

GÜÇ ELEKTRONİĞİNDE KULLANILAN ANAHTARLAMA ELEMANLARI

1. DENEYİN AMACI

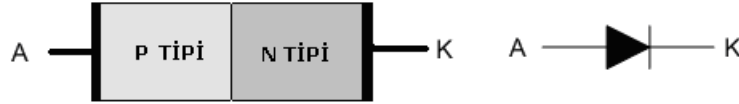
Güç elektroniği devrelerinde yoğun olarak kullanılan anahtarlama elemanlarının, anahtarlama davranışlarının incelenmesi.

2. TEORİ

Güç Elektroniğinde Kullanılan Anahtarlama Elemanlarına Genel Bakış

2.1. Diyotlar

Diyotlar Şekil 1’de gösterildiği gibi genellikle, bir p -tipi ve bir n -tipi yarı iletken malzemenin birleşiminden oluşan elemanlardır. Malzemenin p -tipi olan tarafı **anot**, n -tipi olan tarafı ise diyodun **katot** terminalini oluşturur.



Şekil 1. Diyotun yapısı ve elektriksel sembolü

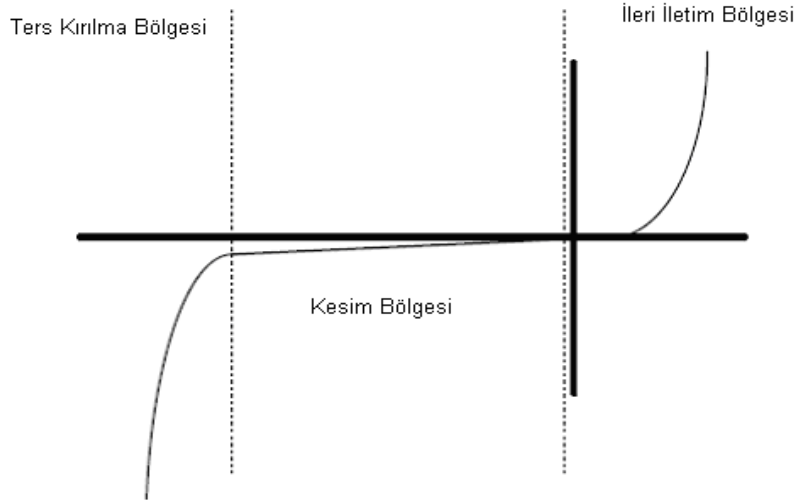
Diyot, katoda göre anoda uygulanan pozitif bir gerilimle iletme geçer ve üzerinde bir gerilim düşümü oluşur. Bu gerilim düşümü diyodun malzemesine göre değişmekle birlikte genel olarak 1 V seviyesinden daha fazla değildir. Diyodun bu gerilim değerine aynı zamanda **eşik gerilim değeri** denir. Diyodun üzerine bu gerilimden daha büyük bir değer uygulanmadıkça diyot iletme geçmez ve kesim bölgesinde kalır.

Diyoda yukarıda belirtilene göre ters yönde bir gerilim uygulanırsa yani anoda göre katotta pozitif bir gerilim olursa, diyot iletim göstermez ve üzerinden ters yönde çok küçük değerde bir akım geçer. Bu akıma diyodun **kaçak akımı** denir. Bu akım mikroamperler ya da bir kaç miliamper seviyesindedir. Eğer ters yönde uygulanan bu voltaj belirli bir değer üzerine çıkarsa diyot ters yönde kırılmaya uğrar. Bu değer diyot üretici bilgi sayfalarında **ters yönde kırılma voltajı** olarak belirtilmiştir. Ters yönde kırılma durumu diyot için tehlikeli bir durumdur; çünkü bu durumda, diyotun üzerinden yüksek bir voltaj değerinde, yüksek bir akım geçmektedir. Bu durum diyotun tamamen bozulmasına sebep olabilir. Diyota uygulanacak olan gerilimlere göre diyodun davranışlarını açıkladık. Bu açıklamanın grafiksel olarak gösterimi Şekil 2’deki gibidir.

Diyotun en önemli özelliklerinden birisi diyotun **kesim dönüşümü süresidir**. Diyot kesim durumuna geçerken tam olarak iletme geçmesi için p - n jonksiyonu içerisindeki akım taşıyıcılarının tam olarak yok olması gerekir. Bunun için diyot, üzerinden geçen akım sıfıra düşer düşmez kapanmaz ve jonksiyon bölgesinin bu fazlalık olan akım taşıyıcılarından temizlenmesi için bir

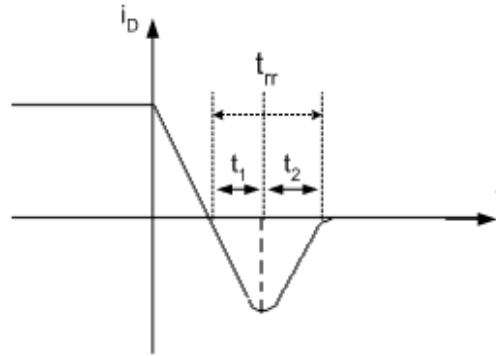
Güç Elektroniğinde Kullanılan Anahtarlama Elemanları

süre ters yönde akım iletir. Diyot kesime giderken görülen bu ters yönde akım iletme süresine **kesim dönüşümü süresi** denir. Bu durum Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Diyot karakteristiği

Şebeke uygulamalarında kesim dönüşümü süresi fazla önemli değildir. Çünkü frekans $50/60\text{ Hz}$ değerindedir. Dolayısıyla kesim dönüşümü süresine göre çok yavaş kalmaktadır. Ancak dc-dc dönüştürücü ya da bunun gibi yüksek frekansta anahtarlama yapılan uygulamalarda kesim dönüşümü süresi önemli olabilir.



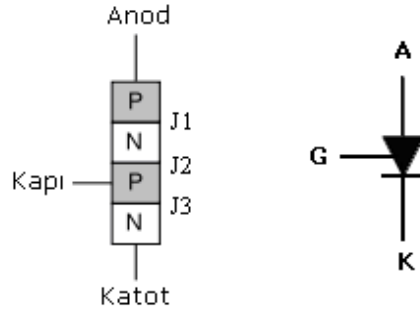
Şekil 3. Diyotun kesim dönüşüm süresi

Diyotlar, kullanıldığı uygulamalardaki gereksinimlere göre sınıflandırılabilir:

- Standart Diyotlar : Genel amaçlı, kesim dönüşümü süresi kabul edilebilir ölçeklerde olan şebeke uygulamalarında kullanılan diyotlardır.
- Schottky Diyotlar : Bu diyotların ileri iletim durumundaki gerilim düşüm değeri diğerlerine göre düşüktür ve yapısal olarak $p-n$ jonksiyonu içermezler. Bu sebeple kesim dönüşümü süreleri de standart diyotlara göre daha küçüktür.
- Hızlı Dönüşümlü Diyotlar : Bu diyotlar, çok düşük kesim dönüşümü süreleri sebebiyle yüksek anahtarlama frekanslı uygulamalarda kullanılırlar.

2.2. Tristörler

Tristör, dört katmanlı, *pnpn* yapısına sahip yarıiletken anahtarlama elemanıdır. Şekil 4’de görüldüğü gibi üç tane *p-n* jonksiyonuna sahiptir.



Şekil 4. Tristörün yapısı ve elektriksel sembolü

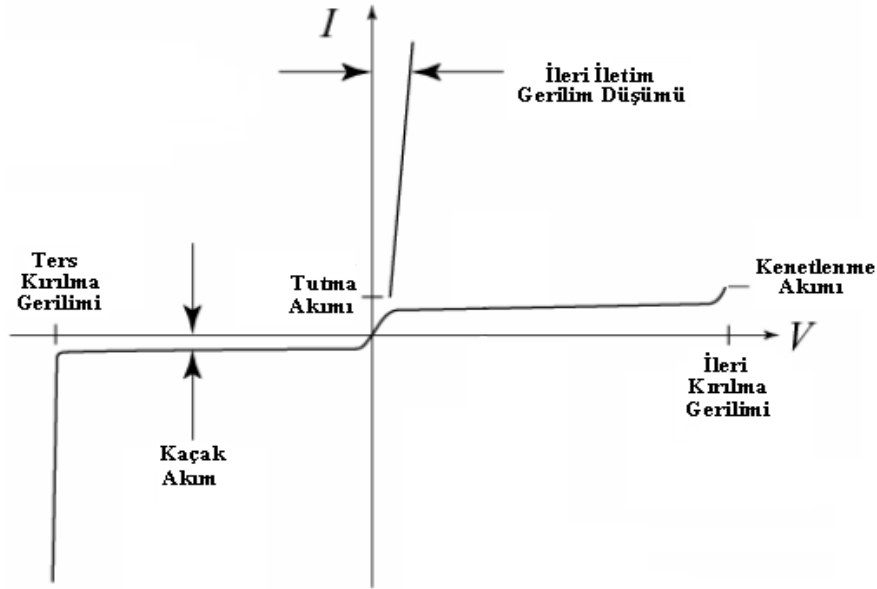
Şekil 4’den görüleceği gibi tristöre ileri yönde bir gerilim uygulandığı takdirde, J1 ve J3 jonksiyonları ileri yönde polariteli, J2 jonksiyonu ise ters yönde polariteli olacaktır. Bu durumda kapı akımı yokken tristör ileri kesim durumunda olup üzerinden akım geçirmeyecektir. Eğer tristörün anot-katot terminaleri arasına uygulanan gerilim artırılırsa bir noktadan sonra tristör iletime 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 iletime 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 terminaleri 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 5’de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 5. Tristör karakteristiği

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.

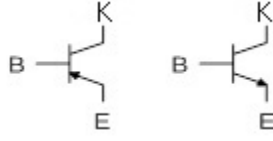
2.3. Güç BJT'leri ve Güç MOSFET'leri

2.3.1. Güç BJT'leri (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

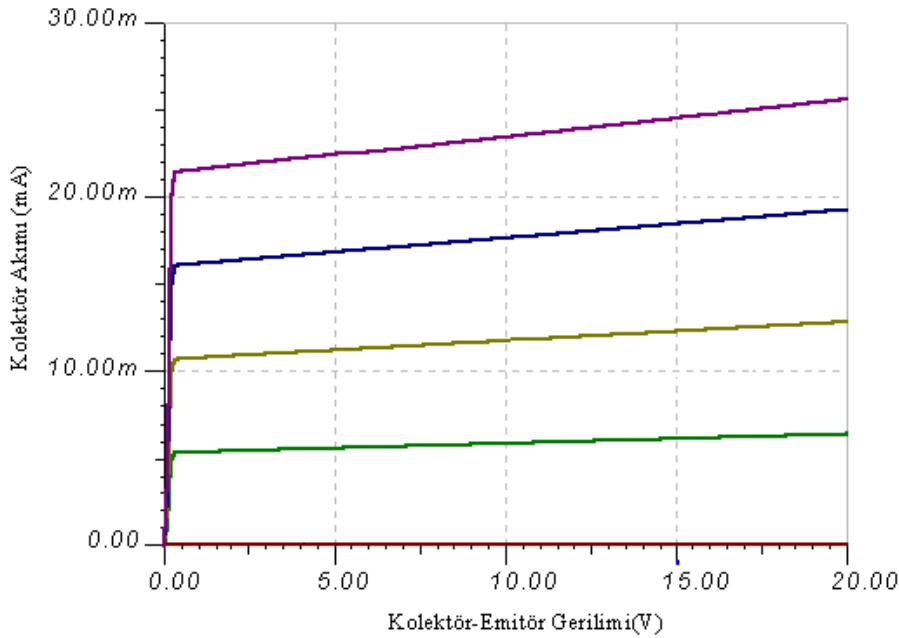
Güç Elektroniklerinde Kullanılan Anahtarlama Elemanları

üretilmiş iki tane pn jonksiyonuna sahip transistörlerdir. Elemanların sembolleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. BJT elektriksel sembolü

BJT'nin üç terminali vardır. Bunlar **beyz**, **emitör** ve **kolektör (base, emitter, 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 7'de gösterilmiştir.



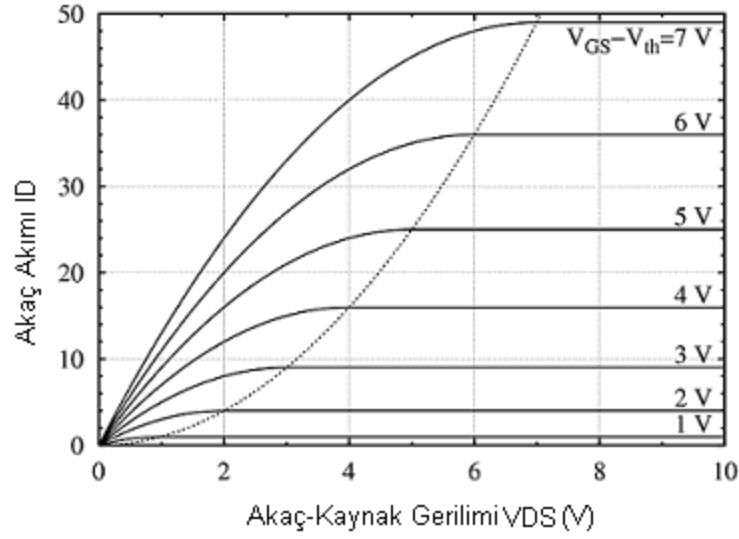
Şekil 7. BJT karakteristiği

BJT'lerin, beyz ve emitörleri arasında bir pn jonksiyonu vardır. Bu sebeple diyotlarda olduğu gibi burada da, transistör iletimdeyken $0.7 V$ 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.

BJT'ler 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

Güç Elektroniğinde Kullanılan Anahtarlama Elemanları

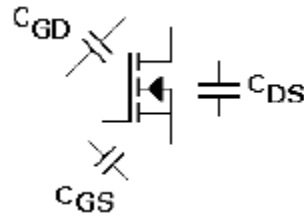
büyük bir akım geçebilir. Bu durumda MOSFET'in çıkış karakteristiği belirli bir kapı-kaynak voltajı için, akaç akımının, akaç-kaynak gerilimine göre değişimidir. Bu değişim Şekil 9'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 9. MOSFET karakteristiği

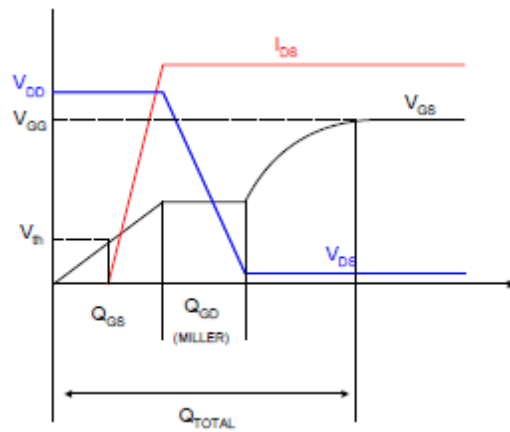
Kapı-kaynak arasına uygulanan gerilimle ilettime geçen MOSFET'lerde bu gerilimin belli bir değerine kadar iletim olmaz. Yani MOSFET belirli bir kapı-kaynak gerilim değerine kadar açılmaz. Bu değere MOSFET'in **eşik gerilim değeri** denir ve üretici bilgi sayfalarında V_{th} olarak gösterilir.

MOSFET'deki en önemli özelliklerden biri MOSFET'in fiziksel yapısından kaynaklanan, terminalleri arasındaki kapasitörleridir. MOSFET aslında Şekil 10'daki gösterimiyle modellenir.



Şekil 10. MOSFET'in terminalleri arasındaki kapasitörler

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 **milller 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 11'de gösterilmiştir.

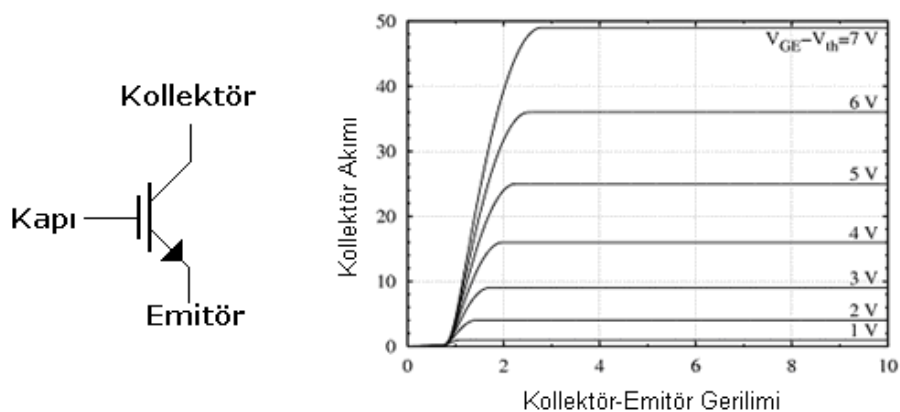


Şekil 11. MOSFET'in anahtarlama karakteristiği ve miller etkisi

2.4. IGBT'ler

IGBT'ler, güç MOSFET'leri 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. IGBT'lerin, BJTler gibi iletim gerilim düşümleri oldukça küçük, ileri kırılma gerilimleri de oldukça büyüktür. Kapıdan kanal içerisine azınlık taşıyıcıları enjeksiyonu olmadığından BJT'ler gibi ikincil kırılma gerilimi problemleri de yoktur. BJT'lerden daha yüksek anahtarlama frekansları vardır ama MOSFET kadar yüksek hızlara ulaşamazlar. Yine de anahtarlama karakteristikleri hemen hemen MOSFET'le aynıdır.

IGBT'lerin üç 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 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. IGBT elektriksel sembolü ve karakteristiği

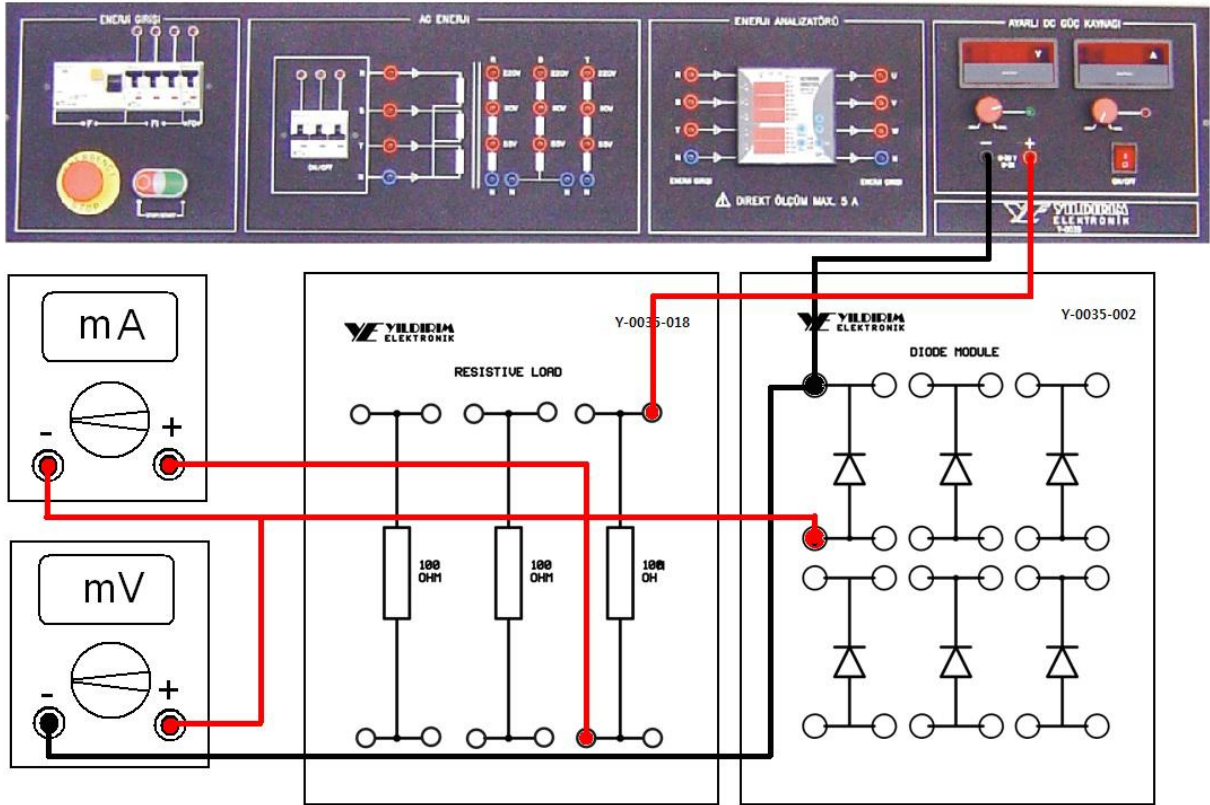
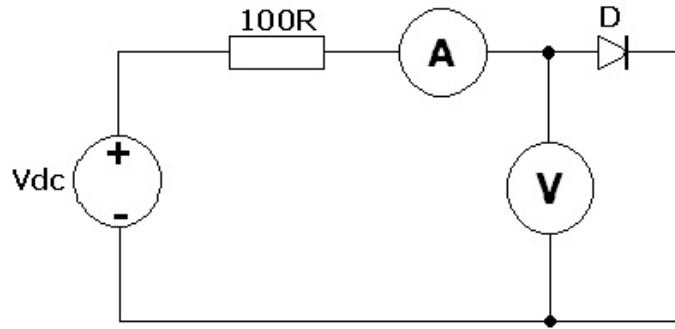
3. DENEYLER

3.1. Diyet Karakteristiğinin Çıkarılması

Not: Bu deney için harici μA -mA ve mV ölçüm aralığı olan multimetre kullanılacaktır.

1. Y-0035-002 DIODE MODULE modülünü yerine takınız. Devre bağlantılarını şekildeki gibi yapınız.

Güç Elektroniklerinde Kullanılan Anahtarlama Elemanları



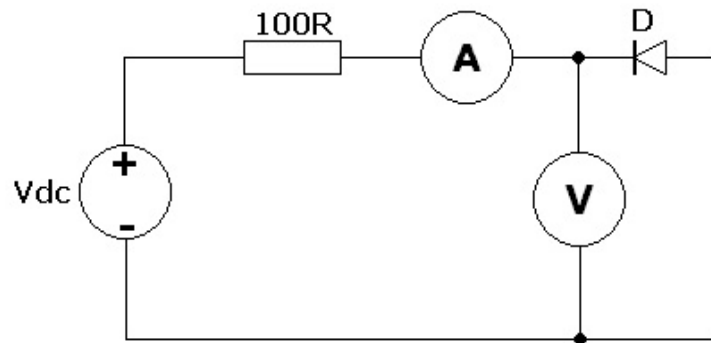
Enerji ünitesindeki ayarlı güç kaynağının gerilim potansiyometrelerini minimuma (sola), akım potansiyometresini maksimuma (sağa) çeviriniz. Devreye gücü uygulayınız. Bu durumda diyot doğru polarlamalandırılmıştır.

2. Ayarlı güç kaynağı gerilimini aşağıdaki tabloda görülen akım değerlerini elde edecek şekilde sırayla ayarlayınız. Diyot uçlarındaki voltmetrede her akım değerine karşılık gelen gerilimi tabloya kaydediniz.
3. Her basamaktaki diyot direncini $R_D = E_D / I_D$ formülünden hesaplayınız ve yine tabloya kaydediniz.

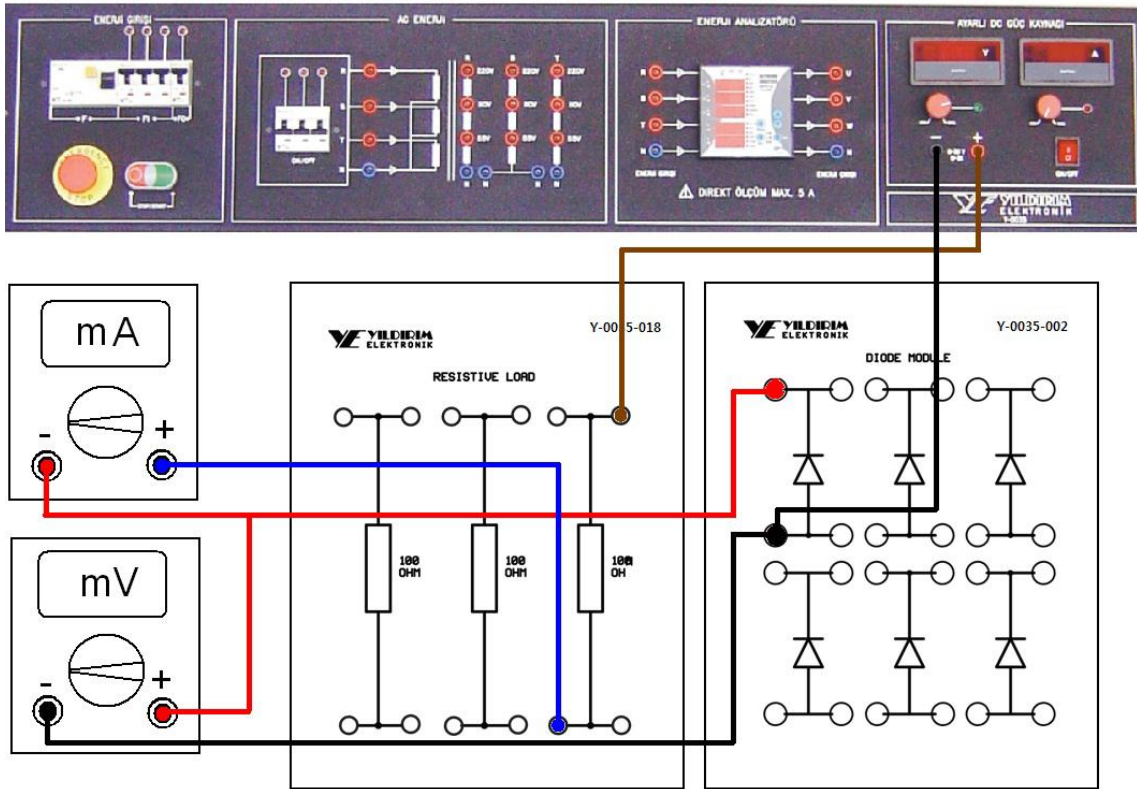
Sıra No	I_D (mA)	E_D (V)	$R_D = \frac{E_D}{I_D}$
1	0		
2	0.02		
3	0.05		
4	0.1		
5	0.2		
6	0.5		
7	0.8		
8	1.0		
9	2.0		
10	5.0		
11	10.0		
12	12.0		

4. Elde edilen I_D ve E_D değerlerini grafik üzerine işaretleyip diyotun doğru polarma karakteristik eğrisini çiziniz.
5. Devrenin enerjisini kesiniz. Devre bağlantısını aşağıdaki gibi yapınız. Devreye enerji veriniz. Bu durumda diyot ters polarmalandırılmıştır. Bu kez aşağıdaki tabloda görülen gerilim değerini ayarlı güç kaynağını ayarlayarak sırasıyla elde ediniz. Her basamakta elde edilen I_D değerini tabloya kaydediniz.

Sıra No	E_D (V)	I_D (μA)
1	0	
2	4.0	
3	8.0	
4	12.0	



Güç Elektronikğinde Kullanılan Anahtarlama Elemanları

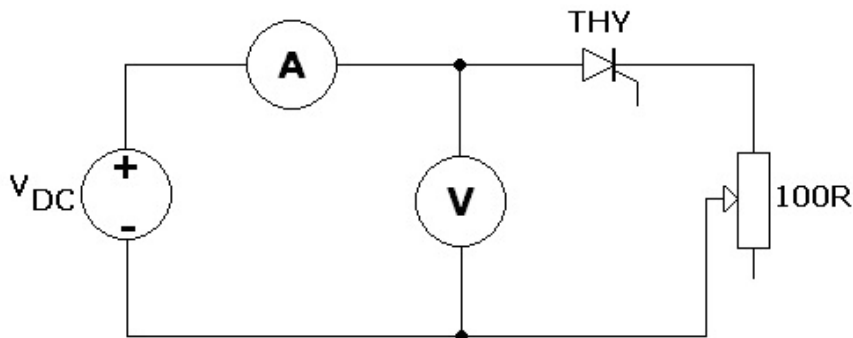


6. Diyot ters polarlamada iken μA seviyesinde geçen akım ne akımıdır?
7. İkinci tabloda elde edilen değerleri bir önceki grafik üzerine işaretleyerek diyotun ters polarlama karakteristik eğrisini çiziniz.
8. Elde edilen grafik için ne söylenebilir?

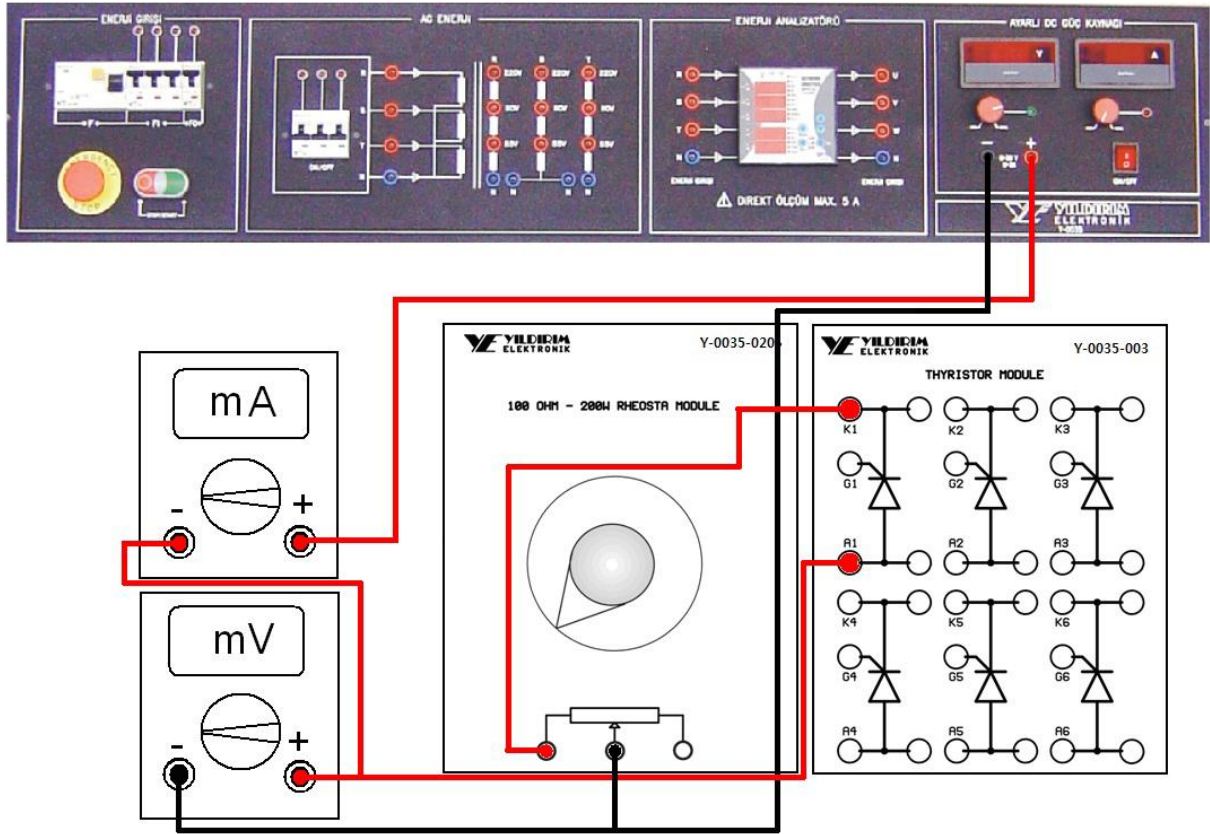
3.2. Tristör Karakteristiğinin Çıkarılması

3.2.1. İleri Bloklama Testi

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



Güç Elektronikğinde Kullanılan Anahtarlama Elemanları



2. DC ayarlı güç kaynağını min. konuma getiriniz. Yukarıdaki devreyi kurduktan sonra enerji veriniz.
3. Gerilimi 0 – 30 V aralığında değiştiriniz ve tabloyu doldurunuz.

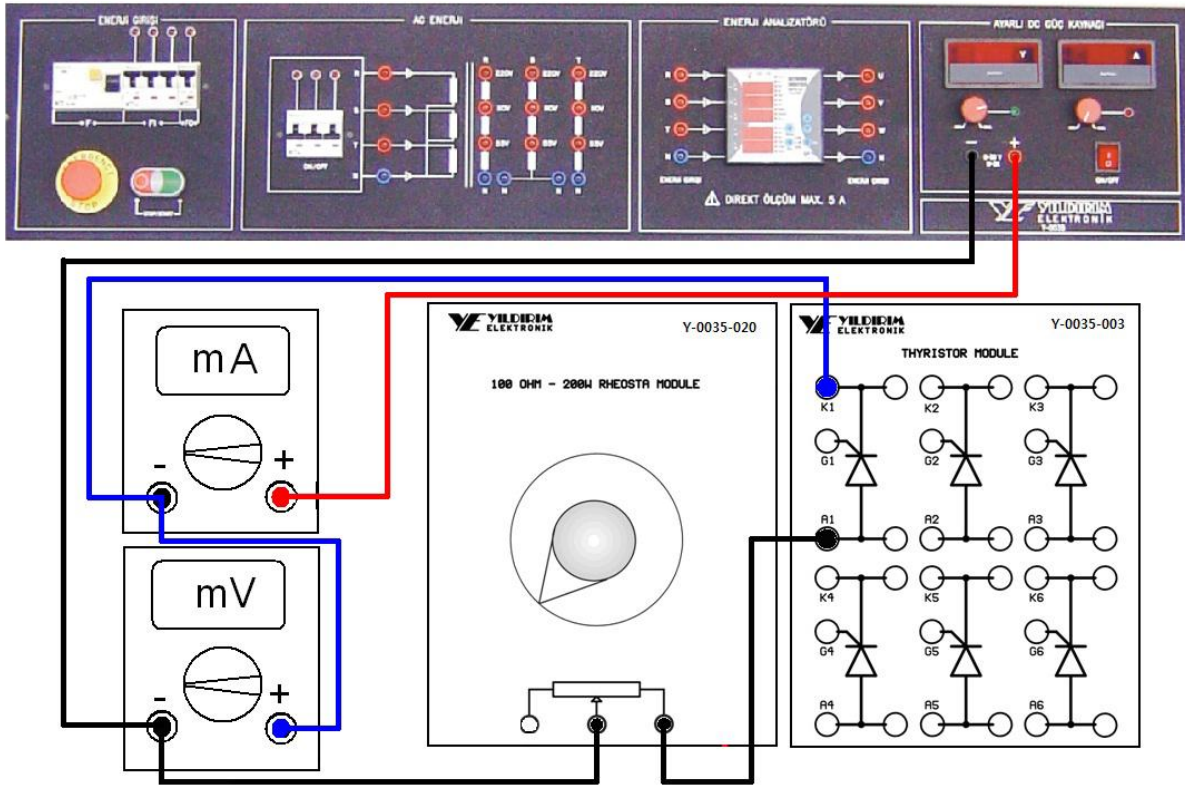
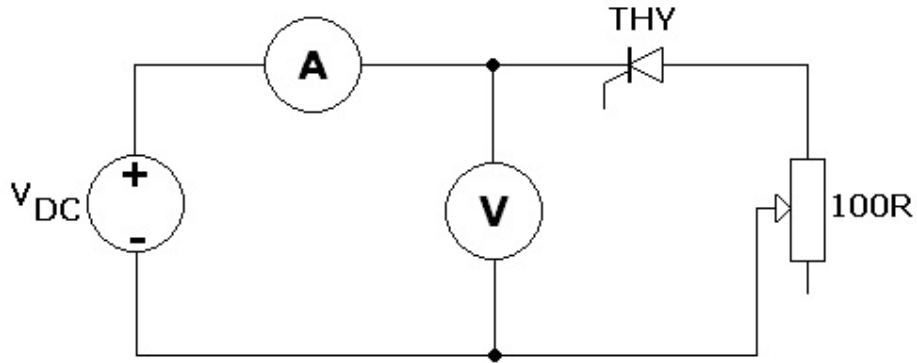
Tristör Gerilimi (V_{DC})	Tristör Akımı (I_{th})	Tristör Üzerine Düşen Gerilim (E_{th})
0		
5		
10		
15		
20		
25		
30		

4. Bu tablodan sonuç olarak ne çıkarılır?

Güç Elektronikğinde Kullanılan Anahtarlama Elemanları

3.2.2. Geri Bloklama Testi

1. Devre bağlantılarını şekildeki gibi yapınız.



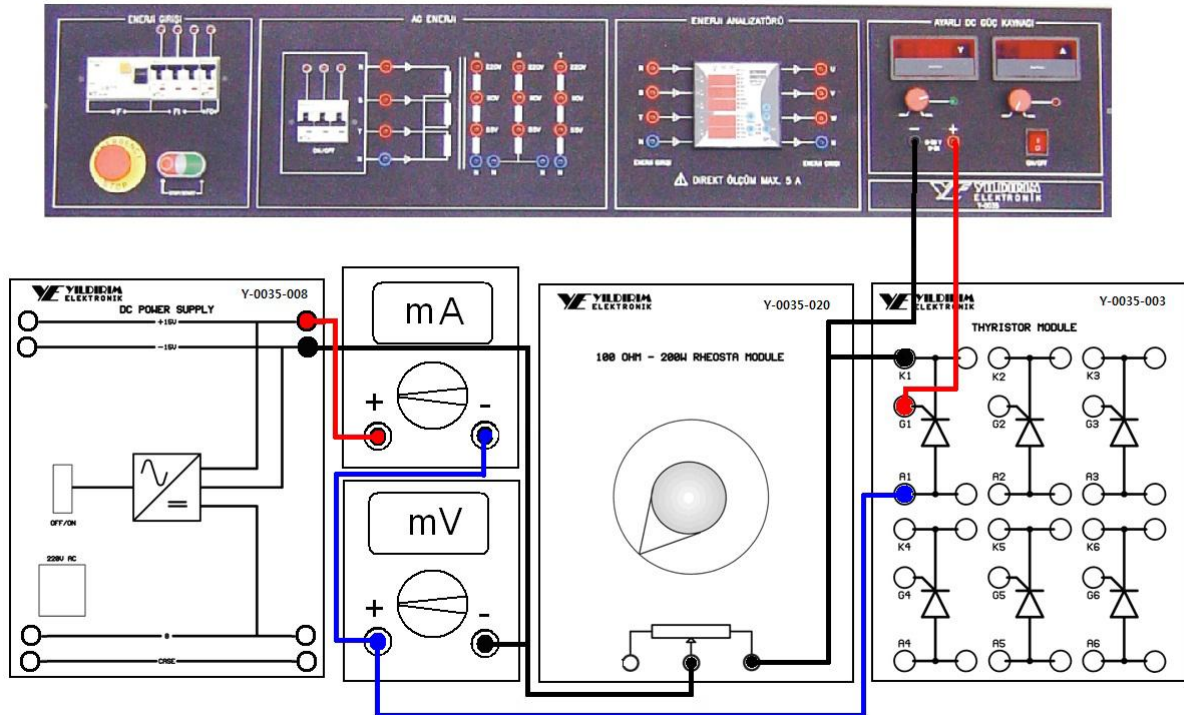
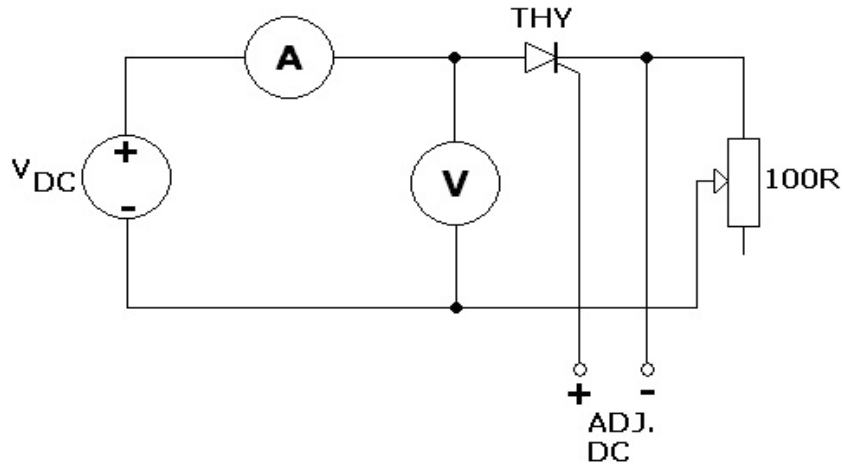
2. DC ayarlı güç kaynağını min. konuma getiriniz. Yukarıdaki devreyi kurduktan sonra enerji veriniz.
3. Gerilimi 0 – 30 V aralığında değiştiriniz ve tabloyu doldurunuz.
4. Bu tablodan sonuç olarak ne çıkarılır?

Güç Elektronikinde Kullanılan Anahtarlama Elemanları

Tristör Gerilimi (V_{DC})	Tristör Akımı (I_{th})	Tristör Üzerine Düşen Gerilim (E_{th})
0		
5		
10		
15		
20		
25		
30		

3.2.3. Tristörün İleri Kırılma Gerilimi

1. Devre bağlantılarını şekildeki gibi yapınız.



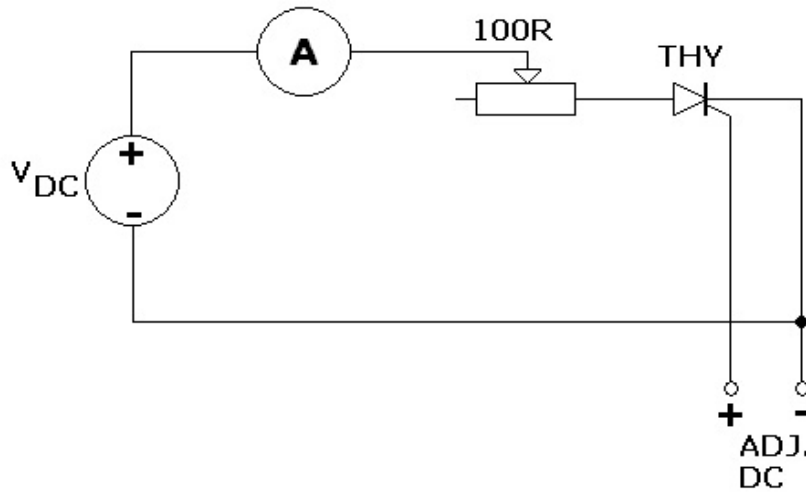
Güç Elektronikğinde Kullanılan Anahtarlama Elemanları

2. Tristörün kapı terminalini, gösterildiği şekilde bağlayın. Şekilde görülen tristörün kapı sürücü devresindeki potansiyometreyi maksimum dirence ayarlayınız. Devrede görülen kaynağı 15 V 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.
3. Tristör iletme geçtiği zaman ise uygulanan gerilim yüke aktarılacak ve tristörün üzerinde ileri iletim voltajı gözlenecektir. Tristörü bu koşullarda iletme geçiren kapı akımı maksimum kapı akımıdır. Tristör bundan daha düşük kapı akımlarıyla da iletme sokulabilir. Şimdi kapı akımını tipik bir değere ayarlayarak, osiloskobun Y1 kanalından tristörün iletme geçtiği anı gözlemleyiniz. Bu andaki kapı akımını (I_g) ve giriş gerilimini not ediniz. Tristörün bu sabit kapı akımı altında iletme 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 çizin.

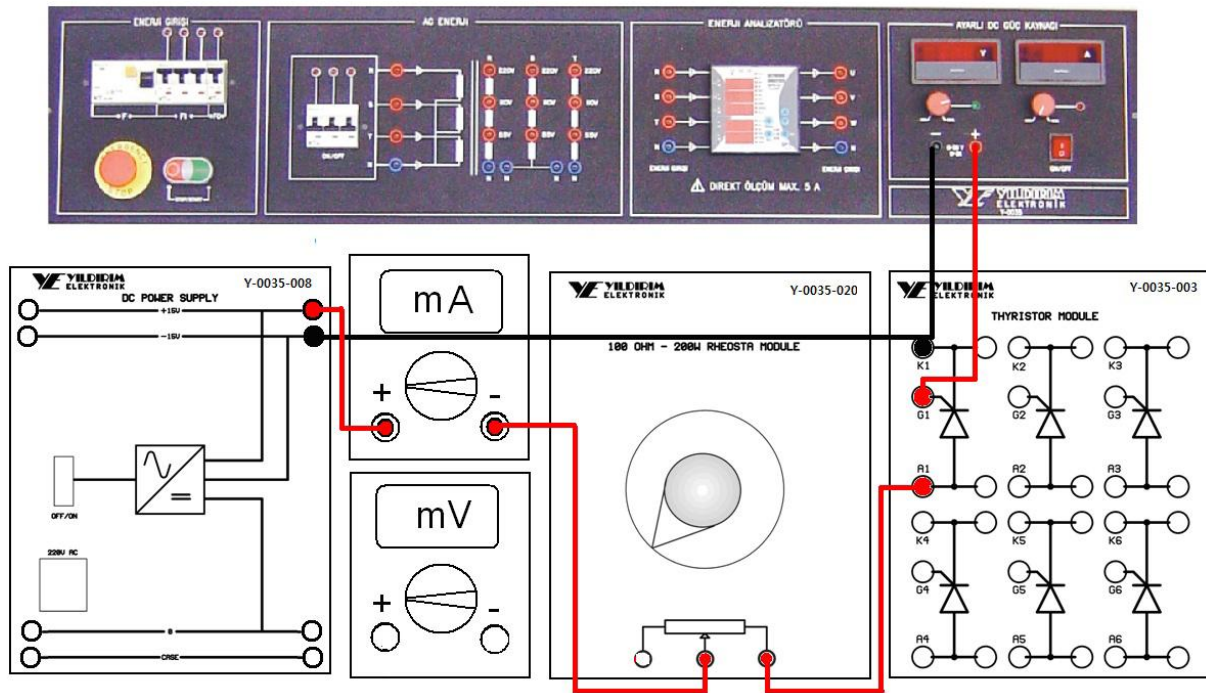
Tristör İleri Kırılma Gerilimi (V_{BO})	Tristör Kapı Akımı (I_g)

3.2.3. İleri İletim Testi

1. Devre bağlantılarını şekildeki gibi yapınız.



Güç Elektroniklerinde Kullanılan Anahtarlama Elemanları

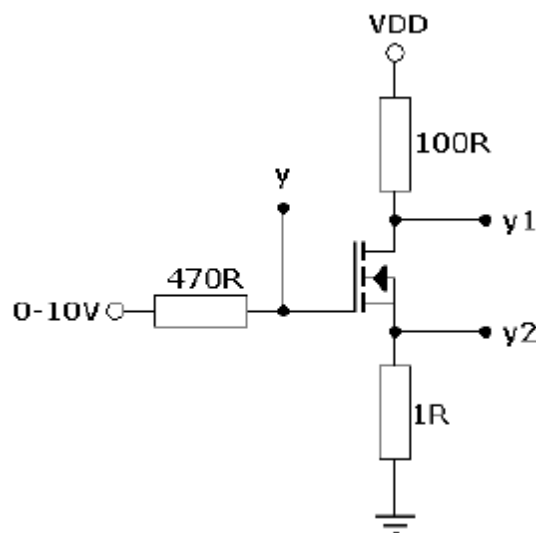


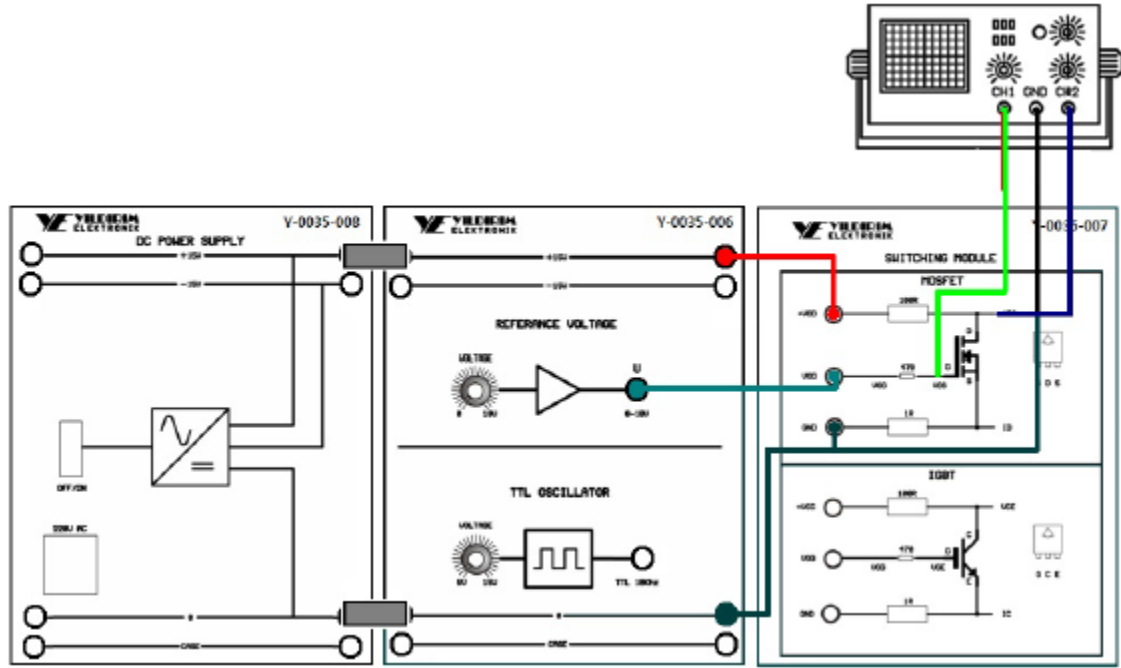
2. Bir önceki deney devresi üzerinde elde ettiğiniz tecrübeye göre, kapı akımını tipik bir değere ayarlayarak farklı giriş gerilimlerine göre elde ettiğiniz tristör akım ve gerilimlerini not ediniz.
3. Değerleri tablo haline getirerek tristör akımının tristör voltajına göre değişimini çiziniz.
4. Tristörün üzerinden geçen akımı 200 mA seviyesine ayarlayınız. Yük olarak kullanılan reosta ile ayarlayarak akımı yavaş yavaş arttırınız.
5. Tristörün ileri iletim durumunda ileri bloklama durumuna geçtiği andaki akımı not ediniz. Bu akıma tristörün tutma akımı denir.

3.3. MOSFET Deneyleri

3.3.1. MOSFET Açılma Testi

1. Devreyi aşağıdaki gibi kurunuz.



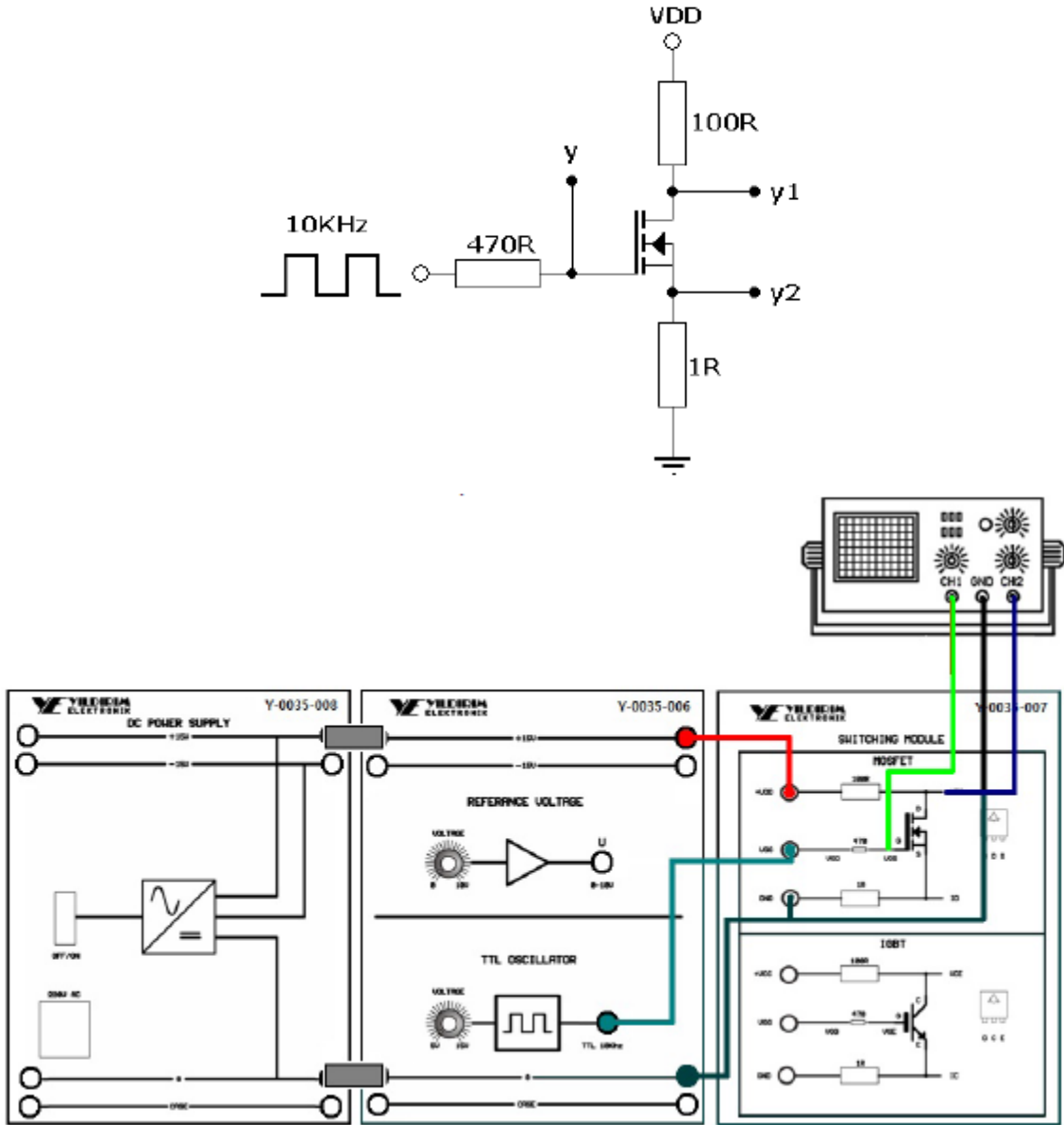


2. Gerekli bağlantıları yaptıktan sonra devreye gerilim veriniz.
3. Gate gerilimine yavaş yavaş artırarak osiloskoptan çıkış gerilimini izleyiniz. Bu anda çıkış gerilimi besleme gerilimi olan 15 V civarında olmalıdır.
4. Gate gerilimi 3 V civarına gelince çıkış gerilimi yavaşça azalmaya başlayacaktır.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

Gate Gerilimi (V_{GG})	Çıkış Gerilimi (V_{OUT})
0	
1	
2	
3	
3.3	
3.6	
3.8	
4	
4.1	
4.2	
4.3	
5	
8	
10	

3.3.2. MOSFET Anahtarlama Testi

1. Devreyi aşağıdaki gibi kurunuz.



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

