

# 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 ilettime geçeceği  $\omega t$  değerinden ne kadar açı sonra söz konusu denetimli elemanın tetiklendiğidir.

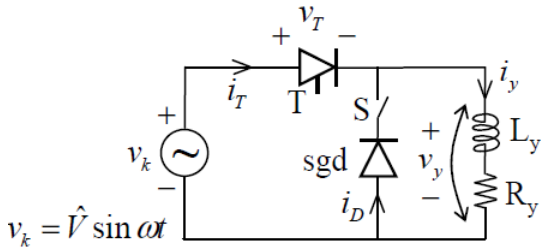
Bu derste denetimli doğrultucular şu yükler için incelenecektir:

- 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):**

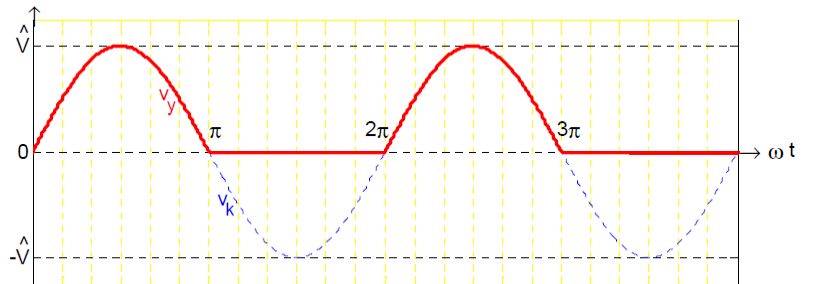


Tek fazlı yarım dalga doğrultucu (O1)

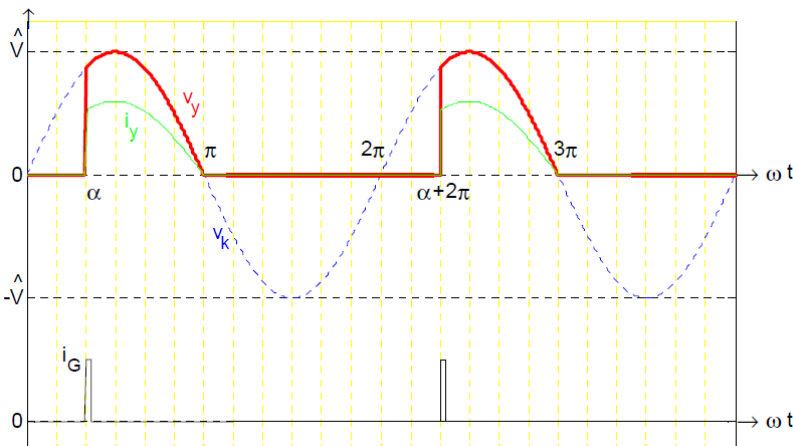
(Aslında orta uç söz konusu olmasa da tür olarak orta uçlu doğrultucular grubunda ele alınmaktadır.)

T tristörü yerinde diyot olsaydı, ilettime geçiş anları 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.)

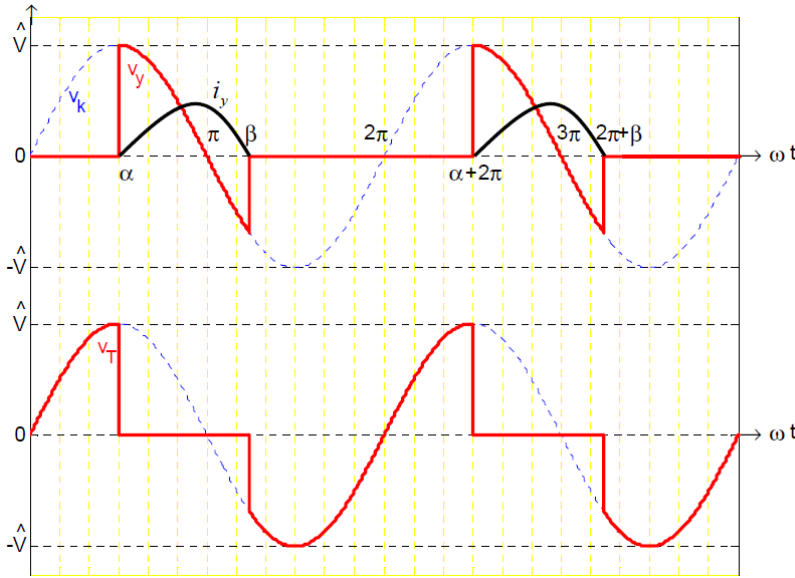
Omik yükte ve  $\alpha = 0^\circ$  (tristör yerine diyot)



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.

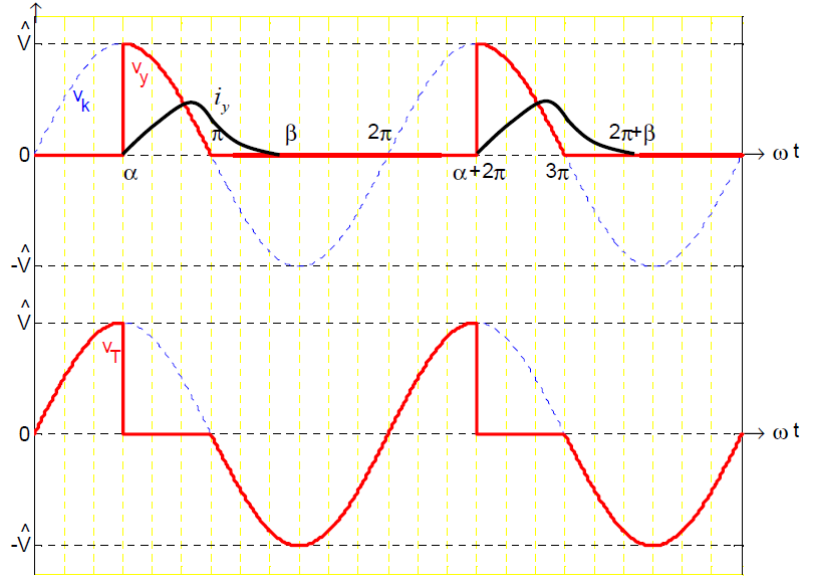
Tristör üzerindeki gerilim ( $v_T$ ) de yanda verilmiştir. Genel olarak tristör iletimdeyken üzerindeki gerilim idealde sıfırdır (gerçekte 0,8~1V civarı). Bu devre için  $v_T = v_k - v_y$  olmaktadır.

### 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.

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



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 çalışamaz.

### DC Gerilim Hesabı:

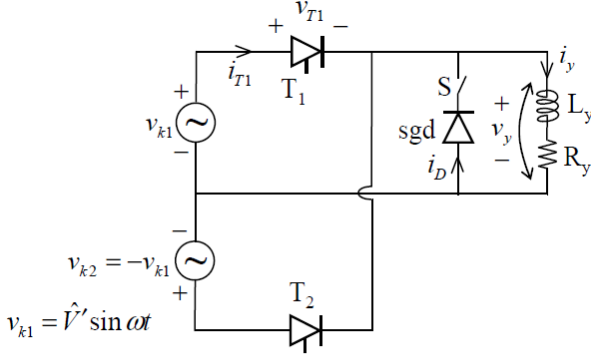
O1 devresindeki  $v_y$  geriliminin ortalama değeri ( $V_{ydc}$ ) genel olarak şöyle bulunur:

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

Burada  $\gamma$  açısı,  $v_y$ 'nin  $\omega t = \alpha$ 'da başlayan sinüzoidal fonksiyonlu parçasının son anındaki açısıdır. Özetle O1 için:

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

## 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.

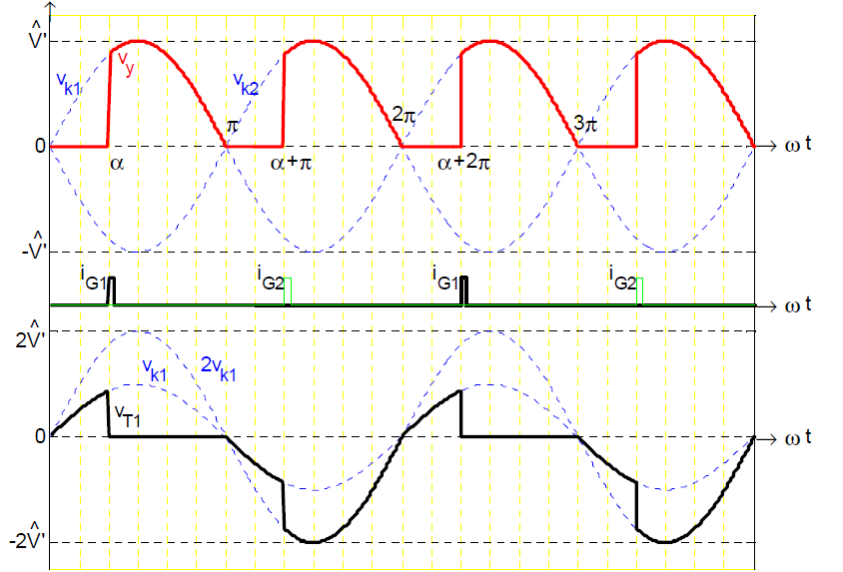
Burada  $v_{T1}$  de gösterilmiştir.  $T_1$  iletimdeyken  $v_{T1} = 0$ 'dır.  $T_2$  iletimdeyken ise orta uca göre  $T_1$ 'in anodu  $v_{k1}$ , katodu ise  $v_{k2}$  potansiyelinde olduğundan  $v_{T1} = v_{k1} - v_{k2} = 2v_{k1}$  olur. Her iki tristör de kesimdeyken ise  $v_y = 0$  olduğundan katot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

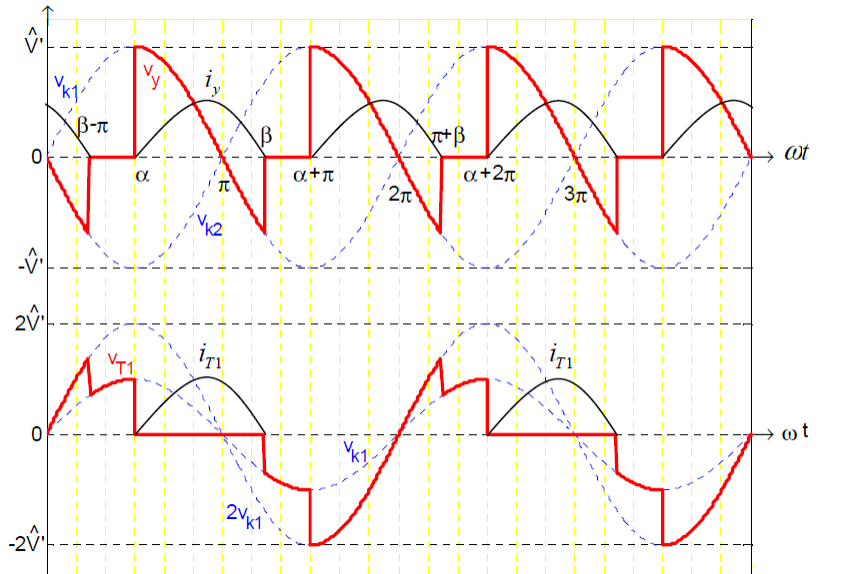
Omik yükte  $\alpha = 60^\circ$



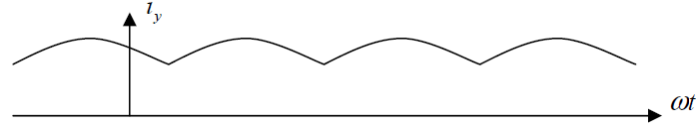
Endüktif yükte sgd'siz çalışmada ise grafikler yandaki gibi olur. Endüktans, akımın ani değişimini engellediği için  $i_y$  yavaşça yükselir ve sönümlenmesi  $v_y$ 'nin sıfıra ulaşmasından sonra olur.  $i_y$  sinüs parçası biçiminde değildir.  $i_y$  sıfırlanana kadar ilgili tristör iletimde kalmaya 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  $\alpha = 90^\circ$

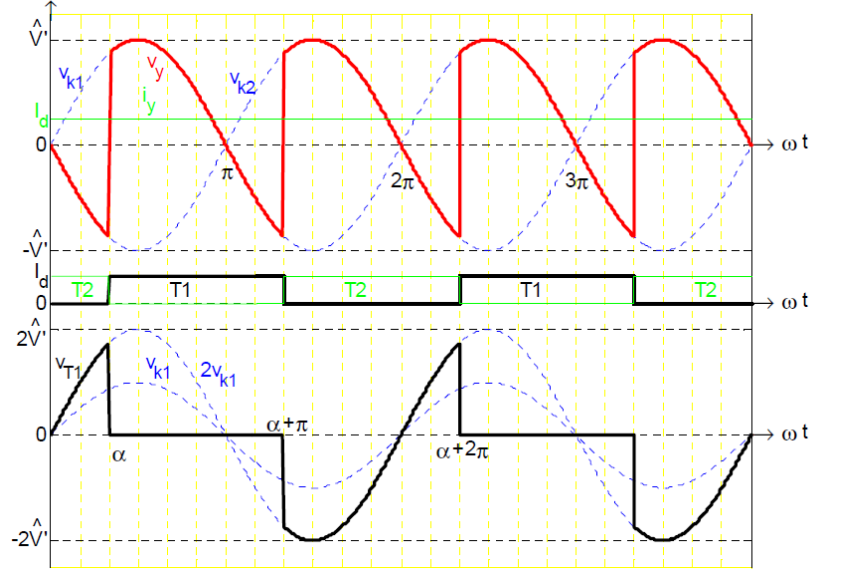


Burada  $\beta < \alpha + \pi$  olduğu varsayılmıştır. Eğer  $\beta > \alpha + \pi$  olmaya meylederse  $i_y$  hiç sıfırlanmadan sürekli devam eder. Bu durumda yukarıdaki şekillerin  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin kesimde olduğu kısımları daralarak yok olur. Büyük  $L_y$  endüktansı kullanılmasından doğan bu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

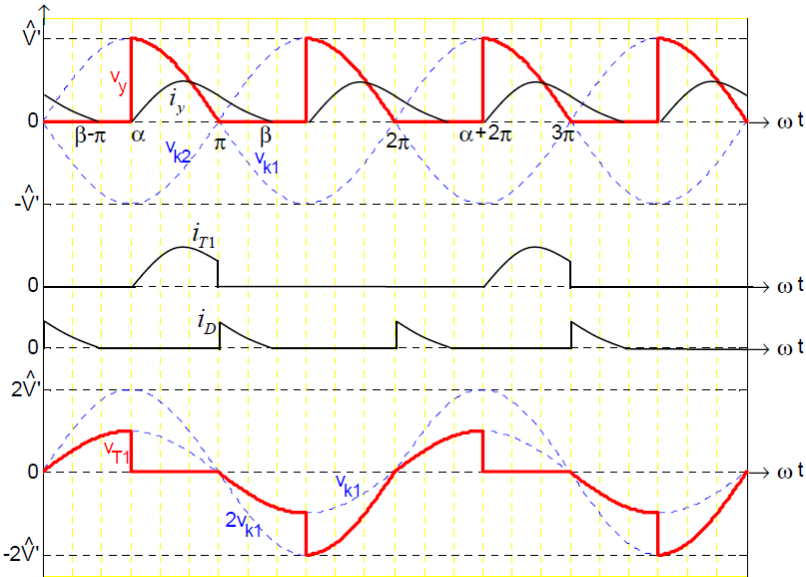
Tam süzölmüş akımlı, sgd yok ve  $\alpha = 60^\circ$



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.

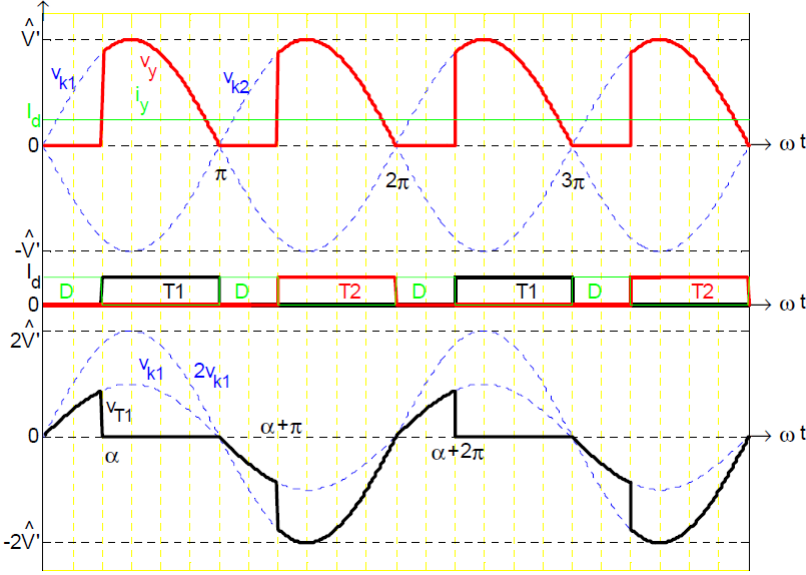
Her an bir tristör iletimde olduğu için  $v_{T1}$ ’in  $v_{k1}$ ’e eşit olduğu durum yoktur.

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



Sgd’li çalışmada gerilim negatife düşmediği için gerilimler omik yüklüdeki gibi olur. Yük akımı sgd’siz durumdakine yakındır. Yük akımı bazen tristörlerden birinden bazen de sgd’den geçer. Tristör gerilimi de omik yüklüdeki 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 dönüştümlü olarak T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> ve sgd üzerinden geçişini göstermektedir.

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

#### DC Gerilim Hesabı:

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

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

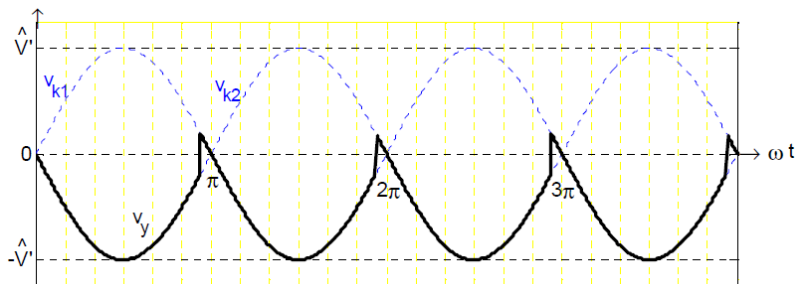
Burada  $\gamma$  açısı,  $v_y$ 'nin  $\alpha$ 'da başlayan sinüzoidal fonksiyonlu parçasının son anındaki açıdır. Yani:

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

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

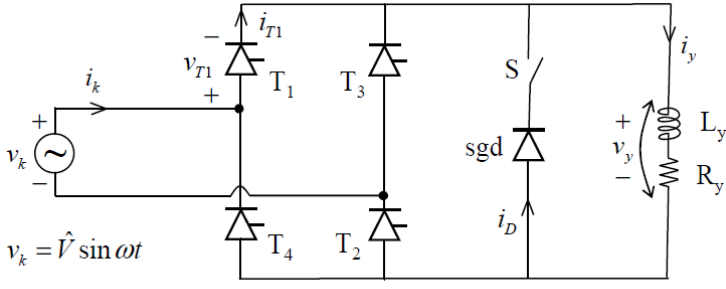
$$V_{ydc} = \begin{cases} \frac{\hat{V}'}{\pi} (1 + \cos \alpha) & \text{sgd varsa veya yük omikse} \\ \frac{\hat{V}'}{\pi} (\cos \alpha - \cos \beta) & \text{sgd'siz endüktif yüklüde} \\ \frac{2\hat{V}'}{\pi} \cos \alpha & \text{sgd'siz tam süzölmüş akımlıda} \end{cases}$$

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 kesimden sonra ilettime geçirilebilme 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. Gerçekten 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.

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

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,

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

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

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

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

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

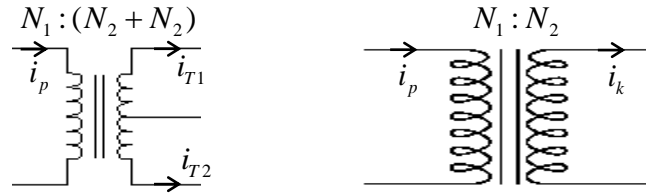
Tam süzölmüş akımlıda ( $L_y \approx \infty$ ) yalnız  $R_y$  üzerindeki ortalama güç:  $P_{Ry} = R_y I_d^2$

Tam süzölmüş akımlı çalışmada geçici bir süre için  $P_{Ry}$  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.

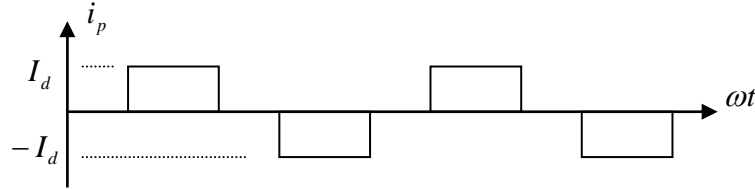
### **Tek Fazlı Doğrultucularda Harmonik Analizi :**

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 ölçeği 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 :**

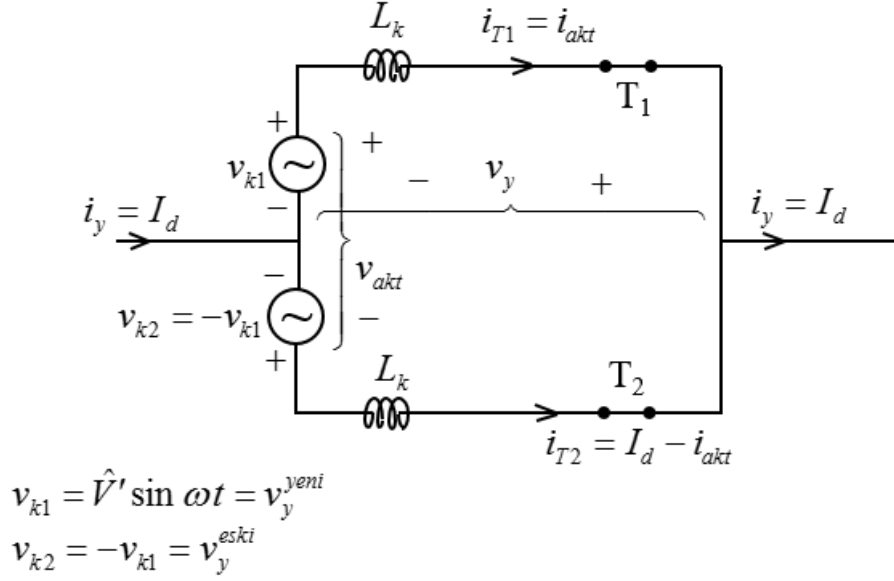
Akımın, anahtar olarak kullanılan bir elemandan diğerine devredilmesine “aktarım” denir. Aktarım süresince bu iki eleman da iletimde olur. Birisi, yük akımı değerinden sıfır akıma doğru kesime giderken, diğeri sıfır akımdan yük akımı değerine ulaşarak yük akımını tamamen devralır. Bu değişim, bir anlık kısa devre akımıyla olur. Kaynak iç endüktansları (trafo sargılarının kaçak endüktansları) 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. İnceleme kolaylığı açısından sadece tam süzölmüş akımlı ve sgd’siz durumlarla ilgileneceğiz. Sgd’li veya aralarda tüm tristörlerin kesimde bulunduğu durumlarda tristörden tristöre aktarım olmadığından bunlar da incelememizin dışındadır.

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



## O2 Devresinde Tristörden Tristöre Aktarım:

Meselâ  $T_2$ 'den  $T_1$ 'e aktarımı ele alalım. Yük akımı  $i_y = I_d$  değerinde sabittir (tam süzölmüş). Aktarım süresince her iki tristör de iletimde olacağından aktarım devresi şöyle olur:



Burada  $L_k$  kaynak iç endüktansdır (kaynak olarak genellikle trafo sekonder sargısı kullanıldığı için o sargının kaçak endüktansı diye de düşünülebilir).  $i_y$  akımının geldiği sol uç O2 devresinin orta ucu, çıktığı sağ uç ise yüke bağlanan diğer uçtur. Bu yüzden sağ ve sol uçlar arası gerilim  $v_y$ 'dir. Aktarımdan hemen önce yüke aktarılan gerilim  $v_y^{eski} = v_{k2}$ , hemen sonra ise  $v_y^{yeni} = v_{k1}$ 'dir. Aktarımın başında  $i_{T1} = 0$ ,  $i_{T2} = I_d$ , sonunda ise  $i_{T1} = I_d$ ,  $i_{T2} = 0$  olur ve  $T_2$  kesime gider. Bu yüzden aktarım devresinin çevre akımını  $i_{akt} = i_{T1}$  diye tanımlayalım. Bu çevrenin  $i_{akt}$  yönünde akım geçirmeye çalışan kaynak gerilimi

$$v_{akt} = v_y^{yeni} - v_y^{eski} = \hat{V}_{akt} \sin \omega t$$

Farklı doğrultucu devrelerinde veya kaynak gerilimi tanımlarında burada bir faz farkı da olabilirdi. O2 devresinde bizim tanımlarımıza göre aktarım geriliminin tepe değeri:

$$\hat{V}_{akt} = 2\hat{V}'$$

Aktarım çevre denklemleri:

$$v_{akt} = L_k \frac{di_{akt}}{dt} - L_k \frac{d(I_d - i_{akt})}{dt} \rightarrow \hat{V}_{akt} \sin \omega t = 2L_k \frac{di_{akt}}{dt}$$

$t$ 'ye göre integral alınıp düzenlenirse

$$i_{akt} = -\frac{\hat{V}_{akt}}{2\omega L_k} \cos \omega t + C$$

Aktarımın başında  $\omega t = \alpha$  iken  $i_{akt} = 0$  olduğu için integral sabiti  $C = \frac{\hat{V}_{akt}}{2\omega L_k} \cos \alpha$  bulunur. Yani

$$i_{akt}(t) = \frac{\hat{V}_{akt}}{2\omega L_k} (\cos \alpha - \cos \omega t)$$

Aktarım süresine  $t_{akt}$ , bunun açı karşılığına ise  $\omega t_{akt} = \ddot{u}$  (aktarım açısı) dersek, aktarımın sonunda  $\omega t = \alpha + \ddot{u}$  iken  $i_{akt} = I_d$  olacağı için

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

bulunur. Buradan aktarım hesaplarında ve  $\ddot{u}$ 'yü bulmakta kullanılacak temel formül elde edilir:

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

Bu formül bu derste görülecek tüm tam denetimli doğrultucularda (O2, K2, O3 ve K6) sgd'siz tam süzölmüş akımlı durumlarda tristörden tristöre aktarım için geçerlidir (O1 devresinde ise aktarım yoktur).



Aktarım süresini bulurken ise unutulmaması gereken bir nokta, eğer  $\ddot{u}$  derece cinsinden kullanılıyorsa

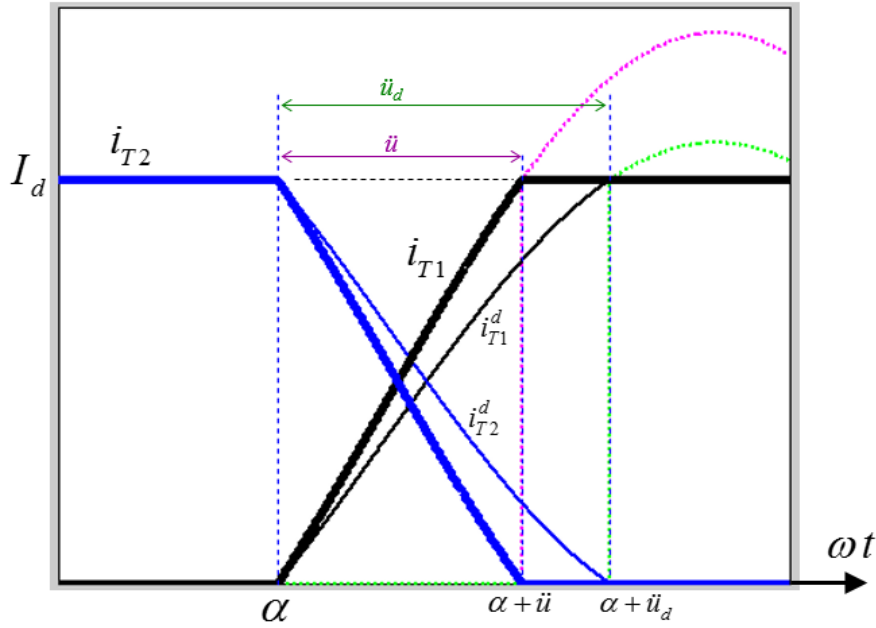
$$t_{akt} = \frac{\ddot{u}}{\omega}$$

formülünde  $\omega = 360^\circ \cdot f$  diye kullanılır, radyan ise  $\omega = 2\pi \cdot f$  diye kullanılır ( $f$  şebeke frekansıdır).

*Kaynak (şebeke) gerilim veya frekansındaki değişimin  $\ddot{u}$  'ye etkisi:*

Bulunan  $i_{akt}(t)$  fonksiyonuna göre  $i_{T1}$  ve  $i_{T2}$  grafikleri aşağıda gösterilmiştir. Ayrıca, gerilimin düşmesi veya frekansın yükselmesi durumunda değişen yeni halleri  $d$  alt ya da üst indisiyle işaretlenerek gösterilmiştir.

Gerilimin düşmesi veya frekansın yükselmesi durumunda  $i_{akt}(t)$  fonksiyonundaki genlik katsayısı  $\frac{\hat{V}_{akt}}{2\omega L_k}$  düşeceği için aktarım açısı  $\ddot{u}$  'nün arttığı görülmektedir.



*Aktarımın ortalama yük gerilimine etkisi ve aktarım çentikleri:*

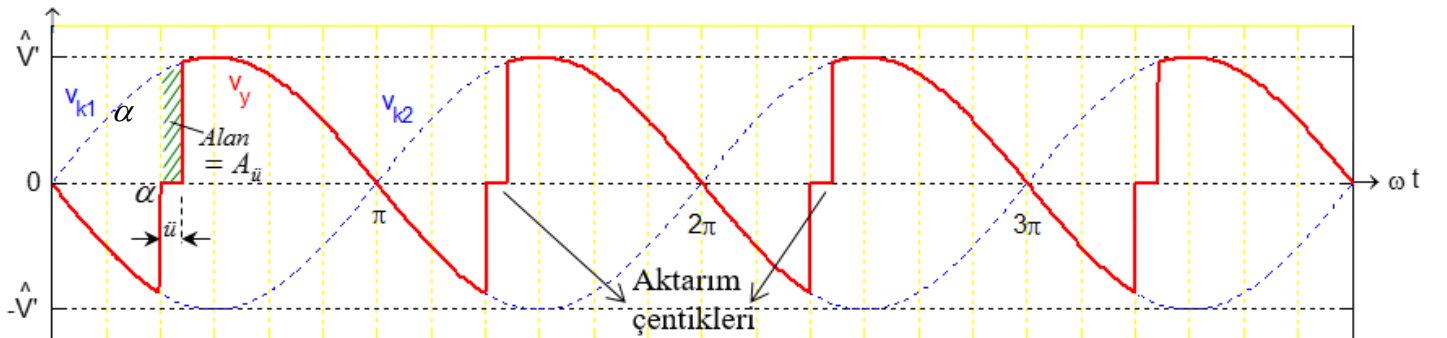
Aktarım devresine bakarsak her iki tristör de iletimde olduğu için anlık olarak yük gerilimini şöyle buluruz:

$$v_y = v_y^{\text{yeni}} - L_k \frac{di_{akt}}{dt} = v_y^{\text{yeni}} - \frac{v_{akt}}{2} = v_y^{\text{yeni}} - \frac{v_y^{\text{yeni}} - v_y^{\text{eski}}}{2} \rightarrow v_y = \frac{v_y^{\text{yeni}} + v_y^{\text{eski}}}{2}$$

Yani eski ve yeni gerilimlerin ortalamasıdır. Halbuki aktarım ideal olsaydı  $v_y^{\text{ideal}} = v_y^{\text{yeni}}$  olurdu. Buna göre aktarım sırasında anlık gerilim

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

kadar düşmektedir. Bu düşüş,  $v_y$  dalga şeklinde çentiklere sebep olur.



Tek fazlı doğrultucuların aktarım çentikleri düz olup çentiğe çok benzetilmeyebilir; ama üç fazlı doğrultucularda çentik şekli daha belirgindir. Burada taralı alan

$$A_{ii} = \int_{\omega t=\alpha}^{\alpha+\ddot{u}} \Delta v_y d(\omega t) = \int_{\omega t=\alpha}^{\alpha+\ddot{u}} \frac{v_{akt}}{2} d(\omega t) = \int_{\omega t=\alpha}^{\alpha+\ddot{u}} \frac{\hat{V}_{akt}}{2} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\hat{V}_{akt}}{2} (\cos \alpha - \cos(\alpha + \ddot{u}))$$

$\ddot{u}$  'yü bulmak için kullanılan formülü en sağ taraftaki büyük parantez içinde kullanırsak O2 için

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

bulunur. K2 hariç göreceğimiz tüm tam denetimli doğrultucuların tristörden tristöre aktarımında bu  $A_{ii}$  formülü geçerlidir. Burada kesinlikle  $\omega = 2\pi f$  alınmalıdır. O2'de  $v_y$  'nin periyodu

$$T_{vy} = \pi$$

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

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

### K2 Devresinde Tristörden Tristöre Aktarım:

K2 devresinde  $v_k = \hat{V} \sin(\omega t)$  gibi tek AC kaynak olduğundan

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

Tek kaynağın tek  $L_k$  iç endüktansı (veya sekonder sargısı kaçak reaktansı) olduğu için O2 formülündeki  $2L_k$  yerine  $L_k$  gelir. Ancak aktarım sırasında O2'de  $i_{akt} : 0 \rightarrow I_d$  değişimi göstermesine karşılık K2'de  $i_{akt} : -I_d \rightarrow I_d$  değişimi gösterir. Bu yüzden  $\ddot{u}$  hesabında kullanılan

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

formülünde O2'deki  $I_d$  'ye karşılık K2'de  $2I_d$  gelir ve formül aynı bulunur. Ancak K2'de  $A_{ii}$  hesabında anlık

$$\Delta v_y = v_y^{\text{ideal}} - \frac{v_y^{\text{yeni}} + v_y^{\text{eski}}}{2} = \frac{v_y^{\text{yeni}} - v_y^{\text{eski}}}{2} = \frac{v_k - (-v_k)}{2} = v_k = v_{akt}$$

bulunur. Halbuki O2'de  $\Delta v_y = v_{akt}/2$  idi. Bu yüzden yalnız K2'ye mahsus olarak  $A_{ii}$  formülü farklıdır:

$$A_{ii} = 2\omega L_k I_d$$

### Örnek:

O2 devresinde  $L_k = 1,7\text{mH}$  olup,  $f = 50\text{Hz}$  frekans,  $\hat{V}' = 110\text{V}$  tepe gerilimi,  $\alpha = 75^\circ$  ateşleme açısı ve  $I_d = 20\text{A}$  'lık tam süzölmüş akımla uzun bir süredir çalışılıyor.

a) Aktarım açısı ( $\ddot{u}$ ) ve aktarım süresini ( $t_{akt}$ ) bulunuz.

b) Aktarımı ihmal etmeden yük üzerindeki ortalama gerilimi ( $V_{ydc}^{\text{gerçek}}$ ) de bulunuz.

Çözüm:

a) Bu devrede  $\hat{V}_{akt} = 2\hat{V}' = 2 \times 110\text{V} = 220\text{V}$

$$\cos 75^\circ - \cos(75^\circ + \ddot{u}) = \frac{2(2\pi 50\text{Hz})(0,0017\text{H})(20\text{A})}{220\text{V}} = 0,0971 = 0,2588 - \cos(75^\circ + \ddot{u}) \rightarrow (75^\circ + \ddot{u}) = 80,7^\circ$$

$$\ddot{u} = 5,7^\circ (= 0,0994 \text{ rad}) \rightarrow t_{akt} = \frac{5,7^\circ}{\omega} \quad \text{Burada } \ddot{u} \text{ raydan cinsinden kullanılsaydı } \omega = 2\pi f \text{ alınırdı.}$$

Derece cinsinden kullanıldığı için  $\omega = 360^\circ \times f$  alınır:

$$t_{akt} = \frac{5,7^\circ}{360^\circ \times 50\text{Hz}} = 3,16 \times 10^{-4} \text{s} = 0,316\text{ms} = t_{akt} \rightarrow \text{aktarım süresi}$$

b) O2 devresinde  $A_{ii} = \omega L_k I_d = (2\pi 50\text{Hz})(0,0017\text{H})(20\text{A}) = 3,4\pi \text{ V}$

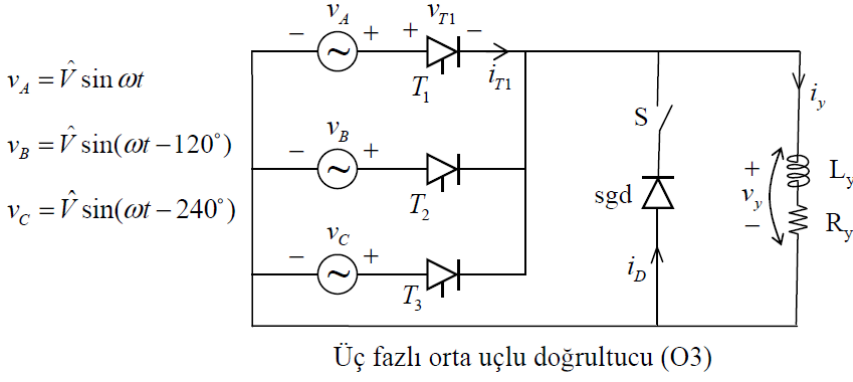
$v_y$  'nin periyodu  $T_{vy} = \pi$

$$\Delta V_{ydc} = \frac{3,4\pi}{\pi} = 3,4 \text{ V} \quad V_{ydc}^{\text{ideal}} = \frac{2\hat{V}'}{\pi} \cos 75^\circ = 18,12 \text{ V}$$

$$V_{ydc}^{\text{gerçek}} = 18,12 \text{ V} - 3,40 \text{ V}$$

$$V_{ydc}^{\text{gerçek}} = 14,72 \text{ V} \rightarrow \text{yük üzerindeki ortalama gerilim.}$$

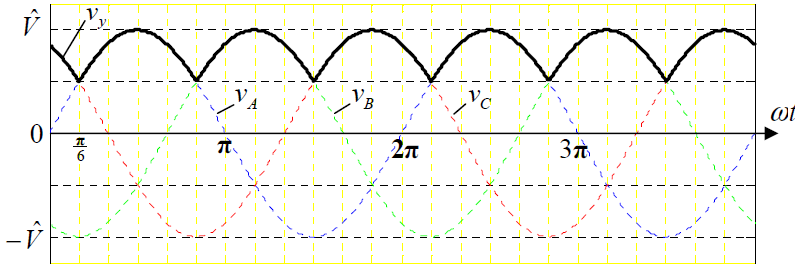
### Üç Fazlı Orta Uçlu Doğrultucu (O3) :



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 iletme 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 iletme geçer. Buna göre  $\alpha$  ateşleme açısıyla çalışmak için

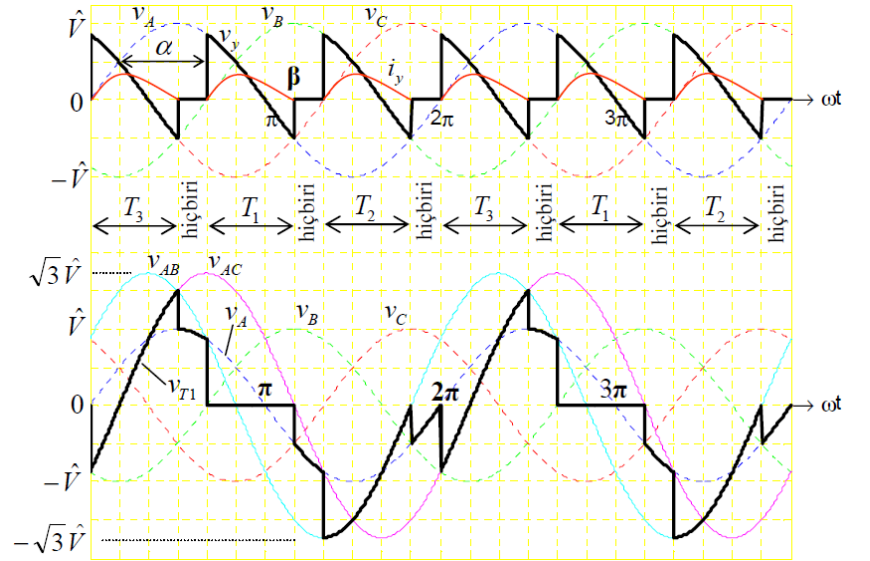
$$T_1 \text{ tristörü } \omega t = \alpha + \frac{\pi}{6} + 2k\pi \quad (k \text{ tamsayı})$$

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

$$T_3 \text{ tristörü } \omega t = \alpha + \frac{3\pi}{2} + 2k\pi$$

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.



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

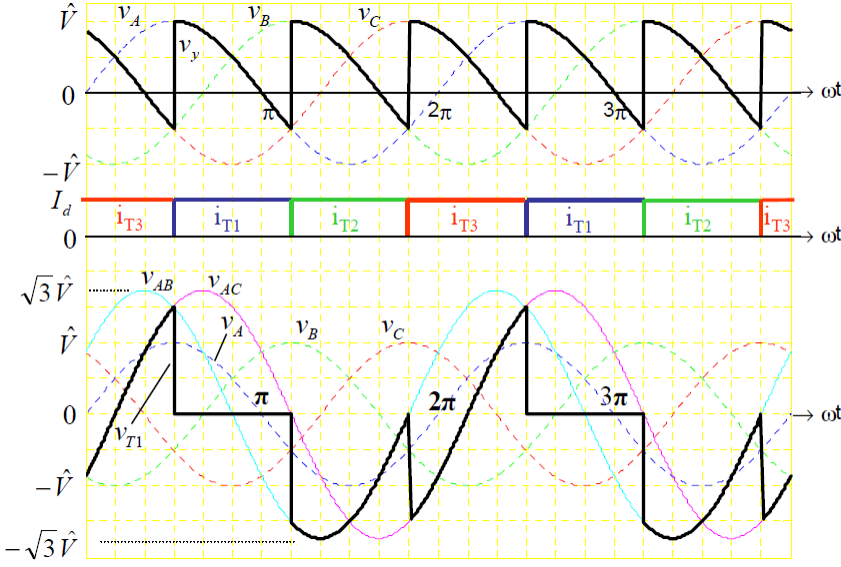
Yük endüktif olduğu için,  $i_y$  yavaş yavaş artıp azalır.  $i_y$  kesilene kadar tristör iletimde kalır. Böylece iletimdeki tristöre seri bağlı kaynağın gerilimi negatife düşse bile yük üzerinde aynen görülür.  $i_y$  kesilince tristör de kesime gider ve  $v_y = 0$  olur.

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,  $\alpha = 60^\circ$



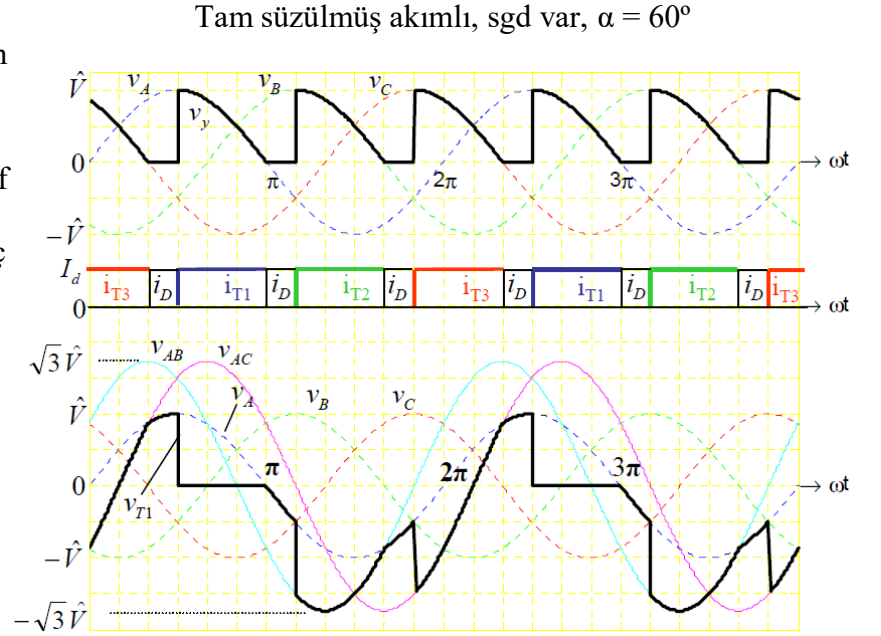
Sgd'sız tam süzölmüş akımlı çalışmada, önceki çalışmadaki tüm tristörlerin kesimde olduğu kısım daralarak yok olmuştur. Akım sürekli devam ettiği için her an bir tristör iletimdedir (her biri  $120^\circ$ ). Yük akımı  $I_d$  değerinde sabittir ve T1, T2, T3 akımları ortada farklı renklerle gösterilmiştir.

$v_{T1}$  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.

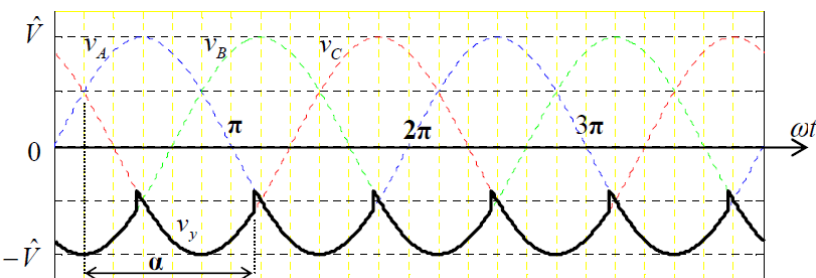
Alt şekilde ise  $v_{T1}$  gösterilmiştir. Üç tristörün de kesimde olduğu anlar bulunduğu için  $v_{T1} = v_A$  anları yeniden görölmektedir.



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 çıkarılmışının ( $t_q$ ) açısı karşılığı mümkün olan en büyük ateşleme açısıdır.

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

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 çalışamaz; 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:

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

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

$$A_{ii} = \int_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6}} \frac{v_{AC}}{2} d(\omega t) = \int_{\omega t = \alpha + \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6}} \frac{\hat{V}_{\text{akt}}}{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) d(\omega t) = \frac{\hat{V}_{\text{akt}}}{2} (\cos \alpha - \cos(\alpha + \frac{\pi}{3})) = \frac{\hat{V}_{\text{akt}}}{2} \frac{2\omega L_k I_d}{\hat{V}_{\text{akt}}}$$

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

bulunur.  $v_y$  'nin periyodu

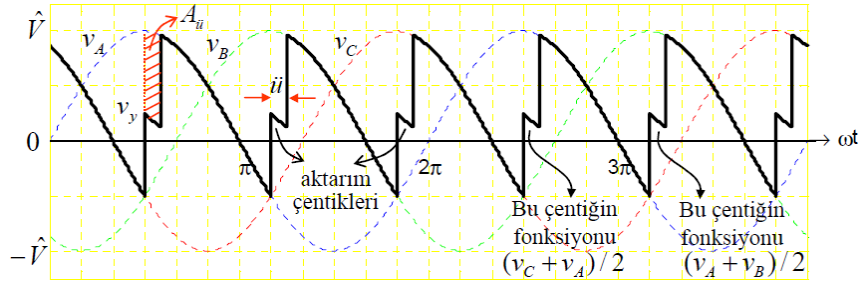
$$T_{vy} = 2\pi/3$$

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

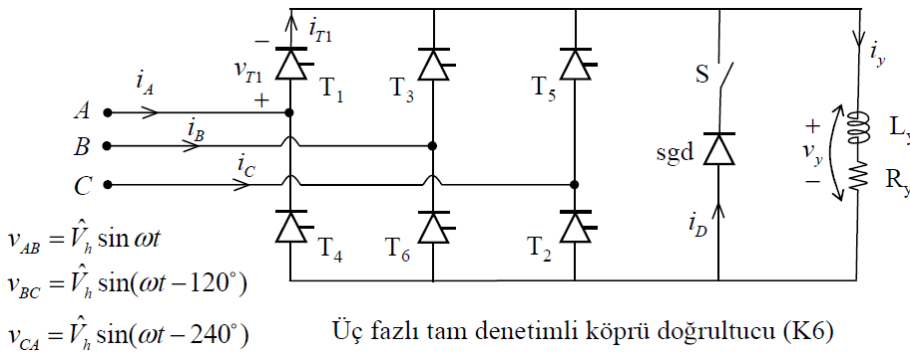
$$\Delta V_{ydc} = \frac{A_{ii}}{T_{vy}} \quad V_{ydc}^{\text{gerçek}} = V_{ydc}^{\text{ideal}} - \Delta V_{ydc}$$

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)



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.

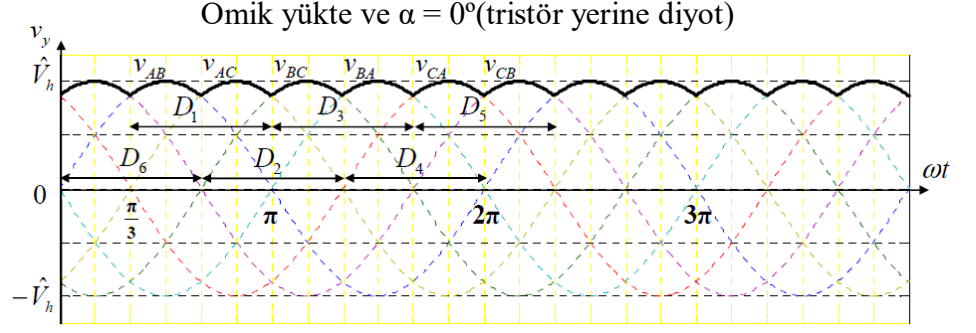
Burada  $\hat{V}_h$ , fazlar arası gerilimin tepe değeridir.

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 iletime geçerek diğer diyotları ters kutuplar ve kesime



zorlar. Böylece yük üzerinde o gerilim görülür. Örneğin  $v_{AB}$  en büyük iken  $D_1$  ve  $D_6$  iletme geçer.  $v_{BA}$  en büyük iken ise  $D_3$  ve  $D_4$  iletme geçer. Sırasına göre iletimdeki diyotlar ve yüke ilettikleri voltajın fonksiyonları şöyledir:

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



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,  $D_6$  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:

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





$\alpha \leq 60^\circ$  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.

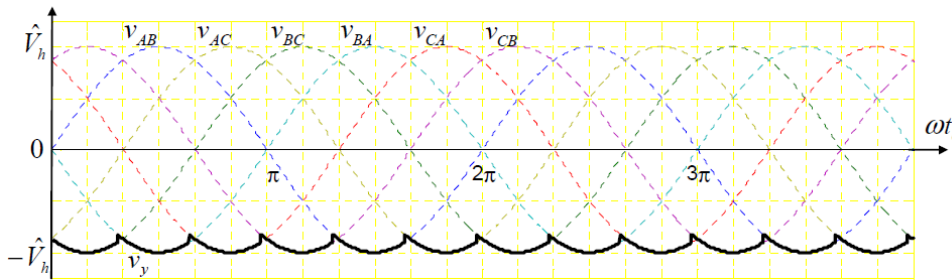
Bu belirsizliğin ayrıntısına girmeden gerilimin fazlar arası gerilimin artı ve eksi tepe değerleri arasında olacağı anlaşılmaktadır ve tristörler bu gerilime göre (güvenlik payı da konularak) seçilmelidir.  $v_{T1}$  şöyle bulunur:

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

$\alpha > 60^\circ$  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 yüklüde 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:

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

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:

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

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

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:

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

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  $v_y^{\text{eski}} = v_{CB}$  ve  $v_y^{\text{yeni}} = v_{AB}$  olduğundan

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

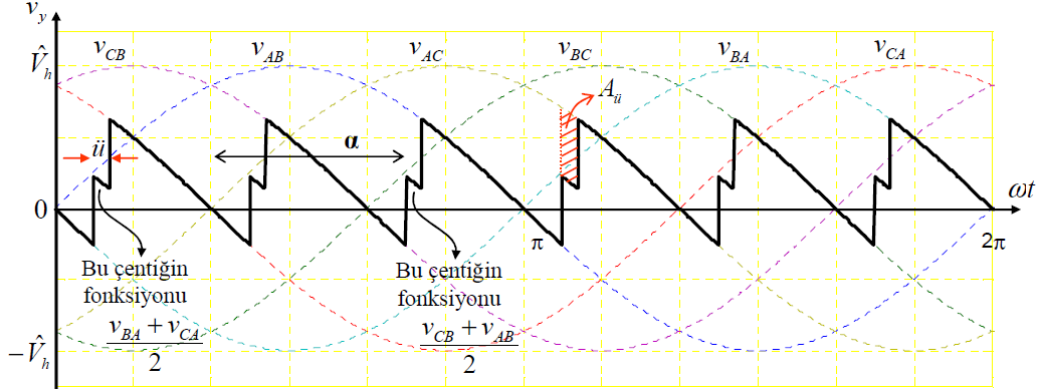
$$A_{ii} = \frac{\hat{V}_{\text{akt}}}{2} \frac{2\omega L_k I_d}{\hat{V}_{\text{akt}}} \rightarrow A_{ii} = \omega L_k I_d$$

bulunur.  $v_y$  'nin periyodu

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

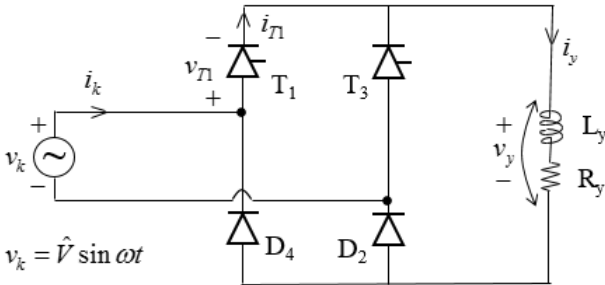
Aktarım sırasında  $v_y = \frac{v_y^{\text{eski}} + v_y^{\text{yeni}}}{2}$  olmasından dolayı  $v_y$  dalga şeklinde ortaya çıkan aktarım çentikleri de şöyledir:

K6'da aktarım ihmal edilmeden, tam süzölmüş akımlı,  $\alpha = 75^\circ$

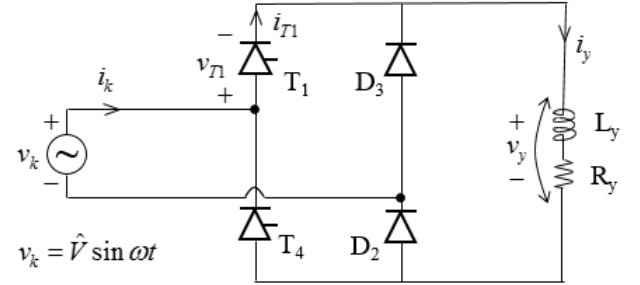


### Yarı denetimli doğrultucular

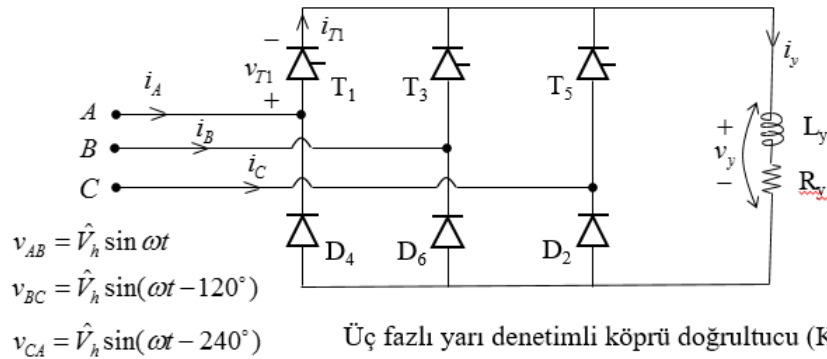
Tam denetimli doğrultuculardaki denetimli elemanlarının bir kısmı yerine diyot kullanılmış doğrultuculardır. Başlıcaları şunlardır:



Tek fazlı simetrik yarı denetimli köprü doğrultucu (K2)



Tek fazlı asimetrik yarı denetimli köprü doğrultucu (K2)



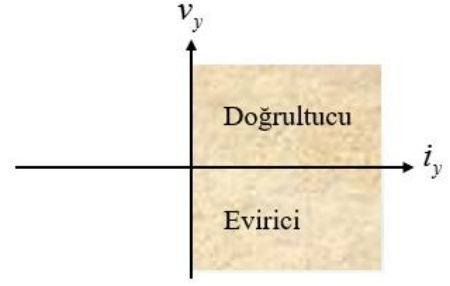
Üç fazlı yarı denetimli köprü doğrultucu (K6)

Buradaki yarı denetimli doğrultucularda sgd kullanmaya gerek yoktur; çünkü zaten yük gerilimi tam denetiminin sgd'li'si gibidir. Şöyle ki: Asimetrik yarı denetimli K2'de seri bağlı gibi olan D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub> diyotları idealde tek bir diyot gibi gerilimin negatife düşmesine izin vermez. Diğer iki devrede ise bir tristör iletimdeyken yük geriliminin negatife düştüğü varsayılırsa aynı koldaki diyot iletime geçerek yük gerilimini yaklaşık sıfırlardı.

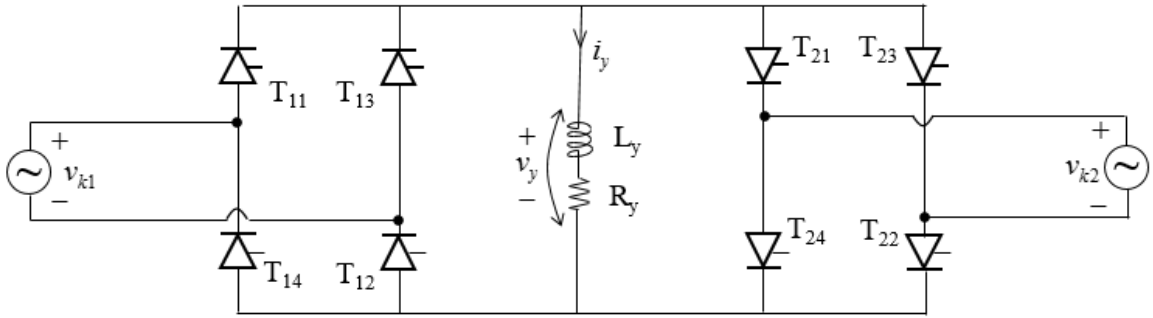
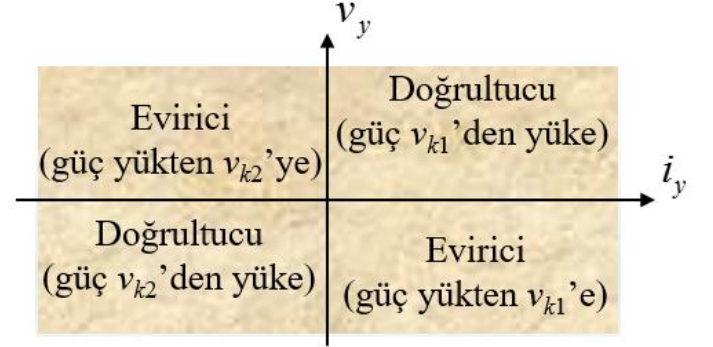
Yarı denetimli doğrultucularda tristör gerilimleri tam denetimlidekinden farklı olabilmektedir. Bu yüzden kullanılacak diyot ve tristörlerin kesimde dayanması gereken gerilimler dikkatli seçilmelidir.

### Doğrultucuların çalışma bölgeleri ve ters paralel bağlanması

Anlatılan tüm doğrultucuların yük akımı ve geriliminin işaretlerine göre çalışma bölgelerine bakarsak, endüktif yüklerde 2 çeyrek bölgede çalışabildiklerini görürüz. Akım hep aynı yönlü olmasına karşılık gerilim negatif de olabilmektedir ve bu durumda endüktansta depolanan enerji şebekeye aktarılmaktadır. Ortalama güç negatifse bu, doğrultucu devrenin evirici modunda çalışmasıdır.



4 çeyrek bölgeli çalışabilen bir doğrultucu elde etmek için iki çeyrek bölgeli çalışabilen herhangi iki adet doğrultucuyu, meselâ K2 devresini, şekildeki gibi ters paralel bağlayabiliriz. Buradaki iki doğrultucu aynı anda çalışamaz, çünkü yüke bir akım yönünde birisi, diğer akım yönünde diğeri bağlanabilir. Bu yüzden  $v_{k1}$  ve  $v_{k2}$  kaynaklarının farklı olması gerekmez, aynı olabilir.



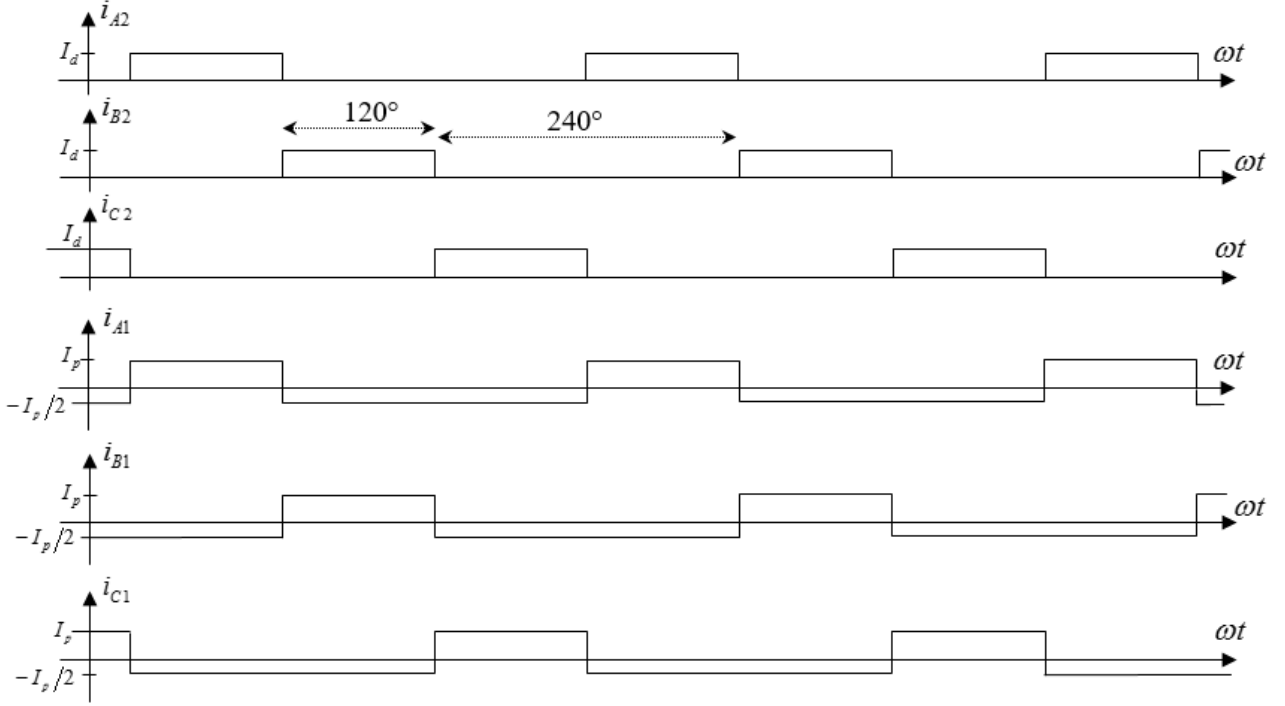
4 çeyrek bölgeli tam denetimli köprü doğrultucu (ters paralel bir çift K2)

### Üç fazlı doğrultucularda harmonik ve reaktif güç analizi

Harmonik ve reaktif güç analizi genellikle şebekeye bakan tarafta yapılır; çünkü ücretlendirme buna göredir. Yani kaynak olarak trafo sekonderi kullanıyorsak hesaplamalar trafonun primerine göre yapılır. Bazı durumlarda bu, sekondere göre yapılan hesaplamalarla aynı sonucu verir ise de bazen primer ve sekonderin bağlantı türü aynı olsa bile farklı sonuçlar verir. Tüketicilerin trafo primeri üçgen bağlı ise, dengeli çalışmada şebeke hat akımında 3'ün tam katı numaralı harmonikler yok olur. Çünkü hat akımları iç faz akımlarının farkıdır ve  $n$ . harmonik için faz farkı dengeli çalışmada  $n \cdot 120^\circ$ 'dir, ki  $n$  eğer 3'ün tam katı ise bu faz farkı  $360^\circ$ 'nin tam katı, yani etkisiz olur. Böylece farkları alınınca bu harmonikler yok olur. Bu yüzden tüketici trafo primer bağlantısı genellikle üçgen yapılıdır.

O3 doğrultucusunda primeri Y bağlı 3 ayrı tek fazlı trafo kullanılıyor ise mutlaka nötr hattı kullanılmalıdır. Aksi halde sekonderde iletimde olmayan tristörlerin bağlı olduğu iki fazın primeri yaklaşık sonsuz empedans göstereceğinden, iletimde olması beklenen tristörün bağlı olduğu fazın primer akımı dönüş yolu bulamaz. Bu fazın primerinden akım geçemeyince sekonderinden de akım geçemez ve devre çalışmaz. Primerde nötr hattı kullanılırsa bu sorun ortadan kalkar. Ancak bu defa da primer hat akımlarında dc bileşen olacağından bu da kötü bir tercihtir (Böyle bir çalışmada primer akımı dalga şekilleri, tam süzölmüş akımlı yük için biraz sonraki şekillerdeki sekonder akım dalga şekilleriyle aynı biçimlidir). Primer üçgen bağlanırsa dc bileşen sıfırcı harmonik olduğu için üçün tam katı harmonik sayılır ve dengeli çalışmada hat akımında yok olur.

O3 doğrultucusunda üç fazlı tek bir trafo kullanılıyorsa, bunların manyetik nüvesi ortak olduğu için sekonderi iletimde olmayan fazların primerleri Y bağlıyken, iletimde olan fazın primer akımına dönüş yolu sağlarlar. Tam süzölmüş akımlı sgd'siz dengeli çalışmada sekonder ve Y bağlı primer akımları şu şekillerdeki gibi olur:



Tam süzölmüş akımlı, sgd'siz O3 devresinin üç fazlı (ortak manyetik nüveli) Y/Y bağlı bir trafoyla çalıştırılması halinde sekonder ve primer akımları

Ayrıca sgd kullanılsaydı sekonderde akımların sıfıra düşme anları daha erken olurdu ve primer akımlarında da buna karşılık aralarda akımın sıfır olduğu zamanlar olurdu.

$I_p$  ile  $I_d$  arasındaki oranın sarım oranı olduğunu söyleyemeyiz. Bunun için anlık güç dengesine bakalım. Meselâ sekonderde A fazı iletimdeyken

$$v_{A1}i_{A1} + v_{B1}i_{B1} + v_{C1}i_{C1} = v_{A2}i_{A2} + v_{B2}i_{B2} + v_{C2}i_{C2}$$

$$\rightarrow v_{A1}I_p - v_{B1}\frac{I_p}{2} - v_{C1}\frac{I_p}{2} = v_{A2}I_d + v_{B2} \cdot 0 + v_{C2} \cdot 0$$

Dengeli çalışmada  $-v_{B1} - v_{C1} = v_{A1}$  'dir. Primer/sekonder gerilim oranı ise tek faz sarım oranı  $N_1/N_2$  olduğundan

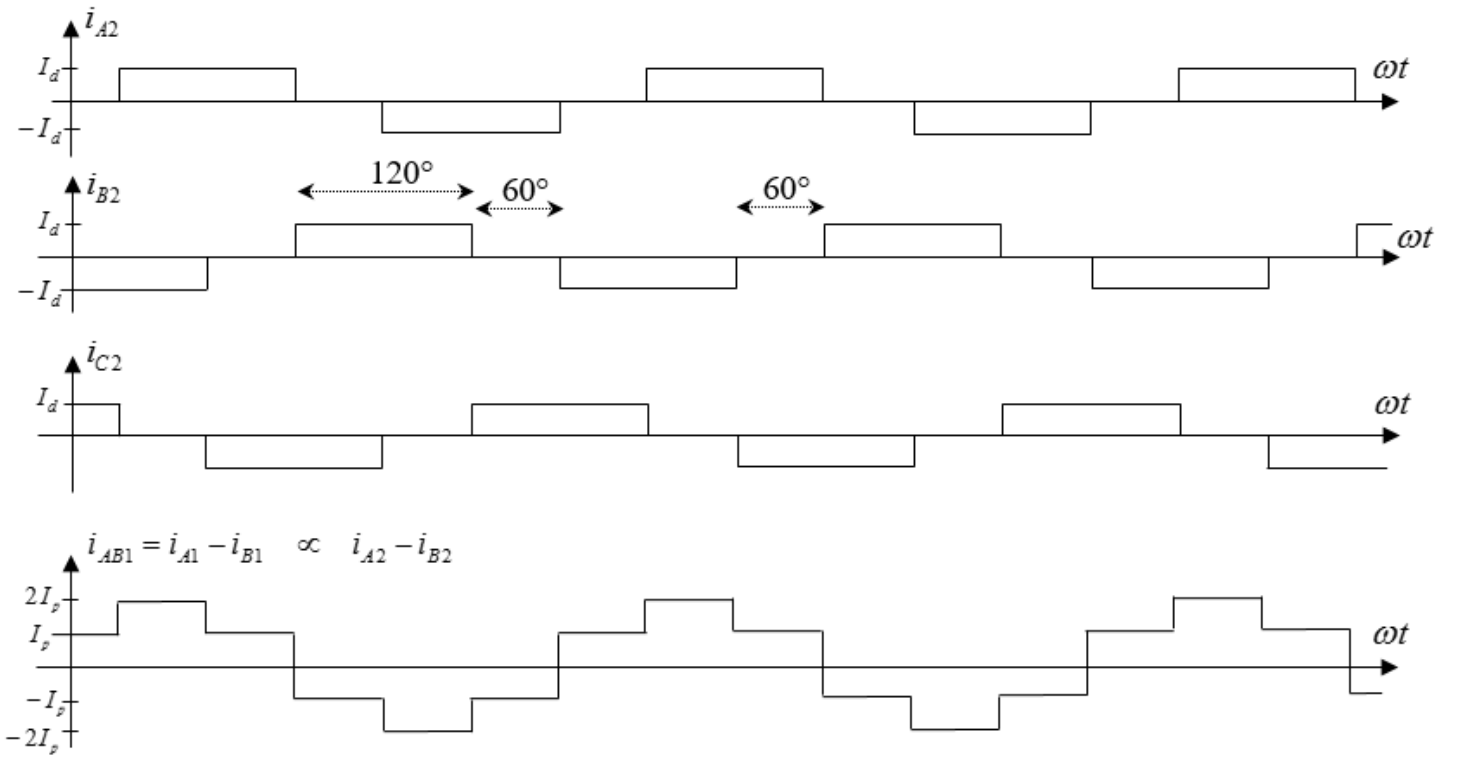
$$v_{A1}\left(I_p + \frac{I_p}{2}\right) = v_{A2}I_d$$

$$\rightarrow \frac{N_1}{N_2}v_{A2}\frac{3}{2}I_p = v_{A2}I_d$$

$$\boxed{I_p = \frac{2N_2}{3N_1}I_d}$$

bulunur. Şebeke hat akımı harmonik ve reaktif güç analizi buna göre yapılır. Halbuki primer üçgen bağlansaydı tek faz akım dönüşüm oranında bu 2/3 katsayısı olmazdı.

Primer  $\Delta$  bağlı ise önce hat akımı dalga şeklini bulup bunun temel bileşen ve rms değerlerini hesaplayıp analiz yapmak uygundur. Meselâ K6 devresi  $\Delta/Y$  trafo ve sgd'siz tam süzölmüş akımla çalışırken sekonder akımları ve bir hattın primer akımı aşağıdaki şekillerdeki gibi olur:



Tam süzölmüş akımlı, sgd'siz K6 devresinin  $\Delta/Y$  bağı bir trafoyla çalıştırılması halinde sekonder akımları ve bir hattın primer akımı

Burada  $I_p = (N_2/N_1)I_d$  'dir. Görüldüğü gibi primer  $\Delta$  bağlanınca hat akımı sinüzoidale daha çok benzemekte, yani harmonikleri azalmaktadır. Zaten 3'ün tam katı numaralı harmoniklerin bu hat akımında olmayacağını söylemiştik. Bu örnekte ayrıca tek harmonik simetrisi (bir yarı periyotta, diğer yarı periyottakinin negatifi) olması nedeniyle çift harmonikler de bulunmamaktadır.

*Dengeli fakat doğrusal olmayan yüklü üç fazlı sistemlerde harmonik ve reaktif güç analizi yaparken bazı notlar:*

- Primer tek faz akım ve gerilimleri kullanılarak bulunan aktif güç, 3 ile çarpılarak üç fazın toplam gücü ( $P$ ) bulunur.
- Primer Y bağlıysa primer hat akımının rms değeri  $I_h^{\text{rms}}$ , primer tek faz akımının rms değerine eşit alınır.
- Primer  $\Delta$  bağlıysa primer hat akımının rms değeri  $I_h^{\text{rms}}$ , primer tek faz akımındaki 3'ün katı numaralı harmonikler atılarak bulunan rms akımın  $\sqrt{3}$  katıdır. Ancak böyle hesaplamak teorik olarak doğru olsa da çok kullanışlı olmayabilir. Bunun yerine tek faz akım dalga şekillerinin farkları çizilerek hat akımları bulunup bunun rms değerini ( $I_h^{\text{rms}}$ ) hesaplamak daha kullanışlıdır (az önceki şekilde gösterildiği gibi).
- Üç fazın toplam görünür gücü, primer Y bağlıysa de  $\Delta$  bağlıysa de  $S = \sqrt{3} V_h^{\text{rms}} I_h^{\text{rms}}$  'tir. Burada  $V_h^{\text{rms}}$  primer fazlar arası geriliminin rms değeridir.
- Üç fazın toplam görünür gücünün, tek faz görünür gücünün 3 katı olması, nötr kullanılsa da kullanılmasa da Y bağlantı için doğrudur,  $\Delta$  için geçerli değildir.
- Toplam reaktif güç  $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$  ve güç faktörü  $GF = P/S$  formülleri hem Y hem  $\Delta$  için geçerlidir.
- Güç deplasman katsayısı (power displacement factor)  $pdf = \cos \phi_1$  tek fazın akım ve gerilim faz farkından hesaplanır.

- Akım toplam harmonik distorsiyonu  $THD_i$  için genellikle primer hat akımından hesaplanan önemlidir.
- Y bağlantıda nötr kullanılmıyorsa akımın dc bileşeni sıfırdır. Meselâ O3 doğrultucusunda primeri Y bağlı 3 ayrı tek fazlı trafo kullanılıyorsa nötr hattı kullanılmazsa, normalde dc bileşenli akım beklenen sistemin çalışmayacağını söylemiştik. Nötr kullanılıyorsa akımın dc bileşeni olabilir.
- Y bağlantıda nötr kullanılıyorsa, ihtimal çok zayıf olsa da teorik olarak nötr akımının faz akımından daha büyük rms değerli olması mümkündür. Çünkü üç faz akımının 3'ün katı numaralı harmonikleri, dc bileşen dahil, nötr hattında skaler toplanır.
- Gerilimin de harmonikli olduğu durumlarda bu notların bir kısmı geçersizdir.