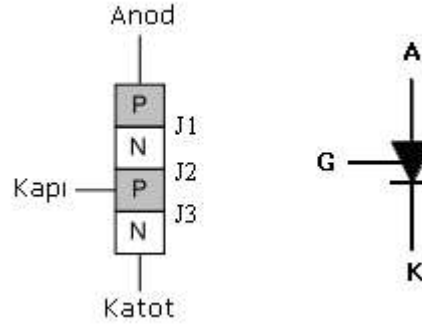


## **Bölüm 1.2 TRİSTÖRLER**

Tristör, 4 katmanlı, pnpn yapısına sahip yarıiletken anahtarlama elemanıdır. Şekil 1.2.1'te görüldüğü gibi 3 tane p-n jonksiyonuna sahiptir.



Şekil 1.2.1 Tristörün yapısı ve elektriksel sembolü

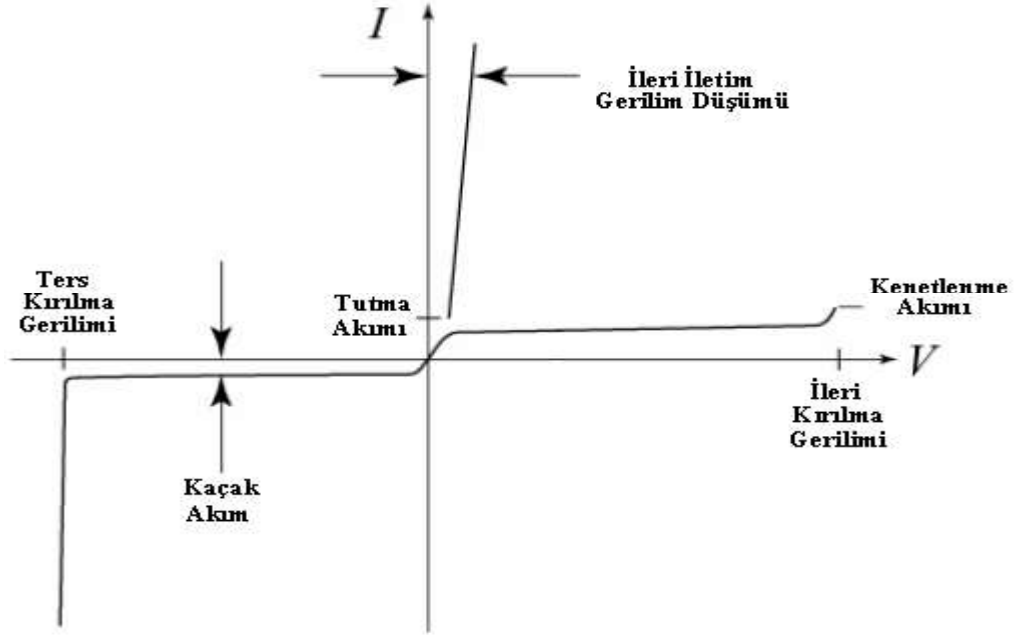
Şekil 1.2.1'den görüleceği gibi tristöre ileri yönde bir gerilim uygulandığı takdirde, J1 ve J3 jonksiyonları ileri yönde polariteli, J2 jonksiyonu ise ters yönde polariteli olacaktır. Bu durumda kapı akımı yokken tristör ileri kesim durumunda olup üzerinden akım geçirmeyecektir. Eğer tristörün anot-katot terminalleri arasına uygulanan gerilim artırılırsa bir noktadan sonra tristör iletme geçecektir. Tristörün ileri iletim durumuna geçtiği bu gerilim değerine "ileri kırılma gerilimi" denir

Tristör kapı terminaline pozitif bir akım uygulandığı zaman iletim durumuna geçer ve iletim durumundayken kapı terminalinin tristör üzerinde herhangi bir kontrol etkisi kalmaz. Tristör ancak üzerine ters polariteli bir gerilim uygulandığı takdirde susturulabilir.

Tristörün kapı terminaline pozitif akım uygulanmasıyla tristör iletme geçer dedik. Eğer bu kapı akımı, tristörün üzerinden geçen akım, belli bir değere gelene kadar uygulanmazsa tristör açılmayıp, ileri kesim durumuna geri dönebilir. Tristörün, iletime geçmesi ve iletimde kalması için gerekli olan bu minimum akıma tristörün "kenetlenme akımı" denir. Benzer şekilde tristörün, iletim durumundan kesim durumuna geçmesi için üzerinden geçen akımın belli bir değer altına düşmesi gerekir. Tristör, üzerinden geçen akım bu değer altına düşmediği sürece, üzerinde negatif bir gerilim olsa bile iletim durumunu koruyacaktır. Sözü edilen bu akıma tristörün "tutma akımı" denir. Tutma akımının değeri, kenetlenme akımından daha düşük bir değerdir.

Tristörler de diyotlar gibi anot-katot terminalleri arasına negatif gerilim uygulandığı takdirde iletim göstermezler, sadece ters yönde bir kaçak akım gözlenir. Ancak bu ters yöndeki gerilim belli değer üzerinde olursa tristör ters yönde iletime geçer. Tristörün ters yönde iletime geçtiği bu değer "ters kırılma gerilimi" değeridir. Tristör ters yönde kırılmaya uğradığı takdirde bozulur ve yenisiyle değiştirilmesi gerekir.

Tristörün, yukarıda belirtilen tüm durumları şekil 1.2.2' de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 1.2.2

Tristörleri ilettime sokma şartları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

\* *Kapı Terminaline Akım Uygulayarak:*

Tristörü asıl olarak ilettime sokma yöntemidir. Kapı'ya uygulanan akım arttıkça tristörün üzerindeki gerilim de düşer ve üzerinden geçen akım artar yani tristör ilettime geçer. Ayrıca bir tristör, daha yüksek kapı akımı uygulanarak, daha düşük anot-katot gerilimlerinde ilettime sokulabilir.

\* *Anot-Katot Arasına Yüksek Gerilim Uygulayarak:*

Yukarıda da belirtildiği gibi, anot katot terminalleri arasına, ileri kırılma eşik geriliminden daha yüksek bir gerilim değeri uygulanırsa, tristör ileri yönde ilettime geçer. Ancak bu tercih edilen bir yöntem değildir. Tristörü bu şekilde ilettime sokmak zararlı olabilir.

\* *dv/dt ile:*

Eğer bir tristöre çok hızlı yükselen bir gerilim uygulanırsa tristör ilettime geçebilir. Bu da tercih edilen bir yöntem değildir.

\* *Işık ile:*

Bir tristörün jonksiyonuna fotonlar çarparsa, bu jonksiyondaki delik- elektron çiftleri artarak tristörü ilettime sokabilir. Bu kullanım için özel olarak üretilen ışıkla aktif edilebilen tristörler mevcuttur.

\* *Isı ile:*

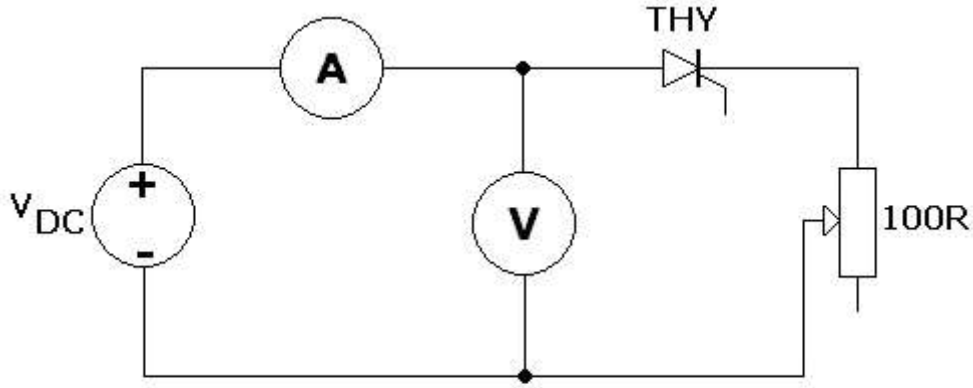
Işık etkisinde olduğu gibi ısı etkisi de delik-elektron çifti sayısını artırarak tristörü ilettime sokabilir.

**DENEY ADI: TRİSTÖRÜN İNCELENMESİ**  
**DENEY 1.2.1 TRİSTÖR KARAKTERİSTİĞİNİN ÇIKARILMASI**

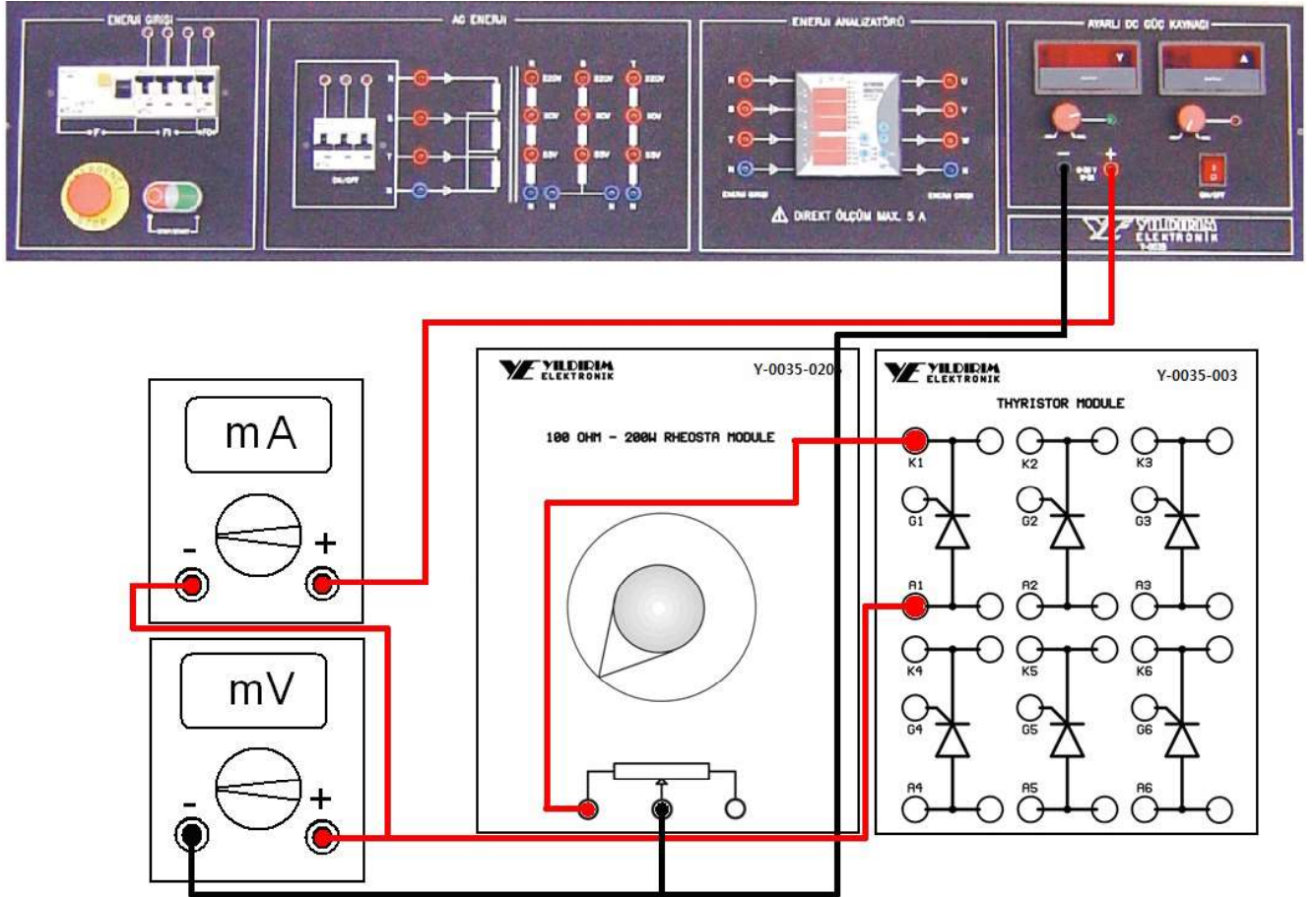
**Tristör (Silikon Kontrollü Doğrultucu-SCR) Testleri**

**1.2.1.1. İleri Bloklama Testi**

Y-0030-003 THYRISTOR MODULE modülünü yerine takınız. Devre bağlantılarını şekildeki gibi yapınız.



Şekil 1.2.3



Şekil 1.2.4

## DENEYİN YAPILIŞI:

- 1- DC Ayarlı güç kaynağını min. konuma getiriniz. Yukarıdaki devreyi kurduktan sonra enerji veriniz.
- 2- Gerilimi 0-30 V aralığında değiştiriniz ve tabloyu doldurunuz.

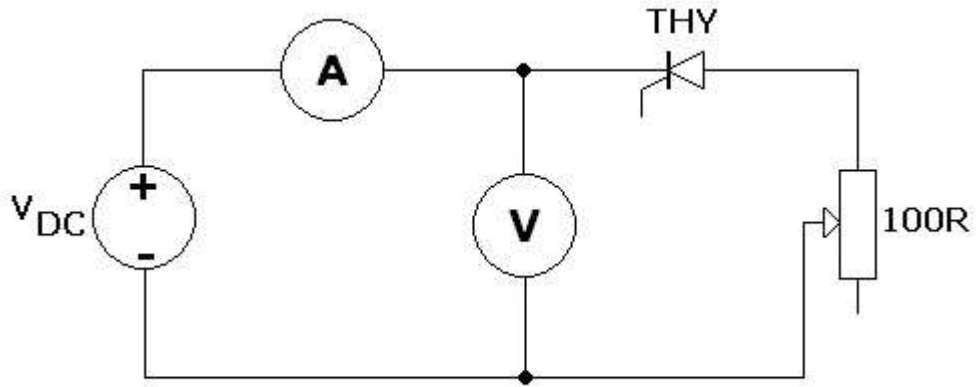
Tristör Gerilimi (VDC)	Tristör Akımı (I Thy)	Tristör üzerinde düşen gerilim (E Thy)
0		
5		
10		
15		
20		
25		
30		

Şekil 1.2.5

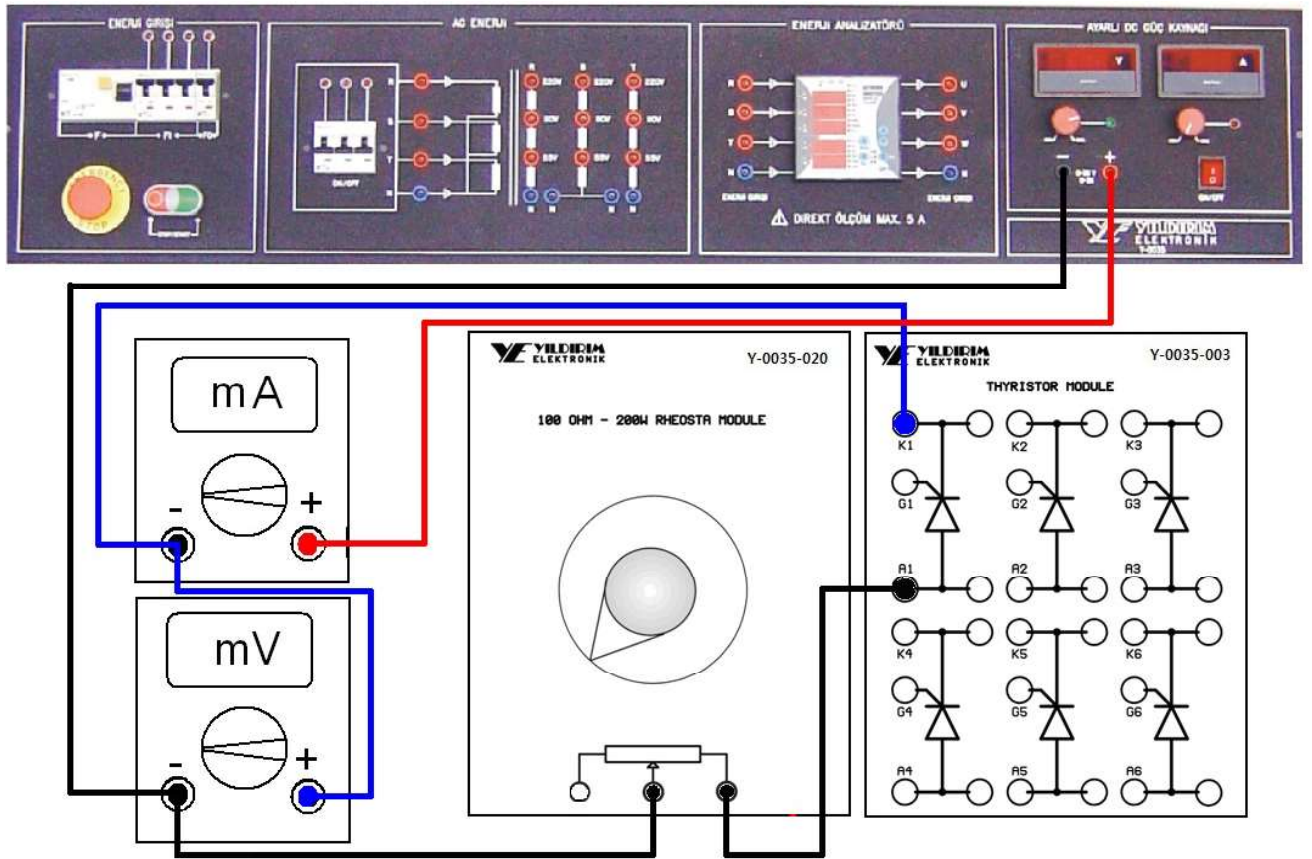
- 3- Sonuç olarak;

Tristör kapısına herhangi bir gerilim uygulamadığımız sürece iletme geçmez. Yalıtımda kalır.

### 1.2.1.2 Geri Bloklama Testi



Şekil 1.2.6



Şekil 1.2.7

## DENEYİN YAPILIŞI:

- 1- DC Ayarlı güç kaynağını min. konuma getiriniz. Yukarıdaki devreyi kurduktan sonra enerji veriniz.
- 2- Gerilimi 0-30 V aralığında değiştiriniz ve tabloyu doldurunuz.

Tristör Gerilimi (VDC)	Tristör Akımı (I Thy)	Tristör üzerinde düşen gerilim (E Thy)
0		
5		
10		
15		
20		
25		
30		

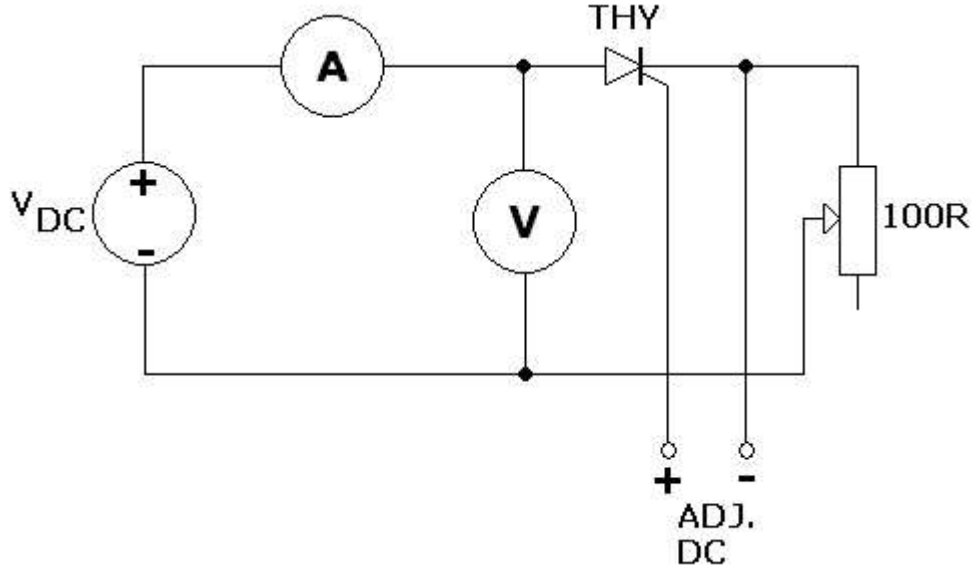
Şekil 1.2.8

- 3- Sonuç olarak;

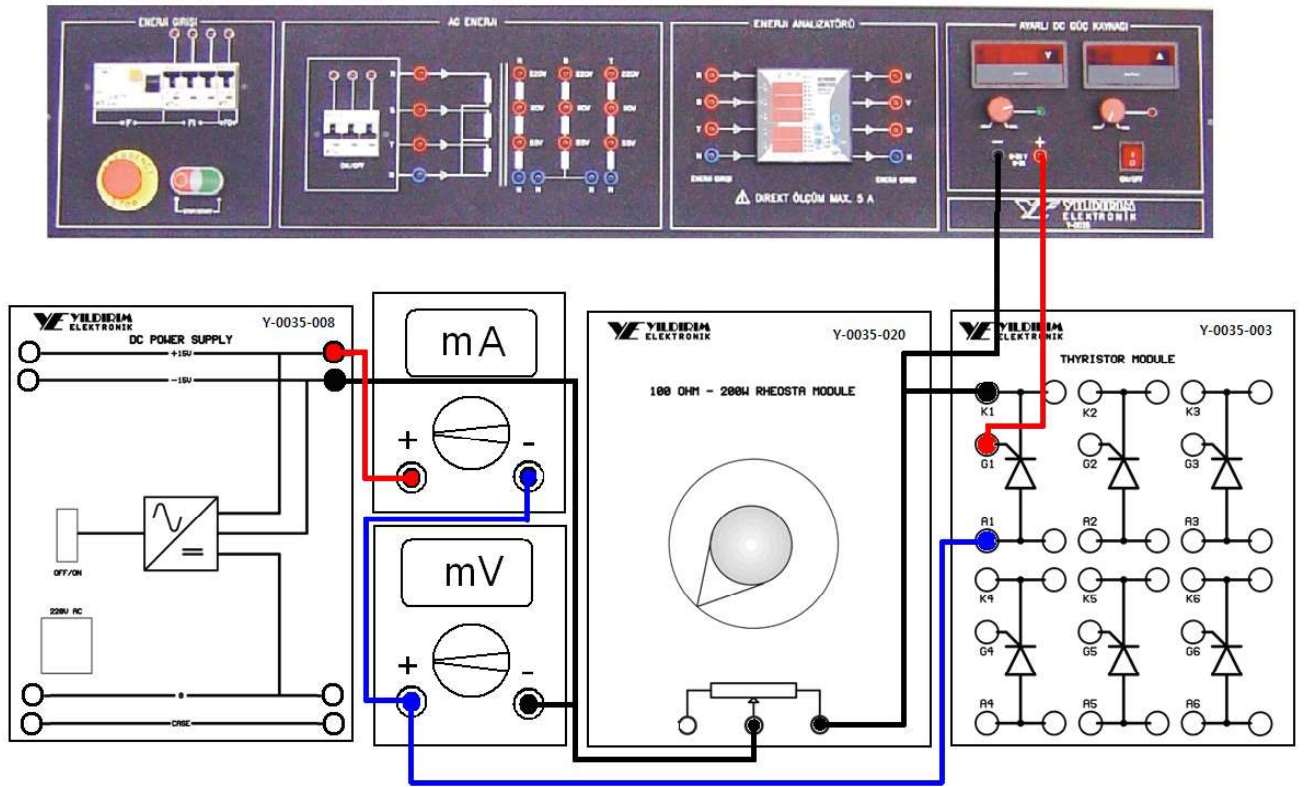
Tristör kapısına herhangi bir gerilim uygulamadığımız sürece ilettime geçmez. Yalıtımda kalır.

### 1.2.1.3 Tristör'ün İleri Kırılma Gerilimi

Devreyi şekildeki gibi kurunuz.



Şekil 1.2.9



Şekil 1.2.10

Tristörün kapı terminalini, gösterildiği şekilde bağlayın. Şekilde görülen tristörün kapı sürücü devresindeki potansiyometreyi maksimum dirence ayarlayınız. Devrede görülen kaynağı 15V değerine ayarlayınız. Osiloskop bağlantılarını da yaptıktan sonra devreyi çalıştırın ve devreden geçen sıfır akımı gözlemleyin. Daha sonra kapı sürücü devresindeki potansiyometreyi yavaş yavaş azaltarak, kapı akımını artırın. Bu arada tristör üzerindeki gerilimi gözlemleyin. Tristör kesimde iken girişteki gerilim tristörün anot-katot uçları arasında gözlenecektir.

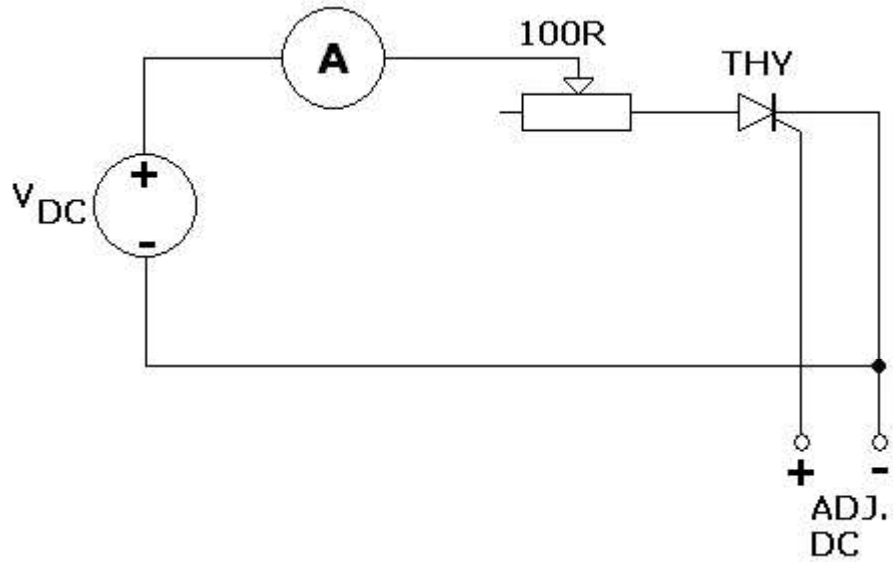
Tristör ilettime geçtiği zaman ise, uygulanan gerilim yüke aktarılacak ve tristörün üzerinde ileri iletim voltajı gözlenecektir. Tristörü bu koşullarda ilettime geçiren kapı akımı maksimum kapı akımıdır. Tristör bundan daha düşük kapı akımlarıyla da ilettime sokulabilir. Şimdi kapı akımını tipik bir değere ayarlayarak, osiloskobun Y1 kanalından tristörün ilettime geçtiği anı gözlemleyiniz. Bu andaki kapı akımını ( $I_g$ ) ve giriş gerilimini not ediniz. Tristörün bu sabit kapı akımı altında ilettime geçtiği giriş gerilimi, tristörün o andaki kapı akımına karşılık gelen ileri kırılma gerilimi ( $V_{BO}$ ) denir. Farklı kapı akımları için ileri kırılma gerilimi değerlerini ölçerek not ediniz.  $I_g$ -  $V_{BO}$  değişiminin grafiğini çiziniz.

$V_{BO}$	$I_g$

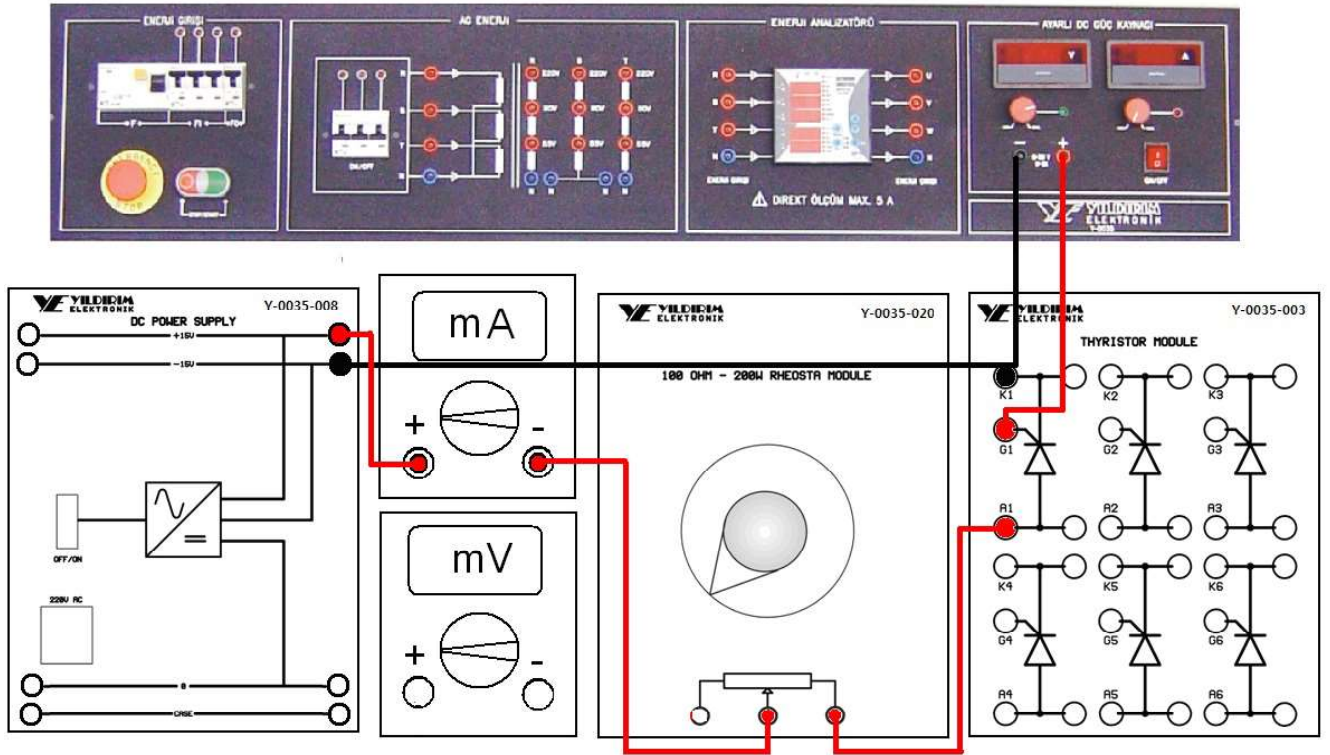
Şekil 1.2.11



### 1.2.1.4 İleri İletim Testi



Şekil 1.2.12



Şekil 1.2.13

Deney 1.2.1.3'teki devre üzerinde elde ettiğiniz tecrübeye göre, kapı akımını tipik bir değere ayarlayarak farklı giriş gerilimlerine göre elde ettiğiniz tristör akım ve gerilimlerini not ediniz. Değerleri tablo haline getirerek tristör akımının tristör voltajına göre değişimini çiziniz.

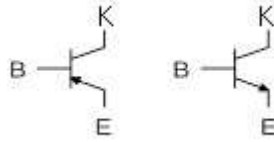
Tristörün üzerinden geçen akımı 200mA seviyesine ayarlayınız. Yük olarak kullanılan Reosta ile ayarlayarak akımı yavaş yavaş arttırınız.

Tristörün ileri iletim durumunda ileri bloklama durumuna geçtiği andaki akımı not ediniz. Bu akıma tristörün tutma akımı denir.

## Bölüm 1.3 Güç BJT'leri ve Güç MOSFET'leri

### GÜÇ BJT'LERİ (Bipolar Jonksiyon Transistör)

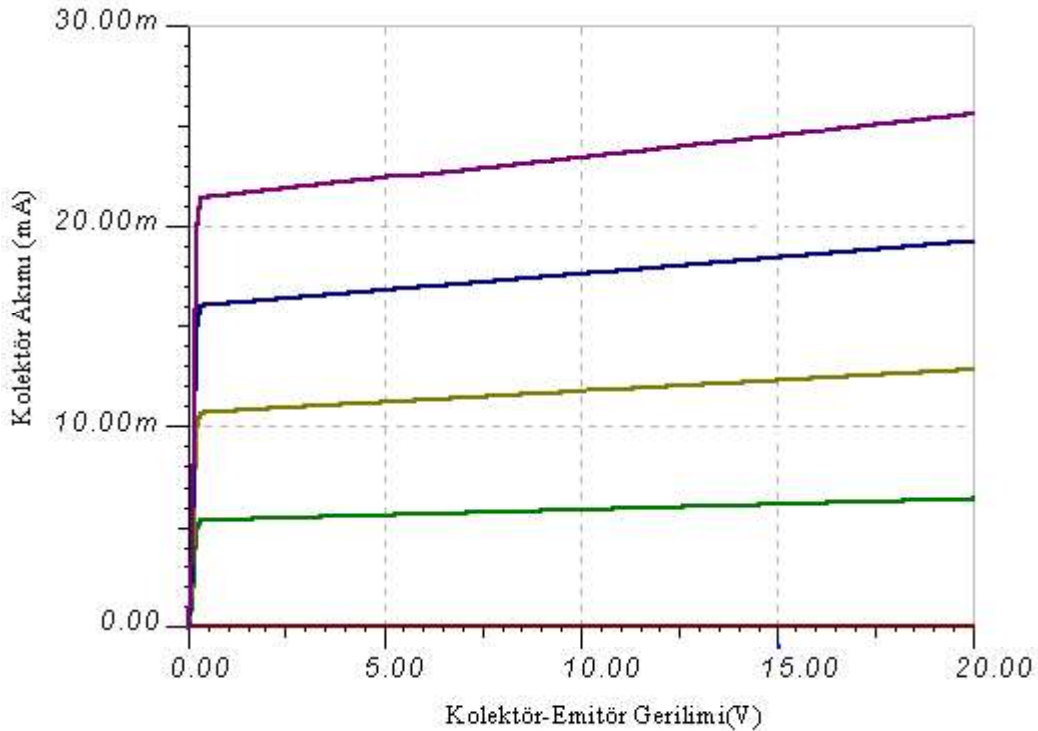
BJT'ler yapısal olarak diyoda benzeyen, iki tane p katkılı katman arasına bir n katkılı katman (pnp) konarak ya da iki tane n katkılı katman arasına, p katkılı bir katman (npn) konarak üretilmiş 2 tane pn jonksiyonuna sahip transistörlerdir. Elemanların sembolleri şekil 1.3.1' de gösterilmiştir.



Şekil 1.3.1

BJT' nin üç terminali vardır. Bunlar beyz, emitör ve kolektör (base, emittor, collector) olarak adlandırılır. Akım kontrollü bir eleman olan BJT transistörleri, beyzine verilen akımla iletim durumuna geçerler ve bu durumda kalmaları için sürekli olarak beyz akımına ihtiyaç duyarlar. Bu durumda BJT transistörlerinin çıkış karakteristiği belirli bir beyz akımı için, kolektör-emitör gerilimine karşı kolektör akımının değişimidir.

Bu değişim şekil 1.3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 1.3.2

BJTlerin, beyz ve emitörleri arasında bir pn jonksiyonu vardır. Bu sebeple diyotlarda olduğu gibi burada da, transistör iletimdeyken 0.7V civarında bir gerilim düşümü mevcuttur ve bu gerilimin altındaki beyz gerilimlerinde transistör kesim

durumunda kalacaktır. Ayrıca iletim durumundayken, üzerlerinde olan gerilim düşümü oldukça düşüktür. Bu nedenle iletim durumundaki güç kayıpları da azdır. Ama azınlık akım taşıyıcısı özelliklerinden dolayı, açılma kapanma süreleri yüksek olabilir.

BJTler beyzine akım uygulanmadığı takdirde kesim durumunda olurlar ve bu durumda transistörün zarar görmeden taşıyabileceği maksimum kolektör-emitör gerilimi vardır. Buna kırılma gerilimi denir.

Ayrıca, azınlık akım taşıyıcılarına sahip elemanlara özgü olan negatif sıcaklık katsayısı sebebiyle BJT'lerin ikinci kırılma noktaları da vardır ki bu tip bozulmalar BJTler de birincil kırılmalara göre daha fazla gözlemlenir.

BJTlerin çalışması 3 ayrı bölgede incelenebilir. Kesim bölgesinde, sıfır ya da yetersiz beyz akımından dolayı transistör açılmaz ve kolektör akımı akmaz. Doğrusal bölge ise genelde yükselteçlerde kullanılan bölgedir ve gerilim-akım ilişkisi doğrusaldır. Son bölge ise doyum bölgesidir. Bu noktada belirli bir beyz akımı için transistörün üzerinden geçebilecek maksimum akım geçmektedir ve kolektör-emitör geriliminin artması kolektör akımını çok fazla değiştirmeyecektir.

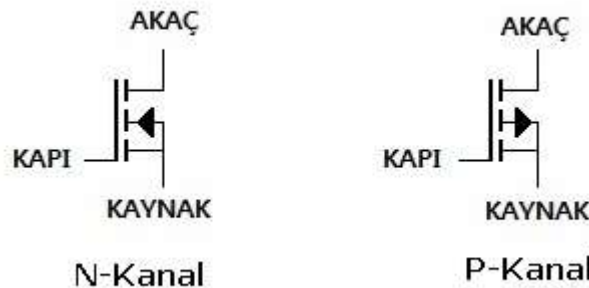
Yukarıda da söylediğimiz gibi, genel olarak BJTlerin doğrusal bölgesi yükselteç, kesim ve doyum bölgeleri ise anahtarlama uygulamalarında kullanılır.

### **GÜÇ MOSFET'LERİ (Metal-Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör)**

Güç MOSFETleri, ortaya çıkmalarıyla birlikte pek çok uygulamada BJT'lere göre tercih edilir olmuşlardır. BJT'lere göre daha yüksek, gerilim düşümüne sahip olmalarına rağmen azınlık taşıyıcıları olmadığı için daha yüksek anahtarlama frekanslarında kullanılabilirler ve toplamda daha düşük kayıplara sahiptirler.

MOSFETler kapı, akaç ve kaynak olmak üzere 3 terminale sahiptirler. Kapı terminali anahtarın diğer kısımlarından silikon dioksit bir tabakayla yalıtılmıştır. Bu sebeple kapı terminalinden MOSFET'e azınlık taşıyıcısı akımı olmaz. Bu da MOSFETlerde, BJTlerde olan ikincil kırılma geriliminin olmaması demektir. Ayrıca azınlık taşıyıcılarının da kanaldan dışarı atılmasını gerektiren kesim dönüşümü de bu sebepten dolayı yoktur ve bu da MOSFETlerin açılma-kapanma sürelerine yansır. MOSFETlerin daha hızlı uygulamalarda kullanılabilmelerinin sebebi budur.

Aşağıdaki şekilde n-kanallı ve p-kanallı MOSFETlerin sembolleri gösterilmiştir.



Şekil 1.3.3

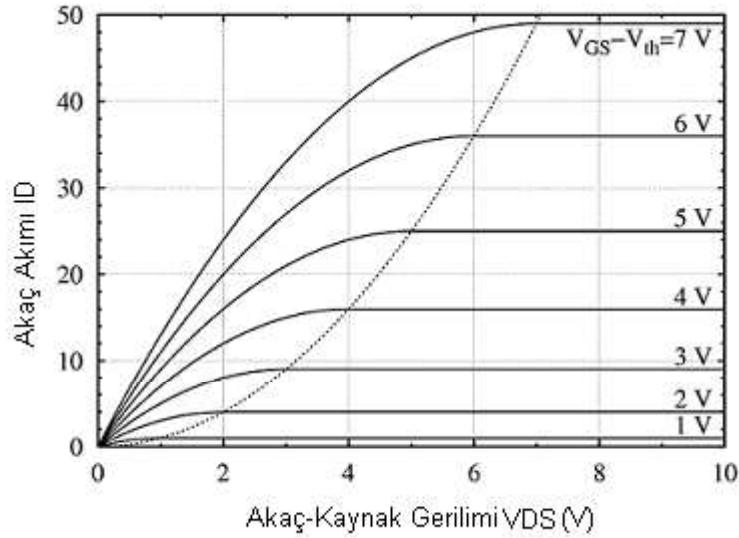
Gerilim kontrollü bir anahtarlama elemanı olan MOSFET, kanal ayarlamalı ve kanal oluşturmali olarak iki çeşittir. Genel olarak kanal oluşturmali (Enhancement type) MOSFET tipi yaygın olarak kullanılır. MOSFET'i iletme sokmak için kapı-kaynak

arasına gerilim uygulamak gerekir. Bu gerilim, eğer MOSFET n-kanallı ise pozitif, p-kanallı ise negatif olacaktır.

Bu gerilim uygulandığı takdirde, akaç-kaynak arasında, voltaj uygulandığında üzerinden akım geçebilecek bir kanal oluşur. Kapı-kaynak gerilimi ne kadar büyükse MOSFET'in üzerinden o kadar büyük bir akım geçebilir.

Bu durumda MOSFET'in çıkış karakteristiği belirli bir kapı-kaynak voltajı için, akaç akımının, akaç-kaynak gerilimine göre değişimidir.

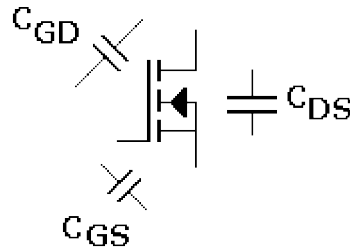
Bu değişim şekil 1.3.4' te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.3.4

Kapı-kaynak arasına uygulanan gerilimle iletme geçen MOSFETlerde bu gerilimin belli bir değerine kadar iletim olmaz. Yani MOSFET belirli bir kapı-kaynak gerilim değerine kadar açılmaz. Bu değere MOSFET'in eşik gerilim değeri denir ve üretici bilgi sayfalarında  $V_{th}$  olarak gösterilir.

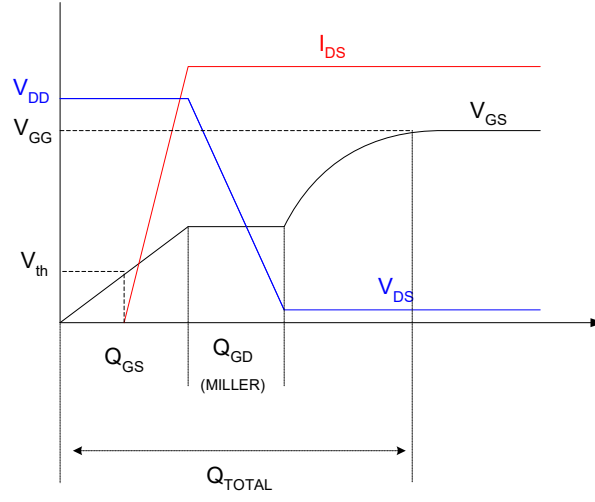
MOSFETteki en önemli özelliklerden biri, MOSFET'in fiziksel yapısından kaynaklanan, terminalleri arasındaki kapasitörleridir. MOSFET aslında şekil 1.3.5' deki gösterimiyle modellenir.



Şekil 1.3.5

Bu kapasitörler, MOSFET'in anahtarlama karakteristiği için oldukça büyük önem taşır. Çünkü transistörün açılma, kapanma süreleri bu kapasitörlerle ilişkilidir ve dolayısıyla yüksek anahtarlama frekanslarındaki kayıplar da doğrudan buna bağlanmaktadır. Bu kapasitör etkilerinden en önemlisi, kapı-akaç arasında gözlemlenen ve "Miller" kapasitansı olarak adlandırılan etkidir. Miller kapasitansı, giriş ile çıkış arasında olduğu için, transistörün yükselteç kazancıyla da katlanır ve etkisi diğerlerine göre daha belirgindir.

Bu durum MOSFET'in anahtarlama karakteristikleriyle birlikte şekil 1.3.6'da gösterilmiştir.

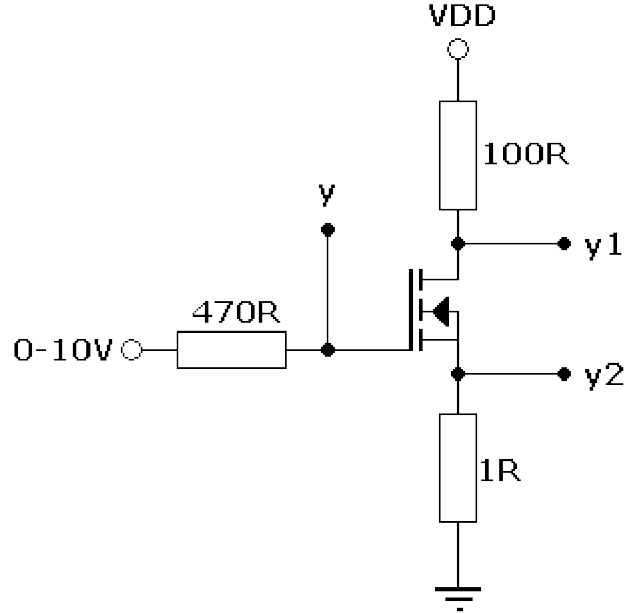


Şekil 1.3.6

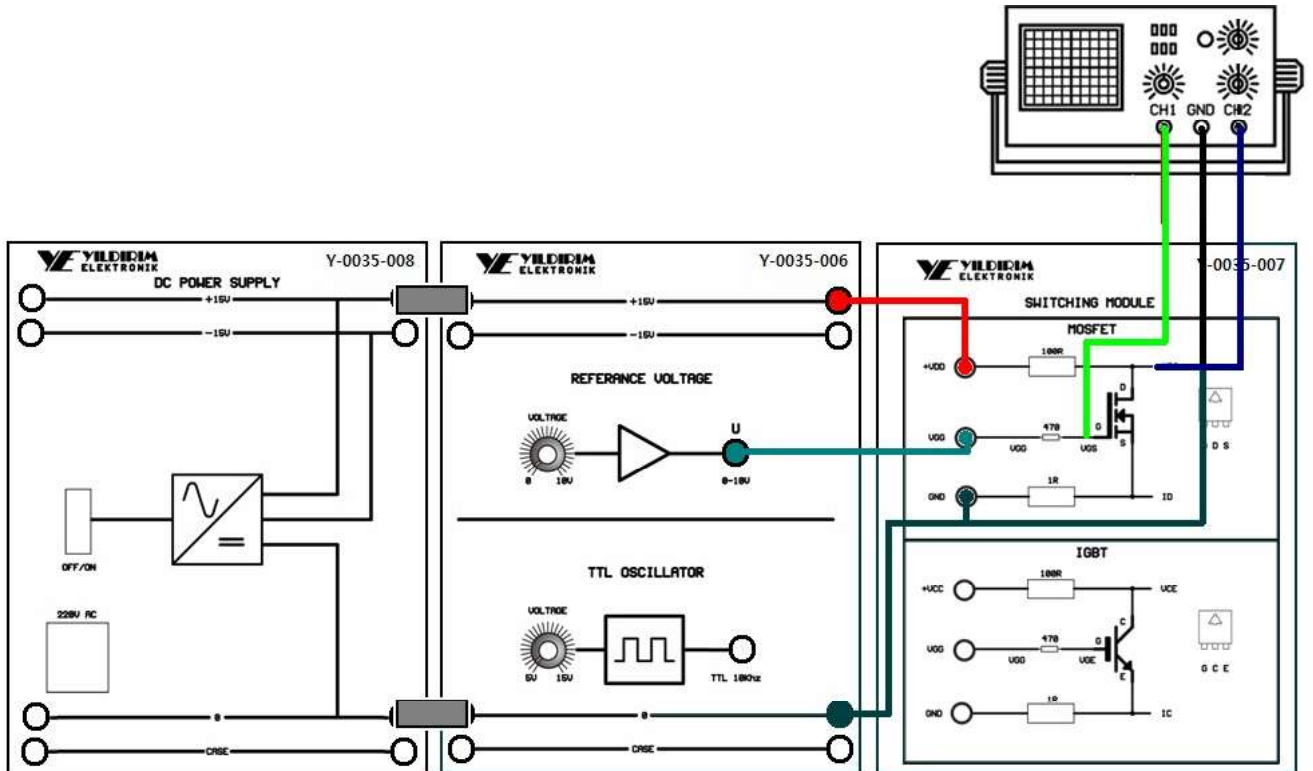
## DENEY NO 1.3.1 DENEY ADI: MOSFET DENEYLERİ

### 1.3.1.1 MOSFET Açılma Testi

Devreyi şekil 1.3.7'deki gibi kurunuz.



Şekil 1.3.7



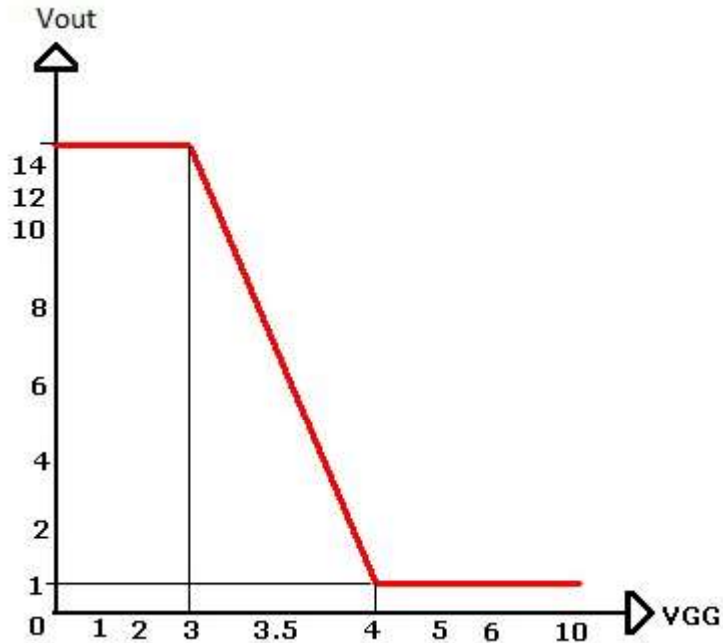
Şekil 1.3.8

## DENEYİN YAPILIŞI:

- 1- Gerekli bağlantıları yaptıktan sonra devreye gerilim veriniz.
- 2- Gate gerilimine yavaş yavaş artırarak osiloskoptan çıkış gerilimini izleyiniz. Bu anda çıkış gerilimi besleme gerilimi olan 15V civarında olmalıdır.
- 3- Gate gerilimi 3V civarına gelince çıkış gerilimi yavaşça azalmaya başlayacaktır. Bu andaki gate gerilimini kaydediniz. (Mosfet ilettime geçmeye başlamıştır.)
- 4- Gate gerilimini artırmaya devam ediniz. Çıkış gerilimi kısa bir süre sonra en az seviyesine inecek ve artık düşmeyecektir. (Mosfet iletindedir.) Bu voltaj değeri 4.3V civarındadır.
- 5- Gate gerilimine göre çıkış grafiğini çiziniz.

VGG	V <sub>çıkış</sub>
0V	15V
1V	15V
2V	15V
3V	15V
<b>3.3V</b>	<b>14V</b>
<b>3.6V</b>	<b>12V</b>
<b>3.8V</b>	<b>10V</b>
<b>4V</b>	<b>5V</b>
<b>4.1V</b>	<b>2V</b>
4.2V	1V
4.3V	1V
5V	1V
8V	1V
10V	1V

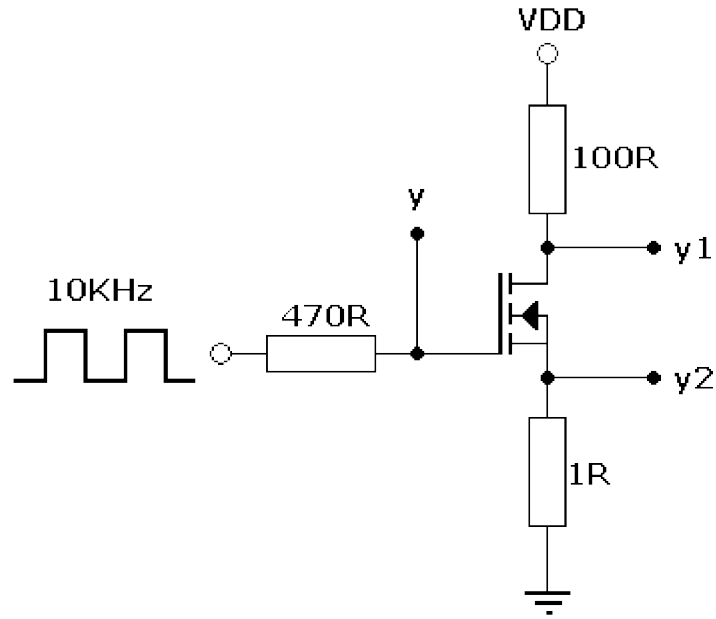
Şekil 1.3.9



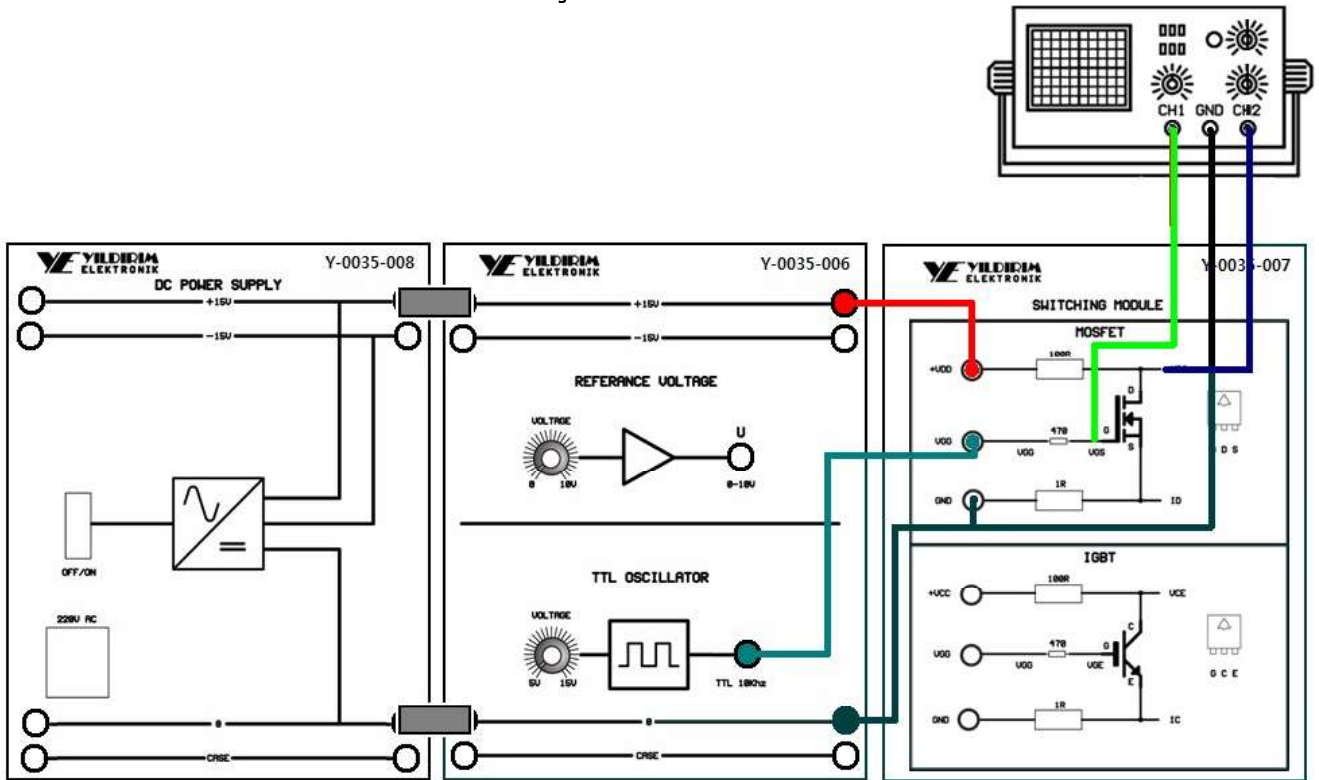
Şekil 1.3.10

### 1.3.1.2 MOSFET Anahtarlama Testi

Devreyi şekil 1.3.11'deki gibi kurunuz.



Şekil 1.3.11



Şekil 1.3.12



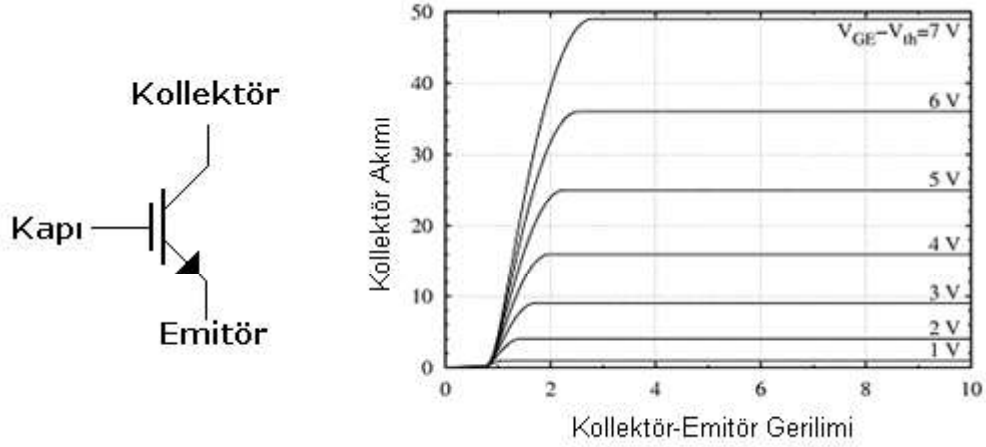
## DENEYİN YAPILIŞI:

- 1- GiriŐe 10V tepe değerine sahip, 10kHz'lik kare dalga uygulayarak,  $V_{GS}$  kapı kaynak gerilimini(Y1), ve  $V_{DS}$  akaç-kaynak gerilimini(Y2) osiloskopta gözlemleyerek çiziniz. Y2 kanalından gördüğünüz akaç-kaynak gerilimi gerçek akaç-kaynak gerilimi midir? Osiloskobun ölçüm problemlerinden birini Y ile gösterilen noktaya takarak, akaç akımını gözlemleyiniz ve çiziniz. Uyguladığınız kare dalganın tepe değerini 10V'den yavaş yavaş düşürerek, bir önceki aşamada ölçüm aldığınız dalga şekillerini gözlemleyiniz. Ne gibi değişiklikler gözlemliyorsunuz? Gerilimi düşürmeye devam ediniz ve MOSFET'in açılması için gerekli olan eşik gerilimi( $V_{th}$ ) değerini tespit ederek, not alınız.

## IGBT'LER

IGBT'ler, güç MOSFETleri ve BJT'lerinin bazı avantajlarını üzerinde toplayan bir anahtarlama elemanıdır. MOSFET'e benzer olarak, yüksek bir kapı empedansı vardır ve bu da anahtarlama kolaylığı sağlar. IGBTlerin, BJTler gibi, iletim gerilim düşümleri oldukça küçük, ileri kırılma gerilimleri de oldukça büyüktür. Kapıdan kanal içerisine azınlık taşıyıcıları injeksiyonu olmadığından BJT'ler gibi ikincil kırılma gerilimi problemleri de yoktur. BJTlerden daha yüksek anahtarlama frekansları vardır ama MOSFET kadar yüksek hızlara ulaşamazlar. Yine de anahtarlama karakteristikleri hemen hemen MOSFETle aynıdır.

IGBT'lerin 3 adet terminali vardır ve bunlar kapı, emitör ve kolektör olarak adlandırılır. Çıkış karakteristiği ise belirli bir kapı-emitör gerilimi için, kolektör akımının kolektör-emitör gerilimine göre değişimidir. IGBT'nin sembolü ve çıkış karakteristiği şekil 1.3.13'te gösterilmiştir.

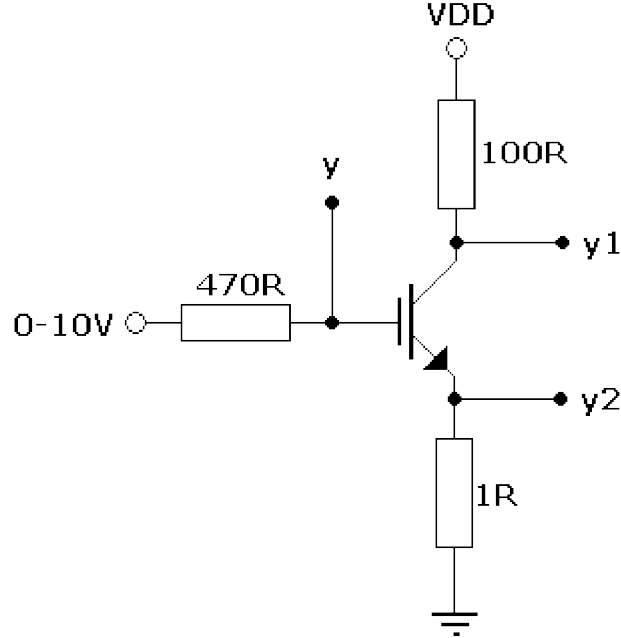


Şekil 1.3.13

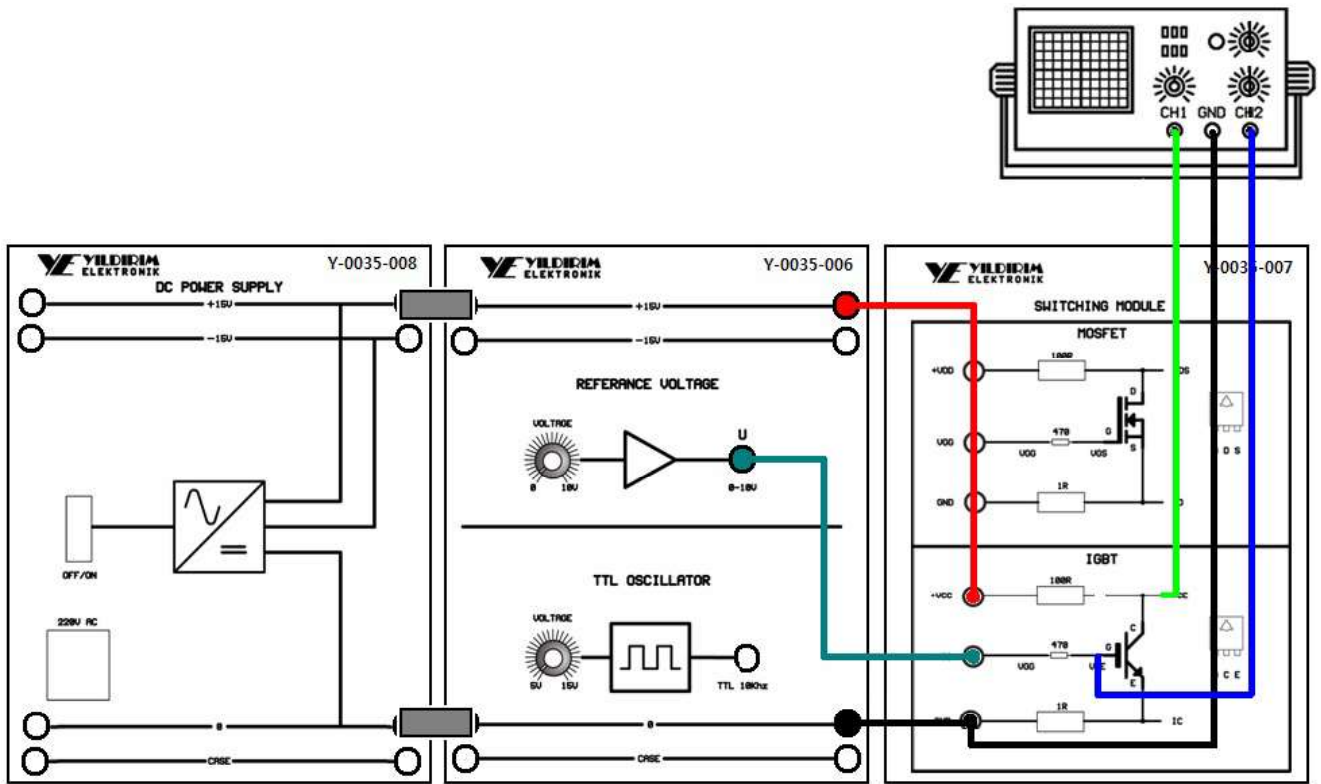
**DENEY NO: 1.3.2**  
**DENEY ADI: IGBT DENEYLERİ**

**1.3.2.1 IGBT Açılma Testi:**

Şekil 1.3.14' deki devreyi kurunuz



Şekil 1.3.14



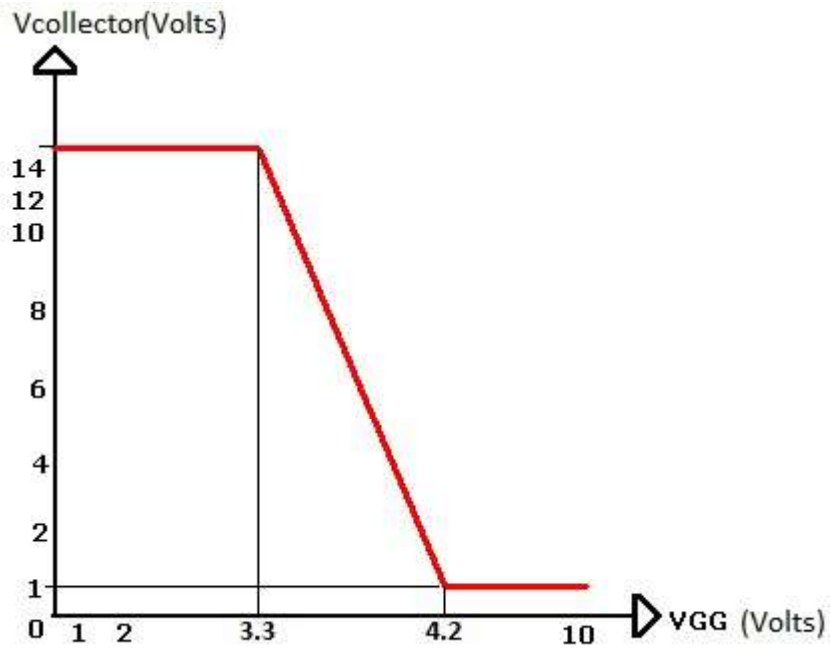
Şekil 1.3.15

## DENEYİN YAPILIŞI:

- 1- Gerekli bağlantıları yaptıktan sonra devreye gerilim veriniz.
- 2- Gate gerilimine yavaş yavaş artırarak osiloskoptan çıkış gerilimini izleyiniz. Bu anda çıkış gerilimi besleme gerilimi olan 15V civarında olmalıdır.
- 3- Gate gerilimi 5V civarına gelince çıkış gerilimi yavaşça azalmaya başlayacaktır. Bu andaki gate gerilimini kaydediniz. (IGBT iletme geçmeye başlamıştır.)
- 4- Gate gerilimini artırmaya devam ediniz. Çıkış gerilimi kısa bir süre sonra en az seviyesine inecek ve artık düşmeyecektir. (IGBT iletimdedir.)  
Bu voltaj değeri 7V civarındadır.
- 5- Gate gerilimine göre çıkış grafiğini çiziniz.

VGG	V <sub>Cıkış</sub>
0V	15V
1V	15V
2V	15V
3V	15V
<b>3.3V</b>	<b>14V</b>
<b>3.6V</b>	<b>12V</b>
<b>3.8V</b>	<b>10V</b>
<b>4V</b>	<b>5V</b>
<b>4.1V</b>	<b>2V</b>
4.2V	1V
4.3V	1V
5V	1V
8V	1V
10V	1V

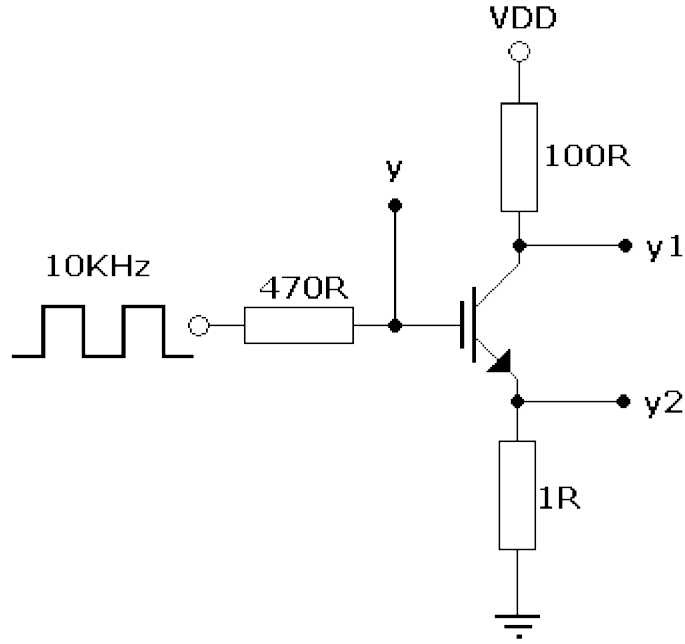
Şekil 1.3.16



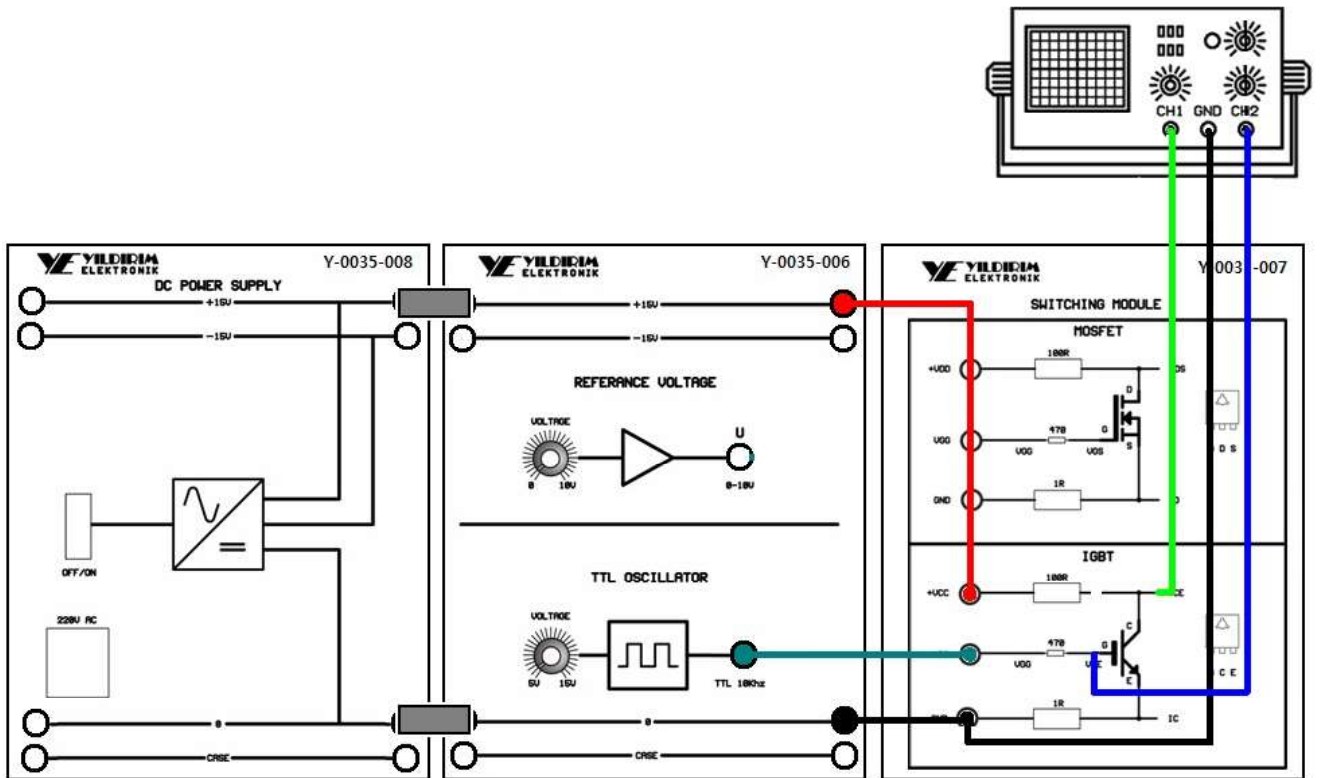
Şekil 1.3.17

### 1.3.2.2 IGBT Anahtarlama Testi

Şekildeki devreyi kurunuz.



Şekil 1.3.18



Şekil 1.3.19

Aynı şekilde  $V_{GE}$  kapı-emitör,  $V_{CE}$  kolektör-emitör gerilimlerinin ve  $I_C$  kolektör akımının dalga şekillerini gözlemleyerek çiziniz. IGBT'nin iletim eşik değerini de bir önceki deneydeki gibi tespit ediniz.

## BÖLÜM 2

### DİYOTLU DOĞRULTUCULAR

#### A. DENEYİN AMACI:

Tek faz ve 3 faz diyotlu doğrultucuların çalışmasını ve davranışlarını incelemek. Bu deneyde tek faz ve 3 faz olmak üzere tüm yarım ve tam dalga doğrultucuları, omik ve indüktif yükler altında incelenecektir.

#### B. Teori: *Diyotlu Doğrultucular*

##### GİRİŞ

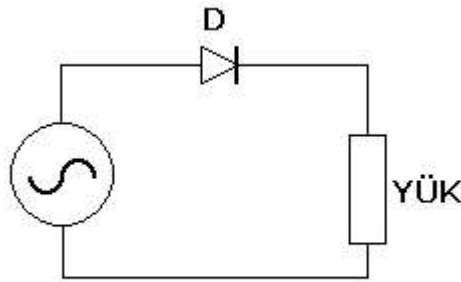
Pek çok güç elektroniği uygulamasında, giriş gücü şebekeden alınan 50-60 Hz'lik AC güç şeklindedir ve uygulamada DC'ye çevrilir. Endüstride kontrollü gerilim ya da güç aktarımı gerekmeyen uygulamalarda maliyet açısından genel eğilim diyotlu doğrultucular kullanmak yönündedir. Diyotlu doğrultucularda güç akışı, şebekeden yüke doğru olup sadece tek yönlüdür. DC güç kaynağı, AC motor sürücüleri ve daha pek çok alanda diyotlu doğrultucular tercih edilmektedir.

Diyotlu doğrultucular, gerilimi şebekeden doğrulttukları için üzerlerinde, doğrultucunun türüne göre şebekenin harmoniklerinin frekansında gerilim salınımları olur. Bunları azaltmak için çıkışa yükten önce bir kapasitör eklenir. Kapasitör ne kadar büyük olursa çıkış gerilimindeki salınımlar da o kadar az olacaktır. Diyotlu doğrultucuların kötü özelliklerinden bir tanesi ise şebekeden oldukça yüksek distorsiyonlu akım çekmeleridir. Bu da harmonik standartlarıyla sınırlandırıldığı için her durumda diyotlu doğrultucular kullanılamayabilir. Bunların yerine kontrollü doğrultucular kullanılarak çeşitli denetim stratejileriyle birlikte akım sinüse benzetilir.

Diyotlu doğrultucuları, tek faz, üç faz ve yarım dalga doğrultucu, tam dalga doğrultucu şeklinde sınıflandırabiliriz. Şimdi bunları inceleyelim.

#### **Tek Faz Yarım Dalga Doğrultucu:**

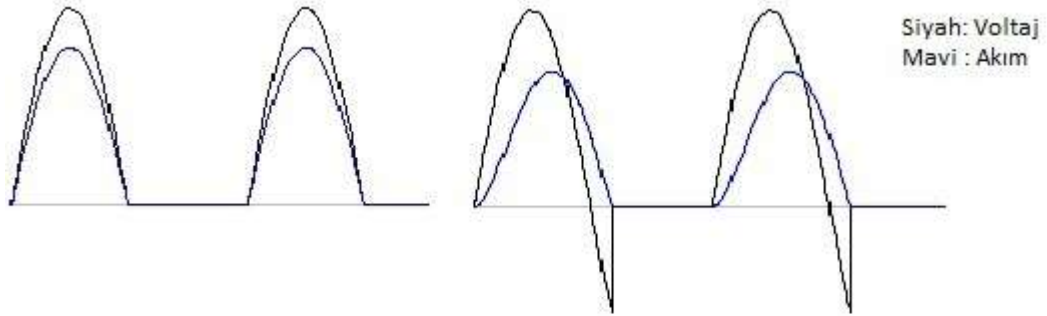
Tek faz yarım dalga doğrultucular pek kullanılsalar da, doğrultucu çalışmasının anlaşılması açısından iyi bir örnek teşkil ederler. Şekil 2.1'de tek fazlı bir yarım dalga doğrultucu görülmektedir.



Şekil 2.1 Tek faz, yarım dalga doğrultucu

Yarım dalga doğrultucu, diyotun üzerine gelen negatif gerilimi iletmemesinden dolayı, sinüs şeklindeki gerilimin sadece pozitif kısmını doğrultacaktır.

Yük omik, ya da indüktif olabilir. Eğer yük omik bir yük ise, diyot sadece pozitif evreyi doğrultur ve kesim durumuna geçer, ancak yük indüktif bir yük ise, yük akımı, gerilim sıfıra düştükten sonra, bir süre daha pozitif yönde akmaya devam edeceği için diyot hemen kesime geçemez ve üzerindeki akım sıfıra düşene kadar negatif gerilimi iletir. Bütün bu durumlar aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Omik ve indüktif yük ile gerilim-akım ilişkisi

Gerilimin negatife düştüğü durumları engellemek için indüktif yüklü uygulamalarda çıkışa, boшта çalışma diyodu(FWD) bağlanır. Bu, yüke ters paralel olarak bağlanan standart bir diyottur ve gerilim negatife düşme eğilimi gösterdiği zaman ilettime geçerek, şebeke diyodunun üzerindeki akımı kendi üzerine alır. Böylece yük akımı boшта çalışma diyodu üzerinden akmaya devam eder ve yük üzerinde sadece oldukça küçük olan diyodun negatif gerilimi gözlenir.

Çıkışta gözlenen gerilimin tepe değeri, diyot üzerindeki gerilim düşümü ihmal edilirse yaklaşık olarak giriş işaretininkiyile aynıdır. Bu dalga şeklinin ortalama ve etkin değerleri integral alınarak hesaplanabilir. Aşağıda yarım dalga doğrultucunun çıkış geriliminin ortalama ve etkin değerleri ve nasıl hesaplandığı verilmiştir.

$$V(t) = V_M \sin(\omega t)$$

$$V_{ORT} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \rightarrow V_{ORT} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_M \sin(\omega t) d(\omega t) \rightarrow V_{ORT} = \frac{V_M}{2\pi} (-\cos \omega t)_0^\pi$$

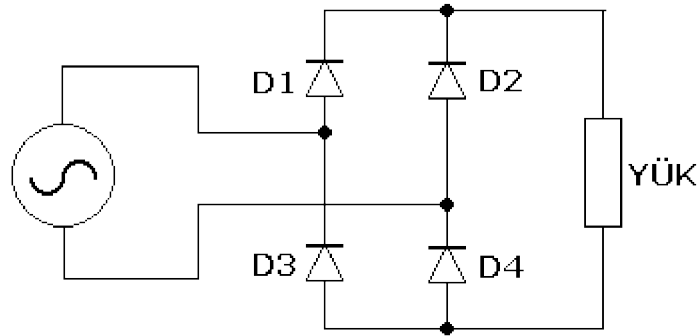
$$V_{ORT} = \frac{V_M}{2\pi} [-\cos \pi - (-\cos 0)] \rightarrow V_{ORT} = \frac{V_M}{2\pi} [2] \rightarrow V_{ORT} = \frac{V_M}{\pi}$$

$$V_{ORT} = \frac{V_M}{\pi} \quad I_{ORT} = \frac{I_M}{\pi}$$

$$V_{RMS} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt \right]^{0.5} \quad V_{RMS} = \frac{V_M}{2} \quad I_{RMS} = \frac{I_M}{2}$$

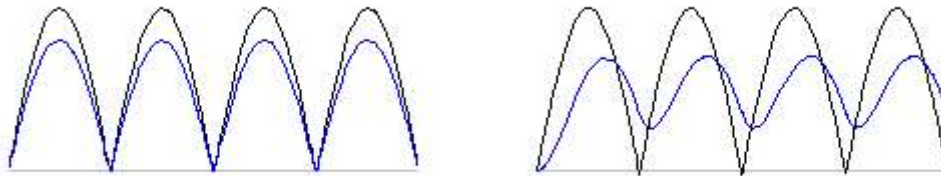
### Tek Faz Tam Dalga Doğrultucu:

Tek fazlı uygulamalar için oldukça sık kullanılan tam dalga ya da köprü doğrultucu devresi şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Tek Fazlı Köprü Doğrultucu

4 tane diyottan oluşan devrede, D1 ve D4 diyotları alternatif gerilimin pozitif evresini geçirecek, D2 ve D3 diyotları da gerilimin negatif evresinde aktif olarak bu bölgeyi doğrultacaktır. Böylece çıkışta, girişteki ac gerilimin iki katı frekansında dc bir gerilim elde edilecektir. Eğer yük indüktif olursa akım gerilimin gerisine düşecek, ancak akımı üzerine alacak pozitif gerilim evresine geçmekte olan başka bir diyot olduğu için yarım dalga doğrultucuda gözlenen negatif voltaj durumu köprü diyotta gerçekleşmeyecektir. Bunlara dair dalga şekilleri şekil 2.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Omik ve indüktif yükte köprü doğrultucu gerilim-akım ilişkisi

Tek fazlı köprü diyotta da yük gerilim, akımlarının ortalama ve etkin değerleri aynı şekilde integral olarak hesaplanır. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.

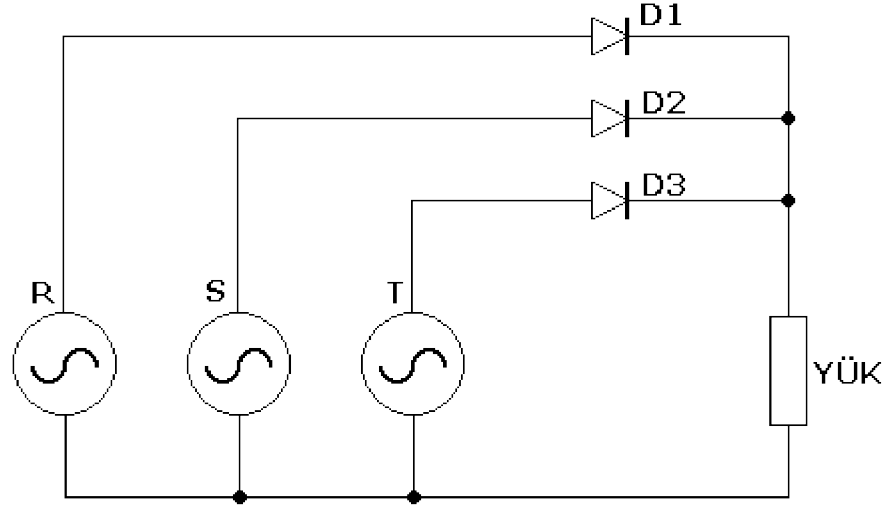
$$V_{ORT} = \frac{2V_M}{\pi} \quad I_{ORT} = \frac{2I_M}{\pi}$$
$$V_{RMS} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} \quad I_{RMS} = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$$

Bu formüllerle verilen akım değerleri sadece omik yükler için kullanılabilir. Çünkü sadece bu durumda akım ve gerilimlerin dalga şekilleri aynıdır.



## Üç Faz Yarım Dalga Doğrultucu:

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi 3 tane tek faz yarım dalga doğrultucunun ortak bir uçta birleşmesiyle oluşmuştur. 3 faz dönüştürücüler, daha yüksek frekanslı ve daha düşük salınımı olan çıkış gerilimleri üretirler. Böylece maliyet ve boyut açısından daha kolay filtrelenen çıkış gerilimleri elde edilmiş olur.



Şekil 2.5. Üç faz yarım dalga doğrultucu

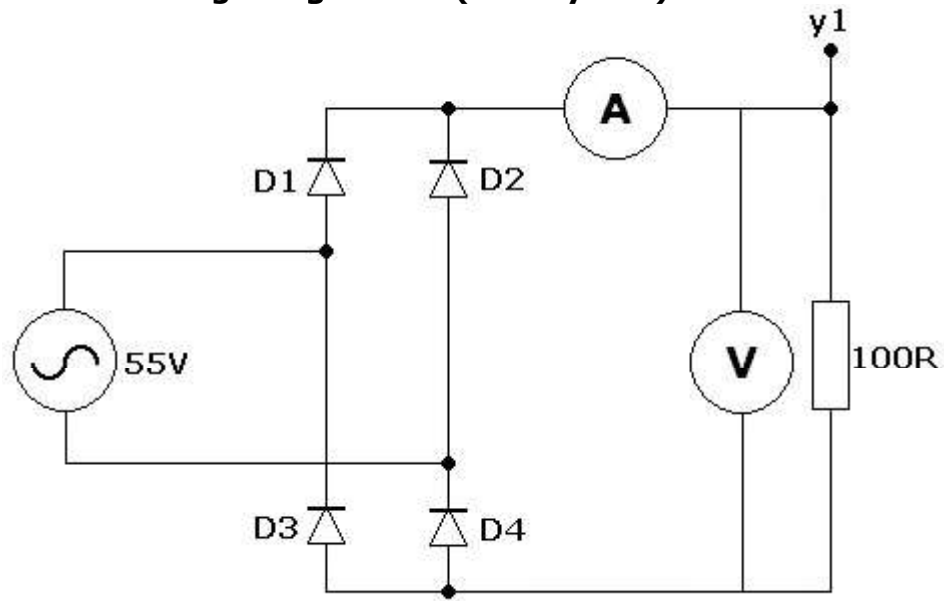
Üç faz yarım dalga doğrultucuda, hangi faz daha pozitif ise o faza bağlı olan diyot iletme geçer ve bir sonraki faz daha pozitif olup iletimi üzerine alana kadar kapanmaz. Bu durumdan da anlaşılacağı gibi her diyot, fazlar arası gerilimin sıfır olduğu noktadan itibaren iletme geçer ve  $120^\circ$  boyunca iletimde kalır. İndüktif yük durumunda da bir sonraki diyot, akımı üzerine alacağı için, gerilimin negatife düşmesi durumu, dolayısıyla da boşta çalışma diyotu kullanımına ihtiyaç yoktur.

Üç faz yarım dalga doğrultucu yük üzerinde, giriş geriliminin 3 katı frekansında bir salınım oluşturur. Bu sebeple "3-darbeleri doğrultucu" şeklinde de adlandırılır. Çıkış geriliminin ortalama ve etkin değerleri ise aşağıda verilen formüllerle hesaplanabilir.

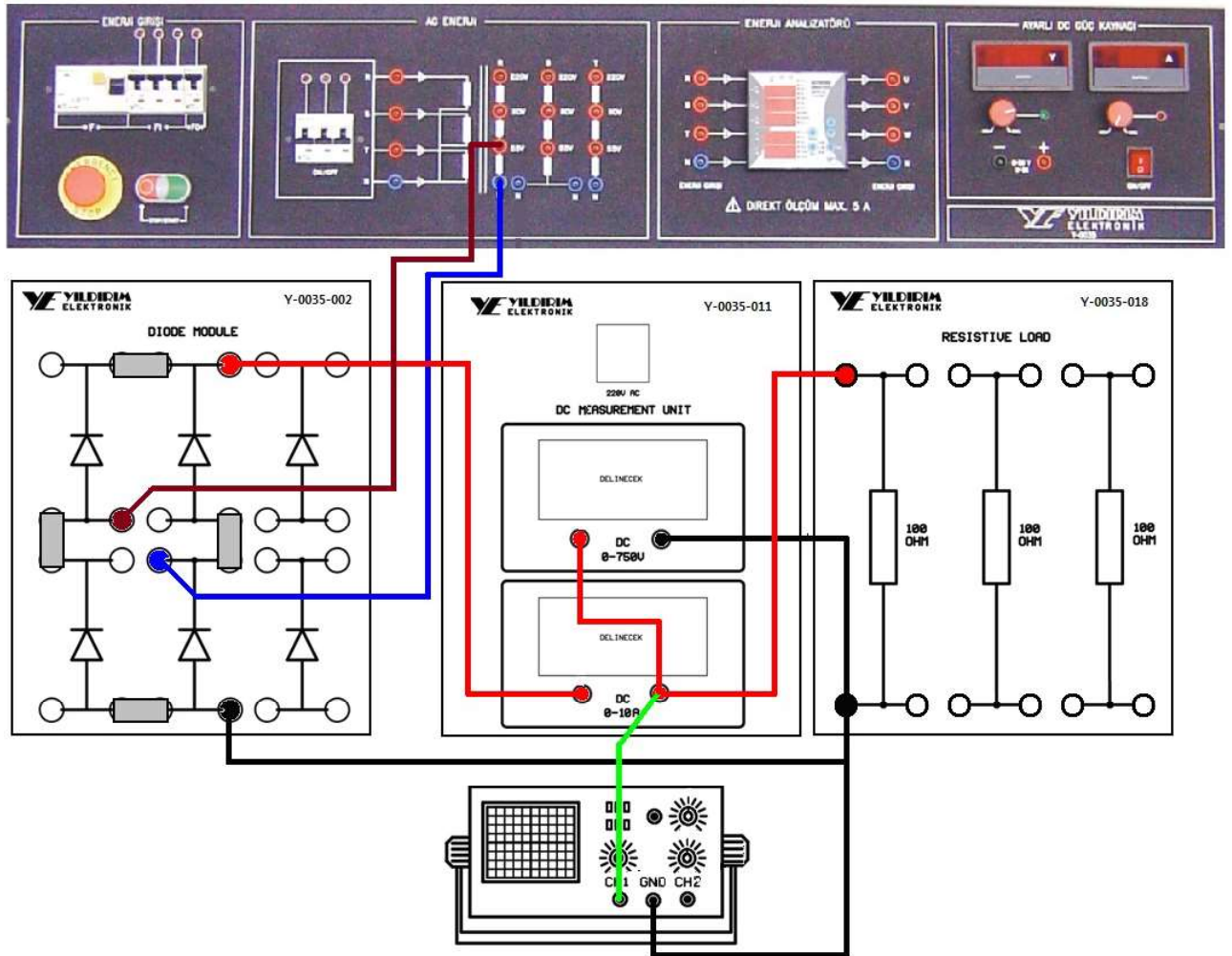
$$V_{ORT} = \frac{3\sqrt{3}V_M}{2\pi} \quad V_{RMS} = V_M \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi}} = 0.84V_M$$

## 2. 2 Tek Fazlı Tam Dalga Doğrultucu-Köprü Doğrultucu

### 2.2.1. Tek Fazlı Tam Dalga Doğrultucu (Omik yükle)



Şekil 2.25

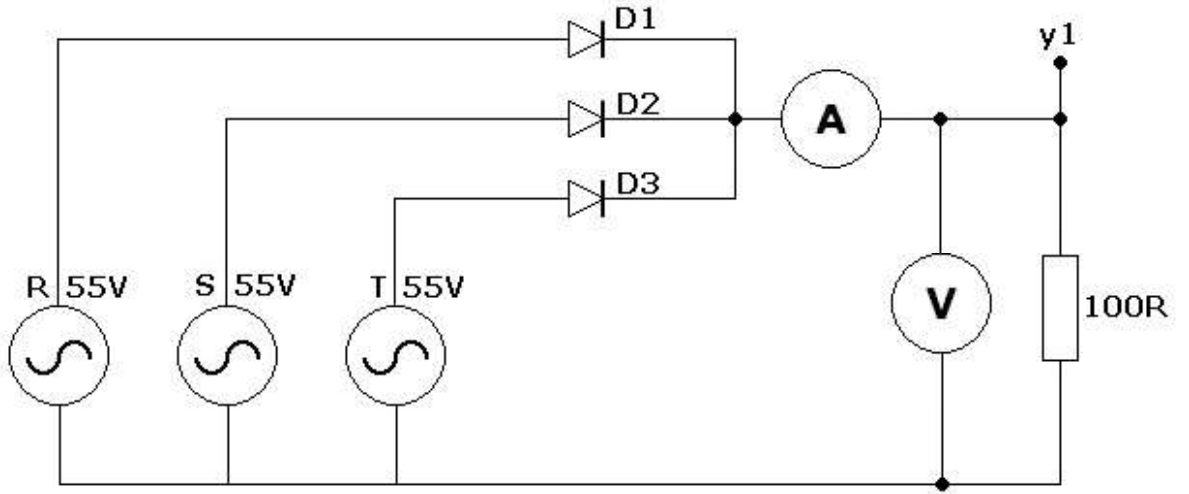


Şekil 2.26

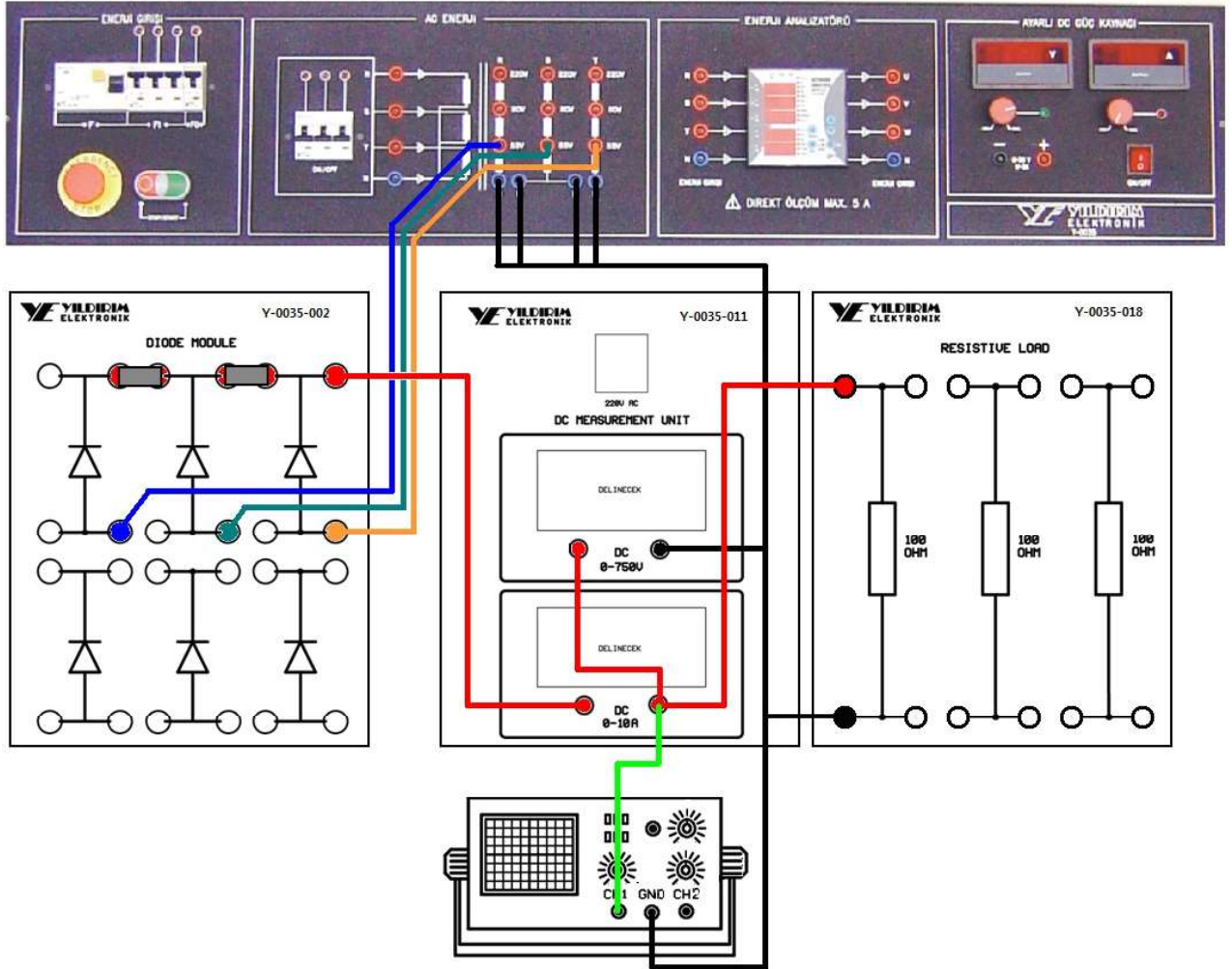
## 2. 3 Üç Faz Yarım Dalga Doğrultucu

### 2.3.1 Üç Faz Yarım Dalga Doğrultucu (Omik Yükle)

Şekildeki devreyi kurunuz.



Şekil 2.35



Şekil 2.36

## **BÖLÜM 3**

### **TRİSTÖRLÜ DOĞRULTUCULAR**

#### **A. Deneyin Amacı**

Tek faz ve 3 faz tristörlü doğrultucuların çalışmasını ve davranışlarını incelemek. Bu deneyde tek faz ve 3 faz olmak üzere tüm yarım ve tam dalga tristörlü doğrultucular, omik ve indüktif yükler altında incelenecektir. Deney 2’de diyotlar kullanılarak incelenen doğrultucu devreler, bu deneyde tristörlerle kontrollü bir hal almıştır. Yani yük gerilimi tristörlerin iletme geçme zamanlamaları kontrol edilerek değiştirilebilir. Bu sebeple tristörlü doğrultuculara kontrollü doğrultucular da denir.

#### **B. Teori: Tristörlü Doğrultucular**

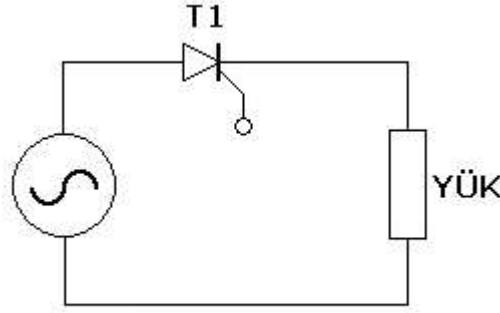
##### **GİRİŞ**

Deney 2’ de sabit çıkış gerilimi üretebilen diyotlu doğrultucuları inceledik. Eğer endüstriyel uygulama sabit değil de ayarlanabilir bir gerilime ihtiyaç duyuyorsa bu durumda diyotlu doğrultucuları kullanamayız. Bu tip uygulamalarda diyotların yerini faz kontrollü tristörler alır. Tristörün çıkış gerilimi, tristörün gecikme ya da ateşleme açısı değiştirilerek kontrol edilebilir. Tristör, kapı terminaline uygulanan bir akım darbesiyle iletme sokulur ve ancak üzerindeki gerilim negatifken, akım da belli bir değer altına düşerse kapanır. AC sistemlerde gerilim ve akım doğal olarak negatife inerler ancak DC sistemlerde böyle bir durum söz konusu olmadığı için bu sistemlerde tristör kullanılamaz.

Faz kontrollü sistemler basit, verimli ve nispeten ucuz oldukları için endüstriyel uygulamalarda, özellikle ayarlanabilir hızlı sürücü sistemlerinde birkaç kW’den MW seviyelerine kadar geniş bir aralıkta yaygın olarak kullanılırlar. Tristörlü doğrultucular da diyotlu doğrultucular gibi, tek faz , üç faz ve yarım dalga , tam dalga doğrultucu şeklinde incelenecektir.

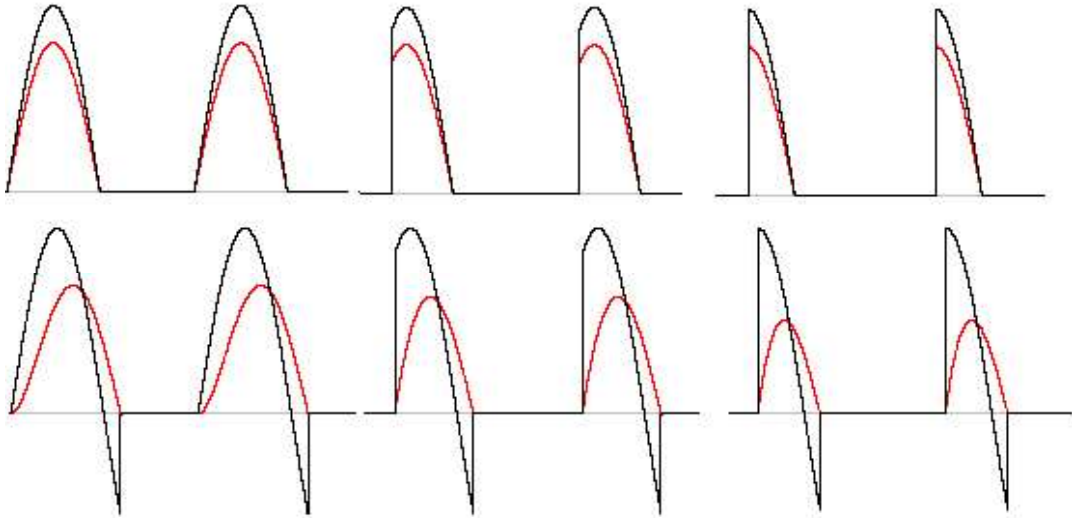
### Tek Faz Yarım Dalga Tristörlü Doğrultucu:

Şekil 3.1'de de görüldüğü gibi devrede yarım dalga diyotlu doğrultucudaki diyodun tristörle değiştirilmesi dışında bir fark yoktur.



Şekil 3.1 Yarım dalga tristörlü doğrultucu

Faz kontrolü, giriş geriliminin pozitif evresinin istenildiği anında, tristörün iletme sokulmasıyla sağlanır. Bu noktadan itibaren üzerindeki gerilim negatif olup, akım azalana kadar tristör iletimde kalır. Eğer yük omik bir yük ise tristör akım ve gerilimlerinin dalga şekli aynı olur ve negatif gerilim sorunu yaşanmaz. Ancak diyotlu yarım dalga doğrultucuda olduğu gibi, indüktif yükte, tristörlü doğrultucu da, akım geriden geldiği için geç kapanarak bir süre negatif gerilimi geçirecek bu da yüke uygulanan ortalama gerilimin azalmasına sebep olacaktır. Şekil 3.2. de farklı ateşleme açıları için yarım dalga doğrultucunun çıkışında gözlenebilecek dalga şekilleri görünmektedir.



Şekil 3.2.Omik ve indüktif yükte 0,60,90° ateşleme açılarında çıkış akım, gerilim dalga şekilleri

Yarım dalga doğrultucu devreleri, düşük frekans bileşenleri ve yüksek salınımları sebebiyle endüstride tercih edilmezler.

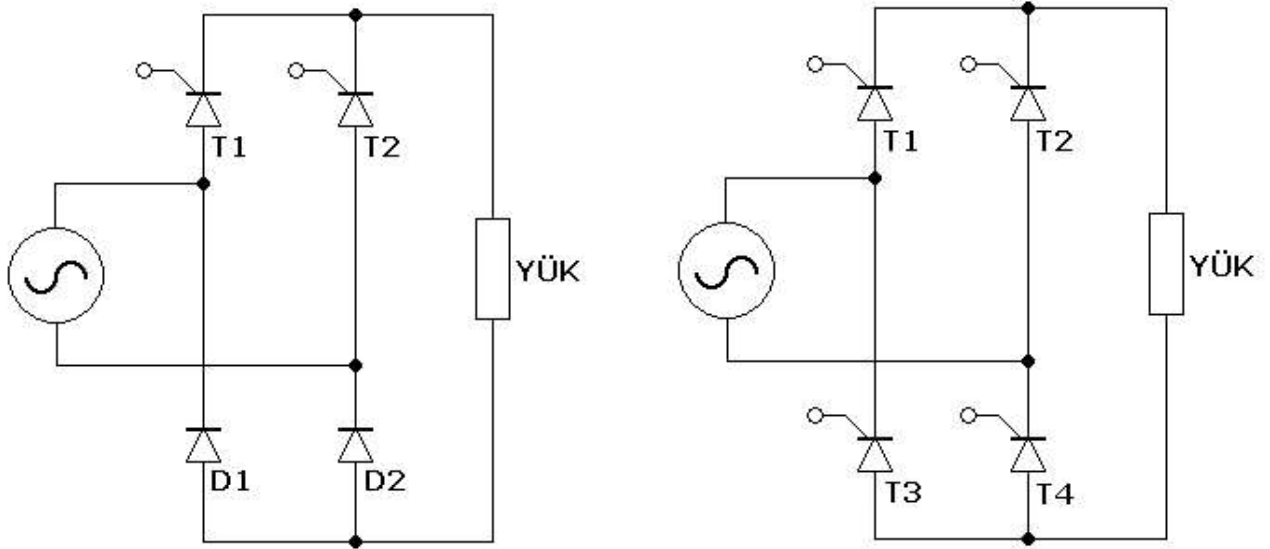
Çıkış geriliminin ortalama ve etkin değerleri diyotlu doğrultuculardaki gibi hesaplanabilir.

$$V_{ORT} = \frac{V_M}{2\pi}(1 + \cos\alpha) \quad V_{RMS} = \frac{V_M}{2} \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{0.5}$$

( $\alpha$  = Ateşleme açısı)

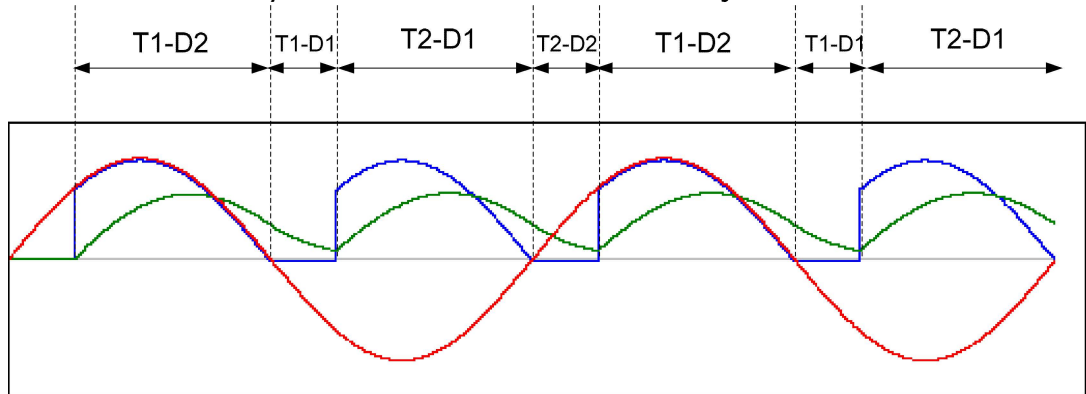
### Tek Faz Tam Dalga (Köprü )Doğrultucu:

Şekil 3.3'te yarı kontrollü ve tam kontrollü köprü doğrultucu görünmektedir. Tam kontrollü doğrultucu 4 tane tristörden oluşurken, yarı kontrollü doğrultucu 2 tristör 2 diyottan oluşmaktadır. Yarı kontrollü doğrultucuda gerilim ve akım daima pozitiftir, yani sadece tek kadranda çalışan bir doğrultucudur. Tam kontrollü doğrultucuda ise boşa çalışma diyodu kullanılmadığı takdirde gerilim negatife düşebilir. Akım ise burada da daima pozitiftir. Bu sistem de pozitif akım ve pozitif-negatif gerilimle yani 2 kadranda çalışmaktadır.



Şekil 3.3 Tek faz, yarı-kontrollü ve tam kontrollü doğrultucu

Şekil 3.4'te indüktif yüklü, yarı kontrollü doğrultucu için tipik bir çıkış gerilimi dalga şekli ile tristör ve diyotların iletim aralıkları verilmiştir.



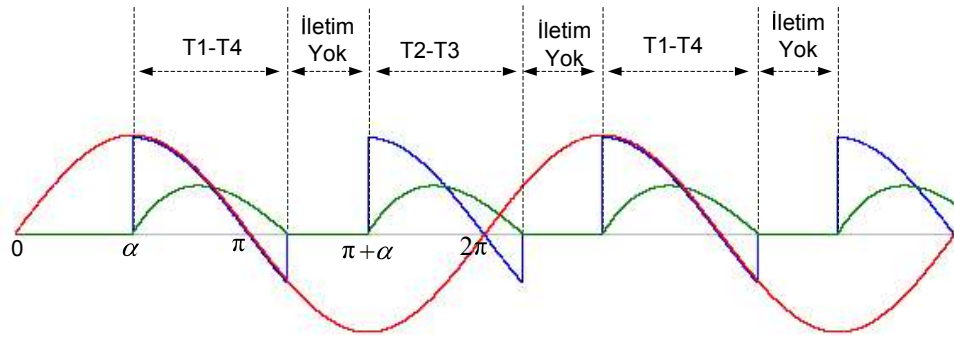
Şekil 3.4 Yarı kontrollü köprü doğrultucu

Şekilde de görüldüğü gibi gerilimin pozitif evresini T1-D2 negatif evresini de T2-D1 anahtarları iletmektedir. Gerilim pozitif evrenin sonuna gelip negatife geçtiğinde T1-D2 çiftinin görevi biter ve gerilim negatife geçtiği için D2 kapanarak üzerinde pozitif gerilim olan D1 açılır. Bu noktada T2 henüz ateşlenmediği için ve de yük akımı sıfıra düşmediği için T1 tristörü T2 ateşlenene kadar iletimde kalır.  $\omega t = \pi + \alpha$ 'da T2 ateşlenir ve T2-D1 çifti iletimi alır.

Gerilimin ortalama ve etkin değerleri aşağıdaki gibidir.

$$V_{ORT} = \frac{V_M}{\pi}(1 + \cos\alpha) \quad V_{RMS} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{0.5}$$

Tam kontrollü doğrultucuda diyotlar yerine de tristörler kullanıldığı için devre üzerindeki her anahtar kontrollüdür ve bu sebeple tam kontrollü denmektedir. Şekil 3.3'te görölen tam kontrollü devreye göre, T1-T4 tristörleri ve T2-T3 tristörleri kendi içlerinde birlikte çalışır.  $\omega t = \alpha$  anında T1 ve T4 ateşlenir ve  $\omega t = \pi$  anına kadar bu tristörler iletimde kalır. T2 ve T3 tristörleri  $\omega t = \pi + \alpha$ 'ya kadar ateşlenmeyeceği için, eğer yük indüktif ise T1 ve T4 tristörleri kesim durumuna geçmeyip yük akımını taşımaya devam edecekler ; T2 ve T3 diyotlarının açılma anına kadar da negatif gerilimi çıkışa iletceklerdir.  $\omega t = \alpha$  anında T2 ve T3 tristörleri ateşlenerek iletime başlayacaklardır. Bu durum tristörlerin iletim periyotlarıyla birlikte Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5

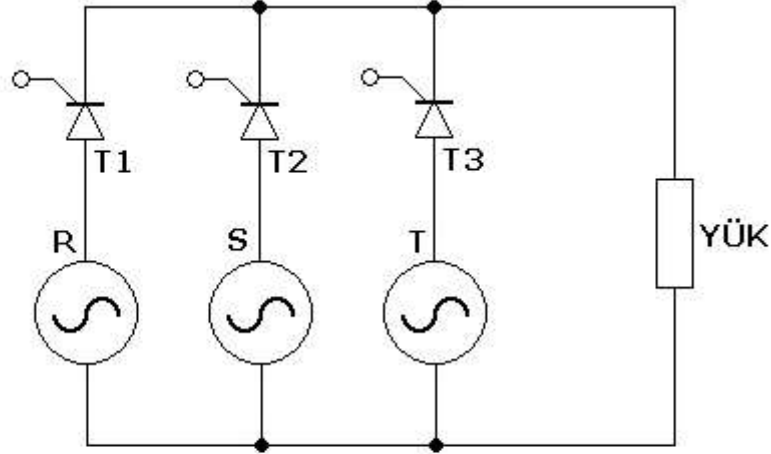
Şekil 3.5'e göre yük akımının süreksiz olduğu görünmektedir. Bu sebeple devredeki hiçbir anahtarın iletimde olmadığı zaman dilimleri vardır. Sürekli yük akımı olması durumunda akım, T1-T4 tristörleri tarafından diğer tristör çifti ateşlenene kadar taşınacaktır. Bu durumda da akımın sürekliliği sağlanırken ortalama gerilim azalacaktır.  $\alpha$ 'dan  $\pi$ 'ye kadar olan periyotta gerilim ve akım pozitifdir yani güç şebekeden yüke doğru akmaktadır. Bu durumda devre "doğrultma" (rectification) durumundadır denir. Gerilimin  $\pi$ 'den sonraki negatif kısmında ise akım yine pozitifdir. Güç yükten kaynağa akar. Bu konumda da devre "evirici" (inverter) modunda çalışıyor denir.

Akım sürekli olduğu takdirde, tam kontrollü köprü doğrultucu için, ortalama ve etkin gerilim aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir.

$$V_{ORT} = \frac{2V_M}{\pi}(\cos\alpha) \quad V_{RMS} = \frac{V_M}{\sqrt{2}}$$

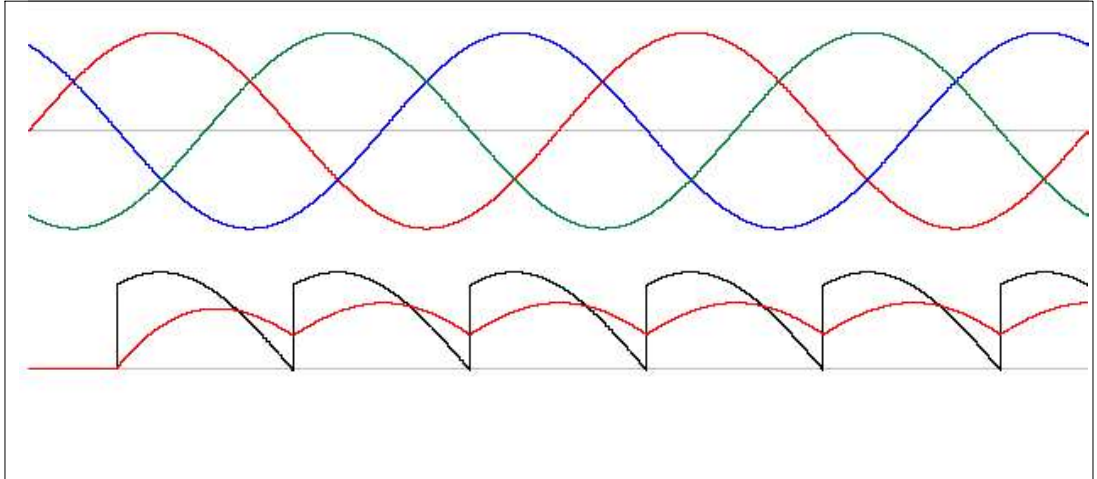
## Üç Faz, Yarım Dalga, Tristörlü Doğrultucu:

Üç faz yarım dalga doğrultucu, daha önce diyotlu doğrultucularda da bahsedildiği gibi yüke daha yüksek bir ortalama gerilim sağlar ve gerilimin frekansı daha yüksek olduğu için filtrelenmesi daha kolaydır. Bu sebeple endüstride yaygın olarak kullanılan bir doğrultucu türüdür. Üç faz doğrultucu, kontrol prensibi fazlar arası gerilimin sıfır olduğu noktaya göre dir. Fazlar kendi içlerinde  $\pi/6$  noktasında kesiştikleri için şekil 3.6'da görülen resme göre  $T1$   $\omega t = \pi/6 + \alpha$  anında tetiklenir. Her bir tristör 120 derece iletimde kalır yani  $T2$   $\pi/6 + \alpha$ ,  $T3$  de  $3\pi/2 + \alpha$  anında ateşlenir.



Şekil 3.6

Aşağıdaki dalga şekilleri üç fazlı yarım dalga doğrultucu için verilen tipik bir çıkış gerilimi dalga şeklidir.



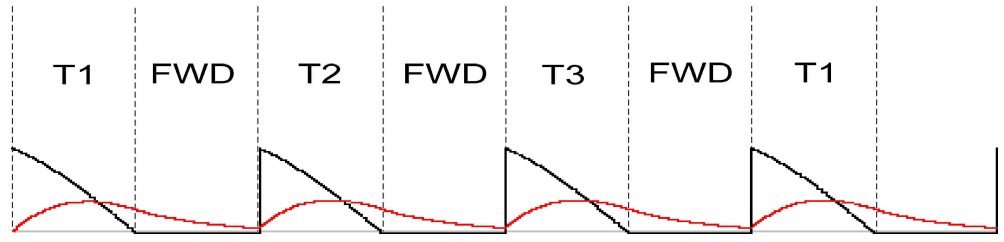
Şekil 3.7 İndüktif yük ile üç faz yarım dalga doğrultucu için giriş ve çıkış dalga şekilleri

Şekil 3.7'deki dalga şekilleri  $\alpha=60^\circ$  için alınmıştır ve yük yeterince indüktif olduğu için akım süreklidir. Eğer yük omik ise,  $\alpha > \pi/6$  için akım süreksiz olacaktır. Sürekli akım durumunda da, gerilimin negatife inme durumu gerçekleşecektir.

Bu durumda, bu doğrultucu türünde de boşa çalışma diyodu (FWD) kullanılabilir. İndüktif yüklü, boşa çalışma diyotlu bir üç faz yarım dalga tristörlü doğrultucunun yük



akım ve gerilimi dalga şekilleriyle birlikte, anahtarların iletim periyotları şekil 3.8’de gösterilmiştir.



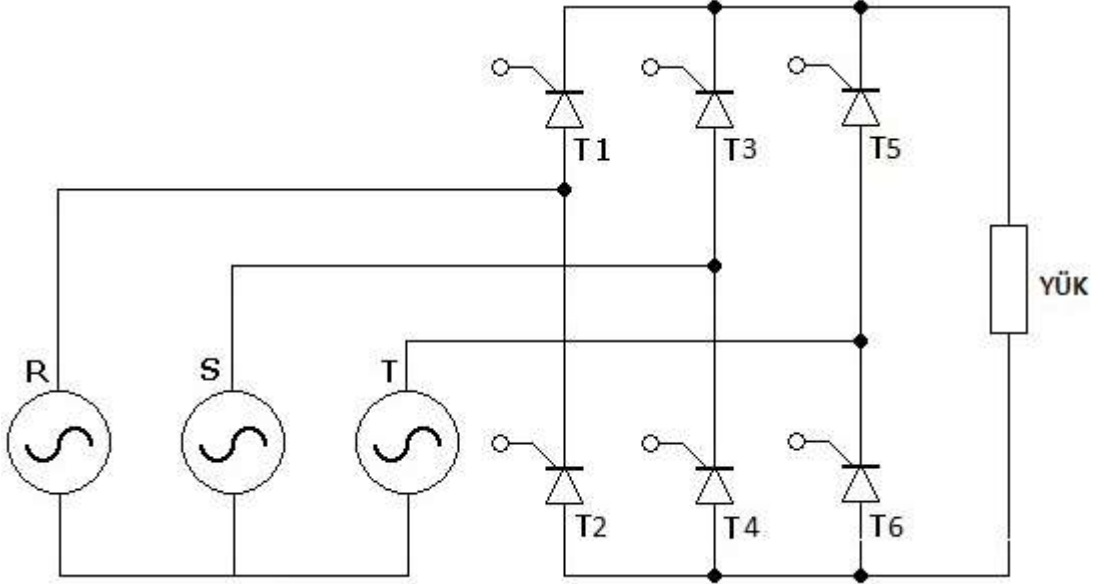
Şekil 3.8 Üç faz, kontrollü yarım dalga doğrultucu için tristör iletim periyotları

Maksimum ortalama gerilim  $\alpha = 0$  için yani her bir tristör, fazların  $\omega t = \pi/6$  anında ateşlendiğine gerçekleşir. Akımın sürekli olduğu durumlar için ortalama ve etkin gerilim değerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir.

$$V_{ORT} = \frac{3\sqrt{3}V_M}{2\pi} \cos \alpha \quad V_{RMS} = \sqrt{3}V_M \left( \frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha \right)^{0.5}$$

## Üç Faz Tam Dalga (Köprü )Doğrultucu:

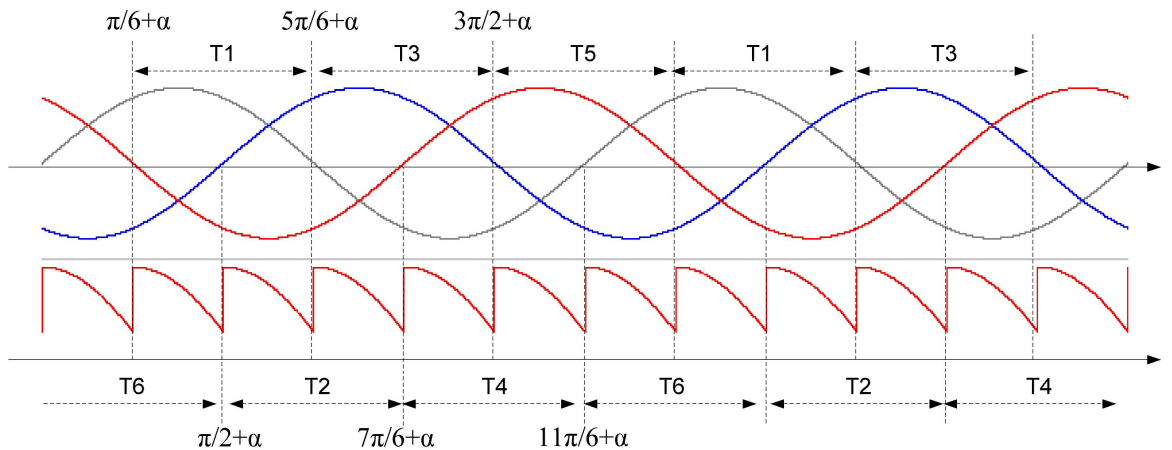
Üç faz köprü doğrultucular endüstride oldukça yaygın olarak kullanılırlar. Üç faz yarım dalga doğrultuculara göre daha da yüksek ortalama gerilim ve daha yüksek frekans sağlarlar. Ateşlemeler yine fazlar arası gerilimin sıfır olduğu noktalara göre her 60 derecede bir yapılır. Her tristör 120 derece iletimde kalır. Doğrultucunu devre şeması şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Üç fazlı köprü doğrultucu

$\omega t = \pi/6 + \alpha$  anında T1 tristörü ateşlenir ve bu anda T6 tristörü zaten iletimdedir.  
 $(\pi/6 + \alpha) < \omega t < (\pi/2 + \alpha)$  T1-T6 tristörleri iletime devam ederler.  $\omega t = \pi/2 + \alpha$  anında T2 ateşlenir ve  
 $(\pi/2 + \alpha) < \omega t < (5\pi/6 + \alpha)$  aralığında iletime devam ederler.

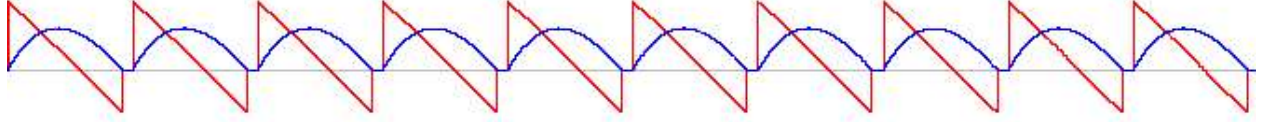
Bu anda artık 2. fazın gerilimi 1. faza göre daha büyük bir değere ulaşmıştır ve 2. fazın tristörü T3 ateşlenir. Ateşleme ve iletim sırası şu şekildedir. T6-T1, T1-T2, T2-T3, T3-T4, T4-T5, T5-T6. Tipik bir üç faz, kontrollü köprü doğrultucu çıkış geriliminin dalga şekli üzerinde bu durum gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Üç faz, kontrollü doğrultucu için tristör iletim periyotları

**$\alpha > \pi/3$ :**

Tristörlerin ateşleme açısı 60 dereceden büyük olursa, omik yükler için akım süreksiz olacaktır. Bu durumda bir sonraki fazın tristörü ateşlenene kadar yükten akım geçmeyecektir. Eğer kullanılan yük indüktif ise bu durumda durum R-L zaman sabiti ve de ateşleme açısının büyüklüğüne göre değişecektir. Eğer ateşleme açısı çok büyük değilse akım sıfıra düşmeyecektir. Ancak ateşleme açısı büyük ama indüktans yeterince büyük değilse bu durumda akım yine de sıfıra düşerek süreksiz bir hal alacaktır. Şekil 3.11'de  $\alpha=115^\circ$  için bu durum gösterilmiştir.



Şekil 3.11 İndüktif yük ile süreksiz akım gösterimi

Şekilden de görüldüğü gibi akım sıfıra inene kadar gerilim de negatifte kalmış, ve akım sıfır olunca tristörler kapanmıştır. Buradan şunu da görüyoruz ki, üç faz, yarım dalga doğrultucuda bahsettiğimiz evirici (inverter) olarak çalışma modu bu devrede de mevcuttur. Akım pozitifken, gerilim negatiftir ve bu bölgede güç akışı dc yükten, ac kaynağa doğrudur. Bu da sistemin bu bölgelerde bir evirici olarak çalıştığını gösterir.

Üç faz, kontrollü köprü doğrultucunun ortalama ve etkin gerilim formülleri aşağıda verilmiştir. Tekrar hatırlatmak gerekir ki bu formüller akım sürekli olduğu zaman kullanılabilir

$$V_{ORT} = \frac{3V_{L-L}}{\pi} \cos \alpha \quad V_{RMS} = V_{L-L} \left( \frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha \right)^{0.5}$$

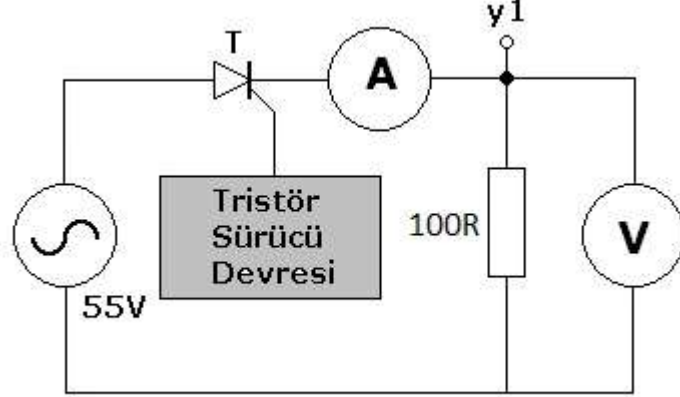
### 3. 1 Tek Fazlı Yarım Dalga Doğrultucu Deneyi

#### 3.1.1 Tek Fazlı Yarım Dalga Doğrultucu (Omik Yükle)

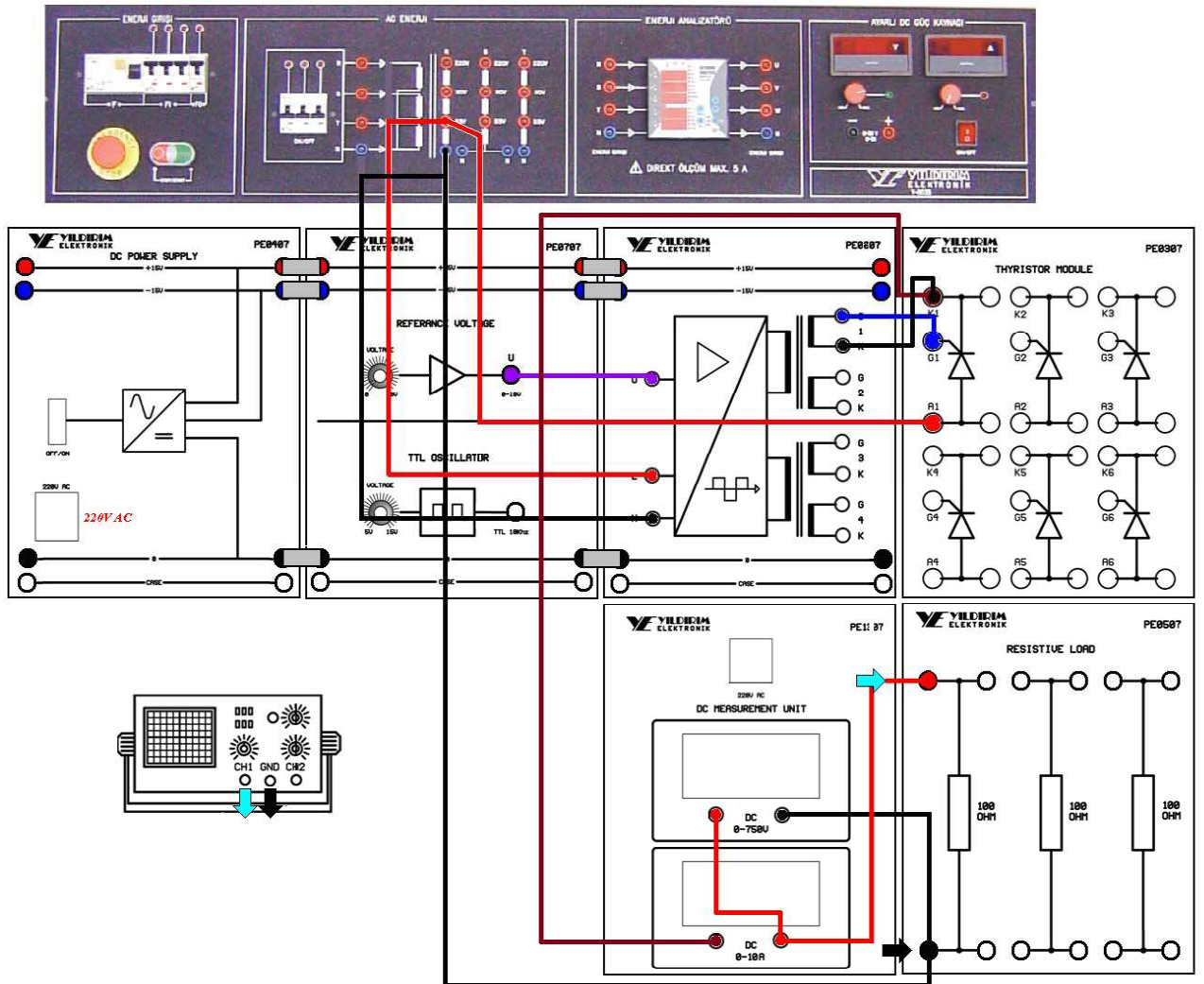
Şekil 3.12’de görülen devreyi kurunuz.

( Devre, girişteki diyot yerine tristör kullanılması dışında deney 2.1.1’deki ile aynıdır )

Not: Ampermetre tristör girişinde AC, çıkışında DC bağlanacaktır. Yer açısından sıra ile bağlanabilir. Deney şemasında karışıklığı önlemek için DC bağlantı kullanılmıştır.



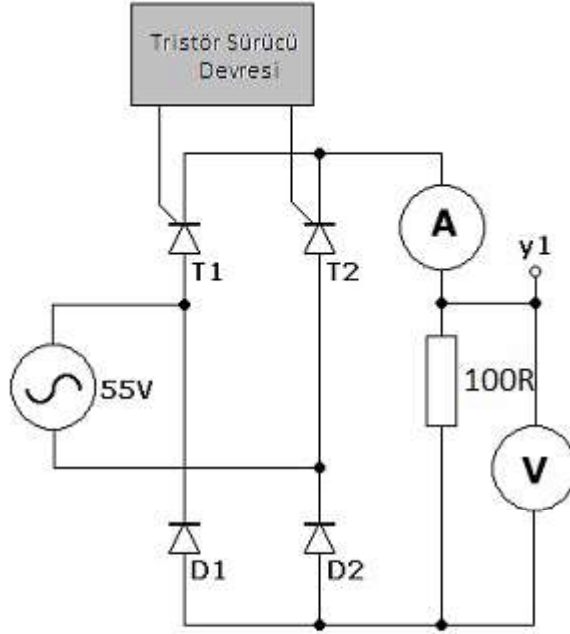
Şekil 3.12



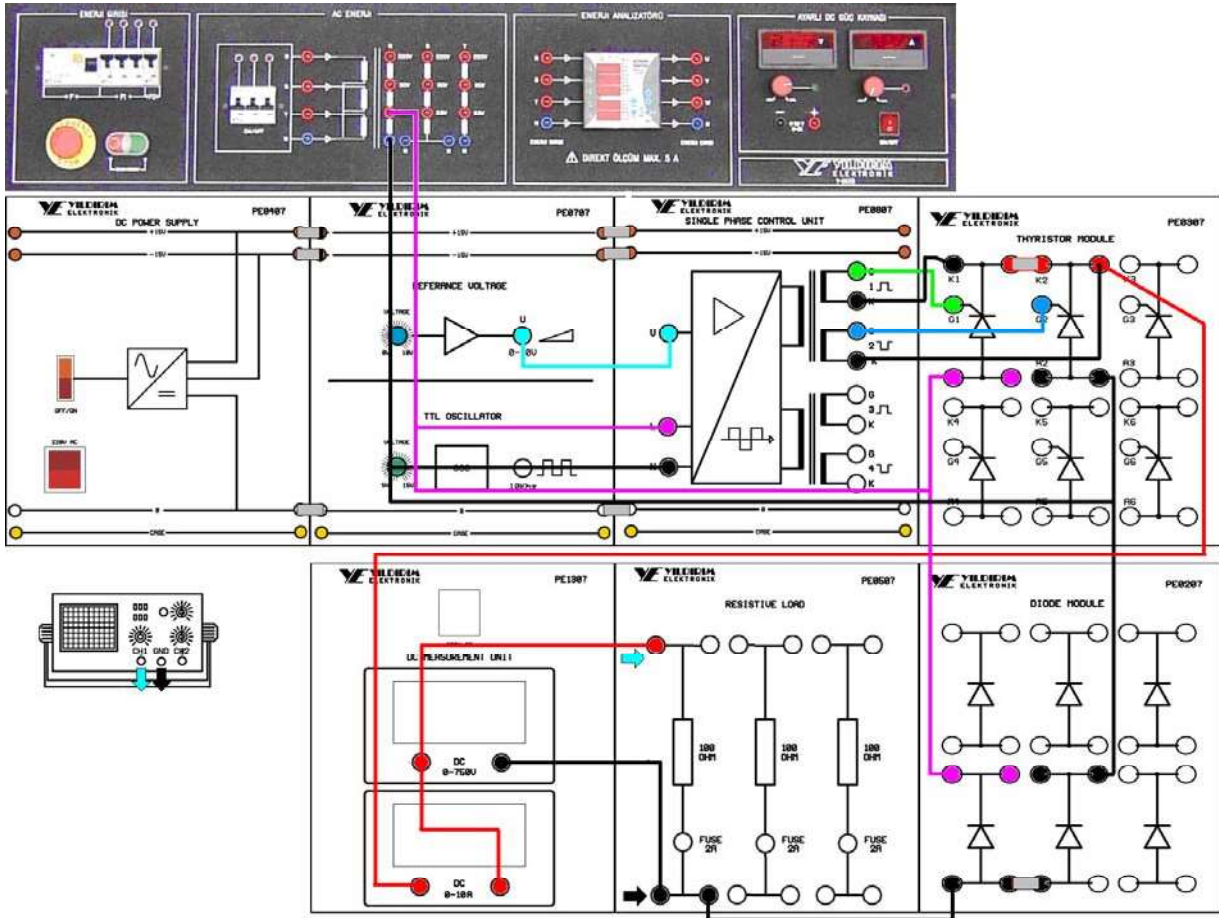
Şekil 3.13

## 3. 2 Tek Fazlı Tam Dalga Doğrultucu-Köprü Doğrultucu

### 3.2.1 Tek Fazlı Yarı Kontrollü Doğrultucu (Omik Yükle)



Şekil 3.27



Şekil 3.28