

# **GÜÇ ELEKTRONİĞİ**

- 1. Güç Elektroniğinin Kapsamı ve Uygulamaları**
- 2. Temel Yarı İletken Güç Elemanları**
- 3. Diğer Yarı İletken Güç Elemanları**
- 4. Güç Elemanlarının Karşılaştırılması**
- 5. AC-DC Dönüştürücüler / Doğrultucular**
- 6. AC-AC Dönüştürücüler / AC Kıyıcılar**
- 7. DC-AC Dönüştürücüler / İnverterler**
- 8. DC-DC Dönüştürücüler / DC Kıyıcılar**
- 9. Güç Elemanlarında Kayıplar ve Isınma**
- 10. Temel Yarı İletken Kontrol Elemanları**
- 11. Güç Elektroniğinde Temel Kontrol Düzenleri**
- 12. Güç Elektroniğinde Temel Koruma Düzenleri**

# 1. GÜÇ ELEKTRONİĞİNİN KAPSAMI ve UYGULAMALARI

## A) GÜÇ ELEKTRONİĞİNİN TANIM ve KAPSAMI

### GÜÇ ELEKTRONİĞİNİN TANIMI

**Güç Elektroniği**, temel olarak **yüke verilen enerjinin kontrol edilmesi** ve **enerji şekillerinin birbirine dönüştürülmesini** inceleyen bilim dalıdır. Güç Elektroniği, Elektrik Mühendisliğinin oldukça **cazip ve önemli** bir bilim dalıdır. Güç Elektroniği, **temel olarak** Matematik ve Devre Teorisi ile Elektronik bilgisi gerektirir.

### YÜKE VERİLEN ENERJİNİN KONTROLÜ

Yüke verilen enerjinin kontrolü, enerjinin **açılması** ve **kapanması** ile **ayarlanması** içerir.

#### 1. Statik (Yarı İletken) Şalterler

- a) Statik AC şalterler
- b) Statik DC şalterler

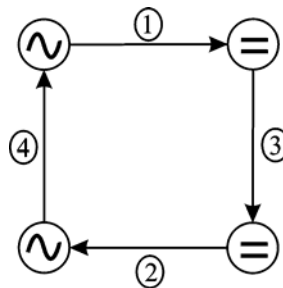
#### 2. Statik (Yarı İletken) Ayarlayıcılar

- a) Statik AC ayarlayıcılar
- b) Statik DC ayarlayıcılar

### ENERJİ ŞEKİLLERİNİN BİRBİRİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ

Elektrik enerji şekillerini birbirine dönüştüren devrelere genel olarak **Dönüştürücüler** adı verilir. **Dört temel dönüştürücü** vardır. Bu dönüştürücüler aşağıdaki diyagramda özetlenmiştir.

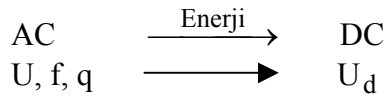
*Dönüştürücüler*



#### Dönüştürücülerde kullanılan kısaltmalar

- DC** : Doğru Akım şeklindeki elektrik enerjisi
- AC** : Alternatif Akım şeklindeki elektrik enerjisi
- $U_d$**  : DC gerilim (ortalama değer)
- $U$**  : AC gerilim (efektif değer)
- $F$**  : Frekans
- $q$**  : Faz sayısı

## 1. AC-DC Dönüştürücüler / Doğrultucular, Redresörler



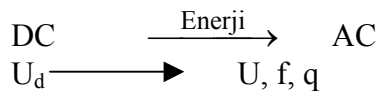
### Temel Özellikleri

- Doğal komütasyonludur.
- Tristör ve diyotlarla gerçekleştirilir.

### Başlıca Uygulama Alanları

- DC motor kontrolü
- Akümülatör şarjı
- Galvano teknikle kaplama
- DC gerilim kaynakları

## 2. DC-AC Dönüştürücüler / İnverterler, Eviriciler



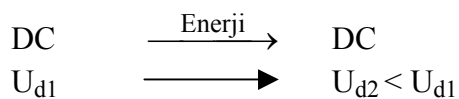
### Temel Özellikleri

- Zorlamalı komütasyonludur.
- Yüksek güç ve düşük frekanslarda SCR kullanılır.
- Orta güç ve orta frekanslarda BJT kullanılır.
- Düşük güç ve yüksek frekanslarda MOSFET kullanılır.
- Ayrıca, diğer güç elemanları,
- GTO yüksek güç ve düşük frekanslarda,
- IGBT ortanın üzerindeki güç ve frekanslarda,
- MCT yüksek güç ve orta frekanslarda kullanılmaktadır.

### Başlıca Uygulama Alanları

- AC motor kontrolü
- Kesintisiz güç kaynakları
- Endüksiyonla ısıtma sistemleri
- Yüksek gerilim DC taşıma sistemleri
- AC gerilim kaynakları

## 3. DC-DC Dönüştürücüler / DC Kıyıcılar



**Temel Özellikleri**

- Zorlamalı komütasyonludur.
- Eleman seçimi inverterdeki gibidir.

**Başlıca Uygulama Alanları**

- DC motor kontrolü
- Akümülatör şarjı
- DC gerilim kaynakları

**4. AC-AC Dönüştürücüler / AC Kıyıcılar, Doğrudan Frekans Dönüştürücüler****AC Kıyıcılar**

$$\begin{array}{ccc}
 \text{AC} & \xrightarrow{\text{Enerji}} & \text{AC} \\
 U_1, f_1, q_1 & \longrightarrow & U_2, f_2, q_2
 \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} f_1 = f_2 \\ q_1 = q_2 \end{array} \right\} \Rightarrow U_1 \rightarrow U_2 \quad \text{AC KIYICI / FAZ KESME DEVRESİ}$$

**Temel Özellikleri**

- Doğal komütasyonludur.
- Tristör ve triyaklarla gerçekleştirilir.

**Başlıca Uygulama Alanları**

- Omik yüklerde güç kontrolü, temel olarak ısı ve ışık kontrolü
- Vantilatör karakteristikli yükleri (fan, pompa, ve kompresör gibi) tahrik eden düşük güçlü AC motor kontrolü

**Doğrudan Frekans Dönüştürücüler**

$$\left. \begin{array}{l} f_1 \neq f_2 \\ q_1 \neq q_2 \\ U_1 \neq U_2 \end{array} \right\} \Rightarrow U_1, f_1, q_1 \rightarrow U_2, f_2, q_2 \quad \text{DOĞRUDAN FREKANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ}$$

**Temel Özellikleri**

- Doğal komütasyonludur.
- Tristörlerle gerçekleştirilir.
- Düşük hızlarda kontrol imkanı sağlar.

**Başlıca Uygulama Alanları**

- Çok düşük devirlerde çalışan ağır iş makinelerinin (yol kazma, taş kırma, maden çıkarma makineleri gibi) kontrolü

## B) GÜÇ ELEKTRONİĞİNİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

Güç Elektroniğinin **statik** ve **dinamik** temel endüstriyel uygulama alanları ile diğer önemli **endüstriyel uygulama alanları** aşağıdaki gibi sıralanabilir.

### 1. Temel Statik Uygulamalar

- Kesintisiz Güç Kaynakları (KGK, UPS)
- Anahtarlamalı Güç Kaynakları (AGK, SMPS)
- Rezonanslı Güç Kaynakları (RGK, RMPS)
- Endüksiyonla Isıtma (EI, EH)
- Elektronik Balastlar (EB, EB)
- Yüksek Gerilim DC Taşıma (YGDCT, HVDC)
- Statik VAR Kompanzasyonu (SVK, SVC)

### 2. Temel Dinamik Uygulamalar

- Genel Olarak DC Motor Kontrolü
- Genel Olarak AC Motor Kontrolü
- Sincap Kafesli (Kısa Devre Rotorlu) Asenkron Motor Kontrolü
- Bilezikli (Sargılı Rotorlu) Asenkron Motor Kontrolü
- Lineer Asenkron Motor Kontrolü
- Senkron Motor Kontrolü
- Üniversal Motor Kontrolü
- Adım Motoru Kontrolü
- Relüktans Motor Kontrolü

### 3. Diğer Önemli Uygulamalar

- Aydınlatma ve Işık Kontrolü Sistemleri
- Isıtma ve Soğuma Sistemleri
- Lehim ve Kaynak Yapma Sistemleri
- Eritme ve Sertleştirme Sistemleri
- Eleme ve Öğütme Sistemleri
- Asansör ve Vinç Sistemleri
- Yürüyen Merdiven ve Bant Sistemleri
- Pompa ve Kompresör Sistemleri
- Havalandırma ve Fan Sistemleri
- Alternatif Enerji Kaynağı Sistemleri
- Akümülatör Şarjı ve Enerji Depolama Sistemleri
- Elektrikli Taşıma ve Elektrikli Araç Sistemleri
- Uzay ve Askeri Araç Sistemleri
- Yer Kazma ve Maden Çıkarma Sistemleri

Ayrıca, Güç Elektroniği, Disiplinlerarası Bilim Alanları olarak bilinen

- **Endüstriyel Otomasyon**
- **Mekatronik**
- **Robotik**

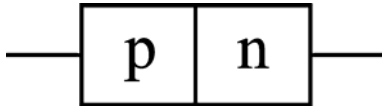
bilimleri içerisinde de yoğun bir şekilde yer almaktadır.

## 2. TEMEL YARI İLETKEN GÜÇ ELEMANLARI

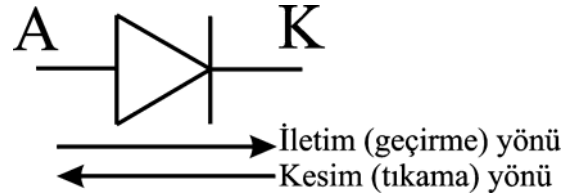
### A) TEMEL KONTROLSÜZ GÜÇ ELEMANI DİYOT

#### Yapı, Sembol ve İletim Karakteristiği

##### Yapı



##### Sembol



A : Anot

K : Katot

##### Açıklama

En basit yapılı kontrolsüz yarı iletken elemandır.

**İletim yönünde**, eşik geriliminin üzerinde küçük değerli bir iç dirence sahip olan bir **iletken** gibidir.

**Kesim yönünde ise**, delinme gerilimine kadar çok küçük sızıntı akımlar geçiren bir **yalıtkan** gibidir.

$U_d$  : Delinme Gerilimi

$U_{T0}$  : Eşik Gerilimi

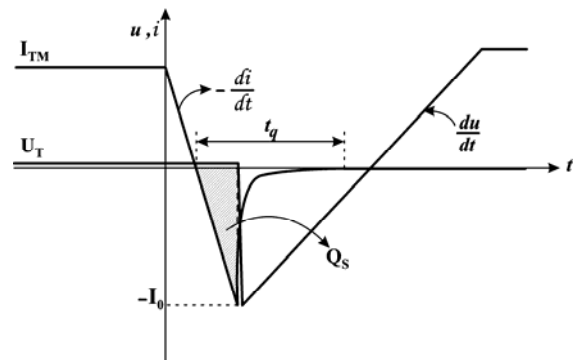
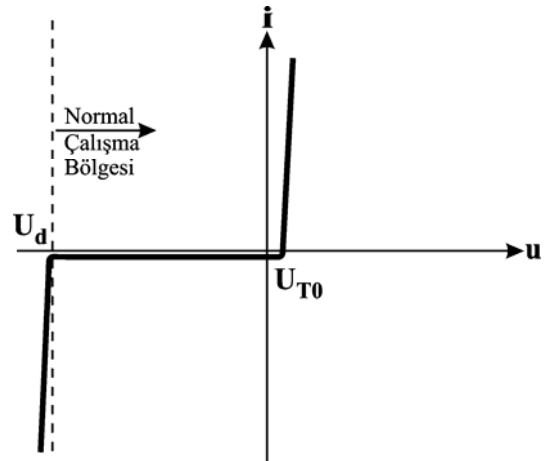
$r_T$  : Eşdeğer Direnç ( $\mu\Omega$  -  $m\Omega$  mertebelerinde)

Güç diyodu,  $U_d$  geriliminde tahrip olur ve iletken hale gelir. Yüksek ve sabit bir gerilim altında akımın sonsuza gittiği bu tür devrilmelere, genel olarak **çığ devrilme** denilmektedir.

Çığ devrilmeye maruz kalan yarı iletken elemanlar, güç kaybından dolayı genellikle **tahrip olur** yani bozulurlar. Tahrip olan yarı iletken elemanlar ise, genellikle **kısa devre** olurlar.

**Güç diyotları**, pozitif yönde akımı geçirmeleri ve ters yönde akımı tutmaları için, oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Normal, hızlı ve çok hızlı diyot türleri mevcuttur. **Normal diyotlar**, genellikle AC şebekeye bağlı doğrultucu ve AC kıyıcı devrelerinde kullanılmaktadır. **Hızlı diyotlar** ise, genellikle inverter ve DC kıyıcılarda kullanılmaktadır. Günümüzde **Ters Toparlanma Süresi** veya Sönme Süresi birkaç 10 ns olan diyotlar üretilmektedir.

##### İletim Karakteristiği

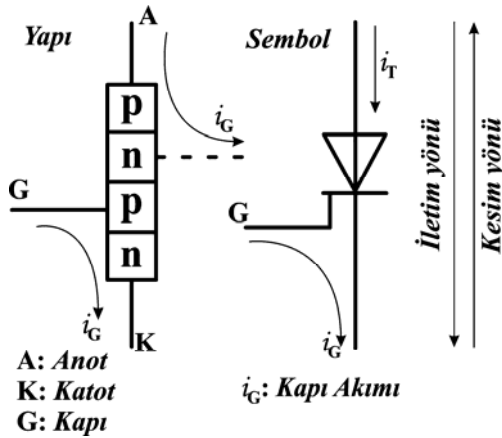


## B) TEMEL KONTROLLÜ GÜÇ ELEMANLARI

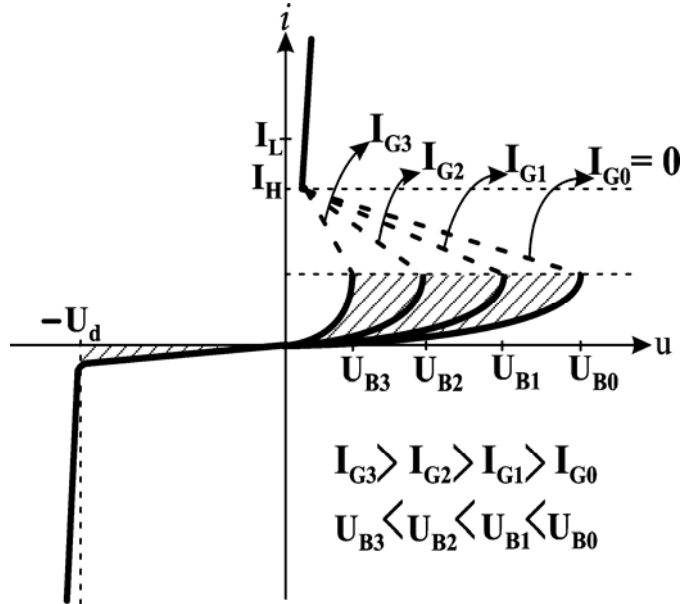
### 1. TRİSTÖR (SCR)

#### Yapı, Sembol ve İletim Karakteristiği

##### Yapı ve Sembol



##### İletim Karakteristiği



#### Karakteristik Değerler

- $i_G$  : Kapı Akımı
- $u_G$  : Kapı Gerilimi
- $I_{GT}$  : Tetikleme Akımı.
- $U_{GT}$  : Tetikleme Gerilimi
- $I_{GTM}$  : Max. Kapı Akımı
- $U_{GTM}$  : Max. Kapı Gerilimi
- $u_B$  : Devrilme gerilimi
- $U_{B0}$  : Sıfır Devrilme Gerilimi
- $I_H$  : Tutma Akımı (mA)
- $I_L$  : Kilitleme Akımı (mA)  $\Rightarrow I_L > I_H$
- $U_d$  : Delinme Gerilimi
- $\frac{du}{dt} \Big|_{krt}$  : Kritik Gerilim Yükseltme Hızı (V/ $\mu$ s)
- $\frac{di}{dt} \Big|_{krt}$  : Kritik Akım Yükseltme Hızı (A/ $\mu$ s)
- $t_q$  : Sönme Süresi ( $\mu$ s)
- $Q_s$  : Taban Tabakalarında Biriken Elektrik Yüğü ( $\mu$ As)
- $U_{DRM}$  : Max. Periyodik (+) Dayanma Gerilimi  $\Rightarrow U_{DRM} < U_{B0}$
- $U_{RRM}$  : Max. Periyodik (-) Dayanma Gerilimi  $\Rightarrow U_{RRM} < U_d$
- $I_{TAVM}$  : Sürekli Çalışmada Tristörün Max. Ortalama Akımı
- $I_{TEFM}$  : Sürekli Çalışmada Tristörün Max. Efektif Akımı
- $I_{Tmax} \Big|_{t=10\text{ ms}}$  : 10 ms için Tristörün Max. Akımı

$\int i^2 dt$  : Tristörün Max. Sınır Yüğü ( $\mu A^2s$ )

$\theta_{vj}$  : Jonksiyon Sıcaklığı

$\theta_{vjmax}$  : Max. Jonksiyon Sıcaklığı

**NOT** :  $I_{GT} = f(U_{TM}, \theta_{vj})$ ,  $I_{GT}$  : Her türlü şartlar altında tristörü tetikleyebilen değerdir.

## Tristörün İletim ve Kesimde Kilitlenme Özelliği

Kapısına **kısa süreli** ve **yeterli** bir akım sinyali uygulanan tristör tetiklenir ve **iletime** girer. Kısa süreli bir sinyal ile iletime girdiği için tristöre **Tetiklemeli Eleman** da denmektedir. İletimdeki bir tristörün içinden geçen akım **kilitleme akımına** eriştiğinde, tristör **iletimde olarak kilitlenir** ve artık kapı akımı kesilse de iletimde kalır.

İletimde olan bir tristörün içinden geçen akım herhangi bir şekilde **tutma akımının** altına düşerse, tristör otomatik olarak **kesime** girer. Bu andan itibaren en az **sönme süresi** kadar tristör negatif bir gerilimle tutulur veya tekrar bir pozitif gerilim ( $\geq 0,6$  V) uygulanmaz ise, tristör **kesimde olarak kilitlenir** ve artık pozitif gerilim uygulansa da kesimde kalır. Bu nedenle, tristöre **Kilitlemeli Eleman** da denilmektedir.

Tristörde iletime girme işlemi kontrollü olup, kesime girme işlemi kontrolsüzdür. Bu nedenle tristöre **Yarı Kontrollü Eleman** da denilmektedir.

## Tristörün Kendiliğinden İletime Geçme Sebepleri

1. Bir tristörün uçlarındaki gerilimin değeri bu tristörün **sıfır devrilme gerilimi** değerine erişirse, yani

$$u_T \geq U_{B0} \text{ ise,}$$

bu tristör kendiliğinden iletime geçer.

2. Bir tristörün uçlarındaki gerilimin yükselme hızı değeri bu tristörün **kritik gerilim yükselme hızı** değerine erişirse, yani

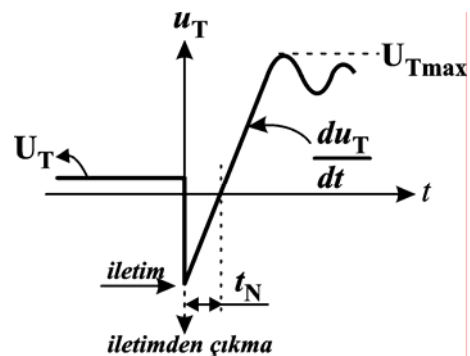
$$\frac{du_T}{dt} \geq \left. \frac{du}{dt} \right|_{krt} \text{ ise,}$$

bu tristör kendiliğinden iletime geçer.

3. Yeni iletimden çıkan bir tristörün negatif gerilimle tutulma süresi bu tristörün **sönme süresinden** küçükse, yani

$$t_N < t_q \text{ ise,}$$

bu tristör **kendiliğinden iletime geçer**.



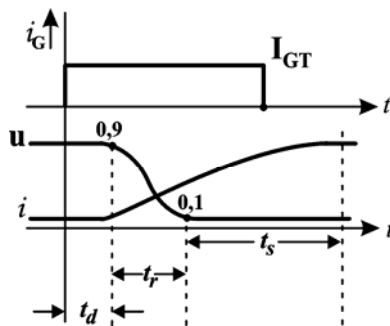


## Tristörün Tahrip Olma Sebepleri

1.  $u_T > U_d$  ise, **çığ devrilme** ve **aşırı güç kaybı** ile **mak. sıcaklık sınırı** aşılar ve tristör bozulur.
2.  $I_{TAV} > I_{TAVM}$  ve  $I_{TEF} > I_{TEFM}$  ise, aşırı güç kaybı ile **mak. sıcaklık sınırı** aşılar ve tristör bozulur.
3.  $\int i_T^2 dt > \int i^2 dt$  ise, aşırı güç kaybı nedeniyle **mak. sıcaklık sınırı** aşılar ve tristör tahrip olur.
4.  $\frac{di_T}{dt} > \frac{di}{dt} \Big|_{krt}$  ise, iletme girmede ilk oluşan dar iletken kanalda **mak. sıcaklık sınırı** aşılar ve tristör bozulur. Buna **sicim olayı** adı verilir.
5.  $\theta_{vj} > \theta_{vjmax}$  ise, aşırı güç kayıplarının sonucu olarak, yarı iletken yapı bozulur.

Bu durumlarda tristör genellikle **iletken** hale gelir veya **kısa devre** olur.

## Tristörün Tetiklenmesi

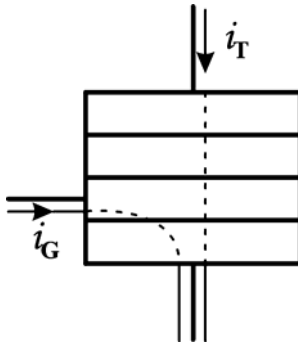


$t_d$  : Gecikme Süresi

$t_r$  : Yükselme Süresi, Açma Süresi

$t_s$  : Yayılma Süresi

$$t_{ON} = t_d + t_r + t_s$$

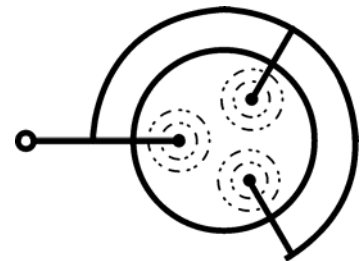


$t_r$  süresi sonunda, kapı akımı civarında ana akımın geçtiği **dar bir kanal** oluşur.  $t_s$  süresi sonunda ise, ısınma etkisi ile akım bütün **jonksiyon yüzeyine yayılır**.  $t_r$  süresi sonunda oluşan kanaldan geçen akım bu kanalın iletkenliğini artırır. İletkenliği artan kanaldan daha çok akım geçer. Bu olay zincirleme bir şekilde sürer ve akım bütün yüzeye yayılır. Fakat, akımın yükselme hızı kritik akım yükselme hızına erişirse, akım bütün yüzeye yayılmadan bu kanalın sıcaklığı max. değere erişir ve bu kanal tahrip olur. Böylece, yarı iletken yapı bozulur ve iletken hale gelir. Bu şekildeki bozulmaya **sicim olayı** denir.

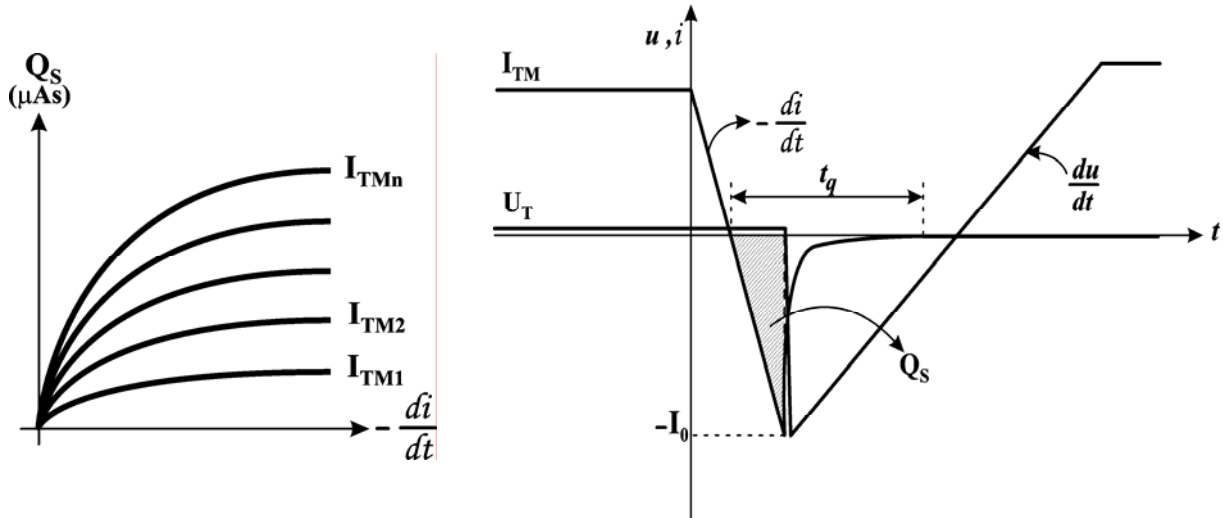
**Sicim Olayı nedeniyle tristörün tahrip olmaması için,**

1.  $\frac{di_T}{dt} \leq \frac{di}{dt} \Big|_{krt}$  olacak şekilde, tristöre bağlanan küçük değerli **bir seri endüktans** ile akım artış hızı sınırlandırılmalıdır.

2. Üretim esnasında, kapı akımının uygulandığı nokta veya **punto sayısı** artırılmalıdır.



## Tristörün Söndürülmesi



$Q_s$  : Taban Tabaklarında Biriken Elektrik Yüğü ( $\mu\text{As}$ )

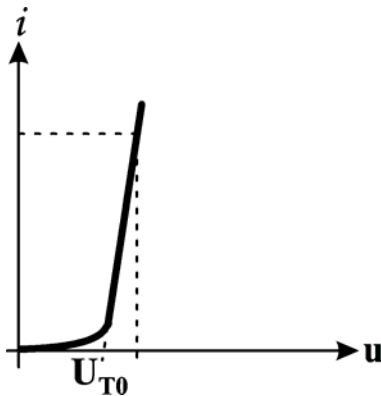
$t_q$  : Sönme Süresi ( $\mu\text{s}$ )

$I_{TM}$  : Sönme Öncesi Tristörden Geçen Akım (A)

$U_T$  : İletim Gerilim Düşümü (V)

$di/dt$  : Sönme Esnasında Tristör Akımının Azalma Hızı (A/ $\mu\text{s}$ )

## Tristör ve Diyodun İletim Gerilim Düşümü



$$u_T = U_{T0} + r_T \cdot i_T$$

$U_{T0}$  : Eşik Gerilimi

$r_T$  : Eşdeğer Direnç ( $\mu\Omega$ -m $\Omega$  mertebelerinde)

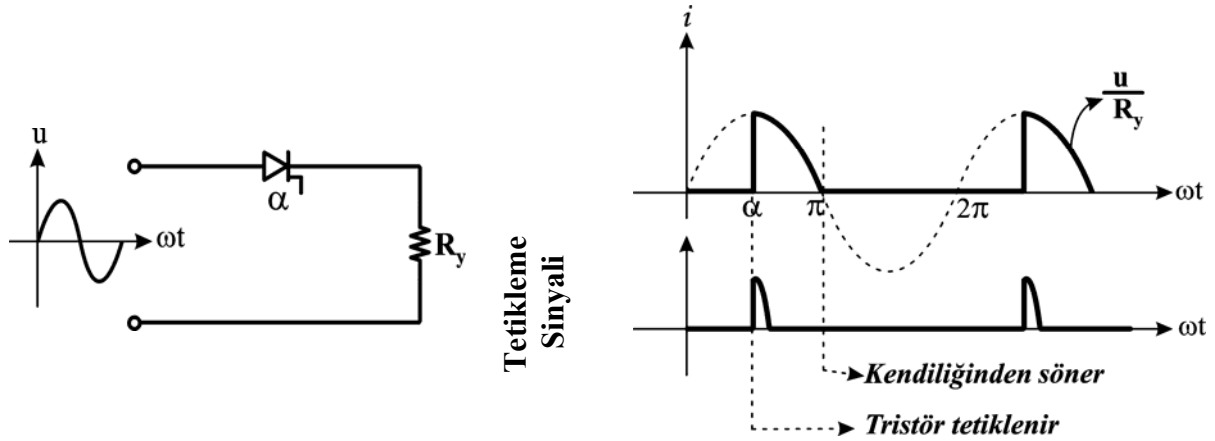
## Tristörün Uygulama Alanları

**Tristör, kontrollü bir diyottur.** Kapısına sürekli ve yeterli bir sinyal verilen tristör, diyoda eşdeğerdir ve diyot gibi davranır. Diyodun da **kontROLSÜZ bir tristör** olduğu söylenebilir. İletimden çıkma olayı ikisinde de aynıdır. **Tristör ve diyotlar**, normal akım ve kısa süreli ani akım değerleri **en yüksek** olan elemanlardır.

Tristörlerin de normal ve hızlı türleri mevcuttur. **Sönme Süresi**, normal tristörlerde birkaç 100  $\mu\text{s}$  civarında, hızlı tristörlerde ise 100  $\mu\text{s}$ 'nin altındadır. **Normal Tristörler**, AC şebekeye bağlı doğrultucular ile AC kıyıcılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. **Hızlı Tristörler ise**, tam kontrollü güç elemanlarının güçleri yetmediğinde, inverter ve DC kıyıcılarda kullanılmaktadır. **Elektrikli taşıma** sistemlerinde kullanılan DC kıyıcılar ile **endüksiyonla ısıtma** sistemlerinde kullanılan inverterler buna örnek gösterilebilir.

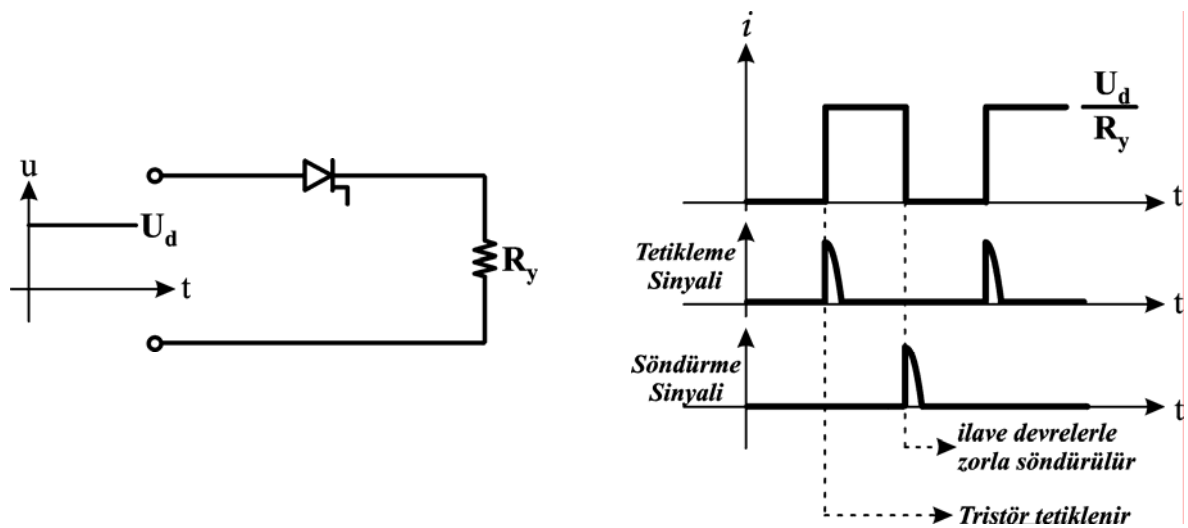
## Tristörlü Örnek Devreler

### 1. Tristörlü bir AC Uygulama



Bu devrede, tristör,  **$\alpha$  anında** kısa süreli bir sinyalle tetiklenir ve iletimde olarak kilitlenir. Tristör içerisinde akım geçtiği sürece iletimde kalır.  **$\pi$  anında** akımın 0 olmasıyla, tristör kendiliğinden **doğal olarak söner** yani kesime girer. Yeni bir pozitif yarım dalgada **yeni bir  $\alpha$  anında** tekrar tetikleninceye kadar tristör kesimde kalır. Sonuç olarak, tristör, pozitif yarım dalgalarda ve  $\alpha$ - $\pi$  aralıklarında iletimde kalır ve sinüsoidal bir akım geçirir.  **$\alpha$  açıları değiştirilerek** yükün gücü ayarlanabilir yani **güç kontrolü** yapılabilir. Bu devre, yarım dalga kontrollü bir doğrultucu olup, **doğal komütasyonlu** bir devredir.

### 2. Tristörlü bir DC Uygulama

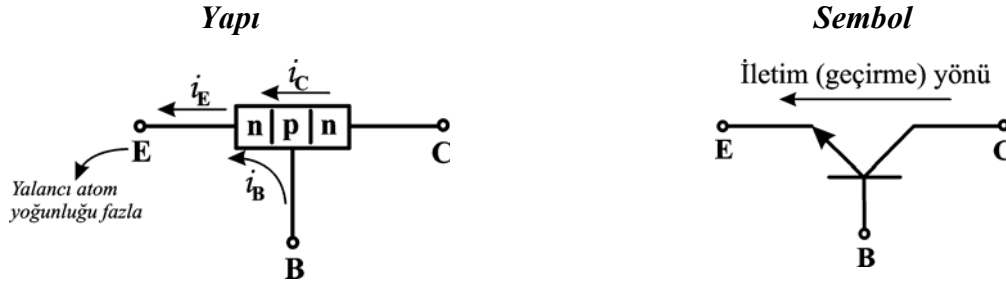


Bu devrede ise, yine **kısa süreli bir sinyal** ile iletme giren tristör, içerisinde geçen akım hiç kesilmeyeceğine göre, doğal olarak hiç iletimden çıkmaz ve sürekli akım geçirir. Ancak, ilave devre ve düzenlerle istenildiği zaman **zorla söndürülebilir**. Tristörün iletimde kalma oranı değiştirilerek güç kontrolü yapılabilir. Bu devre ise, bir DC kıyıcı olup, **zorlamalı komütasyonlu** bir devredir.

## 2. BİPOLAR TRANSİSTÖR ( BJT )

### Yapı, Sembol ve İletim Karakteristiği

#### *npn türü*

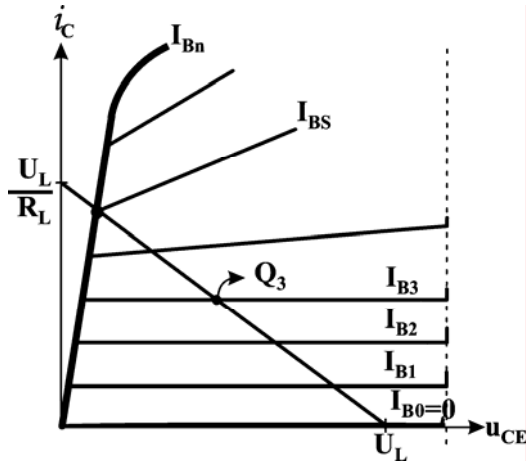


#### *pnp türü*

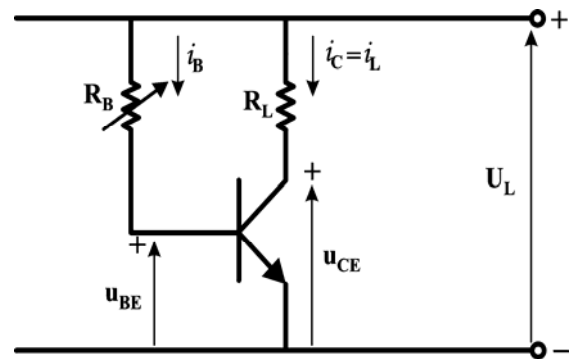


C : Kollektör, E : Emiter, B : Taban

#### *İletim Karakteristiği*



#### *Temel bir Transistör Devresi*



### Temel Özellikler

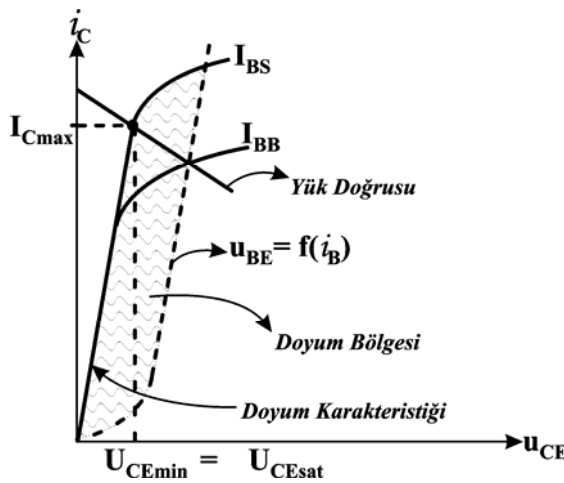
- **Yük** genellikle C ucuna bağlanır. **Taban akımı** daima E-B arasında geçer ve **akımın yönü** p'den n'ye doğrudur. Ana akım ile taban akımı daima **aynı yöndedir**.
- B ile C arasında bir akım geçerek, transistör ters ve istenmeyen **kötü bir iletme** girebilir. Bu durum önlenmelidir.
- Transistörün **çığ devrilmeye** girmesi elemanı tahrip eder.
- Güç devrelerinde transistör **ya tam iletimde** (kalın çizgi üzerinde) **ya da tam kesimde** çalıştırılmalıdır. Buna **Anahtarlama Elemanı** olarak çalışma denilir. Tristörler doğal olarak böyle çalışır.
- Transistörde **giriş olduğu sürece çıkış** vardır. Transistör bir **Tam Kontrollü Elemandır**.
- **Giriş** akım, **çıkış** akımıdır.

- İletim gerilim düşümü veya iletim kaybı **en düşük** olan elemandır.
- Anahtarlama güç kaybı **en yüksek** olan elemandır.
- Alt bölgelerde karakteristikler **paralel ve eşit aralıklıdır**. Bu bölgede sabit kazançla akım yükseltme işlemi yapılabilir. Fakat güç devrelerinde bu yapılamaz.

## Genel Tanımlar

$$\begin{aligned}
 i_C &= \beta_F \cdot i_B \\
 i_E &= i_C + i_B = (1 + \beta_F) i_B \\
 \beta_F &: \text{DC Akım Kazancı}
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{aligned}
 i_C &= \beta_F \cdot i_B \\
 u_R &= R_L \cdot i_C \\
 u_{CE} &= U_L - u_R \\
 u_{CE} &= U_L - R_L \cdot i_C \rightarrow \text{Yük Doğrusu}
 \end{aligned}
 \quad
 \left| \begin{aligned}
 U_{BE} &\cong 0,6 \text{ V} \\
 i_B &= \frac{U_L - u_{BE}}{R_B}
 \end{aligned} \right.$$

## Doyum ve Aşırı Doyum



$i_B = I_{BB}$  ise,  $u_{CE} = u_{BE}$  olur.  
Buna **Sınırdaki Çalışma** denir.

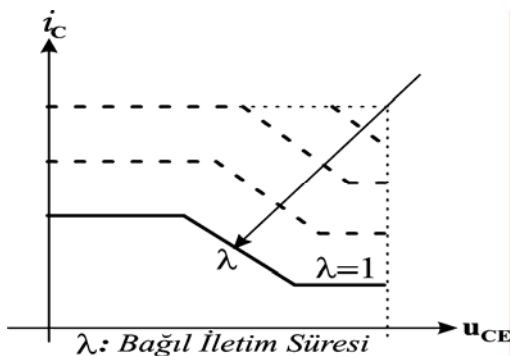
$i_B = I_{BS}$  ise,  $u_{CE} = U_{CEsat}$  ve  $i_C = I_{Cmax}$  olur.  
Buna **Doyumda Çalışma** denir.

$I_{BB} < i_B < I_{BS}$  ise,  $u_{CE} < u_{BE}$  olur.  
Buna **Doyum Bölgesinde Çalışma** denir.

$i_B > I_{BS}$  ise, yine  $u_{CE} = U_{CEsat}$  ve  $i_C = I_{Cmax}$  olur.  
Buna da **Aşırı Doyumda Çalışma** denilir.

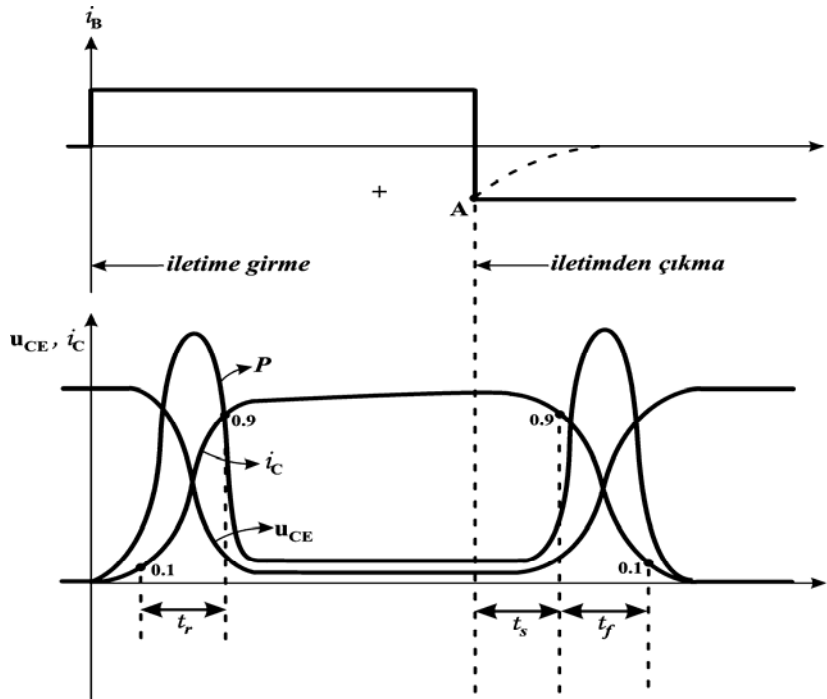
- B-E arası normale göre iç direnci oldukça büyük olan bir **diyot jonksiyonudur**. Doyum karakteristiği ile  $u_{BE}$  karakteristiği arasındaki bölgeye **Doyum Bölgesi** denir.
- Bir transistörün iletimden çıkma süresi,  $i_B$  akımının **doyum fazlası** ile orantılıdır. **Aşırı doyum**, transistörün hızını düşürür ve anahtarlama kayıplarını arttırır. Aynı zamanda, B-C jonksiyonundan akım geçirerek ilave kayıplara sebep olabilir.

## Emniyetli Çalışma Alanı (SOA)



Bir transistörün aynı anda hangi akım ve gerilim değerlerinde kullanılabileceği, **Emniyetli Çalışma Alanı (SOA)** ile verilir. Bir transistörde, nominal akım ve gerilim değerleri, aynı anda kullanılabilecek değerler değildir. Tristörlerde nominal değerler aynı anda kullanılabilir. Tristörlerde SOA alanı gibi bir sınırlama mevcut değildir.

## İletime ve Kesime Girme



$t_r$  : Yükselme Süresi  
 $t_s$  : Yayılma Süresi  
 $t_f$  : Düşme Süresi

$$t_{ON} \cong t_r$$

$$t_{OFF} \cong t_s + t_f$$

$$t_{SW} = t_{ON} + t_{OFF}$$

$$\cong t_r + t_s + t_f$$

- Anahtarlama esnasındaki ani güç kaybı çok yüksektir. Bir yarı iletkenin toplam güç kaybı, anahtarlama ve iletim güç kayıplarının toplamına eşittir. Düşük frekanslarda **iletim güç kaybı**, yüksek frekanslarda ise **anahtarlama güç kaybı** daha etkilidir.
- Transistörler, **orta güç ve orta frekanslarda** en yaygın olarak kullanılan en ucuz yarı iletken güç elemanlarıdır.

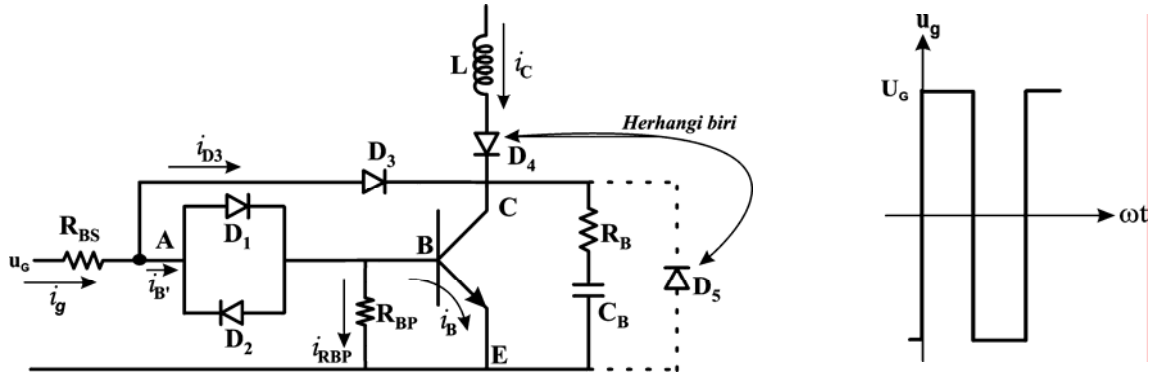
## Transistörün Uygulama Alanları

Transistörler, normal olarak, orta güç ve frekanslarda, zorlamalı komütasyonlu olan **inverter** ve **DC kıyıcı** devrelerinde kullanılmaktadır. Ancak, uygulama alanları gittikçe azalmaktadır.

## Transistörün Sürülmesinde Önemli Olan Hususlar

- İletime girme ve çıkma **SOA alanı** içinde olmalıdır.
- Sürekli çalışmada  **$I_{Cmax}$  değeri** aşılmamalıdır.
- İletime girerken  **$di_c / dt$**  ve iletimden çıkarken  **$du_{CE} / dt$  değerleri** sınırlanmalıdır. Bu, kayıp güçleri azaltır.
- İletime sürme ve iletimden çıkarma sinyali **ani akım darbeleri** olmalı, sürekli sürme akımı ise ana akımla tam **uyum içinde** olmalıdır. **Aşırı doyum** önlenmelidir. Bu, elemanı hızlandırır ve kayıpları azaltır.
- B-E uçları (eleman girişi) uygun **bir direnç ile köprülenmelidir**. Bu, kaçak, sızıntı ve deplasman akımlarına karşı elemanı korur, kayıpları azaltır.
- **Ters gerilim** uygulanmamalıdır. Güç transistörünün ters gerilim tutma özelliği yoktur. Normal olarak -30 V civarındadır. **Girişi dirençle köprülenmiş** bir transistör negatif gerilim tutma özelliğini tamamen kaybeder.
- Eleman **elektronik olarak** korunmalıdır.

## Genel bir Sürme Devresi ve Aşırı Doyumun Önlenmesi



**L** : İletime girerken  $di_c/dt$ 'yi sınırlar.

**R<sub>B</sub> ve C<sub>B</sub>** : Her yarı iletkenine paralel olarak konulması gereken ( R-C ) elemanıdır. İletimden çıkarken  $du_{CE}/dt$  ve  $U_{CEmax}$ 'ı sınırlar.

**R<sub>BS</sub>** : Giriş akımını sınırlar. Gerilim sinyalini akım sinyaline dönüştürür.

**R<sub>BP</sub>** : Sızıntı ve deplasman akımına karşı koruma görevi yapar.

**D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> ve D<sub>3</sub>** : Aşırı doyumu önler, transistörün belirli bir gerilim düşümü ile çalışmasını sağlar.

**D<sub>4</sub> veya D<sub>5</sub>** : Transistörü ters akım ve gerilimlere karşı korur.

### İletime girme esnasında

D<sub>3</sub> diyodu kesimdedir.

$U_{CE}$  : Çok yüksek veya  $U_A$ 'dan büyüktür.

$U_A = 2 U_D$

$U_D$  : Bir diyottaki gerilim düşümü.

$U_D \cong 0,6 V$

$U_{BE} \cong U_D$

$I_{D3} = 0$

$$i_g = \frac{U_g - U_A}{R_{BS}}$$

$$i_g = i_B' = i_{RBP} + i_B$$

$$i_{RBP} = \frac{U_{BE}}{R_{BP}}$$

$$i_{RBP} \ll i_B \text{ olmalıdır. } i_B \cong i_g \text{ olur.}$$

### İletim durumunda

D<sub>3</sub> diyodu daima iletimde olmalıdır.

$$i_g = i_B + i_{D3}$$

$$i_{D3} = i_g - i_B$$

$$i_B' = i_{RBP} + i_B$$

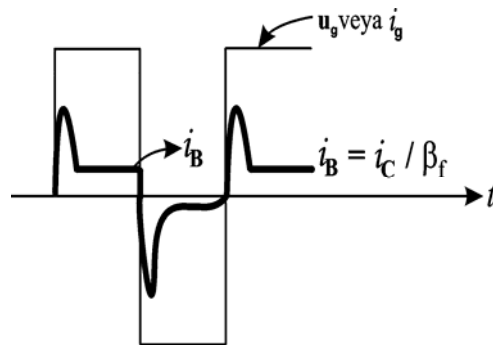
$$i_{RBP} = U_{BE} / R_{BP}$$

$$i_B = i_c / \beta_f$$

$$U_{D1} + U_{BE} = U_{D3} + U_{CE}$$

$$U_{D1} = U_{D3} = U_D$$

$$\Rightarrow U_{CE} = U_{BE} \cong U_D$$



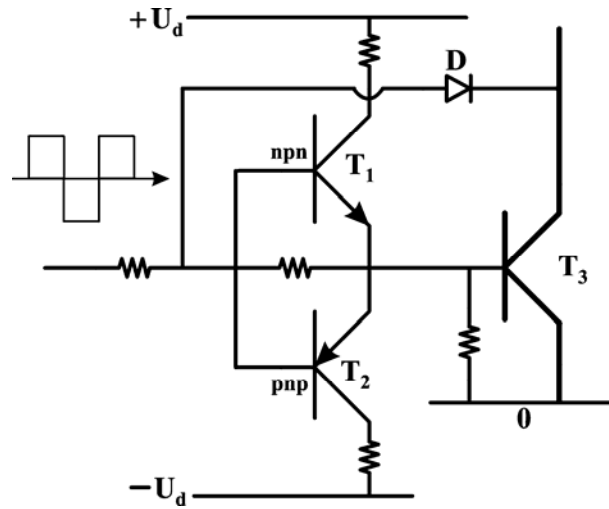
### İletimden çıkma esnasında

$$i_g = i_B' = i_{BP} + i_B$$

$$I_{D3} = 0, D_3 \text{ kesimde.}$$

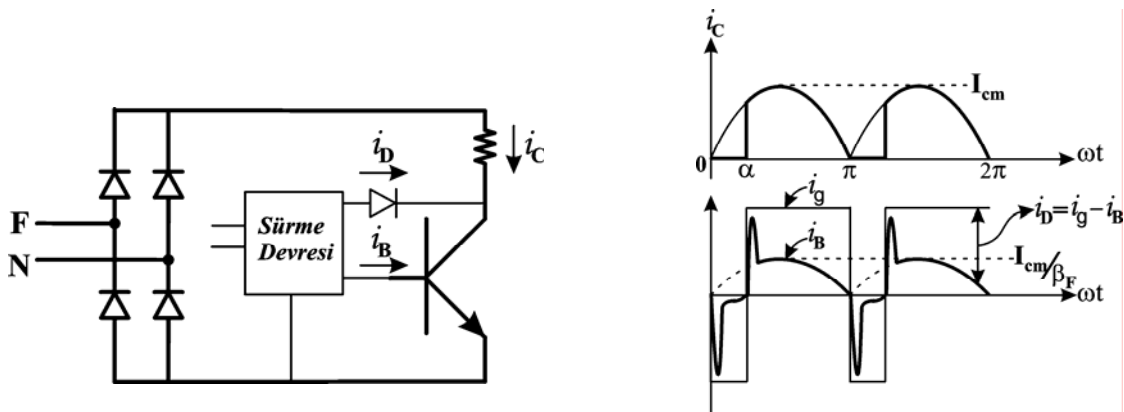
Transistörde E'den B'ye doğru kararlı rejimde bir akım geçmez. Sadece transistör iletimden çıkıncaya kadar E'den B'ye doğru bir akım geçer. Bu akım, kesime girmeyi büyük ölçüde hızlandırır. Transistör kesime girdiğinde ters  $i_B$  akımını kendiliğinden sıfırlanır.

## Yükseltmeli bir Sürme Devresi



**Ters-paralel bağlı iki elamandan** birisinin iletimde olması, diğerinin kesimde olmasını garanti eder. Burada transistörlerin tabanları ters-paralel bağlı olduğundan, iki transistörün birlikte iletimde olması mümkün değildir. Herhangi birisinin tabanına bir akım uygulandığında, diğerinin tabanında 0.6 V kadar bir negatif gerilim oluşur, bu transistör iletime giremez ve eğer iletimde ise hızlı bir şekilde kesime girer. **Bu mükemmel bir kilitlemedir.** Yaklaşık 1 kHz'nin üzerindeki **orta ve yüksek frekanslarda** giriş sinyali ve sürme kaynağı **iki yönlü** veya **çift kutuplu** olmalıdır.

## Transistörlü Örnek bir Devre



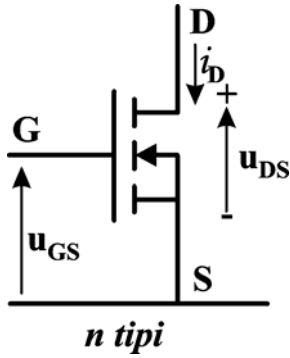
**Bu devrede**, bir diyot köprüsü ile doğrultulan tek fazlı **sinüsoidal şebeke gerilimi**, transistör yardımı ile belli açılarda kısılmaktadır. Transistör, bütün yarım dalgalarda ve  $\alpha$ - $\pi$  aralıklarında iletimde kalır ve sinüsoidal bir akım geçirir.  $\alpha$  açıları değiştirilerek yükün gücü ayarlanabilir yani **güç kontrolü** yapılabilir. Transistör girişine  $\alpha$ - $\pi$  aralıklarında yeterli bir pozitif ve bunların dışındaki aralıklarda yeterli bir negatif akım uygulanır. **Aşırı doyum koruması** olduğundan, transistör tabanı **ihtiyacı olan akımı** çeker ve **gelen akımın fazlası** diyot üzerinden geçer. Transistör girişine verilen akım, en kötü halde bile yeterli değerde olmalıdır. Bu devre, tam dalga kontrollü bir doğrultucu olup, aslında **doğal komütasyonlu** bir devredir.



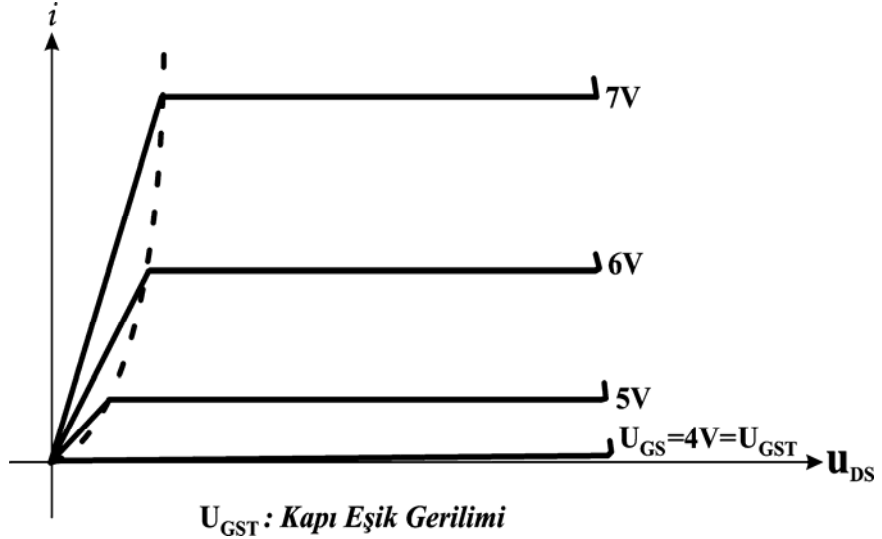
### 3. İZOLE KAPILI ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR (IGFET, MOSFET)

#### Yapı, Sembol ve İletim Karakteristiği

*Sembol*

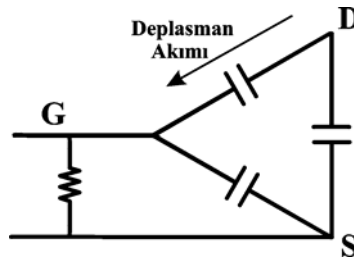


*İletim Karakteristiği*



#### Genel Özellikler

- MOSFET **daima doyumda** kullanılmalıdır.
- Giriş olduğu sürece çıkış vardır.
- **Giriş** gerilim, **çıkış** akımdır.
- **Kazanç** sonsuz kabul edilir.
- **En hızlı** yarı iletken elemandır. İletime giriş 50-60 ns ve iletimden çıkış 150-200 ns civarındadır. Anahtarlama kaybı **en düşük** olan elemandır.
- İletim gerilim düşümü veya iletim güç kaybı **en yüksek** olan elemandır.
- Tek dezavantajı, sıcaklıkla artan yüksek değerli bir **iç dirence** sahip olmasıdır.
- Düşük güç ve yüksek frekanslarda kullanılır.
- **Giriş akımı** nanoamperler mertebesinde. Ancak, gerilim sinyali ilk verildiğinde yüksek değerli bir şarj akımı çeker. Bu akımın karşılanmasına dikkat edilmelidir. Aksi halde hız düşer.
- **Kapı dayanma gerilimi**  $\pm 20$  V'tur. Gerçekte, uygulanan gerilim  $\pm 18$  V'u geçmemelidir. Uygulamalarda, genellikle sürme gerilimi olarak  $\pm 15$  V kullanılmaktadır.



## MOSFET'lerin Uygulama Alanları

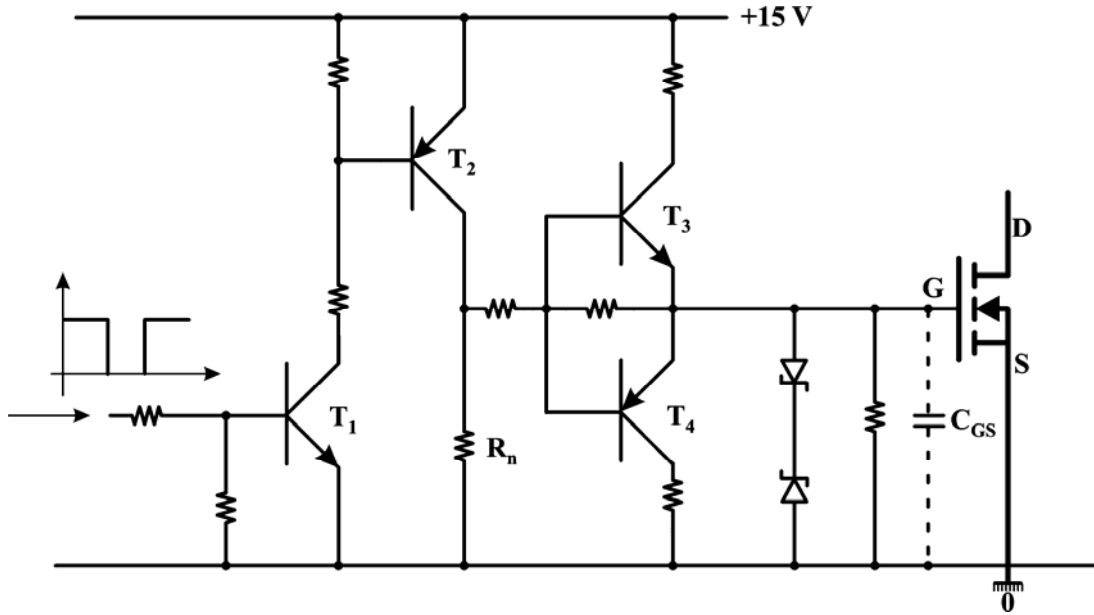
MOSFET'ler, normal olarak, düşük güç ve yüksek frekanslarda, zorlamalı komütasyonlu olan **inverter** ve **DC kıyıcı** devrelerinde kullanılmaktadır.

Bu elemanlarda fiyat gerilime çok bağlıdır. Düşük gerilimli MOSFET'lerin fiyatları oldukça düşük olduğundan, **düşük gerilimli uygulamalarda** MOSFET'ler yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna örnek olarak, düşük gerilimli akümülatör-inverter grubuna sahip olan kesintisiz güç kaynakları ile düşük gerilimli DC kıyıcı devresine sahip olan anahtarlamalı güç kaynakları gösterilebilir.

Ayrıca, MOSFET'ler çalışma frekansı en yüksek olan elemanlardır. **Yüksek frekans ve düşük güçlü uygulamalarda** da MOSFET'ler yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna örnek olarak, düşük güçlü kesintisiz ve anahtarlamalı güç kaynakları ile endüksiyonla ısıtma ve elektronik balastlar gösterilebilir.

Ancak, BJT ve MOSFET'lerin uygulama alanları sürekli olarak daralmakta, bunların yerini hız ve güçleri sürekli olarak gelişen **IGBT elemanları** almaktadır.

## Örnek bir MOSFET Sürme Devresi

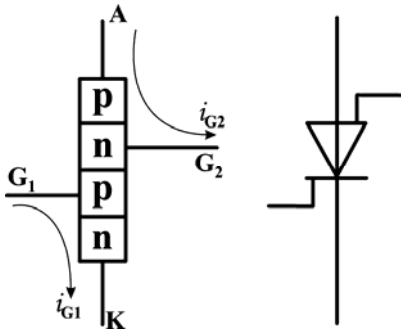


**MOSFET ve IGBT elemanlarının sürülmesinde**, iki yönlü veya çift kutuplu giriş sinyali ve iki yönlü sürme kaynağına gerek yoktur. **BJT elemanlarının sürülmesinde ise**, yaklaşık olarak 1 kHz'nin altındaki düşük frekanslarda **iki yönlü giriş sinyali** ve **iki yönlü sürme kaynağına** gerek yoktur. Bu şartlar altında, bütün bu elemanların sürülmesinde burada verilen devre kullanılabilir. Ancak, BJT için zenerlere gerek yoktur. MOSFET ve IGBT için ise zenerler her zaman gereklidir.

**Bu sürme devresinde**, giriş sinyali uygulandığında, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> ve T<sub>3</sub> ardışık olarak iletme girer ve G ucu +15 V'a çekilir. Giriş sinyali kesildiğinde, R<sub>n</sub> ile gösterilen direnç üzerinden T<sub>4</sub> iletme girerek G ucunu 0'a çeker, yani MOSFET'in parasitik giriş kondansatörü C<sub>GS</sub>'i deşarj eder. Hızlı transistörler seçildiğinde, **sürme devresi oldukça hızlı ve emniyetlidir**.

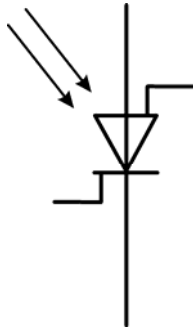
### 3. DİĞER YARI İLETKEN GÜÇ ELEMANLARI

#### TRİSTÖR TETROT



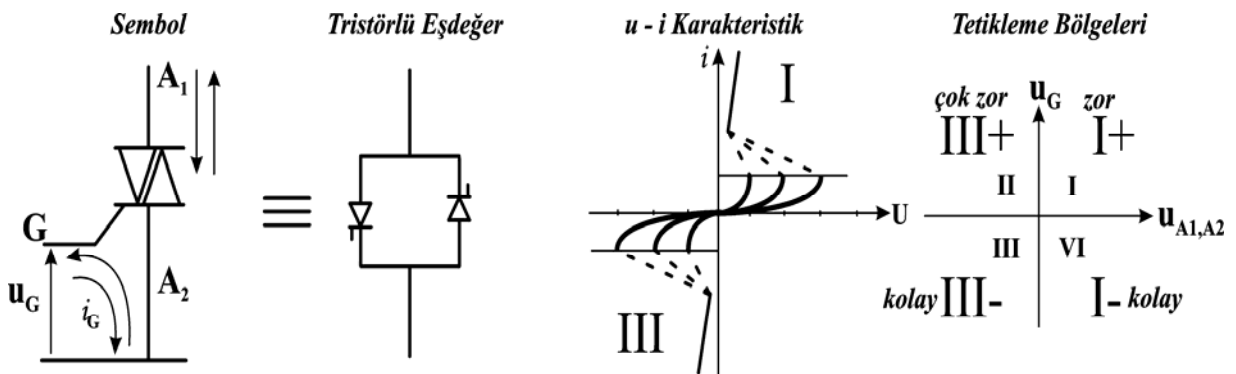
4 uçlu **özel bir tristördür**. Her iki kapıdan da tetiklenebilir. Tetiklemede,  $i_{G1}$  ve  $i_{G2}$  akımları ayrı ayrı kullanılabilir.

#### FOTO TRİSTÖR



Normal ortamda gözle görülen **ışıkla iletme giren** iki, üç veya dört uçlu **özel bir tristördür**. Işıklı veya bir kapı akımıyla kontrol edilebilir.

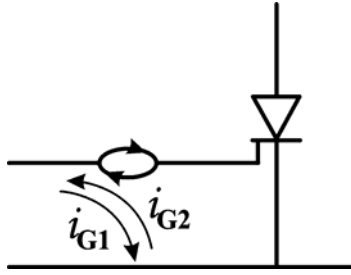
#### TRİYAK (İKİ YÖNLÜ TRİSTÖR TRİYOT)



Triyak ters-paralel bağlı iki tristöre eşdeğerdir. İki yönlü tristör de denir. **Tetikleme** ve **montaj** kolaylığı sağlar. **Sadece AC uygulamalarda** kullanılmak üzere üretilmektedir. AC kırıyıcılarda **gücün yettiği yere kadar** bir triyak kullanılır. Aksi halde tristörlere geçilir. Yaklaşık 100-150 A'lere kadar triyaklar üretilmektedir.

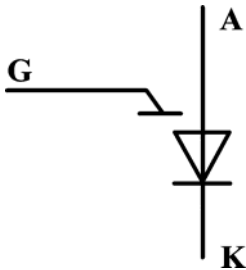
Triyak I- ve III- belgelerinde düşük akımlarla **kolay** tetiklenir. III+ belgesinde tetikleme **çok zor** veya imkansızdır. Uygulamalarda, I+ ve III- bölgelerinde **çalışma kolaydır**.

## KAPI SÖNÜMLÜ TRİSTÖR (GTO)



- Kısa süreli  $i_{G1}$  ile tetiklenir ve  $i_{G2}$  ile söndürülür.
- $i_{G1}$  **çok küçük** değerlerdedir (normal trisitorlerdeki gibi).
- $i_{G2}$  **çok büyük** değerlerdedir (  $\frac{1}{4}$  ana akım kadar).
- Hızlı **özel bir trisitor**dür.
- Düşük frekans ve yüksek güçlerde kullanılır.
- Söndürme sinyalinin büyüklüğünden dolayı tetikleme devreleri karmaşık ve pahalıdır.

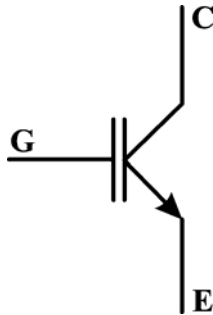
## MOS KONTROLLÜ TRİSTÖR (MCT)



MOSFET ve trisitor karışımı, oldukça hızlı, gerilim kontrollü, **karma** bir elemandır. **MOSFET'in ideal sürme özelliği ile trisitorün ideal iletim karakteristiğini birlikte taşır.** Negatif gerilim sinyali ile tetiklenir. Pozitif gerilim sinyali ile söner. Yine iletimde ve kesimde kilitlenme özelliği vardır. Şu anda **en üstün eleman** görünümündedir. Fakat henüz gelişimi tamamlanamamıştır. Halen ticari olarak üretilmemektedir.

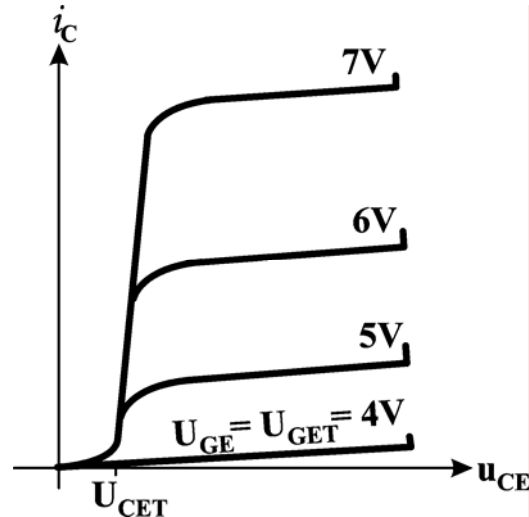
## İZOLE KAPILI BİPOLAR TRANSİSTÖR (IGBT)

*Sembol*



$U_{CET}$  : Çıkış Eşik Gerilimi  
 $U_{GET}$  : Kapı Eşik Gerilimi  
 Genellikle,  $U_{CET} > 2 \text{ V}$  ve  
 $U_{GET} : 4 \text{ V}$  civarındadır.

*u-i karakteristiği*



**MOSFET'in MOS kontrolü ve BJT'nin ana akım karakteristiğini birlikte taşıyan karma bir elemandır.** Tek dezavantajı **çıkış eşik geriliminin** oluşudur. Ancak **iç direnci çok küçük** olduğundan, yüksek akımlarda yine avantajlı duruma geçer. Günümüzde IGBT ortanın biraz üzerindeki güç ve frekanslarda, **en yaygın olarak kullanılan elemanlardır.**

## 4. GÜÇ ELEMANLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

TEMEL Yİ GÜÇ ELEMANLARININ İYİDEN KÖTÜYE DOĞRU SIRALAMASI				
Sürme Kolaylığı	MOSFET	IGBT	GTO	BJT
Sönme Kolaylığı	MOSFET	IGBT	BJT	GTO
İletim Gerilim Düşümü	BJT (1.0 V)	GTO (2.0 V)	IGBT (3.0 V)	MOSFET (5.0V)
Anahtarlama Güç Kaybı	MOSFET	IGBT	GTO	BJT
Akım Dayanımı	GTO (3000 A)	IGBT (800 A)	BJT (600 A)	MOSFET (100 A)
Gerilim Dayanımı	GTO (3000 V)	IGBT (1500 V)	BJT (1200 V)	MOSFET (1000 V)
Devre Gücü	GTO (10 MW)	IGBT (500 kW)	BJT (100 kW)	MOSFET (10 kW)
Çalışma Frekansı	MOSFET (100 kHz)	IGBT (20 kHz)	BJT (10 kHz)	GTO (1 kHz)
Fiyat	BJT	GTO	IGBT	MOSFET
<b>Not : 1.</b> Güç BJT'leri genellikle Darlington yapıda ve npn türündedir. <b>2.</b> Burada GTO tristör ailesini temsil etmektedir.				

## ***KONU İLE İLGİLİ ÇÖZÜLMÜŞ PROBLEMLER***

### **Problem 1**

Bir tristör  $u_T = 1000 \sin 62800 t$  (V) şeklinde bir gerilime maruz kalacaktır. Bu tristörün, kendiliğinden iletme geçmemesi için,

- a)  $U_{B0}$  değeri ne olmalıdır?  
 b)  $\frac{du}{dt} \big|_{krt}$  değeri ne olmalıdır ?

### **Çözüm**

- a)  $U_{Tmax} < U_{B0}$  olmalıdır.  
 $\Rightarrow U_{B0} > U_{Tmax} = 1000 \text{ V}$

- b)  $\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{max} < \frac{du}{dt} \big|_{krt}$  olmalıdır.

$$u_T = U_{Tmax} \sin \omega t$$

$$\frac{du_T}{dt} = \omega U_{Tmax} \cos \omega t$$

$$\left(\frac{du_T}{dt}\right)_{max} = \omega U_{Tmax}$$

$$= 62800 \cdot 1000 \text{ V/s}$$

$$= 62.8 \text{ V}/\mu\text{s}$$

$$\Rightarrow \frac{du}{dt} \big|_{krt} > 62,8 \text{ V}/\mu\text{s} \text{ olmalıdır.}$$

### **Problem 2**

Kritik gerilim yükselme hızı  $125 \text{ V} / \mu\text{s}$  olan bir tristöre, genliği  $2000 \text{ V}$  olan bir sinüsoidal gerilim uygulanmaktadır. Frekans gittikçe yükseltirise, bu frekans hangi değere ulaştığında tristör kendiliğinden iletme geçer?

### **Çözüm**

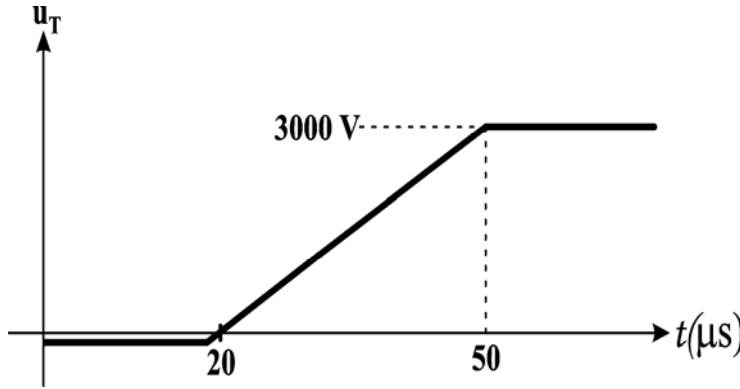
$$\frac{du_T}{dt} \big|_{max} = \frac{du}{dt} \big|_{krt}$$

$$u_T = U_m \sin \omega t$$

$$\frac{du_T}{dt} = U_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t$$

$$\frac{du_T}{dt} \big|_{max} = U_m \cdot \omega$$

$$125 \cdot 10^6 \text{ V/s} = 2000 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \Rightarrow f \cong 10 \text{ kHz} \text{ bulunur.}$$

**Problem 3**

$t=0$  anında yeni iletimden çıkan ve şekildeki gibi bir gerilime maruz kalan bir tristörün kendiliğinden iletime geçmemesi için, bu tristörün,

$U_{B0}$ ,  $\frac{du}{dt} \big|_{krt}$  ve  $t_q$  değerleri ne olmalıdır?

**Çözüm**

$$U_{B0} > U_{Tmax}$$

Şekilden,

$$U_{B0} > 3000 \text{ V olmalıdır.}$$

$$t_q \leq t_N$$

Şekilden,

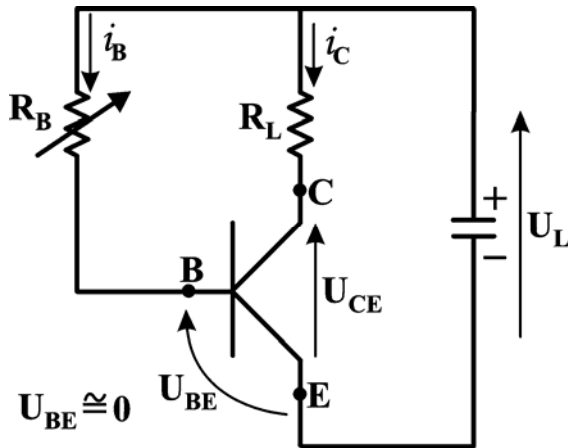
$$t_q \leq 20 \mu s \text{ olmalıdır.}$$

$$20 \mu s \leq t \leq 50 \mu s \text{ için, } u_T = \frac{3000}{30} (t - 20)$$

$$\frac{du}{dt} \big|_{krt} > \left( \frac{du_T}{dt} \right) \big|_{max}, \quad \frac{du}{dt} \big|_{krt} > 100 \text{ V} / \mu s \text{ olmalıdır.}$$

**Problem 4**

10  $\Omega$ 'luk bir yükü 50 V'luk bir DC kaynak ile beslemek üzere, şekilde verilen bir npn tipi transistörün emiter montajı kullanılmıştır. Transistörün akım kazancı 200 olduğuna göre,



- Taban devresi direnci 5 k $\Omega$  iken, yük akımı ve gerilimi ne olur ?
- Yükte harcanan gücün 160 W olabilmesi için, taban devresi direnci kaç k $\Omega$ ' a ayarlanmalıdır ?

**Çözüm**

a)  $I_C = I_L$   

$$I_B = \frac{U_L - U_{BE}}{R_B} = \frac{50 - 0}{5 \cdot 10^{-3}}$$

$$I_B = 10 \text{ mA}$$

$$I_C = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 200 = 2 \text{ A} = I_L$$

$$U_Y = R_L \cdot I_L = 10 \cdot 2 = 20 \text{ V}$$

b)  $P_L = 160 \text{ W}$   

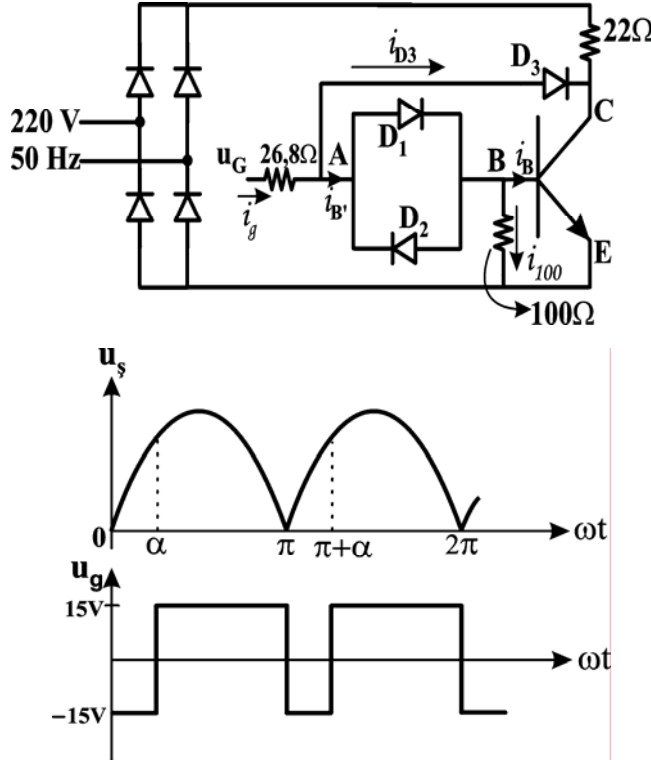
$$P_L = R_L \cdot I_L^2 \Rightarrow 160 = 10 \cdot I_L^2 \Rightarrow I_L = 4 \text{ A} = I_C$$

$$I_B = 4 / 200 \Rightarrow I_B = 20 \text{ mA}$$

$$R_B = \frac{U_L - U_{BE}}{I_B} = \frac{50 - 0}{20 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_B = 2,5 \text{ k}\Omega \text{ bulunur.}$$

### Problem 5



Şekildeki devrede,

- İletime geçme esnasında ani taban akımı değerini hesaplayınız ( $i_{D3}=0$ ).
- İletim durumunda, transistörün gerilim düşümü ile taban akımını ve  $D_3$  diyodunun akımını bulunuz.
- İletimden çıkma esnasında, ters taban akımının ani değerini bulunuz.
- Taban akımı değişimini yaklaşık olarak çiziniz.

$$U_{D1,2,3} \cong 0,6 \text{ V}$$

$$U_{BE} = 1 \text{ V}$$

$$\beta_{dc} = 100$$

$$U_{EB} \cong -1 \text{ V}$$

### Çözüm

a) İletime geçme esnasında,  $i_B = ?$   

$$i_{D3} = 0,$$

$$i_g = i_B' = i_{100} + i_B$$

$$U_B = U_{BE}$$

$$U_A = U_{D1} + U_B$$

$$= 0,6 + 1$$

$$= 1,6 \text{ V}$$

$$i_g = i_B' = \frac{U_g - U_A}{26,8} = \frac{15 - 1,6}{26,8} = 500 \text{ mA}$$

$$i_{100} = U_B / 100 = 1 / 100 = 10 \text{ mA}$$

$$i_B = i_B' - i_{100} = 500 - 10 = 490 \text{ mA bulunur.}$$

b) İletim durumunda,  $U_{CE}$ ,  $i_B$ ,  $i_{D3} = ?$

*İletimden çıkmada :*



$$i_C = u_S / 22$$

$$i_C = \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \sin \omega t / 22$$

$$i_C = 10\sqrt{2} \cdot \sin \omega t \text{ A}$$

$$i_B = \frac{i_C}{\beta_{dc}} = \frac{10\sqrt{2}\sin \omega t}{100} = 100\sqrt{2} \sin \omega t \text{ (mA)}$$

$$i_{100} = 10 \text{ mA}$$

$$i_B' = \sqrt{2} \cdot 100 \cdot \sin \omega t + 10 \text{ (mA)}$$

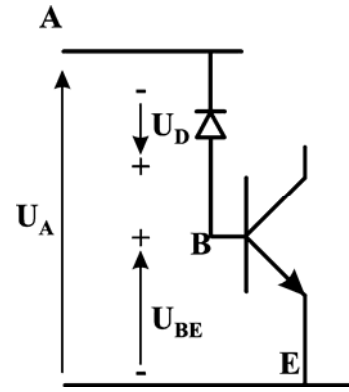
$$i_g = 500 \text{ mA}$$

$$i_{D3} = i_g - i_B' = 490 - \sqrt{2} \cdot 100 \cdot \sin \omega t \text{ (mA)}$$

bulunur.

$$U_{D1} + U_{BE} = U_{D3} + U_{CE}$$

$$U_{CE} = 1 \text{ V bulunur.}$$



c) İletimden çıkma esnasında,  $i_B = ?$

$$U_B = U_{BE} = 1 \text{ V}$$

$$U_A = -U_{D2} + U_{BE}$$

$$= -0,6 + 1$$

$$= 0,4 \text{ V}$$

$$i_g = \frac{U_g - U_A}{26,8} = \frac{-15 - 0,4}{26,8} = -575 \text{ mA}$$

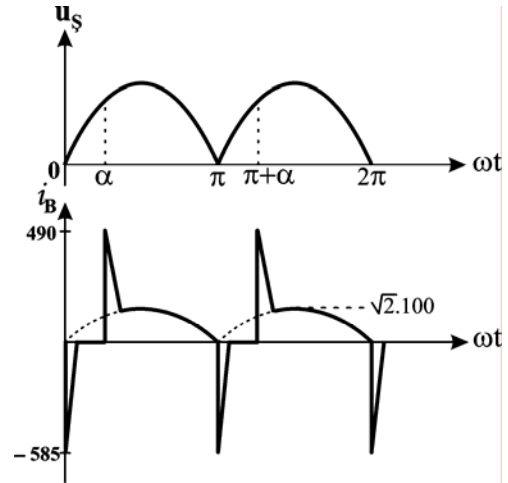
$$i_{100} = \frac{U_{BE}}{100} = 10 \text{ mA}$$

$$i_g = i_B' = -i_{100} + i_B$$

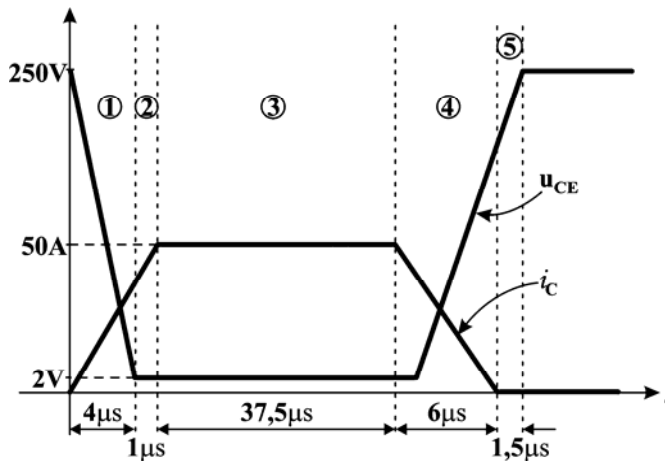
$$i_B = i_g + i_{100} = 575 + 19$$

$$i_B = 585 \text{ mA bulunur.}$$

d)



## Problem 6



Peryodik bir çalışmada, kesim dışındaki çalışma durumları için, bir transistörün uçlarındaki gerilim ve içinden geçen akımın değişimleri şekilde verilmiştir. Bu transistör  $f_P = 10 \text{ kHz}$  'lık bir frekansta anahtarlandığına göre,

- Transistörün verilen her bir aralıktaki enerji kaybını hesaplayınız.
- Transistörün toplam enerji ve güç kaybını hesaplayınız.

**Çözüm**

1. bölge için,

$$u_1 = -\left(\frac{250-2}{4 \cdot 10^{-6}}\right)t + 250 = 250 - 62 \cdot 10^6 t \text{ V}$$

$$i_1 = \left(\frac{50}{5 \cdot 10^{-6}}\right)t = 10 \cdot 10^6 t \text{ A}$$

$$W_1 = \int_0^{4\mu s} (250 - 62 \cdot 10^{-6} t) 10 \cdot 10^6 t dt = 6,6773 \text{ mj}$$

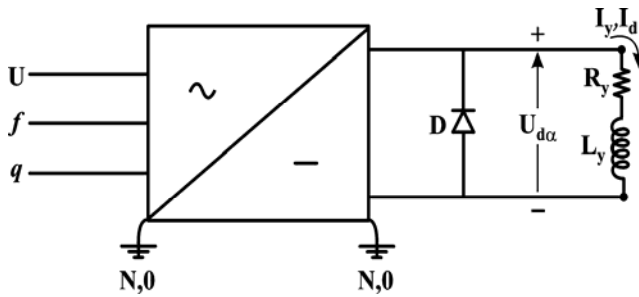
$$\dots$$

$$P_T = 206,13 \text{ W}$$

## 5. AC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER / DOĞRULTUCULAR

### GİRİŞ

#### AC-DC Dönüştürücülerin Genel Özellikleri



$U$  : AC girişteki efektif faz gerilimi

$f$  : Frekans

$q$  : Faz sayısı

$I_d, I_y$  : DC çıkış veya yük akımı (ortalama değer)

$U_{d\alpha}$  : DC çıkış gerilimi,  $U_{d\alpha} = f(\alpha)$

$U_d$  : Maksimum DC çıkış gerilimi,

$\alpha = 0 \Rightarrow U_{d\alpha} = U_d$

$\alpha$  : Faz Kesme veya Faz Kontrol açısı

: Gecikme Açısı veya Tetikleme Gecikmesi

$D$  : Serbest Geçiş (Komütasyon, Söndürme) diyodu

$U_1 = U_2 = U_3 = U_f$  : Efektif Faz Gerilimi

$U_{12} = U_{21} = U_{13} = U_h$  : Efektif Fazlar Arası Gerilim

$U_{fm}$  : Faz Gerilimi Maksimum Değeri

$U_{hm}$  : Hat (Fazlar Arası) Gerilimi Maksimum Değeri

Endüstride **en eski** ve **en yaygın** olarak kullanılan dönüştürücü türüdür.

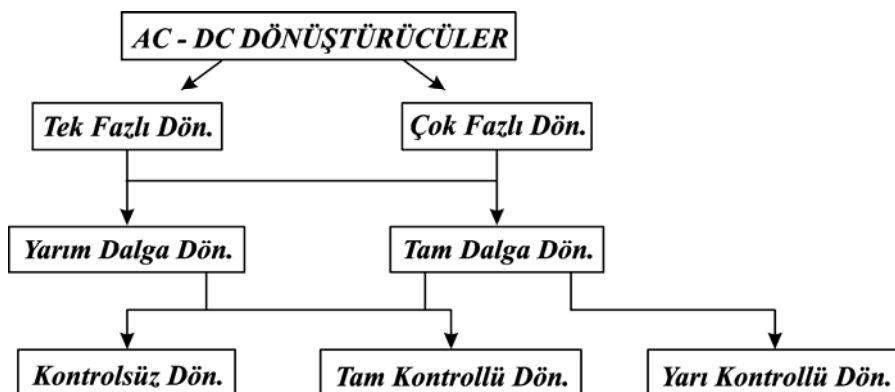
#### Temel Özellikleri

- Kontrol lineer değildir.
- **Faz Kontrol Yöntemi** ile kontrol sağlanır.
- Çıkış gerilimi **ortalama** olarak kontrol edilir.
- Şebeke tarafında yüksek değerli **harmonikler**, yük tarafında yüksek değerli **dalgalandırmalar** oluşur.
- **Doğal komütasyonludur.**
- Diyot ve/veya tristörler ile gerçekleştirilir.

#### Başlıca Uygulama Alanları

- DC motor kontrolü
- Akümülatör şarjı
- Galvanoteknikle kaplama
- DC motor alan besleme
- DC kaynak makineleri
- DC regülatörler
- DC gerilim kaynakları

#### AC-DC Dönüştürücülerin Genel Olarak Sınıflandırılması



## AC-DC Dönüştürücülerin Kontrol Açısından Karşılaştırılması

### KontROLSÜZ Doğrultucu

- Diyotlarla gerçekleştirilir
- Sadece **doğrultucu modunda** çalışır.
- Genellikle serbest geçiş diyodu yoktur.
- $\alpha = 0$   
 $U_{d\alpha} = U_d = \text{Sabit}$

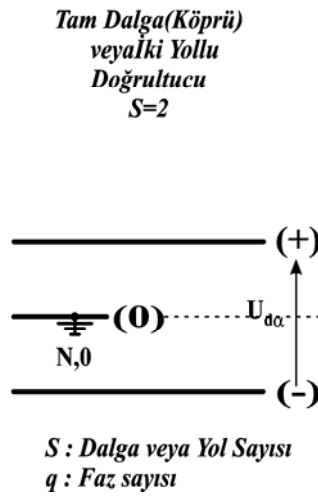
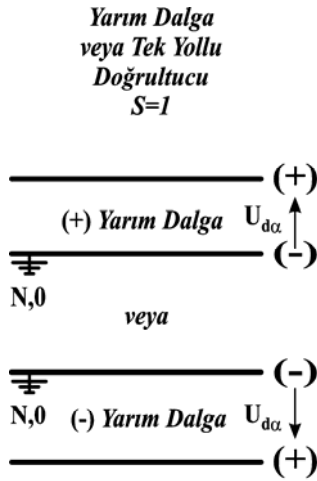
### Tam Kontrollü Dönüştürücü

- Tristörlerle gerçekleştirilir.
- Hem doğrultucu hem de **inverter modunda** çalışır.
- Serbest geçiş diyodu yoktur. Konursa inverter modunda çalışmaz.
- $0 < \alpha < \pi$   
 $+U_d > U_{d\alpha} > -U_d$

### Yarı Kontrollü Doğrultucu

- Tristör ve diyotlarla gerçekleştirilir.
- Sadece **doğrultucu modunda** çalışır.
- Genellikle serbest geçiş diyodu vardır.
- $0 < \alpha < \pi$   
 $+U_d > U_{d\alpha} > 0$

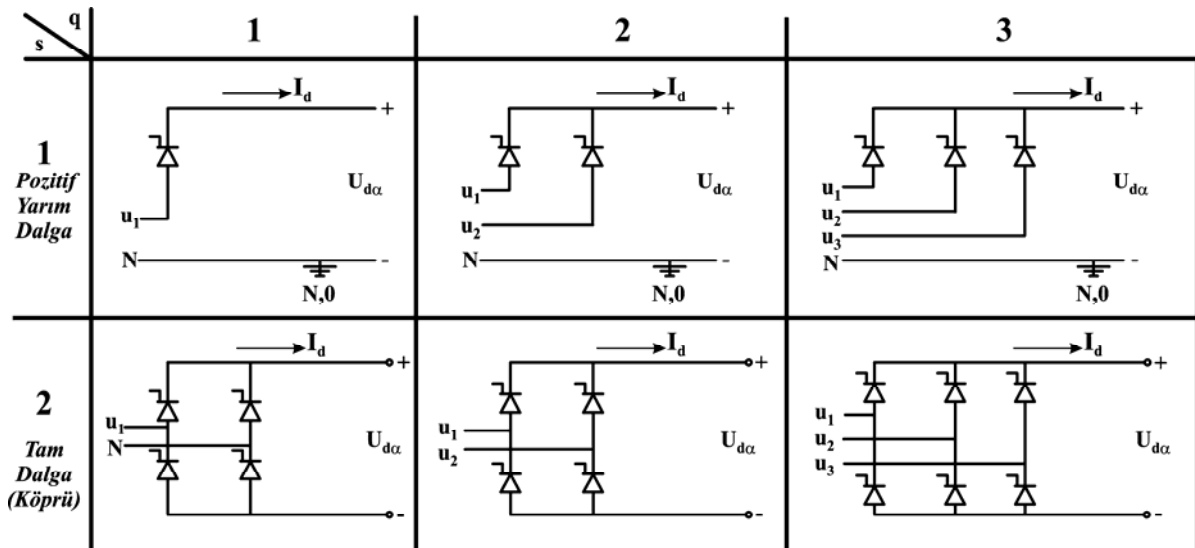
## AC-DC Dönüştürücülerin Dalga Sayısı Açısından Karşılaştırılması



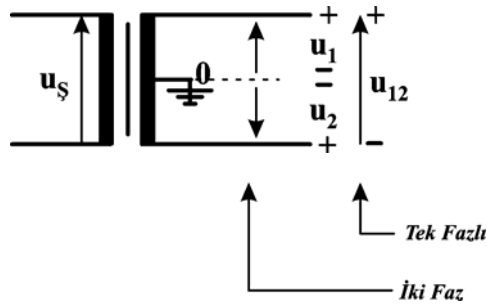
**Yarım Dalga** Doğrultucuda, **şebekenin nötrüne (N) göre** bir çıkış gerilimi üretilir yani çıkıştaki DC hatların birisi şebekenin N ucuna bağlıdır.

**Tam Dalga** Doğrultucu, Pozitif (+) ve Negatif (-) Yarım Dalga Doğrultucuların toplamına eşdeğerdir. Çıkışta **N ucu kullanılmaz**. Ancak, çıkış gerilimi potansiyel olarak N ucunu ortalar.

## Temel AC-DC Dönüştürücülerin Temel Devre Şemaları



## Tek Fazlı Dönüştürücünün 2 Fazlı Eşdeğeri

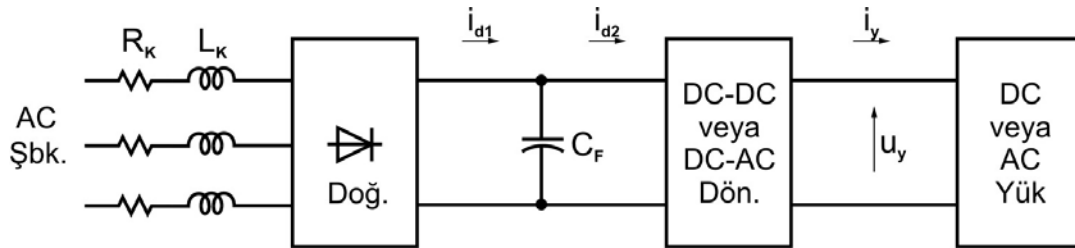


Tek Fazlı Sistem	İki Fazlı Eşdeğeri
$q=1$	$q=2$
$s$	$s$
$U_f$	$U_1 = U_2 = U_f/2$
$I_d$	$I_d$
$R_k$	$R_k/2$
$L_k$	$L_k/2$

Endüstride **2 Fazlı bir AC Şebeke** sistemi mevcut değildir. Ancak, **sekonderi orta uçlu** olan tek fazlı bir transformatörde, orta uca göre sekonder uçlarında  $180^\circ$  faz farklı **2 fazlı bir AC gerilim** oluşmaktadır. Endüstriyel olarak 2 fazlı bir gerilim bu şekilde üretilebilir. Ayrıca, teorik analizlerde, yukarıda görüldüğü gibi, tek fazlı bir gerilimin **2 fazlı eşdeğeri** kullanılabilir.

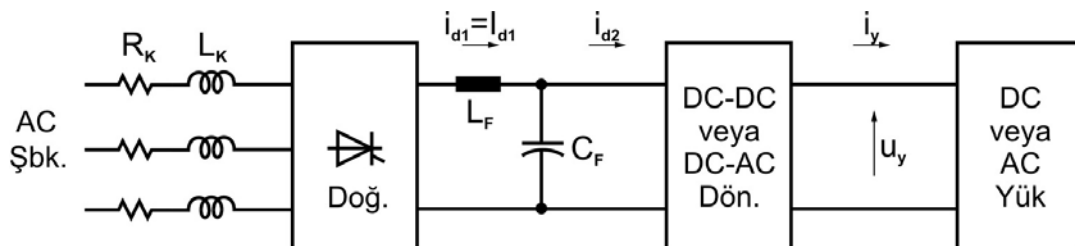
## DOĞRULTUCULARIN ENDÜSTRİYEL UYGULAMA DEVRELERİ

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan doğrultucuların **gerçek eşdeğer devreleri** aşağıdaki gibi sıralanabilir.



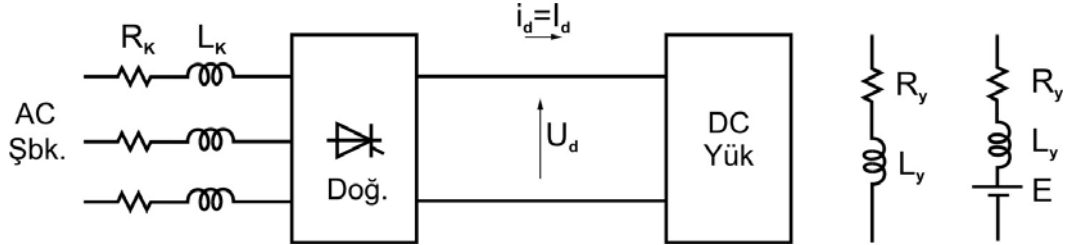
KontROLSÜZ bir doğrultucu ile tek yönlü (kutuplu, DC) bir kondansatör grubu, DC-DC veya DC-AC dönüştürücülerin beslenmesinde, genellikle **ucuz ve basit** olması nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Burada,  $R_k$  ve  $L_k$ , AC şebekenin eşdeğer direnç ve endüktansdır. Etkisinin azalması nedeniyle analizde öncelikle  $R_k$  direnci ihmal edilir.

Bu devrede, şebeke geriliminin maksimum olduğu anların yakınlarında, şebekeden **aşırı akım darbeleri** çekilir. Şebeke geriliminde **ciddi bozulmalar** oluşur. Devre çalışmaya **ilk başladığında**, kondansatörün şarjı için ilk tedbirler alınır. Şebeke bozulmalarına karşı uluslararası düzeyde sınırlamalar başladığından, bu devrenin kullanılmasında azalma olması beklenmektedir.



Kontrollü bir doğrultucu ile **regüleli** bir DC gerilim elde edilmesinde, genellikle doğrultucu çıkışına seri bir bobin (şok bobini, **akım düzeltme reaktörü**) bağlanır. Kontrolsüz doğrultucuda da bu bobin bağlanabilir. Bu durumda yapılan analizde hem  $R_K$  hem de  $L_K$  elemanları ihmal edilebilir ve doğrultucunun yükü bir **akım kaynağı** olarak alınabilir.

Bu devrede, AC şebekedeki **bozulmalar** çok daha azdır. Doğrultucunun kontrolü ile devrenin ilk çalışması başlatılabilir.



Doğrultucu çıkışında doğrudan bir DC yükün bulunması durumu, genellikle kontrollü bir doğrultucu ile bir DC motorun kontrolü uygulamasıdır. Motorun endüktansından dolayı, burada da  $i_d = I_d$  yani doğrultucunun bir **akım kaynağı** ile yüklendiği kabul edilebilir.

Sonuç olarak, doğrultucuların sabit olduğu kabul edilen bir akımla yüklenmesi durumu, endüstriyel uygulamalarda daha çok karşılaşılan bir durumdur. Doğrultucular ile doğrudan omik bir yükün beslenmesinin pratik bir yanı yoktur. Ancak, son yıllarda modern olarak gerçekleştirilen **güç faktörünü düzeltme** yöntemlerinde, yük eşdeğer bir direnç olarak kabul edilmektedir.

O halde, doğrultucuların incelenmesinde, **kolay anlaşılma** açısından yükün omik olduğu, **gerçek devrelere yakınlık** açısından yükün akım kaynağı olduğu kabul edilmektedir. Teorik olarak, yük endüktansı sonsuz olduğunda akım tam olarak sabittir. Gerçekte, frekans ve endüktans değerlerine bağlı olarak **akımda bir dalgalanma** mevcuttur. Motor kontrolünde olduğu gibi, akımdaki dalgalanmanın düşük olduğu durumlarda, yük bir akım kaynağı olarak kabul edilebilir.

# OMİK YÜKLÜ YARIM DALGA KONTROLSÜZ DOĞRULTUCULAR

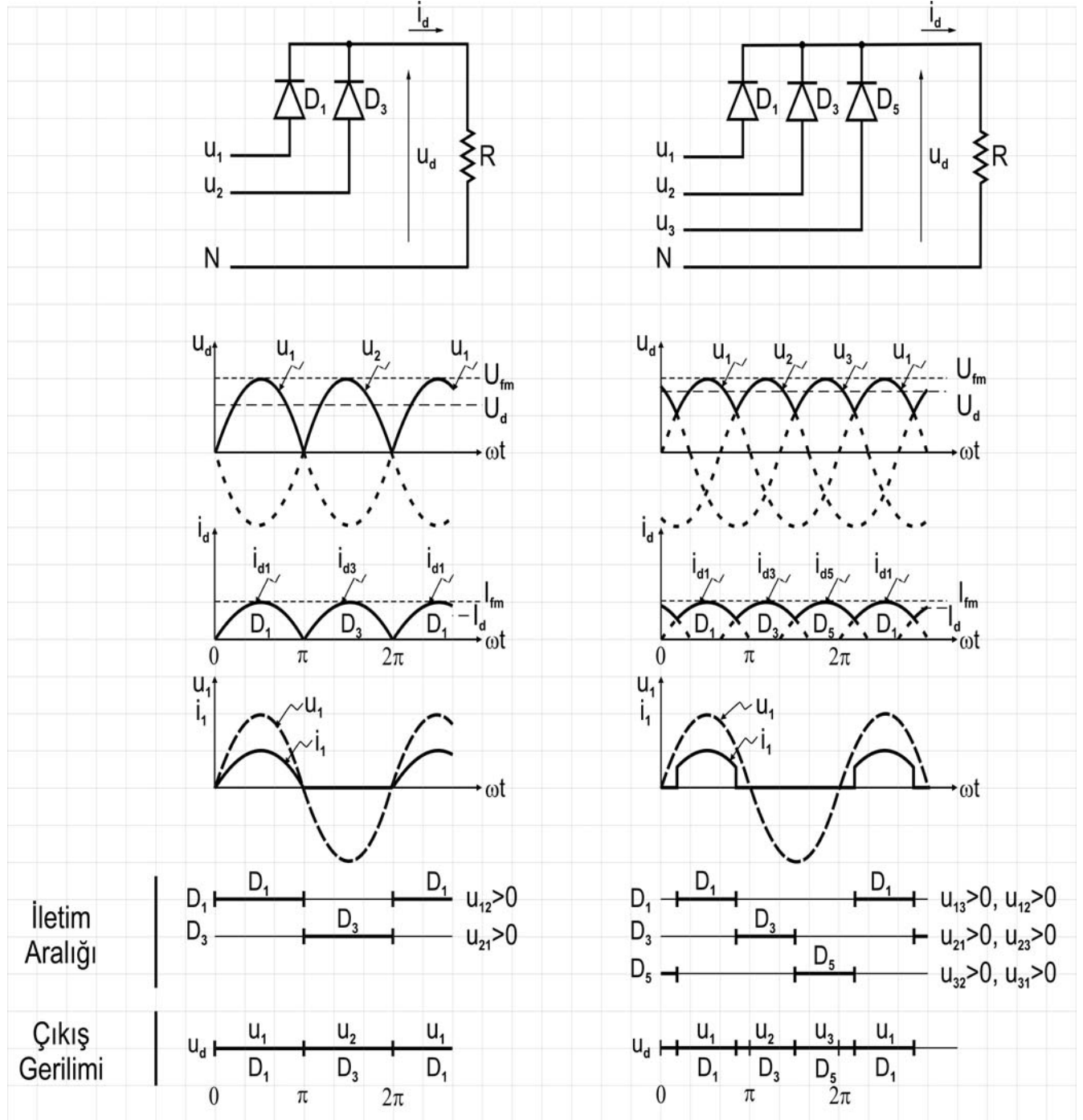
## Devre Şeması ve Temel Dalga Şekilleri

### Omik Yüklü

#### 2 Fazlı Yarım Dalga Kontrolsüz Doğrultucu

### Omik Yüklü

#### 3 Fazlı Yarım Dalga Kontrolsüz Doğrultucu



## Çıkış Gerilimi İfadeleri

### Omik Yüklü

#### 2 Fazlı Yarım Dalga Kontrolsüz Doğrultucu

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{fm} \sin(\omega t) d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{\pi} U_{fm} [-\cos(\omega t)]_0^{\pi} \\
 &= \frac{1}{\pi} U_{fm} [\cos(\omega t)]_{\pi}^0 \\
 &= \frac{1}{\pi} U_{fm} [1 - (-1)] \\
 U_d &= \frac{2}{\pi} U_{fm} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} U_f
 \end{aligned}$$

### Omik Yüklü

#### 3 Fazlı Yarım Dalga Kontrolsüz Doğrultucu

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} U_{fm} \cos(\omega t) d(\omega t) \\
 &= \frac{3}{2\pi} U_{fm} [\sin(\omega t)]_{-\pi/3}^{\pi/3} \\
 &= \frac{3}{2\pi} U_{fm} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} - \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] \\
 U_d &= \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_{fm} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \sqrt{2} U_f
 \end{aligned}$$

## Kısa Açıklama

- **Diyotlar** uçlarına pozitif gerilim uygulandığı sürece iletimde kalırlar, bunun dışında kesimdedirler ve negatif gerilim ile tutulurlar.
- **Aynı anda** sadece bir diyot iletimde kalır.
- Diyotlar yük akımını **eşit aralıkla ve sırayla** geçirirler.
- İletimde olan diyodun bağlı olduğu faz gerilimi, çıkıştaki **yük gerilimini** oluşturur.
- AC şebekeden **DC akım** çekilir ve şebekede **ciddi bozulmalar** oluşur.
- Yük akımı ve bir diyodun akımı kolayca hesaplanabilir.
- Diyotlar **fazlar arası gerilime** maruz kalır.



# OMİK-ENDÜKTİF YÜKLÜ YARIM DALGA KONTROLSÜZ DOĞRULTUCULAR

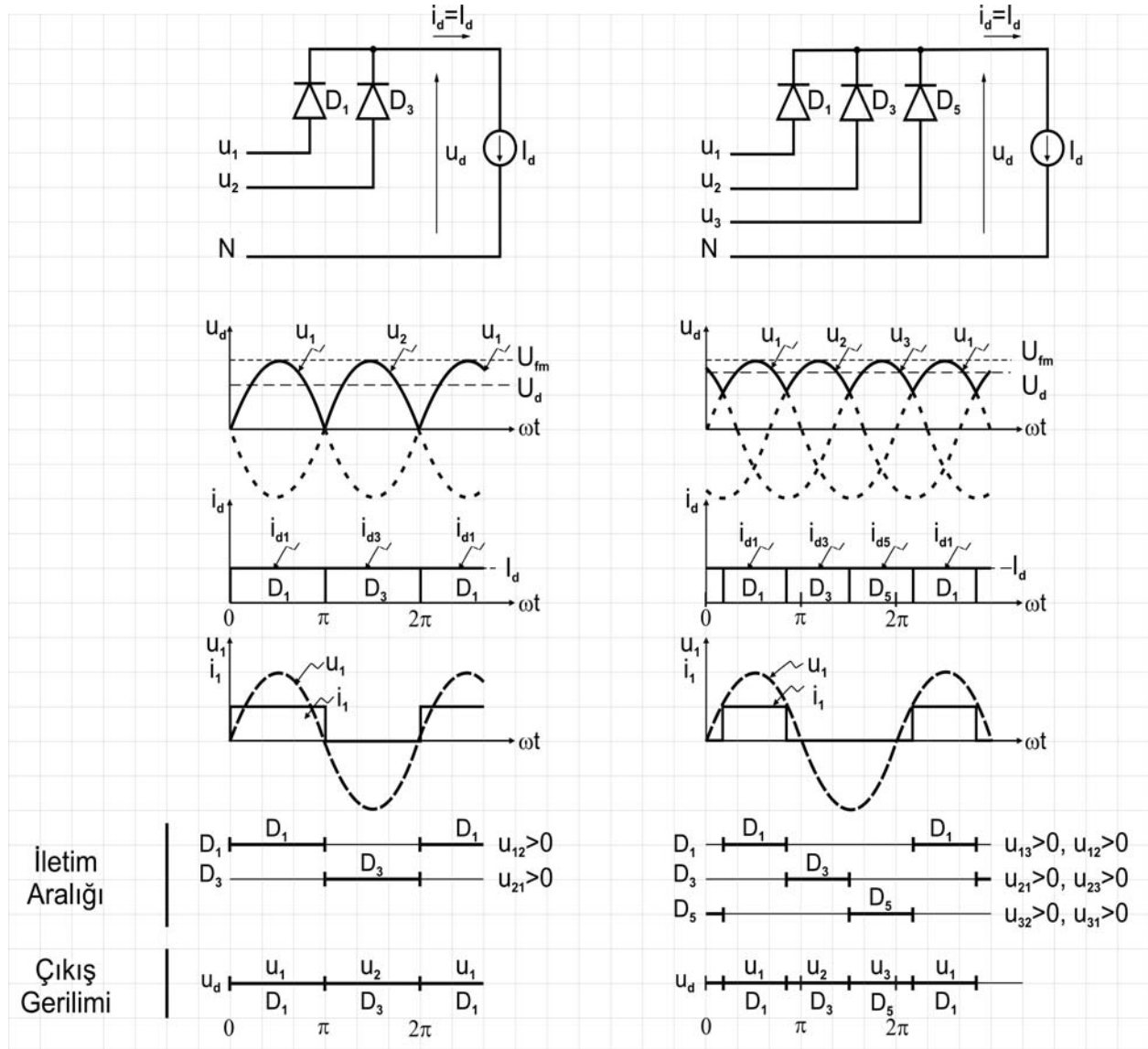
## Devre Şeması ve Temel Dalga Şekilleri

Akım Kaynağı ile Yüklü

2 Fazlı Yarım Dalga Kontrolsüz Doğrultucu

Akım Kaynağı ile Yüklü

3 Fazlı Yarım Dalga Kontrolsüz Doğrultucu



## Çıkış Gerilimi İfadeleri ve Kısa Açıklama

- Çıkış gerilimi ifadeleri, omik yüklü yarım dalga kontrolsüz doğrultucular ile aynıdır.

$$2 \text{ faz için : } U_d = \frac{2}{\pi} U_{fm} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} U_f$$

$$3 \text{ faz için : } U_d = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_{fm} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \sqrt{2} U_f$$

- Bu doğrultucuların özellikleri, omik yüklü doğrultucularda sıralanan özellikler ile aynıdır.

# TAM DALGA KONTROLSÜZ DOĞRULTUCU ÖRNEKLERİ

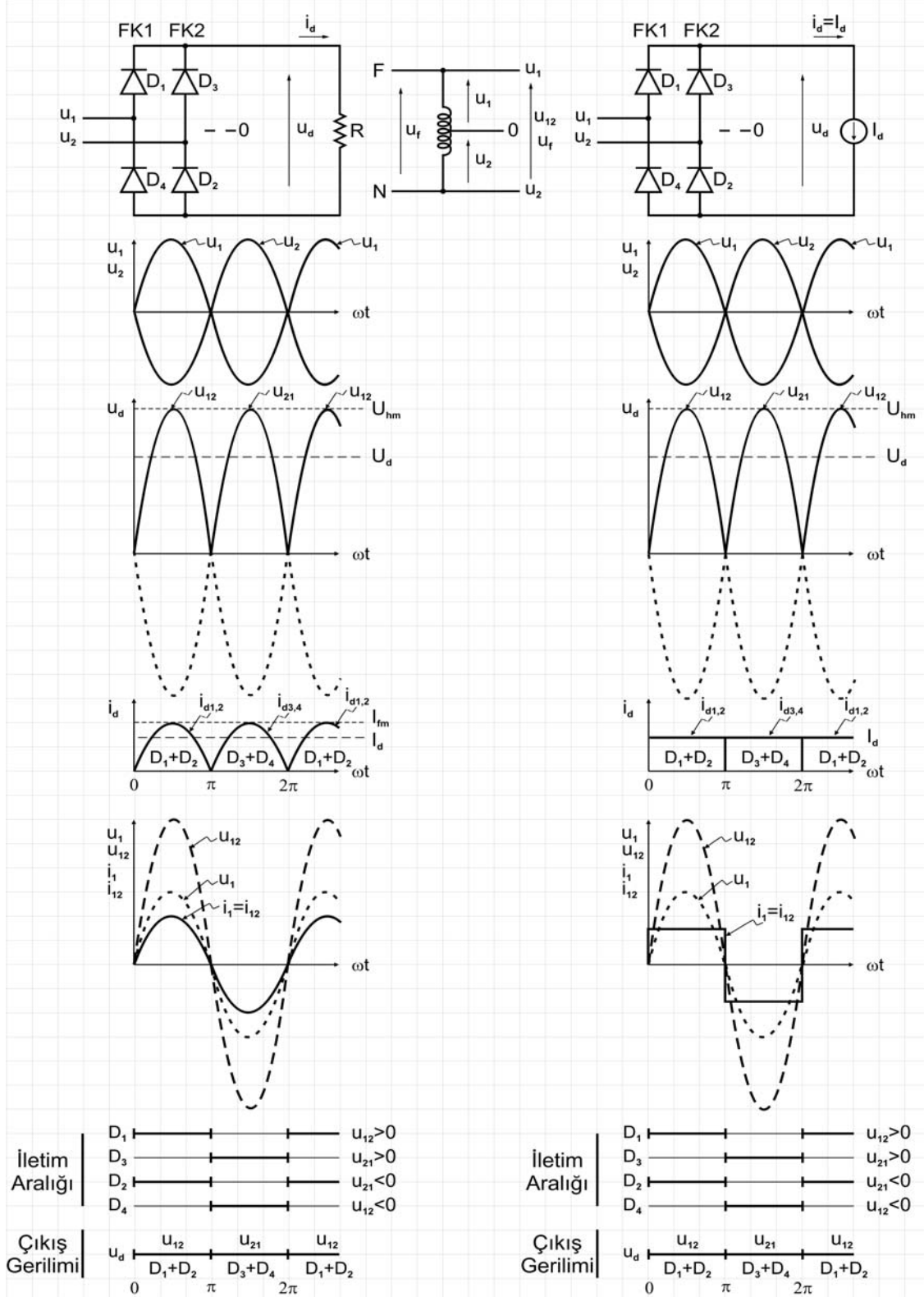
## Devre Şeması ve Temel Dalga Şekilleri

Omik Yüklü

2 Fazlı Tam Dalga Kontrolsüz Doğrultucu

Akım Kaynağı ile Yüklü

2 Fazlı Tam Dalga Kontrolsüz Doğrultucu



## Çıkış Gerilimi İfadesi

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{hm} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{\pi} U_{hm} [-\cos(\omega t)]_0^{\pi} = \frac{1}{\pi} U_{hm} [\cos(\omega t)]_{\pi}^0 = \frac{1}{\pi} U_{hm} [1 - (-1)]$$

$$U_d = \frac{2}{\pi} U_{hm} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} U_h = 2 \frac{2}{\pi} \sqrt{2} U_f$$

## Kısa Açıklama

- İki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucularda, yükün omik ve akım kaynağı olması durumlarında, **çıkış gerilimi** aynıdır.
- Tam dalga doğrultucunun çıkış gerilimi, eşdeğer olan yarım dalga doğrultucu çıkış geriliminin **2** katıdır.
- Üst ve alt sıradaki diyotlar, yük akımını **eşit aralıklarla ve sırayla** geçirirler.
- Aynı anda, üst ve alt sıradan **sadece birer diyot** iletimde kalır.
- Aynı anda, üst ve alt sıradan **aynı faz koluna ait** diyotlar iletimde olamaz.
- **Çıkış gerilimi**, iletimde olan üst ve alt sıradaki diyotlara göre, fazlar arası gerilimler de oluşmaktadır.
- AC şebekeden çekilen **faz akımının** DC bileşeni yoktur.
- **AC şebeke açısından**, yarım dalgaya göre tam dalga doğrultucular çok daha iyidir.
- **Omik yüklü** tam dalga doğrultucunun şebekeden çektiği akımda, faz farkı ve harmonik yoktur.
- **Akım kaynaklı yükte** ise, şebekeden çekilen akımda, faz farkı yoktur, ancak harmonik vardır.
- AC şebekeden çekilen **faz ve hat akımları** birbirine eşittir.
- Diyotlar **fazlar arası gerilime** maruz kalır.

**Omik yükte** sinusoidal olan faz ve hat akımı efektif olarak,

$$I_f = I_h = U_h / R$$

**Omik-endüktif yükte** sinusoidal olmayan faz veya hat akımı efektif olarak,

$$I_f^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_d^2 d(\omega t) = \frac{1}{\pi} I_d^2 [\omega t]_0^{\pi} = \frac{1}{\pi} I_d^2 \pi \Rightarrow I_f = I_d$$

şeklinde bulunur. Bu akımın **Temel Bileşeni** ve **Toplam Harmonik Distorsiyonu**, Fourier analizi yapılarak,

$$I_{f1} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I_d \text{ ve THD}=0,48$$

şeklinde bulunur.

**NOT :** 2 faz için yapılan bu analizin 3 faz için de yapılması önerilir.

# YARIM DALGA KONTROLLÜ DOĞRULTUCU ÖRNEKLERİ

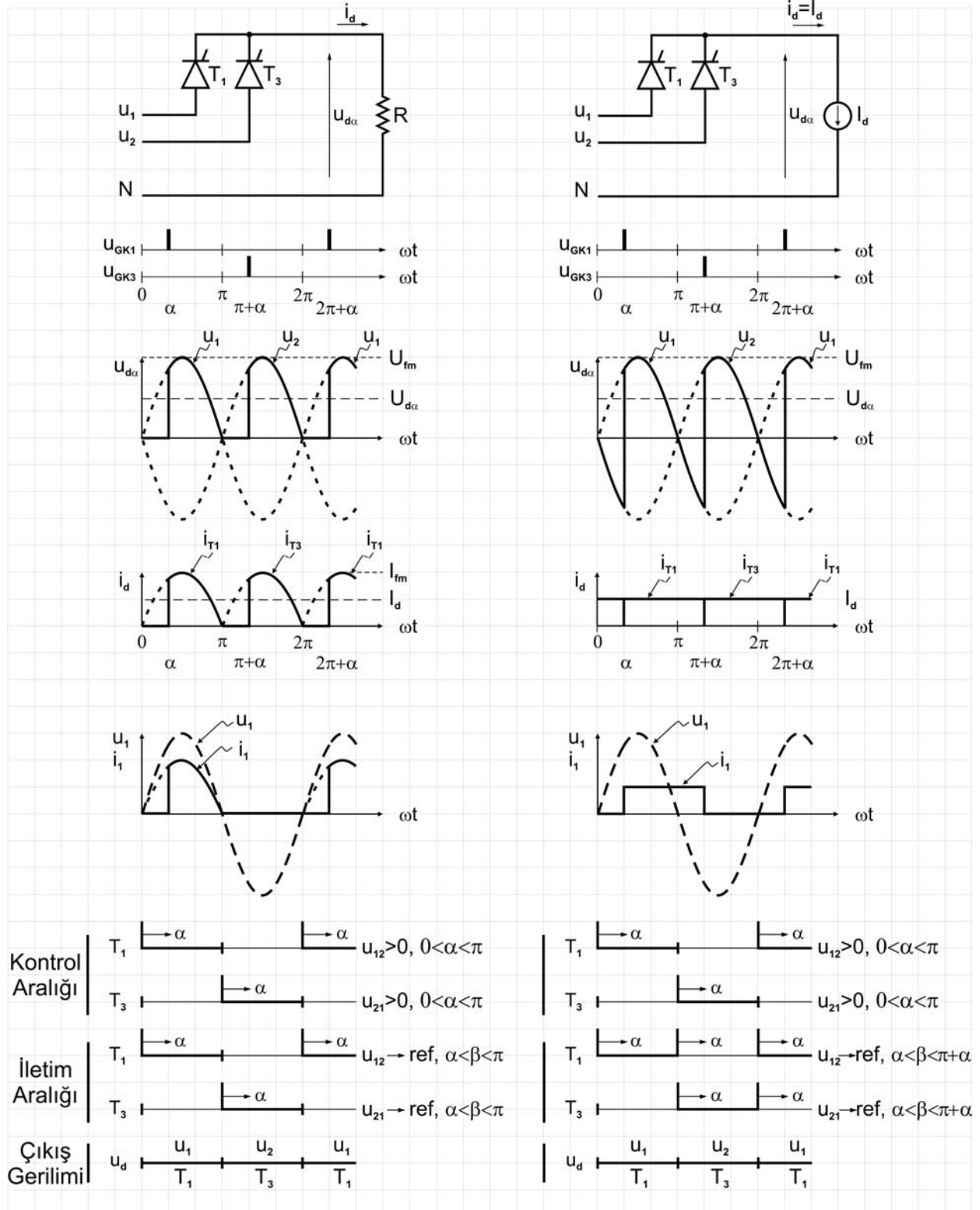
## Devre Şeması ve Temel Dalga Şekilleri

### Omik Yüklü

#### 2 Fazlı Yarım Dalga Kontrollü Doğrultucu

### Akım Kaynağı ile Yüklü

#### 2 Fazlı Yarım Dalga Kontrollü Doğrultucu



## Çıkış Gerilimi İfadeleri

### Omik Yüklü

#### 2 Fazlı Yarım Dalga Kontrollü Doğrultucu

$$\begin{aligned}
 U_{d\alpha} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{fm} \sin(\omega t) d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{\pi} U_{fm} [-\cos(\omega t)]_{\alpha}^{\pi} \\
 &= \frac{1}{\pi} U_{fm} [\cos(\omega t)]_{\pi}^{\alpha} \\
 &= \frac{1}{\pi} U_{fm} [\cos \alpha - (-1)] \\
 U_{d\alpha} &= \frac{1}{\pi} U_{fm} (1 + \cos \alpha) \\
 &= \frac{1}{\pi} \sqrt{2} U_f (1 + \cos \alpha) \\
 &= \frac{1}{2} U_d (1 + \cos \alpha)
 \end{aligned}$$

### Akım Kaynağı ile Yüklü

#### 2 Fazlı Yarım Dalga Kontrollü Doğrultucu

$$\begin{aligned}
 U_{d\alpha} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} U_{fm} \sin(\omega t) d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{\pi} U_{fm} [-\cos(\omega t)]_{\alpha}^{\pi+\alpha} \\
 &= \frac{1}{\pi} U_{fm} [\cos(\omega t)]_{\pi+\alpha}^{\alpha} \\
 &= \frac{1}{\pi} U_{fm} [\cos \alpha - \cos(\pi + \alpha)] \\
 &= \frac{1}{\pi} U_{fm} [\cos \alpha + \cos \alpha] \\
 U_{d\alpha} &= \frac{2}{\pi} U_{fm} \cos \alpha \\
 &= \frac{2}{\pi} \sqrt{2} U_f \cos \alpha = U_d \cos \alpha
 \end{aligned}$$

## Kısa Açıklama

- **Genel olarak** yarım dalga doğrultucu özellikleri mevcuttur.
- **Omik yükte**,  $\alpha$  anında iletme giren bir tristör  $\pi$  anında akımın sıfır olmasıyla kesime girer. Elemanların iletiminde ve çıkış geriliminde boşluklar oluşur.
- **Omik-endüktif yükte**,  $\alpha$  anında tetiklenerek iletme giren bir tristör, akımın sürekli oluşundan dolayı, bir sonraki tristör  $\alpha + \pi$  anında tetikleninceye kadar iletimde kalır. Elemanların iletiminde ve çıkış geriliminde boşluklar oluşmaz.
- Yine AC şebekeden bir **DC akım** çekilir. Ayrıca  $\alpha$  açısına bağlı olarak, akım gerilime göre geri kalır.
- Prensip olarak, **faz kesme kontrolü**, ardışık fazların kesişim noktaları (fazlar arası gerilimlerin sıfır noktaları) sıfır ( $\alpha=0$ ) olmak üzere  $0-\pi$  aralığında yapılır. **Sıfır noktaları**, 2 fazlı sistemlerde  $\omega t$  ekseninde, 3 fazlı sistemlerde ise bu eksenin dışında oluşur.

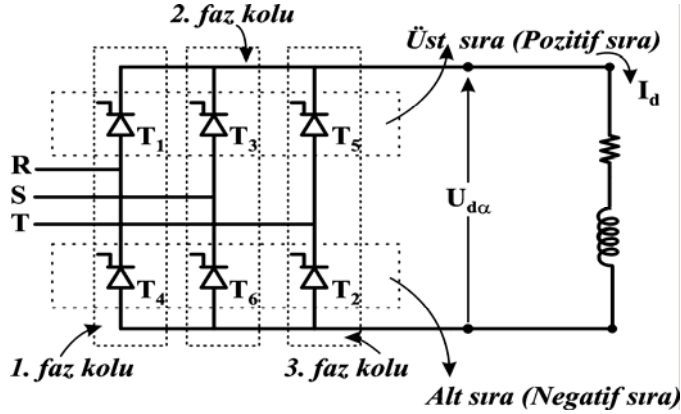
2 fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu olan bu devreler ve dalga şekilleri, kolayca **2 fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu için** düzenlenebilir. Bu durumda, İletimde olan elemanlara  $T_2$  ve  $T_4$  tristörleri eklenir.  $T_1$  ile  $T_2$  ve  $T_3$  ile  $T_4$  aynı sinyallerle ve eşzamanlı olarak tetiklenir. **Çıkış gerilimi**  $U_{12}$  ve  $U_{21}$  fazlar arası gerilimleri ile oluşur. **Faz akımları** çift yönlü hale gelir ve bu akımlarda DC bileşen oluşmaz. Ancak,  $\alpha$  açısına bağlı olarak, akımda faz farkı ve harmonikler oluşur. Akım kaynaklı yük için, **temel bileşenin faz kayma açısı**,  $\alpha$  açısına eşit olur.

**NOT:** Yarım dalga için yapılan bu analizin tam dalga için de yapılması önerilir.

Ayrıca, 2 faz için yapılan bu analizin 3 faz için de benzer şekilde yapılması yararlı olur.

## GENELLEŞTİRİLMİŞ İNCELEMELER

### Genel Devre Şeması ve Açıklamalar



Üst ve alt sıradan herhangi birisi kullanılırsa **Yarım Dalga Doğrultucu**, her ikisini de kullanılırsa **Tam Dalga Doğrultucu** elde edilir. **Serbest geçiş diyodu**, yük akımının sürekliliğini sağlar. Çıkış gerilimi  $U_{d\alpha}$  çok dalgalı da olsa, büyük değerli bir yük endüktansından dolayı genellikle çıkış akımı  $I_d$  **sürekli ve sabit** kabul edilir.

Serbest geçiş diyodu olmadığında, sürekli kabul edilen DC yük akımını, hem üst hem de alt sırada elemanlar **eşit aralıklarla ve sırayla** geçirilirler. Üst ve alt sıradan aynı anda **sadece birer eleman** iletimde kalabilir. Hem üst hem de alt sırada, akımın bir elemandan diğerine aktarılışına **Komütasyon Olayı** denir ve bu aktarma işlemlerinin başlangıç ya da sıfır noktaları **ardışık faz gerilimlerinin** kesişim noktalarıdır. **Diyotlu devrelerde** sıfır noktalarında kendiliğinden oluşan bu aktarım olayları, **tristörlü devrelerde** tetikleme sinyalleriyle geciktirilebilir. Bu  $\alpha$  **gecikme açıları**  $0 - \pi$  aralığında ayarlanabilir. Bu açığı **Tetikleme Gecikmesi** veya **Gecikme Açısı** denir.

- **Endüstriyel uygulamalar açısından**, doğrultucuların **akım kaynağı** ile yüklenmesi durumu, daha gerçekçi ve anlamlıdır.
- **Faz kontrolü**, genellikle fazlar arası gerilimlerin sıfır ( $\alpha=0$ ) noktaları referans alınarak yapılır ve kontrol aralığı  $0-\pi$  şeklindedir.
- **Güç elemanları** hem üst hem de alt sırada, akımı **eşit aralıklarla ve sırayla** geçirir. Sürekli akım için iletim aralığı 2 fazda  $\pi$  ve 3 fazda  $2\pi/3$  kadardır.
- **Çıkış gerilimi** iletimde olan elemanlara göre, yarım dalga doğrultucularda **faz gerilimleri** ve tam dalga doğrultucularda **fazlar arası gerilimler** ile oluşur. Tam dalgada çıkış gerilimi eşdeğer yarım dalgadaki 2 katıdır.
- AC şebekeden çekilen **faz akımı**, yarım dalga doğrultucularda DC şekilde ve ayrıca kontrollü olanlarda gerilime göre geridir. Tam dalga doğrultucularda, faz akımında **DC bileşen** yoktur fakat **harmonikler** bulunabilir. Kontrolsüz olanlarda faz farkı oluşmaz, ancak kontrollü olanlarda kontrol açısına bağlı bir faz farkı oluşur.
- **AC şebeke açısından**, tam dalga doğrultucuların kullanılması, mümkün ise doğrultucunun kontrolsüz olması, mümkün değil ise **kontrol bandının** olabildiğince sıfıra yakın olması önerilmektedir.

- Doğrultucularda **çıkış akımı**, daima güç elemanlarının iletim yönünde ve tek yönlüdür. Gerilim ise, sadece tam kontrollü olan doğrultucularda 2 yönlü olup, diğerlerinde tek yönlüdür.

## Çıkış Gerilimi İfadeleri

Bütün kontrolsüz doğrultucularda,

$$U_d = U_{dm} = s \frac{q}{\pi} \sqrt{2} U_f \sin \frac{\pi}{q}$$

Bütün yarı kontrollü doğrultucular ile omik yüklü tam kontrollü doğrultucularda,

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{2} U_d (1 + \cos \alpha)$$

2 faz için

$$U_{d\alpha} = U_d \cos \alpha$$

3 faz ve  $0^\circ < \alpha < 30^\circ$  için

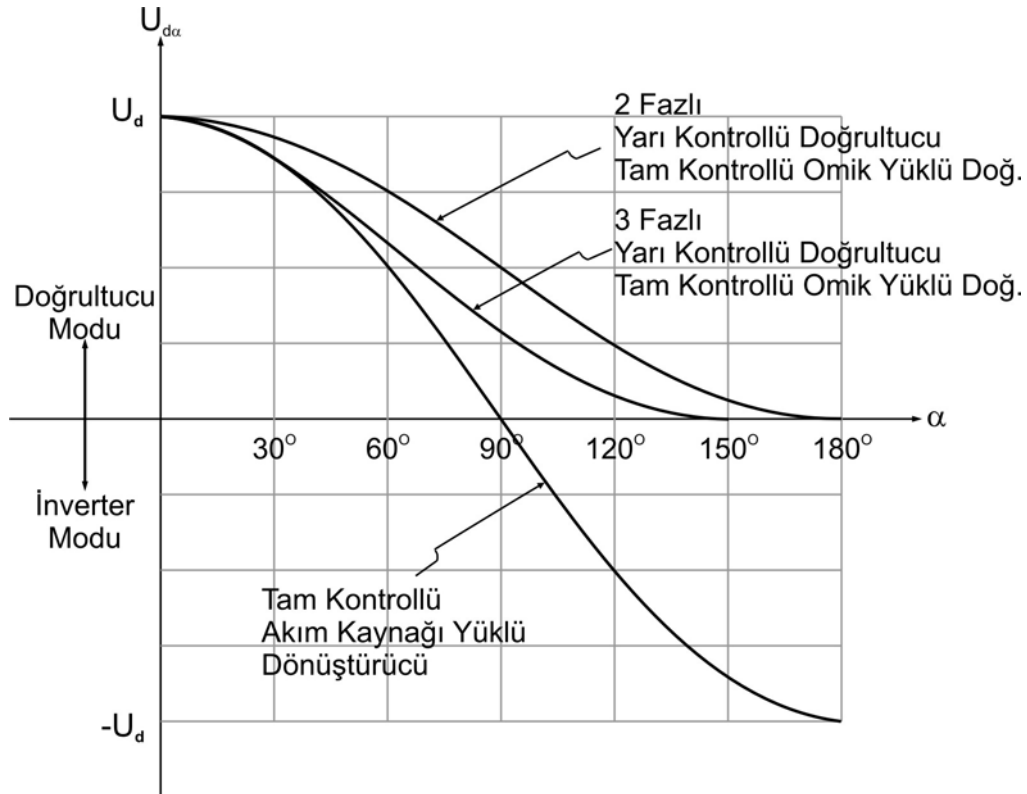
$$U_{d\alpha} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_d [1 + \cos(\alpha + 30^\circ)]$$

3 faz ve  $30^\circ < \alpha < 150^\circ$  için

Akım kaynağı ile yüklü bütün tam kontrollü doğrultucularda,

$$U_{d\alpha} = U_d \cos \alpha$$

## Çıkış Gerilimi Değişimleri



AC şebeke  $\xrightarrow{\text{Enerji}}$  DC yük  $\Rightarrow$  Doğrultucu Modu

AC şebeke  $\xleftarrow{\text{Enerji}}$  DC yük  $\Rightarrow$  İnverter Modu

## Çalışma Modları

Doğrultucularda **çıkış akımı**, daima **tek yönlüdür**. Bu yön pozitif kabul edilir ve güç elemanlarının iletim yönüdür.

**Çıkış gerilimi** ise, sadece omik endüktif yüklü tam kontrollü doğrultucularda, pozitif ve negatif olmak üzere **iki yönlü** veya iki bölgeyi olabilmektedir.

Çıkış gerilimi pozitif olduğunda, güç pozitif olur, enerji akışı AC şebekeden DC yüke doğrudur. Bu çalışmaya **Doğrultucu Modu** denilmektedir.

Çıkış gerilimi negatif olduğunda ise, enerji akışı DC yükten AC şebekeye doğrudur. Bu çalışmaya ise **İnverter Modu** denilir.

Doğrultucu modunda AC gerilim DC'ye, inverter modunda ise DC gerilim AC'ye dönüştürülür. Örnek olarak, doğrultucu modunda AC şebeke gerilimi doğrultularak bir aküyü şarj eder veya DC motoru çalıştırır. İnverter modunda ise, akümülatör veya DC generatör uçlarındaki DC gerilim AC gerilime dönüştürülerek, akü veya DC generatörün enerjisi AC şebekeye aktarılır.

**İki yönlü enerji aktarımı** sağlayabilen omik-endüktif yüklü tam kontrollü dönüştürücülerin çıkış gerilimi ifadesi tekrar yazılarak, aşağıdaki yorum yapılabilir.

$$U_d = U_{dm} = s \frac{q}{\pi} \sqrt{2} U \sin \frac{\pi}{q}$$

$$U_{d\alpha} = U_d \cos \alpha$$

$$\alpha = 0 \quad \text{için, } U_{d\alpha} = U_d = U_{dm}$$

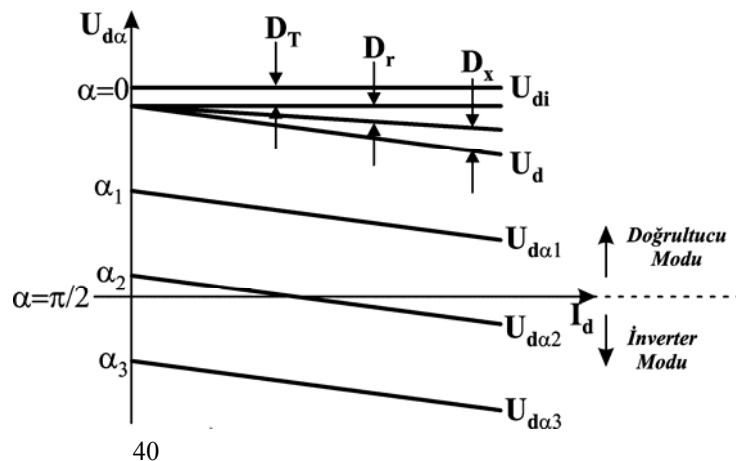
$$\alpha < \pi/2 \quad \text{için, } U_{d\alpha} > 0 \Rightarrow \text{Doğrultucu Modu}$$

$$\alpha = \pi/2 \quad \text{için, } U_{d\alpha} = 0$$

$$\alpha > \pi/2 \quad \text{için, } U_{d\alpha} < 0 \Rightarrow \text{İnverter Modu}$$

**Bu yorumlar**, güç elemanları ve devre ideal kabul edilerek yapılmaktadır. Doğal olarak gerçek uygulamalarda, gerilim düşümleri ve güç kayıpları oluşur. Bir fikir vermesi açısından, aşağıda bir doğrultucunun gerçek çıkış veya yük karakteristiği verilmiştir.

Şekilden görüldüğü gibi, gerçek bir doğrultucuda, akıma bağlı olarak farklı gerilim düşümleri oluşmakta ve çıkış gerilimi düşmekte,  $\alpha = \pi/2$  yakınlarında doğrultucu modunda çalışan bir dönüştürücü yüklendiğinde inverter moduna geçebilmektedir.





## Aktif Güç Dengesi

Devre kayıpları ihmal edildiğinde, bir doğrultucunun **giriş ve çıkışındaki aktif güçler** birbirine eşit olur. AC şebeke tarafındaki aktif güç, akımın efektif temel bileşeni ve bu bileşenin kayma faktörü ile hesaplanır. DC taraftaki aktif güç ise, ortalama gerilim ve akım ile bulunur.

Genel olarak omik-endüktif yüklü  $q$  faz sayılı tam dalga kontrollü bir doğrultucu için, temel akımın **kayma açısı  $\phi_1$**  faz kontrol açısı  $\alpha$ 'ya eşit olduğuna göre, **güç dengesi**,

$$P_g = P_\varsigma$$

$$q U_f I_{f1} \cos \alpha = U_{d\alpha} I_d = U_d I_d \cos \alpha$$

şeklinde, ayrıca şebekeden çekilen **reaktif güç**,

$$Q_g = q U_f I_{f1} \sin \alpha$$

olarak yazılabilir. Ayrıca, **Görünen Güç** ve **Güç Faktörü** ifadeleri,

$$S = q U_f I_f$$

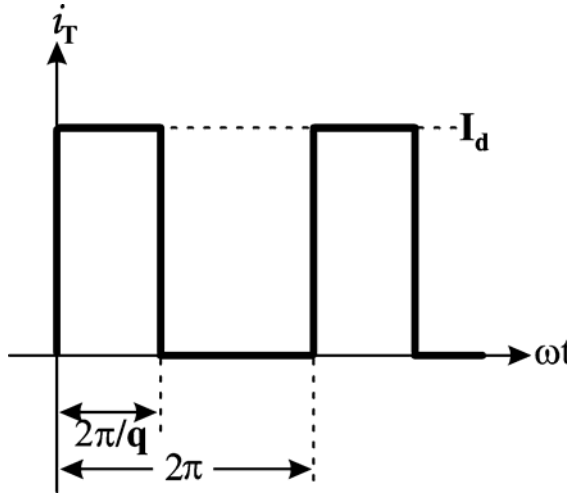
$$GF = P / S$$

Her zaman geçerlidir.

## Bir Elemanın Maruz Kaldığı Akım ve Gerilim

Genel olarak **omik-endüktif yüklü  $q$  faz sayılı doğrultucularda**, bir güç elemanından geçen akımın dalga şekli ile bu akımın ortalama ve efektif değerleri aşağıda verilmiştir. Bu akım şekli ve ifadeler, yarım ve tam dalga ile kontrolsüz ve kontrollü doğrultucularda değişmez.

$$I_{TAV} = \frac{1}{q} I_d$$



$$I_{TEF} = \sqrt{\frac{1}{q}} I_d$$

Yarım ve tam dalga ile kontrolsüz ve kontrollü **bütün doğrultucularda**, bir güç elemanı daima fazlar arası gerilime maruz kalır.

**Genel olarak**, bir elemanın periyodik pozitif ve negatif dayanma gerilimi, bu elemanın maruz kaldığı maksimum gerilimden büyük olmalıdır.

$$\begin{aligned} U_{DRM}, U_{RRM} &> U_{hm} \\ &> \sqrt{2} U_h \\ &> \sqrt{2} 2 U_f \sin \frac{\pi}{q} \end{aligned}$$

şeklinde. Bu ifade, **tek fazlı sistemler için**,

$$U_{DRM}, U_{RRM} > \sqrt{2} U_F$$

**2 fazlı sistemler için**,

$$U_{DRM}, U_{RRM} > 2\sqrt{2} U_F$$

**ve 3 fazlı sistemler için**,

$$U_{DRM}, U_{RRM} > \sqrt{6} U_F$$

olarak düzenlenebilir.

Faz gerilimi 220 V olan AC şebekeye bağlı tek fazlı doğrultucularda, en az 400 V'luk ve daha emniyetli olması açısından 600 V'luk güç elemanları kullanılmaktadır. 3 fazlı doğrultucularda ise, en az 600 V'luk ve daha emniyetli olması açısından 800 V'luk elemanlar kullanılmaktadır.

## KONU İLE İLGİLİ ÇÖZÜLMÜŞ PROBLEMLER

### Problem 1

Faz gerilimi 110 V olan 2 fazlı yarım dalga kontrolsüz bir doğrultucu ile 10  $\Omega$ 'luk bir yük beslenmektedir. Devre kayıplarını ihmal ederek,

- Çıkış gerilim ve akımını bulunuz.
- Bir diyottan geçen akımın ortalama ve efektif değerlerini hesaplayınız.
- Efektif faz akımını bulunuz.
- Bir diyodun maruz kaldığı maksimum gerilimi bulunuz.

### Çözüm

- a) Çıkış gerilimi,

$$U_d = s \frac{q}{\pi} \sqrt{2} U_f \sin \frac{\pi}{q} = 1 \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \cdot 110 \cdot \sin \frac{\pi}{q}$$

$$U_d = 99,04 \text{ V}$$

Çıkış akımı,

$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{99,04}{10}$$

$$I_d = 9,9 \text{ A}$$

- b) Bir diyodun ortalama akımı,

$$I_{DAV} = \frac{1}{q} I_d = \frac{1}{2} \cdot 9,9$$

$$I_{DAV} = 4,95 \text{ A}$$

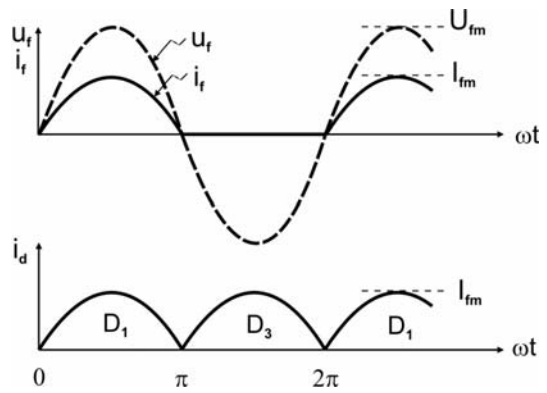
Bir diyodun efektif akımı,

$$I_{DEF}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_{fm}^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{2\pi} I_{fm}^2 \int_0^\pi \frac{1 + \cos 2(\omega t)}{2} d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{4\pi} I_{fm}^2 \left[ (\omega t) + \frac{1}{2} \sin 2(\omega t) \right]_0^\pi$$

$$= \frac{1}{4\pi} I_{fm}^2 [\pi + 0]$$



$$I_{DEF}^2 = \frac{1}{4} I_{fm}^2$$

$$I_{DEF} = \frac{1}{2} I_{fm} = \frac{1}{2} \sqrt{2} \cdot 11$$

$$I_{DEF} = 7,78 \text{ A}$$

- c) Efektif faz akımı, yarım dalga doğrultucuda bir eleman akımının efektif akımına eşit olduğundan,

$$I_f = I_{DEF} = 7,78 \text{ A}$$

- d) Bir diyodun maruz kaldığı maksimum gerilim,

$$U_{Dmax} = U_{hm} = 2\sqrt{2} \cdot U_f = 2\sqrt{2} \cdot 110$$

$$U_{Dmax} = 311,1 \text{ V}$$

bulunur.

## Problem 2

Faz gerilimi 220 V olan tek fazlı tam dalga (köprü) kontrolsüz bir doğrultucu ile 20  $\Omega$ 'luk bir alıcı beslenmektedir. Devre kayıplarını ihmal ederek,

- Yükün gerilim ve akımını bulunuz.
- Bir diyodun ortalama ve efektif akımlarını hesaplayınız.
- Efektif faz akımını bulunuz.
- Bir diyodun maruz kaldığı maksimum gerilimi bulunuz.

## Çözüm

Tek fazlı sistem	İki fazlı sistem
$U_f = 220 \text{ V}$	$U_f = 110 \text{ V}$
$q = 1$	$q = 2$
$s = 2$	$s = 2$

a) Çıkış gerilimi,

$$U_d = s \frac{q}{\pi} \sqrt{2} \cdot U_f \sin \frac{\pi}{q} = 2 \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \cdot \frac{220}{2} \cdot \sin \frac{\pi}{2}$$

$$U_d = 198,1 \text{ V}$$

Çıkış akımı,

$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{198,1}{20}$$

$$I_d = 9,9 \text{ A}$$

b) Bir diyodun ortalama akımı,

$$I_{DAV} = \frac{1}{q} I_d = \frac{1}{2} \cdot 9,9$$

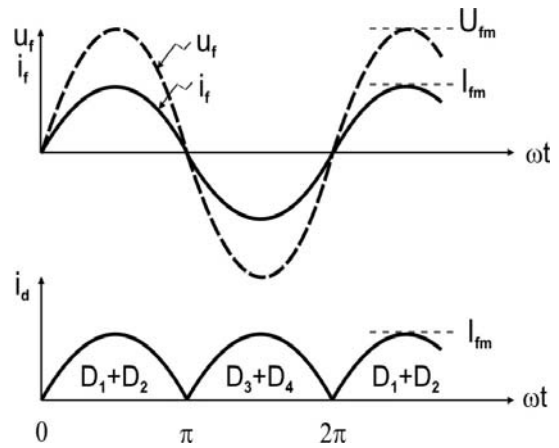
$$I_{DAV} = 4,95 \text{ A}$$

Bir diyodun efektif akımı,

$$I_{DEF}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_{fm}^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{2\pi} I_{fm}^2 \int_0^\pi \frac{1 + \cos 2(\omega t)}{2} d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{4\pi} I_{fm}^2 \left[ (\omega t) + \frac{1}{2} \sin 2(\omega t) \right]_0^\pi$$



$$= \frac{1}{4\pi} I_{fm}^2 [\pi + 0]$$

$$I_{DEF}^2 = \frac{1}{4} I_{fm}^2$$

$$I_{DEF} = \frac{1}{2} I_{fm} = \frac{1}{2} \sqrt{2} \cdot 11$$

$$I_{DEF} = 7,78 \text{ A}$$

c) Efektif faz akımı,

$$I_f = \frac{I_{fm}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 11}{\sqrt{2}}$$

$$I_f = 11 \text{ A}$$

d) Bir diyodun maruz kaldığı maksimum gerilim,

$$U_{Dmax} = U_{hm} = 2\sqrt{2} \cdot U_f = 2\sqrt{2} \cdot 110$$

$$U_{Dmax} = 311,1 \text{ V}$$

bulunur.

### Problem 3

Faz gerilimi 110 V olan iki fazlı yarım dalga kontrollü bir doğrultucu ile 9,9 A'lık bir DC motor beslenmektedir. Yük  $\alpha=60^\circ$  iken beslendiğine göre, devrenin kayıpsız olduğunu ve yük akımının sürekli ve düzgün olduğunu kabul ederek,

- Yükün gerilimi bulunuz.
- Bir tristörün ortalama ve efektif akımlarını hesaplayınız.
- Efektif faz akımını bulunuz.
- Şebekeden çekilen aktif ve reaktif güçler ile güç katsayısını bulunuz.

### Çözüm

- a)  $\alpha=60^\circ$  iken, yük gerilimi,

$$U_{d\alpha} = U_d \cos \alpha = s \frac{q}{\pi} \sqrt{2} U_f \sin \frac{\pi}{q} \cos \alpha = 1 \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \cdot 110 \cdot \sin \frac{\pi}{2} \cos 60^\circ$$

$$U_{d\alpha} = 49,52 \text{ V}$$

- b) Bir tristörün ortalama akımı,  $\alpha'$  dan bağımsız olarak,

$$I_{TAV} = \frac{1}{q} I_d = \frac{1}{2} \cdot 9,9$$

$$I_{TAV} = 4,95 \text{ A}$$

Bir tristörün efektif akımı,

$$I_{TEF} = \sqrt{\frac{1}{q}} I_d$$

$$I_{TEF} = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot 9,9$$

$$I_{TEF} = 7 \text{ A}$$

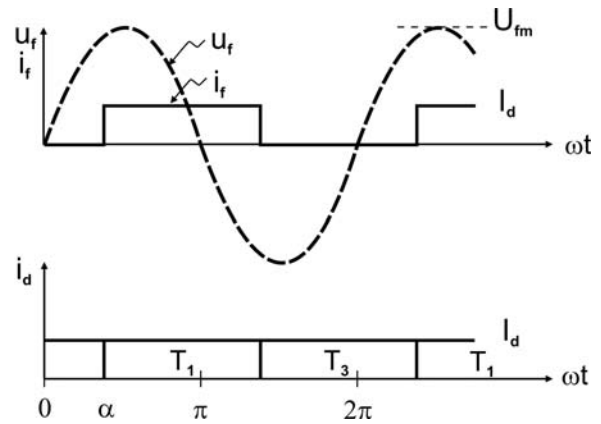
- c) Efektif faz akımı, yarım dalga doğrultucuda bir elemandan geçen akımının efektif değerine eşit olacağına göre,

$$I_f = I_{TEF} = 7 \text{ A}$$

- d) Şebekeden çekilen aktif güç,

$$P_g = q U_f I_{f1} \cos \alpha = P_\varphi = U_{d\alpha} I_d = 49,52 \cdot 9,9$$

$$P_g = 490,2 \text{ W}$$



Şebekeden çekilen görünen güç,

$$S_g = q U_f I_f = 2 \cdot 110 \cdot 7$$

$$S_g = 1540 \text{ VA}$$

Güç katsayısı,

$$GK = \frac{P_g}{S_g} = \frac{490,2}{1540}$$

$$GK = 0,318$$

bulunur.

**Problem 4**

Faz gerilimi 220 V olan tek fazlı tam dalga (köprü) kontrollü bir doğrultucu ile  $\alpha=45^\circ$  iken 10 A'lık bir alıcı beslenmektedir. Devre kayıplarını ihmal ederek,

- Alıcının besleme gerilimi ile gücünü bulunuz.
- Bir tristörün ortalama ve efektif akımlarını hesaplayınız.
- Şebekeden çekilen efektif faz akımını bulunuz.
- Faz akımının efektif temel bileşenini bulunuz.
- Şebekeden çekilen reaktif gücü bulunuz.
- Şebekeden çekilen görünen güç ile güç katsayısını bulunuz.

**Çözüm**

- a) Alıcının besleme gerilimi,

$$U_{da} = U_d \cos \alpha = s \frac{q}{\pi} \sqrt{2} U_f \sin \frac{\pi}{q} \cos \alpha = 2 \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \cdot 110 \cdot \sin \frac{\pi}{2} \cos 45^\circ$$

$$U_{da} = 140,1 \text{ V}$$

Alıcının aktif gücü,

$$P_\varsigma = U_{da} I_d = 140,1 \cdot 10$$

$$P_\varsigma = 1401 \text{ W}$$

- b) Bir tristörün ortalama akımı,

$$I_{TAV} = \frac{1}{q} I_d = \frac{1}{2} \cdot 10$$

$$I_{TAV} = 5 \text{ A}$$

Bir tristörün efektif akımı,

$$I_{TEF} = \sqrt{\frac{1}{q}} I_d$$

$$I_{TEF} = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot 10$$

$$I_{TEF} = 7,07 \text{ A}$$

- c) Şebekeden çekilen efektif faz akımı,

$$I_f = I_h = I_d = 10$$

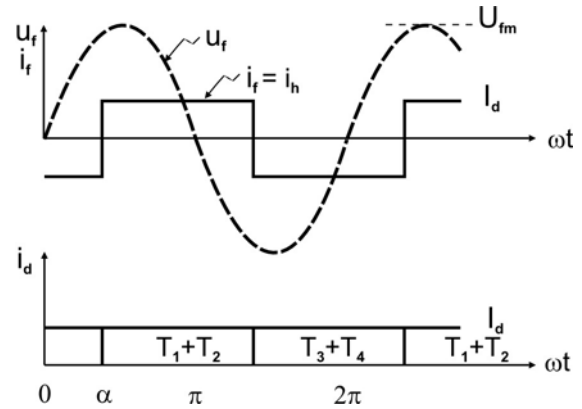
$$I_f = 10 \text{ A}$$

- d) Giriş ve çıkıştaki aktif güçlerin eşitliğinden,

$$q U_f I_{f1} \cos \alpha = U_{da} I_d = U_d I_d \cos \alpha$$

$$2 \cdot 110 \cdot I_{f1} \cos 45^\circ = 1401$$

$$\Rightarrow I_{f1} = 9 \text{ A}$$



- e) Şebekeden çekilen reaktif güç,

$$Q_g = q U_f I_{f1} \sin \alpha = 2 \cdot 110 \cdot 9 \cdot \sin 45^\circ$$

$$Q_g = 1401 \text{ VAR}$$

- f) Şebekeden çekilen görünen güç,

$$S_g = q U_f I_f = 2 \cdot 110 \cdot 10$$

$$S_g = 2200 \text{ VA}$$

Güçkatsayısı,

$$GK = \frac{P_g}{S_g} = \frac{1401}{2200}$$

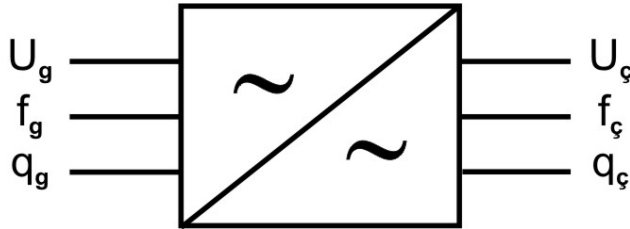
$$GK = 0,637$$

bulunur.

## 6. AC-AC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER / AC KIYICILAR

### GİRİŞ

#### AC-AC Dönüştürücülerin Genel Özellikleri



$U_g$  : AC girişteki efektif faz gerilimi

$f_g$  : Frekans

$q_g$  : Faz sayısı

$U_{\ç}$  : AC çıkıştaki efektif faz gerilimi,  $U_{\ç} = f(\alpha)$

$U_{\çmax}$  : Maksimum AC çıkış gerilimi,

$$\alpha = 0 \Rightarrow U_{\ç} = U_{\çmax} = U_g$$

$\alpha$  : Faz Kesme veya Faz Kontrol açısı

: Gecikme Açısı veya Tetikleme Gecikmesi

$U_1 = U_2 = U_3 = U_f$  : Efektif Faz Gerilimi

$U_{12} = U_{21} = U_{13} = U_h$  : Efektif Fazlar Arası Gerilim

$U_{fm}$  : Faz Gerilimi Maksimum Değeri

$U_{hm}$  : Hat (Fazlar Arası) Gerilimi Maksimum Değeri

AC-AC dönüştürücülerde, frekans ve faz sayısı sabit olmak üzere, efektif çıkış geriliminin kontrolü yapıldığında, bu dönüştürücüye **AC Ayarlayıcı** veya **AC Kıyıcı** denilmektedir. Enerjinin kontrolü değil de sadece anahtarlanması veya açılıp-kapatılması amaçlandığında ise, devreye **Statik AC Şalter** denilmektedir.

Endüstride **çok yaygın** olarak kullanılan dönüştürücü türüdür.

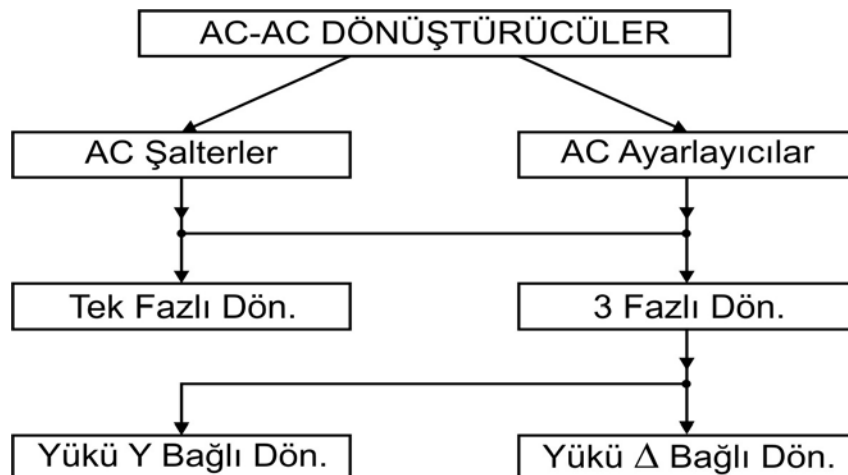
#### Temel Özellikleri

- Kontrol lineer değildir.
- **Faz Kontrol Yöntemi** ile kontrol sağlanır.
- Çıkış gerilimi sabit frekans altında **efektif olarak** kontrol edilir.
- Hem şebeke hem de yük tarafında yüksek değerli **harmonikler** oluşur.
- **Doğal komütasyonludur.**
- Tristör veya triyaklar ile gerçekleştirilir.

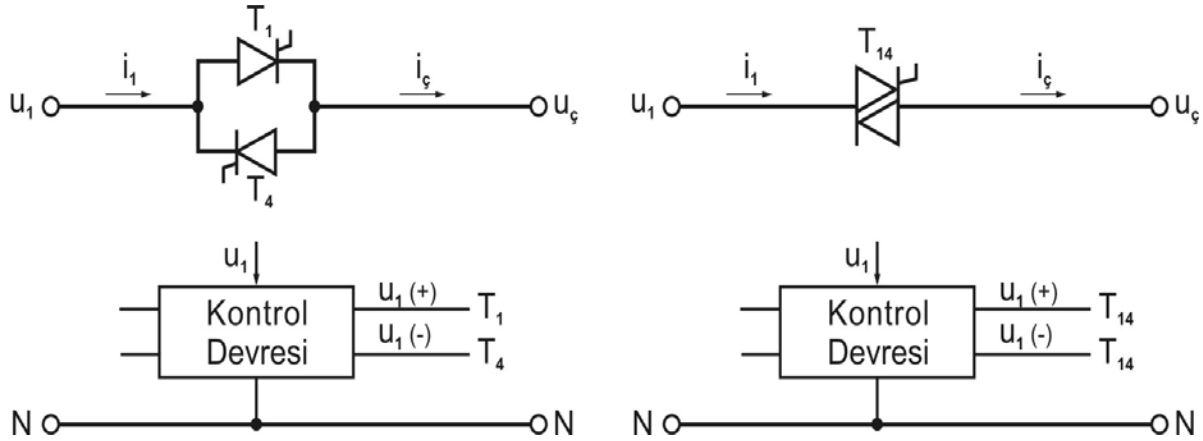
#### Başlıca Uygulama Alanları

- Bütün **omik yüklerde** (fırın, ısıtıcı, lamba gibi) güç kontrolü
- Vantilatör karakteristikli **küçük güçlü AC motorlarda** (fan, pompa, kompresör gibi) hız kontrolü
- Statik **AC regülatörlerde** gerilim kontrolü
- Statik **AC şalterlerde** devreyi açma ve kapama
- Statik **reaktif güç kompanzasyonu**

#### AC-AC Dönüştürücülerin Genel Olarak Sınıflandırılması



## AC Kıyıcıların Temel Kontrol Özellikleri



**Faz Kontrol Devreleri**, temel olarak bir AC gerilimin **Sıfır Noktaları** ile **Pozitif ve Negatif Aralıklarını** algılayarak, bu aralıklarda  $\alpha$  **kontrol açısı** ayarlanabilen biri Pozitif ve diğeri Negatif olmak üzere 2 sinyal üretir. Doğrultucu ve AC kıyıcılarda, **Pozitif Sinyal** ilgili fazın Pozitif Elemanına ve **Negatif Sinyal** ilgili fazın Negatif Elemanına verilir. Örneğin, yukarıdaki AC kıyıcı temel devre şemasında,  $u_1$  gerilimini algılayan faz kontrol devresi, bu gerilimin + ve - yarı peryotlarında olmak üzere 2 sinyal üretmekte, bu sinyallerden + olanı  $T_1$  ve - olanı  $T_4$  tristörünün tetiklenmesinde kullanılmaktadır.

**Triyak**, bilindiği gibi **ters-paralel bağlı 2 tristöre** eşdeğerdir. Ancak, sadece bir soğutucu ile sadece bir kapıya sahiptir. AC kıyıcı devrelerinde, triyakın gücünün yettiği yere kadar, aynı faza ait ters-paralel bağlı 2 tristör yerine daima bir adet triyak kullanılmaktadır. Böylece, AC kıyıcıların maliyeti düşmekte ve kontrolü kolaylaşmaktadır. Bir faza ait + ve - sinyallerin her ikisi de, o faza ait triyakın kapısına uygulanmalıdır. Bu durum da, yukarıda verilen triyaklı temel devre şemasında görülmektedir.

**Endüstriyel olarak**, AC kıyıcılar ısı ve ışık kontrolü amacıyla **daha çok omik yüklerde** kullanılmaktadır.

**AC kıyıcılar**, bütün güç elemanlarının sürekli sinyallerle tetiklenmesi veya yine bütün güç elemanlarının daima  $\alpha = 0$  olarak tetiklenmesi ile **AC Şalterler** olarak kullanılmaktadır.

**AC şalterlerde**, devreye giriş ve çıkışlarda, AC şebekeden geçici harmonikler çekilir. Bunu önlemek için **Sıfır Gerilim Şalteri** kullanılır. Sıfır Gerilim Şalterleri, daima (+) yarım dalganın başında devreye girer ve (-) yarım dalganın sonunda devreden çıkar.

**AC kıyıcılarda**, kesme açısı  $\alpha$  ile güç kontrolü yapıldığı sürece, yük omik dahi olsa şebekeden reaktif güç çekilir ve daima harmonikler oluşur. Bu mahsuru en aza indirebilmek için, sadece omik yüklerde **Dalga Paketleri Yöntemi** ile güç kontrolü yapılır. Bu yöntemde, örneğin, AC şebekenin 10 tam peryodu bir kontrol peryodu olarak seçilir. 10 peryot içerisinde yüke uygulanacak olan tam peryot sayısı değiştirilerek güç kontrolü sağlanır. Örneğin, kontrol oranı 3/10 için, şebekenin 10 peryodundan 3'ü yüke uygulanır. Bu yöntem motor kontrolünde kullanılamaz.

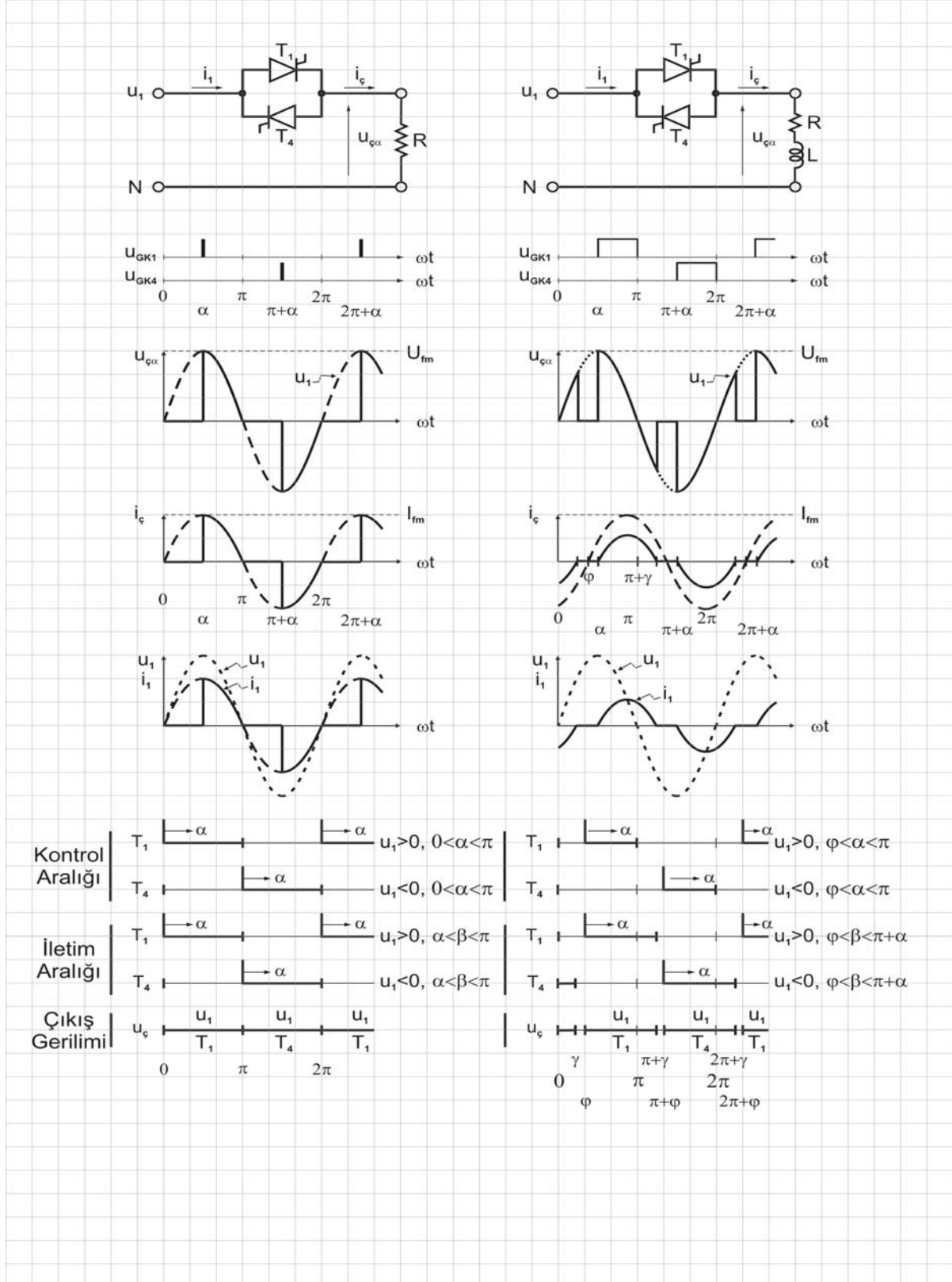


# TEK FAZLI AC KİYİCİLER

## Devre Şeması ve Temel Dalga Şekilleri

### Omik Yüklü Tek Fazlı AC Kıyıcı

### Omik-Endüktif Yüklü Tek Fazlı AC Kıyıcı



## Çıkış Gerilimi İfadeleri

### Omik Yüklü Tek Fazlı AC Kıyıcı

$$\begin{aligned}
 U_{\varphi}^2 &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{\text{fm}}^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{\pi} \frac{1}{2} U_{\text{fm}}^2 \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2(\omega t)) d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{2\pi} U_{\text{fm}}^2 \left[ (\omega t) - \frac{1}{2} \sin 2(\omega t) \right]_{\alpha}^{\pi} \\
 &= \frac{1}{2\pi} U_{\text{fm}}^2 \left[ \pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right] \\
 &= \frac{U_{\text{fm}}^2}{2} \left[ \frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha) \right] \\
 &= U_f^2 \left[ \frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha) \right] \\
 U_{\varphi} &= \frac{U_{\text{fm}}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha)} \\
 &= U_f \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha)}
 \end{aligned}$$

### Çıkış Akım ve Gücü

$$\begin{aligned}
 I_{\varphi} &= I_f = U_{\varphi} / R \\
 P_{\varphi} &= U_{\varphi} I_{\varphi} = U_{\varphi}^2 / R \\
 \alpha &= 0 \text{ için,} \\
 U_{\varphi} &= U_{\varphi \text{ max}} = U_f \\
 I_{\varphi} &= I_f = I_{\varphi \text{ max}} = I_{f \text{ max}} = U_f / R \\
 P_{\varphi} &= P_{\varphi \text{ max}} = U_{\varphi \text{ max}} I_{\varphi \text{ max}} = U_f I_{\varphi \text{ max}} = U_f^2 / R
 \end{aligned}$$

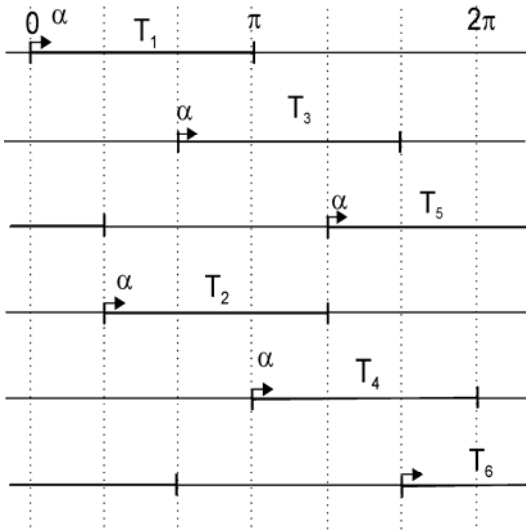
### Kısa Açıklama

- **Faz kesme kontrolü**, tek fazlı AC kıyıcılarda, faz geriliminin sıfır noktaları referans ( $\alpha=0$ ) olmak üzere yapılır.
- **Çıkış gerilimi**, tek fazlı AC kıyıcılarda, faz gerilimi ile belirlenir.
- **Omik yükte**, genellikle  $\alpha$  anında kısa süreli sinyaller ile tetikleme sağlanır.  $\alpha$  anında tetiklenerek ilettime giren bir tristör,  $\pi$  anında akımın sıfır olmasıyla kesime girer. Bir elemanın kontrol aralığı  $0 < \alpha < \pi$  ve iletim aralığı  $\alpha < \beta < \pi$  şeklindedir.
- **Omik-endüktif yükte**, genellikle  $\alpha$ - $\pi$  aralığında uzun süreli sinyaller ile tetikleme sağlanır.  $\alpha$  anında tetiklenerek ilettime giren bir tristör,  $\pi + \gamma$  anında akımın sıfır olmasıyla kesime girer. Bir elemanın kontrol aralığı  $\varphi < \alpha < \pi$  ve iletim aralığı  $\varphi < \beta < \pi + \gamma$  şeklindedir.
- Her iki yük durumunda da,  $\alpha$  açısına bağlı olarak, elemanların iletiminde ve çıkış geriliminde **boşluklar** oluşur.
- Her iki yük durumunda da, AC şebekeden çekilen akımın **DC bileşeni** yoktur. Ancak,  $\alpha$  açısına bağlı olarak, akımda **faz farkı ve harmonikler** oluşur.
- Tek fazlı AC kıyıcılarda, **güç elemanları** faz gerilimine maruz kalır.

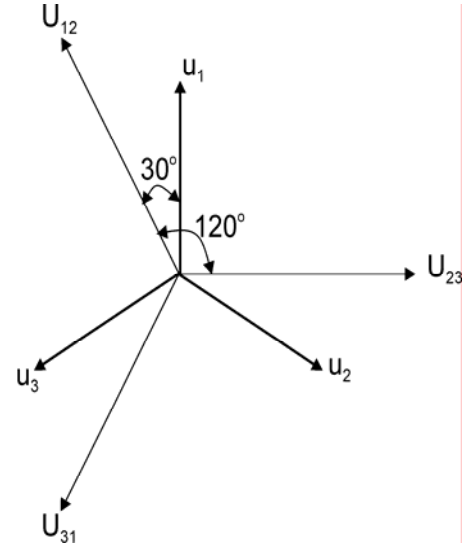
## 3 FAZLI AC KIYICILAR

### 3 Fazlı AC Kıyıcıların Temel Prensipleri

3 Fazlı bir Sistemde Kontrol Aralıkları



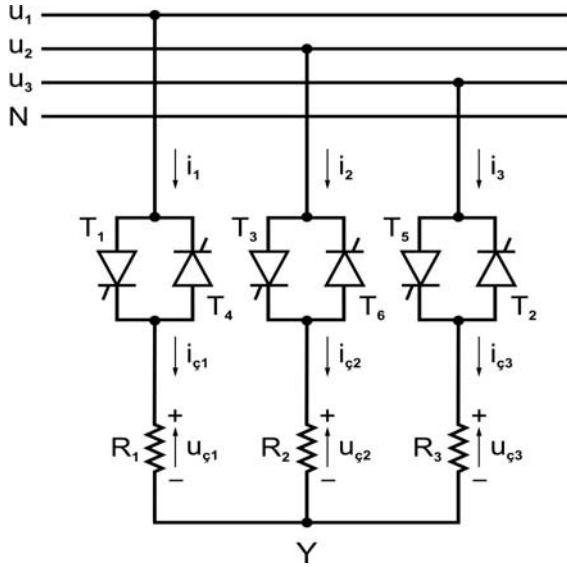
3 Fazlı bir Sistemin Vektörel Diyagramı



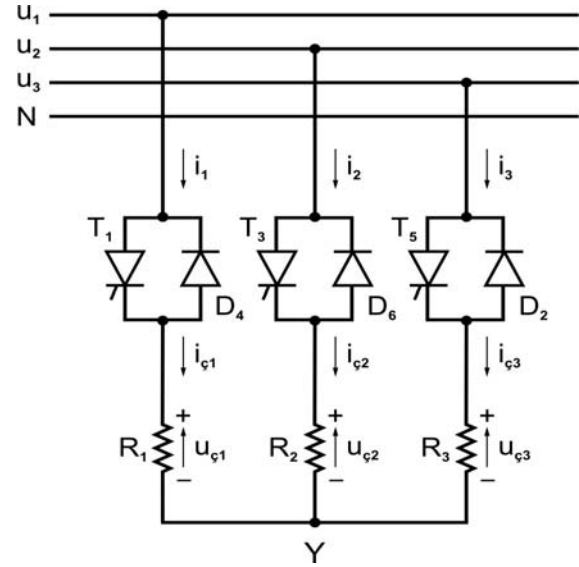
#### Açıklama

- **Kontrol aralıkları**, genellikle faz gerilimlerine göre belirlenir.
- Örneğin,  $U_1$ ,  $U_2$  ve  $U_3$  **faz gerilimlerin** pozitif aralıkları sırasıyla  $T_1$ ,  $T_3$  ve  $T_5$  negatif aralıkları ise  $T_4$ ,  $T_6$  ve  $T_2$  tristörlerinin kontrol aralıkları olarak kullanılabilir.
- Ancak, faz ve fazlar arası gerilimler arasındaki ilişkiler dikkate alınarak, kontrol aralıkları faz veya fazlar arası gerilimlere göre tasarlanabilir.
- $U_{12}$ ,  $U_{23}$  ve  $U_{31}$  **fazlar arası gerilimleri**, sırasıyla  $U_1$ ,  $U_2$  ve  $U_3$  faz gerilimlerinden  $30^\circ$  ileridedir.
- $U_{13}$ ,  $U_{21}$  ve  $U_{32}$  **fazlar arası gerilimleri** ise, sırasıyla  $U_1$ ,  $U_2$  ve  $U_3$  faz gerilimlerinden  $30^\circ$  geridedir.
- **Çıkış gerilimleri**, iletimde olan elemanlara göre, faz ve/veya fazlar arası gerilimler kullanılarak belirlenir.
- **Genellikle omik olan yük**, Y veya  $\Delta$  bağlı olabilmekte ve her ikisinde de maliyet ve kontrol kolaylığı açısından farklı devre yapıları oluşturulabilmektedir.
- **Güç Elemanları**, genellikle fazlar arası gerilimlere maruz kalır.

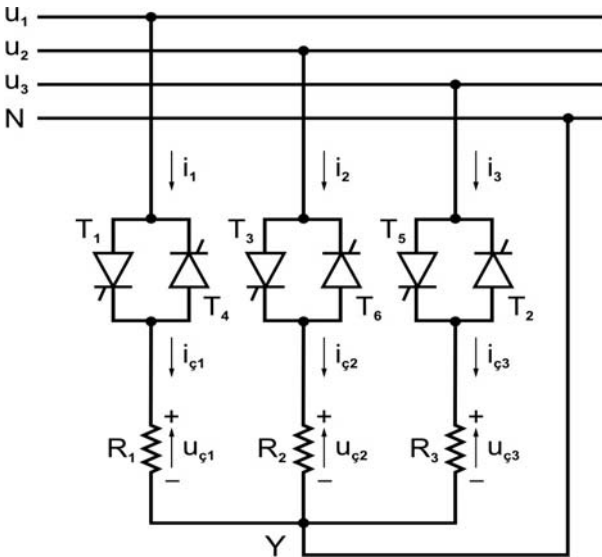
## Yükü Y Bağlı 3 Fazlı AC Kıyıcıların Muhtelif Devre Şemaları



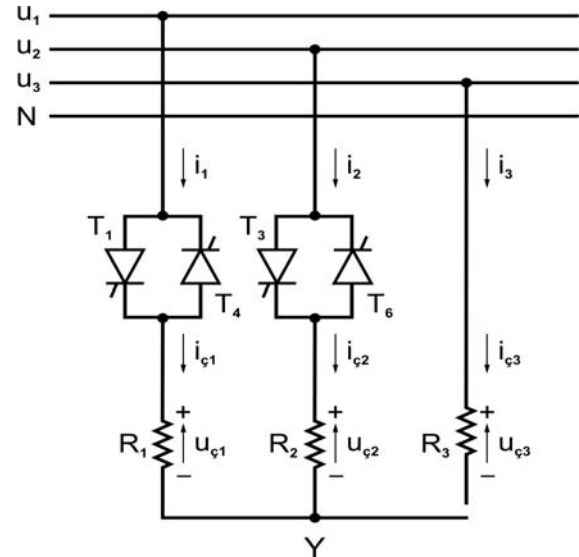
- Güç elemanları AC şebeke faz girişlerine bağlıdır.
- **Yükün Y bağı olduğu genel devre şemasıdır.**
- Y noktası N ile bağlı değildir.
- Kontrol faz gerilimlerine göre yapılır.
- Elemanlar fazlar arası gerilimlere maruz kalır.



- Güç elemanları AC şebeke faz girişlerine bağlıdır.
- **Her bir fazın negatif elemanları olarak diyotlar kullanılmıştır.**
- Fazlar arası geçmek zorunda olan akımlar ancak tristörler üzerinden devreyi tamamlayabileceğinden, aynı kontrol sağlanır.
- Burada amaç, maliyetin azaltılmasıdır.
- Kontrol faz gerilimlerine göre yapılır.
- Elemanlar fazlar arası gerilimlere maruz kalır.

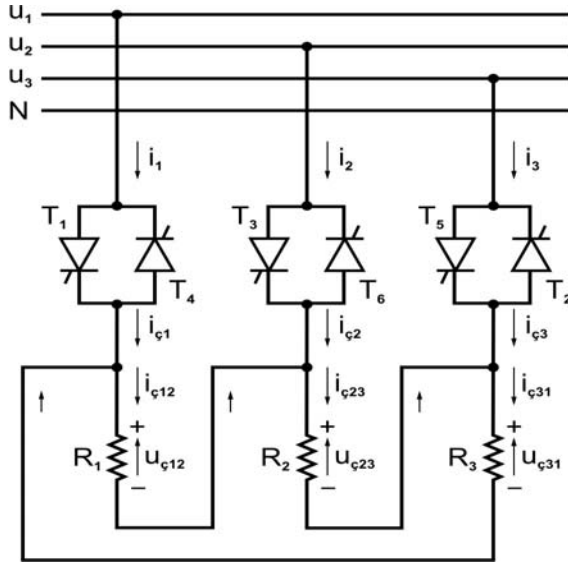


- Güç elemanları AC şebeke faz girişlerine bağlıdır.
- **Y noktası N ile bağlıdır.**
- Her bir faz kolu, bağımsız olarak tek fazlı bir AC kıyıcı gibi çalışır.
- Kontrol faz gerilimlerine göre yapılır.
- Elemanlar faz gerilimlerine maruz kalır.

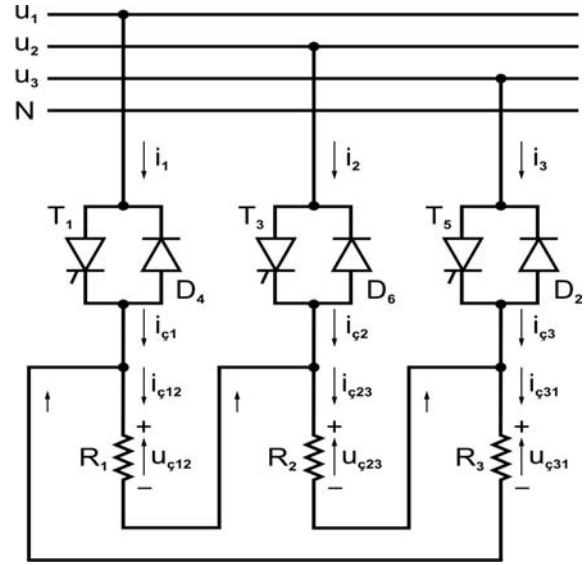


- Güç elemanları AC şebeke faz girişlerine bağlıdır.
- **Herhangi bir fazın elemanları olarak diyotlar kullanılmıştır.**
- Fazlar arası geçmek zorunda olan akımlar ancak tristörler üzerinden devreyi tamamlayabileceğinden, aynı kontrol sağlanır.
- Burada da amaç, maliyetin azaltılmasıdır.
- Kontrol faz gerilimlerine göre yapılır.
- Elemanlar fazlar arası gerilimlere maruz kalır.

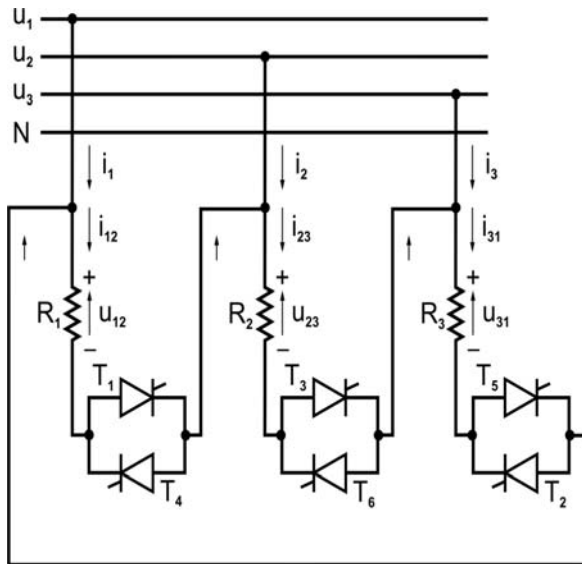
## Yükü $\Delta$ Bağlı 3 Fazlı AC Kıyıcıların Muhtelif Devre Şemaları



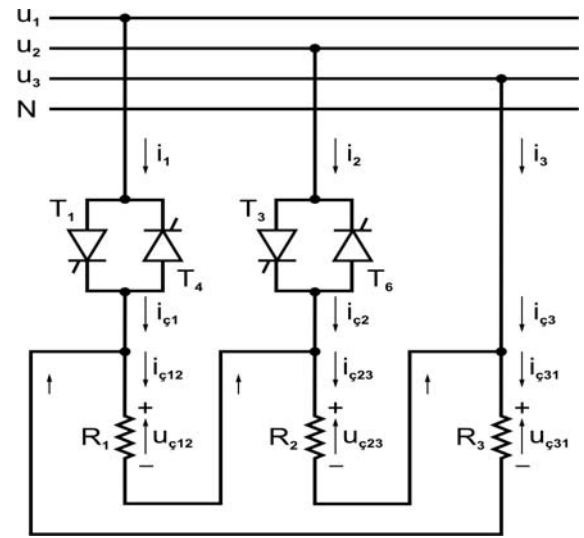
- Güç elemanları AC şebeke faz girişlerine bağlıdır.
- **Yükün  $\Delta$  bağlı olduğu genel devre şemasıdır.**
- Kontrol faz gerilimlerine göre yapılır.
- Elemanlar fazlar arası gerilimlere maruz kalır.



- Güç elemanları AC şebeke faz girişlerine bağlıdır.
- **Her bir fazın negatif elemanları olarak diyotlar kullanılmıştır.**
- Fazlar arası geçmek zorunda olan akımlar, ancak tristörler üzerinden devreyi tamamlayabileceğinden, aynı kontrol sağlanır.
- Burada amaç, maliyetin azaltılmasıdır.
- Kontrol faz gerilimlerine göre yapılır.
- Elemanlar fazlar arası gerilimlere maruz kalır.



- **Güç elemanları  $\Delta$  yükün fazlarına seri bağlıdır.**
- Her bir faz kolu, fazlar arası gerilim ile fakat bağımsız olarak tek fazlı bir AC kıyıcı gibi çalışır.
- Kontrol fazlar arası gerilimlere göre yapılır.
- Elemanlar fazlar arası gerilimlere maruz kalır.



- Güç elemanları AC şebeke faz girişlerine bağlıdır.
- **Herhangi bir fazın elemanları olarak diyotlar kullanılmıştır.**
- Fazlar arası geçmek zorunda olan akımlar, ancak tristörler üzerinden devreyi tamamlayabileceğinden, aynı kontrol sağlanır.
- Burada da amaç, maliyetin azaltılmasıdır.
- Kontrol faz gerilimlerine göre yapılır.
- Elemanlar fazlar arası gerilimlere maruz kalır.

## AKTİF GÜÇ DENGESİ

Devre kayıpları ihmal edildiğinde, bir AC kırıncının **giriş ve çıkışındaki aktif güçler** birbirine eşit olur. AC şebeke tarafındaki aktif güç, akımın efektif temel bileşeni ve bu bileşenin kayma faktörü ile hesaplanır. AC çıkıştaki aktif güç ise, yükün omik olması durumunda, efektif çıkış gerilimi ve yükün direnci ile bulunabilir. Bu durumda, **güç dengesi**,

$$P_g = P_\varphi$$

$$q U_f I_{f1} \cos \varphi_1 = q (U_\varphi^2 / R)$$

şeklinde ifade edilebilir.

## BİR ELEMANIN MARUZ KALDIĞI AKIM VE GERİLİM

**AC şalter veya ayarlayıcılarda** faz başına öncelikle bir adet triyak veya ters-paralel bağlı 2 adet tristör kullanılmaktadır. Kontrollü veya kontrolsüz hat akımının tamamı bir triyaktan veya yarım dalgası bir tristörden geçer. Kontrolsüz akım, kontrollü akımın  $\alpha = 0$  olan özel bir durumdur.

**Tam dalga durumunda** bir triyaktan geçen doğrultulmuş ortalama ve efektif akımlar,

$$I_{TAV} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_{fm} \sin(\omega t) d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{\pi} I_{fm} [\cos(\omega t)]_{\alpha}^{\pi}$$

$$= \frac{1}{\pi} I_{fm} (1 + \cos \alpha)$$

$$I_{TAV} = \frac{1}{\pi} \sqrt{2} I_{f \max} (1 + \cos \alpha)$$

$$\Rightarrow \alpha = 0 \text{ için, } I_{TAV} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I_{f \max}$$

$$I_{TEF}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_{fm}^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{\pi} \frac{1}{2} I_{fm}^2 \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2(\omega t)) d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{2\pi} I_{fm}^2 \left[ (\omega t) - \frac{1}{2} \sin 2(\omega t) \right]_{\alpha}^{\pi}$$

$$I_{TEF}^2 = I_{f \max}^2 \left[ \frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha) \right]$$

$$I_{TEF} = I_{f \max} \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha)}$$

$$\Rightarrow \alpha = 0 \text{ için, } I_{TEF}^2 = I_{f \max}^2$$

$$I_{TEF} = I_{f \max}$$

**Yarım dalga durumunda** bir tristörden geçen ortalama ve efektif akımlar,

$$I_{TAV} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2} I_{f \max} (1 + \cos \alpha)$$

$$I_{TEF}^2 = \frac{1}{2} I_{f \max}^2 \left[ \frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha) \right]$$

$$I_{TEF} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{f \max} \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha)}$$

$$\alpha = 0 \text{ için,}$$

$$I_{TAV} = \frac{1}{\pi} \sqrt{2} I_{f \max}$$

$$I_{TEF}^2 = \frac{1}{2} I_{f \max}^2$$

$$I_{TEF} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{f \max}$$

şeklinde hesaplanır.

**Güç elemanları**, tek fazlı ve sadece Y noktası N ile bağlı olan 3 fazlı AC kırıyıcılarda, faz gerilimlerine maruz kalır ve

$$U_{\text{DRM}}, U_{\text{RRM}} > \sqrt{2} U_f$$

şeklinde, diğer bütün 3 fazlı AC kırıyıcılarda fazlar arası gerilimlere maruz kalır ve

$$U_{\text{DRM}}, U_{\text{RRM}} > \sqrt{6} U_f$$

şeklinde seçilir.

## ***KONU İLE İLGİLİ ÇÖZÜLMÜŞ PROBLEMLER***

### **Problem 1**

2,2 kW'lık tek fazlı bir ısıtıcı triyaklı bir AC şalter üzerinden beslenmektedir. AC şebekenin faz gerilimi 220 V olduğuna göre, devre kayıplarını ihmal ederek,

- AC şebeken çekilen faz akımını bulunuz.
- Triyakın ortalama ve efektif akımlarını hesaplayınız.
- Triyakın maruz kaldığı maksimum gerilimi bulunuz.

### **Çözüm**

a) AC şebeken çekilen faz akımı,

$$P = q \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

$$2,2 \cdot 10^3 = 1 \cdot 220 \cdot I_f \cdot 1$$

$$\Rightarrow I_f = 10 \text{ A}$$

b) Triyakın doğrultulmuş ortalama ve efektif akımları,

$$I_{\text{TAV}} = \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_f$$

$$= \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 10$$

$$I_{\text{TAV}} = 9 \text{ A}$$

$$I_{\text{TEF}} = I_f$$

$$I_{\text{TEF}} = 10 \text{ A}$$

c) Triyakın maruz kaldığı maksimum gerilim,

$$U_{\text{Tmax}} = \sqrt{2} \cdot U_f$$

$$= \sqrt{2} \cdot 220$$

$$U_{\text{Tmax}} = 311,1 \text{ V}$$

bulunur.

**Problem 2**

Güç katsayısı 0,75 olan 100 kW'lık bir 3 fazlı yük, tristörlü bir AC şalter üzerinden beslenmektedir. AC şebekenin faz gerilimi 220 V olduğuna göre, devre kayıplarını ihmal ederek,

- AC şebeken çekilen faz akımını bulunuz.
- Bir tristörün ortalama ve efektif akımlarını hesaplayınız.
- Bir tristörün maruz kaldığı maksimum gerilimi bulunuz.

**Çözüm**

- a) AC şebeken çekilen faz akımı,

$$P = q \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

$$100 \cdot 10^3 = 3 \cdot 220 \cdot I_f \cdot 0,75$$

$$\Rightarrow I_f = 202 \text{ A}$$

- b) Bir tristörün ortalama ve efektif akımları,

$$I_{TAV} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_f$$

$$= \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 202$$

$$I_{TAV} = 90,93 \text{ A}$$

$$I_{TEF} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_f$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 202$$

$$I_{TEF} = 142,8 \text{ A}$$

- c) Bir tristörün maruz kaldığı maksimum gerilim,

$$U_{Tmax} = \sqrt{6} \cdot U_f$$

$$= \sqrt{6} \cdot 220$$

$$U_{Tmax} = 538,9 \text{ V}$$

bulunur.

**Problem 3**

33 kW'lık 3 fazlı bir ısıtıcı triyaklı bir AC şalter üzerinden beslenmektedir. AC şebekenin faz gerilimi 220 V olduğuna göre, devre kayıplarını ihmal ederek,

- AC şebeken çekilen faz akımını bulunuz.
- Bir triyakın ortalama ve efektif akımlarını hesaplayınız.

**Çözüm**

- a) AC şebeken çekilen faz akımı,

$$P = q \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

$$33 \cdot 10^3 = 3 \cdot 220 \cdot I_f \cdot 1$$

$$\Rightarrow I_f = 50 \text{ A}$$

- b) Bir triyakın ortalama ve efektif akımları,



$$\begin{aligned}
I_{TAV} &= \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_f \\
&= \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 50 \\
I_{TAV} &= 45,02 \text{ A}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{TEF} &= I_f \\
I_{TEF} &= 50 \text{ A}
\end{aligned}$$

bulunur.

#### Problem 4

11 kW'lık tek fazlı bir fırın tristörlü bir AC kıyıcı ile kontrol edilmektedir. AC şebekenin faz gerilimi 220 V olduğuna göre, devre kayıplarını ihmal ederek,

- AC şebeken çekilen maksimum faz akımını bulunuz.
- Tristörün maksimum ortalama ve efektif akımlarını hesaplayınız.
- $\alpha=90^\circ$  için, fırının gerilim ve gücünü bulunuz.
- $\alpha=90^\circ$  için, tristörün ortalama ve efektif akımlarını hesaplayınız.

#### Çözüm

a) AC şebeken çekilen maksimum faz akımı,

$$\begin{aligned}
P_{\max} &= q \cdot U_f \cdot I_{f \max} \cdot \cos \varphi \\
11 \cdot 10^3 &= 1 \cdot 220 \cdot I_{f \max} \cdot 1 \\
\Rightarrow I_{f \max} &= 50 \text{ A}
\end{aligned}$$

b) Tristörün maksimum ortalama ve efektif akımları,

$$\begin{aligned}
I_{TAV \max} &= \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{f \max} \\
&= \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot 50 \\
I_{TAV \max} &= 22,51 \text{ A}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{TEF \max} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_{f \max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 50 \\
I_{TEF \max} &= 35,36 \text{ A}
\end{aligned}$$

c)  $\alpha=90^\circ$  için, fırının gerilim ve gücü,

$$\begin{aligned}
U_\varphi &= U_f \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)} \\
&= 220 \sqrt{\frac{1}{\pi} \left( \pi - \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \sin 2 \frac{\pi}{2} \right)} \\
U_\varphi &= \frac{220}{\sqrt{2}} \text{ V} \\
P_{\varphi \max} &= q \cdot R \cdot I_{f \max}^2 \\
11 \cdot 10^3 &= 1 \cdot R \cdot (50)^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow R &= \frac{11 \cdot 10^3}{(50)^2} \\
R &= \frac{220}{50} \Omega \\
P_\varphi &= \frac{U_\varphi^2}{R} \\
&= \left( \frac{220}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot \frac{50}{220} \\
P_\varphi &= 5,5 \text{ kW}
\end{aligned}$$

d)  $\alpha=90^\circ$  için, tristörün ortalama ve efektif akımları,

$$\begin{aligned} I_{TAV} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{2} I_{f \max} (1 + \cos \alpha) \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{2} \cdot 50 \cdot (1 + \cos 90^\circ) \\ I_{TAV} &= 11,25 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{TEF} &= \frac{1}{\sqrt{2}} I_{f \max} \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha)} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 50 \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \sin(2 \frac{\pi}{2}))} \\ I_{TEF} &= 25 \text{ A} \end{aligned}$$

### Problem 5

4,4 kW'lık tek fazlı bir ısıtıcı triyaklı bir AC kıyıcı ile kontrol edilmektedir. AC şebeke faz gerilimi 220 V olup, devre kayıpları ihmal edilecektir.  $\alpha=0^\circ$  ve  $\alpha=90^\circ$  için,

- Yük ve triyak gerilimlerini bulunuz.
- Yük, triyak ve faz akımlarını hesaplayınız.
- Yük ve triyakta harcanan güçler ile şebekeden çekilen güçleri hesaplayınız.

### Çözüm

a)  $\alpha=0^\circ$  için,

$$\begin{aligned} U_\varphi &= U_{\varphi \max} = U_f \\ U_\varphi &= 220 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_t &= U_{t \min} \\ U_t &= 0 \text{ V} \end{aligned}$$

$\alpha=90^\circ$  için,

$$\begin{aligned} U_\varphi &= U_f \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha)} \\ &= 220 \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \sin(2 \frac{\pi}{2}))} \\ U_\varphi &= \frac{220}{\sqrt{2}} = 155,6 \text{ V} \end{aligned}$$

Sinüsoidal gerilim  $0^\circ$ - $90^\circ$  aralığında triyak ve  $90^\circ$ - $180^\circ$  aralığında yükün uçlarındadır.

$$U_t = U_\varphi = 155,6 \text{ V}$$

yazılabilir. Aynı zamanda,

$$U_f^2 = U_\varphi^2 + U_t^2$$

şeklinde de ifade edilebilir.

b)  $\alpha=0^\circ$  için,

$$\begin{aligned} I_\varphi &= I_t = I_f = I_{f \max} \\ &= \frac{P_{\max}}{U_f} \\ &= \frac{4,4 \cdot 10^3}{220} \\ I_\varphi &= I_t = I_f = 20 \text{ A} \end{aligned}$$

$\alpha=90^\circ$  için,

$$\begin{aligned} I_\varphi &= I_t = I_f \\ I_\varphi &= I_{f \max} \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha)} \\ &= 20 \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \sin(2 \frac{\pi}{2}))} \\ I_\varphi &= I_t = I_f = \frac{20}{\sqrt{2}} = 14,14 \text{ A} \end{aligned}$$

c)  $\alpha=0^\circ$  için,

$$P_t = 0$$

$$\Rightarrow P_g = P_\varphi = 4,4 \text{ kW}$$

$\alpha=90^\circ$  için,

$$P_t = 0$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow P_g = P_\varphi &= U_\varphi I_\varphi = U_\varphi^2 / R \\ &= \frac{220}{\sqrt{2}} \frac{20}{\sqrt{2}}\end{aligned}$$

$$\Rightarrow P_g = P_\varphi = 2,2 \text{ kW}$$

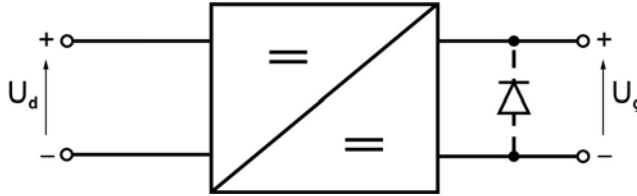
**Not:** Bir AC kırıyıcıda, efektif olarak triyakın gerilim ve akımının çarpımıyla, triyakta harcanan güç bulunamaz. Triyakın gerilim ve akımı eşzamanlı değildir.

Bir dirençte ise, gerilim ve akım eşzamanlı olduğundan, bu ikisinin çarpımı güce eşittir.

## 7. DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER / DC KIYICILAR

### GİRİŞ

#### DC-DC Dönüştürücülerin Genel Özellikleri



$U_d$  : Girişteki DC kaynak gerilimi

$U_ç$  : Çıkıştaki ortalama DC gerilim,  $U_ç = f(\lambda)$

$\lambda$  : Darbe / Peryot Oranı, Doluluk Oranı

: Bağlı İletim Süresi

$D$  : Serbest Geçiş Diyodu

#### Başlıca Uygulama Alanları

- DC motor kontrolü
- Anahtarlama güç kaynakları
- Akümülatör şarjı
- Galvanoteknikle kaplama
- DC motor alan besleme
- DC kaynak makineleri
- DC regülatörler
- DC şalterler
- DC gerilim kaynakları

Endüstride **yüksek frekanslı devreler** olarak bilinen ve son yıllarda **kullanımı yaygınlaşan** dönüştürücü türüdür.

#### Temel Özellikleri

- Kontrol lineerdir.
- **DC PWM Yöntemi** ile kontrol sağlanır.
- **DC PWM kontrolü**, en kolay kontrol yöntemi olarak bilinir.
- Çıkış gerilimi **ortalama olarak** kontrol edilir.
- **Yüksek frekanslı** devreler olarak bilinir.
- Hem giriş hem de yük tarafında ciddi **dalgalanmalar** oluşabilir. Ancak, bu dalgalanmalar kolayca düzeltilebilir.
- **Zorlamalı komütasyonludur.**
- Genel olarak, yüksek güç ve düşük frekanslarda **SCR**, orta güç ve orta frekanslarda **BJT**, düşük güç ve yüksek frekanslarda **MOSFET**, kullanılır. **IGBT** ise, ortanın üzerindeki güç ve frekanslarda kullanılır.

#### DC-DC Dönüştürücülerin Genel Olarak Sınıflandırılması

Anahtarlanan endüktansların enerji aktarımı prensibine göre çalışan **DC-DC dönüştürücüler**,

1. Endüktanslı ( temel, izolasyonsuz, tek çıkışlı)
2. Transformatörlü ( izolasyonlu, tek veya çok çıkışlı )

olmak üzere 2 genel gruba ayrılmaktadır. **Endüktanslı dönüştürücülerin**,

- a) Düşürücü ( Buck )
- b) Yükseltici ( Boost )
- c) Düşürücü-Yükseltici ( Buck-Boost )

olmak üzere 3 temel türü bulunmaktadır. Bu kaynakların tasarımı transformatörlü olanlardan daha kolaydır. Ancak, en önemli dezavantajları giriş ve çıkış arasında izolasyonunun olmamasıdır. **Transformatörlü dönüştürücülerin ise**,

- a) Geri Dönüslü ( Fly Back )
- b) İleri Yönlü ( Forward )
- c) Tam Köprü ( Full Bridge )
- d) Yarım Köprü ( Half Bridge )
- e) Push–Pull ( Push-Pull )

türleri mevcuttur. Bu kaynakların en önemli özelliği, giriş ile çıkış arasında izolasyonun olması ve çok sayıda çıkışın elde edilebilmesidir. Ayrıca, bu kaynaklar prensip olarak endüktanslı temel dönüştürücülerden herhangi birisinin özelliğini taşır.

**DC kıyıcılar**, bir endüktans gerektirmeden, bir DC gerilimi yüksek frekansta kıyarak çıkıştaki ortalama DC gerilimi giriş geriliminin altında olmak üzere ayarlayan, temel olarak düşürücü türe giren ve yaygın olarak DC motor kontrolünde kullanılan dönüştürücüler olarak bilinmektedir. DC kıyıcıların, tek, 2 ve 4 bölge olarak çalışan türleri mevcuttur.

## DC-DC Dönüştürücülerde Kontrol Yöntemleri

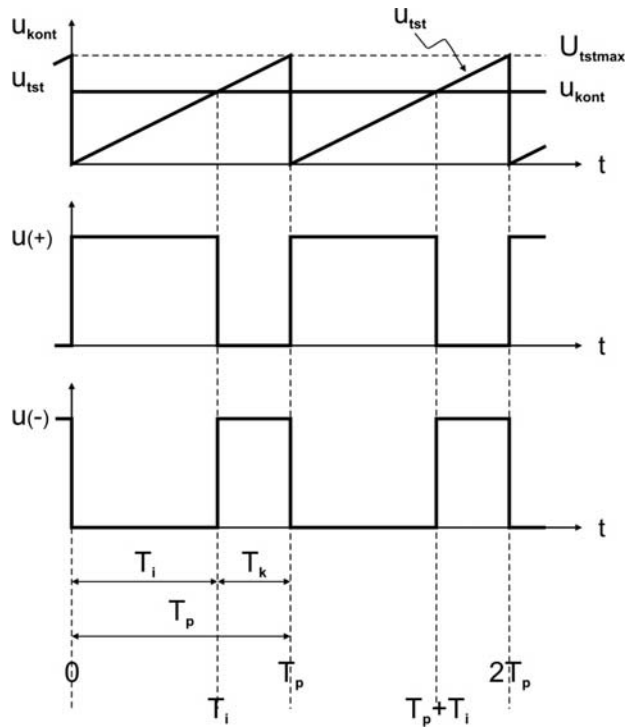
Prensip olarak DC-DC dönüştürücülerin kontrolü, bir yarı iletken güç anahtarının bir periyot içerisindeki bağıl iletim süresi  $\lambda$  ayarlanarak yapılır. Bu kontrol, oldukça kolay bir şekilde, bir testere dişi sinyal ile ayarlanabilen bir kontrol geriliminin karşılaştırılmasıyla sağlanır. Burada,  $\lambda$  bağıl iletim süresi,

$$\lambda = T_i / T_p = U_{kont} / U_{tstmax}$$

şeklinde hesaplanabilir.  $\lambda$  bağıl iletim süresi ve çıkış geriliminin kontrolü, aşağıda verilen 2 temel şekilde yapılmaktadır.

1. Sabit frekans altında darbe genişliği değiştirilerek yapılmakta ve buna **Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM, PWM)** denilmektedir.
2. Darbe genişliği sabit tutularak frekansın değiştirilmesi ile yapılmakta ve buna **Frekans Modülasyonu (FM)** denilmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda, giriş ve çıkıştaki dalgalanmaların filtre edilebilmesi açısından, frekansın sabit kalması istenmekte ve **yaygın olarak PWM yöntemi** kullanılmaktadır.



$T_i$  : İletim Süresi veya Darbe Genişliği

$T_k$  : Kesim Süresi

$T_p$  : Darbe veya Anahtarlama Periyodu

$f_p$  : Darbe veya Anahtarlama Frekansı

$$T_p = T_i + T_k$$

$$f_p = 1 / T_p$$

$$\lambda = T_i / T_p$$

$$T_i = \lambda T_p = T_p - T_k$$

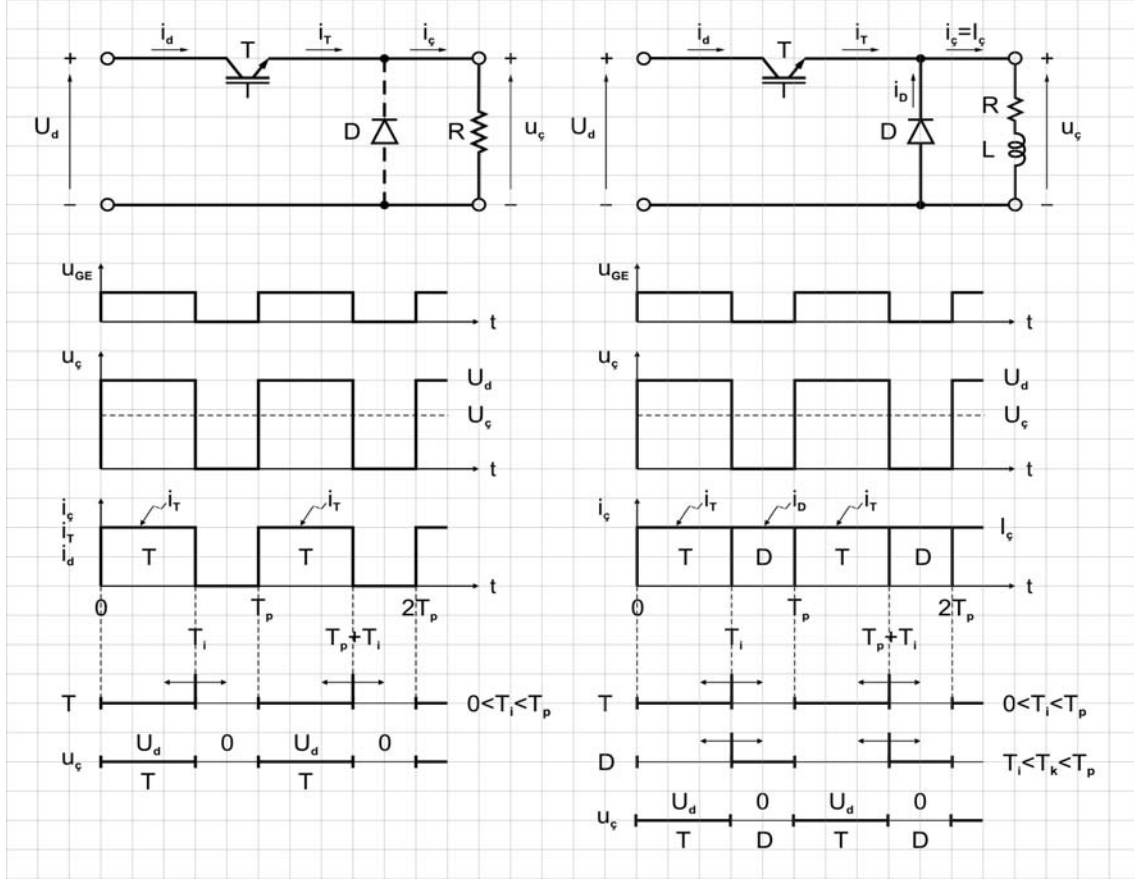
$$T_k = (1 - \lambda) T_p = T_p - T_i$$

# TEK BÖLGE Lİ TEMEL DC KİYİCİ LAR

## Devre Şeması ve Temel Dalga Şekilleri

### Omik Yüklü Temel DC Kıyıcı

### Omik-Endüktif Yüklü Temel DC Kıyıcı



## Akım İfadeleri

### Omik Yüklü Temel DC Kıyıcı

$$I_\phi = U_\phi / R$$

$$i_\phi = i_T = i_d$$

$$I_\phi = I_T = I_d$$

### Omik-Endüktif Yüklü Temel DC Kıyıcı

$$i_\phi = I_\phi$$

$$I_T = \lambda I_\phi$$

$$i_d = i_T$$

$$I_D = (1 - \lambda) I_\phi$$

$$i_\phi = i_T + i_D$$

$$I_d = \lambda I_\phi$$

$$I_\phi = I_T + I_D$$

## Çıkış Gerilimi ve Çalışma Bölgeleri

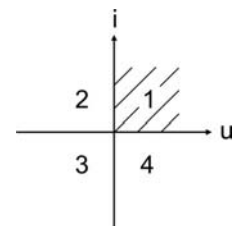
$$U_\phi = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_i} U_d dt$$

$$= \frac{T_i}{T_p} U_d$$

$$U_\phi = \lambda U_d$$

$$0 \leq \lambda \leq 1$$

$$0 \leq U_\phi \leq U_d$$



## Kısa Açıklama

- **DC kıyıcı** prensip olarak bir kontrollü güç elemanı (transistör, **aktif eleman**) ve bir kontrolsüz güç elemanı (diyot, **pasif eleman**) ile elde edilir.
- **Kontrol ve iletim aralığı**, her iki yük durumunda da,  $0 < \lambda < 1$  ve  $0 < T_i < T_p$  şeklindedir.
- **Enerji akışı**, transistör iletimde iken DC kaynaktan DC yüke doğrudur. Diyot iletimde iken ise, DC yükte biriken enerji diyot üzerinden serbestçe dolaşır.
- **Çıkış gerilimi**, her iki yük durumunda da, transistör iletimde iken DC giriş gerilimine ve kesimde iken sıfıra eşittir. Gerilim tek yönlü ve pozitifdir.
- **Giriş akımı**, her iki yük durumunda da, transistör akımına eşittir. Akım da tek yönlüdür.
- **Omik-endüktif yüklerde**, yük akımı kesintisiz ise, bir periyot içerisinde ya transistör ya da diyot iletimdedir. Çıkış akımında boşluk oluşmaz. **Çıkış akımı**, daima transistör ve diyot akımlarının toplamına eşittir.
- **Omik-endüktif yüklerde** yük akımının devamını sağlamak için yüke **ters-paralel bir diyodun** konulması zorunludur. Aksi halde, transistör akımı keserken, endüktans aşırı **emk** üretir ve devre ile elemanlar hasar görür. Uygulamalarda, yük omik bile olsa, emniyet açısından yine diyot konulur.
- Çıkış gerilimi ile giriş ve çıkış akımlarında,  $\lambda$  oranına bağlı olarak **dalgalandırmalar** oluşur. Omik-endüktif yükte, yük endüktansı çıkış akımını düzeltilir.
- **Güç elemanları** DC giriş gerilimine maruz kalır.

## İKİ BÖLGELİ DC KİYICI

### Çıkış Gerilimi ve Akım İfadeleri

$$U_{\varphi} = \frac{1}{T_p} \left[ \int_0^{T_i} U_d dt + \int_{T_i}^{T_p} -U_d dt \right]$$

$$= \frac{1}{T_p} U_d [T_i - (T_p - T_i)]$$

$$= \frac{1}{T_p} [2T_i - T_p] U_d$$

$$U_{\varphi} = (2\lambda - 1) U_d$$

$$0 \leq \lambda \leq 1$$

$$-U_d \leq U_{\varphi} \leq U_d$$

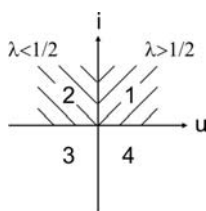
$$i_{\varphi} = i_T + i_D$$

$$I_{\varphi} = I_T + I_D \quad I_T = \lambda I_{\varphi}$$

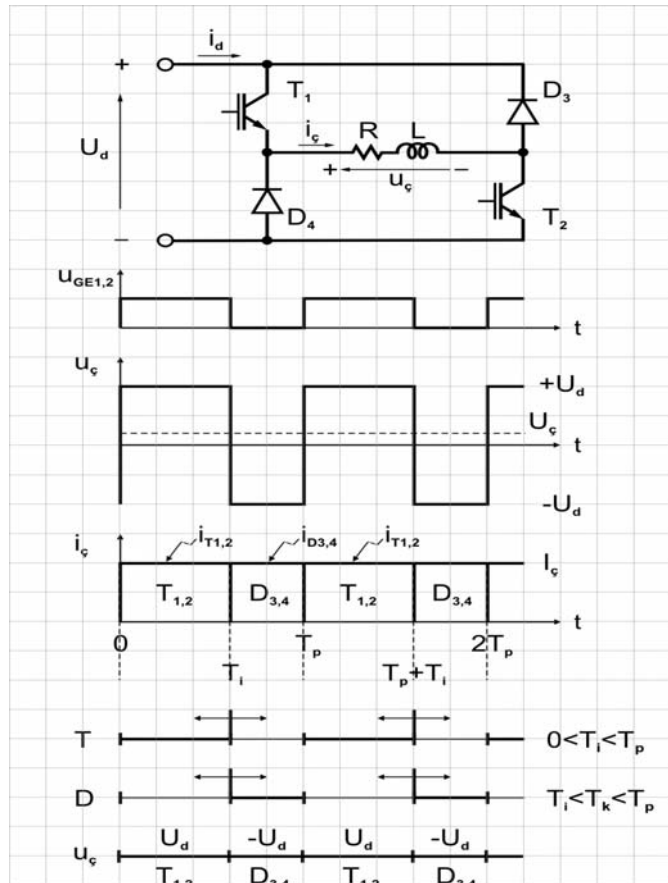
$$i_d = i_T - i_D \quad I_D = (1 - \lambda) I_{\varphi}$$

$$I_d = I_T - I_D \quad I_d = (2\lambda - 1) I_{\varphi}$$

### Çalışma Bölgeleri



### Devre Şeması ve Temel Dalga Şekilleri



## Kısa Açıklama

- **Kontrol ve iletim aralığı**, yine  $0 < \lambda < 1$  ve  $0 < T_i < T_p$  şeklindedir.
- **Bir peryot içerisinde** ya transistör ya da diyot iletimdedir. Çıkış akımında boşluk oluşmaz.
- **Çıkış gerilimi**, transistör iletimde iken DC giriş gerilimine ve diyot iletimde iken negatif olarak DC giriş gerilimine eşittir.
- **Çıkış akımı**, daima transistör ve diyot akımlarının toplamına eşittir.
- **Giriş akımı**, daima transistör akımından diyot akımını çıkarılarak bulunur.
- **Enerji akışı**, transistör iletimde iken DC kaynaktan DC yüke doğru, diyot iletimde iken DC yükten DC kaynağa doğrudur.
- **Ortalama ve sonuç olarak**, transistörlerin iletim aralığı daha büyük iken DC kaynaktan enerji çekilir, diyotların iletim aralığı daha büyük iken DC kaynağa enerji verilir.
- Tek yönlü akım ve çift yönlü gerilim ile **2 bölgeli çalışma** elde edilir. Çalışma bölgeleri, tam kontrollü doğrultucular gibidir.
- **Güç elemanları** DC giriş gerilimine maruz kalır.

## GENELLEŞTİRİLMİŞ SONUÇLAR

### Çıkış Gerilimleri ve Çalışma Modları

Tek bölgeli DC kıyıcılarda,

$$U_{\phi} = \lambda U_d$$

İki bölgeli DC kıyıcılarda,

$$U_{\phi} = (2\lambda - 1) U_d$$

$\lambda = 0$  için,  $U_{\phi} = -U_{\phi m} = -U_d$

$\lambda < 1/2$  için,  $U_{\phi} < 0 \Rightarrow$  **Neg. Çal. Modu**

$\lambda = 1/2$  için,  $U_{\phi} = 0$

$\lambda > 1/2$  için,  $U_{\phi} > 0 \Rightarrow$  **Poz. Çal. Modu**

$\lambda = 1$  için,  $U_{\phi} = U_{\phi m} = U_d$

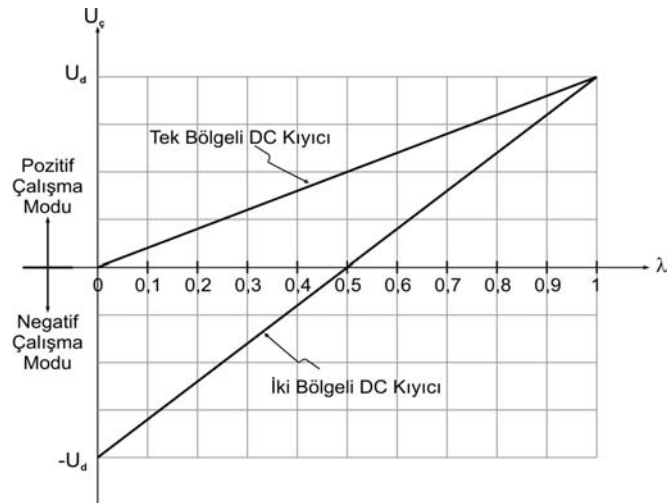
**Poz. Çal. Modu**  $\Rightarrow$  DC kay.  $\xrightarrow{\text{Enerji}}$  DC yük

**Neg. Çal. Modu**  $\Rightarrow$  DC kay.  $\xleftarrow{\text{Enerji}}$  DC yük

2 bölgeli DC kıyıcılar, tek yönlü akım, 2 yönlü gerilim, 2 yönlü enerji akışı ve böylece 2 bölgeli çalışma sağlar.

**ÖNEMLİ NOT :** 2 bölgeli 2 adet kontrollü doğrultucunun ters-paralel bağlanmasıyla 4 bölgeli bir AC-DC dönüştürücü, benzer şekilde 2 bölgeli 2 adet DC kıyıcının ters-paralel bağlanmasıyla, 4 bölgeli bir DC-DC dönüştürücü elde edilebilmektedir. Her ikisinde de 2 yönlü gerilim ve akım ile 2 yönlü enerji akışı sağlanabilmektedir. Araştırmınız.

### Çıkış Gerilimi Değişimleri



### Aktif Güç Dengesi

$$P_g = P_{\phi} \Rightarrow U_d I_d = U_{\phi} I_{\phi}$$

### Elemanlarının Maruz Kaldığı Akım ve Gerilim

$$I_{\phi} = I_T + I_D$$

$$I_{TAV} = \lambda I_{\phi}$$

$$I_{DAV} = (1 - \lambda) I_{\phi}$$

$$I_{TEF} = \sqrt{\lambda} I_{\phi}$$

$$I_{DEF} = \sqrt{(1 - \lambda)} I_{\phi}$$

$$U_{DRM}, U_{RRM} > U_d$$



## KONU İLE İLGİLİ ÇÖZÜLMÜŞ PROBLEMLER

### Problem 1

Giriş gerilimi 250 V ve anahtarlama frekansı 10 kHz olan tek bölgeli bir DC kısıyıcı ile 50 A'lık bir DC motor kontrol edilmektedir. Devre kayıplarını ihmal ederek, çıkış akımının sürekli ve sabit olduğunu kabul ederek, bağlı iletim süresi 3/5 iken,

- Peryot ile transistör ve diyodun iletim sürelerini hesaplayınız.
- Motor gerilimi ile gücünü bulunuz.
- Transistör ve diyodun ortalama akımlarını bulunuz.
- Transistör ve diyodun efektif akımlarını hesaplayınız.
- Giriş akımı ile gücünü bulunuz.

### Çözüm

$$\text{a)} \quad T_p = \frac{1}{f_p} = \frac{1}{10 \cdot 10^3}$$

$$T_p = 100 \mu s$$

$$T_i = \lambda T_p$$

$$= \frac{3}{5} 100$$

$$T_i = 60 \mu s$$

$$T_k = T_p - T_i$$

$$= 100 - 60$$

$$T_k = 40 \mu s$$

$$\text{b)} \quad U_\varphi = \lambda U_d$$

$$= \frac{3}{5} 250$$

$$U_\varphi = 150 \text{ V}$$

$$P_\varphi = U_\varphi \cdot I_\varphi$$

$$= 150 \cdot 50$$

$$P_\varphi = 7,5 \text{ kW}$$

$$\text{c)} \quad I_T = \lambda I_\varphi$$

$$= \frac{3}{5} 50$$

$$I_T = 30 \text{ A}$$

$$I_\varphi = I_T + I_D$$

$$50 = 30 + I_D$$

$$\Rightarrow I_D = 20 \text{ A}$$

$$\text{d)} \quad I_{TEF} = \sqrt{\lambda} I_\varphi$$

$$= \sqrt{\frac{3}{5}} 50$$

$$I_{TEF} = 38,73 \text{ A}$$

$$I_{DEF} = \sqrt{(1-\lambda)} I_\varphi$$

$$= \sqrt{(1-\frac{3}{5})} 50$$

$$I_{DEF} = 31,62 \text{ A}$$

$$\text{e)} \quad I_d = I_T$$

$$I_d = 30 \text{ A}$$

$$P_g = U_d \cdot I_d$$

$$= 250 \cdot 30$$

$$P_g = 7,5 \text{ kW}$$

$$P_g = P_\varphi = 7,5 \text{ kW}$$

## Problem 2

Giriş gerilimi 100 V ve darbe frekansı 20 kHz olan 2 bölgeli bir DC kıyıcı ile 10 A'lık bir DC alıcı beslenmektedir. Çıkış akımının sabit ve devrenin kayıpsız olduğunu kabul ederek,

- $\lambda=7/10$  için, alıcının gerilim ve gücünü, transistör ve diyot ile girişin ortalama akımlarını hesaplayınız. Güç dengesinin gösteriniz ve çalışma modunu belirtiniz.
- $\lambda=2/10$  için, aynı soruları cevaplayınız.

## Çözüm

- a)  $\lambda=7/10$  için,

$$U_{\varphi} = (2\lambda - 1)U_d$$

$$= (2 \cdot \frac{7}{10} - 1) \cdot 100$$

$$U_{\varphi} = 40 \text{ V}$$

$$I_T = \lambda I_{\varphi}$$

$$= \frac{7}{10} 10$$

$$I_T = 7 \text{ A}$$

$$I_D = I_{\varphi} - I_T$$

$$= 10 - 7$$

$$I_D = 3 \text{ A}$$

$$I_d = I_T - I_D$$

$$= 7 - 3$$

$$I_d = 4 \text{ A}$$

$$P_g = U_d \cdot I_d$$

$$= 100 \cdot 4$$

$$P_{\varphi} = 400 \text{ W}$$

$$P_g = P_{\varphi} = 400 \text{ W}$$

Çalışma (+) modda.

Enerji akışı DC kaynaktan DC yüke doğrudur.

Örneğin, akümülatör şarj oluyor, DC kaynaktan enerji çekiyor.

- b)  $\lambda=2/10$  için,

$$U_{\varphi} = (2\lambda - 1)U_d$$

$$= (2 \cdot \frac{2}{10} - 1) \cdot 100$$

$$U_{\varphi} = -60 \text{ V}$$

$$I_T = \lambda I_{\varphi}$$

$$= \frac{2}{10} 10$$

$$I_T = 2 \text{ A}$$

$$I_D = I_{\varphi} - I_T$$

$$= 10 - 2$$

$$I_D = 8 \text{ A}$$

$$I_d = I_T - I_D$$

$$= 2 - 8$$

$$I_d = -6 \text{ A}$$

$$P_g = U_d \cdot I_d$$

$$= 100 \cdot -6$$

$$P_{\varphi} = -600 \text{ W}$$

$$P_g = P_{\varphi} = -600 \text{ W}$$

Çalışma (-) modda.

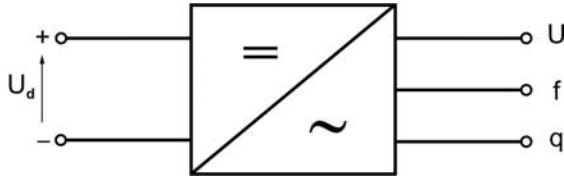
Enerji akışı DC yükten DC kaynağa doğrudur.

Örneğin, uçları ters çevrilmiş bir akümülatör deşarj oluyor, DC kaynağa enerji veriyor.

## 8. DC-AC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER / İNVERTERLER

### GİRİŞ

#### DC-AC Dönüştürücülerin Genel Özellikleri



Endüstride **yüksek frekanslı devreler** olarak bilinen ve son yıllarda **kullanımı yaygınlaşan** dönüştürücü türüdür.

#### Temel Özellikleri

- $U_d$  : Girişteki DC kaynak gerilimi
- $U_\phi$  : Çıkıştaki AC efektif faz gerilimi  
 $U_\phi = f(m_d)$  veya  $U_\phi = f(m_a)$
- $m_d$  : Modülasyon Doluluk Oranı
- $m_a$  : Modülasyon Genlik Oranı  
: Modülasyon Katsayısı
- $m_f$  : Modülasyon Frekans Oranı

- Kontrolün **lineer** olduğu kabul edilir.
- Yaygın olarak **AC PWM Yöntemi** ile kontrol sağlanır.
- Çıkış gerilimi **efektif olarak** kontrol edilir.
- **Yüksek frekanslı** devreler olarak bilinir.
- Giriş tarafında ciddi **dalgalanmalar** ve çıkış tarafında ciddi **harmonikler** oluşabilir. Ancak, bu dalgalanmalar kolayca düzeltilebilir.
- **Zorlamalı komütasyonludur.**
- Genel olarak, yüksek güç ve düşük frekanslarda **SCR**, orta güç ve orta frekanslarda **BJT**, düşük güç ve yüksek frekanslarda **MOSFET**, kullanılır. **IGBT** ise, ortanın üzerindeki güç ve frekanslarda kullanılır.

#### Başlıca Uygulama Alanları

- AC motor kontrolü
- Kesintisiz güç kaynakları
- Endüksiyonla ısıtma
- Yüksek gerilinde DC taşıma
- DC gerilim kaynakları

#### DC-AC Dönüştürücülerin Genel Olarak Sınıflandırılması

DC-AC dönüştürücüler,  
**Besleme kaynağı açısından,**

- a) Gerilim Kaynaklı İnverterler
- b) Akım Kaynaklı İnverterler

**Faz sayısına göre,**

- a) Tek Fazlı İnverterler
- b) Üç Fazlı İnverterler

**Kontrol açısından,**

- a) Kare Dalga İnverterler
- b) Boşluklu (Kısmi) Kare Dalga İnverterler
- c) PWM İnverterler

**İletim süresine göre,**

- a)  $180^\circ$  iletimli inverterler
- b)  $120^\circ$  iletimli inverterler

**Tek fazlı inverterler,**

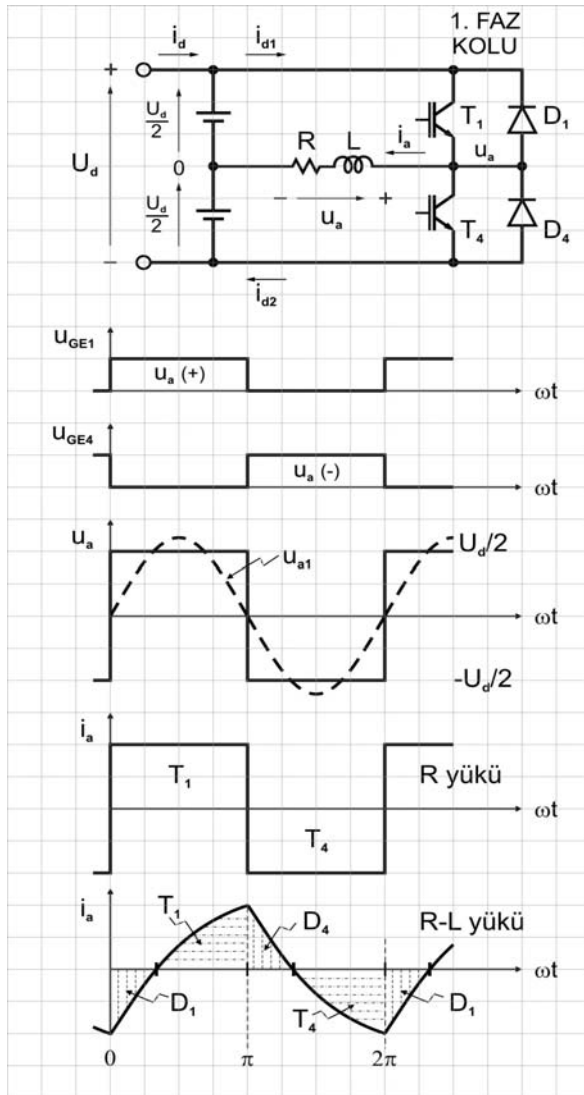
**Devre yapısına göre,**

- a) Yarım Köprü İnverterler
- b) Tam Köprü İnverterler
- c) Push-Pull İnverterler

olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Gerilim kaynaklı ve PWM inverterler, endüstride daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

# TEK FAZLI KARE DALGA İNVERTERLER

## Yarım Köprü Kare Dalga İnverter



$$U_a^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left( \frac{U_d}{2} \right)^2 d(\omega t)$$

$$U_a = \frac{U_d}{2}$$

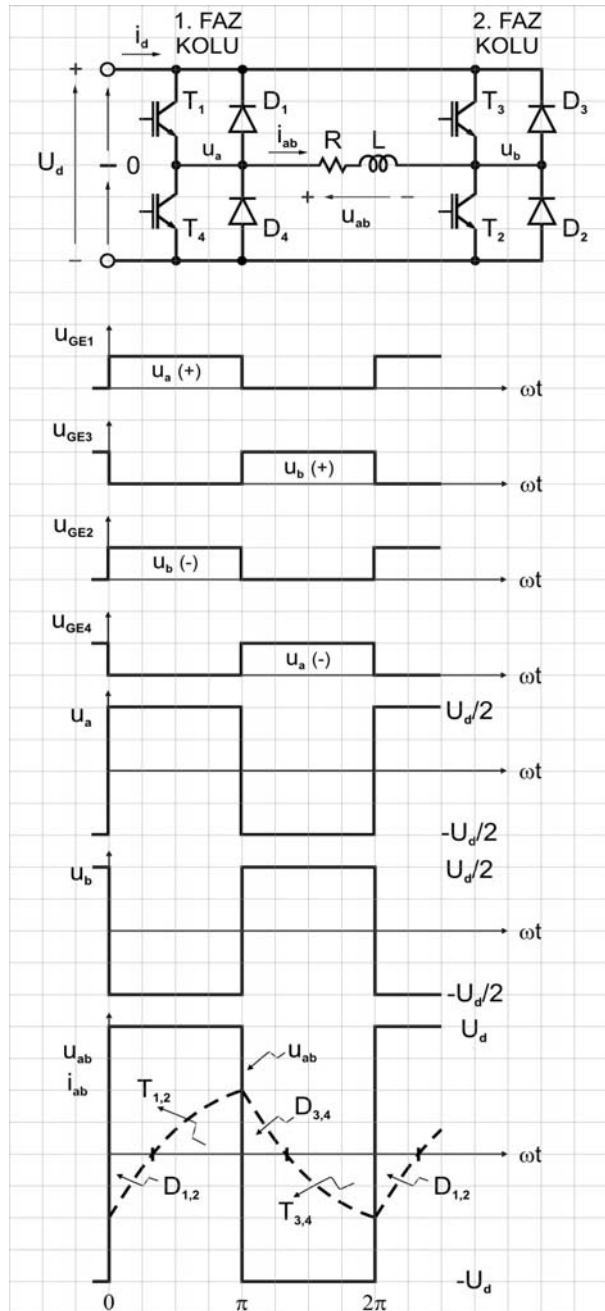
$$U_{a1} = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \frac{U_d}{2} \sin(\omega t) d(\omega t)$$

$$U_{a1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_d}{2}$$

Bu inverter sadece **2 transistör** ve **2 diyot** ile gerçekleştirilir. Devre yapısı basit ve ucuzdur. Ancak, **orta uçlu bir gerilim kaynağı** gerektirir. Böyle bir kaynak pratik olarak pek mümkün olmadığından, bazı özel endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.

**Elamanlar**  $U_d$  gerilimine maruz kalır.

## Tam Köprü Kare Dalga İnverter



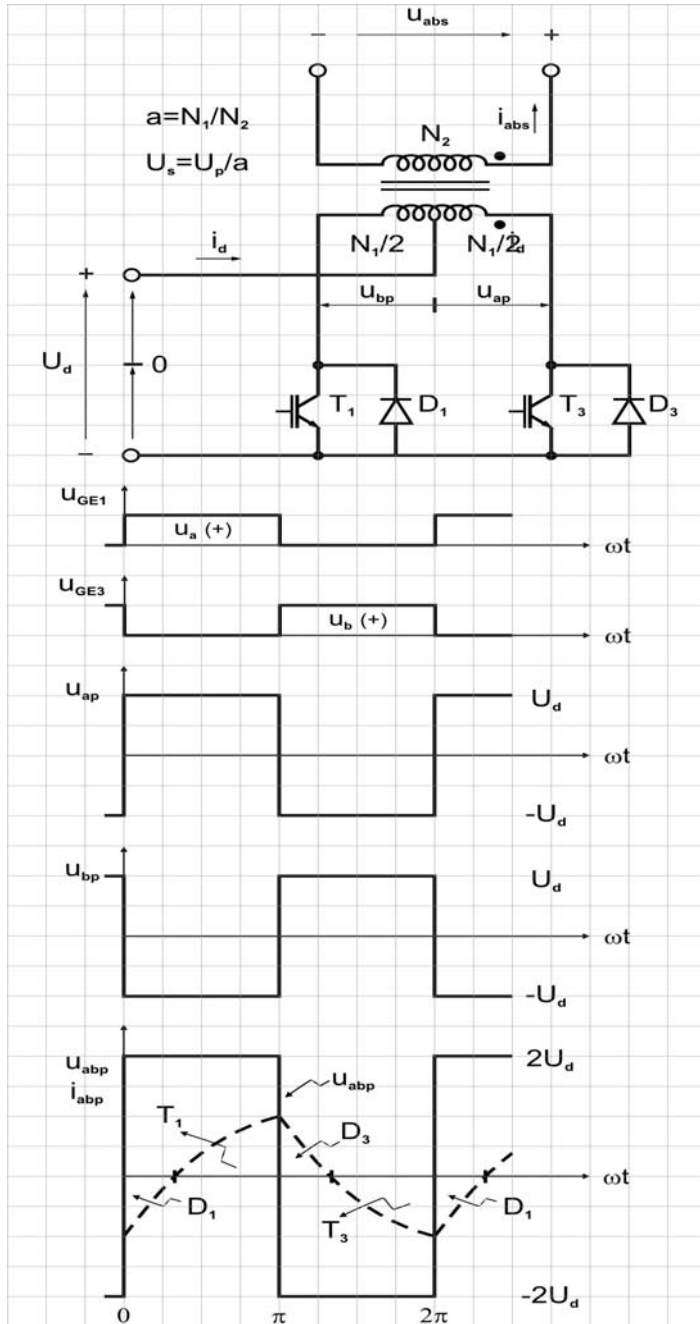
$$U_{ab} = U_d$$

$$U_{abl} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_d$$

Bu inverter **4 transistör** ve **4 diyot** ile gerçekleştirilmektedir. **Normal** bir inverter devresi olup, herhangi bir sınırlama veya özel şart gerektirmez.

**Elamanlar**  $U_d$  gerilimine maruz kalır.

## Push-Pull Kare Dalga İnverter



$$U_{abs} = 2 \frac{U_d}{a}$$

$$U_{absl} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} 2 \frac{U_d}{a}$$

Bu inverter de sadece **2 transistör** ve **2 diyot** ile gerçekleştirilir. Devre yapısı yine basit ve ucuzdur. Ancak, **primeri orta uçlu bir transformatör** gerektirir. İzolasyon amacıyla bir transformatör zaten genellikle istendiğinden, bu devre endüstriyel uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan en basit ve en ucuz inverter türüdür.

**Elamanlar**  $2U_d$  gerilimine maruz kalır. Ancak çıkış gerilimi de normalin 2 katıdır.

## Kare Dalga İnverterlerde

- **180° iletimli kare dalga inverterlerde**, kontrol için sadece bir flip-flop yeterlidir. Aynı faza ait 2 transistörün her ikisi de 180° iletimde kalır. Transistörlerin iletimleri arasında boşluk olmadığından, çıkış ucunun potansiyeli daima belirlidir ve çıkış bir gerilim kaynağıdır. Ancak, aynı faza ait 2 transistörün aynı anda iletimde kalmasıyla bir **kısa devrenin** oluşmaması için, bu transistörlerin sinyalleri arasında **ölü süre** denilen bir boşluğun bırakılması gerekmektedir.
- Kare dalga inverterlerde, **frekans** inverter içerisinde kontrol edilmekte, **gerilim** ise ancak **Darbe Genlik Modülasyonu** ile girişteki DC gerilimin genliği değiştirilerek kontrol edilebilmektedir.
- **120° iletimli kare dalga inverterlerde**, aynı faza ait 2 transistörün iletimleri arasında 60°'ar derecelik boşluklar olduğundan, yükün özelliklerine göre çıkış geriliminde bozulmalar olmaktadır. Ancak ölü süreye gerek yoktur.

## Genel Olarak İnverterlerde

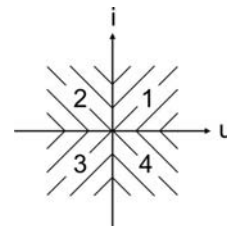
- **Enerji akışı**, tristörler iletimde iken DC kaynaktan AC yüke doğru ve diyotlar iletimde iken AC yükten DC kaynağa doğrudur.
- **Çıkışta** gerilim ve akım ile enerji 2 yönlü olabilmektedir. Böylece, inverterler **4 bölge**li olarak çalışabilmektedir.
- **Bir peryot içerisinde**, ortalama enerji akışı DC kaynaktan AC yüke doğru ise devrenin **inverter modunda**, enerji akışı AC yükten DC kaynağa doğru ise **doğrultucu modunda** çalıştığı anlaşılır.
- **DC kaynaktan çekilen akım için**,

$$I_d = I_T - I_D$$

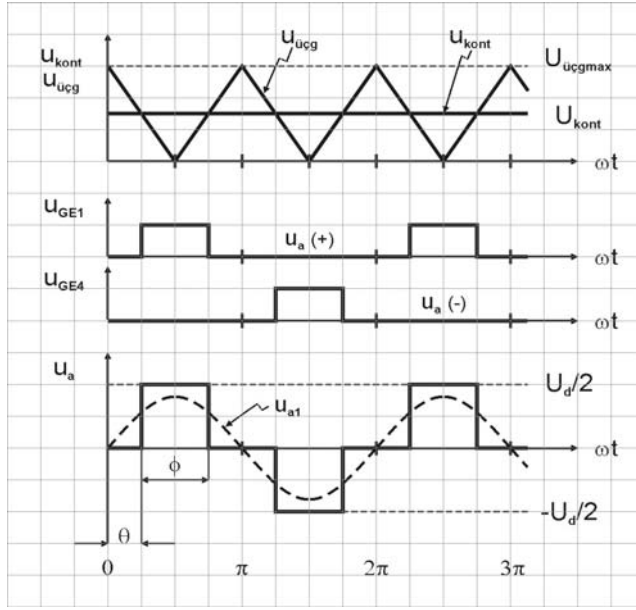
- **Giriş ve çıkıştaki aktif güçler için**,

$$P_g = P_\varphi \Rightarrow U_d I_d = q U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

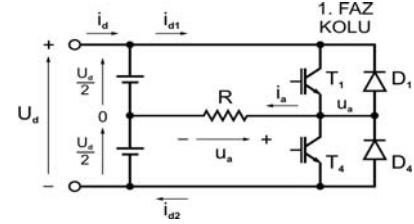
eşitlikleri yazılabilir.



## BOŞLUKLU KARE DALGA İNVERTERLER



**Boşluklu kare dalga inverterlerde**, aynı faza ait 2 transistörün iletimleri arasında boşluklar olduğundan, çıkış geriliminde yükün özelliklerine göre bozulmalar olmaktadır. Ancak ölü süreye gerek yoktur.



$$U_a^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\theta}^{\pi-\theta} \left( \frac{U_d}{2} \right)^2 d(\omega t)$$

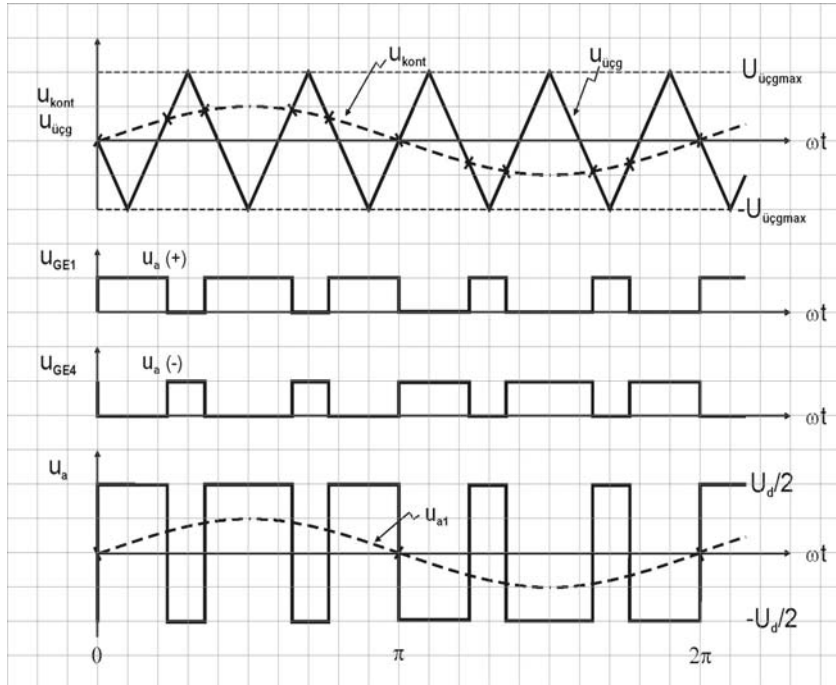
$$U_a = \sqrt{m_d} \frac{U_d}{2} \Rightarrow m_d = \frac{\phi}{\pi} = \frac{U_{kont}}{U_{üçg \max}}$$

$$U_{a1} = \frac{2}{\pi} \int_{\theta}^{\pi-\theta} \frac{U_d}{2} \sin(\omega t) d(\omega t)$$

$$U_{a1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_d}{2} \sin \frac{\phi}{2}$$

**Boşluklu kare dalga kontrolü**, tek ve 3 fazlı bütün inverterlere uygulanabilmektedir. **Doluluk oranı**  $m_d$  değiştirilerek çıkış gerilimi kontrol edilmektedir. Bu kontrol aslında **tek darbeli bir PWM kontrolüdür**.

## SİNÜSOİDAL PWM İNVERTERLER



- $m_a$  : Modülasyon Genlik Oranı
- $m_f$  : Modülasyon Frekans Oranı
- $f_s$  : Üçgen Dalgı Frekansı
- : Taşıyıcı Frekansı
- : Anahtarlama Frekansı
- $f_1$  : Sinüsoidal Dalgı Frekansı
- : Temel veya Ana Frekans
- : Modülasyon Frekansı

$$m_a = \frac{U_{kont \max}}{U_{üçg \max}} \quad m_f = \frac{f_s}{f_1}$$

$$m_a \leq 1 \text{ için, } U_{a1} = m_a \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{U_d}{2}$$

$m_a \leq 1$  : Modülasyon Altı Çalışma  
: Lineer Çalışma

$m_a > 1$  : Modülasyon Üstü Çalışma  
: Lineer Olmayan Çalışma  
: Aşırı Modülasyon

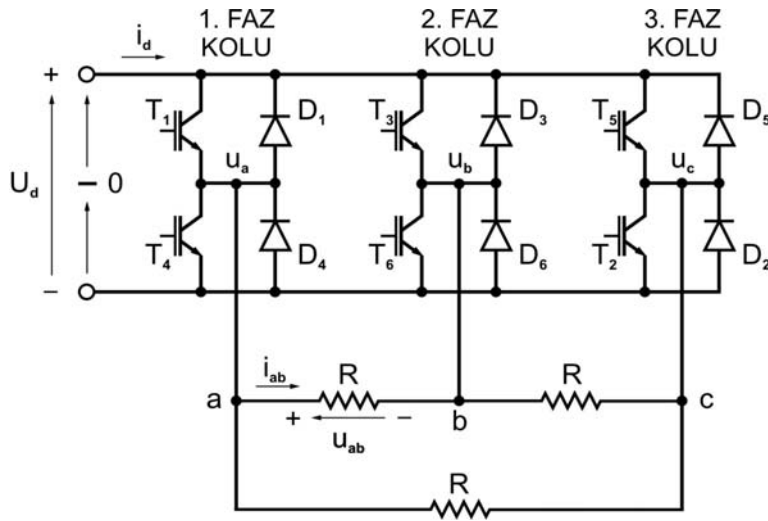
$m_a \geq 3$  : Kare Dalgı Çalışma

Endüstride **en yaygın** olarak kullanılan kontrol yöntemi **PWM** ve en yaygın olarak kullanılan PWM yöntemi de **Sinüsoidal PWM** yöntemidir.

**Sinüsoidal PWM inverterlerde**, bir sinüsoidal kontrol gerilimi ile daha yüksek frekanslı bir üçgen sinyalin karşılaştırılmasıyla kontrol sağlanır. **Sinüsoidal gerilime**, temel gerilim, modülasyon gerilimi veya kontrol gerilimi denilir. **Üçgen sinyale**, taşıyıcı dalgı da denilmektedir.

**PWM inverterlerde**, gerilim ve frekans inverter içerisinde kontrol edilmektedir. **PWM kontrolü**, tek ve 3 fazlı bütün inverterlere uygulanabilmektedir. **Harmonik** seviyesi oldukça düşüktür.

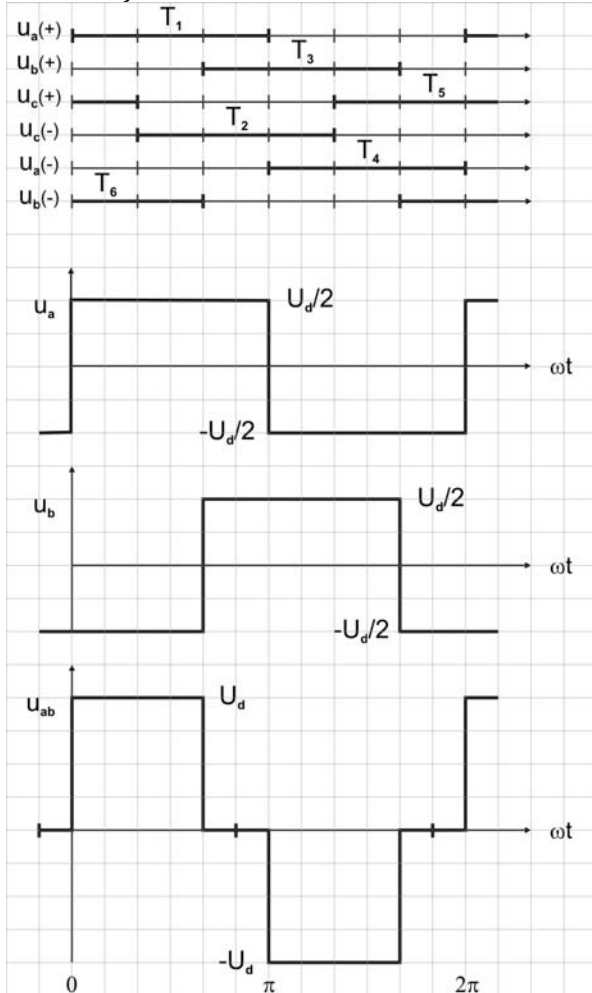
## ÜÇ FAZLI KARE DALGA İNVERTERLER



Üç fazlı inverterlerin **çalışma prensibi** tek fazlılara oldukça benzerdir. Çıkış geriliminin bozulmaması açısından **180° iletimli** olanları tercih edilir. Çoğu uygulamalarda ve özellikle kesintisiz güç kaynaklarında, harmoniklerin çok az olduğu **PWM kontrolü** kullanılmaktadır. **Anahtarlama kayıpları** açısından kare dalga inverterler oldukça avantajlıdır. Kare dalga inverterlerde **Doluluk Oranı** değiştirilerek gerilim kontrolü yapılabilir.

**NOT :** AC filtrenin çıkış gerilimi, giriş geriliminin temel bileşenine eşittir. DC filtrenin çıkış gerilimi ise, giriş geriliminin ortalama değerine eşittir.

### Üç Fazlı 180° İletimli İnverter



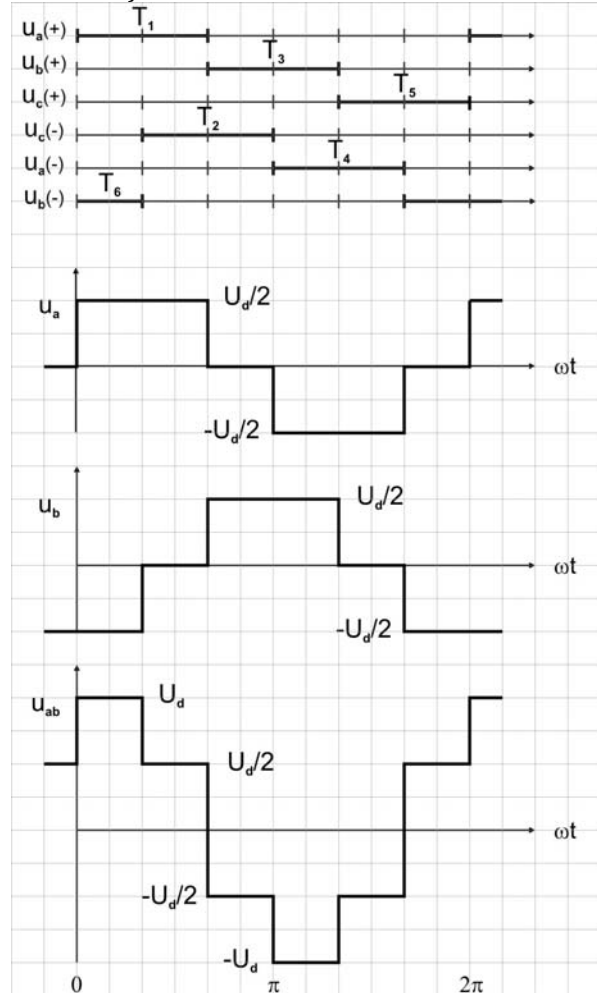
$$U_a = \frac{U_d}{2}$$

$$U_{ab} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d$$

$$U_{a1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_d}{2}$$

$$U_{ab1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d$$

### Üç Fazlı 120° İletimli İnverter



$$U_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_d}{2}$$

$$U_{ab} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_d$$

$$U_{a1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \frac{U_d}{2}$$

$$U_{ab1} = \frac{3}{\sqrt{2}\pi} U_d$$

## KONU İLE İLGİLİ ÇÖZÜLMÜŞ PROBLEMLER

### Problem 1

Giriş gerilimi 250 V ve frekansı 20 kHz olan tam köprü kare dalga bir inverter ile 25  $\Omega$ 'luk bir ısıtıcı beslenmektedir. Devre kayıplarını ihmal ederek,

- Peryot ile transistörlerin iletim sürelerini bulunuz.
- Alıcının gerilimi ile akım ve gücünü hesaplayınız.
- DC kaynaktan çekilen akımı bulunuz.
- Bir transistörün ortalama ve efektif akımlarını hesaplayınız.
- Transistörlerin maruz kaldığı maksimum gerilimi bulunuz.

### Çözüm

- a)  $f=20$  kHz olduğuna göre,

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20 \cdot 10^3}$$

$$T = 50 \mu s$$

Yük omik olduğuna göre,

$$T_T = \frac{T}{2} = \frac{50}{2}$$

$$T_T = 25 \mu s$$

- b) Tam köprü tam dalga inverter için,

$$U_{ab} = U_d$$

$$U_{ab} = 250 \text{ V}$$

Yük omik olduğuna göre,

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{250}{25}$$

$$I_{ab} = 10 \text{ A}$$

$$P_{\phi} = U_{ab} \cdot I_{ab} = \frac{U_{ab}^2}{R}$$

$$= 250 \cdot 10$$

$$P_{\phi} = 2,5 \text{ kW}$$

- c) Kayıpları ihmal edildiğine göre,

$$P_g = P_{\phi}$$

$$U_d \cdot I_d = P_{\phi}$$

$$250 \cdot I_d = 2,5 \cdot 10^3$$

$$\Rightarrow I_d = 10 \text{ A}$$

- d) Bir transistörden yarı peryot içerisinde 10 A geçtiğine göre,

$$I_{TAV} = \frac{1}{2} 10$$

$$I_{TAV} = 5 \text{ A}$$

$$I_{TEF} = \sqrt{\frac{1}{2}} 10$$

$$I_{TEF} = 7,071 \text{ A}$$

- f) Tam dalga bir inverterde,

$$U_{Tmax} = U_d$$

$$U_{Tmax} = 250 \text{ V}$$

bulunur.



## Problem 2

12 V'luk bir akümülatör ile çalışan push-pull türü kare dalga bir inverterin çıkış gerilimi filtre edilerek,  $P=1200$  W,  $U=220$  V,  $f=50$  Hz,  $\cos\phi=0,8$  değerlerine sahip olan tek fazlı bir AC alıcı beslenecektir. Devre kayıplarını ihmal ederek,

- Kullanılacak transformatörün dönüşüm oranını hesaplayınız.
- DC kaynaktan çekilen ve AC alıcının çektiği akımları bulunuz.
- Bir güç elemanının maruz kaldığı maksimum gerilimi bulunuz.
- Bir diyottan geçen ortalama akım 25 A olarak ölçüldüğüne göre, bir transistörün ortalama akımını hesaplayınız.

## Çözüm

- a) Bir AC filtrenin çıkış gerilimi, giriş geriliminin temel bileşenine eşit olur.

Push-pull kare dalga inverter için,

$$U_{abs1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} 2 \frac{U_d}{a}$$

$$220 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} 2 \frac{12}{a}$$

$$\Rightarrow a = 1/10,18$$

bulunur.

- b) AC alıcının çıkış gücünden,

$$P_{\phi} = U_{abl} \cdot I_{abl} \cdot \cos\phi_1$$

$$1200 = 220 \cdot I_{abl} \cdot 0,8$$

$$\Rightarrow I_{abl} = 6,818A$$

bulunur.

Giriş ve çıkış gücünün eşitliğinden,

$$P_g = U_d \cdot I_d$$

$$1200 = 12 \cdot I_d$$

$$I_d = 100A$$

bulunur.

- c) Push-pull türü bir inverter kullanıldığına göre,

$$U_{Tmax} = 2U_d$$

$$U_{Tmax} = 2 \cdot 12$$

$$U_{Tmax} = 24V$$

bulunur.

- d) Bütün inverterler için,

$$I_d = I_T - I_D$$

olduğuna göre,

$$100 = I_T - 25$$

$$I_T = 125A$$

bulunur.

### Problem 3

Giriş gerilimi 200 V ve frekansı 10 kHz olan tam köprü türü tek fazlı bir inverterde, boşluklu kare dalga kontrolü ile 10  $\Omega$ 'luk bir alıcının gücü ayarlanmaktadır. Devre kayıplarını ihmal ederek,

- Alıcının nominal akım ve gücünü bulunuz.
- Alıcı geriliminin nominalin yarısına düşmesi için, doluluk oranı hangi değere ayarlanmalıdır?
- Alıcı gücünün nominalin yarısına düşmesi için, doluluk oranı hangi değere ayarlanmalıdır?
- Doluluk oranı 3/5 iken, bir transistörün kaç derece ve kaç  $\mu$ s iletimde kaldığını bulunuz.
- Doluluk oranı 2/5 iken, bir transistörün ortalama ve efektif akımlarını hesaplayınız.

### Çözüm

- a) Alıcının normal akım ve gücü,

$$U_{ab} = \sqrt{m_d} U_d$$

$$m_d = 1 \text{ için,}$$

$$U_{ab} = U_d = 200 \text{ V}$$

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{200}{10}$$

$$I_{ab} = 20 \text{ A}$$

$$P_{\phi} = U_{ab} \cdot I_{ab} = 200 \cdot 20$$

$$P_{\phi} = 4 \text{ kW}$$

- d)  $m_d = 3/5$  için,

$$P_g = P_{\phi}$$

$$m_d = \frac{\phi}{\pi} = \frac{3}{5}$$

$$\Rightarrow \phi = \frac{3}{5} \pi = 108^\circ$$

$$\phi = 2\pi f \cdot T_T$$

$$\frac{3}{5} \pi = 2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot T_T$$

$$\Rightarrow T_T = 30 \mu s$$

- b) Gerilimin yarıya düşebilmesi için,

$$U_{ab} = \sqrt{m_d} U_d$$

$$\frac{U_d}{2} = \sqrt{m_d} U_d$$

$$\Rightarrow m_d = 1/4$$

- c) Gücün yarıya düşebilmesi için,

$$P_{\phi} = \frac{U_{ab}^2}{R}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{U_d^2}{R} = \frac{U_{ab}^2}{R}$$

$$\Rightarrow U_{ab} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_d$$

$$U_{ab} = \sqrt{m_d} U_d$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} U_d = \sqrt{m_d} U_d$$

$$\Rightarrow m_d = 1/2$$

- e)  $m_d = 2/5$  için,

Her bir transistör yarı peryotta çalıştığına göre,

$$I_{TAV} = \frac{1}{2} m_a \cdot 20$$

$$I_{TAV} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5} \cdot 20$$

$$I_{TAV} = 4 \text{ A}$$

$$I_{TEF} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5}} \cdot 20$$

$$I_{TEF} = 8,944 \text{ A}$$

bulunur.

## 9. GÜÇ ELEMANLARINDA KAYIPLAR VE ISINMA

### GÜÇ KAYIPLARI

Bir yarı iletken güç elemanında aşağıda sıralanan dört temel kayıp oluşur.

#### 1. Tetikleme veya Sürme Kayıpları

Elemanın **kontrol veya giriş akımı** nedeniyle oluşan kayıptır.

$$P_G = \frac{1}{T} \int u_G \cdot i_G \cdot dt$$

#### 2. Anahtarlama Kayıpları

Elemanın **iletime ve kesime girme işlemleri** esnasında oluşan kayıplardır.

$$P_S = P_{ON} + P_{OFF}$$

#### 3. Kapama veya Tıkama Kayıpları

Elemanın **pozitif ve negatif kapama durumlarında** geçen sızıntı akımlar sebebiyle oluşan kayıplardır.

$$P_B = P_P + P_N$$

#### 4. İletim Kaybı

Elemanın **iletimi esnasında** oluşan kayıptır.

$$P_T = \frac{1}{T} \int u_T \cdot i_T \cdot dt$$

Bu durumda, **toplam güç kaybı**,

$$P = P_G + P_B + P_S + P_T$$

olur. Kontrol ve kapama kayıpları genellikle dikkate alınmaz.

**Anahtarlama kayıpları**, kataloglarda genellikle bir anahtarlamaadaki enerji kayıpları şeklinde verilir. Bu enerji kayıplarının frekansla çarpılmasıyla 1 s'deki enerji kayıpları olan anahtarlama güç kayıpları bulunur.

$$W_S = W_{ON} + W_{OFF}$$

$$P_S = f_p \cdot W_S$$

**Düşük frekanslarda**, örneğin SCR'de 400 Hz, BJT'de 1 kHz ve MOSFET'te 10 kHz değerlerinin altında, anahtarlama güç kayıpları da ihmal edilerek,

$$P \cong P_T \text{ alınabilir.}$$

## İLETİM GÜÇ KAYIPLARI

İletim kayıplarının güç elemanlarına göre ne şekilde hesaplanabileceği aşağıda verilmiştir.

### TRANSİSTÖRDE

$$P_T = \frac{1}{T} \int u_{CE} \cdot i_C \cdot dt \quad \text{Sabit bir gerilim düşümü için,}$$

$$P_T = U_{CE} I_{CAV}$$

### MOSFETTE

$$P_T = \frac{1}{T} \int u_{DS} \cdot i_D \cdot dt = \frac{1}{T} \int r_{DS} \cdot i_D^2 \cdot dt = r_{DS} \int i_D^2 \cdot dt$$

$$P_T = r_{DS} I_{DEF}^2$$

### TRİSTÖR VE DİYOTTA

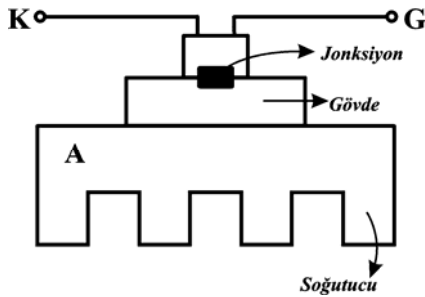
$$P_T = \frac{1}{T} \int u_T \cdot i_T \cdot dt = \frac{1}{T} \int (U_{TO} + r_T \cdot i_T) i_T \cdot dt$$

$$P_T = U_{TO} \frac{1}{T} \int_0^T i_T \cdot dt + r_T \frac{1}{T} \int_0^T i_T^2 \cdot dt$$

$$P_T = U_{TO} \cdot I_{TAV} + r_T \cdot I_{TEF}^2$$

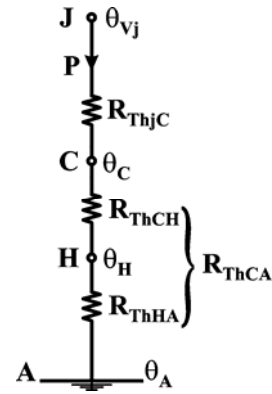
## TERMİK EŞDEĞER DEVRE VE ISINMA

Genellikle bir soğutucuya bağlı olan bir güç elemanındaki **sıcaklık tanımları** ve **termik eşdeğer devresi** ile sıcaklık hesaplarının nasıl yapılabileceği aşağıda verilmiştir.



$\theta_A$  : Ortam Sıcaklığı  
 $\theta_H$  : Soğutucu Sıcaklığı  
 $\theta_C$  : Gövde Sıcaklığı  
 $\theta_{vj}$  : Jonksiyon Sıcaklığı

$R_{ThJC}$  : İç Termik Direnç ( $^{\circ}\text{C} / \text{W}$ )  
 $R_{ThCA}$  : Dış Termik Direnç ( $^{\circ}\text{C} / \text{W}$ )



$$\theta_C = \theta_A + P \cdot R_{ThCA}$$

$$\theta_{vj} = \theta_A + P (R_{ThCA} + R_{ThJC})$$

$$= \theta_A + P \cdot R_{ThCA} + P \cdot R_{ThJC}$$

$$\theta_{vj} = \theta_C + P \cdot R_{ThJC}$$

**Soğutma**, Güç elemanları aşağıda verilen iki temel şekilde soğutulmaktadır.

**1. Doğal Soğutma** : Eleman alüminyum veya bakır bir soğutucuya monte edilir. Isı doğal olarak soğutucudan havaya yayılır.

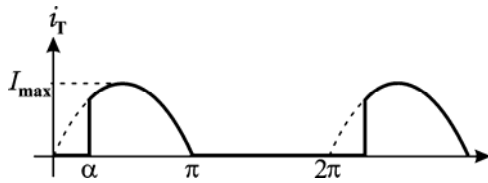
**2. Zorlamalı Soğutma** : Eleman yine alüminyum veya bakır bir soğutucuya monte edilir. Ayrıca fan, su veya yağ ile soğutma güçlendirilir.

## KONU İLE İLGİLİ ÇÖZÜLMÜŞ PROBLEMLER

### Problem 1

Bazı karakteristikleri verilen bir tristörden **kesme açısı ayarlanabilen yarım sinüs dalgası şeklinde bir akım** geçmektedir. Tristör zorlamalı olarak soğutulmakta olup, soğutma havası sıcaklığı 40 °C'dir.

- Kesme açısı 30° iken, tristörün jonksiyon sıcaklığının 104 °C olduğu bilindiğine göre, geçen sinüsoidal akımın maksimum değeri kaç A'dır?
- 50 A'lık bir DC akım geçirilen bu tristörün jonksiyon sıcaklığı kaç °C olur?
- Bu tristörden en fazla kaç A'lık bir DC akım geçirilebilir?



$$\begin{aligned}
 U_{TO} &= 1,2 \text{ V} \\
 r_T &= 10 \text{ m}\Omega \\
 R_{ThJC} &= 0,20 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W} \\
 R_{ThCA} &= 0,20 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W} \\
 \text{İşletme Sıcaklığı} &: -55 \text{ }^\circ\text{C} \text{ ile } 125 \text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

### Çözüm

- $\alpha = 30^\circ$  için,

$$I_{TAV} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_m \sin t dt = \frac{I_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

$$I_{TEF}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_m^2 \sin^2 t dt = \frac{I_m^2}{4\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha)$$

$$\theta_{vj} = \theta_A + P (R_{ThCA} + R_{ThJC}) \Rightarrow 104 = P \cdot 0,4 + 40 \Rightarrow P = 160 \text{ W}$$

$$P = U_{TO} \cdot I_{TAV} + r_T \cdot I_{TEF}^2$$

$$160 = U_{TO} \cdot \frac{I_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) + r_T \cdot \frac{I_m^2}{4\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha)$$

$$I_{m1} = 193,5 \text{ A}$$

$$I_{m2} = -340 \text{ A} \Rightarrow I_m = 193,5 \text{ A}$$

- $I_{TAV} = I_{TEF} = 50 \text{ A}$  için,

$$P = U_{TO} \cdot I_{TAV} + r_T \cdot I_{TEF}^2 \Rightarrow P = 1,2 \cdot 50 + 10 \cdot 10^{-3} \cdot 50^2 \Rightarrow P = 85 \text{ W}$$

$$\theta_{vj} = \theta_A + P (R_{ThCA} + R_{ThJC}) \Rightarrow \theta_{vj} = 85 (0,2+0,2) + 40 \Rightarrow \theta_{vj} = 74 \text{ }^\circ\text{C}$$

- $125 = P_{Tmax} \cdot 0,4 + 40 \Rightarrow P_{Tmax} = 212,5 \text{ W}$

$$212,5 = 1,2 I_m + 10 \cdot 10^{-3} I_m^2$$

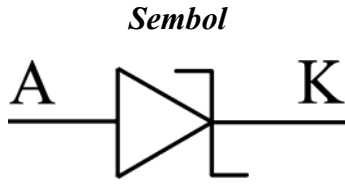
$$I_{m1} = 97,5 \text{ A}$$

$$I_{m2} = -217,5 \text{ A} \Rightarrow I_m = 97,5 \text{ A}$$

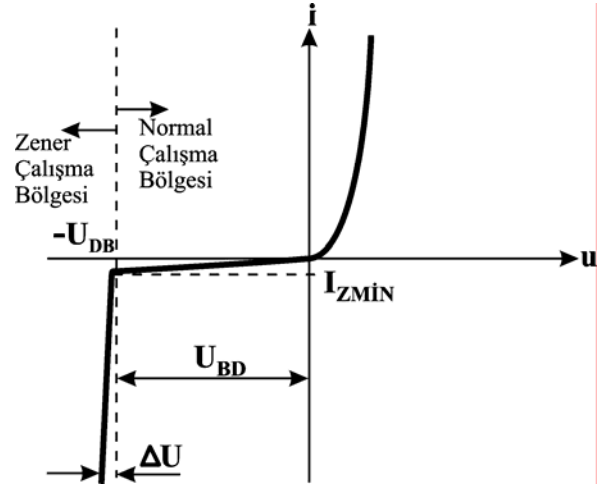
**ÖNEMLİ NOT :** Temel dönüştürücülerde, gerilim ve akımlar, genellikle **kesilmiş yarım ve tam dalga bir sinüs fonksiyonu** ile **kıyılmış bir DC fonksiyon** şeklindedir. Bu fonksiyonların **ortalama ve efektif değerlerinin** hesaplanmasının iyi bilinmesi gerekir. Güç kayıpları ve ısınma hesapları, bundan sonra dönüştürücü soruları ile birlikte yapılacaktır.

## 10. TEMEL KONTROL ELEMANLARI

### ZENER DİYODU



*u-i karakteristiği*



$U_{BD}$  : Zener Devrilme Gerilimi

$r_Z$  : Zener Direnci

$I_{ZMIN}$  : Minimum Zener Akımı

$P_{DM}$  : Maksimum Zener Gücü

$I_{ZMAX}$  : Maksimum Zener Akımı (Ortalama)

$$P_{DM} = U_Z \cdot I_Z \cong U_{BD} \cdot I_{ZMAX}$$

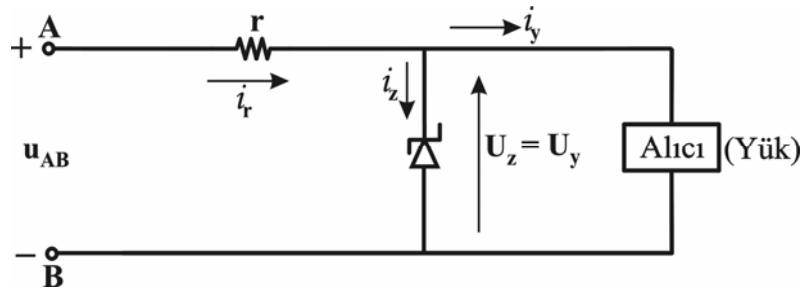
$$u_Z = U_{BD} + r_Z \cdot i_Z$$

$$u_Z = U_{BD} + \Delta U$$

$$u_Z \cong U_{BD} \cong U_Z \cong \text{Sabit}$$

Zener diyodu, **dalgalı** doğru gerilimden **düzgün** doğru gerilim elde etmek için veya **gerilim regülasyonu** amacıyla kullanılır.

### Zener Diyodunun Temel Devresi



**Bu devrede,**

$$i_Z = \frac{u_{AB} - U_Z}{r} - i_Y$$

$$u_Z = U_{BD} + r_Z \cdot i_Z$$

$$u_Z \cong U_{BD} = U_Z = U_Y$$

$$I_{Zmin} = \frac{U_{ABmin} - U_{BD}}{r} - I_{Ymax}$$

$$I_{Zmax} = \frac{U_{ABmax} - U_{BD}}{r} - I_{Ymin}$$

$$I_{Zmin} \leq i_Z \leq I_{Zmax}$$

Zener diyodunun **sabit gerilim** üretebilmesi için,

$$i_Z \geq I_{ZMIN}$$

$$r \leq \frac{U_{ABmin} - U_{BD}}{I_{ZMIN} + I_{Ymax}}$$

olmak zorundadır. Bu durumda genel olarak,

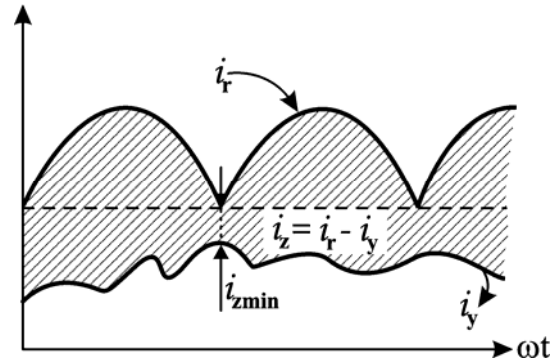
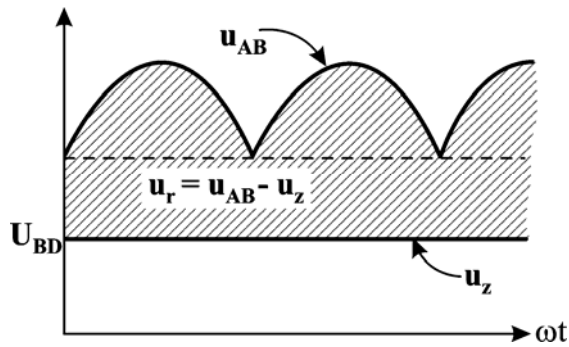
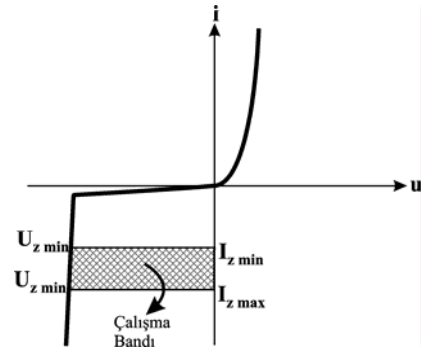
ifadesi yazılabilir.

r direncinin değişmesiyle bandın aşağı yukarı ( $\downarrow \uparrow$ ) yer değiştirmesi zener diyotun güç kaybını etkiler.

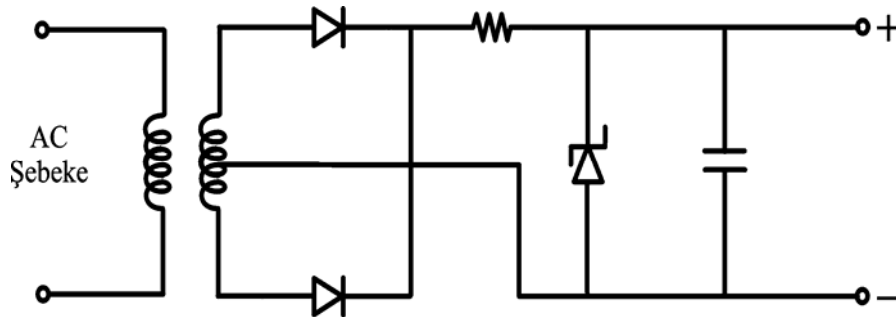
En **ekonomik dizayn** için,

$$I_{Zmin} \cong I_{ZMIN}$$

olarak seçilmesi gerekir.



### Zener Diyotlu Örnek bir Devre

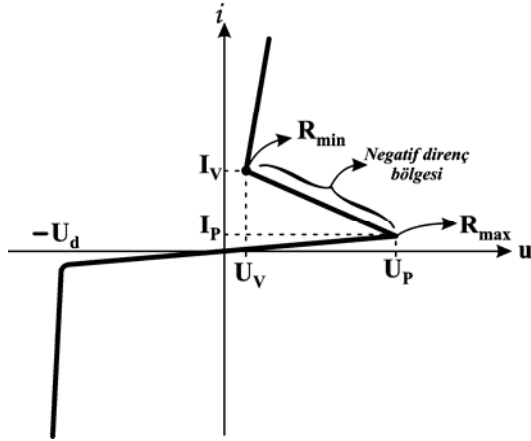


## DEVİRLEN ELEMANLAR

### Shockley Diyodu

Kapı ucu çıkarılmamış özel bir tristördür. İki uçlu ve tek yönlü devrilen bir elemandır.

*u-i karakteristiği*



*Sembol*



$U_P$  : Devrilme Gerilimi

$U_d$  : Delinme Gerilimi

$u \geq U_P$  : İletime girer.

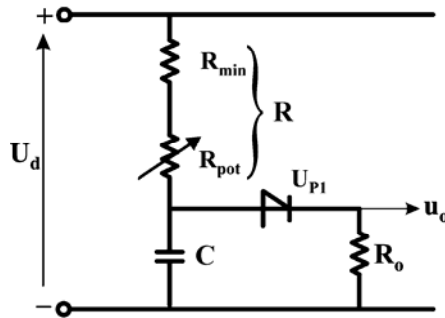
$i \geq I_P$  : İletime girer.

$i \geq I_V$  : İletimde kalır.

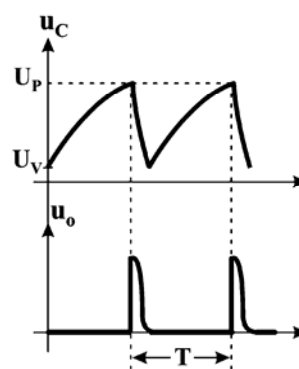
$i < I_V$  : Kesime girer.

$U_P, U_V, I_P, I_V$  : Önemli katalog değerlerdir.

*Shockley Diyotlu Bir Osilatör Devresi*



*Temel Dalga Şekilleri*



$$R_{\min} \geq \text{birkaç k}\Omega$$

$$R_{\text{pot}} \cong \text{birkaç yüz k}\Omega$$

$$R_o \leq 100 \Omega$$

$$R = R_{\min} + R_{\text{pot}}$$

$$R_{\min} \geq \frac{U_d - U_V}{I_V}$$

$$I_{C\max} \leq I_V$$

$U_P < U_d$  ise, devre çalışır.

$I_C < I_P$  ise,  $u_C$  hiç  $U_P$ 'ye erişemez ve hiç sinyal elde edilemez.

$I_C > I_V$  ise, ilettime giren eleman artık iletimden çıkmaz ve birinci sinyalden sonra artık sinyal elde edilemez. Uygulamada sınır değerlerden uzak durulur.

$$R_{\max} = R_{\min} + R_{\text{potmax}}$$

$$R_{\max} \leq \frac{U_d - U_P}{I_P}$$

$$I_{C\min} \geq I_P$$

$$u_C = U_d (1 - e^{-t/RC})$$

$$\tau = RC$$

$$\tau : \text{zaman sabiti}$$

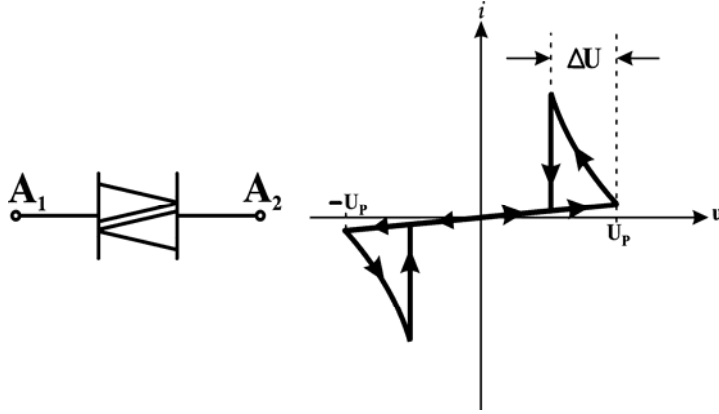


$$u_C = U_P \Rightarrow t \cong T \Rightarrow T \cong RC \cdot \ln \frac{U_d}{U_d - U_P} \text{ bulunur.}$$

## Diyak

*Sembol*

*u-i karakteristiği*



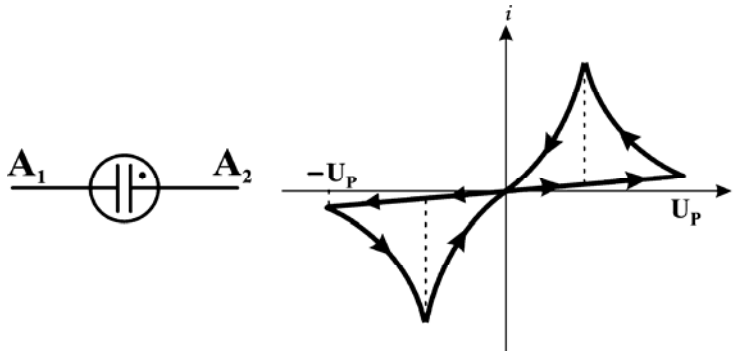
Diyak, **2 uçlu ve 2 yönlü** devrilen bir elemandır.

AC uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan en basit ve en ucuz 2 yönlü devrilen elemandır.

## Neon Lamba

*Sembol*

*u-i karakteristiği*



Neon lamba, **2 uçlu ve 2 yönlü** devrilen bir elemandır.

Bir yarı iletken değildir ve içerisi **neon gazı** ile doludur.

Endüstride daha çok **gösterge lambası** olarak kullanılmaktadır.

Devrilme geriliminin yüksek olması bir dezavantaj, sızıntı akımının çok düşük olması ise bir avantaj olarak söylenebilir.

$$60V < U_P < 100 V$$

$$i_{sız} = \text{Birkaç } \mu A$$

## Diğer Bazı Devrilen Eleman Örnekleri

**UJT (Unijunction Transistor)** : 3 uçlu tek yönlü devrilen bir elemandır. Bu eleman, çift tabanlı bir transistördür.

**PUT (Programmable Unijunction Transistor)** : 3 uçlu tek yönlü devrilen bir elemandır. Bu eleman, Anot tarafından kapı ucu çıkarılan özel bir tristördür.

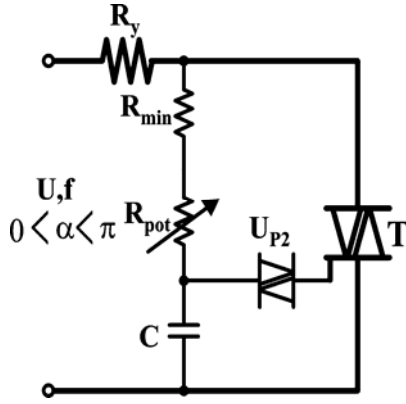
**SUS (Silicon Unilateral Switch)** : 3 uçlu tek yönlü devrilen bir elemandır. Bu eleman, 2 transistör ve bir zener diyodu ile bir dirençten oluşan basit bir entegre devredir.

**SBS (Silicon Bilateral Switch)** : 3 uçlu iki yönlü devrilen bir elemandır. Bu eleman, ters paralel bağlı 2 adet SUS'a eşdeğer olan bir entegre devredir.

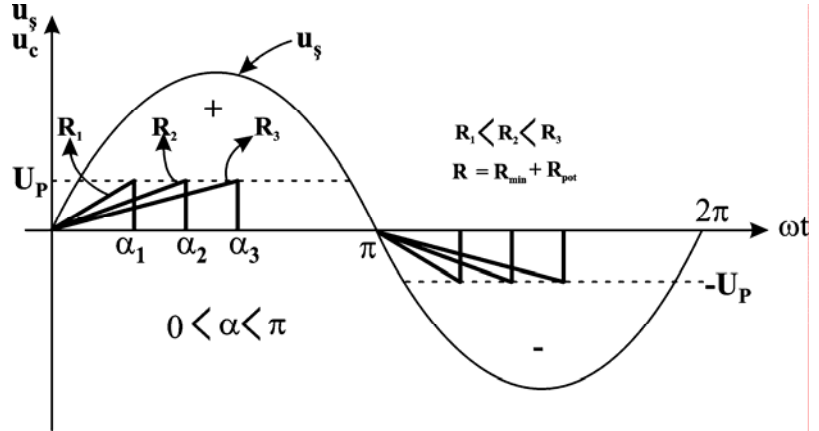
**NOT** : Yukarıda sıralanan devrilen elemanlar, 555 ve diğer entegre devreler ile mikro işlemcilerin gelişmesiyle, artık pek kullanılmamaktadır.

## Osilatörlü Tek Fazlı bir AC Kıyıcı Örneği

### Triyak ve Diyaklı AC Kıyıcı



### Çalışma Prensipleri



### Açıklama

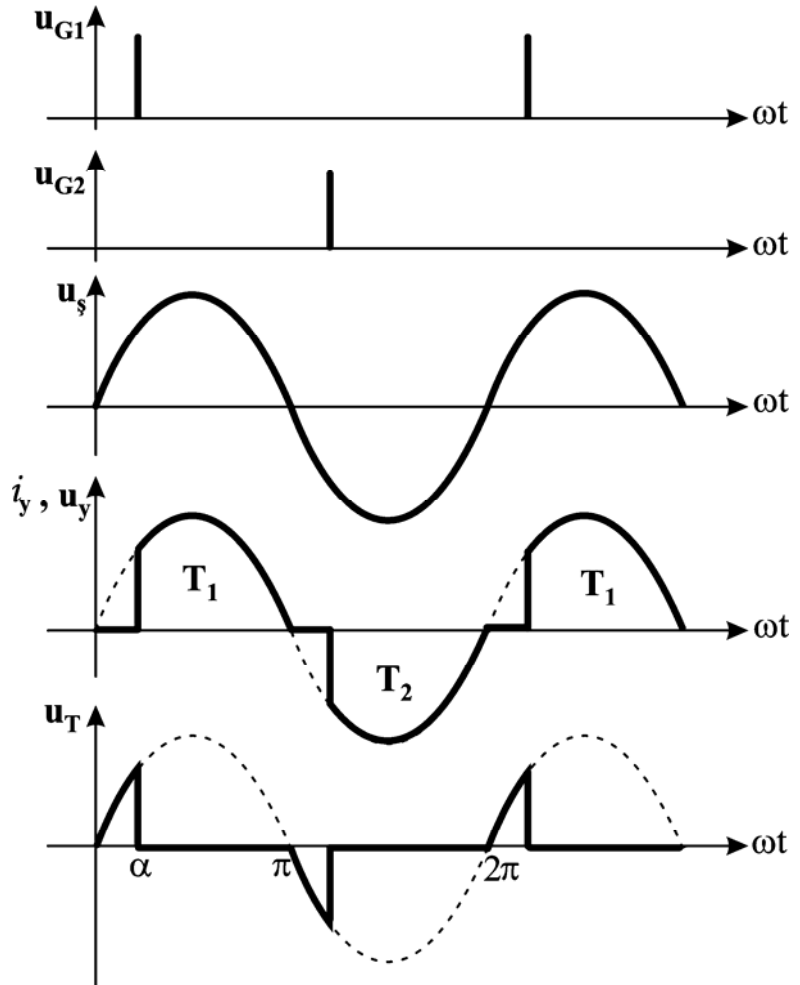
Bir adet **triyak** ve bir **diyak** kullanılarak gerçekleştirilen **tek fazlı AC kıyıcı** devreleri, ısı ve ışık kontrolü amacıyla endüstride **en yaygın** olarak kullanılan, **en basit** ve **en ucuz** bir AC kıyıcı türüdür.

**Pozitif Yarım Dalgada**, dirençler üzerinden şarj olan kondansatör geriliminin belli bir  $\alpha$  açısında  $U_p$  devrilme gerilimine erişmesiyle diyak devrilir. Kondansatörün diyak üzerinden ani olarak deşarj olması ile  $\alpha$  anında triyak tetiklenir. Tetiklenen triyak üzerinden kondansatör deşarj olarak resetlenir.  $\pi$  anında akımın sıfır olmasıyla, triyak kesime gider.

**Negatif Yarım Dalgada**, negatif yönde benzer çalışma oluşur.

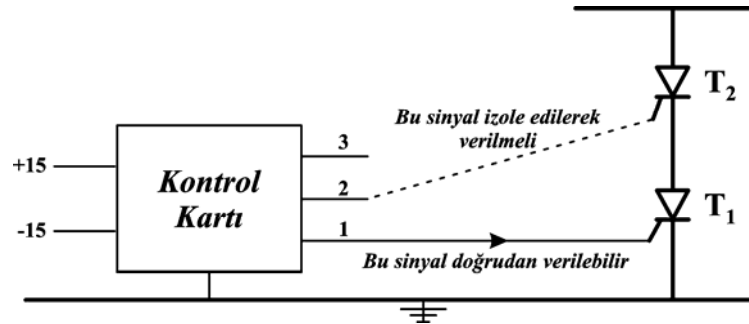
Böylece, endüstride çok yaygın olarak kullanılan, oldukça basit ve ucuz bir AC kıyıcı devresi gerçekleşir.

### Temel Dalga Şekilleri



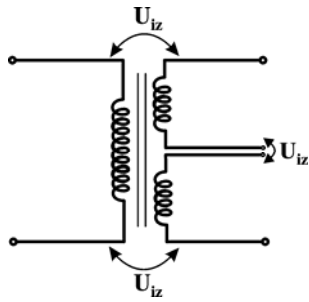
## SİNYAL İZOLASYON ELEMANLARI

### İzolasyonun Tanımı



Güç elektroniği devrelerinde, tetikleme veya sürme sinyalleri genellikle **izole edilerek** ana akım elemanlarına iletilir. Bu işlem **manyetik alanla** ve **ışıkla** olmak üzere iki şekilde yapılabilir.

### Tetikleme Transformatörü



**Tetikleme transformatörü**, küçük boyutlu bir ferit nüveye az sarım sayılı bir primer ve bir ya da birkaç sekonder sargı sarılarak elde edilir. Bütün sargıların birbirlerine ve nüveye karşı izole edilmeleri önemlidir.

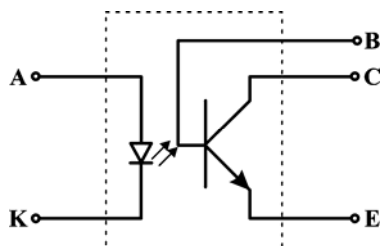
$U_{iz}$  : İzolasyon Gerilimi ( bir kaç kV mertebesinde)

L değeri birkaç yüz  $\mu H$  mertebelerinde olup, ancak kısa süreli sinyaller iletilebilir. Uzun süreli sinyallerde, ilk anda çıkış verip sonra kısa devre özelliği gösterir.

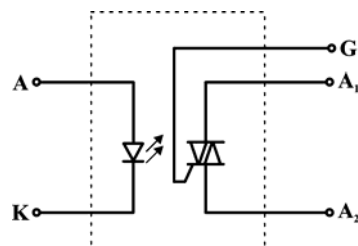
### Opto Bağlayıcılar

**Opto bağlayıcı**, girişlerindeki LED'den geçen akımın yaydığı ışıkla çıkışları iletme giren elemanlardır. Kısa ya da uzun süreli sinyallerin iletilmesinde kullanılır. Opto Transistör, Opto Darlington, Opto Tristör, Opto Triyak

*Opto Transistörün Sembolü*



*Opto Triyakın Sembolü*



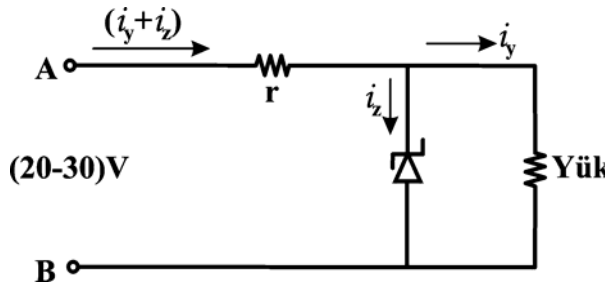
## KONU İLE İLGİLİ ÇÖZÜLMÜŞ PROBLEMLER

### Problem 1

20 ile 30 V arasında dalgalanan bir DC gerilim kaynağından, 10 V' luk ve 9 mA'lık bir DC alıcıyı beslemek üzere, 10 V ve 10  $\Omega$  'luk bir zener diyot ile sabit bir DC gerilim kaynağı elde edilmek isteniyor. Bu zener diyodu için,  $I_{ZMIN}=1$  mA olduğuna göre,

- Akımı sınırlayıcı direnç en fazla kaç ohm olabilir?
- Aynı direnç için yük uçlarındaki tam gerilimin min ve max değerlerini bulunuz.

### Çözüm



$$u_Z = U_{BD} + r_Z \cdot i_Z$$

$$u_Z \cong U_{BD} = U_Z$$

$$a) u_{AB} = U_Z + r (i_Z + i_Y)$$

$$I_{Zmin} = \frac{U_{ABmin} - U_{BD}}{r} - I_{Ymax} \quad I_{Zmax} = \frac{U_{ABmax} - U_{BD}}{r} - I_{Ymin}$$

$$1.10^{-3} = \frac{20 - 10}{r} - 9.10^{-3} \quad I_{Zmax} = \frac{30 - 10}{1000} - 9.10^{-3} = 11mA \Rightarrow I_{Zmax} = 11 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow r = 1 \text{ k}\Omega \text{ bulunur.}$$

$$b) U_{Ymin} = U_{Zmin} = U_{BD} + r_Z \cdot I_{Zmin} = 10 + 10.1.10^{-2} = 10,010 \text{ V}$$

$$U_{Ymax} = U_{Zmax} = U_{BD} + r_Z \cdot I_{Zmax} = 10 + 10.11.10^{-2} = 10,110 \text{ V}$$

### Problem 2

15 – 18 V arasında dalgalanan bir DC gerilim kaynağından 12 V'luk ve 0 – 25 mA arasında akım çeken bir DC alıcıyı beslemek üzere, 12 V ve 5  $\Omega$  'luk bir zener diyot ile sabit bir DC gerilim kaynağı elde edilmek isteniyor. Bu zener diyodu için  $I_{Zmin}=5$  mA olduğuna göre,

- Akım sınırlayıcı direnç en fazla kaç ohm olabilir?
- Aynı direnç için yük uçlarındaki tam gerilimin min ve max değerlerini bulunuz?

### Çözüm

$$a) I_{Zmin} = \frac{U_{ABmin} - U_{BD}}{r} - I_{Ymax}$$

$$5.10^{-3} = \frac{15 - 12}{r} - 25.10^{-3}$$

$$\Rightarrow r = 100 \Omega \text{ bulunur.}$$

$$\text{b) } I_{Z\max} = \frac{18-12}{100} - 0$$

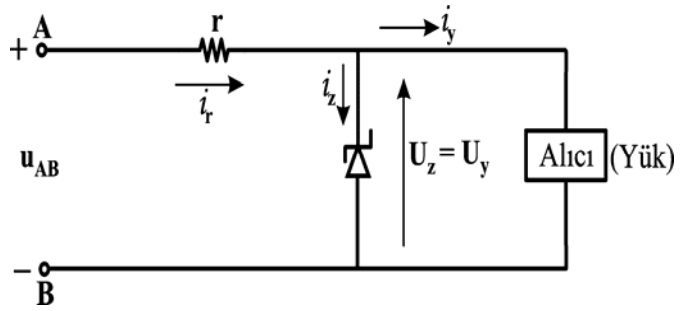
$$I_{Z\max} = 60 \text{ mA}$$

$$U_{Y\min} = 12 + 5.5 \cdot 10^{-3} = 12,025 \text{ V}$$

$$U_{Y\max} = 12 + 5.60 \cdot 10^{-3} = 12,300 \text{ V}$$

### Problem 3

Şekildeki devrede A ve B uçları arasındaki düzgün olan gerilim şebekedeki dalgalanma sebebiyle 15-20 V arasında değişmektedir. Alıcının gerilimi 12 V olup, çektiği akım 0-10 mA arasında değişmektedir. Devre en ekonomik olacak şekilde, r direncinin değerini ve zener diyodunun gücünü hesaplayınız.



### Çözüm

Devrenin en ekonomik hali,  $i_{Z\min} \cong 0$  durumunda oluşur.

$$I_{Z\min} = \frac{U_{AB\min} - U_Z}{r} - I_{Y\max} \quad I_{Z\max} = \frac{U_{AB\max} - U_Z}{r} - I_{Y\min} \quad I_{Z\max} = \frac{20-12}{300} - 0$$

$$0 = \frac{15-12}{r} - 10 \cdot 10^{-3} \quad I_{Z\max} \cong 26,67 \text{ mA}$$

$$r = 300 \, \Omega \text{ bulunur.}$$

Bu akım sürekli değerinde  $I_{ZDM} \cong 26,67 \text{ mA}$  olur.

$$P_{DM} = U_Z \cdot I_{ZDM}$$

$$= 12 \cdot 26,67 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{DM} \cong 320 \text{ mW} \text{ bulunur.}$$

### Problem 4

10 V'luk bir DC gerilim kaynağı ve devrilme gerilimi 7,5 V olan bir shockley diyonu ile 10 kHz frekanslı bir sinyal üretilmek istenmektedir. Shockley diyonunda  $I_v = 9 \text{ mA}$  ve  $U_v = 1 \text{ V}$  olduğuna göre, osilatörün minimum direnci ile zaman sabitini hesaplayınız. 0,47  $\mu\text{F}$ 'lık bir kondansatör kullanılırsa, potansiyometre kaç  $\text{k}\Omega$ 'a ayarlanmalıdır?

### Çözüm

$$R_{\min} \geq \frac{U_d - U_v}{I_v}$$

$$\Rightarrow R_{\min} \geq 1 \text{ k}\Omega$$

$$T = 1 / f = 1 / 10000 = 100 \, \mu\text{s}$$

$$T \cong RC \cdot \ln \frac{U_d}{U_d - U_p}$$

$$\Rightarrow RC = 72 \, \mu\text{s} \text{ bulunur.}$$

$$C = 0,47 \, \mu\text{F} \text{ için,}$$

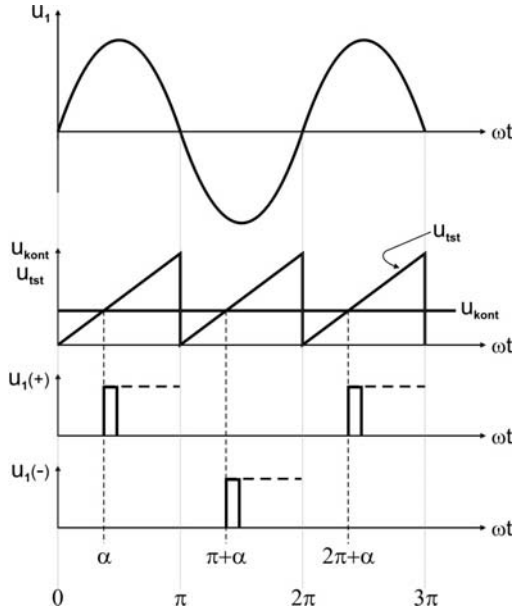
$$(R_{\min} + R_{\text{pot}}) C = 72 \, \mu\text{s}$$

$$\Rightarrow R_{\text{pot}} = 152 \text{ k}\Omega \text{ bulunur.}$$

# 11. GÜÇ ELEKTRONİĞİNDE TEMEL KONTROL DÜZENLERİ

## FAZ KONTROL YÖNTEMİ

### Temel Dalga Şekilleri



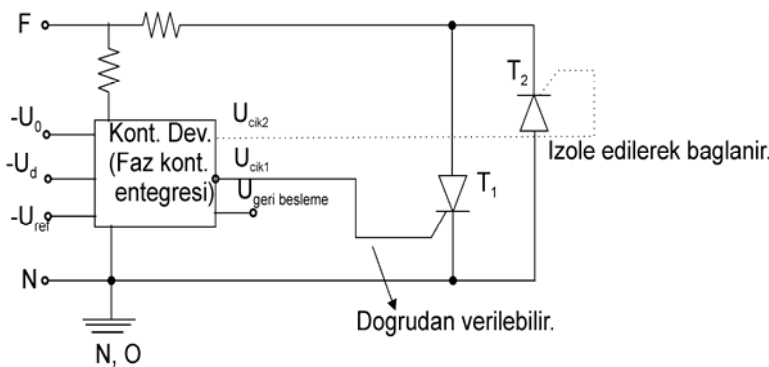
**Faz kontrol entegreleri,** Faz veya Fazlararası gerilimlerle çalışabilir, sadece senkronizasyon örneğinin alındığı direnç değerleri değişir. Ancak, kontrol açısından, entegrenin **Sıfır (Şasi)** ucunun devrenin hangi noktası ile irtibatlı olduğu önemlidir.

Faz Kontrol Yöntemi için verilen yandaki açıklamaları dikkatlice inceledikten sonra, burada verilen her bir dalga şeklinin nasıl elde edildiğini ve ne anlama geldiğini yorumlamaya çalışınız.

### Açıklama

Genel olarak AC Kıyıcı ve Doğrultucularda, **Faz Kontrol Yöntemi** ve bu yöntemle göre sinyal üreten **Faz Kontrol Entegreleri** kullanılır. Prensip olarak Faz Kontrol Yönteminde, AC şebekeden bir **senkronizasyon örneği** alınır, bu örnek **2 yönlü kare dalgaya** dönüştürülür, böylece şebeke geriliminin **sıfır noktaları ile (+) ve (-) yarı peryotları** belirlenir, her bir yarı peryotta birer pozitif testere dişi dalga elde edilir, bu **testere dişi dalga** ile bir **DC referans gerilimin** karşılaştırılması ile hem (+) hem de (-) yarı peryotlar için ayrı ayrı **α faz kontrol açısı** anlarında **faz kontrol sinyali** üretilir. Testere dişi dalga genliği ve referans gerilimin değeri ayarlanabilir. Testere dişi dalga genliği belirli bir değere kalibre edilir ve sabitlenir. Referans gerilim ise, testere dişi gerilimin minimum ve maksimum değerleri arasında değişebilecek şekilde kalibre edilir. Normal çalışmada, bir potansiyometre ile referans gerilim ayarlanarak, α faz kontrol açıları değiştirilir. Ayrıca, **(+) ve (-) faz kontrol sinyalleri**, kısa süreli olabileceği gibi, yarı peryodun sonuna kadar devam da edebilir. Kısa süreli sinyallerin süresi ayarlanabilir. **Kısa veya uzun süreli sinyallerin inversleri veya toplamları** da üretilmiş olabilir. Her faz kontrol entegresinde bu ilave özelliklerin hepsi olmayabilir. Uygulama türüne göre, sadece Pozitif veya sadece Negatif sinyaller, Kısa Süreli veya Uzun Süreli sinyaller, Toplam veya İnvers sinyaller kullanılabilir.

### Tek Fazlı AC Kıyıcı Devresi Örneği



AC akımın pozitif yarım dalgasını T<sub>1</sub> tristörü ve negatif yarım dalgasını T<sub>2</sub> tristörü geçirir.

T<sub>1</sub> tristörü entegrenin pozitif sinyalleri ve T<sub>2</sub> tristörü entegrenin negatif

### Açıklama

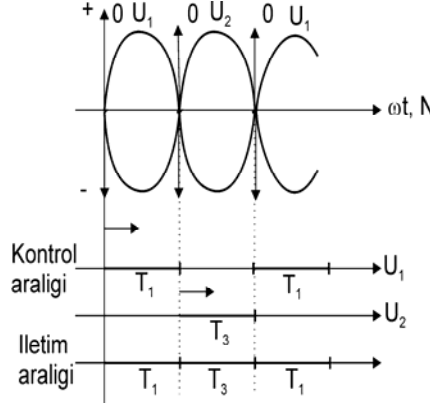
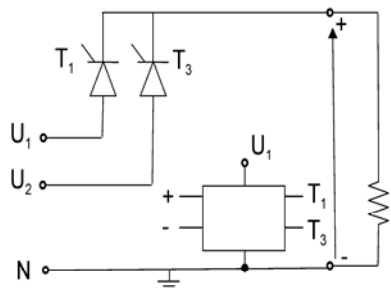
AC kıyıcılar, tek fazlı veya 3 fazlı olarak uygulanmaktadır. 3 fazlı AC kıyıcılarda yük ise, Yıldız (Y) veya Üçgen (Δ) bağlı olabilmektedir.

Genel olarak AC kıyıcılarda, **Faz Kontrol Yöntemi** ve bu yöntemle göre sinyal üreten **Faz Kontrol Entegreleri** kullanılır. Prensip olarak bu entegrelerde, AC şebeke gerilimi ile **senkronize** bir şekilde, kısa ve/veya uzun süreli, pozitif ve negatif faz kontrol sinyalleri

sinyalleri ile tetiklenir. Katodu entegrenin sıfırına (0) veya şebekenin üretilir. Bu sinyallerin nötrüne (N) bağlı olan  $T_1$  sinyallerinin izolasyonuna gerek yoktur. toplamları, inversleri ve Ancak, bu şartı sağlamayan  $T_2$  sinyalleri izole edilmelidir. toplamlarının inversleri de entegre tarafından veya ilave

Ters-paralel bağlı 2 tristör yerine bir triyak kullanıldığında, sinyal devrelerle elde edilebilir. izolasyonuna gerek kalmaz.

### İki Fazlı Yarım Dalga Kontrollü Doğrultucu Devresi Örneği

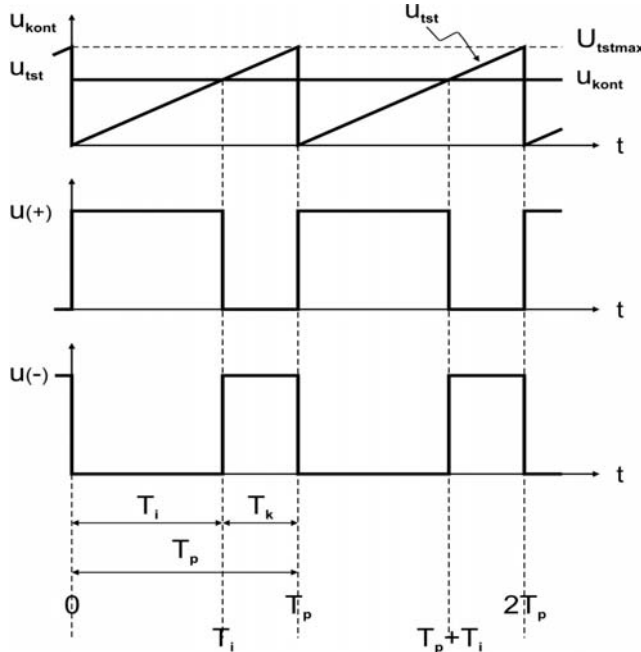


### Açıklama

Bir adet faz kontrol entegresi kullanılır. Entegrenin sıfırı nötre ve senkronizasyon girişi  $U_1$  fazına bağlanır. Entegrenin kısa süreli pozitif sinyalleri  $T_1$  için ve kısa süreli negatif sinyalleri  $T_3$  için kullanılır. Sinyaller izole edilir.

## DC-PWM KONTROL YÖNTEMİ

### Temel Dalga Şekilleri



### Açıklama

DC Kıyıcılarda, DC PWM kontrol yöntemi kullanılmaktadır.

DC PWM kontrol yönteminde, bir testere dişi sinyal ile bir referans gerilimin karşılaştırılması ile kontrol sinyali elde edilmektedir. Çıkış geriliminin kontrolü, referans gerilimin değiştirilmesi ile sağlanmaktadır.

Genellikle sabit tutulan testere dişi sinyalin frekansı, anahtarlama veya kıyım frekansı olarak anılmaktadır. Bu frekans aynı zamanda devrenin çalışma frekansıdır.

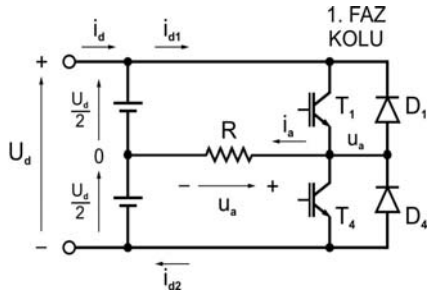
DC kıyıcılarda kısa devre olma özelliği yoktur.

Kontrol kartının sıfırı (0), toprağa ya da DC kıyıcının negatif (-) barasına bağlıdır. Genellikle sinyal izolasyonu gerekir.

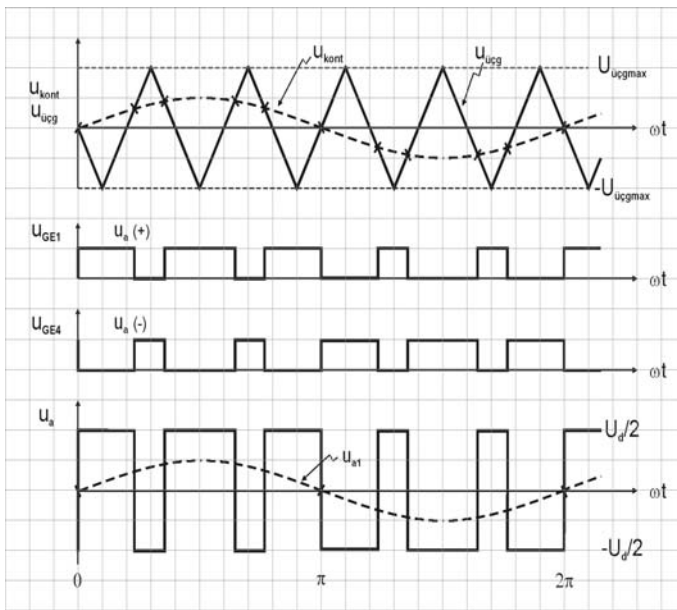
DC Kıyıcılarda, genellikle IGBT veya MOSFET güç elemanları ve sürekli sinyal kullanılmaktadır. Tristörlü DC kıyıcılarda, genellikle kısa süreli sinyaller kullanılır. Ayrıca, iletim aralığının baş ve sonunda, kontrol dışında kalan avans sürelerinin bırakılması gerekmektedir.

## AC-PWM (SİNÜSOİDAL-PWM) KONTROL YÖNTEMİ

### Temel Devre Şeması



### Temel Dalga Şekilleri



### Açıklama

- PWM İnverterlerde, genellikle **IGBT veya MOSFET** güç elemanları ve **sürekli sinyaller** kullanılmaktadır.
- **AC PWM kontrolü**, düzenli örneklenmiş, sinüsoidal ve harmonik eliminasyonlu olmak üzere 3 genel gruba ayrılmaktadır.
- **Sinüsoidal PWM tekniğinde**, bir sinüsoidal örnek ile bir taşıyıcı üçgen sinyalin karşılaştırılmasıyla çıkış sinyali elde edilmektedir. Genellikle sabit tutulan taşıyıcı üçgen sinyalinin frekansı, **anahtarlama frekansını** belirlemektedir. Ayrıca, sinüsoidal örneğin frekans ve genliği değiştirilerek, **çıkış gerilimi ve frekansının** kontrolü sağlanmaktadır.
- Karşılaştırma sonucu elde edilen **pozitif sinyal**  $0-\pi$  aralığında  $T_1$  ve bu sinyalin **inversi**  $\pi-2\pi$  aralığında  $T_4$  transistörüne uygulanır.



## 12. GÜÇ ELEKTRONİĞİNDE TEMEL KORUMA DÜZENLERİ

### Genel Giriş

Yarı iletken güç elemanlarında, temel olarak elemanların maruz kaldığı **elektriksel değerleri** ve elemanlarda oluşan **anahtarlama kayıplarını sınırlama veya azaltma** amacıyla yapılan Bastırma İşlemi,

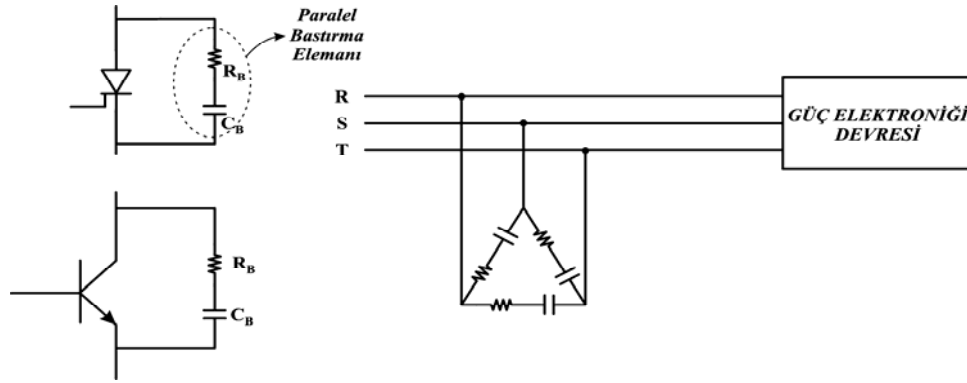
- Seri Bastırma
- Paralel Bastırma

olmak üzere iki genel gruba ayrılır.

Temel olarak, **seri bastırma**, güç elemanına seri olarak bağlanan küçük bir **endüktans** ile ilettime girme işlemi esnasında elemandan geçen **akımın yükselme hızının** sınırlanmasıdır. **Paralel bastırma ise**, elemana paralel bağlanan küçük bir **kondansatör** ile kesime girme işlemi sırasında eleman uçlarında oluşan **gerilimin yükselme hızının** sınırlanmasıdır. Bu elemanlara, seri ve paralel bastırma elemanları denilir.

Yalın olarak bir endüktans veya bir kondansatör kullanılması bazı problemlere neden olur. Bu nedenle, bazı ilavelerle bastırma işlemleri geliştirilmektedir. Böylece, **Seri ve Paralel Bastırma Devreleri veya Hücreleri** oluşmaktadır. Bu bastırma devreleri, yayınlarda Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS), Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS) ve Yumuşak Anahtarlama (SS) gibi isimlerle de yer almaktadır.

### Paralel Bastırma Devresi



Seri bağlı  $R_B$  ve  $C_B$  elemanlarına, paralel bastırma devresi, paralel bastırma hücresi veya paralel R-C elemanı denilir. Güç elemanlarına veya genel devre girişlerine paralel olarak bağlanan bu R-C elemanın iki temel görevi vardır.

1. Eleman uçlarındaki gerilimin **maksimum değerini** sınırlar veya bastırır. Bu elemanın tahrip olmasını önler.
2. Eleman uçlarındaki gerilimin **yükselme hızının maksimum değerini** sınırlar veya bastırır. Bu, elemanın anahtarlama güç kaybını azaltır. Tristörde, aynı zamanda kendiliğinden ilettime geçmeyi önler.

Şebeke girişine  **$\Delta$  bağlı paralel R-C elemanları** ile AC şebekeden gelen bütün akım ve gerilim darbelerine karşı bütün devre korunur.

$$C_B \uparrow \Rightarrow U_m \downarrow \left( \frac{du}{dt} \right)_m \downarrow$$

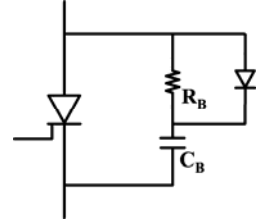
$$R_B \uparrow \Rightarrow U_m \downarrow \uparrow \left( \frac{du}{dt} \right)_m \uparrow$$

**$C_B$  değerinin artması**, hem  $U_m$  hem de  $(du/dt)_m$  değerlerini iyi yönde etkiler.  **$R_B$ 'nin artması**,  $U_m$  değerini her iki yönde de etkileyebilir,  $(du/dt)_m$  değerini olumsuz etkiler. Bu nedenle  $R_B$  değerinin optimize edilmesi gerekir. Ayrıca,  $C_B$ 'nin hem şarjı hem de deşarjı esnasında  **$R_B$ 'de enerji kaybı** oluşur.

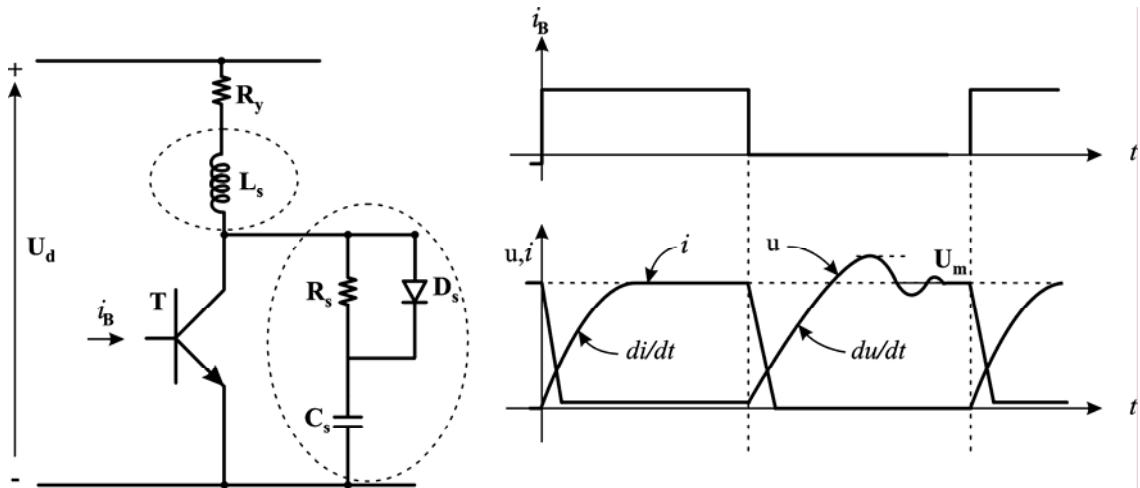
Uygulamada  $C_B$ 'nin seçimi, frekansla doğrudan ilgilidir.  **$C_B$ 'nin sarj ve deşarj süreleri**, peryoda göre oldukça küçük olmalıdır. Ayrıca,  **$R_B$ 'deki güç kaybı**, makul seviyelerde kalmalıdır. Aksi halde devre amacından sapar. Normal olarak, frekans arttıkça  $C_B$  değeri düşer.

**Örneğin**, 220 V ve 50 Hz'lik AC şebekede,  $R_B = 10 \Omega / 5 \text{ W}$  ve  $C_B = 220 \text{ nF}$  seçilebilir. Birkaç yüz V ve 10 kHz'lik bir uygulamada,  $R_B = 22 \Omega / 10 \text{ W}$  ve  $C_B = 1 \text{ nF}$  gibi seçilebilir.

Özellikle **yüksek frekanslarda**,  $R_B$ 'nin olumsuz etkilerini azaltmak için, güç elemanının iletim yönünde bir diyotla  $R_B$ 'nin köprülenmesi iyi sonuçlar vermektedir. Bu durumda bastırma devresine **Kutuplu veya Yönlü Bastırma Devresi** denilir. Bu bastırma, sadece pozitif yöndeki gerilimlerde etkilidir.



### Örnek bir Bastırma Hücresi



Burada, güç elemanının **iletime girmesi esnasında**, seri bastırma elemanı  $L_s$  elemandan geçen akımın yükselme hızı  $di/dt$ 'yi sınırlar. Ayrıca, dolu olan  $C_s$ ,  $R_s$  üzerinden deşarj olur. Güç elemanının **kesime girmesi esnasında ise**, kutuplu bastırma devresi, eleman uçlarındaki gerilimin yükselme hızı  $du/dt$ 'yi ve maksimum değeri  $U_m$ 'yi sınırlar. Böylece, güç elemanı hem **aşırı elektriksel değerlere** karşı korunur hem de elemanın **anahtarlama kayıpları** büyük ölçüde azalır.