

# DOĞRULTUCULAR

AC gerilimi DC gerilime dönüştüren sistemlerdir. Güç elektroniği devreleri olarak doğrultucular denetimli ve denetimsiz olarak 2'ye ayrılır. Anahtar eleman olarak genellikle denetimsiz doğrultucularda diyot, denetimlilerde ise tristör kullanılır. AC giriş geriliminin periyoduna göre tristörlerin periyodik olarak tetiklenmesi (ateşlenmesi) gerekir.

**Ateşleme açısı ( $\alpha$ ):** Devrede söz konusu denetimli eleman (tristör, triyak gibi) yerine diyot olsa ve yük omik olsa o diyodun iletme geçeceği  $\omega t$  değerinden ne kadar açı sonra söz konusu denetimli elemanın tetiklendiğidir.

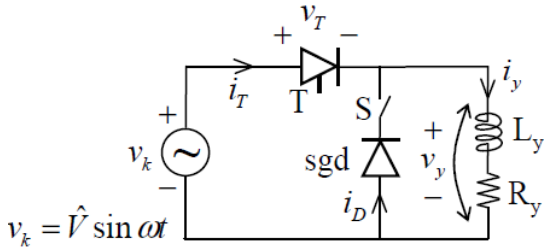
Bu derste denetimli doğrultucular şu yükler için incelenecektir:

- 1) Omik yükte ( $R_y$ )
- 2) Endüktif yükte ( $R_y$  ve  $L_y$  birlikte)
- 3) Tam süzölmüş akımlı ( $R_y$  ile birlikte  $L_y \approx \infty$ )

Ayrıca  $L_y$  kullanılan durumlarda serbest geçiş diyodu (sgd) denilen yüke ters paralel bir diyodun kullanılıp kullanılmamasına göre de ayrı ayrı inceleme yapılacaktır. Genel olarak devrenin sıfır anından önce uzun zamandır çalıştığı düşünülerek çizimler yapılacaktır.

Doğrultucu devrelerin derste kullanacağımız kısa adlarındaki "O" ya da "K" harfi "orta uçlu" ya da "köprü" anlamında, yanındaki sayı ise sinüzoidal giriş geriliminin bir periyoduna karşılık çıkışta kaç tane sinüzoidal dalga parçası görüldüğü anlamındadır.

## Tek fazlı yarım dalga doğrultucu (O1):

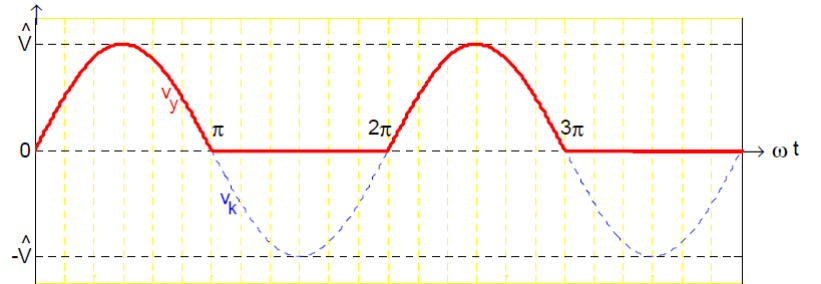


Tek fazlı yarım dalga doğrultucu (O1)

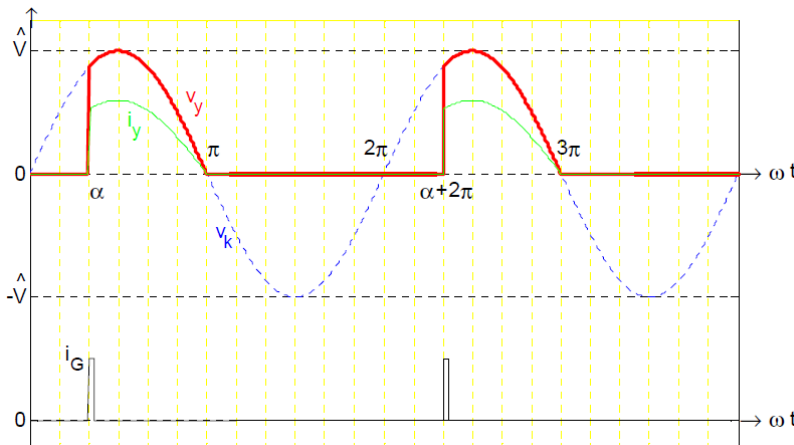
(Aslında orta uç söz konusu olmasa da tür olarak orta uçlu doğrultucular grubunda ele alınmaktadır.)

T tristörü yerinde diyot olsaydı, iletme geçiş anarı yandaki gibi (bu şekil için  $2\pi$ 'nin katlarında) olurdu. Bu yüzden  $\alpha$ 'nın başlangıcı  $2\pi$ 'nin katları olarak düşünülerek ateşleme yapılır. (Kaynak geriliminin fazıyla birlikte kayabilir.)

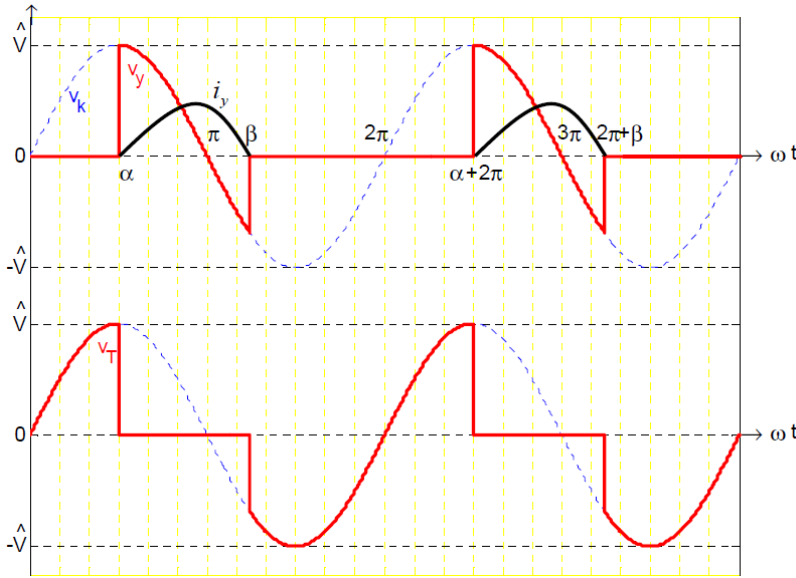
Omik yükte ve  $\alpha = 0^\circ$  (tristör yerine diyot)



Omik yükte ve  $\alpha = 60^\circ$



Endüktif yükte sgd yok ve  $\alpha = 90^\circ$



Bu defa  $i_y$  akımı gecikmeli olarak artıp azalır ve  $\omega t = \beta > \pi$  olan bir anda akım sıfırlanır. Akım kesilmedikçe tristör iletimde kalır,  $v_k < 0$  olsa bile. Çünkü akım azalırken  $L_y$  üzerinde endüklenen ters gerilim  $v_k$ 'ya rağmen tristörü doğru kutuplar.

Tristör üzerindeki gerilim ( $v_T$ ) de yanda verilmiştir. Genel olarak tristör iletimdeyken üzerindeki gerilim idealde sıfırdır (gerçekte 0,8~1V civarı). Bu devre için  $v_T = v_k - v_y$  olmaktadır.

### Serbest geçiş diyodunun etkisi :

O1 devresindeki S anahtarı kapatılmışsa Endüktif yüklerde sgd devreye girer. Sgd, yük geriliminin negatife düşmesini engeller (idealde böyledir, gerçekte -0,7V civarında tutar). Çünkü  $v_y$  negatif olmaya meyledince sgd iletime geçer ve  $v_y = 0$ 'da kalmasını sağlar. Bunun üzerine tristör kesime gitmek zorunda kalır. Endüktansın enerjisi sgd üzerinden tamamen boşalana kadar böyle olur ve sonra sgd de kesime gider.

Sgd iletime geçince  $i_y$ , idealde asimptotik sönümlü RL devrelerindeki gibi sönümlenmeye başlar; ancak gerçekte diyodun iletim voltajından dolayı kısa sürede akım kesilir.

Sgd'siz endüktif yüklü çalışmada  $v_y < 0$  iken  $i_y > 0$  olması, anlık gücün negatif olduğu, yani endüktansta depolanmış enerjinin kaynaklara aktarıldığı anlamına gelmektedir. Sgd bu durumu önlediği için geri verilecek enerjinin gereksiz yere şebekeden fazladan çekilmemesini sağlar. Yani sgd reaktif gücü azaltır.

Tam süzölmüş akımla O1 devresinde sürekli olarak çalışmaz.

### DC Gerilim Hesabı:

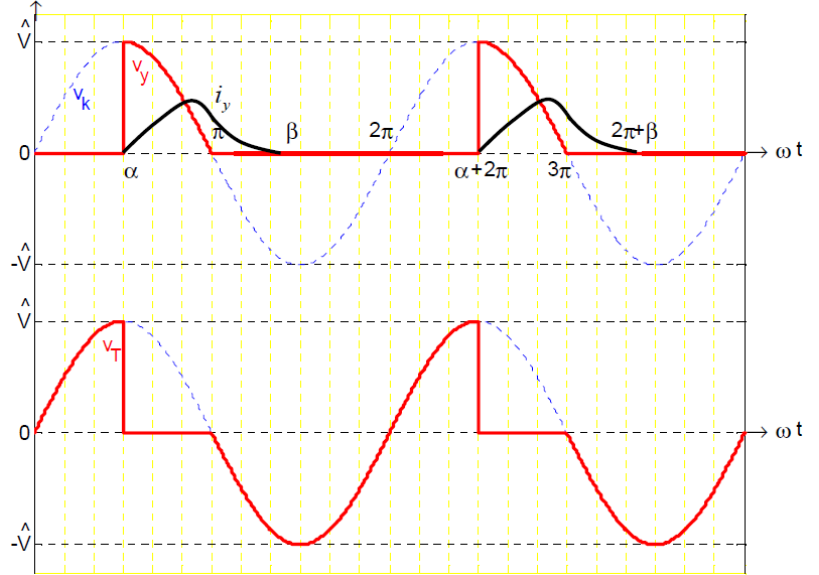
O1 devresindeki  $v_y$  geriliminin ortalama değeri ( $V_{ydc}$ ) genel olarak şöyle bulunur:

$$V_{ydc} = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} v_y d(\omega t) = \frac{\hat{V}}{2\pi} \int_{\alpha}^{\gamma} \sin(\omega t) d(\omega t)$$

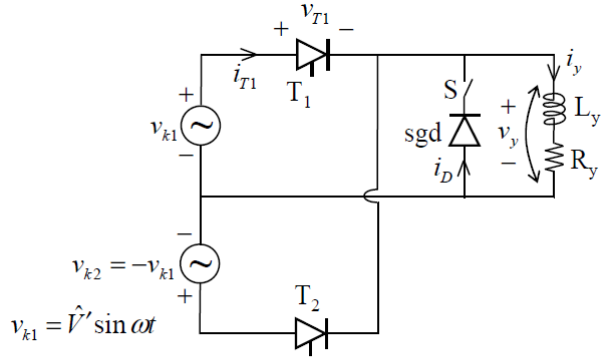
Burada  $\gamma$  açısı,  $v_y$ 'nin  $\alpha$ 'da başlayan sinüzoidal fonksiyonlu parçasının son anındaki açısıdır. Özetle O1 için:

$$V_{ydc} = \frac{\hat{V}}{2\pi} (\cos \alpha - \cos \gamma) \quad \gamma = \begin{cases} \pi & \text{omik yükte ve sgd'li endüktif yükte} \\ \beta & \text{sgd'siz endüktif yükte} \end{cases}$$

Endüktif yükte sgd var ve  $\alpha = 90^\circ$



## Tek fazlı tam dalga doğrultucu (O2):



Tek fazlı tam dalga doğrultucu (O2)

Bu devrede, yanda verilen kaynak fonksiyonu için  $\alpha = 0^\circ$  başlangıcının,

$T_1$  için  $\omega t = 2k\pi$ ,

$T_2$  için  $\omega t = (2k-1)\pi$ ,

anlarına karşılık geldiği açıktır (Diyot olsalardı omik yükte bu anlarda ilettime geçerlerdi). Buna göre herhangi bir  $\alpha$  için

$\omega t = 2k\pi + \alpha$  anlarında  $T_1$ ,

$\omega t = (2k-1)\pi + \alpha$  anlarında  $T_2$

tetiklenmelidir.

O2 devresinin omik yükte çalışma grafikleri yanda verilmiştir.

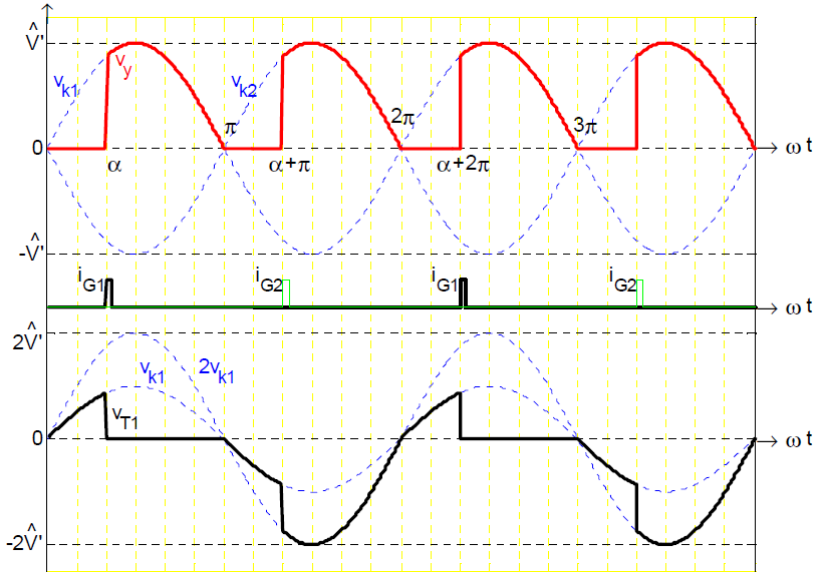
Burada  $v_{T1}$  de gösterilmiştir.  $T_1$  iletimdeyken  $v_{T1} = 0$ 'dır.  $T_2$  iletimdeyken ise orta uca göre  $T_1$ 'in anodu  $v_{k1}$ , katodu ise  $v_{k2}$  potansiyelinde olduğundan  $v_{T1} = v_{k1} - v_{k2} = 2v_{k1}$  olur. Her iki tristör de kesimdeyken ise  $v_y = 0$  olduğundan katot potansiyeli orta uç potansiyelindedir. Anot ise yine  $v_{k1}$  potansiyelinde olduğundan  $v_{T1} = v_{k1}$  olur. Özetle:

$$v_{T1} = \begin{cases} 0 & T_1 \text{ iletimde ise} \\ 2v_{k1} & T_2 \text{ iletimde ise} \\ v_{k1} & T_1 \text{ ve } T_2 \text{ kesimde ise} \end{cases}$$

Bu ifade O2 devresinin inceleyeceğimiz tüm durumları için geçerlidir.

Şekilde ayrıca  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin tetiklenme akımları da gösterilmiştir. Şekillerde  $v_{T1}$  ölçeğinin farklı olduğuna dikkat ediniz.

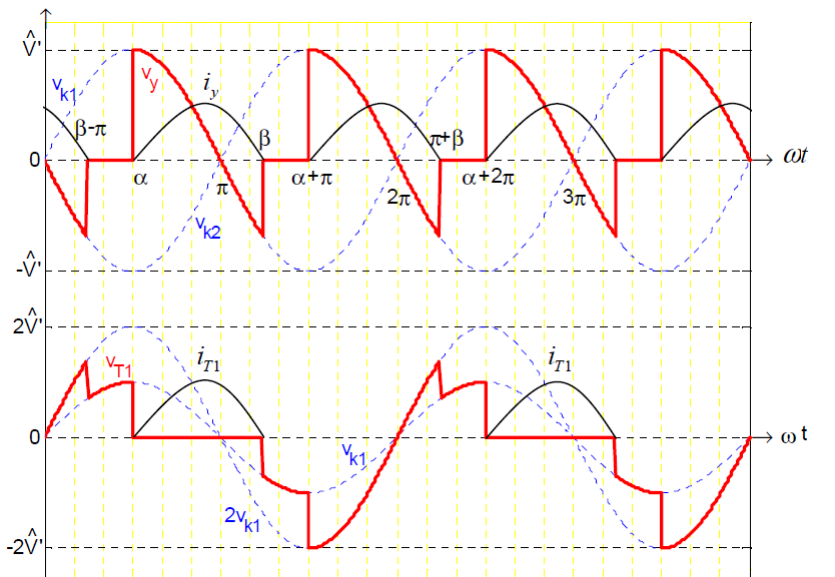
Omik yükte  $\alpha = 60^\circ$



Endüktif yükte sgd'siz çalışmada ise grafikler yandaki gibi olur. Endüktans, akımın ani değişimini engellediği için  $i_y$  yavaşça yükselir ve sönmelenmesi  $v_y$ 'nin sıfıra ulaşmasından sonra olur.  $i_y$  sinüs parçası biçiminde değildir.  $i_y$  sıfırlanana kadar ilgili tristör iletimde kalmaya devam ettiğinden,  $v_y$  aynı fonksiyonu izlemeye devam eder.

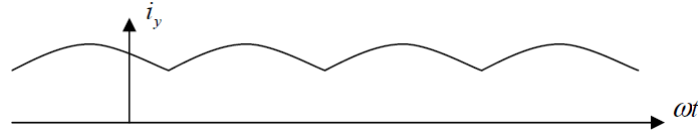
$i_y$  parçalarından sırasıyla birisi  $T_1$ , diğeri  $T_2$  üzerinden geçtiği için,  $i_{T1}$  alt şekildeki gibi olur. Yukarıda verilen  $v_{T1}$  fonksiyonu çizilince de yanda alttaki şekil bulunur.

Endüktif yükte sgd yok ve  $\alpha = 90^\circ$



Burada  $\beta < \alpha + \pi$  olduğu varsayılmıştır. Eğer  $\beta > \alpha + \pi$  olmaya meylederse  $i_y$  hiç sıfırlanmadan sürekli devam eder. Bu durumda yukarıdaki şekillerin  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin kesimde olduğu kısımları daralarak yok olur.

Büyük  $L_y$  endüktansı kullanılmasından doğan bu durumda  $i_y$  akımı şöyle bir şekil alır:

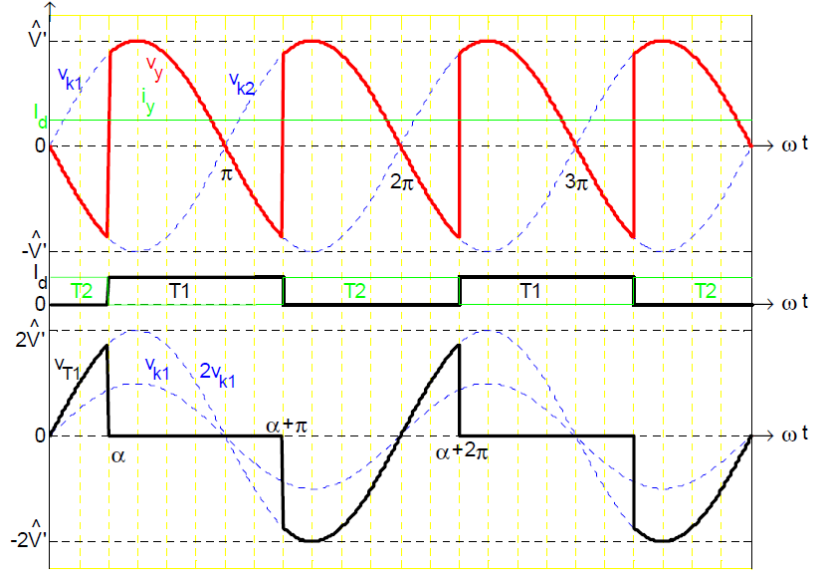


Eğer  $L_y \approx \infty$  sayılabilecek kadar büyük bir endüktans kullanılırsa  $i_y$  akımındaki dalgalanma ihmal edilebilecek kadar küçük olur ve  $I_d$  gibi bir değerde sabit kaldığı düşünülür. Buna “tam süzölmüş akımlı çalışma” denir. Aslında bu, ilk çalışmada bir geçiş döneminde akımın yükselerek dengeye gelmesinden sonra olur. Fakat biz çizimlerimizi sistemin sıfır anından önce dengeye ulaşacak kadar uzun bir süredir çalıştığı varsayımıyla yapıyoruz.

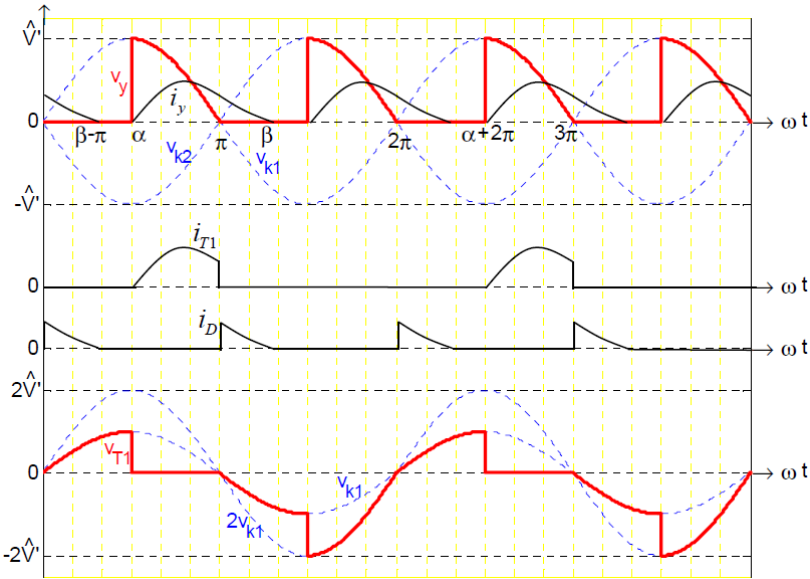
Yandaki şekilde tam süzölmüş akımlı çalışma grafikleri sgd’siz durum için görülmektedir.  $i_y = I_d$  değerinde sabit olan akım, bazen  $T_1$  bazen de  $T_2$  tarafından taşınmaktadır. Yanda ortadaki şekil bunu göstermektedir.

Her an bir tristör iletimde olduğu için  $v_{T1}$ ’in  $v_{k1}$ ’e eşit olduğu durum yoktur.

Tam süzölmüş akımlı, sgd yok ve  $\alpha = 60^\circ$

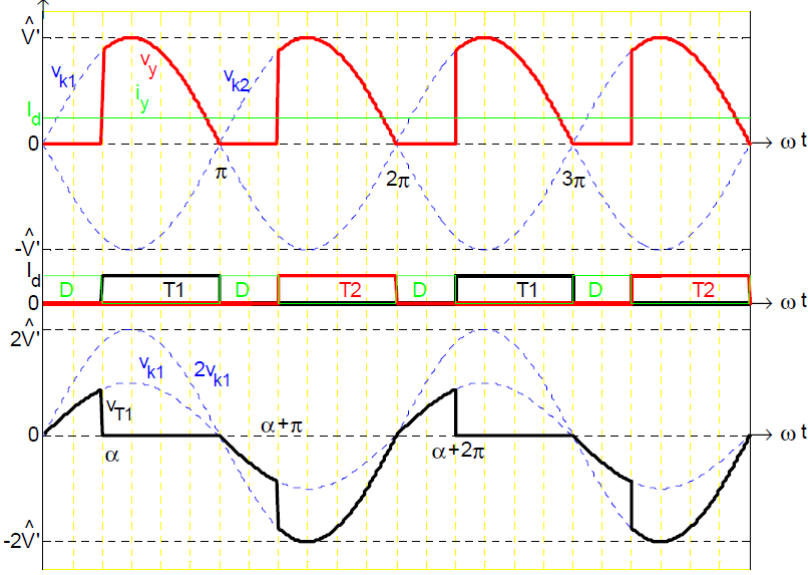


Endüktif yükte sgd var ve  $\alpha = 90^\circ$



Sgd’li çalışmada gerilim negatife düşmediği için gerilimler omik yüklerdeki gibi olur. Yük akımı sgd’siz durumdakine yakındır. Yük akımı bazen tristörlerden birinden bazen de sgd’den geçer. Tristör gerilimi de omik yüklerdeki gibi olur.

Tam süzölmüş akımlı, sgd var ve  $\alpha = 60^\circ$



Tam süzölmüş akımlıda da sgd kullanılması benzer etki yapar. Yanda ortadaki şekil, yük akımının dönüşümlü olarak  $T_1$ ,  $T_2$  ve sgd üzerinden geçişini göstermektedir.

Tüm bu şekillerde tristör gerilim dalgasının farklı ölçekte çizildiğine dikkat ediniz.

### DC Gerilim Hesabı:

O2 devresinde  $v_y$  geriliminin  $\omega t$ 'ye göre periyodu  $\pi$  olduğundan ortalama değeri ( $V_{ydc}$ ):

$$V_{ydc} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} v_y d(\omega t) = \frac{\hat{V}'}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \sin(\omega t) d(\omega t)$$

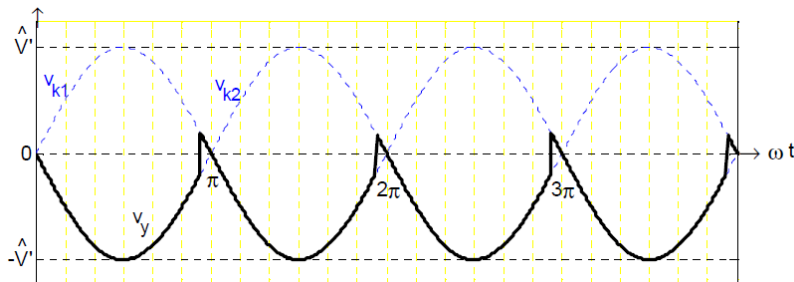
Burada  $\gamma$  açısı,  $v_y$ 'nin  $\alpha$ 'da başlayan sinüzoidal fonksiyonlu parçasının son anındaki açısıdır. Yani:

$$\gamma = \begin{cases} \pi & \text{sgd varsa veya yük omikse} \\ \beta & \text{sgd'siz endüktif yüklüde} \\ \alpha + \pi & \text{sgd'siz tam süzölmüş akımlıda} \end{cases} \quad \text{olmak üzere} \quad V_{ydc} = \frac{\hat{V}'}{\pi} (\cos \alpha - \cos \gamma)$$

$-\cos \pi = 1$  ve  $\cos(\alpha + \pi) = -\cos \alpha$  yerine yazılırsa ortalama yük gerilimi şöyle bulunur:

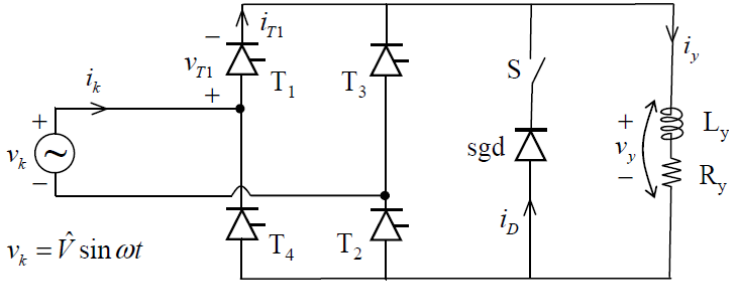
$$V_{ydc} = \begin{cases} \frac{\hat{V}'}{\pi} (1 + \cos \alpha) & \text{sgd varsa veya yük omikse} \\ \frac{\hat{V}'}{\pi} (\cos \alpha - \cos \beta) & \text{sgd'siz endüktif yüklüde} \\ \frac{2\hat{V}'}{\pi} \cos \alpha & \text{sgd'siz tam süzölmüş akımlıda} \end{cases}$$

Dikkat edilirse  $\alpha > 90^\circ$  için sgd'siz tam süzölmüş akımlı çalışmada negatif dc gerilim elde edilebilmektedir.  $i_y > 0$  olduğundan bu,  $L_y \approx \infty$  endüktansında depolanmış enerjinin şebekeye aktarılması demektir ve gerçekte bu çalışmanın uzun süre devam etmesi mümkün değildir. Kısa süreli olarak mümkün olan en büyük  $\alpha$  değerini bulmak için son çizimdeki  $v_{T1}$ 'e bakarsak  $\alpha$  değerini sağa doğru kaydırırken tetiklemeden hemen önce  $v_{T1} > 0$  şartının,  $\alpha = 180^\circ$ 'ye kadar geçerli olduğunu görürüz. Pratikte tristörün ilettime geçiş gecikmesini ( $t_q$ ) de dikkate alarak  $0^\circ < \alpha < 180^\circ - \omega t_q$  aralığında ateşleme yapılabileceği anlaşılır. Sgd'siz tam süzölmüş akımlı  $\alpha = 180^\circ - \omega t_q$  sınırında çalışılırsa  $v_y$  dalga şekli şöyle olur:



Bunun geçici bir çalışma olduğu unutulmamalıdır.

## Tek fazlı köprü doğrultucu (K2) :



Tek fazlı tam denetimli köprü doğrultucu (K2)

Bu devre, O2'ye çok benzer olarak çalışır. T<sub>1</sub> ile T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> ile de T<sub>4</sub> birlikte tetiklendiği için ilettime ve kesime birlikte geçerler (numaralandırma buna göre yapılmıştır).

Bu devrenin grafiklerinin çoğu ölçek farkıyla O2 devresininkilere benzer. Örnek olarak sgd'siz endüktif yük çizimleri aşağıda gösterilmiştir.

Endüktif yükte sgd yok,  $\alpha = 90^\circ$

Şekilde kaynak akımı ( $i_k$ ) ve iletimde olan tristörler de belirtilmiştir.

$v_{T1}$  çizilirken, tüm tristörlerin kesimde olduğu anlarda aslında sonsuz olan tristör iç dirençleri, bütün tristörler için eşit kabul edilerek  $v_{T1} = v_k/2$  bulunmuştur.

Çünkü T<sub>1</sub> ve T<sub>2</sub> tristörleri  $v_y = 0$  üzerinden seri bağlı olarak  $v_k$  gerilimini taşımaktadır. Sgd kullanılan durumlarda sgd'nin iletimde olduğu anlarda da aynı şey geçerlidir. Gerçekte tüm tristörler kesimdeyken tristör gerilimleri 0 ile  $v_k$  arasında belirsiz değerlerdedir. T<sub>3</sub> ve T<sub>4</sub> iletimdeyken T<sub>1</sub>'in anodu kaynağın + ucuna, katodu ise T<sub>3</sub> üzerinden kaynağın - ucuna bağlı olduğu için  $v_{T1} = v_k$  olur.

T<sub>1</sub> ve T<sub>2</sub> iletimdeyken ise  $v_{T1} = 0$  olduğu gayet açıktır. Buna göre K2 devresinde  $v_{T1}$  şöyle yazılabilir.

$$v_{T1} = \begin{cases} 0 & \text{T}_1 \text{ ve T}_2 \text{ iletimde ise} \\ v_k & \text{T}_3 \text{ ve T}_4 \text{ iletimde ise} \\ v_k/2 & \text{T}_1, \text{T}_2, \text{T}_3 \text{ ve T}_4 \text{ kesimdeyse ve tikama ic dirençleri esit kabul edilirse} \end{cases}$$

Genel olarak, K2'deki dalga şekilleri O2'dekilerle aynı biçimli, fakat ölçek olarak şöyle farklıdır:

$$[v_y]_{K2} = \frac{\hat{V}}{\hat{V}'} [v_y]_{O2} \quad \text{ve} \quad [v_T]_{K2} = \frac{\hat{V}}{2\hat{V}'} [v_T]_{O2}$$

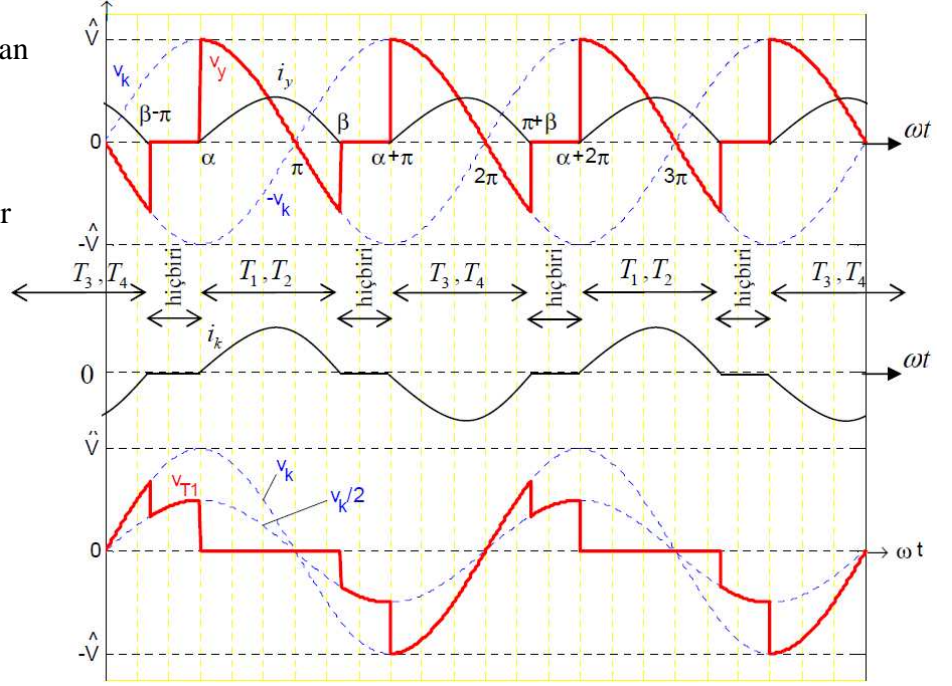
$V_{ydc}$  için de yukarıdaki  $v_y$  oranı geçerlidir.

## Doğrultucularda Güç Hesabı :

İnceleyeceğimiz tüm doğrultucularda genel olarak,  $\omega t$  cinsinden  $v_y$ 'nin periyoduna  $T_{vy}$  dersek,

$$R_y \text{ ile } L_y \text{ birlikte yük üzerindeki ortalama güç: } P = \frac{1}{T_{vy}} \int_{T_{vy}} v_y i_y d(\omega t)$$

$$\text{Yalnız } R_y \text{ üzerindeki ortalama güç ise: } P_{Ry} = \frac{1}{T_{vy}} \int_{T_{vy}} R_y i_y^2 d(\omega t) = R_y I_{y \text{ rms}}^2$$



Buna göre omik yükte ( $L_y = 0$ ) ortalama güç:  $P = P_{R_y} = R_y I_{y_{rms}}^2 = \frac{V_{y_{rms}}^2}{R_y}$

Tam süzölmüş akımlıda ( $L_y \approx \infty$ )  $R_y$  ile  $L_y$  birlikte yük üzerindeki ortalama güç:

$$P = \frac{1}{T_{vy}} \int_{T_{vy}} v_y I_d d(\omega t) = V_{y_{dc}} \cdot I_d$$

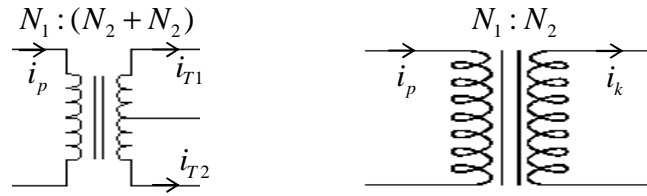
Tam süzölmüş akımlıda ( $L_y \approx \infty$ ) yalnız  $R_y$  üzerindeki ortalama güç:  $P_{R_y} = R_y I_d^2$

Tam süzölmüş akımlı çalışmada geçici bir süre için  $P_{R_y}$  ile  $P$  'nin farklı olması mümkündür. Ama çok uzun süreli bir çalışmada bunlar ortalama olarak aynı olurlar.

Diğer durumlarda da genel güç formülünden yola çıkılarak hesap yapılmalıdır.

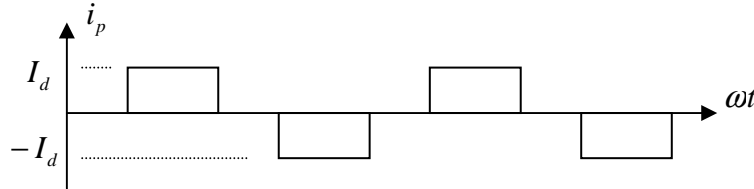
### **Tek Fazlı Doğrultucularda Harmonik Analizi :**

Harmonik analizi genellikle sistemin şebekeye bağlı tarafına göre yapılır. Kaynak olarak genellikle trafo kullanılır. O2 için sekonderi orta uçlu (aşağıda soldaki), O1 ve K2 için ise normal bir trafo (sağdaki) kullanılır.



Akım ve gerilim dalga şekilleri K2 devresinde primer ve sekonderde ölçüğü farklı olsa da aynı biçimli ve akım gerilim çarpımı aynı değerlidir. Bu yüzden K2 devresinin harmonik analizi ister primer, ister sekonder değerleriyle yapılabilir.

O2 devresinde ise sekonder akımı bir yarı periyotta bir taraftan, diğer yarı periyotta diğer taraftan geçtiği için harmonik analizinin primer gerilim ve akımıyla yapılması daha kolaydır. Örneğin 1:(1+1) sarım oranlı bir trafo kullanılıyorsa primer akımı, 1:1 oranlı K2 trafosununki gibi olur:



(Bu şekil, sgd kullanılan tam süzölmüş akımlı çalışma içindir. Aradaki boşluklarda yük akımı sgd üzerinden dolaşmaktadır.)

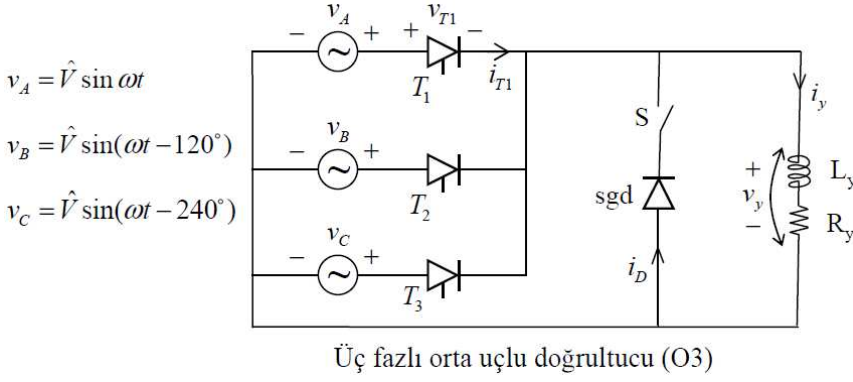
### **Tam Denetimli Doğrultucularda Aktarım :**

Akımın, anahtar olarak kullanılan bir elemandan diğerine devredilmesine “aktarım” denir. Aktarım süresince bu iki eleman da iletimde olur. Birisi, yük akımı değerinden sıfır akıma doğru kesime giderken, diğeri sıfır akımdan yük akımı değerine ulaşarak yük akımını tamamen devralır. Bu değişim, bir anlık kısa devre akımıyla olur. Kaynak iç endüktansları (trafo sargılarının kaçak endüktansları) aktarımı tamamlayacak yönde akımların değişim hızı üzerinde önemli rol oynar. Bu yüzden bu endüktansları ihmal etmeden hesap yapacağız. Sargı dirençlerini ise ihmal edeceğiz ve tristörleri yine ideal kabul edeceğiz.

Aktarım hesapları, inceleyeceğimiz tam denetimli doğrultucuların hepsinde benzer biçimdedir. Anlatım kolaylığından dolayı bu hesapları O2 devresi üzerinde gösterelim.

(Bu konunun devamı derste tahtaya yazarak anlatıldığı için bu dosyada yer almamıştır; ancak çok benzeri bu dosyada bir sonraki konunun sonunda O3 devresi için yer anlatılmıştır.)

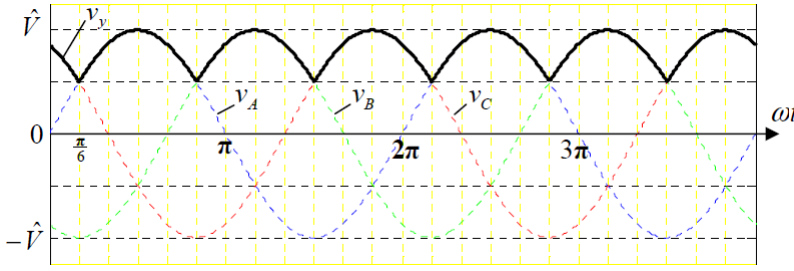
## Üç Fazlı Orta Uçlu Doğrultucu (O3) :



Bu devredeki kaynakların yerine genellikle üç fazlı bir trafonun yıldız bağlı sekonderi kullanılır.

Tristörlerin tetiklenme açısı başlangıcının ( $\alpha = 0$ ) nereye karşılık geldiğini bulmak için önce omik yükte  $T_1, T_2, T_3$  tristörleri yerine sırasıyla  $D_1, D_2, D_3$  diyotları kullanıldığını düşünelim.

Omik yükte ve  $\alpha = 0^\circ$  (tristör yerine diyot)



Bu durumda herhangi bir anda  $v_A, v_B, v_C$  gerilimlerinden en büyüğü hangisiyse ona seri bağlı diyot iletime geçerek diğer diyotları ters kutuplar ve kesime zorlar. Böylece yük üzerinde o kaynağın gerilimi görülür. Buradaki kaynak fonksiyonlarına göre  $D_1$  diyodu  $\omega t = 30^\circ$ 'de,  $D_2$  diyodu  $\omega t = 150^\circ$ 'de,

$D_3$  diyodu ise  $\omega t = 270^\circ$ 'de iletime geçer. Buna göre  $\alpha$  ateşleme açısıyla çalışmak için

$$T_1 \text{ tristörü } \omega t = \alpha + \frac{\pi}{6} + 2k\pi \quad (k \text{ tamsayı})$$

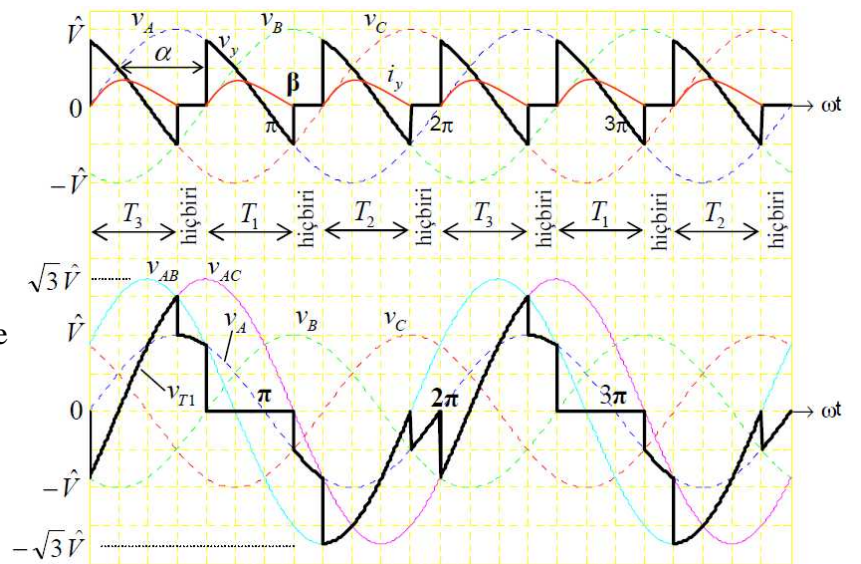
$$T_2 \text{ tristörü } \omega t = \alpha + \frac{5\pi}{6} + 2k\pi$$

$$T_3 \text{ tristörü } \omega t = \alpha + \frac{3\pi}{2} + 2k\pi \quad \text{açılarına karşılık gelen anlarda tetiklenir.}$$

Yanda endüktif yükte sgd yokken  $\alpha = 90^\circ$  için  $v_y, i_y, v_{T1}$  grafikleri ile hangi anlarda hangi tristörlerin iletimde olduğu gösterilmiştir. Hiçbir tristörün iletimde olmadığı anlar da "hiçbiri" diye gösterilmiştir.

Yük endüktif olduğu için,  $i_y$  yavaş yavaş artıp azalır.  $i_y$  kesilene kadar tristör iletimde kalır. Böylece iletimdeki tristöre seri bağlı kaynağın gerilimi negatife düşse bile yük üzerinde aynen görülür.  $i_y$  kesilince tristör de kesime gider ve  $v_y = 0$  olur.

Endüktif yükte sgd yok,  $\alpha = 90^\circ$

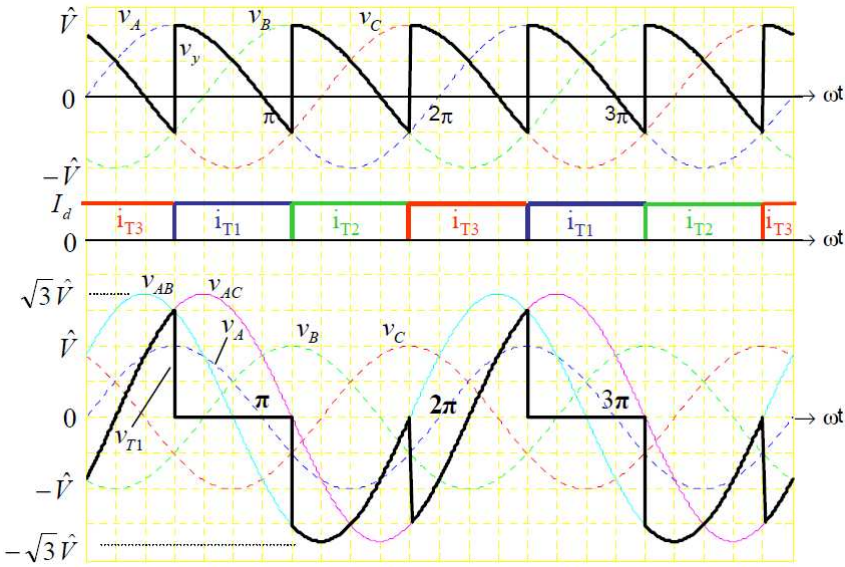


O3 devresinin tüm durumları için  $v_{T1}$  şöyledir:

$$v_{T1} = \begin{cases} 0 & T_1 \text{ iletimde ise} \\ v_{AB} & T_2 \text{ iletimde ise} \\ v_{AC} & T_3 \text{ iletimde ise} \\ v_A & T_1, T_2, T_3 \text{ kesimde ise} \end{cases}$$

$T_1$  iletimdeyken  $v_{T1} = 0$  olduğu açıktır. Orta uca göre  $T_1$ 'in anodunun potansiyeli hep  $v_A$ 'dır. Katodunun potansiyeli ise,  $T_2$  iletimdeyken  $v_B$ ,  $T_3$  iletimdeyken  $v_C$ , hepsi kesimdeyken ise sıfır (orta uçla aynı potansiyelde) olur. Yani  $T_2$  iletimdeyken  $v_{T1} = v_{AB} = v_A - v_B$ ,  $T_3$  iletimdeyken  $v_{T1} = v_{AC} = v_A - v_C$ , hepsi kesimdeyken ise  $v_{T1} = v_A$  olur.

Tam süzölmüş akımlı, sgd yok,  $\alpha = 60^\circ$



Sgd'siz tam süzölmüş akımlı çalışmada, önceki çalışmadaki tüm tristörlerin kesimde olduğu kısım daralarak yok olmuştur. Akım sürekli devam ettiği için her an bir tristör iletimdedir (her biri  $120^\circ$ ). Yük akımı  $I_d$  değerinde sabittir ve T1, T2, T3 akımları ortada farklı renklerle gösterilmiştir.

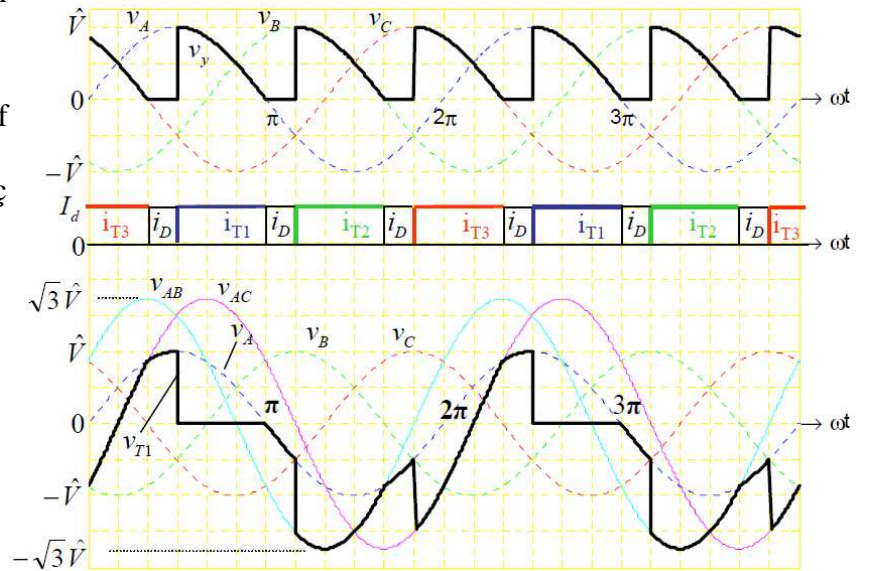
$v_{T1}$  dalga şekli önceki çalışmadakiyle aynı fonksiyonla ifade edilebilir; ancak burada  $v_A$ 'ya eşit olduğu kısım daralarak kaybolmuştur.

Tam süzölmüş akımlı çalışmada sgd varken ise grafikler yandaki gibi olur. Bu defa  $v_y < 0$  durumu yoktur.  $v_y$ , omik yüklerdeki gibidir. Yük üzerindeki anlık güç hiç negatif olmaz. Yani şebekeden fazla enerji çekip geri verme durumu olmadığı için reaktif güç düşüktür.

Yük akımının hangi anda hangi anahtar elemanlarla taşındığı orta şekilde gösterilmiştir. Üç tristörün de kesimde olduğu anlarda sgd iletimdedir.

Alt şekilde ise  $v_{T1}$  gösterilmiştir. Üç tristörün de kesimde olduğu anlar bulunduğu için  $v_{T1} = v_A$  anları yeniden görülmektedir.

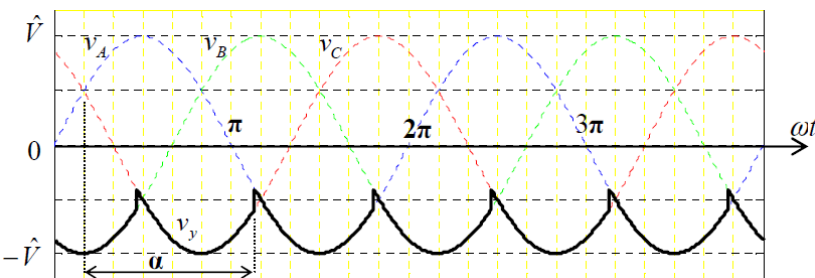
Tam süzölmüş akımlı, sgd var,  $\alpha = 60^\circ$



O3 devresinde mümkün olan en büyük ateşleme açısını bulmak için tristör gerilim dalga şeklinde, o tristör tetiklenmeden hemen önceki gerilim fonksiyonunu sağa doğru devam ettirerek ne zamana kadar pozitifte (doğru kutuplanmış) kaldığına bakarız. Bu son andan  $\alpha = 0$  başlangıç anının ve tristörün iletim gecikmesinin çıkarılmasının ( $t_q$ ) açılışı mümkün olan en büyük ateşleme açısıdır.

$$\alpha_{\max} = \begin{cases} 150^\circ - \omega t_q & \text{Omik yükte ya da sgd varken} \\ 180^\circ - \omega t_q & \text{sgd yokken tam süzölmüş akımlıda} \end{cases}$$

Aşağıda sgd yokken tam süzölmüş akımlı,  $\alpha = 180^\circ - \omega t_q$  çalışması için  $v_y$  gösterilmiştir. Bu çalışmada



ortalama güç negatif ( $i_y > 0$  ve ortalama  $v_y$  negatif) olduğu için endüktansta depolanan enerji şebekeye aktarılmaktadır. Bu yüzden böyle bir çalışma,  $\alpha < 90^\circ$  şartlarında endüktansta yeterince enerji depolandıktan sonra ve ancak geçici bir süre için mümkündür.

### DC Gerilim Hesabı:

O3 devresinde  $v_y$  geriliminin  $\omega t$  'ye göre periyodu  $2\pi/3$  olduğundan ortalama değeri ( $V_{ydc}$ ) :

$$V_{ydc} = \frac{1}{2\pi/3} \int_{2\pi/3} v_y d(\omega t) = \frac{3\hat{V}}{2\pi} \int_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\gamma} \sin(\omega t) d(\omega t)$$

Burada  $\gamma$  açısı,  $v_y$  'nin  $\alpha + 30^\circ$  'de başlayan sinüzoidal fonksiyonlu parçasının son anındaki açıdır. Yani:

$$\gamma = \begin{cases} \pi & \alpha > \pi/6 \text{ iken ve "sgd varsa veya yük omikse"} \\ \beta & \alpha > \pi/6 \text{ iken ve sgd'siz endüktif yüklüde} \\ \alpha + \frac{5\pi}{6} & \text{sgd'siz tam süzölmüş akımlıda veya } \alpha < \pi/6 \text{ ise} \end{cases} \quad \text{olmak üzere}$$

$$V_{ydc} = \frac{3\hat{V}}{2\pi} \left( \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \cos \gamma \right)$$

Burada

$$\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(\alpha + \frac{5\pi}{6}\right) = \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha \right) - \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \alpha - \frac{1}{2} \sin \alpha \right) = \sqrt{3} \cos \alpha$$

ve  $\cos \pi = -1$  yerine yazılırsa ortalama yük gerilimi şöyle bulunur:

$$V_{ydc} = \begin{cases} \frac{3\hat{V}}{2\pi} \left( 1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) \right) & \alpha > \pi/6 \text{ iken "sgd varsa veya yük omikse"} \\ \frac{3\hat{V}}{2\pi} \left( \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \cos \beta \right) & \alpha > \pi/6 \text{ iken sgd'siz endüktif yüklüde} \\ \frac{3\sqrt{3}\hat{V}}{2\pi} \cos \alpha & \text{sgd'siz tam süzölmüş akımlıda veya } \alpha < \pi/6 \text{ ise} \end{cases}$$

Sgd'siz tam süzölmüş akımlı çalışmada  $\alpha > 90^\circ$  için  $v_y < 0$  olmakta, yani ortalama enerji akışı  $L_y$  'den şebekeye doğru olmaktadır. Ancak sistem bu durumda uzun süre çalışmaz; çünkü gerçekte sonlu olan  $L_y$  endüktansındaki enerji de sonludur.

### O3 Devresinde Tristörden Tristöre Aktarım:

Aktarım süresince 2 tristör iletimde olacağından aktarım devresi gerilimi fazlar arası gerilim olur. Tepe değeri de fazlar arası gerilimin tepe değeridir:

$$\hat{V}_{akt} = \sqrt{3} \hat{V}$$

Burada  $\hat{V}$  faz-nötr geriliminin tepe değeridir.  $\ddot{u}$  hesabında kullanılan formülün aynı olduğunu görmek için meselâ  $T_3$ 'ten  $T_1$ 'e ilk aktarımı ele alalım:

$$v_{akt} = v_A - v_C = v_{AC} = \sqrt{3} \hat{V} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) = \hat{V}_{akt} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) = 2L_k \frac{di_{akt}}{dt} = 2\omega L_k \frac{di_{akt}}{d(\omega t)}$$

$$i_{akt} \Big|_{\omega t = \alpha + \ddot{u} + \frac{\pi}{6}} - i_{akt} \Big|_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{6}} = \frac{\hat{V}_{akt}}{2\omega L_k} \int_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \ddot{u} + \frac{\pi}{6}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t)$$

$$I_d - 0 = \frac{\hat{V}_{akt}}{2\omega L_k} (\cos \alpha - \cos(\alpha + \ddot{u}))$$

Sonuçta  $\ddot{u}$  hesabında kullanılan genel formül aynı şekilde elde edilir:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \ddot{u}) = \frac{2\omega L_k I_d}{\hat{V}_{akt}}$$

Ayrıca aktarım anında  $v_y = \frac{v_y^{\text{eski}} + v_y^{\text{yeni}}}{2}$  ve aktarım ihmal edilseydi  $v_y^{\text{ideal}} = v_y^{\text{yeni}}$  olacağından, aktarımın anlık gerilimi düşürme miktarı:

$$\Delta v_y = v_y^{\text{ideal}} - \frac{v_y^{\text{eski}} + v_y^{\text{yeni}}}{2} = v_y^{\text{yeni}} - \frac{v_y^{\text{eski}} + v_y^{\text{yeni}}}{2} = \frac{v_y^{\text{yeni}} - v_y^{\text{eski}}}{2} = \Delta v_y$$

Bunun bir periyottaki integral etkisi:

$$A_{ii} = \int_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \hat{u} + \frac{\pi}{6}} \Delta v_y d(\omega t) = \int_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \hat{u} + \frac{\pi}{6}} \frac{v_y^{\text{yeni}} - v_y^{\text{eski}}}{2} d(\omega t)$$

T<sub>3</sub>'ten T<sub>1</sub>'e ilk aktarımda  $v_y^{\text{eski}} = v_C$  ve  $v_y^{\text{yeni}} = v_A$  olduğundan

$$A_{ii} = \int_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \hat{u} + \frac{\pi}{6}} \frac{v_{AC}}{2} d(\omega t) = \int_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \hat{u} + \frac{\pi}{6}} \frac{\hat{V}_{\text{akt}}}{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) d(\omega t) = \frac{\hat{V}_{\text{akt}}}{2} (\cos \alpha - \cos(\alpha + \hat{u})) = \frac{\hat{V}_{\text{akt}}}{2} \frac{2\omega L_k I_d}{\hat{V}_{\text{akt}}}$$

$$A_{ii} = \omega L_k I_d$$

bulunur.  $v_y$ 'nin periyodu

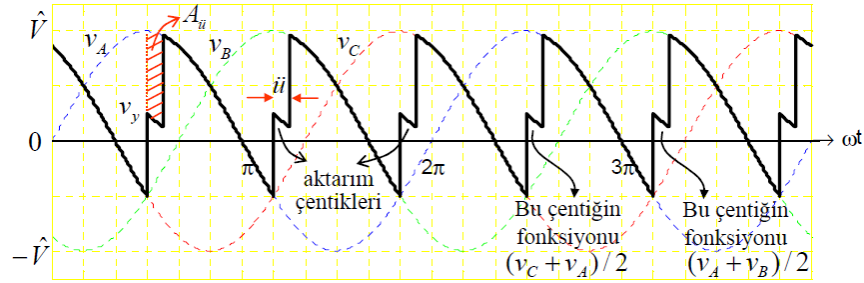
$$T_{vy} = 2\pi/3$$

olup, sırasıyla aktarımın ortalama gerilimi azaltıcı etkisi ve gerçek dc yük gerilimi:

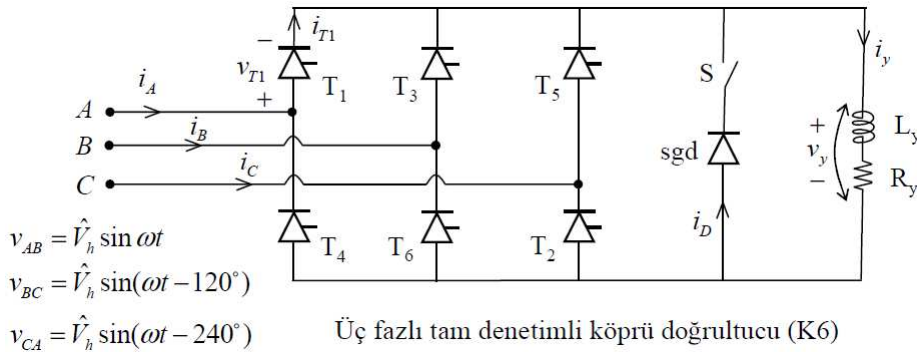
$$\Delta V_{y \text{ dc}} = \frac{A_{ii}}{T_{vy}} \quad V_{y \text{ dc}}^{\text{gerçek}} = V_{y \text{ dc}}^{\text{ideal}} - \Delta V_{y \text{ dc}}$$

Aktarım sırasında  $v_y = \frac{v_y^{\text{eski}} + v_y^{\text{yeni}}}{2}$  olmasından dolayı  $v_y$  dalga şeklinde ortaya çıkan aktarım çentikleri de şöyledir:

O3'te aktarım ihmal edilmeden, tam süzölmüş akımlı,  $\alpha = 60^\circ$



### Üç fazlı tam denetimli köprü doğrultucu (K6)



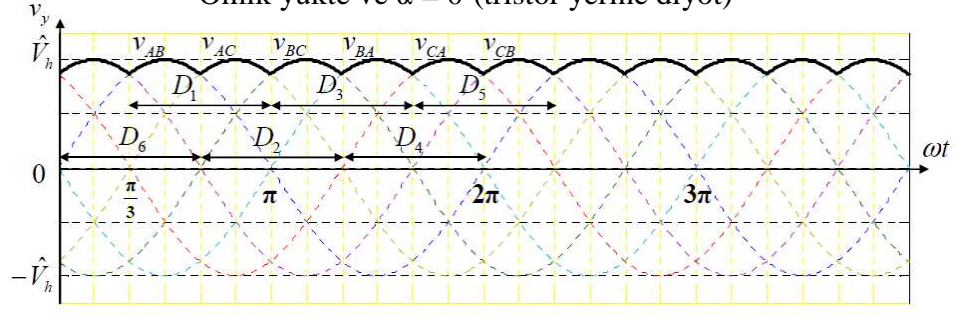
Bu devrede A, B, C uçlarına, Y veya Δ bağlı üç fazlı kaynağın hat uçları bağlanır. Bu kaynak, üç fazlı bir trafonun Y veya Δ bağlı sekonderi olabilir.

Burada  $\hat{V}_h$ , fazlar arası gerilimin tepe değeridir.

Tristörlerin tetiklenme açısı başlangıcının ( $\alpha = 0$ ) nereye karşılık geldiğini bulmak için önce omik yükte T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>6</sub> tristörleri yerine sırasıyla D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>5</sub>, D<sub>6</sub> diyotları kullanıldığını düşünelim. Bu durumda herhangi bir anda fazlar arası gerilimlerden (tersleriyle birlikte 6 ayrı fonksiyon:  $v_{AB}$ ,  $v_{AC}$ ,  $v_{BC}$ ,  $v_{BA}$ ,  $v_{CA}$ ,  $v_{CB}$ ) en büyüğü hangisiyse onu yük üzerine iletecek diyotlar ilettime geçerek diğer diyotları ters kutuplar ve kesime zorlar. Böylece yük üzerinde o gerilim görülür. Örneğin  $v_{AB}$  en büyük iken D<sub>1</sub> ve D<sub>6</sub> ilettime geçer.  $v_{BA}$  en büyük iken ise D<sub>3</sub> ve D<sub>4</sub> ilettime geçer. Sırasına göre iletimdeki diyotlar ve yüke ilettikleri voltajın fonksiyonları şöyledir:

Omik yükte ve  $\alpha = 0^\circ$  (tristör yerine diyot)

- $D_6, D_1 \rightarrow v_y = v_{AB}$   
 $D_1, D_2 \rightarrow v_y = v_{AC}$   
 $D_2, D_3 \rightarrow v_y = v_{BC}$   
 $D_3, D_4 \rightarrow v_y = v_{BA}$   
 $D_4, D_5 \rightarrow v_y = v_{CA}$   
 $D_5, D_6 \rightarrow v_y = v_{CB}$



Bu durum periyodik olarak tekrarlanır. Tristör veya diyotlar buna göre numaralandırılmıştır. Buradaki kaynak fonksiyonlarına göre  $D_1$  diyodu  $\omega t = 60^\circ$ 'de,  $D_3$  diyodu  $\omega t = 180^\circ$ 'de,  $D_5$  diyodu  $\omega t = 300^\circ$ 'de;  $D_2$  diyodu  $\omega t = 120^\circ$ 'de,  $D_4$  diyodu  $\omega t = 240^\circ$ 'de,  $D_5$  diyodu  $\omega t = 0^\circ$ 'de, iletme geçer ve her biri  $120^\circ$  iletimde kalır. Buna göre  $\alpha$  ateşleme açısıyla çalışmak için

$$T_1 \text{ tristörü } \omega t = \alpha + \frac{\pi}{3} + 2k\pi \quad (k \text{ tamsayı})$$

$$T_2 \text{ tristörü } \omega t = \alpha + \frac{2\pi}{3} + 2k\pi$$

$$T_3 \text{ tristörü } \omega t = \alpha + \pi + 2k\pi$$

$$T_4 \text{ tristörü } \omega t = \alpha + \frac{4\pi}{3} + 2k\pi$$

$$T_5 \text{ tristörü } \omega t = \alpha + \frac{5\pi}{3} + 2k\pi$$

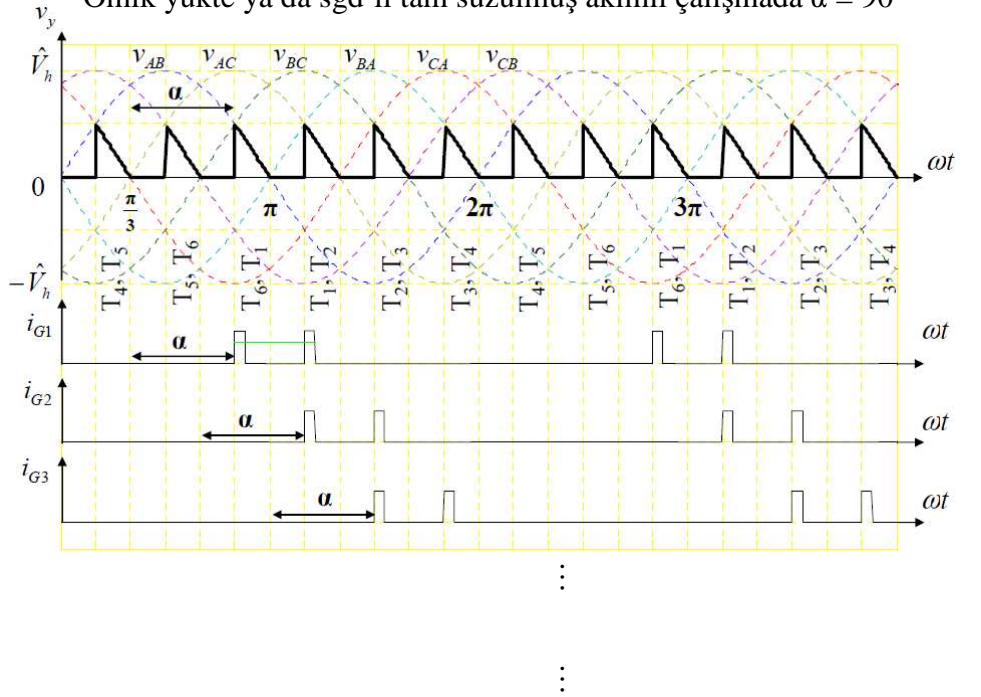
$$T_6 \text{ tristörü } \omega t = \alpha + 2k\pi$$

açılarına karşılık gelen anlarda tetiklenir. Ancak, bazı durumlarda tristör başına düşen  $120^\circ$ 'lik aralıkta, söz konusu tristör iletme geçtikten sonra kesime gidebilmekte ve son iletme geçmesinden  $60^\circ$  sonra tekrar iletme geçmesi beklenebilmektedir. Bu yüzden K6 devresindeki tristörler, aralarında  $60^\circ$  bulunan darbe çiftleriyle ya da  $60^\circ$ 'den biraz daha geniş tek bir darbeye tetiklenir. Örnek olarak omik yükte ya da sgd'li tam süzölmüş akımlı çalışmada  $\alpha = 90^\circ$  için bu durum aşağıda gösterilmiştir:

Burada  $v_y$  negatif olamayacağı için her tristör  $30^\circ$  iletimde kaldıktan sonra kesime gitmektedir.  $30^\circ$  kesimde kaldıktan sonra, yeni sırası gelen tristörle birlikte de iletme geçebilmesi için yeniden tetiklenmelidir.  $T_1$  için  $\alpha$ ,  $v_{AB}$ 'nin en büyük olmaya başladığı andan itibaren hesaplanır. İletimdeki tristör çiftlerine göre  $v_y$  şöyledir:

- $T_6, T_1 \Rightarrow v_y = v_{AB}$   
 $T_1, T_2 \Rightarrow v_y = v_{AC}$   
 $T_2, T_3 \Rightarrow v_y = v_{BC}$   
 $T_3, T_4 \Rightarrow v_y = v_{BA}$   
 $T_4, T_5 \Rightarrow v_y = v_{CA}$   
 $T_5, T_6 \Rightarrow v_y = v_{CB}$

Omik yükte ya da sgd'li tam süzölmüş akımlı çalışmada  $\alpha = 90^\circ$



$\alpha \leq 60^\circ$  için omik ve tüm endüktif yüklerde (sgd önemsiz) ( $\alpha = 30^\circ$ )

$\alpha \leq 60^\circ$  için sgd olsa da olmasa da, yük omik de olsa, endüktif de olsa, tam süzölmüş akımlı da olsa  $v_y$  dalga şekli aynıdır.

$T_1$  tristör gerilimi fonksiyonu ise şöyle bulunur:  $T_1$  iletimdeyken gerilimi sıfırdır. Anodu her zaman A hattının potansiyelindedir. Katodu ise  $T_3$  iletimdeyken B hattının,  $T_5$  iletimdeyken ise C hattının potansiyelindedir.  $T_1$ ,  $T_3$  ve  $T_5$  kesimdeyken katod potansiyeli belirsizdir. Bu belirsizliğin asıl değeri tristörlerin tıkama ve kesimdeki iç dirençlerine bağlıdır, ki bu da tristörler üzerindeki gerilimlere bağlıdır.

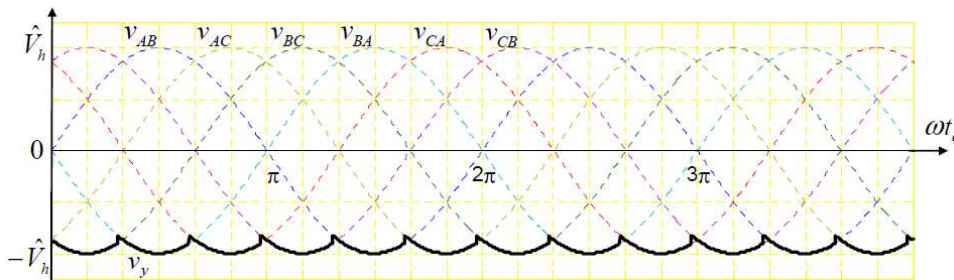
Bu belirsizliğin ayrıntısına girmeden gerilimin fazlar arası gerilimin artı ve eksi tepe değerleri arasında olacağı anlaşılmaktadır ve tristörler bu gerilime göre (güvenlik payı da konularak) seçilmelidir.  $v_{T1}$  şöyle bulunur:

$$v_{T1} = \begin{cases} 0 & T_1 \text{ iletimde ise} \\ v_{AB} & T_3 \text{ iletimde ise} \\ v_{AC} & T_5 \text{ iletimde ise} \\ \text{belirsiz} & T_1, T_3, T_5 \text{ kesimde ise} \end{cases}$$

$\alpha > 60^\circ$  için sgd yoksa, tam süzölmüş akımlı çalışmada  $v_y < 0$  anları da görülecektir. K6 devresinde mümkün olan en büyük ateşleme açısını bulmak için tristör gerilim dalga şeklinde, o tristör tetiklenmeden hemen önceki gerilim fonksiyonunu sağa doğru devam ettirerek ne zamana kadar pozitifte (doğru kutuplanmış) kaldığına bakarız. Bu son andan  $\alpha = 0$  başlangıç anının ve tristörün iletim gecikmesinin çıkarılmışının ( $t_q$ ) açılı karşılığı mümkün olan en büyük ateşleme açısıdır. Sgd yokken tam süzölmüş akımlıda, yukarıdaki  $v_{T1}$  dalga şekli üzerinde bu işlemi yaparsak  $240^\circ - 60^\circ - \omega t_q = 180^\circ - \omega t_q$  bulunur. Sgd varken veya omik yüklerde ise  $v_y$  sıfırdan küçük olamayacağı için meselâ  $T_1$ 'in ilk iletime geçirilmesi  $v_{AB}$  sıfıra düşmeden yapılmalıdır. Yani en geç ateşleme açısı  $120^\circ - \omega t_q$  bulunur:

$$\alpha_{\max} = \begin{cases} 120^\circ - \omega t_q & \text{Omik yükte ya da sgd varken} \\ 180^\circ - \omega t_q & \text{sgd yokken tam süzölmüş akımlıda} \end{cases}$$

Aşağıda sgd yokken tam süzölmüş akımlı,  $\alpha = 180^\circ - \omega t_q$  çalışması için  $v_y$  gösterilmiştir. Bu çalışmada



ortalama güç negatif ( $i_y > 0$  ve ortalama  $v_y$  negatif) olduğu için endüktansta depolanan enerji şebekeye aktarılmaktadır. Bu yüzden böyle bir çalışma,  $\alpha < 90^\circ$  şartlarında endüktansta yeterince enerji depolandıktan sonra ve ancak geçici bir süre için mümkündür.

### DC Gerilim Hesabı:

K6 devresinde  $v_y$  geriliminin  $\omega t$  'ye göre periyodu  $\pi/3$  olduğundan ortalama değeri ( $V_{ydc}$ ) :

$$V_{ydc} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{\gamma} v_y d(\omega t) = \frac{3\hat{V}_h}{\pi} \int_{\alpha+\frac{\pi}{3}}^{\gamma} \sin(\omega t) d(\omega t)$$

Burada  $\gamma$  açısı,  $v_y$  'nin  $\alpha + 60^\circ$  'de başlayan sinüzoidal fonksiyonlu parçasının son anındaki açıdır. Yani:

$$\gamma = \begin{cases} \pi & \alpha > \pi/3 \text{ iken ve "sgd varsa veya yük omikse"} \\ \beta & \alpha > \pi/3 \text{ iken ve sgd'siz endüktif yüklüde} \\ \alpha + \frac{2\pi}{3} & \text{sgd'siz tam suzulmuş akımlıda veya } \alpha < \pi/3 \text{ ise} \end{cases} \quad \text{olmak üzere}$$

$$V_{ydc} = \frac{3\hat{V}_h}{\pi} \left( \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \cos \gamma \right)$$

Burada

$$\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) = \left( \frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \right) - \left( -\frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \right) = \cos \alpha$$

ve  $\cos \pi = -1$  yerine yazılırsa ortalama yük gerilimi şöyle bulunur:

$$V_{ydc} = \begin{cases} \frac{3\hat{V}_h}{\pi} \left( 1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right) & \alpha > \pi/3 \text{ iken "sgd varsa veya yük omikse"} \\ \frac{3\hat{V}_h}{\pi} \left( \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) - \cos \beta \right) & \alpha > \pi/3 \text{ iken sgd'siz endüktif yüklüde} \\ \frac{3\hat{V}_h}{\pi} \cos \alpha & \text{sgd'siz tam suzulmuş akımlıda veya } \alpha < \pi/3 \text{ ise} \end{cases}$$

Burada  $\hat{V}_h$ , fazlar arası gerilimin tepe değeri olduğu unutulmamalıdır. Sgd'siz tam süzölmüş akımlı çalışmada  $\alpha > 90^\circ$  için  $v_y < 0$  olmakta, yani ortalama enerji akışı  $L_y$  'den şebekeye doğru olmaktadır. Ancak sistem bu durumda uzun süre çalışamaz; çünkü gerçekte sonlu olan  $L_y$  endüktansındaki enerji de sonludur.

### K6 Devresinde Tristörden Tristöre Aktarım:

Aktarım süresince 3 tristör iletimde olacağından aktarım devresi gerilimi fazlar arası gerilim olur. Tepe değeri de fazlar arası gerilimin tepe değeridir:

$$\hat{V}_{akt} = \hat{V}_h$$

Burada  $L_k$  olarak kaynağın yıldız bağlı eşdeğerinin faz başına kaçak endüktansını kullanmalıyız.  $\ddot{u}$  hesabında kullanılan formülün aynı olduğunu görmek için meselâ  $T_6$  iletimdeyken,  $T_5$ 'ten  $T_1$ 'e ilk aktarımı ele alalım:

$$v_{akt} = v_{AC} = \hat{V}_h \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) = \hat{V}_{akt} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) = 2L_k \frac{di_{akt}}{dt} = 2\omega L_k \frac{di_{akt}}{d(\omega t)}$$

$$i_{akt} \Big|_{\omega t = \alpha + \ddot{u} + \frac{\pi}{3}} - i_{akt} \Big|_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{3}} = \frac{\hat{V}_{akt}}{2\omega L_k} \int_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{3}}^{\alpha + \ddot{u} + \frac{\pi}{3}} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) d(\omega t)$$

$$I_d - 0 = \frac{\hat{V}_{akt}}{2\omega L_k} (\cos \alpha - \cos(\alpha + \ddot{u}))$$

Sonuçta  $\ddot{u}$  hesabında kullanılan genel formül aynı şekilde elde edilir:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \ddot{u}) = \frac{2\omega L_k I_d}{\hat{V}_{akt}}$$

$T_5$ 'ten  $T_1$ 'e ilk aktarımda  $v_y^{eski} = v_{CB}$  ve  $v_y^{yeni} = v_{AB}$  olduğundan

$$A_{ii} = \int_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{3}}^{\alpha + ii + \frac{\pi}{3}} \frac{v_y^{\text{yeni}} - v_y^{\text{eski}}}{2} d(\omega t) = \int_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{3}}^{\alpha + ii + \frac{\pi}{3}} \frac{v_{AC}}{2} d(\omega t) = \int_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{3}}^{\alpha + ii + \frac{\pi}{3}} \frac{\hat{V}_{\text{akt}}}{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) d(\omega t) = \frac{\hat{V}_{\text{akt}}}{2} (\cos \alpha - \cos(\alpha + ii))$$

$$A_{ii} = \frac{\hat{V}_{\text{akt}}}{2} \frac{2\omega L_k I_d}{\hat{V}_{\text{akt}}} \rightarrow A_{ii} = \omega L_k I_d$$

bulunur.  $v_y$  'nin periyodu

$$T_{vy} = \pi/3$$

Aktarım sırasında  $v_y = \frac{v_y^{\text{eski}} + v_y^{\text{yeni}}}{2}$  olmasından dolayı  $v_y$  dalga şeklinde ortaya çıkan aktarım çentikleri de şöyledir:

