فصل ۴

روشهای کموتاسیون

۴-۱ مقدمه

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

همان طوری که ملاحظه کردیم وقتی تریستورها 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 تریستوری روشن می‌شود و خروجی مورد نیاز فراهم می‌گردد، معمولاً بایستی آنرا خاموش (قطع) کرد. خاموش شدن به این معنی است که تریستور از هدایت بازایستد و با اعمال مجدد ولتاژ مثبت به آند آن (درغیاب پالس آتش) روشن نگردد. فرایند خاموش شدن به ***کموتاسیون***[1] 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[2]

ج - کموتاسیون اجباری[3]

1- Commutation

2- Natural Commutation

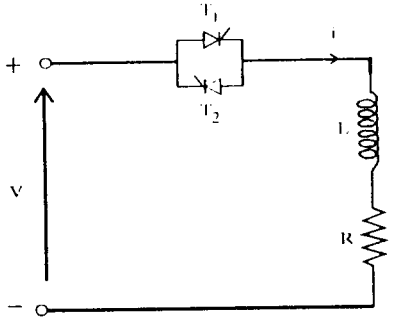
3- Forced Commutation

۴-۲ 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 تریستورِ در حال قطع شدن به تریستورِ 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 t_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 t_2 به صفر می‌رسد. با صفر شدن جریان i، تریستور T_1 قطع می‌شود و چون ولتاژ آند به کاتد آن منفی است، در حال قطع باقی می‌ماند. در لحظه t_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 t_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 عملکرداین 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.

۴-۳ کموتاسیون طبیعی

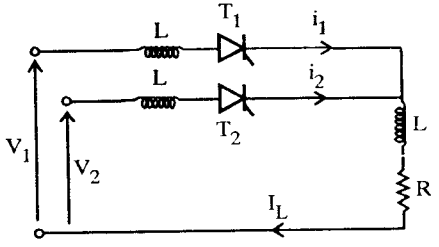
هرگاه عمل کموتاسیون یا انتقال جریان از یک عنصر نیمه‌هادی به عنصر دیگر به کمک ولتاژهای ac اعمال شده به مدار، صورت گیرد، کموتاسیون را طبیعی می‌نامند. این جابجایی جریان بطور خودکار و بدون دخالت مدار کموتاسیون اضافیِ خارجی انجام می‌گیرد. نکته اساسی در تحقق این نوع کموتاسیون اعمال ولتاژ متناوب (ac) به مدار 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. باشرط اینکه اندوکتانس بار فوق‌العاده زیاد است، جریان بار را می‌توان ثابت فرض کرد.



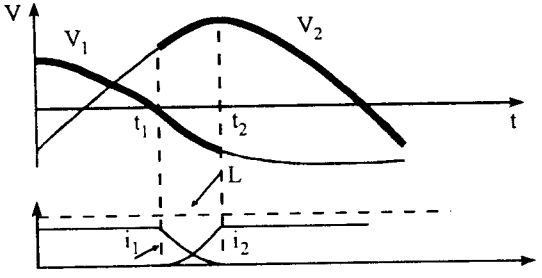
(الف) مدار

(ب)شکل موج‌ها

شکل ۴-۱ عملکرد مدار بدون کموتاسیون



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲ 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 آنی انجام می‌شد و در غیر اینصورت مطابق آنچه که در بالا گفته شد با تأخیر انجام می‌گرفت. به هرحال 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 یکسوکننده (مبدلهای ac-dc) مورد بحث قرار گرفت، به واسطه منبع ولتاژ ورودی ac، تریستور یا دیود هدایت کننده در نقطه صفر جریان خاموش می‌شد و یا با کموتاسیون طبیعی جریان بار از دیود یا تریستورِ در حال خاموش شدن به دیود یا تریستورِ در حال روشن شدن، انتقال می‌یافت.

۴-۴ کموتاسیون اجباری

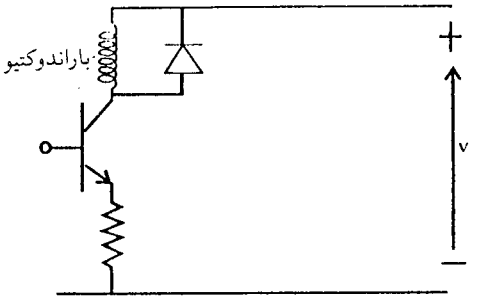
همان طوری که بیان شد مدارهایی که در فصل قبل مورد بررسی قرار گرفتند، دارای منبع تغذیه ac بودند، لیکن در کاربردهای متعددی از وسایل نیمه‌هادی قدرت، نظیر معکوس کننده‌ها (اینورترها) و برش دهنده‌ها (چاپرها)، منبع تغذیه dc می‌باشد. اگر چنانچه در این مدارها از تریستوراستفاده شود، با توجه به اینکه ولتاژ ورودی 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 بازیابد. به چنین مداری که برای خاموش کردن تریستور بکار می‌رود، ***مدارکموتاسیون***[1] 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***[2] معروف است. کموتاسیون اجباری تریستور به طرق مختلفی انجام می‌گیرد که در این

1- Commutation Circuit 2- Forced Commutation

بخش تشریح خواهد شد.

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



شکل ۴-۳ باری که توسط ترانزیستور کنترل می‌شود

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

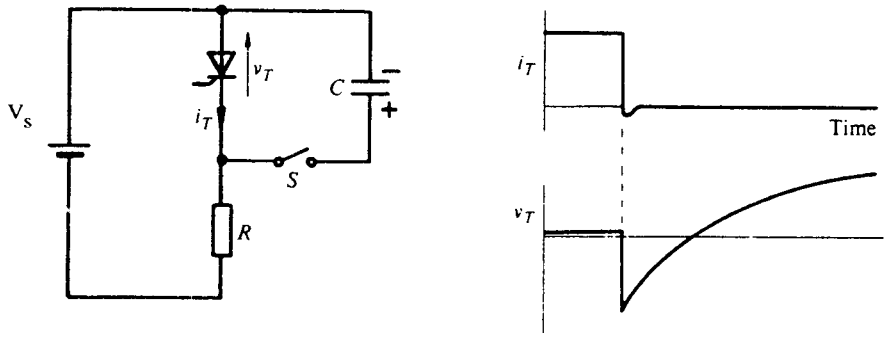
در حقیقت وظیفه مدار کموتاسیون اجباری این است که اولاً جریان عبوری از تریستور را به صفر کاهش دهد و ثانیاً برای مدت زمانی که مساوی و یا بیشتر از زمان قطع[1] تریستور است، ولتاژ معکوسی را به دو سر آن اعمال نماید تا اینکه تریستور در خلال این فاصله زمانی حالت مسدود خود را باز یابد. این اهداف را می‌توان بوسیله مدارهای کموتاسیون زیر بدست آورد.

۴-۴-۱ کموتاسیون با خازن موازی

اهداف فوق را می‌توان با استفاده از یک منبع ولتاژ خارجی برآورده کرد. به این ترتیب که منبع ولتاژ با عبور دادن جریان کافی در جهت مخالف، جریان تریستور را به صفر کاهش می‌دهد

1- Turn-off Time

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



شکل ۴-۴ کموتاسیون اجباری بوسیله خازن موازی

آنگاه خازن در درون مقاومت‌بار به تخلیه خود ادامه می‌دهد و همانطوریکه در شکل ۴-۴ ملاحظه می‌شود پس از گذشت زمان ولتاژ دو سر تریستور 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 تریستور قرار می‌گیرد، این فاصله زمانی از نظر خاموش شدن تریستور حائز اهمیت است. زیرا اگر این فاصله زمانی به اندازه کافی باشد، با اعمال ولتاژ مثبت، تریستور دوباره روشن نمی‌شود. این پریود زمانی که در شکل مشخص شده است، زمانی است که در خلال آن ولتاژ آند - کاتد تریستور منفی است. این زمان نبایستی از زمان قطع (یا زمان خاموشی) تریستور کمتر باشد. بعداً خواهیم دیداین 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 تریستور صرفنظر 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 تریستور 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 $t = ۰$ داریم

$$-V_s = V_s + A \rightarrow A = -۲V_s$$

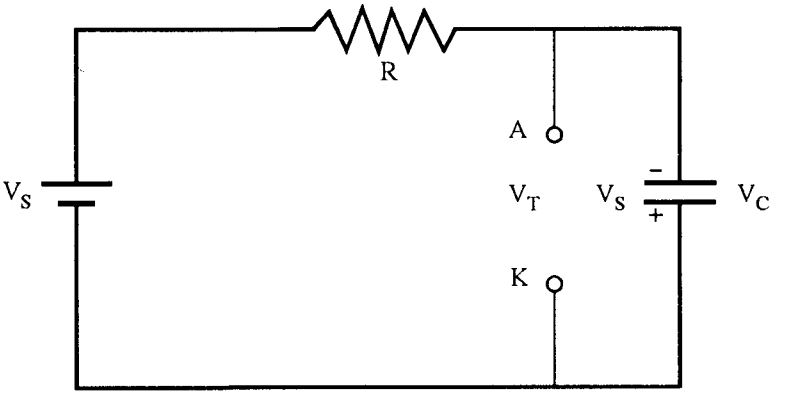
$$v_c = V_s - ۲V_s\, e^{-t/\tau}$$

$$v_c = V_s\,(۱ - ۲e^{-t/\tau}) \quad و \quad \tau = RC \qquad (۱-۴)$$

منحنی تغییرات ولتاژ در شکل ۴-۴ ب رسم شده است. می‌توان از معادله (۴-۱) مدت زمانی که تریستور در بایاس معکوس قرار می‌گیرد را بدست آورد. برای این کار کافی است که در معادله $v_c = ۰$ قرار داده شود. بنابراین

$$۰ = Vs\,(۱ - ۲\, e^{-t/\tau})$$

$$t = ۰/۶۹۳\tau = ۰/۶۹۳\ RC$$



شکل ۴-۵ مدار معادل

مثال ۴-۱

در شکل ۴-۴، $V_s = ۱۰۰V$، $R = ۵\Omega$، $C = ۵\mu F$ و زمان لازم برای خاموشی تریستور، $tq = ۱۵\mu S$ است. آیا فاصله زمانی که تریستور در بایاس معکوس قرار می‌گیرد برای خاموش شدن آن کافی است؟

حل -

$$\tau = RC = ۵ \times ۵ \times ۱۰^{-۶} = ۲۵\,\mu S$$

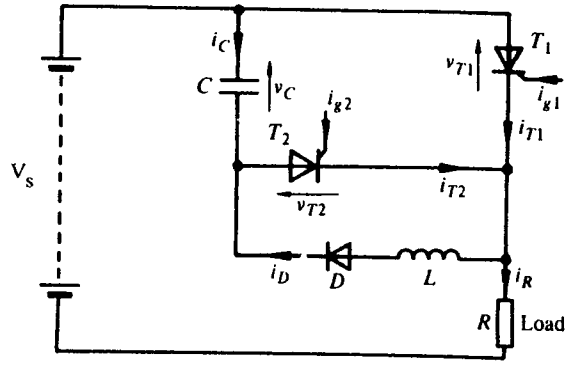
$$t = ۰/۶۹۳\,RC = ۰/۶۹۳ \times ۲۵ = ۱۷/۳۳\,\mu F$$

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

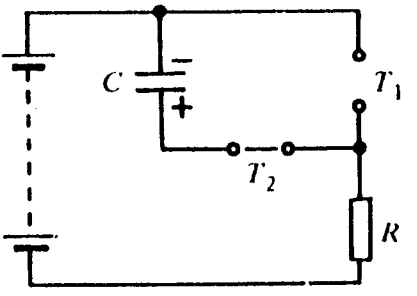
برای اینکه این مدار جنبه عملی پیدا کند لازم است کلید مکانیکی S با سوئیچ الکترونیکی جایگزین گردد تا اینکه باردار کردن و تخلیه کردن خازن قابل کنترل گردد و اطمینان حاصل شود که خازن C دوباره در جهت اولیه باردار گردیده و برای توالی خاموشی بعدی آماده می‌گردد. چنین مداری در شکل ۴-۶ نشان داده شده است، که در آن T_1 تریستور اصلی است و جریان بار از آن عبور می‌کند و T_2 تریستور 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 تریستور کمکی اضافه شده است تا تریستور اصلی بتواند عمل کموتاسیون را انجام دهد.

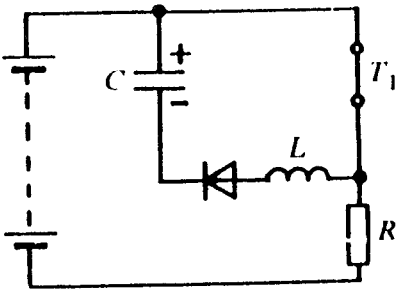
عملکرد مدار را می‌توان به شرح زیر بیان کرد. وقتی تریستورها هر دو قطع هستند با اتصال دادن باطری، هیچ جریانی از مدار عبور نمی‌کند. همانطوریکه قبلاً ملاحظه کردیم جهت انجام کموتاسیون بایستی خازن باردار را به دو سر تریستور T_1 سوئیچ کرد. بنابراین لازم است ابتدا با آتش کردن تریستور کمکی T_2، خازن C را باردار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



شکل ۴-۶ مدار کموتاسیون



(الف) وقتی T_2 آتش می‌شود خازن با پلاریته‌نشان داده شده شارژ می‌گردد.



(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.

شکل ۴-۷ مدار معادل شکل ۴-۶

با آتش کردن تریستور T_1، باطری 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 ودر 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 تریستور قرار می‌گیرد و در نتیجه تریستور T_1 را خاموش می‌نماید. بنابراین بطور خلاصه می‌توان گفت که با روشن کردن T_1 باطری به بار متصل می‌شود و با روشن کردن T_2، تریستور T_1 خاموش می‌شود و بار از باطری قطع می‌گردد.

چون این مدار قادر است ولتاژ باطری را به بار قطع و وصل نماید، یعنی اینکه با روشن و خاموش کردن تریستورها، ولتاژ باطری برش داده می‌شود و به بار اعمال می‌گردد، از اینرو به آن **چاپر یا برش دهنده** d.c[1] گفته می‌شود. از آن جایی که با آتش کردن T_2، بلافاصله ولتاژ معکوسی به تریستور T_1 اعمال می‌گردد به آن *کموتاسیون ولتاژ*[2] نیز گفته می‌شود. به دلیل اینکه در این مدار از یک تریستور کمکی T_2 استفاده شده است تا تریستور اصلی T_1 بتواند عمل کموتاسیون را انجام دهد، این نوع کموتاسیون همچنین به کموتاسیون کمکی[3] نیز معروف

1- d.c. Chopper 2- Voltage Commutation 3- Auxiliary Commutation

است. در عمل می‌توان دیود D را با تریستور T_3 جایگزین کرد طوریکه همزمان با T_1 آتش گردد. از آن جایی‌که وجود اندوکتانس درمدار بار- باطری ممکن است باعث نوسان ثانوی (پس از خاموش شدن تریستور 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 می‌نماید. این مدار در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.

به این نوع کموتاسیون علاوه بر عناوین فوق‌الذکر، تحت عنوان ***کموتاسیون ضربه***[1] نیز اشاره می‌گردد. بنابراین در این مدار اگر فرض کنیم خازن به اندازه $-V_0$ مطابق پلاریته نشان داده شده در شکل دارای بار اولیه است و تریستور T_1 د رحال هدایت بوده و جریان بار I_L را تأمین می‌نماید. وقتی تریستور کمکی T_2 آتش می‌شود تریستور T_1 به وسیله ولتاژ خازن در گرایش (بایاس) معکوس قرار می‌گیرد. جریان تریستور 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 ورودی V_s شارژ می‌شود، وقتی که جریان به صفر تنزل می‌یابد، تریستور T_2 خاموش می‌گردد. با آتش کردن تریستور T_3، بار خازن از $V_0=V_s$، به $-V_0$، در جهت عکس شارژ می‌شود و بنابراین برای کلیدزنی بعدی آماده می‌شود.

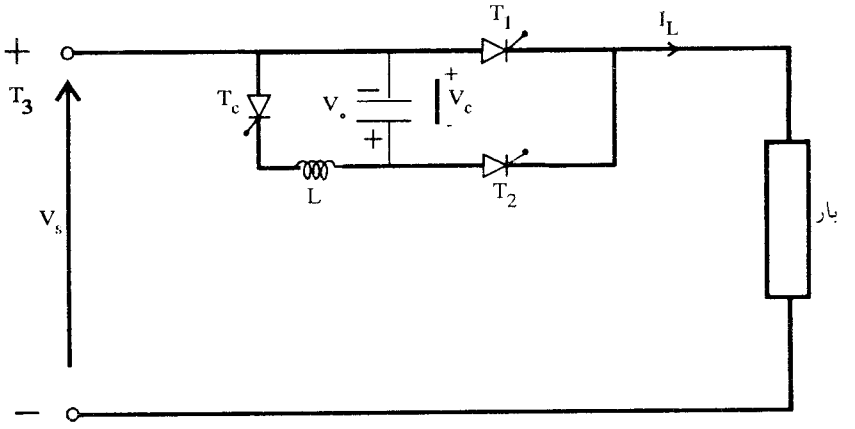
البته در اینجا قبول می‌کنیم که تریستور T_3 خودبخود خاموش می‌شود و به این روش خاموش شدن، ***کموتاسیون خودی***[2] گفته می‌شود، و نحوه این نوع کموتاسیون را بعداً تشریح خواهیم کرد. مدار معادل مدار کموتاسیون ضربه‌ای شکل ۴-۸ در خلال پریود کموتاسیون در شکل ۴-۹ الف و شکل موجها در شکل ۴-۹ ب نشان داده شده است. زمان لازم برای تخلیه خازن از $-V_0$ به صفر، زمان قطع[3] مدار t نامیده می‌شود و بایستی از زمان قطع تریستور 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 می‌آید:

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

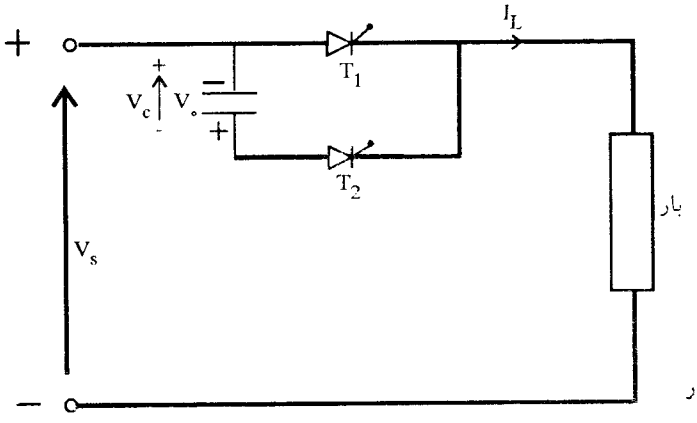
$$t=\frac{V_0\,C}{I_L} \qquad (۲-۴)$$

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

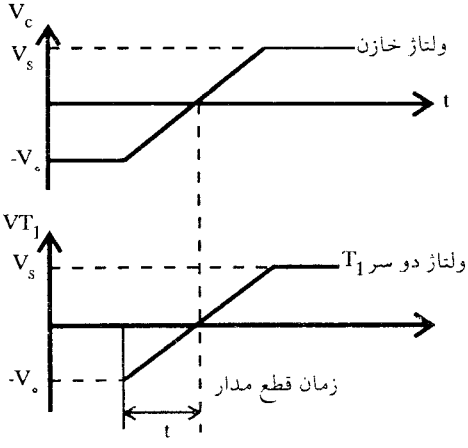
1- Impulse Commutation 2- Self-Commutation 3- Turn-off Time



شکل ۴-۸ مدار کموتاسیون ضربه



(الف) مدار



(ب) شکل موجها

شکل ۴-۹ مدار معادل و شکل موجها

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

حال به تشریح نحوه کموتاسیون خودی که در خاموش شدن T_2 در مدار کموتاسیون ضربه انجام گرفت، می‌پردازیم. در حقیقت با آتش شدن T_2 یک مدار LC خواهیم داشت و مطابق آنچه که در مورد مدار شامل L، C و دیود D در شکل ۴-۷ 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 ۴-۱۰ 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:

$$V_s = v_L + v_c = L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int i\,dt + v_c(0) \qquad (۳-۴)$$

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

$$i(t) = Vs\sqrt{C/L}\ \mathrm{Sin}\ \omega_m t \qquad (۴-۴)$$

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

$$v_c(t) = V_s\ (1-\mathrm{Cos}\omega_m t) \qquad (۵-۴)$$

در $\omega_m t = \pi$ یعنی پس از گذشت زمان $t = t_0 = \pi/\omega_m = \pi\sqrt{LC}$، جریان مدار به صفر می‌رسد و تریستور T_1 خودبخود خاموش (قطع) می‌شود و کموتاسیون خودی تحقق می‌یابد. طی زمان t_0 که به ***زمان کموتاسیون*** [1] موسوم است خازن تا سطح $2V_s$ شارژ شده است. شکل موج در شکل ۴-۱۰ ب نشان داده شده است.

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

1- Commutation time

$$L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int idt + v_c(0) = 0 \qquad (۶-۴)$$

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

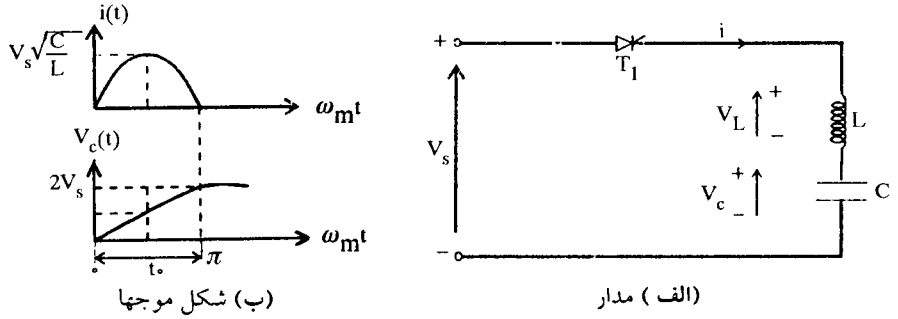
$$i(t) = V_0\sqrt{\frac{C}{L}}\,Sin\omega_m t \qquad (۷-۴)$$

ولتاژ خازن برابر خواهد بود با

$$v_c(t) = -V_0 Cos\omega_m t \qquad (۸-۴)$$

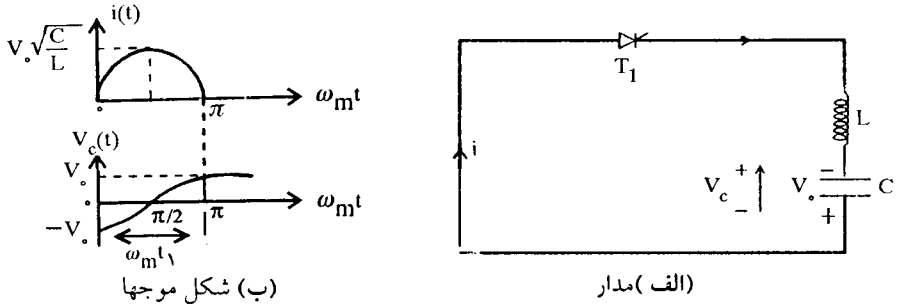
پس از گذشت $t = t_r = t_0 = \pi\sqrt{LC}$ جریان به صفر می‌رسد و خازن تا ولتاژ V_0 در جهت عکس شارژ می‌گردد. یعنی همانطوریکه قبلاً گفته شد در خلال نیم سیکل ولتاژ خازن از V_0- تا V_0+ تغییر پیدا می‌کند، همانطوریکه در شکل ۴-۱۱ ب ملاحظه می‌شود. زمان t_r زمان معکوس شدن[1] نامیده می‌شود.

در اینجابه حل چند مثال می‌پردازیم تا مفهوم کموتاسیون بیشتر آشکار گردد.



(ب) شکل موجها (الف) مدار

شکل ۴-۱۰ مدار کموتاسیون خودی



(ب) شکل موجها (الف)مدار

شکل ۴-۱۱ مدار کموتاسیون خودی

1- Reversing time

مثال ۴-۲

یک مدار کموتاسیون ضربه در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است. اگر $V_s = ۲۰۰V$، $R = ۱۰\Omega$ و $C = ۵\mu F$ و $Vo = Vs$ باشد، زمان قطع مدار را حساب کنید.

حل - در شرایط کموتاسیون، یعنی وقتی $T_۲$ آتش می‌شود، ولتاژ خازن در دوسر $T_۱$ قرار می‌گیرد که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$v_c = \frac{۱}{C}\int idt + v_c(۰)$$

$$Vs = v_c + Ri$$

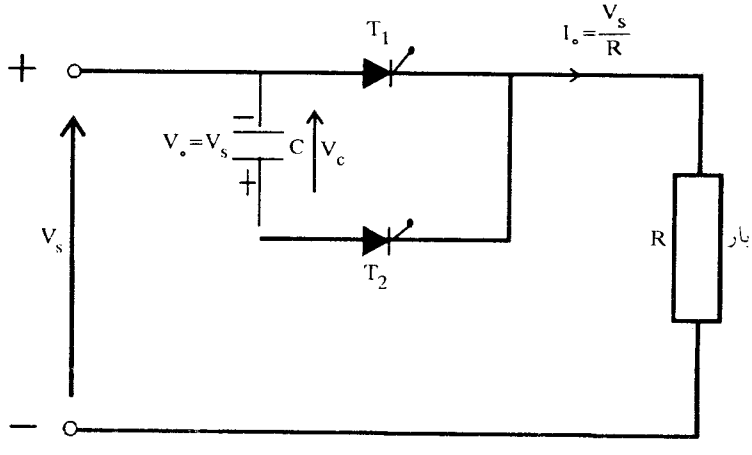
با توجه به شرایط اولیه $v_c(۰) = -V۰ = -V_s$ از حل معادلات فوق داریم

$$v_c(t) = V_s(۱-۲e^{-t/RC})$$

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

$$۱-۲e^{-t/RC} = ۰ \rightarrow t_q = RC\,Ln۲$$

با توجه به مقادیر $R = ۱۰\Omega$ و $C = ۵\mu F$ $t = ۳۴/۷\mu s$ خواهد شد.



شکل ۴-۱۲ مدار کموتاسیون ضربه با باراهمی

مثال ۴-۳

در مدار کموتاسیون شکل ۴-۱۳، $C=۲۰\mu F$ و $L_۱ = ۲۵\mu H$ است. ولتاژ اولیه خازن برابر ولتاژ ورودی است یعنی $V_o= V_s = ۲۰۰V$. اگر جریان بار بین ۵۰A و ۲۰۰A تغییر نماید، تغییرات زمان قطع مدار را محاسبه نمائید.

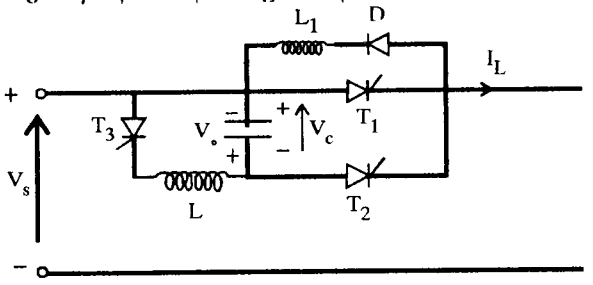
حل - مدار معادل در خلال کموتاسیون در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. در این شکل داریم،

$$i_c = i + I_L$$

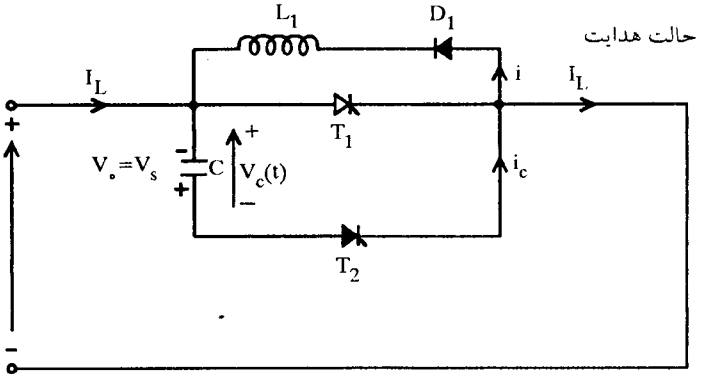
$$v_c = \frac{۱}{C}\int i_c dt + v_c(۰) = -L_۱\frac{di}{dt} = -L_۱\frac{di_c}{dt}$$

با توجه به شرایط اولیه $i_c(۰) = I_L$ و $v_c(۰) = -V_o = -V_s$ از حل معادلات فوق جریان خازن بدست می‌آید یعنی

$$i_c(t) = V_o\sqrt{C/L_۱}\,\mathrm{Sin}\omega_۱t + I_L\mathrm{Cos}\omega_۱t$$



شکل ۴-۱۳ مدار کموتاسیون ضربه



شکل ۴-۱۴ مدار معادل

ولتاژ دو سر خازن برابر است با

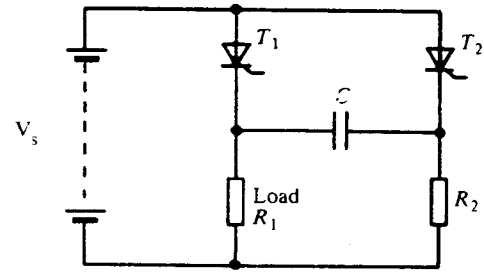
$$v_c(t) = I_L \sqrt{L_1/C}\, \mathrm{Sin}\omega_1 t - V_0 \mathrm{Cos}\omega_1 t$$

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

$$I_c \sqrt{L_1/C}\, \mathrm{Sin}\omega_1 t - V_0 \mathrm{Cos}\omega_1 t = 0$$

$$\text{زمان قطع مدار } t_q = \sqrt{L_1 C}\, \tan^{-1}\left(\frac{V_0}{I_L}\sqrt{C/L_1}\right) \qquad (۹-۴)$$

با توجه به مقادیر داده شده برای $I_L = 50A$، $t = 29\mu s$ و برای $I_L = 100A$، $t = 23/7\mu s$ و برای $I_L = 200A$، $t = 16/3\,\mu s$ بدست می‌آید. بنابراین ملاحظه می‌شود که با افزایش جریان بار از ۵۰A به ۲۰۰A، زمان قطع مدار از $29\ \mu s$ به $16/3\mu s$ کاهش می‌یابد که این تغییرات خیلی زیاد نیست و با قرار دادن دیود بیشتر این جریان تا حدودی مستقل از بار می‌شود.

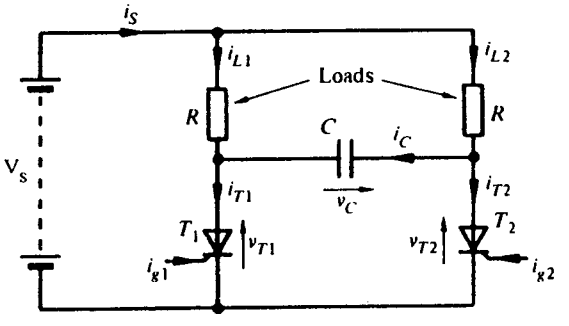


شکل ۴-۱۵ مدار کموتاسیون با خازن موازی که در آن از اندوکتانس استفاده نشده است.

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 تریستور 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 بدوسر T_1 قرار گرفته آنرا خاموش می‌نماید. تریستور 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_2، آنرا خاموش می‌نماید و این سیکل دوباره تکرار می‌شود. از معایب این مدار این است که مقاومت R_2 باعث تلفات می‌شود زیرا در فواصلی که بار قطع است از آن جریان عبور می‌کند. البته با انتخاب مقادیر بزرگتر برای R_2 (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* [1] گفته می‌شود. وقتی تریستور T_1 آتش می‌شود، بار R_1 به منبع تغذیه متصل می‌گردد و همزمان خازن C از طریق R_2 تا ولتاژ V_s شارژ می‌شود. پلاریته خازن در شکل مشخص شده است. وقتی که تریستور T_2 آتش می‌شود، خازن شارژ شده در دو سر T_1 قرار گرفته و بار R_2 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_2 و منبع تغذیه به V_s- معکوس می‌گردد. حال اگر تریستور T_1 مجدداً آتش شود، تریستور T_2 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*** [2] نیز گفته می‌شود.



شکل ۴-۱۶ مدار کموتاسیون تکمیلی

1- Complementary Commutation

2- Complementary Impulse Commutation

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:

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

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

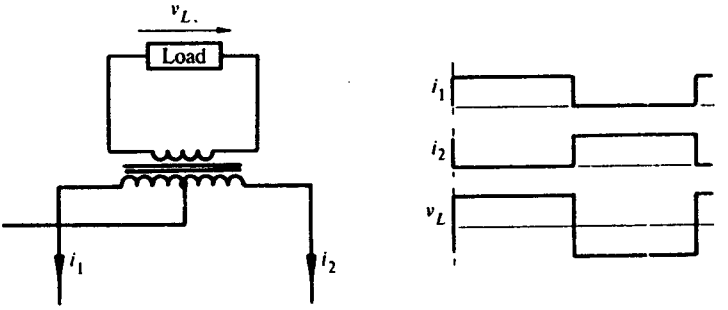
$$v_c(t) = V_s(1-2e^{-t/RC})$$

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

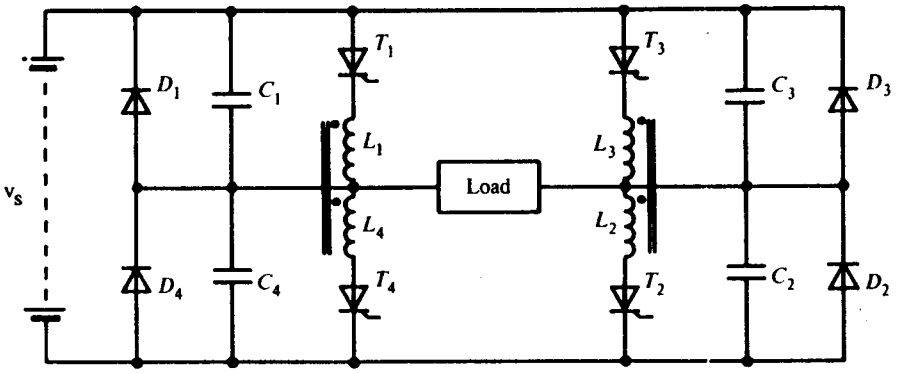
$$t = RCLn2 = 5 \times 10 Ln2 = 34/7\ \mu s$$

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 دوبار مجزای شکل ۴-۱۶ را ایفاء می‌نماید. قطع و وصل شدن متناوب و به فواصل زمانی مساوی تریستورها، منجر به تولید یک ولتاژ متناوب در دو سر بار واقع در ثانویه ترانسفورماتور می‌گردد. مدار پل با کموتاسیون تکمیلی موسوم به مک‌موری - بدفورد[1] در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. اگر تریستورهای 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 یر بار یک ولتاژ متناوب ظاهر می‌شود.

1- Mcmurry-bedford



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

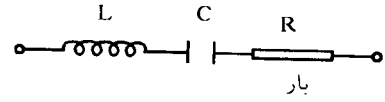


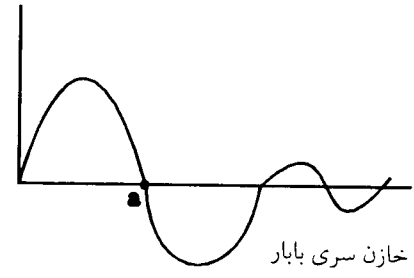
شکل ۴-۱۸ مدار مک‌موری - بدفورد

۴-۴-۲ کموتاسیون رزونانسی

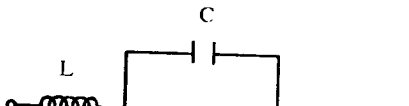
همان طوری که قبلاً در مورد کموتاسیون خودی گفتیم می‌توان از خاصیت نوسان خودی مجموعه خازن - اندوکتانس، جهت خاموش کردن تریستور استفاده کرد لیکن در این روش ضرورتی نداشت که عناصر کموتاسیون، با بار یک مدار رزونانس ایجاد کنند. در روش کموتاسیون رزونانسی[1]، عناصر کموتاسیون L و C و بار مطابق شکل ۴-۱۹ و ۴-۲۰ تشکیل مدار رزونانس زیرمیرا[2] می‌دهند، در نتیجه در اثر اعمال ولتاژ dc جریان مدار مطابق شکل از صفر می‌گذرد و معکوس می‌شود. اگر یک تریستور بصورت سری در مدار قرار گیرد، وقتی جریان آن در نقطه a به صفر می‌رسد و می‌خواهد معکوس گردد، خاموش می‌شود.

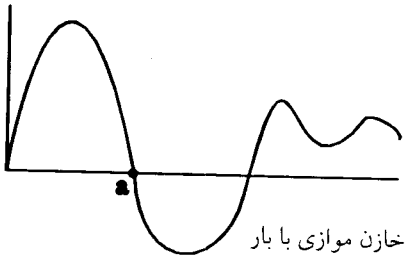
1- Resonant Commutation 2- Underdamped





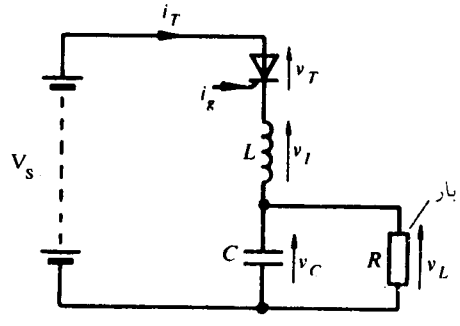
شکل ۴-۱۹ کموتاسیون رزونانسی





شکل ۴-۲۰ کموتاسیون رزونانسی

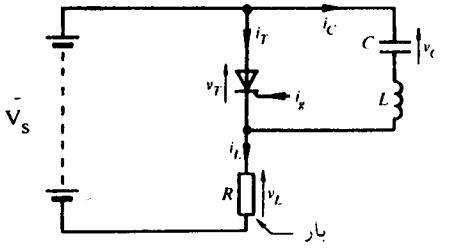
مدار کموتاسیون رزونانس سری در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. عملکرد این مدار به این صورت است که با آتش کردن تریستور، منبع تغذیه به مدار نوسانی زیرمیرا متصل می‌شود و یک نوسان جریان در مدار برقرار می‌گردد و در نتیجه پس از نیم‌سیکل جریان تریستور به صفر رسیده و می‌خواهد معکوس گردد. بنابراین تریستور در اولین صفر جریان بطور خودکار قطع می‌گردد. سپس خازن در بار تخلیه می‌شود. زمان وصل تریستور 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 تریستور،خازن C تا ولتاژ تغذیه شارژ می‌شود. با آتش کردن تریستور، منبع تغذیه به بار متصل می‌گردد و همزمان نوسان آغاز می‌گردد.در صورتیکه جریان نوسانی از جریان بار (E/R) بزرگتر باشد، جریان تریستور می‌خواهد معکوس گردد و در نتیجه تریستور 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.



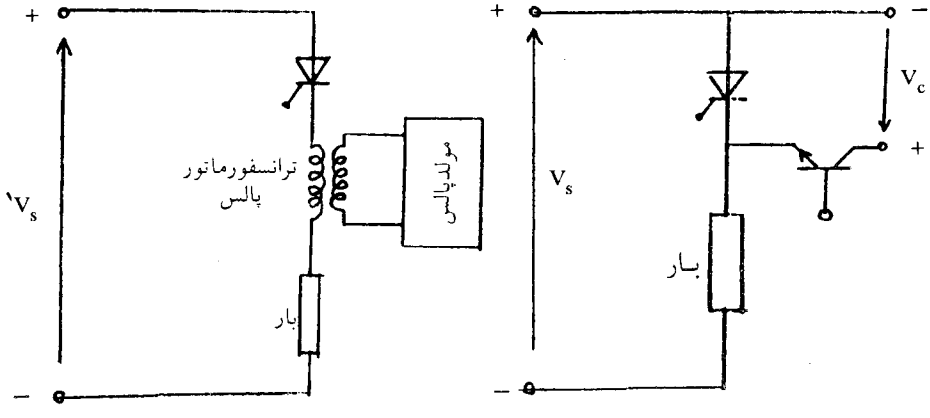
شکل ۴-۲۲ کموتاسیون رزونانس موازی

۴-۴-۳ کموتاسیون با پالس خارجی[1]

همانطوری که در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است یک منبع ولتاژخارجی 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 اعمال‌می‌گردد. در حقیقت در این‌حالت‌ولتاژی بزرگتر و مخالف ولتاژ dc منبع تغذیه، در دوسر اندوکتانس سری شده با تریستور حاملِ 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_2، D_2 و C عبور می‌کند که خازن را همانطوریکه در شکل ۴-۱۰ ملاحظه کردیم تا دو برابر ولتاژ تغذیه شارژ می‌کند و دیود D_2 از معکوس شدن جریان ممانعت به عمل می‌آورد. با آتش کردن T_1، بار از

1- Commutation by external pulse

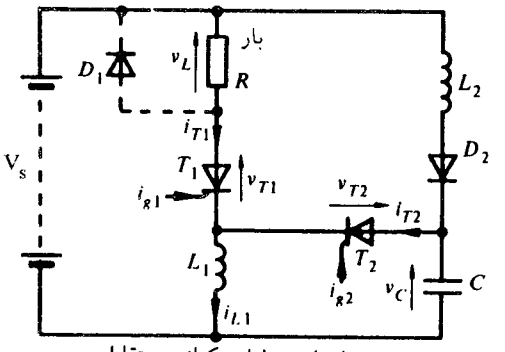
طریق اندوکتانس L_1 به منبع تغذیه متصل می‌گردد. وقتی که T_2 آتش می‌شود، ولتاژ خازن C در دو سر اندوکتانس L_1 قرار گرفته، ولتاژ معکوس به دو سر T_1 اعمال گردیده، آنرا خاموش (قطع) می‌نماید. مدار رزونانس متشکل از L_1 و C تقریباً نیم‌سیکل نوسان نموده و جریان به صفر می‌رسد و T_2 خاموش (قطع)می‌گردد. حال خازن از طریق L_2 و D_2 مجدداً شارژ شده و برای توالی بعدی آماده می‌گردد. در شرایط توصیفی فوق، فرکانس رزونانس L_2C خیلی کمتر از آن L_1C است طوریکه خازن C در اندوکتانس L_1 تخلیه شده و مستقل از L_2 می‌باشد.از اینرو برای تحقق شرایط فوق لازم است اندوکتانس L_2 بمراتب بزرگتر از L_1 باشد. البته در اینصورت زمان قطع جریان بار افزایش می‌یابد. اگر چنانچه بجای دیود D_2 از یک تریستور استفاده شود که پس از خاموش شدن (قطع) T_2 آتش گردد، در اینصورت می‌توان از اندوکتانس L_2 کوچکتری استفاده کرد و زمان قطع بار را کاهش داد. نکته‌ای که باید در توصیف این مدار اضافه کرد این است که وقتی تریستور T_2 قطع می‌شود، خازن C تا سطح ولتاژ دو برابر ولتاژ تغذیه $2V_s$ (با پلاریته سطح پائینی خازن مثبت) باردار باقی می‌ماند. بنابراین وقتی که از طریق L_2 و D_2 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 تریستور T_2 قرار گیرد، پس از نیم‌سیکل نوسان از معکوس شدن جریان پیشگیری نشده و در نتیجه یک نوسان کامل در L_2C صورت می‌گیرد و خازن تا ولتاژ $2V_s$ شارژ می‌گردد. و فرایند تکرار می‌شود.



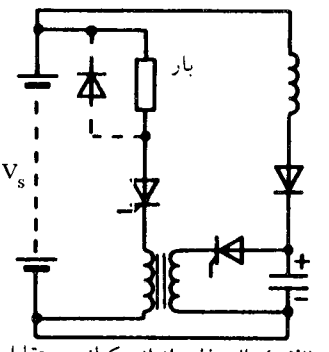
(ب) با استفاده از ترانسفورماتور پالس

(الف) بااستفاده از ترانزیستور

شکل ۴-۲۳ کموتاسیون با منبع خارجی



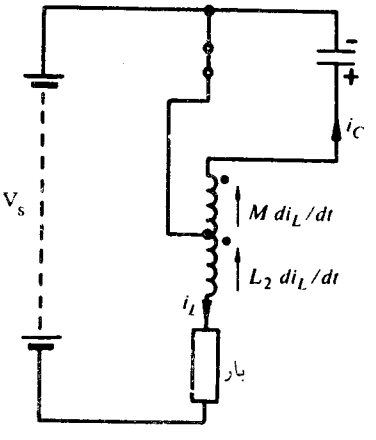
(ب) بدون اندوکتانس متقابل



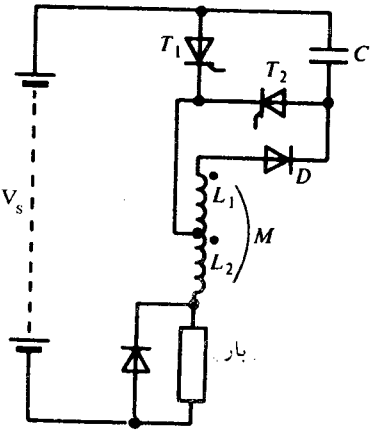
(الف) بااستفاده از اندوکتانس متقابل

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.



(ب)شرایط مدار بلافاصله پس از روشن کردن T_1



(الف) مدار کموتاسیون

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_2 القاء می‌شود که این ولتاژ همچنین در اثر اندوکتانس متقابل، ولتاژی را در L_1 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_2 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 (Mdi_1/dt) همچنین برمقدار بار خازن می‌افزاید.

۴-۵ - مسائل حل شده

مسأله 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 $V_s = 200V$. جریان اولیه اندوکتانس $I_L = 250A$ است.

حل -

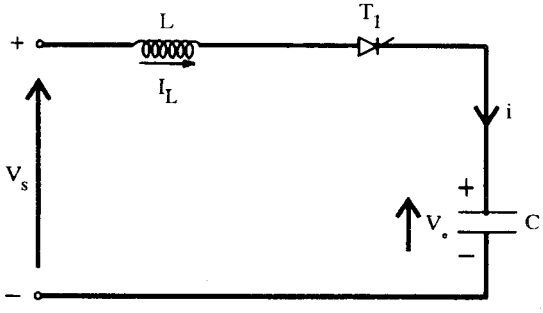
معادله مدار عبارتند از،

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

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 $\omega_m t_o = \frac{\pi}{۲}$ به صفر می‌رسد و در نتیجه تریستور در t_o قطع می‌شود و بنابراین مدت زمان هدایت تریستور که برابر t_o است از این رابطه به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{۱}{\sqrt{LC}} t_o = \frac{\pi}{۲} \rightarrow t_o = ۰/۵\pi \sqrt{LC}$$

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

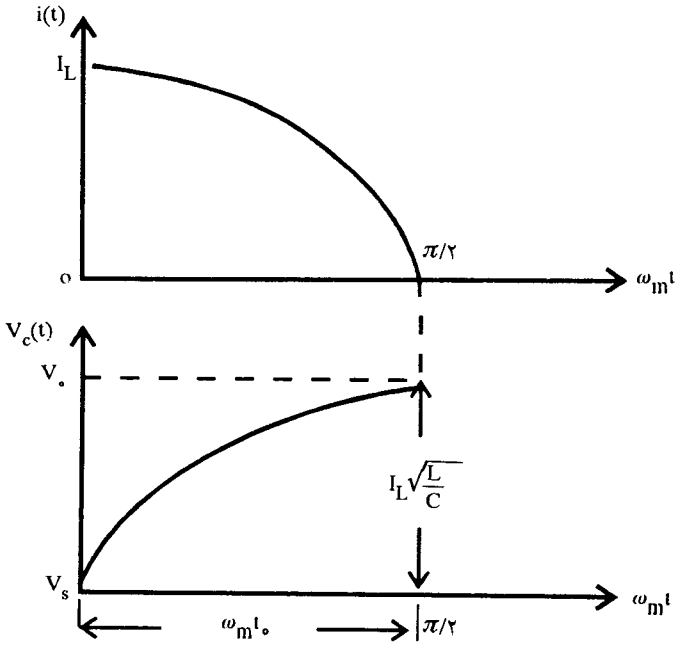
$$v_c(t_o) = V_s + I_L \sqrt{L/C}$$

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

$$t_o = ۰/۵\pi \sqrt{۱۰ \times ۱۰^{-۶} \times ۵۰ \times ۱۰^{-۶}} = ۳۵/۱۲ \times ۱۰^{-۶} = ۳۵/۱۲ \mu S$$

$$V_c = ۲۰۰ + ۲۵۰ \sqrt{\frac{۱۰}{۵۰}} = ۲۰۰ + ۱۱۱/۸۰ = ۳۱۱/۸ \text{ V}$$

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



شکل ۴-۲۷ شکل موج‌های جریان و ولتاژ

مساله ۴-۲

در مدار کموتاسیون ضربه‌ای شکل ۴-۸، $C = ۲۰\mu F$ 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 $T_۲$ آتش می‌شود ولتاژ خازن در دو سر تریستور $T_۱$ قرار می‌گیرد که مقدارش از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$v_c = \frac{۱}{C}\int idt + v_c(۰)$$

$$V_s = v_c + Ri$$

با توجه به اینکه در شرایط اولیه $v_c(۰) = -V_o = -V_s$ می‌باشد از حل معادلات فوق داریم

$$v_c(t) = V_s(۱ - ۲e^{-t/RC})$$

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

$$۱-۲e^{-t/RC} = ۰ \qquad t_q = RCLn۲$$

برای وقتی که $V_s = ۱۸۰V$ و $I_L = ۵۰A$ است مقدار مقاومت برابر است با

$$R = \frac{۱۸۰}{۵۰} = ۳/۶\ \Omega$$

$$t_q = ۳/۶ \times ۲۰ \times ۱۰^{-۶} ln۲ = ۵۰ \times ۱۰^{-۶} = ۵۰\ \mu s$$

برای وقتی که $V_s = ۲۲۰$ و $I_L = ۲۰۰$ است مقدار مقاومت برابر است با

$$R = \frac{۲۲۰}{۲۰۰} = ۱/۱\ \Omega$$

$$t_q = ۱/۱ \times ۲۰ \times ۱۰^{-۶}\ Ln۲ = ۱۵/۲۵ \times ۱۰^{-۶} = ۱۵/۲۵\mu S$$

بنابراین وقتی ولتاژ و جریان بار تغییر می‌کنند زمان قطع از حداقل $۱۵/۲۵\ \mu s$ تا حداکثر $۵۰\ \mu s$ تغییر می‌نماید.

مساله ۴-۳

در مدار کموتاسیون ضربه‌ای شکل ۴-۸، مقدار C و L را تعیین کنید در صورتی که $V_s = ۲۲۰V$ و جریان بار $I_L = ۱۵۰A$، زمان قطع $t_q = ۱۵\mu s$ 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 درآن مقدار مقاومت R، با داشتن ولتاژ و جریان بار قابل محاسبه است، بنابراین

$$t_q = RCLn۲$$

$$R = \frac{V_s}{I_L} = \frac{۲۲۰}{۱۵۰}\Omega$$

$$۱۵\times۱۰^{-۶} = \frac{۲۲۰}{۱۵۰}CLn۲$$

$$C = \frac{۱۵\times۱۰^{-۶}\times۱۵۰}{۲۲۰\,Ln۲} = ۱۴/۷۵\times۱۰^{-۶} = ۱۴/۷۵\mu F$$

برای محاسبه Lبایستی مدار LC راکه پس از آتش شدن تریستور $T_۳$ ایجاد می‌شود در نظر گرفت. این مدار مشابه مدار شکل ۴-۱۱، تریستور $T_۳$ باکموتاسیون خودی قطع می‌شود. با توجه به معادله (۴-۷) حداکثر مقدار جریان از رابطه زیر بدست می‌آید و نبایستی از ۱۵۰٪ جریان I_L بیشتر شود بنابراین،

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

$$\frac{۱۵۰}{۱۰۰}\times۱۵۰ = ۲۲۰\sqrt{\frac{۱۴/۷۵\times۱۰^{-۶}}{L}}$$

$$L = ۱۴/۱۰\mu H$$

مساله ۴-۴

مدار کموتاسیون (چاپر ایده‌ال) شکل ۴-۶که در فرکانس ۵۰۰Hz کار می‌کند، باری به مقاومت ۳Ω و اندوکتانس ۹ mH را از طریق یک باطری ۶۰V تغذیه می‌کند. با فرض اینکه باطری 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 $\frac{۱}{۴}$ باشد، حساب کنید. همچنین مقدار متوسط جریان و ولتاژ را در هر پریود محاسبه نمائید.

حل - در چاپر ایده‌ال در خلال پریود روشن بودن (on) تمام ولتاژ باطری 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_2 تنزل می‌یابد. شکل زیر، شکل موج جریان و ولتاژ رابرای 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:

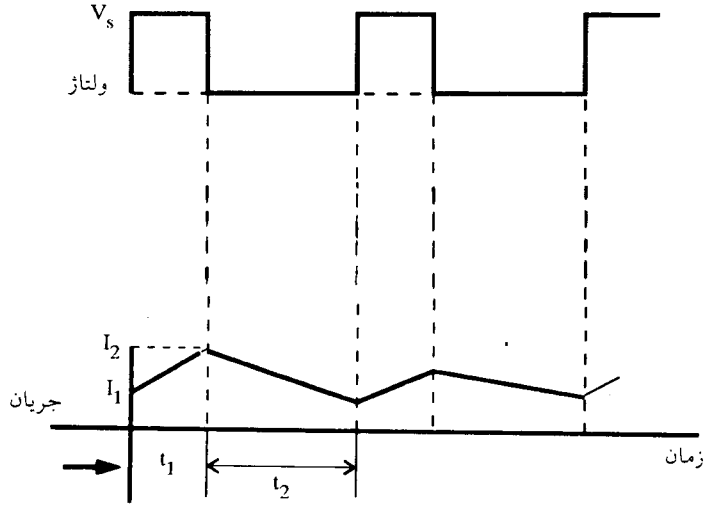
$$\text{پریود وصل} \quad i = I_1 + \left(\frac{E}{R} - I_1\right)(1 - e^{-t/T}) = I_2 \quad \text{وقتی} \quad t = t_1$$

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

از معادلات بالا داریم

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

در مساله فوق $\frac{E}{R} = \frac{60}{30} = 20$ و $T = \frac{L}{R} = \frac{0/009}{3} = 0/003\,S$، در فرکانس ۵۰۰Hz، $t_1 + t_2 = \frac{1}{500} = 0/002S$ است.



شکل موج جریان و ولتاژ

برای نسبت $\frac{on}{off} = \frac{۱}{۴}$ داریم،

$$I_۱ = ۳/۰۱ \text{ A} \quad و \quad I_۲ = ۵/۱۳ \text{ A}$$

مقدار متوسط جریان و ولتاژ برابر است با،

$$V_{متوسط} = ۶۰ \times (\frac{۱}{۵}) = ۱۲ \text{ V}$$

$$I_{متوسط} = \frac{۱۲}{۳} = ۴ \text{ A}$$

مساله ۴-۵

در مدار شکل ۴-۱۵ که یک چاپر با خازن موازی است، اندازه خازن مورد لزوم را بدست آورید در صورتی که بار ۶Ω بوده و از باطری ۳۶V تغذیه می‌گردد. زمان قطع لازم برای تریستور $T_۱$ برابر $۸۰\mu s$ است. اگر $R_۲ = ۵R_۱$ باشد حداقل زمان وصل تریستور $T_۱$ را بدست آورید. از تلفات تریستور صرفنظر کنید.

حل - در شکل ۴-۱۵ وقتی تریستور $T_۱$ آتش می‌شود خازن تا ولتاژ V_s شارژ می‌شود. با روشن کردن $T_۲$ این ولتاژ در دو سر تریستور $T_۱$ قرار گرفته آنرا خاموش می‌نماید ولتاژ دو سر خازن (یا تریستور $T_۱$) در این حالت با توجه به شکل ۴-۲۸ از رابطه زیر بدست می‌آید،

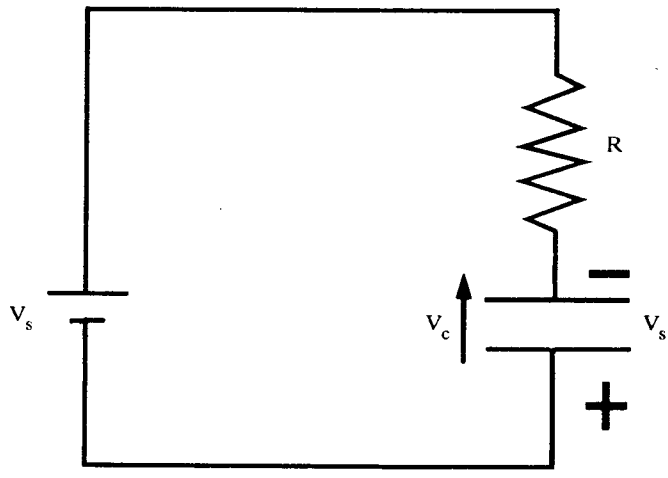
$$V_c = V_s + A\, e^{-t/\tau}$$

$$-V_s = V_s + A \rightarrow A = -۲V_s$$

$$V_c = V_s - ۲V_s\, e^{-t/\tau}$$

بنابراین در لحظه آتش شدن $T_۲$، ولتاژ $V_c = -V_s$ در دو سر تریستور $T_۱$ قرار می‌گیرد و در پایان زمان قطع، ولتاژ V_c به صفر کاهش می‌یابد و این زمانی است که رابطه زیر برقرار باشد.

$$۰ = V_s - ۲V_s\, e^{-t/\tau}$$



شکل ۴-۲۸

$e^{-t/\tau} = ۰/۵ \rightarrow t/\tau = ۰/۶۹۳$

بنابراین با معلوم بودن $t = ۸۰\mu s$ مقدار τ معلوم می‌شود یعنی

$\tau = ۸۰ \times ۱۰^{-۶} \; / \; ۰/۶۹۳$

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

$۸۰ \times ۱۰^{-۶} \; / ۰/۶۹۳ = ۶C$

$C = (۸۰ \times ۱۰^{-۶})(۰/۶۹۳ \times ۶) = ۱۹/۲\mu F$

وقتی T_1 آتش‌گردد تغییرات ولتاژ روی خازن C برابر است با $V_c = V_s - ۲Vs\ e^{-t/\tau}$ که در آن $\tau = R_2C$ و $R_2 = ۵R_1 = ۳۰\Omega$ است و (مثلاً) T_1 باید تا زمانی که $V_c = ۰/۸V_s$ می‌شود، روشن بماند که در نتیجه حداقل زمان وصل به شرح زیر محاسبه می‌شود

$۰/۸V_s = V_s - ۲V_s e^{-t/\tau}$

$e^{-t/\tau} = ۰/۱ \rightarrow e^{-t/\tau} = ۱۰$

$$e^{-t/\tau} = ۱۰ \rightarrow t/\tau = \ln ۱۰$$

$$t = ۳۰ \times ۱۹/۲ \times ۱۰^{-۶}\ \mathrm{Ln}۱۰ = ۱/۳۳ \times ۱۰^{-۳} = ۱/۳۳\ \mathrm{ms}$$

مساله ۴-۶

از پل کموتاسیون تکمیلی شکل ۴-۱۸ برای تغذیه یک باراهمی ۵Ω توسط منبع تغذیه ۲۰۰ V dc استفاده شده است. با توجه به زمان خاموشی (قطع) ۴۰μs برای تریستور، مقادیر مناسب برای اجزاء مدار پیشنهاد کنید. فرض کنید این اجزاء ایده‌ال و بدون تلفات می‌باشند.

حل - شکل ۴-۲۹ بیانگر شرایط خاموشی (قطع) است. نوسان انرژی ذخیره شده $\frac{۱}{۲}CV^۲ + \frac{۱}{۲}LI^۲$ را در فرکانس $۱/۲\pi\sqrt{۲LC}$ در بردارد. زمان قطع ۴۰μs بیانگر زمانی است که ولتاژ خازن به نصف مقدار اولیه تنزل می‌یابد.

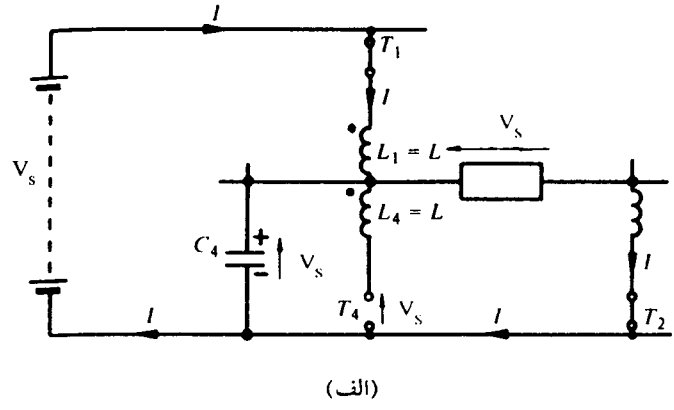
ابتدا خازن در اندوکتانس تخلیه می‌شود و جریان آن با رابطه $i=I_m\mathrm{Sin}(\omega t + \phi)$ افزایش می‌یابد و در $t = ۰$ داریم $i = ۲۰۰/۵$. ولتاژ خازن برابر است با $L di/dt$، بنابراین مدت زمانی که طول می‌کشد تا di/dt به نصف مقدار اولیه‌اش تنزل یابد مدت زمان قطع تریستور بدست می‌آید. در انتخاب مقدار I_{max} لازم است بین اطمینان یافتن از کموتاسیون و اجتناب از تلفات اضافی کموتاسیون مصالحه‌ای صورت گیرد. به طور مثال اگر $I_{max} = ۱/۵ \times ۲۰۰/۵ = ۶۰A$ انتخاب شود آنگاه $i = ۶۰\mathrm{Sin}(\omega t + \phi)$ خواهد بود که در آن به ازای $i = ۴۰A$ مربوط به $t=۰$، منجر به $\phi = ۰/۷۳$ می‌گردد.

$di/dt = ۶۰\omega\mathrm{Cos}(\omega t + \phi)$ که در $\omega t = ۰/۴۵۹$ به نصف مقدار خود می‌رسد بنابراین داریم:

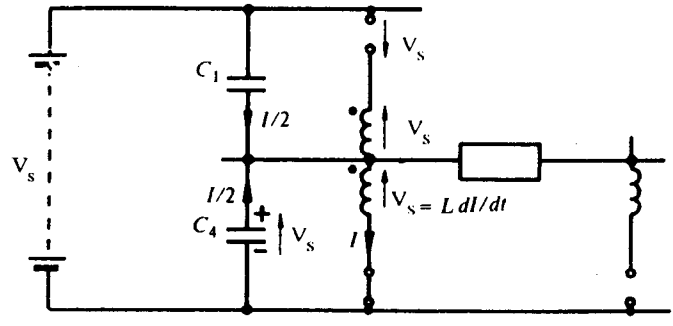
$$\omega = ۰/۴۵۹/(۴۰ \times ۱۰^{-۶}) = ۱۱۴۷۸$$

وقتی $(\omega t + \phi) = \pi/۲$ باشد ولتاژ خازن صفر است و جریان اندوکتانس در مقدار پیک ۶۰A است. مقدار باری که $C_۲$ از دست داده است روی $C_۱$ قرار می‌گیرد، از این رو انرژی اضافی ذخیره شده در اندوکتانس L از باطری دریافت می‌شود و برابر است با

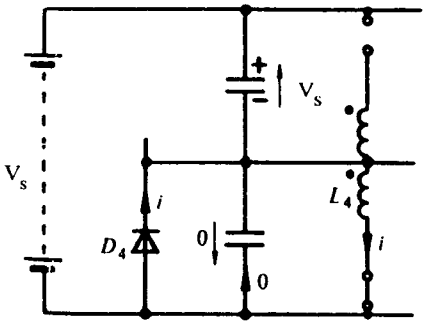
$$\int_{\omega t=۰}^{\omega t+\phi=\pi/۲} ۲۰۰(۶۰/۲)\mathrm{Sin}(\omega t+\phi)dt = ۴۴۷۲/\omega = \frac{۱}{۲}L(۶۰^۲ - ۴۰^۲)$$



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۴-۲۹ وضعیت مدار شکل ۴-۱۸ در شرایط خاموشی (قطع) با باراهمی (الف) قبل از اینکه T_2 آتش شود (ب) بالافاصله پس از آتش شدن T_2 (پ) پس از اینکه ولتاژ خازن می‌خواهد معکوس گردد.

همچنین $\omega = ۱۱۴۷۸ = ۱/\sqrt{۲Lc}$ که درآن $L = ۳۹۰\mu H$ و $C = ۹/۷۴\mu F$ است. با مراجعه به شکل ۴-۲۹ پ ملاحظه می‌شود که جریان در دیود $D_۲$ با ۶۰A شروع می‌شود و وقتی که انرژی ذخیره شده $\frac{۱}{۲}LI^۲ = ۰/۷J$ در هر کموتاسیون تلف می‌شود، به صفر کاهش می‌یابد. مقدار di/dt در تریستور $T_۱$ برابر است با $i/C = ۳۰/۹/۷۴ = ۳V/\mu s$

مساله ۴-۷

مدار کموتاسیون رزونانس سری شکل ۴-۲۱ دارای مقادیر $L= ۳mH$، $C=۲۰\ \mu F$ و $R= ۵۰\Omega$ است. اگر منبع dc ۱۰۰ ولت باشد، مقادیر نامی تریستور را بدست آورید. از کلیه تلفات صرفنظر کنید. همچنین توان بار را برای حالاتی که تریستور با فرکانس (الف) ۴۰۰Hz (ب) ۲۰۰Hz آتش شود، بدست آورید.

حل - برای تعیین توان بار لازم است عبارتی برای جریان تریستور و ولتاژ بار را بدست آورد. در شکل ۴-۳۰ مدار معادل شکل ۴-۲۱ در حالتی که تریستور روشن شده است (در زمان t=۰) نشان داده شده است.

فرض کنید در لحظه t=۰ ولتاژ خازن $v=V_۰$ و در همین لحظه $i_۱=۰$ است.

معادلات ولتاژ در این مدار به قرار زیر است:

$$V_s = L\frac{di_۱}{dt} + \frac{۱}{C}\int i_۲dt$$

$$۰ = \frac{۱}{C}\int i_۲dt - Ri_۱ + Ri_۲$$

با تبدیل این معادلات به فرم لاپلاسی داریم.

$$\frac{V_s}{s} = SL\bar{i}_۱ + \frac{۱}{C}\left[\frac{\bar{i}_۲}{S} + \frac{V_۰}{S}C\right]$$

$$۰ = \frac{۱}{C}\left[\frac{\bar{i}_۲}{S} + \frac{V_۰}{S}C\right] + R\bar{i}_۲ - R\bar{i}_۱$$

پس از حل معادلات فوق داریم

$$i_۱ = \frac{V_s}{R} - e^{-\alpha t}\left[\frac{V_s}{R}\cos\omega t + (\frac{\alpha V_s}{\omega R} - \frac{V_s}{\omega L} + \frac{V_۰}{\omega L})\sin\omega t\right]$$

که درآن

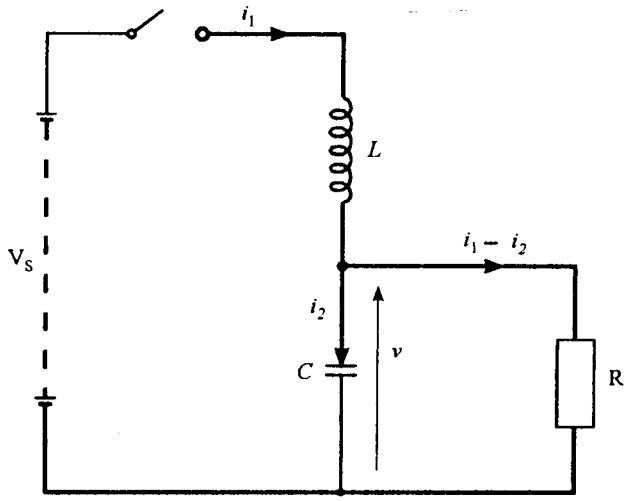
$$\alpha = \frac{۱}{۲RC} \qquad \omega = \left[\frac{۱}{LC} - (\frac{۱}{۲RC})^۲\right]^{\frac{۱}{۲}}$$

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

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.

$$i_1 = ۲ - e^{-۵۰۰t}\left[۲\cos۴۰۵۱۱t + (۰/۰۸۲V_0 - ۷/۸۹)\sin۴۰۵۱۱t\right]$$

$$v = ۱۰۰ - e^{-۵۰۰t}\left[(۱۰۰ - V_0)\cos۴۰۵۱۱t + (۱۲/۳۴ + ۰/۱۲۳۴V_0)\sin۴۰۵۱۱t\right]$$



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

وقتی $i_1 = ۰$ است جریان تریستور متوقف می‌شود و این زمانی است که $t = ۰/۹۴ms$ باشد در صورتی که تریستور اولین بار روشن شده باشد (یعنی $V_0 = ۰$ باشد). حداکثر مقدار جریان i_1 در $t = ۰/۴۷\ ms$ اتفاق می‌افتد و برابر است با $۸/۴۱\ A$. ولتاژ دو سربار در لحظه خاموش شدن برابر $v = ۱۵۳/۹V$ است. ولتاژ معکوس دو سرتریستور در هنگام خاموش شدن برابر است با $۱۰۰ - ۱۵۳/۹ = ۵۳/۹\ V$ که در $۴۳۱\mu s$ به صفر تنزل می‌یابد یعنی وقتی که $۱۵۳/۹e^{-t/RC} = ۱۰۰$ می‌باشد و در نتیجه زمان قطع مشخص می‌گردد.

جریان پیک تریستور برابر $۸/۴۱A$ است و اگر پریود قطع و وصل یکسان در نظر گرفته

شود، مقدار rms جریان برابر $۸/۴۱/۲=۴/۲A$ خواهد بود.

(الف) در فرکانس ۴۰۰Hz، تریستور در هر ۲/۵ms روشن می‌شود. با توجه به داده‌های قبلی ولتاژ دو سربار در پایان اولین سیکل به مقدار $v = ۱۵۳/۹e^{-(۲/۵-۰/۹۴)۱۰^{-۳}/RC} = ۳۲/۳\ V$ کاهش می‌یابد و تقریباً در شروع و پایان هر سیکل به مقدار تقریبی ۳۰V استقرار می‌یابد و زمان روشن بودن تریستور ۱/۰۳۵ms خواهد بود. معادله ولتاژ در پریود روشن بودن تریستور برابر است با $v = ۱۰۰ - e^{-۵۰۰t}[۷۰Cos۴۰۵۱t + ۱۶Sin۴۰۵۱t]$ و در پریود تخلیه شدن خازن (یعنی ۱/۴۶۵ms = ۱/۰۳۵ - ۲/۵)، $v = ۱۳۰e^{-t/RC}$ خواهد بود.

انرژی بار در هر سیکل برابر است با انرژی خروجی باطری در هر سیکل یعنی:

$$\int V_s i_1 dt = \int_{۰}^{۱/۰۳۵\times۱۰^{-۳}} ۱۰۰[۲ - e^{۵۰۰t}(۲Cos۴۰۵۱t - ۵/۴۳Sin۴۰۵۱t)]dt$$

$$= [۲۰۰t - e^{-۵۰۰t}(۰/۱۲۶Cos۴۰۵۱t + ۰/۰۶۵Sin۴۰۵۱t)]_{۰}^{۰/۰۰۱۰۳۵}$$

$$= ۰/۲۰۷ + ۰/۰۷۱ + ۰/۱۲۶ = ۰/۴۰۴J$$

$$\text{توان} = ۰/۴۰۴ \times ۴۰۰ = ۱۶۱/۶\ W$$

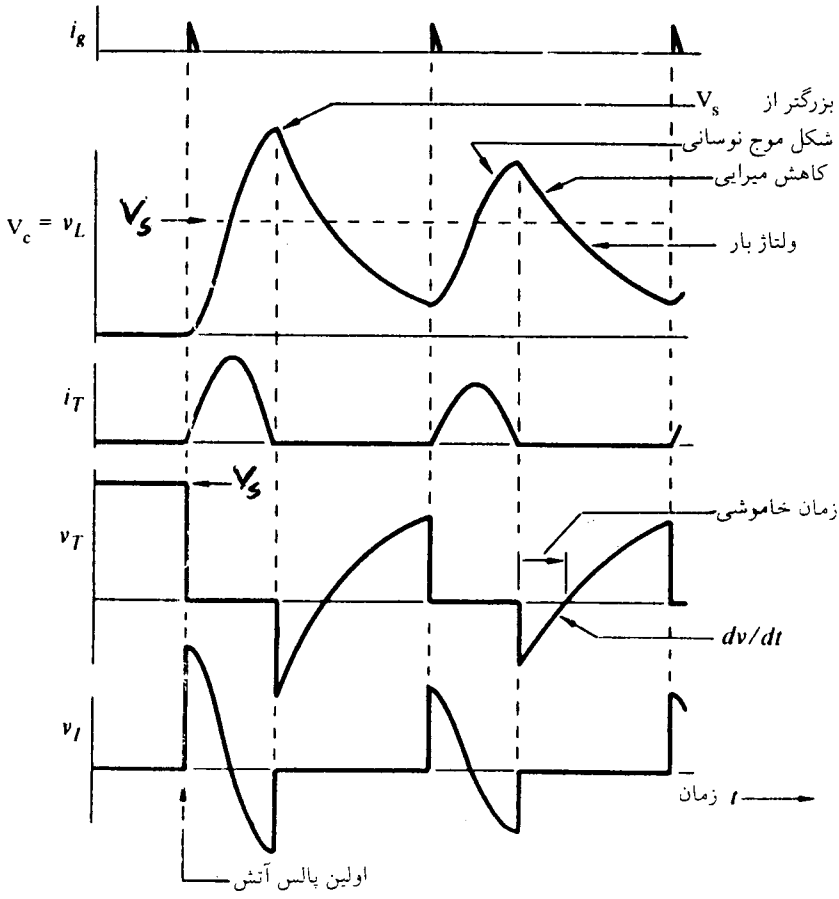
(ب) اگر تریستور در فرکانس ۲۰۰Hz یعنی در پریود 5ms روشن شود، پس از اولین سیکل ورودی، ولتاژ بار به مقدار $v = ۱۵۳/۹\ e^{-(۵-۰/۹۴)\times۱۰^{-۳}/RC} = ۲/۶\ V$ تنزل می‌یابد، که عملاً می‌توان صفر در نظر گرفت. انرژی دریافت شده از باطری در خلال هر سیکل و با توجه به $V_0 = ۰$ برابر ۰/۴۸۴J است که مقدار توان زیر را بدست می‌دهد،

$$\text{توان} = ۰/۴۸۴ \times ۲۰۰ = ۹۶/۸\ W$$

شکل موجهای مربوط به مدار کموتاسیون رزونانس سریِ 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 ۱۰۰V و بار ۲۰Ω و زمان خاموشی لازم برای تریستور ۸۰μs باشد. فرض کنید مدار در حالت میرایی بحرانی است و از تلفات صرفنظر کنید.



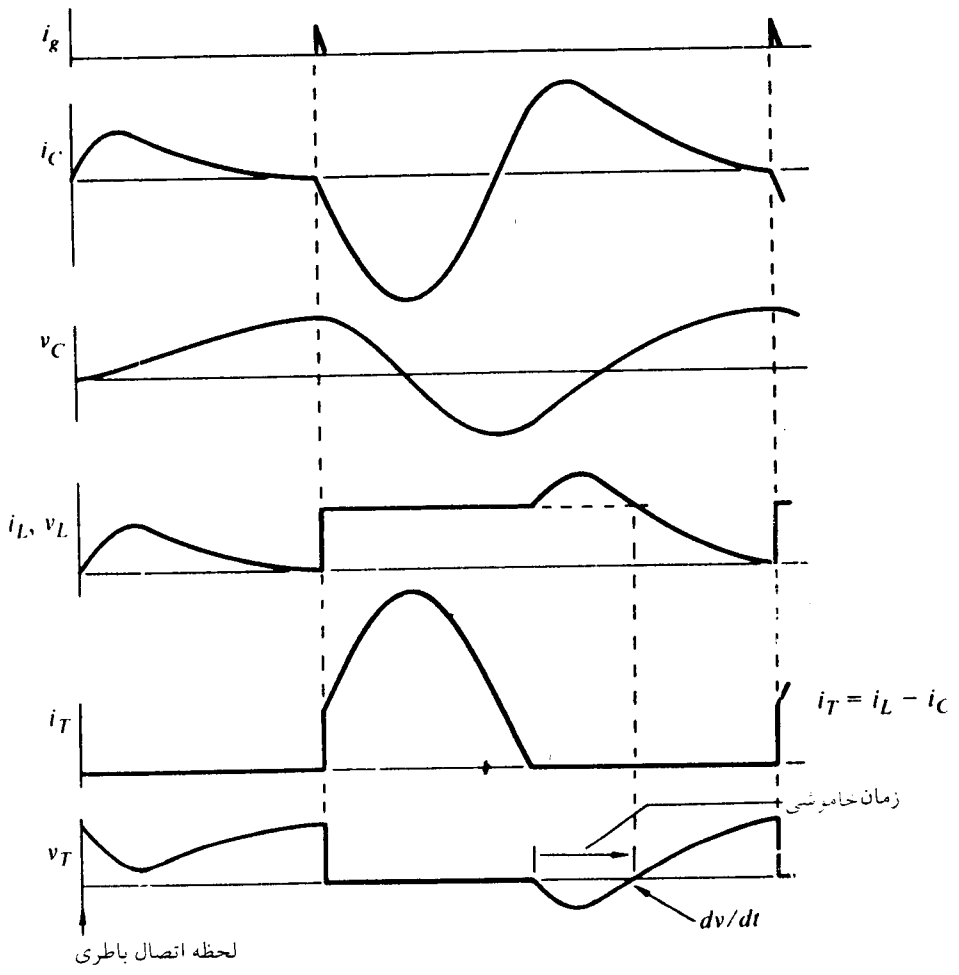
شکل ۴-۳۱ شکل موجهای مربوط به مدار کموتاسیون ۴-۲۱

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

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

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

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



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

که ولتاژ خازن در شروع خاموشی کمتر از ۱۰۰V، مثلاً" حدود ۸۷V است، بنابراین فرض می‌شود که در t=۰، Ldi/dt=۸۷ است. با توجه به شرایط فوق A=۳۰۲۰۰۰، B=۵، α=۲۲۰۴۰ خواهد شد و درنتیجه L=R/۲α = ۰/۴۵۴mH بدست می‌آید. برای حالت میرایی بحرانی داریم R^2= ۴L/C در نتیجه C= ۴/۵۴μF خواهد بود. هنگامی که تریستور روشن می‌شود مدارLC با فرکانس $\omega = 1/\sqrt{LC}$ نوسان می‌کند وجریان i= -(V/ωL)Sin ωt

خواهد بود. زمان خاموش شدن تریستور در جریان $i=۱۰۰/۲۰ = ۵A$ بدست می‌آید یعنی در لحظه $t = ۱۶۶\mu s$ اتفاق می‌افتد. پیک جریان تریستور برابر است با،

$$\text{پیک جریان} = ۵ + (V/L\omega) = ۱۵\ A$$

مساله ۴-۹

می‌خواهیم یک بار ۱۰ آمپری را به وسیله مدار کموتاسیون با پالس خارجی شکل ۴-۲۴ کنترل نمائیم. اگر ولتاژ منبع تغذیه برابر ۲۰۰V باشد، مقادیر مناسبی برای خازن و سلف پیشنهاد کنید در صورتی که این اجزاء بدون تلفات بوده و زمان خاموشی برابر $۱۰۰\mu s$ باشد.

حل - وقتی در ابتدا منبع dc وصل می‌گردد، خازن C تا $۲\times۲۰۰ = ۴۰۰\ V$ شارژ می‌شود. وقتی $T_۲$ آتش می‌شود مدار معادل آن در شکل ۴-۳۳ الف نشان داده شده است. در $t = ۰$، جریان در $L_۱$ یعنی $i_۱$ برابر با جریان بار ۱۰A خواهدبود. با استفاده از معادله(۴-۸) یا روشهای دیگر $i_۱ = ۱۰\text{Cos}\omega t + (۴۰۰/\omega L_۱)\text{Sin}\omega t$ خواهد بود که درآن $\omega = ۱/\sqrt{L_۱C}$ است. $L_۱$ را چنان انتخاب می‌کنیم که پیک جریان $i_۱$ تقریباً ۲۰A یعنی دو برابر جریان بار گردد.بنابراین بطور مثال $\omega L_۱ = ۴۰۰/۲۰ = ۲۰$ و $v = L_۱di_۱/dt$ خواهد بود. هنگامی که به ۲۰۰V کاهش یابد ولتاژتریستور $T_۱$ شروع به مثبت شدن خواهد کرد و بنابراین زمان قطع مشخص خواهد شد یعنی

$$-۱۰\omega L_۱\text{Sin}\omega t + ۴۰۰\ \text{Cos}\omega t = ۲۰۰$$

که درآن $t=۱۰۰\mu s$ است. از این معادلات خواهیم داشت، $L_۱ = ۳/۱۱mH$، $\omega = ۶۴۳۵$ و $C = ۷/۷۶\mu F$. وقتی که ولتاژ تریستور $T_۱$ مثبت می‌شود، دیود $D_۲$ شروع به هدایت می‌کند و مدار معادل شکل ۴-۳۳ ب بدست می‌آید که این مدار تا لحظه‌ای که $i_۱$ به صفر تنزل می‌یابدیعنی تا لحظه خاموش شدن $T_۲$ قابل قبول می‌باشد. دسته معادلات دیگری در $t=۰$ و با $i_۱ = ۲۰A$، $i_۲ = ۲۰A$ و $v = ۲۰۰V$ بر آن حاکم خواهد بود. اندوکتانس $L_۲$ بایستی خیلی بزرگتر از $L_۱$ باشد بطور مثال $L_۲ = ۰/۰۲H$ باشد. مقدار بزرگتر موجب کند شدن نوسان $L_۲C$ می‌گردد. پس از حل معادلات در این شرایط خواهیم داشت،

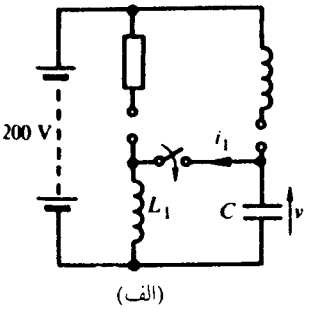
$$i_1 = ۸۶۵۵t + ۸/۰۴\text{Sin}\omega t + ۱۷/۳۱\text{Cos}\omega t + ۲/۶۹$$

$$i_2 = ۸۶۵۵t + ۲/۶۹ - ۲/۶۹\text{Cos}\omega t$$

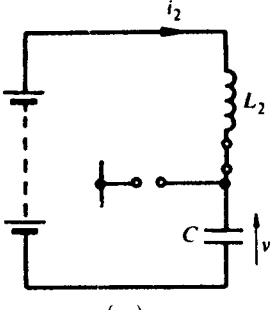
$$v = ۲۷ + ۱۷۳\text{Cos}\omega t - ۳۷۲\text{Sin}\omega t$$

که درآن $\omega = ۶۹۱۹۰$ است. وقتی i_1 به صفر تنزل می‌یابد T_2 خاموش می‌شود و زمان $t = ۳۳۲/۷\mu s$ بدست می‌آید و در این زمان $i_2 = ۷/۳۶$ A و $v = -۳۶۵$ V است.

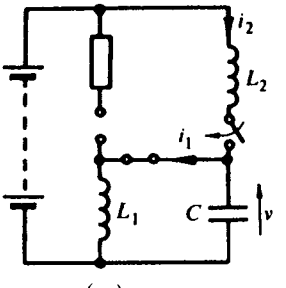
حال شرایط مدار به آنچه که در شکل ۴-۳۳ پ نشان داده شده است، تغییر می‌یابد که



(الف)



(پ)



(ب)

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

مجدداً با t=۰، $v = -۳۶۵V$ و $i_۲ = ۷/۳۶A$ شروع می‌شود. با حل معادلات برای $i_۲$ و v داریم،

$$i_۲ = ۱۱/۱ \, Sin\omega t + ۷/۳۶ Cos\omega t$$

$$v = ۲۰۰ - ۵۶۵ Cos\omega t + ۳۷۴ Sin\omega t$$

که در آن $\omega = ۲۵۳۸$ است. دیود $D_۲$ در $i_۲ = ۰$ یعنی در $t = ۱۰۰۷\mu s$ خاموش می‌شود و ولتاژ $v = ۸۷۸V$ بدست می‌آید. زمان خاموشی (قطع) تریستور $T_۲$ وقتی است که $v = ۰$ یعنی $t = ۲۷۰\mu s$ که از $۱۰۰\mu s$ مشخص شده بیشتر است.

مساله ۴-۱۰

از مدار کموتاسیون شکل ۴-۲۵ جهت کنترل بار ۶۰ آمپری از منبع تغذیه dc، ۴۸ ولتی استفاده شده است. در صورتی که زمان خاموشی (قطع) تریستورها $۳۰\mu s$ باشد، مقادیر مناسب برای اجزاء مدار پیشنهاد کنید. بار در فرکانس ۱kHz 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 $T_۱$ آتش می‌شود فرض کنید که خازن C تا ۴۸V شارژ می‌شود. وقتی تریستور $T_۲$ آتش می‌شود، خازن از طریق منبع dc و بار با جریان ۶۰A (در صورتی که جریان بار مسطح فرض شود) تخلیه می‌گردد. بنابراین $dv/dt = ۶۰/c$ که در آن $dv/dt = ۴۸/(۳۰\times۱۰^{-۶})$ می‌باشد، ولتاژ دو سر خازن (و تریستور $T_۱$) پس از $۳۰\mu s$ معکوس می‌شود و در نتیجه $C = ۳۷/۵ \, \mu F$ بدست می‌آید. وقتی $T_۲$ خاموش می‌شود خازن در طی $۳۰\mu s$ دیگر تا ولتاژ ۴۸V شارژ می‌شود. حداقل زمان وصل (روشن بودن) $T_۱$، قبل از اینکه $T_۲$ بتواند آتش شود از نیم نوسان $L_۱C$ تعیین می‌گردد. مدت زمان هر سیکل بار برابر $t = ۱۰۰۰\mu s$ $= ۱/۱۰^{۳}$ است. اگر حداقل زمان روشن بودن، مثلاً برابر $۲۰۰\mu s$ باشد (که کنترل ولتاژ بار را تا تقریباً ۲۰ درصد آن امکان‌پذیر می‌کند) مدت زمان حداقل $۱۰۰\mu s$ زمان قطع (خاموشی) $T_۲$

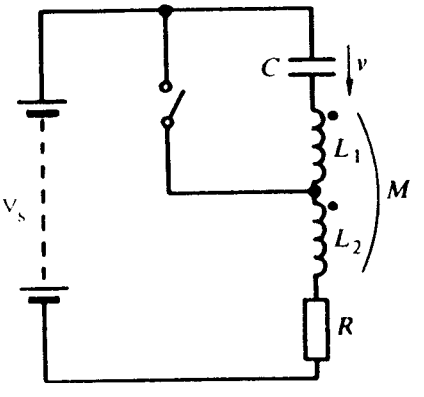
www.elec4u.ir

خواهد بود. بنابراین از رابطه $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C}} = \frac{10^6}{(200\times2)} = 1/2\ \pi\ \sqrt{L_1C}$ ، مقدار $L_1=108\mu H$ 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 $M = \sqrt{L_1 L_2}(Vs/R)\sqrt{L_2/C}$ که M است. اگر قرار باشد C تا سطح ولتاژ منبع dc، یعنی ۴۸V شارژ شود آنگاه با توجه به $V_s/R=60A$، مقدار $L_2 = 24\mu H$ می‌باشد.

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

در آتش شدن بعدی، خازن که در ابتدا تا ۴۸V شارژ شده است، یک ولتاژ اضافی تقریباً برابر با $(V_s/R)\sqrt{L_2/C}$ را دریافت می‌نماید. حداکثر مقدار ولتاژ خازن برابر ۹۶=۴۸+۴۸ می‌گردد. مقدار پیک جریان نوسانی T_1DC برای مدت زمان نیم‌سیکل ۲۰۰μs، برابر است با

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



شکل ۴-۳۴ مدار شکل ۴-۲۵

در مدت زمانی که طی می‌شود تا در خلال آن ولتاژدو سرخازن از ۹۶V به ۴۸ V برگردد، تریستور T_2 جریان ۶۰A را از خود عبور می‌دهد و این مدت زمان برابر است با

$$[37/5\times10^{-6}(96+48)]\ /60 = 90\mu s$$

مقادیر نامی تریستور T_1: مقدار موثر جریان را با توجه به جریان بار و جریان با نوسان کوتاه مدت می‌توان مثلاً ۷۰A در نظر گرفت. $dv/dt = ۶۰/(۳۷/۵\times۱۰^{-۶}) = ۱/۶ V/\mu s$،

$di/dt = ۴۸/(۲۴\times۱۰^{-۶}) = ۲A/\mu s$، P.F.V. = ۹۶V

مقادیر نامی تریستور T_2: مقدار موثر جریان برابر است با $۶۰/\sqrt{(۱۰۰۰/۹۰)} = ۱۸A$، یعنی ۶۰ آمپر برای بخش ۱۰۰۰/۹۰ از سیکل بار، $dv/dt = ۵۶/(۳۷/۵\times۱۰^{-۶}) = ۱۰۵ V/\mu s$،

(اندوکتانس نشتی در حلقه CT_2) $di/dt = ۹۶/$ ، PFV = ۹۶V

مقادیر نامی دیود D: مقدار موثر جریان ۱۸A است که از روی جریان نوسانی با پیک ۵۶A محاسبه می‌شود. در نوسان مدار L_2C که متعاقب خاموش شدن T_2 ایجاد می‌شود، P.F.V. به مقدار زیر می‌رسد،

$۹۶ \times L_1/L_2$ نسبت تبدیل = ۲۰۴ V

مجدداً خاطر نشان می‌گردد که محاسبات فوق خیلی تقریبی می‌باشد و یک راهنمایی کلی را ارائه می‌نماید. برای بدست آوردن مقادیر نهایی انجام آزمایشهای عملی ضروری است.