

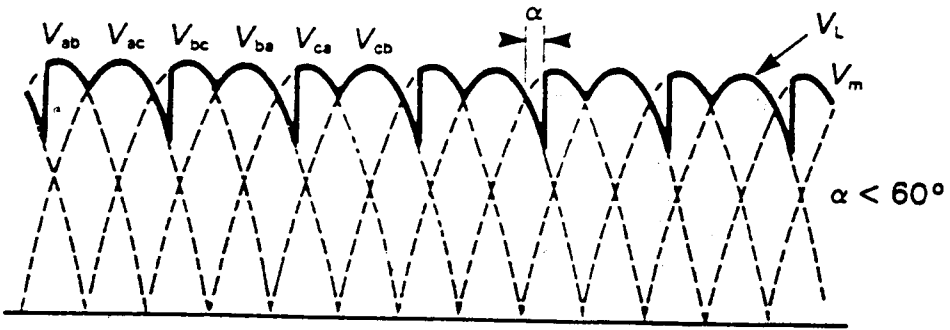
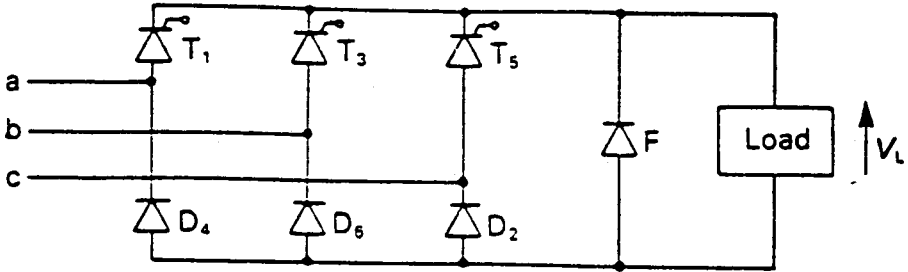
برای زاویه آتش بزرگتر از 60° ، همانطوریکه در شکل ملاحظه می‌شود دیود کموتاسیون از معکوس شدن ولتاژ بار ممانعت می‌نماید و در این شرایط مقدار ولتاژ بار برابر است با:

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

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.

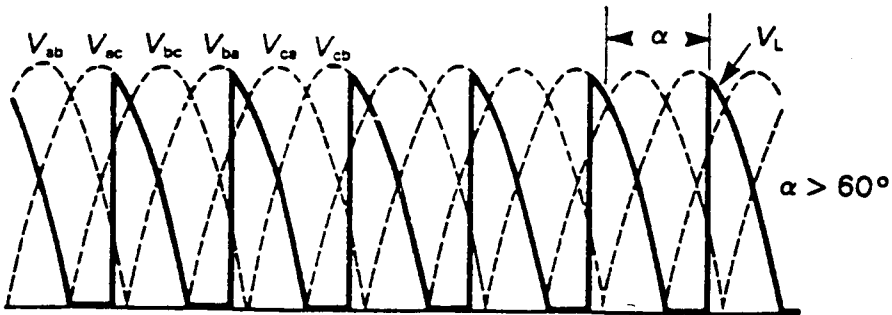
۷-۳ تداخل (همپوشانی)^۱

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



1	3	5	1	3	5	1
6	2	4	6	2	4	6

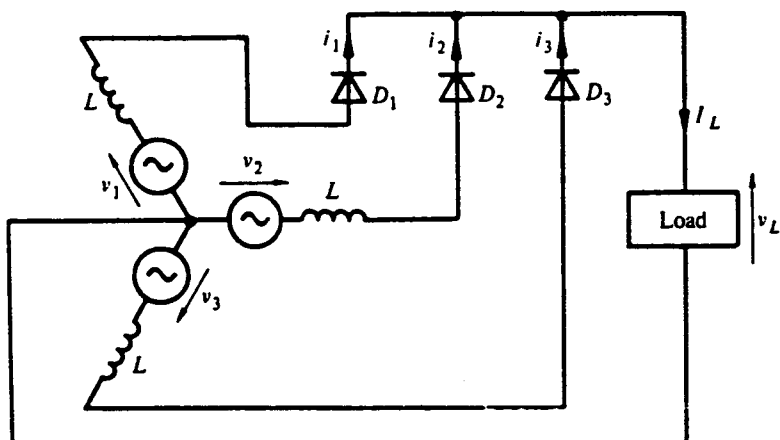
نوالی
آتش کردن



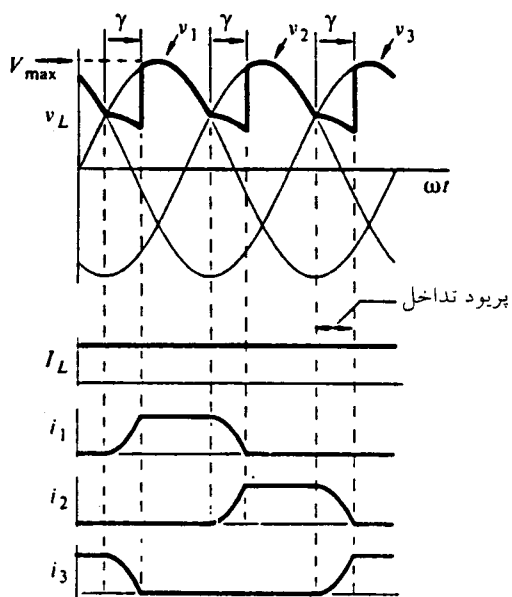
5	1	3	5	1	3	5
6	2	4	6	2	4	6

نوالی
آتش کردن

شکل ۳-۳۲ شکل موج ولتاژ بار در مدار پل سه فاز نیمه کنترل شده



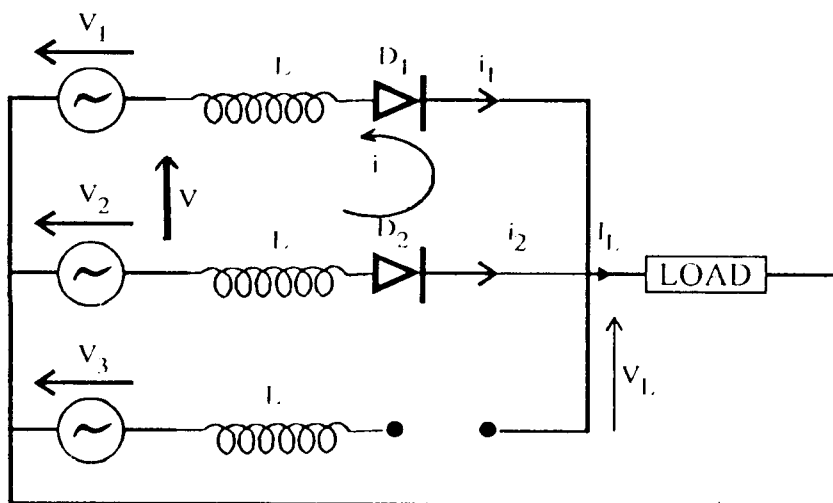
(الف) مدار



(ب) شکل موجها

شکل ۳-۳ پدیده تداخل در یکسو کننده سه فاز نیم موج

کدام با اندوکتانس L سری شده است. همانطوریکه در شکل ۳-۳۳ ب ملاحظه می شود کموتاسیون (یا انتقال جریان از یک دیود به دیود دیگر) آنی نیست بلکه در فاصله γ این انتقال انجام می گیرد یعنی مدت زمانی طول می کشد که (مثلاً) جریان دیود D_1 از جریان بار به صفر تنزل یابد و جریان دیود D_2 به مقدار جریان بار افزایش یابد. بنابراین در خلال این پریود زاویه ای که به پریود تداخل (همپوشانی)^۱ موسوم است هم دیودی که وارد مدار می شود و هم دیودی که از مدار خارج می شود هر دو هدایت می کنند. زاویه γ به عنوان زاویه کموتاسیون^۲ یا زاویه تداخل تعریف می شود. به منظور محاسبه زاویه تداخل، جریان دیود یا تریستور در پریود تداخل و شکل موج ولتاژ بار در خلال این پریود و بطور کلی عوامل موثر در این پدیده، مدار شکل ۳-۳۴ را مورد بررسی قرار می دهیم. در حقیقت می خواهیم در این مدار مسأله انتقال جریان یا کموتاسیون بین دیود D_1 و دیود D_2 را با در نظر گرفتن اندوکتانس منبع تغذیه مورد بررسی قرار دهیم. اگر جریان بار I_L باشد و دیود D_1 در حال هدایت باشد دیود D_1 این جریان بار را فراهم می کند و دیود D_2 قطع است. با فرارسیدن لحظه کموتاسیون، بایستی D_1 قطع گردد یعنی جریان i_1 بلافاصله به صفر تنزل یابد و D_2 وصل گردد یعنی جریان i_2 بلافاصله به مقدار



شکل ۳-۳۴ وضعیت مدار یکسو کننده سه فاز نیم موج در شرایط تداخل

I_L افزایش یابد و در نتیجه دیود D_2 جریان بار را تأمین نماید. این حالت وقتی رخ می دهد که بتوان از اندوکتانس مدار صرفنظر کرد. با وجود اندوکتانس در مدار، جریان i_1 و i_2 در خلال کموتاسیون مطابق شکل ۳-۳۳ ب تغییر می یابند. یعنی مدت زمانی طول می کشد تا جریان i_1 از مقدار جریان بار به صفر تنزل یابد و در همان فاصله زمانی جریان i_2 با آهنگ یکسان تا مقدار جریان بارافزایش می یابد. بنابراین وضعیت مدار قبل در شرایط تداخل مطابق شکل ۳-۳۴ خواهد بود.

برای محاسبه زاویه تداخل می توان اینطور عمل کرد. با فرض ثابت بودن جریان بار (که با فرض بی نهایت بودن اندوکتانس بار حاصل می شود) در پریود کموتاسیون $i_1 + i_2 = I_L$ می باشد. در لحظه شروع کموتاسیون $i_2 = 0$ و $i_1 = I_L$ می باشد در این لحظه D_2 شروع به هدایت می کند و جریان i_2 با آهنگی معین افزایش می یابد و چون مجموع جریانهای i_1 و i_2 ثابت است از جریان i_1 به همان مقدار کاسته می شود، یا به عبارت دیگر می توان گفت که این جریان در خلاف جهت i_1 از مدار D_1 می گذرد. بنابراین اگر مقدار این جریان i باشد جریان عبوری از مدار D_1 برابر $i_1 = I_L - i$ و در مدار D_2 برابر $i = i_2$ است یعنی اینکه در پریود کموتاسیون یک جریان گردشی i در مسیر بسته شامل دیودهای D_1 و D_2 برقرار می شود که این جریان از لحظه شروع کموتاسیون صفر و در پایان کموتاسیون برابر I_L است و از این مطلب می توان در محاسبه زاویه تداخل استفاده کرد.

با صرفنظر کردن از افت ولت دیودها داریم،

$$v_2 - v_1 = v = \omega L \, di/dt \quad (3-56)$$

ولتاژ v اختلاف ولتاژ دو فاز است که برابر ولتاژ خط خواهد بود که مقدار آن در شکل ۳-۳۵ الف بصورت ناحیه هاشور زده نشان داده شده است و به ولتاژ کموتاسیون معروف است. بنابراین ولتاژ v که همان ولتاژ خط است موجی است سینوسی مقدارش در لحظه شروع کموتاسیون صفر و حداکثر مقدار آن V_m است که در آن حداکثر مقدار ولتاژ فاز است. بنابراین از لحظه شروع کموتاسیون $i = 0$ می توان نوشت:

$$v = \sqrt{3} V_m \sin \omega t \quad (3-57)$$

از ترکیب معادلات (۳-۵۶) و (۳-۵۷) داریم

$$\sqrt{3} V_m \sin \omega t = \omega L \, di/dt$$

$$di = \frac{\sqrt{3} V_m}{\omega L} \sin \omega t \, dt$$

با انتگرال‌گیری از دو طرف معادله از فاصله ۰ تا t خواهیم داشت،

$$i = \frac{\sqrt{3} V_m}{\omega L} \left(-\frac{\cos \omega t}{\omega} \right) + K$$

با توجه به اینکه در $t=0$ ، $i=0$ می‌باشد مقدار ثابت انتگرال‌گیری K برابر $K = \frac{\sqrt{3} V_m}{\omega L}$ است و در نتیجه

$$i = \frac{\sqrt{3} V_m}{\omega L} (1 - \cos \omega t) \quad (58-3)$$

این شکل موج کسینوسی در شکل ۳-۳۳ ب و همچنین در شکل ۳-۳۵ ب نشان داده شده است. پریود تداخل از لحظه $t=0$ که در آن $i=0$ است شروع و هنگامیکه $i=I_L$ (که در آن لحظه $\omega t=\gamma$ است) تداخل کامل می‌گردد بنابراین،

$$I_L = \frac{\sqrt{3} V_m}{\omega L} (1 - \cos \gamma) \quad (59-3)$$

و یا

$$\cos \gamma = 1 - \frac{\omega L I_L}{\sqrt{3} V_m} \quad (60-3)$$

شکل موج ولتاژ بار در خلال پریود تداخل در شکل ۳-۳۳ ب و ۳-۳۵ پ نشان داده شده است. این که چرا در فاصله کموتاسیون شکل موج ولتاژ خروجی به اینصورت است با توضیحی که هم اکنون داده می‌شود، روشن خواهد شد. اگر فرض کنیم جریان I_L ثابت است (یا حداقل فرض شود که در خلال کموتاسیون ثابت است) می‌توان نتیجه گرفت که آهنگ کاهش جریان i_1 با افزایش جریان i_2 برابر است یعنی $di_1/dt = -di_2/dt$ و بنابراین ولتاژ ظاهر شده در دوسر اندوکتانس $L di_1/dt$ و $L di_2/dt$ با یکدیگر مساوی و در جهت مخالف هم می‌باشند. بنابراین ولتاژ لحظه‌ای خروجی در خلال پریود کموتاسیون میانگین ولتاژهای دوفاز یعنی برابر

است. جهت پی بردن به اینکه ولتاژ خروجی میانگین ولتاژ دو فاز است می توان در شکل ۳-۳۴ برای دو مدار شامل منبع ولتاژ v_1 و v_2 و بار قانون KVL را نوشت به اینصورت:

$$-v_1 + L di_1/dt + v_L = 0$$

$$-v_2 - L di_2/dt + v_L = 0$$

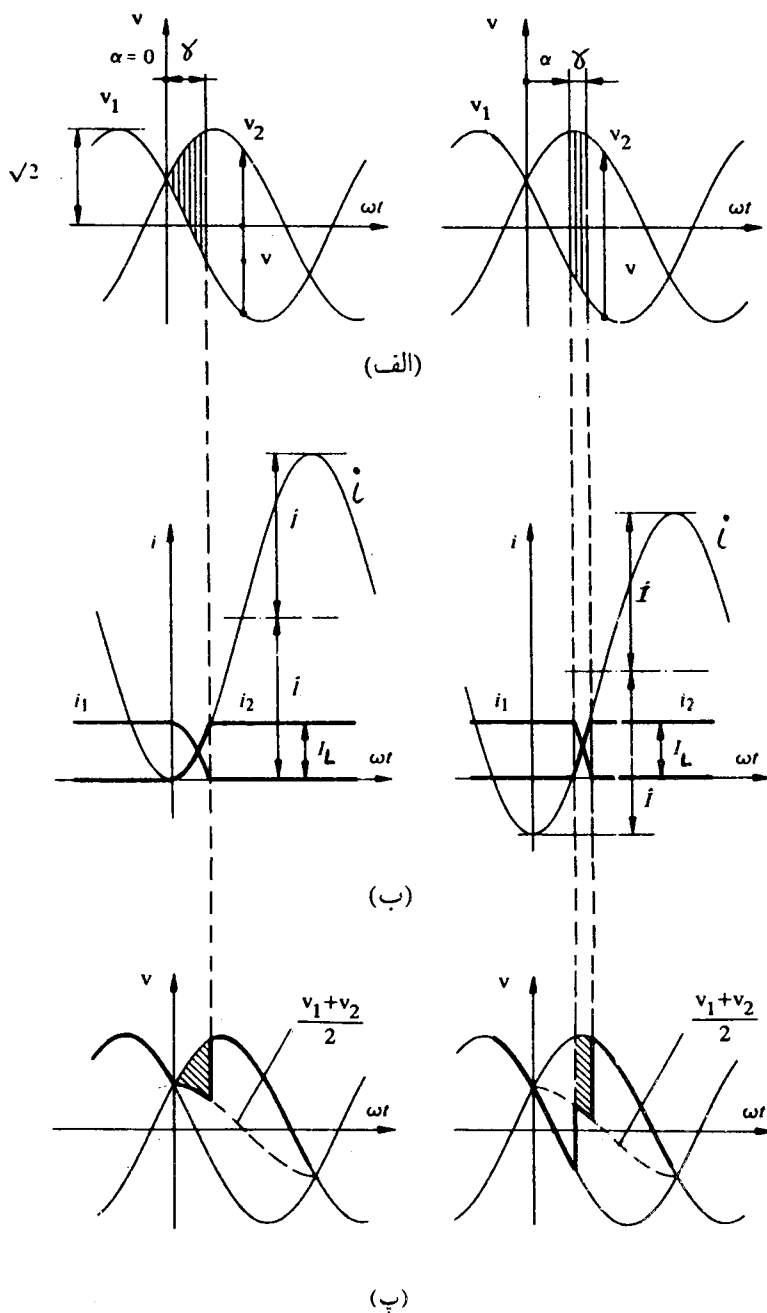
همانطوریکه گفته شد چون جریان i_1 کاهش می یابد و i_2 با همان آهنگ افزایش می یابد ولتاژ دوسر اندوکتانس ها مساوی و مختلف علامه هستند. اگر دو رابطه فوق با هم جمع شوند ولتاژ خروجی در حین کموتاسیون بدست می آید یعنی $v_L = \frac{v_1 + v_2}{2}$. بنابراین ولتاژ بار در خلال تداخل، میانگین دو موج سینوسی است که دارای شکل سینوسی خواهد بود.

برای تعیین مقدار متوسط ولتاژ خروجی در این شرایط، می توان سطح بین دو منحنی که یکی مربوط به ولتاژ سینوسی پس از کامل شدن تداخل و دیگری مربوط به پریود تداخل است، را بدست آورد. همانطوریکه قبلاً گفته شد ولتاژ بار در فاصله γ که از میانگین دو موج سینوسی بدست می آید و دارای شکل موج سینوسی است، اگر بصورت کسینوسی در نظر گرفته شود فاصله انتگرال گیری از ۰ تا γ بر روی موج کسینوسی با مقدار پیک $V_m \sin \pi/6$ خواهد بود. بنابراین مقدار متوسط ولتاژ بار از رابطه زیر بدست می آید،

$$V_{dc} = \frac{1}{\frac{\gamma}{2\pi}} \left[\int_0^{\gamma} V_m \sin \frac{\pi}{6} \cos \theta d\theta + \int_{\gamma + \frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_m \sin \omega t d(\omega t) \right]$$

$$= \frac{\sqrt{3} V_m}{\frac{\gamma}{2\pi}} (1 + \cos \gamma) \quad (3-61)$$

اگر از تداخل صرف نظر شود یعنی $\gamma = 0$ باشد، معادله (۳-۶۱) به معادله (۳-۳۴) تبدیل می شود. اگر چنانچه مدار سه فاز نیم موج کنترل نشده شکل ۳-۳۳ به مدار کنترل شده تبدیل شود، پدیده تداخل منجر به شکل موج شکل ۳-۳۶ می گردد. وضعیت ولتاژ و جریان در خلال تداخل همچنین در شکل ۳-۳۵ نشان داده شده است که در آن همانطوریکه مشاهده می شود در



شکل ۳-۳۵ وضعیت ولتاژ و جریان در خلال پدیده تداخل برای زاویه آتش صفر و α

لحظه کموتاسیون، ولتاژ معینی وجود دارد. با استفاده از معادله (۳-۵۶) و $v_2 - v_1 = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + \alpha)$ که در آن t فاصله زمانی از لحظه شروع کموتاسیون تا صفر شدن جریان i است، داریم

$$\sqrt{3} V_m \sin(\omega t + \alpha) = 2L \frac{di}{dt}$$

و در نتیجه

$$i = \frac{\sqrt{3} V_m}{2L\omega} [\cos\alpha - \cos(\omega t + \alpha)] \quad (3-62)$$

وقتی که $i = I_L$ باشد یعنی $\omega t = \gamma$ باشد تداخل کامل می‌گردد، بنابراین

$$I_L = \frac{\sqrt{3} V_m}{2L\omega} [\cos\alpha - \cos(\gamma + \alpha)] \quad (3-63)$$

در مقایسه با حالت قبل ($\alpha = 0$)، در اینجا زاویه تداخل γ کوچکتر است و تغییر جریان و ولتاژ در این فاصله کوتاه از شکل منحنی به خط نزدیک می‌شود. مقدار متوسط ولتاژ خروجی از رابطه زیر بدست می‌آید

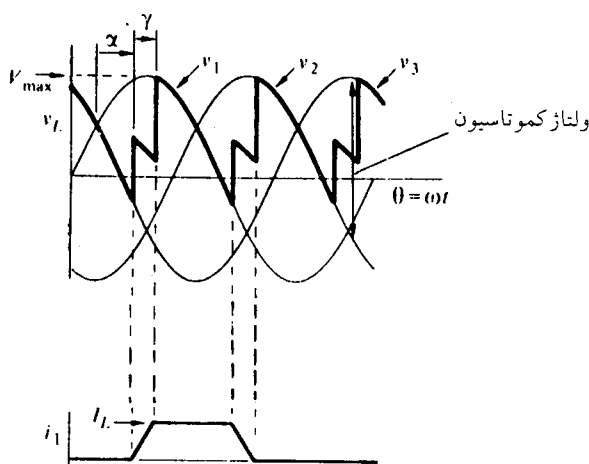
$$V_{dc} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \left[\int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} V_m \sin \frac{\pi}{6} \cos \theta d\theta + \int_{\alpha+\gamma+\frac{\pi}{6}}^{\alpha+\frac{5\pi}{6}} V_m \sin \omega t d(\omega t) \right]$$

$$= \frac{\sqrt{3} V_m}{4\pi} [\cos\alpha + \cos(\alpha+\gamma)] \quad (3-64)$$

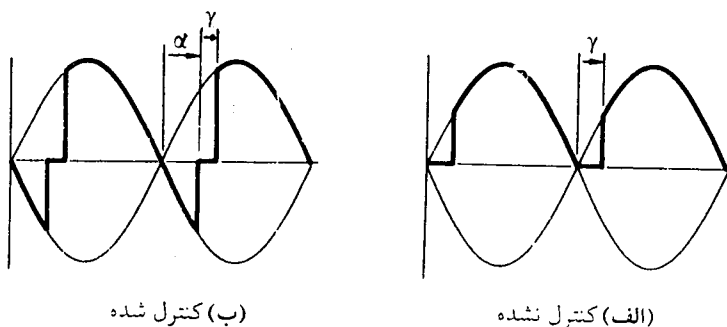
پدیده تداخل در تمامی مدارهای یکسوکننده وجود دارد، که یک نمونه از آن در اینجا مورد بحث قرار گرفت. در مورد شکل موج دو پالسی، یعنی در یکسوکننده تکفاز تمام موج، ولتاژ خروجی در طول پریود تداخل، همانطوری که در شکل ۳-۳۷ نشان داده شده است، برابر صفر است. زیرا همانطوری که قبلاً گفته شد ولتاژ خروجی در این پریود برابر میانگین ولتاژ دو فاز است و ولتاژ دو فاز یعنی v_1 و v_2 در این حالت مساوی و مختلف‌العلامه هستند بنابراین میانگین آن صفر است.

مثال ۳-۵

یک یکسوکننده تکفاز تمام موج که دارای دیود کموتاسیون در دوسر بار خروجی خود



شکل ۳-۳۶ پدیده تداخل در مدار سه فاز نیم موج کنترل شده



شکل ۳-۳۷ موج ولتاژ خروجی دو پالسی با در نظر گرفتن تداخل

می باشد، از یک منبع تغذیه 50 Hz و 120 V که دارای اندوکتانس 0.333 mH است تغذیه می شود. با فرض پیوسته بودن جریان در مقدار ثابت 4 A ، زاویه تداخل را در دو حالت زیر حساب کنید.

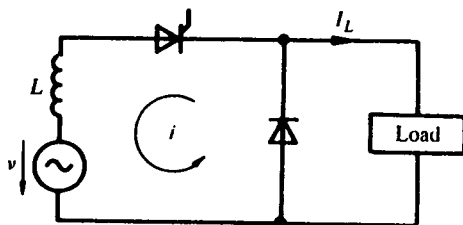
(الف) انتقال جریان از یک ترستور هدایت کننده به دیود کموتاسیون

(ب) انتقال جریان از دیود کموتاسیون به یک ترستور وقتی که زاویه آتش 15° است.

حل - قبل از حل این مثال خاطر نشان می شود، در مدارهایی که در آنها دیود کموتاسیون بکار رفته است، در یک فاصله زمانی دیود کموتاسیون جریان بار را به عهده دارد. یعنی اینکه در

شروع این فاصله زمانی جریان بار از ترستور به دیود کموتاسیون انتقال می‌یابد، و در پایان این فاصله زمانی جریان بار از دیود کموتاسیون به ترستور دیگر انتقال می‌یابد. با مراجعه به شکل ۳-۲۶ می‌توان به این موضوع پی برد. از آن جایی که در این شکل از اندوکتانس منبع تغذیه صرف‌نظر شده است، این انتقال جریان همان طوری که ملاحظه می‌شود بطور لحظه‌ای انجام گرفته است. همچنین ملاحظه می‌شود که انتقال جریان از ترستور هدایت‌کننده به دیود کموتاسیون در لحظه‌ای که ولتاژ تغذیه معکوس می‌شود صورت می‌گیرد و انتقال جریان از دیود کموتاسیون به ترستور دیگر در زاویه آتش α صورت می‌گیرد. البته در اینجا از افت ولت و سایل یکسوکندنه صرف‌نظر شده است. در صورتی که برای منبع تغذیه اندوکتانس قایل باشیم، که در این مثال مورد نظر است، این انتقالات جریان بطور آنی صورت نمی‌گیرند، بلکه در خلال پریودی که به پریود تداخل موسوم است، صورت می‌گیرد.

(الف) در انتقال جریان از ترستور هدایت‌کننده به دیود کموتاسیون وضعیت به این صورت است که ترستور هدایت‌کننده جریان بار را تأمین می‌کند و دیود کموتاسیون در گرایش معکوس قرار دارد. در لحظه معکوس شدن ولتاژ تغذیه، جریان ترستور پس از طی زمانی (پریود تداخل) از جریان بار به صفر تنزل می‌یابد و جریان دیود کموتاسیون در خلال این پریود از صفر به مقدار جریان بار افزایش می‌یابد و در پایان این پریود انتقال جریان کامل می‌شود و در نتیجه دیود کموتاسیون جریان بار را به عهده می‌گیرد. براساس آنچه که قبلاً در رابطه با تداخل بیان شد، این شرایط را می‌توان به کمک مدار شکل ۳-۳۸ با جریان گردشی i نشان داد. در شروع کموتاسیون این جریان صفر است و پس از کامل شدن فرایند تداخل مقدار آن به جریان بار I_L می‌رسد.



شکل ۳-۳۸ شرایط مدار در طول تداخل، وقتی که جریان بار از ترستور به دیود کموتاسیون انتقال می‌یابد.

با توجه به آنچه که قبلاً گفته شد می‌توان زاویه تداخل را به کمک این مدار به شرح زیر بدست آورد.

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

$$V_m \sin \omega t = L di/dt$$

$$di = \frac{V_m}{L} \sin \omega t dt \quad \text{و یا}$$

با انتگرال گیری از رابطه فوق در فاصله ωt تا ωt_1 خواهیم داشت:

$$i = \frac{V_m}{L\omega} (1 - \cos \omega t) \quad (۶۵-۳)$$

کمو تاسیون در $i = I_L$ که در آن $\omega t = \gamma_1$ است، کامل می شود. بنابراین

$$I_L = \frac{V_m}{L\omega} (1 - \cos \gamma_1) \quad (۶۶-۳)$$

با توجه به مقادیر داده شده در مثال و جایگزینی آن در معادله (۶۶-۳) زاویه تداخل γ_1 بدست می آید.

$$\gamma_1 = ۴/۰۲^\circ$$

(ب) در انتقال جریان از دیود کمو تاسیون به ترستور دیگر، وضعیت به این صورت است که پس از پایان پریود هدایت دیود کمو تاسیون، ترستور بعدی آتش می شود و جریان بار را تأمین می نماید. بنابراین در انتقال جریان از دیود کمو تاسیون به ترستور بعدی که در زاویه α صورت می گیرد در طی یک پریود تداخل صورت می گیرد. این شرایط را می توان به کمک مدار شکل ۳-۳۹ نشان داد. در این حالت چون کمو تاسیون در زاویه آتش α شروع می شود مقدار ولتاژ در لحظه شروع $i = 0$ صفر نبوده و دارای مقدار بیشتر از صفر می باشد و بنابراین منجر به زاویه تداخل کوچکتري می شود. با توجه به شکل ۳-۳۹ زاویه تداخل در این حالت به شرح زیر محاسبه می گردد.

$$v = V_m \sin(\omega t + \alpha) = L di/dt$$

با انتگرال گیری مشابه حالت قبل خواهیم داشت.

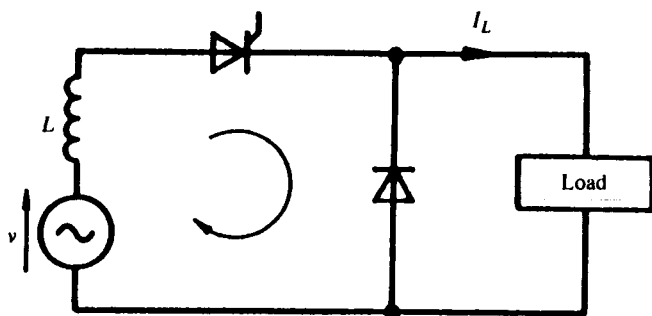
$$i = \frac{V_m}{L\omega} [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] \quad (۶۷-۳)$$

کمو تاسیون در $I_L = i$ که در آن $\gamma_r = \omega t$ است، کامل می شود. بنابراین

$$I_L = \frac{V_m}{L\omega} [\cos\alpha - \cos(\gamma_r + \alpha)] \quad (۶۸-۳)$$

با جایگزین کردن مقادیر داده شده در مثال در معادله (۶۸-۳) زاویه تداخل γ_2 بدست می آید،

$$\gamma_r = ۰/۵۳۶^\circ$$



شکل ۳-۳۹ شرایط مدار در خلال تداخل. وقتی که جریان بار از دیود کمو تاسیون به ترستور دیگر انتقال می یابد.

مثال ۳-۶

مدار پل تکفاز نیمه کنترل شده شکل ۳-۲۶ که شامل دیود کمو تاسیون می باشد، بوسیله منبع $۱۲۰V$ و $۵۰Hz$ تغذیه می شود. اگر بار کاملاً اندوکتیو و جریان بار $۱۰A$ باشد، شکل موج ولتاژ بار و جریان را در زاویه آتش ۹۰° بدست آورید. فرض کنید منبع دارای اندوکتانس $۳mH$ باشد و از افت ولت و سایل صرف نظر شود.

حل - با مراجعه به شکل ۳-۲۶ و با فرض اینکه جریان ثابت و برابر $۱۰A$ باشد مسأله را حل می کنیم. مطابق آنچه در مسأله قبل گفته شد و با توجه به معادلات (۳-۶۵) و (۳-۶۶) در شرایط انتقال جریان از ترستور به دیود کمو تاسیون داریم،

$$i = \frac{۱۲۰\sqrt{۲}}{۳ \times ۱۰^{-۳} \times ۲\pi \times ۵۰} (1 - \cos\omega t) = ۱۸۰(1 - \cos\omega t)$$

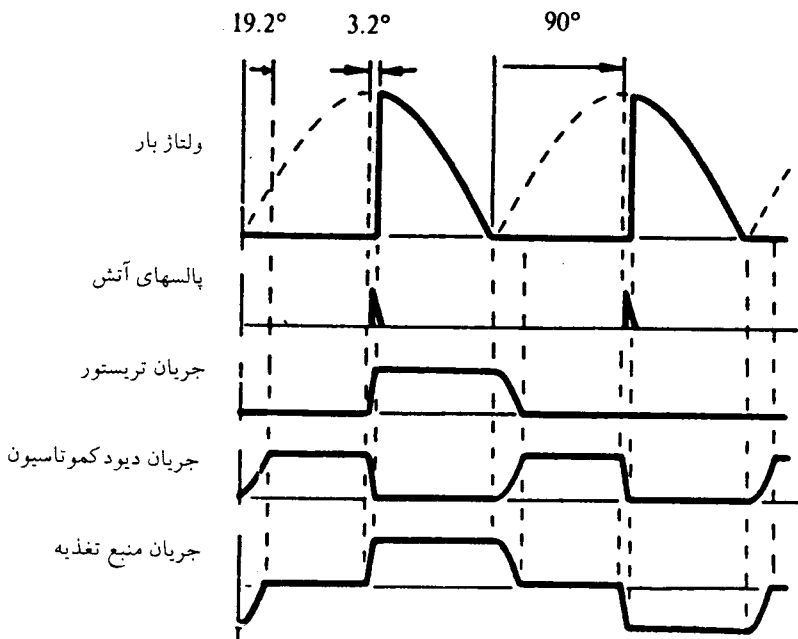
$$۱۰ = ۱۸۰(1 - \cos\gamma_1) \rightarrow \gamma_1 = ۱۹/۲^\circ$$

بنابراین زاویه تداخل در کموتاسیون تریستور به دیود کموتاسیون برابر $\gamma_1 = 19/2^\circ$ است. هنگامیکه تریستور در زاویه $\alpha = 90^\circ$ آتش می‌شود، در انتقال جریان از دیود به تریستور آتش شونده، زاویه تداخل از معادلات (۶۷-۳) و (۶۸-۳) بدست می‌آیند، بنابراین

$$i = \frac{120\sqrt{2}}{3 \times 10^{-3} \times 2\pi 50} [\cos 90^\circ - \cos(\omega t + 90^\circ)] = 180 \sin \omega t$$

$$10 = 180 \sin \gamma_2 \rightarrow \gamma_2 = 3/2^\circ$$

بنابراین زاویه تداخل در کموتاسیون دیود کموتاسیون به تریستور بعدی برابر $\gamma_2 = 3/2^\circ$ است. شکل موجها در شکل ۳-۴۰ نشان داده شده است. باید توجه داشت که در اینجا فرض کرده‌ایم که بار کاملاً اندوکتیو بوده و در نتیجه توانسته‌ایم جریان بار را مقدار ثابت فرض نمائیم. البته در عمل گرچه ممکن است جریان بار پیوسته باشد لیکن در یک یکسوسکننده دو پالسی که بارهای با قدرت پائین را تغذیه می‌نماید، نمی‌تواند مقدار ثابت داشته باشد. با وجود این می‌توان مقدار آن را حداقل در پریود تداخل ثابت فرض نمود و در نتیجه شکل موجهای بدست آمده صحیح می‌باشند.



شکل ۳-۴۰ شکل موج ولتاژ و جریان در پریود تداخل

در ادامه محاسبه ولتاژ خروجی در یک یکسوکننده سه فاز نیم موج که منجر به معادله (۶۴-۳) گردید، ذکر این نکته ضروری است که پدیده تداخل منجر به تغییر مقدار متوسط ولتاژ خروجی به میزان ΔV_d گردیده است،

$$V_{dc} = V_o - \Delta V_d \quad \text{یعنی}$$

که در آن V_o مقدار متوسط ولتاژ خروجی بدون در نظر گرفتن تداخل است که از معادله (۴۸-۳) بدست می آید و عبارتست از

$$V_o = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos\alpha$$

بنابراین با استفاده از معادله (۶۴-۳)

$$\Delta V_d = \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} V_m [\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma)] \quad (۶۹-۳)$$

با ترکیب معادله (۶۹-۳) و معادله (۶۳-۳) خواهیم داشت

$$\Delta V_d = \frac{3L\omega}{2\pi} I_L \quad (۷۰-۳)$$

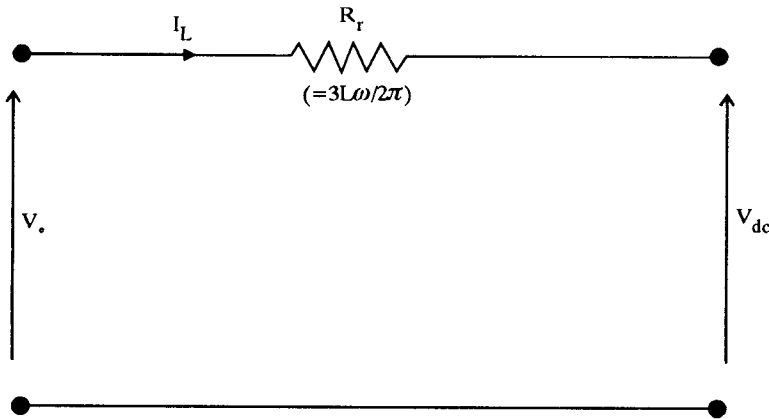
از معادلات (۴۸-۳) و (۷۰-۳) داریم

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos\alpha - \frac{3L\omega}{2\pi} I_L = V_o - R_F I_L \quad (۷۱-۳)$$

بنابراین عبارت ΔV_d را می توان بر حسب مقاومت موثر dc با مقدار R_F و جریان بار I_L در نظر گرفت. در نتیجه می توان یکسوکننده را با مدار معادل نشان داده شده در شکل ۳-۴۱ نمایش داد. باید توجه داشت که در این مدار معادل جمله R_F فقط معرف افت ولتاژ ناشی از تداخل است و مفهوم تلفات توان را در بر ندارد.

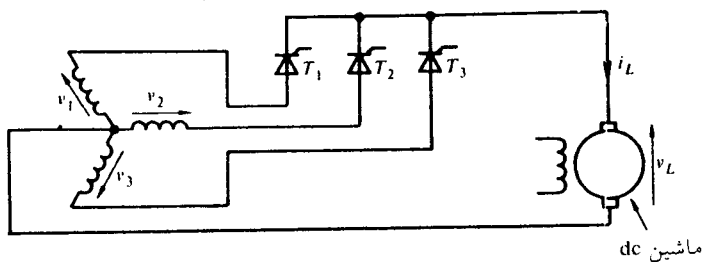
۳-۸ معکوس سازی

به منظور تشریح پدیده معکوس سازی^۱ مبدل کنترل شده سه فاز نیم موج شکل ۳-۴۲ الف را در نظر می گیریم. با صرف نظر کردن از اثر تداخل، شکل موج ولتاژ خروجی برای

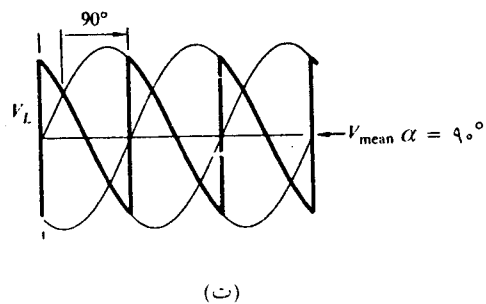
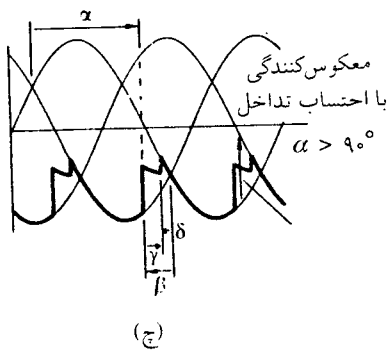
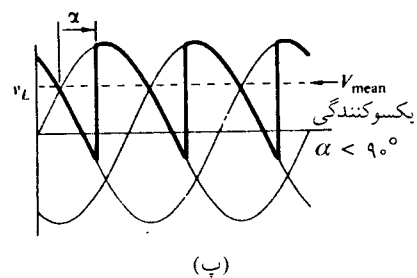
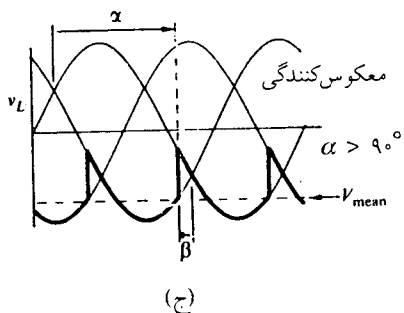
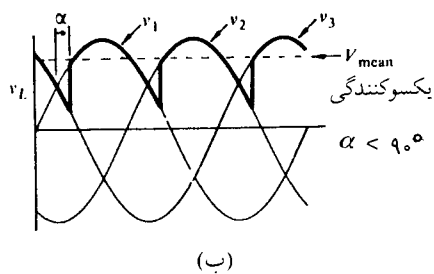
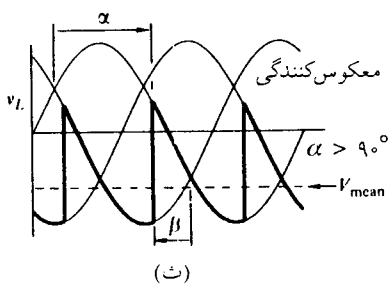


شکل ۴۱-۳ مدار معادل مبدل سه فاز نیم موج در مُد یکسوکنندگی

زوایای آتش مختلف در شکل ۴۲-۳ ب الی ج رسم شده است. همان طوری که ملاحظه می شود برای زاویه های آتش $\alpha < 90^\circ$ ، مبدل نقش یکسوکنندگی دارد. در زاویه آتش $\alpha = 90^\circ$ ، ولتاژ خروجی به یک میزان مثبت و منفی می شود و در نتیجه مقدار متوسط ولتاژ خروجی صفر است. برای زاویه های آتش $\alpha > 90^\circ$ ، همان طوری که در شکل ملاحظه می شود مقدار متوسط ولتاژ خروجی منفی می گردد. شکل موج در حالت $\alpha = 180^\circ$ مشابه $\alpha = 0^\circ$ است با این تفاوت که جهت آن معکوس شده است. نمودار تغییر مقدار متوسط ولتاژ خروجی نسبت به تغییر زاویه آتش برای این مبدل در شکل ۴۳-۳ ترسیم شده است. همان طوری که ملاحظه می شود وقتی زاویه آتش از 0° تا 180° تغییر می کند میانگین ولتاژ خروجی از حداکثر مقدار مثبت تا حداکثر مقدار منفی تغییر می نماید. در زاویه های آتش بزرگتر از 90° ولتاژ خروجی معکوس (منفی) می شود لیکن چون جهت جریان در ترستورها توسط جهت ترستورها مشخص می شود و بنابراین نمی تواند معکوس گردد، در نتیجه جهت عبور توان از طرف dc مبدل به سمت منبع تغذیه ac خواهد بود. یعنی اینکه اگر در این حالت یک منبع dc با علامت منفی به ترمینالهای خروجی متصل شود می تواند از طریق مدار کنترل به سیستم ac توان تزریق نماید. در این حالت گفته می شود که مبدل در مُد معکوس کنندگی^۱ (اینورتری) کار می کند. شکل ۴۲-۳ الف اتصال این مبدل به یک ماشین dc را نشان می دهد. وقتی زاویه آتش کوچکتر از 90° است و مبدل در مُد یکسوکنندگی کار می کند ماشین dc معرف بار یکسوکننده است و



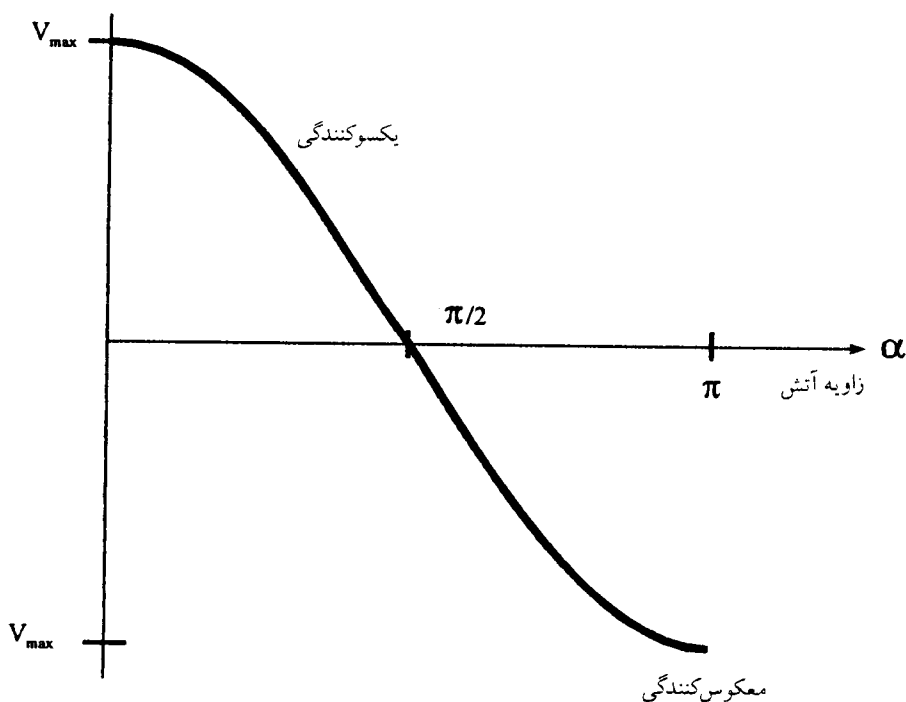
(الف)



شکل ۳-۴۲ شکل موج ولتاژ خروجی در مبدل سه فاز نیم موج در زوایای آتش مختلف

بصورت موتور عمل می‌کند. هنگامیکه ولتاژ بار V_1 معکوس می‌شود و مبدل در مُد معکوس کنندگی قرار می‌گیرد، ماشین dc بصورت ژنراتور عمل می‌کند و توان را به سیستم تغذیه برگشت می‌دهد. البته چون جهت جریان تغییر نمی‌کند، در نتیجه اگر ماشین در همان جهت موتوری می‌چرخد، برای اینکه بصورت مولد عمل کند بایستی اتصالات میدان تحریک یا آرمیچر معکوس گردد. برای آنکه مبدل قادر باشد در مُد معکوس کنندگی کار کند و ترستورها عمل کموتاسیون را انجام دهند بایستی سیستم ac متصل به آن در حالیکه توان برگشتی را جذب می‌نماید، بتواند ولتاژهای با شکل موج پایدار را فراهم نماید. چنین سیستم ac می‌تواند یک سیستم سنکرون ac بزرگ نظیر شبکه تغذیه عمومی باشد. انرژی برگشت داده شده به سیستم ac توسط بارهای متعدد موجود در سیستم جذب می‌گردد.

عمل کموتاسیون (یا انتقال جریان) بین هر زوج ترستور در صورتی انجام می‌گیرد که ولتاژ لحظه‌ای آنید ترستوری که می‌خواهد روشن گردد از ولتاژ لحظه‌ای آنید ترستور روشن، بزرگتر باشد (و یا کمتر منفی باشد). البته این شرط بایستی در طول پریود تداخل برقرار باشد. بنابراین کموتاسیون بین T_1 و T_2 در صورتی امکان‌پذیر است که ولتاژ لحظه‌ای V_2 بیشتر از V_1 ولتاژ بار



شکل ۳-۴۳ تغییر مقدار متوسط ولتاژ بار نسبت به تغییر زاویه آتش

باشد و یا γ_2 نسبت به γ_1 کمتر منفی باشد. وقتی زاویه آتش به مقدار $\alpha = 180^\circ$ می‌رسد (به شکل ۳-۴۲ ج مراجعه شود) ولتاژهای γ_1 و γ_2 ابتدا با هم برابر شده و سپس معکوس می‌گردند یعنی ولتاژ لحظه‌ای γ_2 از γ_1 کمتر می‌شود (یا γ_2 نسبت به γ_1 بیشتر منفی می‌شود)، در نتیجه عمل کموتاسیون تحقق نمی‌یابد. بنابراین در تغییر زاویه α به مقدار نهایی $\alpha = 180^\circ$ که در حقیقت زاویه حد عملکرد مبدل است، نایل می‌آییم. وقتی مبدل در مُد معکوس‌کنندگی کار می‌کند برای مشخص کردن محلی از شکل موج که در آن محل تریستور آتش می‌شود معمولاً بجای استفاده از زاویه تأخیر آتش α از زاویه تقدم یا پیشرو آتش β ^(۱) استفاده می‌شود، همانطوریکه در شکل ۳-۴۲ ث و ج نشان داده شده است. بین α و β رابطه زیر برقرار است.

$$\beta = 180^\circ - \alpha \quad (3-72)$$

و این رابطه برای تمام مبدلها با هر تعداد پالس بکار برده می‌شود.

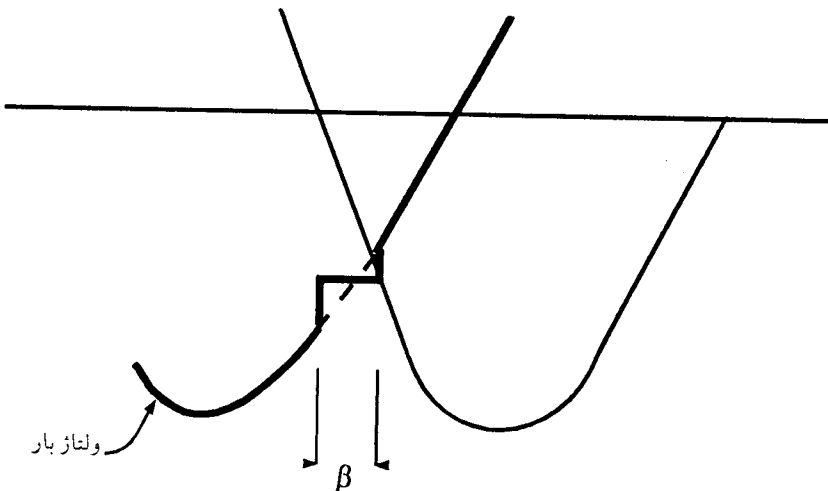
همان طوری که گفته شد برای سهولت، شکل موج‌های شکل ۳-۴۲ ب الی ج با صرف نظر کردن از پدیده تداخل ترسیم گردیده است. لیکن در شکل ۳-۴۲ ج تداخل (همپوشانی) منظور شده است. همان طوری که ملاحظه می‌شود تداخل موجب به تأخیر افتادن کموتاسیون گردیده است. شکل موج ولتاژ در خلال پریود تداخل دارای مقدار میانگین ولتاژ بین دو فاز (یا ولتاژ کموتاسیون) است. از این شکل برمی‌آید که قبل از فرارسیدن نقطه‌ای که در آن ولتاژ دوفاز برابر است (یا ولتاژ کموتاسیون صفر است)، عمل کموتاسیون (یا انتقال جریان بین دو تریستور) انجام گرفته است. اگر این حالت پیش نیاید، یعنی قبل از آنکه عمل کموتاسیون کامل گردد به نقطه مساوی بودن ولتاژها برسیم، چون از آن پس ولتاژها معکوس می‌گردند (همانطوریکه در بالا گفته شد) کموتاسیون انجام نمی‌گیرد (کموتاسیون ناموفق) و جریان بار (یعنی ژنراتور) به تریستور در حال قطع شدن (تریستور خارج شونده) ^۲ برگشت داده می‌شود. چنین شرایطی برای مبدلی که در مد معکوس‌کنندگی کار می‌کند، در شکل ۳-۴۴ نشان داده شده است. بنابراین برای اینکه عمل کموتاسیون با موفقیت انجام گیرد بایستی زاویه تداخل γ کمتر از زاویه پیشرو آتش β باشد. در غیراینصورت هنوز پریود تداخل به پایان نرسیده است که نقطه مساوی بودن ولتاژ دو فاز فرامی‌رسد و در نتیجه کموتاسیون تحقق نمی‌یابد. در عمل، زاویه β هرگز نمی‌تواند به مقدار صفر تنزل یابد. در شکل ۳-۴۲ ج زاویه δ بوسیله رابطه زیر تعریف شده است و معرف زمانی است که تریستور خارج شونده از مدار (تریستور در حال قطع شدن) فرصت دارد تا پس از کامل

شدن فرایند کموتاسیون و قبل از معکوس شدن ولتاژ، حالت مسدود خود را بازیابد.

$$\delta = \beta - \alpha$$

(۷۳-۳)

زاویه δ به زاویه خاموشی^۱ یا زاویه بازیافت^۲ معروف است. بواسطه اثر تداخل و ضرورت داشتن ولتاژ لحظه‌ای زیادتر بر روی تریستور وارد شونده به مدار (تریستور در حال وصل شدن)^۳، لازم است در شرایطی که به حد $(\alpha = 180^\circ)$ نزدیک می‌شویم، δ از 5° کمتر نشود تا عمل کموتاسیون بطور موفقیت آمیز انجام شود. بنابراین زاویه آتش بایستی در محدوده بین 0° و زاویه نزدیک به 180° قرار داشته باشد و پالسهای آتش در نقاطی واقع در این محدوده مجاز اعمال شوند. در عمل ممکن است تحت شرایطی، زاویه آتش از این محدوده مجاز فراتر رود و منجر به مختل شدن کموتاسیون گردد. بنابراین لازم است که در عمل مطمئن گردیم که زاویه آتش از مرزهای محدوده مجاز فراتر نمی‌رود. برای انجام این منظور، مدارهای آتش تریستورها طوری طراحی می‌شوند که قطع نظر از کنترل‌های مختلف موجود در آنها، شامل کنترل End-stop باشند. عملکرد این مدار کنترل به اینصورت است که هرگاه مدار کنترل آتش



شکل ۳-۴ کموتاسیون ناموفق در مبدلی که در مد معکوس کنندگی کار می‌کند بواسطه معکوس شدن ولتاژ قبل از کامل شدن کموتاسیون

عادی بخواهد پالسی فراتر از محدوده مجاز زاویه آتش به تریستور صادر کند، پالس آتشی را در مرز محدوده مجاز به تریستور اعمال می نماید تا عمل کموتاسیون کامل با موفقیت انجام شود. بنابراین مثلاً یک پالس آتش End-stop در $\beta = 20^\circ$ به تریستور صادر می شود. برای توضیح بیشتر می توان به مرجع ۸ مراجعه کرد.

قدر مطلق مقدار متوسط ولتاژ با فرض ثابت بودن جریان و صرف نظر کردن از تداخل از رابطه زیر بدست می آید.

$$|V_{dc}| = \frac{1}{\frac{\gamma\pi}{\gamma}} \int_{\frac{\pi}{\gamma} - \beta}^{\frac{\Delta\pi}{\gamma} - \beta} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{3}}{\gamma\pi} V_m \cos \omega t = V_o \quad (74-3)$$

اگر تداخل در نظر گرفته شود و زاویه γ منظور گردد مقدار ولتاژ dc برابر خواهد بود با

$$|V_{dc}| = \frac{1}{\frac{\gamma\pi}{\gamma}} \left[\int_{\frac{\pi}{\gamma} + \gamma - \beta}^{\frac{\Delta\pi}{\gamma} - \beta} V_m \sin \omega t d(\omega t) + \int_{-\beta}^{-\beta + \gamma} V_m \sin \frac{\pi}{\gamma} \cos \theta d\theta \right]$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{\gamma\pi} V_m [\cos \beta + \cos(\beta - \gamma)] \quad (75-3)$$

حال در نظر می گیریم که

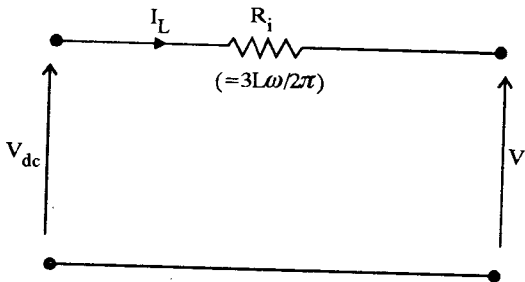
$$V_{dc} = V_o + \Delta V_d \quad (76-3)$$

از ترکیب معادلات (۷۴-۳)، (۷۵-۳)، (۷۶-۳) و (۷۷-۳) معادله زیر بدست می آید.

$$V_{dc} = \frac{\sqrt{3}}{\gamma\pi} V_m \cos \beta + \frac{\sqrt{3}L\omega}{\gamma\pi} I_L = V_o + R_i I_L \quad (77-3)$$

که در آن $\Delta V_d = R_i I_L$ و $R_i = \frac{\sqrt{3}L\omega}{\gamma\pi}$ است.

معادله (۷۷-۳) را می‌توان با مدار معادل معکوس‌کننده مطابق شکل ۴۵-۳ نشان داد، که در آن R_i در افت ولت دخالت دارد و مفهوم تلفات توان را در بر ندارد.



شکل ۴۵-۳ مدار معادل مبدل سه فاز نیم موج در مُد معکوس‌کنندگی

مثال ۷-۳

یک مبدل سه فاز نیم موج به منبع تغذیه ۴۱۵۷ (ولتاژ خط)، متصل شده است و در مد معکوس‌کنندگی کار می‌کند. اگر زاویه خاموشی 18° و زاویه تداخل $3/8^\circ$ باشد مقدار متوسط ولتاژ بار را حساب کنید.

حل - با استفاده از معادله (۷۵-۳) داریم

$$|V_{dc}| = \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \times \frac{415\sqrt{2}}{\sqrt{3}} [\cos 18^\circ + \cos(18^\circ - 3/8^\circ)]$$

$$= 269.1 \text{ V}$$

۹-۳ معادلات برای مبدل P پالسی

معادلاتی که تاکنون بدست آمد مربوط به مبدل سه فاز نیم موج، یعنی مبدل سه - پالسی بود. با بکاربردن روش مشابه می‌توان معادلات مربوط به یک مبدل کلی P- پالسی کنترل شده را بدست آورد. برای بدست آوردن این معادلات، شکل ۴۶-۳ را در نظر می‌گیریم. مقدار متوسط ولتاژ برای مُد یکسوکنندگی و مُد معکوس‌کنندگی به شرح زیر بدست می‌آیند.

(الف) در مُد یکسوکنندگی

$$V_{dc} = \frac{1}{\frac{\pi}{2}} \left[\int_{-\frac{\pi}{p} + \alpha}^{\frac{\pi}{p} + \alpha} V_m \cos \omega t \, d(\omega t) + \int_{\alpha}^{\alpha + \gamma} V_m \cos \frac{\pi}{p} \cos \theta \, d\theta \right]$$

$$= \frac{p V_m}{\pi} \left\{ \sin\left(\frac{\pi}{p} + \alpha\right) - \sin\left[-\frac{\pi}{p} + (\alpha + \gamma)\right] + \cos \frac{\pi}{p} \sin(\alpha + \gamma) - \cos \frac{\pi}{p} \sin \alpha \right\}$$

$$V_{dc} = p \frac{V_m}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)] \quad (۷۸-۳)$$

البته افت ولت وسایل نیمه‌هادی از مقدار فوق کسر می‌شود. با توجه به آنچه قبلاً در مورد مبدل سه پالسی گفته شد می‌توان معادله (۷۸-۳) را به شکل زیر نوشت

$$V_{dc} = \frac{p}{\pi} V_m \sin \frac{\pi}{p} \cos \alpha - \frac{p L \omega}{\pi} I_L \quad (۷۹-۳)$$

و یا

$$V_{dc} = V_o - R_i I_L \quad (۸۰-۳)$$

که در آن $R_i I_L$ معرف افت ولت ناشی از پدیده تداخل است و V_o مقدار متوسط ولتاژ مدار باز است. البته از افت ولت وسایل نیمه‌هادی و افت ولت مقاومت اهمی موجود در مدار صرف‌نظر شده است. مدار معادل مبدل در این حالت در شکل ۳-۴۷ الف نشان داده شده است. (ب) در مُد معکوس‌کنندگی

با جایگزینی $\alpha = \pi - \beta$ قدر مطلق متوسط ولتاژ در این حالت برابر است با

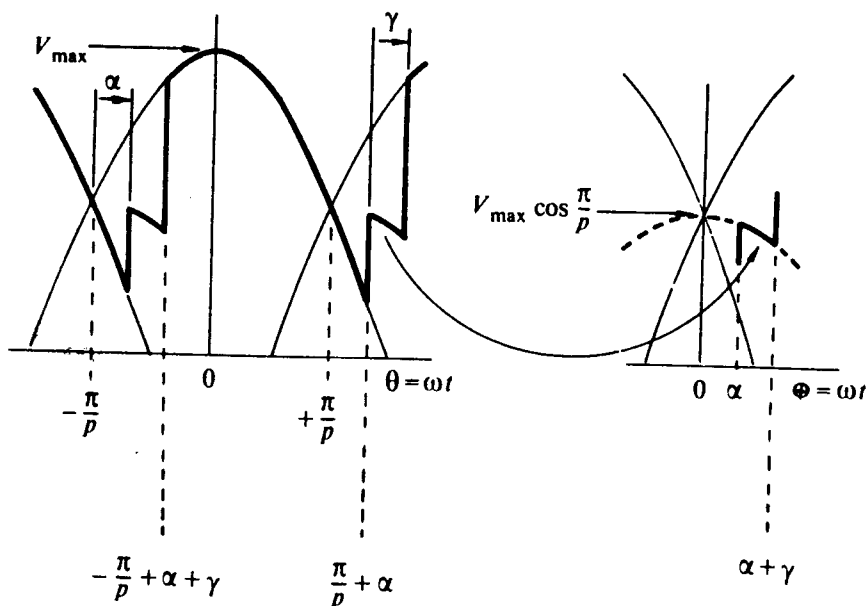
$$V_{dc} = \frac{p}{\pi} V_m \sin \frac{\pi}{p} [\cos \gamma + \cos(\beta - \gamma)] \quad (۸۱-۳)$$

با توجه به آنچه که قبلاً در مورد مبدل سه پالسی گفته شد، معادله (۸۱-۳) را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$V_{dc} = \frac{p}{\pi} V_m \sin \frac{\pi}{p} \cos \beta + \frac{p L \omega}{\pi} I_L \quad (۸۲-۳)$$

و یا

$$V_{dc} = V_o + R_i I_L \quad (۸۳-۳)$$



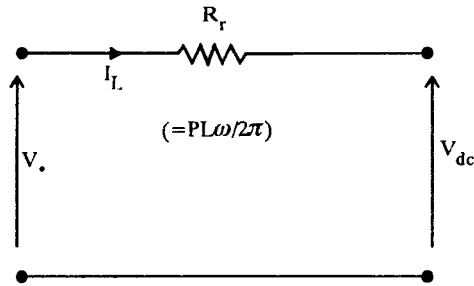
شکل ۳-۴۶ موج در یکسوکننده P پالسی

مدار معادل مبدل در این حالت در شکل ۳-۴۷ ب نشان داده شده است. از افت ولت وسایل نیمه‌هادی و مقاومت اهمی موجود در مدار صرف‌نظر شده است. رابطه بین زاویه تداخل γ ، جریان بار I_L ، ماگزیمم ولتاژ تغذیه V_m و راکتانس کموتاسیون $X = L\omega$ ، در یکسوکننده P پالسی که در زاویه تأخیر آتش α کار می‌کند، را می‌توان با ترکیب معادلات (۳-۷۸) و (۳-۷۹) بدست آورد. یعنی

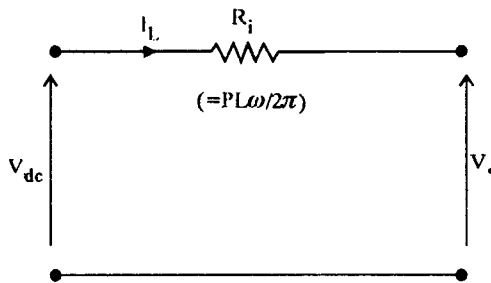
$$L\omega I_L = V_m \sin \frac{\pi}{p} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] \quad (۳-۸۴)$$

مثال ۳-۸

یک خط انتقال DC که دارای مقاومت اهمی $\Omega/۲۰$ می‌باشد به همراه دو مبدل پل تمام کنترل شده شش پالسی برای مرتبط کردن یک سیستم سه فاز ۵۰ Hz و ۴۱۵ V (ولتاژ خط) به یک سیستم سه فاز ۶۰ Hz و ۳۸۰ V (ولتاژ خط)، بکار رفته است. اندوکتانس منبع سیستم ۵۰ Hz برابر فاز/۱ mH و از آن سیستم ۶۰ Hz برابر فاز/۱/۲۵ mH می‌باشد.



(الف) حالت یکسوکندگی



(ب) حالت معکوس‌کنندگی

شکل ۳-۴۷ مدار معادل مبدل P پالسی

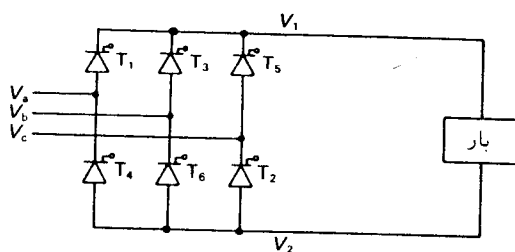
اگر خط ارتباطی DC، جریان ۵۰ A را از خود عبور و توان ۱۵ kW را به سیستم ۶۰ Hz تحویل دهد، زاویه تقدم آتش معکوس‌کننده و زاویه تأخیر آتش یکسوکندنده را محاسبه نمایید.

حل - مبدل بکار رفته در سیستم انتقال در شکل ۳-۴۸ نشان داده شده است. با توجه به مدار معادل مبدل (یکسوکندنده و معکوس‌کننده) و ترکیب آن با مقاومت خط ارتباطی DC، مدار معادل شکل ۳-۴۹ بدست می‌آید.

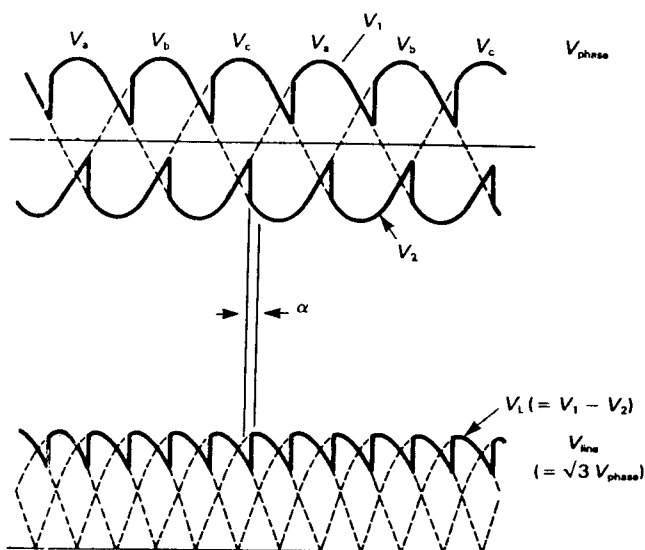
مقادیر R_r و R_i را می‌توان با توجه به مقادیر داده‌ها بدست آورد.

$$R_r = pL\omega/2\pi = 6 \times 2\pi \times 50 \times 10^{-3}/2\pi = 0.3 \, \Omega$$

$$R_i = pL\omega/2\pi = 6 \times 2\pi \times 60 \times 1/25 \times 10^{-3}/2\pi = 0.45 \, \Omega$$

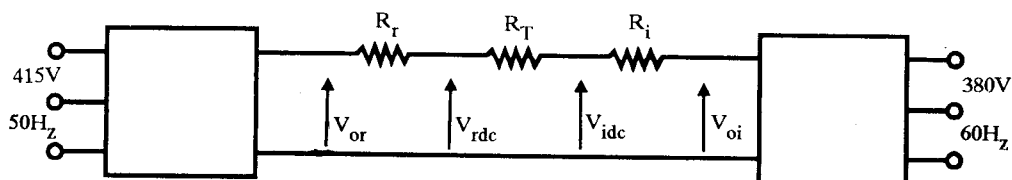


(الف) مبدل پل سه فاز



(ب) ولتاژ بار

شکل ۴۸-۳. مبدل پل سه فاز تمام کنترل شده همراه با شکل موج ولتاژ بار



شکل ۴۹-۳. مدار معادل سیستم مربوط به مثال ۸-۳

در محاسبه مقادیر فوق توجه شود که تعداد پالس $P=6$ است و در محاسبه R_f فرکانس 50 Hz و در محاسبه R_i فرکانس 60 Hz بکار رفته است.
در معکوس کننده مقدار متوسط ولتاژ ورودی را می توان از روی جریان ثابت و توان ثابت عبوری از خط پیدا کرد. یعنی:

$$V_i \text{ dc} = 1500/50 = 300 \text{ V}$$

با استفاده از معادله (۳-۸۲) و مراجعه به شکل ۳-۴۹ مقدار زاویه β بدست می آید،

$$300 = \frac{6}{\pi} 380 \sqrt{2} \sin\left(\frac{180^\circ}{6}\right) \cos\beta + 0/45 \times 50$$

$$300 - (0/45 \times 50) = \frac{6 \times 380 \times \sqrt{2} \times \sin 30^\circ}{\pi} \cos\beta$$

$$277/5 \times \pi = 3 \times 380 \sqrt{2} \cos\beta$$

$$\cos\beta = \frac{277/5 \times \pi}{3 \times 380 \times \sqrt{2}} = 0/5408 \rightarrow \beta = 57/27^\circ$$

حال مقدار متوسط ولتاژ خروجی یکسوکننده را حساب می کنیم.

$$V_f \text{ dc} = V_i \text{ dc} + R_{f1} I_{L1} = 300 + (50 \times 0/2) = 310 \text{ V}$$

با استفاده از معادله (۳-۷۹) و مراجعه به شکل ۳-۴۹ مقدار زاویه α بدست می آید،

$$310 = \frac{6}{\pi} \times 415 \times \sqrt{2} \times \sin\left(\frac{180^\circ}{6}\right) \cos\alpha - (0/3 \times 50)$$

$$\cos\alpha = \frac{325 \times 2\pi}{6 \times 415 \times \sqrt{2}} = 0/5799 \rightarrow \alpha = 54/56^\circ$$

۳-۱۰ رگولاسیون (تنظیم) ولتاژ

از عبارت رگولاسیون یا تنظیم^۱ برای بیان میزان افت ولتاژ وسایل یا تجهیزات در شرایط باردار استفاده می‌گردد و درصد رگولاسیون یا درصد تنظیم ولتاژ بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$(۳-۸۳) \quad \text{ولتاژ بار کامل} - \text{ولتاژ بدون بار} = \text{درصد تنظیم ولتاژ} \times ۱۰۰$$

ولتاژ بار کامل

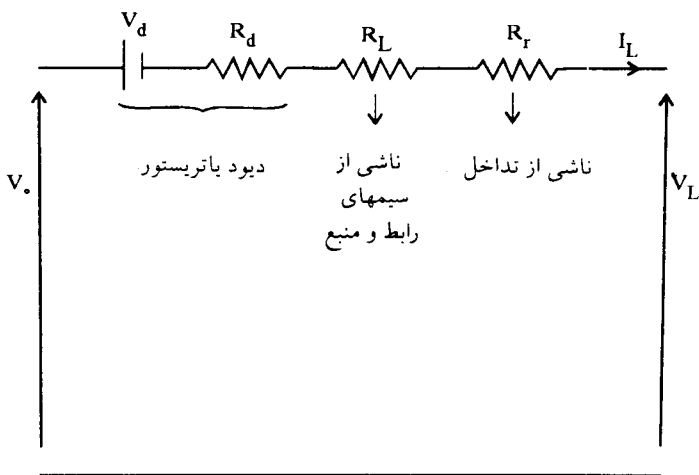
عواملی نظیر افت دو سر وسایل نیمه هادی (دیود یا ترستور)، مقاومت اهمی سیمهای رابط و منبع تغذیه و همچنین اندوکتانس منبع تغذیه سبب می‌شوند که مقدار ولتاژ خروجی مبدل در باردار با مقدار آن در بی‌باری یا مدار باز (ولتاژ خروجی وقتی $I_L = 0$ است) متفاوت گردد. سه افت ولت فوق را می‌توان بوسیله مقاومت‌های R_{L1} , R_{L2} و R_F مطابق شکل ۳-۵۰ نشان داد. ولتاژ بدون بار یا مدار باز برابر V_0 و ولتاژ در بار واقعی برابر V_L است. اگر جریان بار ثابت باشد (مسطح باشد)، آنگاه می‌توان هر افت ولتی را توسط مقاومت اهمی نشان داد. در مورد افت ولت ناشی از اندوکتانس منبع تغذیه L_c که منجر به پدیده تداخل (همپوشانی) می‌گردد،

همانطوریکه قبلاً^۲ در معادله (۳-۷۹) ملاحظه کردیم، ولتاژ بار به اندازه $I_L \left(\frac{PL_{\omega}}{2\pi} \right)$ از مقدار بدون بار آن کاهش می‌یابد (که در آن P تعداد پالس است و قطع نظر از اینکه مبدل کنترل شده هست یا خیر، این افت ولت حاصل می‌شود). بنابراین این افت را می‌توان توسط مقاومت اهمی $R_F = \frac{PL_{\omega}}{2\pi}$

در شکل ۳-۵۰ نشان داد. همانطوریکه قبلاً^۳ دیدیم این افت ولت در مبدلی که در مد معکوس

کنندگی کار می‌کند نیز برابر $I_L \left(\frac{PL_{\omega}}{2\pi} \right)$ است که به کمک مقاومت $R_i = \frac{PL_{\omega}}{2\pi}$ نشان داده می‌شود.

افت ولت دوسر دیود یا ترستور را می‌توان بصورت یک مقاومت ثابت و یا اگر دقیقتر بخواهیم بصورت ترکیب یک ولتاژ ثابت (معرف پتانسیل پیوند) و یک مقاومت اهمی (برای سیلیکون) نشان داد. در مدارهایی که شامل ترکیب دیود و ترستور می‌باشند افت ولت و مقاومت معادلی که به آن نسبت داده می‌شود، به زاویه آتش بستگی دارد و مقدار دقیق آن با در نظر گرفتن زاویه آتش بدست می‌آید. مقاومت اهمی سیم‌های ارتباطی و منبع تغذیه L_c غالباً^۴ ثابت در نظر گرفته می‌شود. اگر از دو فاز تغذیه بطور همزمان جریان عبور نماید (در عملکرد دپل)، مقاومت موثر منبع تغذیه L_c از جمع مقاومت‌های دو فاز بدست می‌آید. این مقاومت با مقاومت اهمی سیمهای ارتباطی جمع شده و به عنوان مقاومت R_L در مدار معادل قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۵۰ مدار معادل مبدل در مد یکسوکندگی با در نظر گرفتن افت ولت وسایل و سیمهای رابط و مقاومت اهمی منبع تغذیه

۳-۱۱ ضریب توان

ضریب توان^۱ باری که از منبع تغذیه ac تغذیه می شود، توسط عبارت کلی زیر بیان می گردد:

$$\text{ضریب توان} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T V_i I_i dt}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{\text{توان متوسط}}{\text{توان ظاهری}} \quad (۳-۸۴)$$

همانطوریکه می دانیم در سیستم ac که جریان و ولتاژ عموماً به شکل سینوسی می باشند و با یکدیگر اختلاف فاز ϕ دارند، مقدار انتگرال فوق برابر $V_{rms} I_{rms} \cos \phi$ خواهد شد. یعنی اینکه در این حالت ضریب توان برابر کسینوس زاویه بین جریان و ولتاژ خواهد بود. لیکن همانطوریکه در این فصل ملاحظه کردیم، یکسوکندها از منبع تغذیه متصل به آنها، جریان های غیر سینوسی دریافت می نمایند که علاوه بر مولفه اصلی در فرکانس تغذیه، دارای مولفه های هارمونیک می باشند. طبق معادله (۳-۸۵) مولفه های هارمونیک موجود در جریان سبب می شوند که مقدار rms جریان غیر سینوسی (I_{rms}) از مقدار rms مولفه اصلی (I_{rms})

بیشتر گردد. در نتیجه حتی با فرض سینوسی بودن ولتاژ تغذیه (که در این صورت مقدار موثر آن با مقدار موثر مولفه اصلی برابر خواهد بود یعنی $V_{rms} = V_{rms}$)، با توجه به معادله (۳-۸۴) ضریب توان حاصل از مقدار کسینوس زاویه بین ولتاژ و جریان (زاویه جابجایی)^(۱) کمتر خواهد بود. بنابراین در این حالت نمی توان ضریب توان را به صورت کسینوس زاویه جابجایی تعریف کرد.

$$I_{rms} = \sqrt{I_{rms}^2 + I_{rms}^2 + I_{rms}^2 + \dots} \quad (3-85)$$

معمولاً می توان فرض کرد که ولتاژ تغذیه ac شکل موج سینوسی خود را حفظ می نماید و در نتیجه توانی به مولفه های هارمونیک نسبت داده نمی شود بلکه توان به مولفه اصلی در فرکانس تغذیه تعلق می گیرد. (اگر باانتگرال گیری توان متوسط برای ولتاژ سینوسی و جریان اصلی و هارمونی های مختلف حساب شود، فقط مولفه مربوط به فرکانس اصلی مقدار خواهد داشت بقیه جملات صفر می شوند) بنابراین،

$$\text{توان} = V_{rms} I_{rms} \cos \phi_1 \quad (3-86)$$

که در آن اندیس ۱ بر مولفه اصلی دلالت دارد و ϕ_1 زاویه بین ولتاژ و مولفه اصلی جریان است. با قراردادن معادله (۳-۸۶) در معادله (۳-۸۴) خواهیم داشت.

$$\text{ضریب توان} = \frac{V_{rms} I_{rms} \cos \phi_1}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{I_{rms}}{I_{rms}} \cos \phi_1 = \mu \cos \phi_1 \quad (3-87)$$

چون ولتاژ تغذیه سینوسی فرض شده است در این معادله بجای V_{rms} در مخرج کسر، V_{rms} که با آن برابر است قرار داده ایم. در رابطه فوق:

$$\mu = \frac{I_{rms}}{I_{rms}} \quad \text{ضریب اعوجاج جریان} \quad (3-88)$$

$$\cos \phi_1 = \text{ضریب جابجایی} \quad (3-89)$$

در مدارهای تمام کنترل شده که دارای جریان بار پیوسته و ثابت هستند، در صورت صرف نظر کردن از تداخل ϕ_1 برابر زاویه تأخیر آتش α است. وقتی جریان تغذیه دارای هارمونیک

است، حتی در مدارهای دیودی که در آنها مولفه اصلی ولتاژ و جریان همفاز است و در نتیجه $\cos\phi_1 = 1$ می باشد، ضریب توان بدست آمده از معادله (۳-۸۷) کوچکتر از واحد است زیرا در این حالت نسبت $\mu = \frac{I_{rms}}{I_{rms}}$ کوچکتر از واحد می باشد. بنابراین مبدل توان راکتیو مصرف می نماید که بایستی بوسیله منبع تغذیه ac فراهم گردد. در مورد مبدل های بزرگ، این توان بوسیله منبع تولیدکننده توان راکتیو، که می تواند یک کندانسور سنکرون^۱ یا جبران کننده های استاتیکی^۲ مدرن باشد، فراهم می گردد. برای کسب اطلاعات بیشتر در این زمینه به مرجع [۴] مراجعه گردد.

مثال ۳-۹

در یک پل تکفاز تمام کنترل شده و نیمه کنترل شده، ضریب توان را در زاویه های آتش 30° و 60° محاسبه کنید. از تداخل و افت ولت وسایل نیمه هادی صرف نظر نموده جریان بار را ثابت فرض کنید.

حل - با مراجعه به مدار پل تکفاز تمام کنترل شده و شکل ۳-۵۱ با توجه به اینکه جریان بار ثابت است، مقدار موثر جریان تغذیه برابر است با:

$$I_{rms} = \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_L^2 d\theta \right]^{\frac{1}{2}} = I_L$$

مقدار متوسط ولتاژ خروجی در پل تکفاز تمام کنترل شده طبق معادله (۳-۴۴) برابر است با

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \cos\alpha = \frac{2\sqrt{2}V_{rms}}{\pi} \cos\alpha$$

بنابراین توان بار برابر است با $P_L = V_{dc} \cdot I_L$ در نتیجه ضریب توان محاسبه می شود،

$$\text{ضریب توان} = \frac{V_{dc} I_L}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{V_{dc} I_L}{V_{rms} I_L} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos\alpha$$

چون جریان بار ثابت و از تداخل صرف نظر شده است،

$$\mu = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0.9003 \text{ و } \cos\phi_1 = \cos\alpha$$

که مستقل از زاویه آتش می باشد.
الف) برای $\alpha = 30^\circ$

$$\text{ضریب توان} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos 30^\circ = 0.7797$$

ب) برای $\alpha = 60^\circ$

$$\text{ضریب توان} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos 60^\circ = 0.4502$$

با مراجعه به مدار پل تکفاز نیمه کنترل شده و شکل (۳-۵۱) مقدار موثر جریان منبع تغذیه از رابطه زیر بدست می آید.

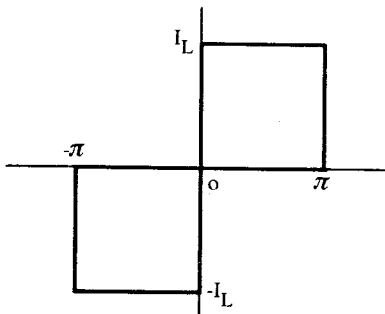
$$I_{rms} = \left[\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_L^2 d\theta \right]^{\frac{1}{2}} = I_L \left[\frac{(\pi - \alpha)}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}}$$

مقدار متوسط ولتاژ خروجی طبق معادله (۳-۴۶) برابر است با

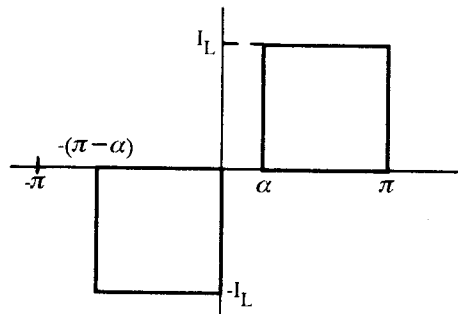
$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} V_m (1 + \cos \alpha) = \frac{\sqrt{2} V_{rms}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

بنابراین مقدار متوسط توان خروجی برابر است با $P_L = V_{dc} \cdot I_L$ و با توجه به معادله (۳-۸۴) ضریب توان برابر است با

$$\text{ضریب توان} = \frac{V_{dc} \cdot I_L}{V_{rms} \cdot I_{rms}} = \frac{\frac{\sqrt{2} V_{rms}}{\pi} (1 + \cos \alpha) I_L}{V_{rms} I_L \left[\frac{(\pi - \alpha)}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \alpha) \left(\frac{\pi}{\pi - \alpha} \right)^{\frac{1}{2}}$$



(ب) شکل موج جریان تغذیه در پل تکفاز تمام کنترل شده



(الف) شکل موج جریان تغذیه در پل تکفاز نیمه کنترل شده

شکل ۳-۵۱ شکل موج جریان تغذیه در پل تکفاز

با استفاده از بسط فوریه دامنه مولفه اصلی جریان به شرح زیر بدست می‌آید (به شکل ۵۱-۳ الف) مراجعه شود.

$$b_1 = \frac{I_L}{\pi} \int_{-(\pi-\alpha)}^0 -\sin \omega t d(\omega t) + \int_{\alpha}^{\pi} \sin \omega t d(\omega t) = 2I_L (1 + \cos \alpha) / \pi$$

$$a_1 = \frac{I_L}{\pi} \int_{-(\pi-\alpha)}^0 -\cos \omega t d(\omega t) + \int_{\alpha}^{\pi} \cos \omega t d(\omega t) = 2I_L (\sin \alpha) / \pi$$

$$\text{دامنه مولفه اصلی} = (a_1^2 + b_1^2)^{\frac{1}{2}} = 2\sqrt{2} I_L (1 + \cos \alpha)^{\frac{1}{2}} / \pi$$

$$\text{و در نتیجه مقدار rms مولفه اصلی} = 2I_L (1 + \cos \alpha)^{\frac{1}{2}} / \pi$$

$$\mu = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{\pi - \alpha} \right)^{\frac{1}{2}} (1 + \cos \alpha)^{\frac{1}{2}} \quad \text{بنابراین}$$

$$\tan \phi_1 = \frac{a_1}{b_1} = -\frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} \quad \text{و} \quad \cos \phi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} \quad \text{و}$$

$$\cos \phi_1 = (1 + \cos \alpha)^{\frac{1}{2}} / \sqrt{2}$$

$$\text{ضریب توان} = 0.9201$$

$$\mu = 0.9226$$

$$\cos \phi_1 = 0.9659$$

$$\text{ضریب توان} = 0.7397$$

$$\mu = 0.8541$$

$$\cos \phi_1 = 0.866$$

$$\alpha = 30^\circ \text{ (الف)}$$

$$\alpha = 60^\circ \text{ (ب)}$$

۱۲-۳ مقادیر نامی ترانسفورماتور

همانطوریکه در این فصل ملاحظه کردیم برای مبدل‌های مختلف، استفاده از ترانسفورماتور با آرایش سیم پیچی مخصوص، اجتناب ناپذیر است. وقتی اینگونه ترانسفورماتورها مورد استفاده قرار می‌گیرند بایستی مقادیر نامی آنها در شرایط کاری معین،

مشخص گردد. این مقادیر نامی در موارد متعددی برای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور یکسان نخواهد بود. از این جهت با عملکرد ترانسفورماتور معمولی که در آن مقادیر نامی هر دو سیم پیچ یکسان است، متفاوت می باشد. ولت آمپر نامی هر سیم پیچی بطور مجزا از حاصل ضرب مقدار rms جریان عبوری از آن و مقدار rms ولتاژ دو سر آن بدست می آید.

مثال ۳-۱۰

یک یکسوکنده سه فاز نیم موج کنترل نشده، جریان $25A$ را در ولتاژ $240V$ به بار تحویل می دهد. یکسوکنده از ثانویه ترانسفورماتور با اتصال ستاره بهم پیوسته (زیگزاگ) تغذیه می شود. اولیه این ترانسفورماتور به منبع تغذیه سه فاز $600V$ (ولتاژ خط) متصل شده است. ولت آمپر سیم پیچی اولیه و ثانویه ترانسفورماتور را محاسبه کنید:

حل - با استفاده از معادله (۳-۳۴) داریم

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi}$$

$$240 = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \rightarrow V_m = \frac{240 \times 2\pi}{3\sqrt{3}} = 290.2 V$$

بنابراین مقدار rms ولتاژ ثانویه برابر است با

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{290.2}{\sqrt{2}} = 205.2 V$$

همانطوریکه می دانیم در اتصال ستاره بهم پیوسته (زیگزاگ) مقدار موثر ولتاژ تولید شده در هر سیم پیچ ثانویه، از جمع برداری ولتاژهای هر قسمت سیم پیچی (که با هم مساوی و اختلاف فاز 60° دارند) بدست می آید. بنابراین اگر مقدار موثر ولتاژ در هر قسمت از سیم پیچی ثانویه را با $V_{w rms}$ نمایش دهیم، رابطه زیر بین این ولتاژ و ولتاژ هر سیم پیچی برقرار است.

$$V_{rms} = \sqrt{3} V_{w rms}$$

$$V_{w rms} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{3}} = \frac{205.2}{\sqrt{3}} = 118.4 V \quad \text{یا}$$

با توجه به اینکه از هر یک سیم پیچهای ثانویه در $\frac{1}{3}$ سیکل جریان عبور می کند بنابراین

مقدار موثر جریان ثانویه برابر است با

$$I_{rms} = \frac{25}{\sqrt{3}} = 14.43 A$$

ولتاژ اولیه ترانسفورماتور را می‌توان از ولتاژ تغذیه (ولتاژ خط) بدست آورد،

$$V_{rms} = \frac{600}{\sqrt{3}} = 346/4 \text{ V}$$

نسبت دور سیم پیچی اولیه به ثانویه برابر است با

$$N = 346/4 / 118/4 = 2/926$$

بنابراین جریانی که از اولیه می‌گذرد برابر است با

$$I_1 = 25 / 2/926 = 8/54 \text{ A}$$

این جریان در $\frac{2}{3}$ سیکل عبور می‌کند و با توجه به شکل موج جریان در اولیه (شکل ۳-۱۰)، مقدار موثر آن بدست می‌آید، یعنی

$$I_{rms} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} I_L^2 d\theta \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_L$$

$$I_{rms} = \left(\frac{I_L^2 + I_L^2 + 0^2}{3} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_L = \frac{\sqrt{2} \times 8/54}{\sqrt{3}} = 6/97$$

بنابراین مقدار نامی اولیه و ثانویه محاسبه می‌شوند، یعنی

$$\text{ولت آمپر نامی اولیه} = 3 \times 6/97 \times 346/4 = 7/24 \text{ kVA}$$

$$\text{ولت آمپر نامی ثانویه} = 6 \times 14/43 \times 118/4 = 10/25 \text{ kVA}$$

۳-۱۳ مبدل با جریان بار ناپیوسته

اگر بار مبدل به قدر کفایت اندوکیتو نباشد، جریان بار در مقدار ثابت و پیوسته باقی

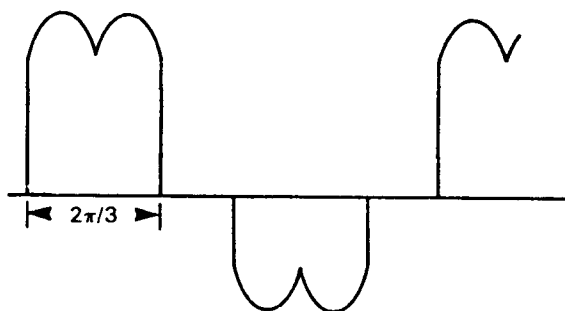
نمی‌ماند، بلکه دارای مولفه هارمونیک می‌گردد و در جریان تغذیه انعکاس می‌یابد، همانطوری‌که در شکل ۳-۵۲ الف و ب نشان داده شده است. در شرایط بار کم، این جریان کاملاً ناپیوسته می‌شود آنچنان‌که در شکل ۳-۵۲ پ نشان داده شده است. تجزیه تحلیل رفتار مبدل و بار در این شرایط به مراتب پیچیده‌تر است و لازم است مقدار هر مولفه بطور مجزا در نظر گرفته شود.

همچنین وقتی در خروجی یکسو کننده از خازن صافی استفاده می‌شود منجر به ناپیوسته شدن جریان تغذیه می‌گردد. (به شکل ۳-۵۳ مراجعه شود). در این حالت وقتی که ولتاژ آند از ولتاژ خازن بیشتر شود، دیودها شروع به هدایت می‌کنند و وقتی که ولتاژ آند از ولتاژ خازن کمتر شود، دیودها از هدایت باز می‌ایستند.

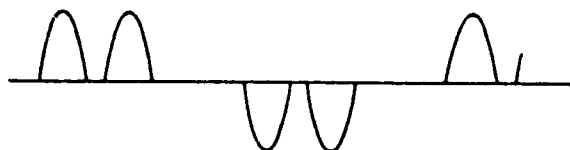


مرجع جریان 0

(الف) جریان dc در پل ۶ پالسی

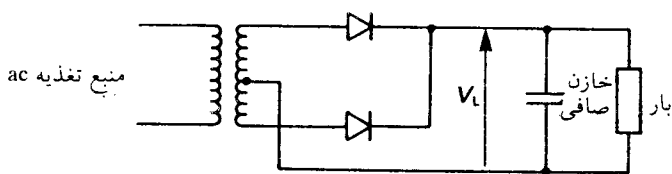


(ب) جریان فاز در پل ۶ پالسی

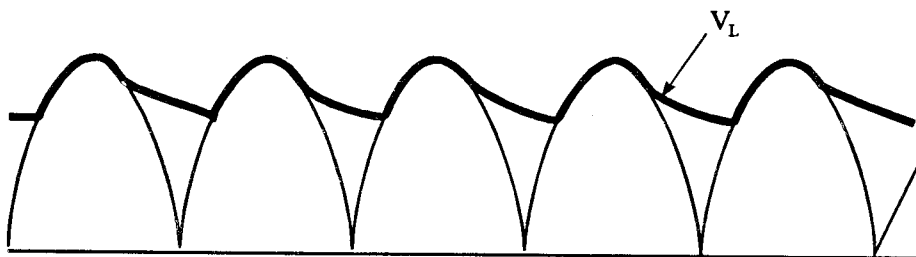


(پ) جریان فاز (متفصل) در پل ۶ پالسی

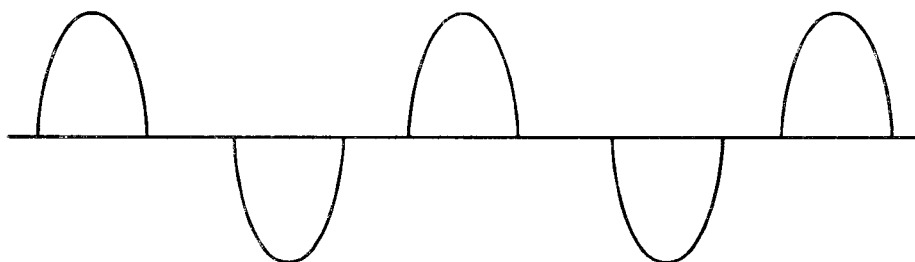
شکل ۳-۵۲ شکل موج جریان در پل شش پالسی که دارای بار با اندوکتانس کم می‌باشد.



(الف) مدار



(ب) شکل موج همراه با خازن صافی



(پ) شکل موج جریان تغذیه

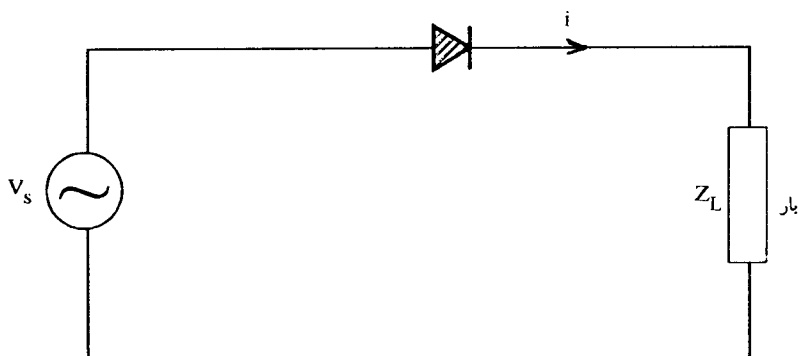
شکل ۳-۵۳ عملکرد یکسوکننده همراه با خازن صافی

۱۴-۳ مسایل حل شده

مساله ۳-۱

مدار نشان داده شده در شکل ۳-۵۴ از منبع ac ، $240V$ ، $50Hz$ تغذیه می‌شود. اگر مقاومت بار 10Ω و اندوکتانس آن $1H$ باشد و تریستور در زاویه 90° آتش شود، مقدار متوسط ولتاژ بار و جریان بار را تعیین کنید. از افت ولت تریستور صرف‌نظر نمایید.

حل- با توجه به اینکه تریستور در زاویه 90° آتش می‌شود، ولتاژ اعمال شده برابر $V_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{4})$ می‌باشد.



شکل ۳-۵۴

جریان دارای دو مولفه ac و dc است که به شرح زیر محاسبه می‌شوند،

$$i_{ac} = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \phi)$$

$$i_{ac} = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{L\omega}{R})$$

$$i_{ac} = \frac{240\sqrt{2}}{\sqrt{10^2 + (2\pi 50 \times 0.1)^2}} \sin(2\pi 50 t + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{3/14}{10})$$

$$i_{ac} = 10/29 \sin(2\pi 50 t + 1/571 - 1/262)$$

$$i_{ac} = 10/29 \sin(2\pi 50 t + 0/309)$$

مقدار این مولفه در $t=0$ برابر $3/12$ است و با توجه به اینکه ثابت زمانی $T = L/R = \frac{1}{100}$ است.

مولفه dc برابر است با

$$i_{dc} = -3/12 e^{-100t}$$

و جریان مدار برابر است با

$$i = i_{dc} + i_{ac}$$

$$i = 10/29 \sin(2\pi 50 t + 0/309) - 3/12 e^{-100t} \text{ A}$$

جریان در لحظه $S = 0.0086$ صفر می شود که با $i = 0$ از رابطه بالا بدست می آید. که این زمان معادل 155° خواهد بود بنابراین می توان مقدار متوسط ولتاژ را حساب کرد یعنی

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{1}{2\pi} \int_{90^\circ}^{90^\circ + 155^\circ} 240\sqrt{2} \sin \theta d\theta = 22/8V$$

$$I_{\text{متوسط}} = \frac{22/8}{10} = 2/28 A$$

مسأله ۲-۳

مدار یکسو کننده تک فاز نیم موج همراه با دیود کموتاسیون مطابق شکل ۳-۲۱ یک بار کاملاً اندوکیتو ۱۵ آمپری را از یک منبع تغذیه $240V, ac$ تغذیه می نماید. مقدار متوسط ولتاژ بار را در زاویه های آتش $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ و 180° محاسبه نمایید. از افت ولت دیود و تریستور صرف نظر کنید. مقادیر نامی تریستور و دیود را بدست آورید.

حل - با توجه به معادله (۳-۴۱) داریم

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{240\sqrt{2}}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

که به ازاء مقادیر زاویه های آتش فوق، مقادیر متوسط ولتاژ بدست می آید یعنی،

α	0°	45°	90°	135°	180°
$V_{\text{متوسط}}$	$108V$	$92V$	$54V$	$16V$	$0V$

مقادیر نامی تریستور:

- ماکزیمم ولتاژ مستقیم (یا معکوس) تریستور

$$P.F.V = P.R.V = V_m = 240\sqrt{2} = 340V$$

- جریان (rms) مجاز تریستور

تریستور در زاویه آتش $\alpha = 0^\circ$ حداکثر فاصله زمانی یک نیم سیکل را هدایت می کند. چون بار

کاملاً اندوکتیو است جریان را مسطح فرض می‌کنیم و مقدار rms جریان از رابطه زیر بدست می‌آید یعنی

$$I_{rms} = \left(\frac{15^2 + 0^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} = 10/6 \text{ A}$$

مقادیر نامی دیود:

$$P.R.V = V_m = 340 \text{ V}$$

- ماکزیمم ولتاژ معکوس دیود

- جریان مجاز دیود

وقتی زاویه تأخیر آتش به 180° می‌رسد، دیود تقریباً در تمام سیکل هدایت می‌کند و بنابراین مقدار نامی جریان ۱۵A خواهد بود.

مسأله ۳-۳

یک بار کاملاً اندوکتیو از طریق یک پل تمام کنترل شده و نیمه کنترل شده از یک منبع تغذیه تک فاز 50 Hz و 240 V تغذیه می‌شود. مقدار متوسط ولتاژ بار حاصل در زاویه‌های آتش 30° و 90° را (در دو پل) با هم مقایسه کنید. از افت ولت وسایل نیمه هادی صرف‌نظر کنید.

حل - در پل تک فاز تمام کنترل شده در زاویه 30° مقدار متوسط ولتاژ برابر است با

$$V_{\text{متوسط}} \text{ در } 30^\circ = \frac{2 \times 240 \times \sqrt{2}}{\pi} \cos 30^\circ = 187/1 \text{ V}$$

مقدار متوسط ولتاژ بار در زاویه 90° برابر است با

$$V_{\text{متوسط}} \text{ در } 90^\circ = \frac{2 \times 240 \times \sqrt{2}}{\pi} \cos 90^\circ = 0 \text{ V}$$

در پل تک فاز نیمه کنترل شده داریم

$$V_{\text{متوسط}} \text{ در } 30^\circ = \frac{240 \sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos 30^\circ) = 201/6 \text{ V}$$

$$V_{\text{متوسط}} \text{ در } 90^\circ = \frac{240 \sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos 90^\circ) = 108 \text{ V}$$

تفاوت موجود در مقادیر متوسط ولتاژ بار در پل تمام کنترل شده و نیمه کنترل شده بواسطه نقش دیود کموتاسیون در ممانعت از معکوس شدن ولتاژ بار است.

مسأله ۳-۴

مدار یکسوکنده قابل کنترل تمام موج شکل ۳-۲۲ از طریق ترانسفورماتور از یک منبع ۵۰Hz تغذیه می شود طوری که

$$V_{1rms} = V_{2rms} = 220V$$

با صرف نظر کردن افت ولت تریستورها، مقدار متوسط جریان را در زاویه آتش 30° و 60° بدست آورید در صورتیکه بار اهمی خالص 15Ω باشد. مقدار پیک و rms جریان تریستور در هریک از حالات فوق چقدر است. اگر چنانچه یک اندوکتانس $18mH$ بطور سری با بار اهمی قرار گیرد در چه زاویه آتشی جریان بار متصل خواهد بود. حل - جریان از رابطه زیر بدست می آید.

$$i = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \phi) \quad \text{در } \alpha = 30^\circ$$

چون بار اهمی خالص است بنابراین $\phi = 0$ است و زاویه هدایت $(180 - 30)^\circ$ است. بنابراین

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{150^\circ} \frac{V_m}{R} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \frac{220\sqrt{2}}{15} [\cos \omega t]_0^{150^\circ}$$

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{220\sqrt{2}}{15} \times 1/866 = 6/16 \text{ A}$$

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{220\sqrt{2}}{15} = 20/\sqrt{4} \text{ A}$$

$$I_{rms} = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{150^\circ} \frac{V_m^2}{R^2} \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = 10/22 \text{ A}$$

در $\alpha = 60^\circ$ زاویه هدایت $(180 - 60)^\circ$ است بنابراین

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{120^\circ} \frac{V_m}{R} \sin \omega t d(\omega t) = 4/95 \text{ A}$$

$$I_m = 20/\sqrt{4} \text{ A}$$

$$I_{rms} = 10/0.7 \text{ A}$$

برای برقراری شرایط جریان بار پیوسته لازم است رابطه زیر برقرار باشد یعنی:

$$\alpha = \phi \quad \alpha = \tan^{-1} \frac{L\omega}{R}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{18 \times 10^{-3} \times 2\pi 50}{15} = 39^\circ \text{ و } 20^\circ$$

مسئله ۳-۵

مدار تک فاز نیم موج شکل ۳-۲۱ از منبع تغذیه $20V_{ac}$ یک بار با ولتاژ کم را تغذیه می‌نماید. با فرض پیوسته بودن جریان بار، مقدار متوسط ولتاژ بار را در زاویه آتش 60° حساب کنید. افت ولت دو سر ترستور را $1/5V$ و دو سر دیود را $0/7V$ فرض کنید.

حل - با توجه به معادله (۳-۴۱) داریم

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{20\sqrt{2}}{2\pi} (1 + \cos 60^\circ) = 6/752V$$

ترستور در فاصله $(60^\circ - 180^\circ)$ هدایت می‌کند و در نتیجه در یک سیکل افت ولت میانگین $0/5V = 1/5 \times \frac{120}{360}$ را ایجاد می‌کند. دیود وقتی هدایت می‌کند افت ولت $0/7V$ را بر بار تحمیل می‌کند. مقدار میانگین آن در یک سیکل برابر $0/467V = 0/7 \times \frac{180+60}{360}$ است. بنابراین مقدار متوسط ولتاژ بار برابر است با

$$6/752 - 0/5 - 0/467 = 5/787$$

بنابراین ملاحظه می‌شود که در ولتاژ پائین افت ولت‌ها قابل اغماض نخواهد بود.

مسئله ۳-۶

یک مبدل سه فاز نیم موج باری را با جریان پیوسته $40A$ طی زاویه آتش 0° تا 75° تغذیه می‌کند. تلفات توان بار در این زاویه‌های آتش مرزی چه مقدار خواهد بود. ولتاژ تغذیه (ولتاژ خط) $415V$ می‌باشد.

حل - با توجه به معادله (۳-۴۸) برای $\alpha = 0^\circ$ داریم،

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha$$

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \frac{415}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cos 0^\circ = 280/22 \text{ V}$$

$$\text{تلفات توان} = 280/22 \times 40 = 11200 \text{ W} = 11/2 \text{ kW}$$

در زاویه $\alpha = 75^\circ$ داریم

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \frac{415}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cos 75^\circ = 72/52 \text{ V}$$

$$\text{تلفات توان} = 72/52 \times 40 = 2901 \text{ W} = 2/9 \text{ kW}$$

مسأله ۷-۳

یک مبدل پل سه فاز تمام کنترل شده مطابق شکل ۳-۱۰ از یک ترانسفورماتور با اتصال ستاره بهم پیوسته (اتصال زیگزاگ) تغذیه می‌شود و بار کاملاً اندوکتیو دارای مقاومت اهمی 8Ω را تغذیه می‌نماید. ترانسفورماتور از ولتاژ فاز اولیه 660 V ، ولتاژ فاز ثانویه 240 V را فراهم می‌کند. مقادیر نامی ترانسفورماتور را محاسبه کنید. از تداخل و افت ولت تریستور صرف‌نظر کنید.

حل - با توجه به معادله (۳-۳۴) داریم،

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} 240\sqrt{2} = 561/38 \text{ V}$$

$$I_L = \frac{561/38}{8} = 70/1725 \text{ A}$$

ولتاژ هر فاز در ثانویه از جمع فازوری دو ولتاژ مساوی دو قسمت سیم‌پیچی که 60° اختلاف فاز دارند بدست می‌آید،

بنابراین ولتاژ rms هر قسمت سیم‌پیچی برابر است با

$$V_{rms} = \frac{240}{2 \cos 30^\circ} = 138/56 \text{ V}$$

چون هر سیم پیچی ثانویه جریان $35/08 \text{ A}$ را در یک سوم سیکل از خود عبور می‌دهد بنابراین

$$I_{rms} = \frac{70/1725}{\sqrt{3}} = 40/50 \text{ A}$$

بنابراین مقدار نامی ثانویه بدست می‌آید یعنی

$$\text{نامی ثانویه} = 6 \times 138/25 \times 40/50 \times 10^{-3} = 33/68 \text{ kVA}$$

جریان ۷۰/۱۷۲۵ با توجه به نسبت تبدیل ترانسفورماتور، وقتی به اولیه انتقال یابد برابر خواهد شد با

$$70/1725(138/56 / 660) = 14/73 \text{ A}$$

با توجه به شکل موج جریان در شکل ۳-۲۱ جریان rms در سیم پیچی اولیه برابر است با

$$I_{\text{rms}} = \left(\frac{14/73^2 + 14/73^2 + 0^2}{3} \right)^{\frac{1}{2}} = 12/03 \text{ A}$$

بنابراین مقدار نامی اولیه بدست می‌آید یعنی

$$\text{نامی اولیه} = 3 \times 660 \times 12/03 \times 10^{-3} = 23/8 \text{ kW}$$

مسئله ۳-۸

یک مبدل پل سه فاز تمام کنترل شده، از یک منبع تغذیه سه فاز ۵۰ Hz و ۶۶۰ V (ولتاژ خطی)، یک بار dc، ۶۰ A و ۴۰۰ V را تغذیه می‌کند. اگر ترستورها دارای افت ولت مستقیم ۱/۲۷ باشند و از تداخل صرفنظر گردد مطلوبست محاسبه:

(الف) زاویه آتش ترستورها

(ب) جریان rms ترستورها

(پ) مقدار متوسط تلفات ترستورها

(ت) اگر منبع تغذیه در هر فاز دارای اندوکتانس ۳/۶ mH باشد مقدار جدید زاویه آتش چقدر خواهد بود تا اینکه پاسخگوی بار مورد نظر باشد.

حل - (الف) با توجه به معادله (۳-۵۲) و در نظر گرفتن افت ولت ترستورها داریم،

$$V_{\text{dc}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \alpha - 2 \times 1/2$$

$$400 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{660}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cos \alpha - 2/4 \quad \alpha = 63^\circ \text{ و } 10^\circ$$

(ب) چون هر تریستور جریان بار را در فاصله $\frac{2\pi}{3}$ هدایت می‌کند، مقدار rms آن بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$I_{rms} = \left(\frac{60^2 + 0^2 + 0^2}{3} \right)^{\frac{1}{2}} = 34.64 \text{ A}$$

(پ) چون تریستور در فاصله $\frac{2\pi}{3}$ جریان 60 A را حمل می‌کند مقدار متوسط تلفات در سیکل بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$P = (1/2 \times 60) / 3 = 24 \text{ W}$$

(ت) با توجه به معادله $(80-3)$ در مورد مبدل فوق داریم.

$$V_{dc} = V_o - \frac{3L\omega}{\pi} I_L$$

$$V_o = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos\alpha - 2 \times 1/2$$

بنابراین

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos\alpha - 2 \times 1/2 - \frac{3L\omega}{\pi} I_L$$

باقرار دادن مقادیر معلوم در معادله فوق داریم،

$$400 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{660}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cos\alpha - 2/4 - \frac{3 \times 2\pi 50 \times 3/6 \times 10^{-2}}{\pi} \times 60$$

$$467/2 = 891/3 \cos\alpha \rightarrow \cos\alpha = 0.5241 \rightarrow \alpha = 58^\circ \text{ و } 23^\circ$$

مسئله ۹-۳

یک بار dc با حداکثر مقدار نامی 500 A و 100 kV توسط یک مبدل پل ۱۲ پالسی که مطابق شکل ۳-۲۰ از دو مبدل پل تشکیل شده است، تغذیه می‌شود. با صرفنظر کردن از تداخل و افت ولت‌ها، مقادیر نامی تریستور (یادیود) و ترانسفورماتور و ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور را برای (الف) اتصال سری پل‌ها (ب) اتصال موازی پل‌ها، حساب کنید.
حل - (الف) اتصال سری در شکل ۳-۲۰ ب نشان داده شده است.

$$V = 100 \text{ kV} / 2 = 50 \text{ kV}$$

چون هر پل دارای مشخصه شش پالسی است، بنابراین با توجه به معادله (۳-۴۰)، ماگزیم ولتاژ بدست می آید یعنی

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$

$$50 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$

$$V_m = 30/23 \text{ kV} \quad \text{یا} \quad V_m = 52/36 \text{ kV} \text{ (ولتاژ خطی)}$$

هر دیود یا ترستور در یک سوم سیکل جریان بار را حمل می کند بنابراین مقدار موثر جریان برابر است با

$$I_{rms} = 500/\sqrt{3} = 288/67 \text{ A}$$

بنابراین مقادیر نامی ترستور (یادیود) برابر است با:

$$P.R.V = 52/36 \text{ kV} \text{ و } I_{rms} = 288/67 \text{ A}$$

$$\text{ولتاژ rms سیم پیچ ستاره ثانویه} = 52/36 / (\sqrt{3} \times \sqrt{2}) = 21/37 \text{ kV}$$

$$\text{ولتاژ rms سیم پیچ مثلث ثانویه} = 52/36 / \sqrt{2} = 37/02 \text{ kV}$$

$$18/5 \text{ MW} = 3 \times 21/37 \times 288/6 \times 10^{-3}$$

(ب) اتصال موازی در شکل ۳-۲۰ پ نشان داده شده است. در مقایسه با مدار سری ولتاژها دو برابر و جریانهها نصف می شود بنابراین

$$V_m = 2 \times 30/23 = 60/46 \text{ kV} \quad \text{یا} \quad V_m = 104/72 \text{ kV} \text{ (ولتاژ خطی)}$$

$$I_{rms} = \frac{288/67}{2} = 144/335 \text{ A}$$

بنابراین مقادیر نامی ترستور (یا دیود) عبارتند از،

$$P.R.V = 104/72 \text{ kV} \text{ و } I_{rms} = 144/335 \text{ A}$$

$$\text{ولتاژ rms سیم پیچ ستاره ثانویه} = 21/37 \times 2 = 42/74 \text{ kV}$$

$$\text{ولتاژ rms سیم پیچ مثلث ثانویه} = 37/02 \times 2 = 74/04 \text{ kV}$$

$$\text{نامی ترانسفورماتور} = 3 \times 42/74 \times 144/335 \times 10^{-3} = 18/5 \text{ MW}$$

مسأله ۱۰-۳

یک مبدل پل سه فاز تمام کنترل شده به منبع تغذیه سه فاز 50 Hz و 415 V (ولتاژ خطی) متصل شده است و در حالت معکوس کنندگی در زاویه پیشرو 30° کار می‌کند. اگر منبع تغذیه دارای مقاومت اهمی 0.04Ω و اندوکتانس 1 mH در فاز باشد و جریان dc به مقدار ثابت 52 A باشد مطلوبست محاسبه ولتاژ منبع dc ، زاویه تداخل و زاویه بازبایی. ترستورها دارای افت ولت مستقیم $1/8\text{ V}$ می‌باشند.

حل - با توجه به معادله (۳-۸۲) و در نظر گرفتن افت ولت ترستورها و افت ولت امپدانس منبع داریم

$$V_{\text{dc}} = V_o + \frac{3L\omega}{\pi} I_L + RI_L$$

$$V_o = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos\beta + 2V_T$$

$$V_o = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \times \frac{415}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \cos 30^\circ + 2 \times 1/8 = 488/96 \text{ V}$$

$$V_{\text{dc}} = 488/96 + \frac{3 \times 1 \times 10^{-3} \times 2\pi 50}{\pi} \times 52 + 0.04 \times 52$$

$$V_{\text{dc}} = 488/96 + 15/60 + 2/08 = 506/64 \text{ V}$$

با استفاده از معادله (۳-۸۴) در زاویه آتش $\alpha = 180^\circ - 30^\circ = 150^\circ$ داریم

$$2\pi 50 \times 1 \times 10^{-3} \times 52 = 415\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{6} [\cos 150^\circ - \cos(150^\circ + \gamma)]$$

$$\gamma = 7^\circ \text{ و } 10^\circ$$

با توجه به معادله (۳-۷۳) زاویه بازبافت δ بدست می‌آید:

$$\delta = \beta - \gamma = 30^\circ - 7^\circ = 23^\circ$$

مسأله ۱۱-۳

برای سیستم مسأله ۳-۱۰، و در زاویه آتش پیشرو $22/5^\circ$ و زاویه بازیافت 5° ، مقدار ماکزیمم جریان dc چه مقدار خواهد بود.

حل - با توجه به معادله (۳-۷۳) و معلوم بودن زاویه β و δ مقدار زاویه تداخل بدست می آید یعنی

$$\gamma = \beta - \delta = 22/5 - 5 = 17/5^\circ$$

با استفاده از معادله (۳-۸۴) در زاویه آتش $157/5^\circ$ $\alpha = 180 - 22/5 = 157/5^\circ$ مقدار جریان dc بدست می آید:

$$2\pi 50 \times 1 \times 10^{-2} I_L = 415\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{6} [\cos 157/5 - \cos(157/5 + 17/5)]$$

$$I_L = 67/53 \text{ A}$$