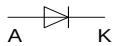
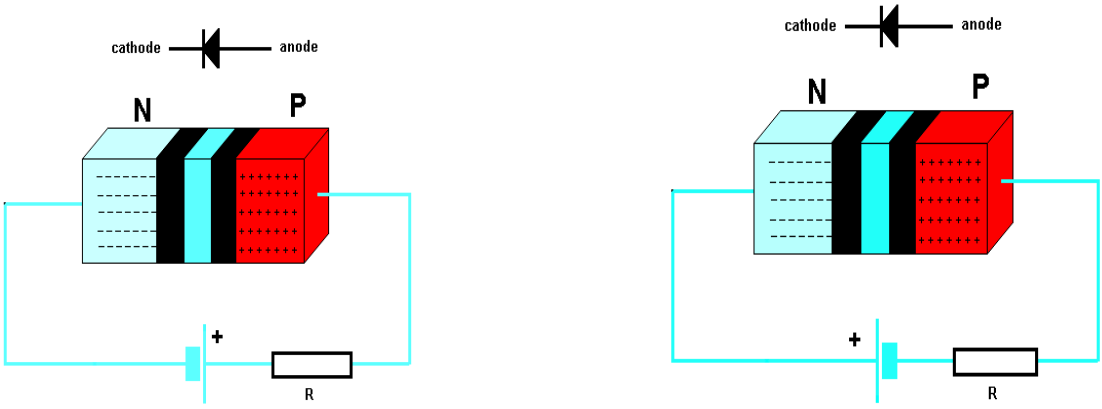
پیوندگاه P-N و دیودهای نیمه هادی (یکسو سازها)

مقدمه: چنانچه دو نیم رسانای نوع (P) و (N) به طور مکانیکی به گونه ای پیوند داده شوند که تشکیل یک بلور واحد را بدهند که در آن پیوستگی ساختمان آن حفظ شده باشد چنین پیوندی را یک پیوند PN با یک دوقطبی می نامند، که دیود نامیده می شود و آنرا با علامت  که A آند و K کاتد آن می باشد نشان میدهند.

برای مشخص شدن کاتد و آند در یک دیود، کاتد را با یک حلقه مشخص می کنند و یا علامت دیود را روی آن می گذارند. دیودهای نیمه هادی معمولاً از ژرمانیم (با ولتاژ آستانه ۰/۳ ولت) و سیلیسیم (با ولتاژ آستانه ۰/۶ ولت) ساخته می شوند که به دلیل قابلیت تحمل دمای بالای دیود سیلیسیوم در جریان های زیاد از آن استفاده می شود.

چنانچه قطب های یک ولتاژ خارجی (منبع تغذیه) را به گونه ای که در شکل (۱-الف) نشان داده شده است (مثبت به آند و منفی به کاتد) به دو سر دیود بسته شود در این صورت می گویند دیود به طور مستقیم بایاس *(Bias)* شده و در غیر این صورت تغذیه به طور معکوس خواهد بود (شکل ۱- ب)

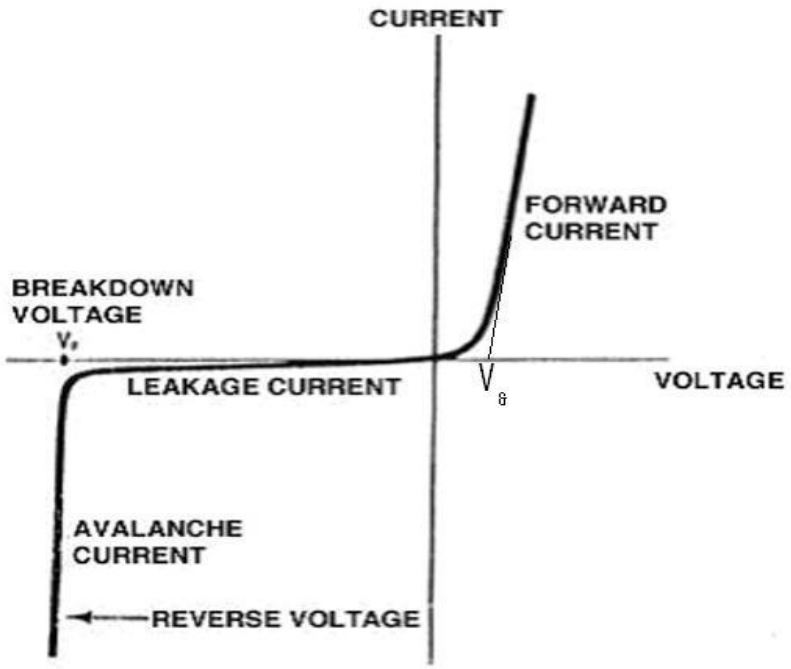


الف:بایاس مستقیم

ب:بایاس معکوس

شکل۱

وقتی دیود به طور مستقیم تغذیه می شود نباید جریان زیادی از آن بگذرد، زیرا باعث سوختن دیود می شود. در حالت تغذیه معکوس نیز ولتاژ اعمال شده نباید از ولتاژ شکست دیود تجاوز نماید چون جریان زیادی از آن عبور کرده باعث سوختن آن می شود. غیر خطی بودن مقاومت دیود باعث می شود که منحنی تغییرات جریان دیود نسبت به ولتاژ اعمال شده به دو سر آن به صورت خط مستقیم نبوده و شکلی شبیه منحنی شکل (۲) را خواهد داشت.



شکل۲

شـکل (۲) منحنی مشـخصـه دیود را که منحنی I_D برحسب V_D است در حالت بایاس مستقیم و معکوس نشان می دهد.

با توجه به این منحنی، در حالت مسـتقیم *(FORWARD)* تا زمانی که ولتاژ اعمال شـده کمتر از سـطح ولتاژ V_γ باشـد، (V_γ برای دیود ژرمانیم حدود ۰/۳ و برای دیود سـیلیسیم حدود ۰/۶ ولت) به علت زیاد بودن مقاومت دینامیک دیود و عدم تخلیه ولتاژ سد، در محل اتصال P و N ولتاژی ایجاد شده و جریان بسیار کم می باشـد و در ازای ولتاژهای بیش از V_γ به علت کم شـدن مقاومت دینامیکی دیود، جریان به شدت با تغییر ولتاژ بـالا می رود. در حـالـت معکوس *(REVERSE)* ، با توجه به منحنی، ابتدا جریان بسـیار ناچیز (I_S) و تقریبا مسـتقل از ولتاژ می باشـد و به ازاء ولتاژ معکوس بیش از V_Z (ولتاژ شکست) جریان دیود به سرعت افزایش می یابد، و اگر اعمال این ولتاژ ادامه یابد و توان مصـرف شـده از توانی که دیود قابلیت تحمل آنرا دارد بیشـتر شود باعث سوختن دیود می شود. به همین علت دیودهای معمولی برای چنین شرایطی به کار نمی روند بلکه از دیود

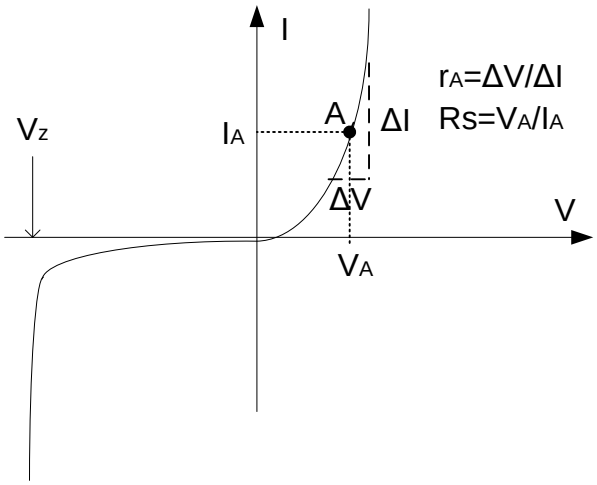
زنر که به علت ساختمان داخلی آن و به منظور استفاده در این ناحیه *(REVERSE)* از منحنی ساخته شده استفاده می شود.

تعیین قطب های دیود: با توجه به توضیحات داده شده که مقاومت دیود در حالت بایاس مستقیم بسیار کم و در حالت بایاس معکوس بسیار زیاد است، می توان قطب های دیود را مشخص نمود و سالم و یا معیوب بودن آن را آزمایش نمود. برای این کار به کمک یک اهمتر مقاومت دیود در دو جهت مختلف اندازه گیری می شود. در صورتی که دیود سالم باشد دو مقدار بسیار متفاوت نشان داده خواهد شد. در صورتی که مقاومت کم نشان داده شود بایاس مستقیم بوده و قطب مثبت اهمتر (اتصال قرمز در اهمتر الکترونیکی و اتصال سیاه در اهم مترهای معمولی یا آومتر) به P و قطب منفی به N وصل است.

مقاومت دیود:

الف- مقاومت استاتیک: مقاومت استاتیک در یک نقطه عبارت است از حاصل تقسیم اختلاف ولتاژدو قطبی به شدت جریان آن. در شکل (۳) مقاومت استاتیک در نقطه *(A)* با رابطه $R_S = \frac{V}{R}$ مشخص می شود.

ب- مقاومت دینامیک: مقاومت دینامیک حاصل تقسیم جزئی ولتاژ (ΔV) به تغییرات جزئی جریان (ΔI) در حوالی نقطه کار می باشد . $r_A = \frac{\Delta V}{\Delta I}$



(شکل -۳):مقاومت دینامیک واستاتیک

دیود زنر: دیود زنر در جهت مستقیم شبیه دیود معمولی عمل می کند ولی در جهت معکوس وقتی به ولتاژ شکست برسد ولتاژ خروجی تقریباً مستقل از جریان گشته و ثابت می ماند. این خاصیت دیود زنر در تنظیم ولتاژ به کار می رود. بنابراین به عنوان تنظیم کننده باید کاتد نسبت به آند مثبت باشد. (تغذیه معکوس در مدار تنظیم کننده) در مدارهای الکتریکی دیود زنر را به صورت نشان می دهند.

برای تبدیل ولتاژ متناوب به ولتاژ (جریان) یکسو شده از مشخصه های غیر خطی دیود استفاده می گردد، که این عمل را یکسوسازی می نامند. حذف و از بین بردن حالت متغیر بودن جریان یکسو شده را صاف کردن (فیلتر کردن) گویند.

در مدارهای یکسوسازی با توجه به نوع مدار از یک، دو یا چهار دیود برای یکسوسازی استفاده می شود و برای بهتر نمودن مشخصه منبع تغذیه در قسمت انتهایی از تنظیم کننده استفاده می شود. ترکیبی از یکسوساز، صافی، و تنظیم کننده را منبع تغذیه *(Power Supply)* می نامند.

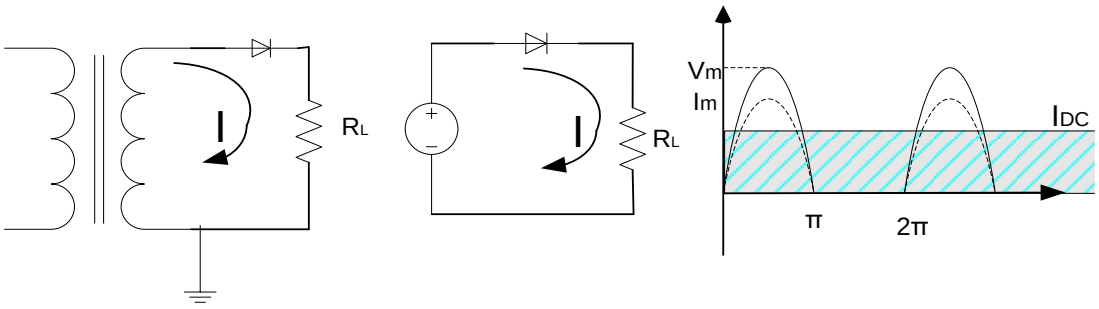
یکسو سازی : در حالت ایده آل یک دیود بایستی جریان را در جهت مستقیم به آسانی عبور دهد، و در جهت معکوس مانع عبور آن گردد. دیودهای عملی مشخصه نزدیک به حالت ایده آل دارند به طور مثال دیودهای

نیمـه هادی افت ولتاژ کمی در جهت مســـتقیم دارند و از طرفی اجازه عبور یک جریان خیلی کمی را در جهت معکوس می دهند. از افت ولتاژ مستقیم و جریان معکوس با کمی خطا می توان چشم پوشی کرد.

یک مدار یکسـوسـاز عملی در شـکل (۱- الف) نشـان داده شده است. یک ترانسفورماتور ولتاژ ۲۲۰ ولت با فرکانس $۵۰Hz$ را به ولتاژ خروجی مناسب $(۲۴V)$ تبدیل می نماید که این ولتاژ به طور سری به ترکیب دیود و مقاومت R_L اعمال می شود. برای تحلیل تقریبی، دیود واقعی مانند دیود ایده آل نمایش داده می شود و از افت ولتاژ V_F و جریان معکوس صرف نظر نمائیم ضمناً از مقاومت داخلی ترانسفورماتور صرفنظر می شود.

به ازاء ولتاژ $V = V_m \sin \omega t$ جریان مطابق شکل ۱- ج است یعنی داریم

$$(۱) \begin{cases} i = \dfrac{V}{R_L} = \dfrac{V_m \sin \omega t}{R_L} & 0 \le \omega t \le \pi \\ i = 0 & \pi \le \omega t \le 2\pi \end{cases}$$



الف- یکسو ساز نیم موج　　ب- مدار معادل　　ج- شکل موج خروج

شکل – (۱)　　۱

مقصود از یکسو سازی به دست آوردن جریان مستقیم است، مؤلفه dc جریان بار R_L برابر مقدار متوسط I بوده و به صورت زیر می باشد:

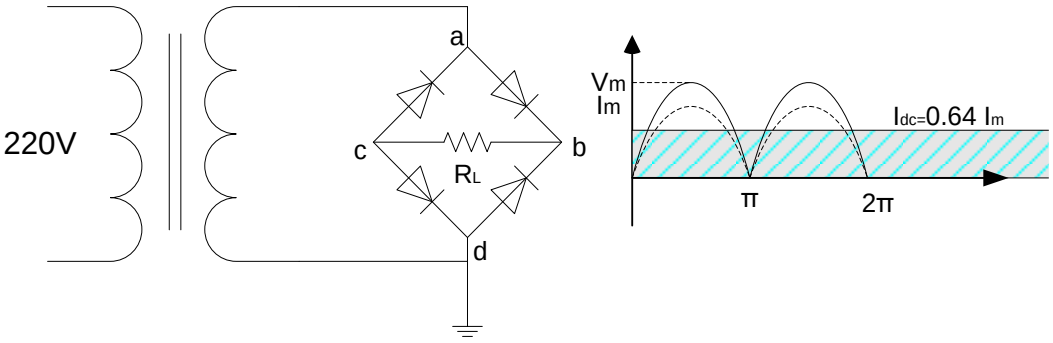
$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_d(\omega t) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \frac{V_m \sin\omega t}{R_L} d(\omega t) + 0 = \frac{1}{2\pi}\frac{V_m}{R_L}\left[-\cos\omega t\right]_0^{\pi} \qquad (۲)$$

$$I_{dc} = \frac{I_m}{\pi} = 0/318\ \ I_m$$

جریان مقاومت بار در حالت نیم موج محاسبه شد که دیده می شود و مؤلفه dc تقریباً ۳۰٪ درصد مقدار ماکزیمم است.

نوع دیگر از یکسو ساز : مدار زیر یکسو ساز پل (شکل ۲) می باشد. در این حالت به علت استفاده از هر دو نیمه موج سینوسی مقدار dc بیشتری از حالت قبل با همان ترانسفورماتور را ایجاد می شود. سیکل مثبت موج سینوسی از مسیر $abcd$ و سیکل منفی از مسیر $dbca$ عبور خواهد کرد، در نتیجه جریانی که در هر دو حالت از مقاومت بار می گذرد همیشه در یک جهت می باشد و مؤلفه dc دو برابر حالت یکسو سازی نیم موج می باشد.

$$I_{dc} = \frac{2}{\pi} \times \frac{V_m}{R_L} = \frac{2I_m}{\pi} \qquad (۳)$$

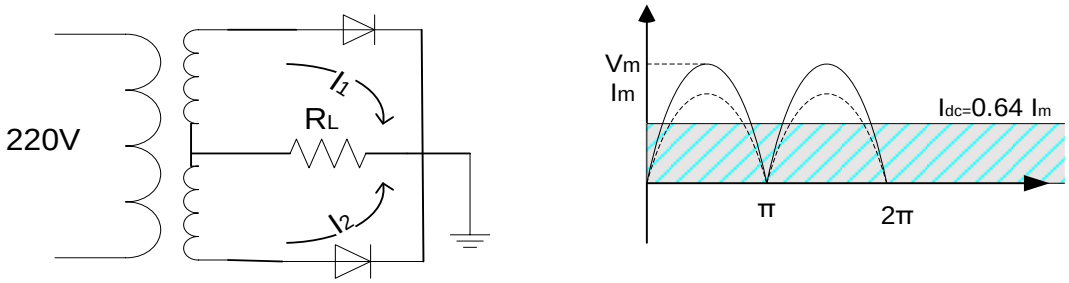


شکل – (۲):یکسو ساز پل

یکی از عیوب مدار پل این است که ۴ دیود در مدار لازم می باشد و در نتیجه در این مدار ولتاژی که در دو دیود تلف می شود همیشه با مقاومت بار (R_L) به طوری سری قرار دارند.

نوع سوم مدار یکسو ساز تمام موج استفاده از ترانسفورماتور سه سر و دو دیود می باشد که ولتاژ ترانسفورماتور دو برابر ولتاژ ترانسفورماتور حالت پل می باشد ولی همان نتیجه پل را به دست می دهد، سیم پی دوم ثانویه ولتاژ V_2 را با فاز مخالف V_1 تهیه می کند. یک چنین سیم پیچی به عنوان معکوس کننده فاز نامیده می شود، وقتی که V_1 مثبت است جریان i_1 از دیود D_1 می گذرد و در این حالت چون V_2 منفی است هیچ جریانی از دیود D_2 نمی گذرد و بالعکس وقتی V_2 مثبت است جریان i_2 از دیود D_2 می گذرد و دیود D_1 قطع می باشد. بنابراین جریانی که از مقاومت بار در یک سیکل خواهد گذشت $i_1 + i_2$ می باشد و خواهیم داشت:

$$I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi}$$



الف- یکسو ساز تمام موج با ترانس سه سر

ب- شکل موج خروجی

شکل ۳

همان طور که گفته شد نتیجه دلخواه یکسو سازی ایجاد جریان مستقیم است ولی عملاً جریان خروجی مدار یکسو ساز علاوه بر مؤلفه dc شامل یک مؤلفه ac هم می باشد. برای اندازه گیری میزان خوب بودن یکسو سازی «ضریب موجک» *(ripple)* را بصورت زیر تعریف می کنیم.

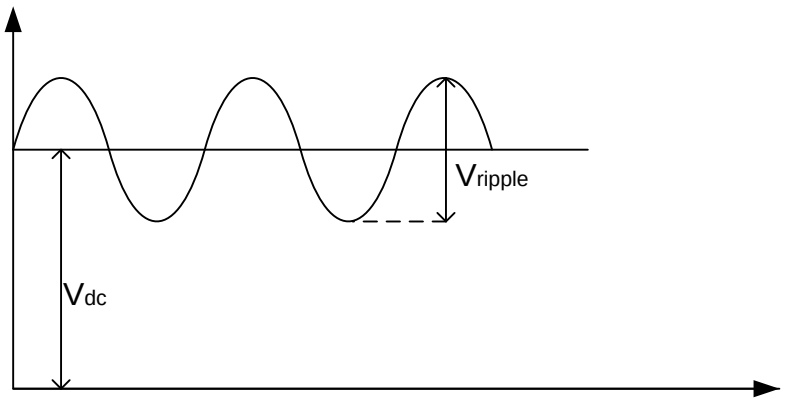
$$r = \frac{I_{ac}}{I_{dc}} = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{\text{مقدار مؤثر مؤلفه } ac}{\text{مؤلفه } dc} \qquad (۴)$$

چون اتلاف توان در مقاومت بار همان مقدار rms جریان است و توان کل برابر است با اتلاف توسط مؤلفه های مستقیم و متناوب

$$I_{rms}^2.R_L = I_{dc}^2.R_L + I_{ac}^2.R_L \Rightarrow I_{ac}^2 = I_{rms}^2 - I_{dc}^2 \qquad (۵)$$

$$r = \frac{\sqrt{I_{rm}^2 - I_{dc}^2}}{I_{dc}} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{dc}}\right)^2 - 1} \qquad (۶)$$

اگر ضریب موجک کم باشد مدار به خوبی جریان متناوب را به جریان مستقیم تبدیل می کند (شکل ۴)



شکل (۴)

مثال: با بکارگیری یک ولتمتر ac و dc ولتاژهای ۱/۵ ولت و ۲۵ ولت قرائت شده است. ضریب موجک را حساب کنید.

حل : $$r = \frac{V_{ac}(rms)}{V_{dc}} \times 100\% = 6\%$$

گرچه استفاده از یکسو سازهای تمام موج به جای نیم موج مؤلفه ac خروجی را از (۱۲٪ به ۴۸٪ مؤلفه dc کاهش می دهند، ولی برای مقصودهای مورد نظر مشخصه فوق رضایت بخش نیست جریان (I_{rms}) یکسو کننده های نیم موج و تمام موج را روابط زیر به دست می آید.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} I_m^2 \sin^2 \omega t} = \frac{I_m}{2} \quad \text{مدار نیم موج} \quad (۷$$

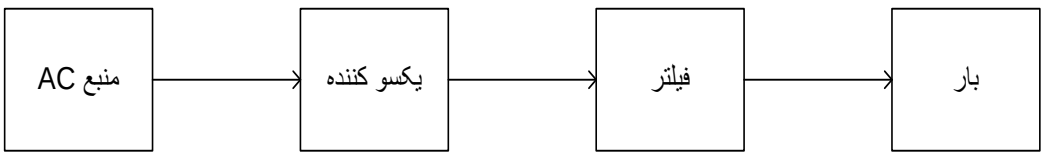
$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{مدار تمام موج} \quad (۸$$

با کمک نتایج فوق و روابط ۲ و ۳ و رابط ۶ می توان ضریب رپیل را در مورد جریان نیم موج و تمام موج به دست آورد.

$$\text{نیم موج} \Rightarrow r = \sqrt{\left(\frac{I_m/2}{I_m/\pi}\right)^2 - 1} = 1.21 \quad (۹$$

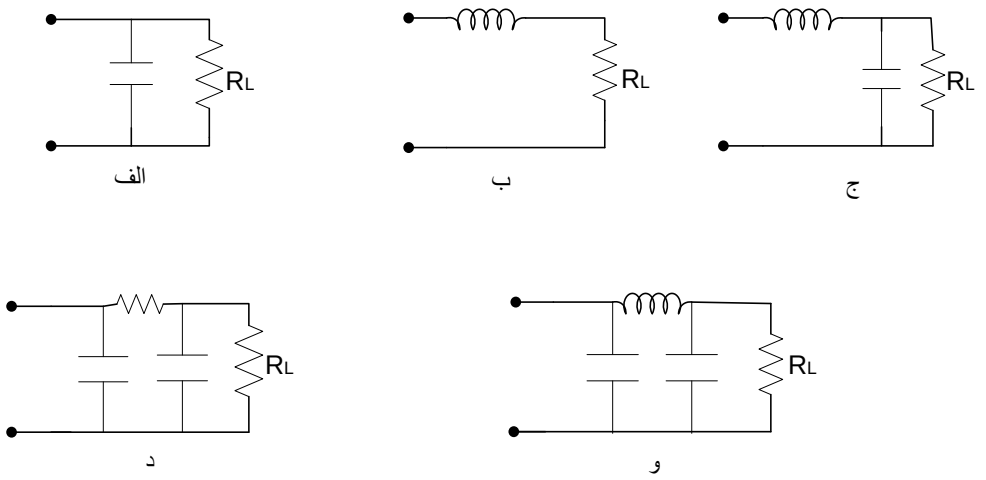
$$\text{تمام موج} \quad r = \sqrt{\left(\frac{I_m/\sqrt{2}}{2I_m/\pi}\right)^2 - 1} = 0.48 \quad (۱۰$$

صافی : برای کاهش مقدار ولتاژ موجک از مدارهای صافی استفاده می شود. مدارهای صافی بین مقاومت بار و مدار یکسو ساز قرار می گیرند. از رایج ترین مدارهای صافی خازن می باشد که به صورت موازی با مقاومت بسته می شود.



شکل (۵)

به جای فیلتر در شکل (۵) می توان با توجه به نیاز از فیلترهای شکل زیر استفاده کرد.



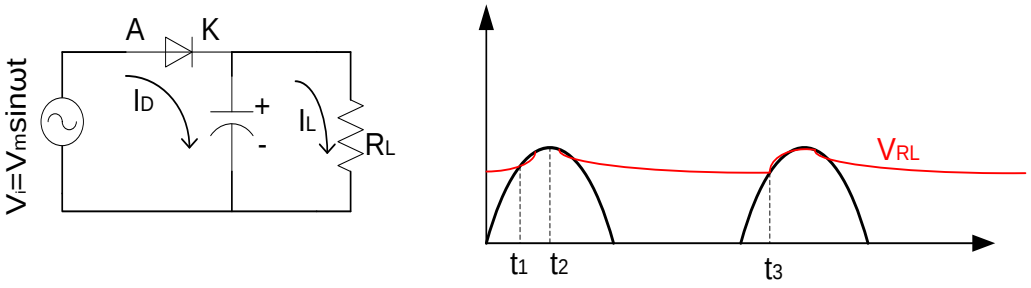
شکل (۶):انواع فیلتر

به طور مثال در شـکل ۶- الف- خازن را می توان تصور نمود که سدی با امپدانس کم برای مؤلفه ac موج یکسـو شـده می باشد که به عبارت دیگر می توان تصور نمود که بار الکتریکی در نیم سیکلی که دیود را هدایت می کند ذخیره می شود و در نیم سیکلی که جریان را هدایت نمی کند بار را تخلیه می نماید و تغییرات ولتاژ را کاهش می دهد. برای اینکه به طرز کار فیلترها آشنا شوید یک مثال ساده خواهیم آورد. بحث ریاضی و محاسبه ضریب موجک هر یک از مدارهای فوق به تفصیل در اکثر کتاب های الکترونیک آورده شده است.

با توجه به شـکل ۷- اگر مقاومت دیود کم باشد، مدار به حال تعادل رسیده باشد کار صافی را می توان به صـورت زیر شـرح داد که در لحظه $t=0$ ولتاژ V صـفراست در صورتی که نقطه k به علت آنکه خازن قبلاً شارژ شده بود دارای ولتاژ V_R می باشد. به عبارت دیگر در دیود $V_A<V_K$ شده یعنی دیود هدایت نمی کند و با توجه به افزایش ولتاژ ورودی $V = V_m \sin \omega t$ در لحظه $t = t_1$, $V_A>V_K$ می گردد و دیود هدایت می نماید.

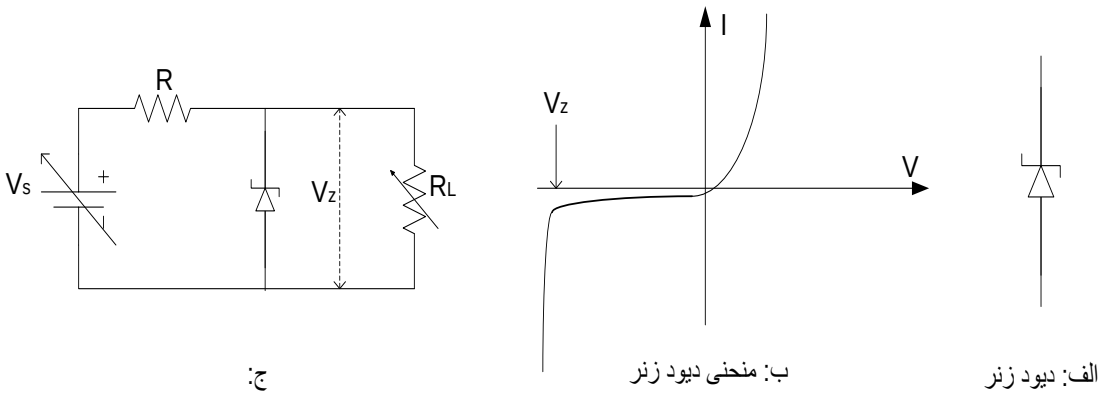
از طرف دیگر با شـروع هدایت دیود خازن هم شـارژ شـده و ولتاژ دو سـرش که همان $V_{RL} = V_K = V_C$ اسـت افزایش می یابد، و با کاهش ولتاژ ورودی عمل هدایت قطع می شـود، (زمان t_2) در زمانی که $V_A<V_K$ شـده خازن در مقاومت بار R_L طبق رابطه $V_{R_L} = V_2 e^{-(t-t_2)/RC}$ تخلیه می شـود و این عمل تا نیم پریود

بعدی تا زمان t_3 ادامه می یابد، و در این لحظه عمل هدایت دیود دوباره شروع می شود. مقدار متوسط یا مؤلفه dc در مقایسه با حالت نیم موج (بدون صافی) بیشتر و مؤلفه ac کمتر شده و ضریب موجک نیز به مقدار زیادی کاهش می یابد.



شکل ۷:صافی خازنی

تنظیم کننده ولتاژ: برای تنظیم ولتاژ خروجی یک منبع تغذیه و بستگی نداشتن آن به تغییرات ولتاژ ورودی و بار خروجی از مدارهای تنظیم کننده ولتاژ استفاده می‌شود، در این مدارها معمولاً از لامپهای گازدار و یا دو قطبی های نیمه هادی (دیود زنر) و ترانسفورماتورهای اشباع شده استفاده می شود از دیود زنر در تغذیه معکوس به عنوان تنظیم کننده ولتاژ استفاده می کنند که ولتاژ دو سر آن مستقل از جریان خواهد بود، شکل ۸- ج نمونه یک تنظیم کننده ولتاژ را نشان می دهد، که به وسیله دیود زنر ساخته شده است. شرح لازم برای ثابت بودن ولتاژ دو سر مقاومت R_L، $V_S > V_Z$ می باشد.



الف: دیود زنر ب: منحنی دیود زنر ج:

شکل ۸: دیود زنر در تثبیت کننده ولتاژ