الکترونیک صنعتی

Power electronic

فهرست

مقدمه

دیودهای نیمه هادی قدرت

مدارات دیودی و یکسوکننده ها

تریستورها

یکسوکننده های کنترل شده

کنترل کننده های ولتاژ متناوب

روشهای کموتاسیون

چاپرهای DC

مقدمه

الکترونیک قدرت ترکیبی از قدرت، الکترونیک و کنترل است.

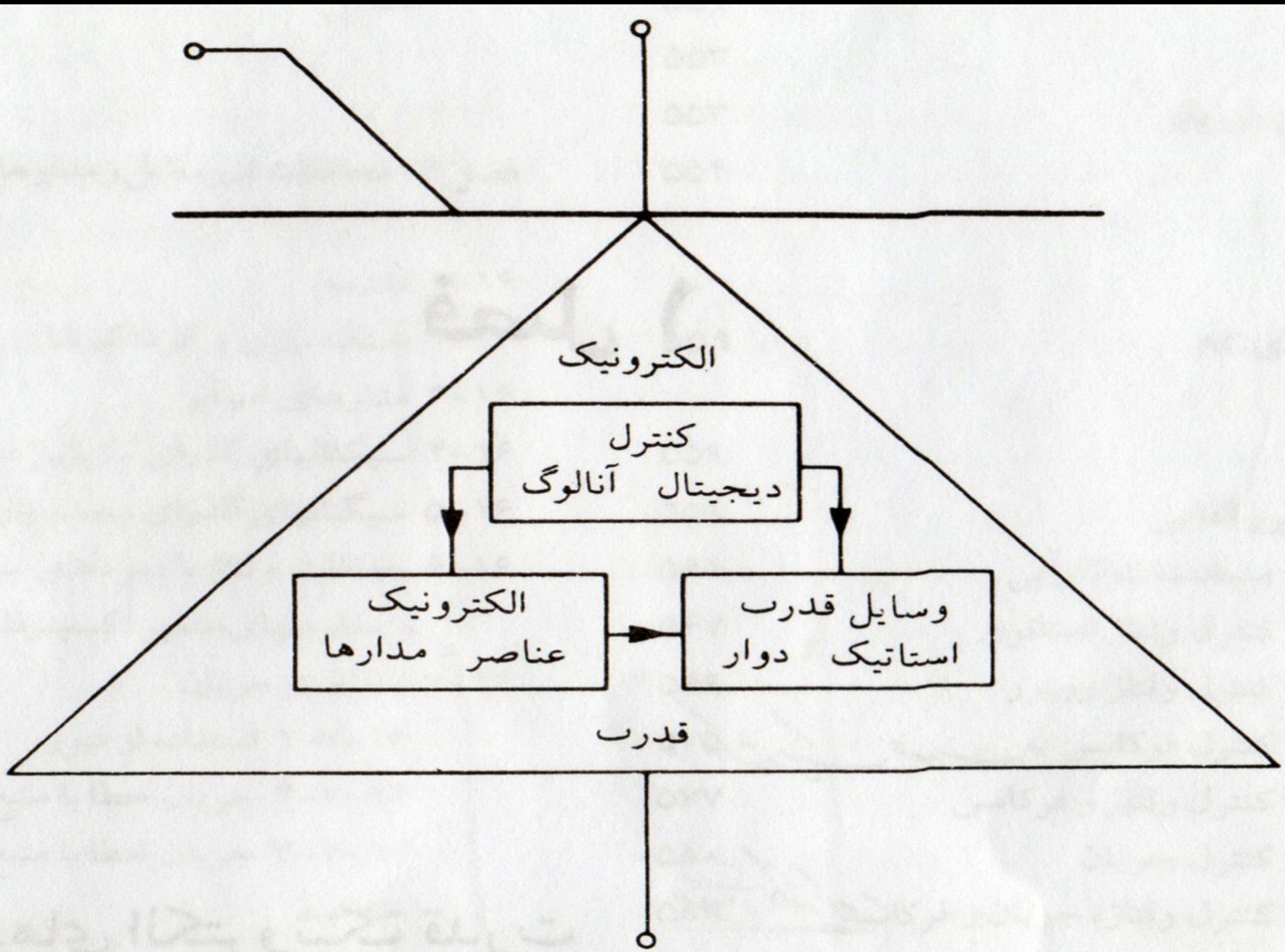
الکترونیک، مدارها وسایل پردازشگر یا پردازنده سیگنالها را بررسی میکند که برای بدست آوردن هدفهای کنترلی مطلوب مورد استفاده قرار میگیرد.

قدرت، وسایل قدرت استاتیک و گردنده را که در تولید، انتقال و توزیع توان الکتریکی به کار گرفته میشود بررسی میکند.

کنترل به بررسی مشخصه های دینامیک و حالت پایدار سیستمهای با حلقه بسته میپردازد.

الکترونیک براساس خاصیت کلید زنی عناصر نیمه هادی قدرت پایه گذاری شده است.

شکل بعد رابطه الکترونیک قدرت با قدرت، الکترونیک و کنترل را نشان میدهد.


الکترونیک
کنترل
دیجیتال آنالوگ
الکترونیک
عناصر مدارها
وسایل قدرت
استاتیک دوار
قدرت

دیودهای نیمه هادی قدرت

دیودهای نیمه هادی قدرت نقش مهمی را مدارات الکترونیک قدرت ایفا میکنند.

دیود به عنوان کلیدی عمل میکند که کارهای بسیاری را از قبیل کلیدهای یکسوکننده، عمل هرزگردی در رگولاتورهای کلید زنی، معکوس سازی بار خازن و انتقال انرژی مابین اجزا، جداسازی ولتاژ، فیدبک انرژی از بار به منبع و آزاد سازی انرژی ذخیره شده را انجام میدهد.

مشخصه های دیود:

$$ID = Is\ (e^{VD/nVT} - 1)$$

معادله قبل معادله شاکلی نام دارد که در آن

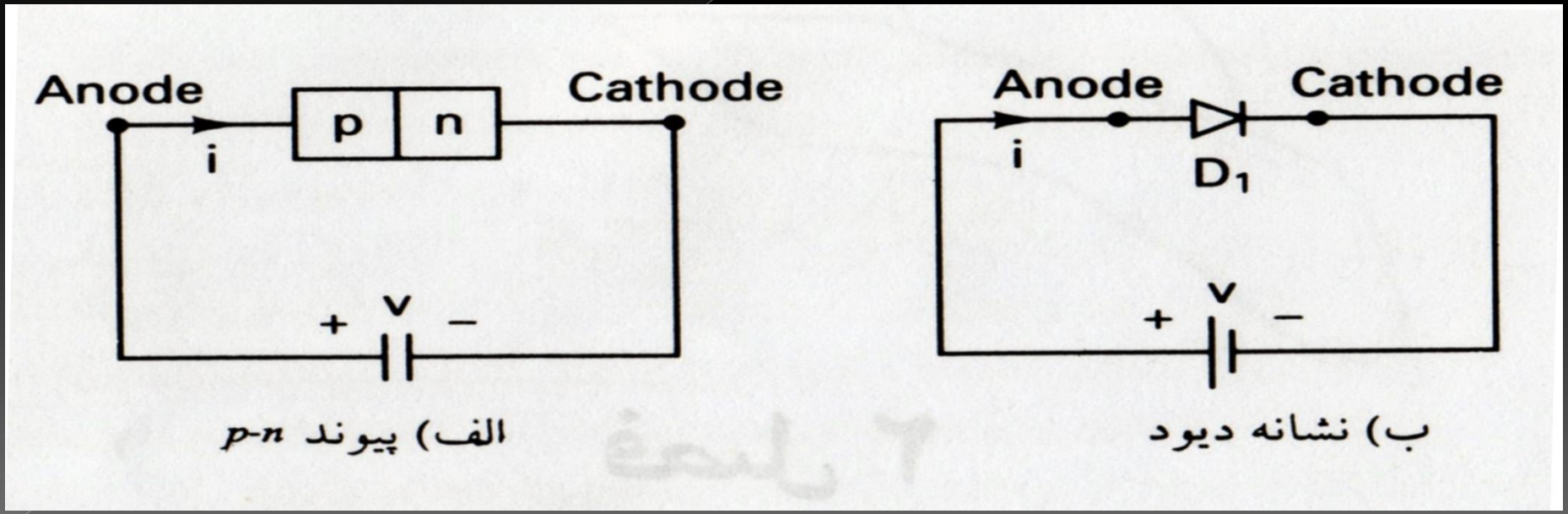
ID: جریان دیود

VD: ولتاژ دیود

IS: جریان نشتی یا اشباع معکوس

n: یک ثابت تجربی که ضریب گسیل یا ضریب ایده آلی نیز نام دارد و مقدار آن از 1 تا 2 متغیر است.

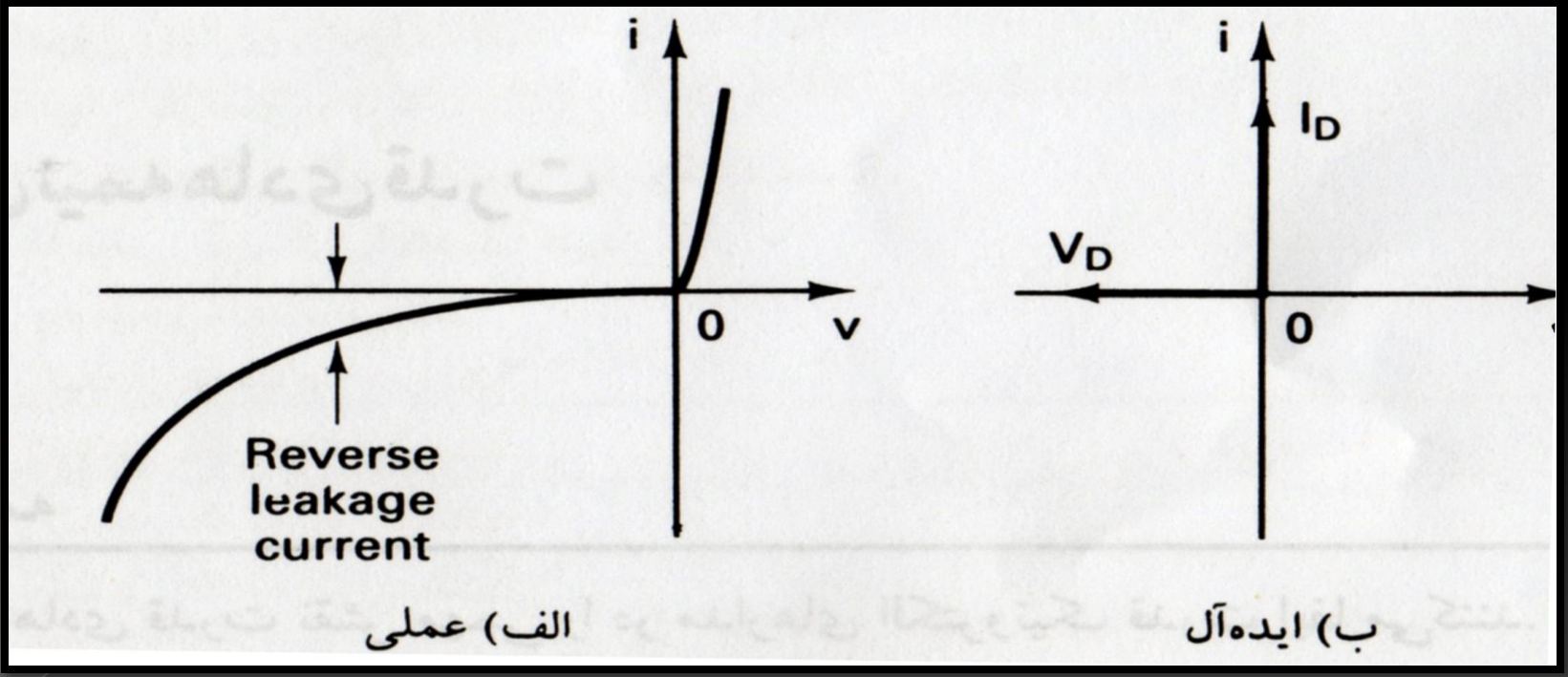
شکل زیر یک اتصال pn و علامت دیود را نشان میدهد:



الف) پیوند p-n

ب) نشانه دیود

شکل زیر مشخصه ولت آمپر یک دیود را نشان میدهد



نواحی کارکرد دیود

دیود در سه ناحیه زیر کار میکند

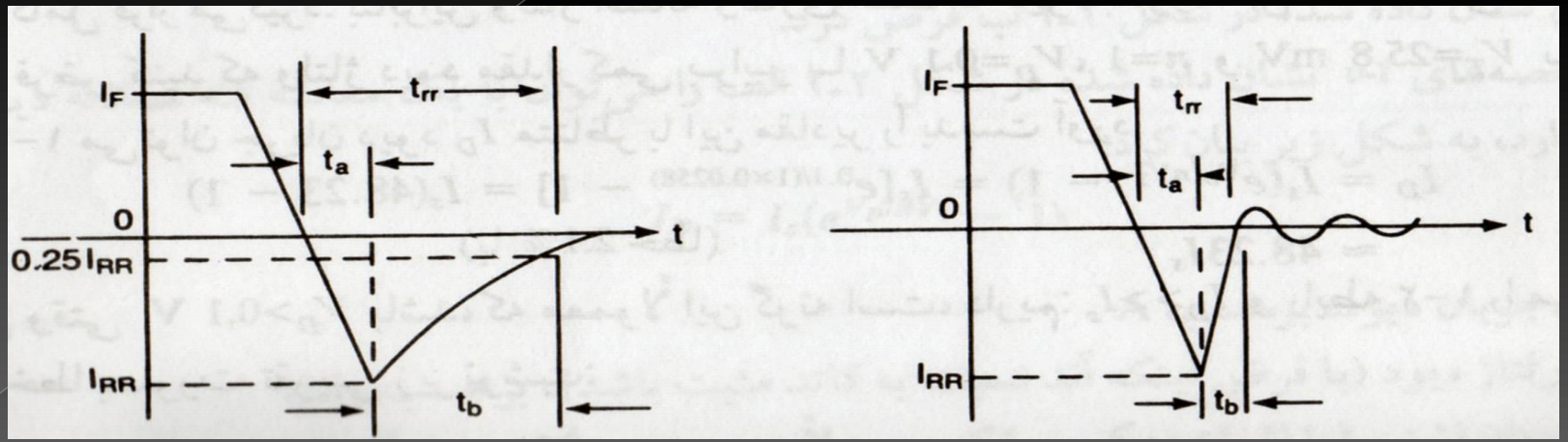
ناحیه بایاس مستقیم که $vd>0$

ناحیه بایاس معکوس که $vd<0$

ناحیه شکست که $vd<-V_{zk}$

مشخصه های بازیابی معکوس :

شکل زیر مشخصه های بازیابی معکوس دیود را در حالت نرم و نا گهانی نشان میدهد.



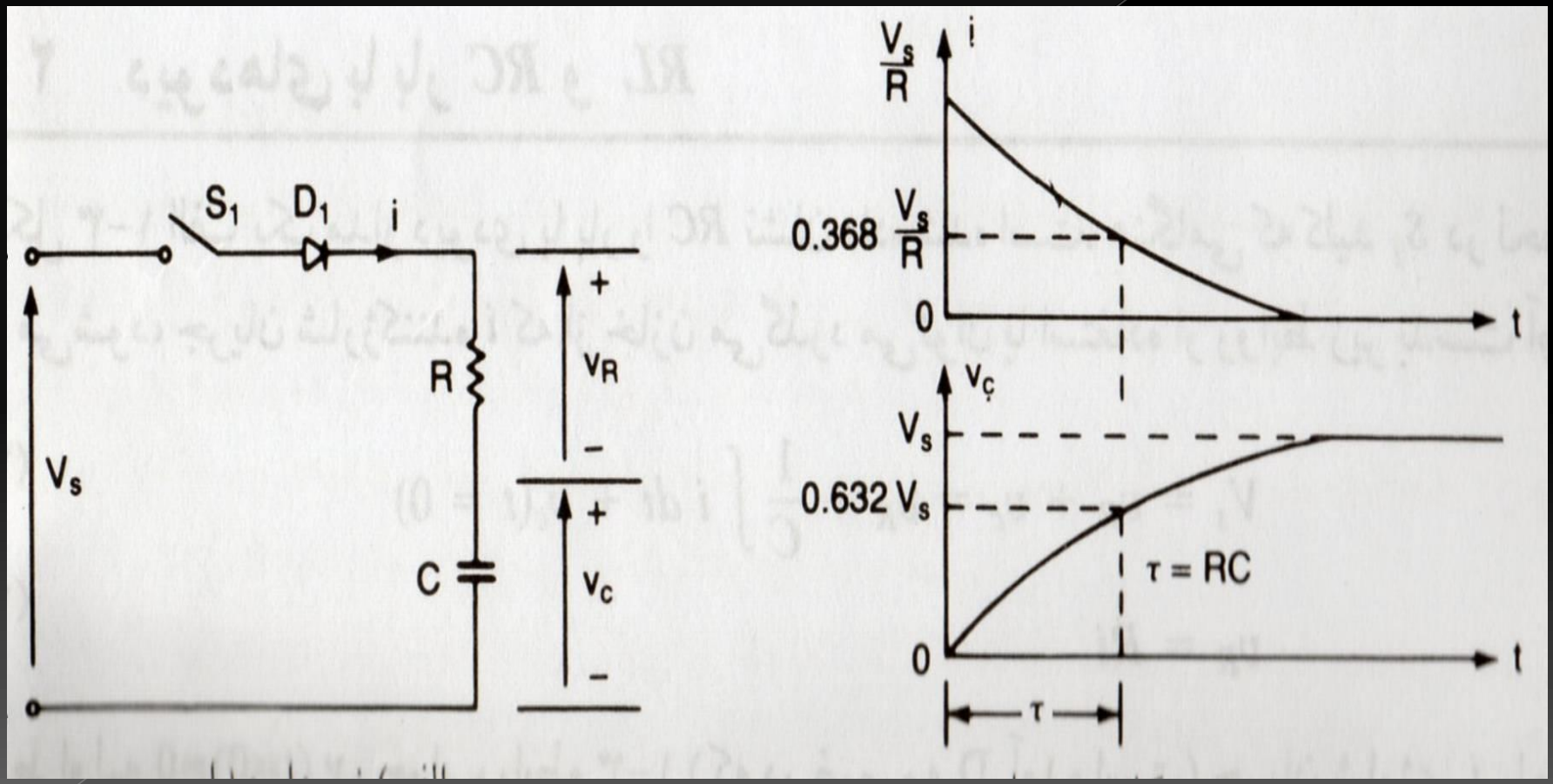
انواع دیودهای قدرت:

1- استاندارد یا همه منظوره
2- بازیابی سریع
3- شاتکی

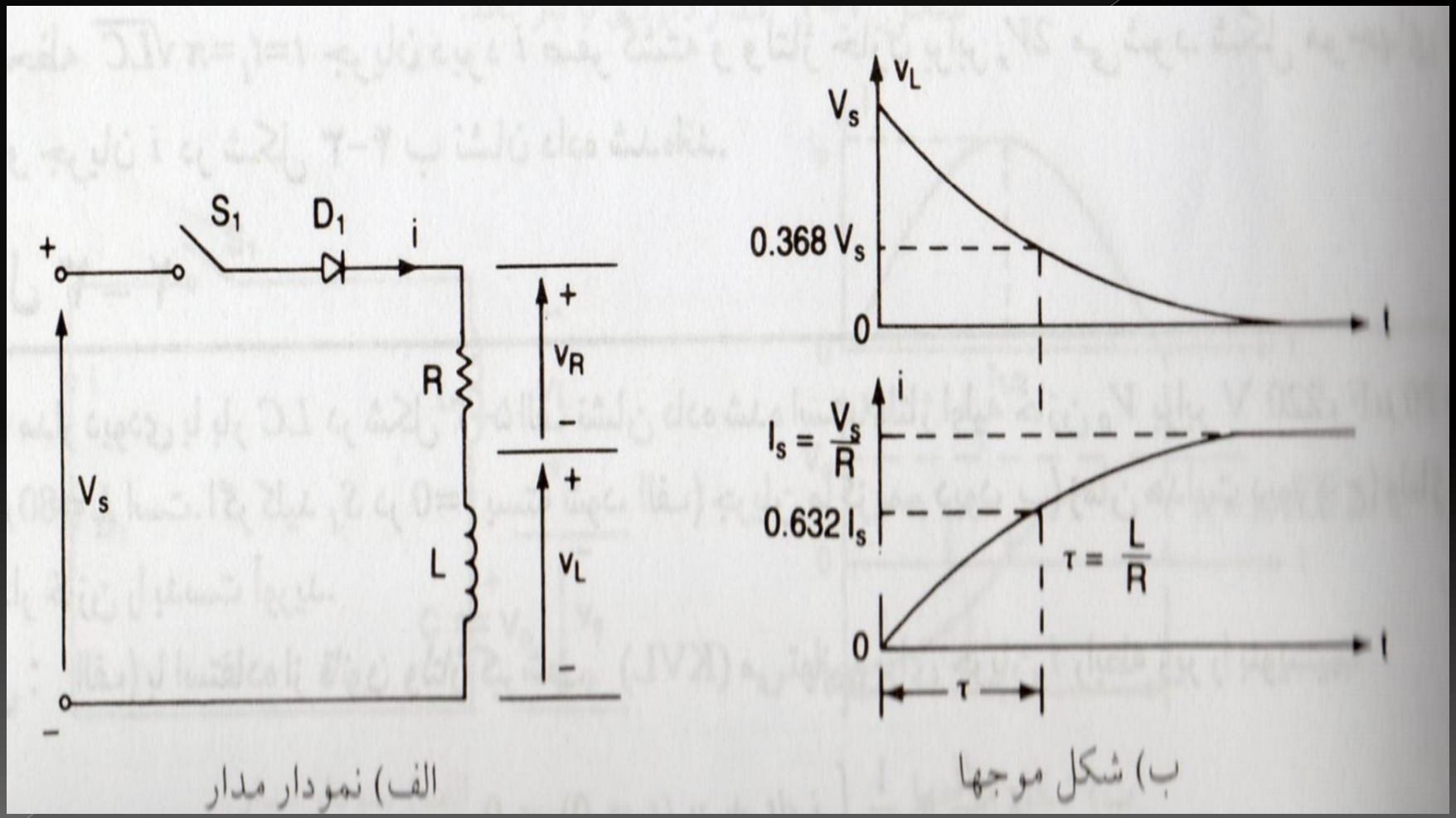
مدارهای دیودی و یکسوکننده

دیودهای نیمه رسانا کابردهای زیادی در مدارهای الکترونیکی و الکتریکی یافته اند. دیودها همچنین به طور گسترده ای در مدارهای الکترونیک قدرت به منظور تبدیل توان الکتریکی به کار گرفته میشوند.

شکل زیر یک مدار دیودی با بار RCرا نشان میدهد



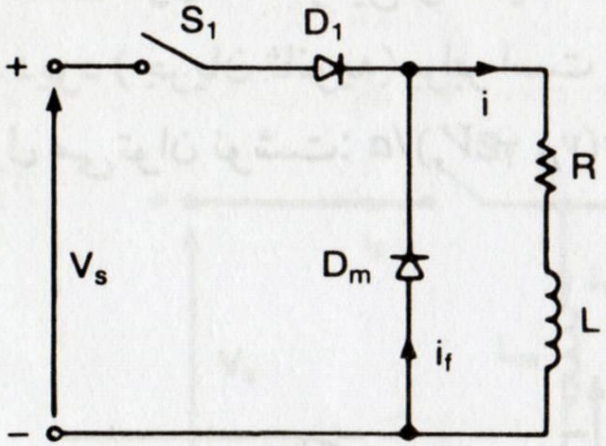
شکل زیر یک مدار دیودی با بار RLرا نشان میدهد



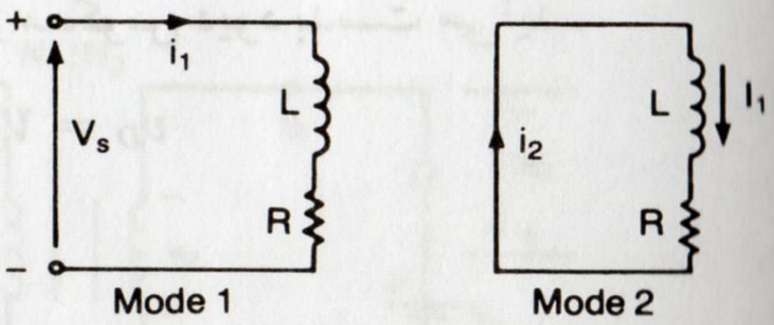
دیودهای هرزگرد

اگر در یک مدار دیودی با بار RL (مانند مدار شکل قبل) کلید برای مدت زمان مشخصی بسته باشد جریان از بار (سلف) میگذرد با باز شدن کلید باید مسیری برای جریان سلف فراهم گردد تا این جریان بازگشتی به مدار آسیبی وارد نکند که این عمل توسط دیود هرزگرد انجام میشود.

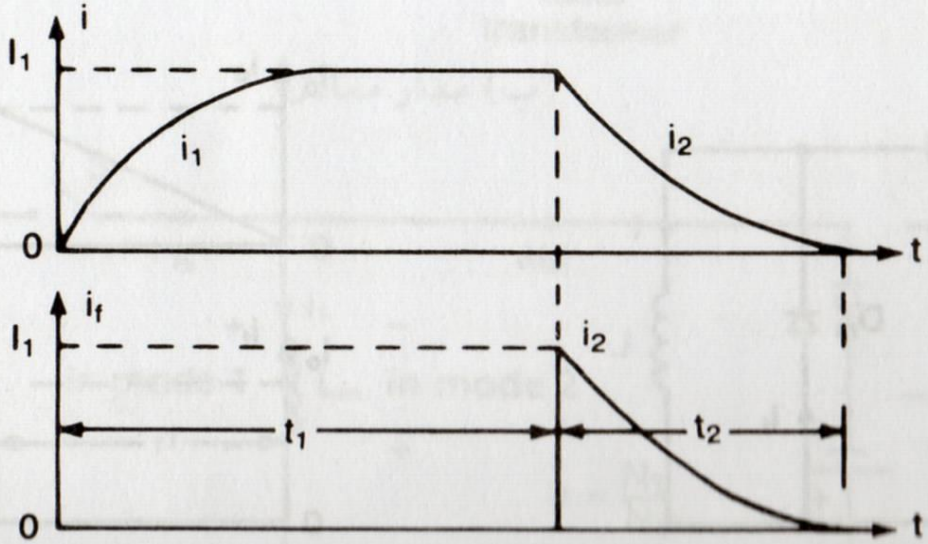
در شکل صفحه بعد، مدار با دیود هرزگرد به همراه شکل موجهای آن نشان داده شده است. (در مرحله اول کلید بسته و در مرحله دوم کلید باز است)



الف مدار

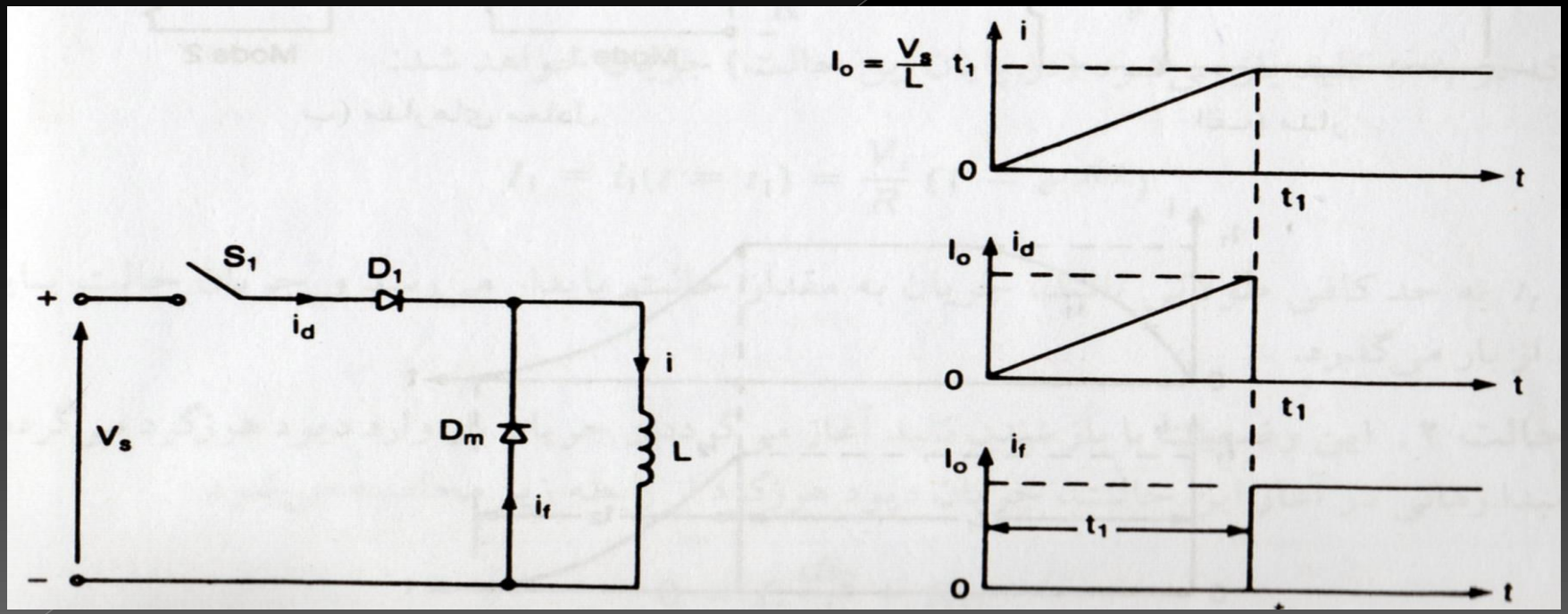


ب مدارهای معادل

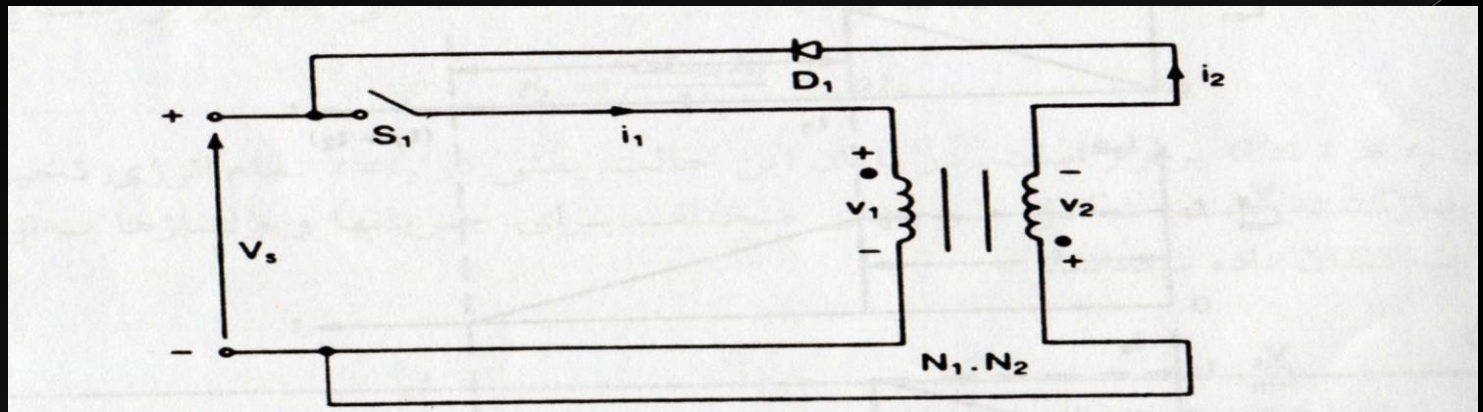


آزاد سازی انرژی ذخیره شده در سلف

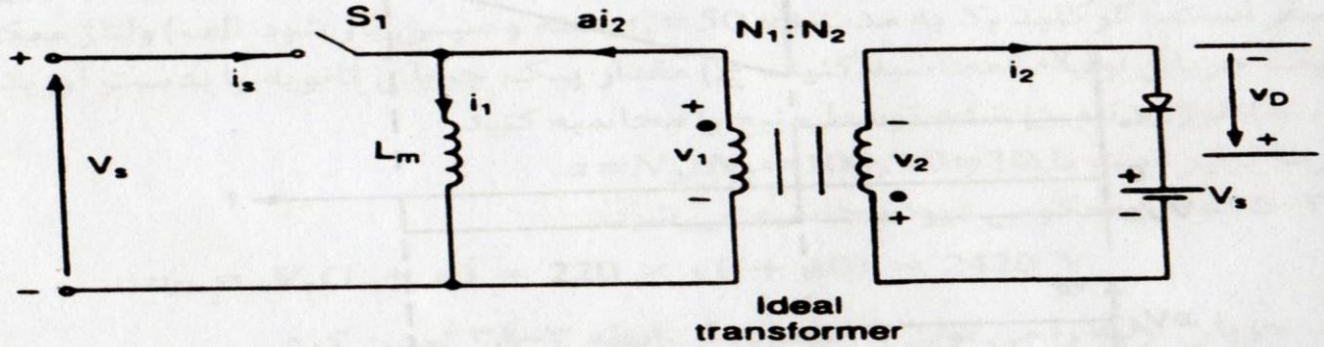
شکل زیر مدار ایده آل بدون تلفات با بار سلفی را نشان میدهد ،که در آن انرژی ذخیره شده در سلف به دلیل نبودن هیچگونه مقاومتی در مدار همانجا باقی میماند. دریک مدار عملی مطلوب است که بازده مدار با بازگرداندن انرژی ذخیره شده به منبع ولتاژ بهبود یابد که این کار توسط ثانویه یک ترانس که دارای تزویج معکوس با اولیه ترانس میباشد و یک دیود که ثانویه ترانس را بطور مستقیم به منبع متصل میکند انجام میگیرد.



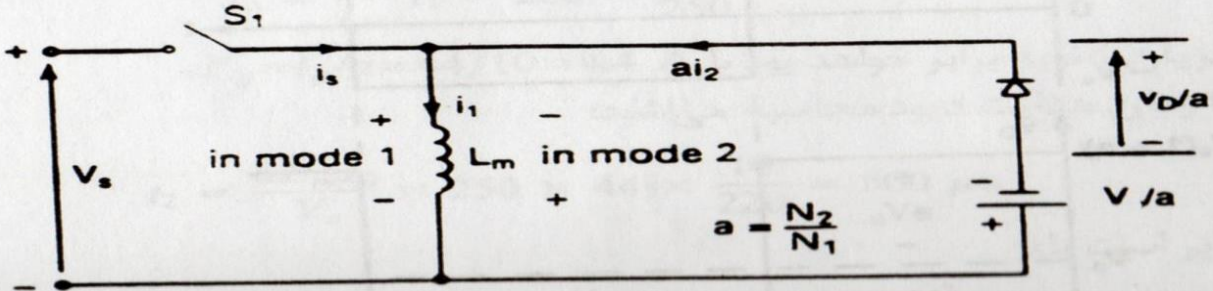
بدین منظور از مداری که در شکل زیر آمده است استفاده میکنیم:



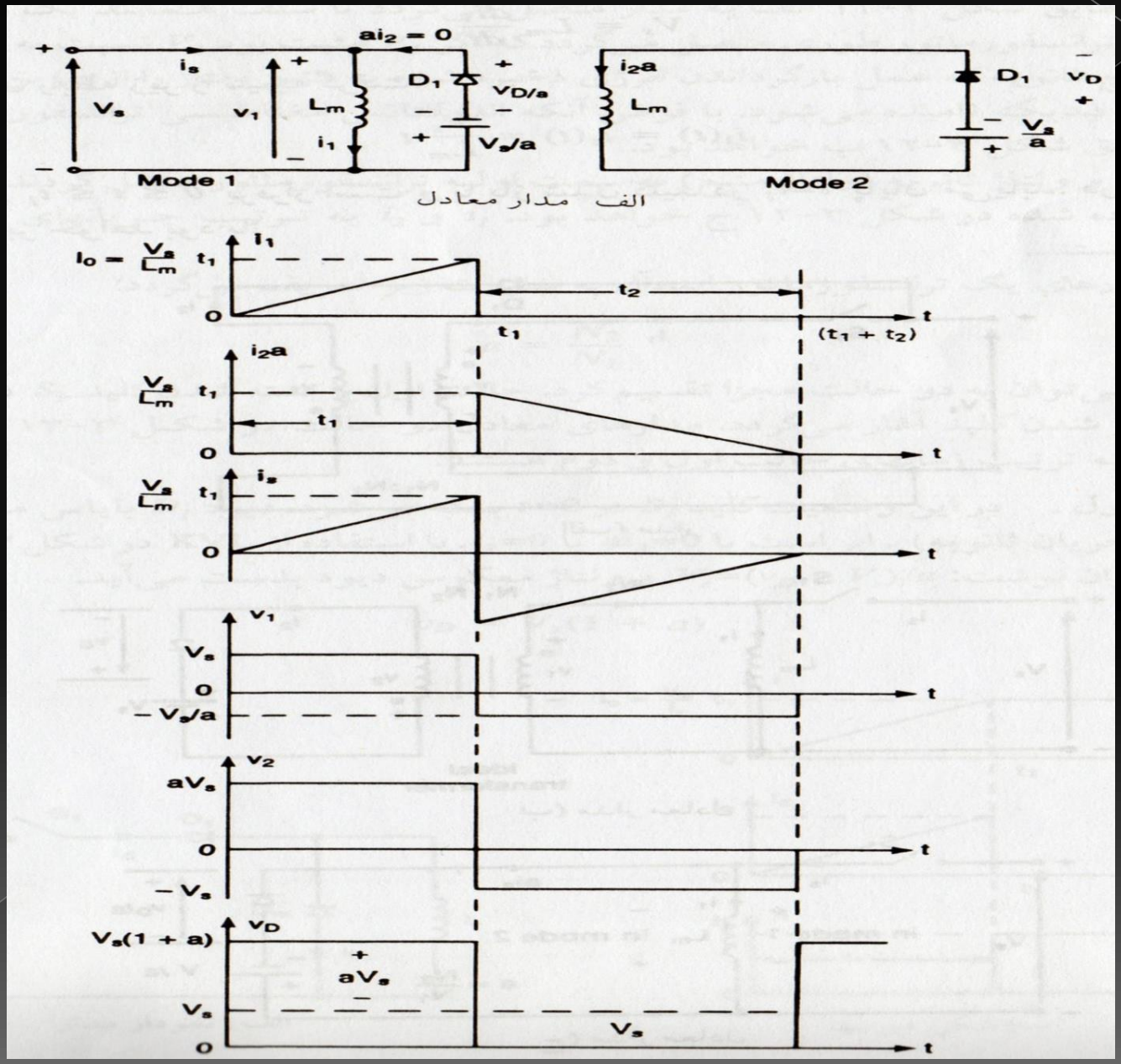
الف) مدار



ب) مدار معادل



مدار معادل دو مرحله(مرحله یک کلید بسته و مرحله دو کلید باز) و شکل موجهای مربوط :

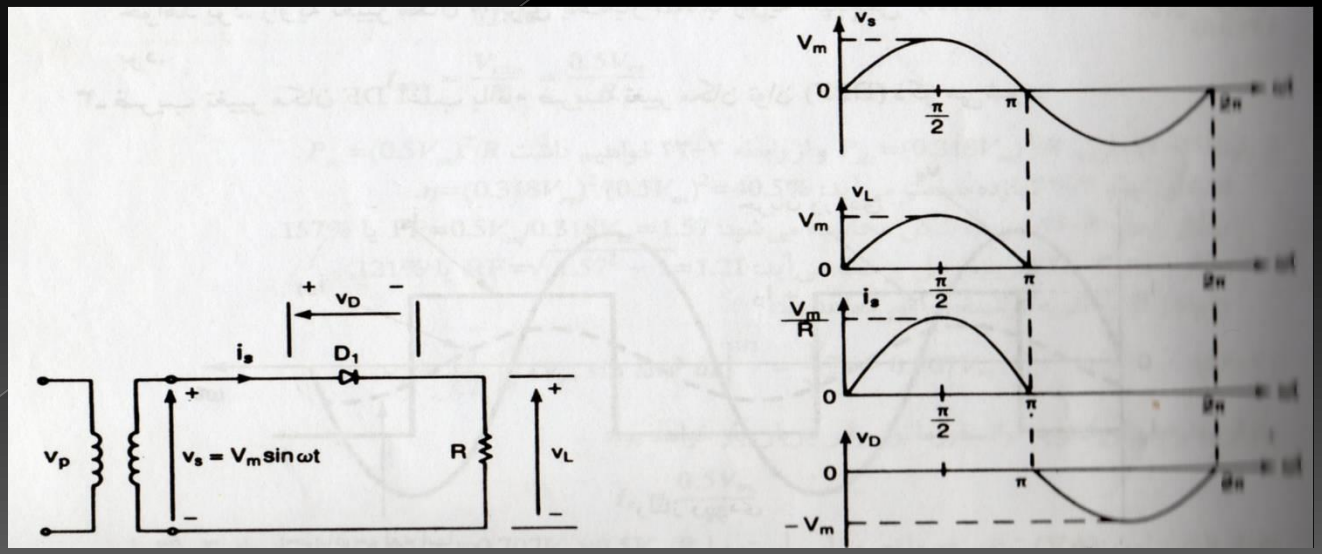


یکسوساز تکفاز نیم موج

یکسو کننده مداری است که عمل تبدیل سیگنال متناوب را به سیگنال یکسویه انجام میدهد.

ساده ترین نوع یکسوسازها، نیم موج تکفاز است، که شکل مداری آن را در زیر میبینیم.

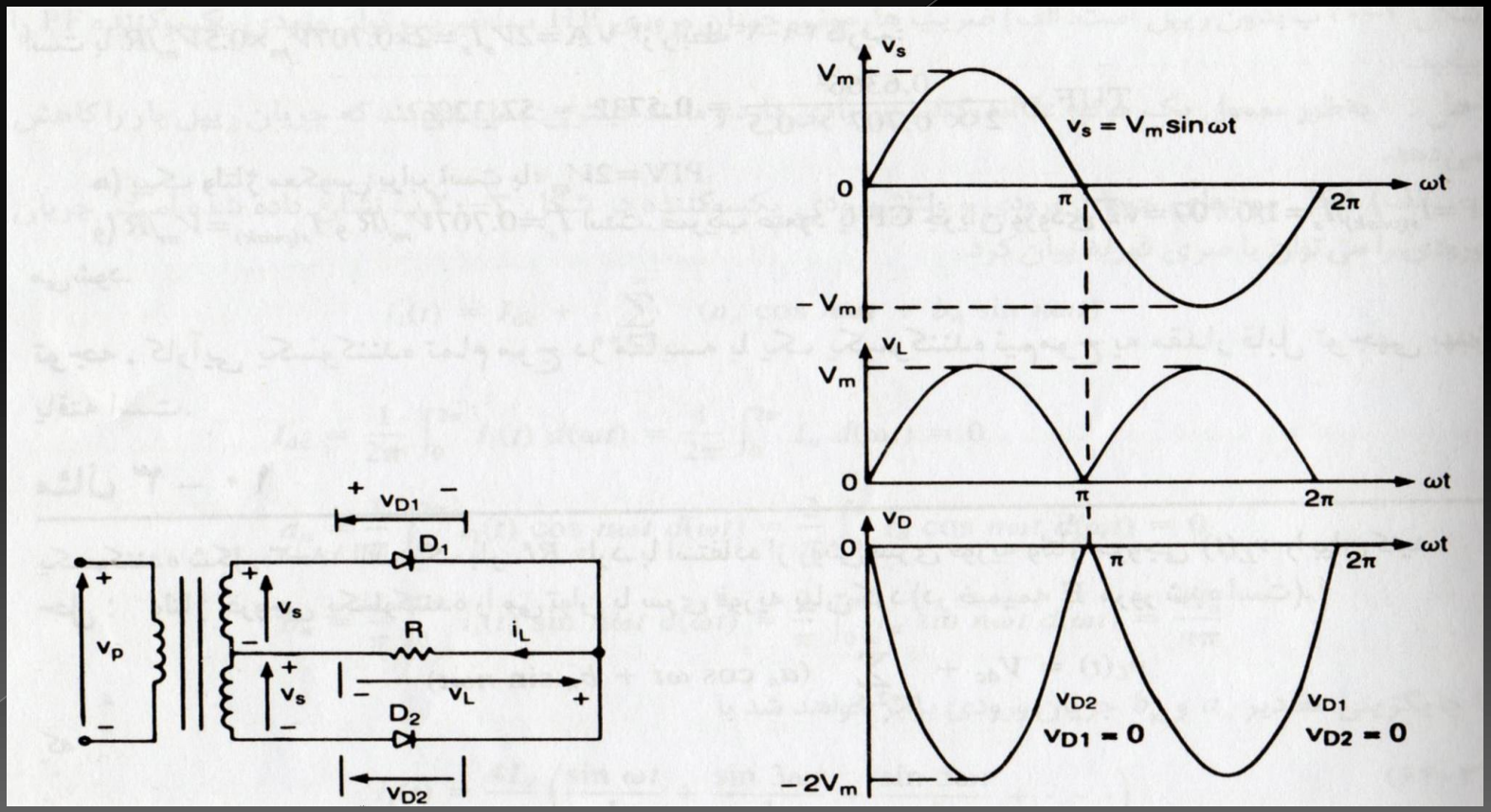
در نیم سیکل مثبت دیود هدایت کرده و ورودی عینا در خروجی ظاهر میشود و در نیم سیکل منفی دیود قطع شده و به عنوان مانعی درمقابل سیگنال ورودی عمل میکند.



یکسوساز تمام موج با ترانس سر وسط

در زیر شکل یک یکسوساز تمام موجب با ترانس سر وسط دار نشان داده شده است .

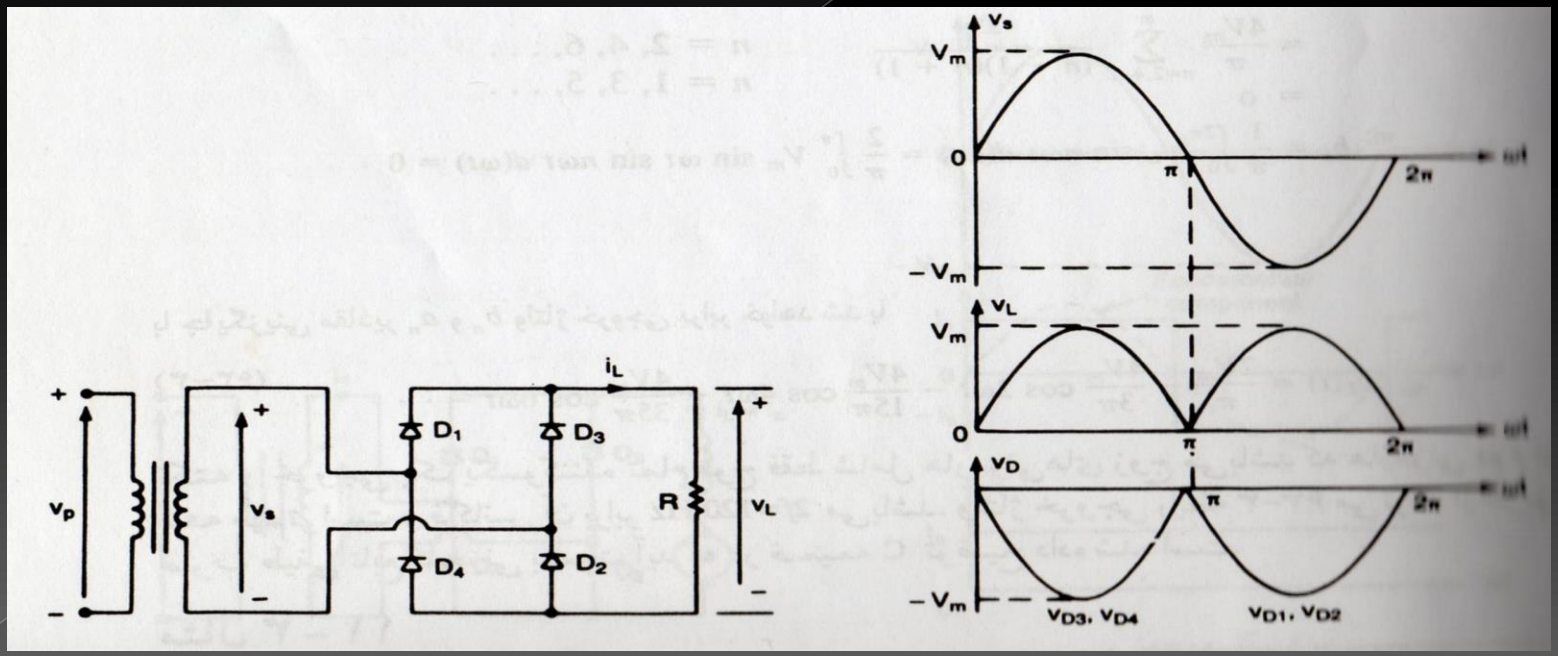
در این مدار هر نیمه به همراه دیودش مشابه یک یکسوکننده نیم موج عمل میکند .



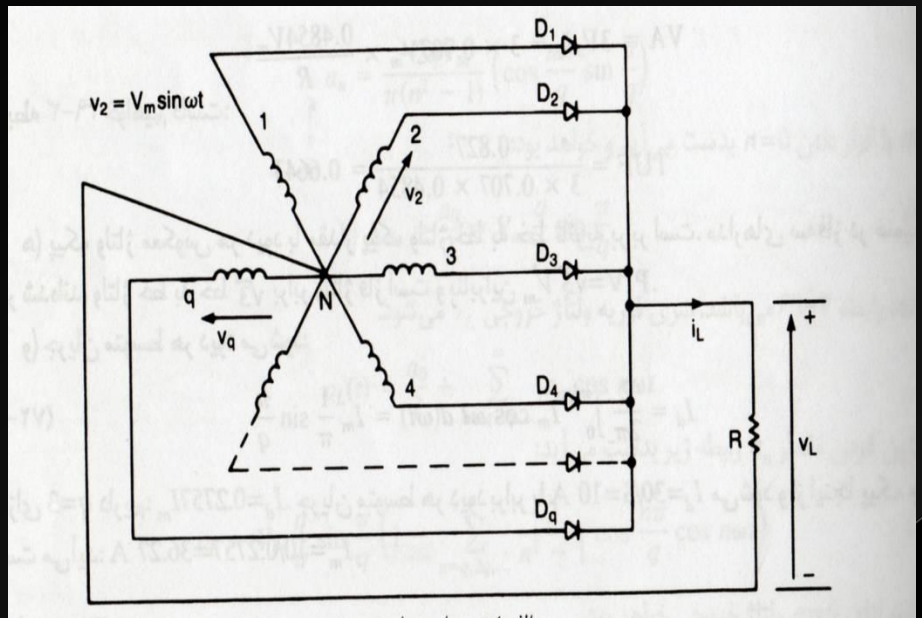
یکسوکننده پل تمام موج

به جای استفاده از یک ترانس سروسط دار میتوان از چهار دیود مطابق شکل زیر استفاده کرد.

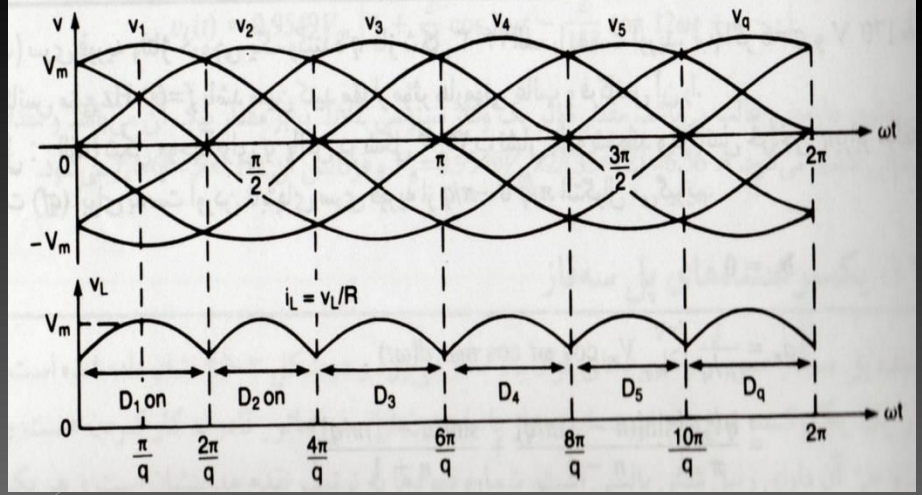
این مدار نسبت به یکسوکننده با ترانس سر وسط دارای Tuf بیشتری میباشد.



یکسوساز چند فاز ستاره



الف) نمودار مدار



شکل روبرو یک یکسوساز چند فاز را با بار مقاومتی نشان میدهد.

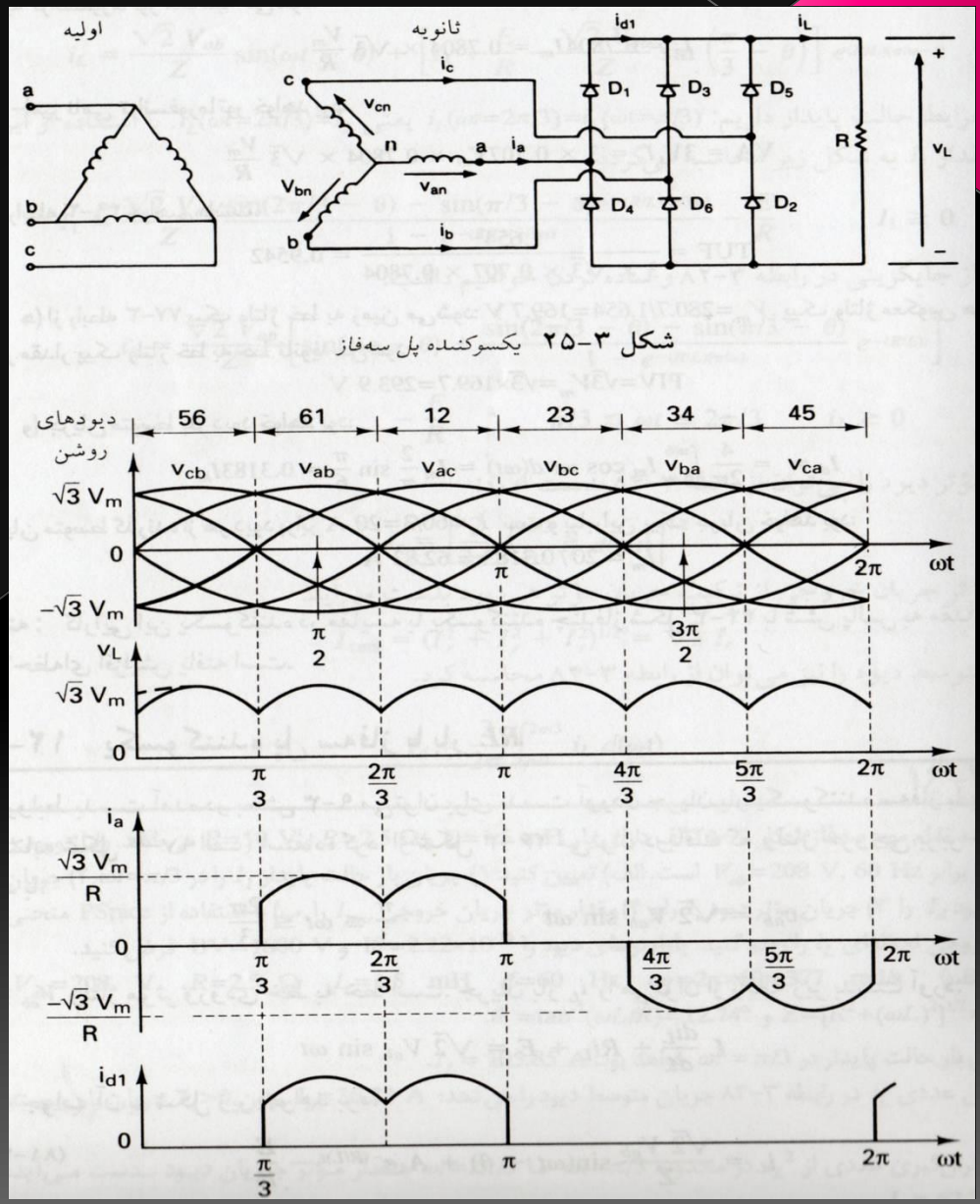
برای بدست آوردن توان خروجی بیشتر از یکسوکننده ها ی سه یا چند فازه استفاده میکنند.

یکسو کننده پل سه فاز

این یکسوساز در کاردبردهای توان بالا بکار میرود.

این مدار با یا بدون ترانسفورماتور قادر به کار کردن است و خروجی آن دارای ریپل شش پالسی است که هر دیود برای 120 درجه هدایت میکند.

پارامترهای این یکسوساز دارای بهتـرین مقادیر میباشد.



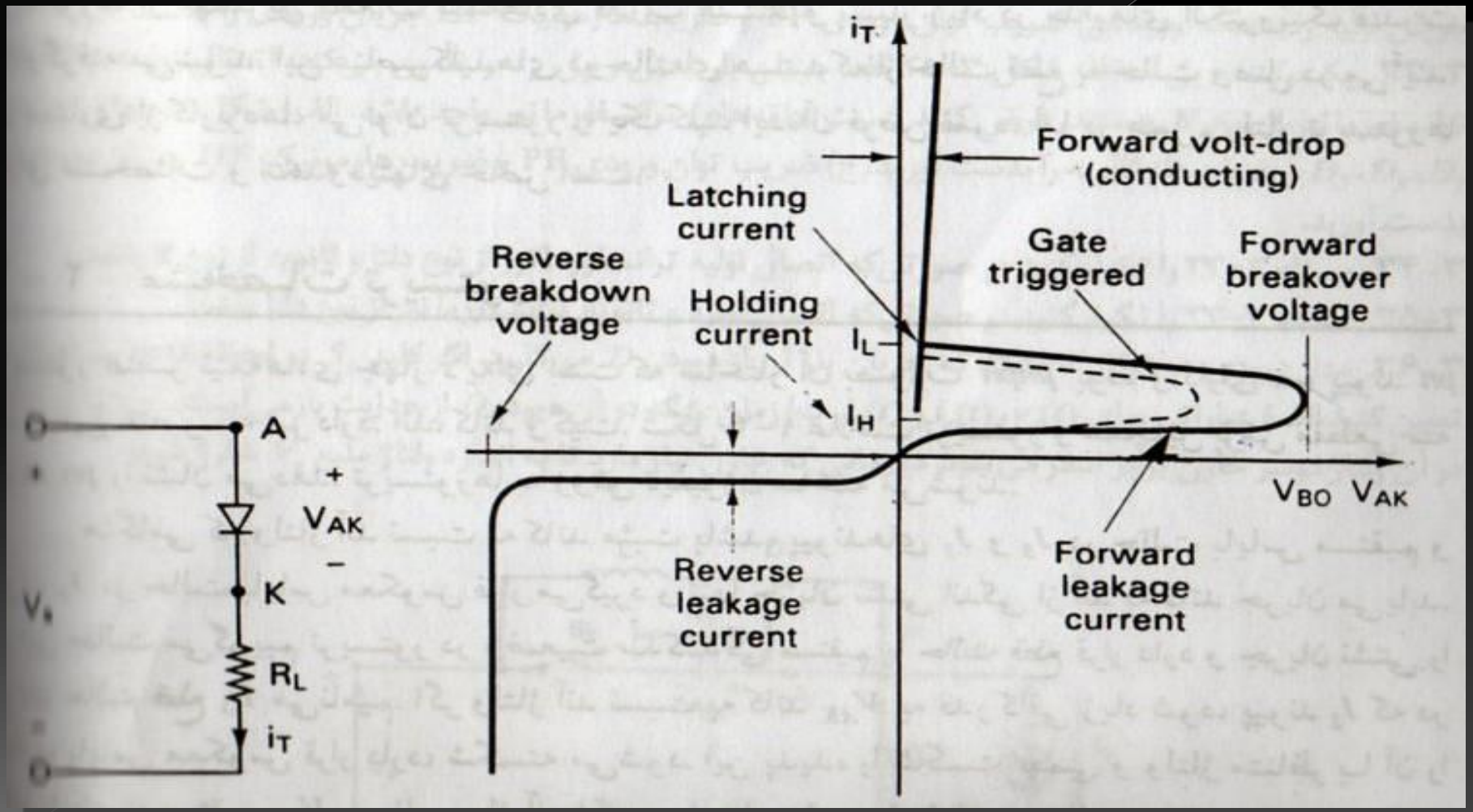
تریستور

تریستورها از مهمترین قطعات نیمه هادی قـدرت هسـتند و بسـیار زیـاد در مدارهای الکترونیک قدرت بکار گرفته میشوند.

این عناصر کلید های دو حالته ای هستند که از حالت قطع به وصـل در مـی آیند .

هنگامی که ولتاژ آند نسبت به کاتد مثبت تر باشد وگیت تریگ شود تریستور در بایاس مستقیم قرار گرفته و هدایت میکند. هدایت کردن ایـن قطعـه بـه وسیله جریان تریگ گیت کنترل میشود.

در زیر یک مدار تریستور و مشخصه
ولت آمپر آن نشان داده شده است



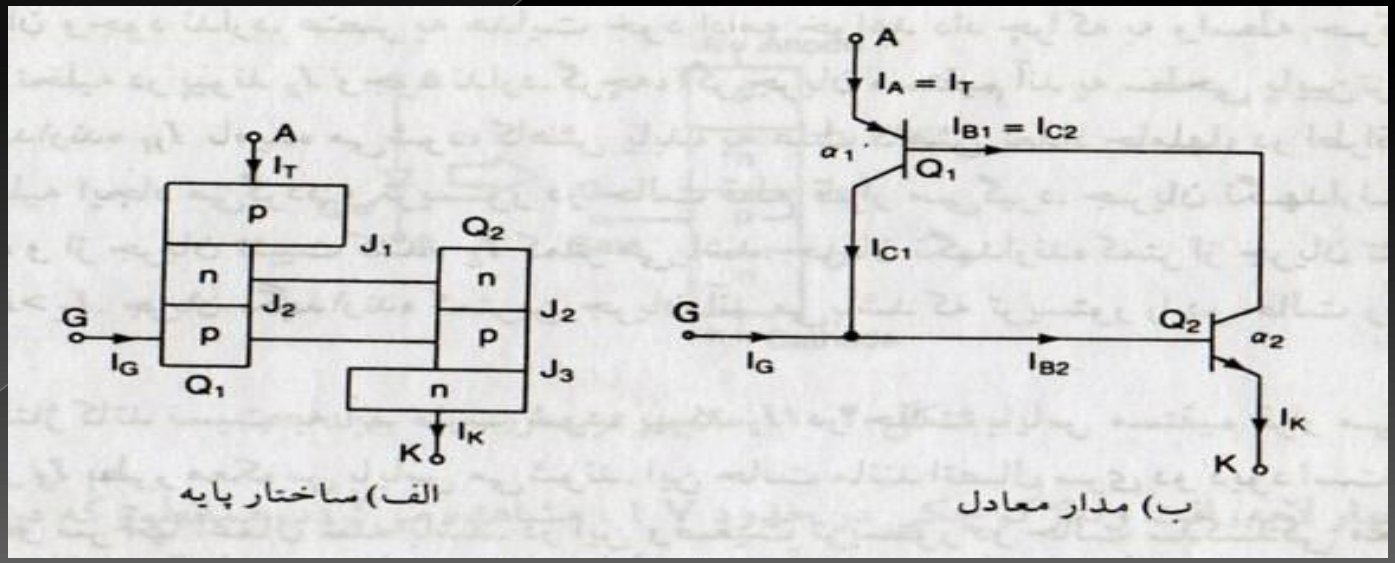
مدل دوتراتزیستوری تریستور

عمل تثبیت کنندگی به واسطه فیدبک مثبت را میتوان با مدل دوترانزیستوری تریستور توجیه کرد.

هر تریستور را میتوان بصورت دو ترانزیستور مکمل(یک ترانزیستور pnp و یک npn) در نظر گرفت.

رابطه بدست آوردن IA:

$$I_A=\alpha_2 I_G+I_{CBO1}+I_{CBO2}/1-(\alpha_1+\alpha_2)$$



روشهای روشن کردن تریستور

گرما:
اگر دمای تریستور بالا رود تعداد زوجهای حفره- الکترون افزایش یافته در نتیجه جریان نشتی افزایش پیدا کرده و امکان دارد تریستور روشن شود که این روش باعث ناپایداری حرارتی شده وباید از آن اجتناب شود.

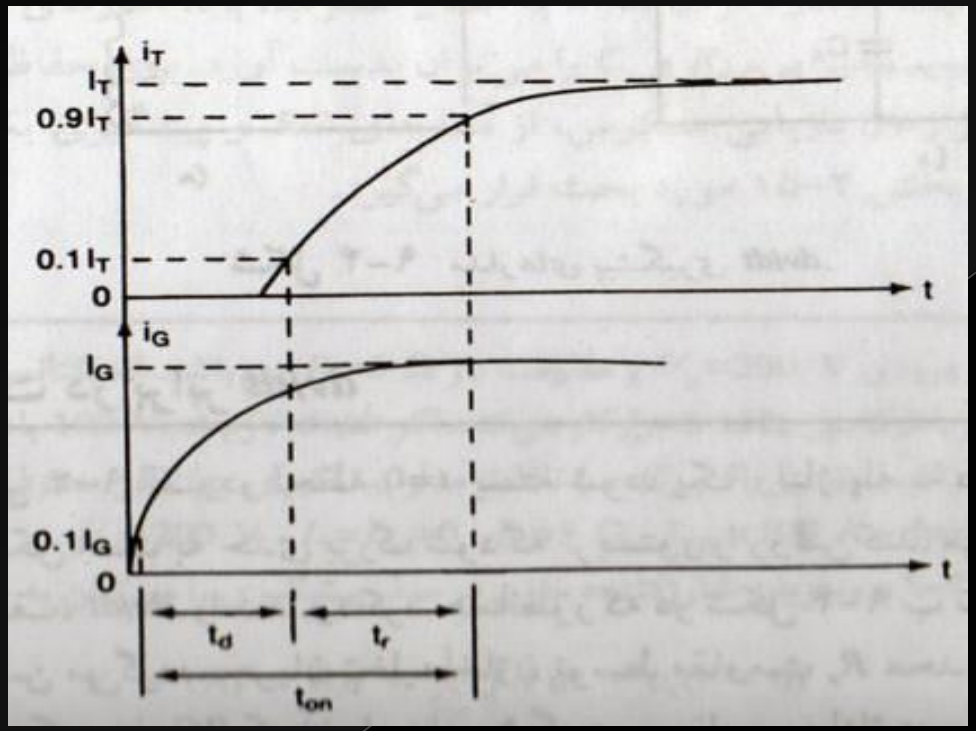
نور:
اگر پیوندهای یک تریستور در معرض تابش نور قرار بگیرند، تعداد زوجهای حفره-الکترون افزایش یافته و ممکن است تریستور روشن شود.

ولتاژ زیاد:
اگر ولتاژ آند به کاتد بیشتر از ولتاژ شکست مستقیم باشد تریستور روشن خواهد شد. این روش زیانبار است و باید از آن اجتناب کنیم.

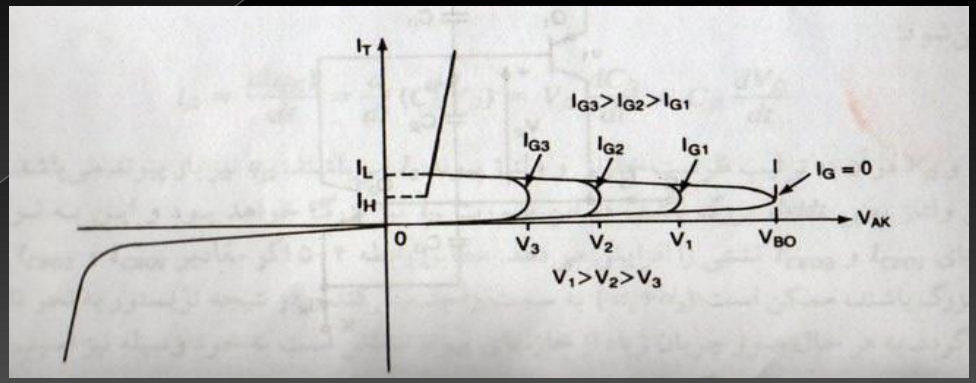
dv / dt:
اگر نرخ افزایش ولتاژ آند به کاتد زیاد باشد، ممکن است شارژ پیوندهای خازنی به اندازه کافی بزرگ شده و منجر به روشن شدن تریستور شود.

جریان گیت:
اگر تریستور در حالت بایاس مستقیم قرار داشته باشد، تزریق جریان به گیت مجر به روشن شدن تریستور خواهد شد.

روشهای خاموش کردن تریستور(کموتاسیون) درفصل هفتم بررسی خواهد شد.



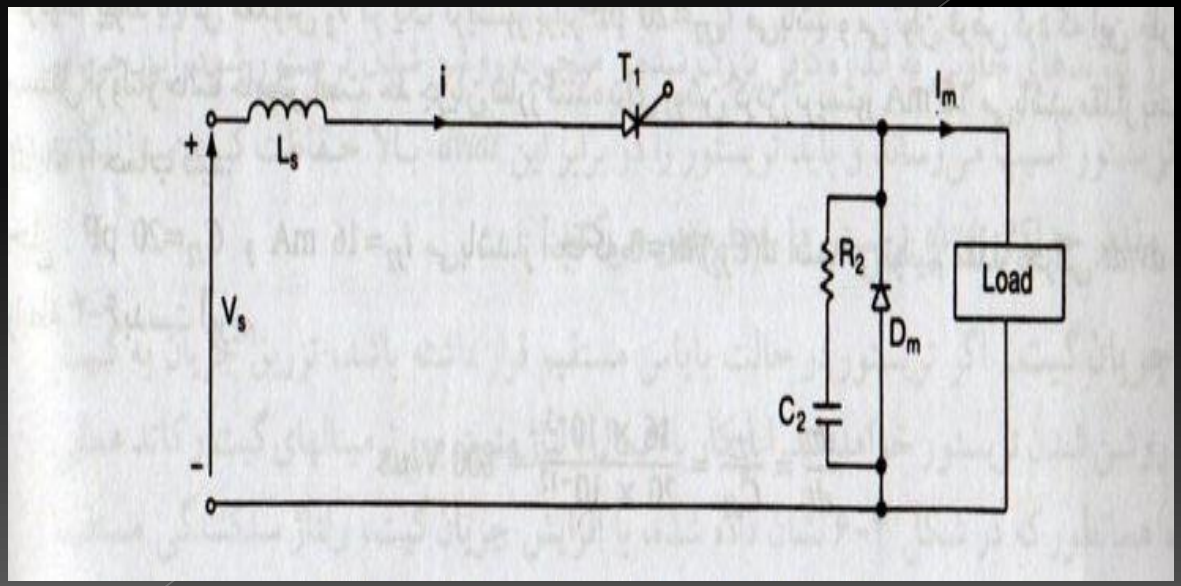
شکل موج جریان آند پس از اعمال سیگنال به گیت(مشخصه های روشن شدن)



با افزایش جریان گیت، ولتاژ سد کنندگی مستقیم کاهش پیدا میکند. (اثر جریان گیت بر ولتاژ سد کنندگی)

حفاظت در برابر di/dt

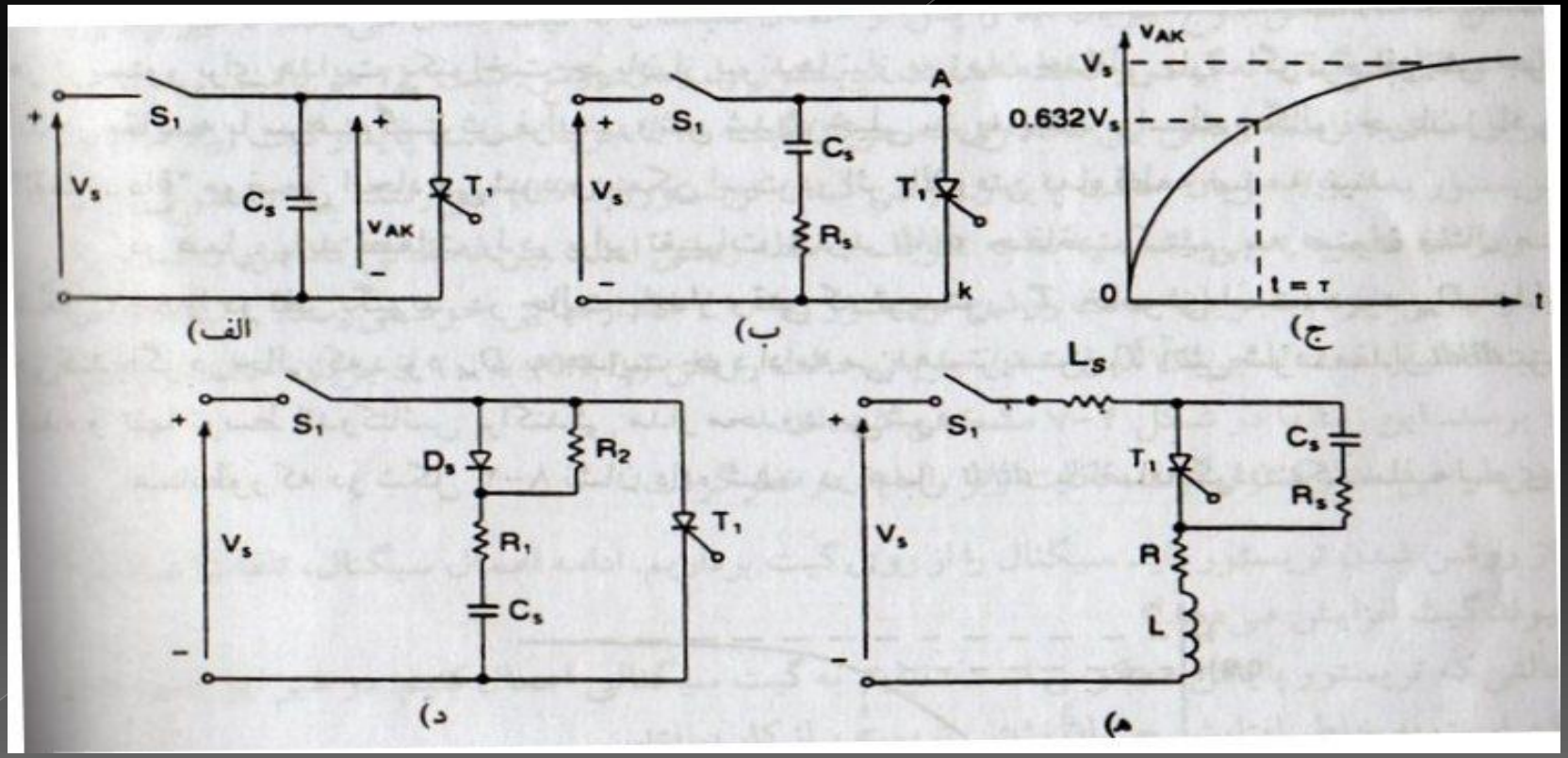
هر تریستور برای هدایت یکنواخت جریان از پیوندها نیاز به زمان حداقلی دارد.اگر نرخ افزایش جریان آند در مقایسه با سرعت گسترش فرآیند روشن شدن،خیلی سریع باشد بواسطه چگالی جریان زیاد یک نقطه داغ موضعی ایجاد میشود و ممکن است در اثر بالا رفتن دما قطعه آسیب ببیند.
در عمل باید قطعات را در برابر تغییرات شدید di/dt محافظت کنیم .



شکل روبرو مدار چاپر با سلف محدود کننده di/dt است:

حفاظت در برابر dv/dt

اگر کلید 1 در شکل زیر در لحظه صفر بسته شود ،یک ولتاژ پله به دو سر تریستور اعمال میگردد و dv/dt ممکن است به حدی بزرگ شود که تریستور را روشن کند. میتوان با استفاده از خازن مطابق شکل زیر آنرا محدود کرد:



انواع تریستورها

1-تریستورهای کنترل فاز (scr)

2- کلیدزنی سریع (scr)

3-خاموش شونده با گیت(gto)

4-سه قطبی دوجهته (triac)

5-هدایت معکوس(rct)

6-القا استاتیک(sith)

7کنترل شده سیلیکونی فعال شونده با نور (lascr)

8-کنترل شده از نوع fet (fet-cth)

9-کنترل شده از نوع mos (mct)

یکسوکننده های کنترل شده

برای رسیدن به یک ولتاژ قابل تنظیم در خروجی یکسوسازها ،از تریستورهای کنترل فاز بجای دیود استفاده میکنیم.

ولتاژ خروجی یکسوکننده های تریستوری با کنترل زاویه آتش تریستور تغییر داده میشود.یکسو کننده های کنترل فاز ساده و ارزان هستند و راندمان آنها عموما بالای 95% است.

این یکسو کننده ها بطور وسیعی در کاربردهای صنعتی بخصوص در موتورهای دور متغییر با توان در حد کسری از اسب بخار تا حد مگا وات بکار میروند.

مبدلهای کنترل فاز بسته به نوع ورودی به مبدلهای تک فاز و سه فاز تقسیم میشوند که هر کدام را میتوان به سه دسته زیر تقسیم کرد :

1-مبدل نیمه

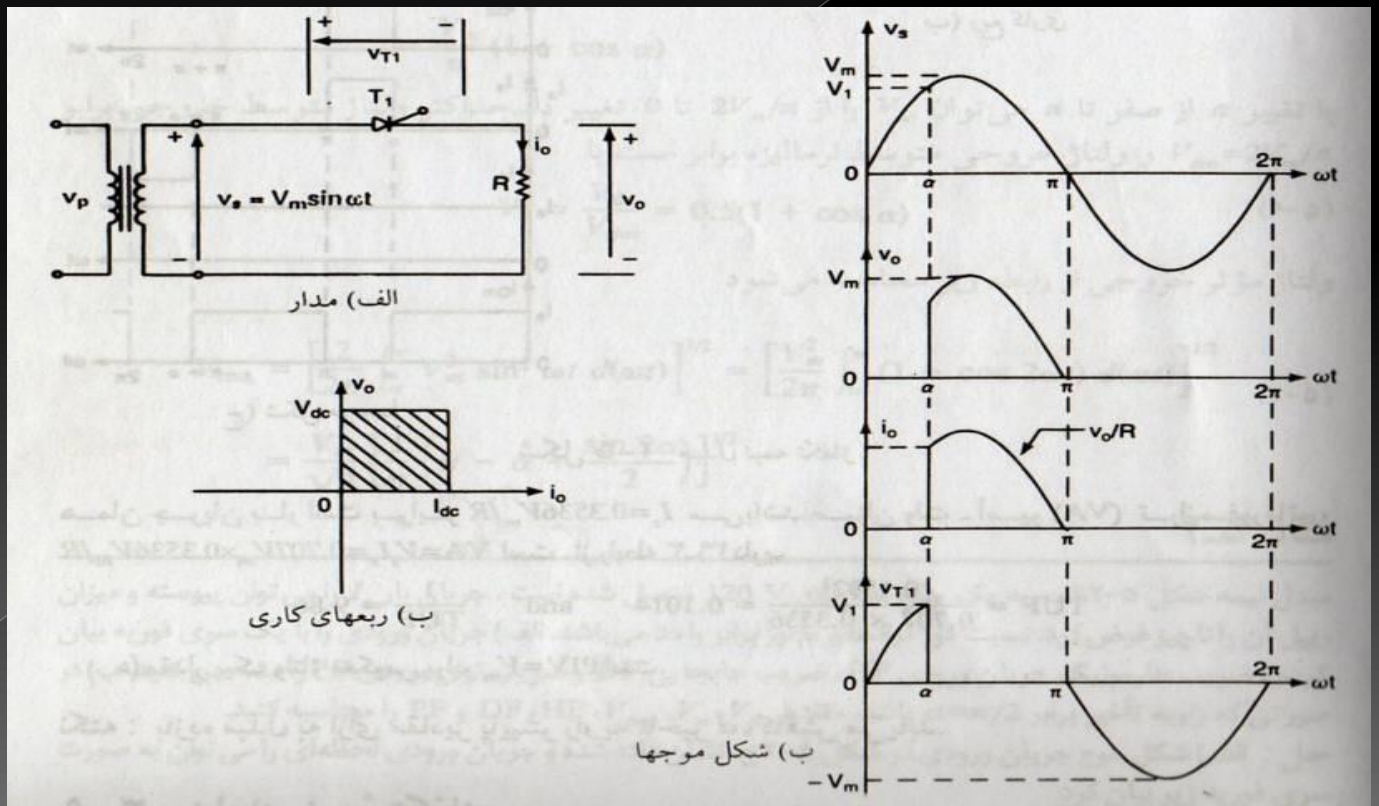
2-مبدل کامل

3-مبدل دوتایی

یکسوساز نیم موج کنترل شده

در نیم سیکل مثبت ورودی تریستور در بایاس مستقیم قرار میگیرد وقتی در زاویه α تریستور آتش میشود شروع به هدایت کرده و ورودی در دوسر بار ظاهر میشود و وقتی که ولتاژ ورودی شروع به منفی شدن میکند، گفته میشود تریستور بایاس معکوس شده و خاموش میشود.

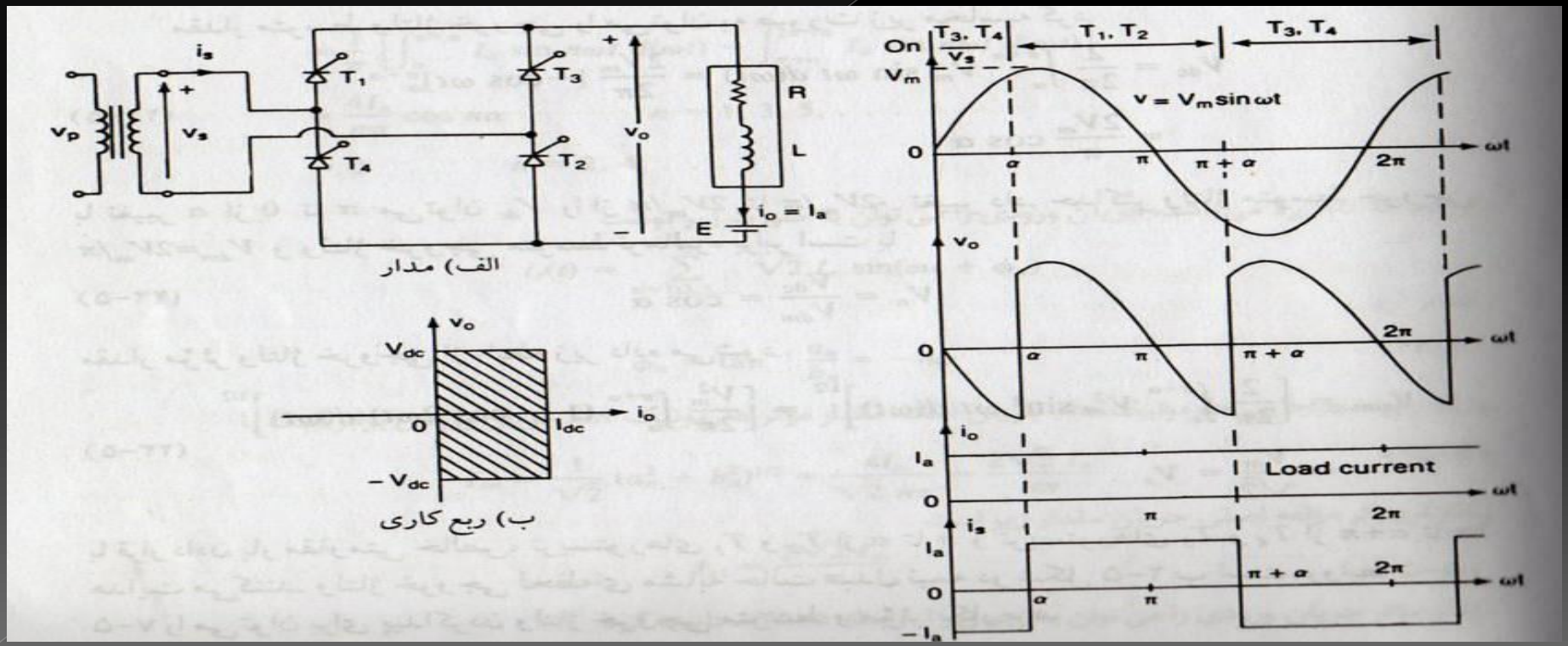
زاویه آتش: از زمانی که ولتاژ وروردی شروع به مثبت شدن میکند تا لحظه آتش شدن تریستور



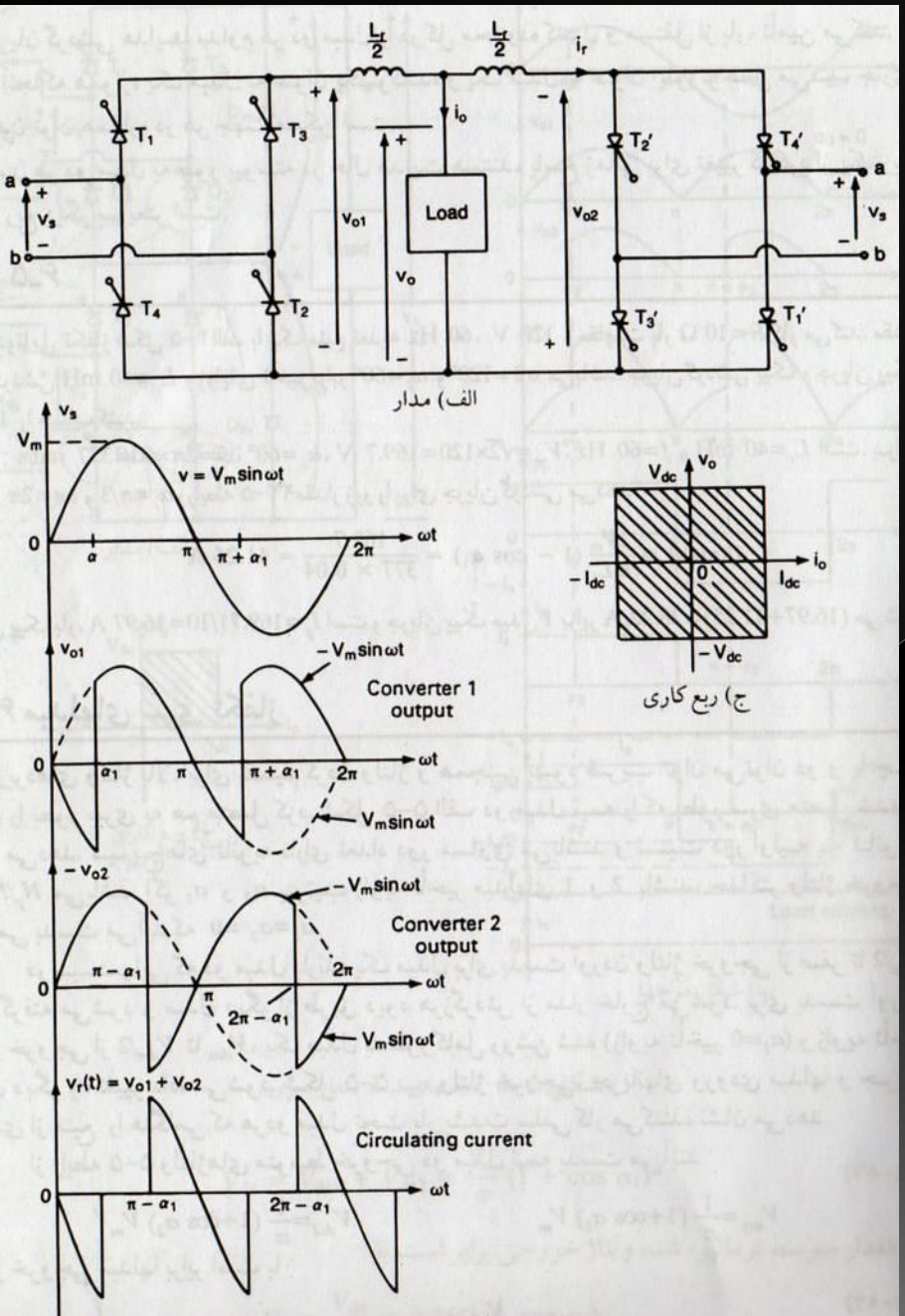
مبدل کامل با بار به شدت سلفی

در زیر مدار یک مبدل کامل تکفاز با بار بشدت سلفی بنحوی که جریان بار پیوسته و بدون ریپل باشد نشان داده شده است:

در بازه زمانی α_α+Π تریستور هدایت میکند و ولتاژ ورودی در خروجی ظاهر میشود.این یکسو ساز در دو ربع کاری مطابق شکل عمل میکند.



مبدل دوتایی تکفاز



دیدیم که مبدلهای کامل تکفاز با بار سلفی تنها اجازه کار در دو ربع کاری را دارند اگر دو تا از این مبدلها را پشت به پشت به هم متصل کنیم ولتاژخروجی و جهت جریان بار را میتوان معکوس کرد . این سیستم کارکرد در چهار ربع را امکان پذیر میکند و مبدل دوتایی نامیده میشود.مبدل های دوتایی عموما در موتورهای دور متغییر با توان بالا بکار میروند. زوایای آتش به نحوی کنترل میشوند که یک مدار در نقش یکسوساز و دیگری در نقش اینورتر کار کند.

کنترل کننده های ولتاژ متناوب

اگر یک کلید تریستوری بین منبع متناوب و بار وصل شود میتوان باتغییر مقدار موثر ولتاژ متناوب اعمال شده به بار، انتقال توان را کنترل نمود. چنین مدار قدرتی با نام کنترل کننده ولتاژ متناوب شناخته میشود.

برای انتقال توان اغلب از دو نوع کنترل استفاده میشود:

1- کنترل قطع و وصل

2- کنترل زاویه فاز

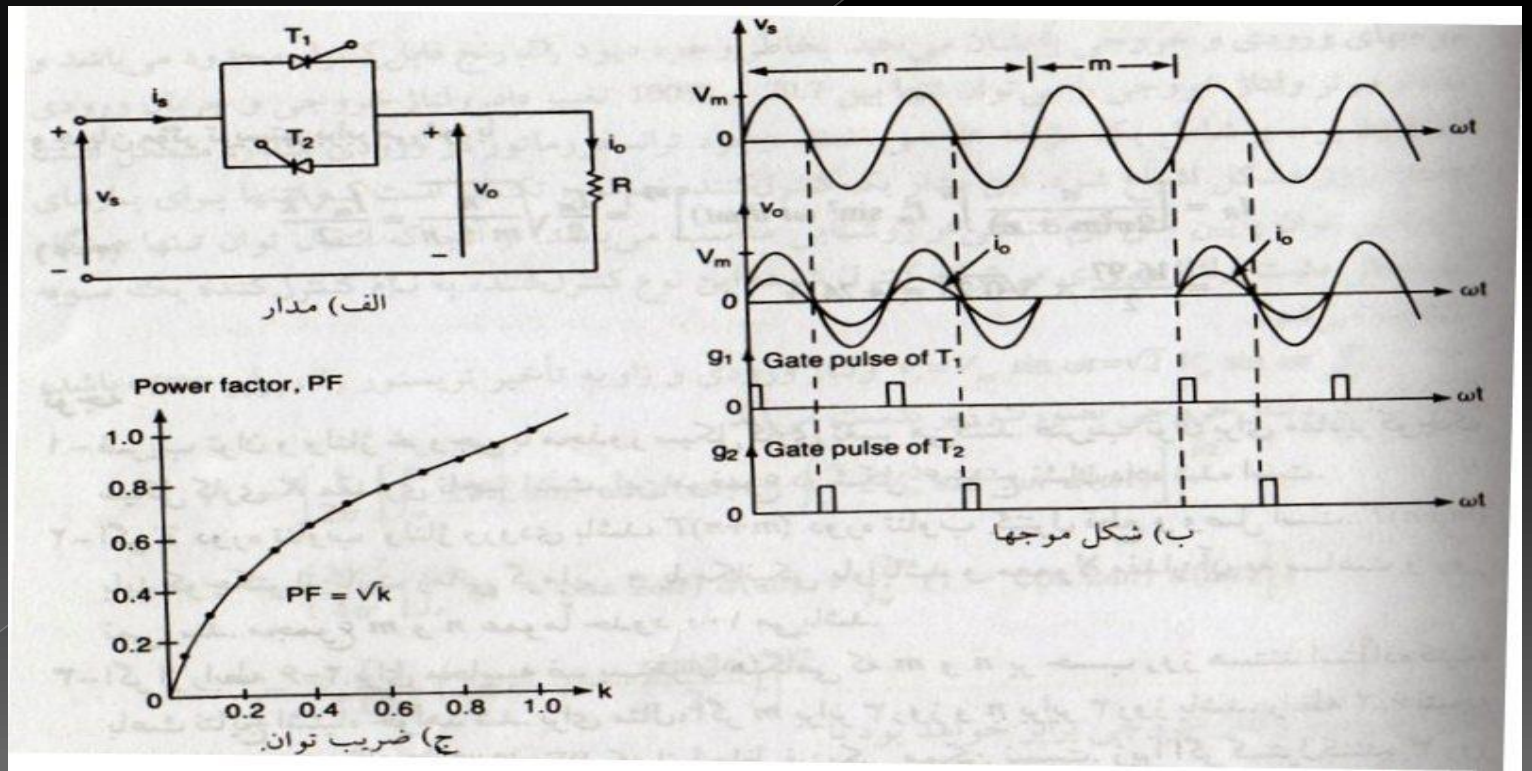
در کنترل قطع ووصل کلیدها(تریستور) بار را برای چند سیکل به منبع متناوب وصل میکنند سپس برای چند سیکل آن را قطع میکنند. در کنترل فاز کلیدهای تریستوری بار را در قسمتی از هر سیکل ولتاژ ورودی به منبع متناوب متصل میکنند.

اساس کنترل قطع و وصل

اساس کنترل قطع و وصل را میتوان با یک کنترل کننده تمام موج تک فاز مطابق شکل زیر توضیح داد. کلید تریستوری منبع متناوب را برای زمان t_n به بار متصل میکند. کلید توسط یک پالس گیت متوقف کننده در لحظه t_0 قطع میشود.

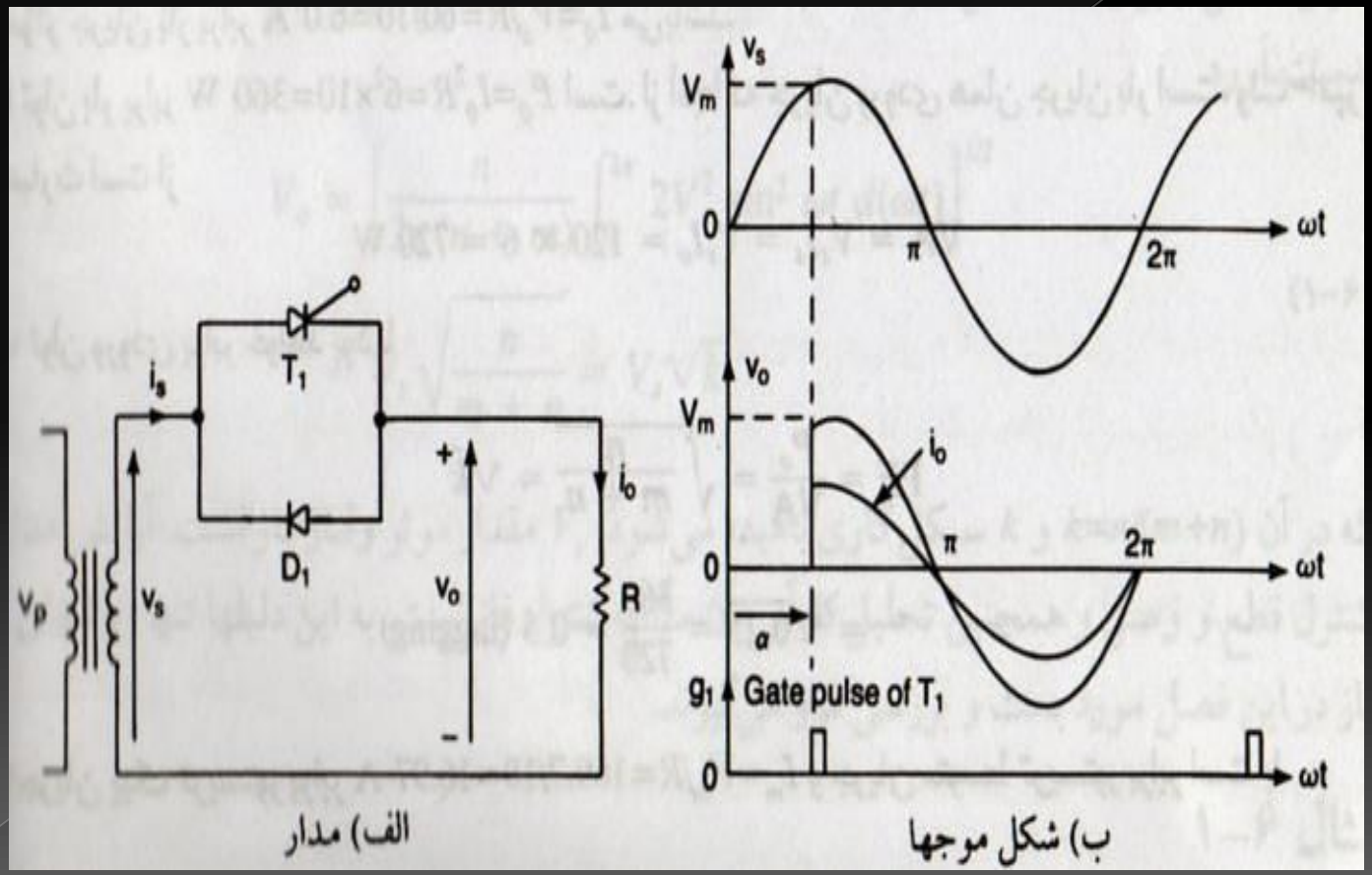
اگر ولتاژ ورودی برای n سیکل به بار متصل و برای m سیکل از بار جدا باشد:

$$Vo = Vs\sqrt{n/n+m} = Vs\sqrt{k}$$



کنترل فاز

در شکل زیر یک مدار کنترل زاویه تکفاز نشان داده شده است . با ایجاد تاخیر در زاویه آتش تریستور میتوان انتقال توان به بار را کنترل کرد.



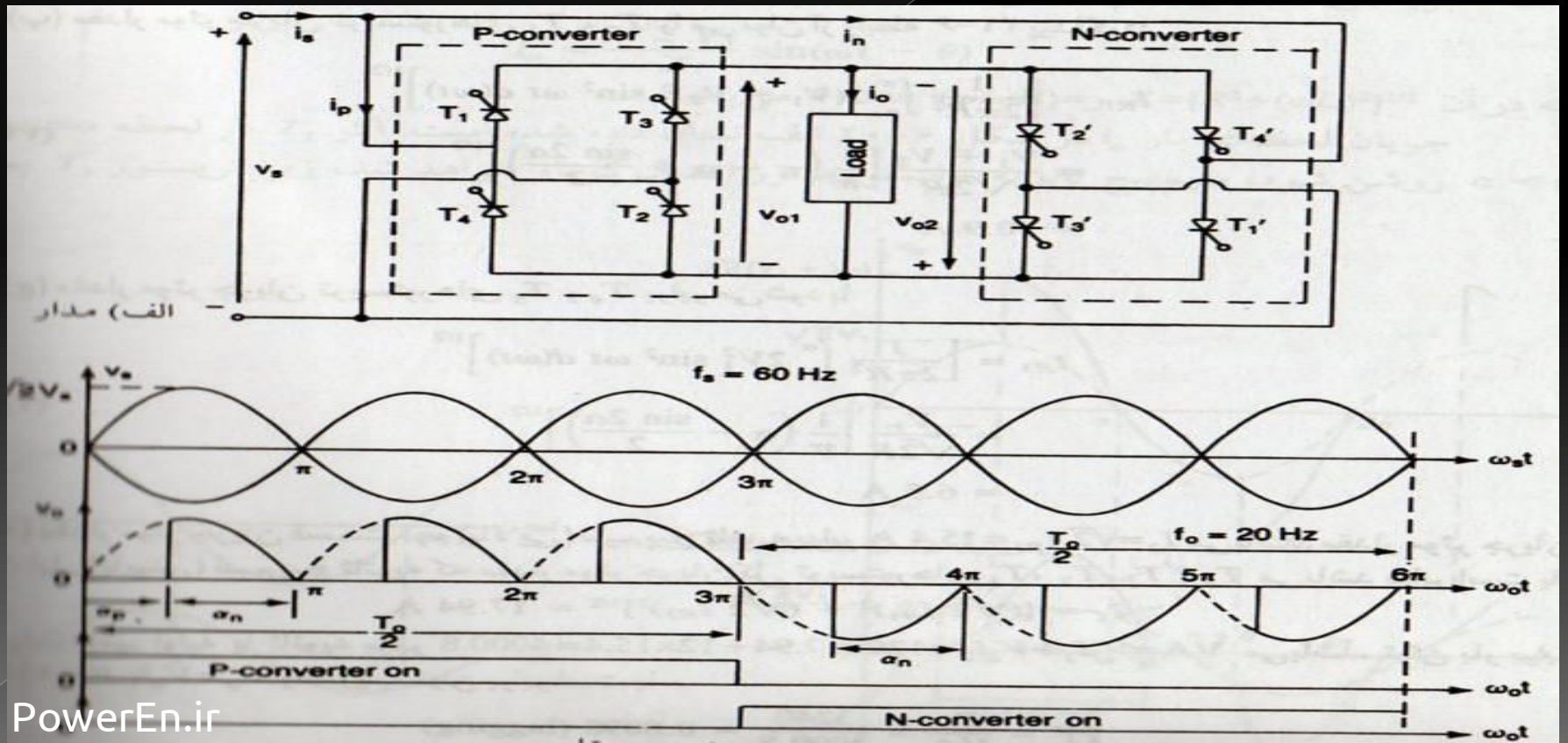
الف) مدار

ب) شکل موجها

سیکلوکانورتر:

سیکلوکانورتر ها مبدلهای ac-ac هستند که میتوانیم فرکانس و مقدار موثر خروجی را به وسیله آن کنترل کنیم .

در زیر یک سیکلوکانورتر و شکل موجهای آن نشان داده شده است.



PowerEn.ir

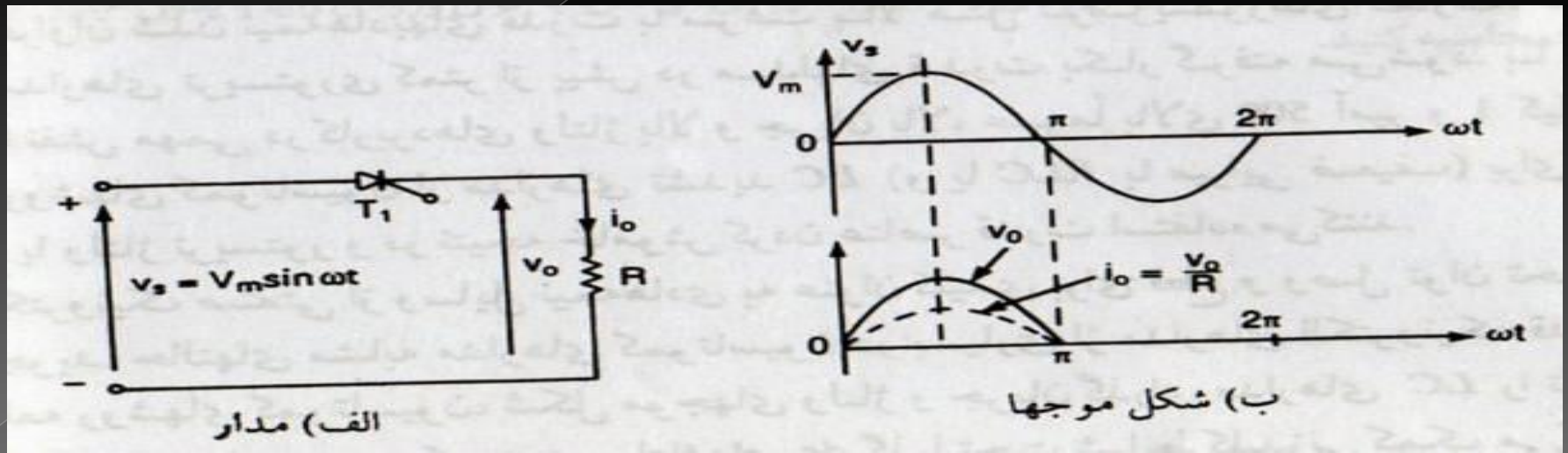
Commutation

کموتاسیون

به روشهای خاموش کردن تریستور در اصطلاح کموتاسیون میگویند که به دو دسته طبیعی و اجباری تقسیم میشوند .

کموتاسیون طبیعی: اگر منبع ولتاژ متناوب باشد جریان تریستور به طور طبیعی صفر شده ویک ولتاژ معکوس روی دو سر تریستور ظاهر گشته که باعث میشود عنصر به طور اتوماتیک بخاطر رفتار طبیعی منبع خاموش میگردد.

این پدیده کموتاسیون طبیعی یا خط نامیده میشود.



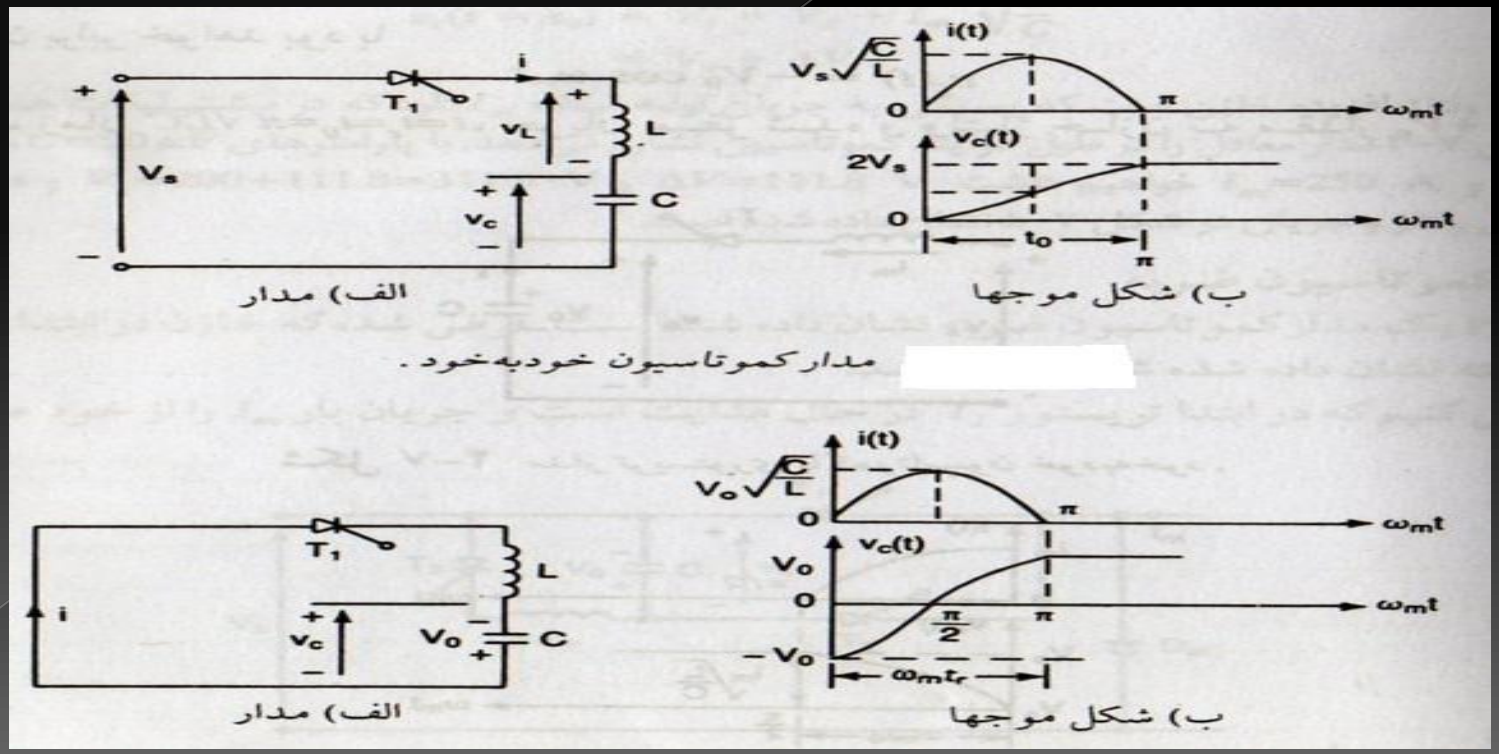
کموتاسیون اجباری : در بعضی از مدارات ولتاژ ورودی dc بوده وبرای خاموش کردن تریستور از مداری اضافی بنام کموتاسیون استفاده میکنیم.

روشهای مختلفی برای خاموش کردن تریستور بصورت اجباری وجود دارد که در زیر اشاره میکنیم:

کموتاسیون خود به خود self commutation

در این نوع کموتاسیون تریستور بنا به خواص طبیعی مدار خاموش میشود.

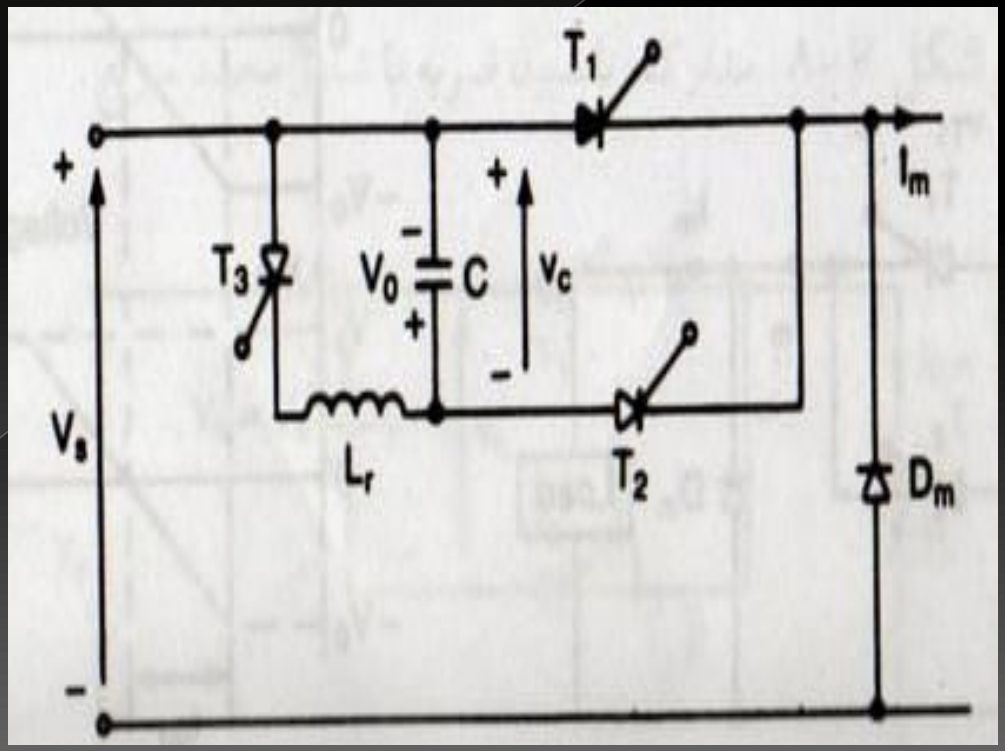
در زیر مدار و شکل موجهای این نوع کموتاسیون آمده است.



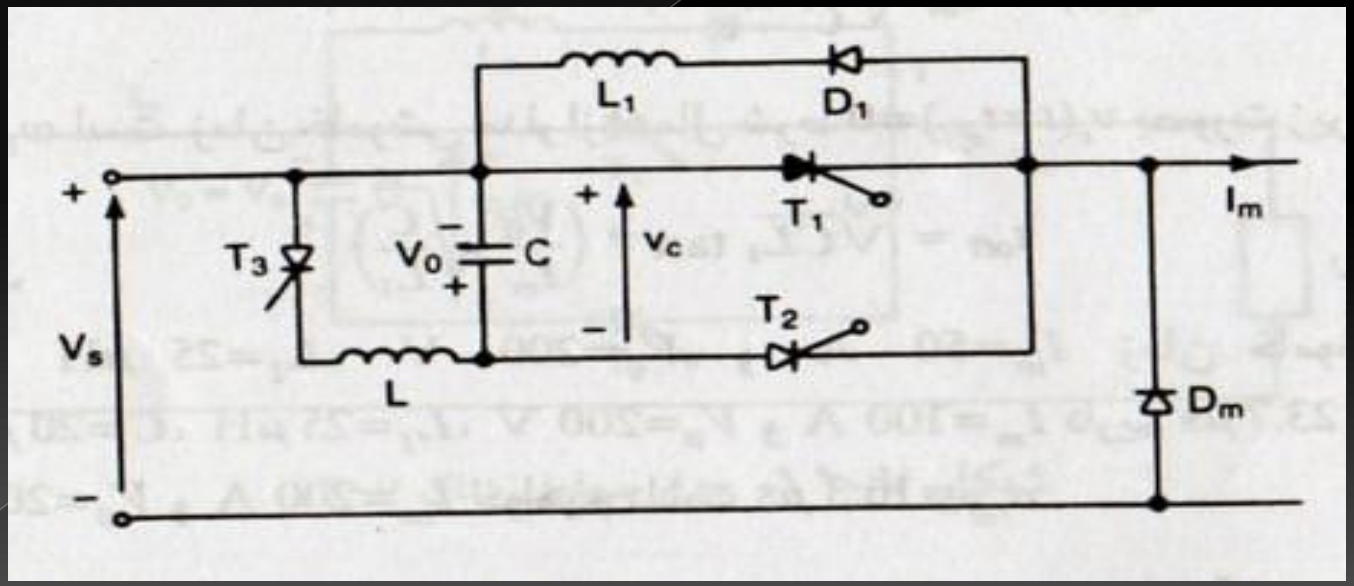
Self commutation

کموتاسیون ضربه

در زیر مدار کموتاسیون ضربه آمده است. تریستور اصلی که هدف خاموش کردن آن میباشد با رنگ سیاه مشخص شده است. در این مدار بلافاصله پس از آتش شدن تریستور T2 تریستور اصلی خاموش میشود و تریستور T3 که جهت معکوس کردن ولتاژ خازن استفاده میشود بصورت کموتاسیون خود به خود کار میکند.



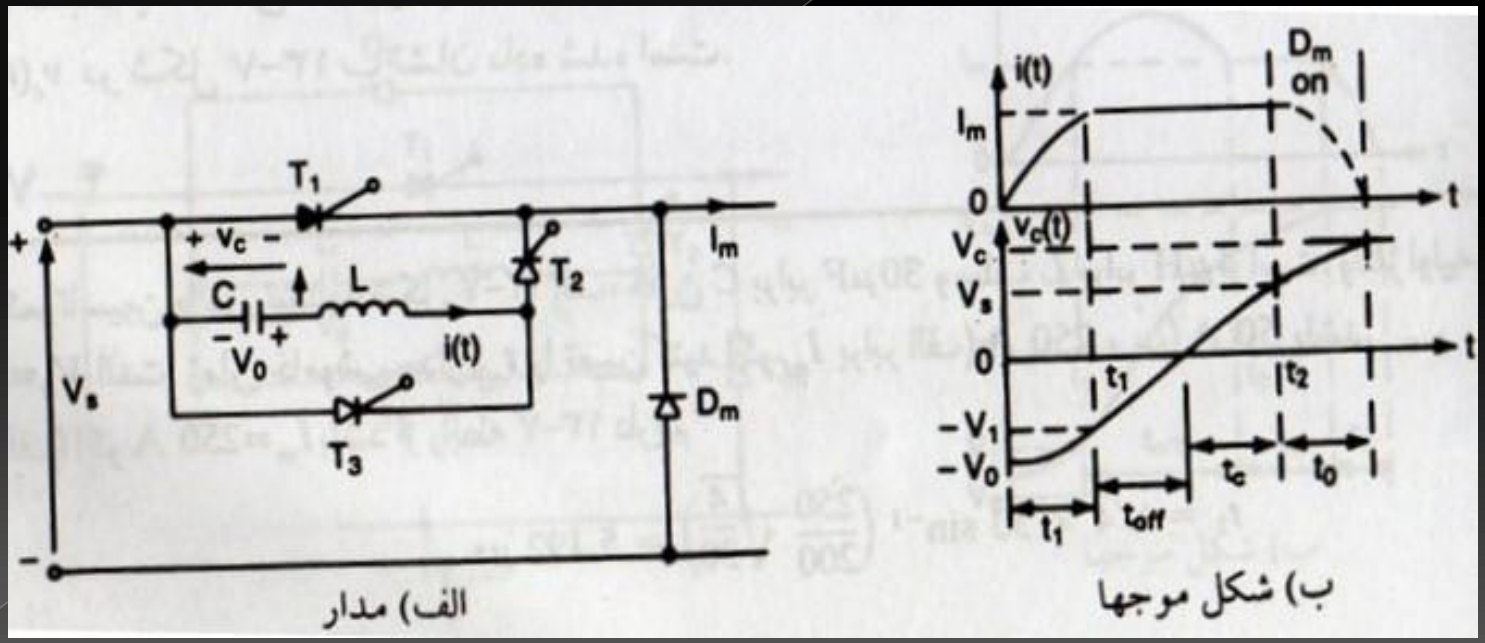
در مدار کموتاسیون ضربه با اضافه کردن یک دیود و سلف به صورت مـوازی و معکوس با تریستور اصلی میتوان سرعت تخلیه خازن را افزایش داد که در زیر مدار آن آمده است.



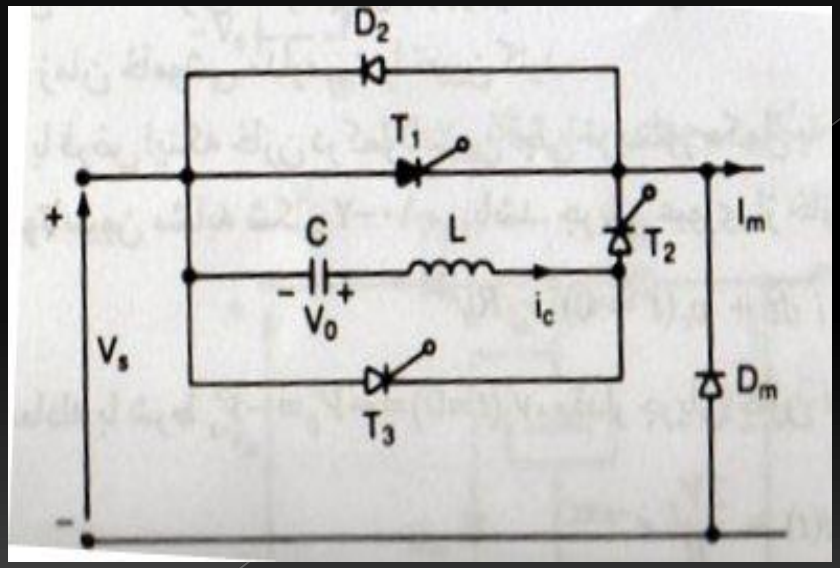
Resonant Pulse Commutation

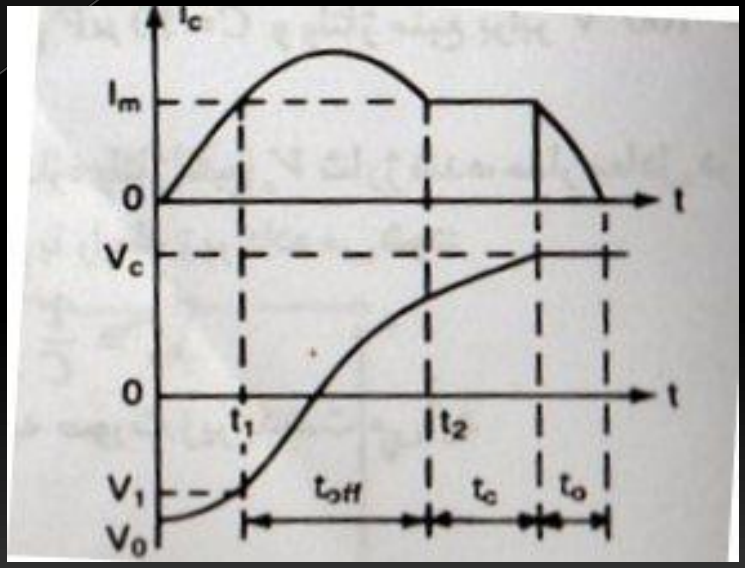
کموتاسیون پالس تشدید

شکل زیر مدار یک کموتاسیون پالس تشدید را نشان میدهد. که در آن تریستور T2 وقتی آتش میشود با L،c و T1تشکیل یک مدار تشدید را میدهد.در این مدار تریستور T3 بصورت کموتاسیون خود به خود کار میکند.



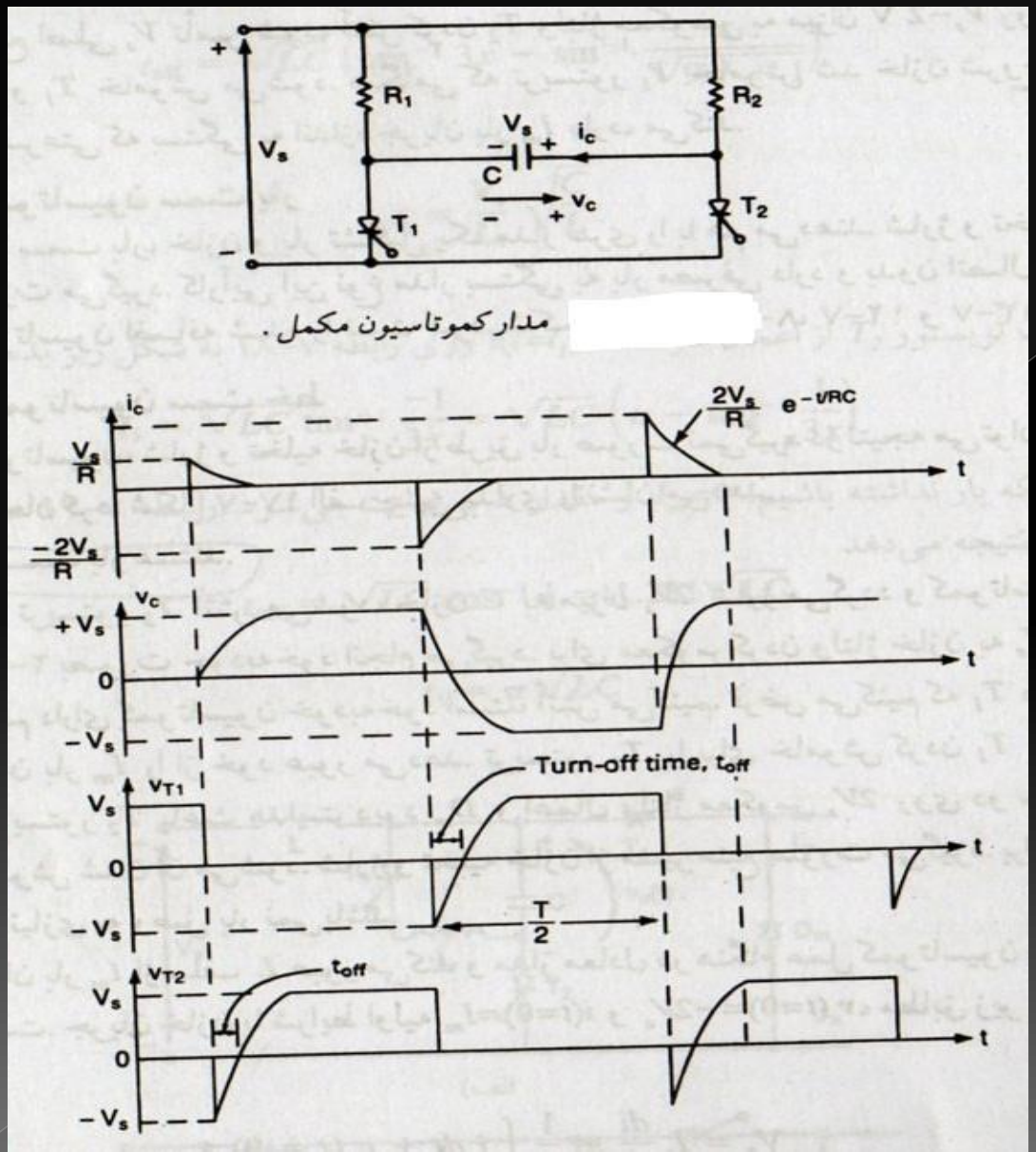
شکل زیر یک کموتاسیون پالس تشدید با دیود شتاب دهنده را نشان میدهد که در آن با اضافه کردن یک دیود بصورت موازی و معکوس با تریستور اصلی میتوان سرعت تخلیه خازن را شتاب بخشید.





Complementary Commutation

کموتاسیون مکمل



مدار کموتاسیون مکمل .

کموتاسیون مکمل برای انتقال جریان بین دو بار بکار میرود و آرایش آن درشکل مقابل نشان داده شده است . آتش شدن یک تریستور باعث خاموش شدن دیگری میشود(مانند کموتاسیون ضربه)، به همین دلیل به آن کموتاسیون ضربه مکمل نیز میگویند.

Load side commutation

کموتاسیون سمت بار

در کموتاسیون سمت بار ، خازن و بار تشکیل یک مدار سری با هم میدهند . شارژ و دشارژ خازن از طریق بار صورت میگیرد ، کارایی این نوع مدار بستگی به بار مصرفی دارد و بدون اتصال بار نمیتوان مدار ها ی کموتاسیون اضافه شده را تست کرد مدار های کموتاسیون ضربه و تشدید پالس نمونه هایی از این هستند.

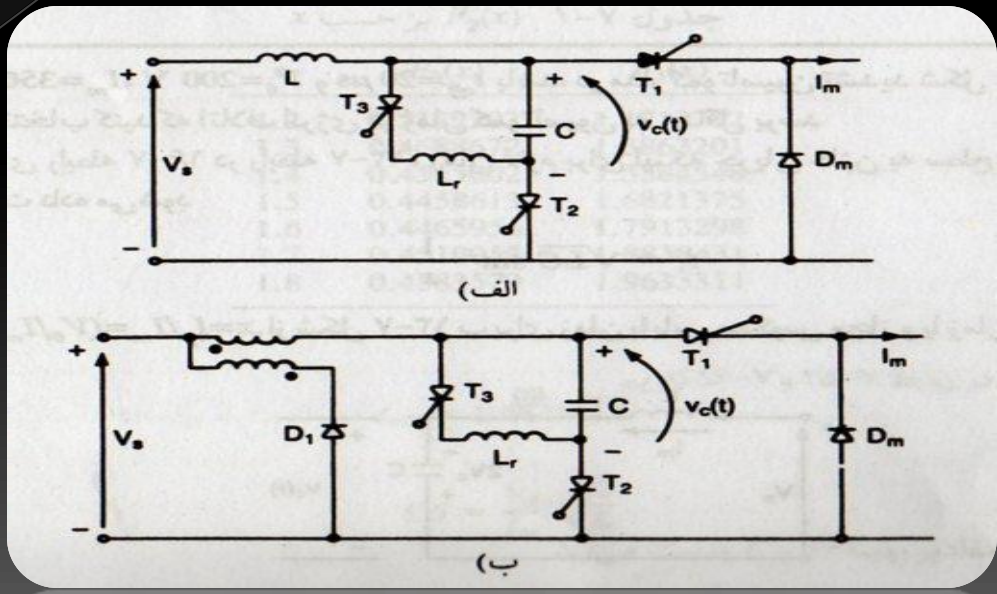
کموتاسیون سمت خط

Line side commutation

در این مدار جهت شارژ و دشارژ خازن وجود بار الزامی نمیباشد.

در زیر نمونه ای از این نوع کموتاسیون آمده است.

درصورت عدم وجود بار در مدار یعنی قطع بودن جریان بار، بجای سلف از یک ترانسفرماتور با تزویج معکوس استفاده میکنیم که در شکل زیرین مشخص است.



چاپرها chopper

در بسیاری از کاربردهای صنعتی نیاز به تبدیل یک منبع dc ولتاژ ثابت به یک منبع dc ولتاژ متغییر میباشد .

چاپر وسیله ایست که مستقیما dc را به dc تبدیل میکند.

چاپر میتواند جهت افزایش یا کاهش پله ای ولتاژ dc بکار گرفته شود.

اساس طرز کار کاهش پله ای را میتوان از روی شکل زیر توضیح داد .

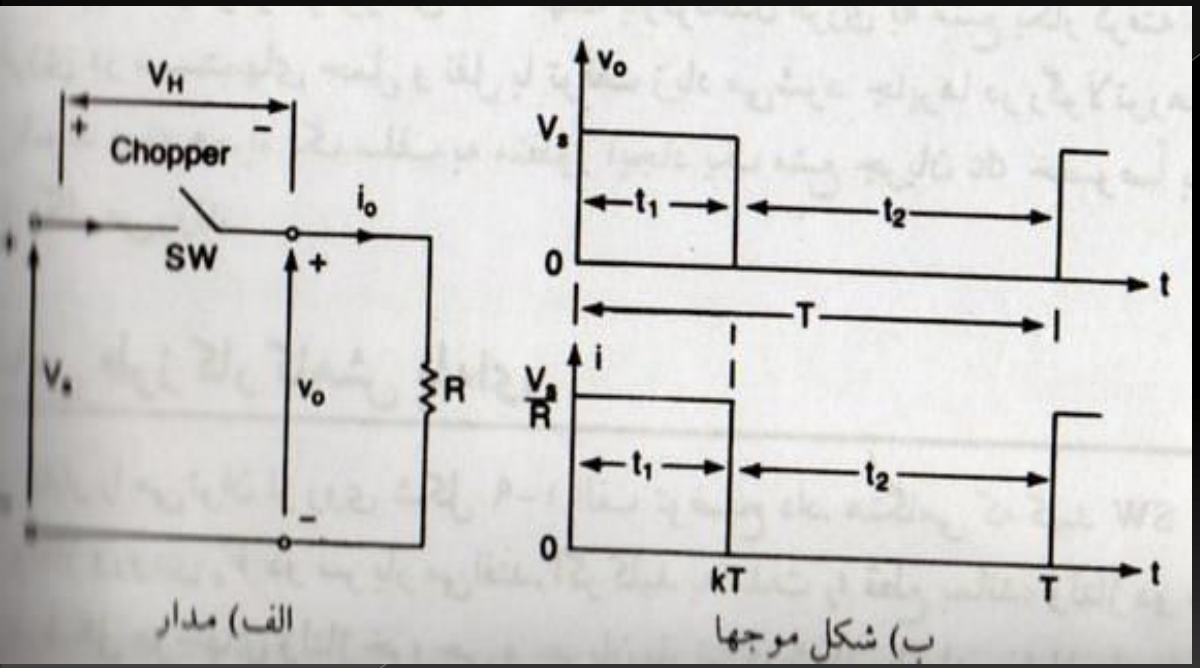
کلید چاپر را میتوان با استفاده از 1- BJT 2- MOSFET 3- GTO و یا تریستور با کموتاسیون اجباری پیاده سازی کرد.

به دو روش زیر میتوان نسبت خروجی را کنترل کرد

1-عملکرد فرکانس ثابت(مدلاسیون پهنای پالس)

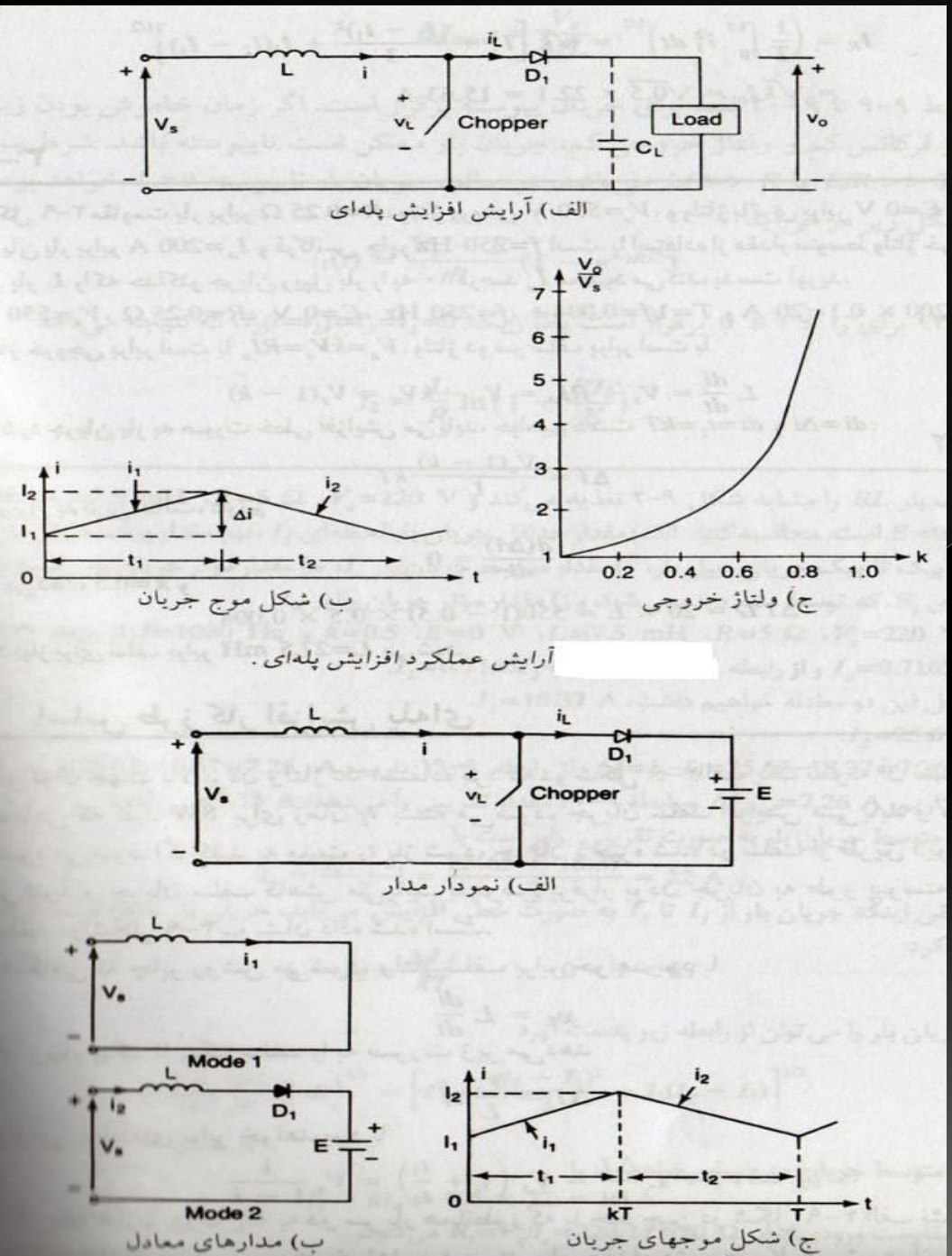
2- عملکرد فرکانس متغییر(مدولاسیون فرکانس)

چاپر کاهش پله ای با بار مقاوتی



همانطور که در شکل مشخص است اگر کلید برای مدت زمان مشخصی بسته باشد ولتاژ ورودی دوسر بار می افتد و اگر کلید برای مدت زمان مشخصی قطع بماند ولتاژ دو سر بار صفر خواهد بود. شکل روبرو یک چاپر کاهش پله ای را به همراه شکل موجهای مربوط نشان میدهد.

چاپر افزایش پله ای



از این چاپر میتوان جهت بالا بردن ولتاژ dc استفاده کرد.

شکل روبرو یک نمونه از این نوع چاپر را به همراه شکل موجهای آن نشان میدهد.

شکل دوم (پایین صفحه) آرایش انتقال انرژی را نشان میدهد که در آن انرژی تولید شده توسط چاپر به باتری منتقل میشود.

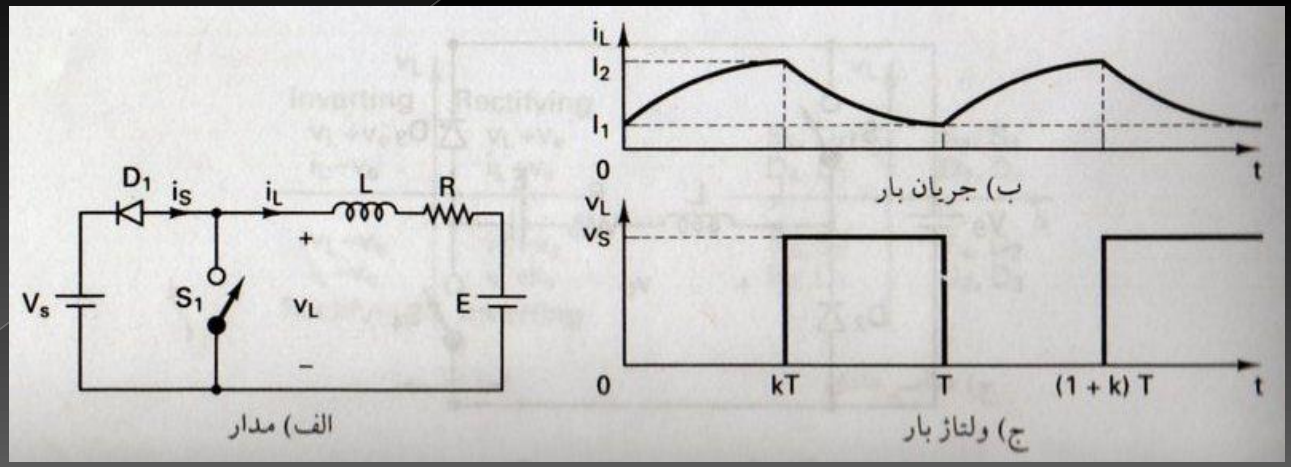
طبقه بندی چاپرها

چاپرها به پنج دسته A, B, C, D, E تقسیم میشوند.

چاپر کلاس A: دراین چاپر جریان بار به بار وارد میشود.
جریان و ولتاژ هر دو مثبت هستند، این چاپر یک چاپر تک ربعی است و مشابه یک یکسو کننده عمل میکند.

چاپر کلاس B: در این چاپر جریان بار از بار خارج میشود.

ولتاژ بار مثبت و جریان بار منفی است، این چاپرنیز یک چاپر تک ربعی است اما در ربع دوم کار میکند ومشابه یک اینورتر عمل میکند. (شکل زیر مربوط به چاپر کلاس B است)

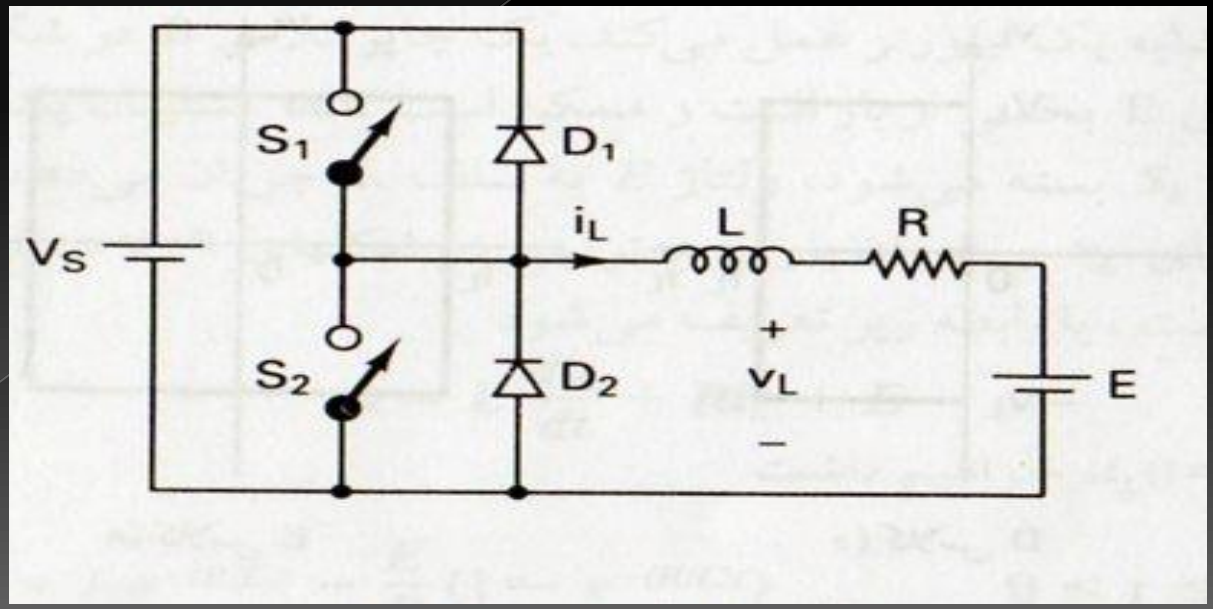


چاپر کلاس C: این چاپر یک چاپر دو ربعی است که در آن ولتاژ بار همیشه مثبت است و جریان بار مثبت یا منفی است.

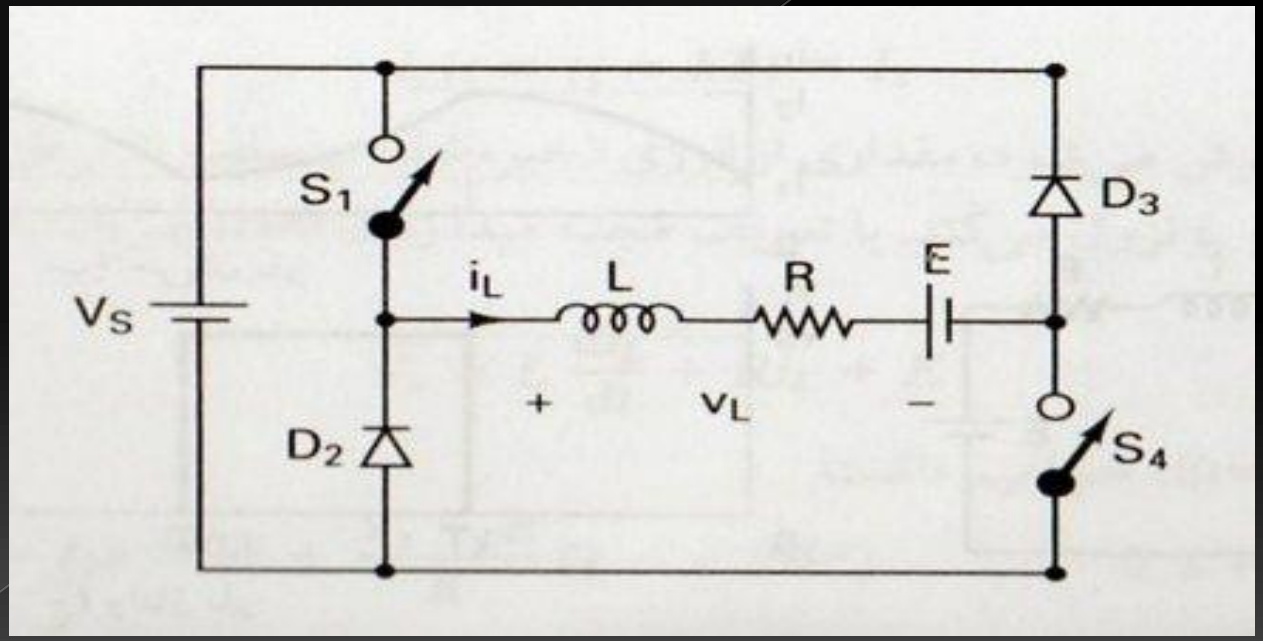
چاپرهای کلاس A و B میتوانند ترکیب شوند و یک چاپر کلاس C پدید آورند.

این چاپر میتواند همانند یکسوکننده و هم همانند یک اینورتر عمل کند.

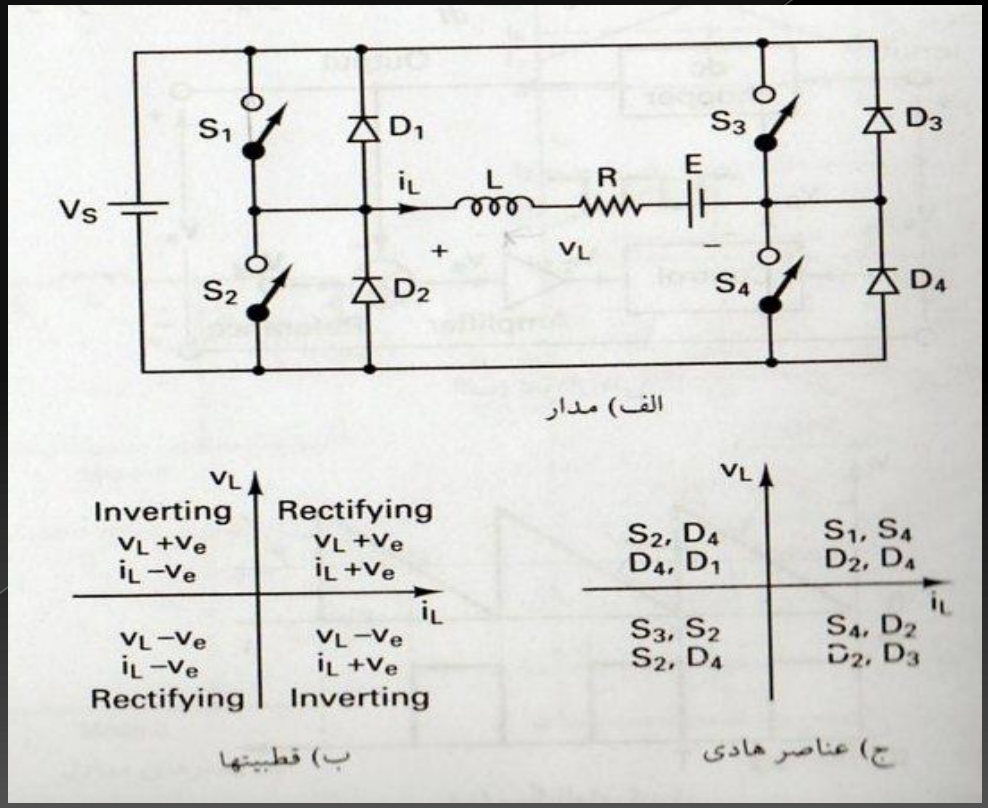
(شکل زیر مربوط به چاپر کلاس c است)



چاپر کلاس D: این چاپر یک چاپر دوربعی است ، جریان در این چاپر همیشه مثبت و ولتاژ میتواند مثبت یا منفی باشد.این چاپر نیز میتواند هم یکسو کننده و هم اینورتر باشد . (شکل زیر یک نمونه از این چاپر است)



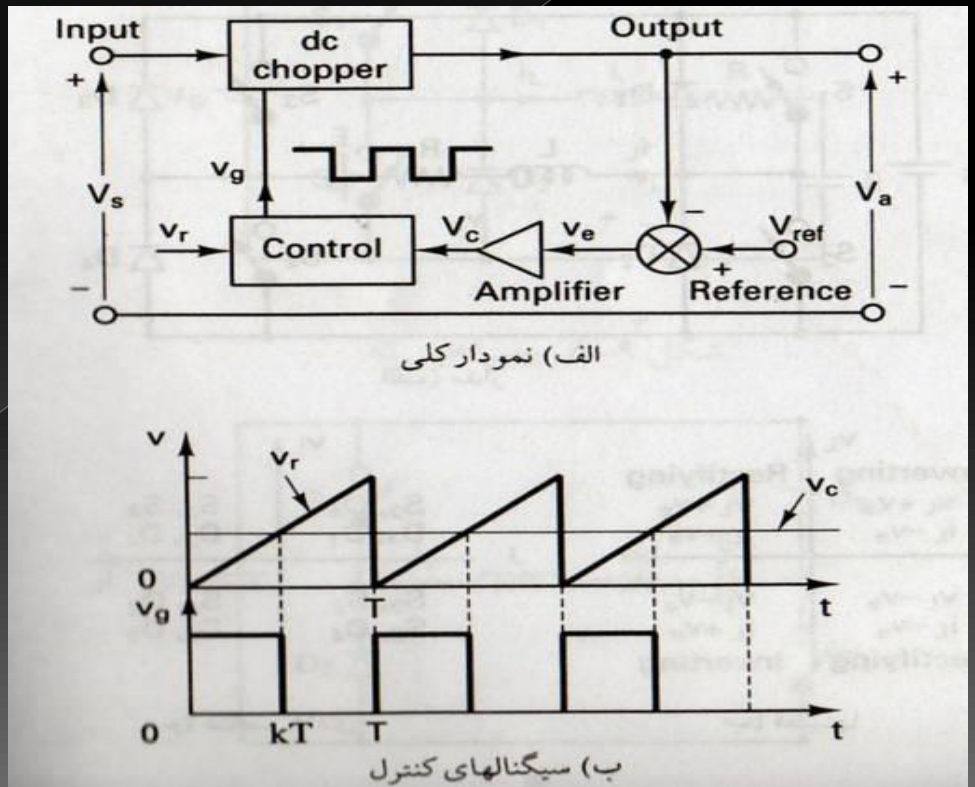
چاپر کلاس E: این چاپر یک چاپر چهار ربعی است، ولتاژ و جریان در این چاپر میتوانند مثبت یا منفی باشند. (شکل زیر یک نمونه از این نوع چاپر را به همراه قطبیت ولتاژش نشان میدهد)



رگولاتورهای تغییر دهنده حالت

شکل زیر اجزاء یک رگولاتور تغییر دهنده حالت را نشان میدهد. تثبیت کردن معمولا از طریق روش مدولاسیون پهنای پالس در یک فرکانس ثابت انجام میگیرد و عنصر کلیدزنی معمولا BJT,Mosfet,IGBT قدرت میباشد.

از شکل سیگنالهای کنترل میتوان دریافت که خروجی یک چاپر dc با بار مقاومتی ناپیوسته و شامل هارمونیک میباشد. مقدار ریپل معمولا با استفاده از یک فیلتر LC کاسته میشود.



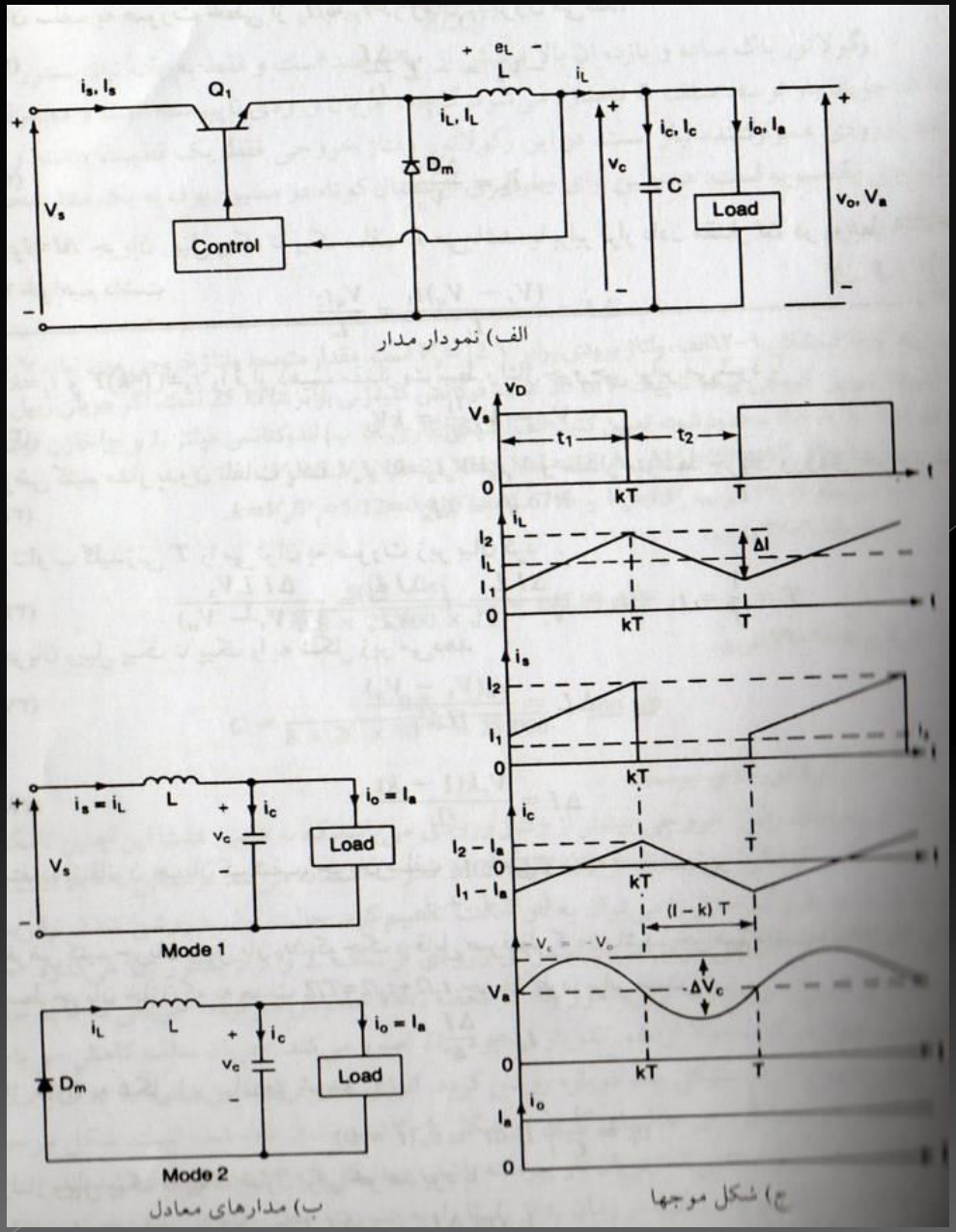
الف) نمودار کلی

ب) سیگنالهای کنترل

چهار توپولوژی پایه برای رگولاتورهای تغییر دهنده وجود دارد

1. باک
2. بوست
3. باک_بوست
4. کیوک

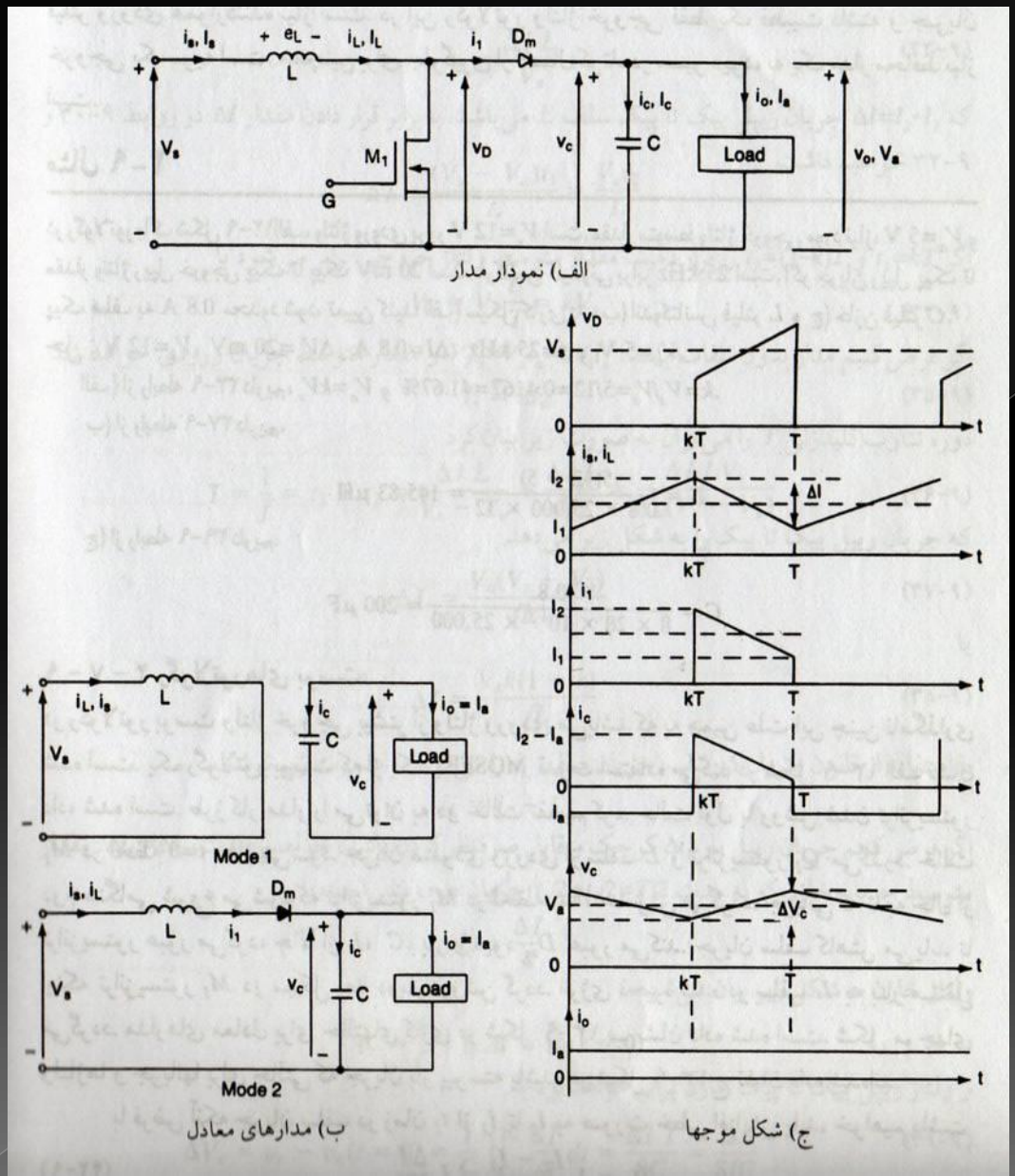
رگولاتور باک BUCK



در یک رگولاتور باک مقدار متوسط ولتاژ خروجی کمتر از ولتاژ ورودی است.

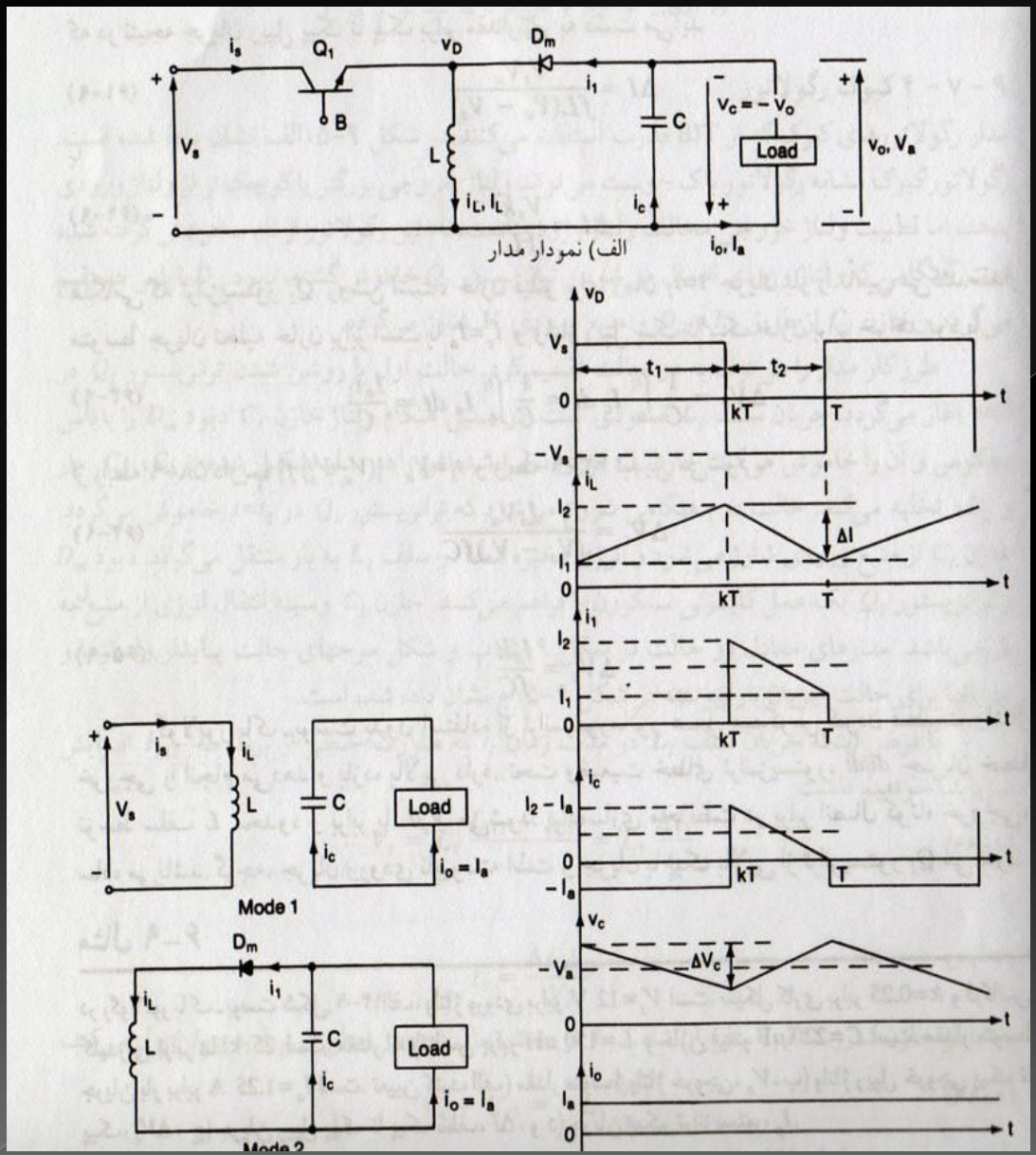
نمودار مدار یک رگولاتور باک که از یک BJT قدرت استفاده میکند در شکل روبرو نشان داده شده است که مشابه یک چاپر کاهش پله ای است.

رگولاتور بوست BOOST



در رگولاتور بوست ولتاژ خروجی از ولتاژ ورودی بیشتر میباشد، در روبرو یک نمونه از این رگولاتور با استفاده از MOSFET قدرت نشان داده شده است

رگولاتور باک - بوست



ولتاژ خروجی در این رگولاتور میتواند کمتر و یا حتی بیشتر از ولتاژ ورودی آن باشد.

قطبیت ولتاژ خروجی مخالف با ولتاژ ورودی است این رگولاتور با نام رگولاتور معکوس کننده نیز شناخته میشود در شکل روبرو نمونه ای از این رگولاتور با BJTنشان داده شده است.

ضمیمه1:

پارامترهای کارایی انواع یکسوکننده های دیودی

پارامترهای کارایی

پارامتر	روابط وفرمولها	بارهای مقاومتی خالص						بارهای سلفی خالص				
		نیم موج	تمام موج	پل	q فاز	سه فاز	پل سه فاز	نیم موج	تمام موج	پل	سه فاز	پل سه فاز
V_{dc}	$\frac{1}{T}\int_0^T f(t)\,dt$	$\frac{V_m}{\pi}$	$\frac{2V_m}{\pi}$	$\frac{2V_m}{\pi}$	$V_m\frac{q}{\pi}sin\frac{\pi}{q}$	$0.827\,V_m$	$1.654\,V_m$	$\frac{V_m}{\pi}$	$\frac{2V_m}{\pi}$	$\frac{2V_m}{\pi}$	$0.827\,V_m$	$1.654\,V_m$
I_{dc}	$\frac{V_{dc}}{R}$: درباره‌ای مقاومتی — در بارهای سلفی ثابت است	$\frac{V_m}{\pi R}$	$\frac{2V_m}{\pi R}$	$\frac{2V_m}{\pi R}$	$I_m[\frac{1}{\pi}sin\frac{\pi}{q}]$	$\frac{0.827\,V_m}{R}$	$\frac{1.654\,V_m}{R}$	ثابت	ثابت	ثابت	ثابت	ثابت
V_{rms}	$[\frac{1}{T}\int_0^T f(t)^2\ dt]^{\frac{1}{2}}$	$\frac{V_m}{2}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}[\frac{q}{\pi}(\frac{\pi}{q}+\frac{1}{2}sin\frac{2\pi}{q})]^{\frac{1}{2}}$	$0.8406\,V_m$	$1.6554\,V_m$	$\frac{V_m}{2}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$	$0.8406\,V_m$	$1.6554\,V_m$
I_{rms}	$\frac{V_{rms}}{R}$: درباره‌ای مقاومتی — در بارهای سلفی ثابت است	$\frac{V_m}{2R}$	$\frac{V_m}{R\sqrt{2}}$	$\frac{V_m}{R\sqrt{2}}$	$I_{sp1}=I_m[\frac{1}{2\pi}(\frac{\pi}{q}+\frac{1}{2}sin\frac{2\pi}{q})]^{\frac{1}{2}}$	$\frac{0.8406\,V_m}{R}$	$\frac{1.6554\,V_m}{R}$	ثابت	ثابت	ثابت	ثابت	ثابت
η	$\frac{P_{dc}}{P_{rms}}=\frac{P_{dc}}{P_{ac}}=\frac{P_{dc}}{P_o}$	40.5 %	$\frac{8}{\pi^2}=81\%$	81 %	$\frac{2q}{\pi}\cdot\frac{sin^2\frac{\pi}{q}}{\frac{\pi}{q}+\frac{1}{2}sin\frac{2\pi}{q}}$	96.77 %	99.83 %	٦٣.٦٦ %	90.03%	90.03 %	98.38 %	99.9 %
F.F	$\frac{V_{rms}}{V_{dc}}$	1.57	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}=1.11$	1.11	$\frac{V_{rms}}{V_{dc}}$	1.015	1.0008	1.57	1.11	1.11	1.015	1.0008
R.F	$\sqrt{F.F^2-1}$	1.21	0.483	0.483	$\sqrt{F.F^2-1}$	0.182	0.04	1.21	0.483	0.483	0.182	0.04
TUF	$\frac{P_{dc}}{P_s}=\frac{V_{dc}\cdot I_{dc}}{V_s\cdot I_s}$	28.6 %	$\frac{4\sqrt{2}}{\pi^2}=57\%$	$\frac{8}{\pi^2}=81\%$	$\frac{V_{dc}\cdot I_{dc}}{q\cdot V_{rms}\cdot i_{sp(rms)}}$	66.43 %	95.42 %	45%	63.66%	90.03%	98.38 %	99.9 %
C.F	$\frac{i_{s(peak)}}{i_{s(rms)}}=\frac{i_{s(peak)}}{I_s}$	2	$\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$	$\frac{1}{[\frac{q}{2\pi}(\frac{\pi}{q}+\frac{1}{2}sin\frac{2\pi}{q})]^{\frac{1}{2}}}$	1.18	0.604	1	1	1	1	1
$i_{s(dc)}$	$i_{s(dc)}=i_{s(dc)1}+i_{s(dc)2}$	$\frac{V_m}{\pi R}$	0	0	$\sum_{j=1}^{q} i_{s(dc)j}$	0	0	$\frac{V_m}{\pi R}$	0	0	0	0
PIV	----------	V_m	$2V_m$	V_m	$\sqrt{3}V_m$	$\sqrt{3}\,V_m$	$\sqrt{3}\,V_m$	V_m	$2V_m$	V_m	$\sqrt{3}\,V_m$	$\sqrt{3}\,V_m$

ضمیمه 2:

تمرین های پیشنهادی هر فصـل (
کتاب الکترونیک قدرت، م. ه . رشید)

فصل دوم (دیودهای نیمه هادی قدرت)	6-5-3-1
فصل سوم (مدارهای دیودی یکسو کننده)	13-11-8-7-6-4
فصل چهارم (تریستورها)	9-8-7-4-2
فصل پنجم (یکسوکننده های کنترل شده)	25-23-19-16-13-11-10-2
فصل ششم (کنترل کننده های ولتاژ متناوب)	6-5-3-2-1
فصل نهم (چاپرهای DC)	10-9-8-5-4-3

با تشکر از مهندس همدونی اصیل

گردآورندگان:

میلاد رستمی ـ محمد امین شیروار

زمستان 90