فصل ۳

مدارهای یکسو کننده

۳-۱ مقدمه

دیودها و تریستورها در مدارهای الکتریکی والکترونیکی کاربردهای فراوانی دارند. همچنین این وسایل نیمه‌هادی بطور وسیع در مدارهای الکترونیک قدرت به منظور تبدیل توان الکتریکی از ac به dc مورد استفاده قرار می‌گیرند. مبدل ac - dc معمولاً به یکسو کننده[1] موسوم است و یکسو کننده‌های دیودی خروجی dc ثابت را فراهم می‌نمایند. به منظور بدست آوردن ولتاژ خروجی قابل کنترل، درمدارهای یکسو کننده بجای دیود از تریستور استفاده می‌شود. به این نوع مبدل قابل کنترل نیز مبدل ac-dc گفته می‌شود. در این فصل به بررسی این نوع مبدل پرداخته و بررسی سایر مبدلها را به فصول بعدی موکول می‌نمائیم.

۳-۲ انواع مدارهای یکسوکننده

مدار یکسو کننده[2] مداری است که یک منبع تغذیه ac را به یک بار dc متصل می‌کند، به عبارت دیگر ولتاژ متناوب تغذیه را به ولتاژ مستقیم تبدیل می‌نماید. ولتاژ مستقیم حاصل معمولاً نظیر ولتاژ باطری مسطح نمی‌باشد بلکه در برگیرنده مولفه ریپل (تموج)[3] است. مدارهای متعددی که تشریح خواهند شد اگر چه همگی خروجی dc را تولید می‌نمایند لیکن با توجه به میزان ریپل موجود در آنها و مقدار متوسط ولتاژ، ضریب بهره و اثربار[4] آنها بر روی سیستم تغذیه، با یکدیگر تفاوت دارند. مدارهای یکسو کننده بطور کلی به دو دسته مدارهای

1- Rectifier 2- Rectifier circuit 3- Ripple

4- Load effect

WWW.IEPE.IR

یکسو کننده نیم موج[1] و تمام موج[2] تقسیم می‌شوند. مدارهای نیم‌موج، مدارهایی هستند که درآنها بر روی هر خط منبع تغذیه ac یک وسیله یا عنصر یکسو کننده قرار دارد و کاتد این عناصر بهم متصل گردیده و بار dc را تغذیه می‌کنند و خط برگشت از بار به خط خنثای منبع تغذیه متصل می‌گردد. اصطلاح نیم‌موج بیانگر این حقیقت است که جریان در هریک از خطوط تغذیه ac در یک جهت است. جهت توصیف این مدارها می‌توان از اصطلاح ***یک راهه یا یکطرفه***[3] استفاده کرد.

مدارهای یکسوکننده تمام موج، مدارهایی هستند که درآنها عملاً دو مدار یکسوکننده نیم موج بطور سری قرار گرفته‌اند، یکی از آنها بار را تغذیه می‌نماید و مدار دیگر جریان بار را مستقیماً به خطوط ac برمی‌گرداند و در نتیجه نیازی به خط خنثای منبع ac نمی‌باشد. از اصطلاح تمام موج به این دلیل استفاده می‌گردد که در حقیقت جریان در هریک از خطوط تغذیه ac، گرچه لزوماً متقارن نیست، متناوب می‌باشد. مدارهای یکسوکننده تمام موج عموماً، ***مدارهای پل***[4] نامیده می‌شوند و همچنین به ***مدارهای دو طرفه***[5] موسومند.

از نقطه نظر کنترل، مدارهای یکسوکننده را می‌توان در سه طبقه، ***کنترل نشده***،[6] ***تمام کنترل شده***[7] ***و نیمه کنترل شده***،[8] قرار دارد. در مدارهای یکسو کننده کنترل نشده فقط از دیود استفاده شده است و دامنه ولتاژ خروجی ثابت و به اندازه دامنه ولتاژ ورودی است. در مدارهای یکسو کننده تمام کنترل شده، عناصر یکسو کننده تریستورها یا ترانزیستورهای قدرت می‌باشند و در این مدارها ولتاژ خروجی dc، تابعی از دامنه ولتاژ تغذیه ac و زاویه آتش تریستورها ست. مدارهای نیمه کنترل شده شامل ترکیبی از دیودها و تریستورها هستند و درمقایسه با مدارهای تمام کنترل شده، کنترل ولتاژ خروجی آنها در سطح محدودتری انجام می‌گیرد. در مدارهای نیمه کنترل شده و کنترل نشده عبور توان فقط از منبع تغذیه ac به بار dc میسر است و به همین دلیل اغلب به عنوان ***مبدلهای یکطرفه***[9] توصیف می‌شوند. لیکن در مدارهای تمام کنترل شده می‌توان با کنترل زاویه آتش امکان عبور توان از بار به منبع تغذیه را فراهم کرد، بنابراین عبور توان در هر دو جهت میسر است و به همین دلیل اغلب به عنوان ***مبدلهای دو طرفه***[10] توصیف می‌شوند. در این مبدلها وقتی توان از منبع به بار انتقال می‌یابد گفته می‌شود که مبدل در حالت یکسوکنندگی کار می‌کند، و هنگامیکه توان از بار به منبع تغذیه انتقال

1- Half wave 2- Full wave 3- Single way 4- Bridge circuits

5- Double - way 6- Uncontrolled 7- Fully - Controlled

8- Half - Controlled 9- Unidirectional converters

10 - Bidirectional converters

www.IEPE.ir

می‌یابد گفته می‌شود که مبدل در حالت معکوس کنندگی کار می‌کند.

مدارهای یکسوکننده غالباً به وسیله تعداد پالس توصیف می‌گردند و تعداد پالس روشی است که براساس آن مشخصه خروجی یک مدار مفروض تعریف می‌شود و تعداد پالس بیانگر میزان تکرار یا تواتر در شکل موج ولتاژ مستقیم خروجی در خلال یک سیکل منبع تغذیه ac است و گاهی بر حسب فرکانس ریپل شکل موج بیان می‌گردد. تعداد پالس در حقیقت معرف تعداد عملیات سوئیچینگ (کلیدزنی) در خلال یک سیکل شکل موج تغذیه ac است که درآنها انتقال بار بین هر یک از دیودها، تریستورها و... صورت می‌گیرد.

۳-۳ دیود کموتاسیون [1]

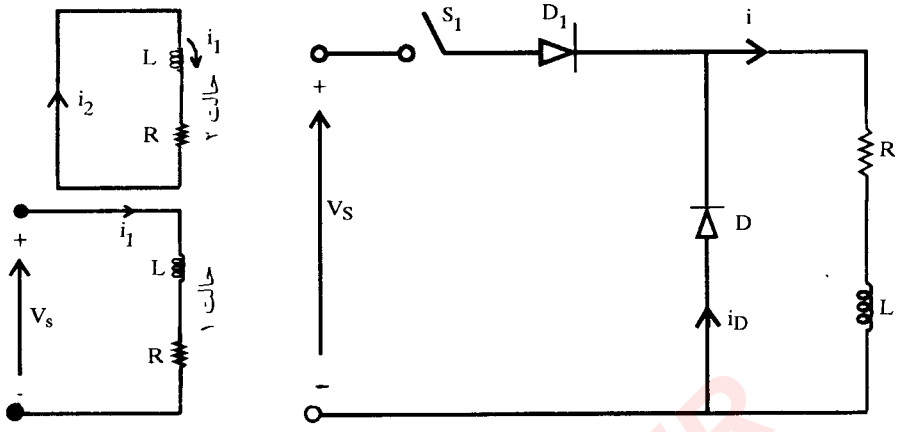
همانطوریکه در فصل ۱ ملاحظه کردیم اگر برای تغذیه یک بار اندوکتیو از یک دیود یا تریستوراستفاده کنیم، ولتاژ بار در مدت زمان هدایت،معکوس می‌گردد. اگر مطابق شکل ۳-۱ یک دیود در دوسر بار قرارگیرد از معکوس شدن ولتاژ ممانعت می‌نماید. به چنین دیودی، دیود کموتاسیون گفته می‌شود که غالباً در مدارهای کنترل نشده یا نیمه کنترل شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در خلال معکوس شدن ولتاژ دوسر بار، جریان بار از یکسوکننده اصلی به دیود انتقال می‌یابد و در نتیجه به تریستورها اجازه داده می‌شود تا دوباره حالت مسدود [2] خودشان را بازیابند. جریان دیود کموتاسیون به وسیله انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی اندوکتانس بار، حفظ می‌گردد. البته این دیود به صورتهای مختلف مانند **دیود هرزگرد [3] دیود بای پاس [4]** توصیف شده است لیکن بهترین توصیف همان دیود کموتاسیون (دیود انتقال دهنده یا جابجا کننده) است، زیرا به هنگام معکوس شدن ولتاژ بار، نقش انتقال دادن [5] جریان از یکسو کننده به دیود را به عهده می‌گیرد.

اگر در شکل ۳-۱ کلید S_1 برای مدت زمان t_1 بسته شود، جریان باربرقرار می‌شود و در هنگام باز شدن کلید مسیر عبور جریان بار توسط دیود D فراهم می‌گردد. بنابراین می‌توان مدارمعادل شکل ۳-۱ ب برای عملکرد دو حالت در نظر گرفت. جریانها برای دو حالت به ترتیب i_1 و i_2 در نظر گرفته شده است.

در خلال حالت (۱)، جریان عبوری از دیود برابر است با

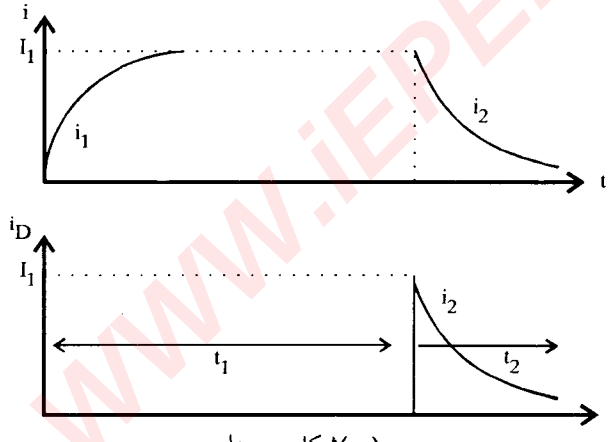
$$i_1(t) = \frac{V_s}{R}(1 - e^{-t\,R/L}) \qquad (۱-۳)$$

1- Commutating Diode
2- Blocking state
3- Freewheeling Diodes
4- By pass
5- Commutate



(الف)دیاگرام مدار

(ب)مدار معادل



(پ)شکل موج‌ها

شکل ۳-۱ مدار یکسو کننده همراه با دیودکموتاسیون

اگر کلید در لحظه $t = t_1$ بسته شود، جریان در آن لحظه برابر خواهد شدبا

$$I_1 = \frac{V_s}{R}(1 - e^{-t_1 R/L}) \qquad (۲-۳)$$

اگر زمان t_1 به‌اندازه‌ای باشد که جریان به مقدار ماندگار خود برسد جریان عبوری ازباربرابر $I = \frac{V_s}{R}$ خواهد بود.

WWW.iEPE.iR

در خلال حالت (۲)، با بازشدن کلید، جریان بار مدار خود را از طریق دیود کموتاسیون می‌بندد، و این جریان از معادله زیر بدست می‌آید.

$$Ri_2 + L\frac{di_2}{dt} = 0 \qquad (۳-۳)$$

با مقدار اولیه I_1، از حل معادله فوق مقدار جریان عبوری از دیود کموتاسیون بدست می‌آید، یعنی

$$i_2(t) = I_1 e^{-t\,R/L} \qquad (۴-۳)$$

باگذشت زمان جریان بطور نمایی تنزل می‌یابد و اگر $t_2 >> L/R$ باشد جریان در $t=t_2$ به صفر کاهش پیدا می‌کند. شکل موجها در شکل ۳-۱ پ نشان داده شده است.

۳-۴ پارامترهای ارزیابی رفتار مدار

از آنجائیکه با مدارهای متعدد یکسو کننده مواجه هستیم، نحوه عملکرد آنها به کمک پارامترهایی که محاسبه خواهند شد مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، این پارامترها عبارتنداز:

- مقدار متوسط یا میانگین ولتاژ خروجی (ولتاژ بار) V_{dc}
- مقدار متوسط جریان خروجی (جریان بار) I_{dc}
- توان خروجی dc P_{dc}
- مقدار rms ولتاژ خروجی V_{rms}
- مقدار rms جریان خروجی I_{rms}
- توان خروجی ac P_{ac}
- بازده (یا نسبت یکسوسازی) یک یکسوکننده، عددی است حائز اهمیت که میزان موثر بودن آن در یکسو کنندگی را بیان می‌کند و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \qquad (۵-۳)$$

که در آن

$$P_{dc} = V_{dc}\, I_{dc} \qquad (۶-۳)$$

$$P_{ac} = V_{rms}\, I_{rms} \qquad (۷-۳)$$

WWW.IEPE.IR

ولتاژ خروجی را می‌توان ترکیبی از دو مولفه در نظر گرفت، یکی مولفه dc و دیگری مولفه ac یا ریپل است.

● مقدار موثر یا (rms) مولفه ac ولتاژ خروجی برابر است با

$$V_{ac} = \sqrt{V_{rms}^{۲} - V_{dc}^{۲}} \qquad (۸-۳)$$

● ضریب شکل[1] که معیاری برای سنجش شکل موج ولتاژ خروجی است برابر است با

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} \qquad (۹-۳)$$

● ضریب ریپل (تموج)[2] که معیاری برای سنجش میزان ریپل موجود است به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} \qquad (۱۰-۳)$$

باقرار دادن معادله (۳-۸) در معادله (۳-۱۰) ضریب ریپل به فرم زیر بیان می‌شود.

$$RF = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{dc}}\right)^{۲} - ۱} = \sqrt{FF^{۲} - ۱} \qquad (۱۱-۳)$$

● ضریب بهره‌برداری ترانسفورماتور[3] بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$TUF = \frac{P_{dc}}{V_s I_s} \qquad (۱۲-۳)$$

که در آن V_s و I_s مقادیر rms ولتاژ و جریان ثانویه ترانسفورماتوراست.

● ضریب جابجایی[4] بصورت زیر بیان می‌شود.

$$DF = \cos \phi \qquad (۱۳-۳)$$

که در آن ϕ زاویه بین مولفه‌های اصلی جریان و ولتاژ ورودی است و زاویه جابجایی[5] نامیده می‌شود.

1- Form Factor 2- Ripple Factor 3- Transformer utilization factor

4- Displacement factor 5- Displacement angle

WWW.iEPE.iR

● **ضریب هارمونیک** [1] جریان ورودی به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$HF=\left(\frac{I_s^2-I_1^2}{I_1^2}\right)^{\frac{1}{2}}=\left[\left(\frac{I_s}{I_1}\right)^2-1\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۴-۳)$$

که در آن I_1 مقدار موثر مولفه اصلی و I_S مقدار موثر کل جریان ورودی است.

● **ضریب توان** [2] ورودی بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$PF = \frac{V_s I_1}{V_s I_s}\cos\phi = \frac{I_1}{I_s}\cos\phi \qquad (۱۵-۳)$$

توجه !- اگر جریان ورودی سینوسی خالص باشد، $I_1 = I_s$ و ضریب توان PF برابر ضریب جابجایی DF خواهد شد. در یک یکسوکننده ایده‌ال، پارامترهای فوق مقادیر زیر را خواهند داشت:

$PF = ۱$ و $HF = ۰$ و $TUF = ۱$ و $FF = ۱$ و $V_{ac} = ۰$ و $\eta = ٪۱۰۰$

۳-۵ یکسوکننده‌های غیرقابل کنترل

همان‌طوری که گفته شد بااستفاده از دیودها در مدارهای الکترونیک قدرت می‌توان ولتاژ ac را به ولتاژ ثابت dc تبدیل کرد. در این بخش به تشریح انواع این مدارهای یکسوکننده می‌پردازیم.

۳-۵-۱ یکسو کننده تکفاز نیم موج [3] (یکطرفه)

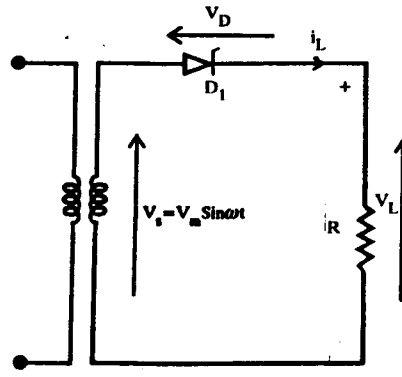
یک یکسوکننده تکفاز نیم موج ساده‌ترین نوع یکسو کننده است که بطور طبیعی در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. لیکن از نقطه نظر فهمیدن اصول کار یکسوکننده، بررسی آن مفید خواهد بود. دیاگرام مداری آن برای یک بار مقاومتی در شکل ۳-۲ الف نشان داده شده است. در خلال نیم سیکل مثبت ولتاژ ورودی، دیود D_1 هدایت می‌کند و ولتاژ ورودی در دوسر بار ظاهر می‌شود. در خلال نیم سیکل منفی، دیود هدایت نمی‌کند و ولتاژ خروجی صفر است. شکل موجهای خروجی و ورودی در شکل ۳-۲ ب نشان داده شده است.

1- Harmonic factor

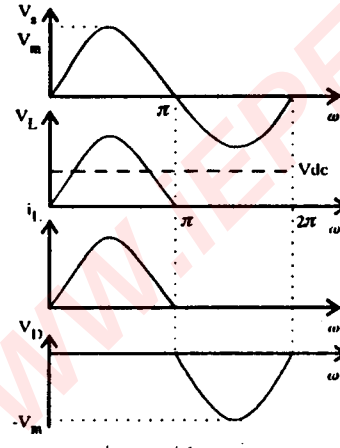
2- Power factor

3- Single-phase half-wave

WWW.iEPE.iR



(الف) دیاگرام مداری



(ب) شکل موجها

شکل ۳-۲ یکسو کننده تکفاز نیم موج با بار مقاومتی

مثال ۳-۱

در یکسوکننده شکل ۳-۲ مطلوب است محاسبه (الف)بازده (ب)ضریب شکل (پ) ضریب ریپل (ت) ضریب بهره‌برداری ترانسفورماتور (ث) پیک ولتاژ معکوس (PIV)[1] دیود D_1.

حل - مقدار متوسط ولتاژ خروجی V_{dc} برابر است با

1- Peak Inverse Voltage

WWW.IEPE.IR

$$V_{dc} = \frac{۱}{T}\int_{۰}^{T} v_L(t)dt \qquad (۱۶-۳)$$

همان طوری که در شکل ملاحظه می‌شود در فاصله $T/۲ \le t \le T$ ، $V_L(t)=۰$ است بنابراین

$$V_{dc} = \frac{۱}{T}\int_{۰}^{T} V_m \sin \omega t \, dt = \frac{-Vm}{T}\left(\cos\frac{\omega T}{۲} - ۱\right)$$

با توجه به $f=\frac{۱}{T}$ و $w = ۲\pi f$ داریم :

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = ۰/۳۱۸\ V_m \qquad (۱۷-۳)$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{۰/۳۱۸\ V_m}{R}$$

مقدار rms آن برابر است با

$$V_{rms} = \left[\frac{۱}{T}\int_{o}^{T} v_L^{۲}(t)dt\right]^{\frac{۱}{۲}} \qquad (۱۸-۳)$$

بنابراین برای شکل موج سینوسی در فاصله $۰ \le t \le T/۲$، مقدار rms ولتاژ خروجی برابراست با

$$V_{rms} = \left[\frac{۱}{T}\int_{o}^{\frac{T}{۲}} (V_m \sin \omega t)^{۲} dt\right]^{\frac{۱}{۲}} = \frac{V_m}{۲} = ۰/۵ V_m \qquad (۱۹-۳)$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{۰/۵\ V_m}{R}$$

با توجه به معادلات (۳-۶) و (۳-۷)،

$$P_{dc} = (۰/۳۱۸V_m)^{۲}/R \ , \ P_{ac} = (۰/۵V_m)^{۲}/R$$

www.iEPE.iR

با توجه به مقادیر محاسبه شده فوق مقادیر مورد نظر به شرح زیر بدست می‌آیند.

(الف) از معادله (۳-۵) $\eta = (۰/۳۱۸V_m)^۲ / (۰/۵V_m)^۲ = ٪۴۰/۵$

(ب) از معادله (۳-۹) $FF = ۰/۵\,V_m / ۰/۳۱۸V_m = ۱/۵۷$ یا ٪۱۵۷

(پ) از معادله (۳-۱۰) $RF = \sqrt{۱/۵۷^۲ - ۱} = ۱/۲۱$ یا ٪۱۲۱

(ت) مقدار rms ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور برابر است با

$$V_s = \left[\frac{۱}{T}\int_o^T (V_m \sin\omega t)^۲ dt\right]^{\frac{۱}{۲}} = \frac{V_m}{\sqrt{۲}} = ۰/۷۰۷V_m \qquad (۳-۲۰)$$

مقدار rms جریان ثانویه ترانسفورماتور همان جریان بار است یعنی

$$I_s = \frac{۰/۵V_m}{R}$$

بنابراین از معادله (۳-۱۲) $TUF = \frac{P_{dc}}{V_s I_s} = \frac{۰/۳۱۸^۲}{۰/۷۰۷\times ۰/۵} = ۰/۲۸۶$

(ث) پیک ولتاژ معکوس یا ولتاژ مسدود برابر است با $PIV = V_m$

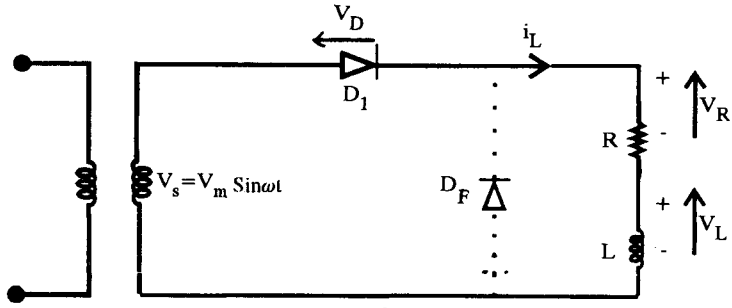
پارامترهای محاسبه شده نشان می‌دهند که این نوع یکسو کننده دارای ضریب تموج بالای ٪۱۲۱، بازده پائین ٪۴۰/۵ و TUF کم است. بعلاوه چون ترانسفورماتور جریان dc را از خود عبور می‌دهد، ممکن است منجر به مساله اشباع هسته ترانسفورماتور گردد. در حقیقت دراین نوع یکسوکننده فقط نیم سیکل انتقال می‌یابد و به همین دلیل بازده آن کم و ریپل آن زیاد است.

حال همان مدار یکسو کننده را در نظر می‌گیریم که در آن بار علاوه بر مقاومت اصلی دارای اندوکتانس می‌باشد (شکل ۳-۳ الف). غالباً در عمل با چنین باری مواجه هستیم. بواسطه وجود اندوکتانس، پریود هدایت دیود $D_۱$ از ۱۸۰ درجه فراتر می‌رود تا جایی که جریان به صفر برسد. شکل موج ولتاژ و جریان در شکل ۳-۳ ب نشان داده شده است.

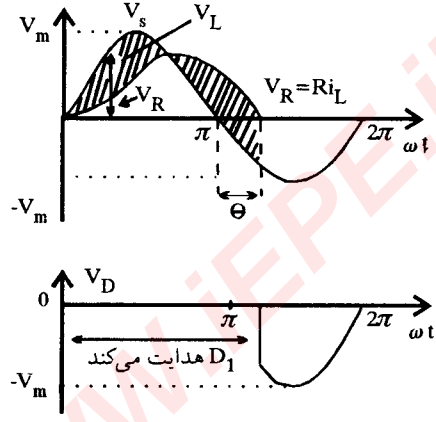
ملاحظه می‌شود که نه تنها در خلال سیکل مثبت ولتاژ تغذیه از بار جریان عبور می‌کند بلکه در خلال بخشی از ولتاژ منفی نیز جریان ادامه می‌یابد. در خلال هدایت دیود می‌توان نوشت:

$$V_m \sin\omega t = Ri_L + L\frac{di_L}{dt} \qquad (۳-۲۱)$$

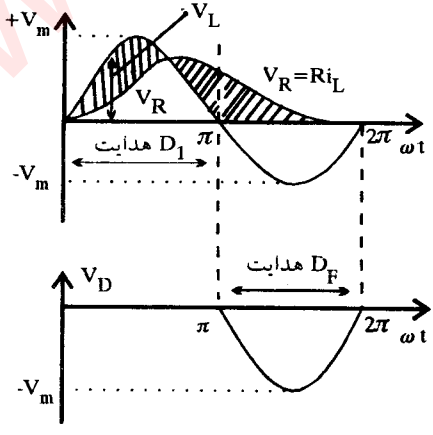
WWW.IEPE.IR



(الف) دیاگرام مداری



(ب) شکل موج‌های ولتاژ و جریان



(پ) شکل موج‌ها با دیود هرزگرد

شکل ۳-۳ یکسو کننده نیم موج بابار RL و دیود هرزگرد

www.iEPE.iR

از حل این معادله جریان بار i_L بدست می‌آید یعنی،

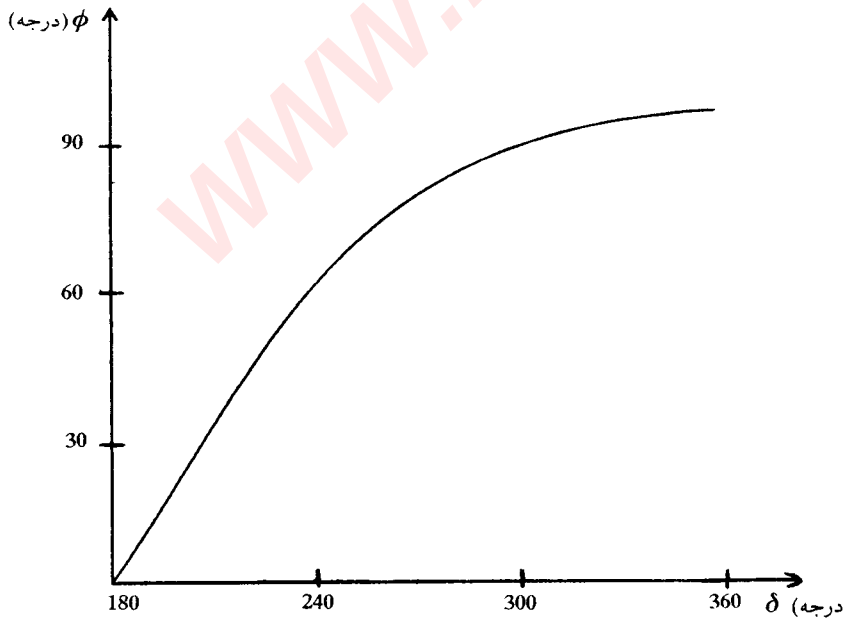
$$\begin{cases} i_L = \dfrac{V_m}{Z}\left[\sin(\omega t - \phi) + e^{\frac{-R}{L}t}\sin\phi\right] & \text{ویا} \\ i_L = \dfrac{V_m}{Z}\left[\sin(\omega t - \phi) + e^{-\omega t/\tan\phi}\sin\phi\right] & \\ i_L = 0 & 0 \le \omega t \le \pi + \theta \\ & \pi + \theta \le \omega t \le 2\pi \end{cases} \qquad (۲۲-۳)$$

که در آن $Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$ و $\phi = \tan^{-1}\dfrac{L\omega}{R}$ و $\omega = 2\pi f$ است.

اگر زاویه $\delta = \pi + \theta$ باشد با حل معادله فوق به ازاء $\omega t = \delta$ و $i = 0$ زاویه δ بدست می‌آید

$$\sin(\delta - \phi) + \sin\phi\, e^{-\delta/\tan\phi} = 0 \qquad (۲۳-۳)$$

از حل معادله فوق به ازاء مقدار معین ϕ، مقدار δ بدست می‌آید. در حقیقت می‌توان با روش تکراری معادله (۳-۲۳) را حل نمود. از دیاگرام شکل ۳-۴ می‌توان برای بدست آوردن زاویه δ به ازاء مقدار معین ϕ استفاده نمود.



شکل ۳-۴ زاویه امپدانس ϕ بر حسب زاویه δ

WWW.IEEE.IR

مقدار متوسط ولتاژ خروجی برابر است با:

$$V_{dc}=\frac{V_m}{۲\pi}\int_{o}^{\pi+\theta}\text{Sin}\omega t\, d(\omega t)=\frac{V_m}{۲\pi}\left[۱-\text{Cos}(\pi+\theta)\right] \qquad (۲۴-۳)$$

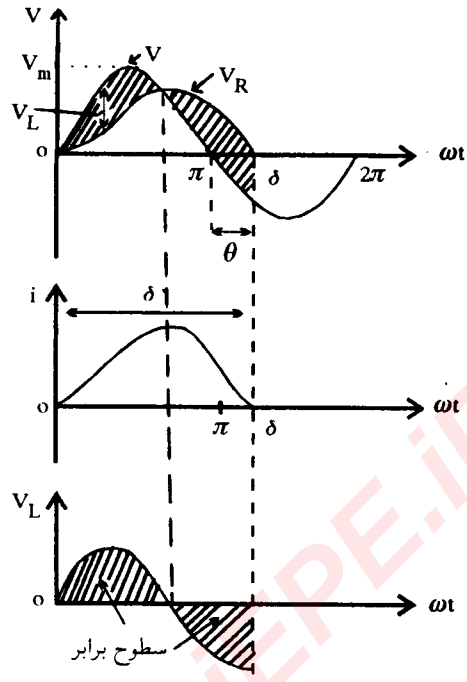
مقدار متوسط جریان یکسو شده از رابطه زیر بدست می‌آید،

$$I_{dc}=\frac{۱}{۲\pi}\int_{o}^{\pi+\theta} i_L\, d(\omega t)=\frac{V_m}{۲\pi R}\left[۱-\text{Cos}(\pi+\theta)\right] \qquad (۲۵-۳)$$

با فرض اینکه مقدار متوسط ولتاژ دو سراندوکتانس صفراست، نتیجه فوق را می‌توان از رابطه $V_{dc} = RI_{dc}$ نیز بدست آورد. در شکل ۳-۳ ب که درآن ولتاژها بر روی یک محور رسم شده‌اند، ولتاژ دوسر مقاومت (Ri_L) متناسب با جریان بار است و تفاضل آن با ولتاژ تغذیه برابر ولتاژ دو سر اندوکتانس خواهد بود که بصورت ناحیه هاشور زده شده در شکل مشخص شده است. ناحیه هاشور زده شده مثبت و منفی برابر است زیرا همانطوریکه گفتیم مقدار متوسط آن صفر می‌باشد. از این اطلاعات می‌توان در بدست آوردن شکل موج جریان بار کمک گرفت. در نقطه‌ای که شکل موج ولتاژ دو سر مقاومت ولتاژ تغذیه را تلاقی می‌کند، ولتاژ دوسر اندوکتانس صفر است و بنابراین $di/dt = ۰$ است یعنی منحنی جریان مقدار ماکزیمم خود را دارد مطابق این روش می‌توان شکل موجها را بدست آورد. این شکل موجها مجدداً در شکل ۳-۵ نشان داده شده‌اند.

همانطوریکه در شکل ۳-۳ ملاحظه می‌شود در مدار یکسوکننده با بار RL، جریان منفصل و دارای ریپل زیادی است. اگرچنانچه مقدار θ درمعادلات (۳-۲۴) و (۳-۲۵) برابر صفر باشد مقدار متوسط ولتاژ و جریان افزایش می‌یابد زیرا در واقع قسمت منفی موج ولتاژ دو سر بار حذف می‌گردد. افزودن دیود هرزگرد D_f مطابق شکل ۳-۳ الف از ظاهر شدن ولتاژ منفی در دوسر بار ممانعت می‌نماید، در نتیجه در خلال نیم سیکل منفی که دیود D_1 قطع می‌شود دیود D_f مسیر دیگری را برای عبور جریان فراهم می‌کند و جریان بار می‌تواند پیوسته گردد. یعنی تا لحظه $t = \pi/\omega$ جریان بار، جریانی است که از دیود D_1 می‌گذرد و از این لحظه به بعد جریان از دیود D_1 به دیود D_f منتقل می‌شود و جریان بار جریان عبوری از D_f می‌باشد(شکل ۳-۳ پ).
مقدار متوسط ولتاژ خروجی برابر است با

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} \qquad (۲۶-۳)$$



شکل ۳-۵ شکل موج جریان و ولتاژ در بار اندوکتیو

مقدار rms ولتاژ بار برابر است با

$$V_{rms} = \frac{V_m}{۲} \qquad (۲۷-۳)$$

ضریب ریپل برابر است با

$$RF = \sqrt{(\frac{V_{rms}}{V_{dc}})^۲ - ۱} = \sqrt{(\frac{\pi}{۲})^۲ - ۱} = ۱/۲۱۱$$

پس از گذشت چندین سیکل جریان مطابق شکل ۳-۶ به شرایط ماندگار خود می‌رسد. جریان بار به شرح زیر محاسبه می‌شود. در فاصله $۰ \le \omega t \le \pi$ جریان بار برابر جریان منبع است و مقدار آن از حل معادله (۳-۲۱) با شرط اولیه $\omega t = ۰$ و $i_L = I_{۲\pi}$ بدست می‌آید، یعنی

$$i_L = \frac{V_m}{Z}\sin(\omega t - \phi) + A\, e^{-\omega t/\tan\phi}$$

$$I_{۲\pi} = -\frac{V_m}{Z}\sin\phi + A \rightarrow A = I_{۲\pi} + \frac{V_m}{Z}\sin\phi$$

WWW.IEPE.IR

با قرار دادن مقدار A در معادله فوق داریم:

$$i_L = \frac{V_m}{Z}\sin(\omega t - \phi) + (I_{2\pi} + \frac{V_m}{Z}\sin\phi)\, e^{-\omega t/\tan\phi} \qquad (۲۸-۳)$$

$$0 \le \omega t \le \pi$$

در فاصله $\pi \le \omega t \le 2\pi$ جریان بار برابر جریان دیود هرزگرد است که مقدار آن از حل معادله (۳-۲۱) به ازاء ورودی صفر و شرط اولیه $\omega t = \pi$ و $i_L = I_{1\pi}$ بدست می‌آید یعنی

$$i_L = A\, e^{-\omega t/\tan\phi}$$

$$i_{1\pi} = A\, e^{-\pi/\tan\phi} \rightarrow A = I_{1\pi}\, e^{\pi/\tan\phi}$$

با قرار دادن مقدار A در معادله فوق داریم

$$i_L = I_{1\pi}\, e^{-(\omega t - \pi)/\tan\phi} \qquad (۲۹-۳)$$

به کمک روابط بالا مقادیر ثابت $I_{1\pi}$ و $I_{2\pi}$ که شرایط مرزی جریان هستند بدست می‌آیند. طبق معادله (۳-۲۹) مقدار جریان در $\omega t = 2\pi$ برابر $I_{2\pi}$ است بنابراین

$$I_{2\pi} = I_{1\pi}\, e^{-(2\pi - \pi)/\tan\phi} = I_{1\pi}\, e^{-\pi/\tan\phi}$$

ویا

$$I_{1\pi} = I_{2\pi}\, e^{\pi/\tan\phi} \qquad (۳۰-۳ \text{ الف})$$

طبق معادله (۳-۲۸) مقدار جریان در $\omega t = \pi$ برابر $I_{1\pi}$ است بنابراین

$$I_{1\pi} = \frac{V_m}{Z}\sin\phi + (I_{2\pi} + \frac{V_m}{Z}\sin\phi)e^{-\pi/\tan\phi}$$

$$I_{2\pi}\, e^{\pi/\tan\phi} = \frac{V_m}{Z}\sin\phi + I_{2\pi}\, e^{-\pi/\tan\phi} + \frac{V_m}{Z}\sin\phi\, e^{-\pi/\tan\phi}$$

ویا

$$I_{2\pi} = \frac{V_m}{Z}\sin\phi\, \frac{1 + e^{-\pi/\tan\phi}}{e^{\pi/\tan\phi} - e^{-\pi/\tan\phi}} \qquad (۳۰-۳ \text{ ب})$$

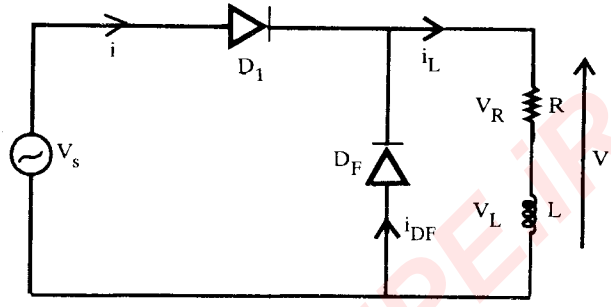
که در آن $\tan\phi = \frac{L\omega}{R}$ و $Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$

WWW.IEPE.IR

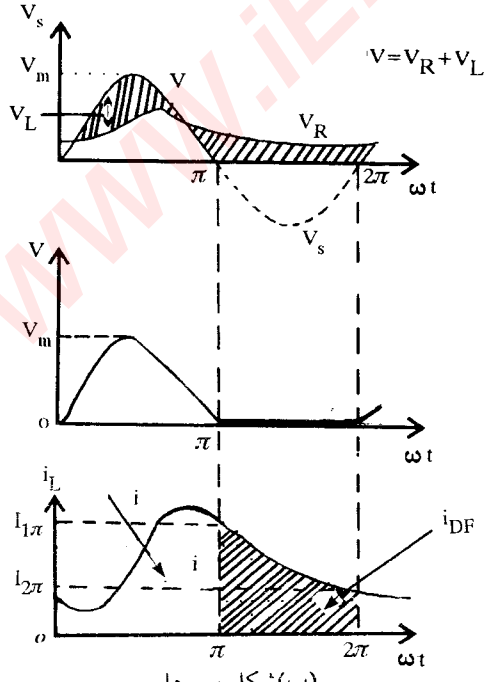
همانطوری که در شکل ۳-۶ ملاحظه می‌شود گرچه جریان بار پیوسته است لیکن جریان تغذیه منفصل و محتوی هارمونیک زیادی است.

مثال ۳-۲

در مدار شکل ۳-۶ ولتاژ تغذیه $۲۴۰\sqrt{۲}\sin(۲\pi ۵۰t)$ V، $R = ۱۰\Omega$ و $L = ۵۰mH$ است مطلوبست محاسبه :



(الف) دیاگرام مداری



(ب)شکل موج‌ها

شکل ۳-۶ یکسوکننده نیم‌موج

WWW.iEPE.IR

الف) مقدار متوسط جریان بار I_{dc}

ب) جریانهای مرزی $I_{1\pi}$ و $I_{2\pi}$

حل - الف) با توجه به معادله (۳-۲۶)، مقدار متوسط ولتاژ خروجی برابراست با

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

در نتیجه مقدار متوسط جریان خروجی برابر است با

$$I_{dc} = \frac{V_m}{\pi R} = \frac{۲۴۰\sqrt{۲}}{\pi \times ۱۰} = ۱۰/۸ \text{ A}$$

ب) امپدانس بار برابر است با

$$Z=\sqrt{(R^۲ + L^۲\omega^۲)} = ۱۸/۶۲ \ \Omega \text{ و } \tan\phi = L\omega/R = ۱/۵۷$$

با توجه به معادلات (۳-۳۰) مقادیر جریانهای مرزی بدست می‌آید و برابراست با

$$I_{1\pi} = ۲۵/۲۲ \text{ A} \qquad \text{و} \qquad I_{2\pi} = ۳/۴۱ \text{ A}$$

۳-۵-۲ یکسو کننده دو فاز نیم موج[1] (یکطرفه)

مدار یکسو کننده دو فاز نیم موج با ترانسفورماتور دارای انشعاب میانی در شکل ۳-۷ الف نشان داده شده است. هر نیمه ترانسفورماتور همراه با دیود مربوطه بصورت یک یکسو کننده نیم موج عمل می‌کند. خروجی یکسو کننده تمام موج در شکل ۳-۷ ب نشان داده شده است. از آن جایی که از ترانسفورماتور مولفه dc عبور نمی‌کند، بنابراین مسأله اشباع هسته ترانسفورماتور وجود ندارد. مقدار متوسط ولتاژ خروجی برابر است با

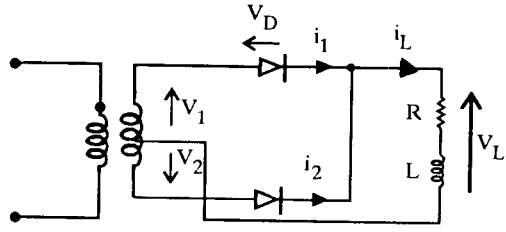
$$V_{dc}=\frac{۲}{T}\int_{o}^{\frac{T}{۲}} V_m \operatorname{Sin} \omega t \, dt=\frac{۲V_m}{\pi} = ۰/۶۳۶۶ \, V_m \qquad (۳-۳۱)$$

اگربار یکسو کننده مقاومت اهمی خالص باشد، پارامترهای مربوطه را حساب می‌کنیم یعنی

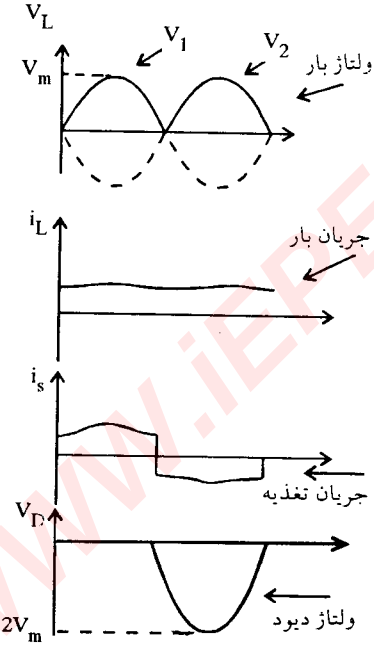
$$V_{dc} = \frac{۲V_m}{\pi} = ۰/۶۳۶۶ \, V_m$$

1- Bi-phase half wave

www.iEPE.iR



(الف) دیاگرام مداری



(ب)شکل موج‌ها

شکل ۳-۷ یکسوکننده دو فاز نیم‌موج

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{۰/۶۳۶۶\ V_m}{R} \qquad (۳۲-۳)$$

$$V_{rms} = \left[\frac{۲}{T}\int_{o}^{\frac{T}{۲}} (V_m \sin\omega t)^{۲}\, dt\right]^{\frac{۱}{۲}} = \frac{V_m}{\sqrt{۲}} = ۰/۷۰۷ V_m \qquad (۳۳-۳)$$

WWW.IEEE.IR

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{۰/۷۰۷V_m}{R}$$

$$P_{dc} = (۰/۶۳۶۶V_m)^۲/R \quad \text{و} \quad P_{ac} = (۰/۷۰۷V_m)^۲/R$$

$$\eta = (۰/۶۳۶۶V_m)^۲ / (۰/۷۰۷V_m)^۲ = ٪۸۱$$

$$FF = ۰/۷۰۷V_m / ۰/۶۳۶۶V_m = ۱/۱۱$$

$$RF = \sqrt{۱/۱۱^۲ - ۱} = ٪۴۸/۲$$

$$V_s = V_m / \sqrt{۲} = ۰/۷۰۷\ V_m$$

$$I_s = ۰/۵\ V_m/R$$ مقدار موثر جریان در هر قسمت از سیم‌پیچ ثانویه

$$TUF = \frac{۰/۶۳۶۶^۲}{۲\times۰/۷۰۷\times۰/۵} = ٪۵۷/۳۲$$

$$PIV = ۲V_m$$

اگر مقادیر فوق را با آنچه که در مدار یکسوکننده نیم موج بدست آمد، مقایسه نمائیم ملاحظه می‌شود که در مدار تمام موج بهبود قابل ملاحظه‌ای حاصل شده است.

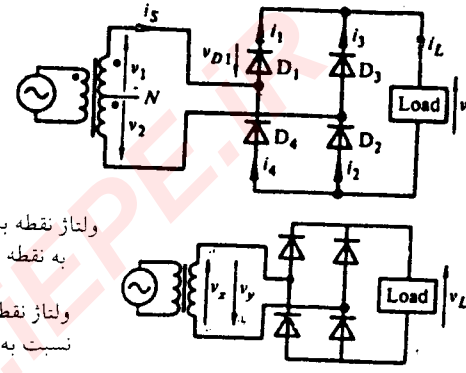
۳-۵-۳ پل تکفاز[1] (دوطرفه)

در یکسو کننده دوفاز نیم موج می‌توان بجای استفاده از ترانسفورماتور با انشعاب میانی، از چهار دیود مطابق شکل ۳-۸ الف،استفاده نمود. این مدار که به یکسوکننده پل معروف است، خروجی تمام موج را فراهم می‌کند و در مقایسه با مدار دو فاز نیم‌موج قبل، هر دیود ولتاژ معکوس کمتری را تحمل می‌کند (V_m). شکل موج جریان و ولتاژ در شکل ۳-۸ ب نشان داده شده است. برای ترسیم شکل موجهامی‌توان مشابه حالت قبل یک نقطه میانی خنثای N را در نظر گرفت و شکل موج ولتاژ هر طرف بار را نسبت به نقطه N بدست آورد و از تفاضل آنها v_L را

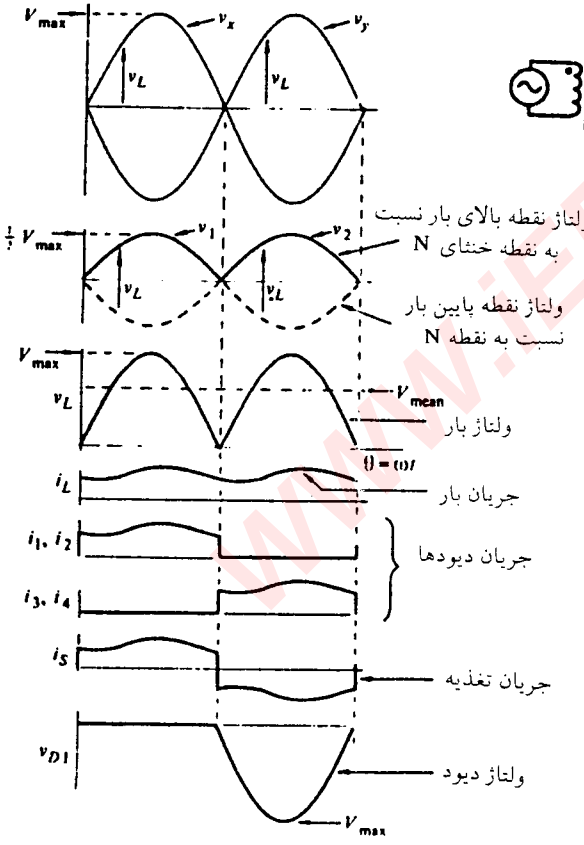
1- Single-phase Bridge

WWW.IEPE.IR

بدست آورد یا با در نظر گرفتن قسمت مثبت و منفی v_x و v_y آنرا بدست آورد. خروجی دارای مشخصه دو پالسی است. وقتی بار شدیداً اندوکتیو باشد (که معمولاً همین‌طور است)، جریان بار تقریباً ثابت و همان‌طوری‌که در شکل ملاحظه می‌شود جریان تغذیه موج مربعی خواهد بود. مقدار متوسط جریان هر دیود برابر نصف جریان متوسط بار است یعنی $I_D = I_{dc}/۲$ و مقدار موثر جریان دیود که مقدار نامی دیود را مشخص می‌کند برابر است با $I_{rms} = I_{dc}/\sqrt{۲}$ که در آن $n=۲$ معرف تعداد پالس است.



(الف)دیاگرام مداری



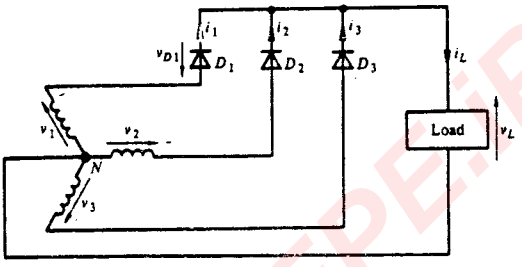
(ب) شکل موج

شکل ۳-۸ یکسوکننده پل تمام موج

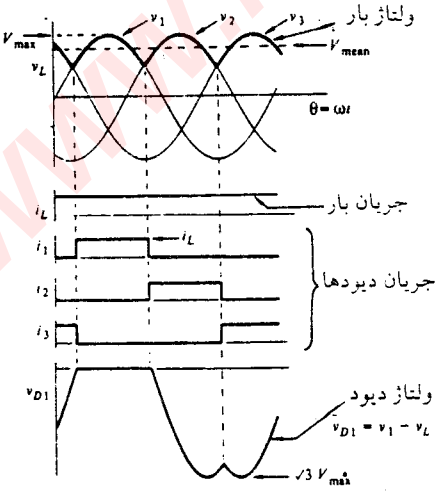
www.iepe.ir

۳-۵-۴ یکسوکننده سه فاز نیم موج[1] (یکطرفه)

یکسوکننده سه فاز نیم‌موج، عنصر اصلی اکثر مدارهای یکسو کننده چند فاز را تشکیل می‌دهد. مداراین یکسوکننده درشکل ۳-۹ الف نشان‌داده‌شده‌است، هرفازتغذیه‌ازطریق یک دیود به‌بار متصل شده‌است و مشابه کلیه اتصالات نیم‌موج، جریان‌باربه‌نقطه‌خنثای تغذیه برمی‌گردد. عملکرد مدار به این صورت است که در هر لحظه مفروض فقط یک دیود هدایت می‌کند و آن دیودی است که به فازی که دارای بیشترین مقدار ولتاژ لحظه‌ای است، متصل شده باشد. این عملکرد منتج به شکل موج ولتاژ بار v_L مطابق شکل ۳-۹ ب می‌گردد، که در حقیقت همان‌قسمت قله‌ی ولتاژ فازهای متوالی است. مادامیکه v_1 مثبت‌ترین فاز است، دیود D_1



(الف)دیاگرام مداری



(ب)شکل موجها

شکل ۳-۹ یکسوکننده سه فاز نیم موج

1- Three-phase half-wave

WWW.IEPE.IR

هدایت می‌کند و جریان پالسی مستطیل شکل ایجاد می‌کند. وقتی v_2 مثبت‌تر از v_1 می‌شود جریان بار از دیود D_1 به دیود D_2 منتقل می‌شود. لحظه انتقال جریان یا کموتاسیون را می‌توان از روی شکل موج ولتاژ دیود v_D مشاهده کرد، وقتی که مقدار لحظه‌ای v_1 از v_2 کمتر می‌شود ولتاژ v_D منفی شده و دیود D_1 خاموش می‌شود.

برای سیستم q فاز، مقدار متوسط ولتاژ خروجی توسط رابطه زیر بدست‌می‌آید.

$$v_{dc}=\frac{1}{2\frac{\pi}{q}}\int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{q}}^{\frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{q}} V_m \operatorname{Sin}\omega t\, d(\omega t)=V_m\frac{q}{\pi}\operatorname{Sin}\frac{\pi}{q} \qquad (۳۳-۳)$$

که در آن $\frac{2\pi}{q}$ زاویه هدایت دیود است که در مورد سیستم سه فاز $\frac{2\pi}{3}$ خواهد شد و مقدار متوسط خروجی برابر است با

$$V_{dc}=\frac{3V_m}{\pi}\sin\frac{\pi}{3}=\frac{3\sqrt{3}\,V_m}{2\pi} \qquad (۳۴-۳)$$

همانطوریکه ملاحظه می‌شود ولتاژ خروجی بین ماکزیمم ونصف آن تغییر می‌کند و سه بار در سیکل تکرار می‌شود، بنابراین دارای مشخصه سه‌پالسی است و در مقایسه با مدارهای قبلی دارای ریپل کمتری است و طبق معادله (۳-۳۰) دارای مقدار متوسط ولتاژ بیشتری است از این‌رو برای قدرتهای بالاتر (بیش از ۱۵ kW) از یکسو کننده‌های سه فاز و یا چند فاز استفاده می‌شود.

بافرض اینکه جریان بار ثابت است (I_L) در فاصله زمانی یک سیکل، جریانهای دیود یک سوم آنرا تشکیل می‌دهند. بنابراین مقدار متوسط جریان هر دیود برابراست با

$$I_D=\frac{1}{2\pi}\int_{o}^{\frac{2\pi}{3}} I_L\, d\theta=\frac{I_L}{3}$$

ویا

$$I_{D\,\text{متوسط}}=\frac{I_L}{n}=\frac{I_L}{3} \qquad (۳۵-۳)$$

برای تعیین مقدار نامی دیود از مقدار rms جریان دیود استفاده می‌شود که برابر است با

$$I_{D\,\text{موثر}}=\left[\frac{1}{2\pi}\int_{o}^{2\frac{\pi}{3}} I_L^2\, d\theta\right]^{\frac{1}{2}}=\frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

ویا

WWW.IEPE.IR

$$\text{موثر } I_D = \frac{I_L}{\sqrt{n}} = \frac{I_L}{\sqrt{۳}} \qquad (۳-۳۶)$$

که در آن n=۳ تعداد پالس است.

همچنین می‌توان بطور ساده از جذر میانگین مجموع مجذورات جریان در سه فاصله مساوی، مقدار موثر جریان را بدست آورد. یعنی

$$I_{rms} = \left(\frac{I_L^{۲} + ۰^{۲} + ۰^{۲}}{۳}\right)^{\frac{۱}{۲}} = \frac{I_L}{\sqrt{۳}}$$

با توجه به شکل موج ولتاژ دیود ملاحظه می‌شود که پیک ولتاژ معکوس دیود برابر $\sqrt{۳}V_m$ است که عبارت از ماکزیمم ولتاژ بین دو فاز است.

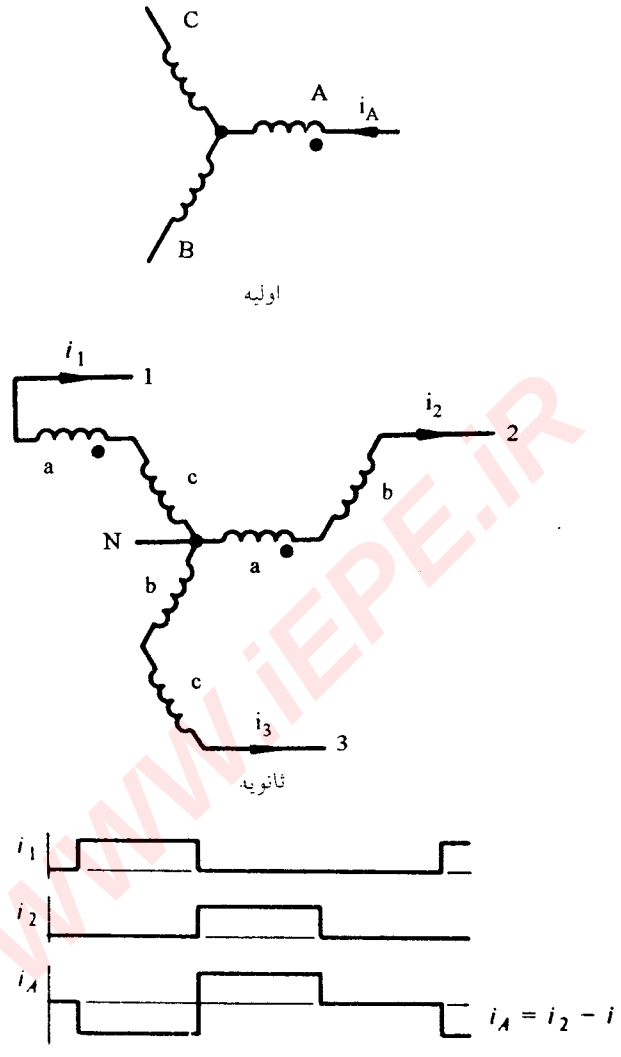
در اینجا باید خاطر نشان کرد که ترانسفورماتور با اتصال مثلث - ستاره یا ستاره - ستاره ساده، اتصال مناسبی نمی‌باشد زیرا در این‌صورت جریان در هر فاز فقط، در یک جهت عبور می‌کند.

این مسأله ممکن است منجر به مغناطیس شدن dc هسته ترانسفورماتور گردد و در نتیجه جریان مغناطیس کننده و تلفات آهنی افزایش یابد. برای اجتناب از وقوع آن می‌توان از ترانسفورماتور با سیم پیچی اتصال ستاره بهم پیوسته موسوم به اتصال زیگزاگ[1] استفاده کرد. در این‌صورت جریان عبوری از هرفاز متناوب خواهد بود بنابراین از ایجاد هرگونه مولفه dc در نیروی محرکه مغناطیسی هسته جلوگیری می‌شود. اتصال زیگزاگ و شکل موج جریان در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. در شکل با حروف مشخص شده است که کدام دو سیم پیچ ثانویه با یکی از سیم‌پیچهای اولیه کوپلاژ دارد. با افزایش تعداد فازها، بهره‌برداری از سیم‌پیچی‌ها در هر سیکل کاهش می‌یابد، مثلاً از مقدار π در مدار تکفاز به مقدار $\frac{۲\pi}{۳}$ در مدار سه فاز کاهش می‌یابد.

۳-۵-۵ یکسوکننده شش فاز نیم موج[2] (یکطرفه)

با استفاده از یک ترانسفورماتور تغذیه ستاره ساده شکل ۳-۱۱، می‌توان یک منبع تغذیه شش فاز را ایجاد کرد و از آن در یکسو کننده شش فاز نیم‌موج شکل ۳-۱۲ مورد بهره‌برداری قرار داد. ولتاژهای خروجی ترانسفورماتور با یکدیگر °۶۰ اختلاف فاز دارند. نحوه اتصال مشابه مدار سه فاز نیم‌موج است و فقط تعداد فاز افزایش یافته است. ولتاژ خروجی دارای مشخصه شش پالسی است (q = ۶)، ریپل آن نسبت به سه فاز نیم‌موج کمتر و با فرکانس

1- Zig-Zag 2- Six-phase half wave



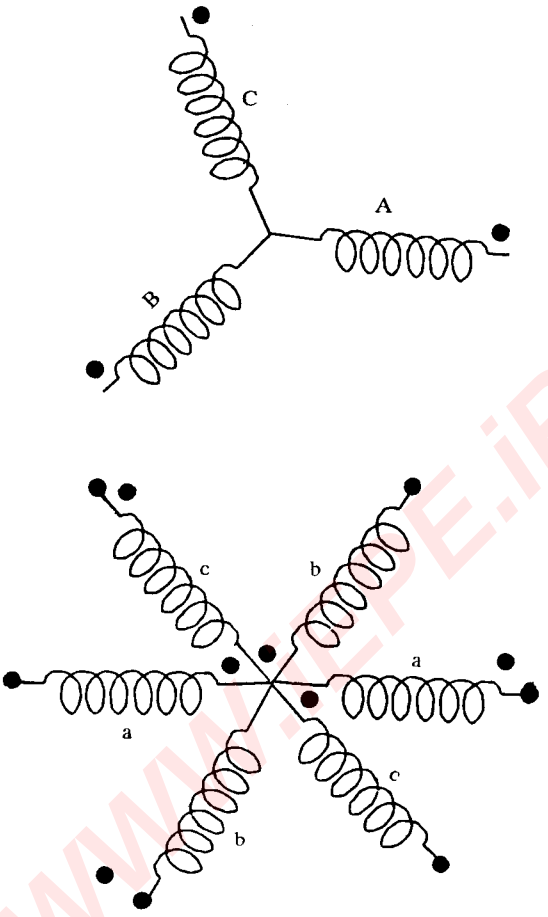
سیم‌پیچهای ثانویه a با سیم‌پیچ اولیه A کوپلاژ دارد.

شکل ۳-۱۰ اتصال زیگزاگ ترانسفورماتور و شکل موج جریان

شش برابر فرکانس تغذیه است. معادلات بخش قبل با جایگذاری $q = ۶$، برای یکسوکننده شش فاز نیم موج قابل قبول خواهد بود. مقدار متوسط ولتاژ بار برابر است با

$$V_{dc} = \frac{۳V_m}{\pi} \qquad (۳۷-۳)$$

WWW.iEPE.IR

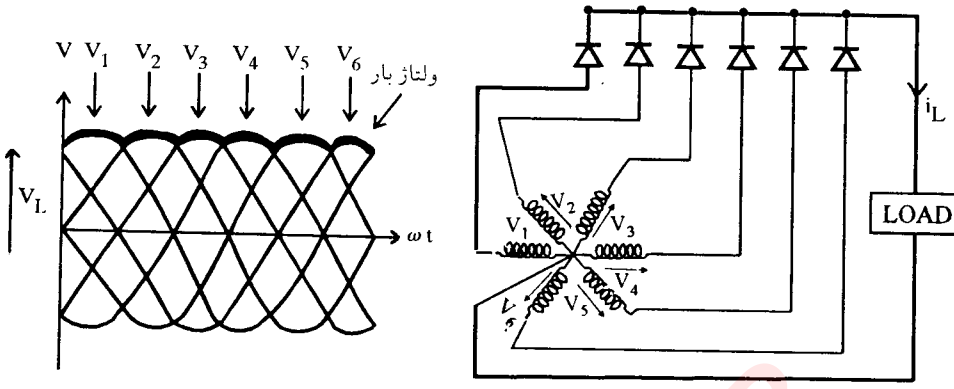


شکل ۳-۱۱ ترانسفورماتور با خروجی شش فاز

البته کاربرد دیود در این مدار بازده خوبی ندارد زیرا فقط در یک ششم سیکل ($\frac{\pi}{۳}$) هدایت می‌کند و برای یک جریان بار مستقیم I_L، مقدار موثر جریان دیود برابراست با

$$\text{موثر } I_D = \frac{I_L}{\sqrt{۶}} \qquad (۳-۳۸)$$

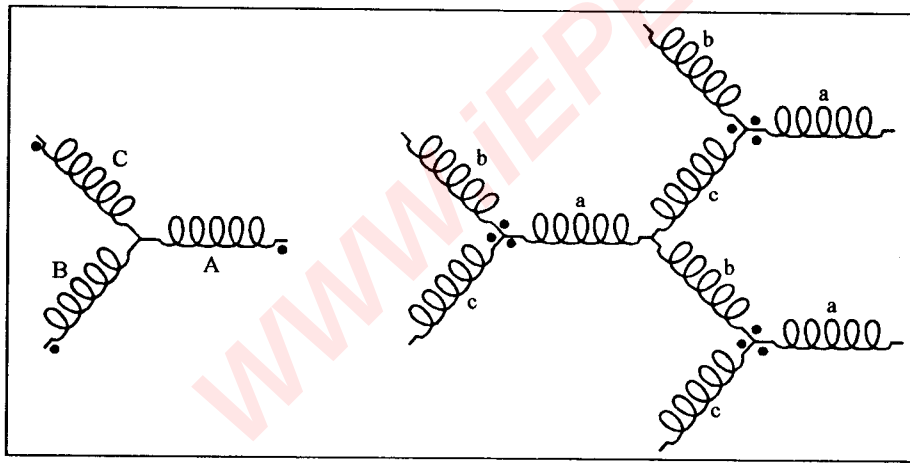
در عمل از اتصال ستاره ساده شکل ۳-۱۲ استفاده نمی‌شود، زیرا از هر بازوی سیم‌پیچی اولیه در یک سوم سیکل جریان عبور می‌کند و در نتیجه مولفه هارمونیک سوم بزرگی در جریان اولیه ایجاد می‌گردد. مقدار جریان مولفه هارمونیک سوم در شکل ۳-۱۱ برابر $\frac{۴I_L}{۳\pi}$ است. برای



(ب)شکل موج

(الف) دیاگرام مداری

شکل ۳-۱۲ مدار شش فاز نیم موج ساده



شکل ۳-۱۳ ترانسفورماتور با اتصال ستاره - چنگالی

حذف مولفه هارمونی سوم می‌توان از اتصال ستاره - چنگالی[1] نشان داده شده در شکل ۳-۱۳ استفاده کرد. در این مدار جریان در هر فاز سیم پیچی اولیه در $\frac{۲}{۳}$ سیکل عبور می‌کند و مولفه هارمونیک سوم به صفر تنزل می‌یابد.

1- Star-fork connection

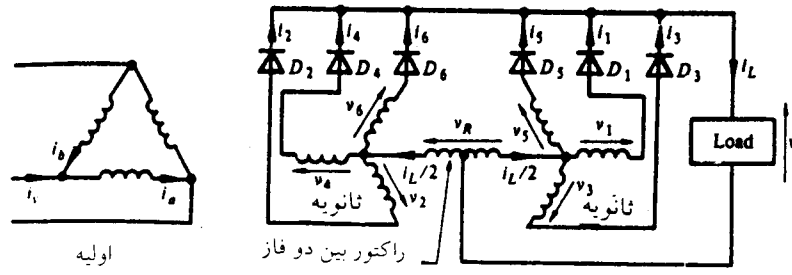
WWW.iEPE.IR

ترانسفورماتوری با چنین سیم‌پیچ غیرمعمول، خیلی گران است و معمولاً بجای آن از اتصال ستاره دوبل[1]، که در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است استفاده می‌گردد. اولیه ترانسفورماتور بصورت مثلث است، در ثانویه ترانسفورماتور روی هر بازو دو سیم پیچ وجود دارد. یک سر سیم پیچهای ثانویه بهم متصل می‌شوند و نقطه خنثی را ایجاد می‌کنند و به این ترتیب ولتاژهای v_1 و v_4، v_3 و v_6، v_5 و v_2، نسبت به هم ۱۸۰° اختلاف فاز دارند. بنابراین اتصال ستاره دوبل اساساً شامل دو مدار سه فاز نیم موج است که بطور موازی کار می‌کنند تا خروجی شش-پالسی را فراهم نمایند. همان‌طوری که گفته شد دو گروه ستاره با یکدیگر ۱۸۰° اختلاف فاز دارند و اگر چنانچه دو نقطه ستاره به‌یکدیگر اتصال کوتاه شوند یک مدار شش فاز ساده خواهیم داشت که شرح آن گذشت. در این حالت ولتاژ خروجی از پشت سرهم قرار گرفتن قله‌های موج ولتاژ، یعنی تکه‌هایی از ولتاژهای سینوسی v_1، v_2، v_3، v_4، v_5، v_6، که نسبت به هم ۶۰° اختلاف فاز دارند، بدست می‌آیدو در هر لحظه فقط دیودی هدایت می‌کند که ولتاژ متصل به آن بیشترین مقدار لحظه‌ای را دارا باشد. مدت زمان هدایت هردیود $\frac{\pi}{3} = 60°$ است و همان‌طوری که گفته شد در این حالت از دیودها بهره‌برداری خوبی به عمل نمی‌آید. البته چون موج خروجی شش‌پالسی است، هارمونیک‌های آن کوچک خواهند بود.

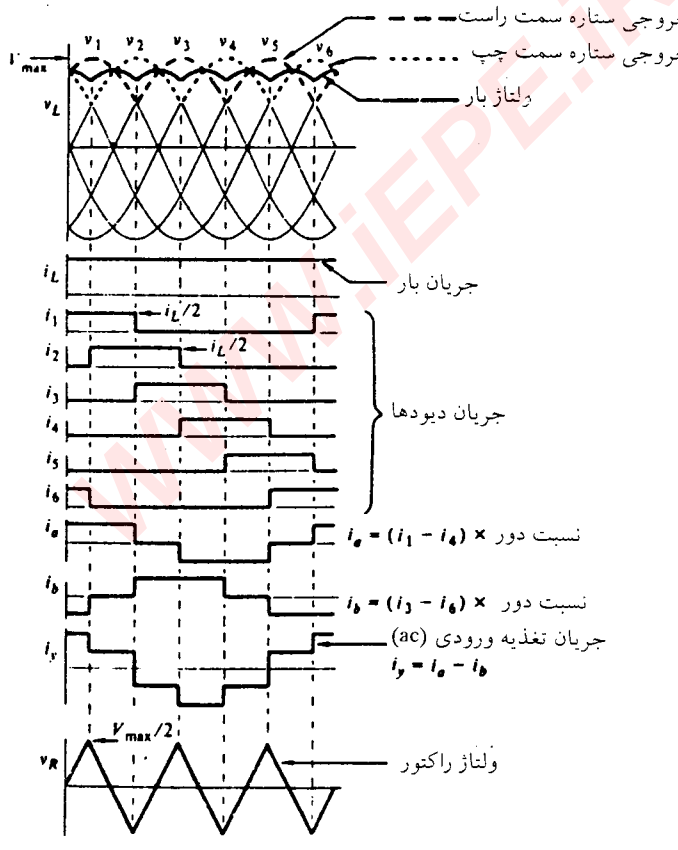
اگر چنانچه دو مدار سه فاز نیم موج بتوانند بصورت موازی کارکنند در مدار شش‌فازه حاصل، عیب فوق مرتفع شده و زاویه هدایت به $\frac{2\pi}{3} = 120°$ افزایش می‌یابد یعنی اینکه هر گروه بطور مستقل عمل کرده و هر دیود برای مدت زمان یک سوم سیکل هدایت می‌کند و در هر لحظه یک دیود از هر گروه هدایت نموده و نصف جریان بار را انتقال می‌دهد.چون مقدار لحظه‌ای ولتاژهای خروجی تولید شده توسط دو گروه یکسان نیستند، اتصال موازی آنها بطور مستقیم امکان‌پذیر نیست. بنابراین جهت عملکرد موازی آنها دو نقطه ستاره از طریق یک ترانسفورماتور یا راکتور بین دو فاز[2] (که همچنین بوبین جذب کننده[3] نامیده می‌شود) بهم متصل می‌گردد. بوبین جذب کننده نقش تقسیم کننده القایی ولتاژ را دارد و اختلاف ولتاژ لحظه‌ای خروجی دو گروه را جذب می‌نماید و امکان می‌دهد که هر دو گروه ستاره همزمان هدایت نمایند. ولتاژ در نقطه وسط این بوبین برابر نصف مجموع ولتاژهای خروجی است، بنابراین همان‌طوری که در شکل ملاحظه می‌شود ولتاژ بار در وسط دو گروه پالس قرار می‌گیرد. ولتاژ بار دارای مشخصه شش - پالسی است و حداکثر مقدار لحظه‌ای آن $\frac{\sqrt{3}}{2} V_{max}$ است که در

1- Double-star connection 2- Interphase reactor or transformer

3- Absorption inductor



(الف) دیاگرام مداری



(ب) شکل موجها

شکل ۳-۱۴ یکسوکننده نیم‌موج شش فاز با ستاره دوبل

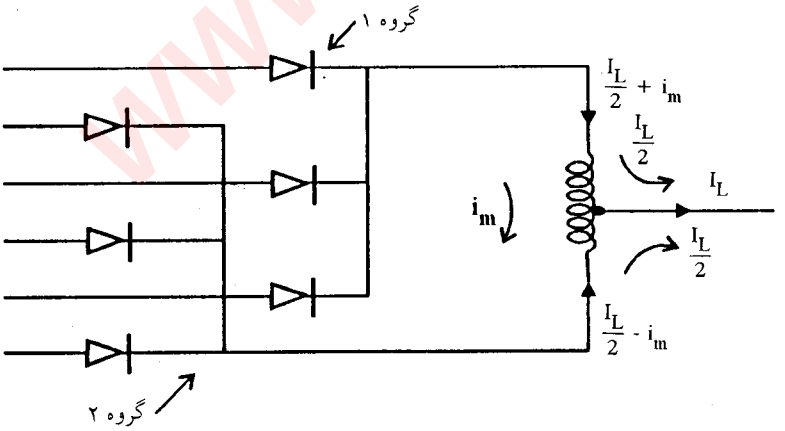
محل تقاطع ولتاژهای فاز قرار دارد. این مقدار از حداکثر مقدار در اتصال ستاره سه فاز (V_{max}) کمتر است.

مقدار متوسط ولتاژ بار را می‌توان با محاسبه مقدار متوسط هر گروه سه پالسی و یا مستقیماً از روی شکل موج واقعی شش پالسی بدست آورد که برابر است با

$$V_{dc} = \frac{۳\sqrt{۳}}{۲\pi} V_m \qquad (۳-۳۹)$$

شکل موج‌های جریان شکل ۳-۱۴ ب نشان می‌دهند که در ترانسفورماتور با اولیه مثلث، یک شکل موج جریان پله‌ای از منبع تغذیه سه فاز کشیده می‌شود. در این نوع اتصال در مقایسه با اتصال شش‌پالسی ساده، مدت زمان هدایت دیود و شکل موج ورودی هر دو بهتر شده است.

شکل موج ولتاژ دو سر بوبین جذب که در شکل ۳-۱۴ ب نشان داده شده است از اختلاف بین دو گروه ستاره بدست می‌آید که تقریباً مثلثی شکل است و ماکزیمم آن برابر نصف ماکزیمم ولتاژ فاز و فرکانس آن سه برابر فرکانس تغذیه است. ولتاژ دو سر بوبین جذب منجر به عبور جریان مغناطیس کننده بین نقاط ستاره دو گروه می‌گردد. مقدار جریان مغناطیس کننده به شارمغناطیسی آن بستگی دارد که خود تابع ولتاژ دو سر آن است. بنابراین یک عدم تعادل کوچکی بین جریانهای دو نیمه راکتور بین دوفاز بوجود می‌آید که در شکل ۳-۱۵ جریان



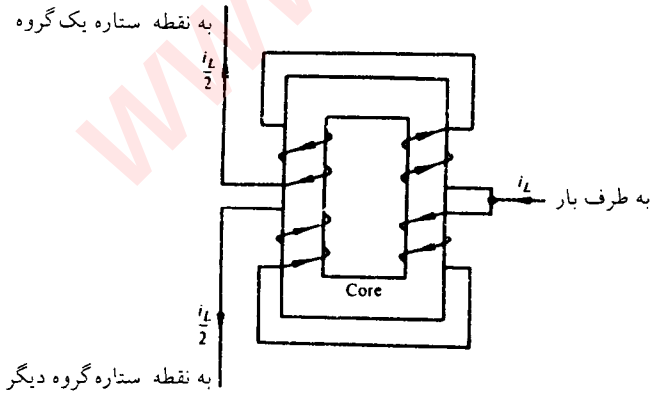
شکل ۳-۱۵ جریان مغناطیس کننده در راکتور بین دوفاز

مغناطیس کننده برگشتی از دیودهای هدایت کننده هر گروه (که در یکی از آنها بصورت جریان معکوس است) می‌گذرد. بنابراین مسیر این جریان بایستی از طریق دیودها باشد واین در

صورتی امکان‌پذیر است که جریان بار برقرار باشد. جریان مغناطیس کننده که از جهت معکوس دیودها عبور می‌کند جریان مستقیم دیود را قدری کاهش می‌دهد. مقدار جریان بار باید از جریان مغناطیس کننده بیشتر باشد. اگر چنانچه جریان بار از مقدار بحرانی (I_{Lcr}) کمتر گردد جریان مغناطیس‌کننده‌برای ایجاد ولتاژ دوسر بوبین کافی نبوده و بوبین نمی‌تواند به عنوان تقسیم کننده ولتاژ عمل نماید و مجموعه بصورت اتصال ستاره شش فاز ساده کار خواهد کرد.

اگر چنانچه بار قطع گردد جریان مغناطیس کننده عبور نمی‌کند و ولتاژی در دو سر بوبین بوجود نمی‌آید و در نتیجه نقطه‌های ستاره از نظر الکتریکی مشترک گردیده و مدار مشابه مدارنیم موج شش‌فاز ساده رفتار می‌کند. بنابراین برای اینکه عملکرد مدار در بارهای مختلف تضمین گردد، لازم است یک بار دائمی کوچک به دو سر یکسوکننده متصل گردد تا جریانی بیشتر از جریان مغناطیس‌کننده از آن بگذرد.

نمونه‌ای از ترانسفورماتور بین دو فاز (راکتور) در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است که هسته آن شامل دو بازو است و روی هر بازو دو سیم پیچ با پیوستگی (کوپلاژ) زیاد قرار دارد. پیوستگی زیاد سیم‌پیچ‌ها، مشابه ترانسفورماتور، تعادل m.m.f را تضمین نموده و باعث می‌شود که جریان بار بطور مساوی بین سیم‌پیچها تقسیم گردد. جریان مغناطیس کننده که از یک نقطه ستاره به نقطه ستاره دیگر جاری می‌شود در تمام سیم‌پیچ‌ها در یک جهت عمل می‌کند تا شار لازم را ایجاد نماید. مشابه ترانسفورماتور معمولی، جریان مغناطیس کننده منجر به عدم تعادل کمی بین جریان کل در دو سیم‌پیچ واقع بر روی یک بازو می‌گردد.



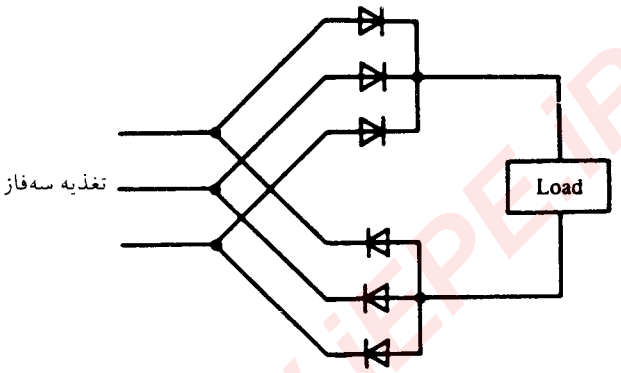
شکل ۳-۱۶ ساختمان ترانسفورماتور (راکتور) بین دو فاز

هر دیود به ماگزیمم ولتاژ معکوس $2V_m$ نیاز دارد، زیرا بایستی هنگامیکه ترانسفورماتور بین دو فاز قادر به تحریک شدن نیست و مدار بصورت اتصال نیم موج شش فاز ساده رفتار می‌کند، این ولتاژ معکوس را تحمل نماید.

www.iepe.ir

۳-۵-۶ یکسوکننده پل سه فاز (دوطرفه)

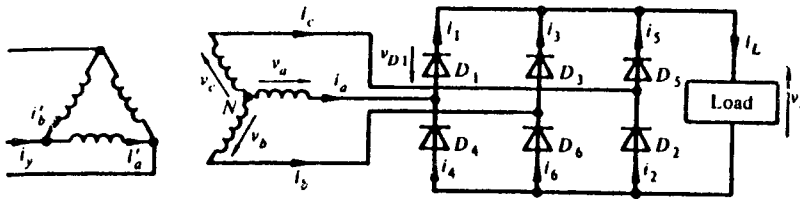
شکل ۳-۱۷ اتصال پل سه فاز تمام موج (دو طرفه) را نشان می‌دهد که در آن دو مدار یکسوکننده سه فاز نیم موج به هم متصل شده‌اند طوری که یکی در نیم سیکل‌های مثبت و دیگری در نیم‌سیکل‌های منفی تغذیه عمل می‌کند. بار از طریق اتصال نیم موج سه فاز تغذیه می‌شود و جریان برگشتی از طریق اتصال نیم موج دیگری به تغذیه برمی‌گردد و نیازی به سیم خنثی نمی‌باشد. این مدار به پل سه فاز شش پالسی معروف است که معمولاً مطابق شکل ۳-۱۸ الف نشان داده می‌شود.



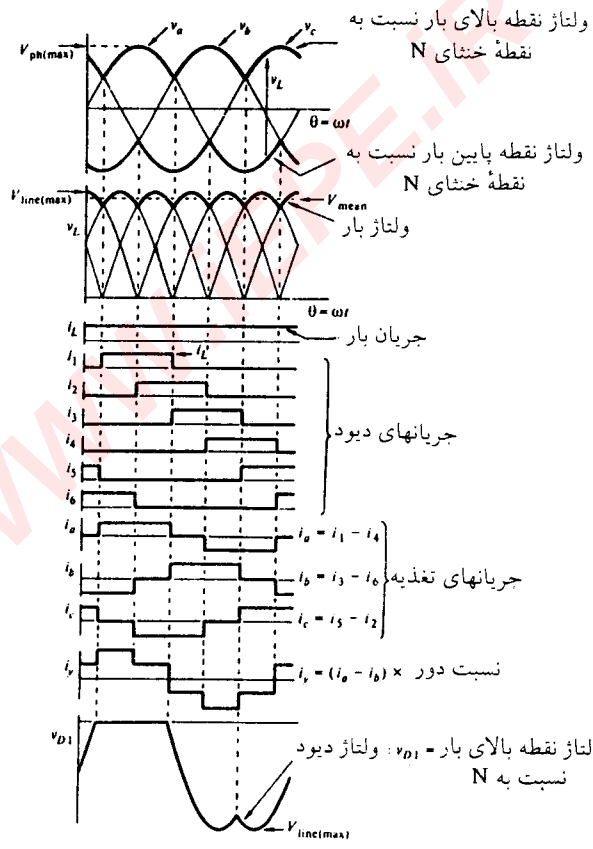
شکل ۳-۱۷ مدار سه فاز تمام موج

برای بدست آوردن شکل موج ولتاژ بار در اتصال ۳-۱۸ الف، می‌توان به دو طریق زیر عمل کرد: روش اول اینکه، می‌توان ولتاژ بار را مجموع دو ولتاژ نیم موجی در نظر گرفت که در طرف مثبت و منفی بار نسبت به نقطه خنثای تغذیه ظاهر می‌شوند. همانطوریکه شکل موج‌های شکل ۳-۱۸ ب نشان می‌دهند، شکل موج ولتاژ بار حاصل دارای مشخصه شش-پالسی بوده و ماکزیمم مقدار لحظه‌ای آن برابر ماکزیمم ولتاژ خط خواهد بود. روش دیگر این است که در نظر گرفته شود که دو دیودی که هدایت می‌کنند آنهایی هستند که به دو خطی متصل شده‌اند که در آن لحظه ولتاژ آنها در بالاترین مقدار است. این بدین معنی‌است که هنگامی که v_a مثبت‌ترین فازاست دیود D_1 هدایت می‌کند و در خلال این پریود هدایت، ابتدا v_b منفی‌ترین فاز بوده و دیود D_6 هدایت می‌کند تا وقتی که v_c منفی‌ترین فاز می‌گردد و جریان دیود D_6 به دیود D_2 منتقل می‌شود. ولتاژ بار در خلال یک سیکل، به نوبت شش موج ولتاژ سینوسی را تعقیب می‌نماید اینها عبارتند از: $v_a - v_b$, $v_a - v_c$, $v_b - v_c$, $v_b - v_a$, $v_c - v_a$, $v_c - v_b$

www.iEPE.ir



(الف) دیاگرام مداری



(ب) شکل موجها

شکل ۳-۱۸ مدارپل سه فاز

که همگی دارای مقدار ماکزیمی برابر با ماکزیمم ولتاژ خط (یعنی $\sqrt{3}$ برابر ولتاژ فاز) هستند. گرچه در شکل ۳-۱۸ منبع تغذیه بصورت اتصال ستاره است، می‌توان بخوبی از اتصال مثلث نیز استفاده کرد.

مقدار متوسط ولتاژ بار را می‌توان از مجموع دو شکل موج سه پالسی با استفاده از معادله (۳-۳۴) بدست آورد.

$$V_{dc} = 2\times\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \qquad (۳-۴۰)$$

همچنین می‌توان مقدار متوسط ولتاژ را مستقیماً از روی ولتاژ بار شش پالسی بدست آورد.

- البته در تمامی موارد بایستی افت ولت دیود هدایت کننده از آن کسر شود. در اینجا چون دو دیود بطور سری با بار قرار دارند به اندازه دو برابر افت ولت دیود از مقدار فوق کسر می‌شود. شکل موج‌های جریان نشان می‌دهند که هر دیود به مدت یک سوم سیکل جریان بار را هدایت می‌کند و مرتبه کموتاسیون مشخص کننده تعداد دیود موجود در مدار است. شکل موج ولتاژ دیود v_{D1} را می‌توان از تفاوت بین ولتاژ فاز v_a و ولتاژ نقطه بالای بار نسبت به نقطه خنثای منبع تغذیه (N)، بدست آورد. ماکزیمم ولتاژ معکوسی که در دو سر دیود ظاهر می‌شود برابر مقدار ماکزیمم ولتاژ خط است. همان طوری که شکل ۳-۱۸ ب نشان می‌دهد جریان تغذیه متقارن است و به شکل شبه مربع[1] است. البته دراین حالت شکل موج جریان در مقایسه با اتصال پل تکفاز، به شکل سینوسی نزدیکتر است.

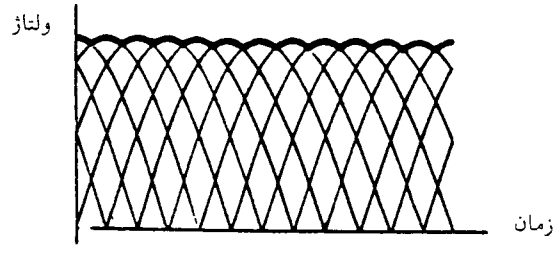
۳-۵-۷ مدارهای دوازده پالسی

در شکل ۳-۱۹ شکل موج ولتاژ دوازده پالسی نشان داده شده است و واضح است که این شکل موج به ولتاژ مستقیم (dc) نزدیک‌تر است. شکل موج نشان داده شده، نمونه شکل موج جریانی است که از منبع تغذیه سه فاز ac کشیده می‌شود که در مقایسه با مدارهای با پالس کمتر، به شکل موج سینوسی نزدیک‌تر است.

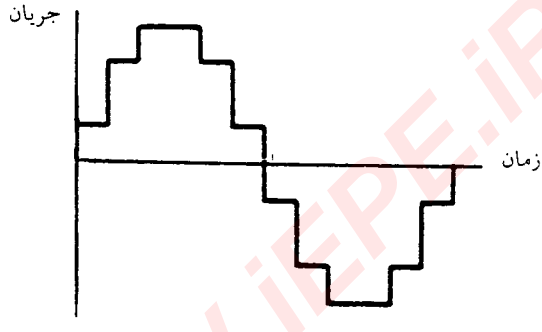
سه نوع اتصال دوازده پالسی که عمومیت دارند، در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است. اتصال نیم‌موج شکل ۳-۲۰ الف، تعمیم مدار ستاره دوبل است که قبلاً تشریح شد. در این مدارها گروه ستاره جابجا شده‌اند تا دوازده فاز با اختلاف زاویه °۳۰ را تولید نمایند و از طریق ترانسفورماتورهای بین دو فاز (راکتورها) به بار متصل گردیده‌اند. چهار دیود بطور همزمان هدایت می‌کنند و فقط به اندازه افت - ولت یک دیود از مقدار متوسط ولتاژ بار کاسته می‌شود.

1- Quazi Square

WWW.IEEE.IR



(الف) شکل موج ولتاژ خروجی



(ب) شکل موج جریان ورودی

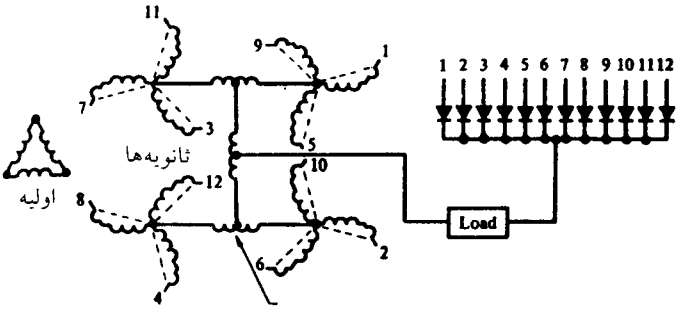
شکل ۳-۱۹ شکل موج ولتاژ خروجی و جریان ورودی در مدار دوازده پالسی

اتصال تمام موج که از دو پل سه فاز تشکیل شده است در شکل ۳-۲۰ ب و پ نشان داده شده است. تغذیه ac از ترانسفورماتوری که دارای دو ثانویه یکی با اتصال ستاره و دیگری با اتصال مثلث است، صورت می‌گیرد. در این روش ولتاژهای سه فازی که دو پل را تغذیه می‌نمایند به اندازه زاویه فاز °۳۰ جابجا شده‌اند، بنابراین دو خروجی شش - پالسی بطور متقارن جابجا شده و خروجی دوازده پالسی را ایجاد می‌نمایند.

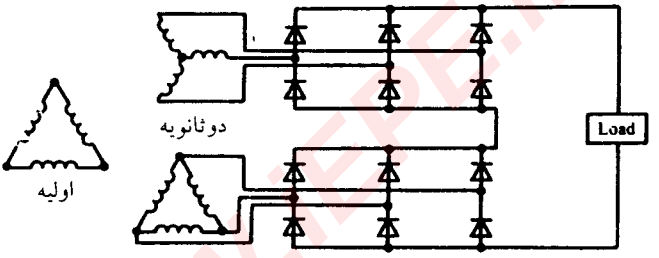
اتصال سری شکل ۳-۲۰ ب برای بارهایی که به ولتاژ بالا نیاز دارند مناسب است، زیرا خروجی دو پل با هم جمع می‌شوند اما مقادیر نامی دیود به هر پل وابسته است. همچنین در اتصال سری، برای مقاصد زمین کردن، نقطه میانی قابل دسترسی است. ممکن است مطابق شکل ۳-۲۰ پ، دو پل بطور موازی بهم متصل گردند.

مدارهای باتعداد پالس بیشتر را می‌توان به همین روش بااستفاده ازمدارسه فازاصلی بدست آورد.

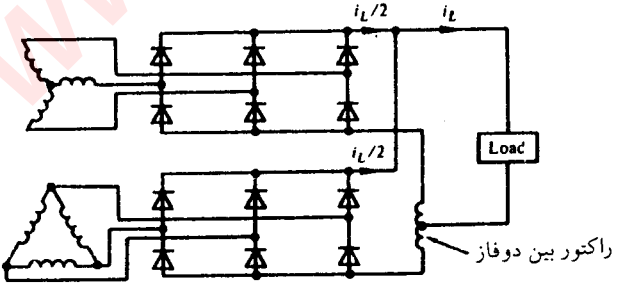
www.iEPE.iR



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۳-۲۰ چند نمونه از اتصالات دوازده پالسی

WWW.IEPE.IR

۳-۶ یکسو کننده‌های قابل کنترل

همانطوریکه در بخش قبل ملاحظه کردیم یکسوکننده‌های غیرقابل کنترل (دیودی) ولتاژ خروجی ثابتی را تولید می‌نمایند. برای اینکه بتوان خروجی قابل کنترلی را بدست آورد، بجای دیود از تریستور استفاده می‌شود که درآن ولتاژ خروجی با تغییر زاویه آتش تریستور کنترل می‌شود و به این ترتیب یکسو کننده های قابل کنترل که بخشی از مبدلهای ac به dc می‌باشند، بدست می‌آیند. این نوع مبدلها بطور وسیع در کاربردهای صنعتی، بخصوص در محرکهای سرعت متغیر[1] مورد استفاده قرار می‌گیرند. همانطوریکه گفته شد این نوع مبدلها بر حسب نوع تغذیه به مبدلهای تکفاز و سه فاز تقسیم می‌شوندو هر نوع ممکن است بصورت نیمه کنترل شده و یا تمام کنترل شده باشد. دراین بخش انواع این مبدلها و طرز کار آنهاتشریح می‌گردد.

۳-۶-۱ یکسوکننده قابل کنترل تکفاز نیم موج

مدار تکفاز نیم موج را می‌توان با استفاده از یک تریستور (بجای دیود) مطابق شکل ۳-۲۱ الف کنترل کرد. با تشریح طرز کار این مدار می‌توان به اصول کار مبدل قابل کنترل پی‌برد. در این مدار مشابه مدار کنترل نشده، بار می‌تواند اهمی و یا اندوکتیو باشد. تریستور وقتی شروع به هدایت می‌نمایدکه ولتاژ دو سرش v_T مثبت است و پالس آتش i_g را دریافت می‌نماید. بنابراین وقتی تریستور در بایاس (گرایش) مستقیم قرار دارد و در $\omega t = \alpha$ پالس آتش به‌گیت آن اعمال می‌گردد، تریستور شروع به هدایت می‌کند و ولتاژ ورودی در دوسر بار ظاهر می‌شود. شکل‌های ۳ - ۲۱ ب و پ نشان می‌دهند که هدایت تریستور به اندازه α نسبت به وضعیتی که دیود بطور طبیعی هدایت می‌کرد، به تأخیر افتاده است. به این زاویه، ***زاویه تأخیر آتش***[2] گفته می‌شود. در این حالت زاویه α نسبت به نقطه صفر ولتاژ تغذیه سنجیده می‌شود. این شکل موج‌ها با توجه به وجود دیود کموتاسیون بدست آمده‌اند که در آنها دیودکموتاسیون از منفی شدن ولتاژ بار (بیش از مقدار افت ولت دیود) ممانعت می‌کند. در خلال پریود هدایتِ تریستور، شکل موج جریان از معادله (۳-۲۱) بدست می‌اید که قبلاً به تفصیل بیان شد و وقتی ولتاژ معکوس می‌شود v_L تقریباً صفر است و جریان بار بطور نمایی کاهش می‌یابد. اگر چنانچه جریان از مقدار جریان نگهدارنده دیود کمتر شود، جریان بار ناپیوسته می‌شود همانطوریکه در شکل ۳-۲۱ پ نشان داده شده است. اگر جریان بارنمایی نزولی تا روشن شدن تریستور در سیکل بعدی، ادامه یابد جریان بار پیوسته می‌گردد چنین شرایطی در شکل ۳-۲۱ ب نشان داده شده‌است.

اگرمقدارپیک‌ولتاژورودی v_mباشد،مقدارمتوسط‌ولتاژخروجی‌ازرابطه‌زیربدست‌می‌آید،

1- Variable speed drives 2- Firing delay angle

www.IEEE.ir

(۴۱-۳)

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

با تغییر دادن زاویه α از 0 تا π می‌توان ولتاژ V_{dc} را از $\frac{V_m}{\pi}$ تا 0 کنترل کرد. چون ولتاژ خروجی فقط دارای پلاریته مثبت است یعنی یک مبدل یک ربعی[1] است، مبدل یک طرفه یا **نیمه‌مبدل**[2] 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،

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

$$=\frac{V_m}{2}\left[\frac{1}{\pi}\left(\pi-\alpha+\frac{\sin 2\alpha}{2}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۴۲-۳)$$

شکل موج ولتاژ دو سر تریستور v_T نشان می‌دهد که در خلال پریود تأخیر ولتاژ مثبت است و همچنین ماکزیمم ولتاژ مستقیم و معکوس آن برابر V_m منبع تغذیه است.

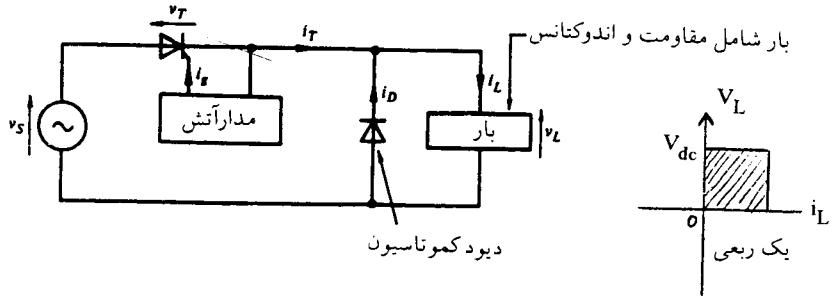
بررسی شکل موجهای شکل ۳-۲۱ بوضوح دو نقش دیود کموتاسیون را نشان می‌دهند، یکی اینکه از منفی شدن ولتاژ بار جلوگیری می‌کند و دیگر اینکه با انتقال جریان بار از تریستور به دیود، اجازه می‌دهد که تریستور در ولتاژ صفر به حالت مسدود (قطع) بازگردد.

مثال ۳-۳

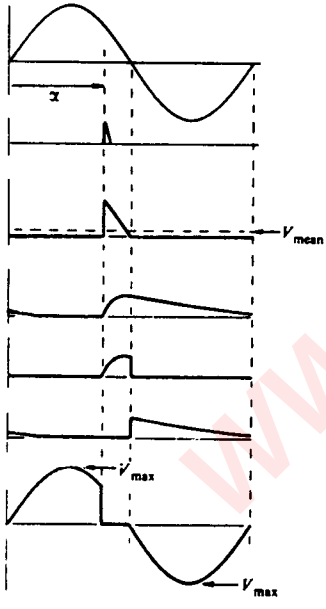
اگر در مدار شکل ۳-۲۱ بار فقط شامل مقاومت اهمی R و زاویه تأخیر آتش $\alpha = \pi/2$ باشد، معین کنید (الف) بازده یکسوکنندگی (ب) ضریب شکل FF (پ) ضریب ریپل RF (ت)ضریب بهره‌برداری ترانسفورماتور TUF و (ث) پیک ولتاژ معکوس PIV تریستور.

1- One quadrant converter 2- Semiconverter

WWW.IEPE.IR

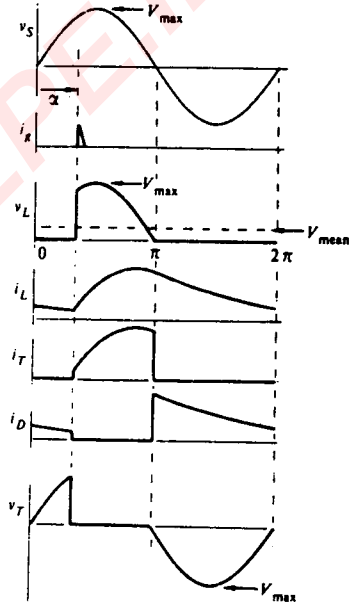


(الف) دیاگرام مداری



(پ)

شکل موجها در زاویه آتش بزرگ
و جریان بار غیرپیوسته



(ب)

شکل موجها در زاویه آتش کوچک
و جریان بار پیوسته

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

WWW.IEEE.IR

حل - با توجه به زاویه آتش α از معادله (۳-۴۱)، $V_{dc} = ۰/۱۵۹۲\ V_m$ و در نتیجه $I_{dc} = ۰/۱۵۹۲\ V_m/R$. از معادله (۳-۴۲)، $V_{rms} = ۰/۳۵۳۶\ V_m$ و $I_{rms} = ۰/۳۵۳۶\ V_m/R$ همچنین $P_{dc} = V_{dc}\ I_{dc} = (۰/۱۵۹۲V_m)^۲/R$ و $P_{ac} = V_{rms}\ I_{rms} = (۰/۳۵۳۶\ V_m)^۲/R$ بنابراین

(الف)بازده یکسوکنندگی برابر است با

$$\eta = \frac{(۰/۱۵۴۲V_m)^۲}{(۰/۳۲۳۶V_m)^۲} = ٪۲۰/۲۵$$

(ب) ضریب شکل برابر است با

$$FF = \frac{۰/۳۵۳۶Vm}{۰/۱۵۹۲Vm} = ۲/۲۲۱ \text{ یا } ٪۲۲/۲۱$$

(پ) ضریب ریپل برابر است با

$$RF = (۲/۲۲۱^۲ - ۱)^{\frac{۱}{۲}} = ۱/۹۸۳ \text{ یا } ٪۱۹۸/۳$$

(ت) مقدار rms ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور برابر است با $V_s = \frac{V_m}{\sqrt{۲}} = ۰/۷۰۷V_m$

مقدار rms جریان ثانویه ترانسفورماتور برابر جریان بار است یعنی، $I_s = ۰/۳۵۳۶V_m / R$

مقدار ولت آمپر (VA) نامی آن برابر است با $VA = V_sI_s = ۰/۷۰۷V_m \times ۰/۳۶۳۵\ V_m / R$ بنابراین

$$TUF = \frac{(۰/۱۵۹۲)^۲}{۰/۷۰۷\times۰/۳۵۳۶} = ۰/۱۰۱۴ \text{ و } \frac{۱}{TUF} = ۹/۸۶$$

(ث) پیک ولتاژ معکوس برابراست با

$$PIV = V_m$$

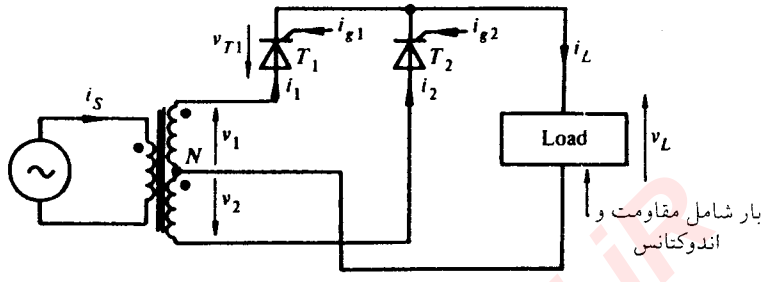
۳-۶-۲ یکسوکننده قابل کنترل تکفاز تمام موج

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 درآن دیودها با تریستورها جایگزین شده‌اند.

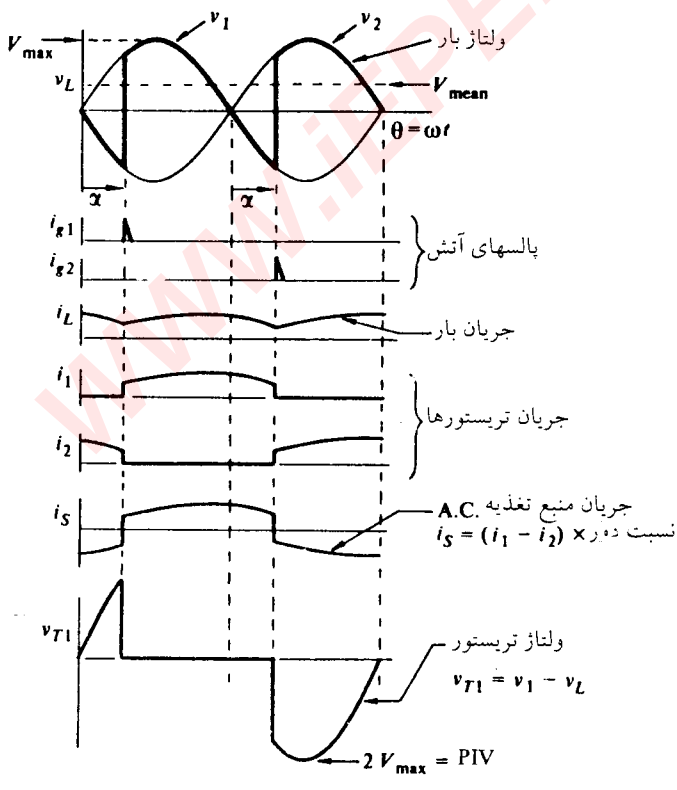
در هرمدار ساده نیم موج، در هر زمان مفروض فقط یک تریستور هدایت می‌کند. همان طوری که قبلاً ملاحظه کردیم در حالت دیودی، عنصر هدایت کننده دیودی است که درآن لحظه

www.iEPE.ir

به فازی که دارای ولتاژ بالاتری است، متصل شده است. حال آنکه در این مدار تریستور مورد نظر می‌تواند در هر لحظه‌ای که ولتاژ آند آن نسبت به کاتد مثبت است، روشن شود. یعنی اینکه مثلاً در شکل ۳-۲۲، می‌توان تریستور T_1 را پس از مثبت شدن ولتاژ v_1 در هر لحظه‌ای از زمان آتش کرد. پالسهای اعمال شده به تریستورها هر یک به اندازه α نسبت به حالت دیودی تأخیر دارند.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۲۲ مدار یکسوکننده قابل کنترل تمام موج

www.IRPE.ir

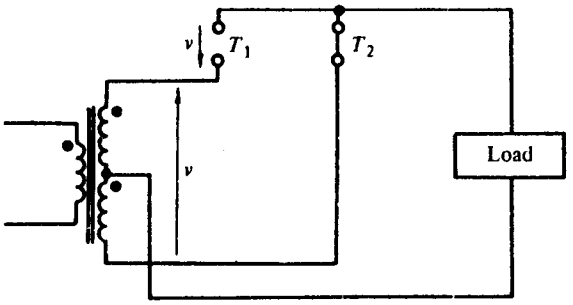
یعنی اگر تریستورها با دیودها جایگزین می‌شدند این زاویه برابر صفر می‌شد.

وقتی تریستور T_1 روشن می‌شود جریان در بار اندوکتیو برقرار می‌شود و تا منفی شده v_1 در حالت روشن باقی می‌ماند. هنگامی که v_1 منفی می‌شود، v_2 مثبت شده و با آتش کردن تریستور T_2، بلافاصله این تریستور روشن شده و جریان بار را به عهده می‌گیرد و ولتاژ معکوس را بر تریستور T_1 اعمال می‌کند و بدین وسیله جریان T_1 به T_2 انتقال می‌یابد. شکل موج ولتاژ دو سر تریستور vT در شکل ۳-۲۲ ب نشان می‌دهد که می‌توان در فاصله‌ای که vT مثبت است در هر لحظه تریستور را با اعمال پالس آتش، به حالت روشن درآورد. پیک ولتاژ معکوس دو سر آن برابر $2vm$ است یعنی ماگزیمم ولتاژ کامل ثانویه ترانسفورماتور در دو سر تریستور ظاهر می‌شود. با مراجعه به شکل ۳-۲۳ به وضوح مشاهده می‌شود که وقتی تریستور T_2 در حالت روشن قرار دارد و تقریباً اتصال کوتاه است تمامی ولتاژ ترانسفورماتور در دوسر تریستور خاموش (قطع) T_1 ظاهر می‌شود.

باتوجه به شکل موج ولتاژبار در شکل ۳-۲۲ ب، مقدارمتوسط ولتاژاز رابطه زیربدست می‌آید،

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

البته بایستی در تمامی مدارهای یکسو کننده توجه داشت که مقدار ولتاژ dc بدست آمده بدون درنظرگرفتن افت ولت وسیله هدایت کننده است. دراینجادر عمل به اندازه افت ولت دو سرتریستور در حال هدایت از مقدار فوق کسرمی‌شود زیرا همواره یکی ازتریستورها بطور سری،با منبع تغذیه قرار می‌گیرد. همچنین دراین حالت فرض شده‌است اندوکتانس باربه‌اندازه‌ای است که جریان بارپیوسته را فراهم می‌کند. وقتی α برابرصفرباشد مقدار ولتاژ متوسط حداکثراست یعنی مشابه حالت دیودی است. وقتی زاویه α برابر ۹۰ درجه است، ولتاژ متوسط



شکل ۳-۲۳ نمایش لحظه‌ای مدار فوق

WWW.iEPE.IR

صفراست یعنی سطوح زیر منحنی مثبت ومنفی موج ولتاژ باهم برابر می‌گردند.این موضوع هم‌از روی معادله فوق که تغییرات آن کسینوسی است و هم از روی شکل موجهابه وضوح ملاحظه می‌گردد. همان‌طوری 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 تریستورها دارای پریود نیم‌سیکل بوده و در جریان بار پیوسته به شکل موج مربعی متمایل می‌شوند. همان‌طوری که در شکل ملاحظه می‌شود جریان منبع تغذیه غیرسینوسی 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 تریستور جایگزین گردند، مدار پل تکفاز تمام کنترل شده شکل ۳-۲۴ بدست می‌آید. مادامی که تریستورها آتش نشده‌اند هدایت صورت نمی‌گیردو برای اینکه جریان برقرار شود بایستی تریستورهای T_1 و T_2 بطور همزمان در نیم سیکل اول و تریستورهای T_3 و T_4 بطور همزمان در نیم سیکل بعدی روشن شوند. جهت اطمینان یافتن از اینکه تریستورها بطور همزمان آتش می‌شوند هر دو تریستور 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،

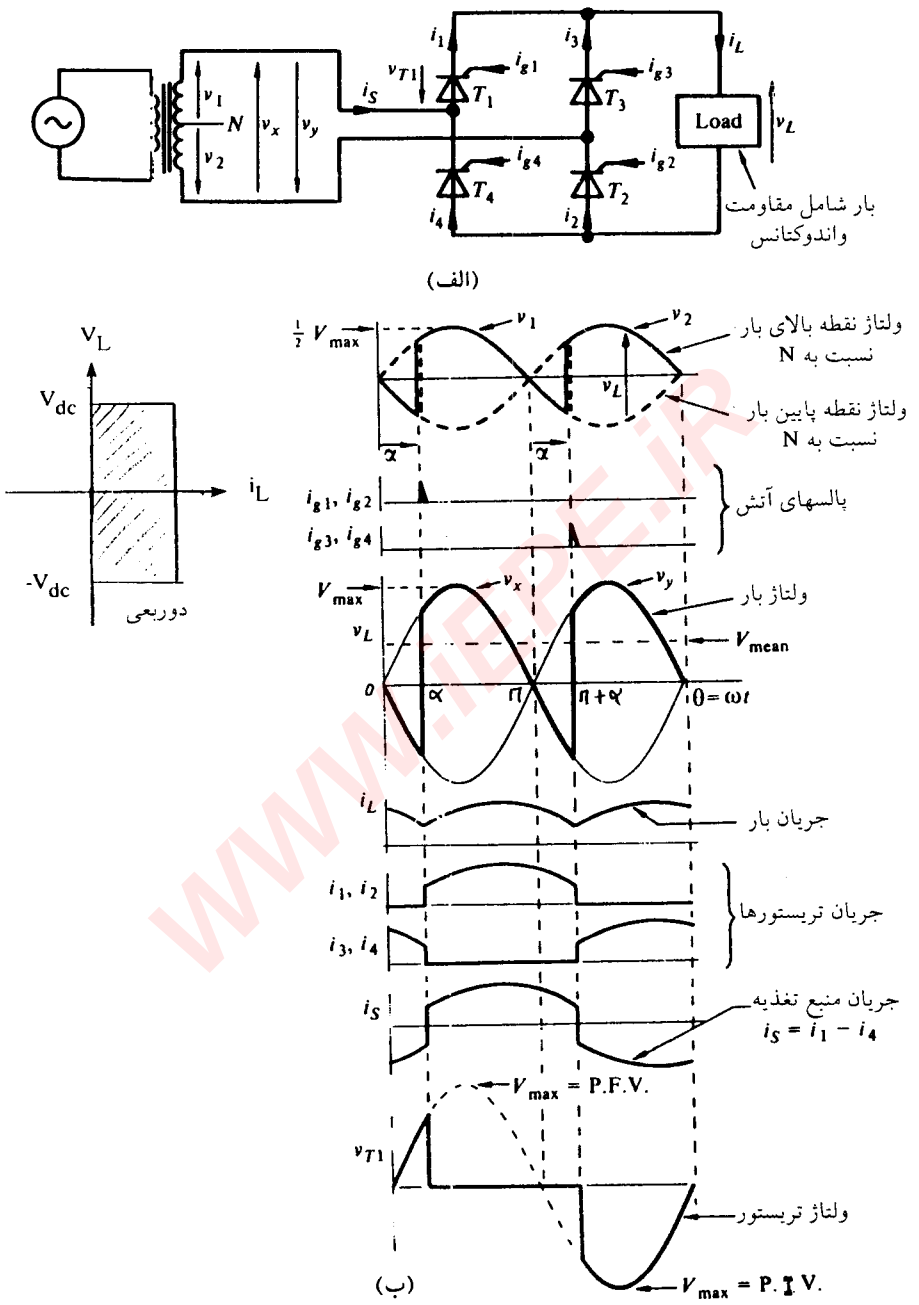
$$V_{dc}=\frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin\omega t \, d(\omega t) = \frac{2V_m}{2\pi}\left[-\cos\omega t\right]_{\alpha}^{\pi+\alpha} = \frac{2V_m}{\pi}\cos\alpha$$

(۴۴-۳)

در این حالت به اندازه افت ولت دو تریستور از مقدار فوق کسر می‌شود. معادله فوق با این فرض که جریان بار پیوسته می‌باشد بدست آمده است. باتغییر 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 مبدلی که در حقیقت یک مبدل دو ربعی[1] است، ***تمام مبدل تکفاز***[2] یا مبدل

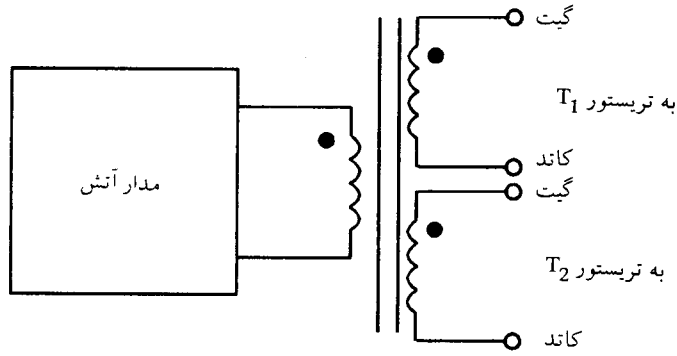
1- Two-quadrant converter 2- Single-phase full converter

WWW.IEPE.IR



شکل ۳-۲۴ مدار پل تکفاز تمام کنترل شده

WWW.IEPE.IR



شکل ۳-۲۵ مدار آتش با اتصالات خروجی

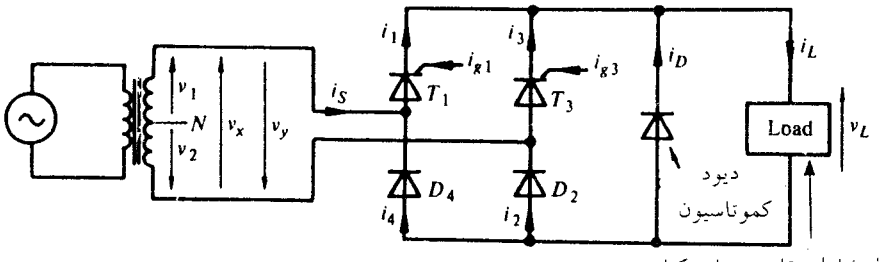
دو طرفه نامیده می‌شود. مقدار rms ولتاژ خروجی از رابطه زیر بدست می‌آید،

$$V_{rms}=\left[\frac{۲}{۲\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m^{۲}\,\mathrm{Sin}^{۲}\omega t\, d(\omega t)\right]^{\frac{۱}{۲}}=\left[\frac{V_m{}^{۲}}{۲\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha}(۱-\mathrm{Cos}۲\omega t)\, d(\omega t)\right]^{\frac{۱}{۲}}$$
$$=\frac{V_m}{\sqrt{۲}}$$

(۴۵-۳)

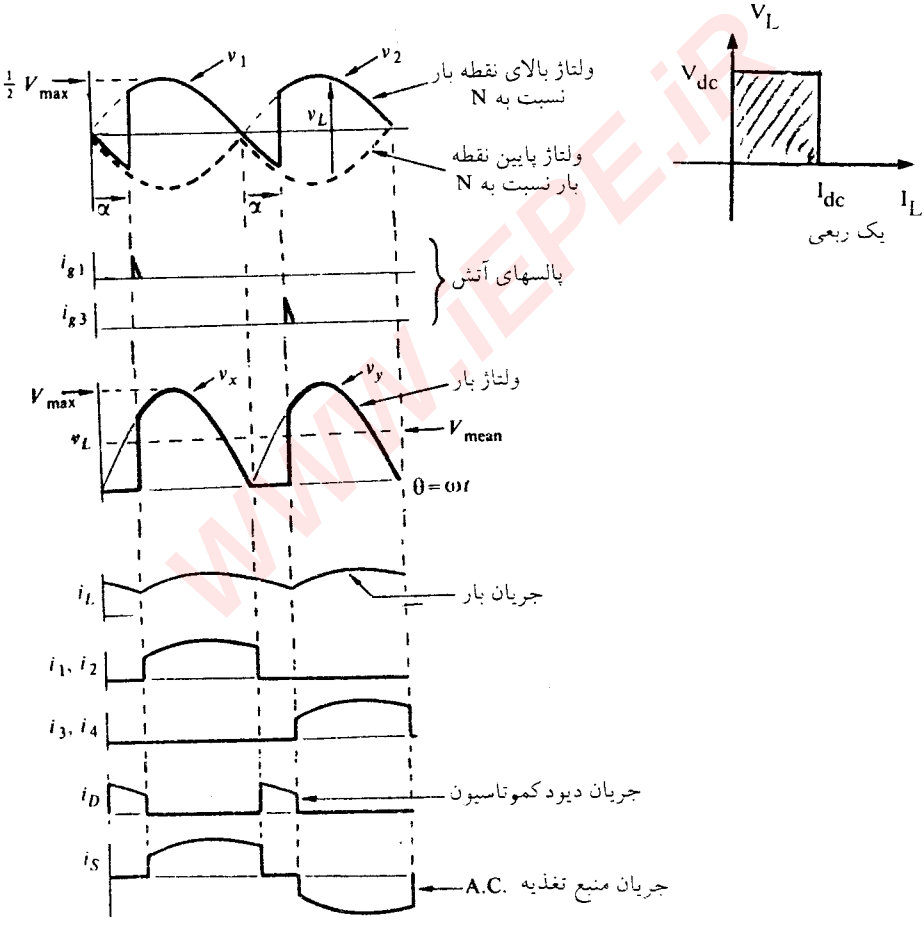
در این نوع مبدل مطابق شکل در فاصله α تا π ولتاژ و جریان ورودی مثبت بوده و در نتیجه توان از منبع به سمت بار عبور می‌کند. بنابراین مبدل در این حالت در مُد یکسوکنندگی کار می‌کند. در فاصله π تا $\pi+\alpha$ ولتاژ ورودی منفی و جریان مثبت است و در نتیجه توان معکوس بوده و از بار به سمت منبع عبور می‌کند. در 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 تریستورهای $T_۲$ و $T_۴$ با دیودهای $D_۲$ و $D_۴$ 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 مداربه این صورت است که در خلال نیم‌سیکل مثبت، تریستور $T_۱$ در بایاس (گرایش) مستقیم قرار دارد و وقتی تریستور در زاویه α آتش می‌شود در فاصله $\alpha \le \omega t \le \pi$ بار از طریق $D_۲$ و $T_۱$ به منبع تغذیه ورودی متصل می‌گردد و جریان بار برقرار می‌گردد که این جریان در شکل بصورت $i_۲$ و $i_۱$ نشان داده شده است. در فاصله $\pi \le \omega t \le \pi+\alpha$ ولتاژ ورودی منفی می‌شود لیکن به واسطه اندوکتیو بودن بار، جریان بار ادامه دارد و چون دیود کموتاسیون در

www.iEPE.iR



بار شامل مقاومت واندوکتانس

(الف)



(ب)

شکل ۳-۲۶ مدار پل تکفاز نیمه کنترل شده

WWW.IEPE.IR

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_3 در بایاس مستقیم قرار می‌گیرد و وقتی در لحظه **$\pi+\alpha$ ، T_3 آتش می‌شود، دیود کموتاسیون در بایاس معکوس قرار گرفته، قطع می‌شود و در** نتیجه بار از طریق T_3 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_3 روشن شود، تریستور T_1 به هدایت خود ادامه می‌دهد اما مسیر برگشت جریان بار از دیود D_2 به دیود D_2 منتقل می‌شود (زیرا در این فاصله با منفی شدن ولتاژ تغذیه دیود D_2 بایاس معکوس و D_2 بایاس مستقیم می‌شود.بنابراین جریان بار از طریق T_1 و D_2 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 برای‌جریان آزاد (هرزگرد) بار فراهم می‌کند و موجب می‌شودکه تریستور قطع شده و وضعیت مسدود خود را بازیابد.

مقدار متوسط ولتاژ خروجی برابر است با

$$V_{dc}=\frac{2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi}V_m\sin\omega t\,d(\omega t)=\frac{2V_m}{2\pi}[-\cos\omega t]_{\alpha}^{\pi}=\frac{V_m}{\pi}(1+\cos\alpha) \qquad (۴۶-۳)$$

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

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

$$=\frac{V_m}{\sqrt{2}}\left[\frac{1}{\pi}(\pi-\alpha+\frac{\sin 2\alpha}{2})\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۴۷-۳)$$

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

www.iEPE.ir

مدار نیمه کنترل شده در مقایسه با مدار تمام کنترل شده ارزانتر است اما به واسطه این‌که جریان تغذیه دارای پریودهای صفر است، این جریان دارای اعوجاج بیشتری است. همان‌طوری که ملاحظه کردیم مدار نیمه کنترل شده یک مبدل یک ربعی یا نیمه مبدل است یعنی در آن امکان‌معکوس شدن ولتاژ متوسط (dc) خروجی وجود ندارد و نمی‌توان 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

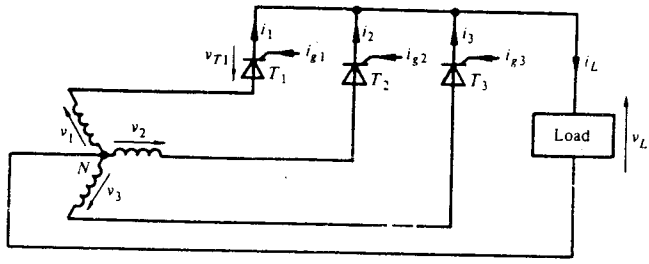
اگر دیودهای شکل ۳-۹ با تریستور جایگزین شوند مدار قابل کنترل شکل ۳-۲۷ بدست می‌آید مقدار متوسط ولتاژ خروجی با کنترل زاویه آتش α قابل تنظیم خواهد بود. زاویه تأخیر آتش نسبت به نقطه‌ای که ولتاژهای فاز منبع تغذیه یکدیگر را تلاقی کرده‌اند، تعریف می‌شود. بنابراین وقتی زاویه تأخیر آتش صفر است، مدار مشابه حالت دیودی است و مقدار متوسط ولتاژ خروجی ماکزیمم است و دیودها در نقاط تلاقی ولتاژهای فاز بطور طبیعی عمل کموتاسیون را انجام می‌دهند. همان‌طوری که شکل ۳-۲۷ ب نشان می‌دهدتا زمانیکه پالس آتش به گیت تریستور اعمال نشده است، تریستور هدایت نمی‌کند، در نتیجه تا فرارسیدن آن لحظه، ولتاژ قبلی بر روی بار قرار می‌گیرد و بنابراین مقدار متوسط ولتاژ بار کاهش می‌یابد. مقدار ریپل افزایش می‌یابد ولی هنوز دارای مشخصه سه پالسی است. شکل موج‌های ولتاژ بار در شکلهای ۳-۲۷ ب و پ اثر زاویه تأخیر آتش بزرگتر را نشان می‌دهند. به ازاء زاویه تأخیر آتش بزرگتر از ۳۰° ولتاژ دارای پریودهای منفی خواهد شد.

مقدار متوسط ولتاژ خروجی از رابطه زیر بدست می‌آید.

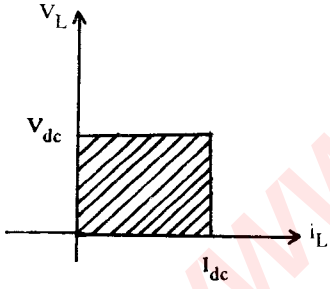
$$V_{dc} = \frac{1}{2\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} V_m \sin\omega t \, d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos\alpha \qquad (۳-۴۸)$$

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

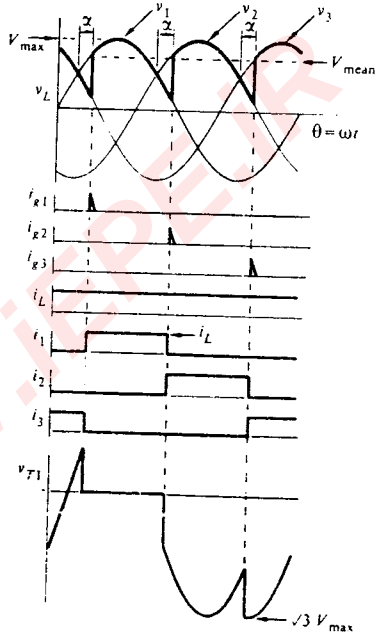
مقدار rms ولتاژ خروجی برابر است با



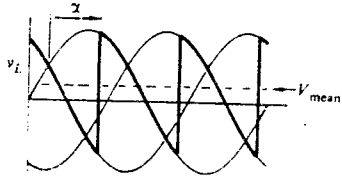
(الف)



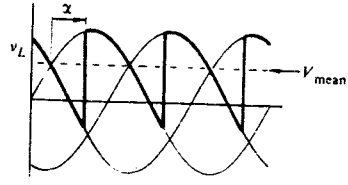
یک ربعی



(ب)



(ت)



(پ)

شکل ۳-۲۷ مدار کنترل شده سه فاز نیم موج

www.iEE.ir

$$V_{rms}=\left[\frac{1}{2\frac{\pi}{3}}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} V_m^2 \sin^2\omega t\, d(\omega t)\right]^{\frac{1}{2}}=\sqrt{3}V_m\left(\frac{1}{6}+\frac{\sqrt{3}}{8\pi}\cos 2\alpha\right)^{\frac{1}{2}}$$

(۴۹-۳)

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 می‌باشد. با فرض اینکه تریستورها دارای افت ولت ۱/۲V باشند، مقدار متوسط ولتاژ بار را در زاویه آتش °۰ و °۴۵ بدست آورید. مقدار نامی جریان و پیک ولتاژ معکوس تریستور چقدر خواهد بود و همچنین متوسط توان تلف شده در هر تریستور چقدر است؟

حل - همانطوریکه قبلاً گفته شد، افت ولت تریستور سبب می‌شود مقدار متوسط ولتاژ خروجی کاهش یابد بنابراین،

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

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

که درآن V_t افت ولت مستقیم تریستور است.

در $\alpha=0°$ داریم

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

در $\alpha=45°$ داریم

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

برای یک جریان ثابت، جریان rms در هر تریستور بوسیله انتگرال‌گیری در خلال یک سیکل

WWW.iEPE.ir

تغذیه بدست می‌آید، یعنی

$$I_{rms}=\left[\frac{۱}{۲\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\frac{۲\pi}{۳}} I_{L}^{۲}\,d(\omega t)\right]^{\frac{۱}{۲}}=\frac{I_{L}}{\sqrt{۳}}$$

بنابراین براساس این فرمول مقدار نامی جریان برابر است با

$$I_{rms} = ۳۲/\sqrt{۳} = ۱۸/۴۷\ A$$

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

$$PRV = \sqrt{۳}\ V_{max} = \sqrt{۳} \times ۳۸۰ = ۵۳۷/۴\ V$$

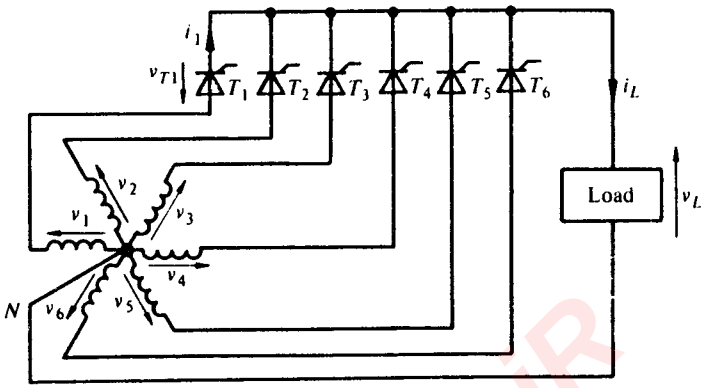
مقدار متوسط توان تلف شده در تریستور به وسیله میانگین‌گیری از توان لحظه‌ای تلف شده در تریستور در خلال یک سیکل بدست می‌آید، یعنی

$$\text{متوسط توان} = \frac{۱}{۲\pi}\int_{\pi}^{\alpha+\frac{۲\pi}{۳}} v_t i_t\,d(\omega t)=\frac{V_t I_t}{۳}=\frac{۱/۲\times ۳۲}{۳}=۱۲/۸\ W$$

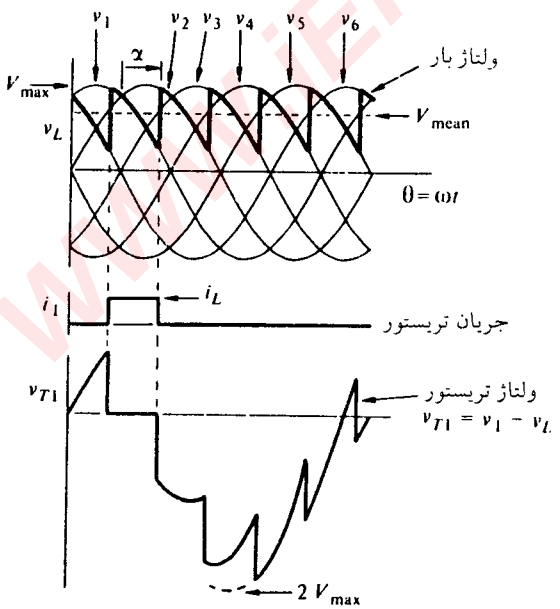
۳-۶-۵ یکسوکننده قابل کنترل شش فاز نیم موج

مدار کنترل شده شش فاز نیم موج که درآن 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 قلهٔ ولتاژهای شش فاز خواهد بود وعمل 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:

WWW.IEPE.IR



(الف)



(ب)

شکل ۳-۲۸ مدار کنترل شده شش فاز نیم‌موج

WWW.iEPE.IR

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

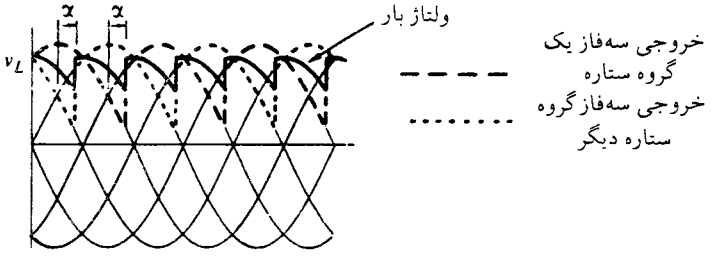
(۵۰-۳)

اگر در شکل ۳-۱۴ الف، دیودها با تریستور جایگزین شوند، مدارتمام کنترل شده با اتصال ستاره دوبل حاصل می‌شود. شکل موج ولتاژ بار در یک زاویه تأخیر آتش α در شکل ۳-۲۹الف 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 °۹۰، 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، ترانسفورماتوربین دو فاز در مدار کنترل شده از نظر فیزیکی سه برابر بزرگتر از حالت دیودی خواهد بود.

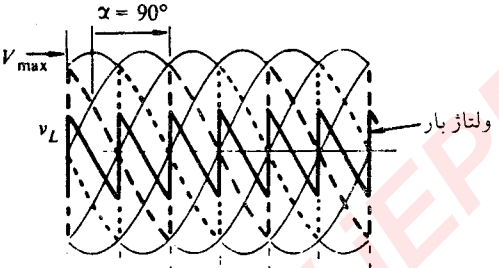
۳-۶-۶ یکسوکننده قابل کنترل پل سه فاز

مبدلهای پل سه فاز در کاربردهای صنعتی تا قدرت حدود ۱۲۰kW 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 کوچک‌است همان‌طوری که درشکل ۳-۳۰ ب ملاحظه‌می‌شود،شکل موج‌ولتاژخروجی(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 °۶۰ آتش می‌شوند، اما نکته‌ای که دراین مدار باید مورد توجه قرار داد مسأله شروع

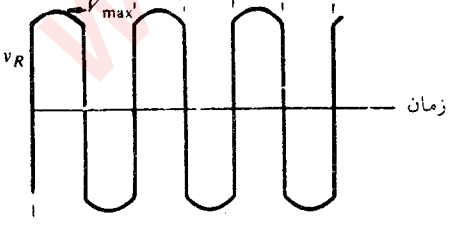
WWW.IEPE.ir



(الف)



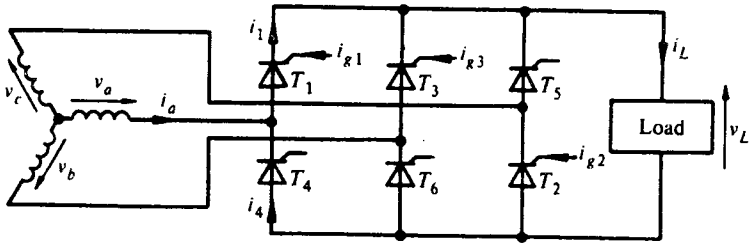
(ب)



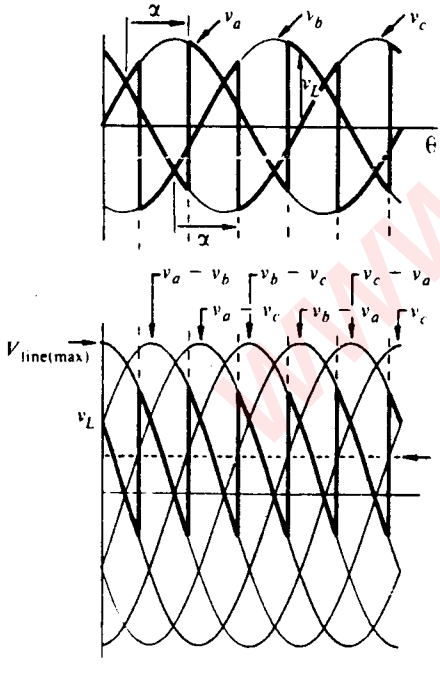
(پ)

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

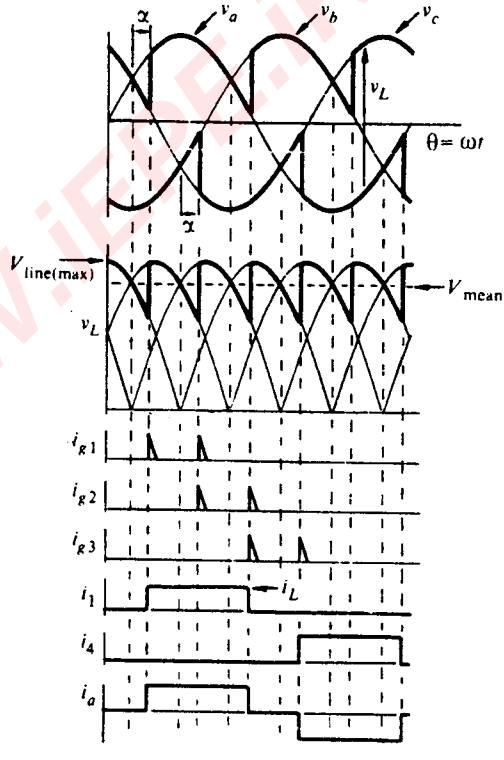
WWW.IEPE.IR



(الف)



(پ)



(ب)

www.iEEE.iR

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 می‌باشند بنابراین بایستی یک زوج تریستور مناسب آتش شوند تا مدار شروع بکار نماید. بنابراین با مراجعه به شکل ۳-۳۰ب، مثلاً اگر وقتی که منبع تغذیه به مدار متصل می‌گردد v_a در مقدار پیک خود باشد، پالس آتش بعدی به تریستور T_2 اعمال می‌شود در اینصورت جریان در مدار برقرار نمی‌شود مگر اینکه همزمان T_1 نیز آتش شود. بنابراین وقتی که به گیت یک تریستور پالسی اعمال می‌شود، بایستی به تریستور دیگری که در مسیرجریان 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 راه‌اندازی گردد. اگر چنانچه فقط به یک پالس اکتفا شود مدار شروع بکار نمی‌کند. البته وقتی مدار راه‌اندازی شد پالس دوم اثری نخواهد داشت (در صورت پیوسته بودن جریان بار) زیرا تریستور قبلاً در وضیعت روشن (وصل) قرار گرفته است. بنابراین در عمل مدارهای آتشِ تریستورها به اینصورت عمل می‌نمایند که هر مدار آتشِ تریستور وقتی پالس آتش به تریستور خودش صادر می‌کند پالسی را به تریستور قبلی اعمال می‌کند. با توجه به شماره‌گذاری تریستورها توالی آتش کردن بصورت ۱۲، ۲۳، ۳۴، ۴۵، ۵۶ و ۶۱ می‌باشد.

شکل ۳-۳۰ پ، شکل موجها رابرای حالتی که زاویه آتش بزرگ است، نشان می‌دهد. در این حالت ولتاژ بار دارای پریودهای منفی است و در نتیجه تشخیص شکل موج ولتاژ بار از روی شکل موج‌های دو گروه سه پالسی مشکل است. برای اینکه بتوان تصویر بهتری از آن داشت، می‌توان به اینصورت عمل کرد. مطابق شکل ۳-۳۰ پ در $\omega t = \pi/6 + \alpha$ تریستور T_4 قبلاً در حال هدایت بوده است، تریستور T_1 روشن می‌شود. بنابراین در فاصله $\pi/6 + \alpha \le \omega t \le \pi/2 + \alpha$ T_1 و T_4 هدایت می‌کنند و ولتاژ v_{ab} که برابر $v_a - v_b$ است، در دوسر بار ظاهر می‌شود در $\omega t = \pi/2 + \alpha$ تریستور T_2 آتش می‌شود و تریستور T_4 بلافاصله در بایاس معکوس قرار می‌گیرد وقطع می‌گردد. بنابراین درفاصله $\pi/2 + \alpha \le \omega t \le 5\pi/6 + \alpha$ تریستورهای T_1 و T_2 هدایت می‌کنند و ولتاژ v_{ac} که برابر $v_a - v_c$ است، در دوسر بار ظاهر می‌شود. اگر توالی آتش کردن را در نظر بگیریم (که قبلاً با شماره‌گذاری تریستورها بیان کردیم) در فواصلی که زوج تریستورها هدایت می‌کنند ولتاژهای خط، $v_a - v_b$، $v_a - v_c$، $v_b - v_c$، $v_b - v_a$، $v_c - v_a$، $v_c - v_b$ در دوسر بار ظاهر می‌گردند وبا استفاده از این ولتاژها و با توجه به لحظات آتش کردن تریستورها می‌توان به سهولت شکل موج ولتاژ بار را بدست آورد و تصور

www.iEPE.ir

بهتری از آن داشت. این شکل موج نشان می‌دهد که مقدار متوسط ولتاژ خروجی در زاویه آتش $\alpha = ۹۰^\circ$ برابر صفر است. مقدارمتوسط آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{dc}=\frac{۱}{\frac{\pi}{۳}}\int_{\frac{\pi}{۶}+\alpha}^{\frac{\pi}{۲}+\alpha} v_{ab}\, d(\omega t) \qquad (۵۱-۳)$$

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

$$v_a = V_m \operatorname{Sin}\omega t$$

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

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

آنگاه مقدار v_{ab} برابر $v_{ab} = v_a - v_b = \sqrt{۳}\, V_m \operatorname{Sin}(\omega t + \pi/۶)$ خواهد بود.

با قرار دادن مقدار v_{ab} در معادله (۳-۵۱) خواهیم داشت.

$$V_{dc}=\frac{\pi}{۳}\int_{\frac{\pi}{۶}+\alpha}^{\frac{\pi}{۲}+\alpha} \sqrt{۳}\, V_m \operatorname{Sin}\left(\omega t+\frac{\pi}{۶}\right) d(\omega t)=\frac{۳\sqrt{۳}}{\pi} V_m \operatorname{Cos}\alpha \qquad (۵۲-۳)$$

مقدار rms ولتاژ خروجی برابر است با

$$V_{rms}=\left[\frac{۳}{\pi}\int_{\frac{\pi}{۶}+\alpha}^{\frac{\pi}{۲}+\alpha} ۳V_m^۲ \operatorname{Sin}^۲\left(\omega t+\frac{\pi}{۶}\right) d(\omega t)\right]^{\frac{۱}{۲}} = \sqrt{۶}\, V_m\left(\frac{۱}{۴}+\frac{۳\sqrt{۳}}{۸\pi}\operatorname{Cos} ۲\alpha\right)$$

$$(۵۳-۳)$$

WWW.iEPE.iR

اگر چنانچه تریستورهای T_2، T_4 و T_6 در مدار شکل ۳-۳۰ با دیود D_2، D_4 و D_6 جایگزین گردند مدار شکل ۳-۳۱ حاصل می‌شود. یک دیود کموتاسیون نیز به‌مدار 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[1] 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.

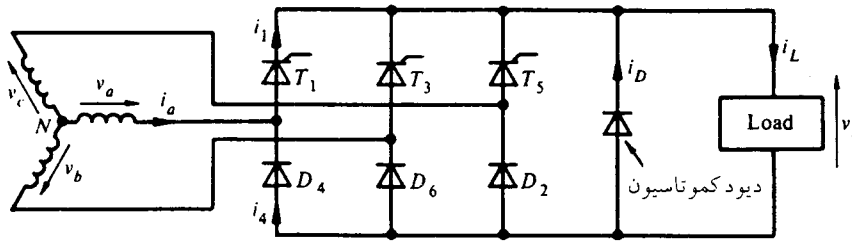
جهت محاسبه مقدار متوسط ولتاژ بار، شکل موج ولتاژ خروجی برای زاویه آتش کوچکتر و بزرگتر از ۶۰° مجدداً در شکل ۳-۳۲ رسم شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود برای زاویه آتش $\alpha \leq 60°$ دیود کموتاسیون نقشی ندارد (زیرا ولتاژ منفی در دوسر بار ظاهر نمی‌شود) و هر زوج تریستور و دیود برای ۱۲۰° هدایت می‌کنند. در این شرایط مقدار متوسط ولتاژ بار از رابطه زیر بدست می‌آید:

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

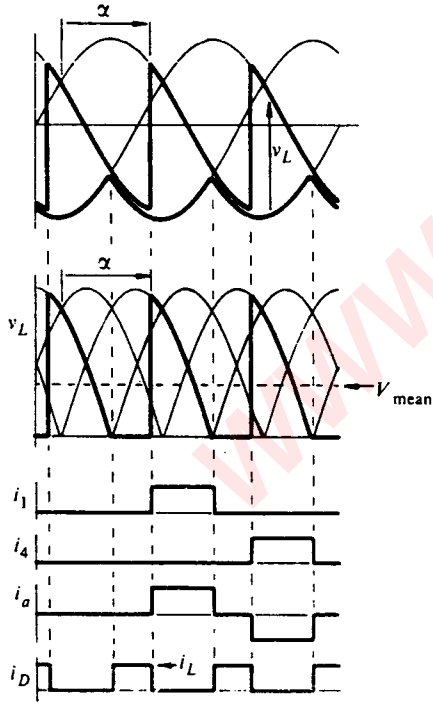
$$=\frac{3}{2\pi}V_{m(line)}(1+\cos\alpha)=\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}V_m(1+\cos\alpha) \qquad (۵۴-۳)$$

1-Notch

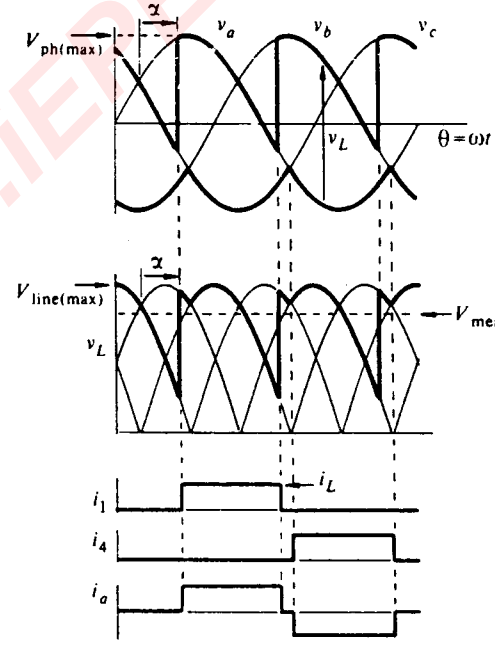
WWW.IEPE.IR



(الف)



(پ)



(ب)

شکل ۳-۳۱ مدار پل سه فاز نیمه کنترل شده

WWW.IEDE.IR

برای زاویه آتش بزرگتر از °۶۰، همانطوریکه در شکل ملاحظه می‌شود دیود کموتاسیون از معکوس شدن ولتاژ بار ممانعت می‌نماید و در این شرایط مقدار ولتاژ بار برابر است با:

$$V_{dc}=\frac{1}{\frac{2\pi}{3}}\int_{\alpha}^{\pi}V_{m(line)}\,\mathrm{Sin}\omega t\,d(\omega t)=\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}V_m(1+\mathrm{Cos}\alpha) \qquad (۳-۵۵)$$

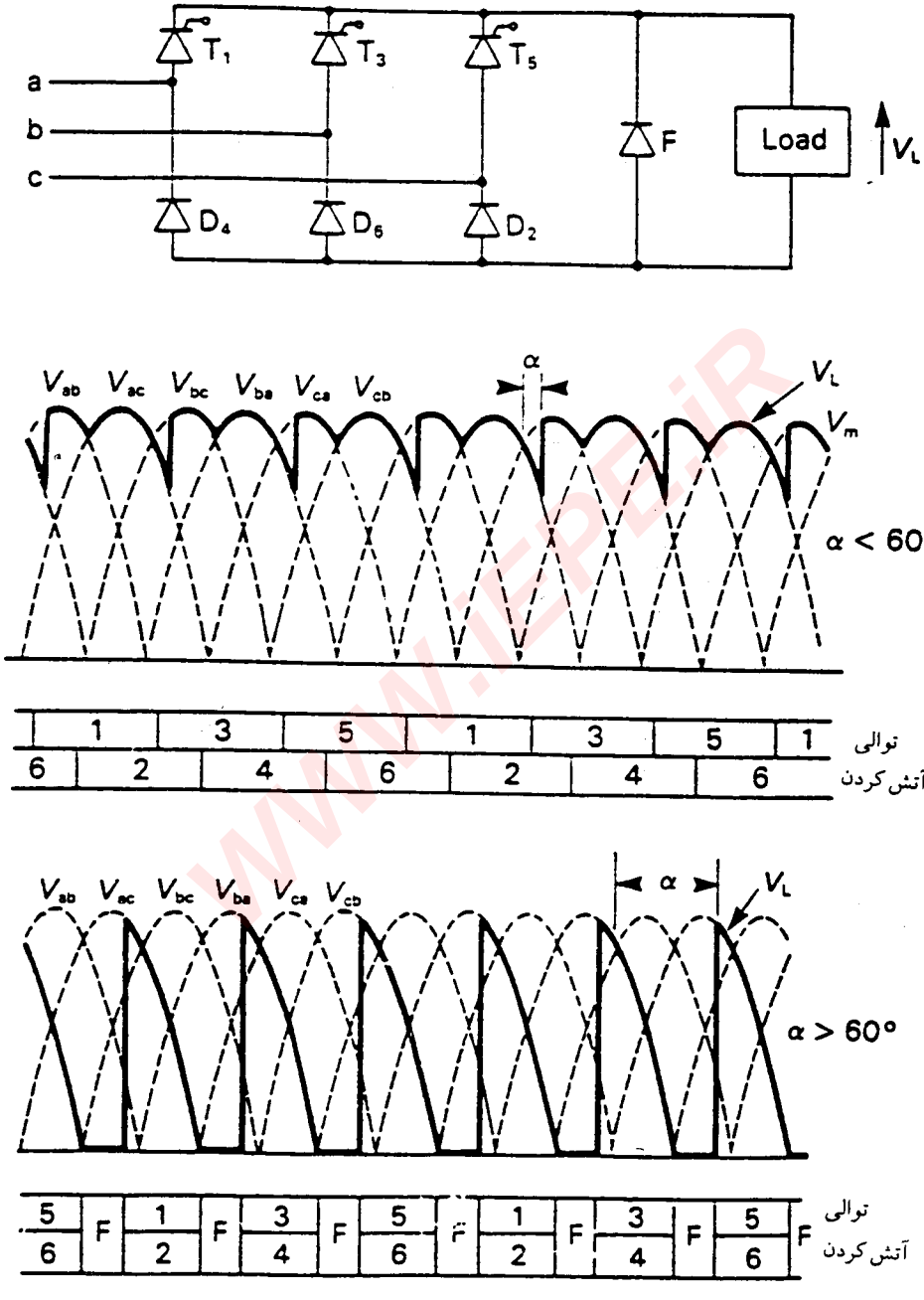
مدارهای نیمه کنترل شده در مقایسه با مدارهای تمام کنترل شده ارزانتر بوده و مسأله راه‌اندازی ندارند، لیکن در شکل موجهای ولتاژ بار و جریان تغذیه مولفه هارمونیک بیشتری وجود دارد.

۳-۷ تداخل (همپوشانی)[1]

در بخش‌های قبل رفتار یکسوکننده‌ها با فرض صرفنظر کردن از امپدانس منبع تغذیه مورد بررسی قرار گرفت. واز این جهت کموتاسیون یا انتقال جریان از یک دیود یا تریستور به دیود یا تریستور دیگر بطور آنی انجام شد. اما در عمل بواسطه وجود اندوکتانس در مدار، جریان دیود نمی‌تواند بطورآنی 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

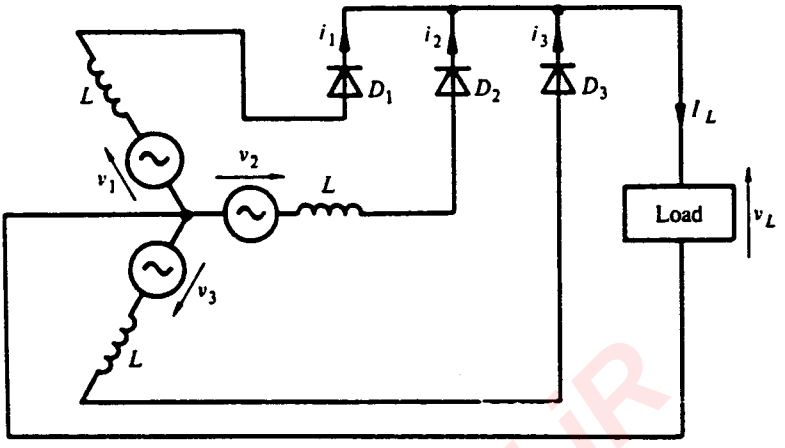
1- Overlap

www.iEPE.IR

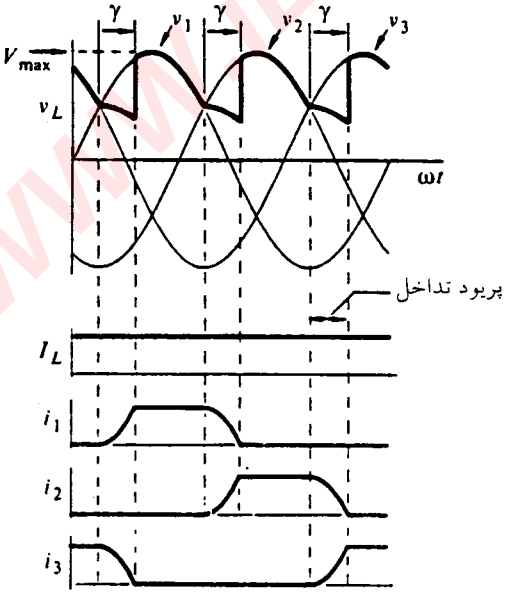


شکل ۳-۳۲ شکل موج ولتاژ بار در مدار پل سه فاز نیمه کنترل شده

WWW.IEPE.iR



(الف) مدار

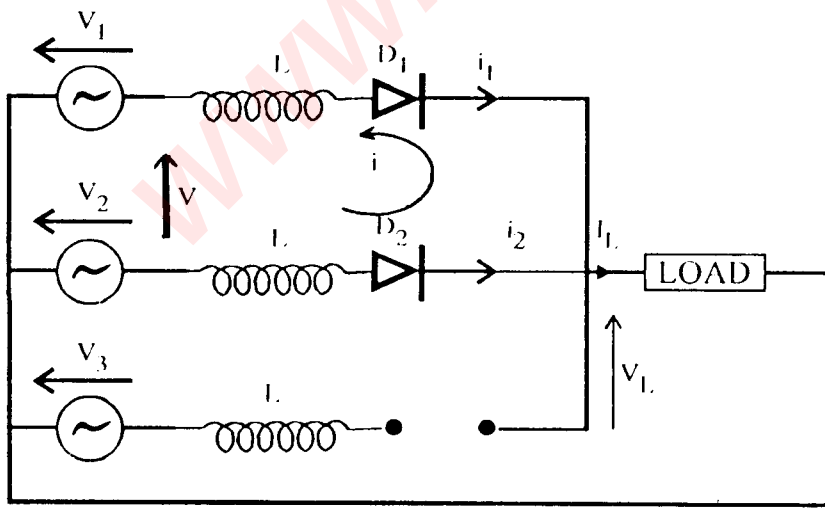


(ب) شکل موجها

شکل ۳-۳۳ پدیده تداخل در یکسو کننده سه فاز نیم موج

WWW.iEPE.IR

کدام با اندوکتانس L سری شده است. همانطوریکه در شکل ۳-۳۳ ب ملاحظه می‌شود کموتاسیون (یا انتقال جریان از یک دیود به دیود دیگر) آنی نیست بلکه در فاصله γ این انتقال انجام می‌گیرد یعنی مدت زمانی طول می‌کشد 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 زاویه‌ای که به ***پریود تداخل (همپوشانی)***[1] موسوم است هم دیودی که وارد مدار می‌شود و هم دیودی که از مدار خارج می‌شود هر دو هدایت می‌کنند. زاویه γ به عنوان ***زاویه کموتاسیون***[2] یا ***زاویه تداخل*** تعریف می‌شود. 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 می‌دهیم. در حقیقت می‌خواهیم 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 می‌کند 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 بلا فاصله به مقدار



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

1- Overlap period 2- Commutation angle

I_L افزایش یابد و در نتیجه دیود D_2 جریان بار را تأمین نماید. این حالت وقتی رخ می‌دهد 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 می‌یابند. یعنی مدت زمانی طول می‌کشد 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 می‌یابد. بنابراین وضعیت مدار قبل در شرایط تداخل مطابق شکل ۳-۳۴ خواهد بود.

برای محاسبه زاویه تداخل می‌توان اینطور عمل کرد. با فرض ثابت بودن جریان بار (که بافرض بی‌نهایت بودن اندوکتانس بار حاصل می‌شود) در پریود کموتاسیون $i_1+i_2=I_L$ می‌باشد. در لحظه شروع کموتاسیون $i_2=0$ و $i_1=I_L$ می‌باشد در این لحظه D_2 شروع به هدایت می‌کند و جریان i_2 با آهنگی معین افزایش می‌یابد و چون مجموع جریانهای i_1 و i_2 ثابت است از جریان i_1 به همان مقدار کاسته می‌شود، یا به عبارت دیگر می‌توان گفت که این جریان در خلاف جهت i_1 از مدار D_1 می‌گذرد. 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 $i_2 = i$ است یعنی اینکه در پریود کموتاسیون یک جریان گردشی i در مسیر بسته شامل دیودهای D_1 و D_2 برقرار می‌شود که این جریان از لحظه شروع کموتاسیون صفر و در پایان کموتاسیون برابر I_L است و از این مطلب می‌توان در محاسبه زاویه تداخل استفاده کرد.

با صرفنظر کردن از افت ولت دیودها داریم،

$$v_2 - v_1 = v = 2L\, di/dt \qquad (۵۶-۳)$$

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 $\sqrt{3}\, V_m$ است که در آن V_m حداکثر مقدار ولتاژ فاز است. بنابراین از لحظه شروع کموتاسیون $t=0$ می‌توان نوشت :

$$v = \sqrt{3}\, V_m \sin \omega t \qquad (۵۷-۳)$$

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

$$\sqrt{3}\, V_m \sin\omega t = 2L\, di/dt$$

$$di = \frac{\sqrt{3}\, V_m}{2L} \sin\omega t \, dt$$

با انتگرال‌گیری از دوطرف معادله از فاصله ۰ تا t خواهیم داشت،

$$i = \frac{\sqrt{3}\, V_m}{2L} \left(- \frac{\cos \omega t}{\omega} \right) + K$$

با توجه به اینکه در $t=0$، $i=0$ می‌باشد مقدار ثابت انتگرال‌گیری K برابر $K = \frac{\sqrt{3}\, Vm}{2\omega L}$ است و در نتیجه

$$i = \frac{\sqrt{3}\, V_m}{2\omega L} (1 - \cos\omega t) \qquad (58-3)$$

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،

$$I_L = \frac{\sqrt{3}\, V_m}{2L\omega} (1 - \cos\gamma) \qquad (59-3)$$

و یا

$$\cos\gamma = 1 - \frac{2L\omega I_L}{\sqrt{3}V_m} \qquad (60-3)$$

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 کوتاسیون 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 Ldi_1/dt و Ldi_2/dt با یکدیگر مساوی و در جهت مخالف هم می‌باشند. بنابراین ولتاژ لحظه‌ای خروجی در خلال پریود کموتاسیون میانگین ولتاژهای دوفاز یعنی برابر

WWW.IEPE.IR

$\frac{v_1 + v_2}{2}$ است. جهت پی‌بردن به اینکه ولتاژ خروجی میانگین ولتاژ دو فاز است می‌توان 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 می‌یابد و i_2 با همان آهنگ افزایش می‌یابد ولتاژ دوسر اندوکتانس‌ها مساوی و مختلف العلامه هستند. اگر دو رابطه فوق با هم جمع شوند ولتاژ خروجی در حین کموتاسیون بدست می‌آید 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، می‌توان 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 می‌آید و دارای شکل موج سینوسی است، اگر بصورت کسینوسی در نظر گرفته شود فاصله انتگرال‌گیری 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 می‌آید،

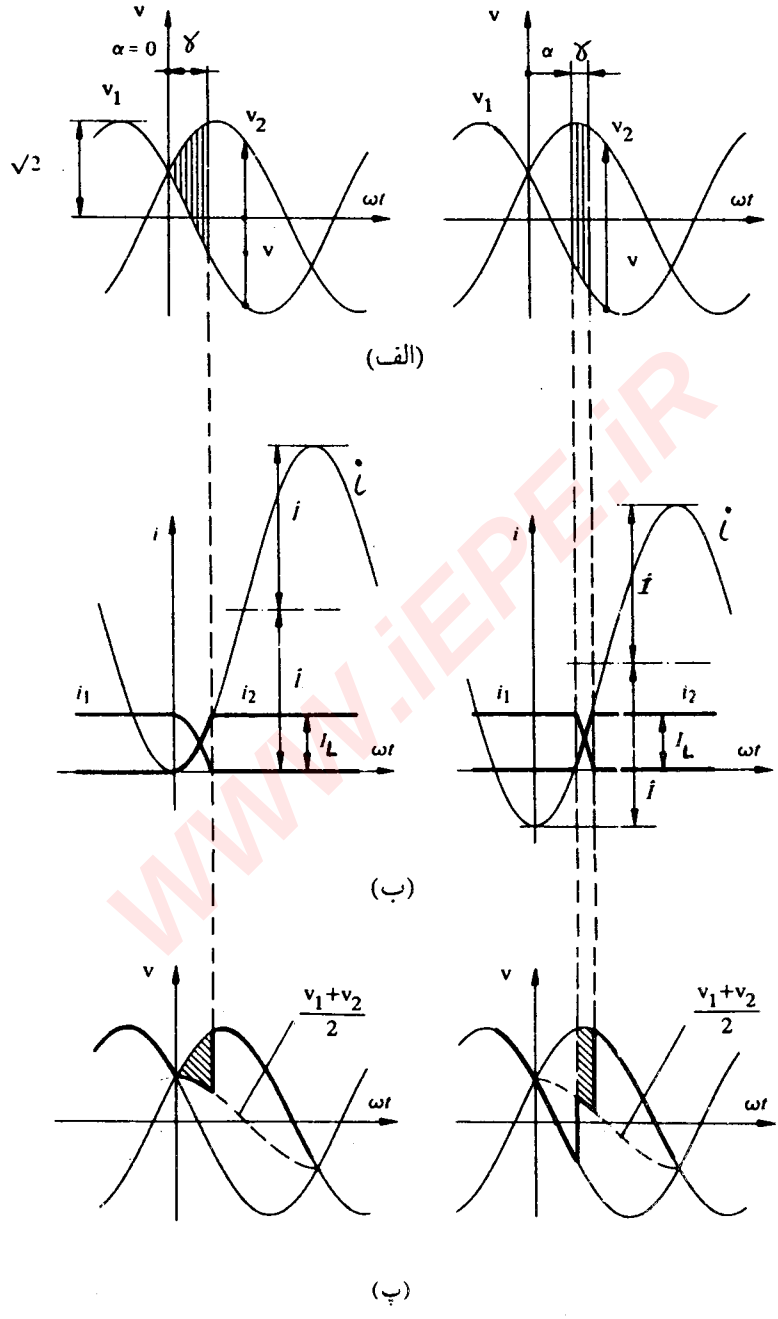
$$V_{dc} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \left[\int_0^{\gamma} V_m \sin\frac{\pi}{6} \cos\theta d\theta + \int_{\gamma+\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_m \sin\omega t \, d(\omega t) \right]$$

$$= \frac{3\sqrt{3} V_m}{4\pi} (1 + \cos\gamma) \qquad (3-61)$$

اگر از تداخل صرفنظر شود یعنی $\gamma = 0$ باشد، معادله (۳-۶۱) به معادله (۳-۳۴) تبدیل می‌شود.

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 می‌گردد. وضعیت ولتاژ و جریان در خلال تداخل همچنین در شکل ۳-۳۵ نشان داده شده است که درآن همانطوریکه مشاهده می‌شود در

WWW.IEPE.IR



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

WWW.iEPE.iR

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 درآن t فاصله زمانی از لحظه شروع کموتاسیون تا صفر شدن جریان i است، داریم

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

و در نتیجه

$$i = \frac{\sqrt{3}V_m}{2L\omega}\left[\cos\alpha - \cos(\omega t + \alpha)\right] \qquad (۶۲-۳)$$

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

$$I_L = \frac{\sqrt{3}V_m}{2L\omega}\left[\cos\alpha - \cos(\gamma + \alpha)\right] \qquad (۶۳-۳)$$

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

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

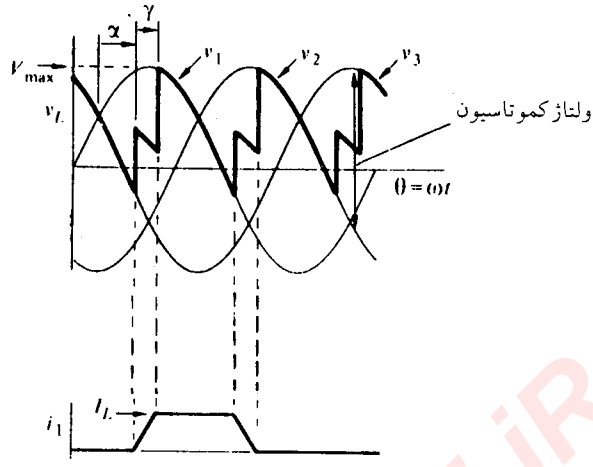
$$= \frac{3\sqrt{3}\, V_m}{4\pi}\left[\cos\alpha + \cos(\alpha+\gamma)\right] \qquad (۶۴-۳)$$

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، همانطوریکه در شکل ۳-۳۷ نشان داده شده است، برابر صفر است. زیرا همانطوریکه قبلاً گفته شد ولتاژ خروجی در این پریود برابر میانگین ولتاژ دو فاز است و ولتاژ دو فازیعنی v_1 و v_2 در این حالت مساوی و مختلف‌العلامه هستند بنابراین میانگین آن صفر است.

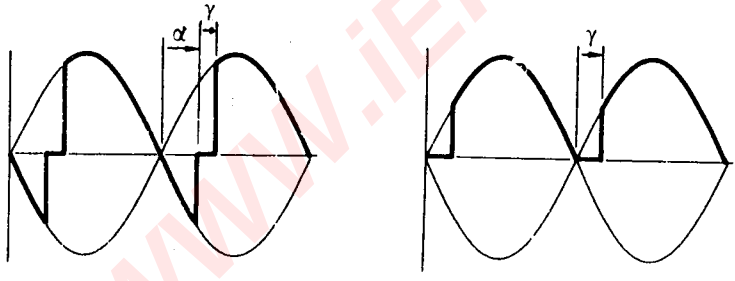
مثال ۳-۵

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

www.iEPE.ir



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



(ب) کنترل شده

(الف) کنترل نشده

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

می‌باشد، از یک منبع تغذیه ۵۰Hz و ۱۲۰V که دارای اندوکتانس ۰/۳۳۳mH است تغذیه می‌شود. با فرض پیوسته بودن جریان در مقدار ثابت ۴A، زاویه تداخل را در دو حالت زیر حساب کنید.

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

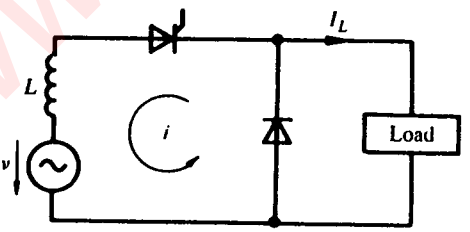
(ب) انتقال جریان از دیود کموتاسیون به یک تریستور وقتی که زاویه آتش ۱۵° است.

حل - قبل از حل این مثال خاطرنشان می‌شود، 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

WWW.iEPE.iR

شروع این فاصله زمانی جریان بار از تریستور به دیود کموتاسیون انتقال می‌یابد، و در پایان این فاصله زمانی جریان بار از دیود کموتاسیون به تریستور دیگر انتقال می‌یابد. با مراجعه به شکل ۳-۲۶ می‌توان به این موضوع پی‌برد. ازآن جایی که دراین شکل ازاندوکتانس 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 تریستور هدایت کننده به دیود کموتاسیون در لحظه‌ای که ولتاژ تغذیه معکوس می‌شود صورت می‌گیرد و انتقال جریان از دیود کموتاسیون به تریستور دیگر در زاویه آتش «صورت می‌گیرد. البته در اینجا از افت ولت وسایل یکسوکننده صرفنظر شده است. در صورتی که برای منبع تغذیه اندوکتانس قایل باشیم، که دراین مثال مورد نظراست، این انتقالات جریان بطور آنی صورت نمی‌گیرند، بلکه در خلال پریودی که به پریود تداخل موسوم است، صورت می‌گیرد.

(الف) در انتقال جریان از تریستور هدایت کننده به دیود کموتاسیون وضعیت به این صورت است که تریستور هدایت کننده جریان بار را تأمین می‌کند و دیود کموتاسیون در گرایش معکوس قرار دارد. در لحظه معکوس شدن ولتاژ تغذیه، جریان تریستور 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 تریستور 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.

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

$$V_m \operatorname{Sin}\omega t = L\, di/dt$$

ویا

$$di = \frac{V_m}{L} \operatorname{Sin}\omega t\, dt$$

با انتگرال‌گیری از رابطه فوق در فاصله ۰ تا t خواهیم داشت:

$$i = \frac{V_m}{L\omega} (۱ - \operatorname{Cos}\omega t) \qquad (۶۵-۳)$$

کموتاسیون در $i = I_L$ که درآن $\omega t = \gamma_۱$ است، کامل می‌شود. بنابراین

$$I_L = \frac{V_m}{L\omega} (۱ - \operatorname{Cos}\gamma_1) \qquad (۶۶-۳)$$

با توجه به مقادیر داده شده در مثال و جایگزینی آن در معادله (۳-۶۶) زاویه تداخل $\gamma_۱$ بدست می‌آید.

$$\gamma_۱ = ۴/۰۲^\circ$$

(ب) در انتقال جریان از دیود کموتاسیون به تریستور دیگر، وضعیت به این صورت است که پس از پایان پریود هدایتِ دیود کموتاسیون، تریستور بعدی آتش می‌شود و جریان بار را تأمین می‌نماید. بنابراین در انتقال جریان از دیود کموتاسیون به تریستور بعدی که در زاویه α صورت می‌گیرددر طی یک پریود تداخل صورت می‌گیرد. این شرایط را می‌توان به کمک مدار شکل ۳-۳۹ نشان داد. در این حالت چون کموتاسیون در زاویه آتش α شروع می‌شود مقدار ولتاژ در لحظه شروع $t=۰$ صفر نبوده و دارای مقدار بیشتر از صفر می‌باشد و بنابراین منجر به زاویه تداخل کوچکتری می‌شود. با توجه به شکل ۳-۳۹ زاویه تداخل در این حالت به شرح زیر محاسبه می‌گردد.

$$v = V_m \operatorname{Sin}(\omega t + \alpha) = L\, di/dt$$

با انتگرال‌گیری مشابه حالت قبل خواهیم داشت.

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

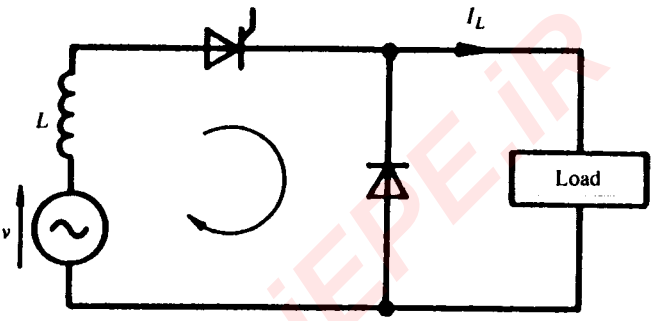
www.iEPE.iR

کموتاسیون در $i = I_L$ که در آن $\omega t = \gamma_2$ است، کامل می‌شود. بنابراین

$$I_L = \frac{V_m}{L\omega}\left[\cos\alpha - \cos(\gamma_2 + \alpha)\right] \qquad (۶۸-۳)$$

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

$$\gamma_2 = ۰/۵۳۶^\circ$$



شکل ۳-۳۹ شرایط مدار در خلال تداخل. وقتی که جریان بار از دیودکموتاسیون به تریستور دیگرانتقال می‌یابد.

مثال ۳-۶

مدار پل تکفاز نیمه کنترل شده شکل ۳-۲۶ که شامل دیودکموتاسیون می‌باشد، بوسیله منبع ۵۰Hz و ۱۲۰V تغذیه می‌شود. 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 ۳ mH باشد واز افت ولت وسایل صرفنظر شود.

حل - با مراجعه به شکل ۳-۲۶ و با فرض اینکه جریان ثابت و برابر ۱۰A باشد مسأله را حل می‌کنیم. مطابق آنچه در مسأله قبل گفته شد و با توجه به معادلات (۳-۶۵) و (۳-۶۶) در شرایط انتقال جریان از تریستور به دیودکموتاسیون داریم،

$$i = \frac{۱۲۰\sqrt{۲}}{۳\times ۱۰^{-۳}\times ۲\pi\times ۵۰}(۱ - \cos\omega t) = ۱۸۰(۱ - \cos\omega t)$$

$$۱۰ = ۱۸۰(۱-\cos\gamma_1) \rightarrow \gamma_1 = ۱۹/۲^\circ$$

WWW.iEPE.iR

بنابراین زاویه تداخل در کموتاسیون تریستور به دیودِ کموتاسیون برابر $\gamma_1 = 19/2^\circ$ است.

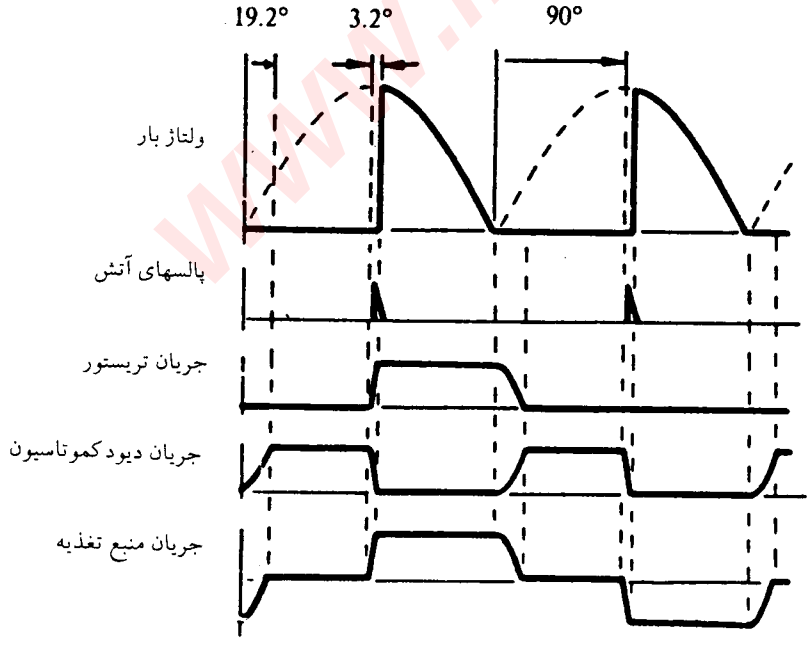
هنگامیکه تریستورْ در زاویه $\alpha = 90^\circ$ آتش می‌شود، در انتقال جریان از دیود به تریستور آتش شونده، زاویه تداخل از معادلات (۳-۶۷) و (۳-۶۸) بدست می‌آیند، بنابراین

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

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

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 یکسوکننده 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

www.iEPE.ir

درادامه‌محاسبه‌ولتاژخروجی‌دریک‌یکسوکننده‌سه‌فازنیم موج که منجر به معادله (۳-۶۴) گردید، ذکر این نکته ضروری است که پدیده تداخل منجر به تغییر مقدار متوسط ولتاژ خروجی به میزان ΔV_d گردیده است،

یعنی $$V_{dc} = V_o - \Delta V_d$$

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

$$V_o = \frac{۳\sqrt{۳}}{۲\pi} V_m \cos\alpha$$

بنابراین با استفاده از معادله (۳-۶۴)

$$\Delta V_d = \frac{۳\sqrt{۳}}{۴\pi} V_m \left[\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma)\right] \qquad (۶۹-۳)$$

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

$$\Delta V_d = \frac{۳L\omega}{۲\pi} I_L \qquad (۷-۳)$$

از معادلات (۳-۴۸) و (۳-۷۰) داریم

$$V_{dc} = \frac{۳\sqrt{۳}}{۲\pi} V_m \cos\alpha - \frac{۳L\omega}{۲\pi} I_L = V_o - R_r I_L \qquad (۷۱-۳)$$

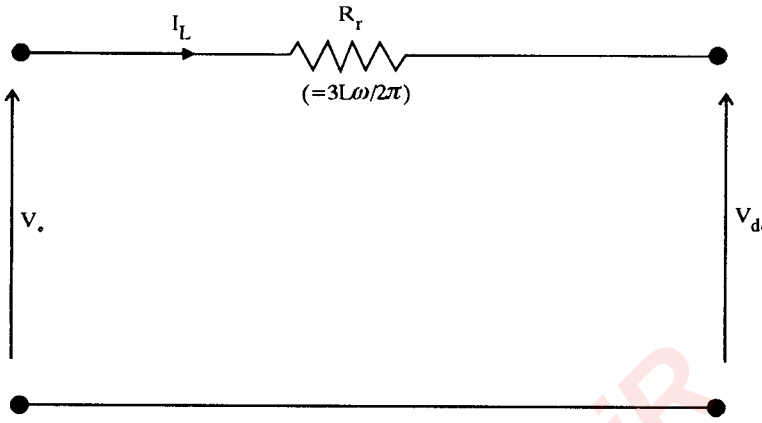
بنابراین عبارت ΔV_d را می‌توان بر حسب مقاومت موثر dc با مقدار R_r و جریان بار I_L در نظر گرفت. در نتیجه می‌توان یکسوکننده را با مدار معادل نشان داده شده در شکل ۳-۴۱ نمایش داد. باید توجه داشت که در این مدار معادل جمله R_r فقط معرف افت ولتاژ ناشی از تداخل است و مفهوم تلفات توان را در برندارد.

۳-۸ معکوس‌سازی

به منظور تشریح پدیده **معکوس سازی**[1] مبدل کنترل شده سه فاز نیم موج شکل ۳-۴۲ الف را در نظر می‌گیریم. با صرفنظر کردن از اثر تداخل، شکل موج ولتاژ خروجی برای

1- Inversion

WWW.IEPE.IR

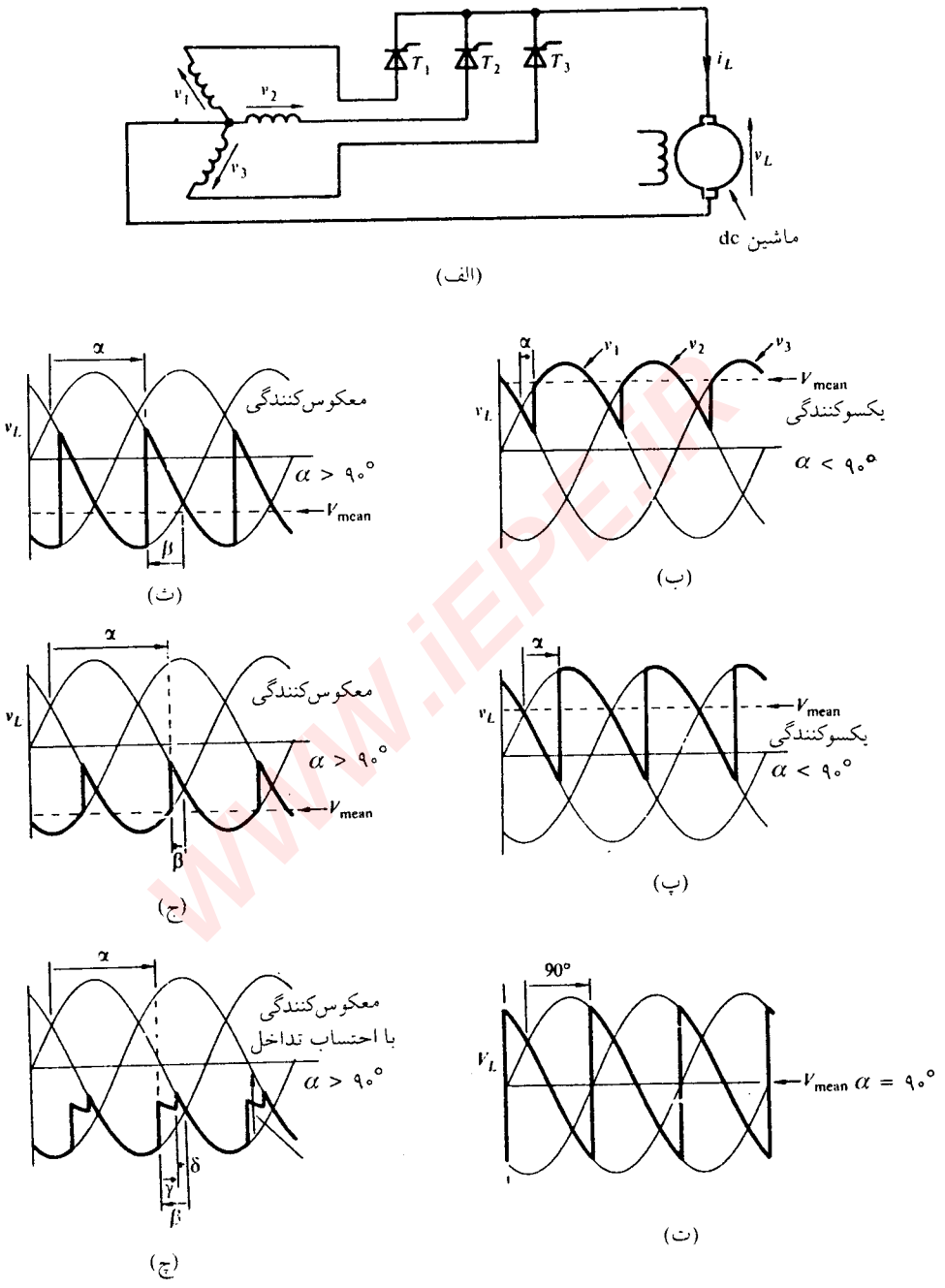


شکل ۳-۴۱ مدار معادل مبدل سه فاز نیم موج در مُد یکسوکنندگی

زوایای آتش مختلف در شکل ۳-۴۲ ب الی ج رسم شده است. همان طوری که ملاحظه می‌شود برای زاویه‌های آتش $\alpha < 90^\circ$، مبدل نقش یکسوکنندگی دارد. درزاویه آتش $\alpha = 90^\circ$، ولتاژ خروجی به‌یک میزان مثبت ومنفی‌می‌شود و درنتیجه مقدارمتوسط ولتاژ خروجی صفر است. برای زاویه‌های آتش $\alpha > 90^\circ$، همان طوری که در شکل ملاحظه می‌شود مقدار متوسط ولتاژ خروجی منفی می‌گردد. شکل موج در حالت $\alpha = 180^\circ$ مشابه $\alpha = 0$ 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 ۳-۴۳ ترسیم شده است. همان طوری که ملاحظه می‌شود وقتی زاویه آتش از 0° تا 180° تغییر می‌کند میانگین ولتاژ خروجی از حداکثر مقدار مثبت تا حداکثر مقدار منفی تغییر می‌نماید. در زاویه‌های آتش بزرگتر از 90° ولتاژ خروجی معکوس (منفی) می‌شود لیکن چون جهت جریان در تریستورها توسط جهت تریستورها مشخص می‌شود و بنابراین نمی‌تواند معکوس گردد، در نتیجه جهت عبور توان از طرف dc مبدل به سمت منبع تغذیه ac خواهد بود. یعنی اینکه اگر دراین حالت یک منبع dc با علامت منفی به ترمینالهای خروجی متصل شود می‌تواند از طریق مدار کنترل به سیستم ac توان تزریق نماید. در این حالت گفته می‌شود که مبدل در *مُد معکوس کنندگی*[1] *(اینورتری)* کار می‌کند. شکل ۳-۴۲ الف اتصال این مبدل به یک ماشین dc را نشان می‌دهد. وقتی زاویه آتش کوچکتراز 90° است و مبدل در مُد یکسوکنندگی کار می کند ماشین dc معرف بار یکسوکننده است و

1- Inverting mode

WWW.IEPE.IR

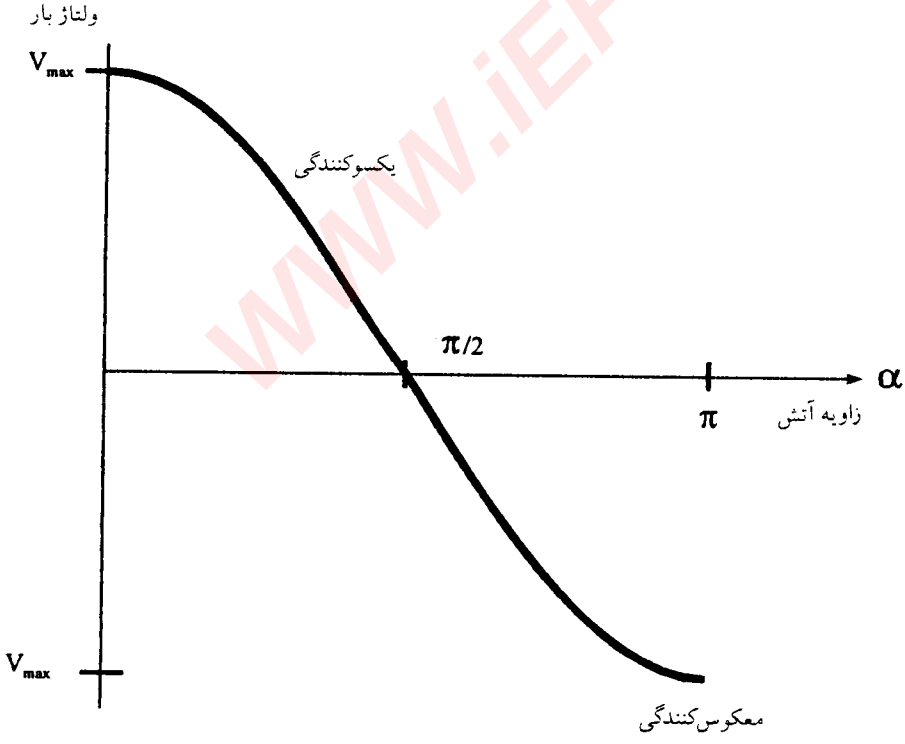


شکل ۳-۴۲ شکل موج ولتاژ خروجی در مبدل سه فاز نیم موج در زوایای آتش مختلف

www.iEPE.ir

بصورت موتور عمل می‌کند. هنگامیکه ولتاژ بار v_l 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 معکوس‌کنندگی کار کند و تریستورها 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 تریستور در صورتی انجام می‌گیرد که ولتاژ لحظه‌ای آندِ تریستوری که می‌خواهد روشن گردد از ولتاژ لحظه‌ای آندِ تریستورِ 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



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

WWW.iEPE.IR

باشد و یا v_2 نسبت به v_1 کمتر منفی باشد. وقتی زاویه آتش به مقدار $\alpha = 180^\circ$ می‌رسد(به شکل ۳-۴۲ ج مراجعه شود) ولتاژهای v_1 و v_2 ابتدا با هم برابر شده و سپس معکوس می‌گردند یعنی ولتاژ لحظه‌ای v_2 از v_1 کمتر می‌شود (یا v_2 نسبت به v_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 درآن محل تریستور آتش می‌شود معمولاً بجای استفاده از زاویه تأخیر آتش α، از زاویه تقدم یا پیشرو آتش[1] β استفاده می‌شود، همانطوریکه در شکل ۳-۴۲ ث و ج نشان داده شده است. بین α و β رابطه زیر برقرار است.

$$\beta = 180^\circ - \alpha \qquad (۳-۷۲)$$

واین 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 صرفنظر کردن از پدیده تداخل ترسیم گردیده‌است. لیکن در شکل ۳-۴۲ چ 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 قبل‌از فرارسیدن نقطه‌ای که درآن ولتاژ دوفاز برابر است (یا ولتاژکموتاسیون صفراست)، 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 ولتاژهامعکوس می‌گردند (همانطوریکه دربالاگفته شد) کموتاسیون انجام نمی‌گیرد (کموتاسیون ناموفق) و جریان بار(یعنی ژنراتور) به تریستورِ در حال قطع شدن (تریستور خارج شونده)[2] 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 چ 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

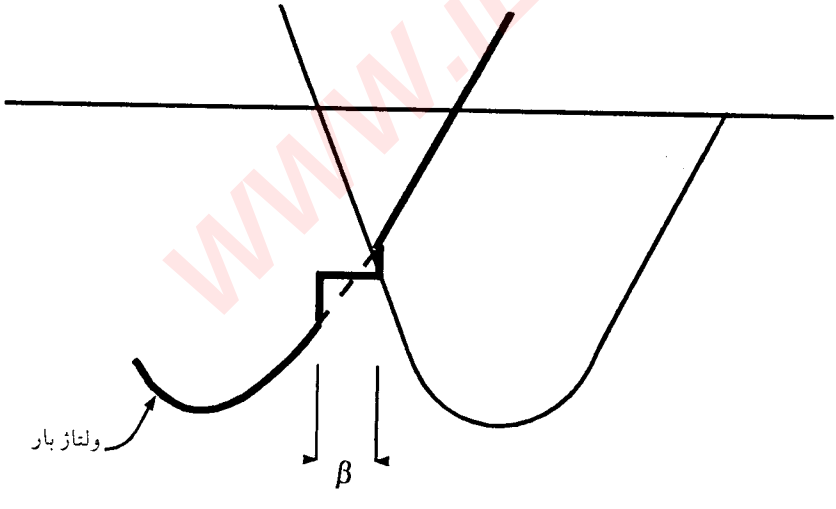
1- Firing advance angle 2- Outgoing Thyristor

www.IEPE.iR

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

$$\delta = \beta - \alpha \qquad (۷۳-۳)$$

زاویه δ به ***زاویه خاموشی***[1] یا ***زاویه بازیافت***[2] معروف است. بواسطه اثر تداخل و ضرورت داشتن‌ولتاژ لحظه‌ای زیادتر بر روی تریستور وارد شونده به مدار (تریستور در حال وصل شدن)[3]، لازم است در شرایطی که به حد ($\alpha = ۱۸۰°$) نزدیک می‌شویم، δ از $۵°$ کمتر نشود تا عمل کموتاسیون بطور موفقیت آمیز انجام شود. بنابراین زاویه آتش بایستی در محدوده بین $۰°$ و زاویه نزدیک به $۱۸۰°$ 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 ۳-۴۴ کموتاسیون ناموفق در مبدلی که در مد معکوس‌کنندگی کار می‌کند بواسطه معکوس شدن ولتاژ قبل از کامل شدن کموتاسیون

1- Extinction angle 2- Recovery angle 3- Incoming Thyristor

WWW.IEEE.IR

عادی بخواهد پالسی فراتر از محدوده مجاز زاویه آتش به تریستور صادر کند، پالس آتشی را در مرز محدوده مجاز به تریستور اعمال می‌نماید تا عمل کموتاسیون کامل با موفقیت انجام شود. بنابراین مثلاً یک پالس آتش End-stop در $\beta = ۲۰°$ به تریستور صادر می‌شود. برای توضیح بیشتر می‌توان به مرجع ۸ مراجعه کرد.

قدر مطلق مقدار متوسط ولتاژ با فرض ثابت بودن جریان و صرفنظر کردن از تداخل از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$|V_{dc}| = \frac{۱}{\frac{۲\pi}{۳}} \int_{\frac{\pi}{۶}-\beta}^{\frac{۵\pi}{۶}-\beta} V_m \sin\omega t \, d(\omega t) = \frac{۳\sqrt{۳}}{۲\pi} V_m \cos\omega t = V_o \qquad (۷۴-۳)$$

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

$$|V_{dc}| = \frac{۱}{\frac{۲\pi}{۳}} \left[\int_{\frac{\pi}{۶}+\gamma-\beta}^{\frac{۵\pi}{۶}-\beta} V_m \sin\omega t \, d(\omega t) + \int_{-\beta}^{-\beta+\gamma} V_m \sin\frac{\pi}{۶} \cos\theta \, d\theta \right]$$

$$= \frac{۳\sqrt{۳}\, V_m}{۴\pi} \left[\cos\beta + \cos(\beta-\gamma) \right] \qquad (۷۵-۳)$$

حال در نظر می‌گیریم که

$$V_{dc} = V_o + \Delta V_d \qquad (۷۶-۳)$$

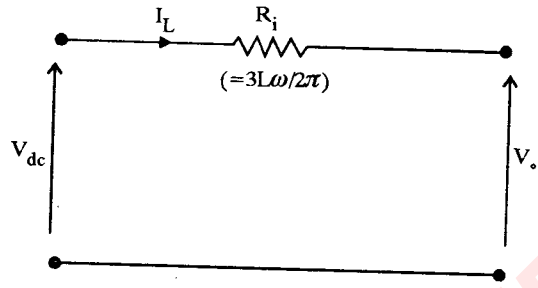
از ترکیب معادلات (۳-۶۸)، (۳-۷۴)، (۳-۷۵) و (۳-۷۶) معادله زیر بدست می‌آید.

$$V_{dc} = \frac{۳\sqrt{۳}}{۲\pi} V_m \cos\beta + \frac{۳L\omega}{۲\pi} I_L = V_o + R_i I_L \qquad (۷۷-۳)$$

که در آن $\Delta V_d = R_i I_L$ و $R_i = \frac{۳L\omega}{۲\pi}$ است.

www.iEPE.iR

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



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

مثال ۳-۷

یک مبدل سه فاز نیم‌موج به منبع تغذیه ۴۱۵V (ولتاژ خط)، متصل شده است و در مد معکوس‌کنندگی کار می‌کند. اگر زاویه خاموشی ۱۸° و زاویه تداخل ۳/۸° باشد مقدار متوسط ولتاژ بار را حساب کنید.

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

$$|V_{dc}| = \frac{۳\sqrt{۳}}{۴\pi} \times \frac{۴۱۵\sqrt{۲}}{\sqrt{۳}} [\cos ۱۸° + \cos(۱۸° - ۳/۸°)]$$

$$= ۲۶۹/۱ \text{ V}$$

۳-۹ 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 ۳-۴۶ را در نظر می‌گیریم. مقدار متوسط ولتاژ برای مُد یکسوکنندگی و مُد معکوس کنندگی به شرح زیر بدست می‌آیند.

(الف) در مُد یکسوکنندگی

WWW.IEPE.IR

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

$$=\frac{pV_m}{2\pi}\left\{\sin(\frac{\pi}{p}+\alpha)-\sin\left[-\frac{\pi}{p}+(\alpha+\gamma)\right]+\cos\frac{\pi}{p}\sin(\alpha+\gamma)-\cos\frac{\pi}{p}\sin\alpha\right\}$$

$$V_{dc} = P\frac{V_m}{2\pi}\sin\frac{\pi}{p}\left[\cos\alpha + \cos(\alpha+\gamma)\right] \qquad (۷۸-۳)$$

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

$$V_{dc} = \frac{P}{\pi}V_m \sin\frac{\pi}{p}\cos\alpha - \frac{PL\omega}{2\pi}I_L \qquad (۷۹-۳)$$

و یا

$$V_{dc} = V_o - R_r I_L \qquad (۸۰-۳)$$

که در آن $R_r I_L$ معرف افت ولت ناشی از پدیده تداخل است و V_o مقدار متوسط ولتاژ مدار باز است. البته از افت ولت وسایل نیمه هادی وافت 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

$$V_{dc} = \frac{P}{2\pi}V_m \sin\frac{\pi}{p}\left[\cos\gamma + \cos(\beta-\gamma)\right] \qquad (۸۱-۳)$$

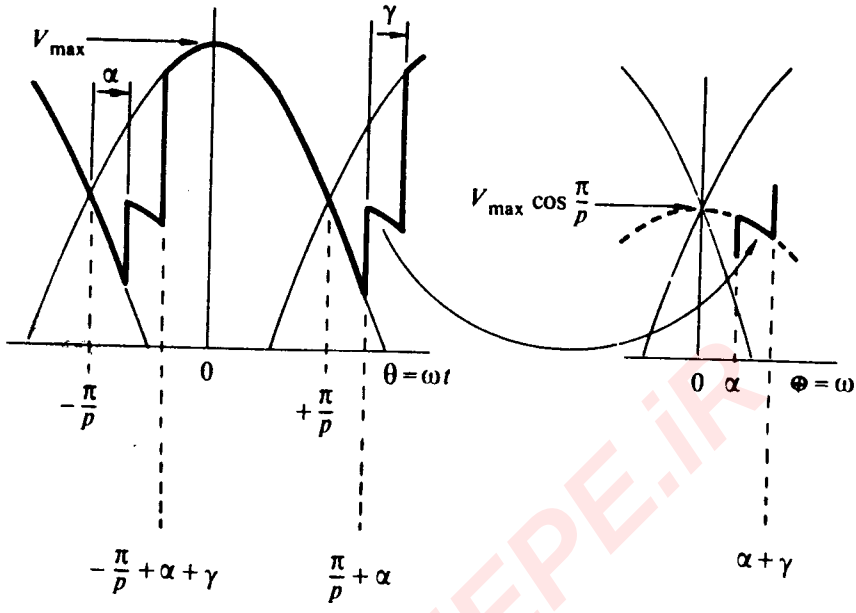
با توجه به آنچه که قبلاً در مورد مبدل سه پالسی گفته شد، معادله (۳-۸۱) را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$V_{dc} = \frac{P}{\pi}V_m \sin\frac{\pi}{p}\cos\beta + \frac{PL\omega}{2\pi}I_L \qquad (۸۲-۳)$$

و یا

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

www.iEPE.iR



شکل ۳-۴۶ شکل 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.

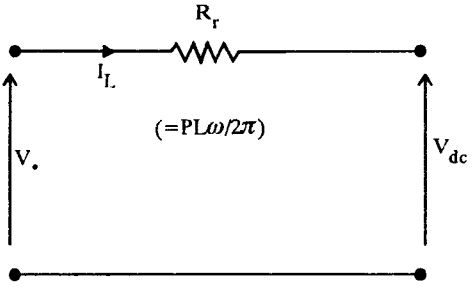
رابطه بین زاویه تداخل γ، جریان بار I_L، ماگزیمم ولتاژ تغذیه V_m و راکتانس کموتاسیون $X = L\omega$، در یکسوکننده P پالسی که در زاویه تأخیر آتش α کار می‌کند، را می‌توان با ترکیب معادلات (۳-۷۸) و(۳-۷۹) بدست آورد. یعنی

$$L\omega I_L = V_m \operatorname{Sin}\frac{\pi}{p}\,[\operatorname{Cos}\alpha - \operatorname{Cos}(\alpha+\gamma)] \qquad (۸۴-۳)$$

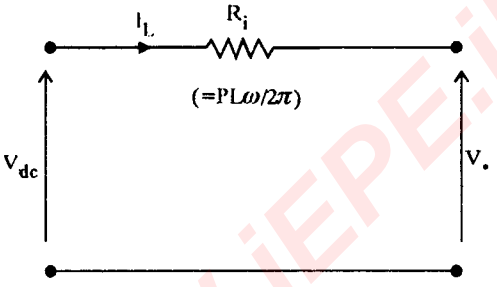
مثال ۳-۸

یک خط انتقال DC که دارای مقاومت اهمی ۰/۲Ω می‌باشد به همراه دو مبدل پل تمام کنترل شده شش پالسی برای مرتبط کردن یک سیستم سه فاز ۵۰Hz و ۴۱۵V (ولتاژخط) به یک سیستم سه فاز ۶۰Hz و ۳۸۰V (ولتاژ خط)، بکار رفته است. اندوکتانس منبع سیستم ۵۰Hz برابر فاز/۱mH و از آن سیستم ۶۰Hz برابر فاز/۱/۲۵mH می‌باشد.

www.iEPE.ir



(الف) حالت یکسوکنندگی



(ب) حالت معکوس‌کنندگی

شکل ۳-۴۷ مدار معادل مبدل P پالسی

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

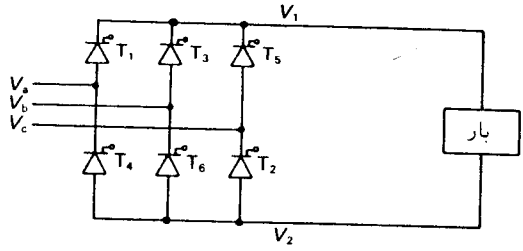
حل - مبدل بکار رفته در سیستم انتقال در شکل ۳-۴۸ نشان داده شده است. با توجه به مدار معادل مبدل (یکسوکننده و معکوس کننده) و ترکیب آن با مقاومت خط ارتباطی DC، مدار معادل شکل ۳-۴۹ بدست می‌آید.

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

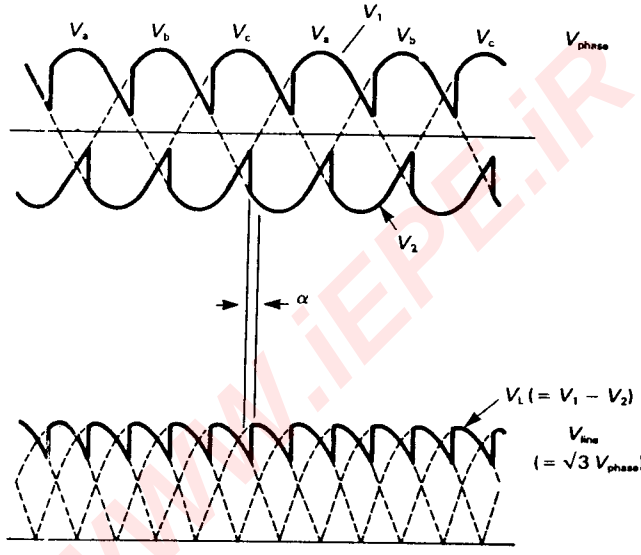
$$R_r = pL\omega/۲\pi = ۶ \times ۲\pi \times ۵۰ \times ۱۰^{-۳}/۲\pi = ۰/۳\ \Omega$$

$$R_i = pL\omega/۲\pi = ۶ \times ۲\pi \times ۶۰ \times ۱/۲۵ \times ۱۰^{-۳}/۲\pi = ۰/۴۵\ \Omega$$

WWW.iEPE.iR

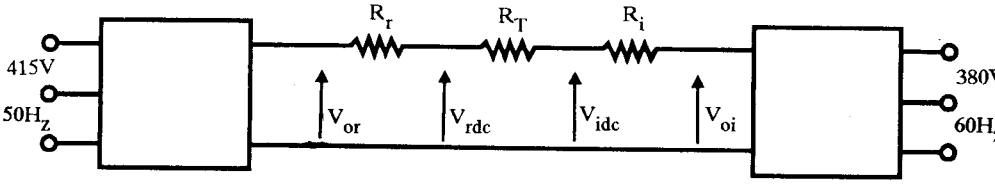


(الف)مبدل پل سه فاز



(ب) ولتاژ بار

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



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

در محاسبه مقادیر فوق توجه شود که تعداد پالس P=۶ است و در محاسبه R_r فرکانس ۵۰Hz و در محاسبه R_i فرکانس ۶۰Hz بکار رفته است.

در معکوس کننده مقدار متوسط ولتاژ ورودی را می‌توان از روی جریان ثابت و توان ثابت عبوری از خط پیدا کرد. یعنی:

$$V_i\,dc = ۱۵۰۰/۵۰ = ۳۰۰\ V$$

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

$$۳۰۰ = \frac{۶}{\pi} ۳۸۰\sqrt{۲}\,\mathrm{Sin}(\frac{۱۸۰}{۶})\,\mathrm{Cos}\beta + ۰/۴۵ \times ۵۰$$

$$۳۰۰ - (۰/۴۵ \times ۵۰) = \frac{۶ \times ۳۸۰ \times \sqrt{۲} \times \mathrm{Sin}۳۰^\circ}{\pi}\,\mathrm{Cos}\beta$$

$$۲۷۷/۵ \times \pi = ۳ \times ۳۸۰\sqrt{۲}\,\mathrm{Cos}\beta$$

$$\mathrm{Cos}\beta = \frac{۲۷۷/۵ \times \pi}{۳ \times ۳۸۰ \times \sqrt{۲}} = ۰/۵۴۰۸ \rightarrow \beta = ۵۷/۲۷^\circ$$

حال مقدار متوسط ولتاژ خروجی یکسوکننده را حساب می‌کنیم.

$$V_r dc = V_i dc + R_r I_L = ۳۰۰ + (۵۰ \times ۰/۲) = ۳۱۰\ V$$

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

$$۳۱۰ = \frac{۶}{\pi} \times ۴۱۵ \times \sqrt{۲} \times \mathrm{Sin}\frac{۱۸۰}{۶}\mathrm{Cos}\alpha - (۰/۳ \times ۵۰)$$

$$\mathrm{Cos}\alpha = \frac{۳۲۵ \times ۲\pi}{۶ \times ۴۱۵ \times \sqrt{۲}} = ۰/۵۷۹۹ \rightarrow \alpha = ۵۴/۵۶^\circ$$

WWW.iEPE.iR

۳-۱۰ رگولاسیون (تنظیم) ولتاژ

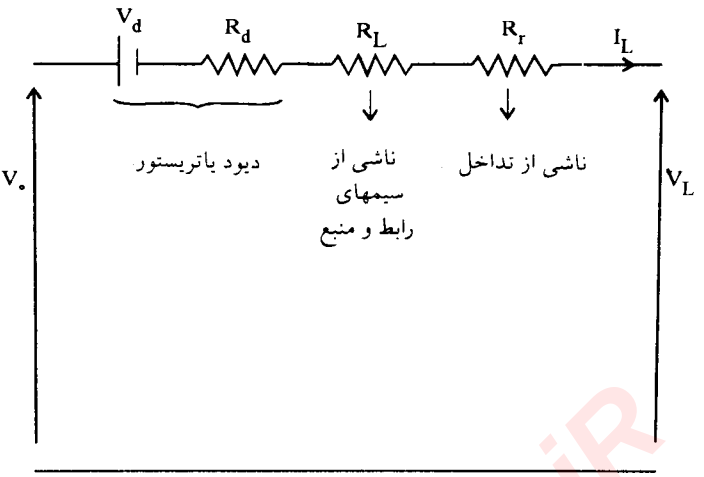
از عبارت **رگولاسیون یاتنظیم**[1] برای بیان میزان افت ولتاژ وسایل یا تجهیزات در شرایط بارداری استفاده می‌گردد و درصد رگولاسیون یا درصد تنظیم ولتاژ بصورت زیر تعریف می‌شود.

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

عواملی نظیر افت دو سر وسایل نیمه هادی (دیود یا تریستور)، مقاومت اهمی سیمهای رابط و منبع تغذیه و همچنین اندوکتانس منبع تغذیه سبب می‌شوند که مقدار ولتاژ خروجی مبدل در بارداری با مقدار آن در بی‌باری یا مدارباز (ولتاژ خروجی وقتی $I_L = ۰$ است) متفاوت گردد. سه افت ولت فوق را می‌توان بوسیله مقاومتهای R_d،R_l و R_r مطابق شکل ۳-۵۰ نشان داد. ولتاژ بدون بار یا مدارباز برابر V_0 و ولتاژ دربار 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 ac که منجر به پدیده تداخل (همپوشانی) می‌گردد، همانطوریکه قبلاً در معادله (۳-۷۹) ملاحظه کردیم، ولتاژ بار به اندازه $(\frac{PL\omega}{۲\pi})I_L$ از مقدار بدون بار آن کاهش می‌یابد(که درآن 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 $R_r = \frac{PL\omega}{۲\pi}$ در شکل ۳-۵۰ نشان داد. همانطوریکه قبلاً دیدیم این افت ولت در مبدلی که در مد معکوس کنندگی کار می‌کند نیز برابر $(\frac{PL\omega}{۲\pi})I_L$ است که به کمک مقاومت $R_i = \frac{PL\omega}{۲\pi}$ نشان داده می‌شود.

افت ولت دوسر دیود یا تریستور 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 تریستور می‌باشند افت ولت ومقاومت معادلی که به آن نسبت داده می‌شود، به زاویه آتش بستگی دارد و مقدار دقیق آن با درنظر گرفتن زاویه آتش بدست می‌آید. مقاومت اهمی سیم‌های ارتباطی و منبع تغذیه ac،غالباً ثابت درنظر گرفته می‌شود. اگر از دو فاز تغذیه بطور همزمان جریان عبور نماید(در عملکردپل)، مقاومت موثر منبع تغذیه ac از جمع مقاومتهای دو فاز بدست می‌آید. این مقاومت با مقاومت اهمی سیمهای ار تباطی جمع شده و به عنوان مقاومت R_l در مدار معادل قرار می‌گیرد.

1- Regulation



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

۳-۱۱ ضریب توان

ضریب توان[1] باری که از منبع تغذیه ac تغذیه می‌شود، توسط عبارت کلی زیر بیان می‌گردد:

$$\text{ضریب توان} = \frac{\frac{1}{T}\int_{\circ}^{T} V i dt}{V_{rms}\, I_{rms}} = \frac{\text{توان متوسط}}{\text{توان ظاهری}} \qquad (۸۴-۳)$$

همانطوریکه می‌دانیم در سیستم ac که جریان و ولتاژ عموماً به شکل سینوسی می‌باشند و با یکدیگر اختلاف فاز ϕ دارند، مقدار انتگرال فوق برابر $V_{rms}I_{rms}\cos\phi$ خواهد شد. یعنی اینکه دراین حالت ضریب توان برابر کسینوس زاویه بین جریان و ولتاژ خواهد بود. لیکن همانطوریکه دراین فصل ملاحظه کردیم، یکسوکننده‌ها از منبع تغذیه متصل به آنها، جریان‌های غیرسینوسی دریافت می‌نمایند که علاوه بر مولفه اصلی در فرکانس تغذیه، دارای مولفه‌های هارمونیک می‌باشند. طبق معادله (۳-۸۵) مولفه‌های هارمونیکی موجود در جریان سبب می‌شوندکه مقدار rms جریان غیرسینوسی (I_{rms}) از مقدار rms مولفه اصلی (I_{1rms})

1- Power Factor

www.iEPE.iR

بیشتر گردد. در نتیجه حتی با فرض سینوسی بودن ولتاژ تغذیه (که دراینصورت مقدار موثر آن با مقدار موثر مولفه اصلی برابر خواهد بود یعنی $V_{rms} = V_{1rms}$)، با توجه به معادله (۳-۸۴) ضریب توان حاصل از مقدار کسینوس زاویه بین ولتاژ و جریان (زاویه جابجایی)[1] کمتر خواهد بود. بنابراین در این حالت نمی‌توان ضریب توان را به صورت کسینوس زاویه جابجایی تعریف کرد.

$$I_{rms} = (I^2_{1rms} + I^2_{2rms} + I^2_{3rms} + ...)^{\frac{1}{2}} \qquad (۳-۸۵)$$

معمولاً می‌توان فرض کرد که ولتاژ تغذیه ac شکل موج سینوسی خود را حفظ می‌نماید و در نتیجه توانی به مولفه‌های هارمونیک نسبت داده نمی‌شود بلکه توان به مولفه‌اصلی در فرکانس تغذیه تعلق می‌گیرد.(اگر باانتگرال گیری توان متوسط برای ولتاژ سینوسی و جریان اصلی و هارمونی‌های مختلف حساب شود، فقط مولفه مربوط به فرکانس اصلی مقدار خواهد داشت بقیه جملات صفر می‌شوند) بنابراین،

$$\text{توان} = V_{1rms} I_{1rms} \cos\phi_1 \qquad (۳-۸۶)$$

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.

$$\text{ضریب توان} = \frac{V_{1rms} I_{1rms} \cos\phi_1}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} \cos\phi_1 = \mu \cos\phi_1 \qquad (۳-۸۷)$$

چون ولتاژ تغذیه سینوسی فرض شده است در این معادله بجای V_{rms} در مخرج کسر، V_{1rms} که با آن برابر است قرار داده‌ایم. در رابطه فوق:

$$\text{ضریب اعوجاج جریان}\ \mu = \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} \qquad (۳-۸۸)$$

$$\text{ضریب جابجایی} = \cos\phi_1 \qquad (۳-۸۹)$$

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

1- Displacement angle

www.iEPE.ir

است، حتی در مدارهای دیودی که در آنها مولفه اصلی ولتاژ و جریان همفاز است و در نتیجه $\cos\phi_1 = 1$ می‌باشد، ضریب توان بدست آمده از معادله (۳-۸۷) کوچکتر از واحد است زیرا در این حالت نسبت $\mu = \frac{I_{1rms}}{I_{rms}}$ کوچکتر از واحد می‌باشد. بنابراین مبدل توان راکتیو مصرف می‌نماید که بایستی بوسیله منبع تغذیه ac فراهم گردد. در موردمبدل‌های بزرگ، این توان بوسیله منبع تولیدکننده توان راکتیو، که می‌تواند یک کندانسورسنکرون[1] و یا جبران کننده‌های استاتیکی[2] مدرن باشد، فراهم می‌گردد. 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 زاویه‌های آتش °۳۰ و °۶۰ محاسبه کنید. از تداخل و افت ولت وسایل نیمه هادی صرفنظر 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:

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

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 $P_L = V_{dc}.I_L$ در نتیجه ضریب توان محاسبه می‌شود،

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

چون جریان بار ثابت و از تداخل صرفنظر شده است،

$$\mu = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0/9003 \text{ و } \cos\phi_1 = \cos\alpha$$

1- Synchronous condenser

2- Static VAR compensator

www.iEPE.ir

که مستقل از زاویه آتش می‌باشد.

الف) برای $\alpha = ۳۰^\circ$

$$\text{ضریب توان} = \frac{۲\sqrt{۲}}{\pi}\cos ۳۰^\circ = ۰/۷۷۹۷$$

ب) برای $\alpha = ۶۰^\circ$

$$\text{ضریب توان} = \frac{۲\sqrt{۲}}{\pi}\cos ۶۰^\circ = ۰/۴۵۰۲$$

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

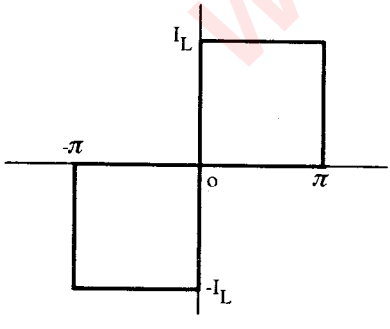
$$I_{rms}=\left[\frac{۱}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} I_L^{۲}\, d\theta\right]^{\frac{۱}{۲}}=I_L\left[\frac{(\pi-\alpha)}{\pi}\right]^{\frac{۱}{۲}}$$

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

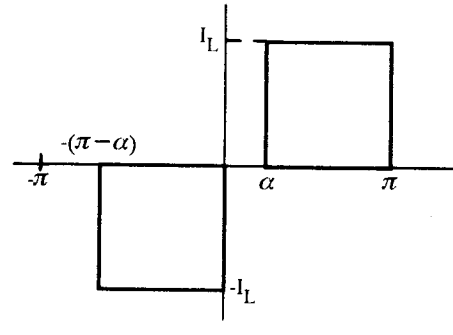
$$V_{dc} = \frac{۱}{\pi}V_m(۱ + \cos\alpha) = \frac{\sqrt{۲}V_{rms}}{\pi}(۱+ \cos\alpha)$$

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

$$\text{ضریب توان} = \frac{V_{dc}.I_L}{V_{rms}.I_{rms}} = \frac{\frac{\sqrt{۲}V_{rms}}{\pi}(۱+\cos\alpha)I_L}{V_{rms}I_L\left[\frac{\pi-\alpha}{\pi}\right]^{\frac{۱}{۲}}} = \frac{\sqrt{۲}}{\pi}(۱+\cos\alpha)\left(\frac{\pi}{\pi-\alpha}\right)^{\frac{۱}{۲}}$$



(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

WWW.IEPE.IR

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

$$b_1=\frac{I_L}{\pi}\int_{-(\pi-\alpha)}^{o} -\mathrm{Sin}\omega t\, d(\omega t)+\int_{\alpha}^{\pi}\mathrm{Sin}\omega t\, d(\omega t)=2I_L(1+\mathrm{Cos}\alpha)/\pi$$

$$a_1=\frac{I_L}{\pi}\int_{-(\pi-\alpha)}^{o} -\mathrm{Cos}\omega t\, d(\omega t)+\int_{\alpha}^{\pi}\mathrm{Cos}\omega t\, d(\omega t)=2I_L(\sin\alpha)/\pi$$

دامنه مولفه اصلی $= (a_1^2 + b_1^2)^{\frac{1}{2}} = 2\sqrt{2}\, I_L(1 + \mathrm{Cos}\alpha)^{\frac{1}{2}}/\pi$.

و در نتیجه

مقدار rms مولفه اصلی $= 2I_L\,(1 + \mathrm{Cos}\alpha)^{\frac{1}{2}}/\pi$

بنابراین

$$\mu = \frac{2}{\pi}\left(\frac{\pi}{\pi-\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}(1 + \mathrm{Cos}\alpha)^{\frac{1}{2}}$$

و

$$\tan\phi_1 = \frac{a_1}{b_1} = \frac{\mathrm{Sin}\alpha}{1+\mathrm{Cos}\alpha} \quad \text{و} \quad \mathrm{Cos}\phi_1 = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\alpha}}$$

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

الف)برای $\alpha = 30^\circ$

ضریب توان $= 0/9201$

$\mu = 0/9226$

$\mathrm{Cos}\phi_1 = 0/9659$

ب)برای $\alpha = 60^\circ$

ضریب توان $= 0/7397$

$\mu = 0/8541$

$\mathrm{Cos}\phi_1 = 0/866$

۳-۱۲ 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،

www.iEPE.iR

مشخص گردد. این مقادیر نامی در موارد متعددی برای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور یکسان نخواهدبود.ازاین‌جهت‌باعملکردترانسفورماتورمعمولی‌که‌درآن‌مقادیرنامی هر دوسیم‌پیچ یکسان است، متفاوت می‌باشد. ولت‌آمپرنامی هرسیم‌پیچی بطور مجزا از حاصلضرب مقدار rms جریان عبوری از آن و مقدار rms ولتاژ دو سر آن بدست می‌آید.

مثال ۳-۱۰

یک یکسوکننده سه فاز نیم موج کنترل نشده، جریان ۲۵A را در ولتاژ ۲۴۰V به بار تحویل می‌دهد. یکسوکننده از ثانویه ترانسفورماتور با اتصال ستاره بهم پیوسته (زیگزاگ) تغذیه می‌شود. اولیه این ترانسفورماتور به منبع تغذیه سه فاز ۶۰۰V (ولتاژ خط) متصل شده است. ولت آمپر سیم پیچی اولیه و ثانویه ترانسفورماتور را محاسبه کنید:

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

$$V_{dc} = \frac{۳\sqrt{۳}V_m}{۲\pi}$$

$$۲۴۰ = \frac{۳\sqrt{۳}V_m}{۲\pi} \rightarrow V_m = \frac{۲۴۰ \times ۲\pi}{۳\sqrt{۳}} = ۲۹۰/۲ \text{ V}$$

بنابراین مقدار rms ولتاژ ثانویه برابر است با

$$V_{۲rms} = \frac{V_m}{\sqrt{۲}} = \frac{۲۹۰/۲}{\sqrt{۲}} = ۲۰۵/۲ \text{ V}$$

همانطوریکه می‌دانیم در اتصال ستاره بهم پیوسته (زیگزاگ) مقدار موثر ولتاژ تولید شده در هر سیم پیچ ثانویه، از جمع برداری ولتاژهای هر قسمت سیم‌پیچی (که با هم مساوی و اختلاف فاز ۶۰° دارند) بدست می‌آید. 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.

$$V_{۲rms} = \sqrt{۳}\ V_{w\ rms}$$

یا

$$V_{w\,rms} = \frac{V_{۲\,rms}}{\sqrt{۳}} = \frac{۲۰۵/۲}{\sqrt{۳}} = ۱۱۸/۴ \text{ V}$$

با توجه به اینکه از هر یک سیم پیچهای ثانویه در $\frac{۱}{۳}$ سیکل جریان عبور می‌کند بنابراین مقدار موثر جریان ثانویه برابر است با

$$I_{۲rms} = \frac{۲۵}{\sqrt{۳}} = ۱۴/۴۳ \text{ A}$$

www.iEPE.ir

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

$$V_{1rms} = \frac{۶۰۰}{\sqrt{۳}} = ۳۴۶/۴ \text{ V}$$

نسبت دور سیم پیچی اولیه به ثانویه برابر است با

$$N = ۳۴۶/۴ / ۱۱۸/۴ = ۲/۹۲۶$$

بنابراین جریانی که از اولیه می‌گذرد برابر است با

$$I_1 = ۲۵ / ۲/۹۲۶ = ۸/۵۴ \text{ A}$$

این جریان در $\frac{۲}{۳}$ سیکل عبور می‌کند و با توجه به شکل موج جریان در اولیه (شکل ۳-۱۰)، مقدار موثر آن بدست می‌آید، یعنی

$$I_{1rms} = \left[\frac{۱}{۲\pi}\int_{o}^{\frac{۴\pi}{۳}} I_L^{۲}\, d\theta\right]^{\frac{۱}{۲}} = \frac{\sqrt{۲}}{\sqrt{۳}} I_L$$

$$I_{1rms} = \left(\frac{I_L^{۲} + I_L^{۲} + ۰^{۲}}{۳}\right)^{\frac{۱}{۲}} = \frac{\sqrt{۲}}{\sqrt{۳}} I_L = \frac{\sqrt{۲} \times ۸/۵۴}{\sqrt{۳}} = ۶/۹۷$$

بنابراین مقدار نامی اولیه و ثانویه محاسبه می‌شوند، یعنی

ولت آمپر نامی اولیه = ۳ × ۶/۹۷ × ۳۴۶/۴ = ۷/۲۴ kVA

ولت آمپر نامی ثانویه = ۶ × ۱۴/۴۳ × ۱۱۸/۴ = ۱۰/۲۵ kVA

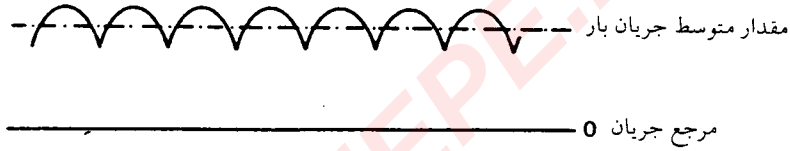
۳-۱۳ مبدل با جریان بار ناپیوسته

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

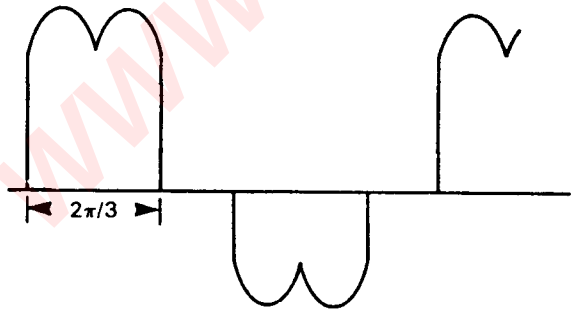
WWW.iEPE.iR

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 بارکم، این جریان کاملاً ناپیوسته می‌شود آنچنان که در شکل ۳-۵۲ پ نشان داده شده است. تجزیه تحلیل رفتار مبدل و بار دراین شرایط به مراتب پیچیده‌تر است و لازم است مقدار هر مولفه بطور مجزا در نظر گرفته شود.

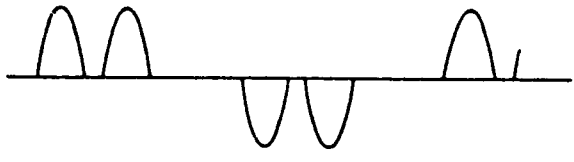
همچنین وقتی در خروجی یکسو کننده از خازن صافی استفاده می‌شود منجر به ناپیوسته شدن جریان تغذیه می‌گردد. (به شکل ۳-۵۳ مراجعه شود). در این حالت وقتی که ولتاژ آند از ولتاژ خازن بیشتر شود، دیودها شروع به هدایت می‌کنند و وقتی که ولتاژ آند از ولتاژ خازن کمتر شود، دیودهااز هدایت باز می‌ایستند.



(الف) جریان dc در پل ۶ پالسی



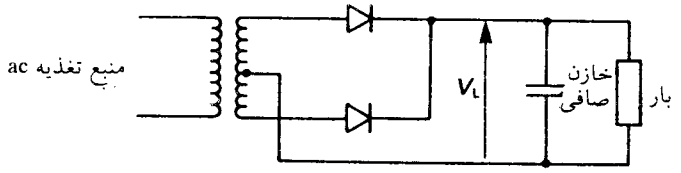
(ب) جریان فاز در پل ۶ پالسی



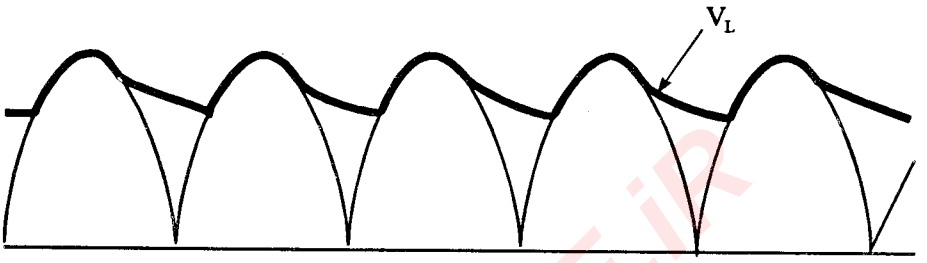
(پ) جریان فاز (منفصل) در پل ۶ پالسی

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

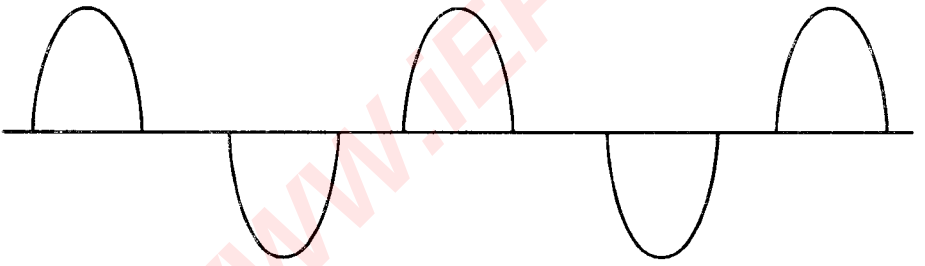
WWW.IEPE.IR



(الف)مدار



(ب) شکل موج همراه با خازن صافی



(پ)شکل موج جریان تغذیه

شکل ۳-۵۳ عملکرد یکسوکننده همراه با خازن صافی

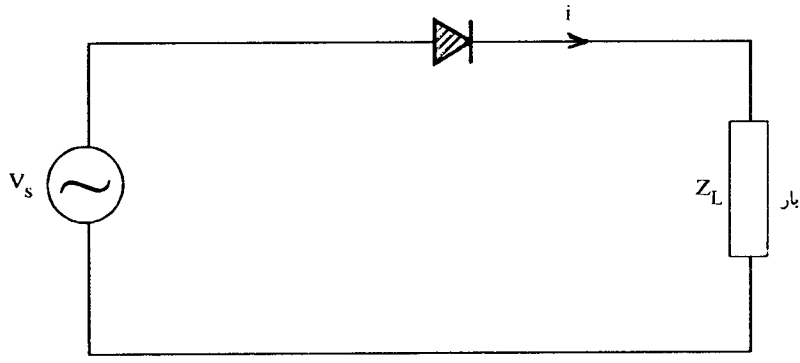
۳-۱۴ مسایل حل شده

مساله ۳-۱

مدار نشان داده شده در شکل ۳-۵۴ از منبع ac، ۲۴۰V، ۵۰Hz تغذیه می‌شود. اگر مقاومت بار ۱۰Ω و اندوکتانس آن ۰/۱H باشد و تریستور در زاویه °۹۰ 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 °۹۰ آتش می‌شود، ولتاژ اعمال شده برابر $V_m Sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ می‌باشد.

WWW.IEPE.IR



شکل ۳-۵۴

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

$$i_{ac} = I_m \, Sin(\omega t + \frac{\pi}{۲} - \phi)$$

$$i_{ac} = \frac{V_m}{\sqrt{R^{۲} + (L\omega)^{۲}}} Sin(\omega t + \frac{\pi}{۲} - \tan^{-۱}\frac{L\omega}{R})$$

$$i_{ac} = \frac{۲۴۰\sqrt{۲}}{\sqrt{۱۰^{۲} + (۲\pi ۵۰ \times ۰/۱)^{۲}}} Sin\,(۲\pi ۵۰ t + \frac{\pi}{۲} - \tan^{-۱}\frac{۳/۱۴}{۱۰})$$

$$i_{ac} = ۱۰/۲۹ Sin(۲\pi ۵۰ t + ۱/۵۷۱ - ۱/۲۶۲)$$

$$i_{ac} = ۱۰/۲۹ Sin(۲\pi ۵۰ t + ۰/۳۰۹)$$

مقدار این مولفه در $t=۰$ برابر ۳/۱۲ است و با توجه به اینکه ثابت زمانی $T = L/R = \frac{۱}{۱۰۰}$ است.

مولفه dc برابر است با

$$i_{dc} = -۳/۱۲ e^{-۱۰۰t}$$

و جریان مدار برابر است با

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

$$i = ۱۰/۲۹ \, Sin(۲\pi ۵۰ t + ۰/۳۰۹) - ۳/۱۲ \, e^{-۱۰۰t} \quad A$$

www.iEPE.iR

جریان در لحظه $t = ۰/۰۰۸۶\ S$ صفر می‌شود که با $i = ۰$ از رابطه بالا بدست می‌آید. که این زمان معادل ۱۵۵° خواهد بود بنابراین می‌توان مقدار متوسط ولتاژ را حساب کرد یعنی

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{۱}{۲\pi}\int_{۹۰^\circ}^{۹۰^\circ + ۱۵۵^\circ} ۲۴۰\sqrt{۲}\,\text{Sin}\,\theta d\theta = ۲۲/۸V$$

$$I_{\text{متوسط}} = \frac{۲۲/۸}{۱۰} = ۲/۲۸\ A$$

مسأله ۳-۲

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 ac، ۲۴۰V تغذیه می‌نماید. مقدار متوسط ولتاژ بار را در زاویه‌های آتش °۰، °۴۵، °۹۰، °۱۳۵ و °۱۸۰ محاسبه نمائید. از افت ولت دیود و تریستور صرفنظر کنید. مقادیر نامی تریستور و دیود را بدست آورید.

حل - با توجه به معادله (۳-۴۱)داریم

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{۲۴۰\sqrt{۲}}{۲\pi}(۱+\text{Cos}\alpha)$$

که به ازاء مقادیر زاویه‌های آتش فوق، مقادیر متوسط ولتاژ بدست می‌آید یعنی،

α	°۰	°۴۵	°۹۰	°۱۳۵	°۱۸۰
$V_{\text{متوسط}}$	۱۰۸V	۹۲V	۵۴V	۱۶V	۰V

مقادیر نامی تریستور:

- ماگزیمم ولتاژ مستقیم (یا معکوس) تریستور

$$P.F.V = P.R.V = V_m = ۲۴۰\sqrt{۲} = ۳۴۰V$$

- جریان (rms) مجاز تریستور

تریستور در زاویه آتش $\alpha = ۰^\circ$ حداکثر فاصله زمانی یک نیم سیکل را هدایت می‌کند. چون بار

WWW.iEPE.IR

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

$$Irms = \left(\frac{۱۵^۲+۰^۲}{۲}\right)^{\frac{۱}{۲}} = ۱۰/۶\ A$$

مقادیر نامی دیود:

- ماگزیمم ولتاژ معکوس دیود $P.R.V = V_m = ۳۴۰V$
- جریان مجاز دیود

وقتی زاویه تأخیر آتش به °۱۸۰ 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 ۵۰ Hz و ۲۴۰ V تغذیه می‌شود. مقدار متوسط ولتاژ بار حاصل در زاویه‌های آتش °۳۰ و °۹۰ را (در دو پل) با هم مقایسه کنید. از افت ولت وسایل نیمه هادی صرفنظرکنید.

حل - در پل تک فاز تمام کنترل شده در زاویه °۳۰ مقدار متوسط ولتاژ برابر است با

$$V_{متوسط}\ در\ ۳۰° = \frac{۲\times۲۴۰\times\sqrt{۲}}{\pi}\cos۳۰° = ۱۸۷/۱\ V$$

مقدار متوسط ولتاژ بار در زاویه °۹۰ برابراست با

$$V_{متوسط}\ در\ ۹۰° = \frac{۲\times۲۴۰\times\sqrt{۲}}{\pi}\cos۹۰° = ۰\ V$$

در پل تک فاز نیمه کنترل شده داریم

$$V_{متوسط}\ در\ ۳۰° = \frac{۲۴۰\sqrt{۲}}{\pi}(۱+\cos۳۰°) = ۲۰۱/۶\ V$$

$$V_{متوسط}\ در\ ۹۰° = \frac{۲۴۰\sqrt{۲}}{\pi}(۱+\cos۹۰°) = ۱۰۸\ V$$

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.

WWW.iEEE.iR

مسأله ۳-۴

مدار یکسوکننده قابل کنترل تمام موج شکل ۳-۲۲ از طریق ترانسفورماتور از یک منبع ۵۰Hz تغذیه می‌شود طوری که

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

با صرفنظر کردن افت ولت تریستورها، مقدار متوسط جریان را در زاویه آتش °۳۰ و °۶۰ بدست آورید در صورتیکه بار اهمی خالص ۱۵Ω باشد. مقدار پیک و rms جریان تریستور در هریک از حالات فوق چقدر است. اگر چنانچه یک اندوکتانس ۱۸mH بطور سری با باراهمی قرار گیرد در چه زاویه آتشی جریان بار متصل خواهد بود.

حل - جریان از رابطه زیر بدست می‌آید.

در $\alpha = 30°$:

$$i = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \phi)$$

چون بار اهمی خالص است بنابراین $\phi = 0$ است و زاویه هدایت °(۳۰-۱۸۰) است. بنابراین

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_{o}^{150^o} \frac{V_m}{R} \sin\omega t \, d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \frac{220\sqrt{2}}{15} [\cos\omega t]_{o}^{150^o}$$

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

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{220\sqrt{2}}{15} = 20/74 \text{ A}$$

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

در $\alpha = 60°$ زاویه هدایت °(۶۰-۱۸۰) است بنابراین

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

$$I_m = 20/74 \text{ A}$$

$$I_{rms} = 10/07 \text{ A}$$

WWW.IEPE.IR

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

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

$$\alpha = \tan^{-1}\frac{۱۸ \times ۱۰^{-۳} \times ۲\pi ۵۰}{۱۵} = ۲۰° \text{ و } ۳۹$$

مسأله ۳-۵

مدار تک فاز نیم موج شکل ۳-۲۱ از منبع تغذیه ۲۰V ac یک بار با ولتاژ کم را تغذیه می‌نماید. با فرض پیوسته بودن جریان بار، مقدار متوسط ولتاژ بار را در زاویه آتش °۶۰ حساب کنید. افت ولت دو سر تریستور را ۱/۵V و دو سر دیود را ۰/۷V فرض کنید.

حل- با توجه به معادله (۳-۴۱) داریم

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{۲۰\sqrt{۲}}{۲\pi}(۱ + \cos ۶۰°) = ۶/۷۵۲V$$

تریستور در فاصله °(۶۰-۱۸۰) هدایت می‌کند و در نتیجه در یک سیکل افت ولت میانگین $\frac{۱۲۰}{۳۶۰} \times ۱/۵ = ۰/۵V$ را ایجاد می‌کند. دیود وقتی هدایت می‌کند افت ولت ۰/۷V را بر بار تحمیل می‌کند. مقدار میانگین آن در یک سیکل برابر $۰/۷ \times \frac{۱۸۰+۶۰}{۳۶۰} = ۰/۴۶۷V$ است. بنابراین مقدار متوسط ولتاژ بار برابر است با

$$۶/۷۵۲ - ۰/۵ - ۰/۴۶۷ = ۵/۷۸V$$

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

مسأله ۳-۶

یک مبدل سه فاز نیم موج باری را با جریان پیوسته ۴۰A طی زاویه آتش °۰ تا °۷۵ تغذیه می‌کند. تلفات توان بار در این زاویه‌های آتش مرزی چه مقدار خواهد بود. ولتاژ تغذیه (ولتاژخط) ۴۱۵V می‌باشد.

حل - با توجه به معادله (۳-۴۸) برای $\alpha = ۰°$ داریم،

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{۳\sqrt{۳}}{۲\pi} V_m \cos\alpha$$

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{۳\sqrt{۳}}{۲\pi}\,\frac{۴۱۵}{\sqrt{۳}}\,\sqrt{۲}\,\text{Cos}۰ = ۲۸۰/۲۲\ \text{V}$$

$$\text{تلفات توان} = ۲۸۰/۲۲ \times ۴۰ = ۱۱۲۰۰\ \text{W} = ۱۱/۲\ \text{kW}$$

در زاویه α=۷۵° داریم

$$V_{\text{متوسط}} = \frac{۳\sqrt{۳}}{۲\pi}\,\frac{۴۱۵}{\sqrt{۳}}\,\sqrt{۲}\,\text{Cos}۷۵° = ۷۲/۵۲\ \text{V}$$

$$\text{تلفات توان} = ۷۲/۵۲ \times ۴۰ = ۲۹۰۱\ \text{W} = ۲/۹\ \text{kW}$$

مسأله ۳-۷

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 ۸ Ω را تغذیه می‌نماید. ترانسفورماتور از ولتاژ فاز اولیه ۶۶۰V، ولتاژ فاز ثانویه ۲۴۰V 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،

$$V_{dc} = \frac{۳\sqrt{۳}}{\pi}\,V_m = \frac{۳\sqrt{۳}}{۲\pi}\,۲۴۰\sqrt{۲} = ۵۶۱/۳۸\text{V}$$

$$I_L = \frac{۵۶۱/۳۸}{۸} = ۷۰/۱۷۲۵\ \text{A}$$

ولتاژ هر فاز در ثانویه از جمع فازوری دو ولتاژ مساوی دو قسمت سیم‌پیچی که ۶۰° اختلاف فاز دارند بدست می‌آید،

بنابراین ولتاژ rms هر قسمت سیم‌پیچی برابر است با

$$V_{rms} = \frac{۲۴۰}{۲\text{Cos}۳۰} = ۱۳۸/۵۶\ \text{V}$$

چون هر سیم پیچی ثانویه جریان ۳۵/۰۸ A را در یک سوم سیکل از خود عبور می‌دهد بنابراین

$$I_{rms} = \frac{۷۰/۱۷۲۵}{\sqrt{۳}} = ۴۰/۵۰\ \text{A}$$

WWW.IEEE.IR

بنابراین مقدار نامی ثانویه بدست می‌آید یعنی

$$\text{نامی ثانویه} = ۶ \times ۱۳۸/۲۵ \times ۴۰/۵۰ \times ۱۰^{-۳} = ۳۳/۶۸\ kVA$$

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

$$۷۰/۱۷۲۵(۱۳۸/۵۶ \ / \ ۶۶۰) = ۱۴/۷۳\ A$$

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

$$I_{rms} = \left(\frac{۱۴/۷۳^۲ + ۱۴/۷۳^۲ + ۰^۲}{۳}\right)^{\frac{۱}{۲}} = ۱۲/۰۳\ A$$

بنابراین مقدار نامی اولیه بدست می‌آید یعنی

$$\text{نامی اولیه} = ۳ \times ۶۶۰ \times ۱۲/۰۳ \times ۱۰^{-۳} = ۲۳/۸\ kW$$

مسأله ۳-۸

یک مبدل پل سه فاز تمام کنترل شده، از یک منبع تغذیه سه فاز ۵۰Hz و ۶۶۰V (ولتاژ خطی)، یک بار dc، ۶۰A و ۴۰۰V را تغذیه می‌کند. اگر تریستورها دارای افت ولت مستقیم ۱/۲V باشند و از تداخل صرفنظر گردد مطلوبست محاسبه :

الف) زاویه آتش تریستورها

ب) جریان rms تریستورها

پ) مقدار متوسط تلفات تریستورها

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)ودر نظر گرفتن افت ولت تریستورها داریم،

$$V_{dc} = \frac{۳\sqrt{۳}}{\pi} \cos\alpha - ۲\times۱/۲$$

$$۴۰۰ = \frac{۳\sqrt{۳}}{\pi} \frac{۶۶۰}{\sqrt{۳}} \sqrt{۲} \cos\alpha - ۲/۴ \qquad \alpha = ۶۳^\circ \text{ و } ۱۰'$$

WWW.IEPE.IR

(ب) چون هر تریستور جریان بار را در فاصله $\frac{۲\pi}{۳}$ هدایت می‌کند، مقدار rms آن بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$I_{rms} = \left(\frac{۶۰^۲ + ۰^\circ + ۰^\circ}{۳}\right)^{\frac{۱}{۲}} = ۳۴/۶۴ \text{ A}$$

(پ) چون تریستور در فاصله $\frac{۲\pi}{۳}$ جریان ۶۰A را حمل می‌کند مقدار متوسط تلفات در سیکل بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{متوسط تلفات} = (۱/۲ \times ۶۰) / ۳ = ۲۴ \text{ W}$$

(ت) با توجه به معادله (۳-۸۰) در مورد مبدل فوق داریم.

$$V_{dc} = V_o - \frac{۳L\omega}{\pi} I_L$$

$$V_o = \frac{۳\sqrt{۳}}{\pi} V_m \cos\alpha - ۲\times۱/۲$$

بنابراین

$$V_{dc} = \frac{۳\sqrt{۳}}{\pi} V_m \cos\alpha - ۲\times۱/۲ - \frac{۳L\omega}{\pi} I_L$$

باقرار دادن مقادیر معلوم در معادله فوق داریم،

$$۴۰۰ = \frac{۳\sqrt{۳}}{\pi} \frac{۶۶۰}{\sqrt{۳}} \sqrt{۲} \cos\alpha - ۲/۴ - \frac{۳ \times ۲\pi ۵۰ \times ۳/۶ \times ۱۰^{-۳}}{\pi} \times ۶۰$$

$$۴۶۷/۲ = ۸۹۱/۳ \cos\alpha \rightarrow \cos\alpha = ۰/۵۲۴۱ \rightarrow \alpha = ۵۸^\circ \text{ و } ۲۳^{-}$$

مسأله ۳-۹

یک بار dc با حداکثر مقدار نامی ۵۰۰A و ۱۰۰kV 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 وافت 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.

$$\text{مقدار متوسط ولتاژ برای هر پل} = ۱۰۰ \text{ kV}/۲ = ۵۰\text{kV}$$

WWW.IEPE.iR

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

$$V_{dc} = \frac{۳\sqrt{۳}}{\pi} V_m$$

$$۵۰ = \frac{۳\sqrt{۳}}{\pi} V_m$$

$V_m = ۳۰/۲۳$ kV یا $V_m = ۵۲/۳۶$ kV (ولتاژ خطی)

هر دیود یا تریستور در یک سوم سیکل جریان بار را حمل می‌کند بنابراین مقدار موثر جریان برابر است با

$$I_{rms} = ۵۰۰/\sqrt{۳} = ۲۸۸/۶۷ \text{ A}$$

بنابراین مقادیر نامی تریستور (یادیود) برابراست با:

$P.R.V = ۵۲/۳۶$ kV و $I_{rms} = ۲۸۸/۶۷$ A

ولتاژ rms سیم‌پیچ ستاره ثانویه $= ۵۲/۳۶ / (\sqrt{۳} \times \sqrt{۲}) = ۲۱/۳۷$ kV

ولتاژ rms سیم‌پیچ مثلث ثانویه $= ۵۲/۳۶ / \sqrt{۲} = ۳۷/۰۲$ kV

نامی ترانسفورماتور $= ۳ \times ۲۱/۳۷ \times ۲۸۸/۶ \times ۱۰^{-۳} = ۱۸/۵$ MW

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

$V_m = ۲ \times ۳۰/۲۳ = ۶۰/۴۶$ kV یا $V_m = ۱۰۴/۷۲$ kV (ولتاژ خطی)

$$I_{rms} = \frac{۲۸۸/۶۷}{۲} = ۱۴۴/۳۳۵ \text{ A}$$

بنابراین مقادیر نامی تریستور (یا دیود) عبارتنداز،

$P.R.V = ۱۰۴/۷۲$ kV و $I_{rms} = ۱۴۴/۳۳۵$ A

WWW.iEPE.iR

ولتاژ rms سیم پیچ ستاره ثانویه = ۲۱/۳۷ × ۲ = ۴۲/۷۴ kV

ولتاژ rms سیم پیچ مثلث ثانویه = ۳۷/۰۲ × ۲ = ۷۴/۰۴ kV

نامی ترانسفورماتور = ۳ × ۴۲/۷۴ × ۱۴۴/۳۳۵ × ۱۰$^{-۳}$ = ۱۸/۵ MW

مسأله ۳-۱۰

یک مبدل پل سه فاز تمام کنترل شده به منبع تغذیه سه فاز ۵۰Hz و ۴۱۵V (ولتاژ خطی) متصل شده است و در حالت معکوس کنندگی در زاویه پیشرو ۳۰° کارمی‌کند. اگر منبع تغذیه دارای مقاومت اهمی ۰/۰۴Ω واندوکتانس ۱mH در فاز باشد و جریان dc به مقدار ثابت ۵۲A باشد مطلوبست محاسبه ولتاژ منبع dc، زاویه تداخل و زاویه بازیابی. تریستورها دارای افت ولت مستقیم ۱/۸V می‌باشند.

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

$$V_{dc} = V_o + \frac{۳L\omega}{\pi} I_L + RI_L$$

$$V_o = \frac{۳\sqrt{۳}}{\pi} V_m \cos\beta + ۲V_T$$

$$V_o = \frac{۳\sqrt{۳}}{\pi} \times \frac{۴۱۵}{\sqrt{۳}} \sqrt{۲} \cos ۳۰° + ۲ \times ۱/۸ = ۴۸۸/۹۶ \text{ V}$$

$$V_{dc} = ۴۸۸/۹۶ + \frac{۳\times۱\times۱۰^{-۳}\times۲\pi۵۰}{\pi} \times ۵۲ + ۰/۰۴ \times ۵۲$$

$$V_{dc} = ۴۸۸/۹۶ + ۱۵/۶۰ + ۲/۰۸ = ۵۰۶/۶۴ \text{ V}$$

با استفاده از معادله (۳-۸۴) در زاویه آتش $\alpha = ۱۸۰ - ۳۰ = ۱۵۰°$ داریم

$$۲\pi۵۰ \times ۱ \times ۱۰^{-۳} \times ۵۲ = ۴۱۵\sqrt{۲}\sin\frac{\pi}{۶}[\cos ۱۵۰ - \cos(۱۵۰ + \gamma)]$$

$$\gamma = ۷° \text{ و } ۱۰'$$

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

$$\delta = \beta - \gamma = ۳۰ - ۷° ۱۰' = ۲۲° ۵۰'$$

www.iEPE.ir

مسأله ۳-۱۱

برای سیستم مسأله ۳-۱۰، و در زاویه آتش پیشرو °۲۲/۵ و زاویه بازیافت °۵، 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 می‌آید یعنی

$$\gamma = \beta - \delta = ۲۲/۵ - ۵ = ۱۷/۵^\circ$$

با استفاده از معادله (۳-۸۴) در زاویه آتش $\alpha = ۱۸۰ - ۲۲/۵ = ۱۵۷/۵^\circ$ مقدار جریان dc بدست می‌آید:

$$۲\pi ۵۰ \times ۱ \times ۱۰^{-۳} I_L = ۴۱۵\sqrt{۲}\ \mathrm{Sin}\frac{\pi}{۶}[\mathrm{Cos}۱۵۷/۵ - \mathrm{Cos}(۱۵۷/۵ + ۱۷/۵)]$$

$$I_L = ۶۷/۵۳\ \mathrm{A}$$

WWW.iEPE.iR