است.
- در هر لحظه فقط یک دیود هدایت می‌کند، آن هم دیودی که فاز متصل به آن ولتاژ بیشتری دارد.
- هر دیود ۱۲۰ درجه هدایت می‌کند.
- ولتاژ لحظه‌ای بار بین مقدار V_m و $V_m/2$ تغییر می‌کند.

یکسو کننده سه‌فاز نیم‌موج با بار اهمی

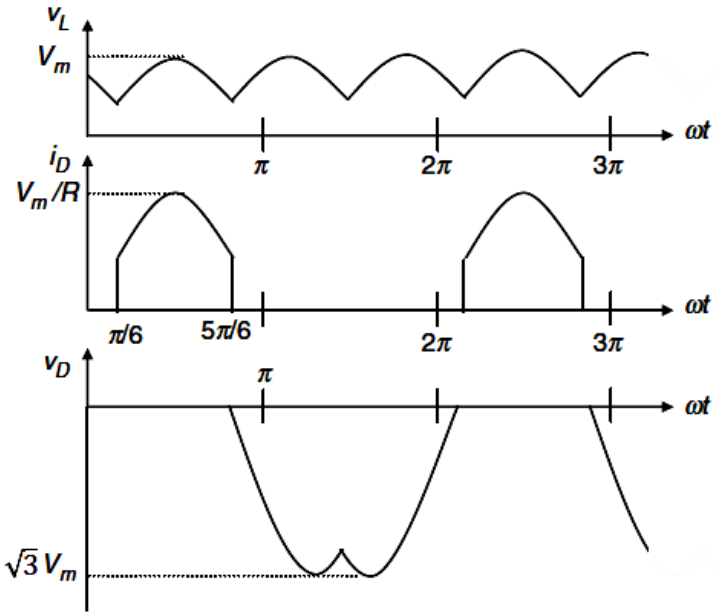
- **PIV** هر دیود برابر است با: $PIV = \sqrt{3}V_{Ph} = V_{Line}$



- ولتاژ و جریان متوسط خروجی:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi/3}\int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_m \sin\omega t.\, d(\omega t) = \frac{3}{2\pi}\sqrt{3}V_{Ph} = \frac{3}{2\pi}V_{Line}$$

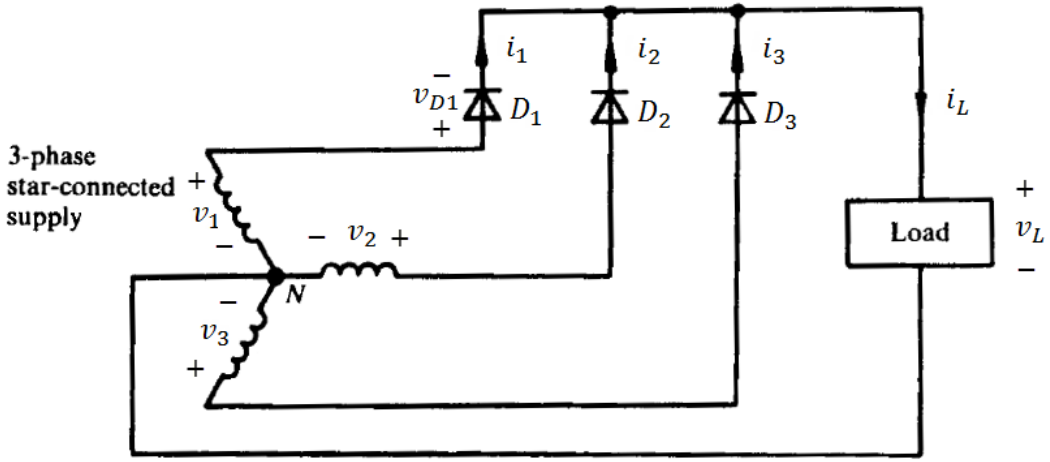
$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$$

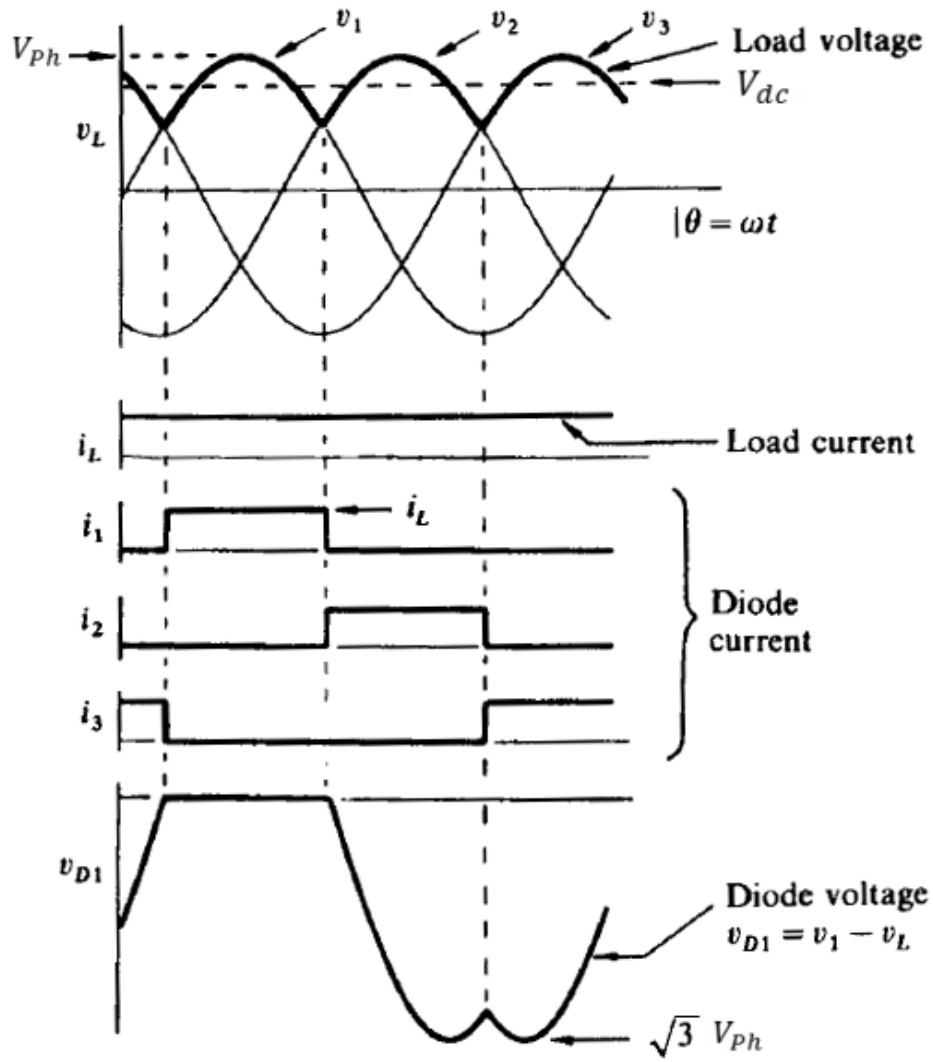


- ولتاژ و جریان موثر خروجی:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi/3}\int_{\pi/6}^{5\pi/6} [V_m \sin\omega t]^2.\, d(\omega t)} = V_{Ph}\sqrt{\frac{3}{2\pi}\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4}\right)} = 0.84V_{Ph} \qquad I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R}$$

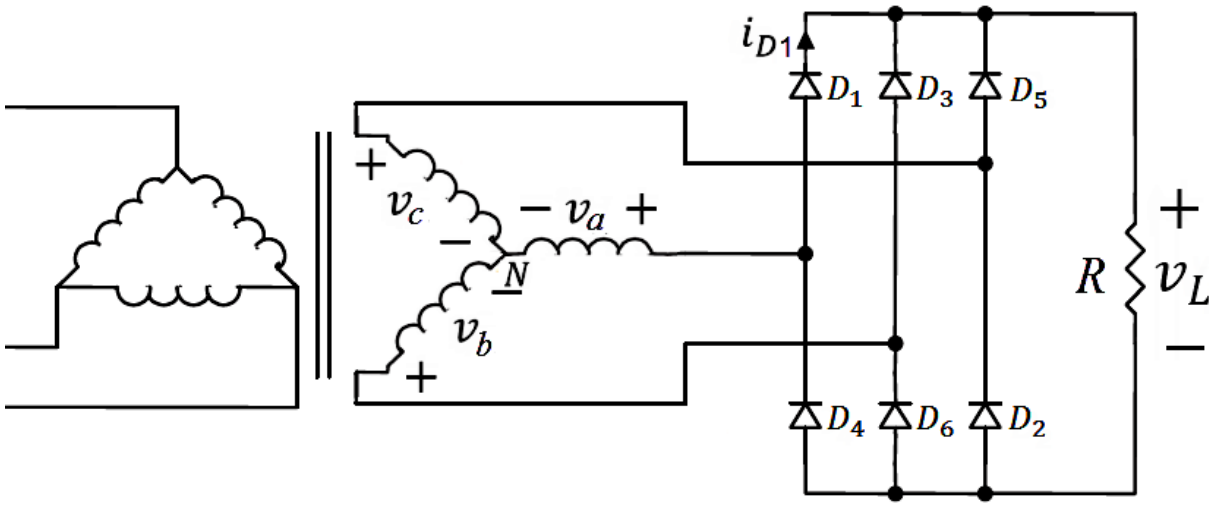
یکسو کننده سه‌فاز نیم‌موج با بار اهمی – سلفی





وقتی خاصیت سلفی به اندازه کافی بزرگ باشد، جریان بار را می‌توان صاف در نظر گرفت.

یکسوکننده سه‌فاز پل با بار اهمی

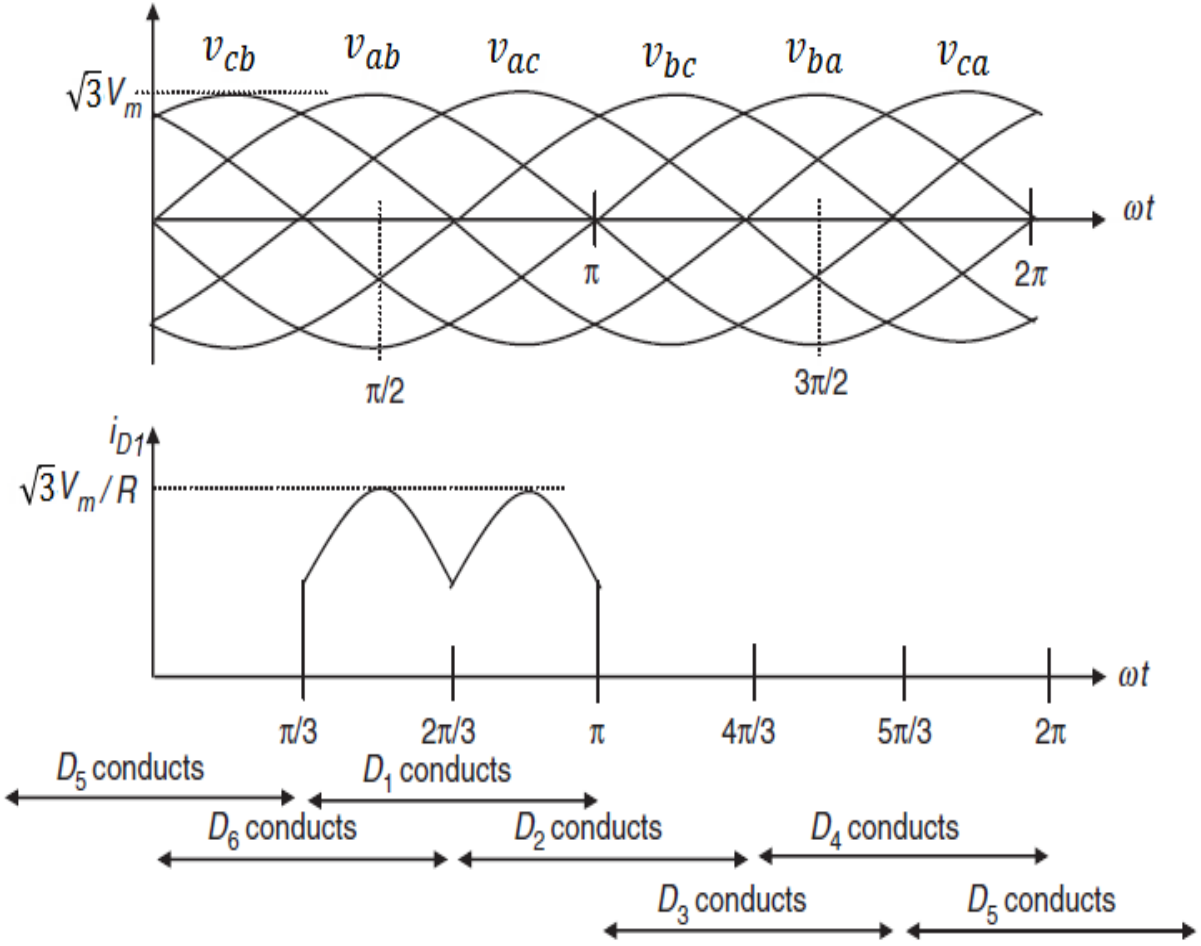


- یکسوکننده‌های پل سه فاز در کاربردهای توان بالا به‌کار می‌روند.
- این مدار با و بدون ترانسفورماتور قادر به کار کردن است.
- ولتاژ خروجی دارای ریپل شش پالسی است.

- شماره دیودها به‌ترتیب تقدم هدایت‌شان است و هر کدام ۱۲۰ درجه هدایت می‌کنند.
- ترتیب هدایت دیودها به صورت 12,23,34,45,56,61,.... است.(اعداد شماره دیودها هستند)

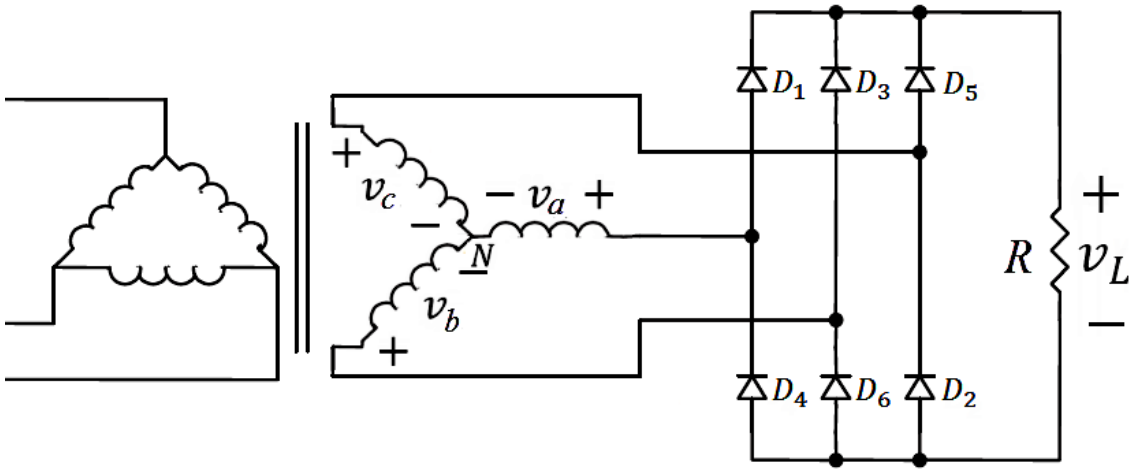
- آن جفتی از دیودها که مابین آن خطوطی از منبع قرار دارند که بالاترین مقدار ولتاژ خط به خط لحظه‌ای را دارند، هدایت می‌کنند.

یکسوکننده سه‌فاز پل با بار اهمی



- یعنی وقتی فاز v_a مثبت تر است، دیود D_1 هدایت می‌کند و طی این پریود، ابتدا v_b منفی تر است و دیود D_6 هدایت می‌کند تا موقعی که v_c منفی‌تر شود و جریان از دیود D_6 به دیود D_2 منتقل شود.

یکسو کننده سه‌فاز پل با بار اهمی



- **PIV** هر دیود برابر است با:

$$PIV = \sqrt{3}V_{Ph} = V_{Line}$$

- ولتاژ و جریان متوسط خروجی:

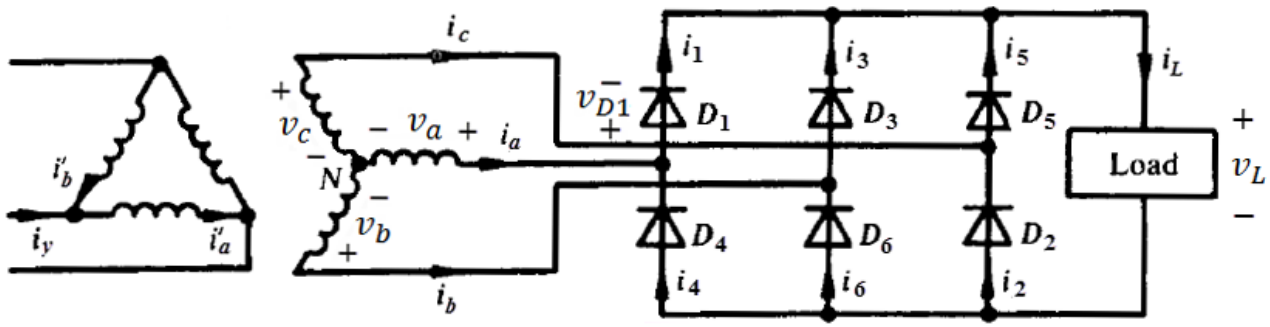
$$V_{dc} = \frac{1}{\pi/3}\int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_{Line}\sin\omega t.\,d(\omega t) = \frac{3}{\pi}V_{Line} = \frac{3}{\pi}\sqrt{3}V_{Ph} \qquad I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$$

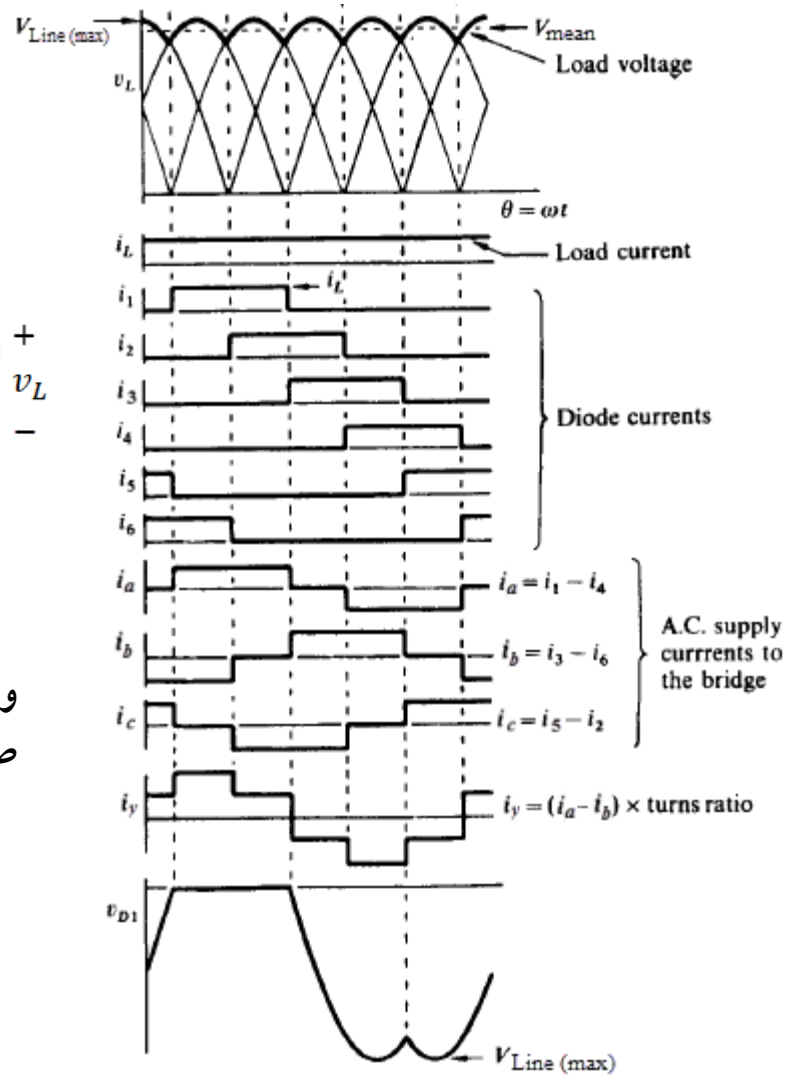
- ولتاژ و جریان موثر خروجی:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi/3}\int_{\pi/3}^{2\pi/3}[V_{Line}\sin\omega t]^2.\,d(\omega t)} = V_{Line}\sqrt{\left(\frac{1}{2}+\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}\right)} = V_{ph}\sqrt{\left(\frac{3}{2}+\frac{9\sqrt{3}}{4\pi}\right)}$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R}$$

یکسوکننده سه‌فاز پل با بار اهمی – سلفی





وقتی خاصیت سلفی به اندازه کافی بزرگ باشد، جریان بار را می‌توان صاف در نظر گرفت.

مثال ۸

- A three phase star rectifier has a purely resistive load with R Ohms. Determine; a) Efficiency, b) Form factor, c) Ripple factor, d)Transformer utilization factor, e) Peak inverse voltage of the diode, f) the peak current through a diode if rectifier delivers Idc=30A at an output voltage of Vdc=140V.
- Solution:

$$V_{dc} = V_m \frac{q}{\pi} \sin\frac{\pi}{q} = 0.827 V_m$$

$$V_{rms} = V_m \sqrt{\frac{q}{2\pi}\left(\frac{\pi}{q} + \frac{1}{2}\sin\frac{2\pi}{q}\right)} = 0.841 V_m$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{0.827 V_m}{R}$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{0.841 V_m}{R}$$

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = \frac{(0.827 V_m)^2}{R}$$

$$P_{ac} = V_{rms} I_{rms} = \frac{(0.841 V_m)^2}{R}$$

a)
$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{(0.827 V_m)^2}{(0.841 V_m)^2} = 99.77\%$$

b)
$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{0.841 V_m}{0.827 V_m} = 1.0165 or 101.65\%$$

مثال ۸ (ادامه)

c) $RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1.0165^2 - 1} = 0.1824 \; or \; 18.24\%$

d) Rms voltage of transformer secondary is

$$V_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707 V_m$$

Rms value of transformer secondary current is equal to rms value of the diode current

$$I_s = I_m \sqrt{\frac{q}{2\pi}\left(\frac{\pi}{q} + \frac{1}{2}\sin\frac{2\pi}{q}\right)} = 0.4854 I_m = \frac{0.4854 V_m}{R}$$

The Volt-ampere rating (VA) of transformer

$$VA = 3 V_s I_s = (3)(0.707 V_m)\frac{0.4854 V_m}{R}$$

Transformer utilization factor

$$TUF = \frac{P_{dc}}{3 V_s I_s} = \frac{0.827^2}{(3)(0.707)(0.4854)} = 0.6643 \; (66.43\%)$$

مثال ۸ (ادامه)

e) The peak reverse blocking voltage

$$PIV = \sqrt{3}V_m$$

f)The average current through each diode is

$$I_d = \frac{2}{2\pi}\int_0^{\pi/6} I_m \cos\omega t\, d(\omega t) = I_m \frac{1}{\pi}\sin\frac{\pi}{q}$$

For q=3, I_d = *0.2757* I_m. The average current through each diode is

$$I_d = \frac{30}{3} = 10A$$

and this gives the peak current as

$$I_m = \frac{10}{0.2757} = 36.27A$$

مثال ۹

- A three phase bridge rectifier has a purely resistive load of R. Determine; a) Efficiency, b) Form factor, c) Ripple factor, d)Transformer utilization factor, e) Peak inverse voltage of the diode, output voltage of Vdc=280.7V. The source frequency is 60Hz.
- Solution:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.654 V_m \qquad V_{rms} = \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}} V_m = 1.6554 V_m$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{1.654 V_m}{R} \qquad I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{1.6554 V_m}{R}$$

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = \frac{(1.654 V_m)^2}{R} \qquad P_{ac} = V_{rms} I_{rms} = \frac{(1.6554 V_m)^2}{R}$$

a)
$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{(1.654 V_m)^2}{(1.6554 V_m)^2} = 99.83\%$$

b)
$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{1.6554 V_m}{1.654 V_m} = 1.0008 \ or \ 100.08\%$$

c)
$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{1.0008^2 - 1} = 0.04 \ or \ 4\%$$

مثال ۹ (ادامه)

d) Rms voltage of transformer secondary is

$$V_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707V_m$$

Rms value of transformer secondary current is

$$I_s = I_m\sqrt{\frac{2}{\pi}\left(\frac{\pi}{6}+\frac{1}{2}\sin\frac{2\pi}{6}\right)} = 0.7804I_m = 0.7804\sqrt{3}\,\frac{V_m}{R}$$

The Volt-ampere rating (VA) of transformer

$$VA = 3V_sI_s = (3)(0.707V_m)(0.7804)\sqrt{3}\,\frac{V_m}{R}$$

Transformer utilization factor

$$TUF = \frac{P_{dc}}{3V_sI_s} = \frac{1.654^2}{3\sqrt{3}(0.707)(0.7804)} = 0.9542\,(95.42\%)$$

e) The peak reverse blocking voltage

$$V_m = \frac{V_{dc}}{1.654} = \frac{280.7}{1.654} = 169.7V \qquad PIV = \sqrt{3}V_m = \sqrt{3}(169.7) = 293.9V$$

مقایسه عملکرد یکسو کننده‌ها

Performance Parameter	Single Phase Half-Wave Rectifier (R Load)	Single Phase Full-Wave Center-Tapped Transformer Rectifier (R Load)	Single Phase Full-Wave Bridge Rectifier (R Load)	Three-Phase Bridge Rectifier (R Load)
Efficiency (h)	40.5%	81%	81%	**99.83%**
Form Factor (FF)	157%	111%	111%	**100.08%**
Ripple Factor (RF)	121%	48.2%	48.2%	**4%**
Transformer Utilization Factor (TUF)	28.6%	57.32%	81.1%	**95.42%**
Peak Inverse Voltage (PIV)	V_m	$2V_m$	V_m	$\sqrt{3}V_m$
Crest Factor (CF)	2	1.414	1.414	**1.047**