

۳-۶ یکسو کننده های قابل کنترل

همانطوریکه در بخش قبل ملاحظه کردیم یکسوکننده های غیر قابل کنترل (دیودی) ولتاژ خروجی ثابتی را تولید می نمایند. برای اینکه بتوان خروجی قابل کنترلی را بدست آورد، بجای دیود از تریستور استفاده می شود که در آن ولتاژ خروجی با تغییر زاویه آتش تریستور کنترل می شود و به این ترتیب یکسو کننده های قابل کنترل که بخشی از مبدل های ac به dc می باشند، بدست می آیند. این نوع مبدلها بطور وسیع در کاربردهای صنعتی، بخصوص در محرکهای سرعت متغیر^۱ مورد استفاده قرار می گیرند. همانطوریکه گفته شد این نوع مبدلها بر حسب نوع تغذیه به مبدل های تک فاز و سه فاز تقسیم می شوند و هر نوع ممکن است بصورت نیمه کنترل شده و یا تمام کنترل شده باشد. در این بخش انواع این مبدلها و طرز کار آنها تشریح می گردد.

۳-۶-۱ یکسو کننده قابل کنترل تک فاز نیم موج

مدار تک فاز نیم موج را می توان با استفاده از یک تریستور (بجای دیود) مطابق شکل ۳-۲۱ الف کنترل کرد. با تشریح طرز کار این مدار می توان به اصول کار مبدل قابل کنترل پی برد. در این مدار مشابه مدار کنترل نشده، بار می تواند اهمی و یا اندوکتیو باشد. تریستور وقتی شروع به هدایت می نماید که ولتاژ دو سرش v_{T1} مثبت است و پالس آتش i_a را دریافت می نماید. بنابراین وقتی تریستور در بایاس (گرایش) مستقیم قرار دارد و در $\alpha = \omega t$ پالس آتش به گیت آن اعمال می گردد، تریستور شروع به هدایت می کند و ولتاژ ورودی در دوسر بار ظاهر می شود. شکل های ۳-۲۱ ب و پ نشان می دهند که هدایت تریستور به اندازه α نسبت به وضعیتی که دیود بطور طبیعی هدایت می کرد، به تأخیر افتاده است. به این زاویه، زاویه تأخیر آتش^۲ گفته می شود. در این حالت زاویه α نسبت به نقطه صفر ولتاژ تغذیه سنجیده می شود. این شکل موج ها با توجه به وجود دیود کموتاسیون بدست آمده اند که در آنها دیود کموتاسیون از منفی شدن ولتاژ بار (بیش از مقدار افت ولت دیود) ممانعت می کند. در خلال پریود هدایت تریستور، شکل موج جریان از معادله (۳-۲۱) بدست می آید که قبلاً به تفصیل بیان شد و وقتی ولتاژ معکوس می شود v_L تقریباً صفر است و جریان بار بطور نمایی کاهش می یابد. اگر چنانچه جریان از مقدار جریان نگهدارنده دیود کمتر شود، جریان بار ناپیوسته می شود همانطوریکه در شکل ۳-۲۱ پ نشان داده شده است. اگر جریان بار نمایی نزولی تا روشن شدن تریستور در سیکل بعدی، ادامه یابد جریان بار پیوسته می گردد چنین شرایطی در شکل ۳-۲۱ ب نشان داده شده است.

اگر مقدار پیک ولتاژ ورودی v_m باشد، مقدار متوسط ولتاژ خروجی از رابطه زیر بدست می آید،

(۴۱-۳)

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

با تغییر دادن زاویه α از ۰ تا π می‌توان ولتاژ V_{dc} را از $\frac{V_m}{\pi}$ تا ۰ کنترل کرد. چون ولتاژ خروجی فقط دارای پلاریته مثبت است یعنی یک مبدل یک ربعی^۱ است، مبدل یک طرفه یا نیمه‌مبدل^۲ نامیده می‌شود. بررسی شکل موجها نیز بوضوح نشان می‌دهد که هر چه زاویه تأخیر آتش بزرگتر باشد مقدار متوسط ولتاژ خروجی کمتر است. مقدار rms ولتاژ خروجی بوسیله رابطه زیر بدست می‌آید،

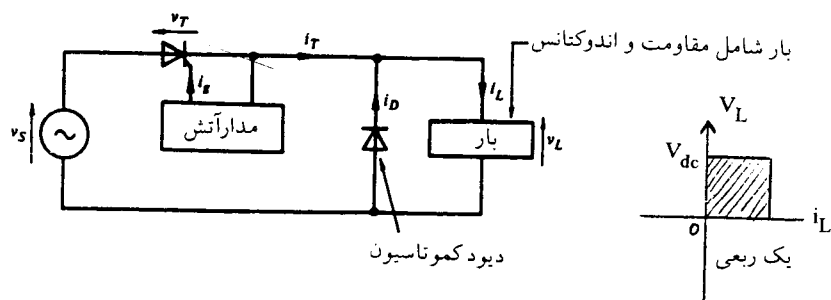
$$V_{rms} = \left[\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{V_m^2}{4\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{V_m}{2} \left[\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (42-3)$$

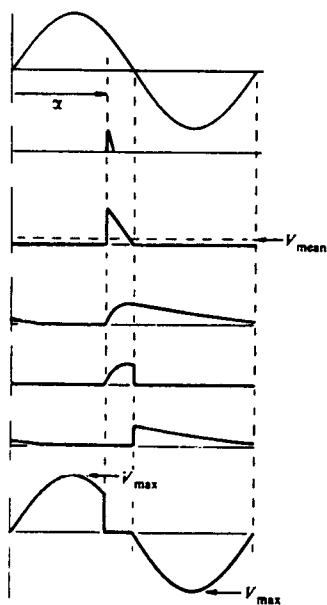
شکل موج ولتاژ دو سر ترستور V_{T1} نشان می‌دهد که در خلال پریود تأخیر ولتاژ مثبت است و همچنین ماکزیمم ولتاژ مستقیم و معکوس آن برابر V_m منبع تغذیه است. بررسی شکل موجهای شکل ۳-۲۱ بوضوح دو نقش دیود کموتاسیون را نشان می‌دهند، یکی اینکه از منفی شدن ولتاژ بار جلوگیری می‌کند و دیگر اینکه با انتقال جریان بار از ترستور به دیود، اجازه می‌دهد که ترستور در ولتاژ صفر به حالت مسدود (قطع) بازگردد.

مثال ۳-۳

اگر در مدار شکل ۳-۲۱ بار فقط شامل مقاومت اهمی R و زاویه تأخیر آتش $\alpha = \pi/2$ باشد، معین کنید (الف) بازده یکسوکندگی (ب) ضریب شکل FF (پ) ضریب ریفیل RF (ت) ضریب بهره‌برداری ترانسفورماتور TUF و (ث) پیک ولتاژ معکوس PIV ترستور.

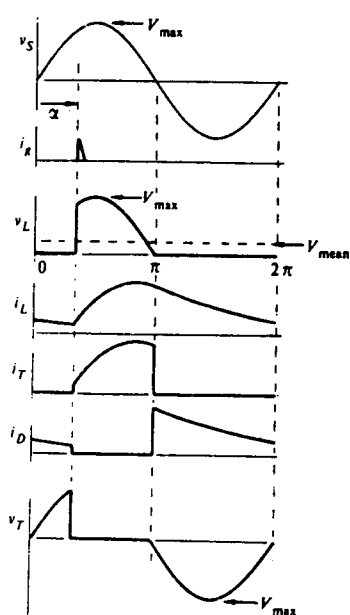


(الف) دیاگرام مداری



(پ)

شکل موجها در زاویه آتش بزرگ
و جریان بار غیرپیوسته



(ب)

شکل موجها در زاویه آتش کوچک
و جریان بار پیوسته

شکل ۲۱-۳ مدار کنترل شده نیم موج تکفاز همراه با دیود کموتاسیون

حل - با توجه به زاویه آتش α از معادله (۳-۴۱)، $V_{dc} = 0/1592 V_m$ و در نتیجه
 $I_{rms} = 0/3536 V_m/R$ و $V_{rms} = 0/3536 V_m$ ، از معادله (۳-۴۲)، $I_{dc} = 0/1592 V_m/R$
 همچنین $P_{ac} = V_{rms} I_{rms} = (0/3536 V_m)^2/R$ و $P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = (0/1592 V_m)^2/R$ بنابراین

(الف) بازده یکسوکنندگی برابر است با

$$\eta = \frac{(0/1542 V_m)^2}{(0/3236 V_m)^2} = 20/25 \%$$

(ب) ضریب شکل برابر است با

$$FF = \frac{0/3536 V_m}{0/1592 V_m} = 2/221 \text{ یا } 22/21 \%$$

(پ) ضریب ریپل برابر است با

$$RF = \frac{1}{(2/221)^2 - 1} = 1/983 \text{ یا } 198/3 \%$$

(ت) مقدار rms ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور برابر است با $V_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0/707 V_m$

مقدار rms جریان ثانویه ترانسفورماتور برابر جریان بار است یعنی، $I_s = 0/3536 V_m / R$

مقدار ولت آمپر (VA) نامی آن برابر است با $VA = V_s I_s = 0/707 V_m \times 0/3536 V_m / R$ بنابراین

$$TUF = \frac{(0/1592)^2}{0/707 \times 0/3536} = 0/1014 \text{ و } \frac{1}{TUF} = 9/86$$

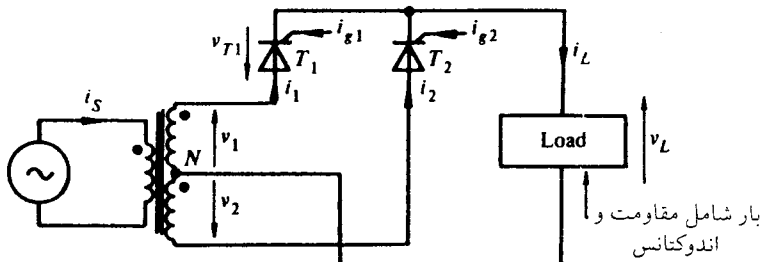
(ث) پیک ولتاژ معکوس برابر است با

$$PIV = V_m$$

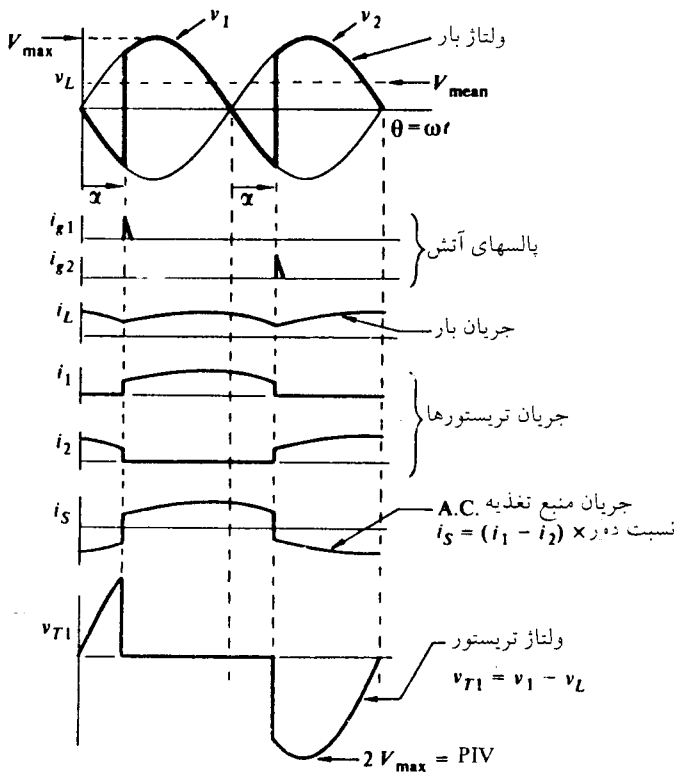
۳-۶-۲ یکسوکننده قابل کنترل تکفاز تمام موج

مدار یکسوکننده قابل کنترل تکفاز تمام موج در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است که در حقیقت همان مدار شکل ۳-۷ است که در آن دیودها با تریستورها جایگزین شده‌اند. در هر مدار ساده نیم موج، در هر زمان مفروض فقط یک تریستور هدایت می‌کند. همان طوری که قبلاً ملاحظه کردیم در حالت دیودی، عنصر هدایت کننده دیودی است که در آن لحظه

به فازی که دارای ولتاژ بالاتری است، متصل شده است. حال آنکه در این مدار ترستور مورد نظر می تواند در هر لحظه ای که ولتاژ آن نسبت به کاتد مثبت است، روشن شود. یعنی اینکه مثلاً در شکل ۳-۲۲، می توان ترستور T_1 را پس از مثبت شدن ولتاژ v_1 در هر لحظه ای از زمان آتش کرد. پالسهای اعمال شده به ترستورها هر یک به اندازه α نسبت به حالت دیودی تأخیر دارند.



(الف)



(ب)

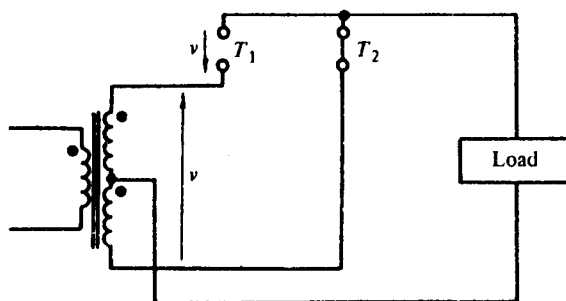
شکل ۳-۲۲ مدار یکسوکننده قابل کنترل تمام موج

یعنی اگر تریتورها با دیودها جایگزین می شدند این زاویه برابر صفر می شد. وقتی تریتور T_1 روشن می شود جریان در بار اندوکتیو برقرار می شود و تا منفی شده v_1 در حالت روشن باقی می ماند. هنگامی که v_1 منفی می شود، v_2 مثبت شده و با آتش کردن تریتور T_2 ، بلافاصله این تریتور روشن شده و جریان بار را به عهده می گیرد و ولتاژ معکوس را بر تریتور T_1 اعمال می کند و بدین وسیله جریان T_1 به T_2 انتقال می یابد. شکل موج ولتاژ دو سر تریتور T_1 در شکل ۲۲-۳ ب نشان می دهد که می توان در فاصله ای که v_T مثبت است در هر لحظه تریتور را با اعمال پالس آتش، به حالت روشن درآورد. پیک ولتاژ معکوس دو سر آن برابر $2V_m$ است یعنی ماگزیمم ولتاژ کامل ثانویه ترانسفورماتور در دو سر تریتور ظاهر می شود. با مراجعه به شکل ۲۳-۳ به وضوح مشاهده می شود که وقتی تریتور T_2 در حالت روشن قرار دارد و تقریباً اتصال کوتاه است تمامی ولتاژ ترانسفورماتور در دوسر تریتور خاموش (قطع) T_1 ظاهر می شود.

باتوجه به شکل موج ولتاژ بار در شکل ۲۲-۳ ب، مقدار متوسط ولتاژ از رابطه زیر بدست می آید،

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (۴۳-۳)$$

البته بایستی در تمامی مدارهای یکسو کننده توجه داشت که مقدار ولتاژ dc بدست آمده بدون در نظر گرفتن افت ولت وسیله هدایت کننده است. در اینجا در عمل به اندازه افت ولت دو سرتریتور در حال هدایت از مقدار فوق کسر می شود زیرا همواره یکی از تریتورها بطور سری، با منبع تغذیه قرار می گیرد. همچنین در این حالت فرض شده است اندوکتانس بار به اندازه ای است که جریان بار پیوسته را فراهم می کند. وقتی α برابر صفر باشد مقدار ولتاژ متوسط حداکثر است یعنی مشابه حالت دیودی است. وقتی زاویه α برابر 90° درجه است، ولتاژ متوسط



شکل ۲۳-۳ نمایش لحظه ای مدار فوق

صفر است یعنی سطوح زیر منحنی مثبت و منفی موج ولتاژ باهم برابر می‌گردند. این موضوع هم از روی معادله فوق که تغییرات آن کسینوسی است و هم از روی شکل موجها به وضوح ملاحظه می‌گردد. همان طوری که از روی شکل موج ولتاژ بار مشاهده می‌گردد خروجی دارای مشخصه دوپالسی است، زیرا شکل موج ولتاژ بار، در فاصله زمانی یک سیکل منبع دوبار تکرار می‌شود.

وقتی بار دارای اندوکتانس کمی است، جریان بار ناپیوسته می‌شود و در این صورت ولتاژ بار دارای پریودهای صفر می‌گردد. جریان ترستورها دارای پریود نیم سیکل بوده و در جریان بار پیوسته به شکل موج مربعی متمایل می‌شوند. همان طوری که در شکل ملاحظه می‌شود جریان منبع تغذیه غیر سینوسی بوده و نسبت به ولتاژ تأخیر دارد.

۳-۶-۳ یکسوکننده قابل کنترل پل تکفاز

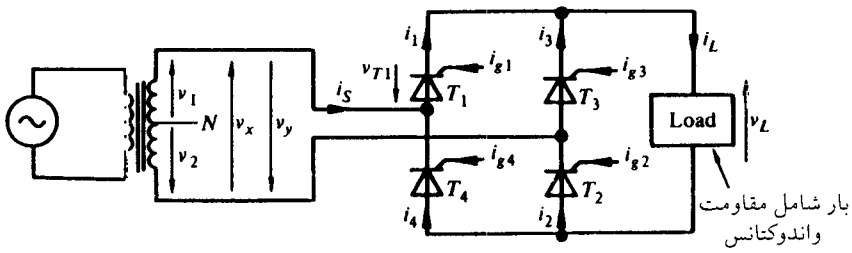
مدار پل تکفاز می‌تواند بصورت آرایش‌های نیمه کنترل شده یا تمام کنترل شده مورد استفاده قرار گیرد. اگر دیودهای موجود در مدار شکل ۳-۸ با ترستور جایگزین گردند، مدار پل تکفاز تمام کنترل شده شکل ۳-۲۴ بدست می‌آید. مادامی که ترستورها آتش نشده‌اند هدایت صورت نمی‌گیرد و برای اینکه جریان برقرار شود بایستی ترستورهای T_1 و T_2 بطور همزمان در نیم سیکل اول و ترستورهای T_3 و T_4 بطور همزمان در نیم سیکل بعدی روشن شوند. جهت اطمینان یافتن از اینکه ترستورها بطور همزمان آتش می‌شوند هر دو ترستور T_1 و T_2 مطابق شکل ۳-۲۵ از یک مدار آتش مشترک، آتش می‌گردند سیگنالهای آتش از طریق ترانسفورماتور ضربه (پالس) به گیت‌ها اعمال می‌شوند.

ولتاژ بار این مدار مشابه مدار قبلی است و مقدار متوسط آن از رابطه زیر بدست می‌آید،

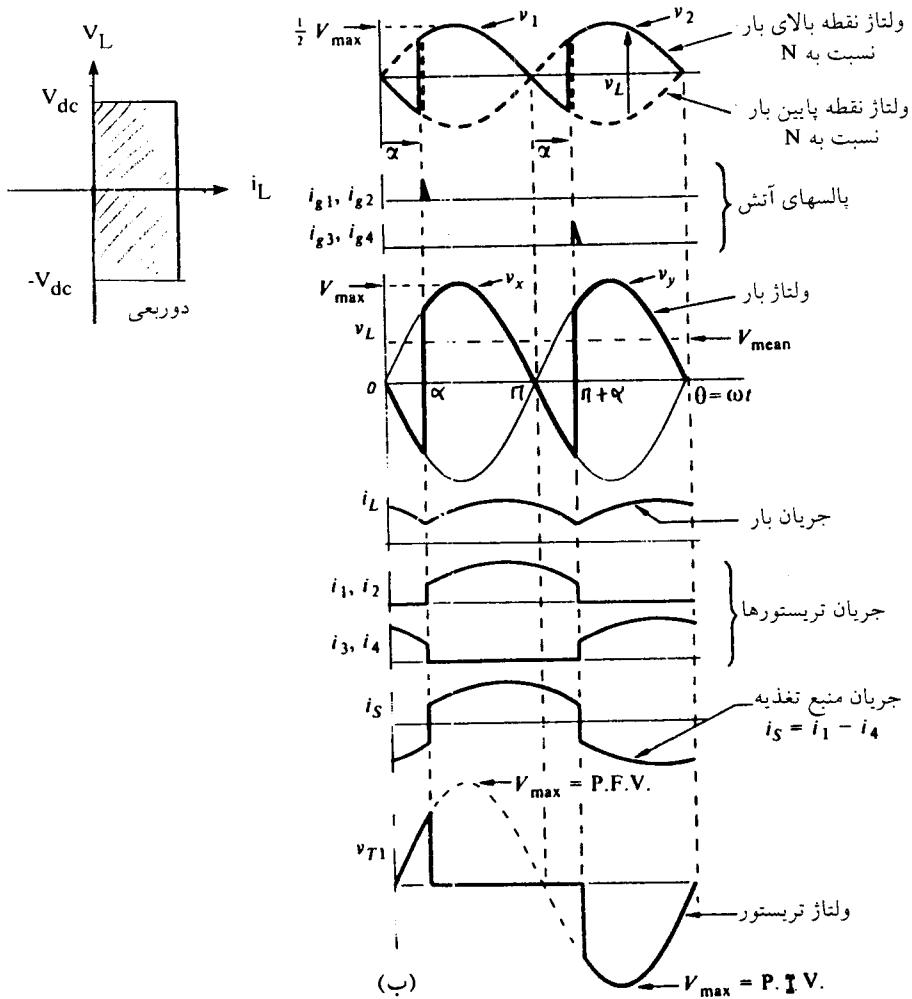
$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi+\alpha} = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$$

(۳-۴۴)

در این حالت به اندازه افت ولت دو ترستور از مقدار فوق کسر می‌شود. معادله فوق با این فرض که جریان بار پیوسته می‌باشد بدست آمده است. با تغییر α از ۰ تا π مقدار V_{dc} از $2V_m/\pi$ تا $-2V_m/\pi$ تغییر می‌کند. بنابراین ولتاژ خروجی مبدل می‌تواند پلاریته مثبت یا منفی داشته باشد، البته جریان خروجی فقط یک پلاریته دارد (یعنی در یک جهت جاری می‌شود). چنین تبدیلی که در حقیقت یک مبدل دو ربعی^۱ است، تمام مبدل تکفاز^۲ یا مبدل

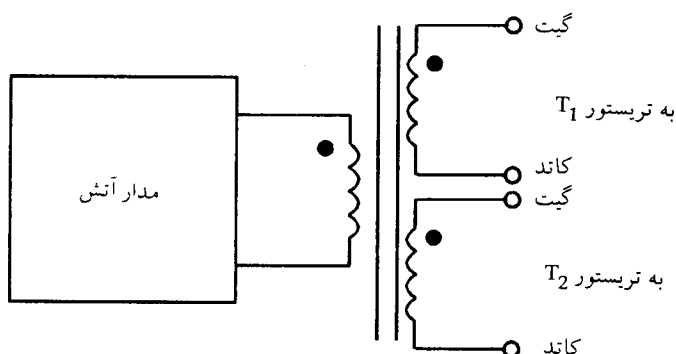


(الف)



(ب)

شکل ۲۴-۳ مدار پل تکفاز تمام کنترل شده



شکل ۳-۲۵ مدار آتش با اتصالات خروجی

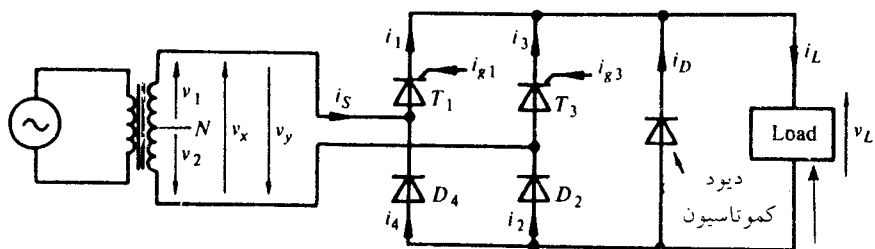
دو طرفه نامیده می‌شود. مقدار rms ولتاژ خروجی از رابطه زیر بدست می‌آید،

$$V_{rms} = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{V_m^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

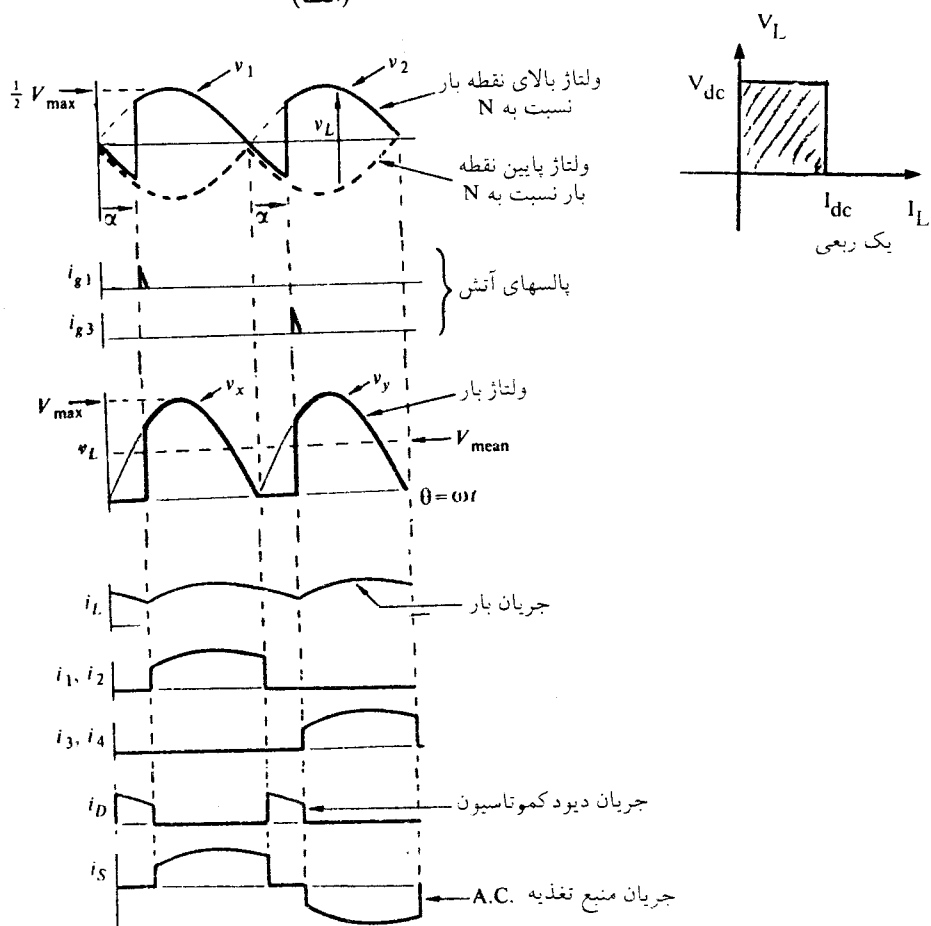
(۳-۴۵)

در این نوع مبدل مطابق شکل در فاصله α تا π ولتاژ و جریان ورودی مثبت بوده و در نتیجه توان از منبع به سمت بار عبور می‌کند. بنابراین مبدل در این حالت در مُد یکسوکنندگی کار می‌کند. در فاصله π تا $\pi + \alpha$ ولتاژ ورودی منفی و جریان مثبت است و در نتیجه توان معکوس بوده و از بار به سمت منبع عبور می‌کند. در این حالت مبدل در مُد معکوس‌کنندگی کار می‌کند. همان طوری که گفته شد بسته به مقدار α مقدار متوسط خروجی مثبت یا منفی خواهد بود. اگر چنانچه در مدار شکل ۳-۲۴ ترستورهای T_1 و T_4 با دیودهای D_1 و D_4 جایگزین گردند، مدار نیمه کنترل شده شکل ۳-۲۶ بدست می‌آید. فرض می‌شود که جریان بار پیوسته باشد. شکل موج ولتاژ بار شکل ۳-۲۶ ب مطابق آنچه که قبلاً ارائه شد رسم شده است. نحوه عملکرد مدار به این صورت است که در خلال نیم‌سیکل مثبت، ترستور T_1 در بایاس (گرایش) مستقیم قرار دارد و وقتی ترستور در زاویه α آتش می‌شود در فاصله $\alpha \leq \omega t \leq \pi$ بار از طریق T_1 و D_4 به منبع تغذیه ورودی متصل می‌گردد و جریان بار برقرار می‌گردد که این جریان در شکل بصورت i_1 و i_4 نشان داده شده است. در فاصله $\pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha$ ولتاژ ورودی منفی می‌شود لیکن به واسطه اندوکتیو بودن بار، جریان بار ادامه دارد و چون دیود کموتاسیون در



بار شامل مقاومت و اندوکتانس

(الف)



(ب)

شکل ۳-۲۶ مدار پل تکفاز نیمه کنترل شده

بایاس (گرایش) مستقیم قرار می‌گیرد هدایت کرده جریان بار از T_1 و D_2 به دیود کموتاسیون انتقال می‌یابد که در شکل بصورت i_D نشان داده شده است و در نتیجه T_1 و D_2 خاموش می‌شوند. در نیم سیکل منفی تریستور T_2 در بایاس مستقیم قرار می‌گیرد و وقتی در لحظه $\pi + \alpha$ آتش می‌شود، دیود کموتاسیون در بایاس معکوس قرار گرفته، قطع می‌شود و در نتیجه بار از طریق T_2 و D_2 به منبع تغذیه متصل می‌گردد. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود دیود کموتاسیون از منفی شدن ولتاژ بار ممانعت می‌کند، اما در این مدار، بدون حضور دیود کموتاسیون نیز این عمل انجام می‌شود. به این صورت که بعد از نقطه صفر ولتاژ تغذیه و قبل از آنکه مثلاً تریستور T_2 روشن شود، تریستور T_1 به هدایت خود ادامه می‌دهد اما مسیر برگشت جریان بار از دیود D_2 به دیود D_1 منتقل می‌شود (زیرا در این فاصله با منفی شدن ولتاژ تغذیه دیود D_2 بایاس معکوس و D_1 بایاس مستقیم می‌شود). بنابراین جریان بار از طریق T_1 و D_1 یک مسیر آزاد (هرزگرد) را طی می‌کند و جریان منبع تغذیه برابر صفر می‌شود. البته دیود کموتاسیون در مقایسه با ترکیب تریستور، دیود، مسیر موازی بهتری را برای جریان آزاد (هرزگرد) بار فراهم می‌کند و موجب می‌شود که تریستور قطع شده و وضعیت مسدود خود را بازیابد.

مقدار متوسط ولتاژ خروجی برابر است با

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (46-3)$$

با تغییر α از ۰ تا π مقدار V_{dc} از $2V_m/\pi$ تا ۰ تغییر می‌کند، یعنی مبدل یک ربعی یا نیم مبدل است.

مقدار rms ولتاژ خروجی برابر است با

$$V_{rms} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{V_m^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (47-3)$$

همان‌طوریکه در شکل موج جریان تغذیه ملاحظه می‌شود، در بعضی فواصل زمانی مقدارش صفر است و در فواصلی که ولتاژ بار صفر است دیود کموتاسیون جریان نزولی بار را از خود عبور می‌دهد.

مدار نیمه کنترل شده در مقایسه با مدار تمام کنترل شده ارزانتر است اما به واسطه این که جریان تغذیه دارای پریودهای صفر است، این جریان دارای اعوجاج بیشتری است. همان طوری که ملاحظه کردیم مدار نیمه کنترل شده یک مبدل یک ربعی یا نیمه مبدل است یعنی در آن امکان معکوس شدن ولتاژ متوسط (dc) خروجی وجود ندارد و نمی توان بصورت معکوس کننده (اینورتر) که بعداً توضیح داده خواهد شد، بکاربرد. در مدار تمام کنترل شده امکان معکوس شدن ولتاژ متوسط خروجی وجود دارد.

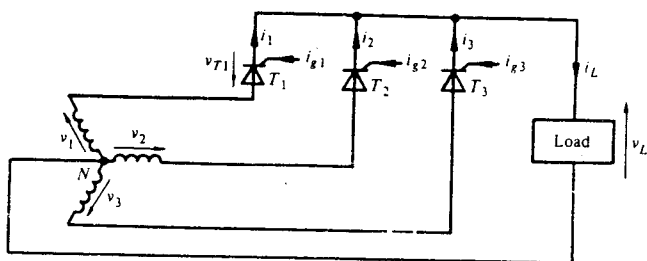
۳-۶-۴ یکسوکننده قابل کنترل سه فاز نیم موج

اگر دیودهای شکل ۳-۹ با تریستور جایگزین شوند مدار قابل کنترل شکل ۳-۲۷ بدست می آید مقدار متوسط ولتاژ خروجی با کنترل زاویه آتش « قابل تنظیم خواهد بود. زاویه تأخیر آتش نسبت به نقطه ای که ولتاژهای فاز منبع تغذیه یکدیگر را تلاقی کرده اند، تعریف می شود. بنابراین وقتی زاویه تأخیر آتش صفر است، مدار مشابه حالت دیودی است و مقدار متوسط ولتاژ خروجی ماکزیمم است و دیودها در نقاط تلاقی ولتاژهای فاز بطور طبیعی عمل کموتاسیون را انجام می دهند. همان طوری که شکل ۳-۲۷ ب نشان می دهد تا زمانی که پالس آتش به گیت تریستور اعمال نشده است، تریستور هدایت نمی کند، در نتیجه تا فورارسیدن آن لحظه، ولتاژ قبلی بر روی بار قرار می گیرد و بنابراین مقدار متوسط ولتاژ بار کاهش می یابد. مقدار ریپل افزایش می یابد ولی هنوز دارای مشخصه سه پالسی است. شکل موج های ولتاژ بار در شکل های ۳-۲۷ ب و پ اثر زاویه تأخیر آتش بزرگتر را نشان می دهند. به ازاء زاویه تأخیر آتش بزرگتر از 30° ولتاژ دارای پریودهای منفی خواهد شد. مقدار متوسط ولتاژ خروجی از رابطه زیر بدست می آید.

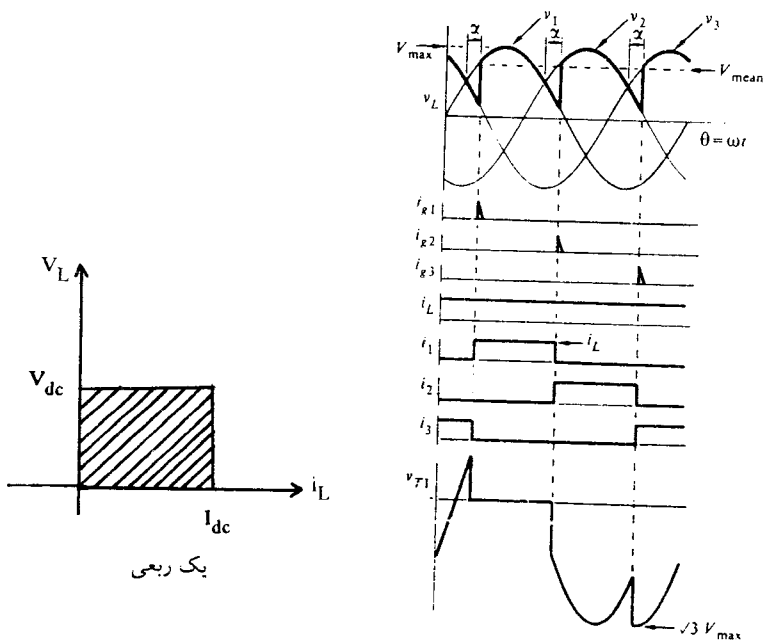
$$V_{dc} = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha \quad (3-48)$$

بنابراین مقدار متوسط ولتاژ خروجی با کسینوس زاویه آتش α متناسب است که در زاویه تأخیر $\alpha = 0^\circ$ حداکثر و در زاویه تأخیر آتش $\alpha = 90^\circ$ ، صفر است.

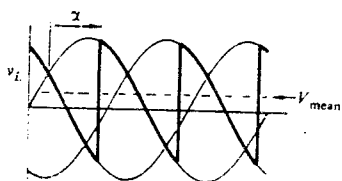
مقدار rms ولتاژ خروجی برابر است با



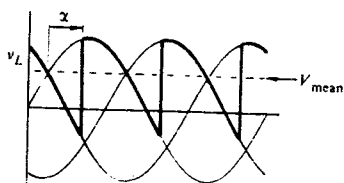
(الف)



(ب)



(ت)



(ث)

شکل ۲۷-۳ مدار کنترل شده سه فاز نیم موج

$$V_{rms} = \left[\frac{1}{\frac{\pi}{2} + \alpha} \int_{\frac{\pi}{2} + \alpha}^{\frac{\Delta\pi}{2} + \alpha} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{3} V_m \left(\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos 2\alpha \right)^{\frac{1}{2}} \quad (49-3)$$

مثال ۳-۴

یک یکسوکننده کنترل شده سه فاز نیم موج به منبع تغذیه ۳۸۰V (ولتاژ خط)، متصل شده است. جریان بار ثابت و مقدار آن ۳۲A می باشد. با فرض اینکه ترستورها دارای افت ولت ۱/۲۷ باشند، مقدار متوسط ولتاژ بار را در زاویه آتش 0° و 45° بدست آورید. مقدار نامی جریان و پیک ولتاژ معکوس ترستور چقدر خواهد بود و همچنین متوسط توان تلف شده در هر ترستور چقدر است؟

حل - همانطوریکه قبلاً گفته شد، افت ولت ترستور سبب می شود مقدار متوسط ولتاژ خروجی کاهش یابد بنابراین،

$$V_m = \frac{380 \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 310 / \sqrt{3}$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha - V_t$$

که در آن V_t افت ولت مستقیم ترستور است.
در $\alpha = 0^\circ$ داریم

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3} \times 380 \times \sqrt{2}}{2 \times \pi \times \sqrt{3}} \cos 0^\circ - 1/2 = 255/4 \text{ V}$$

در $\alpha = 45^\circ$ داریم

$$V_{dc} = \frac{3 \times \sqrt{3} \times 380 \times \sqrt{2}}{2 \times \pi \times \sqrt{3}} \cos 45^\circ - 1/2 = 180/2 \text{ V}$$

برای یک جریان ثابت، جریان rms در هر ترستور بوسیله انتگرال گیری در خلال یک سیکل

تغذیه بدست می‌آید، یعنی

$$I_{rms} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha + \frac{2\pi}{r}} I_L^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

بنابراین براساس این فرمول مقدار نامی جریان برابر است با

$$I_{rms} = 32/\sqrt{3} = 18.47 \text{ A}$$

با مراجعه به شکل ۳-۲۷ ملاحظه می‌شود که پیک ولتاژ معکوس تریستور برابر است با

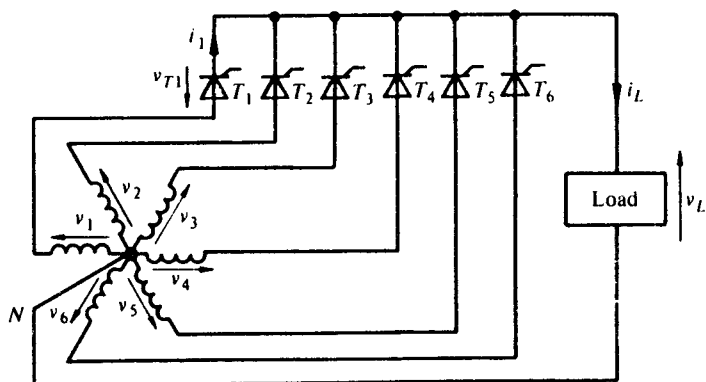
$$PRV = \sqrt{3} V_{max} = \sqrt{3} \times 380 = 657.4 \text{ V}$$

مقدار متوسط توان تلف شده در تریستور به وسیله میانگین‌گیری از توان لحظه‌ای تلف شده در تریستور در خلال یک سیکل بدست می‌آید، یعنی

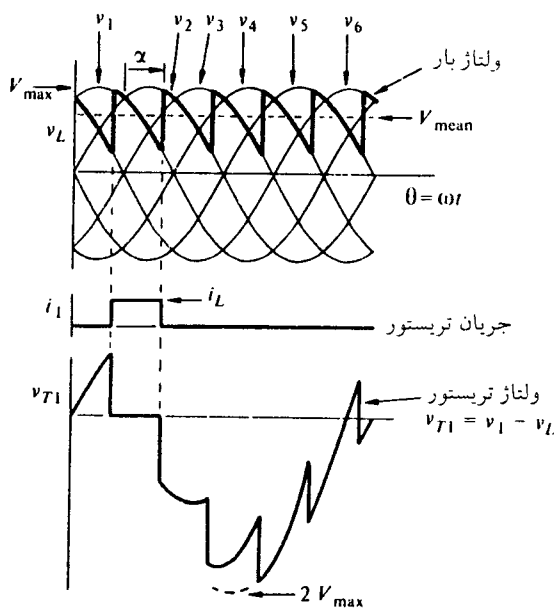
$$\text{متوسط توان} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha + \frac{2\pi}{r}} v_L i_L d(\omega t) = \frac{V_L I_L}{3} = \frac{1/2 \times 32}{3} = 12/8 \text{ W}$$

۳-۶-۵ یکسوکننده قابل کنترل شش فاز نیم موج

مدار کنترل شده شش فاز نیم موج که در آن از یک ترانسفورماتور تغذیه ستاره ساده استفاده شده است، در شکل ۳-۲۸ نشان داده شده است. نحوه اتصال مشابه مدار سه فاز نیم موج است و فقط تعداد فاز افزایش یافته است و هر تریستور در فاصله یک ششم سیکل هدایت می‌کند. همانطوریکه قبلاً در شکل ۳-۱۲ ملاحظه کردیم شکل موج ولتاژ بار در حالت دیودی همان قسمت قلّه ولتاژهای شش فاز خواهد بود و عمل کموتاسیون در نقطه تلاقی ولتاژها رخ می‌دهد. لیکن برای حالت تریستوری همانطوریکه شکل ۳-۲۸ ب نشان می‌دهد، به اندازه زاویه تأخیر آتش α در موج ولتاژ خروجی تأخیر ایجاد می‌شود. شکل موج دارای مشخصه شش پالسی است و مقدار متوسط آن از رابطه زیر بدست می‌آید:



(الف)



(ب)

شکل ۲۸-۳ مدار کنترل شده شش فاز نیم موج

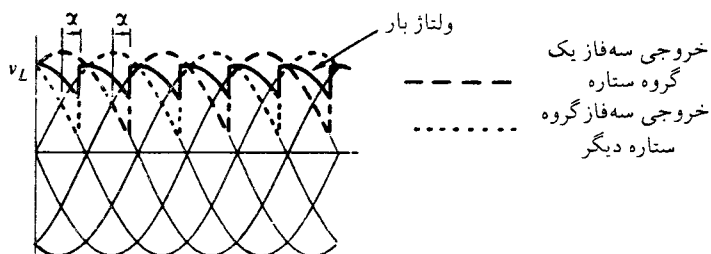
$$V_{dc} = \frac{1}{\frac{2\pi}{6}} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2}{\pi} V_m \cos \alpha$$

(۵۰-۳)

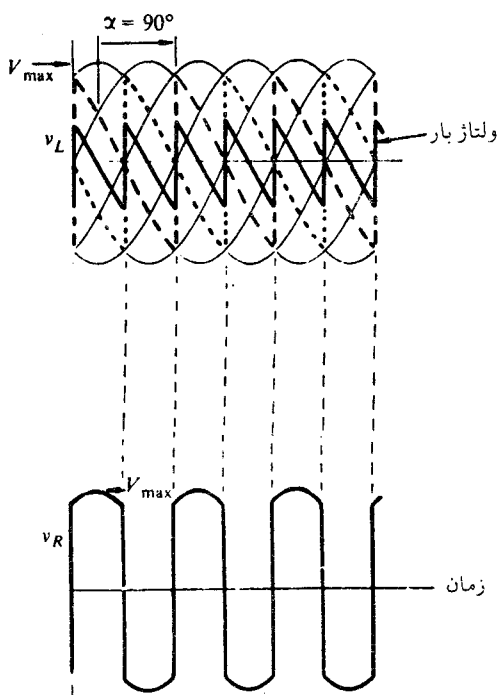
اگر در شکل ۳-۱۴ الف، دیودها با تریستور جایگزین شوند، مدار تمام کنترل شده با اتصال ستاره دوبل حاصل می‌شود. شکل موج ولتاژ بار در یک زاویه تأخیر آتش α در شکل ۳-۲۹ الف نشان داده شده است و مشابه حالت دیودی شکل موج دارای مشخصه شش پالسی است و در وسط شکل موج دو گروه سه پالسی قرار می‌گیرد. مقدار متوسط ولتاژ خروجی با کسینوس زاویه α متناسب است. در زاویه آتش 90° ، مقدار متوسط صفر است و شکل موج ولتاژ در شکل ۳-۲۹ ب نشان داده شده است. در این شرایط ولتاژ ترانسفورماتور (راکتور) بین دو فاز، مطابق شکل ۳-۲۹ پ، تقریباً "چهارگوشی است و چون تغییر فلوی (شار) مغناطیسی در راکتور با سطح زیر منحنی ولتاژ - زمان متناسب است، در مقایسه با شکل موج مثلثی حالت دیودی، سطح زیر منحنی سه برابر افزایش یافته است و در نتیجه بواسطه همین افزایش سه برابر تغییرات فلوی مغناطیسی، ترانسفورماتور بین دو فاز در مدار کنترل شده از نظر فیزیکی سه برابر بزرگتر از حالت دیودی خواهد بود.

۳-۶-۶ یکسوکنده قابل کنترل پل سه فاز

مبدل‌های پل سه فاز در کاربردهای صنعتی تا قدرت حدود 120 kW بطور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر چنانچه دیودهای شکل ۳-۱۸ با تریستور جایگزین شوند، پل سه فاز تمام کنترل شده شکل ۳-۳۰ بدست می‌آید. مشابه مدارهای قابل کنترل قبل، مقدار متوسط ولتاژ خروجی به کمک تغییر زاویه آتش α قابل کنترل خواهد بود. وقتی زاویه تأخیر آتش کوچک است همان‌طوری که در شکل ۳-۳۰ ب ملاحظه می‌شود، شکل موج ولتاژ خروجی (بار) را می‌توان با جمع کردن شکل موجهای دو گروه سه پالسی بدست آورد (به شکل ۳-۱۸ مراجعه شود). این شکل موج شش پالسی است و تفاوت آن با شکل موج حالت دیودی این است که به اندازه زاویه α تأخیر پیدا کرده است. همان‌طوریکه در شکل ملاحظه می‌شود تریستورها در فاصله 60° آتش می‌شوند، اما نکته‌ای که در این مدار باید مورد توجه قرار داد مسأله شروع



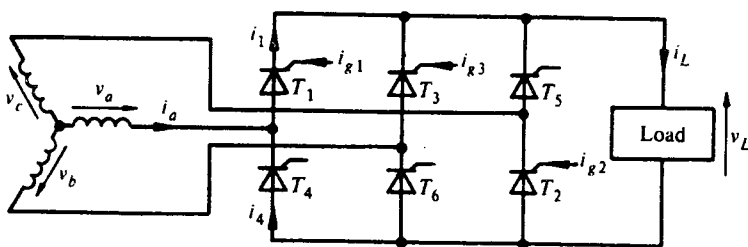
(الف)



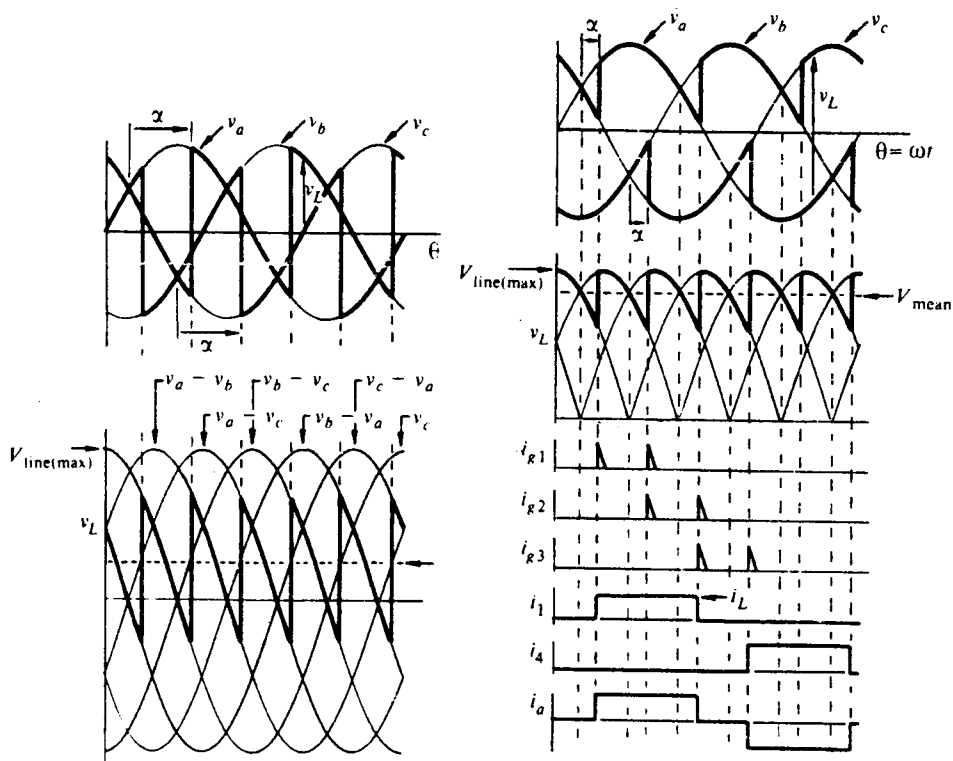
(ب)

(پ)

شکل ۳-۲۹ شکل موجها در مدار کنترل شده با اتصال ستاره دوپل



(الف)



(پ)

(ب)

شکل ۳-۳۰ مدار پل سه فاز تمام کنترل شده

بکارمدار است. از آن جایی که در شرایط کارعادی دو تریستور با هم در حال هدایت می باشند بنابراین بایستی یک زوج تریستور مناسب آتش شوند تا مدار شروع بکار نماید. بنابراین با مراجعه به شکل ۳-۳۰، مثلاً اگر وقتی که منبع تغذیه به مدار متصل می گردد v_{a1} در مقدار پیک خود باشد، پالس آتش بعدی به تریستور T_7 اعمال می شود در اینصورت جریان در مدار برقرار نمی شود مگر اینکه همزمان T_1 نیز آتش شود. بنابراین وقتی که به گیت یک تریستور پالسی اعمال می شود، بایستی به تریستور دیگری که در مسیر جریان آن قرار دارد همزمان پالسی اعمال شود. نتیجه کلی اینکه بایستی همواره به گیت هر تریستور دو پالس آتش به فاصله 60° اعمال شود تا مدار راه اندازی گردد. اگر چنانچه فقط به یک پالس اکثفا شود مدار شروع بکار نمی کند. البته وقتی مدار راه اندازی شد پالس دوم اثری نخواهد داشت (در صورت پیوسته بودن جریان بار) زیرا تریستور قبلاً در وضعیت روشن (وصل) قرار گرفته است. بنابراین در عمل مدارهای آتش تریستورها به اینصورت عمل می نمایند که هر مدار آتش تریستور وقتی پالس آتش به تریستور خودش صادر می کند پالسی را به تریستور قبلی اعمال می کند. با توجه به شماره گذاری تریستورها توالی آتش کردن بصورت ۱۲، ۲۳، ۳۴، ۴۵، ۵۶ و ۶۱ می باشد.

شکل ۳-۳۰ پ، شکل موجها را برای حالتی که زاویه آتش بزرگ است، نشان می دهد. در

این حالت ولتاژ بار دارای پریودهای منفی است و در نتیجه تشخیص شکل موج ولتاژ بار از روی شکل موج های دو گروه سه پالسی مشکل است. برای اینکه بتوان تصویر بهتری از آن داشت، می توان به اینصورت عمل کرد. مطابق شکل ۳-۳۰ پ در $\omega t = \pi/6 + \alpha$ تریستور T_6 قبلاً در حال هدایت بوده است، تریستور T_1 روشن می شود. بنابراین در فاصله $\pi/6 + \alpha \leq \omega t \leq \pi/2 + \alpha$ T_6 و T_1 هدایت می کنند و ولتاژ v_{a1b} که برابر $v_{b1} - v_{a1}$ است، در دوسر بار ظاهر می شود در $\omega t = \pi/2 + \alpha$ تریستور T_7 آتش می شود و تریستور T_6 بلافاصله در بایاس معکوس قرار می گیرد و قطع می گردد. بنابراین در فاصله $\pi/6 + \alpha \leq \omega t \leq 5\pi/6 + \alpha$ تریستورهای T_1 و T_7 هدایت می کنند و ولتاژ v_{a1c} که برابر $v_{c1} - v_{a1}$ است، در دوسر بار ظاهر می شود. اگر توالی آتش کردن را در نظر بگیریم (که قبلاً با شماره گذاری تریستورها بیان کردیم) در فواصلی که زوج تریستورها هدایت می کنند ولتاژهای خط، $v_{a1} - v_{b1}$ ، $v_{a1} - v_{c1}$ ، $v_{b1} - v_{c1}$ ، $v_{a2} - v_{b2}$ ، $v_{a2} - v_{c2}$ ، $v_{b2} - v_{c2}$ در دوسر بار ظاهر می گردند و با استفاده از این ولتاژها و با توجه به لحظات آتش کردن تریستورها می توان به سهولت شکل موج ولتاژ بار را بدست آورد و تصور

بهتری از آن داشت. این شکل موج نشان می دهد که مقدار متوسط ولتاژ خروجی در زاویه آتش $\alpha = 90^\circ$ برابر صفر است. مقدار متوسط آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} v_{ab} d(\omega t) \quad (51-3)$$

ولتاژ v_{ab} را می توان به صورت زیر محاسبه کرد. اگر ولتاژهای خط - نول به قرار زیر باشند؛

$$v_a = V_m \sin \omega t$$

$$v_b = V_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$v_c = V_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

آنگاه مقدار v_{ab} برابر $v_a - v_b = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + \pi/6)$ خواهد بود.

با قرار دادن مقدار v_{ab} در معادله (51-3) خواهیم داشت.

$$V_{dc} = \frac{\pi}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) d(\omega t) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha \quad (52-3)$$

مقدار rms ولتاژ خروجی برابر است با

$$V_{rms} = \left[\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} 3 V_m^2 \sin^2 \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{6} V_m \left(\frac{1}{4} + \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cos 2\alpha \right)$$

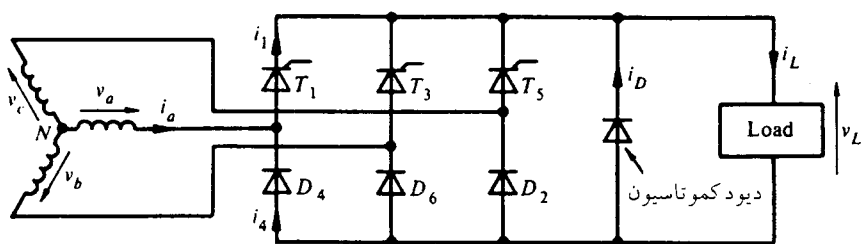
(53-3)

اگر چنانچه تریستورهای T_1 ، T_2 و T_3 در مدار شکل ۳-۳۰ با دیود D_1 ، D_2 و D_3 جایگزین گردند مدار شکل ۳-۳۱ حاصل می‌شود. یک دیود کموتاسیون نیز به مدار اضافه شده است و نقش آن مشابه نقشی است که در مدار پل نیمه کنترل شده تکفاز به عهده دارد. در این مدار نیز با تغییر زاویه آتش α کنترل ولتاژ بار امکان پذیر است. شکل موج ولتاژ بار برای زاویه α کوچک در شکل ۳-۳۱ ب و برای زاویه α بزرگ در شکل ۳-۳۱ پ نشان داده شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود شکل موج ولتاژ بار از جمع دو شکل موج فوقانی و تحتانی بدست می‌آید. شکل موج فوقانی مربوط به عملکرد تریستورها در زاویه آتش α و شکل موج تحتانی مربوط به دیودهاست. شکل موج ولتاژ بار حاصل در مقایسه با حالت تمام کنترل شده که شش برش^۱ داشت، دارای سه برش است. چون شکل موج سه پالسی است در مقایسه با اتصال تمام کنترل شده، دارای ریپل بیشتری است. وقتی که زاویه آتش افزایش می‌یابد، می‌توان تصور کرد که در شکل موج ولتاژ خروجی خط عمودی واقع در محل آتش شدن تریستور به سمت راست حرکت می‌کند.

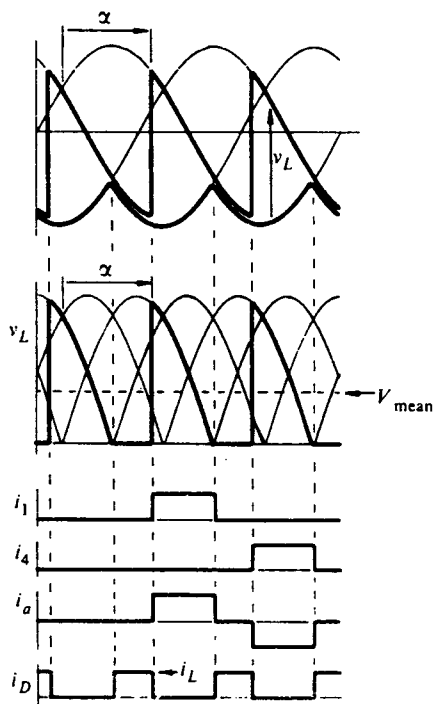
جهت محاسبه مقدار متوسط ولتاژ بار، شکل موج ولتاژ خروجی برای زاویه آتش کوچکتر و بزرگتر از 60° مجدداً^۲ در شکل ۳-۳۲ رسم شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود برای زاویه آتش $\alpha \leq 60^\circ$ دیود کموتاسیون نقشی ندارد (زیرا ولتاژ منفی در دوسر بار ظاهر نمی‌شود) و هر زوج تریستور و دیود برای 120° هدایت می‌کنند. در این شرایط مقدار متوسط ولتاژ بار از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{dc} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \left[\int_{\alpha + \frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} V_{m(\text{line})} \sin \omega t d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} V_{m(\text{line})} \sin \omega t d(\omega t) \right]$$

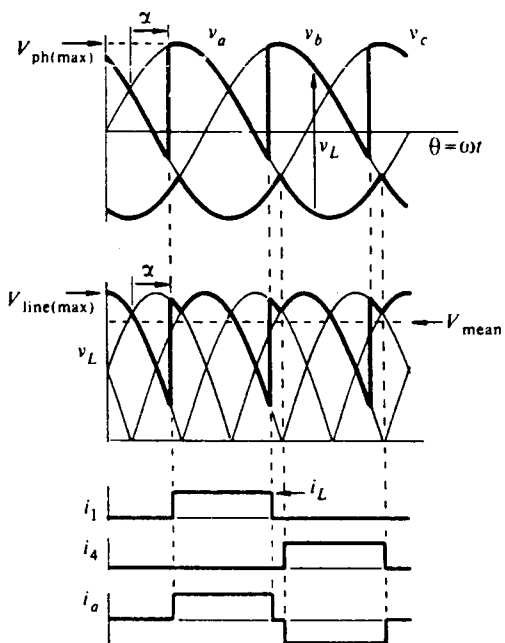
$$= \frac{3}{2\pi} V_{m(\text{line})} (1 + \cos \alpha) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m (1 + \cos \alpha) \quad (54-3)$$



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۳-۳۱ مدار پل سه فاز نیمه کنترل شده

برای زاویه آتش بزرگتر از 60° ، همانطوریکه در شکل ملاحظه می‌شود دیود کموتاسیون از معکوس شدن ولتاژ بار ممانعت می‌نماید و در این شرایط مقدار ولتاژ بار برابر است با:

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{m(\text{line})} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} V_m (1 + \cos \alpha) \quad (55-3)$$

مدارهای نیمه کنترل شده در مقایسه با مدارهای تمام کنترل شده ارزانتر بوده و مسأله راه‌اندازی ندارند، لیکن در شکل موجهای ولتاژ بار و جریان تغذیه مولفه هارمونیک بیشتری وجود دارد.

۷-۳ تداخل (همپوشانی)^۱

در بخش‌های قبل رفتار یکسوکننده‌ها با فرض صرف‌نظر کردن از امپدانس منبع تغذیه مورد بررسی قرار گرفت. و از این جهت کموتاسیون یا انتقال جریان از یک دیود یا تریستور به دیود یا تریستور دیگر بطور آتی انجام شد. اما در عمل بواسطه وجود اندوکتانس در مدار، جریان دیود نمی‌تواند بطور آتی تغییر نماید و زمانی لازم است تا این انتقال جریان صورت گیرد. نتیجه کلی اینکه کموتاسیون جریان با تأخیر انجام می‌گیرد، طوریکه زمان معینی طول می‌کشد تا جریان در دیودی یا تریستوری که از مدار خارج می‌شود به صفر کاهش یابد و در دیودی که وارد مدار می‌شود با همان سرعت افزایش یابد. راکتانس منبع تغذیه معمولاً از مقاومت بزرگتر است و از آن جایی که اندوکتانس موجب تأخیر در جریان می‌گردد، می‌توان از مقاومت منبع تغذیه صرف‌نظر کرد. منبع تغذیه ac را می‌توان با استفاده از مدار معادل تونن بصورت یک منبع ولتاژ و اندوکتانس سری با آن نمایش داد. جهت توضیح این پدیده مدار یکسوکننده سه فاز نیم موج شکل ۳-۳۳ الف را در نظر می‌گیریم. وقتی مفهوم تداخل در این مدار مشخص شود به مدارهای دیگر نیز قابل تعمیم است. در شکل ۳-۳۳ الف، منبع تغذیه شامل سه منبع ولتاژ است که هر