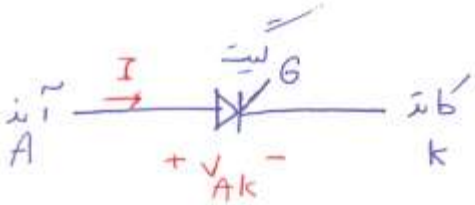
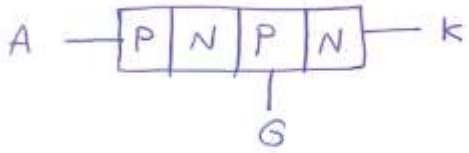
تریستور:

تریستور مانند دیود یک لایه قدرت است و یک نیمه رسانای قدرت است.

تریستور از چهار لایه PNPN ساخته شده است و دارای ۳ پایه آند، کاتد و گیت است.

آند و کاتد به مدار قدرت متصل می‌گردد.





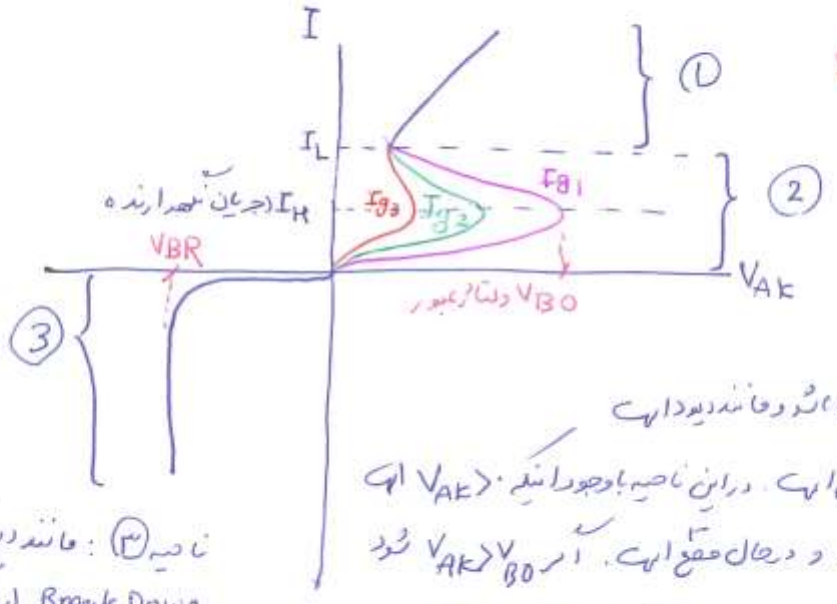
شرط هدایت تریستور: ۱- ولتاژ $V_{Ak} > 0$ باشد

۲- گیت پالس مثبت دریافت کند.

جهت روشن ماندن تریستور جریان I باید بزرگتر از I_H گردد.

شرط خاموش شدن تریستور: یا باید V_{Ak} را کوچکتر از صفر کرد و یا اینکه $I < I_H$ گردد.

مشخصه تریستور:



ناحیه ① : حالت وصل می‌شود و مانند دیود است

ناحیه ② : حالت قطع پایدار است. در این ناحیه با وجود اینکه $V_{Ak} > 0$ است جریان کمی از آن می‌گذرد و در حال قطع است. اگر $V_{Ak} > V_{BO}$ شود به حالت وصل می‌رود

$I_{g1} < I_{g2} < I_{g3}$

هرقدر I_g بزرگتر باشد V_{BO} کوچکتر است و سریع روشن می‌شود.

ناحیه ③ : مانند دیود مقابل است V_{BR} ولتاژ Breake Down است اگر V_{Ak} از این کوچکتر گردد تریستور می‌سوزد. (یعنی اگر در حالت مقابل ولتاژ بیشتر از V_{BR} گردد).

زاویه آتش : برای شکل موج متناوب ورودی می‌توان دوره تناوب را از صفر تا ۳۶۰ درجه تقسیم کرد (معادل ۰ تا 2π رادیان). در شرط $V_{AK}>0$ برقرار باشد می‌توان با اعمال پالس به بیت تریستور را روشن کرد که این لحظه اعمال پالس فعال زاویه‌ای معین خواهد بود که به آن زاویه آتش می‌گویند.

کموتاسیون : به روش‌های خاموش کردن تریستور کموتاسیون می‌گویند. در مدارات جریان متناوب به علت تغییر خودکار پلاریته دوسرآند وکاتد تریستور به صورت خودکار خاموش می‌شود که به آن کموتاسیون طبیعی می‌گویند. اگر جریان به اجبار خاموش شود به آن کموتاسیون اجباری می‌گویند که در این حالت به مدارات جانبی نیاز است که به آن مدار کموتاسیون می‌گویند.

انواع تریستور:

تریستور که به انواع مختلف می‌باشند که در ادامه چند نوع آن آورده شده است:

۱- تریستور با کموتاسیون خطی (SCR) Line-commutated thyristor

هر وقت ولتاژ ورودی صفر شد خاموش می‌گردد. تا ۴۵۰۰A و ۶۰۰۰V وجود دارند

۲- تریستور با کموتاسیون اجباری Forced-Comutated thyristor

توسط یک مدار اضافی که مدار کموتاسیون نامیده می‌شود خاموش می‌شوند

۳- تریستور خاموش شوند از طریق گیت Gate-turn off-thyristor (GTO)

با اعمال پالس مثبت به گیت روشن و با پالس منفی خاموش می‌گردد تا ۶۰۰۰V و ۳۰۰۰A وجود دارند

۴- تریستور با القای استاتیک (SITH)

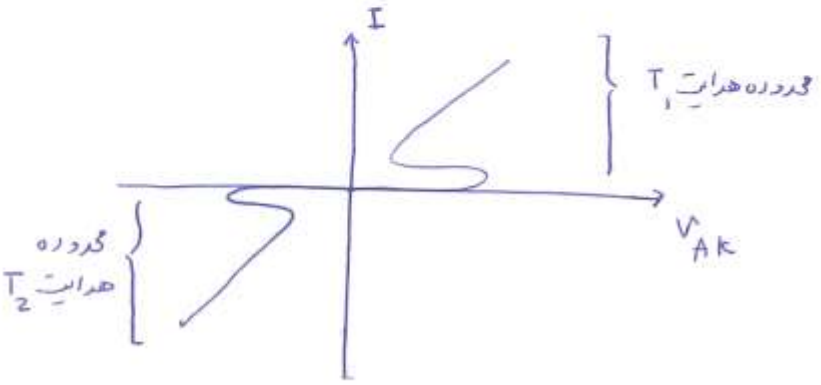
مثل GTO با پالس مثبت گیت روشن و با پالس منفی خاموش می‌شود تا ۱۲۰۰V و ۳۰۰A وجود دارد

۵- تریستور هدایت معکوس Reverse-Conducting thyristor

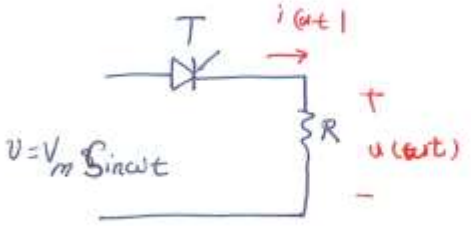
با یک دیود معکوس موازی شده است. تا ۲۵۰۰V و ۱۰۰۰A وجود دارد

۶- تریاک (تریستور دوجهته)

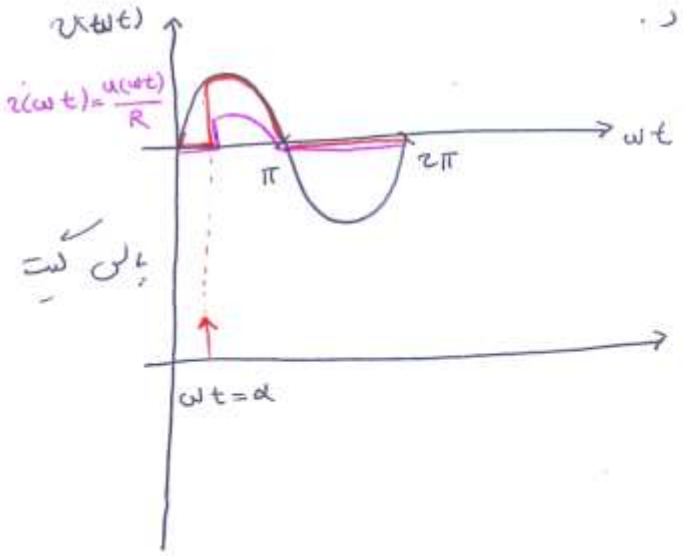
همانند دو تریستور موازی معکوس است که قابلیت هدایت دو پالس را دارا می‌باشد. این کلید دوجهته است یعنی جریان یا از تریستور بالایی عبور می‌کند یا از تریستور پایینی.



مدار تریستوری با بار R:



تریستور زمانی هدایت می‌کند که به گیت پالس مثبت وارد شود و زمانی خاموش می‌شود که جریان صفر شود.



شرط هدایت تریستور:

$V_{AK} > 0$ و اعمال پالس مثبت به گیت

شرط خاموشی T:

جریان صفر شود و یا $V_{AK} < 0$ گردد.

* در $wt = 0$ به آند تریستور ولتاژ مثبت می‌افتد ولی چون به گیت پالس داده نشده است تریستور روشن نمی‌شود

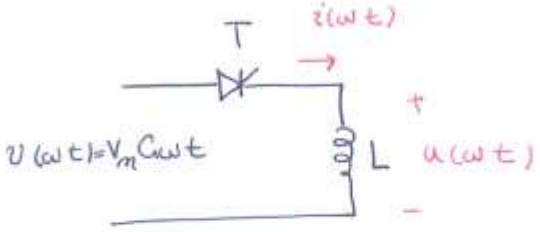
* در $wt = \alpha$ که ولتاژ آند مثبت است پالس مثبت به گیت تریستور روشن می‌شود و در نتیجه ولتاژ $v(wt)$ روی $u(wt)$ می‌افتد تا زمانی که در $wt = \pi$ جریان صفر شود.

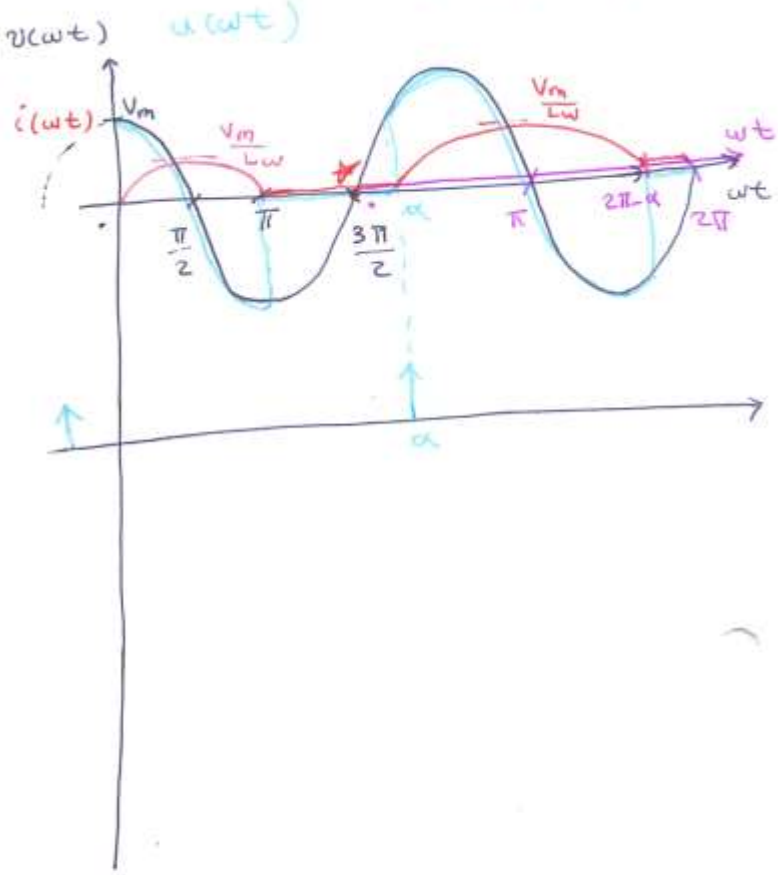
* در $wt = 2\pi$ تا $wt = \pi$ اگر به تریستور پالس هم داده شود روشن نمی‌شود چون ولتاژ آند منفی است

از شکل موج ولتاژ $u(wt)$ بار و جریان $i(wt)$ دیده می‌شود که مدار یکسو کننده است. پس:

$$u_{dc} = u_{av} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin wt \, dwt = \frac{V_m}{2\pi}(1+\cos\alpha) \rightsquigarrow i_{av} = i_{dc} = \frac{u_{dc}}{R}$$

مدار ترانزیستوری با بار سلفی:





شرط هدایت T: $V_{Ak} > 0$ ، اعمال پالس به بیت

شرط خاموشی T: جریان صفر شود و یا $V_{Ak} < 0$ گردد.

① $0 < \omega t < \pi$

$$v(\omega t) = L\omega i' \rightsquigarrow i' = \frac{V_m}{L\omega} C\omega t \rightsquigarrow i = \frac{V_m}{L\omega} \sin\omega t + k \Rightarrow k = 0 \Rightarrow$$

$$i(\omega t_{on}) = 0$$

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{L\omega} \sin\omega t$$

② $\pi < \omega t < \frac{3\pi}{2}$

در $\omega t = \pi$ $\Rightarrow$ $i(\omega t) = \frac{V_m}{L\omega} \sin\pi = 0$ می‌شود $\Rightarrow$ T: off خاموش می‌شود چون $V_{Ak} < 0$

است $\omega t = \frac{3\pi}{2}$ ، ترانزیستور روشن نمی‌شود.

③ $0 < \omega t < \alpha$ در $\omega t = \frac{3\pi}{2}$ متغیر ωt را عوض می‌کنیم داریم: بعد $u(\omega t) = V_m \sin\omega t$ می‌گردد

از $\omega t = 0$ تا $\omega t = \alpha$ ، $V_{Ak} > 0$ است ولی چون پالس ایجاد نشده است $\Rightarrow$ T: off

④ $\alpha < \omega t < 2\pi - \alpha$

در $\omega t = \alpha$ پالس به بیت ایجاد می‌شود چون $V_{Ak} > 0$ است $\Rightarrow$ T: on می‌شود

$$V_m \sin\omega t = L\omega i' \rightarrow i' = \frac{+V_m}{L\omega}\cos\omega t \rightarrow$$

$$i = \frac{V_m}{L\omega}\int_{\alpha}^{\omega t} \sin\omega t\, d\omega t = \frac{-V_m}{L\omega}\left[\cos\omega t\right]_{\alpha}^{\omega t} = \frac{V_m}{L\omega}\left[\cos\alpha - \cos\omega t\right]$$

می‌خواهیم لحظه صفر شدن جریان (یعنی خاموش شدن T) را بیابیم:

$$i(\omega t) = 0 \rightarrow \frac{V_m}{L\omega}\left[\cos\alpha - \cos\omega t\right] = 0 \rightarrow \cos\omega t = \cos\alpha \rightarrow \omega t = 2\pi \pm \alpha$$

پس $\omega t = 2\pi + \alpha = \alpha$ و $\omega t = 2\pi - \alpha$ ⟸ در $\boxed{\omega t = 2\pi - \alpha}$ تریستور خاموش می‌شود

(a) $2\pi - \alpha < \omega t < 2\pi$

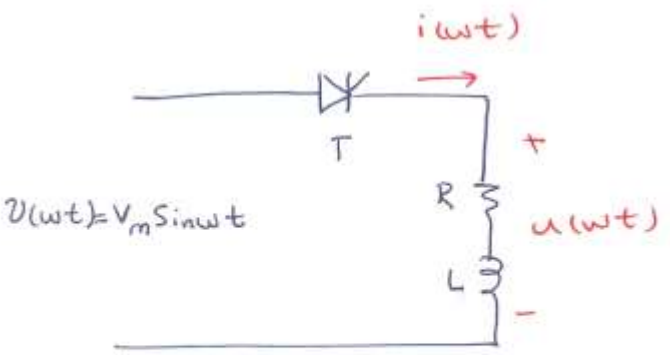
از این مرحله T خاموش است چون $V_{AK} < 0$ است اگر به بیت پالس هم داده شود روشن نمی‌شود.

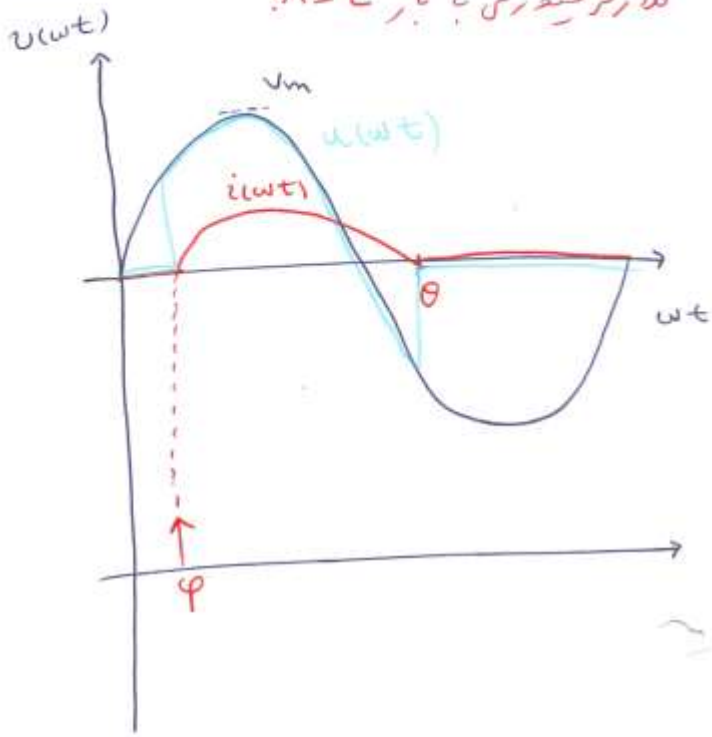
دیتا: بار هم زمان با جریان مقدار دارد بنابراین $u(\omega t) = V(\omega t)$ و زمانی که $i(\omega t) = 0$ است $u(\omega t) = 0$ می‌گردد.

$$u_{dc} = u_{av} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} V_m \sin\omega t = 0$$

پس دارمن توانند به عنوان یکسوکننده عمل کند.

مدار ترانزیستوری با بار R-L:





① $\omega t < \varphi$.

با وجود اینکه $V_{AK} > 0$ است ولی چون به گیت پالس اعمال نشده است ⇐ T: off است

② $\varphi < \omega t < \theta$

در $\omega t = \varphi$ به گیت پالس می دهیم و چون $V_{AK} > 0$ است ⇐ T: on می شود (می خواهیم ببینیم کی

T: off خاموش می شود ⇐ پس باید $i(\omega t)$ را بیابیم .

قبلا دیدیم :

$$i(\omega t) = A e^{-\frac{R}{L\omega}\omega t} + \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \alpha)$$

که $\begin{cases} Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2} \\ \alpha = tg^{-1}\dfrac{L\omega}{R} \end{cases}$

$$i(\omega t = \varphi) = 0 \Rightarrow 0 = A e^{-\frac{R}{L\omega}\varphi} + \frac{V_m}{Z}\sin(\varphi - \alpha) \Rightarrow$$

$$A = -\frac{V_m}{Z} e^{\frac{R}{L\omega}\varphi} \sin(\varphi - \alpha)$$

$$\Rightarrow i(\omega t) = -\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi-\alpha)\, e^{\frac{R(\varphi-\omega t)}{L\omega}} + \frac{V_m}{Z}\sin(\omega t-\alpha)$$

در $\omega t=\theta$ جریان صفر می‌شود یعنی T: off می‌شود. (چون در $\omega t=\theta$ ولتاژ $V_{AK}<0$ است اگر روی کلید پالس هم اعمال شود T روشن نمی‌شود).

$$i(\omega t=\theta)=0 \Rightarrow -\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi-\alpha)\, e^{\frac{R(\varphi-\theta)}{L\omega}} + \frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\alpha) = 0$$

$$\Rightarrow \sin(\varphi-\alpha)\, e^{\frac{R(\varphi-\theta)}{L\omega}} = \sin(\theta-\alpha) \rightarrow \theta \text{ بدست می‌آید}$$

(۲) $\theta < \omega t < 2\pi$

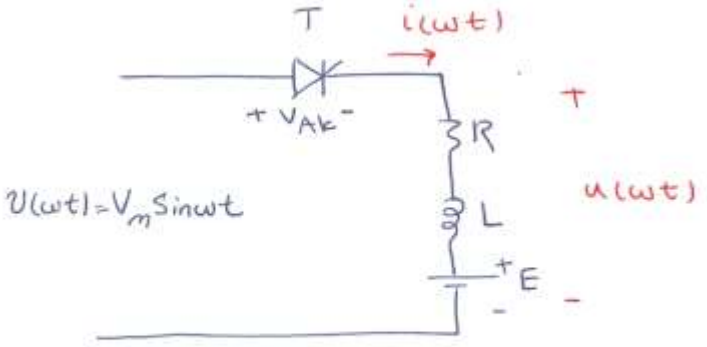
چون $V_{AK}<0$ است ~~[illegible]~~ ⇐ T خاموش می‌ماند (حتی اگر پالس هم اعمال شود روشن نمی‌شود)

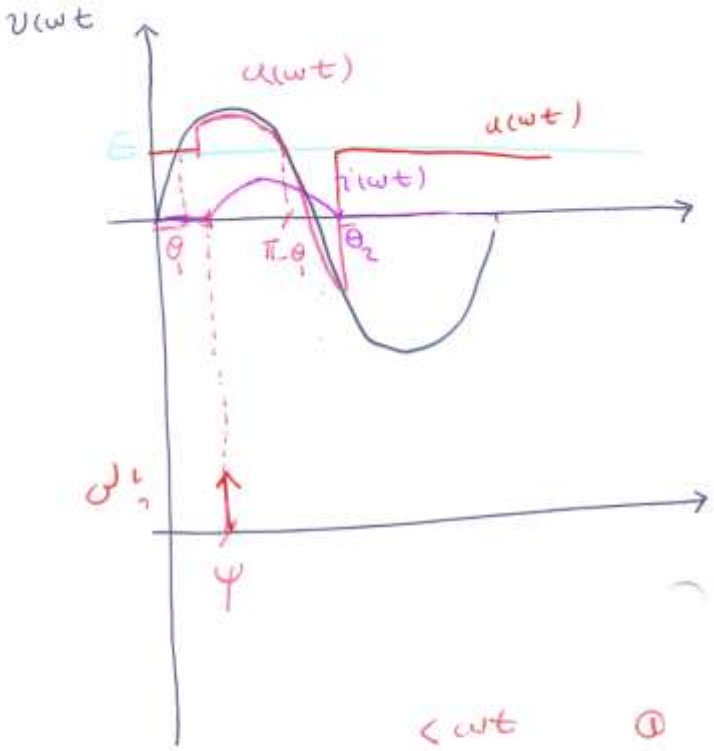
~~[illegible]~~ باز دوباره $i(\omega t)$ هم زمانی که جریان مجدد صفر برابر $V(\omega t)$ می‌شود $i(\omega t)=0$ است $\omega t=\theta$ می‌گردد.

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

$$-\frac{V_m}{2\pi}\left[\cos\pi - \cos\varphi + \cos\theta - \cos\pi\right] = +\frac{V_m}{2\pi}\left[\cos\varphi - \cos\theta\right]$$

مدار ترانزیستوری با بار R-L-E :





① $0 < wt < \theta_1$.

در این بازه $i(wt) = 0$ است پس:

$V_{AK} = V(wt) - E$ چون $V(wt) < E$ است

$V_{AK} < 0$ ⟸ اگر به گیت پالس هم اعمال گردد ترانزیستور روشن نمی شود .

پس جهت روشن شدن ترانزیستور حتما باید بعد از $wt > \theta_1$ به گیت پالس دهیم و تا زمانی مزمت پالس دادن داریم که $\pi - \theta_1 > wt > \theta_1$ باشد.

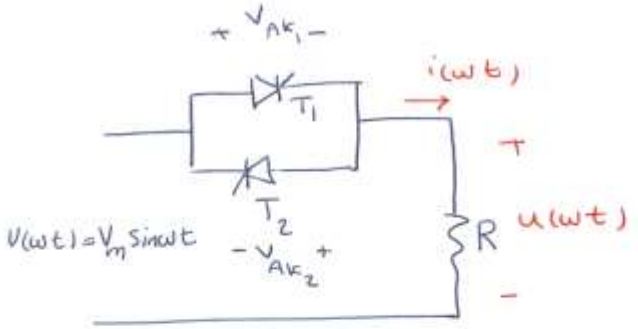
② $\psi < wt < \theta_2$

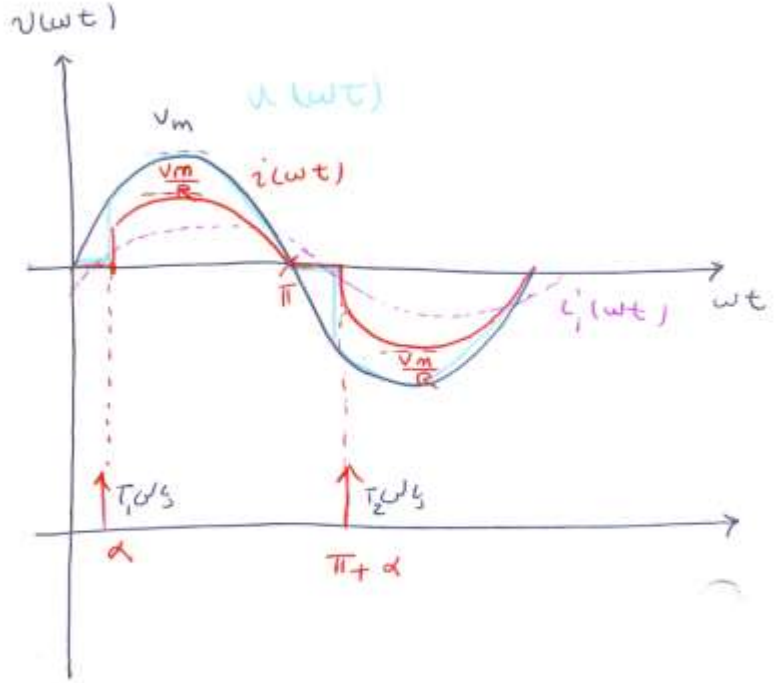
در $wt = \psi$ به ترانزیستور پالس اعمال می کنیم . کلکتور بیس چون $V_{AK} > 0$ است ترانزیستور روشن می شود . پس جریان $i(wt)$ برقرار می گردد :

$$i(wt) = Ae^{-\frac{R}{L}wt} + \frac{Vm}{Z}\sin(wt - \alpha) - \frac{E}{R}$$

که $\begin{cases} Z = \sqrt{R^2 + L^2 w^2} \\ \alpha = tg^{-1}\dfrac{Lw}{R} \end{cases}$

مدار AC/AC ترایستوری با بار اهمی:





① $0 < wt < \alpha$

در این بازه چون ابتدا $i = 0$ است ترایستور T_1 قطع است ولی چون $V_{AK_1} = V(wt) >$ است آماده روشن شدن است ولی چون $V_{AK_2} < 0$ است T_2 هرگز روشن نمی شود.

② $\alpha < wt < \pi$

در $wt = \alpha$ به ترایستور T_1 پالس وارد می کنیم $\Leftarrow T_1$: on $\Leftarrow$ روشن می گردد. $\Leftarrow i(wt) = \frac{V_m}{R} \sin wt$

ترایستور T_1 تا زمانی روشن است که $i(wt) >$ است یعنی تا $wt = \pi$.

در این بازه چون $V_{AK_2} < 0$ است $\Leftarrow T_2$ هرگز روشن نمی شود.

③ $\pi < wt < \pi + \alpha$

در این بازه دوتا تا $V_{AK_1} < 0$ است یعنی T_1 هرگز روشن نمی شود ولی چون $V_{AK_2} >$ است آماده روشن شدن است ولی چون به بیت T_2 پالس وارد می شود روشن نمیشه

④ $\pi + \alpha < wt < 2\pi$

در $wt = \pi + \alpha$ به T_2 پالس می دهیم $\Leftarrow T_2$: on $\Leftarrow$ می شود $\Leftarrow i(wt) = \frac{V_m}{R} \sin wt$

دیده می شود که تابع $u(\omega t)$ تابع زوج است پس ضرایب b_n و زوج سری فوریه صفر خواهند شد

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} u(\omega t)\,d\omega t = \frac{1}{2\pi}\left[\int_\alpha^{\pi} V_m \sin\omega t\, d\omega t + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} V_m \sin\omega t\, d\omega t\right] = 0$$

$$a_1 = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} u(\omega t)\cos\omega t\, d\omega t = \frac{V_m}{\pi}\int_0^{2\pi} \sin\omega t\cos\omega t \overset{d\omega t}{=} \frac{V_m}{2\pi}\int_0^{2\pi} V_m \sin 2\omega t\, d\omega t$$

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

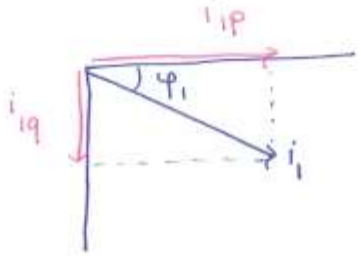
$$b_1 = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} u(\omega t)\sin\omega t\, d\omega t = \frac{V_m}{2\pi}\int_0^{\pi}(1-\cos 2\omega t)\,d\omega t = \frac{V_m}{2\pi}\left[\int_\alpha^{\pi}(1-\cos 2\omega t)\,d\omega t\right.$$

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

$$\Rightarrow \begin{cases} C_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \\ \varphi_1 = \tan^{-1}\frac{a_1}{b_1} \end{cases} \Rightarrow \begin{aligned} u_1(\omega t) &= C_1 \sin(\omega t - \varphi_1) \\ i_1(\omega t) &= \frac{C_1}{R}\sin(\omega t - \varphi_1) = a_1\cos\omega t + b_1 \sin\omega t \end{aligned}$$

جمله اول سری فوریه

$\Rightarrow$



$$i_{1Q} = i_1 \sin\varphi_1 \qquad i_{1P} = i_1\cos\varphi_1 \Rightarrow \begin{cases} a_1 = I_{1P}|_{max} \\ b_1 = I_{1Q}|_{max} \end{cases}$$

توان P_1 و Q_1 (مولفه اصلی) ست شد:

$$\Rightarrow \begin{cases} P_1 = \frac{1}{2} V_m \times b_1 = \frac{V_m^2}{2R}\,\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2}\sin 2\alpha}{\pi} \\ Q_1 = \frac{1}{2} V_m \times a_1 = \frac{V_m^2}{2R}\,\frac{1-\cos 2\alpha}{2\pi} \end{cases}$$

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t} = \frac{V_m^2}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} \frac{1-\cos 2\omega t}{2} d\omega t = \frac{V_m}{\sqrt{2\pi}}\sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}}$$

$$\Rightarrow I_{rms} = \frac{u_{rms}}{R}$$

$$i = i_1 + i_3 + i_5 + \cdots \Rightarrow I_{rms}^2 = I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \cdots$$

ضریب کمی اعوجاج:

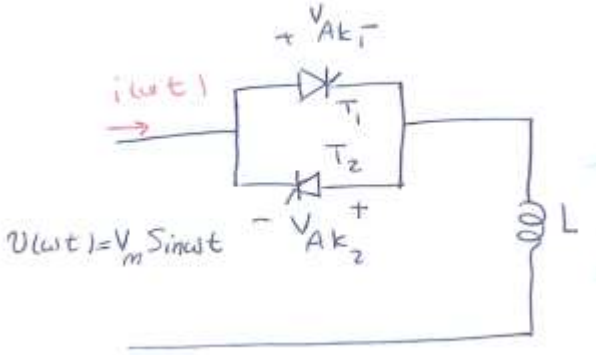
Total harmonic distortion (THD)

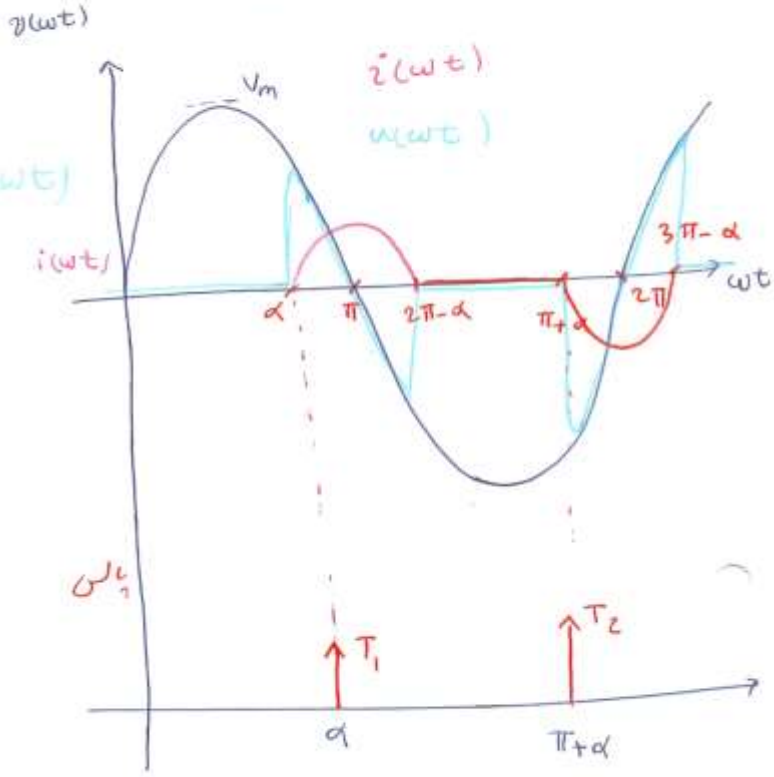
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \Rightarrow$$

اگر هارمونیک وجود نداشته باشد $THD = 0$ می‌گردد

پس هرقدر THD کوچک باشد یعنی هارمونیک کم است.

مبدل AC/AC با بار سلفی:





① $-<\omega t<\alpha$

T_1 : off $\Leftarrow$ T_1 می تواند با اعمال پالس روشن شود ولی پالس اعمال نشده $\Leftarrow$ $V_{Ak_1}>0$

T_2 : off $\Leftarrow$ ـــــــــ $\Leftarrow$ T_2 نمی تواند $\Leftarrow$ $V_{Ak_2}<0$

② $\alpha<\omega t<2\pi-\alpha$

در $\omega t=\alpha$ به T_1 پالس اعمال می کنیم $\Leftarrow$ T_1 روشن می شود . تا زمانی روشن می ماند که جریان صفر شود.

$$V_m \sin\omega t = L\omega \dot{i} \rightsquigarrow \dot{i}(\omega t) = -\frac{V_m}{L\omega}\cos\omega t + k \Rightarrow k=\frac{V_m}{L\omega}\cos\alpha$$

$$\dot{i}(\omega t=\alpha)=0$$

$$\Rightarrow i(\omega t) = \frac{V_m}{L\omega}(\cos\alpha-\cos\omega t) \Rightarrow \begin{cases} \omega t=\alpha \Rightarrow \dot{i}(\omega t)=0 \\ \omega t=\pi \Rightarrow i(\omega t)=\frac{V_m}{L\omega}(\cos\alpha+1) \end{cases}$$

$i(\omega t)=0 \Rightarrow \cos\omega t=\cos\alpha \Rightarrow \omega t=2\pi-\alpha \Rightarrow$ در $2\pi-\alpha$ جریان صفر می شود و T_1 خاموش می شود.

(۳) $2\pi-\alpha < \omega t < \pi+\alpha$

$V_{Ak_1} < 0 \Leftarrow T_1$ می‌تواند روشن شود

$V_{Ak_2} > 0 \Leftarrow T_2$ می‌تواند روشن شود ولی چون پالس اعمال نمی‌گردد خاموش است

(۴) $\pi+\alpha < \omega t < 3\pi-\alpha$

در $\omega t = \pi+\alpha$ به T_2 پالس اعمال می‌کنیم $\Leftarrow T_2$: on می‌شود $\Leftarrow$

$$\begin{cases} i(\omega t) = -\frac{V_m}{L\omega}\cos\omega t + k \\ i(\omega t = \pi+\alpha) = 0 \end{cases} \Rightarrow k = \frac{V_m}{L\omega}\cos(\pi+\alpha)$$

$$\Rightarrow i(\omega t) = \frac{V_m}{L\omega}\left(-\cos\omega t + \cos(\alpha+\pi)\right)$$

$$i(\omega t) = 0 \rightsquigarrow \cos\omega t = +\cos(\alpha+\pi) \rightsquigarrow \omega t = 2\pi-\alpha \quad \cos\omega t = \cos(\pi+\alpha) \rightsquigarrow \omega t = 3\pi-\alpha$$

$u(\omega t)$ هم زمین می‌گردد $\begin{cases} u(\omega t) = V(\omega t) & \Leftarrow i(\omega t) \neq 0 \\ u(\omega t) = 0 & \Leftarrow i(\omega t) = 0 \end{cases}$

همانطور که از شکل موج جریان دیده می‌شود مبدل ACIAC می‌باشد.

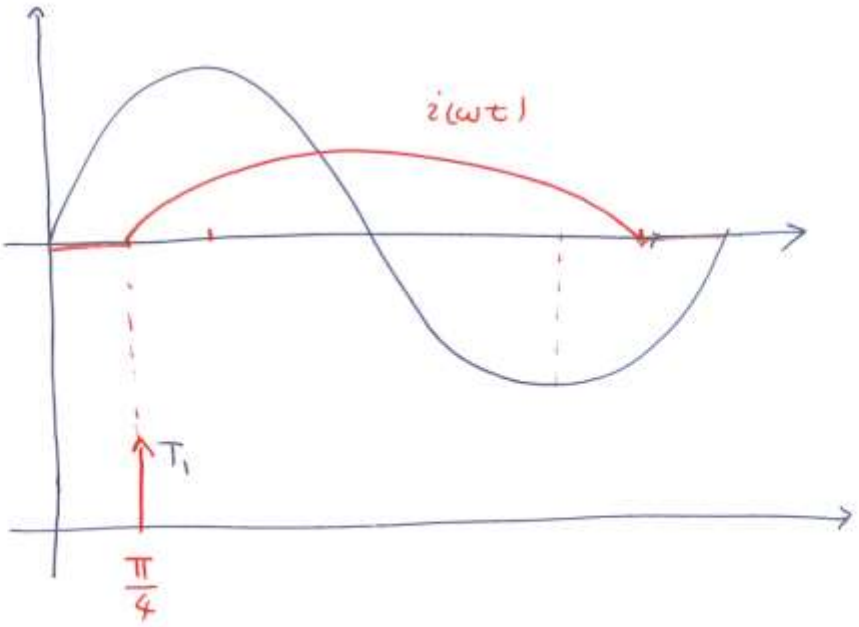
اگر فرض کنیم $\begin{matrix} 2\pi-\alpha = \beta \\ \pi+\alpha = \gamma \end{matrix} \Leftarrow$ همواره باید $\gamma \leq \beta$ باشد درغیر اینصورت مدار درست کار نخواهد کرد. یعنی حتماً باید $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$ باشد. درغیر اینصورت T_1 روشن خواهد ماند و T_2 آنقدی روشن شده نخواهد رفت.

به عنوان مثال اگر $\alpha = \frac{\pi}{4}$ باشد:

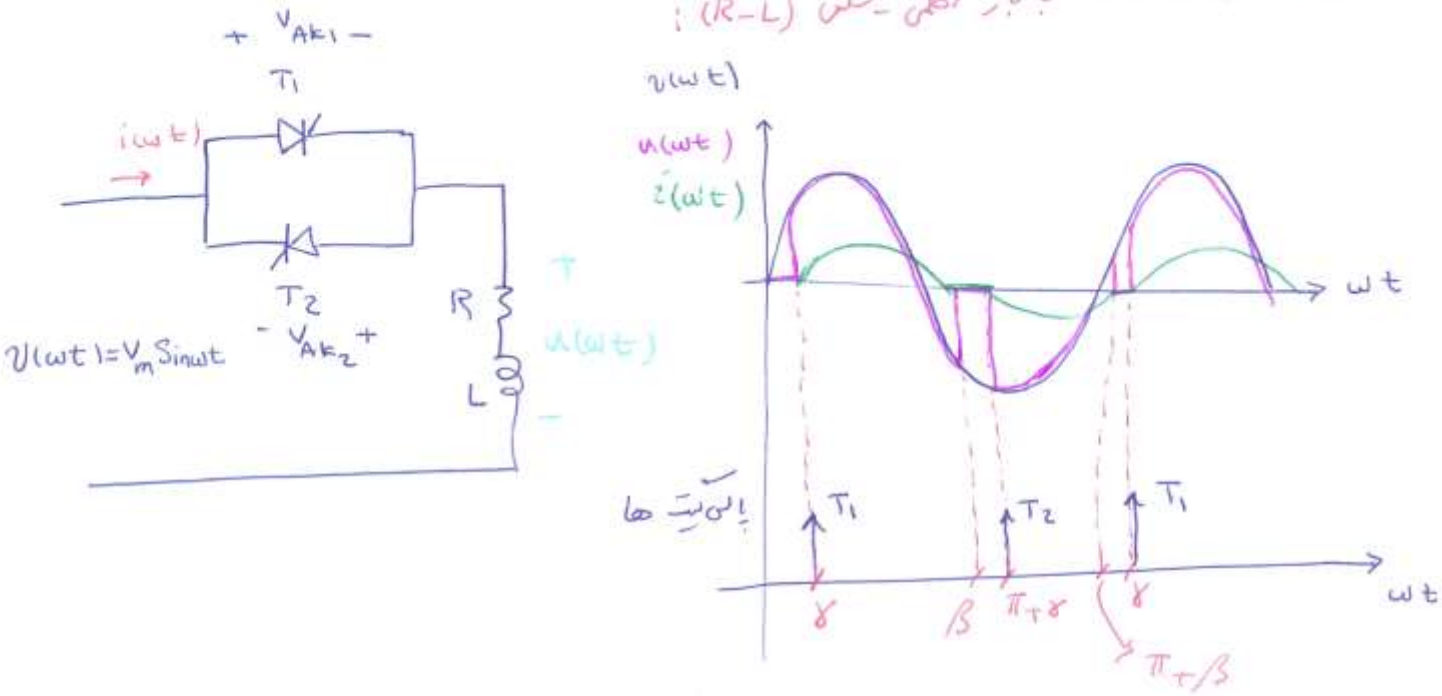
$$\begin{cases} i(\omega t) = -\frac{V_m}{L\omega}\cos\omega t + k \\ i(\omega t = \frac{\pi}{4}) = 0 \end{cases} \rightarrow k = \frac{V_m\sqrt{2}}{2L\omega} \Rightarrow i(\omega t) = \frac{V_m}{L\omega}\left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \cos\omega t\right)$$

زمانی T_1 خاموش می شود که:

$$i(\omega t) = 0 \Rightarrow \cos\omega t = \frac{\sqrt{2}}{2} \rightarrow \omega t = \frac{\pi}{4},\ 2\pi - \frac{\pi}{4}$$



مبدل AC|AC با بار اهمی-سلفی (R-L):



① $0<\omega t<\gamma$

T_1 آماده روشن شدن است ولی پالس ایجاد نشده است $\Leftarrow V_{Ak_1}>0$ $\Rightarrow T_1$: off

T_2 نمی‌تواند روشن شود $\Leftarrow V_{Ak_2}<0$ $\Rightarrow T_2$: off

② $\gamma<\omega t<\beta$

در $\omega t=\gamma$ که $V_{Ak_1}>0$ است به T_1 پالس ایجاد شده $\Rightarrow T_1$: on روشن شود. تا زمانی روشن می‌ماند که جریان صفر شود پس باید معادله جریان نوشته شود:

$$V_m \sin\omega t = R i + L\omega i' \rightarrow i = Ae^{-\frac{R}{L\omega}\omega t} + \frac{V_m}{\sqrt{R^2+L^2\omega^2}}\sin(\omega t-\alpha) \quad ①$$

که $\begin{cases} z=\sqrt{R^2+L^2\omega^2} \\ \alpha=\tan^{-1}\frac{L\omega}{R} \end{cases}$

$i(\omega t=\gamma)=0 \Rightarrow A=\frac{-V_m}{z}\sin(\gamma-\alpha)e^{\frac{R}{L\omega}\gamma}$ بازمی $\Rightarrow i(\omega t)=\frac{V_m}{z}\left(\sin(\omega t-\alpha)-e^{\frac{R}{L\omega}(\gamma-\omega t)}\sin(\gamma-\alpha)\right)$

$i(\omega t=\beta)=0 \Rightarrow \sin(\beta-\alpha)-e^{\frac{R}{L\omega}(\gamma-\beta)}\sin(\gamma-\alpha)=0$ ② $\omega t=\beta$ زمانی T_1 خاموش می‌شود:

$\Rightarrow \beta=$ بدست آید

T_1 باید قبل از روشن شدن T_2، خاموش شود یعنی باید $\beta \leq \pi + \gamma$ باشد

$\Leftarrow$ باید $\alpha \geq \gamma$ باشد. برای اثبات این موضوع فرض می‌کنیم $\gamma < \alpha$ باشد. درنتیجه از رابطه ۲ داریم

$$\gamma < \alpha \Rightarrow \sin(\gamma - \alpha) < 0 \Rightarrow \sin(\beta - \alpha) = e^{-(\beta-\gamma)\frac{R}{L\omega}} \sin(\gamma - \alpha) < 0 \Rightarrow$$

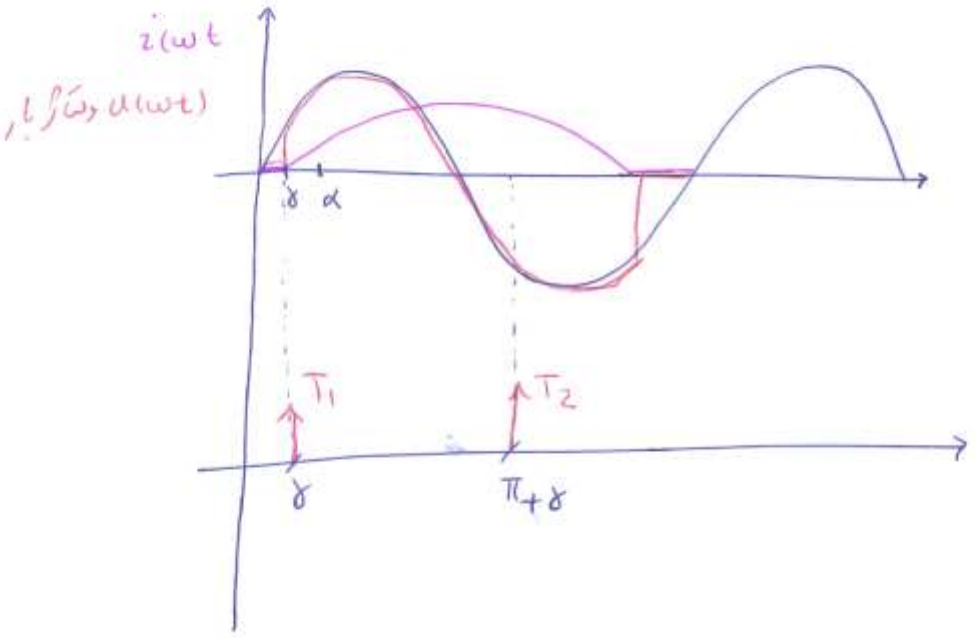
می‌آید $\sin(\beta - \alpha) < 0$

درنتیجه باید $\beta - \alpha \geq \pi$ باشد $\Leftarrow$ $\beta + \gamma - \alpha \geq \pi + \gamma$ $\Leftarrow$ $\beta > \pi + \gamma$

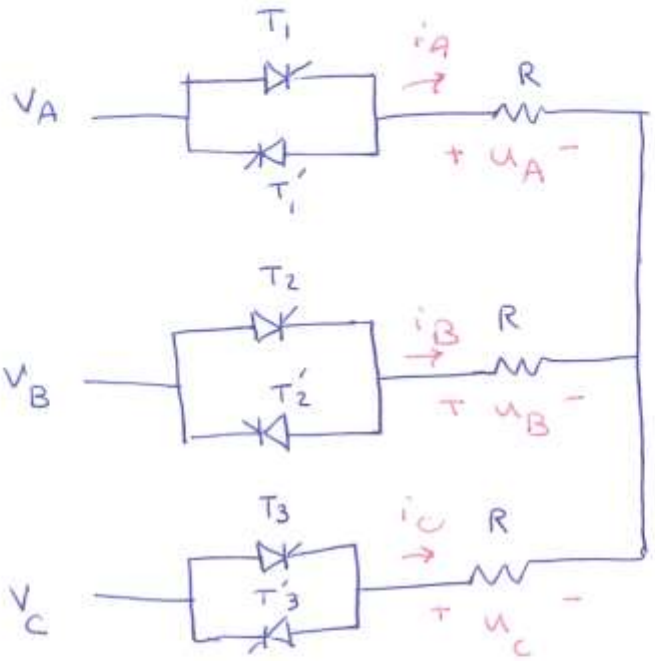
(کوچکتر از ضد)

که با فرض $\beta \leq \pi + \gamma$ در تضاد است پس باید $\gamma \geq \alpha$ باشد

در مثال زیر دیده می‌شود که T_1 در γ روشن شده است که در آن $\gamma < \alpha$ است. بنابراین T_2 را که در $\pi + \gamma$ می‌خواهیم روشن کنیم روشن نمی‌شود. چون جریان T_1 صفر شده است. بنابراین فقط T_1 روشن است و T_2 روشن نمی‌شود.



برشگر سه فاز با بار اهمی (R) :



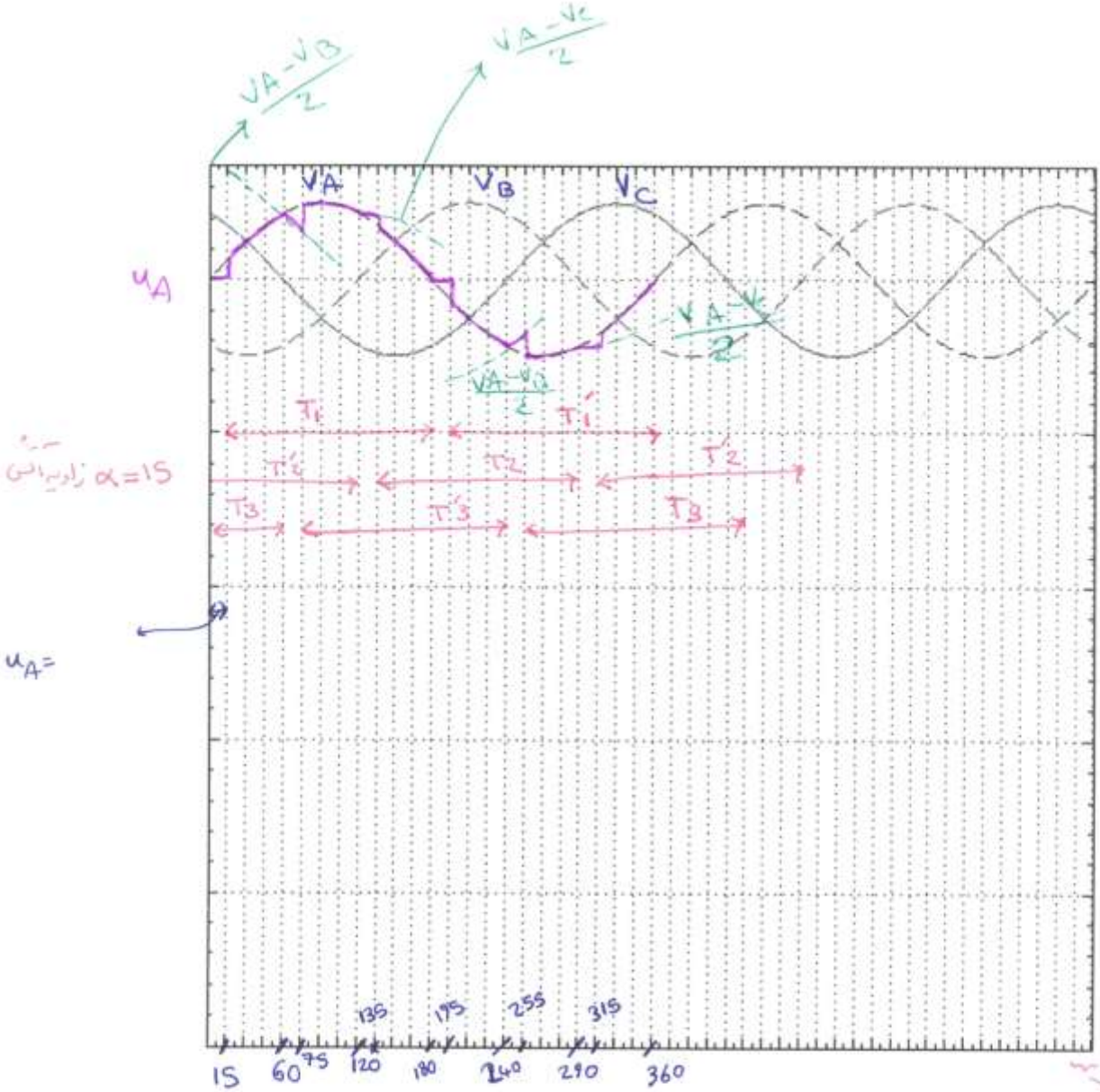
در مدار فوق برای زوایای آتش α زیر داریم :

- $0 < \alpha < \frac{\pi}{3} \Rightarrow$ گاهی سه و گاهی سه تا از تریستور هدایت می‌کنند
- $\frac{\pi}{3} < \alpha < \frac{\pi}{2} \Rightarrow$ همیشه دو تریستور هدایت می‌کنند
- $\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{5\pi}{6} \Rightarrow$ گاهی دو تریستور و گاهی سه تریستور بدون هدایت

α زاویه آتش تریستور T_1 است.

زاویه آتش :

	T_1	T'_1	T_2	T'_2	T_3	T'_3
زاویه آتش	α	$\pi+\alpha$	$\alpha-\frac{2\pi}{3}$	$\alpha+\pi-\frac{2\pi}{3}$	$\alpha+\frac{2\pi}{3}$	$\alpha+\pi+\frac{2\pi}{3}$



نقطه برای $\alpha=15$:

T_1 در α روشن می‌شود - T'_1 در $\pi+\alpha$ روشن می‌گردد

T_2 در $\alpha-\frac{2\pi}{3}$ " " T'_2 در $\pi+\alpha-\frac{2\pi}{3}$ " "

T_3 در $\alpha+\frac{2\pi}{3}$ " " T'_3 در $\pi+\alpha+\frac{2\pi}{3}$ " "

} هرکدام زمانی خاموش می‌شوند که جریان صفر شود.

در $\alpha=15$ دیده می‌شود که گاهی دو تریستور هدایت می‌کند و گاهی سه تریستور.

اگر ولتاژ یک فاز مبنا یعنی u_A را رسم کنیم بقیه (u_B و u_C) هم‌شکل u_A و با اختلاف فاز $\pm\frac{2\pi}{3}$ خواهد بود

$0 < \omega t < 15^\circ \Rightarrow T_2', T_3 : on \Rightarrow -V_B + u_B - u_C + V_C = 0$ $\xrightarrow{i_B = -i_C \Rightarrow u_C = -u_B}$ $\begin{cases} u_B = \frac{V_B - V_C}{2} \\ u_C = \frac{V_C - V_B}{2} \\ u_A = 0 \end{cases}$

$15 < \omega t < 60 \Rightarrow T_1, T_2', T_3 : on \Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

$60 < \omega t < 75 \Rightarrow T_1, T_2' : on \Rightarrow V_A + u_A - u_B + V_B = 0$ $\xrightarrow{i_A = -i_B \Rightarrow u_A = -u_B}$ $\begin{cases} u_A = \frac{-V_B + V_A}{2} \\ u_B = \frac{-V_A + V_B}{2} \\ u_C = 0 \end{cases}$

$75 < \omega t < 120 \Rightarrow T_1, T_2', T_3' : on \Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

$120 < \omega t < 135 \Rightarrow T_1, T_3' : on \Rightarrow -V_A + u_A - u_C + V_C = 0$ $\xrightarrow{u_A = u_C}$ $\begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_C}{2} \\ u_B = 0 \\ u_C = \frac{V_C - V_A}{2} \end{cases}$

$135 < \omega t < 180 \Rightarrow T_1, T_2, T_3' : on \Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

$180 < \omega t < 195 \Rightarrow T_2, T_3' : on \Rightarrow -V_B + u_B - u_C + V_C = 0$ $\xrightarrow{u_B = u_C}$ $\begin{cases} u_A = 0 \\ u_B = \frac{V_B - V_C}{2} \\ u_C = \frac{V_C - V_B}{2} \end{cases}$

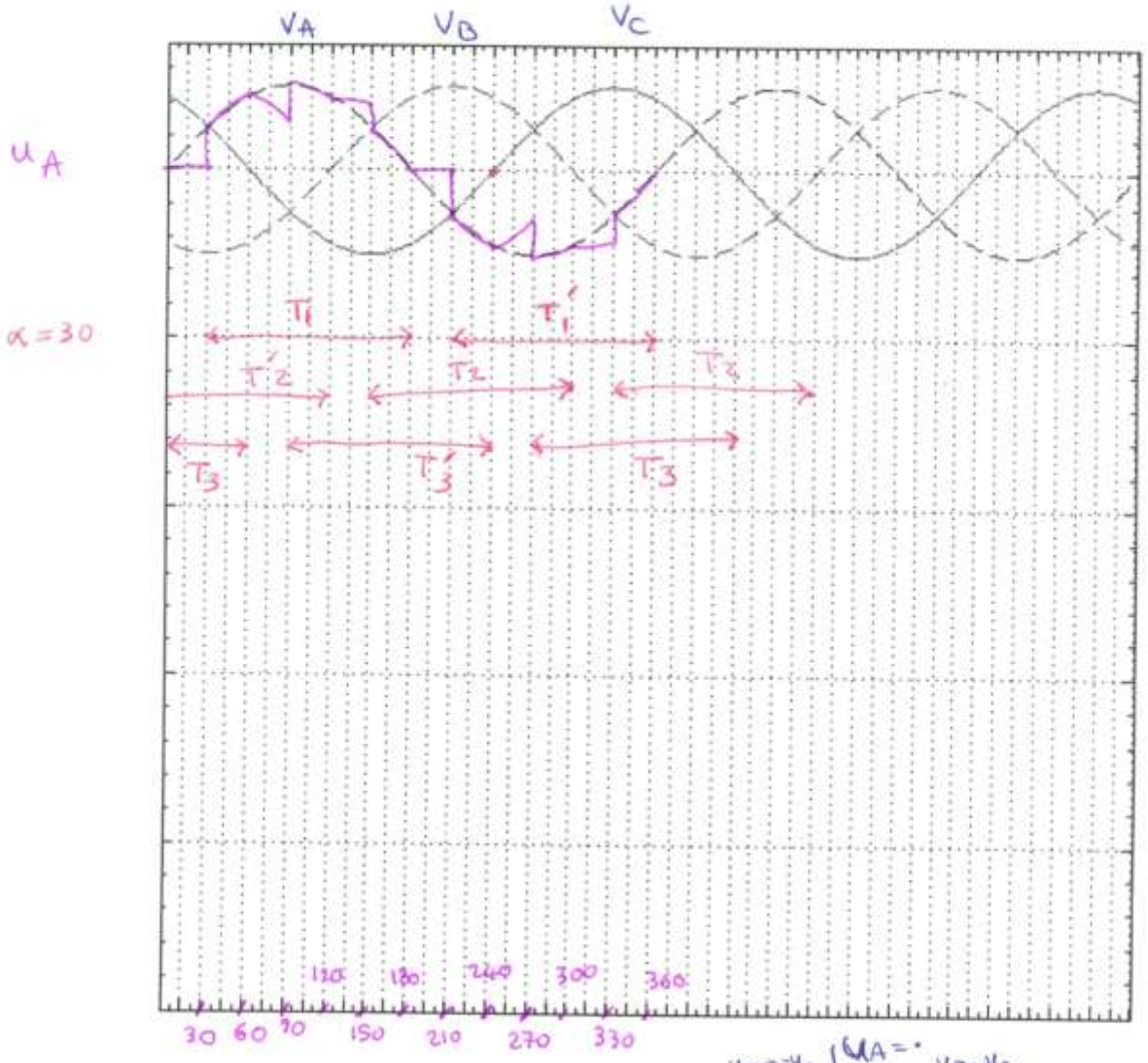
$195 < \omega t < 240 \Rightarrow T_1', T_2, T_3' : on \Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

$240 < \omega t < 255 \Rightarrow T_1', T_2 : on \Rightarrow -V_A + u_A - u_B + V_B = 0$ $\xrightarrow{u_A = u_B}$ $\begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_B}{2} \\ u_B = \frac{V_B - V_A}{2} \\ u_C = 0 \end{cases}$

$255 < \omega t < 290 \Rightarrow T_1', T_2, T_3 : on \Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

$290 < \omega t < 315 \Rightarrow T_1', T_3 : on \Rightarrow -V_A + u_A - u_C + V_C = 0$ $\xrightarrow{u_A = -u_C}$ $\begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_C}{2} \\ u_B = 0 \\ u_C = \frac{V_C - V_A}{2} \end{cases}$

$315 < \omega t < 360 \Rightarrow T_1', T_2', T_3 : on \Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$



$0 < \omega t < 30 \Rightarrow T_2', T_3$: on $\Rightarrow -V_B + u_B - u_C + V_C = 0 \xrightarrow{u_B = -u_C} \begin{cases} u_A = 0 \\ u_B = \frac{V_B - V_C}{2} \\ u_C = \frac{V_C - V_B}{2} \end{cases}$

$30 < \omega t < 60 \Rightarrow T_1, T_2', T_3$: on $\Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

$60 < \omega t < 90 \Rightarrow T_1, T_2'$: on $\Rightarrow -V_A + u_A - u_B + V_B = 0 \xrightarrow{u_A = -u_B} \begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_B}{2} \\ u_B = \frac{V_B - V_A}{2} \\ u_C = 0 \end{cases}$

$90 < \omega t < 120 \Rightarrow T_1, T_2', T_3'$: on $\Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

$120 < \omega t < 150 \Rightarrow T_1, T_3'$: on : on $\Rightarrow -V_A + u_A - u_C + V_C = 0 \xrightarrow{u_A = -u_C} \begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_C}{2} \\ u_B = 0 \\ u_C = \frac{V_C - V_A}{2} \end{cases}$

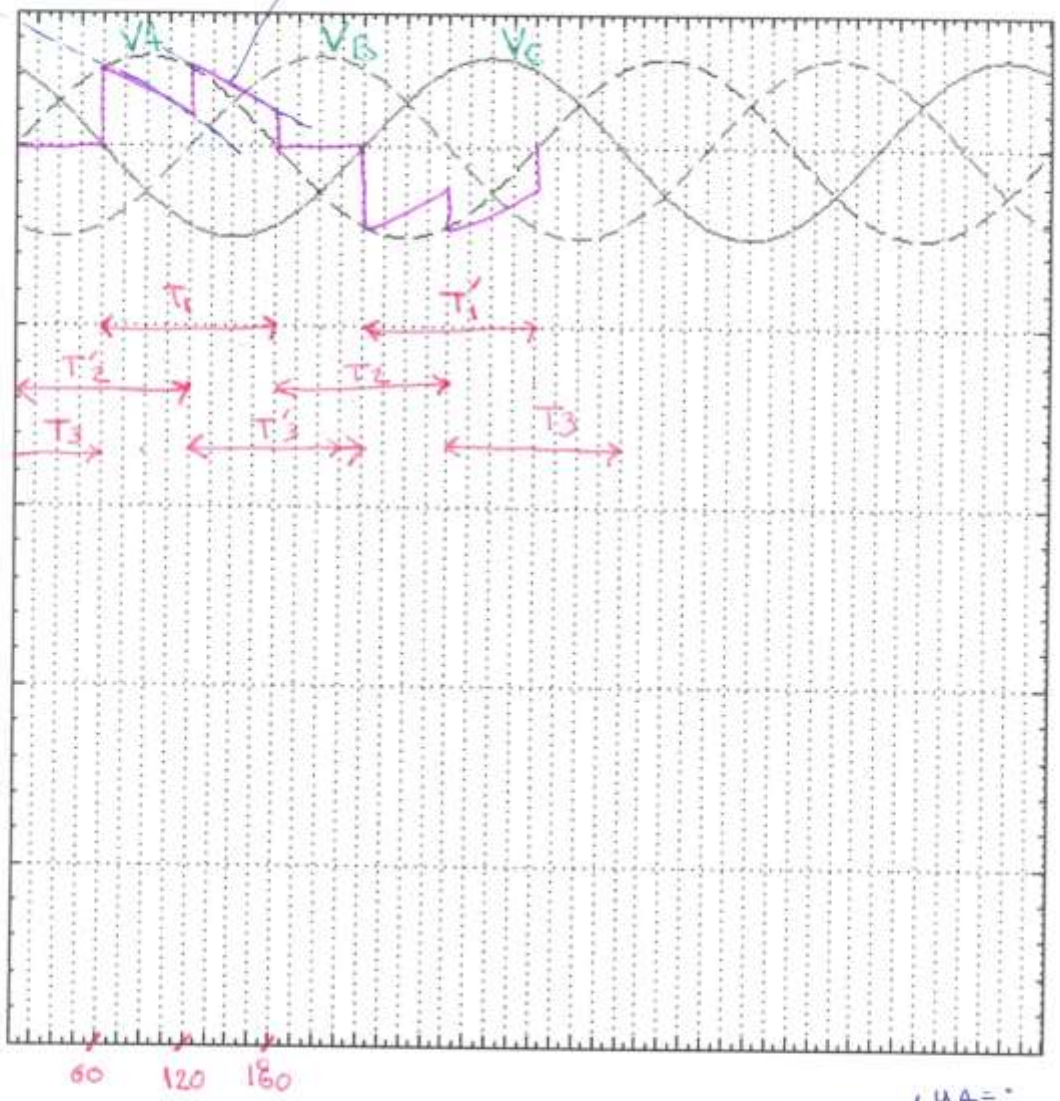
$150 < \omega t < 180 \Rightarrow T_1, T_2, T_3'$: on $\Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

⋮

نیم سیکل منفی مانند نیم سیکل مثبت است با
وجود علامت آن منفی می باشد

$u_A = \frac{V_A - V_C}{2}$

$u_A = \frac{V_A - V_B}{2}$



u(A)

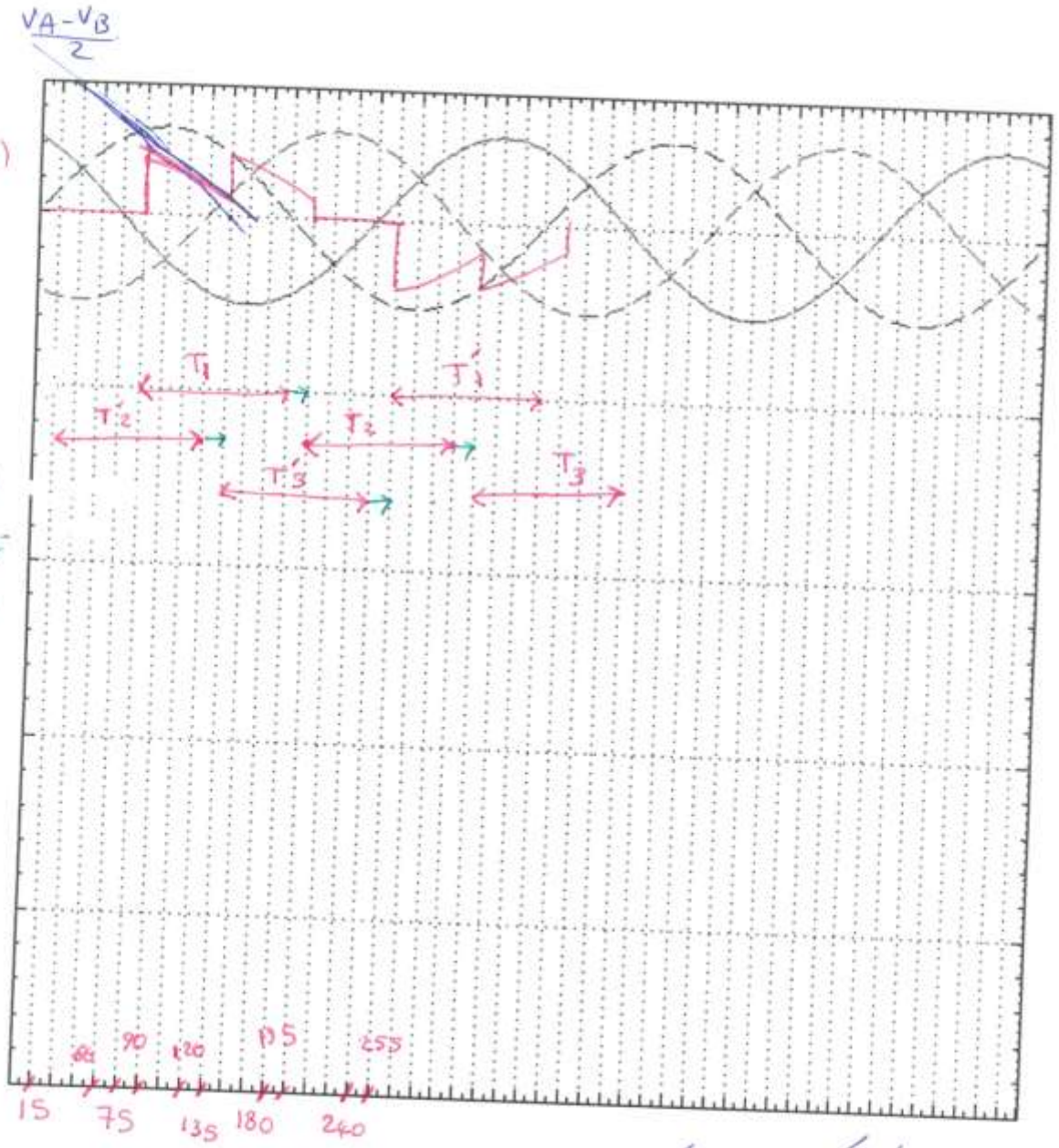
$\alpha = 60$ درجه
زاویه آتش

$0 < \omega t < 60 \Rightarrow T_3, T'_2$ on $\Rightarrow -V_B + u_B - u_C + V_C = 0 \xrightarrow{u_B = -u_C}$ $\begin{cases} u_A = 0 \\ u_B = \frac{-V_C + V_B}{2} \\ u_C = \frac{-V_B + V_C}{2} \end{cases}$

$60 < \omega t < 120 \Rightarrow T_1, T'_2$: on $\Rightarrow -V_A + u_A - u_B + V_B = 0 \xrightarrow{u_A = -u_B}$ $\begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_B}{2} \\ u_B = \frac{V_B - V_A}{2} \\ u_C = 0 \end{cases}$

$120 < \omega t < 180 \Rightarrow T_1, T'_3$: on $\Rightarrow -V_A + u_A - u_C + V_C = 0 \xrightarrow{u_A = -u_C}$ $\begin{cases} u_A = \frac{-V_C + V_A}{2} \\ u_B = 0 \\ u_C = \frac{V_C - V_A}{2} \end{cases}$

نیم سیکل دوم ، منفی نیم سیکل اول آن .



بازه‌ای که ترایستور یک به اجبار روشن است

اگر محدوده هدایت هر ترایستور را ۱۸۰ درجه بگیریم دیده می‌شود که در بعضی از بازه‌ها ۱ ترایستور و در بعضی از بازه‌ها ۲ ترایستور می‌خواهد هدایت کند. حالت ۱ ترایستوری نمی‌تواند وجود داشته باشد چون جریان آن ترایستور را صفر نخواهد داشت مثلاً در بازه $60 < \omega t < 75$ فقط T_2 هدایت می‌کند تا $\omega t = 60$ که ترایستور T_3 می‌خواهد خاموش شود و در $\omega t = 75$، T_1 می‌خواهد روشن شود. چون یک ترایستور به تنهایی نمی‌تواند هدایت کند در اینصورت T_2 ترایستور T_3 را به اجبار در حال هدایت نگه می‌دارد تا در $\omega t = 75$ که T_1 روشن شود

$0 < \omega t < 15 \Rightarrow v_A = v_B = v_C = 0$

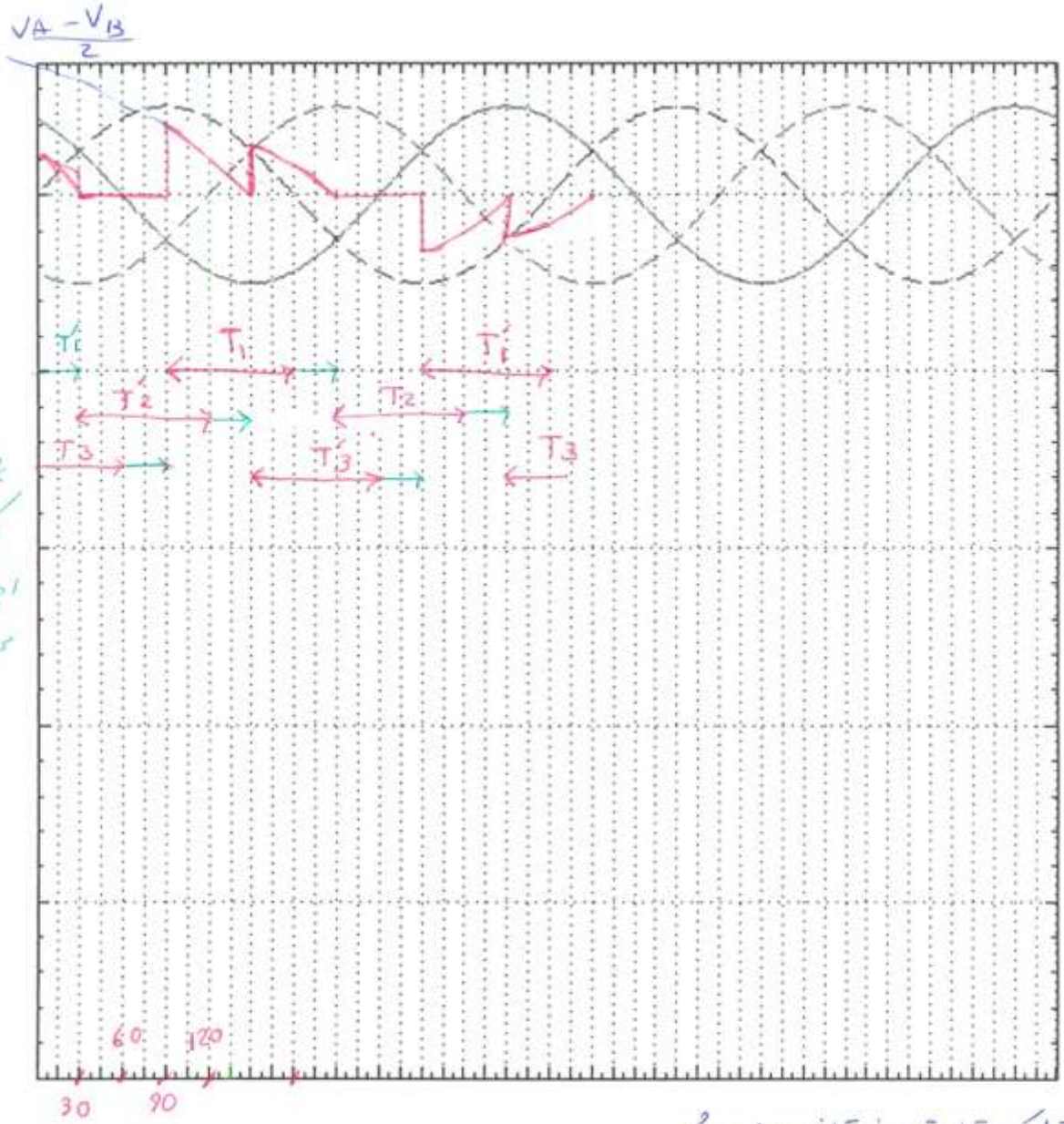
$15 < \omega t < 75 \Rightarrow T_2' : on \Rightarrow u_A = u_B = u_C = 0$

در این بازه

$75 < \omega t < 135 \Rightarrow T_1, T_2' : on \Rightarrow -v_A + u_A - u_B + v_B = 0 \xrightarrow{u_A = u_B} \begin{cases} u_A = \frac{v_A - v_B}{2} \\ u_B = \frac{v_B - v_A}{2} \\ u_C = 0 \end{cases}$

$135 < \omega t < 195 \Rightarrow T_1, T_3' : on \Rightarrow -v_A + u_A - u_C + v_C = 0 \Rightarrow \begin{cases} u_A = \frac{v_A - v_C}{2} \\ u_B = 0 \\ u_C = \frac{v_C - v_A}{2} \end{cases}$

مشابه سیکل دوم ترسیم نیم سیکل اول



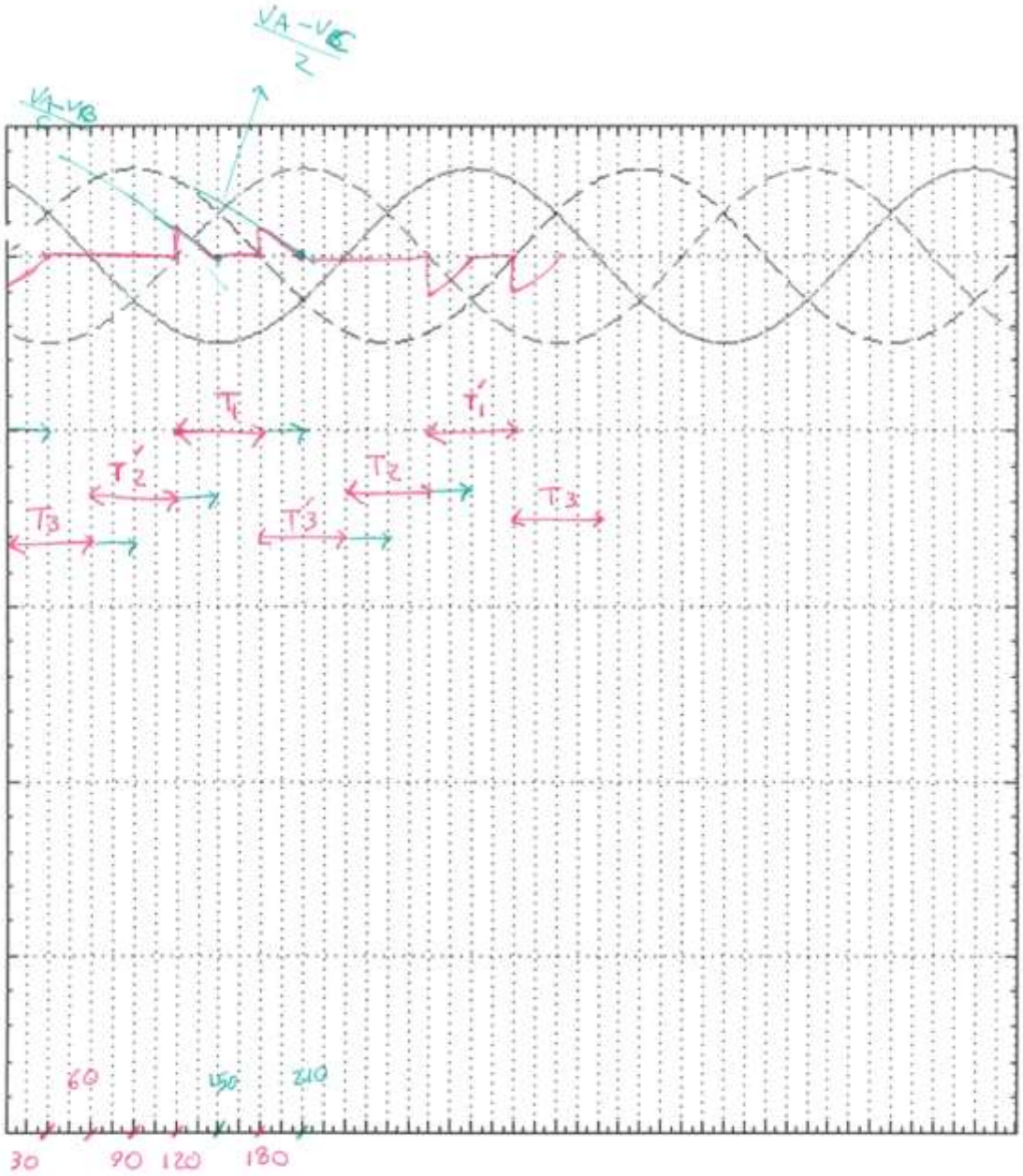
تنها قبل فقط کلید تریستور می تواند روشن باشد.

$0 < \omega t < 30 \Rightarrow T_1', T_3 : on \Rightarrow -V_A + u_A - u_C + V_C = 0 \Rightarrow \begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_C}{2} \\ u_B = 0 \\ u_C = \frac{V_C - V_A}{2} \end{cases}$

$30 < \omega t < 90 \Rightarrow T_2', T_3 : on \Rightarrow -V_B + u_B - u_C + V_C = 0 \Rightarrow \begin{cases} u_A = 0 \\ u_B = \frac{V_B - V_C}{2} \\ u_C = \frac{V_C - V_B}{2} \end{cases}$

$90 < \omega t < 150 \Rightarrow T_1, T_2' : on \Rightarrow -V_A + u_A - u_B + V_B = 0 \Rightarrow \begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_B}{2} \\ u_B = \frac{V_B - V_A}{2} \\ u_C = 0 \end{cases}$

$150 < \omega t < 210 \Rightarrow T_1, T_3' : on \Rightarrow -V_A + u_A - u_C + V_C = 0 \Rightarrow \begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_C}{2} \\ u_B = 0 \\ u_C = \frac{V_C - V_A}{2} \end{cases}$



$u_A(\omega t)$

$\alpha=120$

دیده می‌شود که در $\omega t=150, 210$ ، $\frac{V_A-V_B}{2}=\frac{V_A-V_C}{2}=0$ می‌شود یعنی جریان A از صفری تردد بنابراین هر لحظه به اندازه می‌تواند

۳۰ درجه به اصطلاح در هوا می‌ماند

$0<\omega t<30 \Rightarrow T_1', T_3$: on $\Rightarrow -V_A+u_A-u_C+V_C=0 \Rightarrow \begin{cases} u_A=\frac{V_A-V_C}{2} \\ u_B=0 \\ u_C=\frac{V_C-V_A}{2} \end{cases}$

$30<\omega t<60 \Rightarrow T_3$: on $\Rightarrow u_A=u_B=u_C=0$

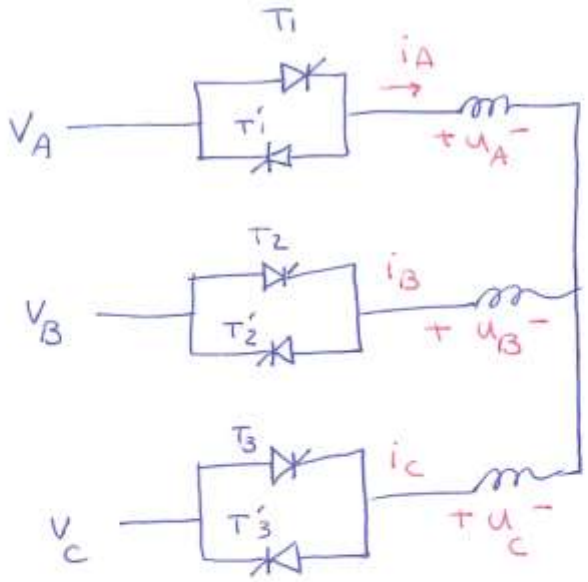
$60<\omega t<90 \Rightarrow T_3, T_2' \Rightarrow -V_B+u_B-u_C+V_C=0 \Rightarrow \begin{cases} u_A=0 \\ u_B=\frac{V_B-V_C}{2} \\ u_C=\frac{V_C-V_B}{2} \end{cases}$

$90<\omega t<120 \Rightarrow T_2'$: on $\Rightarrow u_A=u_B=u_C=0$

$120<\omega t<150 \Rightarrow T_1, T_2'$: on $\Rightarrow -V_A+u_A-u_B+V_B=0 \Rightarrow \begin{cases} u_A=\frac{V_A-V_B}{2} \\ u_B=\frac{V_B-V_A}{2} \\ u_C=0 \end{cases}$

$150<\omega t<180 \Rightarrow T_1$: on $\Rightarrow u_A=u_B=u_C=0$

مبدل AC/AC سه فاز با بار سلفی

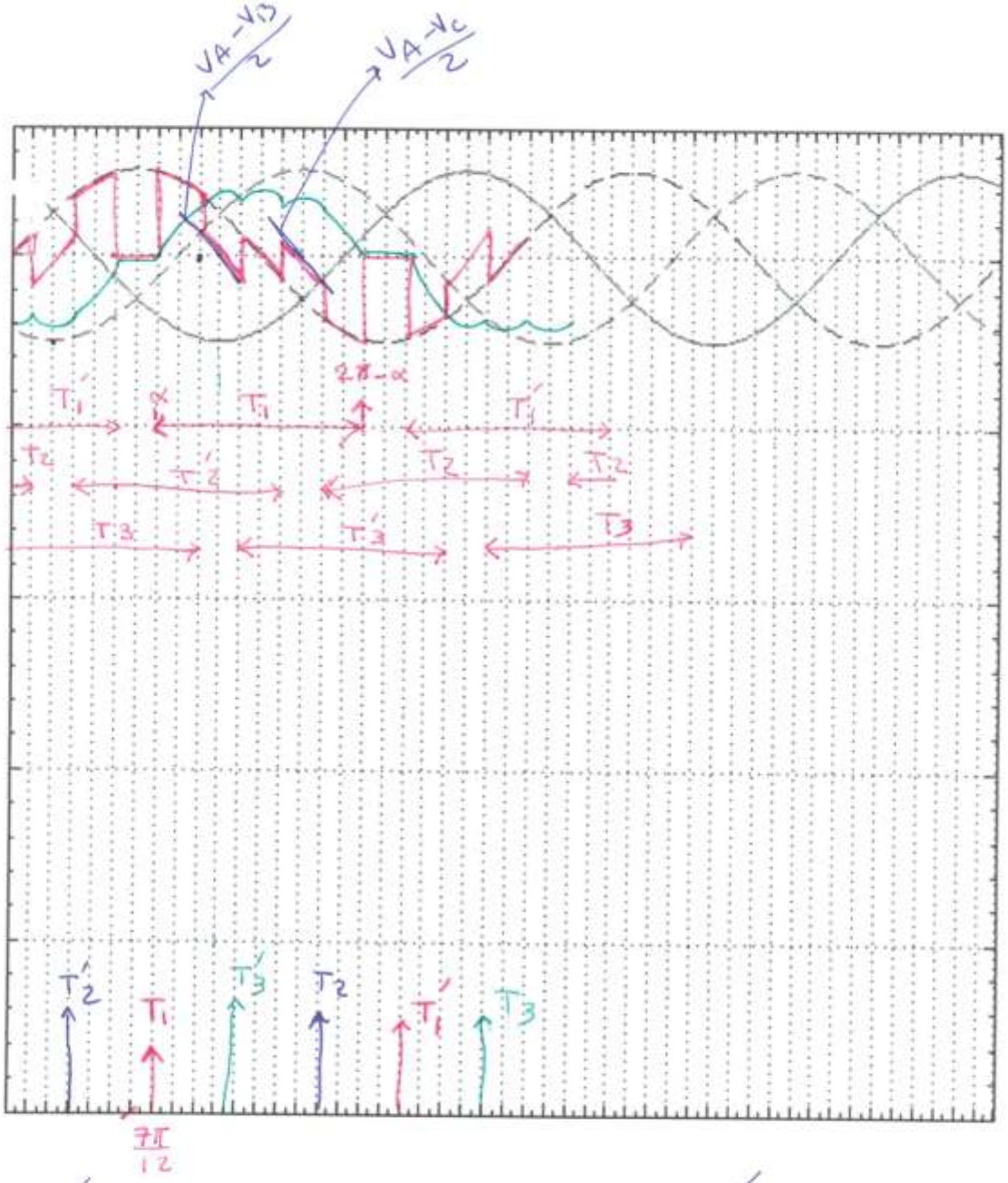


می دانیم که در بار سلفی باید زاویه آتش $\alpha > \frac{\pi}{2}$ باشد

دوازده زیر برای زاویه آتش در نظر گرفته می شود

$\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{2\pi}{3} \Rightarrow$ هدایت سه یا دو تریستوری

$\frac{2\pi}{3} < \alpha < \frac{5\pi}{6} \Rightarrow$ دو یا صفر تریستوری



در $\omega t = \alpha = 105^\circ$ ترانزیستور T_1 را روشن می‌کنیم چون بار سلفی است T_1 تا $2\pi - \alpha$ روشن می‌ماند بقیه کلیدها هم مثل T_1 عمل می‌کنند

$0 < \omega t < 15 \Rightarrow T_1', T_2, T_3 : on \Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

$0 < \omega t < 45 \Rightarrow T_1', T_3 : on \rightarrow -V_A + u_A - u_C + V_C = 0 \Rightarrow \begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_C}{2} \\ u_B = 0 \\ u_C = \frac{V_C - V_A}{2} \end{cases}$

$45 < \omega t < 75 \Rightarrow T_1', T_2', T_3 : on \Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

$75 < \omega t < 105 \Rightarrow T_2', T_3 : on \rightarrow -V_B + u_B - u_C + V_C = 0 \Rightarrow \begin{cases} u_A = 0 \\ u_B = \frac{V_B - V_C}{2} \\ u_C = \frac{V_C - V_B}{2} \end{cases}$

$105 < \omega t < 135 \Rightarrow T_1, T_2', T_3 : on \Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

$135 < \omega t < 165 \Rightarrow T_1, T_2' : on \Rightarrow -V_A + u_A - u_B + V_B = 0 \Rightarrow \begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_B}{2} \\ u_B = \frac{V_B - V_A}{2} \\ u_C = 0 \end{cases}$

$165 < \omega t < 195 \Rightarrow T_1, T_2', T_3' : on \Rightarrow \begin{cases} u_A = V_A \\ u_B = V_B \\ u_C = V_C \end{cases}$

جهت رسم جریان از $\omega t = \alpha = 105$ شروع می کنیم. دوباره $105 < \omega t < 135$ سه تریستور T_1، T_2' و T_3 هدایت می کنند پس:

$$\begin{cases} u_A = V_A \Rightarrow L\omega \frac{di_A}{d\omega t} = V_m \sin\omega t \Rightarrow i'_A = \frac{V_m}{L\omega} \sin\omega t \Rightarrow \\ u_B = V_B \Rightarrow L\omega \frac{di_B}{d\omega t} = V_m \sin(\omega t - 120) \Rightarrow i'_B = \frac{V_m}{L\omega} \sin(\omega t - 120) \\ u_C = V_C \Rightarrow L\omega \frac{di_C}{d\omega t} = V_m \sin(\omega t + 120) \Rightarrow i'_C = \frac{V_m}{L\omega} \sin(\omega t + 120) \end{cases}$$

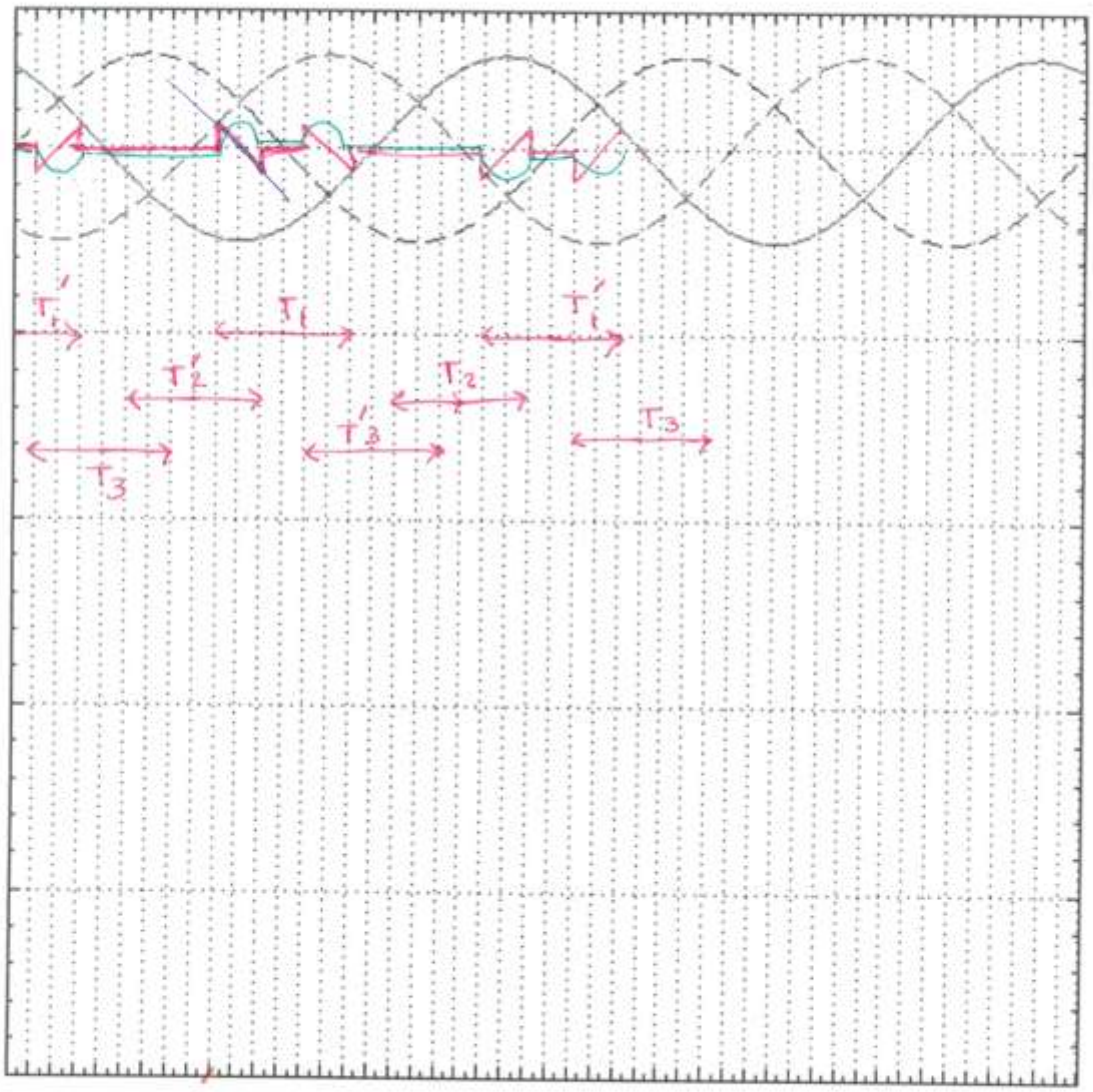
$$\begin{cases} i_A = \overbrace{A_1}^{i_{hA}} + \overbrace{B_1 \sin\omega t + C_1 \cos\omega t}^{i_{PA}} \Rightarrow i'_{PA} = B_1 \cos\omega t - C_1 \sin\omega t \Rightarrow i'_A \text{ و } i'_{PA} \text{ و } i_{PA} \text{ را بدست آورید} \\ i_A(\omega t = \alpha) = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow B_1 \cos\omega t - C_1 \sin\omega t = \frac{V_m}{L\omega} \sin\omega t \Rightarrow \begin{cases} B_1 = 0 \\ C_1 = -\frac{V_m}{L\omega} \end{cases} \Rightarrow i_{PA} = -\frac{V_m}{L\omega} \cos\omega t$$

$$\Rightarrow \begin{cases} i_A = A_1 - \frac{V_m}{L\omega} \cos\omega t \\ i_A(\omega t = \alpha) = 0 \end{cases} \Rightarrow A_1 = \frac{V_m}{L\omega} \cos\alpha \Rightarrow i_A = \frac{V_m}{L\omega} (\cos\alpha - \cos\omega t)$$

i_A تا $\omega t = 135$ ادامه دارد:

$$i_A(\omega t = 135) = \frac{V_m}{L\omega} (\cos 105 - \cos 135) = I_{A135}$$



$0 < \omega t < 15 \Rightarrow T_1' : on \Rightarrow u_A = u_B = u_C = 0$

$15 < \omega t < 45 \Rightarrow T_1', T_3 : on \Rightarrow -V_A + u_A - u_C + V_C = 0 \Rightarrow \begin{cases} u_A = \frac{V_A - V_C}{2} \\ u_B = 0 \\ u_C = \frac{V_C - V_A}{2} \end{cases}$

$45 < \omega t < 75 \Rightarrow T_3 : on \Rightarrow u_A = u_B = u_C = 0$

$75 < \omega t < 105 \Rightarrow T_2', T_3 : on \Rightarrow -V_B + u_B - u_C + V_C = 0 \Rightarrow \begin{cases} u_A = 0 \\ u_B = \frac{V_B - V_C}{2} \\ u_C = \frac{V_C - V_B}{2} \end{cases}$

$105 < \omega t < 135 \Rightarrow T_2' : on \Rightarrow u_A = u_B = u_C = 0$

همانطور که برای زوایای آتش دیده شد، دامنه جمله اول سری فوریه ولتاژ خروجی (v_A, v_B, v_C) به ازای تغییرات زاویه آتش خواهد داشت. بنابراین این مبدل را می‌توان مبدل AC/AC کاهنده (با کاهش دامنه ولتاژ) در نظر گرفت