

۱-۱- تیریس‌تور (یا یکسو کننده قابل کنترل p-n-p-n)

تیریس‌تور یک وسیله نیمه هادی چهار لایه سه اتصالی با سه خروجی است و از لایه های نوع p و n سیلیکونی که به طور متناوب قرار گرفته اند ساخته شده اند. ناحیه p انتهایی آند، ناحیه n انتهایی کاتد و ناحیه p داخلی دریچه یا گیت^۱ است. آند از طریق مدار به طور سری به کاتد وصل می شود. این وسیله اساساً یک کلید است و همواره تا زمانی که به پایانه های آند و دریچه ولتاژ مثبت مناسبی به کاتد اعمال نشده است در حالت قطع (حالت ولتاژ مسدود کننده) باقی می ماند و امپدانس بینهایتی از خود نشان خواهد داد. در حالت وصل و عبور جریان بدون احتیاج به علامت^۲ (یا ولتاژ) بیشتری روی دریچه به عبور جریان ادامه خواهد داد. در این حالت به طور ایده آل هیچ امپدانسی در مسیر جریان از خود نشان نمی دهد. برای قطع کلید و یا برگرداندن تیریس‌تور به حالت خاموشی بایستی روی دریچه علامت و یا ولتاژی نباشد و جریان در مسیر آند به کاتد به صفر تقلیل یابد. تیریس‌تور عبور جریان را فقط در یک جهت امکان پذیر می سازد.

اگر به پایانه های تیریس‌تور ولتاژ بایاس خارجی اعمال نشود، حاملهای اکثریت در هر لایه تا زمانی که ولتاژ الکتروستاتیکی داخلی^۳ به وجود آمده از انتشار بیشتر حاملها جلوگیری کند، منتشر می شوند. اما بعضی از حاملهای اکثریت انرژی کافی جهت عبور از سد تولید شده توسط میدان الکتریکی ترمزکن^۴ هر اتصال را دارد. این حاملها پس از عبور، تبدیل به حاملهای اقلیت می

1-Gate

2-signal

3-Built - in voltage

2-Retarding electric field

شوند و می توانند با حاملهای اکثریت ترکیب شوند. حاملهای اقلیت هر لایه نیز می توانند توسط میدان الکتریکی ثابتی در هر یک از اتصالها شتابدار شوند، ولی چون در این حالت (از خارج ولتاژی اعمال نمی شود) مدار خارجی وجود ندارد مجموع جریانهای حاملهای اقلیت و اکثریت بایستی صفر شود.

حال اگر یک ولتاژ بایاس با یک مدار خارجی برای حمل جریانهای داخلی منظور شود، این جریان ها شامل قسمتهای زیر خواهند بود.

جریان I_1 ناشی از:

۱- عبور حاملهای اکثریت (حفره ها) از اتصال J_1

۲- عبور حاملهای اقلیت از اتصال J_1

۳- حفره های تزریق شده به اتصال J_2 که از طریق ناحیه n اشاعه می یابند اتصال J_1 را قطع می کند.

۴- حاملهای اقلیت از اتصال J_2 که از طریق ناحیه n اشاعه یافته و از اتصال J_1 عبور کرده

است. عیناً I_2 نیز از شش قسمت و I_3 از چهار قسمت تشکیل خواهد یافت.

برای تشریح اصول کار تریستور از دو روش متشابه^۱ مدل‌های دیودی و یا دو ترانزیستوری

می توان استفاده کرد .

(الف) مدل‌های دیودی تریستور

تریستور که یک نیمه هادی سه اتصالی ، شبیه سه دیودی است که به طور سری اتصال

یافته اند . اگر دریچه بایاس نشود ولی به دو سر آند و کاتد ولتاژ بایاسی اعمال شود این ولتاژ هر

قطبیتی^۲ که داشته باشد همواره حداقل یک اتصال معکوس بایاس شده ، وجود خواهد داشت تا از

هدایت تریستور جلوگیری کند .

اگر کاتد توسط ولتاژ منبع تغذیه (نسبت به آند) منفی شود و دریچه نسبت به کاتد به

طور مثبت بایاس شود لایه p دریچه توسط کاتد از الکترون لبریز می شود و خاصیت خودش را به

عنوان لایه p از دست می دهد . در نتیجه تریستور به دیود هدایتی معادلی تبدیل می شود .

(ب) مدل دو ترانزیستوری تریستور

1-Analogue

2-Polarity

پولک p-n-p-n را می توان به صورت دو ترانزیستور با دو ناحیه پایه در نظر گرفت . کلکتور ترانزیستور n-p-n ، جریان محرکی برای پایه ترانزیستور p-n-p که جریان کلکتورش اضافه جریان دریچه به مثابه جریان محرک^۱ پایه ترانزیستور n-p-n است ، مهیا کند . برای روشن کردن ترانزیستور جریان دریچه به جزء خیلی حساس ترانزیستور n-p-n از اتصال p-n-p-n اعمال می شود . اولین ده درصد افزایش جریان آند ، در اصل جریان کلکتور ترانزیستور n-p-n است . پایه n ترانزیستور p-n-p توسط جریان کلکتور ترانزیستور n-p-n باردار می شود . در نتیجه فیدبک مثبتی توسط جریان کلکتور ترانزیستور p-n-p به منظور افزایش بارهای ایجاد شده در پایه p ترانزیستور n-p-n دایر می شود . به این ترتیب جریان تیریسستور شروع به افزایش می کند ، به سرعت به مقدار اشباع می رسد و جریان تیریسستور فقط توسط امیدانس بار مح

دود

می شود .

بهبتر است به منظور تشریح مشخصه و خواص تیریسستور حالت های مختلف آن را (از نظر بایاس) مورد بررسی قرار دهیم .

۱-۲- مشخصات تیریسستور

1-Drive

برای اینکه بتوان وسیله های الکترونیکی را با کیفیت کافی مورد استفاده قرار داد و از آنها محافظت کرد بایستی مشخصات و خواص آنها کاملاً معلوم شوند . مشخصات تیریس‌تور را می توان با ملاحظه سه حالت مختلف اصلی این وسیله تعیین کرد :

۱- شرایط بایاس معکوس^۱

۲- بایاس مستقیم و مسدود^۲

۳- بایاس مستقیم و هدایت^۳

۱-۲-۱- بایاس معکوس تیریس‌تور (کاتد نسبت به آند مثبت)

در این حالت اتصالات اول و سوم به طور معکوس اتصال دوم به طور مستقیم بایاس می شوند و درست مثل یک اتصال p-n مقدار کمی جریان نشستی از کاتد به آند عبور خواهد کرد . اعمال ولتاژ محرک مثبتی به دریچه تیریس‌تور در حالی که آند هنوز منفی است سبب می شود که تیریس‌تور رفتاری شبیه ترانزیستور داشته باشد و جریان معکوس نشستی آند تا مقدار قابل ملاحظه مقایسه ای با جریان دریچه افزایش یابد ، از این رهگذر اتلاف قدرت قابل ملاحظه ای در تیریس‌تور وقوع خواهد یافت . زیاد گرم شدن اتصال می تواند سبب افسار گسیختگی حرارتی^۴ شود . جریان آند با جریان اشباع معکوس اتصال اول به اضافه کسری از

1-Revers bias

2-Forward bias and blocking

3-Forward bias and conducting

4-Termal runaway

جریان دريچه برابر است . جريان اشباع بستگي به درجه حرارت دارد . بنابراین بالا رفتن درجه حرارت باعث افزايش جريان اشباع می شود که آن نیز موجب گرم شدن بیشتر اتصال می شود . ولتاژ بیشینه دريچه در شرایط بایاس معکوس غالباً توسط سازندگان برای محدود کردن اثر حرارت معین می شود .

افزايش ولتاژ بایاس معکوس باعث پهن شدن لایه های تهی اتصالات اول و سوم می شود . اتصال اول معمولاً بخش اعظم ولتاژ آند به کاتد را مسدود می کند ، لذا منطقه تهی این اتصال غالباً پهن است . به خاطر اینکه ولتاژ مسیر سوراخ کنی توسط تماس لایه های تهی اتصالات J_1 و J_2 به وجود نیاید لایه n وسطی را کمی پهن می سازند .

۱-۳-۲- تیرستور بایاس مستقیم و مسدود (آند نسبت به کاتد مثبت)

اتصالات اول و سوم بایاس مستقیم و اتصال دوم بایاس معکوس می شود . جريان آند در خلال مدتی که یک اتصال $p-n$ بایاس معکوس وجود دارد ، خیلی کم است و مقدارش برابر با جريان اشباع اتصال دوم به اضافه قسمتی از جريان دريچه است . جريان دريچه در طول این شیوه عمل با این که خودش بایستی کوچک باشد جريان آند را افزايش می

دهد .

۱-۲-۳- تریستور بایاس مستقیم و هدایت

چهار روش برای روشن کردن تریستور وجود دارد و به محض اینکه هدایت شروع شد امپدانس صفر در مسیر عبور جریان از خود نشان می دهد. همان طوری که از مشخصه کلی ولتاژ جریان یک تریستور، در طول زمانی که تریستور هدایت می کند افت ولتاژ بین آند و کاتد در حدود ۱ تا ۱/۵ ولت است و اصولاً مستقل از جریان آند است. چهار روش راه اندازی^۱ تریستور وجود دارد:

(۱) فعال سازی نوری (۲) علائم الکتریکی (۳) ولتاژ بایاس مستقیم با دامنه زیاد (و ۴) ولتاژ بایاس مستقیم با میزان صعود سریع وجود دارد. روش دوم، یعنی راه اندازی توسط علائم الکتریکی مهمترین و معمول ترین روش است، در حالی که آخرین روش به علت طبیعت مزاحمی^۲ که دارد قابل اجتناب است.

(الف) روشن کردن^۳ توسط نور

یک شعاع نوری که از دریچه به سوی اتصال کاتد، J_3 جهت داده می شود، می تواند انرژی کافی برای شکستن پیوندهای الکترونیکی در نیمه هادی را تولید و حاملهای اقلیت اضافی لازم جهت وصل کلید یا روشن کردن تریستور را مهیا کند.

1-Triggerring

2-Spurious

3-Turn - on

www.kandooocn.com

(ب) روشن کردن توسط علائم الکتریکی اعمال شده به دریچه:

اگر تریستور در بایاس مستقیم قرار داشته باشد، تزریق جریان به دریچه منجر به روشن شدن تریستور می گردد. این کار با اعمال پالس مثبت مناسب بین گیت و کاتد عملی خواهد شد. با افزایش جریان دریچه، ولتاژ سد کنندگی مستقیم کاهش پیدا می کند.

تاخیر زمانی بین لحظه اعمال سیگنال به دریچه و لحظه هدایت تریستور را زمان روشن

شدن t_{on} می نامیم. t_{on} بنا به تعریف برابر است با فاصله زمانی بین لحظه ای که جریان دریچه

۱۰٪ جریان حالت پایدار دریچه ($0.1I_G$) و جریان تریستور ۹۰٪ جریان حالت پایدار روشن شدن

خود ($0.9I_T$) می رسد.

t_{on} مجموع زمان تاخیر t_d و زمان صعود t_r می باشد. t_d بنا به تعریف فاصله زمانی

بین لحظاتی است که جریان دریچه به ۱۰٪ مقدار نهایی خود و جریان حالت روشن تریستور به

۱۰٪ مقدار نهایی خود ($0.1I_T$) می رسد. t_i نیز فاصله زمانی مورد نیاز است تا جریان آند از ۱۰٪

جریان حالت روشن به ۹۰٪ جریان حالت روشن برسد.

$$t_{on} = t_d + t_r$$

در طراحی مدار کنترل دریچه باید نکات زیر را رعایت کرد:

۱- پس از روشن شدن تریستور باید سیگنال دریچه را از روی دریچه برداریم ادامه اعمال

سیگنال، تلفات توان را در پیوند دریچه افزایش می دهد.

۱ - t_{on} در بعضی از Data sheet ها با نام t_{gt} آمده است.
2-Delay time
3-Rise time

www.kandooocn.com

۲-پهنای پالس دریچه IG باید طولانی تر از زمان رسیدن جریان آند به جریان نگهدارنده I_H باشد. در عمل پهنای پالس دریچه را بیشتر از زمان روشن شدن تریستور ton در نظر می گیرند.

اگر علامت دریچه قبل از اینکه جریان صعودی آند به جریان قفلی^۱ (به حداقل جریان لازم برای ادامه هدایت) برسد به صفر تنزل یابد، تریستور دوباره خاموش خواهد شد. بلافاصله پس از آنکه جریان در آند از جریان قفلی تجاوز کرد تریستور تا زمانی که جریان آند از جریان نگهدارنده^۲، که کمتر از جریان قفلی است، کمتر نشده است روشن خواهد ماند (این مساله پس زنی^۳ الکتریکی است). در جریانهای بار کم، به منظور اینکه در طول روشن بودن تریستور متجاوز بودن جریان آن از جریان نگهدارنده تضمین شود، ممکن است از یک مدار تخلیه خازنی یا مقاومت سالم ساز^۴ استفاده شود. جریان قفلی با جریانهای دریچه بزرگتر به آهستگی اضافه می شود.

در فاصله اولین روشن شدن تریستور فقط سطح کوچکی در نزدیکی الکتروود دریچه جریان آند را هدایت می کند به همین علت افزایش قابل ملاحظه ای جریان آند در مدتی کوتاه، یعنی di/dt بزرگ، قبل از گسترش هدایت در بین اتصال ممکن است سبب بالا رفتن حرارت موضعی به اندازه ای که کافی برای خسارت دیدن تریستور است، شود. این گرم شدگی بیشینه تغییرات di/dt را در طول روشن شدن بین ۳ تا ۳۰ آمپر بر میکروثانیه محدود می کند، گرچه تریستورهای مخصوص سریع ممکن است قابلیت تغییرات جریانی تا 10^3 آمپر بر میکرو ثانیه را هم داشته باشند. یک سلف سری شده با آند تغییرات di/dt را کاهش می دهد و پس از آنکه تریستور به هدایت کامل رسید ممکن است کاری کرد تا سلف به حد اشباع برسد و di/dt مقدار بیشتری تا جریان بار کامل داشته باشد. این سلف همچنین باعث کاهش تلفات روشن و خاموش شدن می

1-latching (or pickup) current

2-Holding current

3- Electric backlash

4-Bleed resistor

شود. ولی قادر است سبب صعود ولتاژ گذاری معکوس، که به نوبه خود مخرب است، نیز شود. جریان دریچه بالاتر نیز به افزایش قابلیت ایستادگی^۱ آند در مقابل di/dt منجر می شود. زمان t_0 ، شروع روشن شدن تریستور توسط ولتاژ پله ای اعمال شده به دریچه را معین می کند. دوره T_1 ^۲ تاخیر زمانی بین پیشانی پالس دریچه و شروع افزایش سریع جریان آند است. بنابراین پالس دریچه بایستی حداقل دارای دوره T_1 ثانیه باشد. اتلاف قدرت در تریستور در دوره T_2 ، به علت افزایش سریع جریان در روی یک سطح کوچک در حالی که افت ولتاژ هنوز قابل ملاحظه است بیشترین مقدار را خواهد داشت. دوره T_3 زمان گسترش رسانندگی^۳ است و نیز مدت زمانی است که افت ولتاژ در تریستور به حالت پایدار می رسد.

(پ) روشن کردن با ولتاژ شکست^۴

افزایش ولتاژ مستقیم آند به کاتد باعث افزایش پهنای منطقه تهی اتصال ۲ و همچنین ازدیاد ولتاژ شتاب دهنده حاملهای اقلیت همان اتصال می شود. این حاملها با اتمهای ثابت برخورد می کنند و حاملهای اقلیت بیشتری را تا رسیدن به شکست بهمی در اتصال به جلو می رانند^۵. این شکست متصل ۲ رادر جهت مستقیم بایاس می کند، و در این حالت جریان آند تنها توسط امپدانس بار مدار خارجی محدود می شود.

در ولتاژ شکست V_{BO} تریستور از وضعیت ولتاژ زیاد در دو سر خود با جریان نشتی خیلی کم به وضعیت ولتاژ خیلی کم با جریان مستقیم زیاد تغییر مشخصه می دهد، یعنی، با ولتاژ V_{BO} تریس ————— تور روش ————— ن می شود.

1-witnstand capability

2-Period

3-Conductivity

2-Breakover voltage turn - on

5-Dislodge

اثرات سطحی پولک سیلیکونی احتمالاً لایه بار فضا^۱ را به طور موضعی فشرده می سازد و ولتاژ قطع را کاهش می دهد. این پدیده معمولاً در اطراف سطح برونی^۲ پیوندگاه به طور غیریکنواخت اتفاق می افتد. در نتیجه ممکن است کل جریان بهمنی از طریق سطح کوچکی عبور کند و اتصال p-n در اثر گرمادگی^۳ از بین برود. در ساختمان تیریسستورهای ولتاژ بالا این نقیصه محیطی رایج است. کناره مناسب یا پخ بودن لبه پولکی جایی که انتشار اتصال^۴ سطح را قطع می کند، ساخت و تولید تیریسستورهای ولتاژ بالا و قابل اعتمادی را ممکن می سازد. ولتاژ شکست از ولتاژ معکوس اسمی بیشتر است، و این روش روشن کردن فقط برای دیودهای چهارلایه p-n-p-n مورد استفاده قرار می گیرد.

(ت) روشن کردن dv/dt

میزان افزایش سریع ولتاژ مستقیم آند به کاتد سبب می شود که توسط خازنهای موجود بین آند - دریچه و دریچه - کاتد جریان گذرا در دریچه ایجاد شود. این تغییر سریع ولتاژ می تواند تیریسستور را روشن کند ولی بایستی از آن اجتناب ورزید. تیریسستورها محدودیتی از ۲۰ الی ۲۰۰ ولت بر میکرو ثانیه تغییرات ولتاژ بر حسب زمان در آند دارند، با این تیریسستورهای ولتاژ بالای ۱۶۰۰ ولت با مقدار dv/dt بیشتر از ۵۰۰ ولت بر میکروثانیه وجود دارد که در آنها حساسیت دریچه کمتر است. عملاً مقدار dv/dt برای کلید زنی با استفاده از یک مقاومت خارجی در مسیر دریچه به کاتد قابل افزایش است.

۱-۲-۴- خاموش شدن تیریسستور

1- Space - charge
3-Overheating

3-Periphery
5-Diffused Junction

خاموش شدن تیریسستور به این معنی است که هدایت در جهت مستقیم قطع می شود و اعمال دوباره ولتاژ مثبت در آند بدون وجود علامت دریچه باعث عبور جریان نخواهد شد ، جا به جایی فرآیند خاموش شدن تیریسستور است .

سه روش زیر برای قطع تیریسستور وجود دارد که عبارتند از : جابجایی طبیعی^۱ ، خاموشی با بایاس معکوس^۲ و خاموشی دریچه .

الف) جابجایی طبیعی

موقعی که جریان آند به مقدار کمتر از جریان نگهدارنده کاهش یابد تیریسستور خاموش یا قطع می شود . به هر حال لازم به تذکر است که میزان اسمی جریان آند معمولاً بیشتر از ۱۰۰۰ برابر جریان نگهدارنده است . از آنجا که در مدارهای جریان مستقیم ولتاژ آند نسبت به کاتد همواره مثبت _____ است _____ می ماند ، جریان آند فقط در موقع کلید خط ، افزایش امپدانس مدار ، و یا انشعاب قسمتی از بار توسط مدار موازی (از طریق موازی کردن مداری) باتیریسستور یعنی همانا اتصال کوتاه^۳ کردن تیریسستور _____ می تواند _____ کاهش یابد .

ب) خاموشی یا بایاس معکوس :

1-Natural Communication
3-Short - cikcuting

2-Reverse - bias turn - off

به منظور ایجاد ولتاژ بایاس معکوس در دو سر تریستوری که در خط جریان مستقیم قرار دارد، می توان از خازنها استفاده کرد. روش تخلیه خازن به طور موازی با تریستور برای خاموشی تریستور را، جا به جایی اجباری^۱ گویند.

مدارهای جا به جایی اجباری چون دارای جریان زیاد هستند و افت حرارتی در مسائل مربوط به طراحی اولویت زیادی دارد، بیشتر مورد توجه قرار می گیرند.

این عمل را به طرق زیادی می توان عملی کرد. ساده ترین روش، جا به جایی فاز است یعنی موقعی که منبع تغذیه متناوب است، پس از نیم سیکل تریستور به طور معکوس بایاس، و خاموش خواهد شد. گذشت ۲۰ میکروثانیه از زمان مثبت شدن کاتد الزاماً موجب خاموشی نمی شود، بلکه تریستور موقعی قطع یا خاموش می شود که جریان مستقیم در آن به صفر تنزل کند و این بستگی به راکتانس بار خواهد داشت. اگر بار خازنی باشد جریان قبل از ولتاژ به صفر تقلیل می یابد، که این خود را، به مثابه جا به جایی اجباری از طریق تشدید و در حالی که منبع تغذیه مدار از نوع جریان مستقیم است نشان می دهد. در زیر چهار نوع مدار خاموش کننده خازنی تشریح شده است. لیکن انتخاب یکی از چهار نوع و یا روش دیگر اغلب به کاربرد تریستور ارتباط دارد.

(الف) خود جابه جایی توسط مدار تشدید^۲

صفحه X خازن C موقعی که تریستور می خواهد روشن شود و جریان بار را هدایت کند مثبت است، و به محض روشن شدن تریستور خازن از طریق تریستور و سلف L (در مدار تشدید) تخلیه، و قطبیت^۳ صفحاتش عوض می شود. جریان تشدید پس از نیم سیکل معکوس خواهد شد و اگر مقدارش بزرگتر از مقدار جریان بار باشد تریستور خاموش می شود. حال اگر بار اتصال کوتاه شود در آن صورت مدار تشدید نمی تواند جریان زیادی به اندازه کافی برای خاموش کردن تریستور مهیا سازد. لذا، بایستی برای کلیه بارها رابطه زیر برقرار باشد.

2-Self communication by resonance

2-Polarity

$$C > t_{\text{off}} / R_L \mu F_0$$

که در آن t_{off} زمان جابجایی بر حسب میکرو ثانیه و R_L مقاومت بار است. عملاً مقدار خازن C از این مقدار به مقدار کمینه ای که جابجایی قابل اعتمادی ایجاد کند تقلیل می یابد. مدار مشابهی که ولتاژ معکوس توسط خاصیت تشدید مدار فراهم می کند یعنی اینکه وقتی خازن باردار شد مدار تشدید سعی در ایجاد جریان معکوسی برای خاموش کردن تیریسستور می کند. دوره هدایت با مقادیر L و C که مقادیر ثابتی هستند تعیین می شود.

(ب) خاموش کردن تیریسستور توسط مدار تشدید کمکی

تیریسستور TH2 بایستی به منظور باردار شدن خازن C قبل از تیریسستور اصلی روشن شود تا به محض باردار شدن خازن و افت جریان مدار به مقدار زیر جریان نگهدارنده، تیریسستور TH2 خاموش شود. اکنون تیریسستور TH1 می تواند برای عبور جریان بار و جریان تشدید مدار LC روشن شود. موقعی که خازن C قطبیت خود را عوض کرد، یعنی موقعی که صفحه Y نسبت به صفحه X مثبت شد و اختلاف پتانسیل بین دو صفحه به دو برابر ولتاژ منبع تغذیه نزدیک شد، دیود از تغییر بیشتر بار در صفحات خازن جلوگیری می کند. در این لحظه اگر تیریسستور TH2 برای دومین بار روشن شود ولتاژ دو سر خازن تیریسستور TH1 را بایاس معکوس، و آن را خاموش می کند. همانند قسمت الف در این مدار بایستی بین ظرفیت خازن و زمان خاموش شدن و مقاومت بار رابطه زیر برقرار باشد.

$$C > t_{\text{off}} / R_L \mu F_0$$

زمان هدایت تیریسستور TH1 نبایستی خیلی طولانی شود چون وجود جریان نشتی معکوس در دیود و تیریسستور باعث تخلیه خازن می شود و در طول زمان معینی ولتاژ دو سر خازن برای خاموش کردن توام با اطمینان تیریسستور TH1 کافی نخواهد بود. بنابراین معمولاً از این مدار در

موقعی که جریان مستقیم متوسط متغیری مورد لزوم است استفاده می شود ، با کلید زنی سریع تریستور و تغییر نسبت به زمان وصل به قطع ، به این منظور نازل می شوند .

(پ) خاموش کردن تریستور توسط خازن موازی

طرز کار این مدار به این صورت است که در زیر تشریح می شود : مدار با خاموش بودن تریستور TH2 و هدایت جریان بار توسط تریستور TH1 شروع به کار می کند . صفحه Y از خازن C تقریباً به علت افت کم ولتاژ در دو سر تریستور دارای پتانسیل معادل زمین یا صفر است و صفحه X دارای پتانسیل مثبتی معادل پتانسیل منبع تغذیه خواهد بود ، زیرا خازن C از طریق C ، R و TH1 باردار می شود . اگر انرژی ذخیره شده در خازن C موقعی که TH2 روشن می شود به اندازه کافی زیاد باشد خازن C شروع به خالی شدن می کند و TH1 را به مدتی بیش از زمان خاموش شدن (تریستور) بایاس معکوس می کند . روشن شدن یکی از تریستورها باعث خاموش شدن تریستور دیگر می شود ، این سیستم مرتباً تکرار می شود .

اگر مقاومت R بار مصرفی دیگری غیر از بار مصرفی اصلی مدار نباشد در انتخاب مقدار آن بایستی دقت کافی مبذول داشت تا اولاً اتلاف قدرت در آن کمینه ، باشد ثانیاً مطمئن شد که ثابت زمانی RC در مقایسه با مقادیر اسمی کلیدزنی خیلی زیاد و طولانی نباشد ، ثالثاً بایستی مقدار آن به حد کافی کوچک باشد تا اینکه جریان عبوری از آن از جریان نشستی TH2 بیشتر شود ، به عبارت دیگر خازن صفحه X را به طور مثبت باردار نخواهد کرد .

به منظور محاسبه مقدار ظرفیت خازن C برای خاموش کردن مطمئن تریستور تعیین زمان لازم برای بایاس مستقیم شدن تریستور TH1 پس از روشن شدن دوباره تریستور TH2 ضرورت دارد . در حالی که تریستور TH1 بایاس معکوس است ، خازن C جریان بار کامل را از خود عبور می دهد .

لذا اگر V ولتاژ منبع تغذیه باشد جریان بار به صورت زیر خواهد بود :

$$i = \frac{2V}{RL} e^{-t/CRL}$$

ولتاژ دو سر تیرستور TH1 عبارت است از :

$$V_{TH1} = V - iRL$$

یعنی :

$$V_{TH1} = v(1 - 2e^{-t/CRL})$$

و زمان لازم برای به صفر رسیدن این ولتاژ که همان زمان لازم برای بایاس مستقیم شدن

تیرستور TH1 است ، عبارت است از :

$$t = 0.7CR_L$$

که بایستی از زمان خاموش شدن تیرستور TH1 بیشتر باشد ، یعنی :

$$t_{off} < 0.7CR_L$$

و یا :

$$C > t_{off} / 0.7R_L$$

توصیه می شود که از خازنی با ظرفیت بیشتر از مقدار محاسبه شده استفاده شود ، و سپس

در عمل خازن C را به حدی کاهش داد تا کمی بیشتر از مقداری شود که به ازای آن جا به جایی

امکان پذیر نخواهد بود . اگر بار شامل القا باشد مقدار ظرفیت خازن C کاهش می یابد . با این حال

مطالب گفته شده در بالا برای هر نوع باری می تواند مورد استفاده قرار گیرد .

(ت) خاموش کردن تیرستور توسط خازن سری

یکی از روشهای خاموش کردن با خازن سری در مدار وارونگر (معکوس کننده) که دارای موج ولتاژ خروجی مربعی است اگر تیریسستور TH2 قطع و TH1 وصل باشد جریان بار عبور خواهد کرد و در صورت قطع TH1 و وصل TH2 جریان از بار در جهت معکوس عبور خواهد کرد .

اغلب ، جریان خروجی مورد درخواست از مدار سینوسی شکل است . که در آن صورت برای داشتن تنظیم صفر در فرکانس اصلی^۱ و تضعیف زیاد در فرکانسهای ناخواسته (یا هارمونیکها) از صافی استفاده می شود . اگر اتصال صافی وارونگر (معکوس کننده) ، بار مدار را خازنی کند ، این امر موجب معکوس شدن جریان قبل از معکوس شدن ولتاژ می شود . جریان معکوس از طریق دیود عبور ، و یک ولتاژ بایاس معکوسی در دو سر تیریسستور ایجاد می کند ، که باعث خاموش شدن تیریسستور می شود . قابل توجه است که در این حالت ولتاژ معکوس از افت ولتاژ مستقیم در دوسر دیود ، یعنی ، حدود یک ولت بیشتر نخواهد بود .

عناصر سلف و خازن در مدار با فرکانس اصلی در حال تشدید هستند و امپدانس صفری بین مدار وارونگر (معکوس کننده) و فرکانس مورد احتیاج ایجاد می کنند ، به این ترتیب عناصر LC مثل یک صافی پایین گذر عمل ، و فرکانسهای ناخواسته را تضعیف می کنند . خازن C_1 به طور موازی با بار اتصال می یابد تا بار را خازنی کند ، در نتیجه جریان از نظر فاز از ولتاژ جلو می افتد و تیریسستور به راحتی خاموش می شود .

برای تکمیل یک سیکل کامل در مدار چهار مرحله به ترتیب زیر وجود دارد :

- (۱) تیریسستور TH1 هادی و TH2 قطع
- (۲) دیود D_1 هادی و TH1 و TH2 قطع
- (۳) تیریسستور TH2 هادی و TH1 قطع
- (۴) دیود D_2 هادی و TH1 و TH2 قطع

هرگز نبایستی دوتیرستور تواماً و در یک لحظه روشن ، و باعث اتصال کوتاه منبع تغذیه شوند .

(پ) خاموشی دریاچه

بعضی از تیريستورهای مخصوص طوری طراحی شده اند که اعمال جریان منفی به دریاچه یا با برداشتن سیگنال فرمان باعث خاموشی تیريستور می شود .

۱-۲-۵- زمان خاموشی تیريستور

زمان خاموشی زمانی است که در طول آن بارهای الکتریکی حاضر در ساختمان سیلیکون به نزدیکی سطح تراز انرژی حالت قطع ، نزول کنند . اگر در طول این فاصله زمانی ، ولتاژ بایاس مستقیمی به تیريستور دوباره اعمال شود هدایت شروع خواهد شد . زمان خاموشی به درجه حرارت حساسیت دارد و بین ۲۵ تا ۱۲۵ درجه سانتی گراد دو برابر می شود . زمان خاموشی برای تیريستورهای معمولی در جابه جایی طبیعی بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکروثانیه است ، در صورتی که در جابجایی اجباری این زمان بین ۷ تا ۲۰ میکروثانیه خواهد بود ، ولی این اعداد شامل تیريستورهای مخصوص نیست . اگر بخواهیم کمی دقیق تر و مشخص تر گفته باشیم، زمان خاموشی تیريستورها حدوداً به قرار زیر است :

۱۰ میکروثانیه برای تیريستورهای ولتاژ کم و جریان کم

کمتر از ۲۰ میکروثانیه برای مقادیر اسمی ۵۰۰ ولت

کمتر از ۳۵ میکروثانیه برای مقادیر اسمی ۸۰۰ ولت

کمتر از ۵۰ میکروثانیه برای مقادیر اسمی ۱۲۰۰ ولت

و ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه برای مقادیر اسمی ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ ولت

۱-۲-۶- مدارهای محافظ گیت :

معمولاً خروجی مدارهای آتش برای اتصال به پایانه های گیت - کاتد با اجزاء حفاظت گیت همراه هستند .

مقاومت R_g : توانایی dv/dt تایریستور را افزایش داده ، زمان قطع را کم کرده و جریان نگهدارنده (I_H) و تثبیت کننده (I_L) را افزایش می دهد .

خازن C_g : مولفه های نویز فرکانس بالا را از بین می برد و توانایی dv/dt تایریستور و همچنین زمان تاخیر گیت را افزایش می دهد .

دیود Dg : گیت را در برابر ولتاژ منفی محافظت می کند . البته در تایریستورهای نامتقارن به منظور بهبود بخشیدن به توانای های dv/dt و

کاهش زمان قطع بهتر است که ولتاژ منفی کوچکی روی گیت اعمال شود .

دیود $D1$: فقط به پالس های مثبت اجازه عبور می دهد .

مقاومت $R1$: نوسانهای گذرا را از بین برده و جریان گیت را محدود می سازد.

۱-۲-۷- حفاظت در برابر dv/dt :

اگر کلید $S1$ در $t=0$ بسته شود ، یک ولتاژ پله به دوسر تایریستور $T1$ اعمال گردد dv/dt ممکن است به حدی بزرگ باشد که تایریستور روشن شود . این پدیده در Switching بارهای AC ، اینورتورهای فرکانس بالا و سیکلوکانورتورها مشاهده می شود .

می توان با اتصال خازن ، dv/dt را محدود کرد. وقتی که تایریستور $T1$ روشن می گردد ، جریان تخلیه خازن توسط R_s محدود می شود .

با استفاده از یک مدار RC که آن را مدار پیشگیری^۱ می نامیم . نرخ زمانی ولتاژ بطور تقریبی از رابطه زیر بدست می آید .

$$\frac{dv}{dt} = \frac{0.632V_s}{T} = \frac{0.632V_s}{R_s C_s}$$

باتوجه به اینکه dv/dt توسط سازندگان داده می شود و یک V_s مشخص می توان مقدار ثابت زمانی پیشگیری $T = R_s C_s$ را بدست آورد .

مقدار R_s با توجه به جریان تخلیه ITD بدست می آید :

$$R_s = \frac{V_s}{ITD}$$

C_s برای کاهش تلف ضربه گیر و حفظ مقدار مطلوب نسبت میرائی ، می تواند کوچک باشد و R_s برای کاهش جریان تخلیه می تواند بزرگ باشد .

۱-۲-۸- حفاظت در برابر di/dt :

همانطور که قبلاً هم گفته شد ، اگر نرخ افزایش جریان آند در مقایسه با سرعت فرآیند روشن شدن ، خیلی سریع باشد ، به واسطه چگالی جریان زیاد یک «نقطه داغ» موضعی ایجاد می شود و ممکن است در اثر بالا رفتن دما ، قطعه صدمه ببیند .

در عمل ، باید قطعات را در برابر تغییرات شدید di/dt حفاظت کنیم . در حالت پایدار وقتی که تیرستور T1 خاموش است ، دیود D_M هدایت می کند . اگر در حالی که دیود D_M به هدایت خود ادامه می دهد تیرستور T1 آتش می شود ، مقدار di/dt بزرگ شده و تنها توسط اندوکتانی پراکندگی مدار محدود می شود .

هدر عمل di/dt با اضافه کردن یک سلف سری L_s محدود می شود . نسبت di/dt مستقیم برابر است با:

1-Snubber circuit

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_s}{L_s}$$

که در آن L_s اندکتانس سری می باشد .

www.kandooocn.com

www.kandooocn.com

www.kandooocn.com

www.kandooocn.com

www.kandooocn.com

۱-۳- مشخصات تیرستور BT151:

۱- V_{DRM} (ولتاژ لحظه ای مستقیم): در این ولتاژ یا کمتر از آن SCR (تیرستوری که

برای یکسوسازی برق شهر بکار می رود.) فقط با یک پالس گیت مناسب روشن می شود. مقدار

این ولتاژ برای تیرستور BT151 که در انجام این پروژه مورد استفاده قرار گرفته است 500V می

باشد.

۲- $V_{RMS} \setminus V_{DSN}$ (ولتاژ لحظه ای معکوس): این ولتاژ شبیه به ولتاژ معکوس دیود است و

باید ولتاژ را کمتر از این مقدار نگه داشت. مقدار این ولتاژ برای تیرستور BT151 500V می

باشد.

۳- V_T : افت ولتاژ آند به کاتد در حالت وصل تیرستور است، که برای تیرستور

BT151، این مقدار کمتر از 1.75V است. این پارامتر تابع دما و جریان عبوری از تیرستور در

بایاس مستقیم می باشد. هر چه جریان مستقیم بیشتر باشد افت ولتاژ دو سر تیرستور در حالت

وصل، بیشتر خواهد بود.

۴- I_{RMS} : ماکزیمم جریان rms که تیرستور در حالت وصل از خود عبور می دهد مقدار

این جریان برای تیرستور BT151، 12A می باشد.

۵- I_{TSM} (جریان ناگهانی): ماکزیمم جریانی که تیریسستور می تواند به طور متناوب از خود

عبور دهد. مقدار این جریان برای BT151، 100A می باشد.

۶- I_H (جریان نگهدارنده): حداقل جریان مستقیم تیریسستور می باشد که باید از تیریسستور

در حالت روشن عبور کند تا تیریسستور خاموش نشود. مقدار این جریان برای BT151 کمتر از

20mA می باشد.

۷- جریان قفلی (ثبیت کننده) (I_L): حداقل جریانی است که باید بین آند و کاتد

تیریسستور برقرار شود تا تیریسستور در صورت اعمال پالس گیت مناسب روشن گردد. مقدار این

جریان برای BT151 کمتر از 40mA

می باشد.

۸- V_{GT} (ولتاژ تریگر گیت): ولتاژ گیت و کاد باید بیشتر از این مقدار باشد تا جریان گیت

کافی برای روشن کردن تیریسستور فراهم شود. برای BT151، این ولتاژ بیش از 1.5V می باشد.

۹- V_{RMG} (ماکزیمم ولتاژ معکوس گیت): حداکثر ولتاژ منفی که

می توان بین گیت و کاتد ایجاد کرد بدون اینکه تیریسستور خراب شود. این ولتاژ برای BT151،

5V می باشد.

۱۰- I_{GT} (جریان تریگر گیت): حداقل جریان گیتی که برای روشن کردن تیریسستور لازم

می باشد، مقدار این جریان برای BT151 بیشتر از 15mA می باشد.

۱۱- $\frac{dv}{dt}$ (سرعت تغییرات ولتاژ): در حالت گذرا ظرفیت خازنی پیوندهای pn روی

مشخصه تیریسستور تاثیر می گذارد. اگر تیریسستور در حالت قطع باشد، اعمال ولتاژ ناگهانی کوچکی

به دو سر آن، منجر به عبور جریان قابل ملاحظه ای از خارنهای پیوند می گردد. جریان خازن به صورت زیر بیان می شود:

$$i_{j2} = \frac{d(qj2)}{dt} = \frac{d}{dt}(c_{j2}V_{j2}) = V_{j2} \frac{dc_{j2}}{dt} + c_{j2} \frac{dv_{j2}}{dt}$$

که v_{j2} و c_{j2} در آن به ترتیب ظرفیت خازنی و ولتاژ پیوند $j2$ می باشند.

اگر سرعت تغییرات ولتاژ آند به کاتد یعنی $\frac{dv}{dt}$ بزرگ باشد در اینصورت جریان i_{j2} نیز

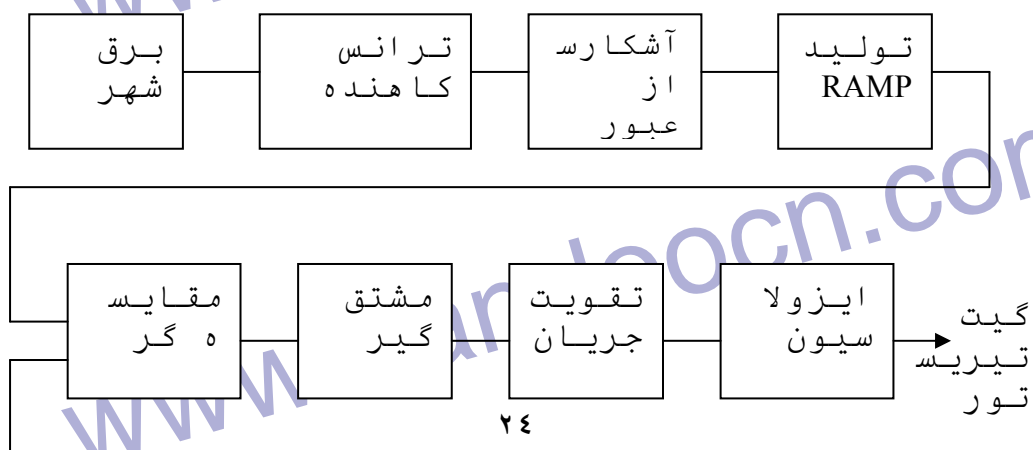
بزرگ شده، در نتیجه تیریسستور به نحو نامطلوبی روشن می گردد.

۱۲- $\frac{di}{dt}$ (سرعت تغییرات جریان): تغییر ناگهانی جریان باعث گرم شدن سریع نقطه عبور

جریان در سطح اتصال و کاهش مقاومت آن نقطه و افزایش بیشتر جریان در آن نقطه و بالاخره

سوختن آن نقطه و در نتیجه سوختن تیریسستور خواهد شد. این نقطه را Hot - Spot می نامند.

۲-۱- بلوک دیاگرام کلی مدار



www.kandoo.cn.com

www.kandoo.cn.com

www.kandoo.cn.com

www.kandoo.cn.com

www.kandoo.cn.com

۲-۲- تفاوت‌های مدار عملی با مدار شبیه سازی شده :

الف- در مدار شبیه سازی شده ولتاژ کنترل را دستی می دهیم در حالی که در مدار عملی

ولتاژ کنترل توسط میکروکنترل می شود .

ب- با توجه به اینکه جریان کلکتور BD135 (ترانزیستور استفاده شده در مدار عملی)

حدود $1/5A$ می باشد به همین خاطر در مدار شبیه سازی شده به جای BD135 از

FZT690B که جریان کلکتور آن نزدیک $1/5A$ می باشد استفاده شده است .

پ- مدار شبیه سازی شده برای نیم موج شبیه سازی شده است ولی مدار عملی تمام موج

است .

ت- تیریس‌تور بکار رفته در مدار عملی BT151 می باشد ولی در مدار شبیه سازی شده از

MCR506-6 استفاده شده است .

۲-۳- تحلیل و شبیه سازی مدار توسط شبیه ساز **Circuitmaker** :

ابتدا تحلیلی مختصر از فرایند کنترل زاویه آتش تیریس‌تور (برای soft-start کردن موتور

) به عمل می آوریم و سپس هر کدام از طبقات بلوک دیاگرام مدار را بررسی می کنیم .

اگر یک شکل موج RAMP و یک شکل موج DC داشته باشیم و با تغییر سطح DC و

انداختن آن در داخل RAMP می توانیم زاویه آتش تیریس‌تور را تعیین کنیم زیرا محل برخورد

سطح DC و شکل موج RAMP زاویه آتش را مشخص می کنند . لازم به تذکر می باشد که مقاومت های $4/7k$ ، مقاومت های pull up خروجی LM339 می باشند .

۲-۳-۱- طبقه ترانس کاهنده :

در شبیه ساز circuitmaker از دو ترانس $\frac{10}{1}$ و $\frac{5}{1}$ استفاده شده است . بنابراین نسبت

خروجی به ورودی ترانس $\frac{50}{1}$ خواهد شد .

۲-۳-۲- طبقه آشکارساز عبور از صفر :

موج سینوسی و خروجی u_2A و u_2B (موج سینوسی خروجی u_2B) اگر ولتاژ پایه پشت

آپ - امپ (در سیستم حلقه باز) بزرگتر از پایه منفی آپ - امپ باشد خروجی آپ - امپ به اشباع

مثبت و در غیر اینصورت به اشباع منفی می رود و چون مشتقگیری که به خروجی U_2A وصل

هست در زمانهای ۰ و 20ms و 40ms و ... و مشتقگیری که به خروجی u_2B وصل می باشد در

زمانهای 10ms و 30ms و 50ms و ... پالسهای سوزنی مثبت تولید می کنند و با توجه به اینکه

دیودها پالسهای منفی را از خود عبور نمی دهند ، خروجی دیودها پالسهای سوزنی مثبت در نقاط

عبور از صفر خواهد بود .

۲-۳-۳- طبقه تولید RAMP:

همانطور که گفته شد خروجی دیودها پالسهای سوزنی مثبت در نقاط عبور از صفر خواهد بود. این مسئله باعث می شود که ترانزیستور Q_1 در نقاط عبور از صفر به حالت اشباع و در بقیه زمانها به حالت قطع برود. در زمان اشباع ترانزیستور Q_1 ، خازن C_3 اتصال کوتاه شده و باعث می شود ولتاژ صفر به خروجی u_1 منتقل شود. از طرف دیگر در زمانهای قطع ترانزیستور Q_1 منبع تغذیه ۱۵- ولت از خروجی u_1 جریان کشی کرده و باعث می شود خازن C_3 شارژ شود و خروجی u_1 به صورت RAMP بالا برود. نکته قابل توجه در این فرایند ثابت زمانی $R_1 C_3$ می باشد. اندازه این ثابت زمانی بایستی در حدود 10ms باشد تا در هم نیم سیکل یک شکل موج RAMP با حداکثر دامنه داشته باشیم.

۲-۳-۴- طبقه Zero-span:

رابطه خروجی طبقه zero-span (پایه منفی $u_2 C$) با ولتاژ کنترل بصورت زیر می باشد:

$$3V_o = -\left(\frac{10K}{R_{span} + 302K}\right)VC - \left(\frac{10K}{R_{zero} + 5.6K}\right)(-15V)$$

در نتیجه:

$$V_o = -1053VC + 13.8$$

حال با تغییر ولتاژ کنترل از صفر ولت تا ۹ ولت ، خروجی Zero-spam (سطح DC) از

۱۳/۸ ولت تا صفر ولت تغییر می کند . و به این ترتیب می توانیم زاویه آتش تریستور را کنترل

کنیم .

۲-۳-۵- طبقه مقایسه گر (u_2C) و مشتق گیر :

همانطوریکه قبلاً گفته شد پایه مثبت u_2C شکل موج RAMP و پایه منفی u_2C سطح

DC متغیر (متناسب با ولتاژ کنترل متغیر) می باشد . در زمانهای برخورد RAMP با سطح DC

خروجی u_2C تغییر اشباع داده و در این زمانها (پالسهای بالارونده) زاویه آتش تریستور مشخص

می شود . خروجی u_2C پالسهای نسبتاً کشیده می باشد و این پالسهای نسبتاً کشیده باعث اشباع

ترانس پالس (طبقه ایزولاسیون) و اعوجاج خروجی آن می شوند . برای جلوگیری از این عمل بعد از

طبقه مقایسه گر طبقه مشتق گیز گذاشته شده تا عرض پالسها را کاهش دهد .

۲-۳-۶- طبقه تقویب جریان و ایزولاسیون :

برای راه اندازی تریستور بایستی جریان کافی به گیت تریستور برسد به همین خاطر از

یک زوج دارلینتون استفاده شده است .

در طبقه ایزولاسیون همانطور که گفته شد از ترانس پالس (که در بازار اصطلاحاً چوک رادیو گفته می شود) استفاده شده است. مقاومت ورودی و خروجی ترانس پالس در حدود چند اهم می باشد (مدار عملی).

البته مقاومت ترانس پالس نبایستی بزرگ باشد زیرا این مسئله باعث افت جریان و عدم راه اندازی تیرستور می شود.

هانری ورودی و خروجی ترانس پالس در حدود چند میلی هانری (مدار عملی و شبیه سازی شده) می باشد.

۲-۴- مدار عملی ساخته شده همراه با نرم افزار:

نکات قابل توجه:

۱- بار استفاده شده، موتور پمپ آب کولر می باشد.

۲- چون در مدار عملی EPROM خارجی نداریم به همین خاطر پایه ۳۱ میکرو به VCC وصل شده است.

۳- دیود D_3 ، دیود هرزگرد می باشد که نقش حفاظت از ترانزیستور ها را به عهده دارد.

۴- مقاومت R_{20} ، جریان ترانس پالس را محدود و از اشباع ترانس پالس جلوگیری می کند.

۵- به دلیل تغییرات ولتاژ دو سر تریستور ممکن است در نبود پالس فرمان گیت ،

تریستور روشن شود . برای اجتناب از این عمل مقاومت های R_{13} و R_{22} بین گیت و

کاتد تریستور گذاشته شده تا توانایی dv/dt تریستور را افزایش دهند .

۶- بدلیل هانری کم موتور از مدارات کماتاسیون (جابجایی) اجباری برای خاموش کردن

تریستور استفاده نشده است .

۷- دیودهای D_4 و D_5 گیت تریستور را از ولتاژهای منفی محافظت می کنند .

۸- مقاومت R_{19} و C_9 نقش حفاظت در برابر $\frac{dv}{dt}$ را بر عهده دارند . و باعث می شوند

ولتاژ موتور به نرمی تغییر کند .

۹- مقاومت R_{18} و خیزهای ناگهانی ولتاژ ترانس پالسها را محدود

می کند .

بسیاری از طبقات مدار عملی همانند شبیه سازی شده می باشد . همانطور که در قسمت

۲-۲ گفته شد در مدار عملی Voltage Control توسط میکرو و D/A کنترل می شود

به همین خاطر ابتدا کارکرد D/A را بررسی می کنیم تا نحوه نوشتن نرم افزار میکرو

مشخص شود .

۲-۴-۱- طبقه D/A : حداکثر ولتاژ طبقه D/A طبق رابطه زیر برابر ۱۰ ولت می باشد :

$$V_{out}(D/A) = 10 \left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{4} + \dots + \frac{A_8}{256} \right)$$

که در آن A_1 تا A_8 بیت های پورت P_0 میکروکنترلر 89c51 می باشند. از طرفی

حداکثر ولتاژ پورت P_0 میکرو ۵ ولت می باشد. بنابراین طبقه D/A ولتاژ خروجی میکرو (پورت

P_0) را دو برابر می کند. پتانسیومتر موجود در شبکه فیدبک LF351، جریان موجود در پایه

چهار DAC0808 را به ولتاژ تبدیل می کند. بدیهی است با تغییر این پتانسیومتر می توانیم

ولتاژهای کنترل مختلفی بدست آوریم.

۲-۴-۲- نرم افزار میکرو:

در طراحی نرم افزار دو نکته باید مدنظر باشد. اول اینکه ولتاژ اولیه موتور بایستی در حدی

باشد تا موتور در لحظات اولیه شروع به چرخیدن کند زیرا در غیر اینصورت موتور انرژی دریافتی را

به صورت حرارت تلف می کند زاویه آتش تیرستور هم بایستی تا ۹۰ درجه تغییر کند. دوم اینکه

به ازای ولتاژ خاص خروجی میکرو (پورت P_0)، طبقه D/A این ولتاژ را دو برابر می کند. حال با

این مقدمات نحوه کارکرد نرم افزار را بررسی می کنیم. همچنین نرم افزار سیستم با شبیه ساز

فرانکلین قابل شبیه سازی می باشد.

توسط دستور A و P_o Mov ولتاژ پورت P_o $(1/74 \times 0.02 \times 87)$ ولت می شود. طبقه

D/A این ولتاژ را دوبرابر کرده، ولتاژ کنترل به مقدار تقریبی $3/5$ ولت می رسد. حال با تاخیر

زمانی در حدود $0/13ms$ ولتاژ P_o را یکی یکی $(2\% \text{ ولت}, 0.2\% \text{ ولت})$ افزایش می دهیم.

وقتی ولتاژ پورت P_o $(2/5 \times 0.02 \times 125)$ ولت شد، حلقه بی نهایت آغاز

و باعث می شود ولتاژ پورت P_o در مقدار $2/5$ ولت بماند. بنابراین در این حالت ولتاژ کنترل ۵

ولت باقی می ماند.

نتیجه آنکه ولتاژ کنترل با تاخیر زمانی تقریباً $5S$ $(0/13_{ms} \times 38)$ از $3/5$ ولت تا ۵ ولت

تغییر می کند و بدین ترتیب زاویه آتش تیریس‌تور کنترل و موتور Soft Start می شود.