

GÜÇ ELEKTRONİĞİNDE KONTROL VE KORUMA TEKNİKLERİ (1206403)

GÜÇ ELEKTRONİĞİNDE KONTROL TEKNİKLERİ

- Kontrolün Tanımı ve Sınıflandırılması
- Güç Elemanları ve Karşılaştırılması
- Güç Devreleri ve Uygulama Alanları
- Kontrolde Kullanılan Eleman ve Devreler
- Güç Elemanlarında Sürme Teknikleri
- Güç Devrelerinde Kontrol Teknikleri

GÜÇ ELEKTRONİĞİNDE KORUMA TEKNİKLERİ

- Korumanın Tanımı ve Sınıflandırılması
- Güç Elemanlarında Koruma Özellikleri
- Güç Devrelerinde Koruma Özellikleri
- Güç Elemanlarında Koruma Teknikleri
- Güç Devrelerinde Koruma Teknikleri
- Sonuç ve Yorumlar

YARARLI KİTAPLAR

- Power Electronics, Circuits, Devices and Applications, Rashid, Muhammad H., NJ: Pearson Education, 2003.
- Power Electronics : Converters, Applications and Design, Ned Mohan, William P. Robbins, Tore M. Undeland, John Wiley & Sons Inc, October 2002.
- Power Electronics, Lander, Cyril W., McGraw-Hill, 1993.

1. GÜÇ ELEKTRONİĞİNDE KONTROL TEKNİKLERİ

1.1. KONTROLUN TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI

Güç Elektroniği'nde Kontrol, Bir alıcıyı besleyen bir yarı iletken güç dönüştürücüsünü denetleyerek, alıcının ihtiyacı olan gerilim, akım, güç, frekans, hız gibi parametreleri kontrol etmek demektir. Burada kontrol, kontrollü olan güç dönüştürücüsü için gerekli olan sinyallerin üretilmesi, iletilmesi ve şekillendirilmesini de kapsar.

Güç elektroniği devrelerinde kullanılan kontrol yöntemleri,

1. Faz Kontrolu (PC)
2. Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) Kontrolu

olarak iki temel gruba ayrılabilir.

Genel olarak,

- Doğal Komütasyonlu devrelerde faz kontrolu
- Zorlamalı Komütasyonlu devrelerde PWM kontrolu

kullanılır.

Elektrik enerjisinin şekline göre PWM kontrolu,

- DC PWM
- AC PWM

Yön veya kutup sayısına göre PWM kontrolu,

- Tek yönlü PWM
- Çift yönlü PWM

Frekans açısından PWM kontrolu,

- Sabit frekanslı PWM
- Değişken frekanslı PWM

Gerilim ve akım açısından PWM kontrolu,

- Gerilim kontrollü PWM
- Akım kontrolü PWM

Geri besleme açısından PWM kontrolu,

- Geri beslemeli PWM
- Geri beslemesiz PWM

Elde edilmesi açısından AC PWM kontrolu,

- Düzenli örneklenmiş PWM
- Sinüsoidal PWM
- Harmonik eliminasyonlu PWM

şeklinde sınıflandırılır. Bu kontrol tekniklerine başka teknikler de eklenebilir. Farklı açılardan değişik sınıflamalar da yapılabilir. Örneğin, rezonanslı devrelerde Rezonans Modülasyonlu Kontrol kullanılır. Doğrudan Moment Kontrolu gibi bazen de yükün özelliğine göre isim verilir.

1.2. GÜÇ ELEMANLARI VE KARŞILAŞTIRILMASI

Bir Yarı İletken Güç Elemanı bir devrede,

- a) İletimde
- b) Kesimde
 - Pozitif Kesimde
 - Negatif Kesimde
- c) Anahtarlama
 - İletime Girme Anahtarlama
 - Kesime Girme Anahtarlama

Durumlarından birinde bulunmaktadır.

Bu durumların her birinde ve ayrıca kontrol girişinde, güç elemanında kayıplar oluşmaktadır. Bu kayıplar, iletim, kesim, anahtarlama ve kontrol kayıpları şeklinde sıralanabilir. Bu kayıplardan kesim ve kontrol kayıpları daima ihmal edilir.

Böylece, etkili olan güç kayıpları,

- a) İletim Güç Kayıpları
- b) Anahtarlama Güç Kayıpları

Şeklinde 2 temel kayıptan oluşur.

Güç Elemanının İletim Kayıp Gücü,

$$P_{IL} = V_{IL} \cdot I_{IL}$$

Güç Elemanının Taşıma Gücü ise,

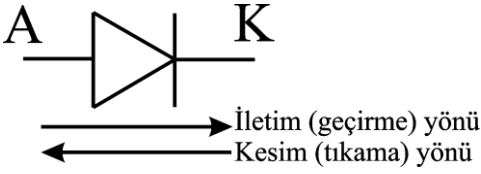
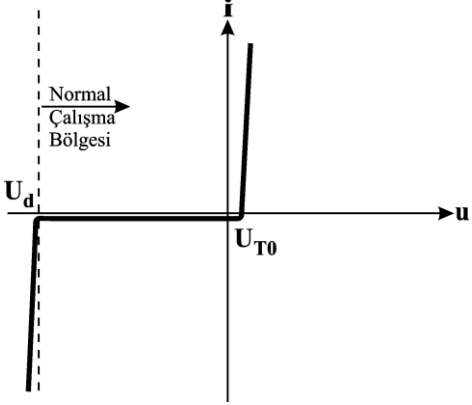
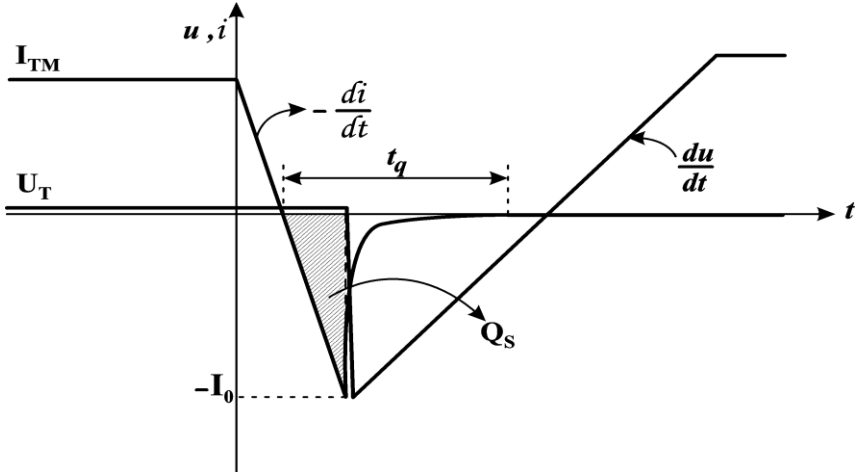
$$P_{TAŞ} = V_{KES} \cdot I_{IL}$$

Şeklinde tanımlanır. Tipik bir güç elemanının dayanabileceği güç kaybı birkaç on W mertebesinde iken taşıma gücü birkaç on kW mertebesinde. Dolayısıyla, **ömrü sonsuz kabul edilen güç elemanları, aslında korumasız olduğunda büyük bir tehdit altındadır.**

Yarı İletkenlerin Özet Tarihçesi

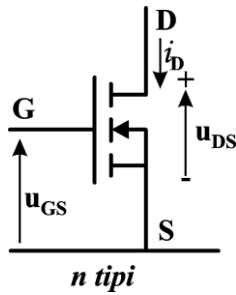
DİYOT	1950	Not : Parantez içerisindeki tarihler, endüstride güç elemanı olarak kullanılmaya başlanan tarihleri göstermektedir.
BJT	1950 (1977)	
SCR	1957	
TRİİYAK	1960	
GTO	1962 (1977)	
MOSFET	1975	
IGBT	1980 (1987)	
SIT	1980	
SITH	1983	
MCT	1983 (1992)	

DİYOT

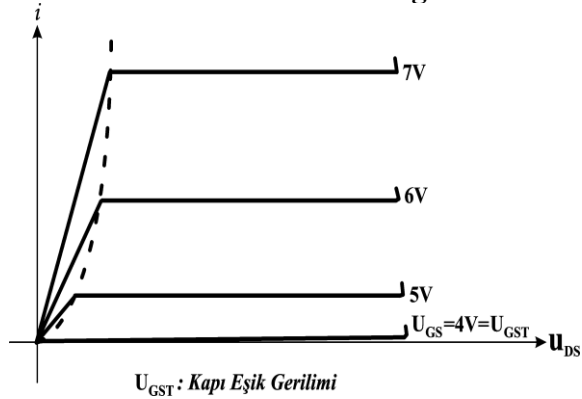
Sembol	Açıklama
 <p>İletim (geçirme) yönü Kesim (tıkama) yönü</p>	<p>A : Anot K : Katot</p> <p>En basit yapılı kontrolsüz yarı iletken elemandır. İletim yönünde, eşik geriliminin üzerinde küçük değerli bir iç dirence sahip olan bir iletken gibidir. Kesim yönünde ise, delinme gerilimine kadar çok küçük sızıntı akımlar geçiren bir yalıtkan gibidir.</p> <p>U_d : Delinme Gerilimi U_{T0} : Eşik Gerilimi r_T : Eşdeğer Direnç ($\mu\Omega$ - $m\Omega$)</p> <p>U_d geriliminde, güç kaybından dolayı diyot yarı iletken özelliğini kaybeder ve genellikle iletken hale gelir. Bu tür devrilmeye, genel olarak çığ devrilme denilmektedir.</p>
<p style="text-align: center;">İletim Karakteristiği</p>  <p style="text-align: center;">Kesime Girme Karakteristiği</p>  <p>Q_s : Taban Tabaklarında Biriken Elektrik Yüğü (μAs) I_{TM} : Sönme Öncesi Diyottan Geçen Akım di/dt : Sönme Esnasında Diyot Akımının Azalma Hızı</p>	

BJT

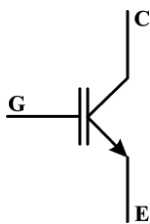
<p>Sembol</p>	<p>Açıklama</p> <p>C : Kollektör E : Emiter B : Taban</p> <ul style="list-style-type: none"> Yük genellikle C ucuna bağlanır. Taban akımı daima E – B arasında geçer ve akımın yönü p'den n'ye doğrudur. Ana akım taban akımı ile aynı yöndedir. B ile C arasında bir akım geçerek, transistör ters ve istenmeyen kötü bir ilettime girebilir. Bu durum önlenmelidir. Transistörün çıkış 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. Giriş akım, çıkış akımdır. Alt bölgelerde karakteristikler paralel ve eşit aralıktır. Bu bölgede sabit kazançla akım yükseltme işlemi yapılabilir. Fakat güç devrelerinde bu yapılamaz. <p>I_{BS} : Taban Doyum Akımı</p>
<p>İletim Karakteristiği</p>	<p>İletim ve Kesime Girme Karakteristiği</p> <p>t_r : Yükselme Süresi t_s : Yayılma Süresi t_f : Düşme Süresi</p> <p>I_{BS} akımı ile çalışmaya Doyumda Çalışma, daha büyük taban akımı ile çalışmaya ise Aşırı Doyumda Çalışma denilmektedir.</p> <p>t_s yayılma süresi, elemanın çalışma frekansını sınırlar. Bu süre, aşırı doyuma bağlı olarak artar, ayrıca negatif kesim sinyali ile düşer. Bu nedenle, yüksek frekanslarda (≥ 1 kHz) genellikle negatif kesim sinyali uygulanır.</p>

MOSFET**Sembol**

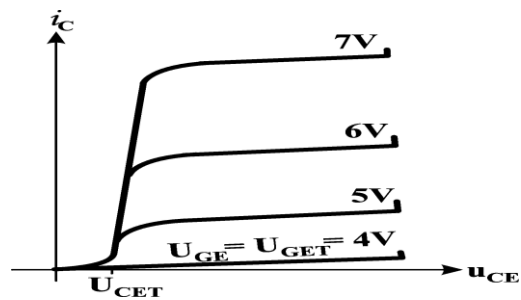
D : Drain
S : Source

İletim Karakteristiği**Açıklama**

- MOSFET daima doyumda kullanılmalıdır.
- Giriş olduğu sürece çıkış vardır.
- Giriş gerilim, çıkış akımdır.
- Kazanç sonsuz kabul edilir.
- En hızlı yarı iletken elemandır. İletime girme birkaç 10 ns ve iletimden çıkma birkaç 100 ns civarındadır.
- İletim gerilim düşümü (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 nano amperler mertebesinde. Ancak, gerilim sinyali ilk verildiğinde yüksek değerli bir şarj akımı çeker. Bu akımın karşılanmasına dikkat edilmelidir. Aksi halde hız düşer.
- Kapı dayanma gerilimi ± 20 V'tur. Gerçekte, uygulanan gerilim ± 18 V'u geçmemelidir.
- **Kapı eşik gerilimi**, kontrol açısından büyük bir avantajdır.

IGBT**Sembol**

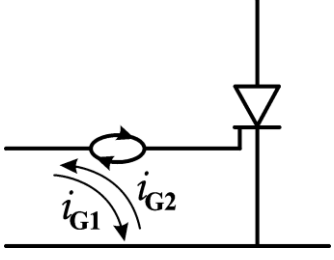
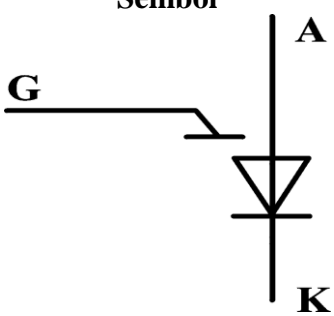
C : Kollektör
E : Emiter
G : Kapı

İletim Karakteristiği

U_{CET} : Çıkış Eşik Gerilimi, U_{CET} 2 V civarındadır.
 U_{GET} : Kapı Eşik Gerilimi, U_{GET} 4 V civarındadır.

Açıklama

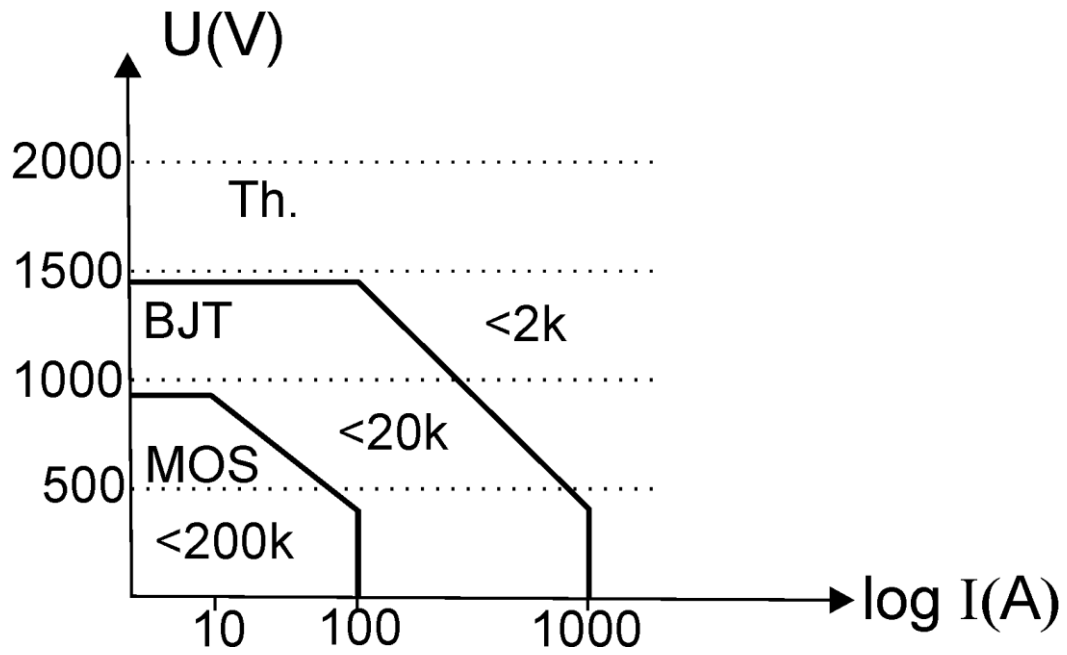
MOSFET'in mos kontrolü ve BJT'nin ana akım karakteristiğini birlikte taşır. Tek dezavantajı **çıkış eşik geriliminin** oluşudur. Ancak iç direnci çok küçük olduğundan, yüksek akımlarda yine avantajlı duruma geçer. Günümüzde, ortamın biraz üzerindeki güç ve frekanslarda, en yaygın olarak kullanılan elemanlardır.

<p>GTO</p> <p>Sembol</p> 	<p>Açıklama</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kısa süreli i_{G1} ile tetiklenir ve i_{G2} ile söndürülür. • i_{G1} çok küçük değerlerdedir (normal trstörlerdeki gibi) • i_{G2} çok büyük değerlerdedir ($\frac{1}{4}$ ana akım kadar) • Hızlı ve tam kontrollü özel bir tristördür. • Düşük frekans ve yüksek güçlerde kullanılır. • Söndürme sinyalinin büyüklüğünden dolayı tetikleme devreleri karmaşık ve pahalıdır.
<p>MCT</p> <p>Sembol</p> 	<p>Açıklama</p> <p>MOSFET ve tristör karışımı, oldukça hızlı, gerilim kontrollü, karma bir elemandır. MOSFET'in ideal sürme özelliği ile tristörün 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.</p>

Yİ GÜÇ ELEMANLARININ KARŞILAŞTIRMA TABLOSU

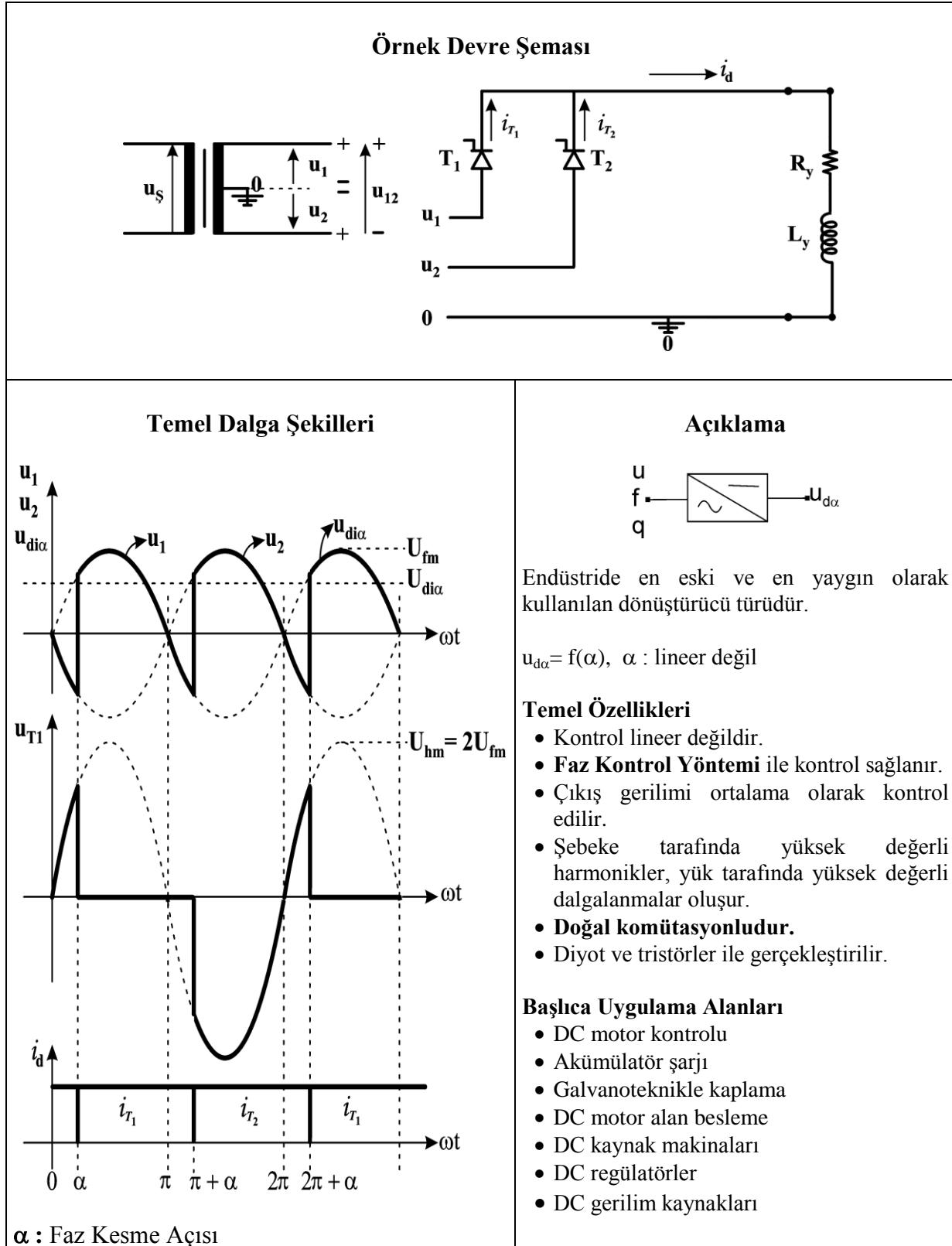
TEMEL Yİ GÜÇ ELEMANLARININ İYİDEN KÖTÜYE DOĞRU SIRALAMASI				
Sürme Kolaylığı	MOSFET	IGBT	GTO	BJT
Sönme Kolaylığı	MOSFET	IGBT	BJT	GTO
İletim Gerilim Düşümü	BJT (1.0 V)	GTO (2.0 V)	IGBT (3.0 V)	MOSFET (5.0V)
Anahtarlama Güç Kaybı	MOSFET	IGBT	GTO	BJT
Akım Dayanımı	GTO (3000 A)	IGBT (800 A)	BJT (600 A)	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
<p>Not : 1. Güç BJT'leri genellikle Darlington yapıda ve npn türündedir.</p> <p>2. Burada GTO tristör ailesini temsil etmektedir.</p>				

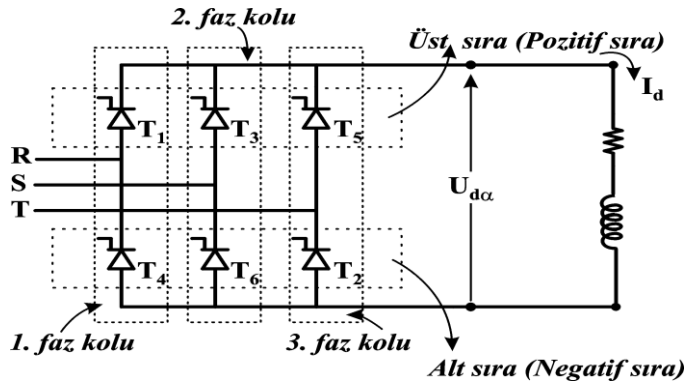
Yİ GÜÇ ELEMANLARININ KARŞILAŞTIRMA ALANI



1.3. GÜÇ DEVRELERİ VE UYGULAMA ALANLARI

AC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER (DOĞRULTUCULAR, REDRESÖRLER)



Genelleştirilmiş AC-DC Dönüştürücü Devre Şeması

Üst ve alt sıradan herhangi birisi kullanılırsa **Yarım Dalga Doğrultucu**, her ikisini de kullanılırsa **Tam Dalga Doğrultucu** elde edilir.

Tam dalga bir doğrultucunun çıkış gerilimi, aynı faz sayılı eşdeğer yarım dalga bir doğrultucu çıkış geriliminin 2 katıdır.

Çıkış gerilimi $U_{d\alpha}$ çok dalgalı da olsa, büyük değerli yük endüktansından dolayı çıkış akımı I_d **sürekli ve sabit** kabul edilir. **Serbest geçiş diyodu**, yük akımının sürekliliğini sağlar. Serbest geçiş diyodu olmadığında, sürekli kabul edilen DC yük akımını, hem üst hem de alt sıra elemanlar eşit aralıklarla ve sırayla geçirirler. 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 α gecikme açıları $0 - \pi$ aralığında ayarlanabilir. Bu açığa **Tetikleme Gecikmesi veya Gecikme Açısı** denir. Üst ve alt sıradan aynı anda sadece birer eleman iletimde kalabilir.

Doğrultucularda bütün analiz faz sayısına bağlı olarak genelleştirilecektir. Yarım dalga bir doğrultucuda, tek fazlı hariç, 2π 'lik bir peryotta faz sayısı kadar tepe vardır. Tek fazlı doğrultucu bu genellemeye uymadığından, burada verilen genel bağıntıların kullanılabilmesi için, tek fazlı doğrultucunun 2 fazlı eşdeğeri dikkate alınmalıdır.

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

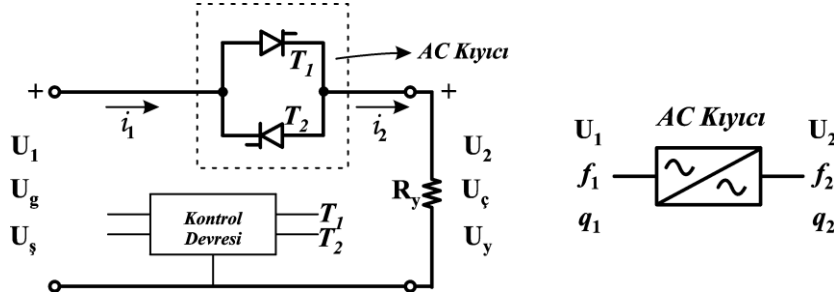
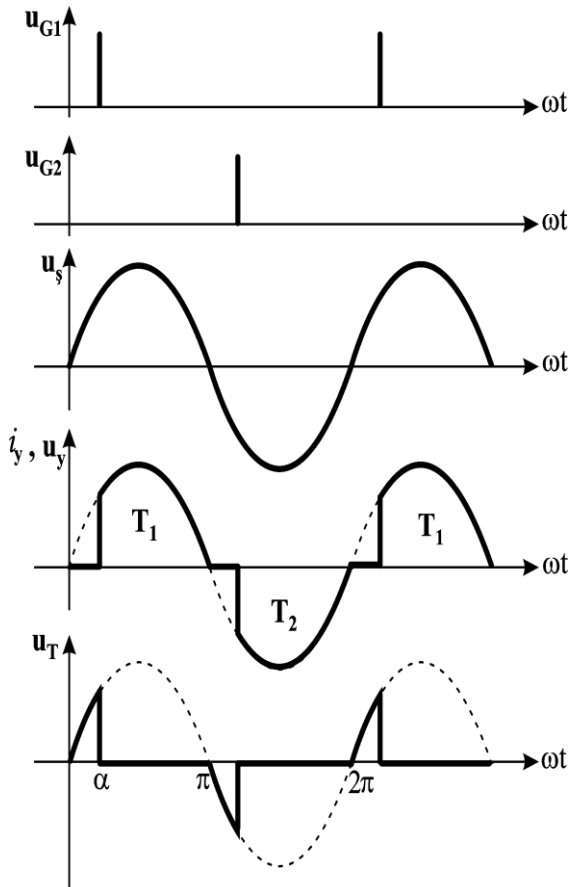
$\alpha < \pi/2$ için, $U_{d\alpha} > 0 \Rightarrow$ **Doğrultucu Modu**

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

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

Bir doğrultucuda, sabit kabul edilen çıkış veya yük akımı I_d 'nin yönü değiştirilemez. Ancak, kontrollü doğrultucularda her iki yönde de gerilim elde edilebilir.

Bu durumda, doğrultucu modunda çıkış gücü pozitifdir, yani AC gerilim DC'ye çevrilir ve AC şebekeden DC yüke enerji aktarılır. İnverter modunda ise, çıkış gücü negatiftir, yani DC gerilim AC'ye çevrilir ve DC çıkıştaki enerji AC şebekeye aktarılır.

AC-AC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER (AC KIYICILAR, DOĞRUDAN FREKANS DÖNÜŞT.)**Örnek Devre Şeması****Temel Dalga Şekilleri**

α : Faz Kesme Açısı

Normal olarak, sabit frekansta çalışan ve giriş geriliminin altında gerilim kontrolü yapan AC-AC dönüştürücüler, **AC Kıyıcı** olarak tanımlanır.

Açıklama

Endüstride çok yaygın olarak kullanılan dönüştürücü türüdür.

$u_2 = f(\alpha)$, α : lineer değil

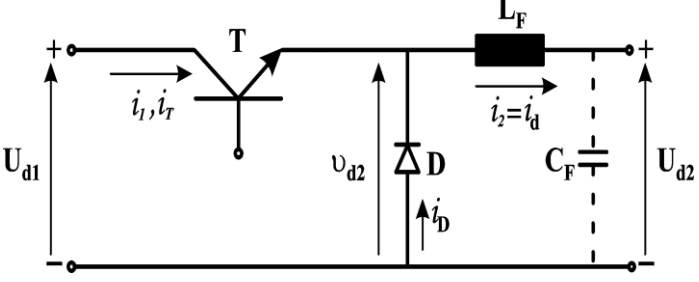
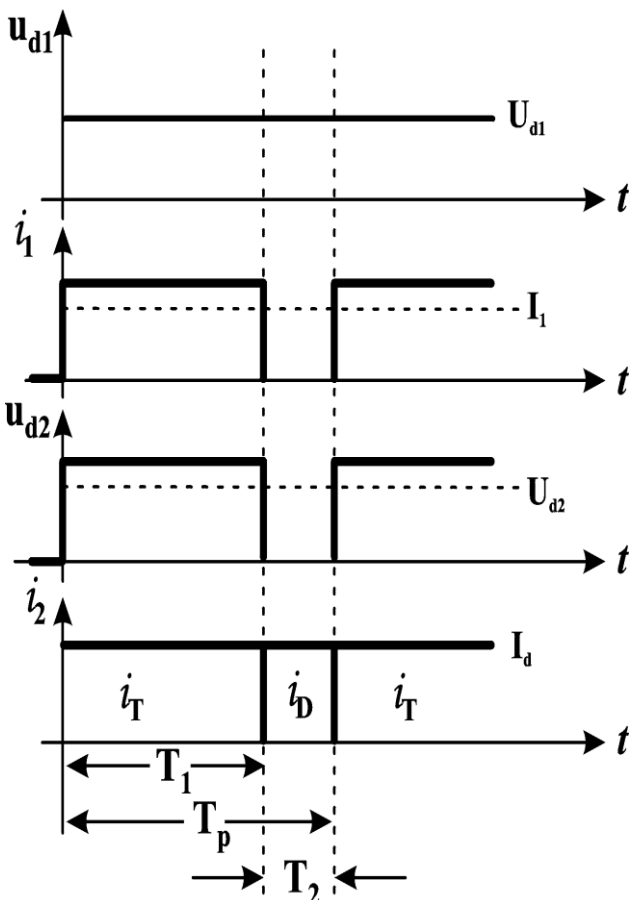
Temel Özellikleri

- 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 ve triyaklar ile gerçekleştirilir.

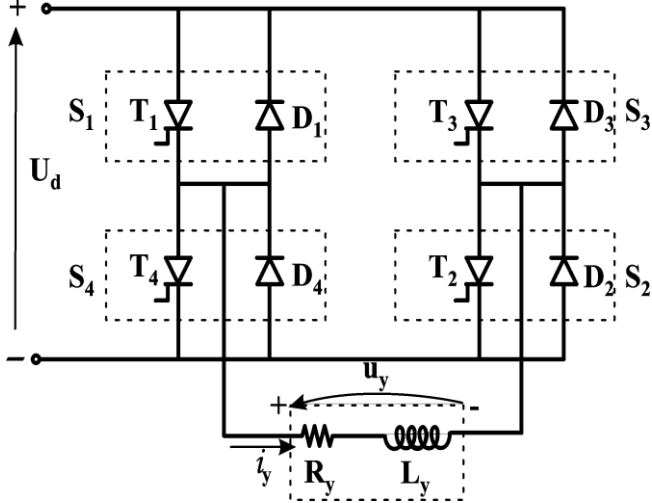
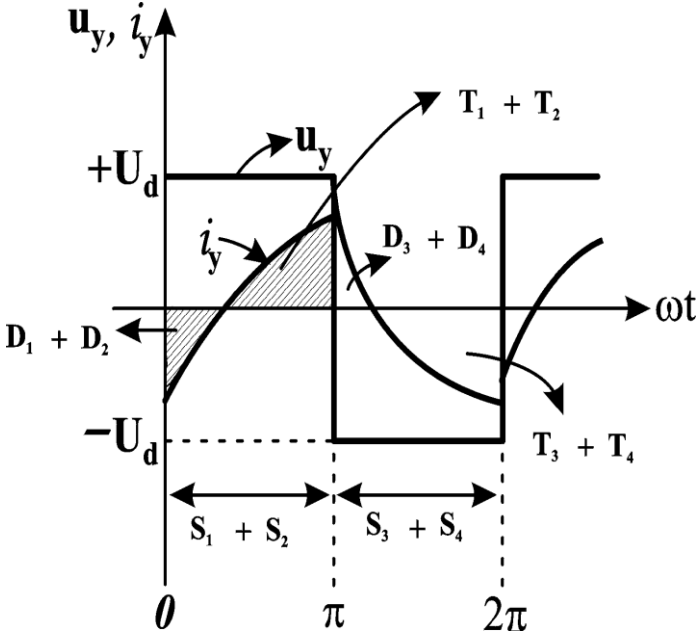
Başlıca Uygulama Alanları

- Bütün omik yüklerde (fırın, ısıtıcı, lamba gibi) güç kontrolü
- Vantilatör karakteristikli küçük güçlü AC motorlarda (fan, pompa, kompresör gibi) hız kontrolü
- Gerilim regülatörlerinde gerilim kontrolü
- Elektronik şalterlerde devreyi açma ve kapama
- Reaktif güç kompanzasyonu

DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER (DC KIYICILAR)

<p style="text-align: center;">Örnek Devre Şeması</p> 	<p style="text-align: center;">Açıklama</p> <p>$u_{d2} = f(\lambda)$, λ: lineer</p> <p style="text-align: center;">Temel Özellikleri</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kontrol lineerdir. • Tek veya Çift Yönlü DC PWM Yöntemi ile kontrol sağlanır. • Çıkış gerilimi ortalama olarak kontrol edilir. • Yüksek frekanslı devreler olarak bilinir. • Hem şebeke hem de yük tarafındaki dalgalanmalar kolay düzeltilebilir. • Zorlamalı komütasyonludur. • Genel olarak, orta güç ve orta frekanslarda BJT, düşük güç yüksek frekanslarda MOSFET, yüksek güç düşük frekanslarda SCR kullanılır. IGBT ise, ortanın üzerindeki güç ve frekanslarda kullanılır.
<p style="text-align: center;">Temel Dalga Şekilleri</p>  <p>T_1 : İletim Süresi T_p : Darbe Peryodu $\lambda = T_1/T_p$: Bağlı İletim Süresi $f_p = 1/T_p$: Darbe Frekansı</p>	<p style="text-align: center;">Başlıca Uygulama Alanları</p> <ul style="list-style-type: none"> • DC motor kontrolü • Akümülatör şarjı • Galvanoteknikle kaplama • DC motor alan besleme • DC kaynak makinaları • DC regülatörler • Anahtarlamalı güç kaynakları • DC gerilim kaynakları <p>Normal olarak, endüktans bulunmayan ve giriş geriliminin altında gerilim kontrolü yapan DC-DC dönüştürücüler, DC Kıyıcı olarak tanımlanır.</p>

DC-AC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER (İNVERTERLER, EVİRİCİLER)

<p style="text-align: center;">Örnek Devre Şeması</p> 	<p style="text-align: center;">Açıklama</p> <p>$U_y = f(\lambda)$, λ: lineer</p> <p>Temel Özellikleri</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kontrol lineerdir. • Tek veya Çift Yönlü AC PWM Yöntemi ile kontrol sağlanır. • Çıkış gerilimi efektif olarak kontrol edilir. • Yüksek frekanslı devreler olarak bilinir. • Şebeke tarafındaki dalgalanmalar ve yük tarafındaki harmonikler kolay düşürülebilir. • Zorlamalı komütasyonludur. • Genel olarak, orta güç ve orta frekanslarda BJT, düşük güç yüksek frekanslarda MOSFET, yüksek güç düşük frekanslarda SCR kullanılır. IGBT ise, ortanın üzerindeki güç ve frekanslarda kullanılır.
<p style="text-align: center;">Temel Dalga Şekilleri</p>  <p>Normal olarak, DC-DC ve DC-AC dönüştürücülerde, frekans yükseldikçe, filtre elemanları küçülür, devrenin boyutu ile fiyatı düşer ve güç yoğunluğu artar.</p>	<p>Başlıca Uygulama Alanları</p> <ul style="list-style-type: none"> • AC motor kontrolü • Endüksiyonla ısıtma • Elektronik balastlar • Kesintisiz Güç Kaynakları • Yüksek Gerilimde DC Taşıma • AC regülatörler • AC gerilim kaynakları

1.4. KONTROLDA KULLANILAN ELEMAN ve DEVRELER

Bütün elektronik ve lojik eleman ve devreleri, güç elektroniğinde kontrol elemanları olarak kullanılmaktadır. Bu eleman ve devreler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Yarı iletken elemanlar
- Kapılar
- Karşılaştırıcılar
- Amplifikatörler
- Sayıcılar
- Flip-flop'lar
- Shift-register'ler
- Schmitt-trigger'ler
- U/I, I/U dönüştürücüleri
- U/f, f/U dönüştürücüleri
- Fonksiyonel devreler (toplama, -, *, d/dt)
- Termistörler
- Opto bağlayıcılar
- Manyetik bağlayıcılar
- Sıfır gerilim detektörleri
- Sıfır akım detektörleri
- Alan etkili dönüştürücüler
- Fotoseller
- Mil pozisyon kaydediciler
- Tako generatörler

Ancak, bazı eleman ve devreler, özellikle güç elektroniğinde daha çok kullanılırlar. Bunlar aşağıda kısaca anlatılmıştır.

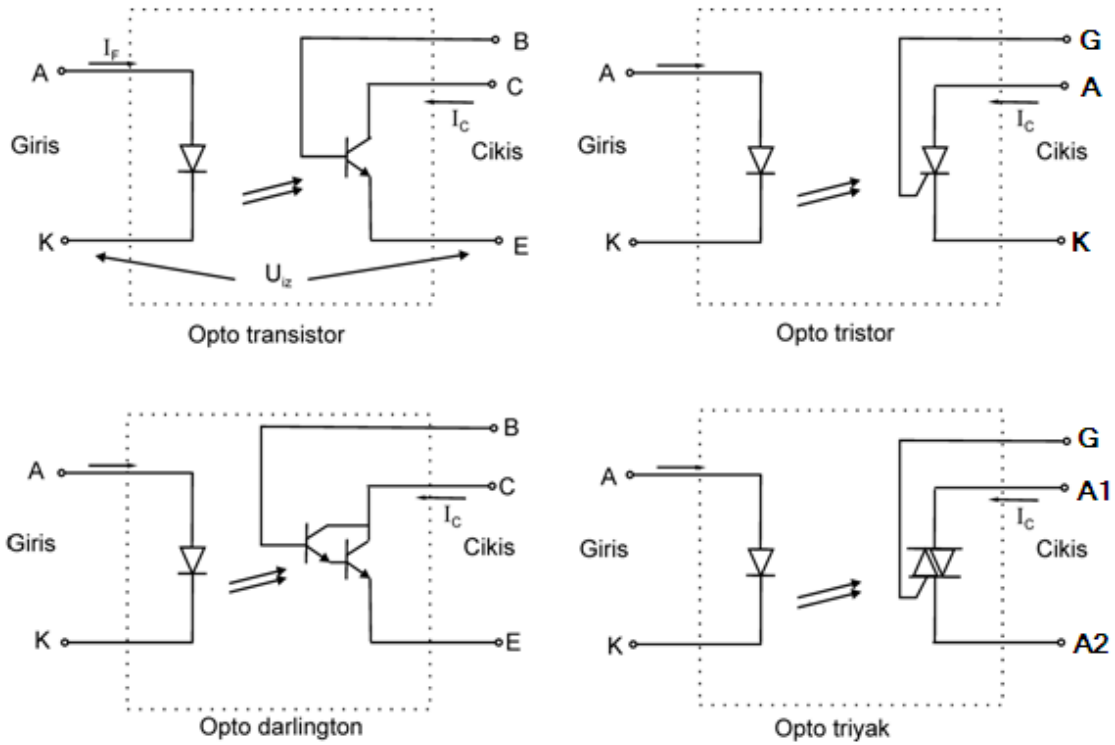
OPTİK BAĞLAYICILAR

Genel olarak, bir giriş sinyali veya bilgisini **ışık vasıtasıyla yalıtılmış olarak** çıkışa aktaran elemanlardır. Bu elemanlar, ışık yayan bir led, hava boşluğu ve ışıkla iletme giren bir foto elemandan oluşmaktadır. Endüstriyel olarak,

- a) Opto Transistör
- b) Opto Darlington
- c) Opto Tristör
- d) Opto Triyak

Türleri kullanılmaktadır. Bu elemanların sembolleri, aşağıdaki şekilde toplu olarak görülmektedir.

Opto transistörler, sinyal izolasyonu amacıyla en yaygın olarak kullanılan optik bağlayıcılarıdır. Bu elemanlarda, çok önemli 3 özellik veya parametre mevcuttur. Bunlar kısaca aşağıda açıklanmıştır.



1. Akım Kazancı

$$a = \frac{I_C}{I_F} \quad \begin{array}{l} I_C : \text{Çıkış Akımı} \\ I_F : \text{Giriş akımı} \end{array}$$

Akım kazancı, çıkış akımının giriş akımına oranıdır.

2. İzolasyon Gerilimi

U_{iz} : İzolasyon Gerilimi (kV mertebelerinde)

İzolasyon gerilimi, giriş ve çıkış arasındaki izolasyon dayanma gerilimidir.

3. Çalışma Frekansı

f_p : Çalışma Frekansı

Çalışma frekansı, elemanın çalışabileceği frekansı veya elemanın hızını gösterir. Genellikle, elemanın kaç kHz'de çalışabileceği, sinyalin başlama ve bitişindeki gecikme süreleri (birkaç 100 ns ile birkaç μ s arasında) ile sinyalin yükselme ve düşme süreleri (birkaç 10 ns ile birkaç μ s arasında) verilir.

Uygulamada, uygun bir opto transistörün kullanılması gerekir. Özellikle hız ve kazançları ile fiyatları oldukça farklı elemanlar mevcuttur. Ayrıca, AC ve DC girişli, mantık kapı çıkışlı ve çok hızlı türleri vardır. Örnek olarak,

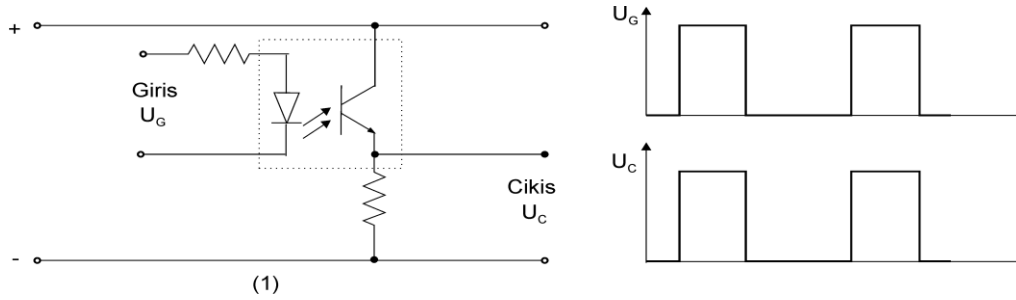
4N 25/35 : Normal hızlı ($t_r + t_f = 10 \mu s$ gibi) ve normal kazançlı ($a = 0.5$ ile 1 arasında)

4N 45/46 : Yüksek kazançlı ($a = 100$ ile 900 arasında)

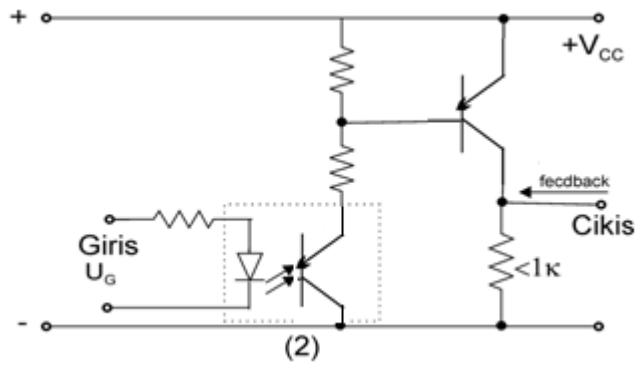
6N 135/136 : Yüksek hızlı $t_r + t_f = 10 ns$ gibi) ve düşük kazançlı ($a = 0.1$ ile 0.2 arasında)

Opto transistörlerdir.

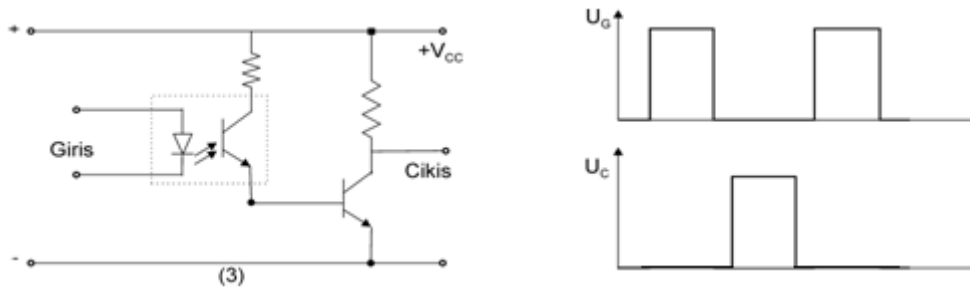
Örnek Bağlantılar



Not : Eleman doğrudan kullanılmıştır. Yükseltme işlemi yoktur. Genel olarak, yüksek seviyenin iyi ve düşük seviyenin kötü olduğu söylenebilir.



Not : Yükseltme işlemi yapılmıştır. Uygulamalarda, genellikle yükseltme işlemi yapılır. Genel olarak, yüksek seviyenin iyi ve düşük seviyenin kötü olduğu söylenebilir.



Not : Yükseltme işlemi yapılmıştır. Uygulamalarda, genellikle yükseltme işlemi yapılır. Genel olarak, yüksek seviyenin kötü ve düşük seviyenin iyi olduğu söylenebilir.

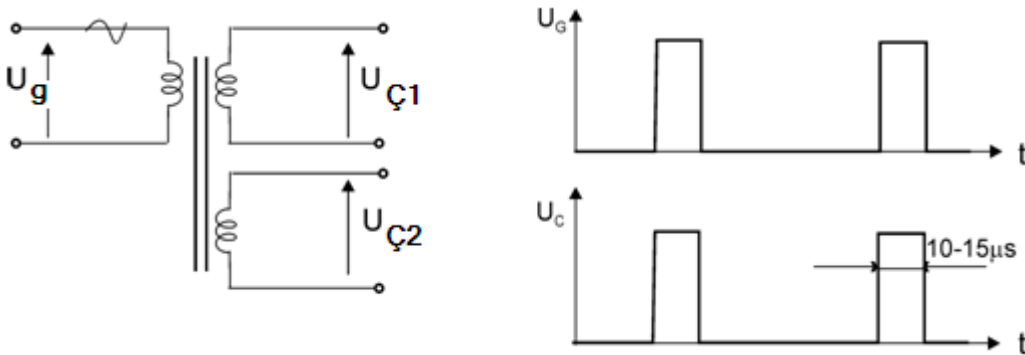
MANYETİK BAĞLAYICILAR

Genel olarak, bir giriş sinyali veya bilgisini **manyetik alan vasıtasıyla yalıtılmış olarak** çıkışa aktaran elemanlardır. Bu elemanlar, **tetikleme transformatörü** olarak bilinmektedir ve daha çok tristörlerin tetiklenmesinde kullanılmaktadır.

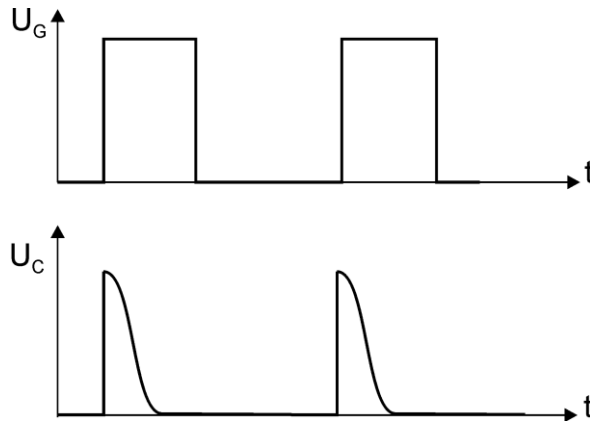
Tetikleme transformatörü, genellikle küçük boyutlu bir ferit nüve üzerine az sarım sayılı bir giriş ve bir veya birkaç çıkış sargısı sarılarak elde edilir. Bütün sargıların birbirine ve nüveye karşı izole edilmeleri oldukça önemlidir. İzolasyon gerilimi, birkaç kV mertebelerinde olmalıdır.

Bu transformatörler oldukça hızlı cevap verirler ve yüksek frekanslar için uygundur. Ayrıca, sarımda gerilim dönüşümü de amaçlanabilir.

Genellikle, endüktans değeri birkaç 100 μH mertebelerinde olup, birkaç 100 μs mertebelerindeki kısa süreli gerilim sinyallerini aktarabilirler. Uzun süreli sinyallerde, başlangıçta kısa süreli bir çıkış verip, sonra kısa devre olurlar. Bu kısa devreye karşı, tedbir alınması gerekir.

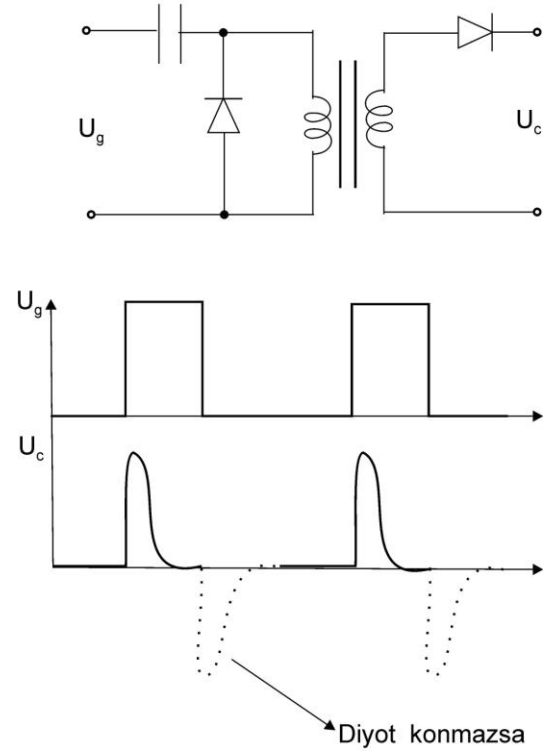
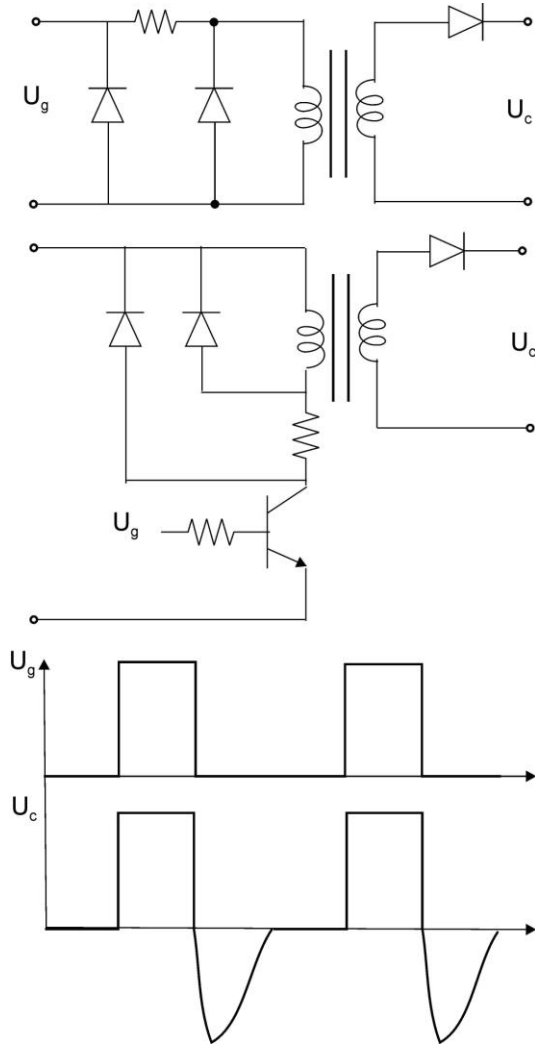


Not : Kısa süreli gerilim sinyali verildiğinde, sinyali aynen aktarırlar.



Not : Uzun süreli gerilim sinyali verildiğinde, başlangıçta sinyal verip, sonra kısa devre olurlar.

Örnek Bağlantılar



C : trafoda kısa devre ihtimalini kaldırır.
LC : T yi belirler.

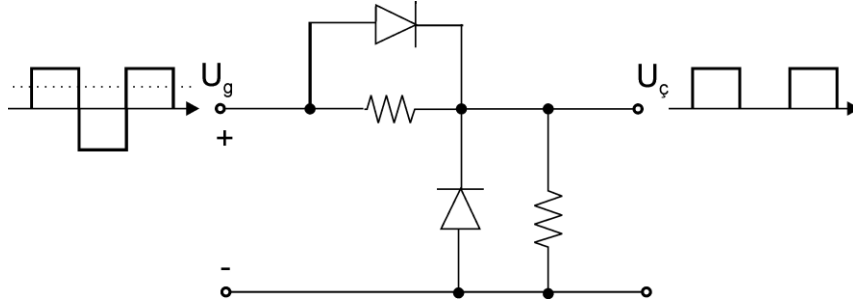
Optik ve Manyetik Bağlayıcılar Arasındaki Önemli Farklar

1. Optik bağlayıcılar çıkışta 2. bir DC gerilim kaynağı gerektirir. Tetikleme transformatörünün çıkışı zaten bir gerilim kaynağıdır.
2. Optik bağlayıcılar kısa ya da uzun her türlü sinyali iletebilir. Tetikleme transformatörü ancak kısa süreli sinyalleri iletir.
3. Sinyallerin yükseltilmesi gerektiğinde, yükseltme işlemi, optik bağlayıcıların çıkışında transformatörlerin ise girişinde yapılır.

Not : Uzun süreli gerilim sinyallerinin transformatör ile iletilmesi özel düzenlerle sağlanabilmektedir.

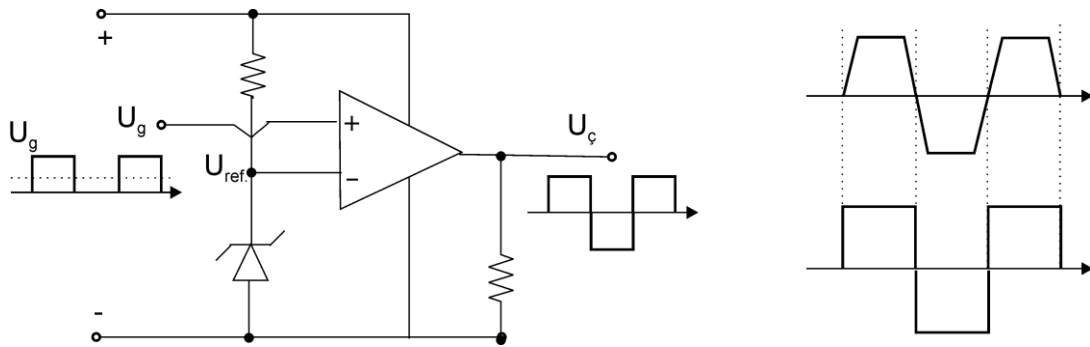
KONTROLDA SIKÇA KARŞILAŞILAN İŞLEMLER

1. İki Yönlü bir Sinyalin Tek Yönlü Hale Getirilmesi



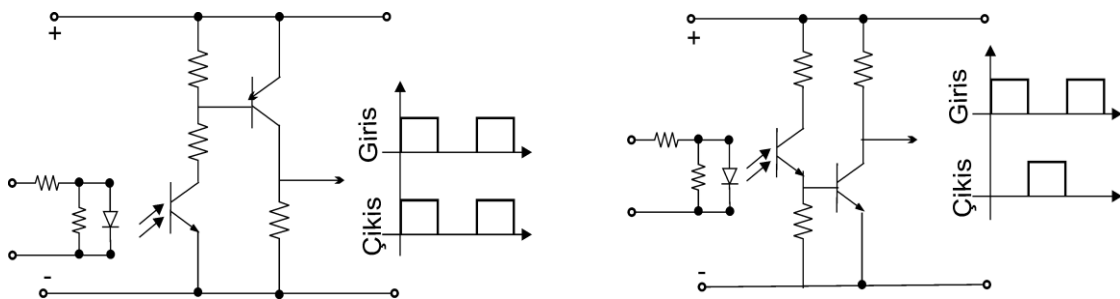
Not : İki (çift) yönlü (kutuplu) bir sinyal, buradaki gibi kolayca tek yönlü (kutuplu) hale dönüştürülebilir. Başka şekillerde de yapılabilen bu işlemle kontrolde sıkça karşılaşılmaktadır.

2. Tek Yönlü bir Sinyalin İki Yönlü Hale Getirilmesi



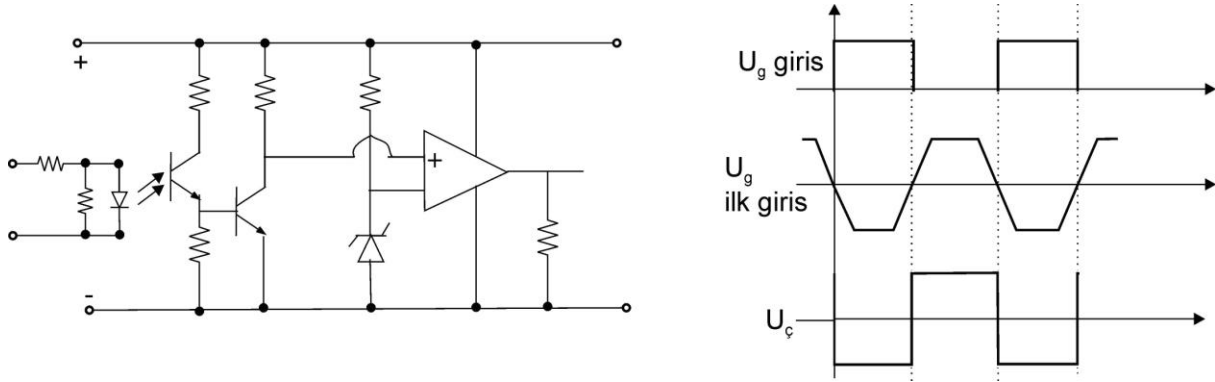
Not : Tek yönlü bir sinyal, buradaki gibi kolayca iki yönlü hale dönüştürülebilir. Aynı devre, uzun olan yükselme ve düşme sürelerini kısaltmak veya sinyalleri keskinleştirmek için de kullanılmaktadır. Ancak, burada kullanılan karşılaştırıcının da hızlı olması gerekir.

3. Bir Opto Bağlayıcı ile Tek Yönlü bir Sinyalin Elde Edilmesi



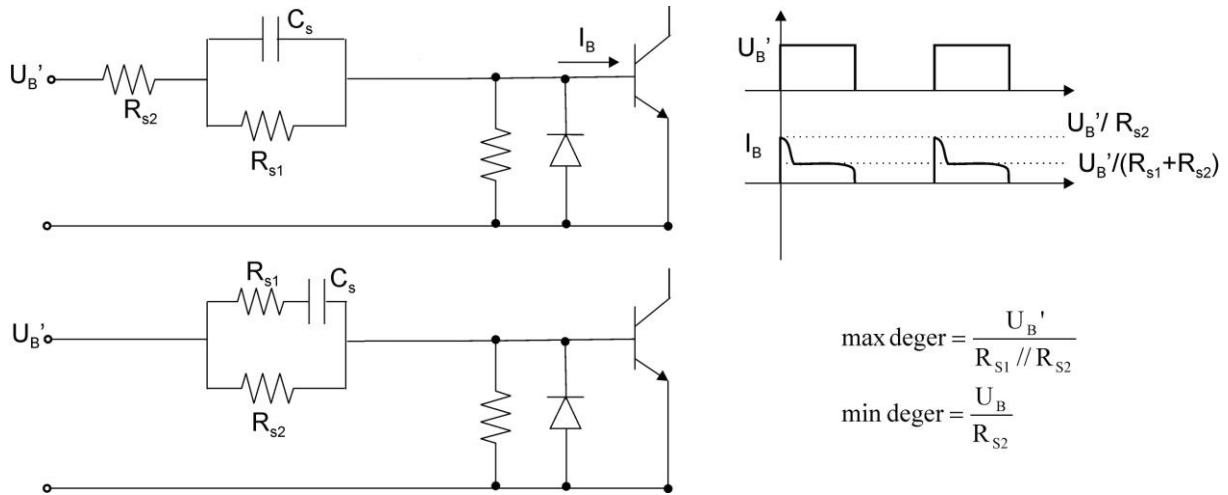
Not : Bir opto bağlayıcı ile izoleli olarak, buradaki gibi kolayca tek yönlü bir sinyal elde edilebilir. Soldaki devrede yüksek, sağdaki devrede ise düşük seviye daha emniyetlidir.

4. Bir Opto Bağlayıcı ile İki Yönlü bir Sinyalin Elde Edilmesi



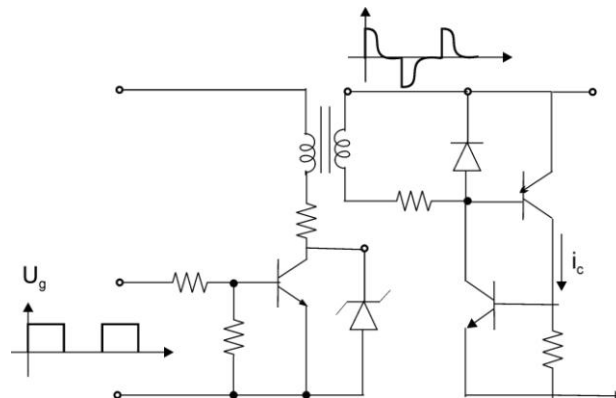
Not : Bir opto bağlayıcı ile izoleli olarak, buradaki gibi kolayca iki yönlü bir sinyal elde edilebilir.

5. Sinyallerde Ani Akım Darbelerinin Oluşturulması



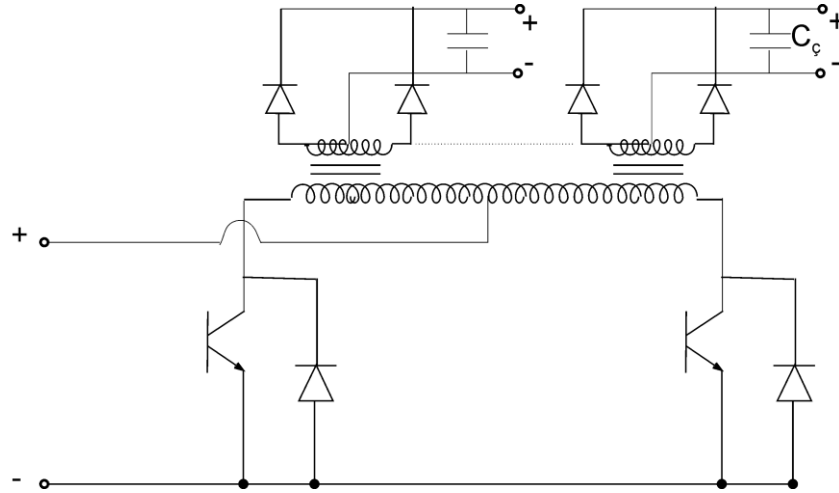
Not : Prensip olarak seri bir kondansatör kullanılarak, buradaki gibi kolayca sinyaller ani akım darbeleri sinyallere dönüştürülebilir. Güç elemanlarının iletme girme işlemlerini hızlandırmak için kullanılan bir yöntemdir. Her iki devre de aynı işlemi gerçekleştirir.

6. Uzun Süreli bir Sinyalin Tetikleme Transformatörü İle İletilmesi



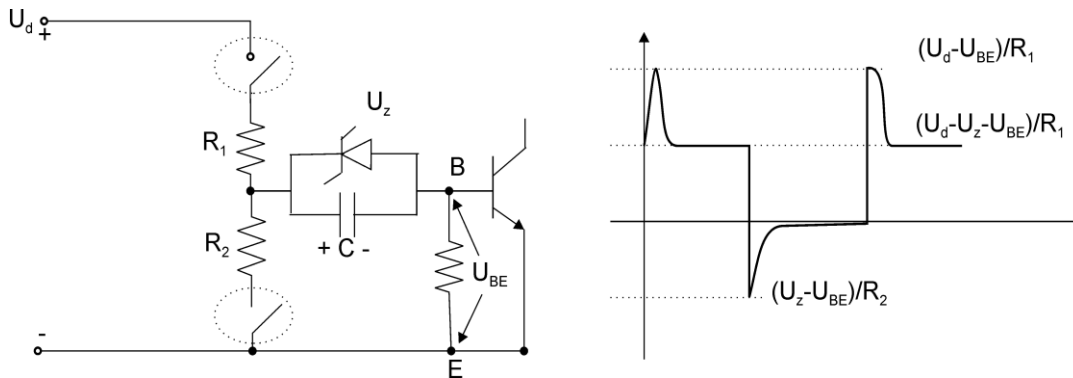
Not : Bu devre yardımıyla uzun süreli bir sinyalin bir tetikleme transformatörü ile iletilmesi sağlanabilir. Tetikleme transformatörü iki yönlü ve kısa süreli bir çıkış sinyali üretir. Çıkışta görülen 2 transistörlü yapı bir tristör eşdeğer devresidir. Üstteki transistöre gelen pozitif sinyal ile yapı iletime girerek çıkışı pozitifte kilitler ve negatif sinyal geldiğinde yapı kesime girerek çıkışı sıfırlar.

7. Bir DC Gerilim Kaynağından Çok Sayıda İzoleli DC Gerilim Kaynağının Elde Edilmesi



Not : Burada, yüksek frekanslı mini bir inverter kullanılarak, bir DC gerilim kaynağından çok sayıda izoleli DC gerilim kaynağı elde edilebilmektedir. Ferit nüveli olan yüksek frekans transformatöründe yeterli bir izolasyon geriliminin sağlanması oldukça önemlidir. Ayrıca, doğrultucu diyotların da hızlı olması gerekir. Çıkış gerilimi yüksek frekanslı ve kare dalga şeklinde olduğundan, oldukça küçük değerli düzeltme kondansatörleri yeterli olmaktadır. Güç elektroniği sistemlerinde genellikle çok sayıda izoleli DC gerilim kaynaklarına ihtiyaç duyulduğundan, bu devre yaygın olarak kullanılmaktadır.

8. Pozitif (+) Gerilim Kaynağından Negatif (-) Gerilim Kaynağının Elde Edilmesi

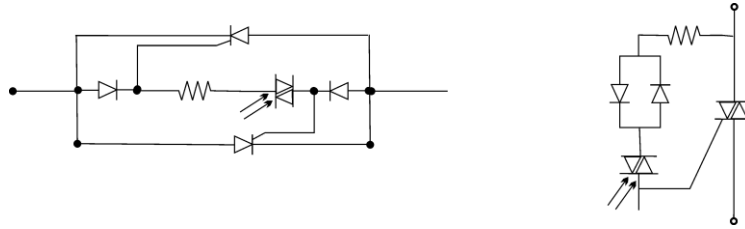


Not : Bu devre yardımıyla, bir zener diyodu ve küçük değerli bir kondansatör kullanılarak, özellikle transistörlerin hızlı söndürülmesi için, kısa süreli bir negatif gerilim kaynağı elde edilebilmektedir. Devre aynı zamanda, pozitif sinyallerde ani akım darbesi de sağlamaktadır.

Bu şekilde elde edilen negatif gerilim kaynakları, SCR ve GTO elemanlarının söndürülmesinde de kullanılmaktadır.

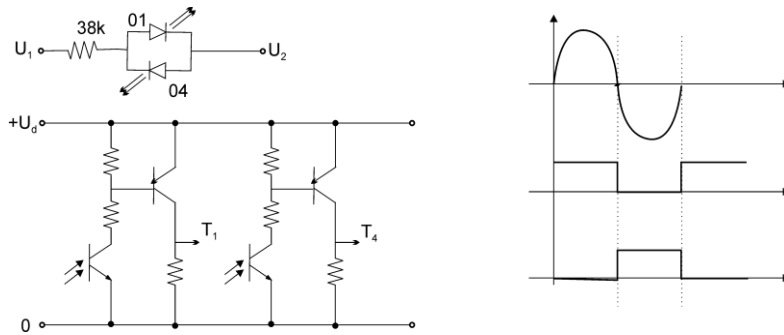
Bir sinyalin baştan ve/veya sondan kesilmesi, sinyalde faz kaydırması, sinyaller arasında boş (ölü) zaman ve/veya ortak zaman oluşturulması gibi işlemleri araştırınız.

9. AC Devrelerde Tetikleme için Opto Triyak Kullanılması

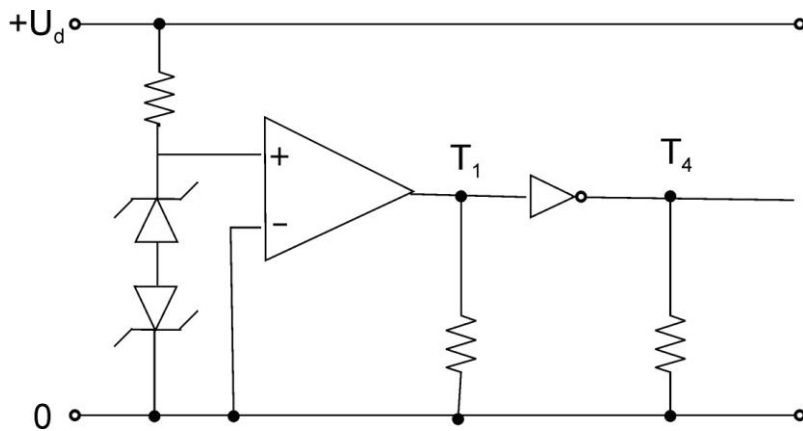


Not : AC kıyıcılar, opto triyak kullanılması sinyal izolasyonu için büyük kolaylık sağlar. İlave bir DC gerilim kaynağına gerek kalmaz.

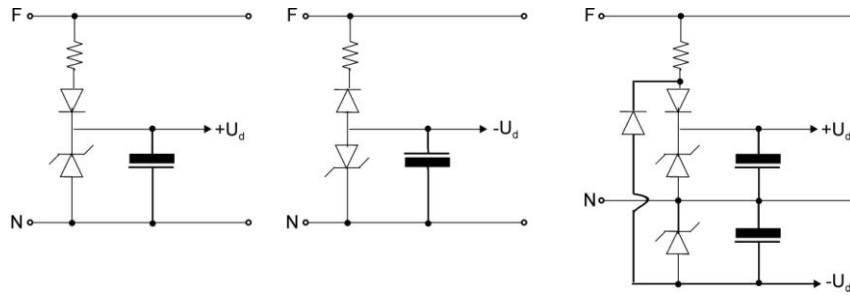
10. AC Devrelerde Senkronizasyon için Opto Transistör Kullanılması



Not : AC kıyıcılar, tristörlerin iletim aralıkları ya da senkronize kare dalgalar, izoleli bir şekilde, opto transistörler vasıtasıyla da elde edilebilir. Bu daha kolaydır. İzolasyon gerekli değil ise, bir karşılaştırıcı ile aşağıdaki gibi de senkronize kare dalgalar elde edilebilir.



11. AC Devrelerde Tek ve Çift Yönlü DC Gerilim Kaynağının Elde Edilmesi



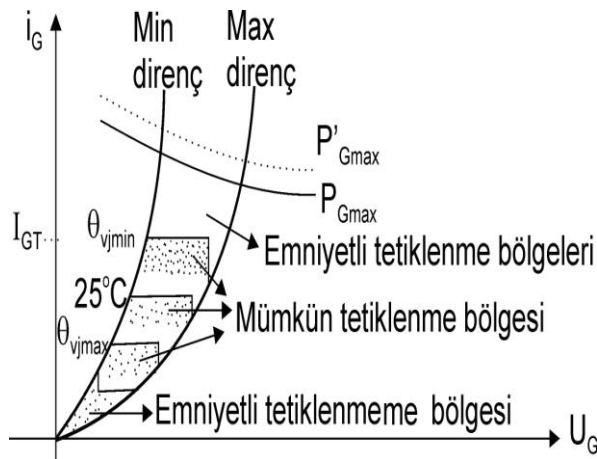
Not : AC uygulamalarda, bir zener diyodu kullanılarak, tek (pozitif veya negatif) veya çift (pozitif ve negatif) yönlü bir DC gerilim kaynağı doğrudan AC şebekeden elde edilebilmektedir. Düşük güçlerde kullanılan bu yöntem, oldukça basit ve ucuzdur.

1.5. GÜÇ ELEMANLARINDA SÜRME TEKNİKLERİ

TRİSTÖRLERDE TETİKLEME (SÜRME) TEKNİKLERİ

Tristör Kapı (Giriş) Karakteristiği

Açıklama



$$I_{GT} = f(\theta_{vj}, U_{AK})$$

I_{GT} : Tetikleme Akımı

θ_{vj} : Jonksiyon Sıcaklığı

U_{AK} : Tetikleme Öncesi Anot-katot Gerilimi

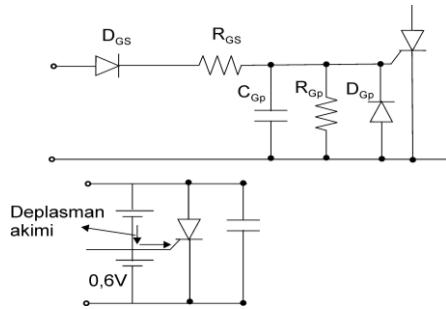
I_{GTM} : Maksimum Kapı Akımı

Tristörde I_{GT} tetikleme akımı, en kötü şartlarda bile tetiklenmenin garanti edildiği katalog değeridir. I_{GTM} ise, kapının sürekli olarak dayanabileceği akım değeridir. Bu iki akımın arasındaki bölge, emniyetli tetiklenme bölgesidir.

Tristörün gerçekte tetiklendiği akım ise, tetikleme öncesi anot-katot gerilimi ve jonksiyon sıcaklığı ile toleransa bağlıdır. Tristör, oldukça farklı akım değerlerinde tetiklenebilmektedir.

Tristörün kesinlikle tetiklenmediği bir akım bölgesi de vardır ve bu bölge emniyetli tetiklenmeme bölgesi olarak bilinir.

Koruma Elemanlarıyla Birlikte Tristör Kapı Devresi



Deplasman (Kayma) Akımı : Genel olarak, pozitif ana uç ile giriş (kontrol) ucu arasındaki eşdeğer jonksiyon kondansatörünün şarj akımı demektir. Bu akım, ana uçlar arasındaki gerilimin yükselme hızı ile doğru orantılıdır. Örneğin, tristörde, $I_D = f(dU_{AK}/dt)$

Tristörlerde, paralel giriş kondansatörünün yeterince dolu (0.6 V) olması durumunda, bu akım doğrudan tetikleme akımı olarak etki eder. Ana uçlar arasındaki gerilimin yükselme hızı kritik değere erişirse, bu akımın değeri tetikleme seviyesine erişir ve tristör tetiklenir.

Açıklama

R_{GS} : Seri Giriş (Kapı) Direnci
 R_{GP} : Paralel (Şönt) Giriş Direnci
 C_{GP} : Paralel (Şönt) Giriş Kondansatörü
 D_{GS} : Seri Giriş Diyodu
 D_{GP} : Ters Paralel Giriş Diyodu
 I_D : Deplasman Akımı

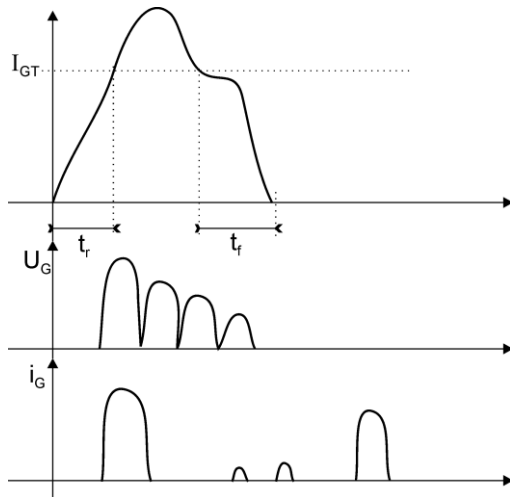
R_{GS} direnci, giriş akımını sınırlar veya giriş gerilim sinyalini akım sinyaline dönüştürür ve daima bağlanmalıdır.

R_{GP} direnci, kaçak (sızıntı) ve gürültü (parazit) ile deplasman akımlarına karşı koruma görevi yapar ve genellikle bağlanır.

C_{GP} kondansatörü, R_{GP} ile birlikte bir giriş filtresi oluşturur ve aynı amacı güçlendirir. Yüksek frekans ve yüksek gürültülü uygulamalarda, bu kondansatörün kullanılması gerekmektedir.

D_{GS} ve D_{GP} diyotlarının her ikisi de, ters akım ve ters gerilimlere karşı kapıyı koruma görevi yaparlar. Aynı anda her ikisinin de kullanılmasına genellikle gerek yoktur.

Tetikleme Sinyali



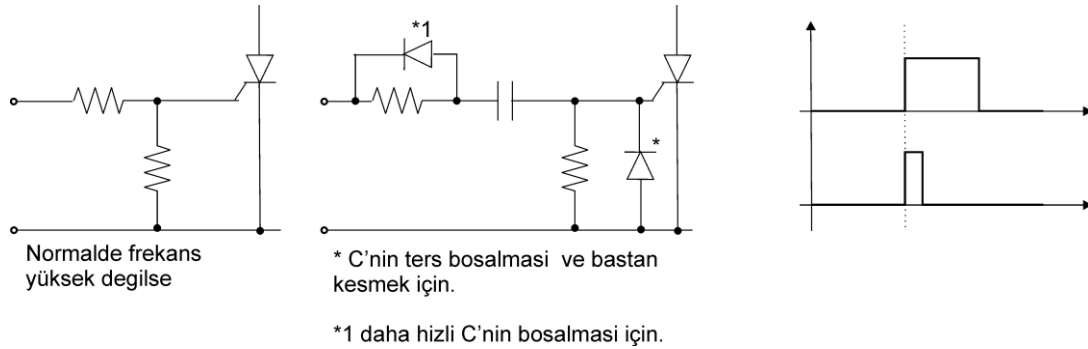
Açıklama

Tristör tetikleme sinyalleri, mümkün olduğunca, kısa süreli ve yüksek değerli olmalıdır. Örneğin, 10-15 μs ve $\frac{1}{2}$ -1 A'lık akım darbelerinin uygun olduğu söylenebilir.

Özel bir amacı yoksa, uzun süreli ve düşük değerli sinyallerin yerine, daima kısa süreli ve yüksek değerli sinyaller tercih edilmelidir. Yükselen kenarı hızlı ve yüksek değerli sinyaller, tristörün iletme girme süresini büyük ölçüde kısaltır ve kayıpları azaltır.

Ancak, omik-endüktif yüklü AC kırıyıcılar ile çoğu inverterlerde, uzun süreli sinyallerin kullanılması gerekmektedir. Bu durumda, sinyallerin düşük fakat emniyetli bir seviyede olması gerekir.

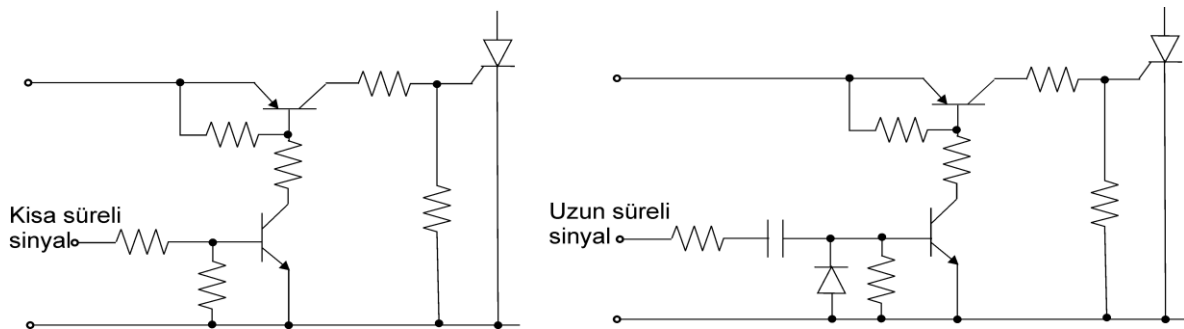
Yükseltmesiz bir Tetikleme Devresi



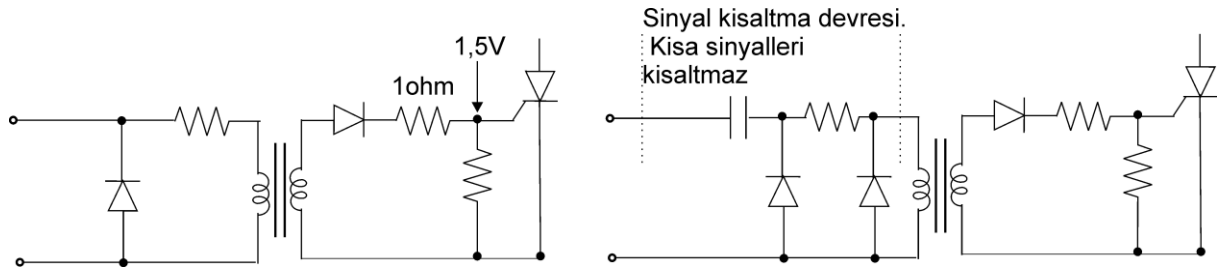
Düşük frekanslı uygulamalarda, normal olarak, en azından bir seri ve bir paralel direnç bulunmalıdır. Uzun süreli sinyallerde, prensip olarak, kapıya seri bir kondansatör bağlanarak sinyal süresi kısaltılabilir veya sinyal baştan kesilebilir ve sinyalin seviyesi yükseltilebilir. Ancak, sinyal bittiğinde bu kondansatörün boşalabilmesi veya resetlenebilmesi için, kapıya ters-paralel bir diyodun bağlanması gerekir. Ayrıca, seri direnç ters yönlü bir diyotla köprülenerek, kondansatörün boşalma süresi kısaltılabilir.

Yükseltmeli bir Tetikleme Devresi

Uygulamalarda genellikle, kontrol devrelerinde elde edilen sinyaller, tristörlerin tetiklenmesi için yeterli değildir ve bu sinyallerin yükseltilmesi gerekir. Yükseltme işlemi de, genellikle transistörlerle yapılır. Ayrıca, genellikle sinyallerin sıfırı (0) tristörlerin katoduna bağlıdır ve bu nedenle yükseltme işleminde şekilde görüldüğü gibi 2 transistör kullanılır. Yukarıdaki alt başlıkta tristör için anlatılanlar, burada kullanılan alt transistörler için de geçerlidir. Sinyal mevcut iken, üstteki yükseltme transistörlerinin doyumda çalışmaları ve tristörlerin yeterli bir akım ile sürülmeleri sağlanmalıdır. Kısaltma işlemi, alt transistörün girişinde yapılır.

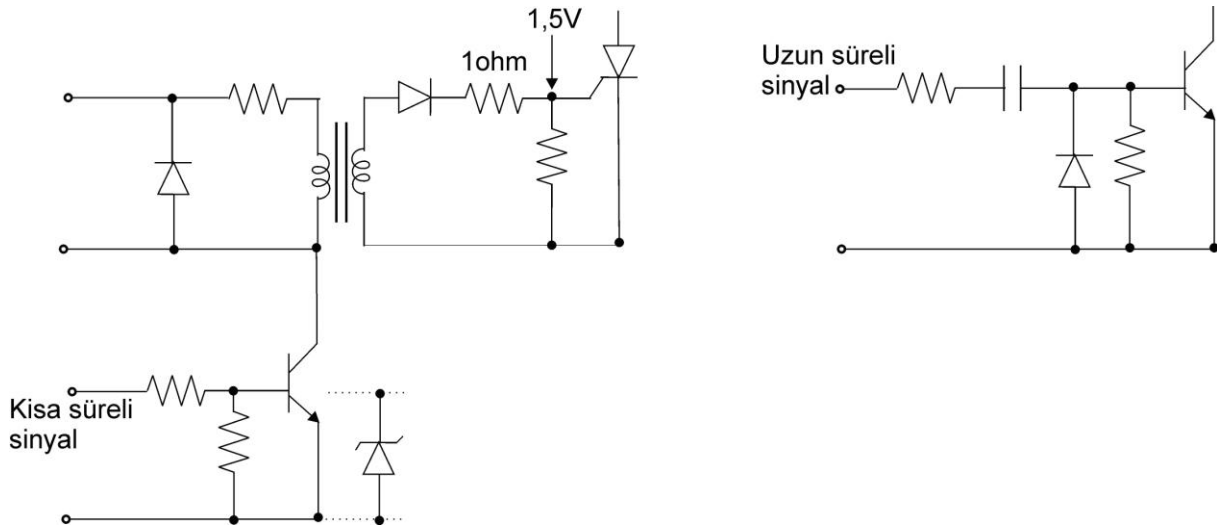


Yükseltmesiz ve İzoleli bir Tetikleme Devresi

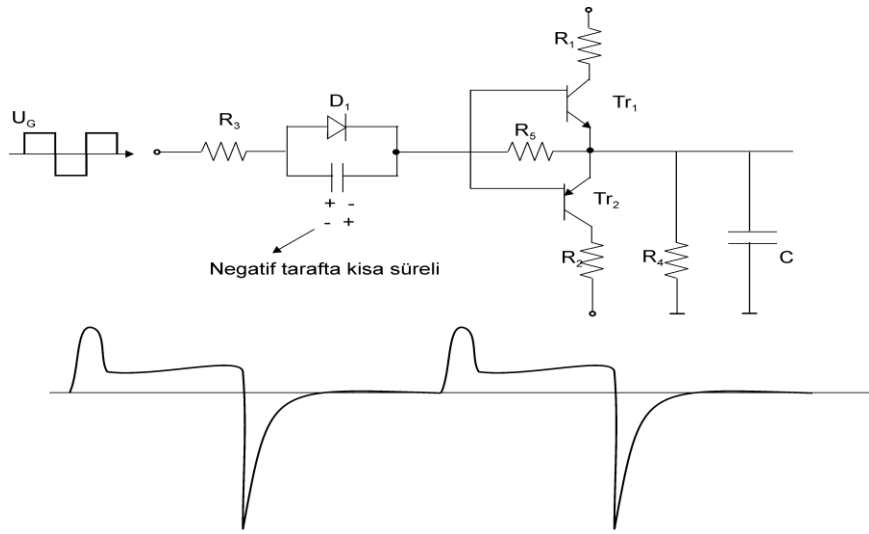


Tristörlerde sinyal izolasyonu genellikle tetikleme transformatörleri ile yapılmaktadır. Bu durumda, primer tarafta çok küçük değerli bir seri direnç çoğu zaman, çıkış katında yine küçük değerli bir seri direnç ve bir diyot genellikle bağlanır. Uzun süreli sinyaller, primer tarafta olmak üzere yine kısaltılabilir. Bu durumda, girişteki diyotlardan birisi veya her ikisi kullanılabilir.

Yükseltmeli ve İzoleli Tetikleme Devresi 1



Tetikleme transformatörlü devrelerde, yükseltme işlemi yine genellikle bir transistörle ve primer tarafta yapılmaktadır. Primer tarafta, diyot devresinin içerisinde kalmak üzere sadece bir seri direnin kullanılması yeterlidir. Uzun süreli sinyaller, yükseltme transistörünün girişinde olmak üzere, yine kısaltılır.

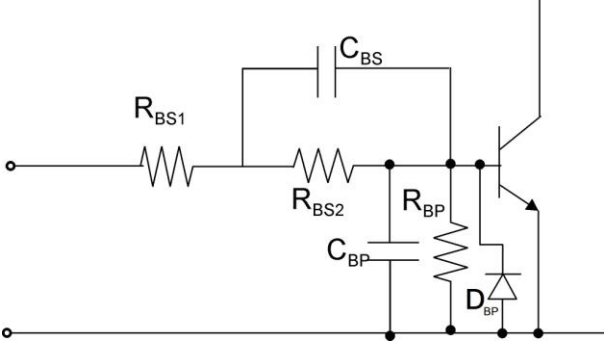


Triyakların Tetiklenmesi

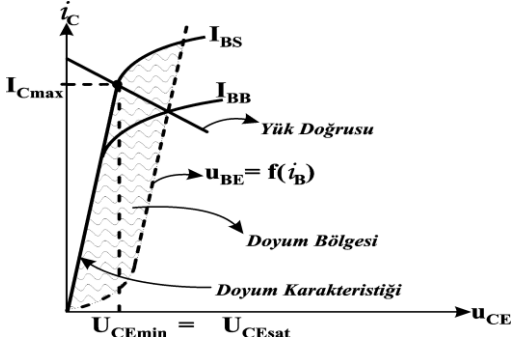
Tristörler için anlatılan tetikleme özelliklerinin tamamı triyaklar için de geçerlidir. Ancak, kontrol açısından, bir triyakın ters-paralel bağlı 2 tristöre eşdeğer olduğu ve kapısının tek olduğunun dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca, pozitif ve negatif yönlerde, tetikleme akımlarının eşit olmayabileceği de göz önüne alınmalıdır. Kısa süreli ve yüksek değerli akım darbelerinin kullanılması halinde, tetikleme akımlarının farklı olmasının hiçbir önemi kalmaz, hatta dizayn edilen bir tetikleme devresi genellikle her türlü tristör veya triyaklar için kullanılmaktadır.

TRANSİSTÖRLERDE SÜRME TEKNİKLERİ

Transistör Taban (Giriş) Karakteristiği	Açıklama
	<p>I_B : Taban Akımı I_C : Kollektör Akımı U_{BE} : Taban-Emiter Gerilimi U_{CE} : Kollektör-Emiter Gerilimi</p> <p>Transistörlerde taban (baz) ile emiter arası iletim direnci artırılmış bir diyot gibidir.</p> <p>Transistör kataloglarında verilen nominal akım ve gerilim değerleri, eşzamanlı olarak kullanılabilecek değerler değildir, eşzamanlı kullanılabilecek değerler emniyetli çalışma alanı olarak ayrıca verilmektedir.</p> <p>Transistör, taban akımı (giriş sinyali) olduğu sürece çıkış akımı veren, tam kontrollü bir güç elemanıdır.</p>

Koruma Elemanlarıyla Birlikte Transistör Taban Devresi	Açıklama
	<p> R_{BS} : Seri Giriş (Taban) Direnci R_{BP} : Paralel (Şönt) Giriş Direnci C_{BS} : Seri Giriş Kondansatörü C_{BP} : Paralel Giriş Kondansatörü D_{BP} : Ters-Paralel Giriş Diyodu I_D : Deplasman Akımı </p> <p> R_{BS1} ve R_{BS2} dirençleri, giriş akımını sınırlar veya giriş gerilim sinyalini akım sinyaline dönüştürürler. R_{BS1} daima bağlanmalıdır. </p> <p> R_{BP} direnci, kaçak (sızıntı) ve gürültü (parazit) ile deplasman akımlarına karşı koruma görevi yapar ve genellikle bağlanır. </p> <p> C_{BP} kondansatörü, R_{BP} ile birlikte bir giriş filtresi oluşturur ve aynı amacı güçlendirir. Yüksek frekans ve yüksek gürültülü uygulamalarda, bu kondansatörün kullanılması gerekmektedir. </p> <p> R_{BS2} direnci ile C_{BS} kondansatörü, ani giriş akımı darbesi sağlar. </p> <p> D_{BP} diyodu, ters akım ve ters gerilimlere karşı tabanı koruma görevi yapar. Bu diyot, aynı zamanda, C_{BS} kondansatörünün resetlenmesini (boşalmasını) sağlar. </p>

Transistörde Aşırı Doyumun Tanımı

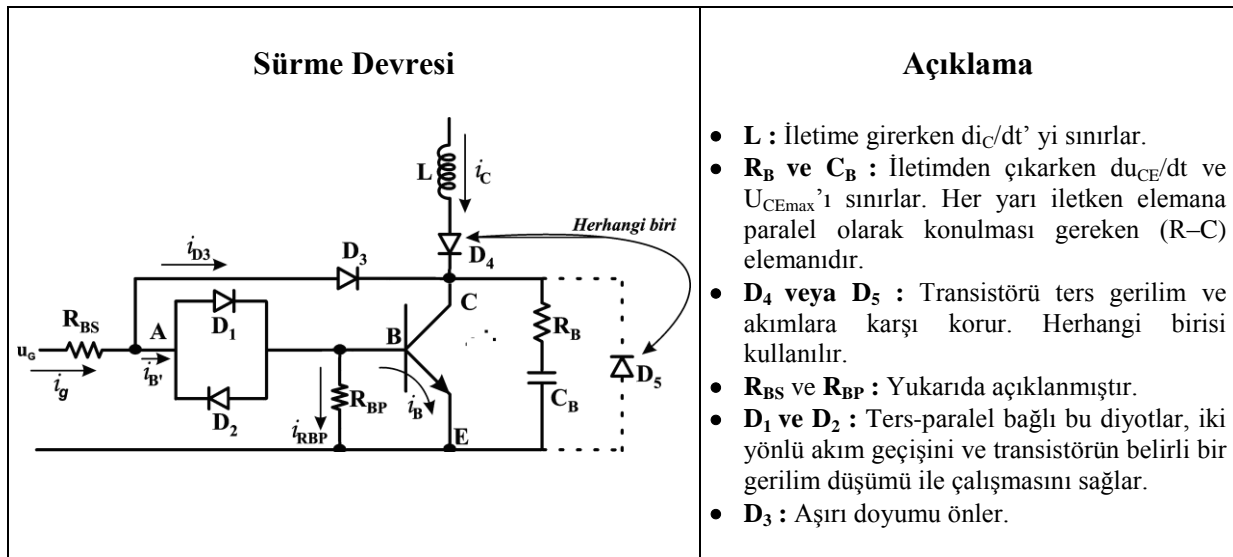
Doyum Bölgesi	Açıklama
	<p> $i_B = I_{BB}$ ise, $u_{CE} = u_{BE}$ olur. Buna Sınırdaki Çalışma denir. </p> <p> $i_B = I_{BS}$ ise, $u_{CE} = U_{CEsat}$ ve $i_C = I_{Cmax}$ olur. Buna Doyumda Çalışma denir. </p> <p> $I_{BB} < i_B < I_{BS}$ ise, $u_{CE} < u_{BE}$ olur. Buna Doyum Bölgesinde Çalışma denir. </p> <p> $i_B > I_{BS}$ ise, yine $u_{CE} = U_{CEsat}$ ve $i_C = I_{Cmax}$ olur. Buna da Aşırı Doyumda Çalışma denilir. </p>

Transistörün Sürülmesinde Önemli Olan Hususlar

- Transistörün maruz kaldığı gerilim ve akım değerleri, emniyetli çalışma alanı içinde kalmalıdır. Sürekli çalışmada I_{Csat} değeri aşılmamalıdır.
- İletime girerken di_C/dt sınırlanmalıdır. Bu anahtarlama kayıplarını azaltır. Akım yükselme hızının sınırlanması, aynı amaçla bütün yarı iletken elemanlarda uygulanır.

- İletimden çıkarken du_C/dt sınırlanmalıdır. Bu deplasman akımını ve anahtarlama kayıplarını azaltır. Gerilim yükselme hızının sınırlanması da, aynı amaçla bütün yarı iletken elemanlarda uygulanır.
- Kontrol sinyali (taban akımı) ani akım darbeleri olmalıdır. Bu elemanın iletime girme ve çıkma işlemlerini büyük ölçüde hızlandırır. Ani akım darbesi uygulaması, genellikle bütün yarı iletken elemanlarda mevcuttur.
- Sürekli haldeki i_B sürme (taban) akımı, i_C ana akımı ile tam uyum içinde ($i_B = i_C / \beta_{dc}$) olmalıdır. i_B 'nin i_C 'ye göre yüksek olması, aşırı doyuma ve depolama süresi t_s 'nin artmasına neden olur. Düşük olması ise, yarı iletime ve u_{CE} ile kayıpların artmasına neden olur. Ayrıca, i_B 'nin çok yüksek olması, B-C jonksiyonunun ters iletime girmesine ve sönerken transistörden ilave bir akım geçmesine ve kayıplara sebep olur.
- Transistör iletime girerken, di_B/dt yüksek olmalıdır. İletimden çıkarken, $u_{CE} \geq 5V$ oluncaya kadar beklenmeli ($-di_B/dt$ sınırlanmalı) ve daha sonra negatif akım darbesi uygulanmalıdır. Bunlar elemanın hızını artırır.
- Transistörün negatif gerilim tutma özelliğinin olmadığı kabul edilir (çok küçüktür). Transistörler ters gerilim ve akımlara karşı seri ya da ters-paralel bir diyot bağlanarak korunmalıdır.
- Transistörler seri veya doğrudan paralel bağlanmamalıdır. Paralel bağlanma açısından, iletim eşdeğeri bir dirençten ibaret olan MOSFET'ler en uygun güç elemanlarıdır.
- Transistörlerin korunması elektronik olarak yapılmalıdır. Yarı iletken güç elemanlarında koruma, gerilim ve/veya akımın ani, ortalama veya efektif değerleri gerçek zamanda elektronik olarak okunarak yapılır. Ayrıca, devre gereği yine uygun yerlere gerekli sigortalar konulmalıdır. Bu sigortalar, sadece yarı iletken elemanların korunması amacıyla konulmazlar. Yarı iletken elemanlar tahrip olduklarında genellikle kısa devre olur ve kısa devre sonrası da korumanın devam etmesi gereklidir.

İki yönlü Giriş Sinyalli, Yükseltmesiz ve Aşırı Doyum Korumalı Transistör Sürme Devresi



İletime girme esnasında, pozitif giriş sinyali uygulandığında,

<p>D_3 diyodu kesimdedir. $I_{D3} = 0$ U_{CE} : Çok yüksek veya $(U_A - U_D)$'dan büyüktür. $U_A = U_D + U_{BE} = 2 U_D$ U_D : Bir diyodun iletim gerilim düşümü. $U_D \cong 0,6 V$ $U_{BE} \cong U_D$</p>	<p>$i_g = \frac{U_G - U_A}{R_{BS}}$ $i_g = i_B' = i_{RBP} + i_B$ $i_{RBP} = \frac{U_{BE}}{R_{BP}}$ $i_{RBP} \ll i_B$ olmalıdır. Böylece, $i_B \cong i_g$ olur.</p>
--	--

İletim durumunda,

$U_{CE} = U_A - U_D$ olduğunda, D_3 iletime girer ve transistörün de iletime girme işleminin tamamlandığı kabul edilir. Bu durumda, D_3 diyodu daima iletimde kalmalıdır.

$i_g \gg i_{B_{max}}$ olmalıdır.

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

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

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

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

$$i_B = i_C / \beta_F$$

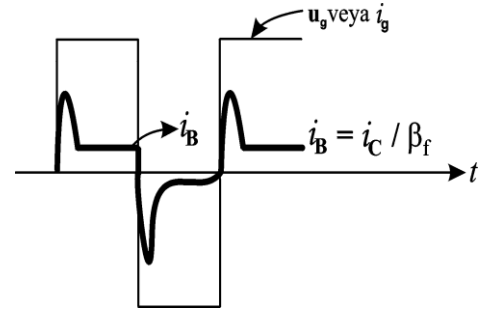
Aynı zamanda,

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

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

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

olur.



İletimden çıkma esnasında, negatif giriş sinyali uygulandığında,

<p>D_3 diyodu kesimdedir. $I_{D3} = 0$ Hepsi negatif olmak üzere, $i_g = i_B = i_{BP} + i_B$ olur.</p>	<p>Transistörde kararlı rejimde E'den B'ye doğru 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 akımı kendiliğinden sıfırlanır.</p>
--	---

Tek Yönlü Giriş Sinyalli, Yükseltmesiz ve Aşırı Doym Korumalı Transistör Sürme Devresi

Sürme Devresi	Açıklama
	<p>Bu devrenin yukarıda verilen devreden farkı, paralel bağlı bir zener diyodu ve bir direnç ile giriş sinyalinin negatif kısmının olmamasıdır.</p> <p>Pozitif sinyal verildiğinde, başlangıçta resetli (boş) olan kondansatör geriliminin zener gerilimine erişmesiyle, transistörün iletime girme işleminin tamamlandığı kabul edilir. Kondansatör boş iken ani akım darbesi ve zener gerilimi ile dolu iken normal sürme akımı karşılanır. Ayrıca, aşırı doym koruması da mevcuttur.</p> <p>Ayrıca, giriş sinyali sıfırlandığında, dolu olan kondansatör, transistör tabanı içerisinden ters</p>

	yönde deşarj olarak, negatif akım darbesi ile transistörün hızlı bir şekilde kesime girmesini sağlar. Aslında, paralel bağlı bir zener diyodu ile bir kondansatör, geçici bir DC gerilim kaynağı sağlar. Bu düzenek, güç elektroniği kontrolünde sıkça kullanılır.
--	--

İki Yönlü Giriş Sinyalli, Yükseltmeli ve Aşırı Doyum Korumalı Transistör Sürme Devresi

Sürme Devresi	Açıklama
	<p>Bu devre, BJT ile MOS kontrollü güç elemanlarında yaygın olarak kullanılan ve son yıllarda entegre olarak da üretilen bir sürme devresidir.</p> <p>Bu devrede, giriş sinyali, tabanları ters-paralel bağlı eşlenik 2 transistör tarafından yükseltilmektedir. Pozitif sinyalde T_1 ve negatif sinyalde T_2 transistörü iletme girer. Buna paralel olarak, T_3 ana transistörünün pozitif ve negatif taban akımlarını, sırasıyla üst ve alttaki dirençler sağlar. Ayrıca, BJT'lerde yükseltme öncesine bağlı bir diyot ile aşırı doyum da önlenmektedir.</p> <p>Ters-paralel bağlı iki elamandan birisinin iletimde olması, diğerinin kesimde olmasını garanti eder. Burada transistörlerin tabanları ters-paralel bağlı olduğundan, iki transistörün birlikte iletme olması mümkün değildir. Herhangi birisinin tabanına bir pozitif akım uygulandığında, diğerinin tabanında 0.6 V kadar bir negatif gerilim oluşur. Böylece, bu transistör iletme giremez ve eğer iletimde ise hızlı bir şekilde kesime girer. Bu mükemmel bir kilitlemedir.</p> <p>Orta ve yüksek frekanslarda (yaklaşık 1 kHz'nin üzerinde), giriş gerilim sinyali ve sürme gerilim kaynağı, normal olarak iki yönlü olmalıdır.</p>

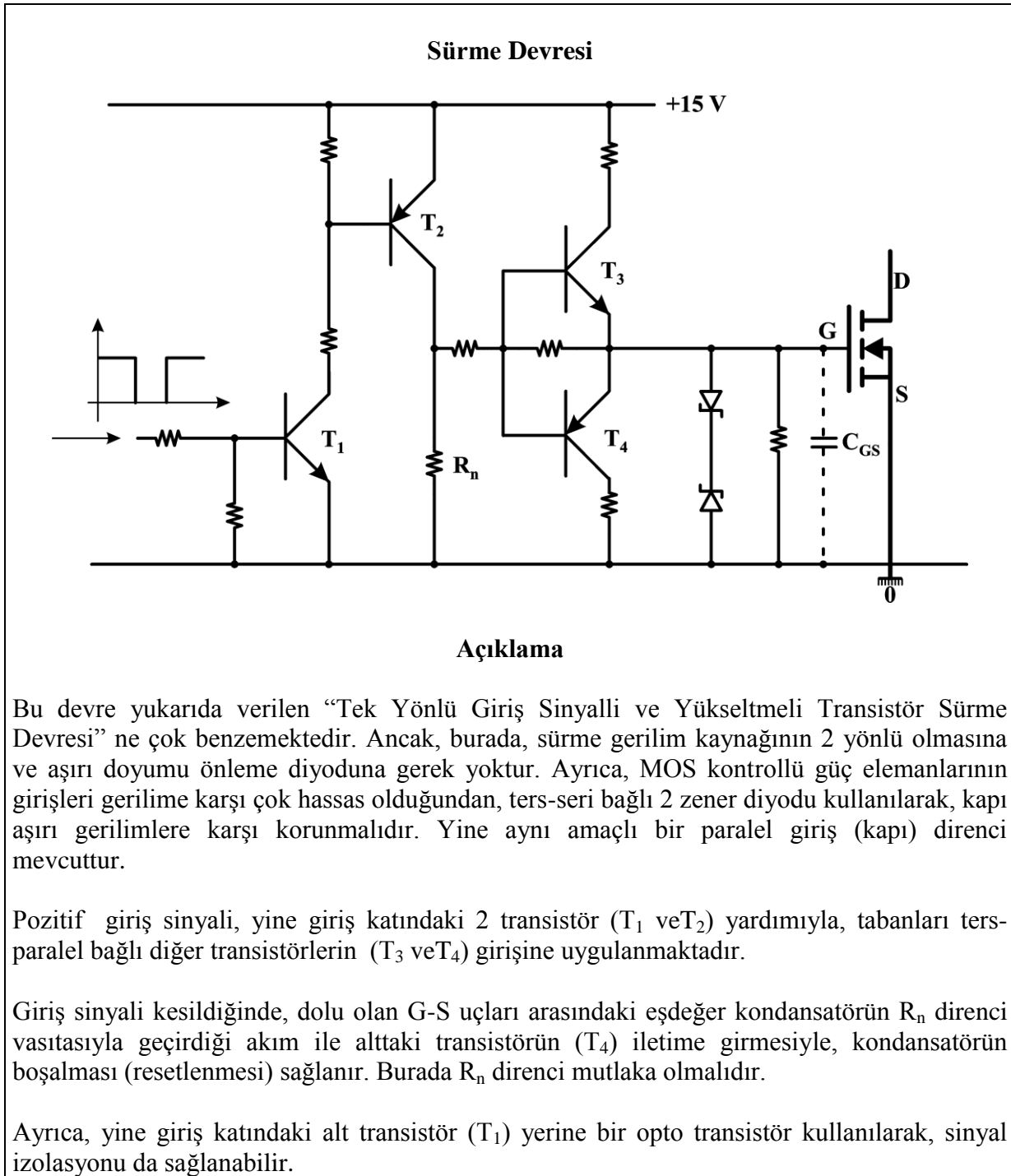
Tek Yönlü Giriş Sinyalli, Yükseltmeli ve Aşırı Doyum Korumalı Transistör Sürme Devresi

Sürme Devresi	Açıklama
	<p>Bu devre yukarıda verilen devreye çok benzemektedir.</p> <p>Pozitif giriş sinyali, giriş katındaki 2 transistör yardımıyla, tabanları ters-paralel bağlı diğer transistörlerin A girişine uygulanmaktadır.</p> <p>Giriş sinyali kesildiğinde, R direnci vasıtasıyla 0'dan $-U_d$ barasına geçen akım ile alttaki transistörün iletme girmesiyle, T_r transistörüne negatif taban akımı sağlanır. Burada R direnci mutlaka olmalıdır. Bu devrede</p>

	<p>de aşırım doyum koruması mevcuttur.</p> <p>Ayrıca, giriş katındaki alt transistör yerine bir opto transistör kullanılarak, sinyal izolasyonu da sağlanabilir.</p>
--	--

<p>Bir transistör sürme devresini tanımak için, yandaki sorulara cevap aranmalıdır.</p>	<p>Giriş sinyali nasıldır? Sürme kaynağı var mıdır, nasıldır? Ani akım darbesi sağlanmakta mıdır, nasıl? Aşırı doyum koruması sağlanmakta mıdır, nasıl? Yükseltme sağlanmakta mıdır, nasıl? İzolasyon sağlanmakta mıdır, nasıl? Aşırı doyum koruması var ise, iletimde iken U_{CE} değeri ne olur? di_C/dt sınırlanması sağlanmakta mıdır, nasıl? Ters gerilim ve akım koruması sağlanmakta mıdır, nasıl? $-di_B/dt$ sınırlanması sağlanmakta mıdır, nasıl?</p>
---	---

<p>Yanda verilen transistör sürme devresinin çalışmasını araştırınız.</p>	
---	--

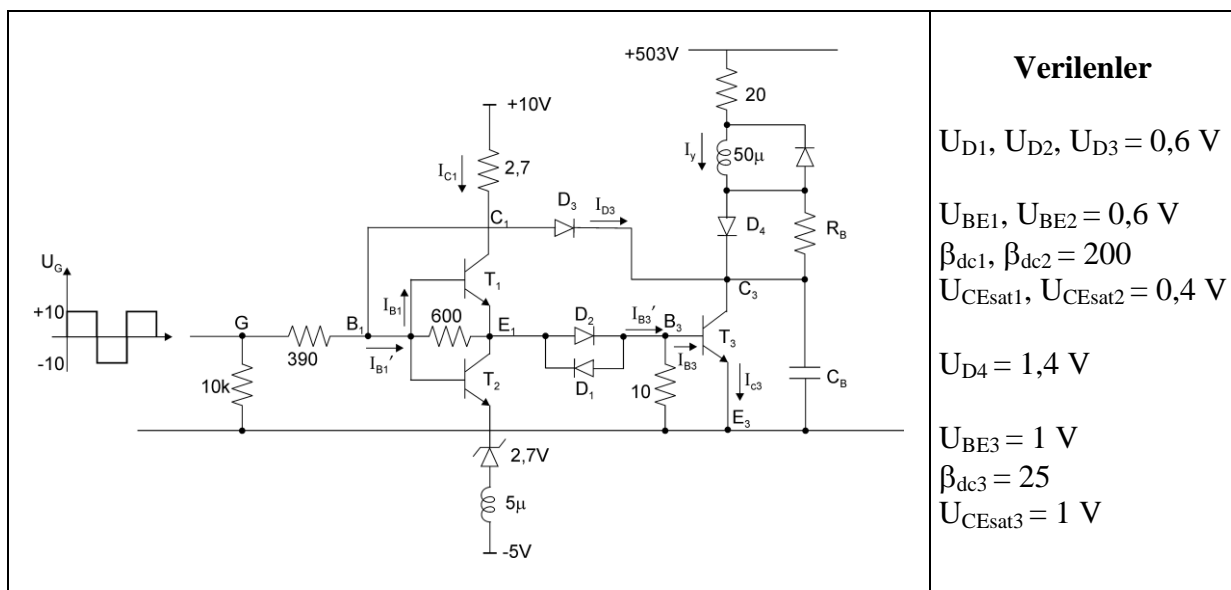
MOSFET ve IGBT ELEMANLARINDA SÜRME TEKNİKLERİ

KONU İLE İLGİLİ ÇÖZÜLMÜŞ PROBLEMLER

PROBLEM 1

Şekildeki transistör sürme devresinde, verilenlere göre,

- İletime giriş esnasında, ana transistörün ani taban akımı (I_{B3}) kaç A olur?
- İletim durumunda, T_3 transistörünün gerilim düşümü (U_{CE3}) kaç V ve D_3 diyodunun akımı (I_{D3}) kaç mA olur?
- Ana transistör taban akımının (I_{B3}) yaklaşık değişimini çiziniz.
- İletime giriş anı dikkate alınmadığında, $2,7 \Omega$ 'luk direncin kayıp gücünü hesaplayınız.
- İletime giriş anı dikkate alınmadığında, T_1 ve T_3 transistörlerinin kayıp güçlerini hesaplayınız.



ÇÖZÜM 1

- a) İletime giriş esnasında, D_3 diyodu kesimdedir.
- $I_{D3} = 0$
- Pozitif sinyalde, genel olarak,
- $U_{B3} = U_{BE3} = 1 \text{ V}$
- $U_{E1} = U_{B3} + U_{D2} = 1 + 0,6 = 1,6 \text{ V}$
- $U_{B1} = U_{E1} + U_{BE1} = 1,6 + 0,6 = 2,2 \text{ V}$
- $I_{10} = U_{BE3} / 10 = 1 / 10 = 0,1 \text{ A} = 100 \text{ mA}$
- $I_{600} = U_{BE1} / 600 = 0,6 / 600 = 0,001 \text{ A} = 1 \text{ mA}$
- $I_{390} = (U_G - U_{B1}) / 390 = (10 - 2,2) / 390 = 0,02 \text{ A} = 20 \text{ mA}$
- eşitlikleri geçerlidir.
- D_3 diyodu kesimde iken,
- $I_{B1}' = I_{390} = 20 \text{ mA}$
- $I_{B1} = I_{B1}' - I_{600} = 20 - 1 = 19 \text{ mA}$
- I_{B1} akımına göre,
- $I_{C1} = \beta_{dc1} \cdot I_{B1} = 200 \cdot 19 \text{ mA} = 3,8 \text{ A}$ olabilir.

	<p>Doyum halinde ise,</p> $I_{C1\max} = [10 - (U_{CEsat1} + U_{E1})] / 2,7$ $= [10 - (0,4 + 1,6)] / 2,7$ $\cong 2,96 \text{ A} \text{ olabilir.}$ <p>O halde, T_1 transistörü doyumda olup,</p> $I_{C1} = I_{C1\max} = 2,96 \text{ A'dir.}$ <p>Böylece,</p> $I_{B3}' = I_{600} + I_{B1} + I_{C1\max} = 1 \text{ mA} + 19 \text{ mA} + 2,96 \text{ A} = 2,98 \text{ A}$ $I_{B3} = I_{B3}' - I_{10} = 2,98 \text{ A} - 100 \text{ mA} = 2,88 \text{ A}$ <p>$I_{B3} = 2,88 \text{ A olur.}$</p>
--	---

b) İletim durumunda,

$U_{C3} = U_{CE3} = U_{B1} - U_{D3} = 2,2 - 0,6 = 1,6 \text{ V}$ olduğunda,
 D_3 diyodu iletme girer ve transistörün iletme girme işleminin tamamlandığı kabul edilir. O halde, iletimde iken,
 $U_{CE3} = 1,6 \text{ V olur.}$

Bu durumda,

$$I_{C3} = I_y + I_{D3} \cong I_y = [503 - (U_{CE3} + U_{D4})] / 20$$

$$= [503 - (1,6 + 1,4)] / 20$$

$I_{C3} = 25 \text{ A bulunur.}$

Şimdi tersten gidilerek,

$$I_{B3} = I_{C3} / \beta_{dc3} = 25 / 25 = 1 \text{ A}$$

$$I_{B3}' = I_{B3} + I_{10} = 1 \text{ A} + 100 \text{ mA} = 1,1 \text{ A}$$

elde edilir ve

T_1 transistörü doyumda olmadığından,

$$I_{B3}' = I_{600} + I_{B1} + \beta_{dc1} \cdot I_{B1}$$

$$I_{B3}' = I_{600} + (1 + \beta_{dc1}) \cdot I_{B1}$$

$$1,1 \text{ A} = 1 \text{ mA} + (1 + 200) I_{B1}$$

$$I_{B1} \cong 5,47 \text{ mA}$$

sonucu ve

işleme devam edilerek,

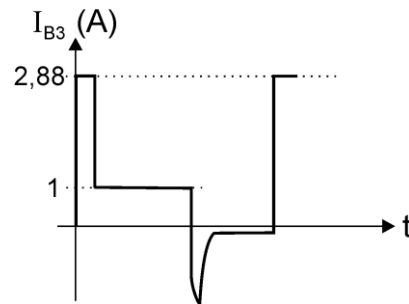
$$I_{B1}' = I_{600} + I_{B1} = 5,47 + 1 = 6,47 \text{ mA}$$

ve sonuçta,

$$I_{D3} = I_{390} - I_{B1}' = 20 - 6,47$$

$$\mathbf{I_{D3} = 13,53 \text{ mA bulunur.}}$$

c) Ana transistör taban akımının (I_{B3}) yaklaşık değişimi



d) İletime giriş anı dikkate alınmadığında,
2,7 Ω'luk direncin
kayıp gücü

$$I_{2,7} = I_{C1} = \beta_{dc1} \cdot I_{B1} = 200 \cdot 5,47 \text{ mA} = 1,094 \text{ A}$$

$$P_{2,7} = \frac{1}{2} \cdot 2,7 \cdot (I_{2,7})^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,7 \cdot (1,094)^2$$

$$\mathbf{P_{2,7} \cong 1,62 \text{ W bulunur.}}$$

e) İletime giriş anı dikkate alınmadığında,
T₁ ve T₃ transistörlerinin
güç kayıpları

$$U_{CE1} = 10 - (U_{E1} + U_{2,7}) = 10 - (1,6 + 1,094 \cdot 2,7) \cong 5,45 \text{ V}$$

$$P_{T1} = \frac{1}{2} \cdot U_{CE1} \cdot I_{C1} = \frac{1}{2} \cdot 5,45 \cdot 1,094$$

$$\mathbf{P_{T1} \cong 2,98 \text{ W bulunur.}}$$

Not : İletime giriş anı dikkate alınmadığında, T₁ ve T₃ transistörleri yarı peryotta iletimdedir.

$$P_{T3} = \frac{1}{2} \cdot U_{CE3} \cdot I_{C3} = \frac{1}{2} \cdot 1,6 \cdot 25$$

$$\mathbf{P_{T3} \cong 20 \text{ W bulunur.}}$$

NOT:

Normal olarak,

$$I_{600} \ll I_{B1} \Rightarrow I_{B1} \cong I_{B1}'$$

$$I_{10} \ll I_{B3} \Rightarrow I_{B3} \cong I_{B3}'$$

$$I_{B1} \ll I_{C1} \Rightarrow I_{B3}' \cong I_{C1}$$

$$I_{D3} \ll I_{C3} \Rightarrow I_{C3} \cong I_y$$

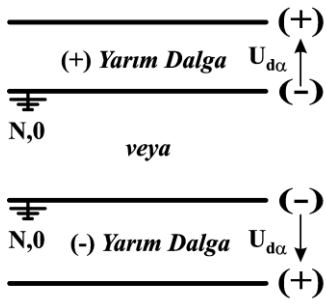
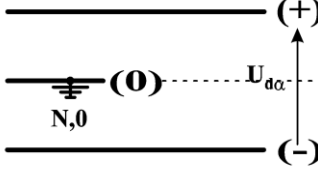
olmalıdır/sağlanmalıdır ve bu devrede D₁ ve D₂ diyotları olmamalıdır.

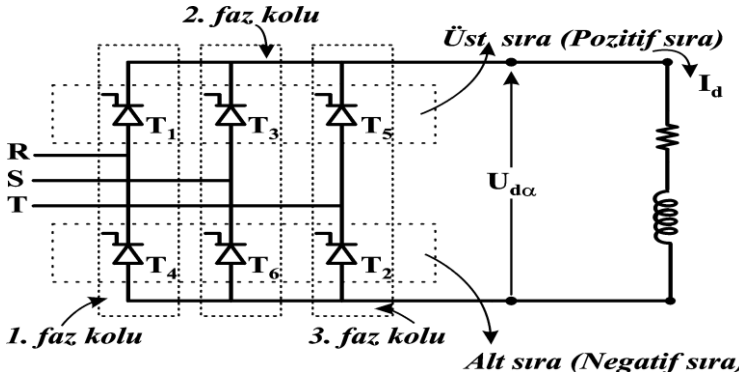
Problemin çözümünü bir de bu kabullere göre yapınız ve sonuçları karşılaştırınız.

1.6. GÜÇ DEVRELERİNDE KONTROL TEKNİKLERİ

DOĞRULTUCULARDA KONTROL TEKNİKLERİ

Faz Kontrol Yöntemi	Açıklama
	<p>Genel olarak doğrultucularda, Faz Kontrol Yöntemi ve bu yönteme 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 dalganın genliği ve referans gerilimin değeri ayarlanabilir. Testere dişi dalganın 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 kullanılabilmektedir.</p>
<p>Yukarıda, örnek olarak seçilen TCA 785 kodlu faz kontrol entegresinin katalogunda verilen Temel Dalga Şekilleri görülmektedir.</p> <p>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.</p> <p>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.</p>	

Yarım ve Tam Dalga Doğrultucuların Durumları	Açıklama
<p><i>Yarım Dalga veya Tek Yollu Doğrultucu</i> $S=1$</p>  <p><i>Tam Dalga (Köprü) veya İki Yollu Doğrultucu</i> $S=2$</p>  <p>S : Dalga veya Yol Sayısı q : Faz sayısı</p>	<p>Yarım dalga doğrultucularda, DC çıkış uçlarından birisi doğrudan AC şebekenin nötrüdür. Dolayısıyla, şebekenin nötrüne göre bir DC gerilim üretilir.</p> <p>Tam dalga doğrultucularda ise, çıkış geriliminde doğrudan AC şebekenin nötrü kullanılmaz. Ancak, DC çıkış geriliminin yarısı nötrün üzerinde, yarısı da nötrün altındadır.</p> <p>Bu özellikler, kontrol açısından çok önemlidir.</p>

Genelleştirilmiş AC-DC Dönüştürücü Devre Şeması	Açıklama
	<p>Üst ve alt sıradan herhangi birisi ile nötrün kullanılmasıyla Yarım Dalga Doğrultucu, her ikisinin nötrsüz olarak kullanılmasıyla Tam Dalga Doğrultucu elde edilir.</p> <p>Tam dalga bir doğrultucunun çıkış gerilimi, aynı faz sayılı eşdeğer yarım dalga bir doğrultucu çıkış geriliminin 2 katıdır.</p>

Açıklama

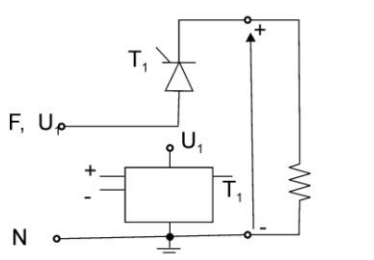
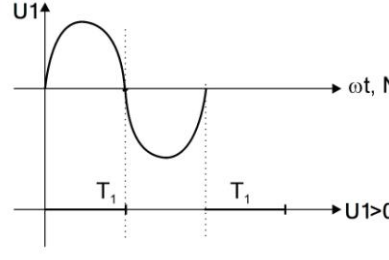
- Üst ve alt sıradan aynı anda sadece birer eleman iletimde kalır.
- Üst ve alt sıradan aynı faza ait 2 eleman birlikte iletimde kalmaz.
- Üst veya alt sıradan bir eleman, aynı faza ait olmayan diğer sıradaki elemanlarla eşit süreli birlikte iletimde kalır.
- Üst veya alt sıradaki elemanlar, akımı eşit aralıklarla ve sırayla geçirirler.
- Üst veya alt sırada akımın bir elemandan diğerine aktarılmasına Komütasyon denilir, bu akım aktarma işlemleri diyotlu doğrultucularda ardışık fazların kesişim noktalarında oluşur, tristörlü doğrultucularda Faz Kesme Açısı kadar geciktirilebilir.
- Kontrol açısı, pratik olarak 0° ile 150° arasında ayarlanır. 180° 'ye çok yaklaşıldığında komütasyonun bozulabileceği bilinmektedir.

3 Fazlı bir Sistemde Kontrol Aralıkları	3 Fazlı bir Sistemin Vektörel Diyagramı
<p style="text-align: center;">Açıklama</p> <ul style="list-style-type: none"> Kontrol aralıkları Faz veya Fazlararası gerilimlere göre düşünülebilir. Örneğin, U_1, U_2 ve U_3 faz gerilimlerin pozitif aralıkları sırasıyla T_1, T_3 ve T_5, ve negatif aralıkları ise T_4, T_6 ve T_2 aralıklarıdır. U_{12}, U_{23} ve U_{31} fazlararası gerilimleri, sırasıyla U_1, U_2 ve U_3 faz gerilimlerinden 30° ileridedir. U_{21}, U_{32} ve U_{13} fazlararası gerilimleri ise, sırasıyla U_2, U_3 ve U_1 faz gerilimlerinden 30° geridedir. 	

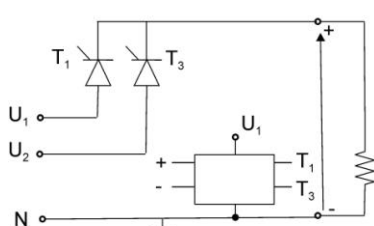
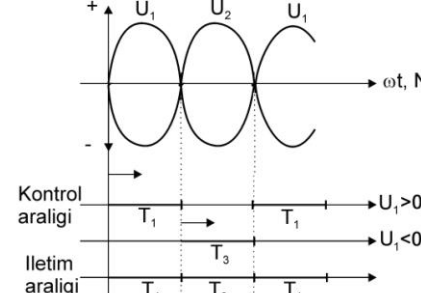
Doğrultucularda Genel Kontrol Özellikleri

- Doğrultucuların kontrolünde, Faz Kontrol Yöntemi kullanılır.
- Üst ve alt sıralarda faz kontrol açıları, fazlararası gerilimlerin kesişim noktalarında başlar.
- α faz kontrol açıları, $0-\pi$ aralığında ayarlanabilir. Ancak, bir elemanın iletim aralığı $2\pi/q$ kadardır.
- Faz kontrol aralıkları, genellikle tek ve iki fazlı doğrultucularda faz gerilimlerine göre, 3 fazlı doğrultucularda ise fazlararası gerilimlere göre elde edilir.
- Faz kontrol aralıklarının belirlenmesinde, faz ve fazlararası gerilimlerin faz farkları dikkate alınarak, farklı çözümler geliştirilebilir. Örneğin, izoleli olarak kullanılması gereken fazlararası gerilimler (U_{13}, U_{21} , ve U_{32}) yerine izolesiz faz gerilimleri (U_1, U_2 ve U_3) kullanılabilir. 6 adet fazlararası gerilim arasında 60° 'ar derecelik faz farkı olduğu dikkate alınarak, farklı kontrol seçenekleri üretilebilir.
- Çıkış gerilimi, yarım dalga doğrultucularda faz gerilimleri ile tam dalga doğrultucularda fazlararası gerilimlerle elde edilir.
- Tek ve iki fazlı doğrultucularda kısa süreli sinyaller kullanılır.
- Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucular ile tam dalga yarı kontrollü doğrultucularda kısa süreli sinyaller kullanılır.
- Tam dalga tam kontrollü doğrultucularda sürekli sinyaller kullanılır.
- Prensip olarak doğrultucularda bütün sinyaller izole edilmelidir. Sadece tek fazlı doğrultucularda katodu nötr ile irtibatlı olan tristörde izolasyona gerek yoktur.

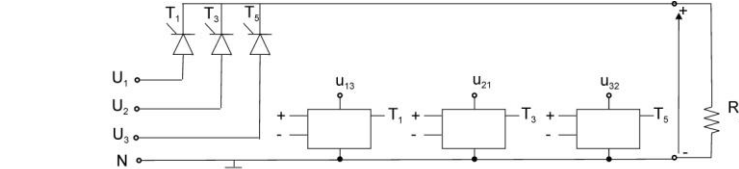
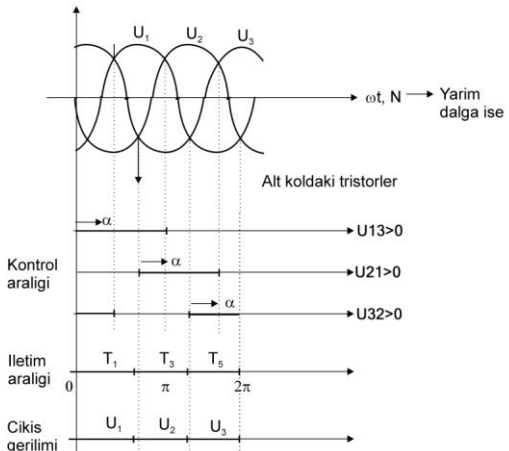
Tek Fazlı Yarım Dalgı Kntrollü Doğrultucularda Kntrol

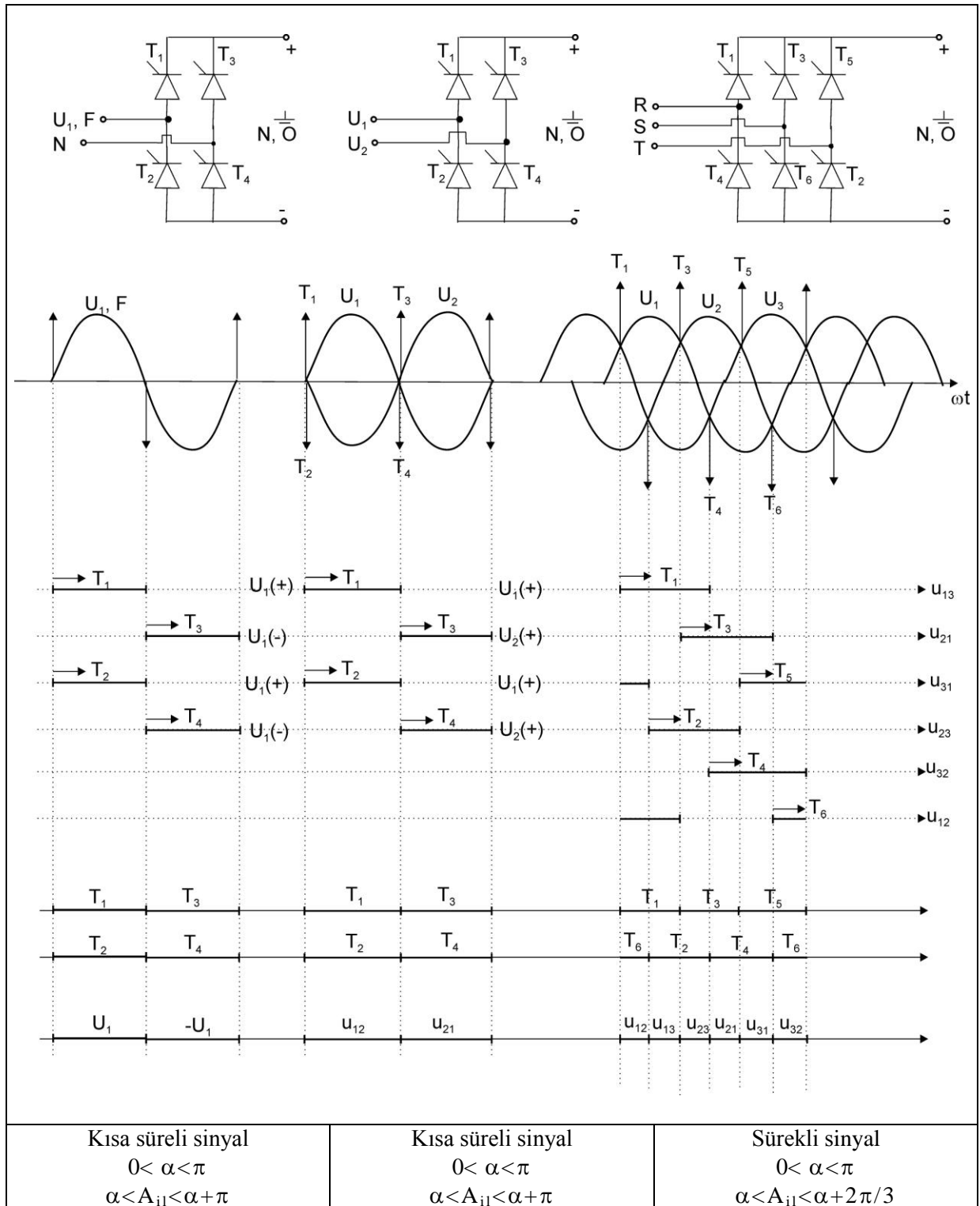
 	<p>Açıklama</p> <p>Bir adet faz kntrol entegresi kullanılır. Entegrenin sıfırı nötre ve senkronizasyon girişı U_1 fazına bağlanır. Entegrenin kısa süreli pozitif sinyalleri kullanılır. Sinyaller izole edilir.</p>
--	--

2 Fazlı Yarım Dalgı Kntrollü Doğrultucularda Kntrol

 	<p>Açıklama</p> <p>Bir adet faz kntrol entegresi kullanılır. Entegrenin sıfırı nötre ve senkronizasyon girişı U_1 fazına bağlanır. Entegrenin kısa süreli pozitif sinyalleri T_1 için ve kısa süreli negatif sinyalleri T_3 için kullanılır. Sinyaller izole edilir.</p>
--	--

3 Fazlı Yarım Dalgı Kntrollü Doğrultucularda Kntrol

 	<p>Açıklama</p> <p>3 adet faz kntrol entegresi kullanılır. Entegrelerin sıfırları nötre ve senkronizasyon girişleri sırasıyla U_{13}, U_{21}, ve U_{32} fazlararası gerilimlerine bağlanır. Ancak, bu fazlararası gerilimler izoleli olmalıdır. Entegrelerin kısa süreli pozitif sinyalleri sırasıyla T_1, T_3 ve T_5 tristörleri için kullanılır. Bütün sinyaller de izole edilmelidir.</p>
---	---

Tam Dalga Tam Kontrollü Doğrultucularda Kontrol

Kısa süreli sinyal
 $0 < \alpha < \pi$
 $\alpha < A_{i1} < \alpha + \pi$

Kısa süreli sinyal
 $0 < \alpha < \pi$
 $\alpha < A_{i1} < \alpha + \pi$

Sürekli sinyal
 $0 < \alpha < \pi$
 $\alpha < A_{i1} < \alpha + 2\pi/3$

Açıklama

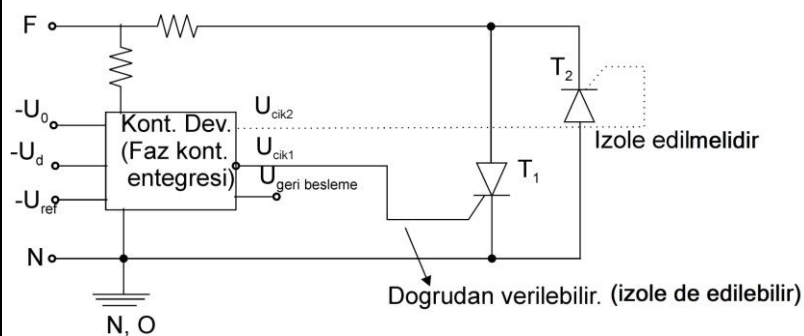
Tek ve 2 fazlı tam dalga tam kontrollü doğrultucularda, kontrol aralıkları sadece **U_1 faz gerilimi** ile elde edilir. **1 adet** faz kontrol entegresi kullanılır. Entegrenin sıfırı nötre ve senkronizasyon girişi U_1 fazına bağlanır. Entegrenin kısa süreli **pozitif sinyalleri** T_1 ile T_2 için ve kısa süreli **negatif sinyalleri** T_3 ile T_4 için kullanılır. **Sinyaller kısa sürelidir**, çünkü karşılıklı tristörlerin tetiklemeleri eşzamanlıdır ve bu tetiklemeyle akım yolu oluşur. **Bütün sinyaller izole edilir.**

3 fazlı tam dalga tam kontrollü doğrultucularda, kontrol aralıkları **izoleli** U_{13} , U_{21} , ve U_{32} fazlararası gerilimler ile elde edilir. **3 adet** faz kontrol entegresi kullanılır. Entegrelerin sıfırları nötre ve senkronizasyon girişleri sırasıyla U_{13} , U_{21} , ve U_{32} izoleli fazlararası gerilimlerine bağlanır. Entegrelerin sürekli **pozitif sinyalleri** sırasıyla T_1 , T_3 ve T_5 tristörleri için ve sürekli **negatif sinyalleri** sırasıyla T_4 , T_6 ve T_2 tristörleri için kullanılır. **Sinyaller uzun sürelidir**, çünkü üst ve alt sıra elemanlarının tetiklemeleri eşzamanlı değildir, kısa süreli tetiklemelerde akım yolu oluşmaz ve tetikleme gerçekleşmez. **Bütün sinyaller de izole edilmelidir.**

AC KIYICILARDA KONTROL TEKNİKLERİ

Tek Fazlı AC Kıyıcılarda Kontrol

Tek Fazlı Prensip AC Kıyıcı Devresi



Şekilde verilen tek fazlı prensip AC kıyıcıda,

AC akımın pozitif yarım dalgasını T_1 tristörü ve negatif yarım dalgasını T_2 tristörü geçirir.

T_1 tristörü entegrenin pozitif sinyalleri ve T_2 tristörü entegrenin negatif sinyalleri ile tetiklenir.

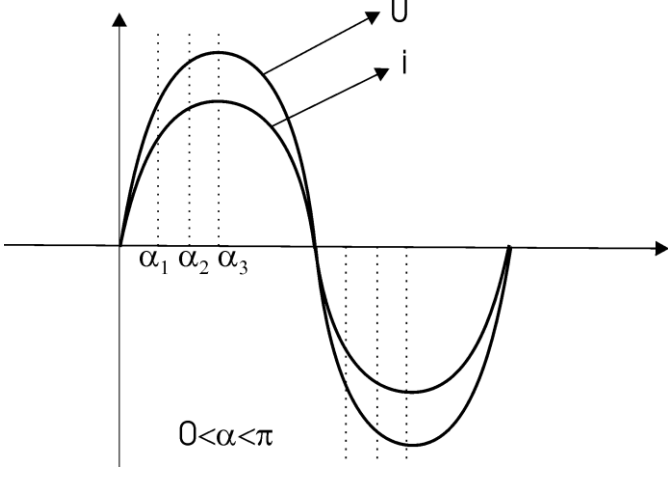
Katodu entegrenin sıfırına (0) veya şebekenin nötrüne (N) bağlı olan T_1 sinyallerinin izolasyonuna gerek yoktur. Ancak, bu şartı sağlamayan T_2 sinyalleri izole edilmelidir.

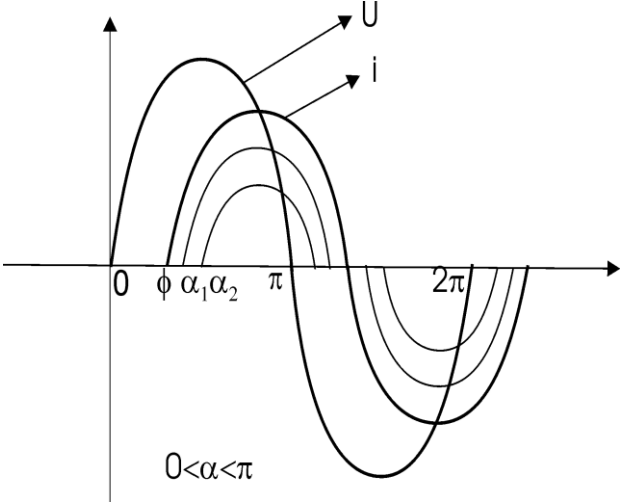
Ters-paralel bağlı 2 tristör yerine bir triyak kullanıldığında, sinyal izolasyonuna gerek kalmaz.

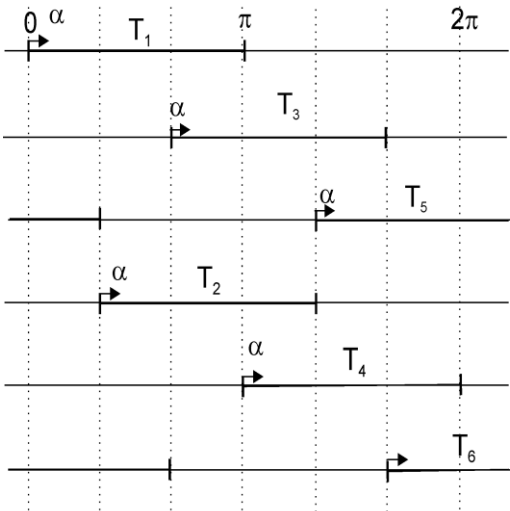
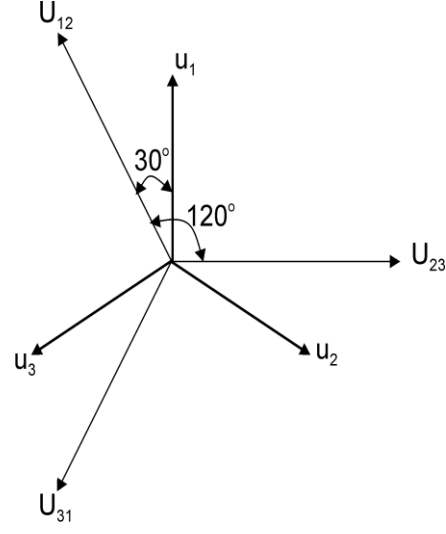
Açıklama

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 kısıyıcılarda, **Faz Kontrol Yöntemi** ve bu yönteme göre sinyal üreten **Faz Kontrol Entegreleri** kullanılır. Prensipte olarak bu entegrelerde, AC şebeke gerilimi ile **senkronize** bir şekilde, kısa ve/veya uzun süreli, pozitif ve negatif faz kontrol sinyalleri üretilir. Bu sinyallerin toplamları, inversleri ve toplamlarının inversleri de entegre tarafından veya ilave devrelerle elde edilebilir.

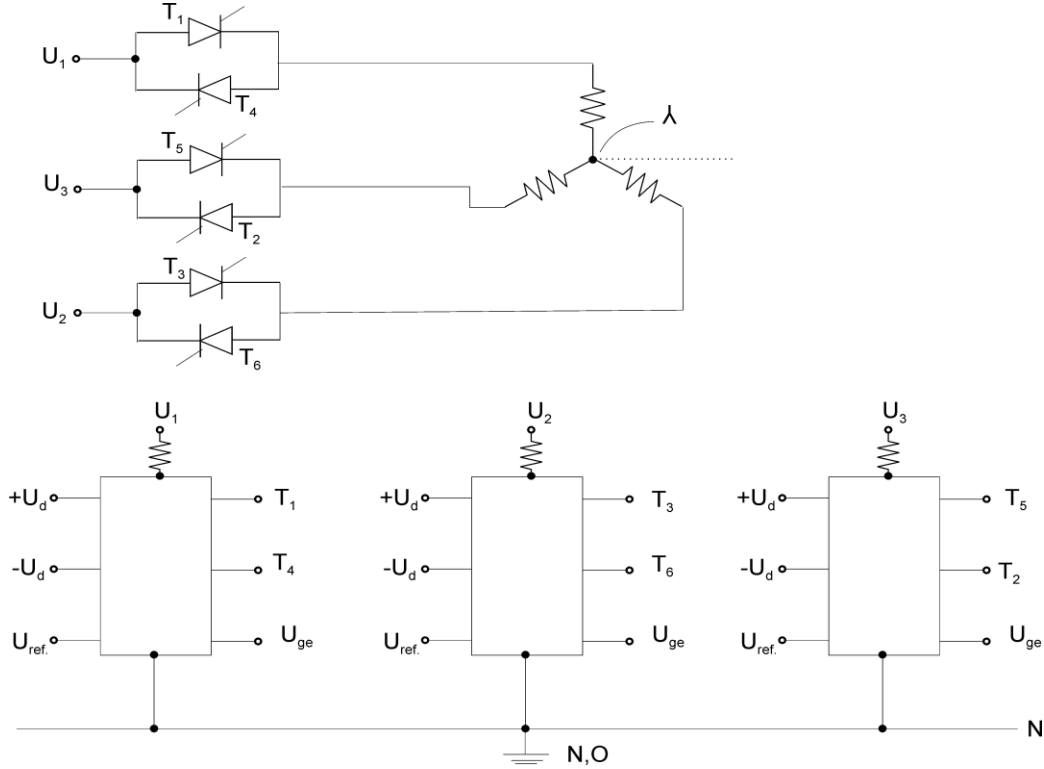
Omik Yük için, Temel Dalga Şekli	Açıklama
 <p>$0 < \alpha < \pi$</p>	<p>Omik yüklü tek fazlı AC kıyıcılarda, prensip olarak,</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kontrol aralığı, $0 < \alpha < \pi$ şeklindedir. • İletim aralığı, $\alpha < \alpha_{IL} < \pi$ şeklindedir. • Sinyaller, kısa sürelidir. α anlarında, kısa süreli sinyaller kullanılır. Sinyal süresinin, birkaç $10 \mu s$ ile birkaç $100 \mu s$ arasında olması uygundur. • Tristörden geçen akım, sinyal bitmeden tristörün I_L kilitleme akımı değerine erişmelidir.

Omik-Endüktif Yük için, Temel Dalga Şekli	Açıklama
 <p>$0 < \alpha < \pi$</p>	<p>Omik-endüktif yüklü tek fazlı AC kıyıcılarda, prensip olarak,</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kontrol aralığı, $\phi < \alpha < \pi$ şeklindedir. • İletim aralığı, $\alpha < \alpha_{IL} < \pi + \beta$ şeklindedir. • Sinyaller, uzun sürelidir.

3 Fazlı bir Sistemde Kontrol Aralıkları	3 Fazlı bir Sistemin Vektörel Diyagramı
	
<p style="text-align: center;">Açıklama</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kontrol aralıkları Faz veya Fazlararası gerilimlere göre düşünülebilir. • Örneğin, U_1, U_2 ve U_3 faz gerilimlerin pozitif aralıkları sırasıyla T_1, T_3 ve T_5 , ve negatif aralıkları ise T_4, T_6 ve T_2 aralıklarıdır. • U_{12}, U_{23} ve U_{31} fazlararası gerilimleri, sırasıyla U_1, U_2 ve U_3 faz gerilimlerinden 30° ileridedir. • U_{21}, U_{32} ve U_{13} fazlararası gerilimleri ise, sırasıyla U_2, U_3 ve U_1 faz gerilimlerinden 30° geridedir. 	

Yıldız (Y) Bağlı Yük için, 3 Fazlı AC Kıyıcılarda Kontrol

Yükü Y Bağlı 3 Fazlı Prensip AC Kıyıcı Devresi



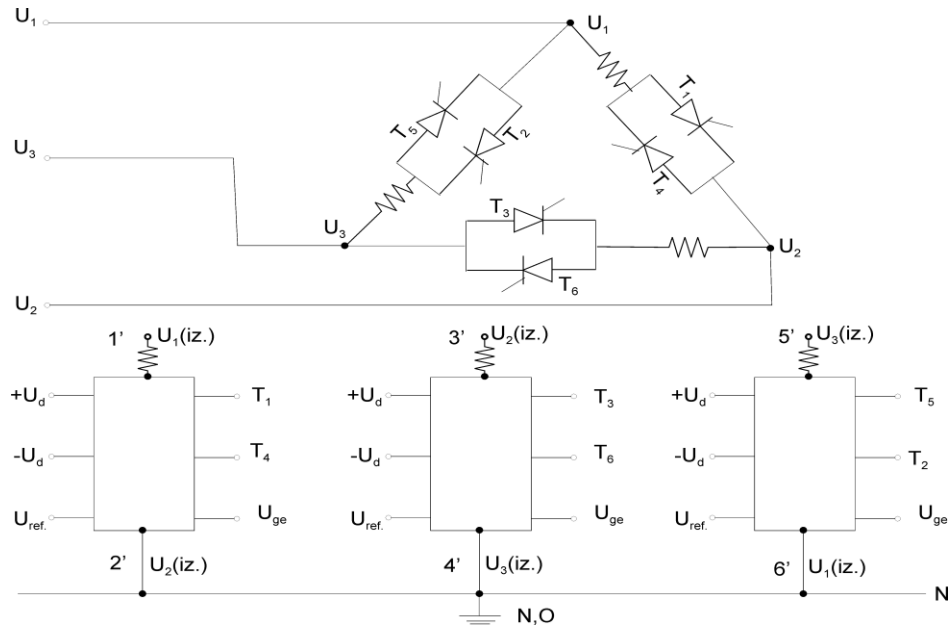
Açıklama

Y Noktası N Noktasına Bağlı ise,

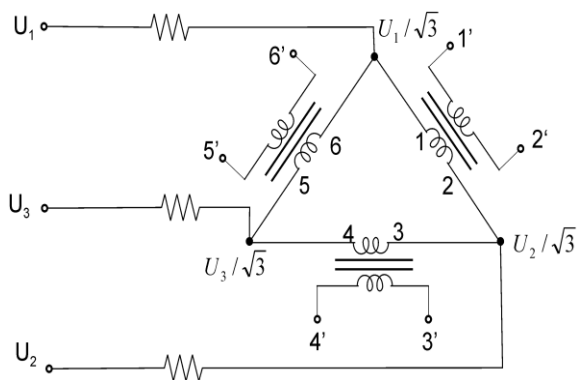
- 3 fazlı AC kıyıcı, 3 adet tek fazlı AC kıyıcıya eşdeğerdir.
- Kontrol aralıkları faz gerilimlerine göre belirlenir.
- Kontrol ve iletim aralıkları ile sinyal süreleri, tek fazlı AC kıyıcılarda verildiği gibidir.
- Bütün sinyaller izole edilmelidir. Ancak, bütün tristörler Y noktasına bağlanırsa, katodu Y noktasına bağlı olan T_1 , T_3 ve T_5 tristörlerinde izolasyona gerek kalmaz. Triyak kullanıldığında, izolasyona gerek kalmaz.

Y Noktası N Noktasına Bağlı Değil ise,

- **Kontrol aralıkları** yine faz gerilimlerine göre belirlenir. Ancak, kontrol $0 < \alpha < 150^\circ$ aralığında yapılır. $\alpha > 150^\circ$ için kontrolün anlamı yoktur.
- Tristörler Y noktasına bağlansa bile **bütün sinyaller izole edilmelidir**. Ancak, tristörler Y noktasına bağlandığında, modül kullanma imkanı ortaya çıkar.
- Yük omik bile olsa **bütün sinyaller sürekli olmalıdır**. Hatta, $\alpha < \alpha_{sin} < \pi + 30^\circ$ olmalıdır.
- **Aynı anda**, 2 veya 3 tristör iletimde kalır. Tek tristör üzerinden akım devresini tamamlayamaz.

Yıldız (Δ) Bağlı Yük için, 3 Fazlı AC Kıyıcılarda Kontrol**Yükü Δ Bağlı 3 Fazlı Prensip AC Kıyıcı Devresi****Açıklama**

- 3 fazlı AC kıyıcı, 3 adet tek fazlı AC kıyıcı gibidir, ancak her bir kol **fazlararası gerilimle** çalışır.
- **Kontrol aralıkları** izoleli fazlararası gerilimlere göre belirlenir. Fazlararası gerilimlerin izolasyonu, 3 fazlı bir transformatör veya opto transistörler ile sağlanabilmektedir.
- **Kontrol ve iletim aralıkları ile sinyal süreleri**, tek fazlı AC kıyıcılarda verildiği gibidir.
- Bütün sinyaller **izole edilmelidir**.
- Tristörlerin faz girişlerine konulması halinde, nasıl bir kontrol yapılabileceğini araştırınız.

Fazlararası Gerilimlerin İzolasyonu**Açıklama**

Δ Bağlı 3 Fazlı transformatörün **primer sargıları**, ya 380 V'luk olmalı ya da 220 V'luk olmalı ve uygun birer seri direnç ile akım sınırlandırılmalıdır.

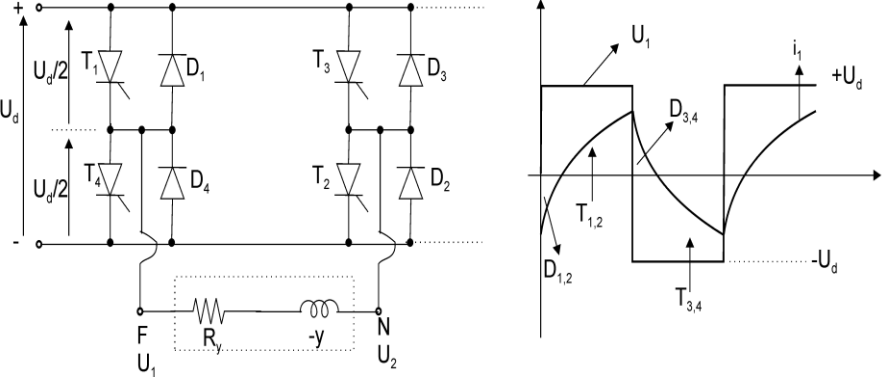
Sekonder sargılarının gerilimi istenildiği gibi seçilebilir. Ancak, faz kontrol entegrelerinin beslemesinde, uygun seri dirençlerin kullanılması gerekir. Sekonder gerilimleri düştükçe, kullanılacak dirençlerin güçleri de düşer.

İNVERTERLERDE KONTROL TEKNİKLERİ

İnverterlerin Genel Özellikleri

- İnverterlerde **kontrollü güç elemanlarının sıra ve düzeni**, doğrultucu ve AC kıyıcılara benzer.
- İnverterlerde genellikle, **IGBT veya MOSFET** güç elemanları ve **sürekli sinyaller** kullanılmaktadır.
- Sadece **rezonans devreli inverterler**, genellikle tristörlerle gerçekleştirilir ve **kısa süreli sinyallerle** kontrol edilir.
- İnverterlerde **kısa devre olma özelliği** vardır.
- Aynı faz koluna ait üst ve alt sıra elemanlar, aynı anda iletimde kalmamalıdır. Bunun için, bu elemanların iletim aralıkları arasında yeterli bir boşluk ya da **ölü zaman** bırakılmalıdır.
- İnverterler kontrol açısından **Kare Dalga ve PWM Kontrollü** inverterler olarak 2 genel gruba ayrılmaktadır.

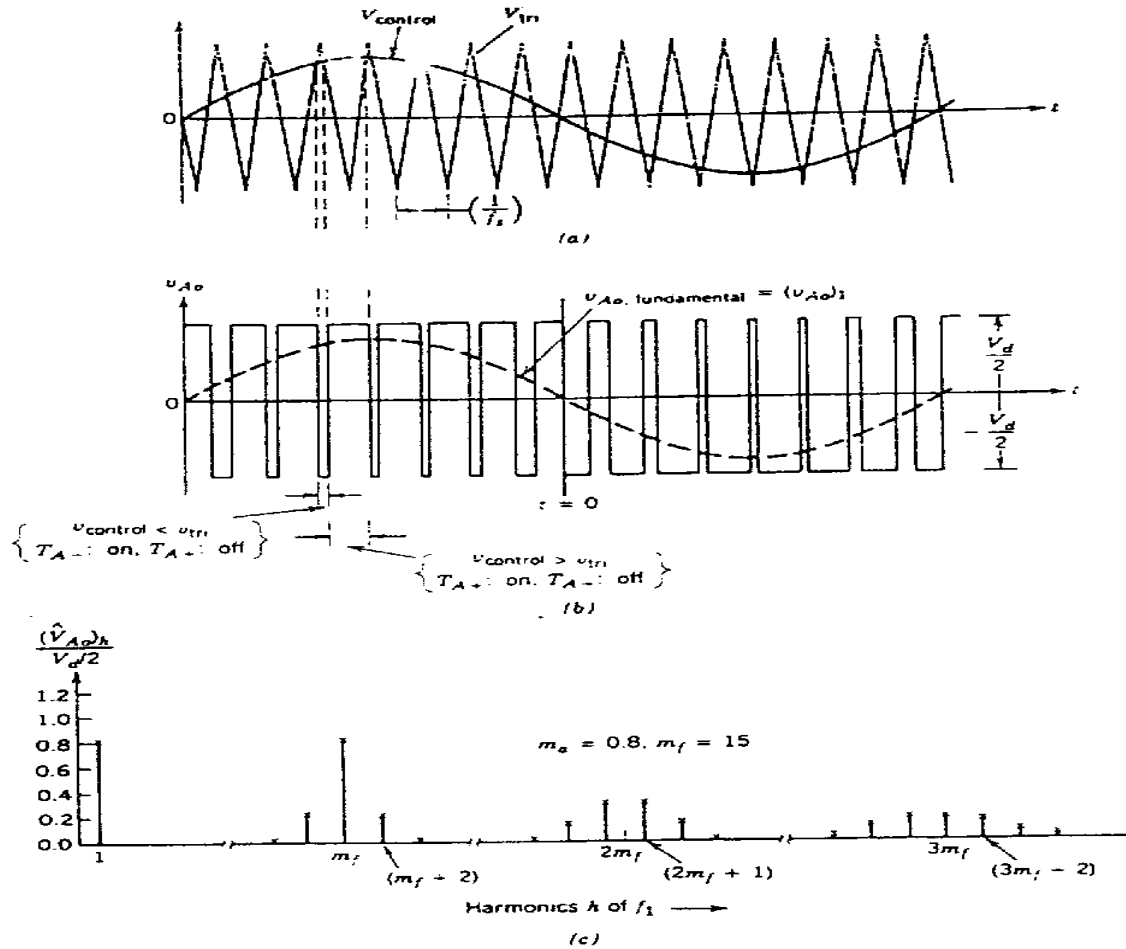
Kare Dalga İnverterlerde Kontrol

Tek Fazlı Prensipten İnverter Devresi ve Temel Dalga Şekilleri	Açıklama
	<p>Tek ve 2 fazlı inverterlerde, tristör düzeni,</p> <p>Üst sıra : T₁ T₃ Alt sıra : T₄ T₂</p> <p>3 fazlı inverterlerde, tristör düzeni,</p> <p>Üst sıra : T₁ T₃ T₅ Alt sıra : T₄ T₆ T₂</p>
Açıklama	
<ul style="list-style-type: none"> • Güç elemanları olarak tristörler kullanıldığında, kare dalga inverterler daha uygundur. • Kare dalga inverterlerde, genellikle gerilim dönüştürme oranı sabittir ve gerilim kontrolü DC giriş gerilimi değiştirilerek yapılır. • Kare dalga inverterler, aynı faz kollarına ait üst ve alt sıra elemanlar açısından, 120° veya 180° iletimli olabilmektedirler. 180° iletimli inverterlerde, bu elemanlar arasında iletim boşlukları olmadığından, çıkış gerilimi dalga şekli yükten bağımsız olarak belirlidir ve bu büyük bir avantajdır. • İletim aralıkları veya kontrol sinyalleri, genellikle sayıcı ve flip-flop ile elde edilir. Tek ya da 2 fazlı inverterlerde 2'ye ve 3 fazlı inverterlerde 6'ya sayıcılar çok kullanılır. • Sadece tristörlü, omik yüklü ve tek fazlı kare dalga inverterlerde, kısa süreli sinyaller kullanılabilir. Bunun dışında, genellikle sürekli sinyaller kullanılmaktadır. • Kontrol kartının sıfırı (0) şebekenin nötrüne (N) veya toprağa bağlı ise, bütün sinyaller izole edilmelidir. Kartın sıfırı inverterin negatif (-) barasına bağlı ise, alt elemanların sinyallerinde izolasyona gerek yoktur. İzolasyon genellikle opto transistörler ile yapılır. 	

Tek veya 2 Fazlı	3 Fazlı
Kare Dalga İnverterlerde, İletim Aralıkları veya Kontrol Sinyallerinin Elde Edilmesi	
Açıklama	
<p>Tek veya 2 fazlı bir kare dalga inverterin kontrol sinyalleri, bir 2'ye sayıcı veya bir flip-flop kullanılarak sağlanmaktadır. Ancak, her iki sinyal bir miktar baştan kesilerek, ölü sürelerin oluşturulması gerekmektedir. Tristörlü devrelerde, ölü sürelerin başlangıçlarında, ana tristörlerin söndürülmesini sağlayan yardımcı tristörler için kısa süreli sinyallerin elde edilmesi de gerekmektedir. Yukarıda görülen tek fazlı inverterin çıkışları, DC kaynak geriliminin orta ucuna göre 2 fazlı olarak da düşünülebilir.</p>	
<p>Bir 6'ya sayıcı kullanılarak, 120° ve 180° iletimli kare dalga inverterlerin kontrol sinyallerinin nasıl elde edilebileceği, yukarıdaki şekilde görülmektedir. 120° iletimli inverterde, üst ve alt elemanlar arasında zaten 60'ar derece iletim boşlukları olduğundan, ayrıca ölü zaman elde edilmesine gerek kalmaz. Ancak, 180° iletimli inverterde, ölü zamanların bırakılması gerekmektedir.</p>	
<p>Ölü Zamanlar, kullanılan güç elemanlarına bağlıdır. Ölü süreler, SCR'lerde birkaç 100 µs, BJT'lerde birkaç 10 µs, IGBT'lerde birkaç µs, MOSFET'lerde birkaç 100 ns mertebelerindedir.</p>	
<p>Kare dalga inverterin DC basamaklar şeklindeki çıkışları yüksek frekansta kıyılarak da çıkış gerilimi kontrol edilebilmektedir. Bu durumda, boşluklu kare dalga şeklinde bir çıkış gerilimi elde edilmektedir.</p>	

Sinüsoidal PWM İnverterlerde Kontrol

Sinüsoidal PWM İnverterlerde, Kontrol Sinyallerinin Elde Edilmesi



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. Ayrıca, elde edilen gerilim tek veya çift yönlü olabilmektedir.
- **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 sinyal sadece $0-\pi$ aralığında T_1 ile T_2 elemanlarına ve bu sinyalin inversi sadece $\pi-2\pi$ aralığında T_3 ile T_4 elemanlarına uygulanırsa, **tek yönlü kontrol** elde edilmiş olur. Sürekli olarak normal sinyal T_1 ile T_2 elemanlarına ve invers sinyal T_3 ile T_4 elemanlarına uygulanırsa, **iki yönlü kontrol** elde edilmiş olur.

DC KIYICILARDA KONTROL TEKNİKLERİ

<p>Prensip DC Kıyıcı Devresi ve Temel Dalga Şekilleri</p>	<p>Açıklama</p> <p>DC Kıyıcılarda, DC PWM kontrol yöntemi kullanılmaktadır.</p> <p>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.</p> <p>Genellikle sabit tutulan testere dişi sinyalin frekansı, anahtarlama veya kıyma frekansı olarak anılmaktadır. Bu frekans aynı zamanda devrenin çalışma frekansıdır.</p>
<p style="text-align: center;">Açıklama</p> <p>DC kıyıcılarda kısa devre olma özelliği yoktur.</p> <p>Kontrol kartının sıfırı (0), toprağa ya da DC kıyıcının negatif (-) barasına bağlıdır. Genellikle sinyal izolasyonu gerekir.</p> <p>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. Devrenin ana tristörü T_1 ve bunu söndürmekte kullanılan yardımcı tristör T_2 olarak belirlenerek, avans süreleri aşağıda tanımlanmıştır.</p> <p>$t_{\beta 1}, t_{\beta 2}$: Baştan ve sondan avans süreleri.</p> <p>$t_{\beta 1}$: T_1 tristörü tetiklendikten sonra devrenin komütasyon için hazır hale gelebilmesi için gerekli olan minimum süre.</p> <p>$t_{\beta 2}$: T_2 tetiklendikten sonra T_1'in kesimde kilitlenebilmesi için gerekli olan minimum süre.</p>	

2. GÜÇ ELEKTRONİĞİNDE KORUMA TEKNİKLERİ

2.1. KORUMANIN TANIMI VE SINIFLANDIRILMASI

Koruma, genel olarak bir eleman veya bir devrenin bozulması ya da **tahrip olmasının önlenmesi** şeklinde tanımlanır ve

1. Yarı iletken eleman ve devrelerin korunması
2. Diğer eleman ve devrelerin korunması

olarak 2 genel grupta toplanabilir.

Motor, transformatör, bobin, kondansatör, direnç gibi yarı iletken olmayan elemanlar ile bunlardan oluşan **klasik devrelerin korunması**, genellikle sigorta, röle, kesici gibi **klasik koruma elemanları** ile sağlanır. Yarı iletken eleman ve devrelerin korunmasında, bu koruyucu elemanlar genellikle yavaş ve yetersiz kalır.

Güç elektroniğinde koruma, özellikle yarı iletken eleman ve devrelerin korunması ile ilgilidir. **Yarı iletken eleman ve devrelerde koruma**, onların tahrip olmasına neden olan elektriksel ve fiziksel değerlerin zorlanmasını önlemek demektir. Bu ise ancak **elektronik koruma elemanları** ile sağlanabilmektedir.

Yarı iletken elemanların maruz kaldığı **elektriksel değerler**, akım ve gerilim ile akım ve gerilim yükselme hızlarıdır. Başlıca **fiziksel değer ise**, jonksiyon sıcaklığıdır. Bu değerlerin zorlanması halinde, yarı iletken elemanlar, aşırı güç kaybı ve ısınma sonucunda genellikle **kısa devre** özelliği gösterir. **Aşırılığın sürmesi**, açık devre olma ve parçalanma ile de sonuçlanabilir.

Yarı iletken eleman ve devrelerde koruma,

1. Koruyucu tedbirler
2. Arıza veya hata korunması

şeklinde 2 kısma ayrılır. **Koruyucu tedbir** olarak konulan eleman veya elemanlar, devre ile birlikte **sürekli çalışarak**, korunan elemanların bazı değerlere karşı zorlanmasına ve arıza oluşmasına engel olurlar. **Arıza korunması** olarak konulan eleman veya elemanlar ise, arızanın oluşması halinde **devreye girerek**, korunan elemanların tahrip olmasına mani olurlar.

Yarı iletken elemanların korunabilmesi için, bu elemanların **iyi tanınması** veya özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir.

2.2. GÜÇ ELEMANLARINDA KORUMA ÖZELLİKLERİ

Yarı iletken elemanlar, iletim durumunda çok küçük ve kesim durumunda çok büyük bir direnç özelliği gösteren, dönüştürme veya **taşıma gücü çok yüksek ve dayanma gücü çok düşük** elemanlardır.

Dahili güç kaybı ve ısı ataleti çok küçük olan yarı iletken elemanlar, bir **anahtarlama elemanı** olarak çalışmalıdır, yani ya tam iletimde ya da tam kesimde çalışmalıdır. Yarı iletken elemanların **yarı iletimde** çalışmaları oldukça tehlikelidir. Özellikle BJT, MOSFET ve

IGBT'lerde bunun sağlanmasına özen gösterilmelidir. Yarı iletimde çalışma özelliği olmayan Tristör ailesi bu bakımdan çok şanslıdır.

Yarı iletken elemanların kısa süreli **aşırı akım** veya ani akım darbesi dayanımları genellikle çok düşüktür. Tristör ailesi bu bakımdan da çok şanslıdır.

Yarı iletken elemanlarda, iletme girme ile iletimden çıkma anlarında **anahtarlama** ve iletim durumunda **iletim kayıpları** oluşur. Frekansa bağlı olan anahtarlama kayıpları, **yüksek frekanslarda** dayanılmaz hale gelebilir. Dolayısıyla, yüksek frekanslarda bu güç kayıpları dikkate alınarak tasarım yapılmalıdır. Hızlı elemanlar bu bakımdan daha avantajlıdır.

Yarı iletken elemanlarda, ana ve kontrol girişleri arasındaki jonksiyonun bir **kondansatör eşdeğeri** mevcuttur. Bu kondansatörden, uygulanan gerilimin yükselme hızına bağlı olarak,

$$i_D = C_D \cdot du_C/dt$$

kadar bir **deplasman akımı** geçer. Tedbir alınmaz ise, bu akım yarı iletken elemanların iletme girmesine neden olabilir.

Tristörlerde, $du/dt \geq (du/dt)_{krt}$ olduğunda, $i_D \geq I_{GT}$ olur ve tristör kendiliğinden iletme geçer.

$$\begin{aligned} i_C &= (h_{FE}+1) \cdot C_{CB} \cdot du_{CB}/dt \\ &\cong (h_{FE}+1) \cdot C_{CB} \cdot du_{CE}/dt \end{aligned}$$

olur ve deplasman akımı büyük değerli ana akımların geçmesine sebep olabilir. Transistöre uygulanan gerilimdeki **dalgalanmalar**, transistörden ana akımların geçmesine neden olur.

Transistörlerde, $C_{BE} \gg C_{CB}$, C_{CE} şeklindedir. Taban jonksiyonunda büyük değerli bir **şarj yükü** oluşur ve bu yük transistörü bir süre her iki yönde de iletimde tutabilir.

İletimden çıkarken oluşan du/dt , bütün yarı iletken elemanlarda anahtarlama kaybına neden olur. du/dt sınırlaması, bütün yarı iletken elemanlar için gerekli ve yararlıdır. Ayrıca, tristörlerde $du/dt \geq (du/dt)_{krt}$ olduğunda, deplasman akımı nedeniyle tristör kendiliğinden iletme geçer.

İletime girerken oluşan di/dt , yine bütün yarı iletken elemanlarda anahtarlama kaybına neden olur. di/dt sınırlaması, bütün yarı iletken elemanlar için gerekli ve yararlıdır. Ayrıca, tristörlerde $di/dt \geq (di/dt)_{krt}$ olduğunda, kapı akımı civarında ilk anda oluşan **dar iletken kanaldan** geçen aşırı akım tristörün tahrip olmasına sebep olur. Buna **sicim olayı** denilmektedir.

Aşırı pozitif gerilimlerde, tristör devrilerek kendiliğinden iletme geçer. Bu istenmeyen bir durum olup, sık sık tekrarı elemanı tahrip edebilir. BJT, MOSFET ve IGBT ise, **çığ devrilmeye** girerek, yüksek gerilim altında bir akım geçirir ve genellikle tahrip olur.

Aşırı negatif gerilimlerde, SCR ve BJT çığ devrilmeye girer ve genellikle tahrip olur. MOSFET'te daima ve IGBT'de genellikle bir **ters-akım diyodu** vardır. Bu durumda, negatif gerilim tutma özelliği zaten yoktur ve elemanlar negatif gerilimlere karşı korunmuş olur.

Kapısı bir direnç ile köprülenmiş olan bir tristörde, pozitif gerilimlerde **kaçak** ve **deplasman** akımları azalır ve bu akımlar ile tristörün tetiklenmesi önlenir. Negatif gerilimlerde ise, çok yüksek olan negatif dayanma gerilimi biraz azalır. Dikkate alındığında, bunun bir mahzuru yoktur.

Tabanı bir direnç ile köprülenmiş olan bir transistörde, pozitif gerilimlerde yine kaçak ve deplasman akımları azalır ve bu akımlar ile transistörün iletme girmesi önlenir. Ancak, negatif gerilimlerde, normalden daha düşük bir kazanç ile transistör iletme girer ve tahrip olma ihtimali ortaya çıkar. Güç transistörlerinin negatif çıkış devrilme gerilimleri, 10 V ile 50 V arasında olup oldukça düşüktür. Giriş köprü direnci olmadığında ise, çıkış devrilmeye maruz kalma ve tahrip olma ihtimali artar. Sonuç olarak, transistörlerin ters akım ve gerilimlere karşı korunması oldukça önemlidir.

Ters olarak iletme girmiş bir transistöre tekrar bir pozitif gerilim uygulandığında, transistör bir süre yüksek gerilim altında akım geçirir ve sonra kesime girer. Bu durum, hem bir transistörün **aşırı doyum** ile çalışması hem de girişi dirençli olan bir transistörün negatif bir gerilime maruz kalması ile oluşur.

2.3. GÜÇ DEVRELERİNDE KORUMA ÖZELLİKLERİ

Yarı iletken güç elemanlarındaki **bütün hassasiyetler**, genellikle yarı iletken güç elemanlarından oluşan devreler için de geçerlidir.

Yarı iletken güç devreleri, yarı iletken güç elemanlarından oluşan **kol** ve **bölümlerden** meydana gelen bir bütün olarak düşünülebilir. Yarı iletken güç devreleri ile kontrol ve koruma devreleri, endüstriyel **bir sistemi** oluşturur.

Yarı iletken güç devrelerinin belirli kol ve bölümlerindeki akım ve gerilim ile akım ve gerilim yükselme hızlarının değerleri, devredeki yarı iletken güç elemanlarına ait değerlere **doğrudan bağlıdır**.

Yarı iletken güç devrelerinde, **belirli kol ve bölümlere** koruma uygulanır. **Koruma uygulanan büyüklükler**, yarı iletken güç elemanları ile aynıdır, sadece değerleri farklıdır.

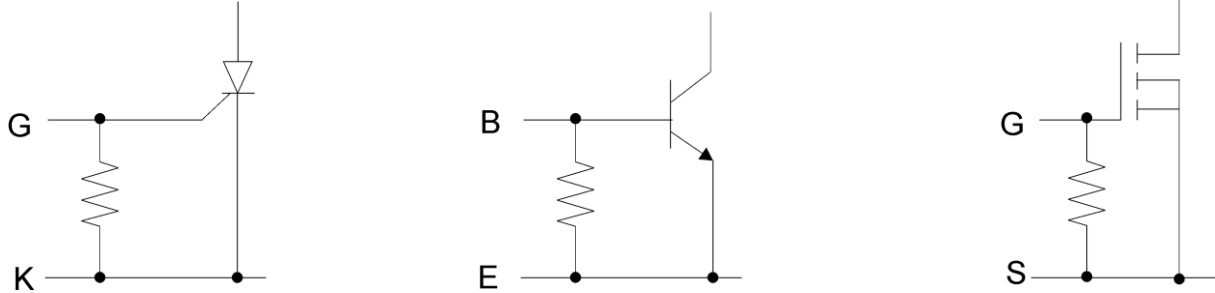
2.4. GÜÇ ELEMANLARINDA KORUMA TEKNİKLERİ

Koruyucu Tedbirler

Yarı iletken güç elemanlarının korunmasında, öncelikle **koruyucu tedbirler** alınmalıdır. Koruyucu tedbir olarak konulan eleman veya elemanlar, devre ile birlikte **sürekli** çalışarak, korunan elemanların bazı değerlere karşı zorlanmasına ve arıza oluşmasına engel olurlar. Böylece, devre veya sistemlerde arıza ile çalışmaya ara verilmesi önlenir ve **işletmenin sürekliliği** sağlanır. Ancak, devre ile birlikte sürekli çalışan bu elemanlar, bir miktar **güç kaybına** sebep olurlar. Bu güç kaybı, özellikle yüksek frekanslarda bazen oldukça yüksek değerlere erişebilmektedir. Yüksek frekanslı uygulamalarda, bu güç kayıpları makul seviyelerde kalacak şekilde tasarımlar yapılmalıdır.

Kaçak ve Deplasman Akımlarının Sınırlanması

Kaçak ve deplasman akımlarının sınırlanması için, genellikle SCR’de G-K, BJT’de B-E, MOSFET’te G-S ve IGBT’de G-E uçları uygun bir direnç ile köprülenir. Bu giriş köprü dirençlerinin diğer etkileri, daha önce açıklanmıştır.



Transistörde Ters Akım ve Gerilimin Önlenmesi

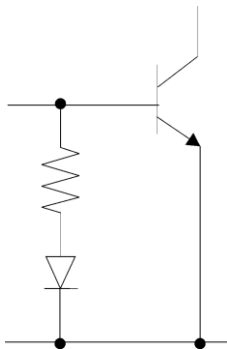
Transistörlerin ters akım ve gerilimlere karşı korunması için, genellikle transistöre seri olarak ve transistörün iletim yönünde **bir diyot** bağlanır.



Ters akımın geçmesine hiç **gerek yok ise**, diyot bu şekilde bağlanır. Burada diyot BJT ile aynı akımı taşır. Ters akım hiç geçmez.

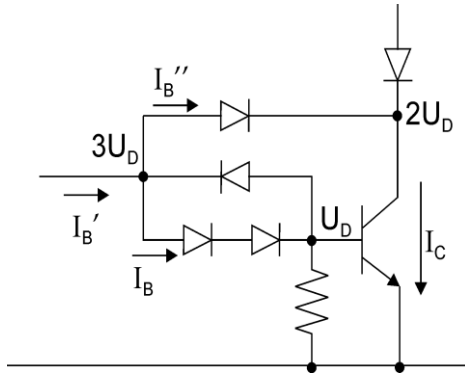
Ters akımın geçmesi **gerekli ise**, bu şekilde bir bağlantı yapılır. Burada diyot yine BJT ile aynı akımı taşır. Ters akım geçer, ancak BJT’den geçmez.

Transistörde Ters İletime Girmenin Önlenmesi



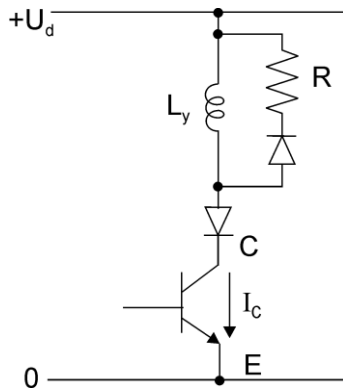
Giriş köprü direnci, negatif gerilimlerde BJT’nin iletme girmesine, BJT’nin negatif gerilim tutma özelliğinin tamamen yok olmasına neden olur. Şekilde görüldüğü gibi **bir diyot** bağlanarak, BJT’nin ters iletme girmesi önlenir. Ancak, bu durumda köprü direncin **normal görevini yapması** olumsuz etkilenir.

Transistörde Aşırı Doyum ve Ters İletime Girmenin Önlenmesi



Şekilde görülen transistörde aşırı doyumu önleme devresinde, iletim durumunda I_C ana akımı için **gerekli** olan I_B taban akımı çekilir, I_B' giriş akımının **fazlalığı** üst diyot üzerinden devresini tamamlar. Böylece, giriş akımı için 2 paralel yol oluşur ve bu paralel yolların gerilim eşitliğinden transistörün iletim gerilim düşümü $2U_D$ olur. Bu durumda, hem **aşırı doyum** hem de B'den C'ye akım geçişi ve transistörün **ters iletme girmesi** önlenmiş olmaktadır. Böylece, transistörün iletimden çıkışı büyük ölçüde hızlanır ve güç kayıpları azalır.

Seri bir Endüktans Nedeniyle Oluşan Aşırı Gerilimin Önlenmesi



Endüstriyel uygulamalarda, yarı iletken elemanlar tarafından **endüktans akımının ani olarak kesilmesi** sonucunda, endüktansta meydana gelen **ters emk'dan** dolayı elemanlar **aşırı gerilimlere** maruz kalır. Bunun önlenmesi için, şekilde görüldüğü gibi endüktans bir ters diyot ve bir direnç üzerinden köprülenir. Böylece, iletim durumunda endüktansta biriken enerji kesim esnasında R direncinde harcanır ve elemanın maruz kaldığı gerilim sınırlanır. Buradaki L_y , özel bir endüktans olabileceği gibi DC motor sargısının endüktansı da olabilir.

Paralel direnç yok iken,

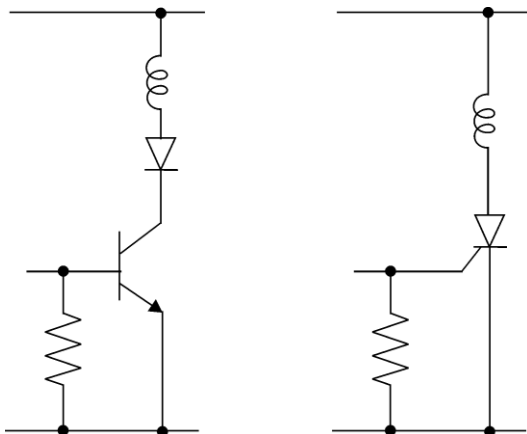
$$U_{CEmax} = U_d + emk$$

Paralel direnç var iken,

$$U_{CEmax} = U_d + R \cdot I_C + U_D$$

olur. Burada, U_D diyodun gerilim düşümü olup 0.6 V civarındadır.

Genel Olarak Akımın Yükselme Hızının Sınırlanması

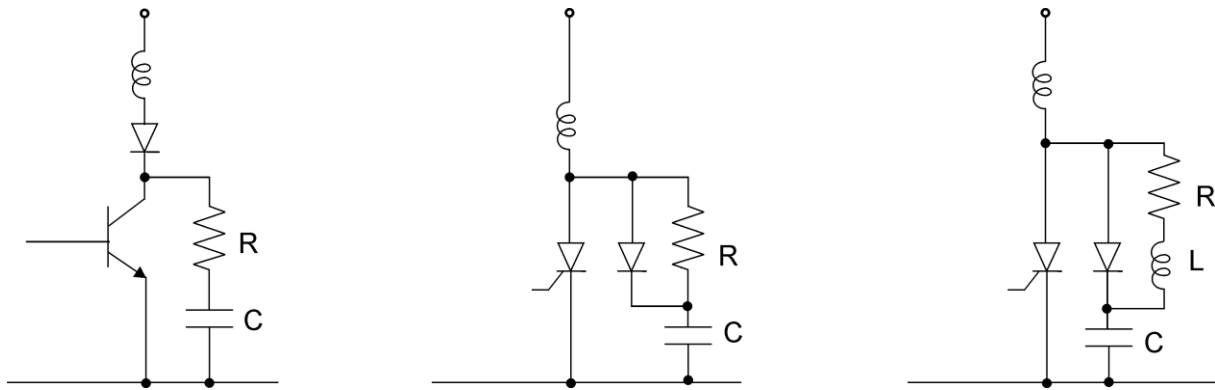


Genel olarak, küçük değerli **bir seri endüktans** bağlanarak, iletme girme esnasında güç elemanından geçen akımın yükselme hızı di/dt sınırlanır. **di/dt sınırlaması**, bütün yarı iletken elemanların iletme girmedeki anahtarlama güç kayıplarını azalttığı gibi, tristörün $di/dt \geq (di/dt)_{krt}$ olarak sicim olayı ile tahrip olmasını da önler.

Genel Olarak Gerilimin Yükselme Hızı ve Maksimum Değerinin Sınırlanması

Genel olarak, küçük değerli **paralel bir seri R-C elemanı** bağlanarak, kesime girme esnasında yarı iletken güç elemanı uçlarında oluşan gerilimin yükselme hızı du/dt ve maksimum değeri U_{max} sınırlanır. **du/dt sınırlaması**, bütün elemanların kesime girmedeki anahtarlama güç kayıplarını azalttığı gibi, tristörün $du/dt \geq (du/dt)_{krt}$ olarak kendiliğinden iletme girmesini de önler. **U_{max} sınırlaması ise**, tristörün devrilerek kendiliğinden iletme geçmesini ve diğer elemanların çığ devrilme ile tahrip olmasını önler.

Dolayısıyla, **R-C elemanı** her zaman ve her yarı iletken güç elemanı için gereklidir. Fakat, kullanılma amacına ve korunacak elemana göre düzenlenmelidir.



Yarı iletken elemanların hızlıca iletme **giriş-çıkışları** ve gerilim kaynaklarının **kesilip-gelmeleri** gibi sebeplerle, endüktanslarda ani akım değişimleri ve **enerji birikimleri** oluşur. Bu enerji birikimleri, **salınım devreleri** oluşturularak söndürülmeli veya harcanmalıdır. Bu sağlanmaz ise, devrede çok büyük gerilimler meydana gelir ve yarı iletken elemanlar tahrip olur. Her yarı iletken elemana bir R-C elemanının bağlanması, birçok salınım yollarının oluşması ile enerji birikimlerinin **sönmesini** sağlar ve böylece **aşırı gerilimlerin** oluşmasını önler.

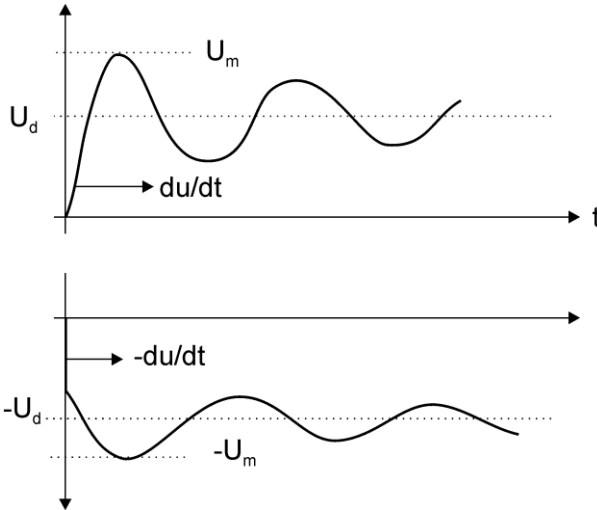
du/dt sınırlaması açısından, mümkün olduğu kadar C değeri büyük, R değeri küçük olmalıdır.

U_{max} sınırlaması açısından, C değeri yine mümkün olduğu kadar büyük olmalıdır. Ancak, R değerinin çok büyük olması da çok küçük olması da iyi sonuç vermemektedir. Aslında, kondansatör dolarken küçük bir R ve kondansatör boşalırken büyük bir R, iyi yönde etkilemektedir.

R direnci, enerji birikimlerinin sönmesini sağladığı gibi, yarı iletken eleman iletme girdiğinde C'nin **deşarj akımını sınırlama** görevini de yapar. R direnci olmaz ise, C'nindeşarj akımı, yüksek frekanslarda yarı iletkenlere büyük yükler getirebilir.

C'nin şarj vedeşarjı, yüksek frekanslarda R direncinde büyük güç kayıplarına da sebep olur. Bu **güç kayıpları**, makul seviyelerde kalmalıdır. Ayrıca, C'nin şarj vedeşarjı, periyot içerisinde belli bir zaman alır. Bu **şarj vedeşarj süreleri** de, yine makul seviyelerde kalmalıdır. Prensip olarak, çalışma veya anahtarlama frekansı arttıkça, kondansatör değeri düşürülmektedir.

Yüksek gerilim ve frekans gibi **ağır çalışma şartlarında**, R direnci pozitif yönde bir diyotla köprülenir. Böylece, C kondansatörü pozitif yönde diyot üzerinden doğrudan şarj olur ve du/dt en iyi şekilde sınırlanır. C kondansatörünün deşarjını sağlayan R direnci, du/dt 'den bağımsız olarak serbestçe seçilebilir. R direncinin güç kaybı da yarıya düşer. Ayrıca, C kondansatörünün deşarjı yarı iletken üzerine ağır bir di/dt yükü getirecek ise, deşarj yoluna R direncine seri olarak bir endüktans da eklenebilir. Bir diyot ile köprülenmiş olan bu tür bastırma devresi veya hücrelerine **yönlü veya kutuplu bastırma hücresi** adı verilir.



R-C elemanı bağlı olan bir yarı iletkene, bir endüktans üzerinden bir DC gerilim anahtarlanırsa, eleman uçlarında oluşan sönümlü gerilimin değişimi şekilde görüldüğü gibi olur.

R-C elemanı bağlı ve sönmekte olan bir tristör veya diyottan geçen ters akımın ani olarak kesilmesi durumunda, eleman uçlarında oluşan sönümlü gerilimin değişimi şekilde görüldüğü gibi olur.

Arıza veya Hata Koruması

Yarı iletken güç elemanlarında, öncelikle aşırı akım ve gerilim ile aşırı akım ve gerilim yükselme hızlarına karşı, seri endüktans ve paralel R-C elemanı kullanmak gibi **koruyucu tedbirler** alınmalıdır.

Koruyucu tedbirlere rağmen oluşan aşırı akım ve gerilim ile aşırı akım ve gerilim yükselme hızları, mümkün ise **kontrol devreleri** ile bastırılmalıdır. Bu da mümkün olmaz ise, hata veya **arızalara karşı koruyucu eleman** veya elemanlar devreye girmelidir.

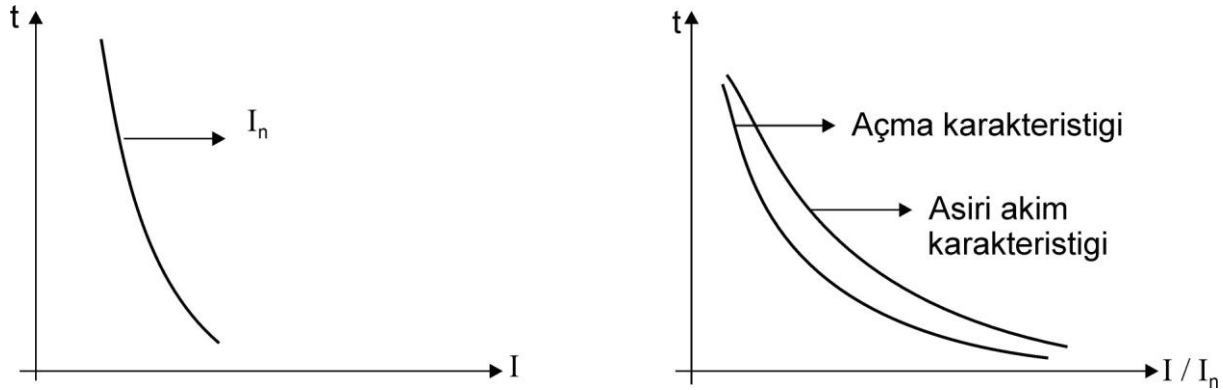
Mümkün ise, arıza yapan eleman veya elemanlar devre dışı bırakılmalı ve sistem çalışmaya devam etmelidir. Bu **kesintisiz koruma düzeni** pahalıdır ve gerektiğinde kullanılır.

İşletme Esnasında Oluşan Aşırı Akımlara Karşı,

- Tam uyumlu hızlı sigortalar
- Termik röleler
- Aşırı akım veya maksimum akım röleleri

ile koruma yapılabilir. Tam uyumlu sigortalar, **aşırı ani akımlara** karşı da koruma yapabilirler. Termik veya aşırı akım rölesi kullanıldığında, ani akım için ayrıca hızlı sigorta veya hızlı şalter konmalıdır.

Koruyucu elemanlar seçilirken, korunacak elemanın karakteristik değerleri ile koruyucu elemanın özellikle imalat toleransı ile **açma karakteristiğinin** dikkate alınması gerekir. Sigorta, termik veya maksimum akım rölesinin açma karakteristiği, her aralıkta yarı iletkenin **aşırı akım karakteristiğinin** altında olmalıdır.



Arıza ve Kısa Devre ile Oluşan Aşırı Ani Akımlara Karşı,

- Hızlı sigortalar
- Hızlı şalterler
- Hızlı ayırıcılar
- Kısa devre ediciler

ile koruma yapılır.

Hızlı sigortalar, ucuz koruma elemanlarıdır. Ana devre girişine, her bir kola veya her bir elemana konabilirler. Sigortalar devreyi kestiğinde, yeniden takılırlar. Dolayısıyla, işletmede uzun kesintilere sebep olabilirler. Sigorta kataloglarında, anma akımı, anma gerilimi, kesme akımı

$$W = \int i^2 \cdot dt$$

değeri, kesme karakteristiği, salt gerilimi değerleri verilir. Korunacak elemanın değerleri ile sigorta değerleri uyum içinde olmalıdır. Hızlı sigortalarda, ana akım devresini komple kesme veya sinyalizasyon gibi amaçlarla kullanılmak üzere, normalde açık yada kapalı **yardımcı ihbar kontaktları** da bulunabilir.

Hızlı şalterler, bilhassa elektrodinamik şalterler sigortalardan çok daha hızlı olan (birkaç 100 µs gibi) pahalı elemanlardır. Arıza sonrası devreye hızlı girmesi istenen yerlerde kullanılır. Hızlı şalterler, uygulamada termik ve maksimum akım röleleri ile donatılmış olarak kullanılır.

Hızlı ayırıcılar, aşırı akım durumunda ve akımın sıfır olduğu anda devreyi açarlar. Akım altında açma-kapama işlemi yapmazlar. Şalterlere göre çok daha ucuzdurlar. Alternatif gerilimde kullanılmaları gerekir. Aşırı akımı, yarım periyodun sonunda akım sıfır oluncaya kadar kesmezler. Dolayısıyla, akım kesilinceye kadar elemanlara zarar verecek değere erişmemelidir. Yani bir endüktans ile sınırlanmalıdır.

Kısa devre ediciler, diğer koruyucular genellikle hız olarak elemanları korumakta yetersiz kaldığında, **çok hızlı bir şekilde** (birkaç µs gibi) devreye girerek sistemi kısa devre ederler. Elemanları veya sistemi toptan korumuş olurlar. Devreyi genellikle bir endüktans üzerinden

kısa devre edip, kendileri de tahrip olmadan sigortayı attırırlar. Yarı iletken güç elemanlarını, genellikle **elektronik olan kısa devre ediciler** koruyabilmektedir. Ancak, koruma yapmalarına karşılık, işletmede kesintiye sebep olurlar. Sigortalar ise, genellikle yarı iletken güç elemanlarını koruyamamaktadır.

Arıza ile Oluşan Aşırı Gerilimlere Karşı,

- Selenyum thyrector veya çığ diyotlar
- Metal oksitli varistörler

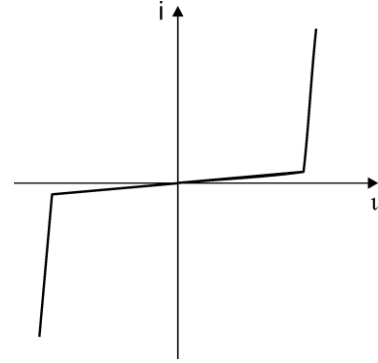
ile koruma yapılabilir. Her ikisinin de karakteristiği prensip olarak aynı olup, gerilimin fazla kısmını keserler. **Gerilim darbesi** nominal gerilimden büyük olduğu sürece, gerilim altında akım geçirirler. Gelen aşırı **darbe gücünü** kendileri harcarlar. Karşılayabilecekleri güç darbeleri soğutucuya bağlıdır. Aralarındaki fark, thyrectorlerin kademeli diğerlerinin ise her türlü gerilimlerde üretilebilmeleridir. Metal oksitli **varistör** ise, linear olmayan bir direnç özelliği gösterir ve belirli bir gerilimin üzerinde direnç değeri hızlıca düşer.

Selenyum thyrector ve çığ diyodun karakteristikleri aynı olup, şekilde görüldüğü gibidir.

Aşırı gerilimler,

- Şebeke geriliminin ani olarak kesilip-gelmemesi
- Yarı iletkenlerin ani olarak iletme girip-çıkmaları
- Koruyucuların ani davranışları

gibi durumlarda oluşur.

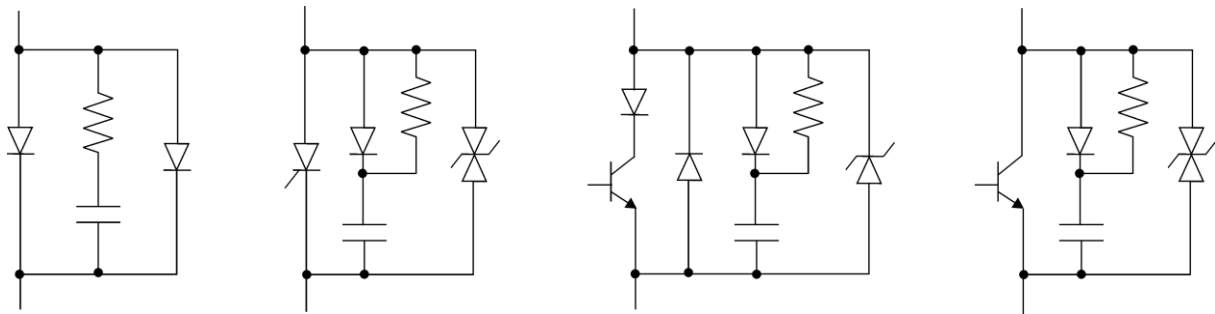


Arıza ile Oluşan Aşırı Akım ve Gerilim Yükselmelerine Karşı,

- Elektronik di/dt röleleri
- Elektronik du/dt röleleri

ile **çok hızlı koruma** yapılabilir. Bu elemanlar, sınır değerler aşıldığında devreyi açarlar, sonra tekrar devreye alınırlar ve işletmede kesintiye neden olurlar.

KORUYUCU TEDBİR VE HATA KORUMASI BİRLİKTE OLMAK ÜZERE, MÜNFERİT ELEMANLARDA GERİLİM DARBELERİNİN BASTIRILMASI



2.5. GÜÇ DEVRELERİNDE KORUMA TEKNİKLERİ

Yarı iletken güç devrelerinde de, öncelikle aşırı akım ve gerilim ile aşırı akım ve gerilim yükselme hızlarına karşı, seri endüktans ve paralel R-C elemanı kullanmak gibi **koruyucu tedbirler** alınmalıdır.

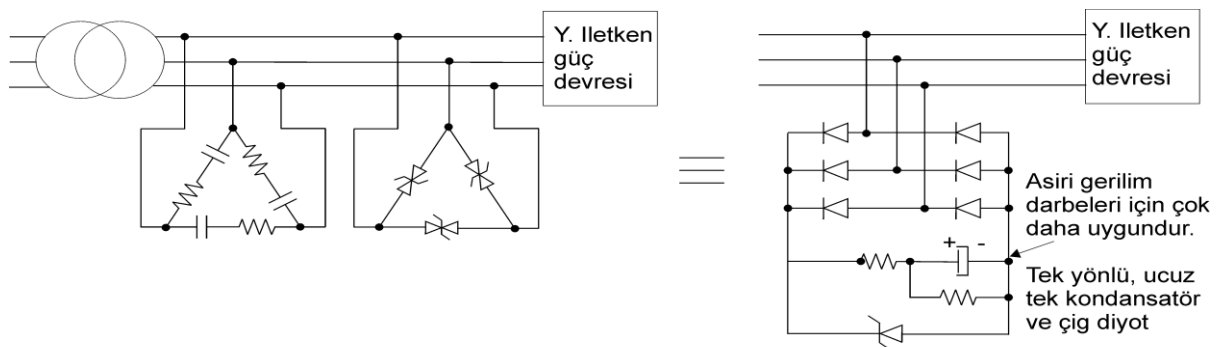
Koruyucu tedbirlere rağmen oluşan aşırı akım ve gerilim ile aşırı akım ve gerilim yükselme hızları, mümkün ise **kontrol devreleriyle** bastırılmalıdır. Öncelikle, doğal komütasyonlu devrelerde **faz kontrol açıları** ve zorlamalı komütasyonlu devrelerde **bağlı iletim süreleri** ile aşırılıklar **kontrol altına** alınmaya çalışılmalıdır. Bu şekilde aşırılıklar önlenemez ise, kontrol sinyalleri tamamen kesilerek, durum kontrol edilmelidir.

Kontrol sinyalleri ile de aşırılıklar önlenemez ise, arıza veya **hatalara karşı koruyucu eleman** veya elemanlar devreye girmelidir. Bu durumda, önce **çığ diyot** ve **varistörler** gibi gerilim kırıcılar görev yapar. Sonra, **elektronik kısa devre edici** ile **elektronik di/dt ve du/dt röleleri** devreye girer. Bu elektronik koruyucular, devrenin çalışmasını kesintiye uğratırlar, ancak genellikle yarı iletken elemanları korurlar. Aşırılıkların sürmesi halinde, artık **sigorta, şalter, röle ve ayırıcı** gibi koruyucular devreyi açarlar. Bu koruyucular genellikle yarı iletken elemanları koruyamazlar.

Mümkün ise, arıza yapan eleman veya elemanlar devre dışı bırakılmalı, sistem çalışmaya devam etmelidir. Bu **kesintisiz koruma düzeni** pahalıdır ve gerektiğinde kullanılır.

Yarı iletken güç eleman ve devrelerinde, genellikle **elektronik koruma** yapılır. Elektronik korumada, genellikle büyüklüklerin **ani değerleri** takip edilir. Yarı iletken güç elemanlarında, genellikle **tek tek** ve bazen de **grup** olarak koruma yapılır. Yarı iletken güç devrelerinde ise, **kol** veya **kısım** ya da **bütün** olarak koruma tasarlanmaktadır. Elektronik korumalara rağmen bir arıza veya hasar oluştuğunda, klasik koruma elemanları devreyi enerji kaynağından ayırmalı ve **arıza veya hasarların devamı** durdurulmalıdır.

KORUYUCU TEDBİR VE HATA KORUMASI BİRLİKTE OLMAK ÜZERE, BİR GÜÇ DEVRESİ GİRİŞİNDE GERİLİM DARBELERİNİN BASTIRILMASI



Genel bir güç devresi girişinde, daima üçgen bağlı **R-C elemanları** ile iki yönlü olarak çığ diyot veya **varistörler** kullanılmalıdır. Bu bağlantı düzeni, gerilim darbelerinin her iki yönde de geçişini sınırlar. Sağda görülen bağlantı düzeni, soldakinin **daha basit ve ucuz** bir eşdeğeridir. Bir diyot köprüsü ile tek yönlü bir kondansatör ve bir varistör kullanılmıştır.

2.6. YUMUŞAK ANAHTARLAMA VE BASTIRMA HÜCRELERİ

GENEL GİRİŞ

Yumuşak anahtarlama, temel olarak anahtarlama kayıpları ile EMI gürültülerin yok edilmesi veya en aza indirilmesidir. *Anahtarlama kayıpları* ise, anahtarlama esnasında güç anahtarının akım ve geriliminin üstüste binme kaybı ile güç diyodunun ters toparlanma kaybı ve anahtarın parazitik kondansatörünün deşarj kaybindan oluşmaktadır. Yumuşak anahtarlama sağlayan ve ilave devreler olarak bilinen *bastırma hücreleri*, klasik ve modern olarak iki genel gruba ayrılır. Bu hücreler arasındaki temel fark, modern hücrelerin bir *kısmi rezonansa* sahip olmalarıdır.

Bir bastırma hücresinden beklenen fonksiyonlar, anahtarlama kayıpları ve EMI gürültülerin bastırılması, anahtarlama enerjilerinin geri kazanılması, hafif yük şartlarında da yumuşak anahtarlamanın sürmesi veya zamanın çoğunda PWM çalışmanın korunması, ana elemanlar üzerinde ilave akım ve gerilim streslerinin oluşmaması veya en az düzeyde kalması, devrenin boyut ve maliyetinin düşmesi ile verim ve güç yoğunluğunun artması şeklinde sıralanabilir. Bu fonksiyonların çok az bir kısmı *klasik*, büyük bir kısmı *modern pasif* ve tamamına yakın bir kısmı ise *modern aktif* hücreler ile sağlanabilmektedir.

Sonuç olarak, devrenin güç yoğunluğunu arttırmanın ana amaç olduğu daima göz önünde tutulmalı, bir bastırma hücresinin sağladığı *Yumuşak anahtarlama yararları* ile devreye yüklediği *külfetler* iyice karşılaştırılmalı ve nihai seçim yapılmalıdır.

KLASİK BASTIRMA HÜCRELERİ

Klasik bastırma hücreleri, genel olarak rezonanssız, kayıplı ve pasif hücreler olarak bilinmektedir. Bu hücreler,

1. *Seri bastırma hücreleri*
2. *Paralel bastırma hücreleri*

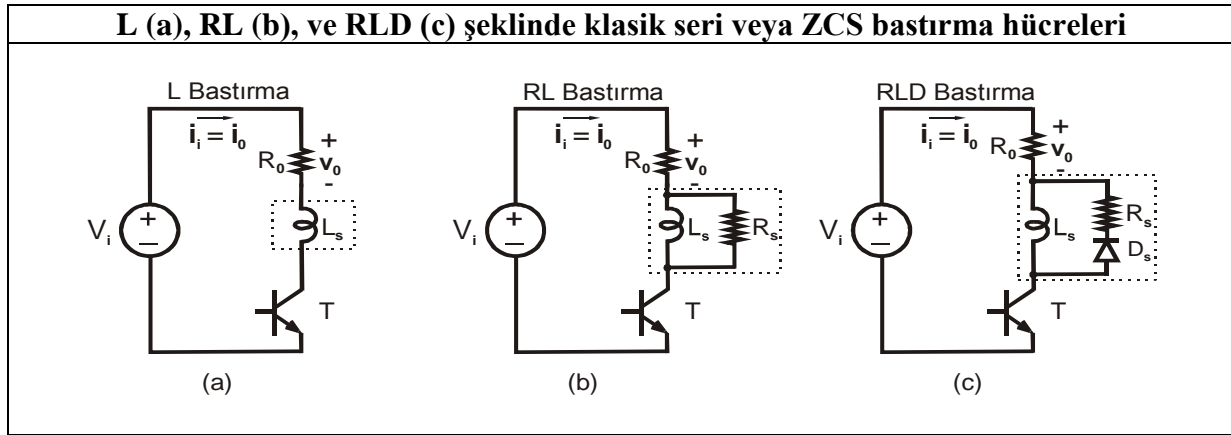
şeklinde 2 genel gruba ayrılır.

Seri Bastırma Hücreleri

Seri bastırma hücresi, iletme girme veya sıfır akımda anahtarlama (ZCS) hücresi olarak da tanımlanır.

Temel olarak seri bastırmada, ana anahtara seri olarak küçük değerli bir endüktans bağlanmasıyla, iletme girme anahtarlama esnasında, elemandan geçen *akımın yükselme hızı sınırlanarak Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS) sağlanır*.

Burada, *iletme girme işleminde anahtarlama enerji kaybı büyük ölçüde azaltılır*. Aslında, anahtarlama enerjisi endüktansa aktarılır. Fakat, bu enerji, kesime girme işleminde, endüktansta büyük bir emk oluşturur ve daha büyük bir enerji kaybı ile anahtarın tahrip olmasına neden olabilir. Ana anahtarın pozitif bir çık devrilme gerilimi ve bir parazitik kondansatöre sahip olduğunu düşünerek bu durumu yorumlayınız. Bu problemin çözümü için, en azından endüktansa paralel bir direncin bağlanması gerekir. Böylece, seri RL hücresi oluşur.



Seri RL bastırma hücresinde, kesime girdiği anda anahtarın maruz kaldığı maksimum gerilim,

$$V_{OFFmax} = V_i + R_s I_0 = V_i + R_s \frac{V_i}{R_0} = (1 + \frac{R_s}{R_0}) V_i$$

olarak bulunur. Burada R_s direnci, iletme girme işleminde anahtarda ek bir akım stresinin oluşmasına neden olur. Bu problemin çözümü için ise, bu dirence seri olarak ve anahtarın iletim yönünün tersi yönde bir diyot bağlanır. Böylece, seri RLD bastırma hücresi elde edilir.

Seri RLD bastırma hücresinde, anahtarın maruz kaldığı gerilim yukarıdakine göre sadece bir diyodun gerilim düşümü kadar artar, fakat direncin çok daha küçük değerlerde seçilmesine imkan sağlanır. Böylece, klasik olarak mükemmele erişilir. Fakat, **anahtarlama enerjisi dirençte harcanır ve ana anahtarda ek bir gerilim stresi oluşur.**

Paralel Bastırma Hücreleri

Paralel bastırma hücresi, kesime girme veya sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) hücresi olarak da tanımlanır.

Temel olarak paralel bastırmada, ana anahtara paralel olarak küçük değerli bir kondansatör bağlanmasıyla, kesime girme anahtarlama esnasında, eleman uçlarında oluşan **gerilimin yükseleme hızı sınırlanarak Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS) sağlanır.**

Paralel bastırma hücrelerinin çalışması, seri bastırma hücreleriyle tam bir benzerlik gösterir. Burada, **kesime girmedeki anahtarlama enerji kaybı büyük ölçüde azaltılır** ve bu enerji kondansatöre aktarılır. Dolu olan bu kondansatör, iletme girme işleminde anahtardan aşırı bir akım geçmesine neden olur. Bunu önlemek için, kondansatöre seri bir direnç bağlanır. Bu durumda, iletme girdiği anda anahtardan geçen maksimum akım,

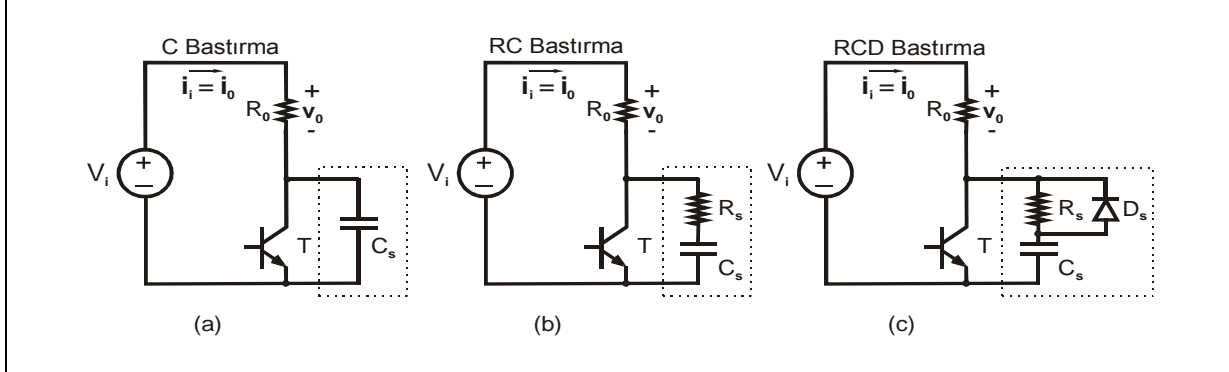
$$I_{ONmax} = I_0 + \frac{V_i}{R_s} = I_0 + R_0 I_0 / R_s = (1 + R_0 / R_s) I_0$$

olarak bulunur. İletimden çıkma işleminde bu direncin ek bir gerilim stresine neden olmaması için, bu direnç anahtarın iletim yönünde bir diyot ile köprülenir. Artık bu direnç daha büyük değerlerde seçilebilir. Böylece, klasik olarak mükemmele erişilir. Fakat, **anahtarlama enerjisi dirençte harcanır ve ana anahtarda ek bir akım stresi oluşur.**

Uygulamalarda, genellikle seri ve paralel bastırma hücreleri birlikte kullanılır. Bu durumda, bu hücreler birbirini olumlu ya da olumsuz olarak etkiler. Bu hücrelerin veya ilave devrelerin

toplamı, genellikle bir tek bastırma hücresi olarak kabul edilir ve dizayn işlemi bir bütün olarak yapılır.

C (a), RC (b), ve RCD (c) şeklinde klasik paralel veya ZVS bastırma hücreleri



Klasik Bastırma Hücrelerinin Özellikleri

- Bastırma elemanı olarak sadece bir L veya bir C kullanılması mümkün değildir.
- Seri bastırma hücresiyle iletme girme işleminde ZCS ve paralel bastırma hücresiyle ise kesime girme işleminde ZVS sağlanır.
- İletim veya kesime girme işlemlerinde, anahtarlama enerji kayıpları büyük ölçüde azalır.
- Anahtarlama enerji kayıpları geri kazanılamaz ve dirençlerde harcanır.
- Seri bastırma işleminde ilave bir gerilim stresi ve paralel bastırmada ise ilave bir akım stresi oluşur.
- Bastırma elemanlarının enerjilenme süreleri ile bu enerjilerin sönme süreleri, hat gerilimi ve yük akımına büyük ölçüde bağlıdır. Hafif yük şartlarında, yumuşak anahtarlamanın sürdürülmesi ve PWM çalışmanın korunması oldukça zordur.
- Düşük frekanslı klasik devreler için uygun olabilir.
- Basit yapılı ve ucuzdur.

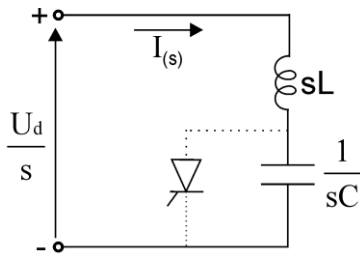
Ödevler

1 : Örnek olarak verilen omik yüklü bir DC kıyıcının transistörüne bir seri bastırma endüktansı bağlandığında, iletme girme işleminde lineer şekilde artan akımın yine yükselme süresi sonunda nominal değere eriştiği ve ancak aynı esnada lineer şekilde sıfıra düşen gerilimi transistör ile endüktansın eşit olarak paylaştıkları kabul edildiğinde, transistörün iletme girme işlemindeki anahtarlama enerji kaybını bulunuz.

2 : Örnek olarak verilen omik yüklü DC kıyıcının transistörüne bir paralel bastırma kondansatörü bağlandığında, kesime girme işleminde lineer şekilde artan gerilimin yine düşme süresi sonunda kaynak gerilimine eriştiği ve ancak aynı esnada lineer şekilde sıfıra düşen akımı transistör ile kondansatörün eşit olarak paylaştıkları kabul edildiğinde, transistörün kesime girme işlemindeki anahtarlama enerji kaybını bulunuz.

Muhtelif Şartlar Altında R-C Elemanının Etüdü

SERİ L-C DEVRESİ



$$I(s) = \frac{U_d}{s(sL + \frac{1}{sC})} = \frac{U_d/L}{s^2 + \frac{1}{LC}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$i(t) = \frac{U_d}{\omega_0 t} \cdot \sin \omega_0 t = U_d \cdot \sqrt{C/L} \cdot \sin \omega_0 t$$

$$U_C(s) = \frac{1}{sC} \cdot I(s) = \frac{U_d/LC}{s(s^2 + \frac{1}{LC})} = \frac{A}{s} + \frac{Bs + C}{s^2 + \frac{1}{LC}}$$

$$(A + B)s^2 + Cs + \frac{A}{LC} \equiv U_d/LC$$

$$A = U_d$$

$$B = -U_d$$

$$C = 0$$

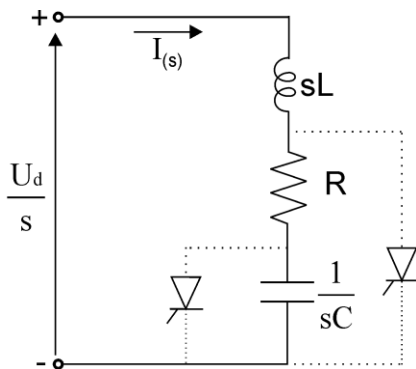
$$U_C(s) = \frac{U_d}{s} - \frac{U_d \cdot s}{s^2 + \frac{1}{LC}}$$

$$U_C(t) = U_d(1 - \cos \omega_0 t)$$

$$U_C(t) = U_d - U_c$$

$$U_L(t) = U_d \cdot \cos \omega_0 t$$

SERİ R-L-C DEVRESİ



$$I(s) = \frac{U_d}{s(sL + R + \frac{1}{sC})} = \frac{U_d/L}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}}$$

$$= \frac{U_d/L}{(s + \frac{R}{2L})^2 + (\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2})}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

$$i(t) = \frac{U_d}{\omega L} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \sin t$$

$$\begin{aligned}
 U_L(s) &= s \cdot L \cdot I(s) = s \cdot L \cdot \frac{U_d/L}{(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2} = U_d \cdot \frac{s}{(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2} \\
 &= U_d \cdot \left(\frac{s + \frac{R}{2L}}{(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2} - \frac{\frac{R}{2L}}{(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2} \right) \\
 U_L(t) &= U_d \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\cos \omega t - \frac{R}{2\omega L} \cdot \sin \omega t \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_R + U_C &= U_d - U_L = U_{RC} \\
 U_{RC} &= U_d \left[1 - e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\cos \omega t - \frac{R}{2\omega L} \cdot \sin \omega t \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_C(s) &= \frac{1}{sC} \cdot I(s) = \frac{1}{sC} \cdot \frac{U_d/L}{(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2} = \frac{U_d/LC}{s \left[(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2 \right]} \\
 &= \frac{A}{s} + \frac{Bs + C}{(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2} = \frac{A}{s} + \frac{Bs + C}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \\
 (A + B)s^2 + (A \cdot \frac{R}{L} + C)s + \frac{A}{LC} &\equiv \frac{U_d}{LC} \\
 A &= U_d \\
 B &= -U_d \\
 C &= -\frac{U_d \cdot R}{L} \\
 U_C(s) &= \frac{U_d}{s} - \frac{U_d \cdot s}{(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2} - \frac{U_d \cdot R}{L} \cdot \frac{1}{(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2} \\
 &= \frac{U_d}{s} - U_d \cdot \left[\frac{s + \frac{R}{2L}}{(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2} - \frac{R}{2L} \cdot \frac{1}{(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2} - \frac{U_d \cdot R}{L} \cdot \frac{1}{(s + \frac{R}{2L})^2 + \omega^2} \right] \\
 U_C(t) &= U_d \left[1 - e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\cos \omega t + \frac{R}{2\omega L} \cdot \sin \omega t \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$U_R = i_R \cdot R$$

$$U_R = U_d \cdot \frac{R}{\omega L} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \sin \omega t$$

$$U_R + U_L + U_C = U_d \quad \text{olarak sağlandığı görülür.}$$

$$\frac{R}{\omega L} \cong 0 \Rightarrow$$

$$i = \frac{U_d}{\omega L} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \sin \omega t$$

$$U_C = U_d \left[1 - e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \cos \omega t \right]$$

$$U_{RC} = U_d \left[1 - e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \cos \omega t \right] = U_C$$

$$\frac{R}{\omega} \cong 0 \Rightarrow \omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

$$i = \frac{U_d}{\omega_0 L} \cdot \sin \omega_0 t$$

$$U_C = U_d [1 - \cos \omega_0 t]$$

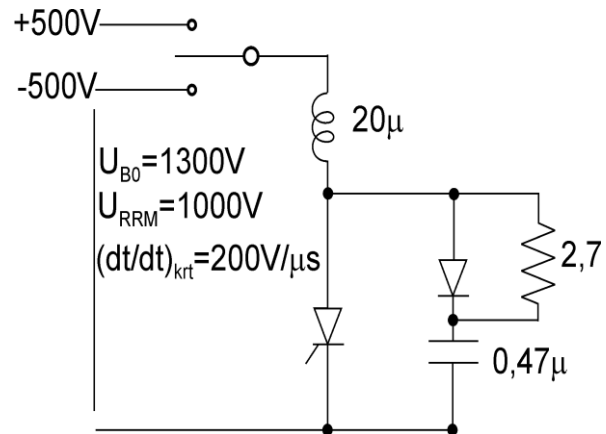
Yerine göre, $\omega \cong \omega_0$, $\frac{R}{\omega L} \cong 0$, $\frac{R}{L} \cong 0$ kabulleri yapılabilir.

Bu kabuller büyük değerli L ve küçük değerli R için yapılabilir.

Problem 1

Şekilde verilen devreye göre,

- (+) anahtarlama U_{B0} 'dan veya $(du/dt)_{krt}$ 'den dolayı tristör kendiliğinden tetiklenir mi?
- (-) anahtarlama, U_{RRM} 'den dolayı tristör tahrip olur mu?



Çözüm

a) (+) anahtarlamada, sönümsüz seri L-C salınımı oluşur.

$$U_T = U_C$$

Seri L-C devre çözümünden,

$$U_T = U_C = U_d (1 - \cos \omega_0 t)$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \text{ bulunur.}$$

$$\frac{dU_t}{dt} = \omega_0 \cdot U_d \cdot \sin \omega_0 t$$

$$dU_t/dt = 0 \Rightarrow \omega_0 t = \pi,$$

$$U_{t\max} = U_d (1 - \cos \pi)$$

$$= 2 \cdot U_d = 2 \cdot 600$$

$$\underline{U_{t\max} = 1200V}$$

$$U_{t\max} = 1200V < U_{B0} = 1300V$$

olduğundan, tristör bu değere göre kendiliğinden ilettime geçmez.

$$\frac{dU_t}{dt} = \omega_0 \cdot U_d \cdot \sin \omega_0 t$$

$$\frac{d^2 U_t}{dt^2} = \omega_0^2 \cdot U_d \cdot \cos \omega_0 t$$

$$d^2 U_t/dt^2 = 0 \Rightarrow \omega_0 t = \pi/2, \quad (dU_t/dt)_{\max} = \omega_0 \cdot U_d \cdot \sin(\pi/2)$$

$$(dU_t/dt)_{\max} = \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 10^{-6} \cdot 0,47 \cdot 10^{-6}}} \cdot 600$$

$$(dU_t/dt)_{\max} \cong 195,7V/\mu s$$

$$\left(\frac{d^2 U_t}{dt^2} \right)_{\max} = 195,7V/\mu s \leq \left(\frac{du}{dt} \right)_{\text{krt.}} = 200V/\mu s$$

olduğundan, tristör bu değere göre de kendiliğinden ilettime geçmez.

b) (-) anahtarlamada, sönümlü seri R-L-C salınımı oluşur.

$$U_T = U_R + U_C = U_{RC}$$

Seri R-L-C devresi çözümünden,

$$i(t) = \frac{U_d}{\omega \cdot L} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \sin \omega t \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

$$U_L(t) = U_d \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\cos \omega t - \frac{R}{2\omega L} \sin \omega t \right)$$

$$U_C(t) = U_d \cdot \left[1 - e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\cos \omega t + \frac{R}{2\omega L} \sin \omega t \right) \right]$$

$$U_R(t) = U_d \cdot \frac{R}{\omega L} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \sin \omega t$$

$$U_{RC}(t) = U_d \cdot \left[1 - e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\cos \omega t - \frac{R}{2\omega L} \sin \omega t \right) \right]$$

ifadeleri elde edilir.

$R \ll L$ ise, önce $\frac{R}{2\omega L} \cong 0$, $R \lll L$ ise, $\frac{R}{2\omega L} \cong 0$, $\frac{R}{L} \cong 0$ ve $\omega \cong \frac{1}{\sqrt{LC}}$ kabulleri

yapılarak, bu ifadeler basite indirgenebilir.

Tam devre çözümüne göre,

$$U_T = U_{RC} = U_d \left[1 - e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\cos \omega t - \frac{R}{2\omega L} \cdot \sin \omega t \right) \right]$$

$$\frac{dU_T}{dt} = U_d \cdot \left[\frac{R}{2L} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\cos \omega t - \frac{R}{2\omega L} \cdot \sin \omega t \right) - e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(-\omega \cdot \sin \omega t - \frac{R}{2L} \cdot \cos \omega t \right) \right]$$

$$= U_d \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left[\left(\frac{R}{2L} + \frac{R}{2L} \right) \cos \omega t + \left(\omega - \frac{R^2}{4\omega L^2} \right) \sin \omega t \right]$$

$$= U_d \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\frac{R}{2L} \cos \omega t + \frac{\omega^2 - \frac{R^2}{4\omega L^2}}{\omega} \sin \omega t \right)$$

$$\frac{dU_T}{dt} = 0 \Rightarrow \operatorname{tg} \omega t_1 = -\frac{R}{L} \cdot \frac{\omega}{\omega^2 - \frac{R^2}{4L^2}} = -\frac{R}{L} \cdot \frac{\omega}{2\omega^2 - \frac{1}{LC}}$$

$$\operatorname{tg} \omega t_1 = -\frac{R}{L} \cdot \frac{\omega \cdot LC}{2\omega^2 LC - 1} = -\frac{\omega RC}{2\omega^2 LC - 1}$$

$$\omega t_1 = \alpha_1 = \text{artg} \left[-\frac{\omega RC}{2\omega^2 LC - 1} \right]$$

$$t_1 = \frac{\alpha_1}{\omega}$$

$$U_{T\max} = U_t(\alpha_1, t_1)$$

olup, sayısal değerler uygulanırsa,

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{20 \cdot 10^{-6} \cdot 0,47 \cdot 10^{-6}} - \frac{2,7^2}{4 \cdot 20 \cdot 10^{-6}^2}} \cong 319103 \text{ rad/s}$$

$$\alpha_1 = \text{artg} \left[\frac{-319103 \cdot 2,7 \cdot 0,47 \cdot 10^{-6}}{(2 \cdot 319103^2 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 0,47 \cdot 10^{-6} - 1)} \right]$$

$$\alpha_1 = -23,89^\circ \mp \pi \Rightarrow \alpha_1 = 156,11^\circ$$

$$t_1 = \frac{156,11^\circ \cdot \pi / 180^\circ}{319103} \cong 8,538 \mu\text{s}$$

$$U_{T\max} = 600 \left[1 - e^{-\frac{2,7}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} \cdot 8,538 \cdot 10^{-6}} \left(\cos 156,11 - \frac{2,7}{2 \cdot 319103 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} \cdot \sin 156,11 \right) \right]$$

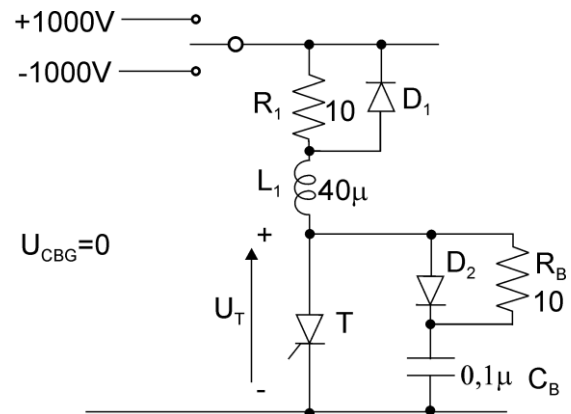
$$U_{T\max} \cong 937 \text{ V bulunur.}$$

Problem 2

Şebeke devrede,

a) (+) anahtarlama, $U_{T\max}=?$, $(dU_T/dt)_{\max}=?$

a) (-) anahtarlama, $-U_{T\max}=?$



Çözüm

a) (+) anahtarlama, seri R-L-C devresi oluşur.

$$U_T = U_C = U_d \left[1 - e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\cos \omega t + \frac{R}{2\omega L} \cdot \sin \omega t \right) \right]$$

$$\frac{dU_T}{dt} = U_d \cdot \left[\frac{R}{2L} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\cos \omega t + \frac{R}{2\omega L} \cdot \sin \omega t \right) - e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(-\omega \sin \omega t + \frac{R}{2L} \cdot \cos \omega t \right) \right]$$

$$= U_d \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \left(\omega + \frac{R^2}{4\omega L^2} \right) \cdot \sin \omega t$$

$$= U_d \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\frac{\omega^2 + \frac{R^2}{4\omega L^2}}{\omega} \right) \cdot \sin \omega t$$

$$\frac{dU_T}{dt} = \frac{U_d}{\omega LC} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \sin \omega t$$

$$\frac{d^2 U_T}{dt^2} = \frac{U_d}{\omega LC} \cdot \left[-\frac{R}{2L} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \sin \omega t + e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \omega \cdot \cos \omega t \right]$$

$$\frac{d^2 U_T}{dt^2} = \frac{U_d}{\omega LC} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \left(\omega \cdot \cos \omega t - \frac{R}{2L} \cdot \sin \omega t \right)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \sqrt{\frac{1}{40 \cdot 0,1 \cdot 10^{-12}} - \frac{10^2}{4 \cdot 40^2 \cdot 10^{-12}}} = \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{100}{4 \cdot 1600}} \cdot 10^6$$

$$\omega \cong 484123 \text{ rad/s}$$

$$dU_T / dt = 0 \Rightarrow \omega t_1 = \pi = 180^\circ \Rightarrow t_1 = \pi / \omega = \pi / 484123$$

$$t_1 \cong 6,49 \mu s$$

$$U_{T \max} = 1000 \cdot \left[1 - e^{-\frac{10}{2 \cdot 40} \cdot 6,49} \cdot \left(\cos \pi + \frac{R}{2\omega L} \cdot \sin \pi \right) \right]$$

$$U_{T \max} \cong 1444 \text{ V}$$

$$\frac{d^2 U_T}{dt^2} = 0 \Rightarrow \frac{\omega \cdot \cos \omega t - \frac{R}{2L} \cdot \sin \omega t}{\frac{R}{2L} \cdot \cos \omega t} = 0$$

$$\operatorname{tg} \omega t_1 = \frac{2\omega L}{R}$$

$$\Rightarrow \omega t_1 = \operatorname{artg} \left(\frac{2\omega L}{R} \right)$$

$$t_1 = \operatorname{artg} \frac{(2\omega L / R)}{\omega}$$

$$\omega t_1 = \operatorname{artg} \left(\frac{2 \cdot 484123 \cdot 40 \cdot 10^{-6}}{10} \right)$$

$$\omega t_1 \cong 75,52^\circ \cong 1,318 \text{ rad}$$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{1,318}{484123}$$

$$t_1 \cong 2,72 \mu\text{s}$$

$$\left(\frac{dU_T}{dt} \right)_{\max} = \frac{1000}{484123 \cdot 40 \cdot 0,1 \cdot 10^{-12}} \cdot e^{-\frac{10}{2 \cdot 40} \cdot 2,72} \cdot \sin 75,52$$

$$\left(\frac{dU_T}{dt} \right)_{\max} \cong 356 \text{ V}/\mu\text{s}$$

b) (-) anahtarlama, yine seri R-L-C devresi oluşur.

Yalnız,

$$U_T = U_R + U_C = U_{RC} = U_d \cdot \left[1 - e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \left(\cos \omega t - \frac{R}{2\omega L} \sin \omega t \right) \right]$$

$$dU_T / dt = 0 \Rightarrow \omega t_1 = \operatorname{artg} \left[\frac{-\omega RC}{(2\omega^2 LC - 1)} \right] \text{ idi.}$$

$$= \operatorname{artg} \left[\frac{-484123 \cdot 10 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}{(2 \cdot 484123^2 \cdot 40 \cdot 0,1 \cdot 10^{-12} - 1)} \right]$$

$$\omega t_1 \cong -29^\circ = \pi - 29^\circ = 151^\circ \cong 2,64 \text{ rad}$$

$$\Rightarrow t_1 = \frac{2,64}{484123}$$

$$t_1 \cong 5,44 \mu\text{s}$$

$$U_{T \max} = 1000 \cdot \left[1 - e^{-\frac{10}{2 \cdot 40} \cdot 5,44} \cdot \left(\cos 151 - \frac{10}{2 \cdot 484123 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} \cdot \sin 151 \right) \right]$$

$$U_{T \max} \cong 1507 \text{ V} \text{ bulunur.}$$