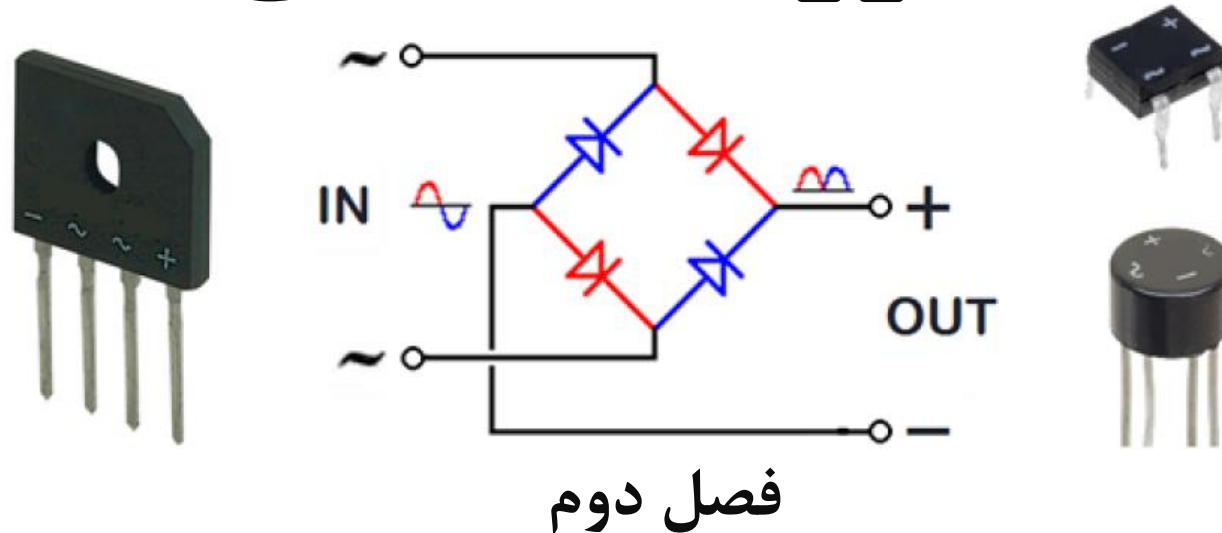




الکترونیک صنعتی

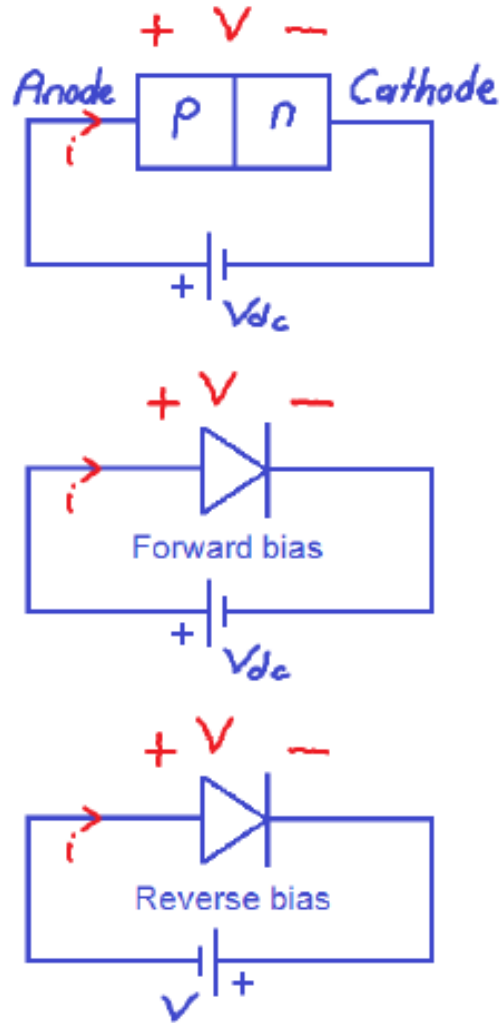


دیودها و یکسوکننده‌های کنترل نشده

Diodes and Uncontrolled Rectifiers

مدرس: احمد توکلی

دیودهای نیمه‌هادی قدرت

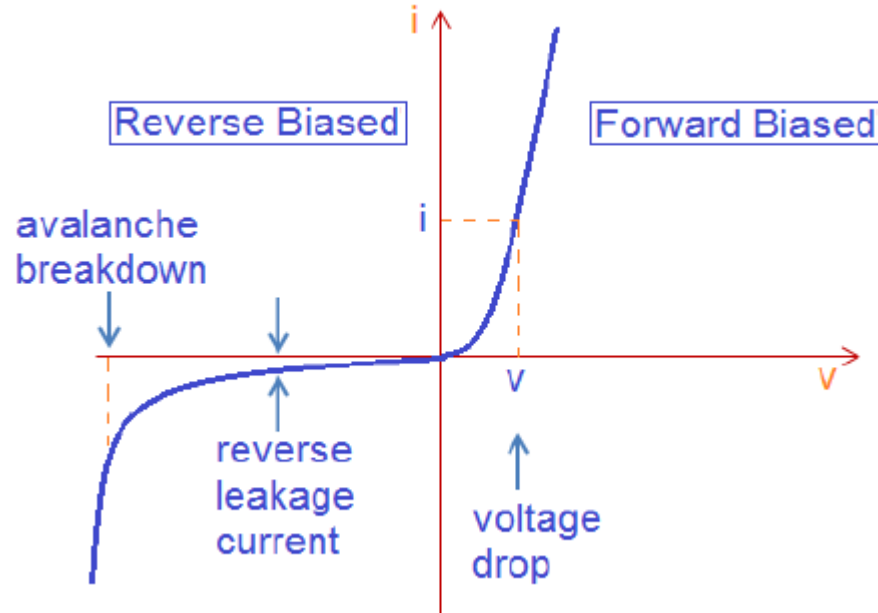


- دیود قدرت یک قطعه دو پایانه با پیوند pn است.
- بایاس مستقیم: وقتی ولتاژ آند مثبت‌تر از کاتد باشد، دیود هدایت می‌کند. مقدار این افت ولتاژ کوچک است و به فرایند ساخت و دمای پیوند بستگی دارد.
- بایاس معکوس: وقتی ولتاژ کاتد مثبت‌تر از آند باشد، دیود قطع خواهد بود. در این حالت یک جریان معکوس کم (جریان نشتی)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

ولتاژ حرارتی در دمای $25^\circ C$ برابر است با:

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

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

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

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

T : دما بر حسب درجه کلوین ($^\circ K$)

ناحیه بایاس مستقیم $V_D > 0$

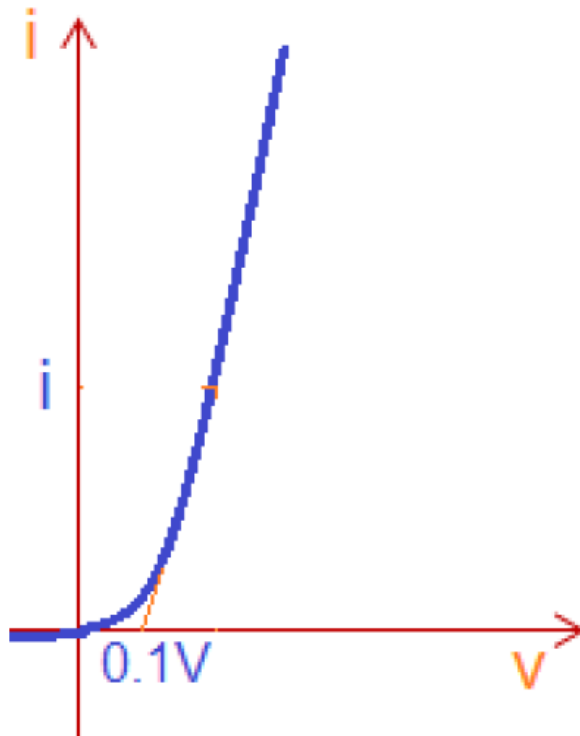
- تا وقتی V_D کوچکتر از ولتاژ آستانه است جریان I_D بسیار کوچک است.
- وقتی V_D بزرگتر از ولتاژ آستانه شود، دیود به طور کامل هدایت می کند.
- حالت $0 < V_D < V_{threshold}$:

فرض می کنیم: $V_D = 0.1 V, n = 1, V_T = 25.8 mV$

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{0.1}{(1)(25.8 \times 10^{-3})}} - 1 \right)$$

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

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



- حالت $V_D \gg V_{threshold}$:

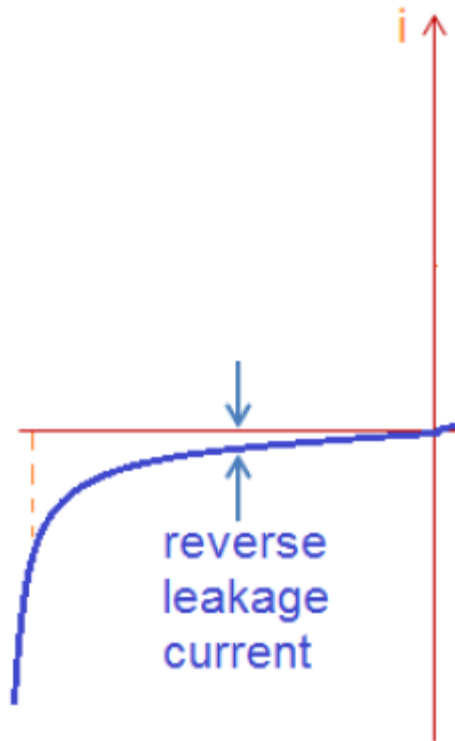
$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \cong I_S e^{\frac{V_D}{nV_T}} \Rightarrow I_D \gg I_S$$

✓ I_D بسیار بزرگتر از I_S است.

ناحیه بایاس معکوس

- اگر $V_D < -0.1\text{ V}$ شود، قسمت نمایی معادله دیود بسیار کوچکتر از یک می شود.

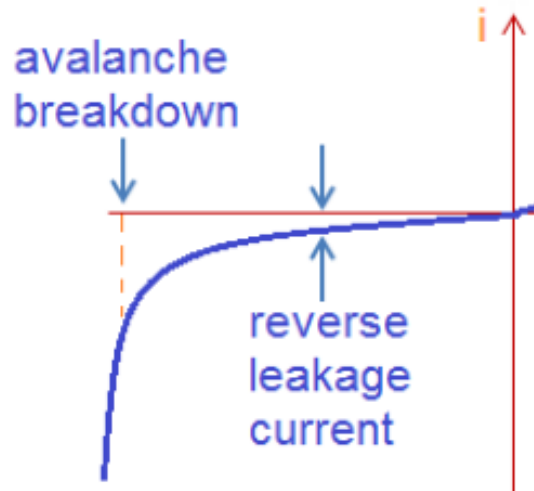
$$I_D = I_S \left(e^{\frac{-V_D}{nV_T}} - 1 \right) \cong -I_S$$



- جریان دیود در جهت معکوس برقرار می شود.
- جریان معکوس دیود، جریان نشتی نام دارد.
- در دیود واقعی، با افزایش ولتاژ معکوس، جریان نشتی هم افزایش پیدا می کند.

ناحیه شکست بهمنی

- اگر ولتاژ معکوس دیود از مقدار مشخصی بیشتر شود، ناحیه سد می شکند.
- این ولتاژ، ولتاژ شکست (V_{BR}) نام دارد.
- اگر ولتاژ معکوس مقدار کمی بیشتر از V_{BR} شود، جریان معکوس سریعاً افزایش پیدا می کند.
- 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 زener در این ناحیه مورد استفاده قرار می گیرد.



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

مثال ۱

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

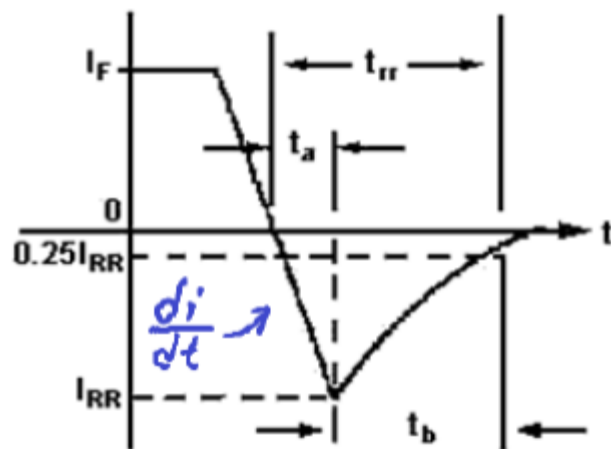
■ حل:

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

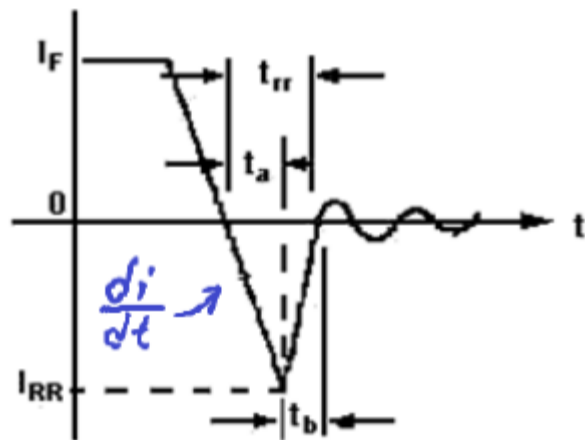
$$300 = I_S \left(e^{\frac{1.2}{2(0.0258)}} - 1 \right)$$

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

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 برابر است با:

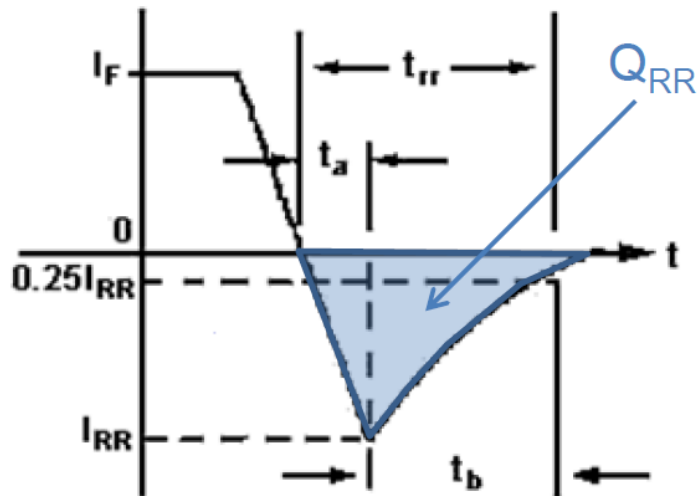
$$I_{RR} = t_a \frac{di}{dt}$$

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

بار بازیابی معکوس Q_{RR}

- 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)

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

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 ایده آل زمان بازیابی معکوس ندارند.
- کاهش زمان بازیابی معکوس باعث افزایش هزینه ساخت دیود می شود.
- در بسیاری از کاربردها اثرات زمان بازیابی معکوس اهمیت زیادی ندارد و می توان از دیودهای ارزان استفاده کرد.
- با توجه به مشخصه های بازیابی و روش های ساخت، دیودهای قدرت به سه گروه تقسیم می شوند:



دیودهای استاندارد یا همه منظوره:

- زمان بازیابی معکوس نسبتاً زیاد (حدود $25\mu s$)
- استفاده در کاربردهای سرعت پایین (کمتر از یک کیلوهرتز) مانند یکسوکننده ها و مبدل های 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:

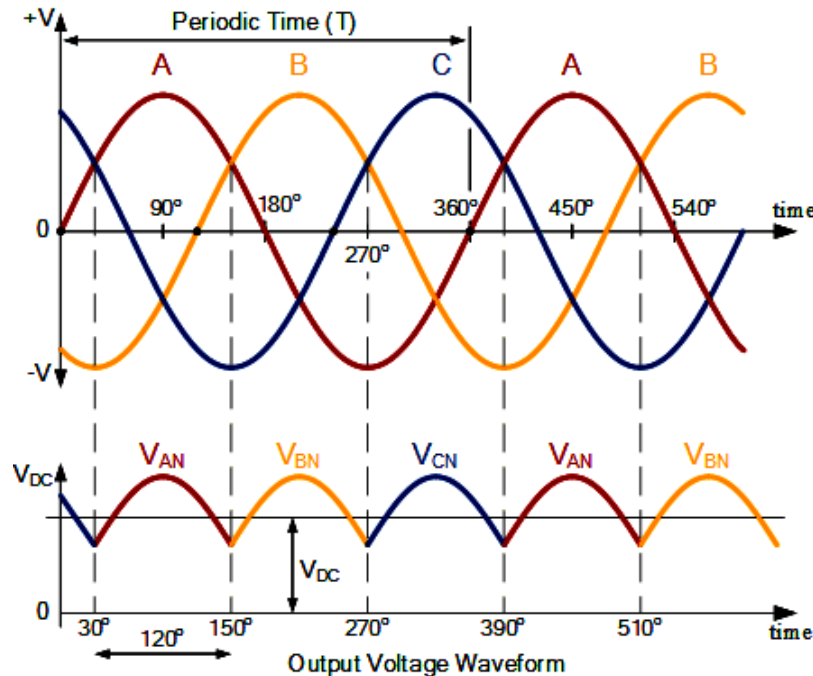
- زمان بازیابی معکوس کوچک (کمتر از $5\mu s$)
- کاربرد در مبدل‌های dc به dc و dc به ac
- محدوده جریان از یک آمپر تا چند صد آمپر و محدوده ولتاژ از ۵۰ ولت تا ۳ کیلو ولت

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)، به دست 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 رپل (Ripple) بر روی ولتاژ dc است.



- 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.

شکل موج یکسوکننده سه‌فاز نیم‌موج کنترل‌نشده

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: I_{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 رپل
- مقدار موثر مولفه ac ولتاژ خروجی (V_{ac}) برابر است با:

$$V_{ac} = \sqrt{V_{rms}^2 - V_{dc}^2} \quad (۴)$$

پارامترهای کارآیی یکسوکننده‌ها

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

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} \quad (5)$$

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

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} \quad (6)$$

- با جایگزینی رابطه (۴) در رابطه (۶) می‌توان نوشت:

$$RF = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{dc}}\right)^2 - 1} = \sqrt{FF^2 - 1} \quad (7)$$

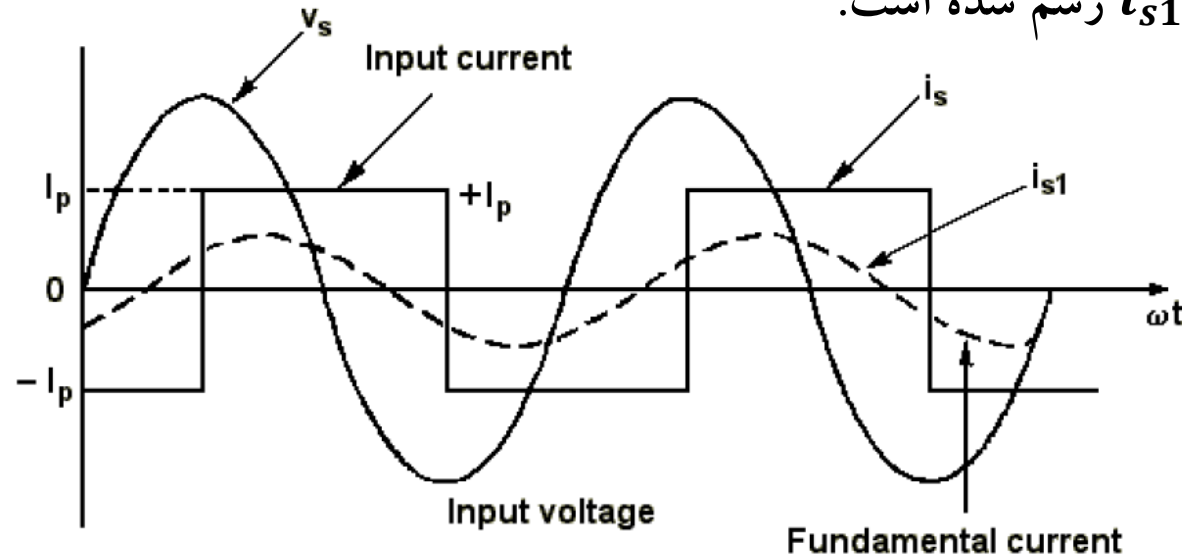
- ضریب کارکرد ترانسفورماتور (Transformer Utilization Factor - TUF) که نشان‌دهنده نسبت ابعاد ترانسفورماتور در مقایسه با زمانی که توان ac خالص را به بار تحویل می‌دهد، است:

$$TUF = \frac{P_{dc}}{V_S I_S} \quad (8)$$

در این رابطه، V_S و I_S به ترتیب 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 به صورت 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**) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DPF = \cos \phi \quad (9)$$

پارامترهای کارآیی یکسوکنده‌ها

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

$$THD = \sqrt{\frac{I_s^2 - I_{s1}^2}{I_{s1}^2}} = \sqrt{\left(\frac{I_s}{I_{s1}}\right)^2 - 1} \quad (10)$$

- 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:

$$PF = \frac{V_s I_{s1}}{V_s I_s} \cos \phi = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \phi \quad (11)$$

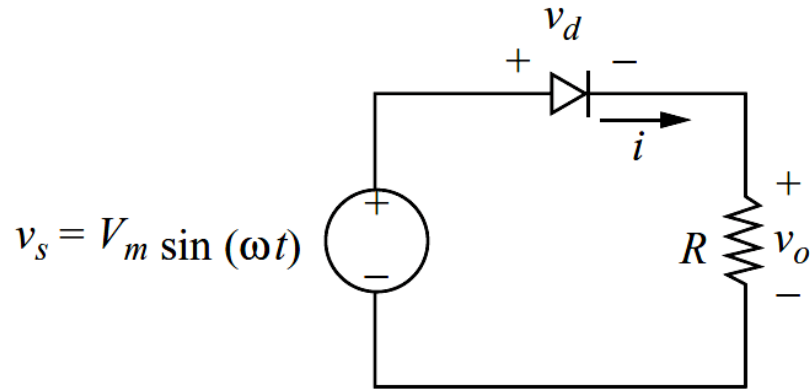
- ضریب صعود جریان ورودی (Crest Factor - CF) که بیانگر میزان پیک جریان ورودی $I_{s(peak)}$ در مقایسه با مقدار موثر آن است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CF = \frac{I_{s(peak)}}{I_s} \quad (12)$$

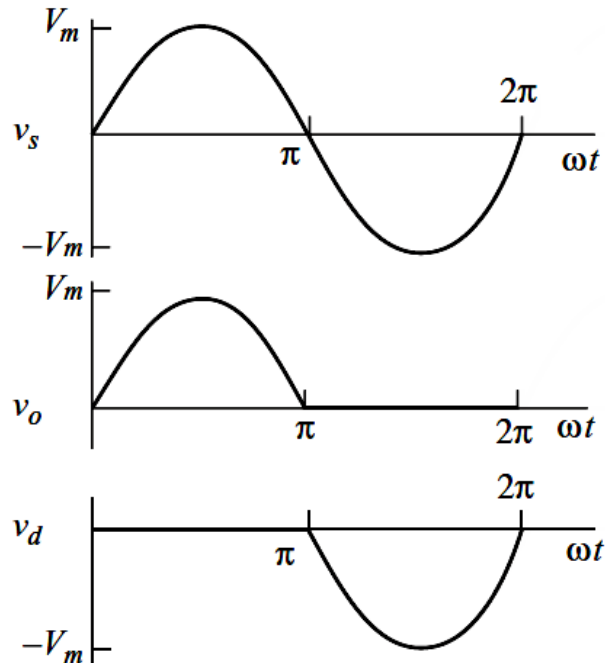
- در مدار یکسوکنده ایده‌آل:

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

یکسوکننده تکفاز نیم موج



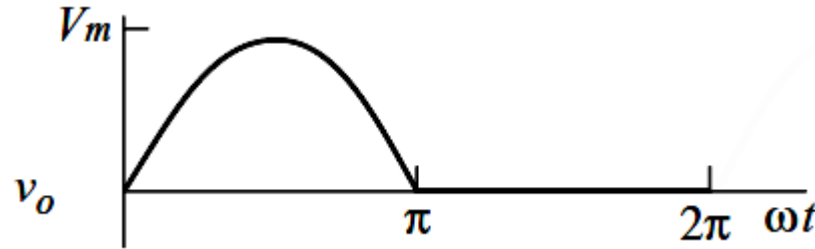
- این نوع یکسوساز، ساده ترین نوع یکسوساز است.
- دیود D_1 در طی نیم سیکل مثبت هدایت کرده و ولتاژ ورودی در دو سر بار قرار می گیرد. در این نیم سیکل، افت ولتاژ مستقیم کوچکی در دو سر دیود قرا می گیرد.
- در طی نیم سیکل منفی دیود D_1 در حالت قطع بوده و ولتاژ خروجی برابر صفر است.



اشکالات یکسوساز نیم موج:

- ✓ 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 نیم موج اغلب در توان های پایین استفاده می شود.

یکسو کننده تکفاز نیم موج



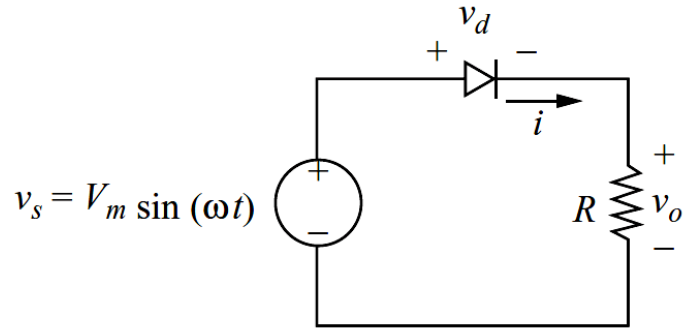
▪ ولتاژ متوسط خروجی:

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

▪ ولتاژ موثر خروجی:

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

مثال ۳



■ در مدار یکسوساز نیم موج مطلوب است:
 الف) راندمان (η)، ب) FF، پ) RF، ت) TUF،
 ث) PIV دیود D_1 و ج) CF جریان ورودی.

■ حل:

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

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

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{(0.318V_m)^2}{(0.5V_m)^2} = 40.5\% \quad \boxed{\text{راندمان کم}} \quad \text{الف)}$$

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

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{(1.57)^2 - 1} = 1.21 = 121\% \quad \boxed{\text{ضریب ریپل بسیار زیاد}} \quad \text{پ)}$$

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:

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

(V_{rms} ولتاژ موثر خروجی است)

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

(ث) حداکثر ولتاژ معکوس دیود (PIV):

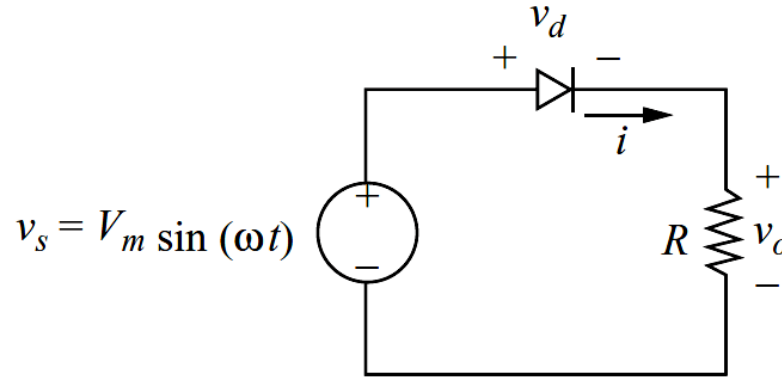
$$PIV = V_m$$

(ج) ضریب صعود جریان ورودی (CF):

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

مثال ۴

- در مدار یکسوساز زیر ولتاژ منبع برابر با $120V_{rms}$ 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)

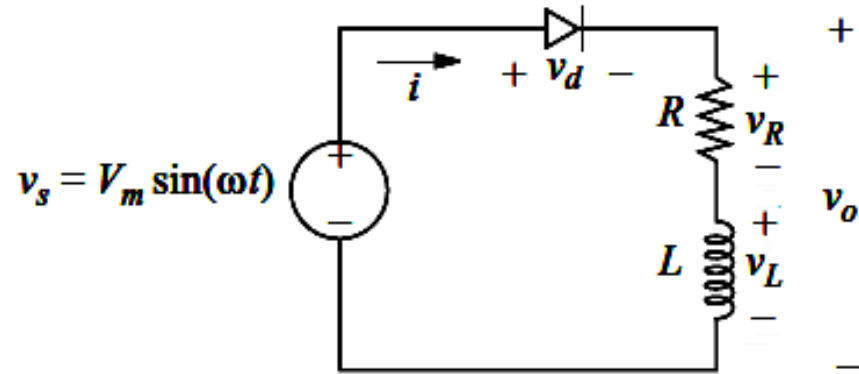
$S = V_{S,rms}I_{S,rms} = 120 \times 17 = 2040 VA$

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

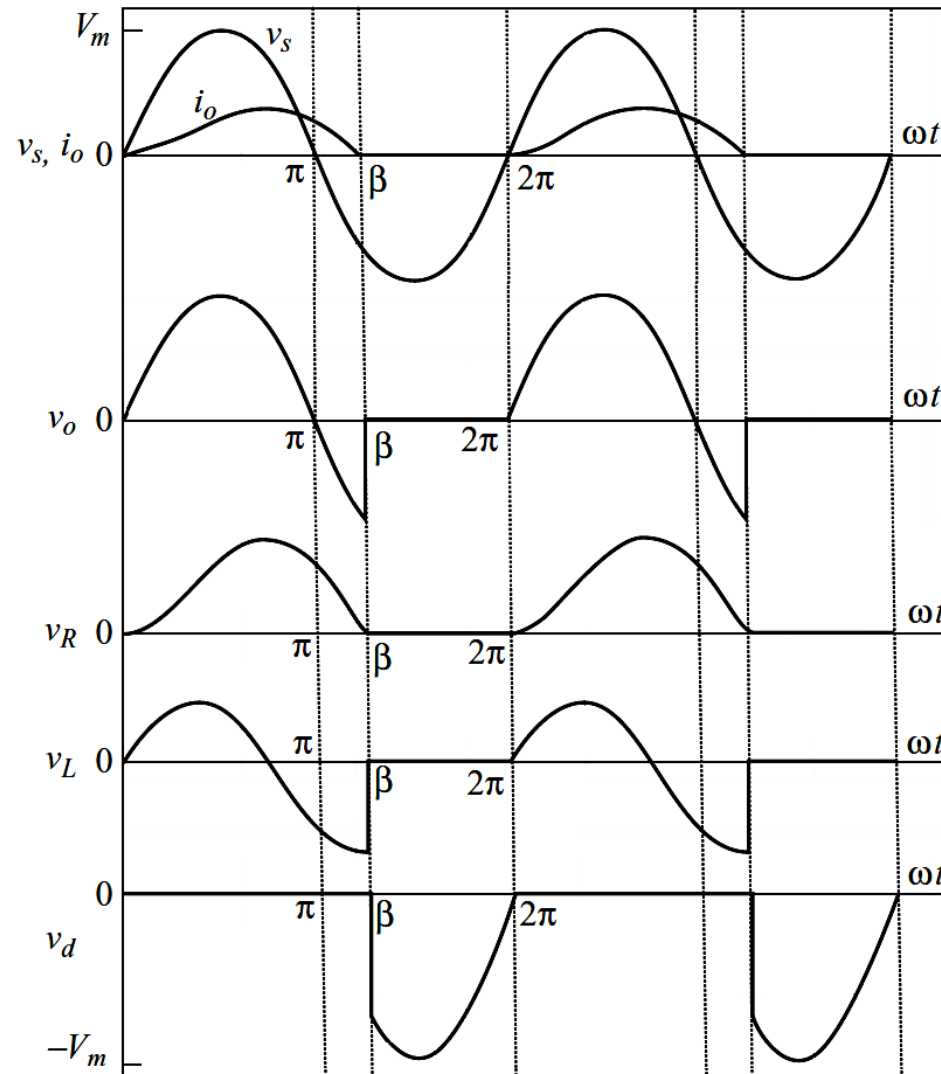
S : توان ظاهری منبع

P : توان متوسط بار

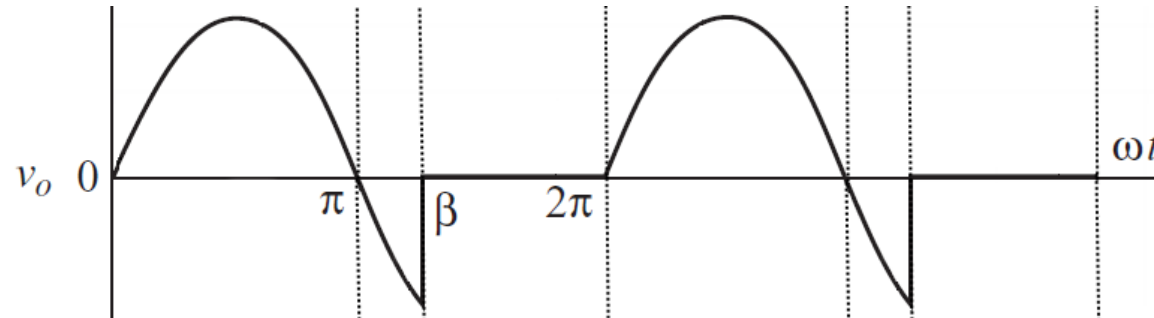
یکسو کننده تکفاز نیم موج با بار اهمی - سلفی



■ در این مدار به خاطر خاصیت
 سلفی بار، دیود بیشتر از 180°
 هدایت می کند تا زمانی که جریان
 مدار صفر شود.



یکسو کننده تکفاز نیم موج با بار اهمی - سلفی



▪ ولتاژ متوسط خروجی برابر است با:

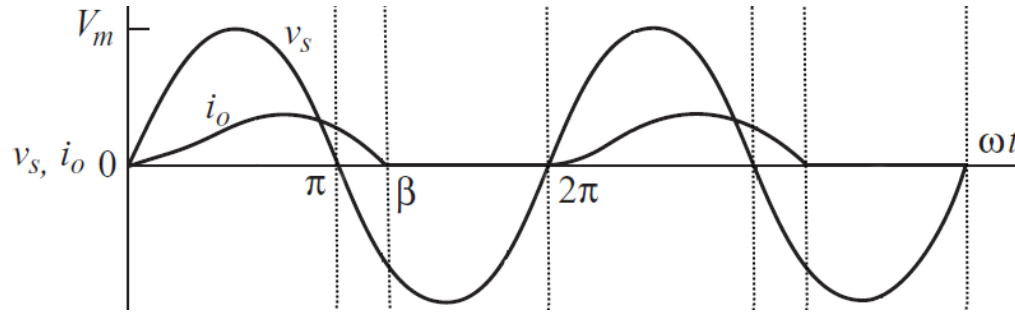
$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\beta} V_m \sin \omega t. d(\omega t) \Rightarrow V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi} (1 - \cos \beta)$$

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

▪ جریان متوسط بار برابر است با:

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

یکسو کننده تکفاز نیم موج با بار اهمی - سلفی



- معادله کلی جریان در مدار یکسو کننده نیم موج با بار RL برابر است با:

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

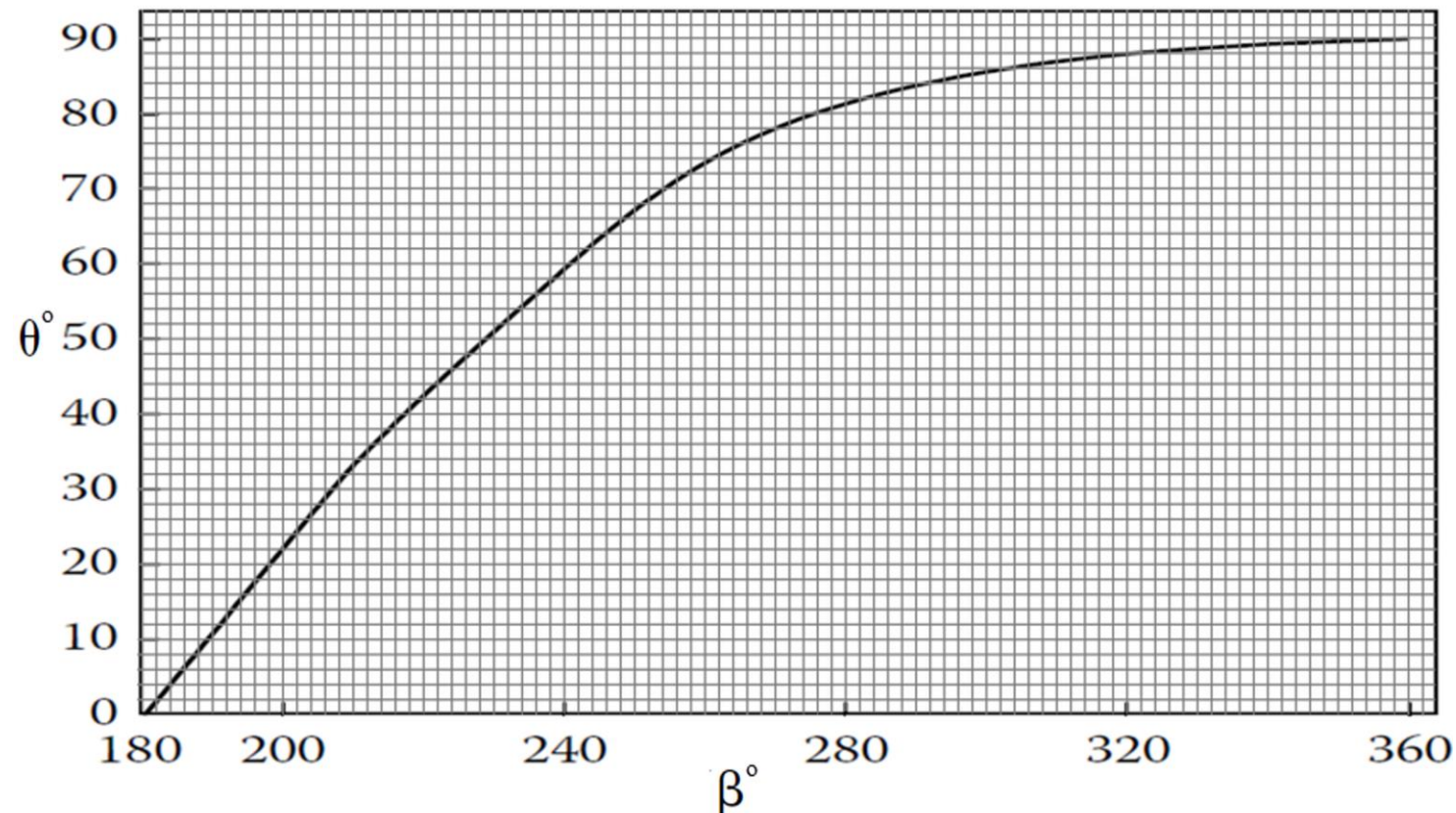
$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \quad \text{and} \quad \tau = \frac{L}{R} \quad \text{که در آن:}$$

$$i(\beta) = \frac{V_m}{Z} \left[\sin(\beta - \theta) + \sin(\theta) e^{-\frac{\beta}{\omega \tau}} \right] = 0 \quad \text{وقتی که } \omega t = \beta \text{ باشد، } i = 0 \text{ می شود:}$$

$$\sin(\beta - \theta) + \sin(\theta) e^{-\frac{\beta}{\omega \tau}} = 0 \quad \text{بنابراین:}$$

یکسوکننده تکفاز نیم موج با بار اهمی - سلفی

- مقدار β را می توان با شبیه ساز MATLAB یا با روش های عددی مثل روش تکرار به دست آورد.
- با استفاده از منحنی زیر و با داشتن θ می توان مقدار β را به دست آورد.



مثال ۵

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

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{100^2 + (377 \times 0.1)^2} = 106.9\Omega \quad \text{الف)}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{377 \times 0.1}{100}\right) = 20.7^\circ = 0.361 \text{ rad}$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.1}{100} = 0.001 \text{ s} \Rightarrow \omega\tau = 377 \times 0.001 = 0.377 \text{ rad}$$

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

$$i(\omega t) = \frac{100}{106.9} \left[\sin(\omega t - 0.361) + \sin(0.361) e^{\left(\frac{-\beta}{-0.377}\right)} \right]$$

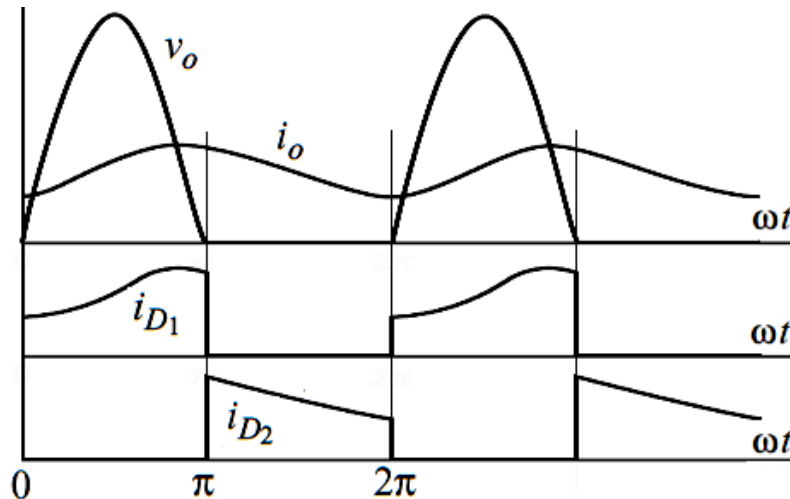
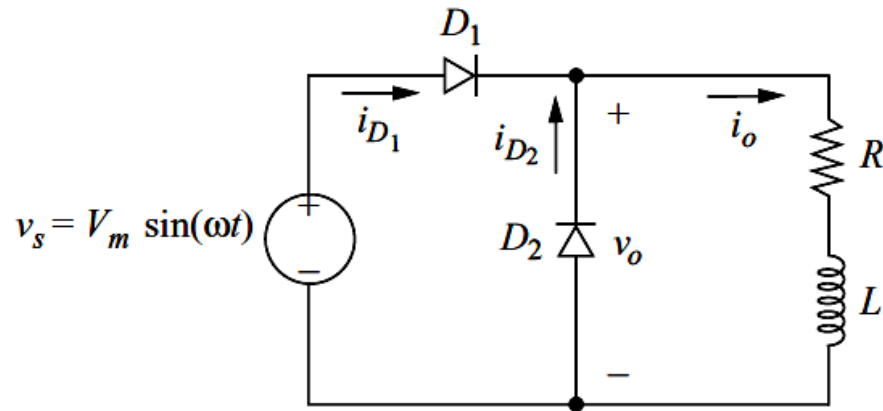
$$= 0.936 \left[\sin(\omega t - 0.361) + 0.331 e^{\left(\frac{-\beta}{-0.377}\right)} \right]$$

- وقتی که $\omega t = \beta$ باشد، $i = 0$ می شود. بنابراین: $\sin(\beta - 0.361) + \sin(0.361) e^{\left(\frac{-\beta}{-0.377}\right)} = 0$

- با استفاده از روش های عددی و با $\theta = 20.7^\circ$ مقدار β به دست می آید: $\beta = 201^\circ = 3.5 \text{ rad}$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{30.77}{100} = 0.3077 \text{ A} \quad \text{پ) } V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi} (1 - \cos \beta) = \frac{100}{2\pi} (1 - \cos 201^\circ) = 30.77 \text{ V} \quad \text{ب)}$$

اضافه کردن دیود هرزگرد



■ دیود هرزگرد D_2 مانع از ظاهر شدن ولتاژ منفی روی بار می شود.

■ انرژی مغناطیسی ذخیره شده افزایش می یابد.
 ■ در لحظه $\omega t = \pi$ جریان از دیود D_1 به دیود D_2 منتقل می شود. این پروسه، کموتاسیون نام دارد.

■ اگر ثابت زمانی $(\tau = L/R)$ به اندازه کافی بزرگ باشد، جریان بار می تواند پیوسته باشد.

■ ولتاژ متوسط خروجی برابر است با:

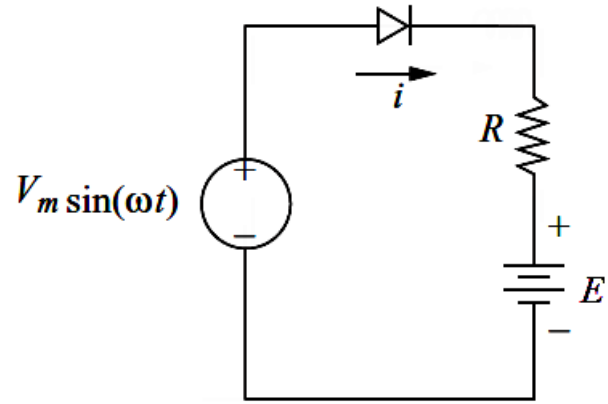
$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m \sin \omega t. d(\omega t) \Rightarrow V_{dc} = \frac{V_m}{\pi}$$

■ 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 می کند:

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

$$\beta = 180 - \alpha$$

▪ زاویه هدایت (δ) برابر است با:

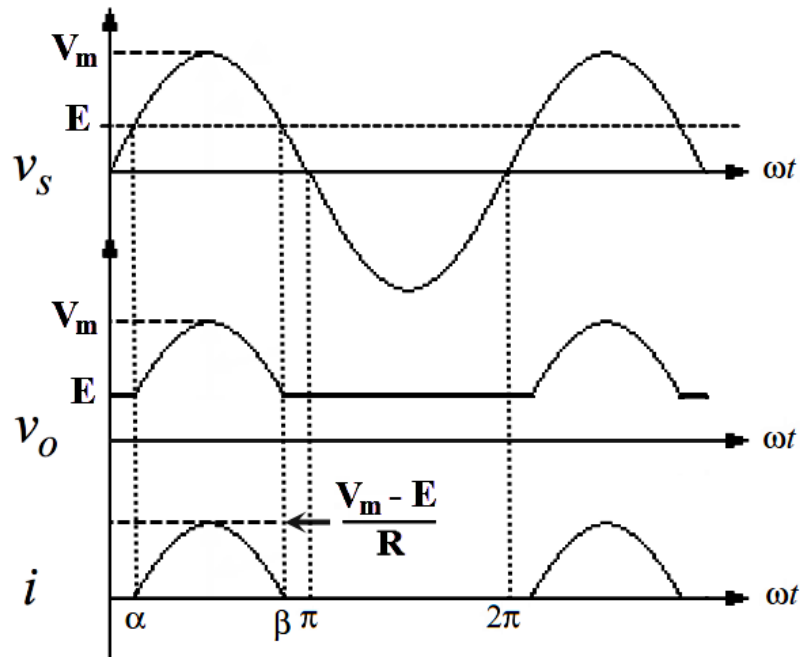
$$\delta = \beta - \alpha$$

▪ محاسبه مقدار مقاومت محدود کننده جریان (R):

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

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

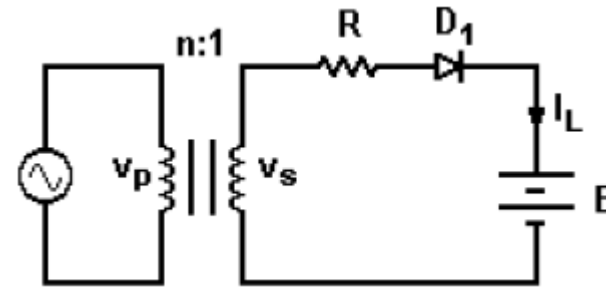
$$R = \frac{1}{2\pi I_{dc}} (2V_m \cos \alpha + 2E\alpha - \pi E)$$



مثال ۶

- 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:

- $E = 12V$
- $V_p = 120V$
- $V_m = \sqrt{2} V_s = 84.85V$

for $V_s > E$ the diode D_1 conducts

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

$$\beta = 180 - \alpha = 180 - 8.13 = 171.87^\circ$$

The conduction angle

$$\delta = \beta - \alpha = 171.87 - 8.13 = 163.74^\circ$$

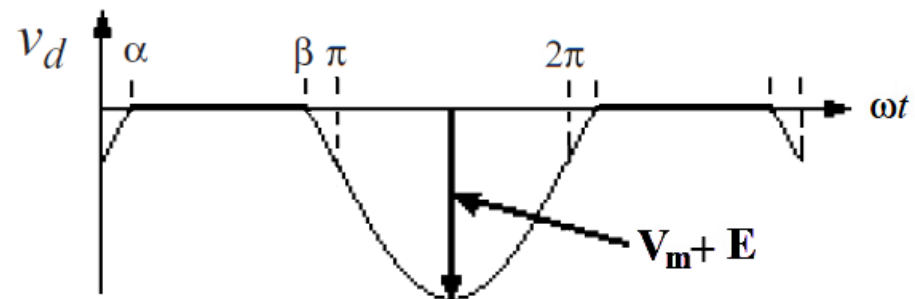
مثال ۶ (ادامه)

ب) مقدار مقاومت محدود کننده جریان:

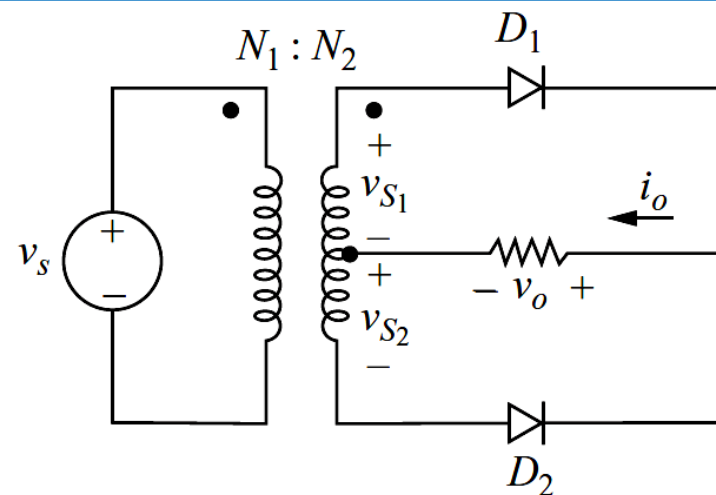
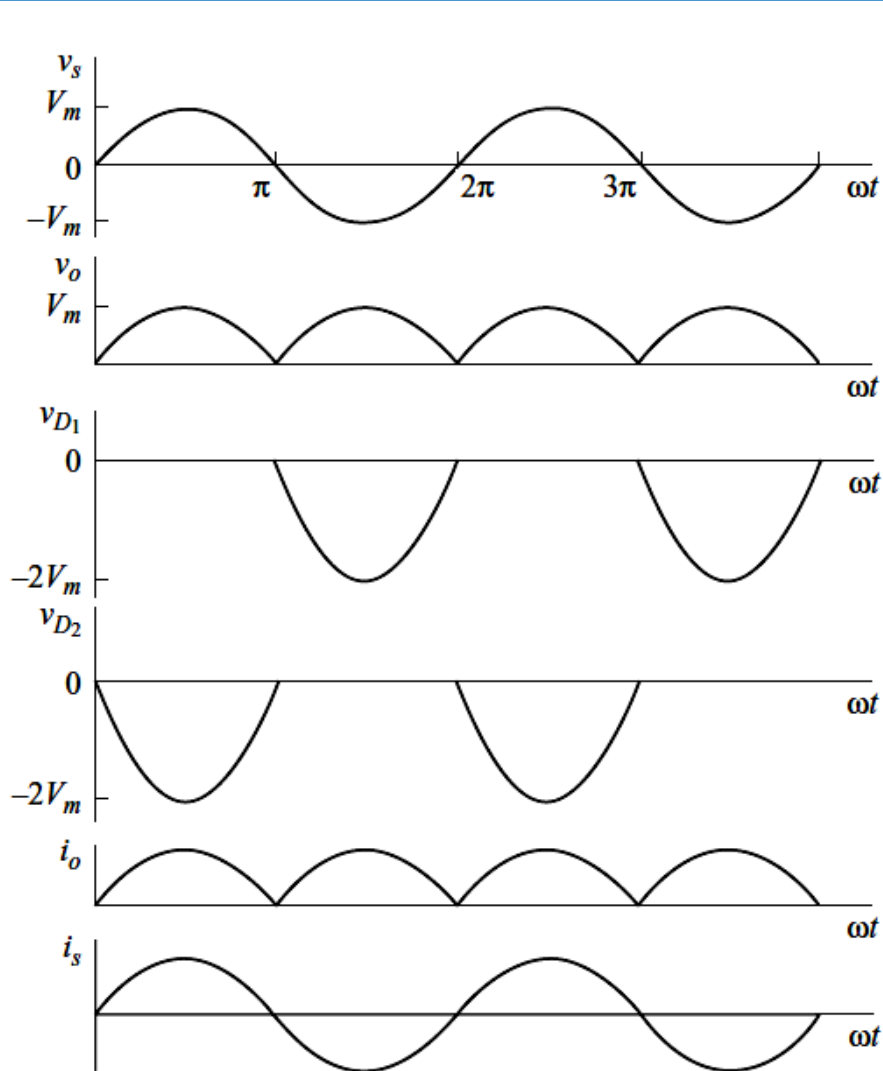
$$R = \frac{1}{2\pi I_{dc}} (2V_m \cos \alpha + 2E\alpha - \pi E)$$
$$= \frac{1}{2\pi 5} (2(84.85) \cos 8.13^\circ + 2(12)(0.1419) - \pi 12) = 4.26 \Omega$$

پ) PIV دیود:

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

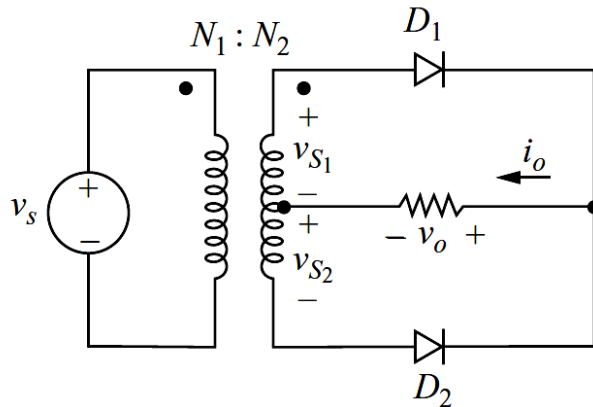


یکسوکننده تک فاز تمام موج سر وسط



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

یکسو کننده تک فاز 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

■ در مدار یکسوساز تمام موج با ترانس سر وسط، اگر بار اهمی خالص باشد، مطلوب است:
الف) راندمان (η)، ب) FF، پ) RF، ت) TUF، ث) PIV هر دیود ج) CF جریان ورودی.

■ حل:

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = 0.6366V_m, \quad I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{0.6366V_m}{R}, \quad P_{dc} = V_{dc}I_{dc} = \frac{(0.6366V_m)^2}{R}$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707V_m, \quad I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{0.707V_m}{R}, \quad P_{ac} = V_{rms}I_{rms} = \frac{(0.707V_m)^2}{R}$$

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

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{0.707V_m}{0.6366V_m} = 1.11 = 111\% \quad \text{(ب)}$$

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{(1.11)^2 - 1} = 0.482 = 48.2\% \quad \text{(پ)}$$

ادامه مثال ۷

(ت)

✓ مقدار موثر ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور: $V_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707V_m$

✓ مقدار موثر جریان هر یک از ثانویه‌های ترانسفورماتور: $I_s = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{0.5V_m}{R}$
(V_{rms} ولتاژ موثر خروجی است)

✓ مقدار توان ظاهری (S) یا ولت-آمپر (VA) ترانسفورماتور (برای جمع دو ثانویه ترانسفورماتور):

$$S = 2V_s I_s = 2 \times (0.707V_m) \times \left(\frac{0.5V_m}{R} \right) = \frac{0.707V_m^2}{R}$$

✓ ضریب بهره‌برداری ترانسفورماتور:

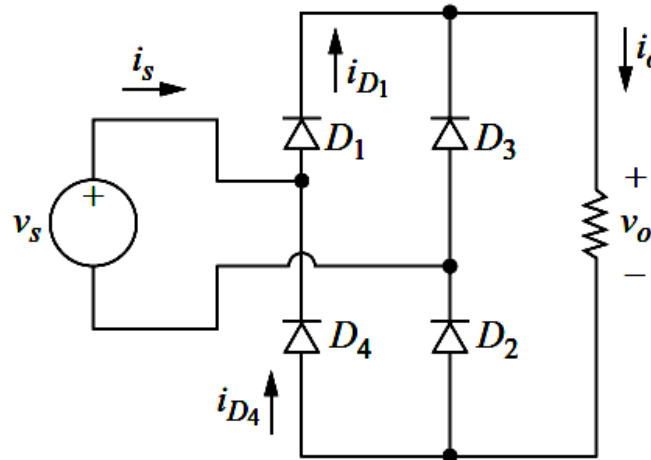
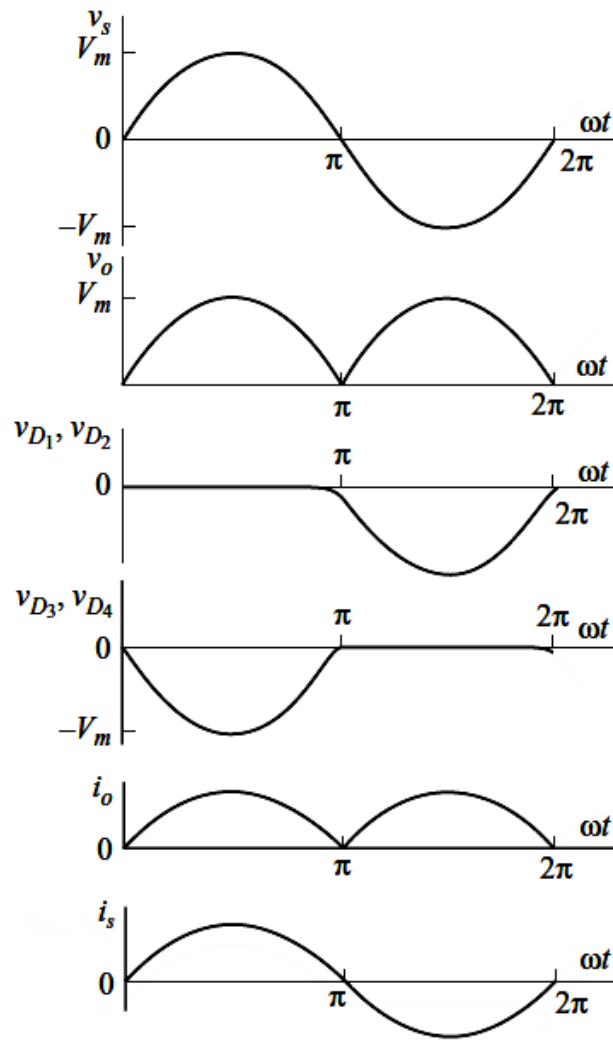
$$TUF = \frac{P_{dc}}{S} = \frac{(0.6366V_m)^2/R}{0.707V_m^2/R} = \frac{(0.6366)^2}{0.707} = 0.5732 = 57.32\%$$

یعنی ترانسفورماتور باید $1/0.573 = 1.74$ بزرگتر از زمانی باشد که به بار ac خالص وصل می‌شود.

(ث) حداکثر ولتاژ معکوس دیود (PIV): $PIV = 2V_m$

(ج) ضریب صعود جریان ورودی (CF): $CF = \frac{I_{s(peak)}}{I_s} = \frac{V_m/R}{0.707V_m/R} = 1.4142$

یکسوکننده تک فاز تمام موج پل



▪ بار اهمی

▪ PIV هر دیود برابر با V_m است.

▪ ولتاژ و جریان متوسط خروجی:

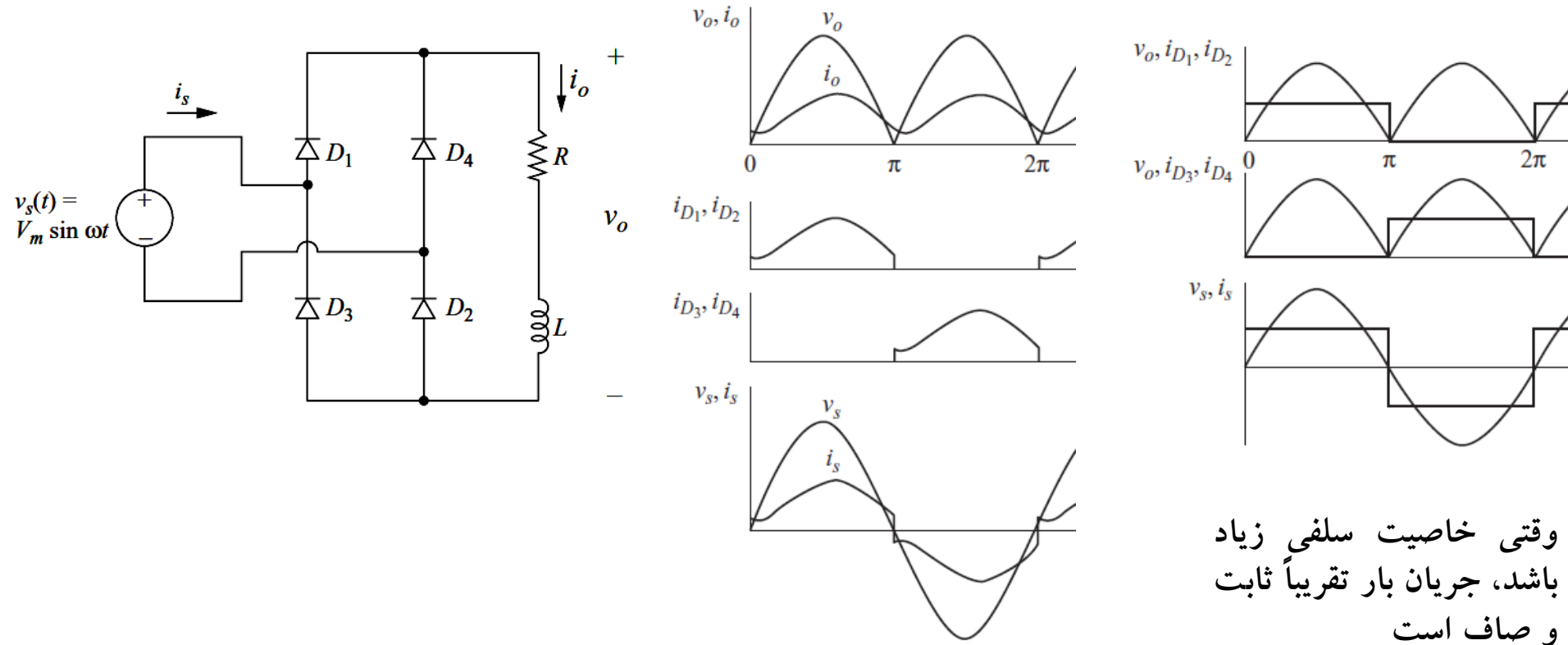
$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \quad I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$$

▪ ولتاژ و جریان موثر خروجی:

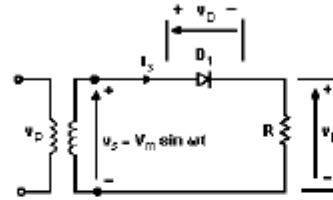
$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R}$$

یکسوکننده تک فاز تمام موج پل

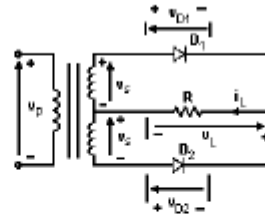
▪ بار اهمی – سلفی



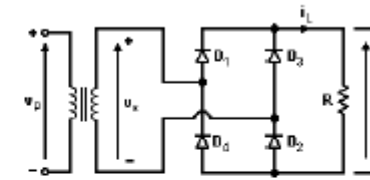
مقایسه یکسو کننده های تک فاز



**Rectifier
(R Load)**

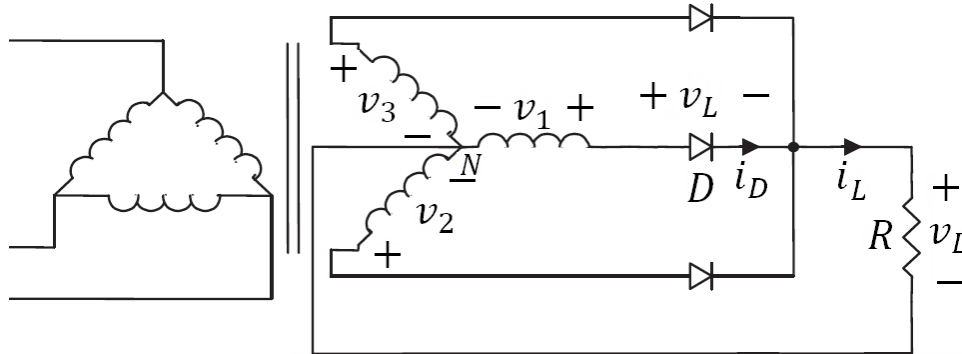


**Full-Wave Transformer Rectifier
(R Load)**

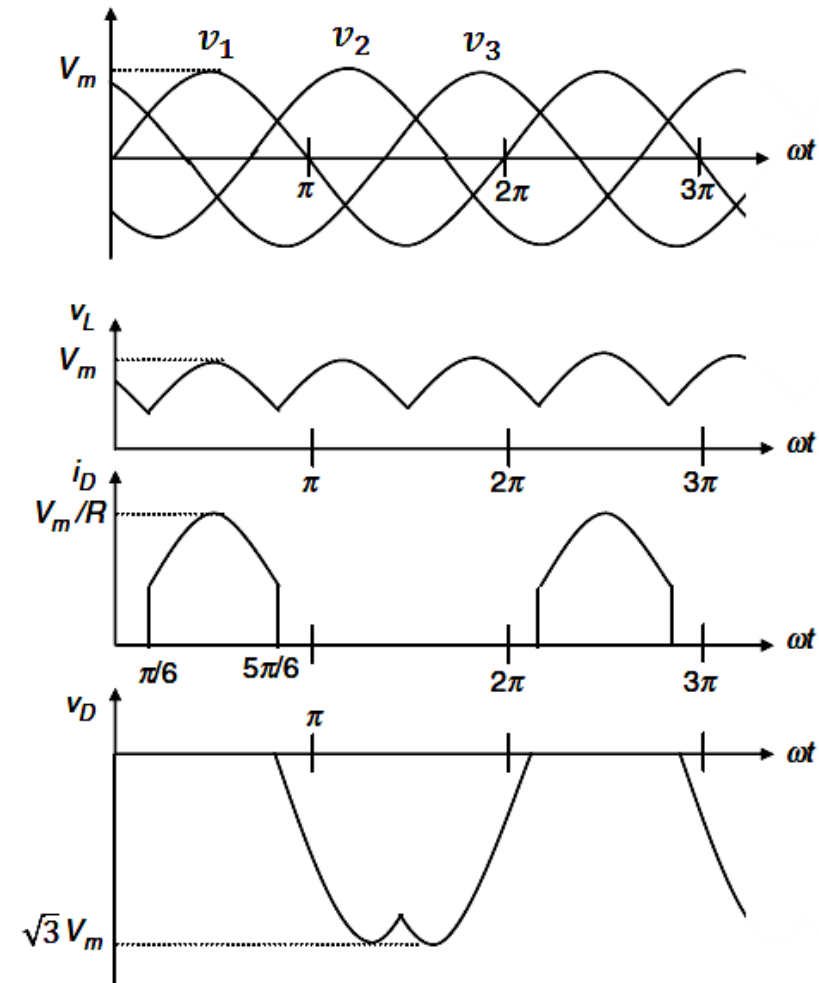


Performance Parameter	Half-Wave	Center-Tapped	Bridge
Efficiency (η)	40.5%	81%	81%
Form Factor (FF)	157%	111%	111%
Ripple Factor (RF)	121%	48.2%	48.2%
Transformer Utilization Factor (TUF)	28.6%	57.32%	81.1%
Peak Inverse Voltage (PIV)	V_m	$2V_m$	V_m
Crest Factor (CF)	2	1.414	1.414

یکسو کننده سه فاز نیم موج با بار اهمی



- در اتصال چند فازه، فاصله زمانی بین تکرار سیکل‌ها کمتر از اتصال تک فاز 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 سه فاز نیم موج با بار اهمی

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

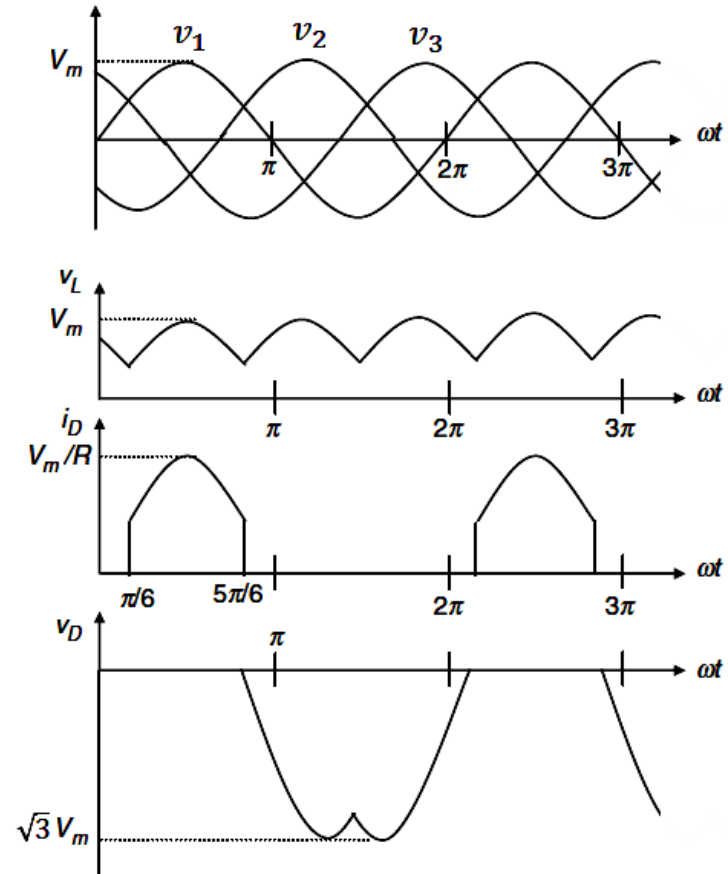
■ ولتاژ و جریان متوسط خروجی:

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

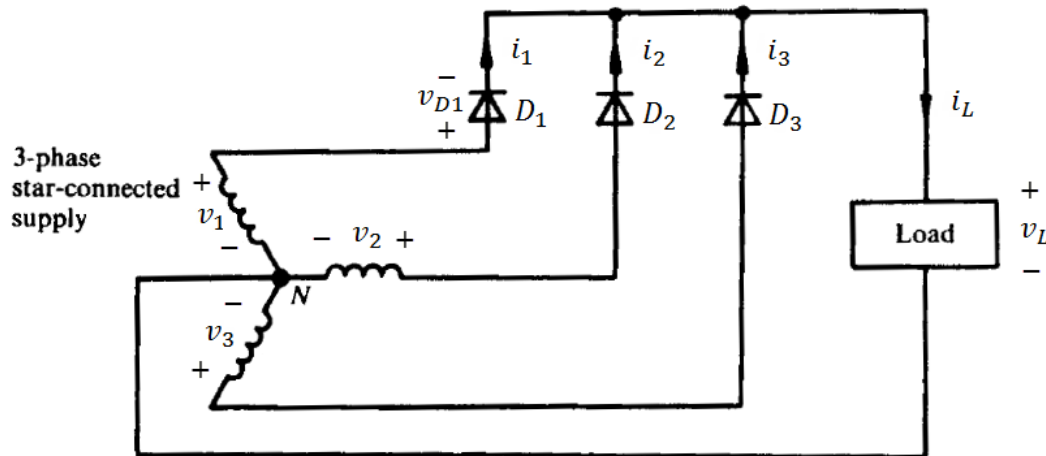
$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R}$$

■ ولتاژ و جریان موثر خروجی:

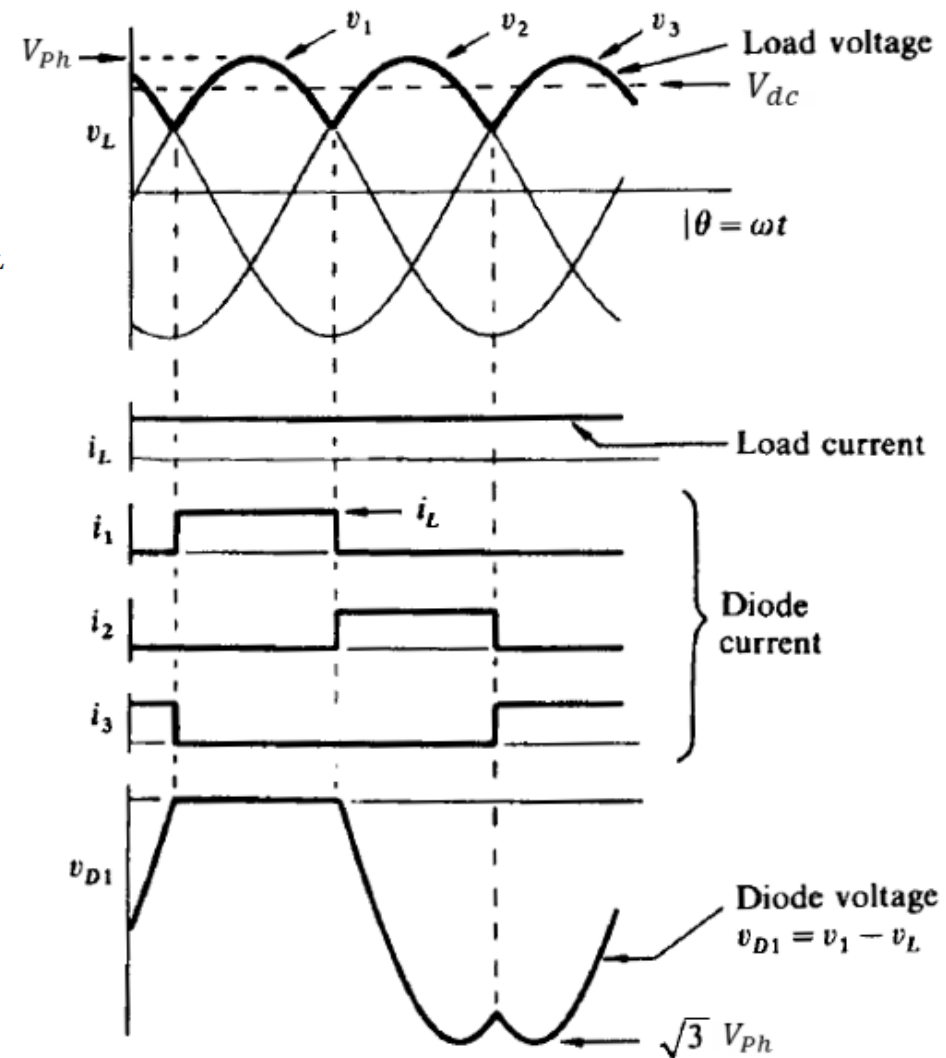
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} [V_m \sin \omega t]^2 \cdot d(\omega t)} = V_{Ph} \sqrt{\frac{3}{2\pi} \left(\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4} \right)} = 0.84V_{Ph} \quad I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R}$$



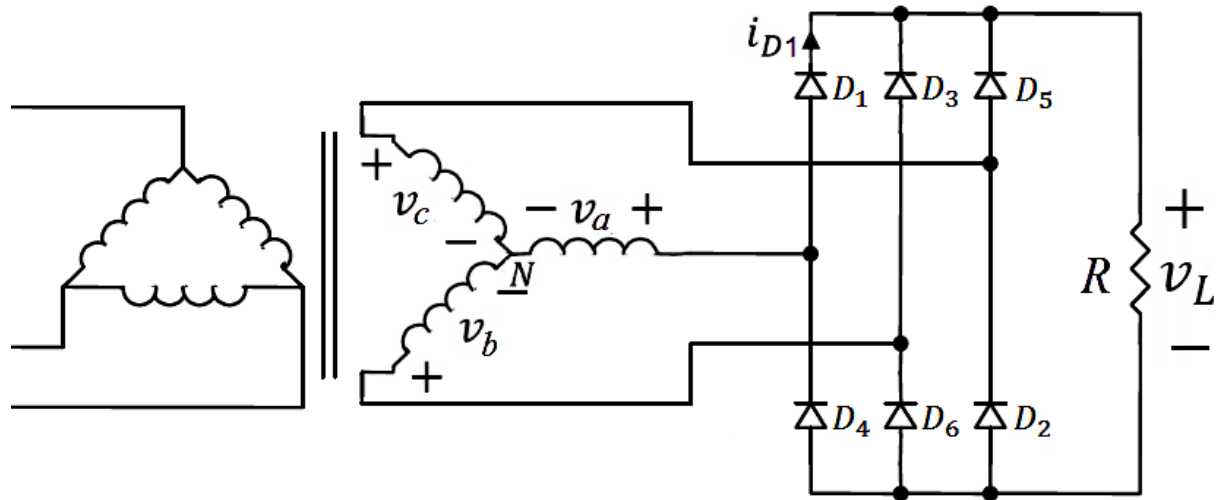
یکسو کننده سه فاز نیم موج با بار اهمی - سلفی



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

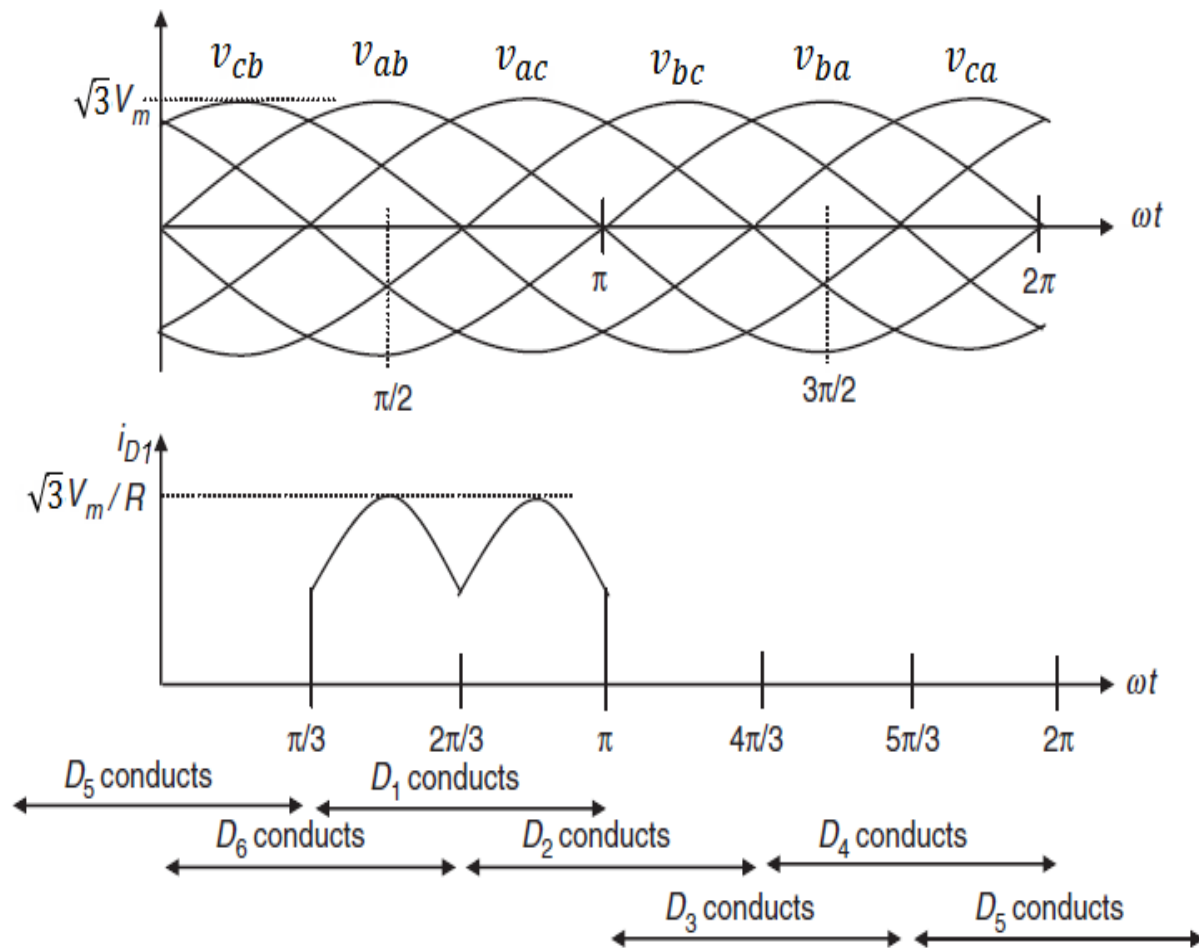


یکسوکننده سه فاز پل با بار اهمی



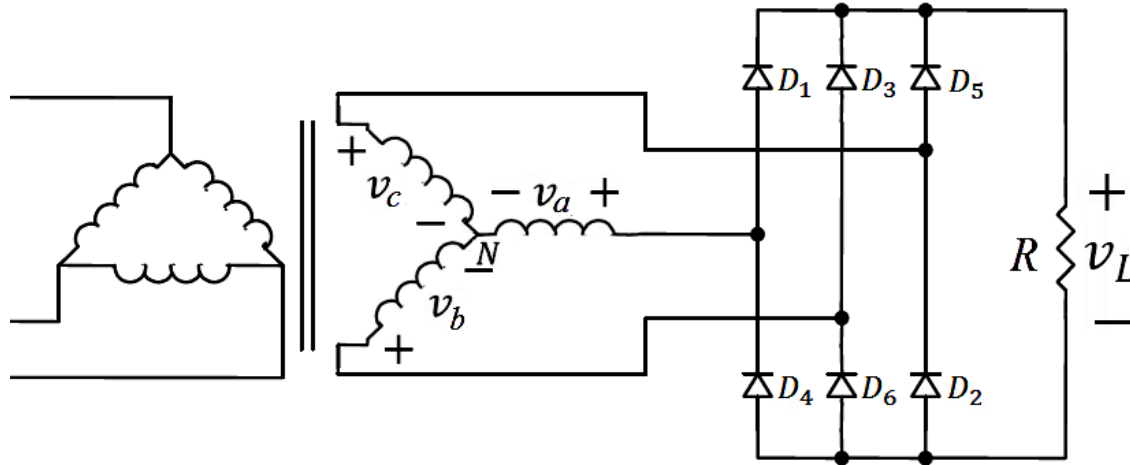
- یکسوکننده‌های پل سه فاز در کاربردهای توان بالا به کار می‌روند.
- این مدار با و بدون ترانسفورماتور قادر به کار کردن است.
- ولتاژ خروجی دارای ریفیل شش پالسی است.
- شماره دیودها به ترتیب تقدم هدایت‌شان است و هر کدام 120° درجه هدایت می‌کنند.
- ترتیب هدایت دیودها به صورت $12, 23, 34, 45, 56, 61, \dots$ 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.

یکسو کننده سه فاز پل با بار اهمی



■ یعنی وقتی فاز V_a مثبت تر است، دیود D_1 هدایت می کند و طی این پریود، ابتدا V_b منفی تر است و دیود D_6 هدایت می کند تا موقعی که V_c منفی تر شود و جریان از دیود D_6 به دیود D_2 منتقل شود.

یکسو کننده سه فاز پل با بار اهمی



▪ **PIV** هر دیود برابر است با:

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

▪ ولتاژ و جریان متوسط خروجی:

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

▪ ولتاژ و جریان موثر خروجی:

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

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

مثال ۸

▪ در مدار یکسوساز پل سه فاز با بار اهمی خالص، اگر جریان متوسط بار $I_{dc} = 60A$ و ولتاژ متوسط خروجی $V_{dc} = 280.7V$ و فرکانس منبع $60Hz$ باشد، مطلوب است:

الف) راندمان (η)، ب) FF ، پ) RF ، ت) TUF ، ث) PIV هر دیود ج) پیک جریان هر دیود

حل:

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} V_{Ph(max)} \Rightarrow 280.7 = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} V_{Ph(max)} \Rightarrow V_{Ph(max)} = 169.7V$$

$$R = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{280.7}{60} = 4.68\Omega \quad P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = 280.7 \times 60 = 16842W$$

$$V_{rms} = V_{ph(max)} \sqrt{\left(\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}\right)} = 1.6554 V_{ph(max)} = 280.9V$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = 60.02A \quad P_{ac} = V_{rms} I_{rms} = 16859W$$

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{16842}{16859} = 99.8\% \quad \text{الف)}$$

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{280.9}{280.7} = 1.0007 = 100.07\% \quad \text{ب)}$$

ادامه مثال ۸

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{(1.0007)^2 - 1} = 0.0374 = 3.74\% \quad (\text{پ})$$

(ت)

مقدار موثر جریان ثانویه ترانسفورماتور برابر است با:

$$I_s = \frac{8}{2\pi} \int_0^{\pi/6} I_m^2 \cos^2 \omega t. d(\omega t) = I_m \sqrt{\frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{6} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{6} \right)} = 0.7804 I_m$$

از طرفی چون ولتاژ ماکزیمم دو سر بار برابر با $V_{Load(max)} = \sqrt{3}V_{Ph(max)}$ است، بنابراین:

$$I_m = \frac{V_{Load(max)}}{R} = \frac{\sqrt{3}V_{ph(max)}}{R} = 62.8A$$

$$I_s = 0.7804 I_m = 49A$$

ولتاژ ماکزیمم هر فاز ثانویه ترانسفورماتور برابر با $V_{ph(max)}$ است. بنابراین مقدار موثر آن برابر است با:

$$V_s = \frac{V_{ph(max)}}{\sqrt{2}} = 0.707V_{ph(max)}$$

ولت - آمپر نامی ترانسفورماتور برابر است با:

$$S = 3V_s I_s = 3 \times (0.707V_{ph(max)}) \times \left(0.7804 \times \frac{\sqrt{3}V_{ph(max)}}{R} \right) = 17641 VA$$

ادامه مثال ۸

$$TUF = \frac{P_{dc}}{S} = \frac{16842}{17641} = 0.9547 = 95.47\%$$

✓ ضریب بهره‌برداری ترانسفورماتور:

$$PIV = \sqrt{3}V_{ph(max)} = 293.9V$$

ث) حداکثر ولتاژ معکوس دیود (PIV):

ج) جریان متوسط هر دیود برابر است با:

$$I_d = \frac{4}{2\pi} \int_0^{\pi/6} I_{d(max)} \cos \omega t. d(\omega t) = \frac{2I_m}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} = 0.3183 I_{d(max)} \Rightarrow I_{d(max)} = \frac{I_d}{0.3183}$$

از طرفی چون هر دیود ۱۲۰ درجه هدایت می‌کند، بنابراین جریان متوسط هر دیود برابر یک سوم جریان متوسط بار است.

$$I_d = \frac{I_{dc}}{3} = \frac{60}{3} = 20A$$

جریان ماکزیمم هر دیود برابر است با:

$$I_{d(max)} = \frac{I_d}{0.3183} = \frac{20}{0.3183} = 62.83A$$

مقایسه عملکرد یکسوکننده‌ها

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 (η)	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