

فصل ۴

روشهای کموتاسیون

۴-۱ مقدمه

در انواع مبدل‌های انرژی، که یک نوع آن تحت عنوان یکسوکننده‌ها (یا مبدل‌های ac-dc) در فصل قبل تشریح شد، از وسایل نیمه هادی قدرت نظیر تریتورها و دیودها بهره‌برداری گردیده است.

همان طوری که ملاحظه کردیم وقتی تریتورها در بایاس (گرایش) مستقیم قرار می‌گیرند، با اعمال پالس آتش به گیت آنها، روشن می‌شوند. دیودها نیز رفتار مشابهی دارند با این تفاوت که روشن شدن آنها به محض مثبت شدن ولتاژ آند به کاتد انجام می‌گیرد و ضرورتی به اعمال پالس آتش وجود ندارد. وقتی تریتوری روشن می‌شود و خروجی مورد نیاز فراهم می‌گردد، معمولاً^۱ بایستی آنرا خاموش (قطع) کرد. خاموش شدن به این معنی است که تریتور از هدایت بازایستد و با اعمال مجدد ولتاژ مثبت به آند آن (درغیاب پالس آتش) روشن نگردد. فرایند خاموش شدن به کموتاسیون^۱ معروف است که در طی آن با جابجا شدن جریان از یک عنصر هدایت کننده به عنصر دیگر یا قسمت‌های دیگر مدار، عنصر هدایت کننده مورد نظر قطع (خاموش) می‌شود. بر حسب چگونگی خاموش شدن وسایل نیمه‌هادی، انواع کموتاسیون به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌گردد:

الف - بدون کموتاسیون

ب - کموتاسیون طبیعی^۲

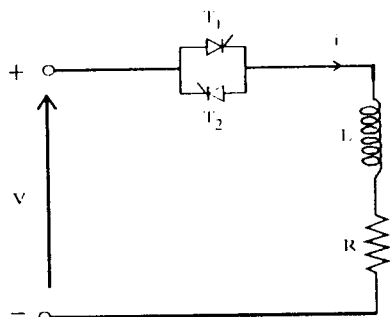
ج - کموتاسیون اجباری^۳

۲-۴ بدون کموتاسیون

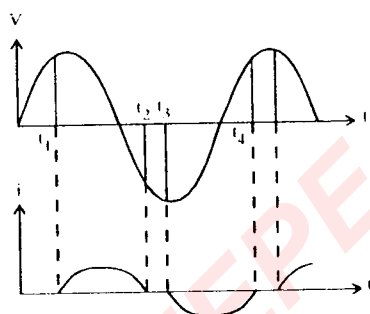
روش‌های خاموش شدن بدون کموتاسیون به این صورت است که جریان تریستور همزمان با جریان بار صفر می‌گردد. در حقیقت در این طریقه خاموش شدن، جریان تریستور در حال قطع شدن به تریستور در حال وصل شدن انتقال نمی‌یابد. اصول کار آن را می‌توان با مراجعه به شکل ۴-۱ توضیح داد. همان طوری که ملاحظه می‌شود تریستورهای معکوس موازی T_1 و T_2 به یک بار اندوکتیو متصل شده است. در نیم سیکل مثبت، T_1 در گرایش مستقیم قرار دارد و در لحظه i_1 با اعمال پالس روشن می‌شود و شروع به هدایت می‌کند و جریان i در بار جاری می‌شود. با توجه به اینکه ولتاژ اعمال شده ac می‌باشد جریان i تا مقدار ماکزیمم افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در لحظه i_2 به صفر می‌رسد. با صفر شدن جریان i ، تریستور T_1 قطع می‌شود و چون ولتاژ ac به کاتد آن منفی است، در حال قطع باقی می‌ماند. در لحظه i_3 با اعمال پالس برگیت T_2 ، این تریستور روشن می‌شود و در نتیجه جریان i در جهت مخالف جریان قبلی از طریق T_2 در بار جاری می‌شود. این جریان نیز پس از عبور از ماکزیمم، در لحظه i_4 صفر می‌شود. با صفر شدن جریان، تریستور T_2 خاموش می‌شود و مدار برای تکرار بعدی آماده می‌شود. جهت کنترل پیوسته توان، لازم است پالس آتش بطور سنکرون در لحظات مورد نظر اعمال گردد. از توضیحات فوق می‌توان دریافت که عمل جابجایی یا کموتاسیون جریان مستقیماً بین T_1 و T_2 انجام نمی‌پذیرد بلکه برای مدت زمانی جریان i صفر است. به همین دلیل عملکرد این مدار را بدون کموتاسیون می‌گویند. نکته اساسی در این مدار این است که تریستور به منبع ولتاژ ac متصل است. با توجه به متناوب بودن جریان عبوری از تریستور و یا دیود، در لحظه فرارسیدن نقطه صفر جریان، تریستور یا دیود خودبخود خاموش می‌شود. ناگفته نماند که این نوع خاموش شدن تریستور که در نقطه صفر طبیعی جریان متناوب صورت می‌گیرد، همچنین کموتاسیون طبیعی نامیده می‌شود. از اینرو می‌توان خاموش شدن تریستور را به کموتاسیون طبیعی و اجباری تقسیم‌بندی کرد.

۳-۴ کموتاسیون طبیعی

هرگاه عمل کموتاسیون یا انتقال جریان از یک عنصر نیمه‌هادی به عنصر دیگر به کمک ولتاژهای ac اعمال شده به مدار، صورت گیرد، کموتاسیون را طبیعی می‌نامند. این جابجایی جریان بطور خودکار و بدون دخالت مدار کموتاسیون اضافی خارجی انجام می‌گیرد. نکته اساسی در تحقق این نوع کموتاسیون اعمال ولتاژ متناوب (ac) به مدار است. اساس کموتاسیون طبیعی را می‌توان با استفاده از مدار ۴-۲ تشریح کرد. ولتاژهای v_1 و v_2 متناوب می‌باشند. فرض می‌کنیم T_1 روشن است و جریان i_1 که برابر جریان بار است از آن می‌گذرد. با شرط اینکه اندوکتانس بار فوق‌العاده زیاد است، جریان بار را می‌توان ثابت فرض کرد.

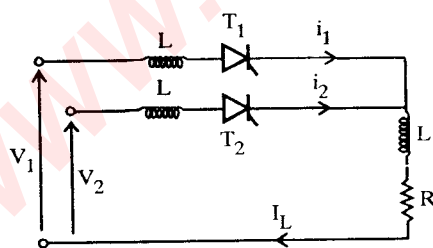


(الف) مدار

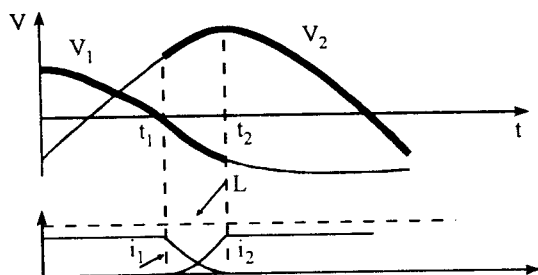


(ب) شکل موج‌ها

شکل ۱-۴ عملکرد مدار بدون کموتاسیون



(الف)



(ب)

شکل ۲-۴ عملکرد مدار با کموتاسیون طبیعی

در لحظه t_1 مقدار لحظه‌ای v_2 بزرگتر از v_1 است و با اعمال پالس آتش به گیت T_2 ، تریستور T_2 روشن می‌شود. جریان i_2 شروع به افزایش می‌کند و با توجه به آنچه که در بخش ۳-۷ در فصل قبل گفته شد، سرعت این افزایش بستگی به اندوکتانس L منبع تغذیه و اختلاف ولتاژ بین v_1 و v_2 دارد. چون جریان بار $I_L = i_1 + i_2$ ثابت است، افزایش i_2 منجر به کاهش i_1 می‌شود و در لحظه t_2 جریان i_1 به صفر می‌رسد و در نتیجه T_1 خاموش می‌شود و تریستور T_2 جریان بار را به عهده می‌گیرد. بدین ترتیب جریان بار I_L بطور طبیعی از تریستور T_1 به تریستور T_2 منتقل می‌شود. البته اگر تریستورها با دیود جایگزین می‌شدند این انتقال جریان بی‌نیاز از اعمال پالس آتش صورت می‌گرفت و در صورت صرفنظر کردن از اندوکتانس منبع تغذیه این انتقال در محل تلاقی ولتاژ v_1 و v_2 و بطور آتی انجام می‌شد و در غیر اینصورت مطابق آنچه که در بالا گفته شد با تأخیر انجام می‌گرفت. به هر حال ملاحظه می‌کنیم که وقتی ولتاژهای اعمال شده متناوب (ac) بوده و نسبت به هم اختلاف فاز دارند، عملکرد بدون کموتاسیون و کموتاسیون طبیعی را تضمین می‌نمایند. آنچه که در فصل گذشته تحت عنوان مدارهای یکسوکنده (مبدل‌های ac-dc) مورد بحث قرار گرفت، به واسطه منبع ولتاژ ورودی ac، تریستور یا دیود هدایت‌کننده در نقطه صفر جریان خاموش می‌شد و یا با کموتاسیون طبیعی جریان بار از دیود یا تریستور در حال خاموش شدن به دیود یا تریستور در حال روشن شدن، انتقال می‌یافت.

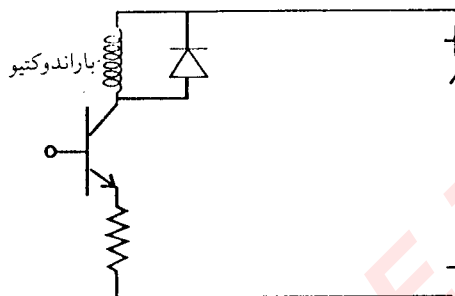
۴-۴ کموتاسیون اجباری

همان طوری که بیان شد مدارهایی که در فصل قبل مورد بررسی قرار گرفتند، دارای منبع تغذیه ac بودند، لیکن در کاربردهای متعددی از وسایل نیمه‌هادی قدرت، نظیر معکوس‌کننده‌ها (اینورترها) و برش دهنده‌ها (چاپرها)، منبع تغذیه dc می‌باشد. اگر چنانچه در این مدارها از تریستور استفاده شود، با توجه به اینکه ولتاژ ورودی dc است، برای خاموش کردن تریستور بایستی از مدار خارجی کمک گرفت. تا بدین وسیله جریان عبوری از آن را به صفر تنزل داد و ولتاژ معکوسی را برای مدت زمان کافی به آن اعمال نمود تا وسیله بتواند در طول این مدت حالت مسدود خود را باز یابد. به چنین مداری که برای خاموش کردن تریستور بکار می‌رود، مدار کموتاسیون^۱ گفته می‌شود.

روشی که بر اساس آن این نحوه خاموش کردن تحقق می‌یابد و معمولاً در مبدل‌های dc-dc (چاپرها) و مبدل‌های dc-ac (اینورترها) مورد استفاده قرار می‌گیرد، به کموتاسیون اجباری^۲ معروف است. کموتاسیون اجباری تریستور به طرق مختلفی انجام می‌گیرد که در این

بخش تشریح خواهد شد.

البته در صورتی که از ترانزیستور قدرت، MOSFET و یا GTO استفاده شود، با کنترل شرایط بیس و یا گیت می توان آنها را خاموش کرد و نیازی به مدار خاموش کننده اضافی نیست. لیکن با توجه به مقادیر نامی این وسایل، هنوز ضرورت استفاده از ترانزیستورها وجود دارد. شکل ۳-۴ مداری را نشان می دهد که در آن بار توسط ترانزیستور کنترل می شود. با کاهش جریان بیس



شکل ۳-۴ باری که توسط ترانزیستور کنترل می شود

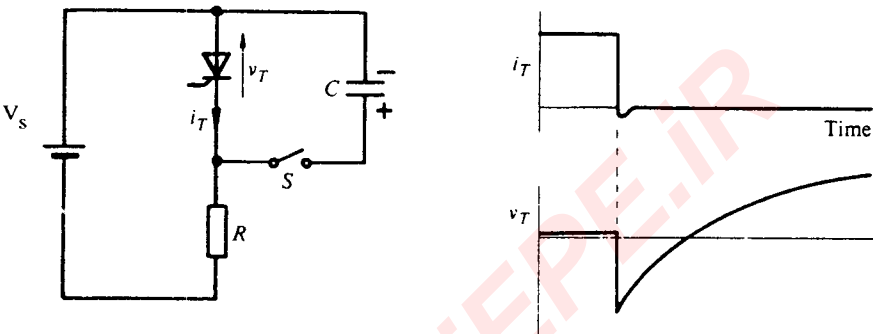
به مقدار صفر، بدون دخالت مدار خارجی اضافی، ترانزیستور خاموش می شود. اگر چنانچه بار اندوکتیو باشد، انرژی مغناطیسی ذخیره شده در آن، در ترانزیستور تلف گردیده و منجر به داغ شدن آن خواهد شد. از این رو بایستی یک مسیر انحرافی برای این جریان بار فراهم گردد. این عمل توسط دیود کموتاسیون که در شکل نشان داده شده است، انجام می گیرد. وقتی که ترانزیستور خاموش می شود، انرژی ذخیره شده، در مسیر بسته بار و دیود کموتاسیون تلف می گردد.

در حقیقت وظیفه مدار کموتاسیون اجباری این است که اولاً "جریان عبوری از ترانستور را به صفر کاهش دهد و ثانیاً" برای مدت زمانی که مساوی و یا بیشتر از زمان قطع^۱ ترانستور است، ولتاژ معکوسی را به دو سر آن اعمال نماید تا اینکه ترانستور در خلال این فاصله زمانی حالت مسدود خود را باز یابد. این اهداف را می توان بوسیله مدارهای کموتاسیون زیر بدست آورد.

۳-۴-۱ کموتاسیون با خازن موازی

اهداف فوق را می توان با استفاده از یک منبع ولتاژ خارجی برآورده کرد. به این ترتیب که منبع ولتاژ با عبور دادن جریان کافی در جهت مخالف، جریان ترانستور را به صفر کاهش می دهد

و سپس ولتاژ معکوسی را در دو سر ترستور برقرار می‌کند تا فرایند خاموشی را تکمیل نماید. این عمل به کمک مدار شکل ۴-۴ انجام می‌گیرد. وقتی ترستور در حال هدایت است جریان مدار برابر V_S/R است. برای خاموش کردن ترستور، ابتدا خازن مطابق جهت نشان داده شده در شکل شارژ می‌شود و آنگاه کلید S بسته می‌شود. با بستن کلید S، ولتاژ خازن (ولتاژ معکوس) در دوسر ترستور ظاهر می‌شود و سبب می‌گردد تا جریان معکوسی از ترستور عبور نماید و در نتیجه جریان ترستور به صفر تنزل می‌یابد.



شکل ۴-۴ کموتاسیون اجباری بوسیله خازن موازی

آنگاه خازن در درون مقاومت بار به تخلیه خود ادامه می‌دهد و همانطوریکه در شکل ۴-۴ ملاحظه می‌شود پس از گذشت زمان ولتاژ دو سر ترستور مثبت شده و خازن در جهت مخالف تا سطح ولتاژ V_S شارژ می‌گردد. همانطوریکه در شکل مشاهده می‌شود در یک فاصله زمانی معین ولتاژ معکوس در دوسر ترستور قرار می‌گیرد، این فاصله زمانی از نظر خاموش شدن ترستور حائز اهمیت است. زیرا اگر این فاصله زمانی به اندازه کافی باشد، با اعمال ولتاژ مثبت، ترستور دوباره روشن نمی‌شود. این پریرود زمانی که در شکل مشخص شده است، زمانی است که در خلال آن ولتاژ آنند - کاتد ترستور منفی است. این زمان نیایستی از زمان قطع (یا زمان خاموشی) ترستور کمتر باشد. بعداً خواهیم دید این زمان به ظرفیت خازن وابسته است، بنابراین در مدار ساده فوق بایستی C به اندازه کافی بزرگ باشد تا زمان قطع لازم تضمین گردد. اگر از جریان معکوس ترستور صرف نظر گردد می‌توان مدار کموتاسیون خازن موازی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. وقتی کلید S بسته می‌شود مدار معادل شکل ۴-۵ بدست می‌آید زیرا جریان عبوری از ترستور پس از بسته شدن کلید صفر است. برای این مدار می‌توان معادله زیر را نوشت:

$$v_c = V_S + A e^{-t/\tau}$$

با شرط اولیه $V_C = -V_S$ در $t=0$ داریم

$$-V_S = V_S + A \rightarrow A = -2V_S$$

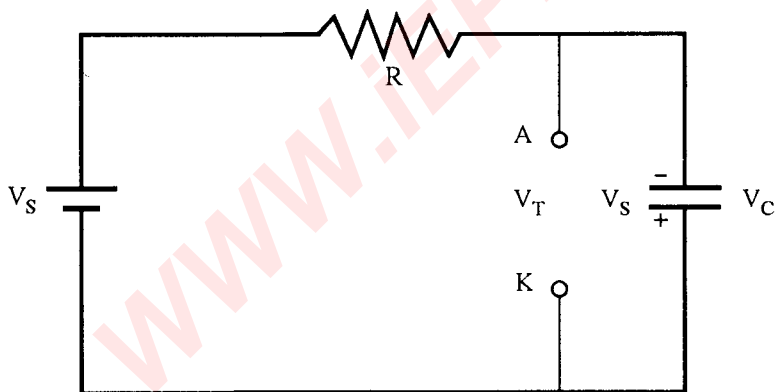
$$v_C = V_S - 2V_S e^{-t/\tau}$$

$$v_C = V_S (1 - 2e^{-t/\tau}) \quad \text{و} \quad \tau = RC \quad (1-4)$$

منحنی تغییرات ولتاژ در شکل ۴-۴ ب رسم شده است. می توان از معادله (۱-۴) مدت زمانی که تریستور در بایاس معکوس قرار می گیرد را بدست آورد. برای این کار کافی است که در معادله $v_C = 0$ قرار داده شود. بنابراین

$$0 = V_S (1 - 2e^{-t/\tau})$$

$$t = 0.693\tau = 0.693 RC$$



شکل ۴-۵ مدار معادل

مثال ۱-۴

در شکل ۴-۴، $V_S = 100V$ ، $R = 5\Omega$ ، $C = 5\mu F$ و زمان لازم برای خاموشی تریستور، $tq = 15\mu s$ است. آیا فاصله زمانی که تریستور در بایاس معکوس قرار می گیرد برای خاموش شدن آن کافی است؟

$$\tau = RC = 5 \times 5 \times 10^{-6} = 25\mu s$$

حل -

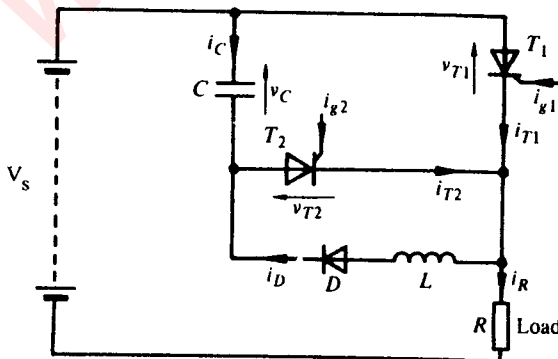
$$t = 0.693 RC = 0.693 \times 25 = 17.33\mu F$$

بنابراین با توجه به اینکه ترستور در زمانی بیشتر از زمان قطع (t_q) در گرایش معکوس قرار می‌گیرد، خاموش شدن آن تضمین می‌گردد.

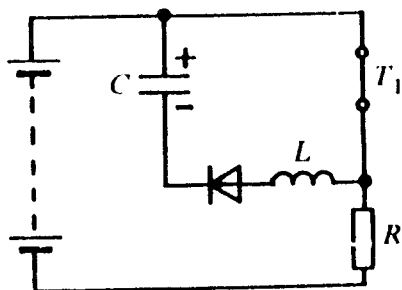
برای اینکه این مدار جنبه عملی پیدا کند لازم است کلید مکانیکی S با سوئیچ الکترونیکی جایگزین گردد تا اینکه باردار کردن و تخلیه کردن خازن قابل کنترل گردد و اطمینان حاصل شود که خازن C دوباره در جهت اولیه باردار گردیده و برای توالی خاموشی بعدی آماده می‌گردد. چنین مداری در شکل ۴-۶ نشان داده شده است، که در آن T_1 ترستور اصلی است و جریان بار از آن عبور می‌کند و T_2 ترستور کمکی است که برای رسیدن به هدف فوق به مدار اضافه گردیده است که به کمک آن می‌توان خازن باردار را به دو سر T_1 سوئیچ نموده آنرا خاموش کرد.

اندوکتانس L برای تأمین بار خازن در جهت اولیه (جهت صحیح) ضروری است. در حقیقت یک ترستور کمکی اضافه شده است تا ترستور اصلی بتواند عمل کموتاسیون را انجام دهد.

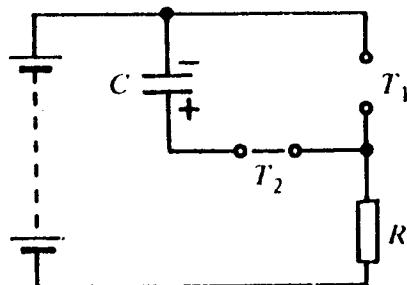
عملکرد مدار را می‌توان به شرح زیر بیان کرد. وقتی ترستورها هر دو قطع هستند با اتصال دادن باتری، هیچ جریانی از مدار عبور نمی‌کند. همانطوریکه قبلاً ملاحظه کردیم جهت انجام کموتاسیون بایستی خازن باردار را به دو سر ترستور T_1 سوئیچ کرد. بنابراین لازم است ابتدا با آتش کردن ترستور کمکی T_2 ، خازن C را باردار کرد. وقتی ترستور T_2 آتش شود طبق مدار معادل شکل ۴-۷ الف، خازن C در تئوری تا سطح ولتاژ V_s باتری شارژ می‌شود. البته در عمل وقتی جریانی از جریانی نگهدارنده ترستور T_2 کوچکتر می‌شود، T_2 قطع (خاموش) می‌شود و جریان متوقف می‌گردد.



شکل ۴-۶ مدار کموتاسیون



(ب) وقتی T_1 آتش می‌شود خازن از طریق T_1 ، L و D ابتدا تخلیه و سپس در جهت عکس (پلاریته‌نشان داده شده) شارژ می‌گردد.



(الف) وقتی T_1 آتش می‌شود خازن با پلاریته‌نشان داده شده شارژ می‌گردد.

شکل ۴-۷ مدار معادل شکل ۴-۶

با آتش کردن ترستور T_1 ، باتری به بار متصل می‌گردد، همانطوریکه در شکل ۴-۷ ب ملاحظه می‌شود. همزمان بین L و C نوسان آغاز می‌شود که فقط برای نیم سیکل ادامه می‌یابد، زیرا دیود از معکوس شدن جریان ممانعت به عمل می‌آورد. از اینرو خازن C تخلیه شده و در جهت مخالف شارژ می‌گردد. به این ترتیب خازن با پلاریته صحیح شارژ گردیده و آماده کموتاسیون می‌باشد. حال با آتش کردن T_2 ، خازن باردار در دوسر ترستور قرار می‌گیرد و در نتیجه ترستور T_1 را خاموش می‌نماید. بنابراین بطور خلاصه می‌توان گفت که با روشن کردن T_1 باتری به بار متصل می‌شود و با روشن کردن T_2 ، ترستور T_1 خاموش می‌شود و بار از باتری قطع می‌گردد.

چون این مدار قادر است ولتاژ باتری را به بار قطع و وصل نماید، یعنی اینکه با روشن و خاموش کردن ترستورها، ولتاژ باتری برش داده می‌شود و به بار اعمال می‌گردد، از اینرو به آن چاپر یا برش دهنده ^۱ d.c گفته می‌شود. از آن جایی که با آتش کردن T_2 ، بلافاصله ولتاژ معکوسی به ترستور T_1 اعمال می‌گردد به آن کموتاسیون ولتاژ ^۲ نیز گفته می‌شود. به دلیل اینکه در این مدار از یک ترستور کمکی T_2 استفاده شده است تا ترستور اصلی T_1 بتواند عمل کموتاسیون را انجام دهد، این نوع کموتاسیون همچنین به کموتاسیون کمکی ^۳ نیز معروف

است. در عمل می توان دیود D را با ترستور T_3 جایگزین کرد طوریکه همزمان با T_1 آتش گردد. از آن جایی که وجود اندوکتانس در مدار بار - باطری ممکن است باعث نوسان ثانوی (پس از خاموش شدن ترستور T_2) گردد و در نتیجه منجر به تخلیه جزئی خازن C از طریق باطری و دیود D گردد، این جایگزینی از این تخلیه ثانوی جلوگیری می نماید. این مدار در شکل ۸-۴ نشان داده شده است.

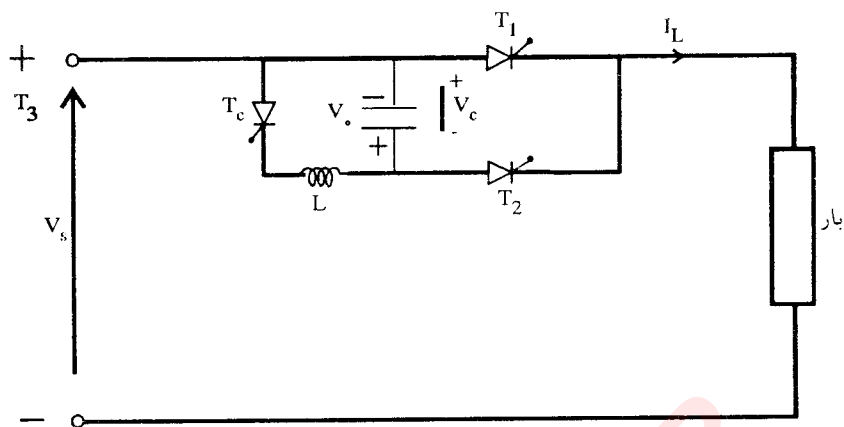
به این نوع کموتاسیون علاوه بر عناوین فوق الذکر، تحت عنوان کموتاسیون ضربه^۱ نیز اشاره می گردد. بنابراین در این مدار اگر فرض کنیم خازن به اندازه V_0 - مطابق پلاریته نشان داده شده در شکل دارای بار اولیه است و ترستور T_1 در حال هدایت بوده و جریان بار I_L را تأمین می نماید. وقتی ترستور کمکی T_2 آتش می شود ترستور T_1 به وسیله ولتاژ خازن در گرایش (بایاس) معکوس قرار می گیرد. جریان ترستور T_1 متوقف شده و خازن جریان بار را حمل خواهد کرد. خازن از ولتاژ $-V_0$ به مقدار صفر و سپس به اندازه ولتاژ dc و رودی V_s شارژ می شود، وقتی که جریان به صفر تنزل می یابد، ترستور T_2 خاموش می گردد. با آتش کردن ترستور T_3 ، بار خازن از $V_0 = V_s$ ، به $-V_0$ ، در جهت عکس شارژ می شود و بنابراین برای کلیدزنی بعدی آماده می شود.

البته در اینجا قبول می کنیم که ترستور T_3 خودبخود خاموش می شود و به این روش خاموش شدن، کموتاسیون خودی^۲ گفته می شود، و نحوه این نوع کموتاسیون را بعداً^۳ تشریح خواهیم کرد. مدار معادل مدار کموتاسیون ضربه ای شکل ۸-۴ در خلال پریود کموتاسیون در شکل ۹-۴ الف و شکل موجها در شکل ۹-۴ ب نشان داده شده است. زمان لازم برای تخلیه خازن از $-V_0$ به صفر، زمان قطع^۳ مدار ۱ نامیده می شود و بایستی از زمان قطع ترستور t_q بزرگتر باشد تا خاموشی تضمین گردد. البته زمان قطع مدار یا زمان تخلیه خازن به جریان بار I_L وابسته است و با فرض ثابت بودن جریان بار، زمان قطع مدار از رابطه زیر بدست می آید:

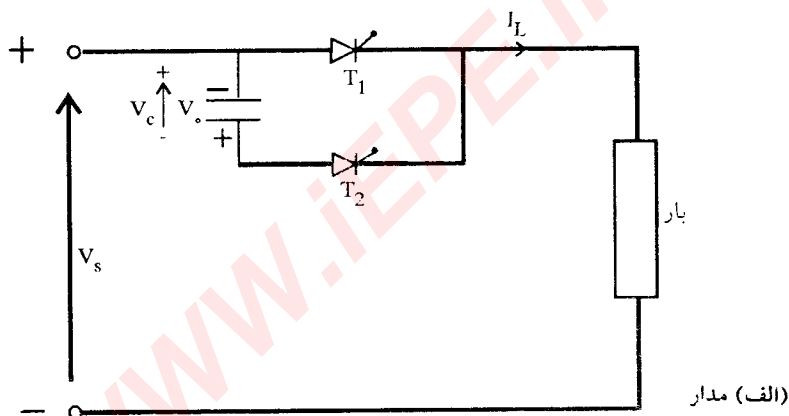
$$V_0 = \frac{1}{C} \int_0^t I_L dt = \frac{I_L t}{C}$$

$$t = \frac{V_0 C}{I_L} \quad (2-4)$$

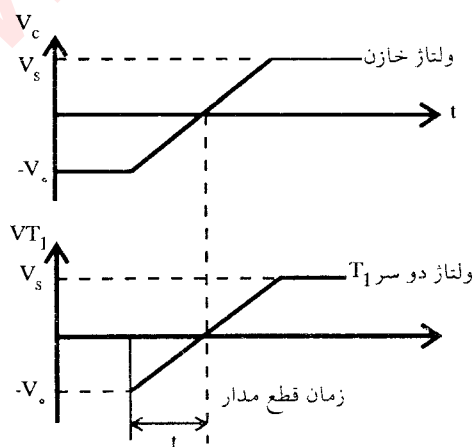
همان طوری که از معادله فوق برمی آید زمان قطع مدار با جریان بار نسبت عکس دارد، در جریان بار کم این زمان زیاد و در جریان بار زیاد، این زمان کم است. البته در یک مدار



شکل ۴-۸ مدار کموتاسیون ضربه



(الف) مدار



(ب) شکل موجها

شکل ۴-۹ مدار معادل و شکل موجها

کمو تاسیون ایده‌ال بایستی این زمان مستقل از جریان بار باشد تا خاموش شدن T_1 تضمین گردد. همانطوریکه در مثال ۳-۴ نشان داده خواهد شد با قرار دادن یک دیود و اندوکتانس بموازات تریستور اصلی، زمان تخلیه خازن شتاب گرفته و زمان قطع تا حدودی مستقل از جریان بار می‌گردد.

حال به تشریح نحوه کمو تاسیون خودی که در خاموش شدن T_3 در مدار کمو تاسیون ضربه انجام گرفت، می‌پردازیم. در حقیقت با آتش شدن T_3 یک مدار LC خواهیم داشت و مطابق آنچه که در مورد مدار شامل C، L و دیود D در شکل ۷-۴ ب، گفته شد، در اینجا صادق است. در خلال نیم سیکل ولتاژ خازن از $-V_0$ تا $+V_0$ تغییر می‌یابد و جریان به صفر می‌رسد و در نتیجه تریستور خودبخود قطع می‌گردد. برای تحلیل بیشتر همانطوریکه گفته شد مدار شکل ۱۰-۴ را در نظر می‌گیریم. در این حالت فرض می‌شود که خازن بدون بار اولیه است. وقتی تریستور T_1 آتش می‌شود، جریان شارژ خازن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_s = v_L + v_c = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + v_c(0) \quad (3-4)$$

با شرط اولیه $v_c(0) = 0$ و $i(0) = 0$ از حل معادله فوق مقدار جریان بدست می‌آید،

$$i(t) = V_s \sqrt{C/L} \sin \omega_m t \quad (4-4)$$

که در آن $\omega_m = 1/\sqrt{LC}$ است. ولتاژ خازن از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$v_c(t) = V_s (1 - \cos \omega_m t) \quad (5-4)$$

در $\omega_m t = \pi$ یعنی پس از گذشت زمان $\pi \sqrt{LC} = t_0 = \pi / \omega_m$ ، جریان مدار به صفر می‌رسد و تریستور T_1 خودبخود خاموش (قطع) می‌شود و کمو تاسیون خودی تحقق می‌یابد. طی زمان t_0 که به زمان کمو تاسیون^۱ موسوم است خازن تا سطح $2V_s$ شارژ شده است. شکل موج در شکل ۱۰-۴ ب نشان داده شده است.

مدار دیگری که در رابطه با کمو تاسیون خودی مورد بررسی قرار می‌گیرد در شکل ۱۱-۴ نشان داده شده است. در اینجا خازن دارای بار اولیه V_0 است. وقتی تریستور آتش می‌شود جریان مدار از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + v_c(0) = 0 \quad (6-4)$$

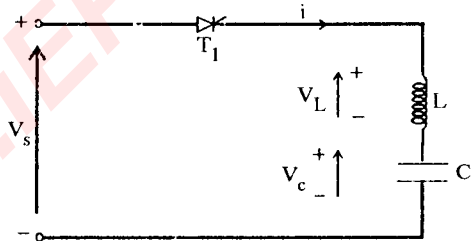
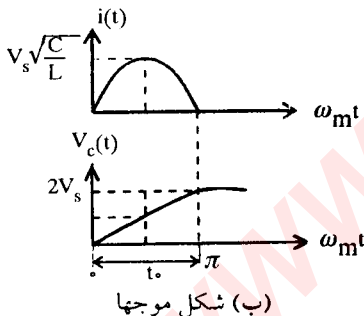
که در آن $v_c(0) = -V_0$ و $i(0) = 0$ است. از حل معادله فوق داریم.

$$i(t) = V_s \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_m t \quad (7-4)$$

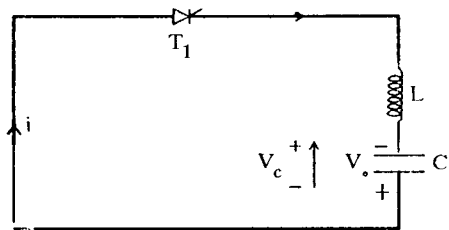
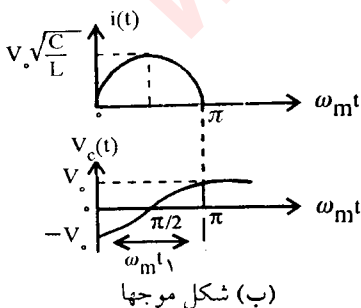
ولتاژ خازن برابر خواهد بود با

$$v_c(t) = -V_0 \cos \omega_m t \quad (8-4)$$

پس از گذشت $t_0 = t_r = t_0 = \pi \sqrt{LC}$ از گذشت V_0 ولتاژ تا ولتاژ V_0 در جهت عکس شارژ می‌گردد. یعنی همانطوریکه قبلاً گفته شد در خلال نیم سیکل ولتاژ خازن از $-V_0$ تا $+V_0$ تغییر پیدا می‌کند، همانطوریکه در شکل ۴-۱۱ ب ملاحظه می‌شود. زمان t_r زمان معکوس شدن^۱ نامیده می‌شود. در اینجا به حل چند مثال می‌پردازیم تا مفهوم کموتاسیون بیشتر آشکار گردد.



شکل ۴-۱۰ مدار کموتاسیون خودی



شکل ۴-۱۱ مدار کموتاسیون خودی

مثال ۲-۴

یک مدار کموتاسیون ضربه در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده است. اگر $V_s = 200V$ ، $C = 5\mu F$ و $R = 10\Omega$ و $V_o = V_s$ باشد، زمان قطع مدار را حساب کنید.
 حل - در شرایط کموتاسیون، یعنی وقتی T_1 آتش می‌شود، ولتاژ خازن در دوسر T_1 قرار می‌گیرد که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$v_c = \frac{1}{C} \int i dt + v_c(0)$$

$$V_s = v_c + R i$$

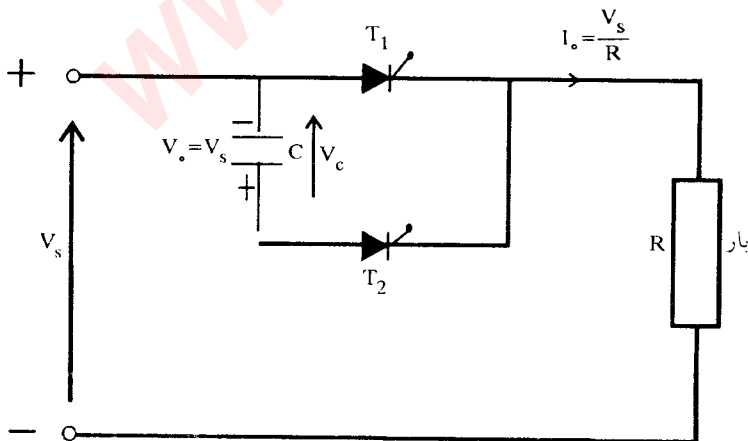
با توجه به شرایط اولیه $v_c(0) = -V_o = -V_s$ از حل معادلات فوق داریم

$$v_c(t) = V_s (1 - e^{-t/RC})$$

با مساوی صفر قرار دادن این معادله زمان قطع بدست می‌آید،

$$1 - e^{-t/RC} = 0 \rightarrow t_q = RC \ln 2$$

با توجه به مقادیر $R = 10\Omega$ و $C = 5\mu F$ $t = 34/\mu s$ خواهد شد.



شکل ۱۲-۴ مدار کموتاسیون ضربه با بار اهمی

مثال ۳-۴

در مدار کموتاسیون شکل ۱۳-۴، $C=20\mu F$ و $L_1=25\mu H$ است. ولتاژ اولیه خازن برابر ولتاژ ورودی است یعنی $V_0 = V_s = 200V$. اگر جریان بار بین $50A$ و $200A$ تغییر نماید، تغییرات زمان قطع مدار را محاسبه نمایید.

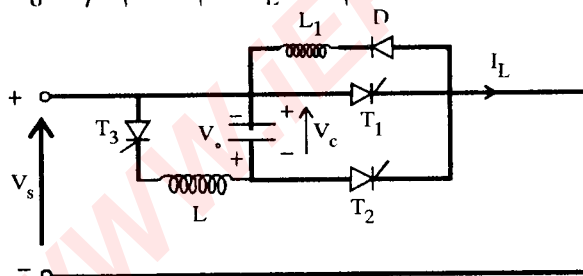
حل - مدار معادل در خلال کموتاسیون در شکل ۱۴-۴ نشان داده شده است. در این شکل داریم،

$$i_c = i + I_L$$

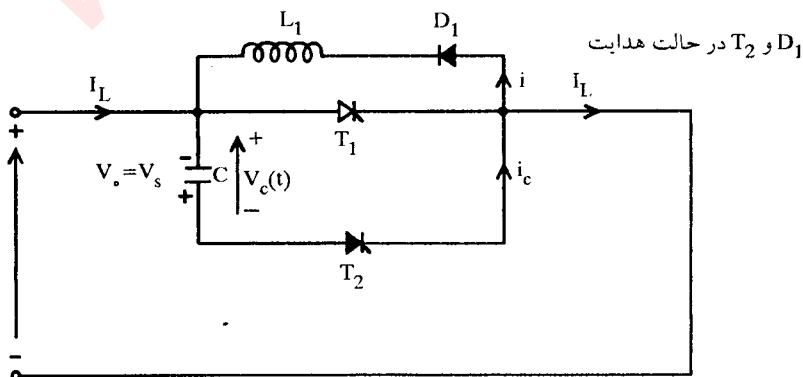
$$v_c = \frac{1}{C} \int i_c dt + v_c(0) = -L_1 \frac{di}{dt} = -L_1 \frac{di_c}{dt}$$

با توجه به شرایط اولیه $i_c(0) = I_L$ و $v_c(0) = -V_0 = -V_s$ از حل معادلات فوق جریان خازن بدست می‌آید یعنی

$$i_c(t) = V_0 \sqrt{C/L_1} \sin \omega_1 t + I_L \cos \omega_1 t$$



شکل ۱۳-۴ مدار کموتاسیون ضربه



شکل ۱۴-۴ مدار معادل

ولتاژ دو سر خازن برابر است با

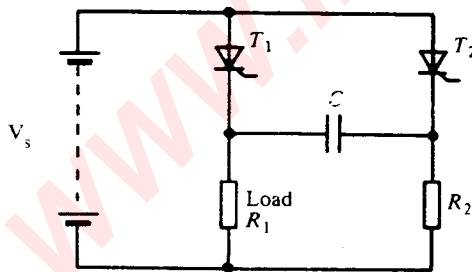
$$v_c(t) = I_L \sqrt{L_1/C} \sin \omega_1 t - V_0 \cos \omega_1 t$$

که در آن $\omega = 1/\sqrt{L_1 C}$ است. زمان قطع مدار با شرط $v_c(t) = 0$ بدست می‌آید بنابراین

$$I_L \sqrt{L_1/C} \sin \omega_1 t - V_0 \cos \omega_1 t = 0$$

$$t_q = \sqrt{L_1 C} \tan^{-1} \left(\frac{V_0}{I_L} \sqrt{C/L_1} \right) \quad (9-4)$$

با توجه به مقادیر داده شده برای $I_L = 50 \text{ A}$ ، $t = 29 \mu\text{s}$ و برای $I_L = 100 \text{ A}$ ، $t = 23/7 \mu\text{s}$ و برای $I_L = 200 \text{ A}$ ، $t = 16/3 \mu\text{s}$ بدست می‌آید. بنابراین ملاحظه می‌شود که با افزایش جریان بار از 50 A به 200 A ، زمان قطع مدار از $29 \mu\text{s}$ به $16/3 \mu\text{s}$ کاهش می‌یابد که این تغییرات خیلی زیاد نیست و با قرار دادن دیود بیشتر این جریان تا حدودی مستقل از بار می‌شود.

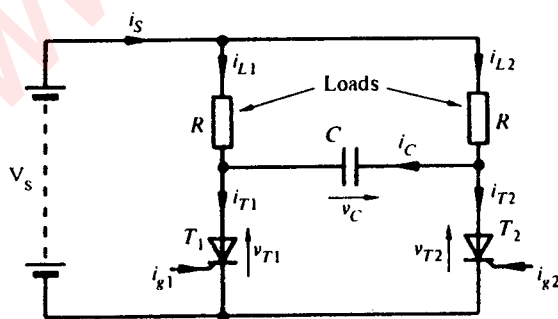


شکل ۴-۱۵ مدار کموتاسیون با خازن موازی که در آن از اندوکتانس استفاده نشده است.

مدار کموتاسیون دیگری در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است که در آن از بکار بردن اندوکتانس اجتناب شده است. اصول کار آن به این ترتیب است که وقتی ترستور T_1 آتش می‌شود منبع تغذیه (باطری) V_s به بار R_1 متصل می‌شود و همزمان خازن C از طریق مقاومت R_2 تا ولتاژ V_s شارژ می‌شود. با آتش کردن T_2 ، ولتاژ خازن بدو سر T_1 قرار گرفته آنرا خاموش می‌نماید. ترستور T_2 روشن باقی می‌ماند و مقاومت R_2 را به منبع متصل می‌کند، خازن C از طریق R_1 ، T_2 و منبع تغذیه در جهت مخالف شارژ می‌شود. حال اگر T_1 مجدداً آتش شود منبع

تغذیه به بار R_1 متصل شده و همزمان با اعمال شدن ولتاژ خازن به دو سر T_1 ، آنرا خاموش می‌نماید و این سیکل دوباره تکرار می‌شود. از معایب این مدار این است که مقاومت R_p باعث تلفات می‌شود زیرا در فواصلی که بار قطع است از آن جریان عبور می‌کند. البته با انتخاب مقادیر بزرگتر برای R_p (نسبت به R_1) می‌توان این تلفات را به حداقل رساند لیکن با این عمل زمان شارژ خازن طولانی‌تر شده و در نتیجه سرعت سوئیچ شدن بار، کاهش می‌یابد.

در شکل ۴-۱۶ مدار کموتاسیون دیگری نشان داده شده است که در آن انتقال جریان بین دو بار انجام می‌شود. یعنی اینکه به وسیله این مدار کموتاسیون، جریان بار از تریستوری که در حال قطع شدن است به تریستور دیگری که حامل جریان بار دیگری است، انتقال می‌یابد. چنین شیوه کموتاسیون بخصوص در مدار معکوس کننده (اینورترها) کاربرد فراوان دارد. به این نوع کموتاسیون اصطلاحاً "کموتاسیون تکمیلی" ^۱ گفته می‌شود. وقتی تریستور T_1 آتش می‌شود، بار R_1 به منبع تغذیه متصل می‌گردد و همزمان خازن C از طریق R_p تا ولتاژ V_s شارژ می‌شود. پلاریته خازن در شکل مشخص شده است. وقتی که تریستور T_1 آتش می‌شود، خازن شارژ شده در دو سر T_1 قرار گرفته و بار R_p به منبع تغذیه متصل می‌شود. در اینصورت T_1 در گرایش (بایاس) معکوس قرار گرفته و با کموتاسیون ضربه خاموش می‌گردد. وقتی که تریستور T_1 قطع می‌شود ولتاژ خازن از طریق R_1 ، T_1 و منبع تغذیه به V_s - معکوس می‌گردد. حال اگر تریستور T_1 مجدداً آتش شود، تریستور T_1 خاموش و سیکل فوق تکرار می‌شود. از آن جایی که عمل قطع تریستور با کموتاسیون ضربه انجام می‌گیرد، به این نوع کموتاسیون گاهی کموتاسیون ضربه تکمیلی ^۲ نیز گفته می‌شود.



شکل ۴-۱۶ مدار کموتاسیون تکمیلی

مثال ۴-۴

در مدار کموتاسیون شکل ۴-۱۶، $R_1 = R_2 = R = 5\Omega$ ، $C = 10\mu F$ و ولتاژ تغذیه $V_s = 100V$ است. زمان قطع مدار را حساب کنید.

حل - اگر فرض کنیم که در کموتاسیون قبلی، خازن C تا ولتاژ تغذیه V_s شارژ شده است، مدار معادل این مدار کموتاسیون در خلال پریود کموتاسیون مشابه مدار ۴-۱۲ است. بنابراین جریان خازن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_s = \frac{1}{C} \int i dt + v_c(0) + Ri$$

با $v_c(0) = -V_0 = -V_s$ از حل معادله فوق داریم

$$i(t) = \frac{2V_s}{R} e^{-t/RC}$$

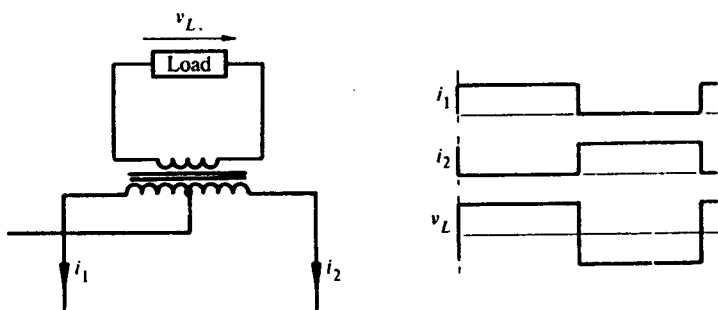
ولتاژ دو سر خازن برابر است با

$$v_c(t) = V_s(1 - 2e^{-t/RC})$$

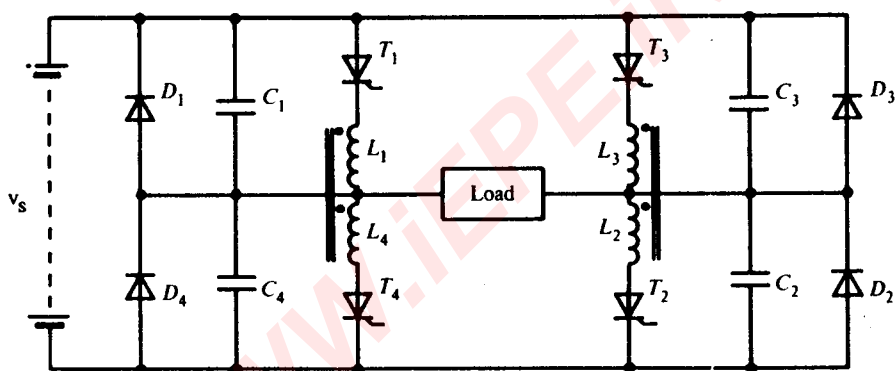
با اعمال شرط $v_c(t) = 0$ ، زمان قطع t بدست می‌آید، یعنی

$$t = RCLn2 = 5 \times 10 \ln 2 = 34.7 \mu s$$

ذکر این نکته ضروری است که با مراجعه به شکل ۴-۱۷ می‌توان دریافت که چگونه با عمل سوئیچینگ بین دو بار مساوی، یک معکوس کننده (اینورتر) ساده بدست می‌آید. که در آن بار ثانویه از طریق دو سیم پیچ اولیه نقش دوار مجزای شکل ۴-۱۶ را ایفاء می‌نماید. قطع و وصل شدن متناوب و به فواصل زمانی مساوی تریتورها، منجر به تولید یک ولتاژ متناوب در دو سر بار واقع در ثانویه ترانسفورماتور می‌گردد. مدار پل با کموتاسیون تکمیلی موسوم به مک‌موری - بدفورد^۱ در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. اگر تریتورهای T_1 و T_2 روشن باشند، منبع تغذیه به بار متصل می‌گردد. متناوباً، با روشن شدن T_3 و T_4 بار در جهت مخالف به منبع تغذیه متصل می‌شود. بنابراین در دو بار یک ولتاژ متناوب ظاهر می‌شود.



شکل ۴-۱۷ تبدیل مدار ۴-۱۶ به یک اینورتر ساده

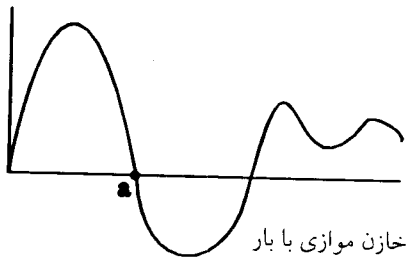
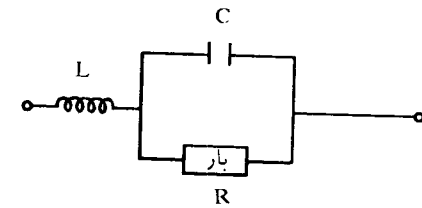


$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C \quad L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L$$

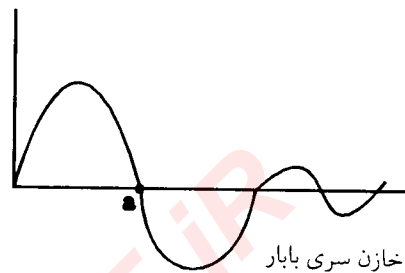
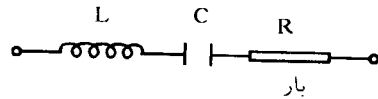
شکل ۴-۱۸ مدار مک موری - بدفورد

۴-۴-۲ کموتاسیون رزونانسی

همان طوری که قبلاً در مورد کموتاسیون خودی گفتیم می توان از خاصیت نوسان خودی مجموعه خازن - اندوکتانس، جهت خاموش کردن تریستور استفاده کرد لیکن در این روش ضرورتی نداشت که عناصر کموتاسیون، با بار یک مدار رزونانس ایجاد کنند. در روش کموتاسیون رزونانسی^۱، عناصر کموتاسیون L و C و بار مطابق شکل ۴-۱۹ و ۴-۲۰ تشکیل مدار رزونانس زیرمیرا^۲ می دهند، در نتیجه در اثر اعمال ولتاژ dc جریان مدار مطابق شکل از صفر می گذرد و معکوس می شود. اگر یک تریستور بصورت سری در مدار قرار گیرد، وقتی جریان آن در نقطه a به صفر می رسد و می خواهد معکوس گردد، خاموش می شود.

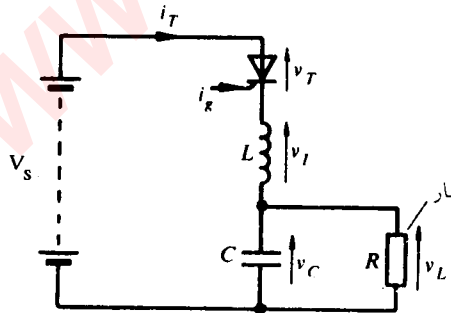


شکل ۴-۲۰ کموتاسیون رزونانسی



شکل ۴-۱۹ کموتاسیون رزونانسی

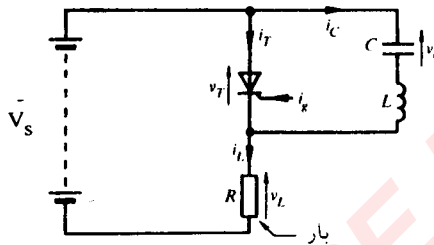
مدار کموتاسیون رزونانس سری در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. عملکرد این مدار به این صورت است که با آتش کردن تریتور، منبع تغذیه به مدار نوسانی زیرمیرا متصل می‌شود و یک نوسان جریان در مدار برقرار می‌گردد و در نتیجه پس از نیم‌سیکل جریان تریتور به صفر رسیده و می‌خواهد معکوس گردد. بنابراین تریتور در اولین صفر جریان بطور خودکار قطع می‌گردد. سپس خازن در بار تخلیه می‌شود. زمان وصل تریتور به فرکانس نوسان میرا بستگی دارد.



شکل ۴-۲۱ کموتاسیون رزونانس سری

مدار رزونانس موازی در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است. در این مدار در پریود خاموشی تریتور، خازن C تا ولتاژ تغذیه شارژ می‌شود. با آتش کردن تریتور، منبع تغذیه به بار متصل می‌گردد و همزمان نوسان آغاز می‌گردد. در صورتیکه جریان نوسانی از جریان بار (E/R) بزرگتر باشد، جریان تریتور می‌خواهد معکوس گردد و در نتیجه تریتور خاموش

می‌شود. با توجه به اینکه مطابق شکل جریان تریستور از تفاضل جریان بار $i_L = E/R$ و جریان نوسانی i_c بدست می‌آید یعنی $i_T = i_L - i_c$ ، وقتی جریان نوسانی i_c از جریان بار i_L بزرگتر باشد، پس از گذشت زمان (کمتر از یک سیکل) جریان i_T به صفر تنزل می‌یابد و در نتیجه تریستور قطع می‌شود. با کاهش مقاومت بار R ، جریان بار از جریان نوسانی بیشتر شده و شرایط فوق پیش نمی‌آید. با افزایش مقاومت R شارژ خازن کند می‌شود و در نتیجه مدت زمان قطع طولانی می‌شود. از اینرو، این مدار برای مقاومت بار ثابت مناسب است.

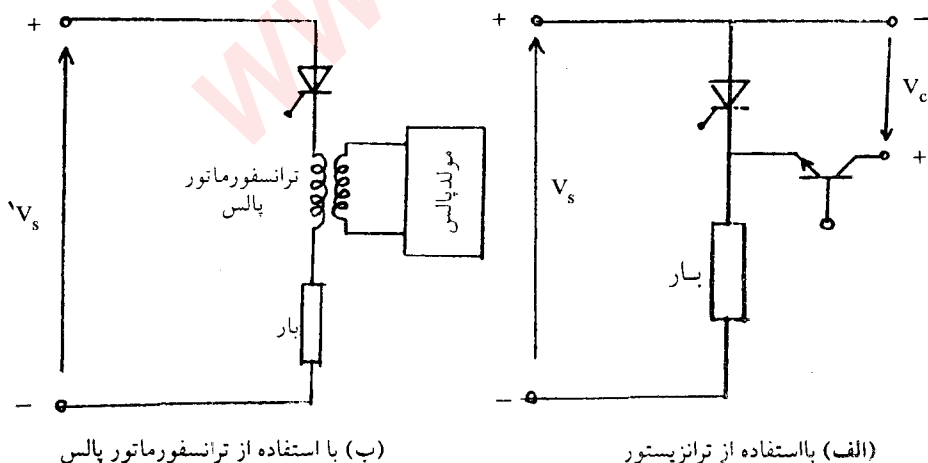


شکل ۴-۲۲ کموتاسیون رزونانس موازی

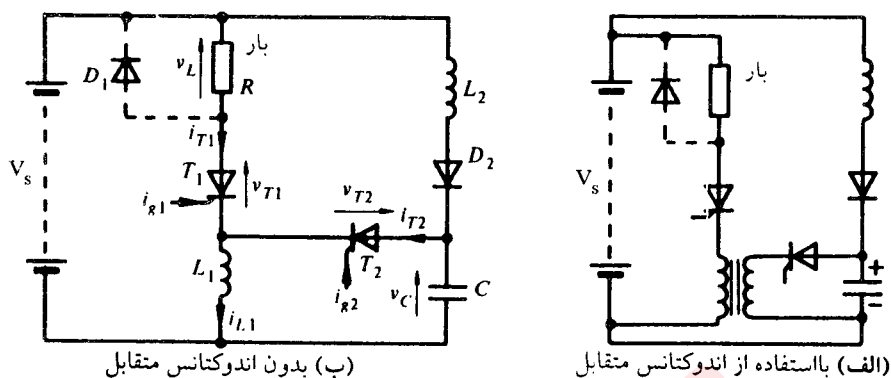
۴-۳-۴ کموتاسیون با پالس خارجی^۱

همانطوری که در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است یک منبع ولتاژ خارجی برای خاموش کردن تریستور مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۴-۲۳ الف، با استفاده از یک سوئیچ ترانزیستوری، منبع ولتاژ خارجی در دو سر تریستور در حال هدایت قرار گرفته آنرا خاموش می‌نماید. در شکل ۴-۲۳ ب، از یک ترانسفورماتور پالس استفاده شده است که از طریق آن ولتاژ کموتاسیون به مدار اصلی اعمال می‌گردد. در حقیقت در این حالت ولتاژی بزرگتر و مخالف ولتاژ dc منبع تغذیه، در دوسر اندوکتانس سری شده با تریستور حامل جریان بار، ایجاد می‌شود که باعث خاموش شدن تریستور می‌گردد. البته مدت زمان اعمال این ولتاژ بایستی برای خاموش کردن تریستور کافی باشد. با مراجعه به شکل ۴-۲۴ الف می‌توان دریافت که چگونه یک خازن باردار می‌تواند از طریق اندوکتانس متقابل (کوپلاژ ترانسفورماتوری)، ولتاژی را در مدار اصلی القاء نماید. در صورتی که این ولتاژ بزرگتر از ولتاژ تغذیه (dc) باشد، تریستور خاموش می‌گردد. البته در شکل ۴-۲۴ ب، این عمل بدون دخالت اندوکتانس متقابل انجام می‌گیرد. در این مدار وقتی که منبع تغذیه به مدار متصل می‌شود، جریانی از L_p ، D_p و C عبور می‌کند که خازن را همانطوری که در شکل ۴-۱۰ ملاحظه کردیم تا دو برابر ولتاژ تغذیه شارژ می‌کند و دیود D_p از معکوس شدن جریان ممانعت به عمل می‌آورد. با آتش کردن T_p ، بار از

طریق اندوکتانس L_1 به منبع تغذیه متصل می‌گردد. وقتی که T_1 آتش می‌شود، ولتاژ خازن C در دو سر اندوکتانس L_1 قرار گرفته، ولتاژ معکوس به دو سر T_1 اعمال گردیده، آنرا خاموش (قطع) می‌نماید. مدار رزونانس متشکل از L_1 و C تقریباً نیم‌سیکل نوسان نموده و جریان به صفر می‌رسد و T_1 خاموش (قطع) می‌گردد. حال خازن از طریق L_1 و D_1 مجدداً شارژ شده و برای توالی بعدی آماده می‌گردد. در شرایط توصیفی فوق، فرکانس رزونانس L_1C خیلی کمتر از آن L_1C است طوریکه خازن C در اندوکتانس L_1 تخلیه شده و مستقل از L_1 می‌باشد. از اینرو برای تحقق شرایط فوق لازم است اندوکتانس L_1 بمراتب بزرگتر از L_1 باشد. البته در اینصورت زمان قطع جریان بار افزایش می‌یابد. اگر چنانچه بجای دیود D_1 از یک ترستور استفاده شود که پس از خاموش شدن (قطع) T_1 آتش گردد، در اینصورت می‌توان از اندوکتانس L_1 کوچکتری استفاده کرد و زمان قطع بار را کاهش داد. نکته‌ای که باید در توصیف این مدار اضافه کرد این است که وقتی ترستور T_1 قطع می‌شود، خازن C تا سطح ولتاژ دو برابر ولتاژ تغذیه $2V_s$ (با پلاریته سطح پایینی خازن مثبت) باردار باقی می‌ماند. بنابراین وقتی که از طریق L_1 و D_1 به منبع تغذیه متصل می‌شود، پس از نیم‌سیکل نوسان (مطابق آنچه که قبلاً در رابطه با شکل ۴-۱۰ بیان کردیم) دیود از معکوس شدن جریان جلوگیری می‌کند و خازن تا ولتاژ $4V_s$ شارژ می‌شود. اگر یک دیود موازی معکوس در دوسر ترستور T_1 قرار گیرد، پس از نیم‌سیکل نوسان از معکوس شدن جریان پیشگیری نشده و در نتیجه یک نوسان کامل در L_1C صورت می‌گیرد و خازن تا ولتاژ $2V_s$ شارژ می‌گردد. و فرایند تکرار می‌شود.

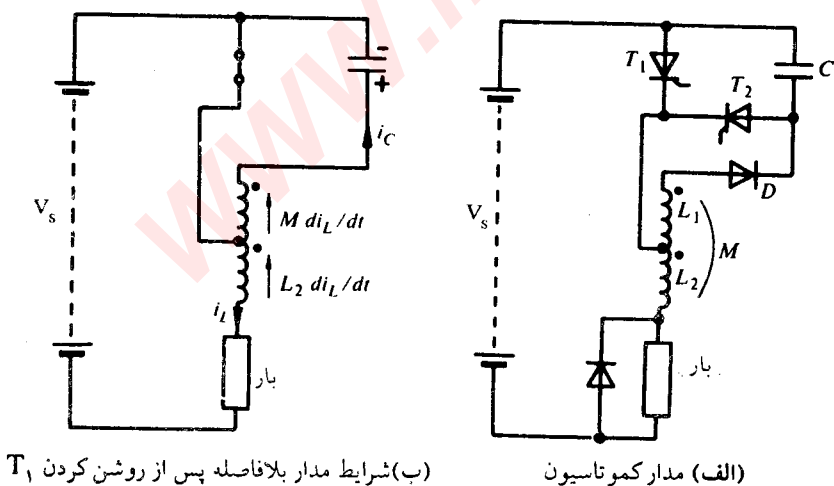


شکل ۴-۲۳ کموتاسیون با منبع خارجی



شکل ۴-۲۴ کموتاسیون با پالس خارجی

در مدار نشان داده شده در شکل ۴-۲۵ از کموتاسیون پالس خارجی و اندوکتانس متقابل استفاده شده است. این مدار دارای این مزیت است که وقتی بار به منبع تغذیه متصل می‌شود، خازن کموتاسیون بطور خودکار در جهت صحیح شارژ شده و برای عمل خاموش کردن بعدی آماده می‌گردد.



شکل ۴-۲۵ کموتاسیون پالس به کمک اندوکتانس متقابل

با مراجعه به شکل ۴-۲۵ ب، وقتی T_1 آتش می‌شود در اثر افزایش جریان بار، ولتاژی در L_1 القاء می‌شود که این ولتاژ همچنین در اثر اندوکتانس متقابل، ولتاژی را در L_2 القاء

می‌نماید. ولتاژ القاء شده در L_1 جریانی را در مدار برقرار می‌کند که خازن C را در پلاریته نشان داده شده در شکل، شارژ می‌نماید دیود D از تخلیه شدن خازن ممانعت به عمل می‌آورد. وقتی تریستور T_1 آتش می‌شود ولتاژ خازن در دوسر T_1 قرار می‌گیرد و آنرا خاموش (قطع) می‌کند و خازن در جهت معکوس شارژ می‌شود. وقتی T_1 مجدداً آتش می‌شود، مدار شامل C ، L_1 و D تشکیل یک مدار نوسانی می‌دهد که در نتیجه خازن در جهت نشان داده شده در شکل ۴-۲۵ ب شارژ می‌شود، ولتاژ ناشی از القاء متقابل ($M di_1/dt$) همچنین بر مقدار بار خازن می‌افزاید.

۴-۵ - مسائل حل شده

مسئله ۴-۱

در شکل ۴-۲۶ مدار کموتاسیون خودی تریستور نشان داده شده است. اگر تریستور T_1 در لحظه $t=0$ وصل شود، تعیین کنید که بعد از خاموش شدن T_1 ، مدت زمان هدایت تریستور و ولتاژ دو سر خازن چقدر است. مشخصات اجزاء مدار عبارتند از، $L = 10 \mu H$ ، $C = 50 \mu F$ و $V_s = 200 V$. جریان اولیه اندوکتانس $I_{L1} = 250 A$ است.

حل -

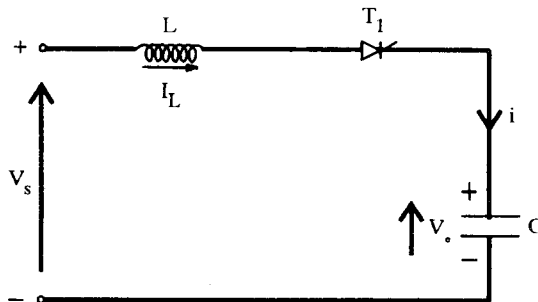
$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + v_c(0) = V_s$$

معادله مدار عبارتند از،

با توجه به $i(0) = I_L$ و $v_c(0) = V_0 = V_s$ ، ولتاژ و جریان خازن پس از حل معادله فوق از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$i(t) = I_L \cos \omega_m t$$

$$v_c(t) = I_L \sqrt{L/C} \sin \omega_m t + V_s$$



شکل ۴-۲۶ مدار کموتاسیون خودی تریستور

با توجه به معادله جریان فوق، جریان در $\omega_m t_o = \frac{\pi}{2}$ به صفر می‌رسد و در نتیجه ترستور در t_o قطع می‌شود و بنابراین مدت زمان هدایت ترستور که برابر t_o است از این رابطه به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{\sqrt{LC}} t_o = \frac{\pi}{2} \rightarrow t_o = 0.5\pi \sqrt{LC}$$

در لحظه t_o که ترستور قطع می‌شود ولتاژ دو سر خازن برابر خواهد بود با

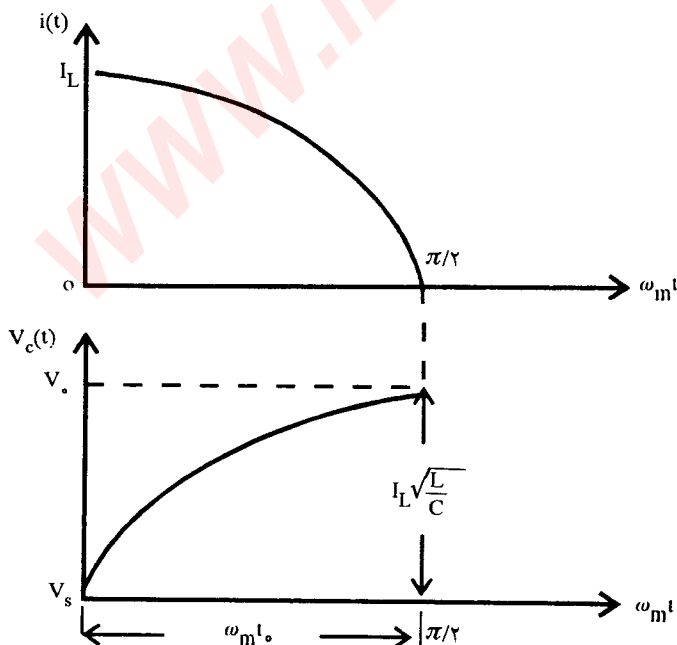
$$v_c(t_o) = V_s + I_L \sqrt{L/C}$$

با قرار دادن مقادیر مربوط به اجزاء سیستم، ولتاژ دو سر خازن و زمان هدایت ترستور بدست می‌آید.

$$t_o = 0.5\pi \sqrt{10 \times 10^{-6} \times 50 \times 10^{-6}} = 35/12 \times 10^{-6} = 35/12 \mu s$$

$$V_c = 200 + 250 \sqrt{\frac{10}{50}} = 200 + 111/80 = 311/80 \text{ V}$$

شکل موج جریان و ولتاژ در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۷ شکل موج‌های جریان و ولتاژ

مساله ۲-۴

در مدار کموتاسیون ضربه‌ای شکل ۴-۸، $C = 20 \mu F$ است. ولتاژ ورودی V_s بین ۱۸۰ تا ۲۲۰ ولت تغییر می‌کند و جریان بار I_L بین ۵۰ و ۲۰۰ آمپر تغییر می‌کند حداقل و حداکثر مقدار t_q (زمان قطع) را محاسبه کنید.

حل - مدار معادل این مدار کموتاسیون در پریود کموتاسیون در شکل ۴-۹ الف نشان داده شده است. در شرایط کموتاسیون وقتی T_2 آتش می‌شود ولتاژ خازن در دو سر ترستور T_1 قرار می‌گیرد که مقدارش از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$v_c = \frac{1}{C} \int i dt + v_c(0)$$

$$V_s = v_c + Ri$$

با توجه به اینکه در شرایط اولیه $-V_o = -V_s = v_c(0)$ می‌باشد از حل معادلات فوق داریم

$$v_c(t) = V_s(1 - e^{-t/RC})$$

زمان قطع وقتی است که ولتاژ خازن به صفر برسد یعنی،

$$1 - e^{-t_q/RC} = 0 \quad t_q = RCLn2$$

برای وقتی که $V_s = 180V$ و $I_L = 50A$ است مقدار مقاومت برابر است با

$$R = \frac{180}{50} = 3.6 \Omega$$

$$t_q = 3.6 \times 20 \times 10^{-6} \ln 2 = 50 \times 10^{-6} = 50 \mu s$$

برای وقتی که $V_s = 220V$ و $I_L = 200A$ است مقدار مقاومت برابر است با

$$R = \frac{220}{200} = 1.1 \Omega$$

$$t_q = 1.1 \times 20 \times 10^{-6} \ln 2 = 15/25 \times 10^{-6} = 15/25 \mu s$$

بنابراین وقتی ولتاژ و جریان بار تغییر می‌کنند زمان قطع از حداقل $15/25 \mu s$ تا حداکثر $50 \mu s$ تغییر می‌نماید.

مساله ۳-۴

در مدار کموتاسیون ضربه‌ای شکل ۴-۸، مقدار C و L را تعیین کنید در صورتی که $V_s = 220V$ و جریان بار $I_L = 150A$ ، زمان قطع $t_q = 15\mu s$ باشد و جریان معکوس تا ۱۵۰٪ جریان I_L محدود گردد.

حل - با توجه به مسأله قبل زمان قطع از رابطه زیر بدست می‌آید که در آن مقدار مقاومت R ، با داشتن ولتاژ و جریان بار قابل محاسبه است، بنابراین

$$t_q = RCLn2$$

$$R = \frac{V_s}{I_L} = \frac{220}{150} \Omega$$

$$15 \times 10^{-6} = \frac{220}{150} CLn2$$

$$C = \frac{15 \times 10^{-6} \times 150}{220 \cdot L \ln 2} = 14/75 \times 10^{-6} = 14/75 \mu F$$

برای محاسبه نابایستی مدار LC را که پس از آتش شدن ترستور T_3 ایجاد می‌شود در نظر گرفت. این مدار مشابه مدار شکل ۴-۱۱، ترستور T_3 با کموتاسیون خودی قطع می‌شود. با توجه به معادله (۴-۷) حداکثر مقدار جریان از رابطه زیر بدست می‌آید و نابایستی از ۱۵۰٪ جریان I_L بیشتر شود بنابراین،

$$I_{max} = V_o \sqrt{C/L}$$

$$\frac{150}{100} \times 150 = 220 \sqrt{\frac{14/75 \times 10^{-6}}{L}}$$

$$L = 14/10 \mu H$$

مساله ۴-۴

مدار کموتاسیون (چاپر ایده‌ال) شکل ۴-۶ که در فرکانس $500Hz$ کار می‌کند، باری به مقاومت 3Ω و اندوکتانس $9mH$ را از طریق یک باتری $60V$ تغذیه می‌کند. با فرض اینکه باتری بدون تلفات باشد و دو سر بار به یک دیود کموتاسیون متصل باشد، شکل موج جریان بار را برای حالتی که نسبت به on/off برابر $\frac{1}{4}$ باشد، حساب کنید. همچنین مقدار متوسط جریان و ولتاژ را در هر پریود محاسبه نمایید.

حل - در چاپر ایده‌ال در خلال پریود روشن بودن (on) تمام ولتاژ باتری در دو سر بار قرار

می‌گیرد و در خلال پریود خاموش بودن (Off) ولتاژ دو سر بار صفر است. در پریود روشن، باطری به یک بار RL متصل می‌گردد که دارای جریان اولیه I_1 است. در خلال پریود خاموشی، جریان بار از طریق دیود در بار RL از مقدار اولیه I_1 تنزل می‌یابد. شکل زیر، شکل موج جریان و ولتاژ را برای هر دو حالت نشان می‌دهد. اگر مدت زمان روشن بودن (وصل) برابر t_1 و مدت زمان خاموش بودن (قطع) برابر t_2 باشد، جریان در پریودهای وصل و قطع به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

$$i = I_1 + \left(\frac{E}{R} - I_1\right)(1 - e^{-t/T}) = I_2 \quad \text{وقتی } t = t_1 \text{ پریود وصل}$$

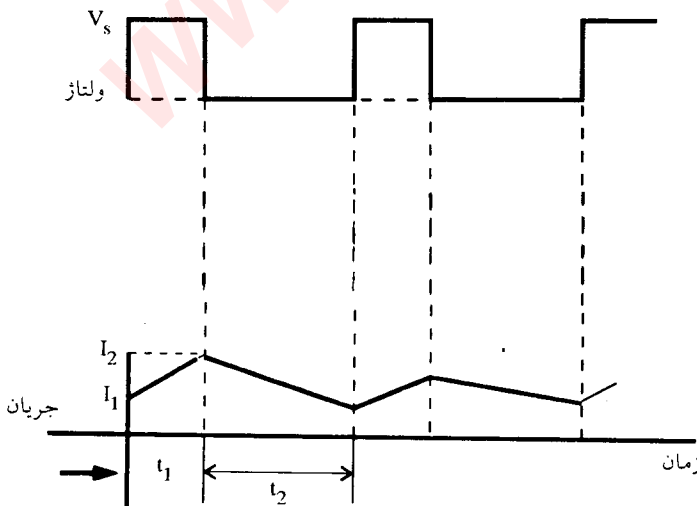
$$i = I_2 e^{-t/T} = I_1 \quad \text{وقتی } t = t_2 \text{ پریود قطع}$$

از معادلات بالا داریم

$$I_2 = \frac{E}{R} \frac{1 - e^{-t_1/T}}{1 - e^{-(t_1+t_2)/T}} \quad I_1 = I_2 e^{-t_2/T}$$

$$\text{در مساله فوق } \frac{E}{R} = \frac{60}{30} = 20 \text{ و } T = \frac{L}{R} = \frac{0.009}{3} = 0.003 \text{ S} \quad \text{در فرکانس } 500 \text{ Hz}$$

$$I_1 + I_2 = \frac{1}{500} = 0.002 \text{ S}$$



شکل موج جریان و ولتاژ

برای نسبت $\frac{on}{off} = \frac{1}{4}$ داریم،

$$I_T = 5/13 \text{ A و } I_1 = 3/0.1 \text{ A}$$

مقدار متوسط جریان و ولتاژ برابر است با،

$$V_{\text{متوسط}} = 60 \times \left(\frac{1}{5}\right) = 12 \text{ V}$$

$$I_{\text{متوسط}} = \frac{12}{3} = 4 \text{ A}$$

مساله ۴-۵

در مدار شکل ۴-۱۵ که یک چارپا با خازن موازی است، اندازه خازن مورد لزوم را بدست آورید در صورتی که بار 6Ω بوده و از باتری 36V تغذیه می‌گردد. زمان قطع لازم برای تریستور T_1 برابر $80\mu\text{s}$ است. اگر $R_2 = 5R_1$ باشد حداقل زمان وصل تریستور T_1 را بدست آورید. از تلفات تریستور صرف‌نظر کنید.

حل - در شکل ۴-۱۵ وقتی تریستور T_1 آتش می‌شود خازن تا ولتاژ V_s شارژ می‌شود. با روشن کردن T_2 این ولتاژ در دو سر تریستور T_1 قرار گرفته آنرا خاموش می‌نماید ولتاژ دو سر خازن (یا تریستور T_1) در این حالت با توجه به شکل ۴-۲۸ از رابطه زیر بدست می‌آید،

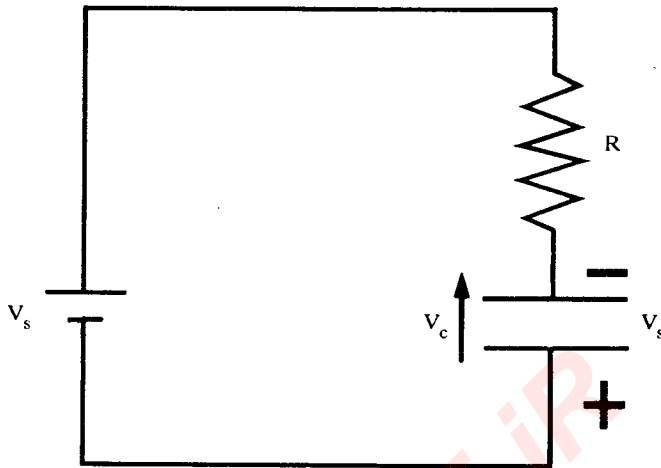
$$V_c = V_s + A e^{-t/\tau}$$

$$-V_s = V_s + A \rightarrow A = -2V_s$$

$$V_c = V_s - 2V_s e^{-t/\tau}$$

بنابراین در لحظه آتش شدن T_2 ، ولتاژ $V_c = -V_s$ در دو سر تریستور T_1 قرار می‌گیرد و در پایان زمان قطع، ولتاژ V_c به صفر کاهش می‌یابد و این زمانی است که رابطه زیر برقرار باشد.

$$0 = V_s - 2V_s e^{-t/\tau}$$



شکل ۲۸-۴

$$e^{-t/\tau} = 0.5 \rightarrow t/\tau = 0.693$$

بنابراین با معلوم بودن $t = 80 \mu s$ مقدار τ معلوم می‌شود یعنی

$$\tau = 80 \times 10^{-6} / 0.693$$

در نتیجه با توجه به $\tau = RC$ مقدار ظرفیت خازن بدست می‌آید.

$$80 \times 10^{-6} / 0.693 = 6C$$

$$C = (80 \times 10^{-6}) / (0.693 \times 6) = 19/2 \mu F$$

وقتی T_1 آتش‌گردد تغییرات ولتاژ روی خازن C برابر است با $V_c = V_s - 2V_s e^{-t/\tau}$ که در آن

$\tau = R_p C$ و $R_p = 5R_1 = 30 \Omega$ است و T_1 باید تا زمانی که $V_c = 0.8V_s$ می‌شود،

روشن بماند که در نتیجه حداقل زمان وصل به شرح زیر محاسبه می‌شود

$$0.8V_s = V_s - 2V_s e^{-t/\tau}$$

$$e^{-t/\tau} = 0.1 \rightarrow e^{-t/\tau} = 10$$

$$e^{-1/\tau} = 10 \rightarrow 1/\tau = \ln 10$$

$$t = 30 \times 19/2 \times 10^{-6} \ln 10 = 1/33 \times 10^{-2} = 1/33 \text{ ms}$$

مساله ۴-۶

از پل کموتاسیون تکمیلی شکل ۴-۱۸ برای تغذیه یک باراهمی 5Ω توسط منبع تغذیه $V = 200 \text{ dc}$ استفاده شده است. با توجه به زمان خاموشی (قطع) $40\mu\text{s}$ برای ترستور، مقادیر مناسب برای اجزاء مدار پیشنهاد کنید. فرض کنید این اجزاء ایده‌آل و بدون تلفات می‌باشند.

حل - شکل ۴-۲۹ بیانگر شرایط خاموشی (قطع) است. نوسان انرژی ذخیره شده $\frac{1}{4} CV^2 + \frac{1}{4} LI^2$ را در فرکانس $1/2\pi\sqrt{2LC}$ در بردارد. زمان قطع $40\mu\text{s}$ بیانگر زمانی است که ولتاژ خازن به نصف مقدار اولیه تنزل می‌یابد.

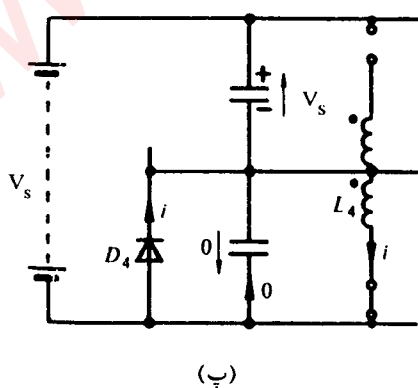
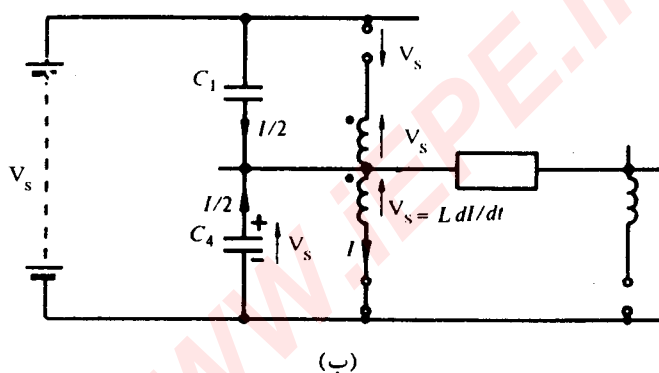
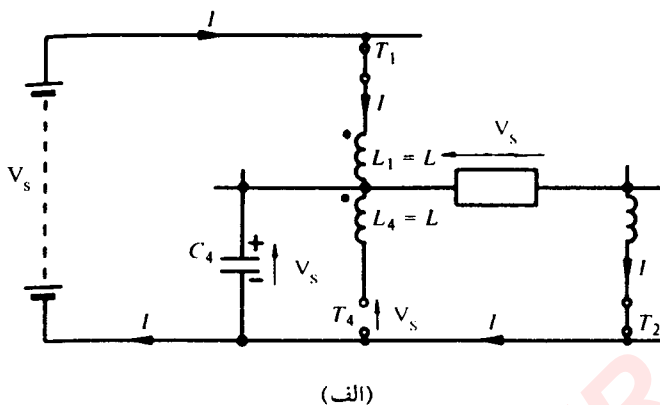
ابتدا خازن در اندوکتانس تخلیه می‌شود و جریان آن با رابطه $i = I_m \sin(\omega t + \phi)$ افزایش می‌یابد و در $t = 0$ داریم $i = 200/5$. ولتاژ خازن برابر است با $L di/dt$ ، بنابراین مدت زمانی که طول می‌کشد تا di/dt به نصف مقدار اولیه‌اش تنزل یابد مدت زمان قطع ترستور بدست می‌آید. در انتخاب مقدار I_{max} لازم است بین اطمینان یافتن از کموتاسیون و اجتناب از تلفات اضافی کموتاسیون مصالحه‌ای صورت گیرد. به طور مثال اگر $I_{max} = 1/5 \times 200/5 = 60 \text{ A}$ انتخاب شود آنگاه $i = 60 \sin(\omega t + \phi)$ خواهد بود که در آن به ازای $i = 40 \text{ A}$ مربوط به $t = 0$ ، منجر به $\phi = 0/73$ می‌گردد.

$di/dt = 60\omega \cos(\omega t + \phi)$ که در $\omega t = 0/459$ به نصف مقدار خود می‌رسد بنابراین داریم:

$$\omega = 0/459 / (40 \times 10^{-6}) = 11478$$

وقتی $(\omega t + \phi) = \pi/2$ باشد ولتاژ خازن صفر است و جریان اندوکتانس در مقدار پیک 60 A است. مقدار باری که C_1 از دست داده است روی C_1 قرار می‌گیرد، از این رو انرژی اضافی ذخیره شده در اندوکتانس L از باطری دریافت می‌شود و برابر است با

$$\int_{\omega t=0}^{\omega t+\phi=\pi/2} 200 \cdot (60/2) \sin(\omega t + \phi) dt = 4472/\omega = \frac{1}{4} L (60^2 - 40^2)$$



شکل ۴-۲۹ وضعیت مدار شکل ۴-۱۸ در شرایط خاموشی (قطع) با بار اهمی (الف) قبل از اینکه T_1 آتش شود (ب) بالا فاصله پس از آتش شدن T_1 (پ) پس از اینکه ولتاژ خازن می خواهد معکوس گردد.

همچنین $\omega = 11478 = 1/\sqrt{LC}$ که در آن $L = 39 \mu H$ و $C = 9/\sqrt{4} \mu F$ است. با مراجعه به شکل ۴-۲۹ پ ملاحظه می شود که جریان در دیود D_1 با $60 A$ شروع می شود و وقتی که انرژی ذخیره شده $LI^2 = 0.7 J$ در هر کموتاسیون تلف می شود، به صفر کاهش می یابد. مقدار di/dt در ترستور T_1 برابر است با $3V/\mu s = 30/9/\sqrt{4} = i/C$

مساله ۴-۷

مدار کموتاسیون رزونانس سری شکل ۴-۲۱ دارای مقادیر $L = 3 mH$, $C = 20 \mu F$ و $R = 50 \Omega$ است. اگر منبع $100 dc$ ولت باشد، مقادیر نامی ترستور را بدست آورید. از کلیه تلفات صرف نظر کنید. همچنین توان بار را برای حالتی که ترستور با فرکانس $400 Hz$ (الف) $200 Hz$ (ب) آتش شود، بدست آورید.

حل - برای تعیین توان بار لازم است عبارتی برای جریان ترستور و ولتاژ بار را بدست آورد. در شکل ۴-۳۰ مدار معادل شکل ۴-۲۱ در حالتی که ترستور روشن شده است (در زمان $t=0$) نشان داده شده است.

فرض کنید در لحظه $t=0$ ولتاژ خازن $v=V_0$ و در همین لحظه $i_1=0$ است. معادلات ولتاژ در این مدار به قرار زیر است:

$$V_s = L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt$$

$$0 = \frac{1}{C} \int i_1 dt - Ri_1 + Ri_r$$

با تبدیل این معادلات به فرم لاپلاسی داریم.

$$\frac{V_s}{s} = sLi_1 + \frac{1}{C} \left[\frac{i_r}{s} + \frac{V_0}{s} C \right]$$

$$0 = \frac{1}{C} \left[\frac{i_r}{s} + \frac{V_0}{s} C \right] + Ri_r - Ri_1$$

پس از حل معادلات فوق داریم

$$i_1 = \frac{V_s}{R} - e^{-\alpha t} \left[\frac{V_s}{R} \cos \omega t + \left(\frac{\alpha V_s}{\omega R} - \frac{V_s}{\omega L} + \frac{V_0}{\omega L} \right) \sin \omega t \right]$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad \omega = \left[\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2RC} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

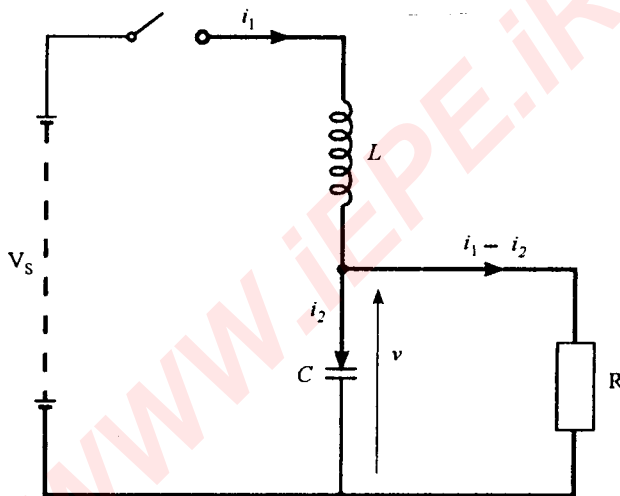
که در آن

$$v = V_s - L \frac{di_1}{dt} = V_s - e^{\alpha t} [(V_s - V_0) \cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} (V_s + V_0) \sin \omega t]$$

در این معادلات i_1 جریان تریستور و v ولتاژ دو سر بار در شرایط روشن بودن تریستور است. با توجه به مقادیر داده شده در مسأله، معادلات زیر حاصل می‌شود.

$$i_1 = 2 - e^{-500t} [2 \cos 40511t + (0/082V_0 - 7/89) \sin 40511t]$$

$$v = 100 - e^{-500t} [(100 - V_0) \cos 40511t + (12/34 + 0/1234V_0) \sin 40511t]$$



شکل ۴-۳۰ مدار معادل شکل ۴-۲۱ در وضعیت روشن شدن تریستور

وقتی $i_1 = 0$ است جریان تریستور متوقف می‌شود و این زمانی است که $t = 0/94 \text{ ms}$ باشد در صورتی که تریستور اولین بار روشن شده باشد (یعنی $V_0 = 0$ باشد). حداکثر مقدار جریان i_1 در $t = 0/47 \text{ ms}$ اتفاق می‌افتد و برابر است با $8/41 \text{ A}$. ولتاژ دو سر بار در لحظه خاموش شدن برابر $v = 153/9 \text{ V}$ است. ولتاژ معکوس دو سرتریستور در هنگام خاموش شدن برابر است با $153/9 - 100 = 53/9 \text{ V}$ که در $431/\mu\text{s}$ به صفر تنزل می‌یابد یعنی وقتی که $100 = 153/9 e^{-t/RC}$ می‌باشد و در نتیجه زمان قطع مشخص می‌گردد.

جریان پیک تریستور برابر $8/41 \text{ A}$ است و اگر پررود قطع و وصل یکسان در نظر گرفته

شود، مقدار rms جریان برابر $rms = 4/2A = 2A$ خواهد بود.

(الف) در فرکانس 400 Hz ، ترستور در هر $2/5\text{ ms}$ روشن می‌شود. با توجه به داده‌های قبلی ولتاژ دو سر بار در پایان اولین سیکل به مقدار $V = 32/3$ و کاهش می‌یابد و تقریباً در شروع و پایان هر سیکل به مقدار تقریبی 30 V استقرار می‌یابد و زمان روشن بودن ترستور $1/035\text{ ms}$ خواهد بود. معادله ولتاژ در پریود روشن بودن ترستور برابر است با $v = 100 - e^{-500t} [70 \cos 40511t + 16 \sin 40511t]$ و در پریود تخلیه شدن خازن (یعنی $1/465\text{ ms} = 1/035 - 2/5$)، $v = 130 e^{-t/RC}$ خواهد بود. انرژی بار در هر سیکل برابر است با انرژی خروجی باطری در هر سیکل یعنی:

$$\begin{aligned} \int V_s i_1 dt &= \int_0^{1/035 \times 10^{-3}} 100 [2 - e^{-500t} (2 \cos 40511t - 5/43 \sin 40511t)] dt \\ &= [200t - e^{-500t} (0/126 \cos 40511t + 0/065 \sin 40511t)]_0^{1/035 \times 10^{-3}} \\ &= 0/207 + 0/071 + 0/126 = 0/404\text{ J} \end{aligned}$$

$$P_{\text{توان}} = 0/404 \times 400 = 161/6\text{ W}$$

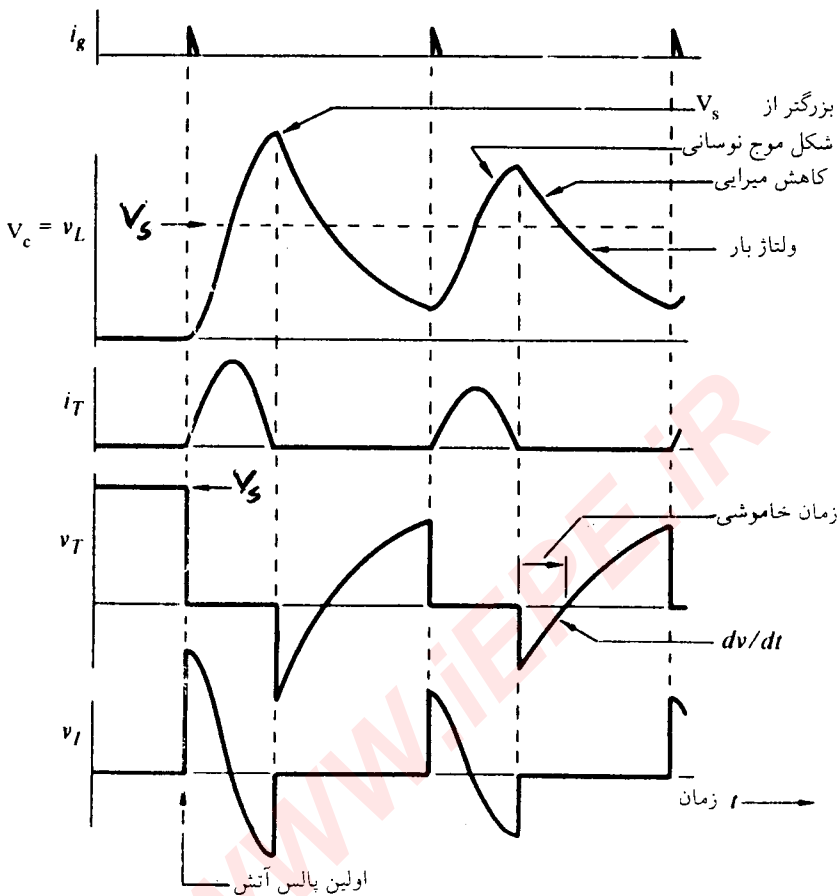
(ب) اگر ترستور در فرکانس 200 Hz یعنی در پریود 5 ms روشن شود، پس از اولین سیکل ورودی، ولتاژ بار به مقدار $V = 2/6$ و $v = 153/9 e^{-(5 - 0/94) \times 10^{-3}/RC}$ تنزل می‌یابد، که عملاً می‌توان صفر در نظر گرفت. انرژی دریافت شده از باطری در خلال هر سیکل و با توجه به $V_0 = 0$ برابر $0/484\text{ J}$ است که مقدار توان زیر را بدست می‌دهد،

$$P_{\text{توان}} = 0/484 \times 200 = 96/8\text{ W}$$

شکل موجهای مربوط به مدار کموتاسیون رزونانس سری شکل ۴-۲۱ در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده است.

مساله ۴-۸

در مدار کموتاسیون موازی شکل ۴-۲۲، مقادیر مناسب برای اجزاء مدار را بدست آورید، در صورتی که منبع تغذیه dc دارای ولتاژ 100 V و بار $20\text{ }\Omega$ و زمان خاموشی لازم برای ترستور $80\text{ }\mu\text{s}$ باشد. فرض کنید مدار در حالت میرایی بحرانی است و از تلفات صرف‌نظر کنید.



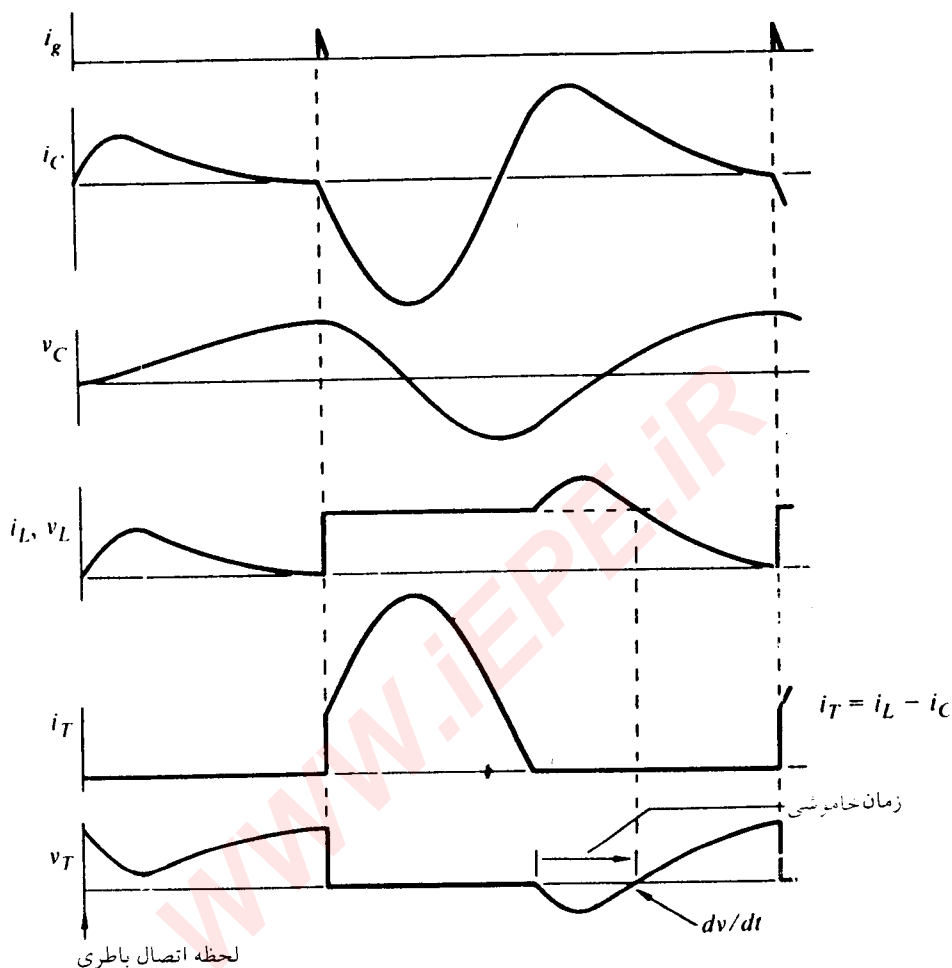
شکل ۳۱-۴ شکل موجهای مربوط به مدار کموتاسیون ۲۱-۴

مدت زمانی را تعیین کنید که در خلال آن و قبل از خاموش شدن تریستور، بار روشن است.

حل - با توجه به شکل ۲۲-۴ در شرایطی که تریستور خاموش است جریان در مدار RLC از رابطه زیر بدست می آید

$$i = e^{-\alpha t} (At + B) \quad \text{و} \quad \alpha = R/2L$$

در شروع خاموش شدن $t=0$, $i = 100/200 = 5A$ است. پس از $80\mu s$, جریان به $5A$ برمی گردد. (ولتاژ بار $100V$ است). با مراجعه به شکل موجهای شکل ۳۲-۴ ملاحظه می شود



شکل ۳۲-۴ موجهای مربوط به مدار کموتاسیون شکل ۲۲-۲

که ولتاژ خازن در شروع خاموشی کمتر از $100V$ ، مثلاً حدود $87V$ است، بنابراین فرض می‌شود که در $t=0$ ، $L \frac{di}{dt} = 87$ است. با توجه به شرایط فوق $A=302000$ ، $B=5$ ، $\alpha=22040$ خواهد شد و در نتیجه $L=R/2\alpha = 0.454mH$ بدست می‌آید. برای حالت میرایی بحرانی داریم $R^2 = 4L/C$ در نتیجه $C = 4/54\mu F$ خواهد بود. هنگامی که ترستور روشن می‌شود مدار LC با فرکانس $\omega = 1/\sqrt{LC}$ نوسان می‌کند و جریان $i = -(V/\omega L)\sin \omega t$

خواهد بود. زمان خاموش شدن تریستور در جریان $i = 100/20 = 5A$ بدست می آید یعنی در لحظه $t = 166\mu s$ اتفاق می افتد. پیک جریان تریستور برابر است با،

$$\text{پیک جریان} = 5 + (V/L\omega) = 15 \text{ A}$$

مساله ۴-۹

می خواهیم یک بار ۱۰ آمپری را به وسیله مدار کموتاسیون با پالس خارجی شکل ۴-۲۴ کنترل نمائیم. اگر ولتاژ منبع تغذیه برابر $200V$ باشد، مقادیر مناسبی برای خازن و سلف پیشنهاد کنید در صورتی که این اجزاء بدون تلفات بوده و زمان خاموشی برابر $100\mu s$ باشد. حل - وقتی در ابتدا منبع dc وصل می گردد، خازن C تا $V = 400 = 2 \times 200$ شارژ می شود. وقتی T_1 آتش می شود مدار معادل آن در شکل ۴-۳۳ الف نشان داده شده است. در $t = 0$ ، جریان در L_1 یعنی i_1 برابر با جریان بار $10A$ خواهد بود. با استفاده از معادله (۴-۸) یا روشهای دیگر $i_1 = 10 \cos \omega t + (400/\omega L_1) \sin \omega t$ خواهد بود که در آن $\omega = 1/\sqrt{L_1 C}$ است. L_1 را چنان انتخاب می کنیم که پیک جریان i_1 تقریباً $20A$ یعنی دو برابر جریان بار گردد. بنابراین بطور مثال $\omega L_1 = 400/20 = 20$ و ωL_1 خواهد بود. هنگامی که $v = L_1 di_1/dt$ به $200V$ کاهش یابد ولتاژ تریستور T_1 شروع به مثبت شدن خواهد کرد و بنابراین زمان قطع مشخص خواهد شد یعنی

$$-10\omega L_1 \sin \omega t + 400 \cos \omega t = 200$$

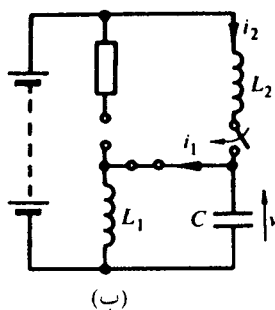
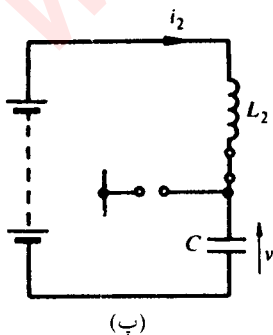
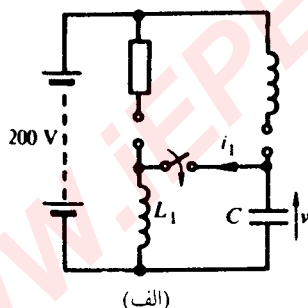
که در آن $t = 100\mu s$ است. از این معادلات خواهیم داشت، $L_1 = 3/11 \text{ mH}$ ، $\omega = 6435$ و $C = 7/76 \mu F$. وقتی که ولتاژ تریستور T_1 مثبت می شود، دیود D_1 شروع به هدایت می کند و مدار معادل شکل ۴-۳۳ ب بدست می آید که این مدار تا لحظه ای که i_1 به صفر تنزل می یابد یعنی تا لحظه خاموش شدن T_1 قابل قبول می باشد. دسته معادلات دیگری در $t = 0$ و با $i_1 = 20A$ ، $i_1 = 20A$ و $v = 200V$ بر آن حاکم خواهد بود. اندوکتانس L_1 بایستی خیلی بزرگتر از L_1 باشد بطور مثال $0.2H$ باشد. مقدار بزرگتر موجب کند شدن نوسان $L_1 C$ می گردد. پس از حل معادلات در این شرایط خواهیم داشت،

$$i_1 = ۸۶۵۵t + ۸/۰.۴\sin\omega t + ۱۷/۳۱\cos\omega t + ۲/۶۹$$

$$i_2 = ۸۶۵۵t + ۲/۶۹ - ۲/۶۹\cos\omega t$$

$$v = ۲۷ + ۱۷۳\cos\omega t - ۳۷۲\sin\omega t$$

که در آن $\omega = ۶۹۱۹۰$ است. وقتی i_1 به صفر تنزل می‌یابد T_p خاموش می‌شود و زمان بدست می‌آید و در این زمان $i_2 = ۷/۳۶$ A و $v = -۳۶۵$ V است. حال شرایط مدار به آنچه که در شکل ۴-۳۳ پ نشان داده شده است، تغییر می‌یابد که



شکل ۴-۳۳ مدار معادل مدار کموتاسیون شکل ۴-۲۴

مجدداً با $\omega = 0$ ، $v = -365V$ و $i_p = 7/36A$ شروع می‌شود. با حل معادلات برای i_p و v داریم،

$$i_p = 11/1 \sin \omega t + 7/36 \cos \omega t$$

$$v = 200 - 565 \cos \omega t + 374 \sin \omega t$$

که در آن $\omega = 2538$ است. دیود D_p در $i_p = 0$ یعنی در $t = 100 \mu s$ خاموش می‌شود و ولتاژ $v = 878V$ بدست می‌آید. زمان خاموشی (قطع) تریستور T_p وقتی است که $v = 0$ یعنی $t = 270 \mu s$ که از $100 \mu s$ مشخص شده بیشتر است.

مساله ۴-۱۰

از مدار کموتاسیون شکل ۴-۲۵ جهت کنترل بار 60 آمپری از منبع تغذیه dc ، $48V$ ولتی استفاده شده است. در صورتی که زمان خاموشی (قطع) تریستورها $30 \mu s$ باشد، مقادیر مناسب برای اجزاء مدار پیشنهاد کنید. بار در فرکانس $1 kHz$ سوئیچ می‌گردد.

حل - مشابه بسیاری از مدارهای خاموش کننده، محاسبات طراحی بصورت تقریب انجام می‌گیرد و در عمل بر اساس نتایج تجربی تغییراتی انجام می‌گیرد. در وهله اول می‌توان از تلفات اجزاء سیستم صرف‌نظر کرد.

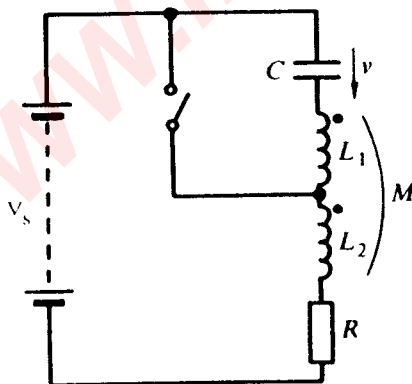
وقتی در ابتدا T_1 آتش می‌شود فرض کنید که خازن C تا $48V$ شارژ می‌شود. وقتی تریستور T_p آتش می‌شود، خازن از طریق منبع dc و بار با جریان $60A$ (در صورتی که جریان بار مسطح فرض شود) تخلیه می‌گردد. بنابراین $dv/dt = 60/c$ که در آن $(dv/dt = 48 / (30 \times 10^{-6}))$ می‌باشد، ولتاژ دو سر خازن (و تریستور T_1) پس از $30 \mu s$ معکوس می‌شود و در نتیجه $C = 37/5 \mu F$ بدست می‌آید. وقتی T_p خاموش می‌شود خازن در طی $30 \mu s$ دیگر تا ولتاژ $48V$ شارژ می‌شود. حداقل زمان وصل (روشن بودن) T_1 ، قبل از اینکه T_p بتواند آتش شود از نیم نوسان $L_p C$ تعیین می‌گردد. مدت زمان هر سیکل بار برابر $100 \mu s = 1/10^3$ است. اگر حداقل زمان روشن بودن، مثلاً برابر $20 \mu s$ باشد (که کنترل ولتاژ بار را تا تقریباً 20% درصد آن امکان‌پذیر می‌کند) مدت زمان حداقل $100 \mu s$ زمان قطع (خاموشی) T_p

خواهد بود. بنابراین از رابطه $\frac{1}{2} \pi \sqrt{L_1 C} = 10^{-6} / (200 \times 2)$ مقدار $L_1 = 10 \mu\text{H}$ بدست می‌آید. وقتی T_1 برای اولین بار آتش می‌شود مدار معادل شکل ۴-۳۴ بدست می‌آید که شرایط اولیه صفر است. تجزیه تحلیل مدار نشان می‌دهد که حداکثر مقدار V تقریباً برابر است با $\sqrt{L_1 L_2} \sqrt{V_s/R}$ که $M = \sqrt{L_1 L_2}$ است. اگر قرار باشد C تا سطح ولتاژ منبع dc، یعنی 48V شارژ شود آنگاه با توجه به $V_s/R = 60\text{A}$ ، مقدار $L_2 = 24 \mu\text{H}$ می‌باشد.

نسبت تبدیل سیم پیجهای کوپلاژ برابر است با $\sqrt{L_1/L_2} = 2/12$

در آتش شدن بعدی، خازن که در ابتدا تا 48V شارژ شده است، یک ولتاژ اضافی تقریباً برابر با $\sqrt{L_2/C} (V_s/R)$ را دریافت می‌نماید. حداکثر مقدار ولتاژ خازن برابر $48 + 48 = 96$ می‌گردد. مقدار پیک جریان نوسانی T_1 DC برای مدت زمان نیم سیکل $200 \mu\text{s}$ ، برابر است با

$$96/\omega L_1 = 96\sqrt{C/L_1} = 56 \text{ A}$$



شکل ۴-۳۴ مدار شکل ۴-۲۵

در مدت زمانی که طی می‌شود تا در خلال آن ولتاژ دو سر خازن از 96V به 48V برگردد، ترستور T_1 جریان 60A را از خود عبور می‌دهد و این مدت زمان برابر است با

$$[37/5 \times 10^{-6} (96 + 48)] / 60 = 90 \mu\text{s}$$

مقادیر نامی تریستور T_1 : مقدار موثر جریان را با توجه به جریان بار و جریان با نوسان کوتاه

مدت می توان مثلاً $70A$ در نظر گرفت. $dv/dt = 60 / (37/5 \times 10^{-6}) = 1/67 \mu s$

$$P.F.V. = 96V, \quad di/dt = 48 / (24 \times 10^{-6}) = 2A/\mu s$$

مقادیر نامی تریستور T_2 : مقدار موثر جریان برابر است با $18A$ یعنی $60 / \sqrt{(1000/90)} = 18A$

60 آمپر برای بخش $90/1000$ از سیکل بار، $dv/dt = 56 / (37/5 \times 10^{-6}) = 105 V/\mu s$

$$PFV = 96V, \quad di/dt = 96 / (CT_2 \text{ در حلقه } CT_2)$$

مقادیر نامی دیود D : مقدار موثر جریان $18A$ است که از روی جریان نوسانی با پیک $56A$

محاسبه می شود. در نوسان مدار L_1C که متعاقب خاموش شدن T_2 ایجاد می شود، $P.F.V.$ به

مقدار زیر می رسد،

$$96 \times L_1 / L_2 = \text{نسبت تبدیل} = 204V$$

مجدداً خاطر نشان می گردد که محاسبات فوق خیلی تقریبی می باشد و یک راهنمایی کلی را

ارائه می نماید. برای بدست آوردن مقادیر نهایی انجام آزمایشهای عملی ضروری است.