فصل ۷

چاپرها (برش دهنده‌ها)

۷-۱ مقدمه

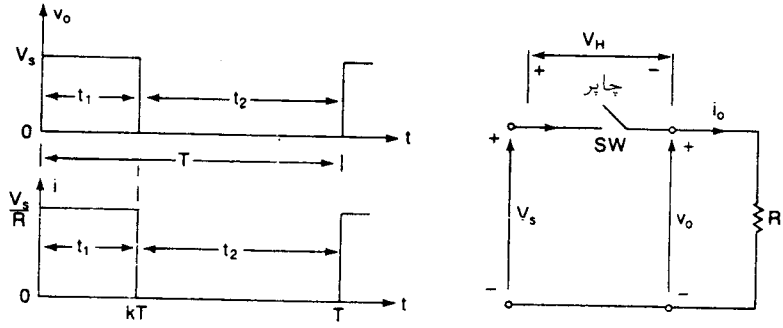
در بسیاری از کاربردهای صنعتی، لازم است که ولتاژ ثابت dc به ولتاژ متغیر dc تبدیل گردد. یک چاپر (برش دهنده یا برشگر)[1] dc مستقیماً این عمل را انجام می‌دهد و همچنین به آن مبدل dc-dc گفته می‌شود. چاپر در حقیقت معادل dc یک ترانسفورماتور ac با نسبت دور متغیر است. بنابراین نظیر یک ترانسفورماتور، قادر است ولتاژ dc را کاهش یا افزایش دهد.

از چاپرها بطور وسیع برای کنترل موتورهای حمل و نقل در اتوبوسهای برقی، بالابرها، جرثقیل‌ها و غیره استفاده می‌شود. چاپرها کنترل ملایم شتاب، بازده بالا و پاسخ دینامیکی سریع را فراهم می‌نمایند. از چاپرها همچنین می‌توان برای ترمز احیایی (مولدی)[2] موتورهای dc استفاده کرد تا انرژی به سیستم تغذیه برگشت داده شود و بنابراین این مساله در سیستم حمل ونقل در توقف‌ها منجر به صرفه‌جویی در انرژی می‌گردد. چاپرها همچنین در رگولاتورهای ولتاژ dc مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۷-۲ اصول کار چاپرکاهنده[3]

اصول کار این نوع چاپر را می‌توان با مراجعه به شکل ۷-۱ الف تشریح کرد. وقتی کلید SW برای مدت t_1 بسته می‌شود، ولتاژ ورودی V_s در دو سر بار ظاهر می‌شود. اگر کلید برای مدت t_2 قطع باشد، ولتاژ دو سر بار صفر خواهد بود. شکل موجهای ولتاژ و جریان بار در شکل ۷-۱ ب نشان داده شده است. بجای کلید SW می‌توان از BJT قدرت، MOSFET قدرت، GTO یا از تریستور با کموتاسیون اجباری استفاده کرد. در عمل این سوئیچ‌ها منجر به افت ولتی در حدود ۰/۵ الی ۲V می‌شوند، لیکن برای سهولت از افت ولت وسایل نیمه هادی صرفنظر می‌شود.

1- Chopper 2- Regenerative 3- Step-down Chopper



(ب) شکل موجها (الف) مدار

شکل ۷-۱ چاپر کاهنده با باراهمی

مقدار متوسط ولتاژ خروجی از رابطه زیر بدست می‌آید

$$V_a=\frac{1}{T}\int_o^{t_1} v_o dt=\frac{t_1}{T}V_s=F t_1 V_s=KV_s \qquad (۱-۷)$$

و مقدار متوسط جریان بار برابر است با $I_o=V_o/R=KV_s/R$ که در آن T پریود برش دادن[1] است و $K=t_1/T$ سیکل کارچاپر[2] و F فرکانس برش دادن[3] است. مقدار rms ولتاژ خروجی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$V_o=\left[\frac{1}{T}\int_o^{t_1} v_o^2 dt\right]^{\frac{1}{2}}=\left[\frac{1}{T}\int_o^{KT} v_o^2 dt\right]^{\frac{1}{2}}=\sqrt{K}\,V_s \qquad (۲-۷)$$

اگر از تلفات چاپر صرفنظر شود، توان خروجی با توان ورودی برابر است و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$P_i=\frac{1}{T}\int_o^{KT} v_o i dt=\frac{1}{T}\int_o^{KT}\frac{v_o^2}{R}dt=K\frac{V_s^2}{R} \qquad (۳-۷)$$

1- Chopping period

2- Duty cycle

3- Chopping frequency

مقاومت موثر ورودی که توسط منبع دیده می‌شود برابراست با

$$R_i = \frac{V_s}{I_o} = \frac{V_s}{KV_s/R} = \frac{R}{K} \qquad (۴-۷)$$

سیکل کار K می‌تواند به کمک t_1، T یا F از ۰ تا ۱ تغییر نماید. بنابراین به وسیله کنترل کردن K، ولتاژ خروجی می‌تواند از ۰ تا V_s تغییر نماید و در نتیجه توان عبوری نیز می‌تواند کنترل شود.

۱ - عملکرد با فرکانس ثابت. در این نوع عملکرد، فرکانس برش دادن F (یا پریود برش دادن T) ثابت نگاه داشته می‌شود و زمان وصل t_1 تغییر می‌نماید. در حقیقت پهنای پالس تغییر می‌کند و این نوع کنترل، به مدولاسیون پهنای پالس (PWM)[1] معروف است.

۲ - عملکرد با فرکانس متغیر. در این نوع عملکرد، فرکانس برش دادن F تغییر می‌کند. یعنی اینکه یا زمان وصل[2] t_1 و یا زمان قطع[3] t_2 ثابت نگاه داشته می‌شود. این نوع کنترل، به مدولاسیون فرکانس موسوم است. بایستی فرکانس در محدوده وسیعی تغییر نماید تا ولتاژ خروجی کامل بدست آید. این نوع کنترل منجر به تولید هارمونیک در فرکانسهای غیرقابل پیش‌بینی می‌گردد که طراحی فیلتر را مشکل می‌نماید.

۷-۳ اصول کار چاپر افزاینده[4]

جهت افزایش ولتاژ dc می‌توان از یک چاپر افزاینده مطابق آنچه که در شکل ۷-۲ الف نشان داده شده است، استفاده کرد. هنگامی که کلید SW برای مدت زمان t_1 بسته می‌شود، جریان اندوکتانس افزایش می‌یابد و انرژی در آن ذخیره می‌شود. اگر کلید برای مدت زمان t_2 باز شود، انرژی ذخیره شده از طریق دیود D_1 به بار انتقال می‌یابد و جریان اندوکتانس کاهش می‌یابد. با فرض پیوسته بودن جریان، شکل موج مربوط به جریان درون اندوکتانس در شکل ۷-۲ ب نشان داده شده است.

وقتی چاپر وصل می‌شود، ولتاژ دو سر اندوکتانس برابر خواهد بود با

$$v_L = L\frac{di}{dt}$$

و در نتیجه جریان عبوری از اندوکتانس دارای ریپل با مقدار پیک تا پیک زیر خواهد بود:

$$\Delta I = \frac{V_s}{L} t_1 \qquad (۵-۷)$$

1- Pulse Width Modulation

2- On- time

3- Off-time

4- Step-up chopper

در مدت قطع چاپر مقدار لحظه‌ای ولتاژ خروجی برابر است با

$$v_o = V_s + L\frac{\Delta I}{t_2} = V_s(1+\frac{t_1}{t_2}) = V_s\,(\frac{1}{1-K}) \qquad (۶-۷)$$

که در بدست آوردن رابطه آخر در معادله فوق از رابطه $K=t_1/T=t_1/t_1+t_2$ استفاده شده است.

چنانچه یک‌خازن C_L مطابق‌شکل به‌دوسربار متصل شود،(که درشکل‌بصورت خط‌چین‌نشان‌داده‌شده‌است)، ولتاژخروجی v_o پیوسته‌خواهدشدودارای‌مقدارمتوسط V_a است. از معادله (۷-۶) بر می‌آید که با تغییر دادن سیکل کار K، می‌توان ولتاژ دو سر بار را افزاش داد و حداقل ولتاژ با $K=0$ بدست می‌آید که برابر V_s است. البته چاپر نمی‌تواند بطور دائم سوئیچ گردد طوری که $K=1$ باشد. برای مقادیر K که نزدیک به واحد باشد، ولتاژ خروجی خیلی زیاد و فوق‌العاده نسبت به تغییرات K حساس می‌شود همانطوریکه در شکل ۷-۲ پ نشان داده شده است.

از این عملکرد می‌توان جهت انتقال انرژی از یک منبع ولتاژ به منبع دیگر، مطابق شکل ۷-۳ الف استفاده نمود. مدار معادل آن برای مدهای عملکرد در شکل ۷-۳ ب نشان داده شده است و شکل موجهای جریان در شکل ۷-۳ پ نشان داده شده است. جریان اندوکتانس در مُد ۱ بوسیله رابطه زیر بدست می‌آید،

$$V_s = L\frac{di_1}{dt}$$

و به فرم زیر بیان می‌شود.

$$i_1(t) = \frac{V_s}{L}\,t + I_1 \qquad (۷-۷)$$

که در آن I_1 جریان اولیه برای مُد ۱ است. در خلال مُد ۱، بایستی جریان افزایش یابد و شرایط لازم چنین است،

$$\frac{di_1}{dt}>0 \quad \text{یا} \quad V_s>0 \qquad (۸-۷)$$

جریان برای مُد ۲ از رابطه زیر بدست می‌آید،

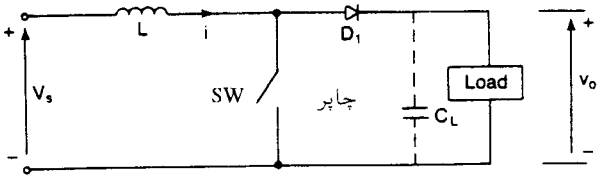
$$V_s = L\,\frac{di_2}{dt} + E$$

که بصورت زیر بیان می‌شود

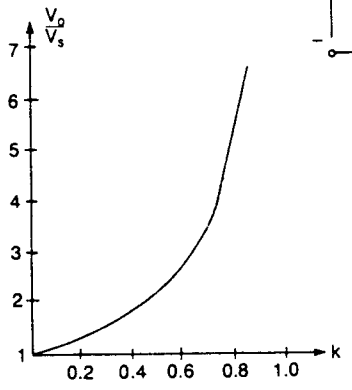
$$i_2(t) = \frac{V_s - E}{L}\,t + I_2 \qquad (۹-۷)$$

که درآن I_2 جریان اولیه برای مُد۲ می‌باشد. برای یک سیستم پایدار، بایستی این جریان کاهش یابد و شرایط به قرار زیر خواهد بود.

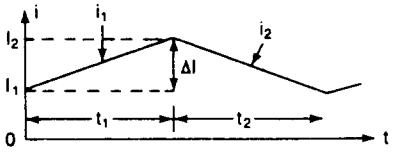
$$\frac{di_2}{dt}<0 \quad \text{یا} \quad V_s<E \qquad (۱۰-۷)$$



(الف) آرایش مدار

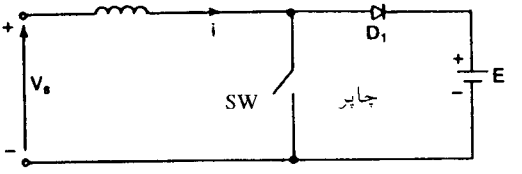


(پ) ولتاژ خروجی

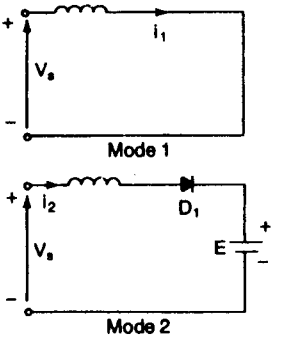


(ب) شکل موج جریان

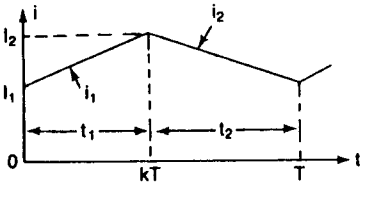
شکل ۷-۲ عملکرد چاپر افزاینده



(الف) دیاگرام مداری



(ب)مدارهای معادل



(پ)شکل موج جریان اندوکتانس

شکل ۷-۳ انتقال انرژی از منبعی به منبع دیگر

چنانچه شرایط معادله (۷-۱۰) برآورده نشود، جریان اندوکتانس بطور پیوسته افزایش می‌یابد و وضعیت ناپایدار رخ خواهد داد. بنابراین بایستی بین ولتاژها شرایط زیر برقرار باشد.

$$0 < V_s < E \qquad (۷-۱۱)$$

معادله (۷-۱۱) نشان می دهد که بایستی منبع ولتاژ V_s کوچکتر از ولتاژ E باشد، تا انتقال توان از یک منبع ثابت (یا متغیر) به یک منبع ولتاژ ثابت dc میسر گردد. در ترمز الکتریکی موتورهای dc، که درآنها موتورها بصورت ژنراتورهای dc عمل می‌کنند، چاپر توان را به منبع ثابت dc یا یک رئوستا انتقال می‌دهد. از آنجائی که وسایل نیمه‌هادی قدرت به یک زمان حداقل برای قطع و وصل نیاز دارند، سیکل کار K، می‌تواند بین یک مقدار حداقل K_{min} و یک مقدار حداکثر K_{max} کنترل گردد و در نتیجه ولتاژ خروجی بین دو مقدار (حداکثر و حداقل) محدود می‌گردد. همچنین با توجه به اینکه ریپل موجود در جریان بار با فرکانس برش دادن نسبت معکوس دارد، بایستی فرکانس تا حد ممکن زیاد باشد تا ریپل جریان کاهش یابد و اندازه اندوکتانس سری قرارداده شده در مدار بار، حداقل گردد.

شکل ۷-۴ الف مدار اصلی چاپر را نشان می‌دهد که یک بار اندوکتیو را تغذیه می‌نماید. مقدار متوسط ولتاژ برابر است با

$$V_L = V_s t_1/T \qquad (۷-۱۲)$$

ومقدار rms ولتاژ بار برابر است با

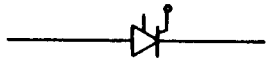
$$V_{L,rms} = V_s \sqrt{t_1/T} \qquad (۷-۱۳)$$

مقدار اندوکتانس بار و سرعت سوئیچینگ طوری است که جریان بار پیوسته است و شکل موجهای ولتاژ و جریان به ترتیب در شکلهای ۷-۴ ب و ۷-۴ پ نشان داده شده است. اگر پریود T خیلی کوچکتر از ثابت زمانی بار باشد و یا اینکه از یک خازن صافی استفاده شود، تغییرات جریان بار را می‌توان خطی در نظر گرفت. بنابراین در خلال هدایت داریم،

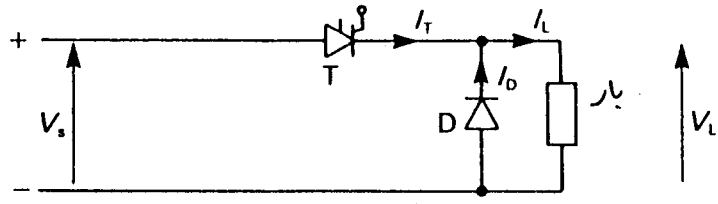
$$V_s - V_L = L\, di/dt = L\, \Delta i/\Delta t \qquad (۷-۱۴)$$

که در آن L اندوکتانس بار می‌باشد

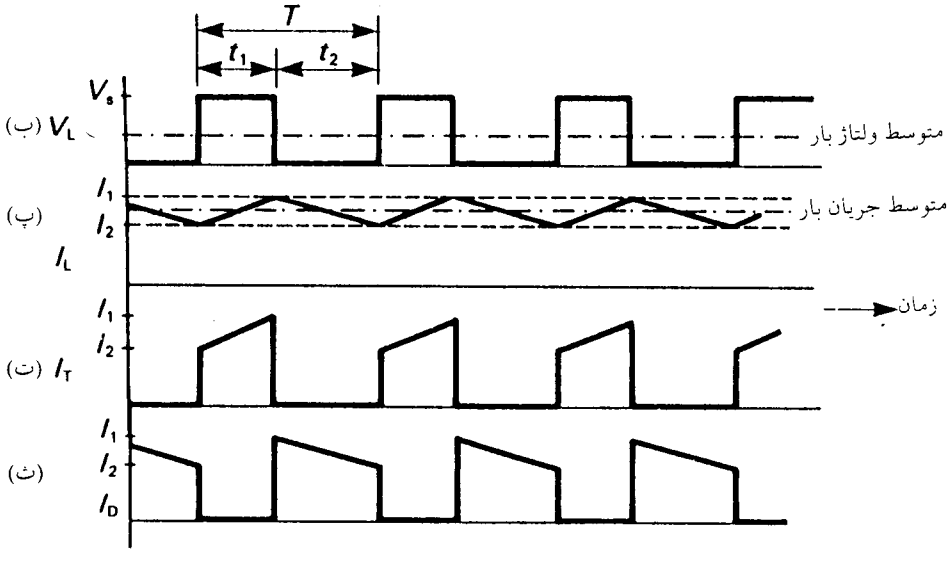
$$I_1 - I_2 = (V_s - V_L)\, t_1/L \qquad (۷-۱۵)$$



علامت اختصاری تریستور با کموتاسیون اجباری



(الف) مدار اصلی چاپر



شکل ۷-۴ عملکرد مدار اصلی چاپر در شرایطی که T خیلی کوچکتر از ثابت زمانی است و یا صافی در مدار وجود دارد

همچنین

$$I_{\text{متوسط}} = (I_1 + I_2)/2 \qquad (۱۶-۷)$$

ودر نتیجه

$$I_1 = I_{\text{متوسط}} + t_2 V_L/(2L) \qquad ۱۷-۷)$$

و

$$I_2 = I_{\text{متوسط}} - t_2 V_L/(2L) \qquad (۱۸-۷)$$

بنابراین جریان ریپل را می‌توان بصورت زیر بیان کرد.

$$i_r = I_r\left(\frac{t}{t_1} - \frac{1}{2}\right) \quad \text{برای} \quad 0 < t < t_1 \qquad (۱۹-۷)$$

$$i_r = I_r\left(\frac{1}{2} - \frac{(t-t_1)}{t_2}\right) \quad \text{برای} \quad t_1 < t < T \qquad (۲۰-۷)$$

که در آنها I_r دامنه پیک تا پیک ریپل جریان است و برابر است با

$$I_r = (I_1 - I_2)$$

بنابراین مقدار rms ریپل جریان برابر است با

$$I_{r,rms} = \left\{\frac{1}{T}\left[\int_0^{t_1} I_r^2\left(\frac{t}{t_1} - \frac{1}{2}\right)^2 dt + \int_{t_1}^{T} I_r^2\left(\frac{1}{2} - \frac{(t-t_1)}{t_2}\right)^2 dt\right]\right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$= (I_1 - I_2)/2\sqrt{3} \qquad (۲۱-۷)$$

اگر پریود T در حدود ثابت زمانی سیستم باشد در غیاب صافی، نمی‌توان تغییرات جریان را خطی در نظر گرفت. با مراجعه به شکل ۷-۵ در خلال هدایت داریم

$$i_L = I_2 + \left(\frac{V_s}{R} - I_2\right)\left(1 - e^{\frac{-R}{L}t}\right) \qquad (۲۲-۷)$$

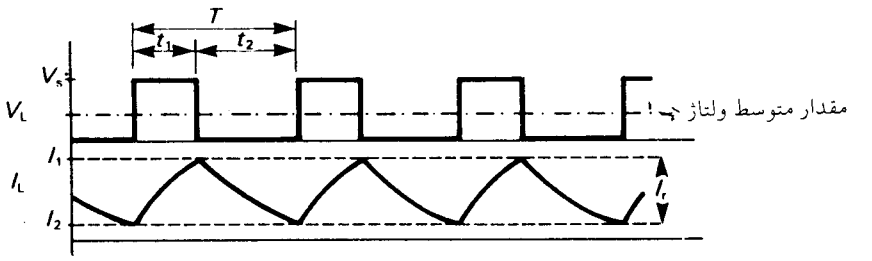
و وقتی منبع تغذیه قطع است داریم

$$i_L = I_1 e^{-\frac{R}{L}t} \qquad (۲۳-۷)$$

با افزایش بیشتر T جریان ناپیوسته می‌شود.

مثال ۷-۱

یک چاپر dc ساده در فرکانس ۲kHz کار می‌کند و از یک منبع dc، ۹۶V بار با مقاومت اهمی ۸Ω را تغذیه می‌نماید. ثابت زمانی بار ۶ms است. اگر مقدار متوسط ولتاژ بار ۵۷/۶V باشد، سیکل کارچاپر، مقدار متوسط جریان بار، دامنه و rms ریپل جریان را حساب کنید.



شکل ۷-۵ عملکرد مدار اصلی چاپر در شرایطی که T در حدود ثابت زمانی است و صافی وجودندارد

حل - پریود = $T = 1/F = 1/2000 = 0/5$ ms پریود

ثابت زمانی بار = ۶ms = ۱۲T

چون T خیلی کوچکتر از ثابت زمانی است بنابراین می‌توان تغییرات جریان را خطی در نظر گرفت. از معادله (۷-۱۲) داریم

$$V_L = 57/6 = 96t_1/T \rightarrow t_1 = 0/3 \text{ ms}$$
$$K = t_1/T = 0/3/0/5 = 0/6$$

از معادله (۷-۱۳) داریم

$$V_{L,rms} = 96(0/3/0/5)^{\frac{1}{2}} = 74/36 \text{ V}$$

مقدار متوسط جریان بار برابر است با

$$57/6/8 = 7/2 \text{ A}$$

از معادله (۷-۱۴) ریپل جریان بدست می‌آید،

$$\Delta i = (V_s - V_L)\,\Delta t/L$$

ثابت زمانی بار = $L/R \rightarrow L = 6 \times 10^{-3} \times 8 = 48$ mH

$$\Delta i = (96-57/6) \times 0/3 \times 10^{-3} / 48 \times 10^{-3} = 0/24 \text{ A}$$

از معادله (۷-۱۷) داریم

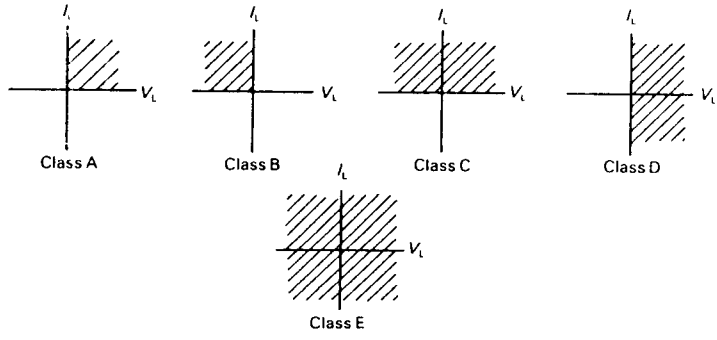
$$I_1 = 7/2 + 57/6 \times 0/2 \times 10^{-3}/(2 \times 48 \times 10^{-3}) = 7/32 \text{ A}$$
$$I_2 = 7/08 \text{ A}$$

از معادله (۷-۲۱) مقدار rms جریان محاسبه می‌شود،

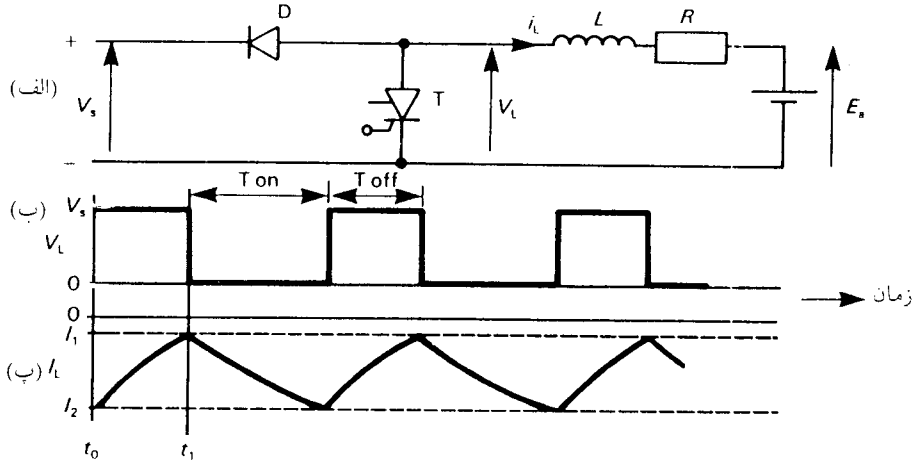
$$I_{rms} = ۰/۲۴/۲\sqrt{۳} = ۰/۰۶۹۳ \text{ A}$$

در این مدار ساده توان فقط از منبع تغذیه به طرف بار جاری می‌شود و به آن **چاپر کلاس A** و یا **چاپر یک ربعی** اطلاق می‌شود زیرا مطابق شکل ۷-۶ فقط در یک ربع دیاگرام v_L-i_L کار می‌کند. سایر چاپرها که قادرند در یک ربع، دو ربع و یا چهار ربع کارکنند مطابق شکل ۷-۶ طبقه‌بندی می‌شوند.

یک چاپر افزاینده کلاس B در شکل ۷-۷ الف، نشان داده شده است. با روشن کردن تریستور T، نیروی محرکه E_a جریانی را از اندوکتانس L عبور می‌دهد. وقتی که تریستور T با کموتاسیون قطع می‌شود، بخشی از انرژی ذخیره شده در L از طریق دیود D به منبع برمی‌گردد. در فاصله $t_1 > t > t_0$، دیود D هدایت می‌کند و داریم



شکل ۷-۶ طبقه‌بندی چاپرها



شکل ۷-۷ چاپر کلاس B

$$\frac{di_L}{dt} + \frac{R}{L} i_L = \frac{V_L - E_a}{L} \qquad (۲۴-۷)$$

و برای شرایط اولیه شکل‌های ۷-۷ ب و ۷-۷ پ داریم،

$$i_L = \frac{V - E_a}{R}\left(۱ - e^{-\frac{R}{L}t}\right) + I_۲ e^{-\frac{R}{L}t} \qquad (۲۵-۷)$$

هنگامی که T آتش می‌شود،

$$\frac{dt_L}{dt} + \frac{R}{L} i_L = -\frac{E_a}{L}$$

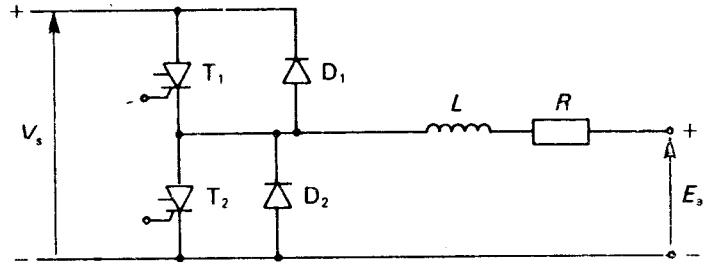
بنابراین

$$i_L = -\frac{E_a}{L}\left(۱ - e^{-\frac{R}{L}t_x}\right) + I_1 e^{-\frac{R}{L}t_x} \qquad (۲۶-۷)$$

که در آن $t_x = t - t_1$ می‌باشد.

با ترکیب کردن دو مدار شکل‌های ۷-۴ و ۷-۷، چاپر دو ربعی کلاس C مطابق شکل ۷-۸ بدست می‌آید. در این مدار بایستی دقت کرد که تریستورهای T_1 و T_2 همزمان آتش نشوند چه در اینصورت منبع تغذیه اتصال کوتاه می‌گردد.

همان طوری که ملاحظه می‌شود در مدارهای چاپر تریستوری از تریستورقابل قطع سریع به عنوان سوئیچ استفاده می‌شود، بنابراین جهت قطع آن بایستی از مدارهای کموتاسیون استفاده کرد. روشهای متعددی وجود دارد که بر اساس آنها می‌توان تریستور را خاموش کرد این روشها قبلاً در فصل چهارم توصیف گردید. بر حسب اینکه از چه روشی جهت خاموش کردن تریستور استفاده شده باشد مدارهای چاپر تریستوری مختلف، نظیر چاپر با ***کموتاسیون ضربه‌ای*** و غیره بدست می‌آید. همچنین از چاپرهای dc بصورت رگولاتور در انواع مختلف جهت تبدیل ولتاژ dc تنظیم نشده به ولتاژ خروجی dc تنظیم شده استفاده می‌شود. جهت آشنا شدن بیشتر می‌توان به کتاب الکترونیک قدرت تألیف M.H.Rashid (مرجع [۵]) مراجعه کرد.



شکل ۷-۸ چاپر کلاس C

۷-۴ مسائل حل شده

مساله ۷-۱

چاپر dc شکل ۷-۱ الف دارای مقاومت اهمی $R=۱۰\Omega$ و ولتاژ ورودی $V_s = ۲۲۰V$ است. وقتی کلید چاپر در حالت وصل باقی می‌ماند افت ولت آن $v_{ch} = ۲V$ و فرکانس برش دادن $F=۱kHz$ است. اگر سیکل کارچاپر ۵۰٪ باشد، تعیین کنید:

(الف) مقدار متوسط ولتاژ خروجی V_a (ب) مقدار rms ولتاژ خروجی V_o

(پ) بازده چاپر (ت) مقاومت ورودی موثر چاپر R_i

حل - $V_s= ۲۲۰V \quad K= ۰/۵ \quad R= ۱۰\ \Omega$ و $v_{ch}= ۲\ V$

(الف) با توجه به معادله (۷-۱) داریم،

$$V_a= ۰/۵ \times (۲۲۰-۲)= ۱۰۹\ V$$

(ب) با توجه به معادله (۷-۲)

$$V_o= \sqrt{۰/۵} \times (۲۲۰-۲)= ۱۵۴/۱۵\ V$$

(پ) توان خروجی از رابطه زیر بدست می‌آید

$$P_o=\frac{۱}{T}\int_{۰}^{KT}\frac{v_۰^۲}{R}dt=\frac{۱}{T}\int_{۰}^{KT}\frac{(V_s-v_{ch})^۲}{R}dt=K\frac{(V_s-v_{ch})^۲}{R}$$

$$=۰/۵\times\frac{(۲۲۰-۲)^۲}{۱۰}=۲۳۷۶/۲\ W$$

(۷-۲۷)

توان ورودی به چاپر از رابطه زیر بدست می‌آید

$$P_i=\frac{۱}{T}\int_{۰}^{KT}v_S i\,dt=\frac{۱}{T}\int_{۰}^{KT}\frac{V_s(V_s-v_{ch})}{R}dt=K\frac{V_s(V_s-v_{ch})}{R}$$

$$=۰/۵\times\frac{۲۲۰(۲۲۰-۲)}{۱۰}=۲۳۹۸\ W$$

(۷-۲۸)

بنابراین بازده چاپر قابل محاسبه است،

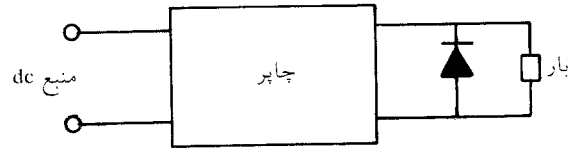
$$\text{بازده}=\frac{P_o}{P_i}=\frac{۲۳۷۶/۲}{۲۳۹۸}=٪۹۹/۰۹$$

(ت)با توجه به معادله (۷-۴) مقاومت موثر ورودی برابر است با

$$R_i = \frac{R}{K} = \frac{۱۰}{۰/۵} = ۲۰\Omega$$

مساله ۷-۲

یک چاپر dc در فرکانس ۶۰۰Hz کار می‌کند و یک بار با مقاومت اهمی $R = ۵\Omega$ و اندوکتانس $L = ۹mH$ را از یک منبع ۱۱۰V dc تغذیه می‌نماید. اگر امپدانس منبع تغذیه صفر باشد و بار مطابق شکل (۷-۹) توسط یک دیود ایده‌آل تست شده باشد، مقدار متوسط ولتاژ خروجی را در حالتهایی که نسبت ON/OFF (الف) ۱/۱ (ب) ۵/۱ و (پ) ۱/۳ باشد، محاسبه کنید.



شکل ۷-۹

حل -

$$\text{پریود} = T = ۱/F = ۱/۶۰۰ = ۱/۶۷ \text{ ms}$$

$$\text{ثابت زمانی} = L/R = ۹/۵ \simeq ۱/۸ \text{ ms}$$

چون T در حدود ثابت زمانی است نمی‌توان تغییرات جریان را خطی در نظر گرفت.

(الف)

$$t_۱ + t_۲ = T \quad \text{و} \quad t_۱ = t_۲ \qquad t_۱/t_۲ = ۱/۱ = ۱$$

بنابراین

$$t_۱ = t_۲ = T/۲ \qquad t_۱/T = \frac{۱}{۲}$$

با توجه به معادله (۷-۱۲) مقدار متوسط ولتاژ برابر است با

$$V_L = V_s t_۱/T = ۱۱۰ \times \frac{۱}{۲} = ۵۵ \text{ V}$$

مقدار متوسط جریان بار عبارتند از

$$I_L = V_L/R = ۵۵/۵ = ۱۱ \text{ A}$$

(ب) $t_1 + t_2 = T$ و $t_1 = 5t_2$ $t_1/t_2 = 5/1$

$$t_1 + \frac{1}{5} t_1 = T \rightarrow t_1/T = 5/6$$

با توجه به معادله (۷-۱۲) مقدار متوسط ولتاژ بدست می‌آید یعنی

$$V_L = V_s t_1/T = 110 \times \frac{5}{6} = 91/67 \text{ V}$$

و مقدار متوسط جریان برابر است با

$$I_L = V_L/R = 91/67/5 = 18/33 \text{ A}$$

(پ) $t_1 + t_2 = T$ و $t_2 = 3t_1$ و $t_1/t_2 = 1/3$

$$t_1 + 3t_1 = T \rightarrow t_1/T = 1/4$$

با توجه به معادله (۷-۱۲) مقدار متوسط ولتاژ برابر است با

$$V_L = V_s t_1/T = 110 \times 1/4 = 27/5 \text{ V}$$

ومقدار متوسط جریان بار برابر است با

$$I_L = V_L/R = 27/5/5 = 5/5 \text{ A}$$