

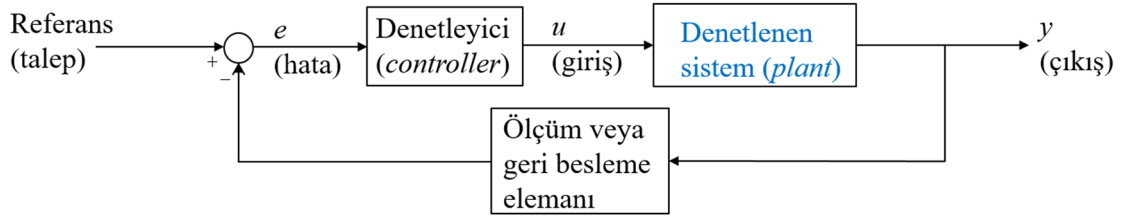
GİRİŞ

GÜÇ ELEKTRONİĞİNİN KULLANIM YERLERİ

Günümüzde her ne kadar dijital elektronik analog elektronikten çok daha ağırlıklı olarak kullanılsa da, çoğunda vazgeçilmez bir öge güç elektroniği devreleridir. Güç elektroniği ağırlıklı olarak analog elektronik görünse de genellikle dijital elektronik de içerir. Başlıca 2 kullanım yeri vardır.

1. Kontrol Sistemlerinde Karar Verilen Sistem Girişini Gerçekleştirmek

Kontrol sistemlerinin hepsi olmasa da birçoğu şu yapıdadır:



Referans, çıkışta istenen veya istenenle orantılı bir sinyaldir. Ölçüm veya geri besleme ile gerçek çıkış (y) arasındaki oranla aynı orana sahip olarak uygulanır. Geri besleme ile arasındaki farka hata ($e = error$) sinyali denir. Hata artı ise çıkış istenen değerden küçük demektir. Hatanın sıfıra gitmesi istenir. Denetleyici mesela PID denetleyici olabilir. Denetlenen sistemi, girişi (u) artırıldıkça çıkışı artan yapıda varsayarsak, hata artı ise denetleyici tarafından u artırılır. Böylece y artar, hata sıfıra yaklaşır. Hata eksi ise çıkış istenenden büyük demektir ve denetleyici tarafından u azaltılır. Böylece y azalır, hata yine sıfıra yaklaşır. Hata sıfır ise çıkış tam istenen değerde demektir ve denetleyici u değerini sabit tutmaya çalışır.

Fakat bu anlatımda gözden kaçan bir durum vardır. Denetleyici genellikle mikroişlemci yazılımı veya opamp devresi gibi zayıf akımlı sinyal üreten bir devredir. Denetlenen sistem ise muhtemelen çok daha büyük akım ve güç gerektirir. Öyleyse denetleyici ile denetlenen sistem arasında bir güç elektroniği devresi gerekir.



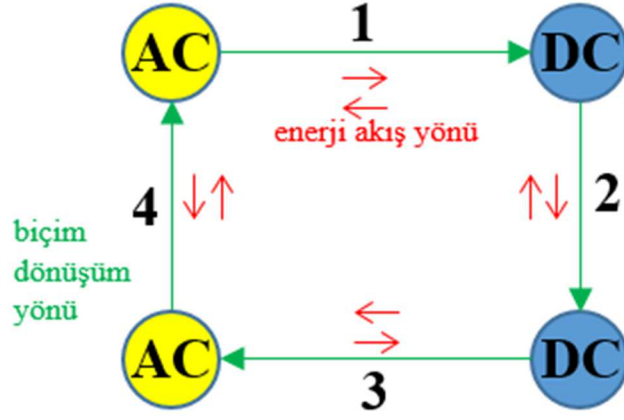
Yani aslında denetleyicinin ürettiği sinyal sistem girişi (u) değil, sisteme uygulanması istenen giriş (u^*) olup genellikle bilgi sinyalidir. Sisteme uygulanan asıl giriş (u), sürücü de denilen bir güç elektroniği devresi tarafından istenene olabildiğince yakın şekilde gerçekleştirilir.

Denetlenen sistemi devlete benzetirsek; denetleyici hükümete benzer, güç elektroniği devresi de devletin polis veya asker gibi güvenlik teşkilatına benzer. Bu benzetmede ölçüm, gizli veya açık istihbarat akışına, talep ise milli iradeye benzetilebilir. Çıkış ise gerçekte yaşanan durum gibi düşünülebilir. Tabii açıkça hissedilmeyen durum değişkenleri (x) de olabilir.

2. Elektrik Enerjisinin Sunum Biçimini Değiştirmek

Elektrik enerjisi en yaygın olarak DC ya da AC biçimlerle sunulur. DC biçim akım ya da gerilim değeriyle tanımlanırken, AC biçim akım ya da gerilimin genlik, faz ve frekans değerleriyle tanımlanır. Bir biçimden diğer

bir biçime (aynı türün tanım değerleri farklı olana da olabilir) dönüştürme işlemi çevirici (*converter*) denilen güç elektroniği sistemleriyle yapılır. Trafolar ise bunu AC için sadece aynı frekans ve fazla sınırlı olarak yapabilir ama bu dönüşüm güç elektroniği kapsamında değildir. Bazı elektromekanik yöntemlerle oldukça zahmetli ve kayıplı bir şekilde dönüşüm de mümkündür ama bunlar da güç elektroniği kapsamında değildir. Güç elektroniği bu dönüşümleri çok az kayıpla yapmayı hedefler. Güç elektroniğindeki başlıca çevirme işlemleri şöyle bir şekil üzerinde gösterilebilir:



Bu 4 dönüşümün her biri şu isimlerle anılırlar:

- 1) Doğrultucu, redresör, AC/DC çevirici (*AC/DC converter, rectifier*)
- 2) DC kıyıcı (*DC chopper*), DC ayarlayıcı, DC/DC çevirici (*DC/DC converter*)
- 3) Evirici (inverter), DC/AC çevirici (*DC/AC converter*), ondulor
- 4) Doğrudan frekans dönüştürücüsü (*DFC, cycloconverter*), AC kıyıcı (*AC chopper*). Ayrıca matris çeviriciler bu gruptadır.

Şekildeki büyük oklar biçim dönüşüm yönleridir. Enerji akış yönü ise kısa sürelerle tersi yönde de olabilir.

BAŞLICA GÜÇ KUMANDA YÖNTEMLERİ

- 1) Elle (*manual*) anahtarlama
- 2) Değişken direnç ile (dc)
- 3) Değişken reaktans ile (ac)
- 4) Varyak ile
- 5) Döner makineler (motor-jeneratör setleri) ile
- 6) Gaz tüpleriyle (lamba diyot, lamba triyot vb)
- 7) Yarıiletken elektronik elemanlarla

Bunlardan yalnızca sonuncusu güç elektroniği dersimizin kapsamındadır. 6. madde de elektrondir ama günümüzde güç amacıyla kullanılmamaktadır.

GÜÇ ELEKTRONİĞİNDE KULLANILAN BAŞLICA YARIİLETKEN ELEMANLAR

Yarıiletken elektronik elemanlar doğrudan gücü taşıma amaçlı olabileceği gibi gücü kumanda eden devrelerde de kullanılabilirler. Bunları başlıca 3 grup altında listeleyebiliriz.

1. Diyotlar

Normal diyotlar

Güç diyotları

Zener diyotlar

Schottky engel (*barrier*) diyotları

Hızlı diyotlar

Işık yayan diyotlar (LED'ler)

Fotodiyotlar

...

2. Transistörler

BJT

FET

JFET

MOSFET

UJT

3. PNPN elemanlar ve diğerleri

Tristör (SCR = Silicon Controlled Rectifier)

Triyak

Diyak

IGBT

GTO (Gate Turn-Off thyristor)

PUT (Proramable UJT)

SUS (*Silicon Unilateral Switch*)

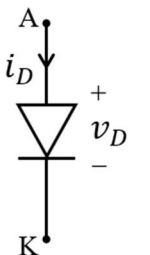
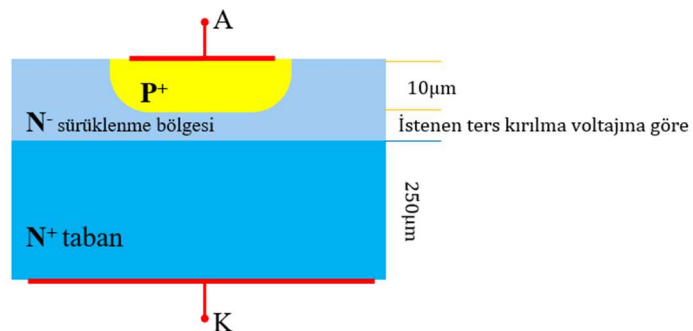
SBS (*Silicon Bilateral Switch*)

SCS (*Silicon Controlled Switch*)

...

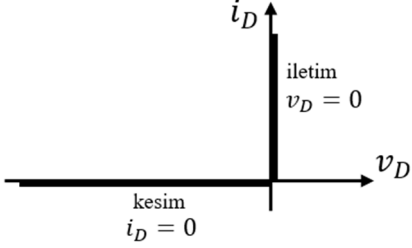
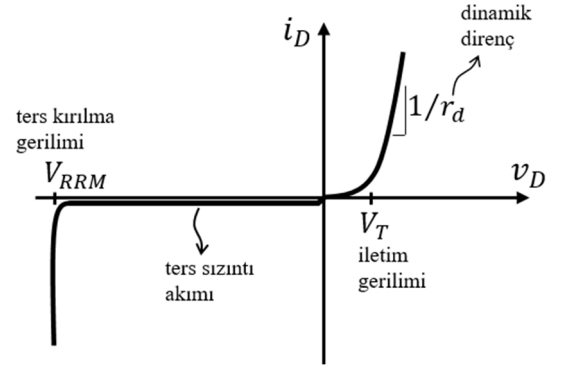
Güç Diyodu

N⁺ taban diyoda düşük dirençli bir kalınlık sağlar. N- bölgesi ise istenen ters kırılma gerilimine uygun kalınlıkta yapılır.



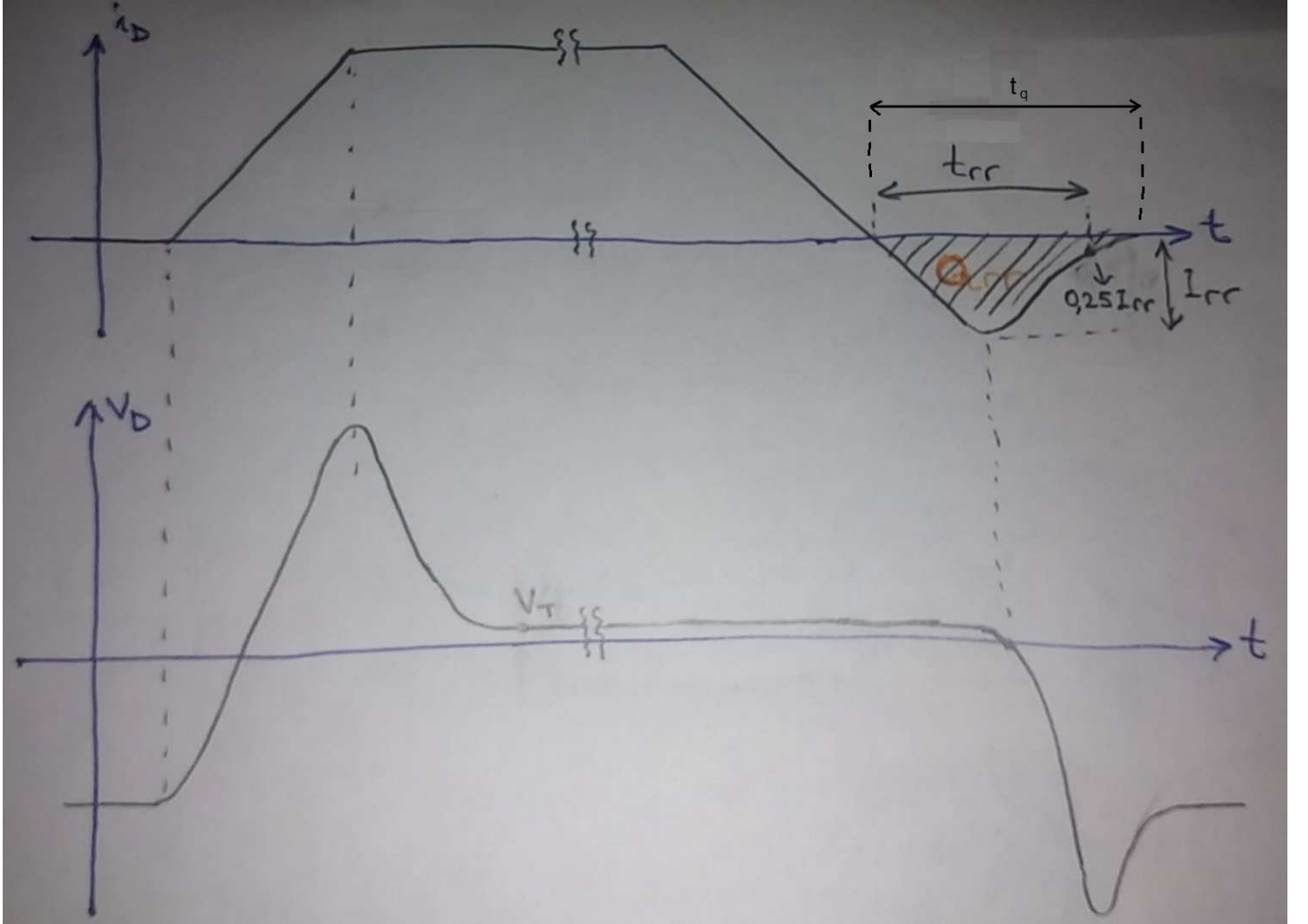
Diyodun akım-gerilim karakteristiği yandaki gibidir. r_d çok küçük olduğundan, iletimdeki akım değişimine göre v_d çok az değişir, yaklaşık V_T civarında kalır (Silisyum diyotlarda 0,6-0,7 V, germanyum diyotlarda 0,2-0,3 V civarı).

Ters kırılma geriliminde (*Maximum Recurrent Reverse Voltage*) diyot zener bölgesindedir. Zener bölgesinde akım dış devre tarafından belirlenir. Akım aşırı yükselmemişse, ters gerilim azalınca diyot normal çalışmasına döner.



İdealleştirilmiş diyot karakteristiği ise soldaki şekildeki gibi olup zener bölgesi olmadığı düşünülür. İletimdeki akım ve kesimdeki gerilim dış devre tarafından belirlenir.

Diyotun İletime ve Kesime Geçişi



Şekillerin sol tarafındaki değişimler ilettime geçişi, sağ tarafındakiler kesime gidişi göstermektedir.

Hem ilettime hem kesime geçişlerde akımdaki değişim (eğim) belirli sınırları aşamaz.

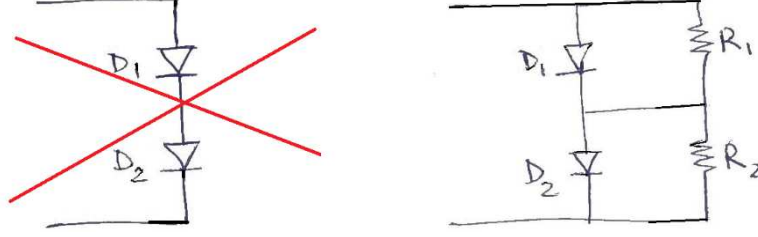
İletime geçişte artı, kesime gidişte eksi yönde büyük diyot gerilimi görülür. Diyot ters gerilimi eksi yöndeki bu gerilime dayanabilmelidir. Bu yüzden devre analizine göre karşılaşılabilecek en büyük ters gerilimin 1,5-2 katına dayanabilecek diyot seçilmelidir. Koruma devresi kullanılıyorsa bu güvenlik payı azaltılabilir. Her iki yöndeki büyük gerilimlerin diğer elemanlara zarar vermemesi için de tedbir alınmalıdır.

Kesime gidişte diyot akımı aniden kesilmez. Eklem bölgesinde taşıyıcılar olduğu sürece akım bir müddet ters yönde de devam eder. Bu sürenin belirgin kısmına “ters toparlanma süresi (t_{rr} : *reverse recovery time*)” denir. Eklem bölgesinin taşıyıcılardan tamamen boşalana kadarki süre ise t_q ile gösterilir. Bu sürede ters yöne geçen toplam yüke ters toparlanma yükü (Q_{rr}) denir.

Bu grafikler, anahtar olarak kullanılan tüm yarı iletken elemanlarda benzerdir.

Diyotların Seri Bağlanması

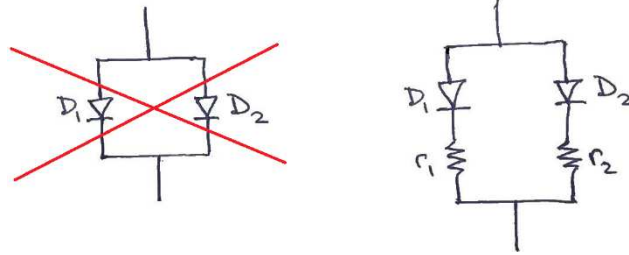
Elimizde sadece ters dayanma gerilimi, devrede karşılaşılabileceklerden küçük olan diyotlar varsa bunları seri bağlayarak daha büyük ters gerilimlere dayanabilmesi sağlanabilir.



Ama eğer bunları yukarıda soldaki gibi bağlarsak bu diyotların kesimdeki sonsuza yakın belirsiz iç dirençlerinin oranına göre gerilim paylaşımına güvenemeyiz. Önce biri sonra diğeri dayanamayıp bozulabilir. Bu yüzden bir gerilim bölücüyle kendi belirlediğimiz orana göre gerilimi paylaşmalarını sağlamalıyız, yukarıda sağdaki şekilde görüldüğü gibi. Burada R_1 ve R_2 direnç değerleri, diyotların kesimdeki iç dirençlerine göre oldukça küçük, ama üzerlerinden geçen akım ihmal edilebilecek kadar büyük olmalıdır.

Diyotların Paralel Bağlanması

Elimizde sadece dayanma akımı, devrede karşılaşılabileceklerden küçük olan diyotlar varsa bunları paralel bağlayarak daha büyük akımlara dayanabilmesi sağlanabilir.



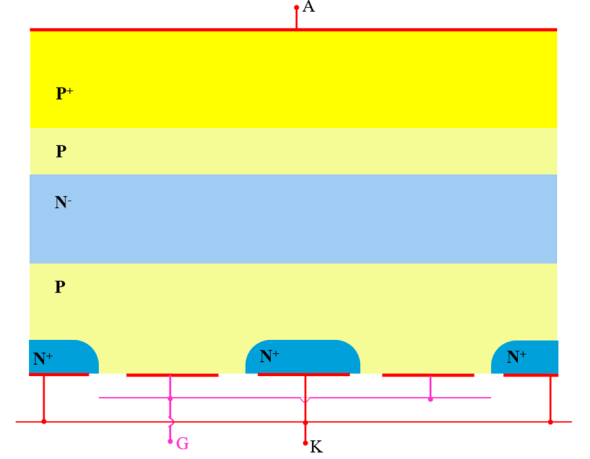
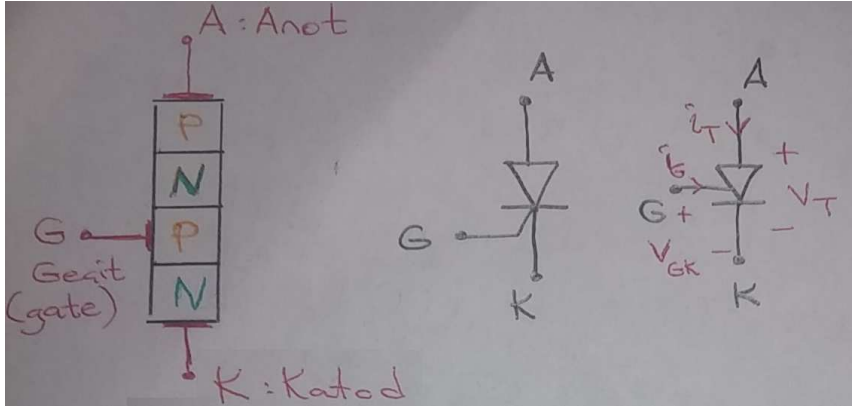
Ama eğer bunları yukarıda soldaki gibi bağlarsak bu diyotların iletimdeki sifıra yakın belirsiz iç dirençlerinin oranına göre akım paylaşımına güvenemeyiz. Önce biri sonra diğeri dayanamayıp yanabilir. Bu yüzden diyotlara birer küçük seri direnç ekleyerek kendi belirlediğimiz orana göre akımı paylaşmalarını sağlamalıyız, yukarıda sağdaki şekilde görüldüğü gibi. Bu dirençlerin bir faydası da, iletim gerilimi küçük olan diyodun erken iletme geçip, diğerrinin iletme geçmesine engel olmasına izin vermemesidir. Çünkü direnç üzerindeki gerilimle birlikte, geciken diyodun iletme geçmesine yetecek gerilim olacaktır.

Burada r_1 ve r_2 direnç değerleri, diyotların iletimdeki iç dirençlerine göre büyük, ama üzerlerindeki güç kaybı ihmal edilebilecek kadar küçük olmalıdır.

Diyotların seri ya da paralel bağlanması, ancak zorluk durumunda düşünülmelidir. Uygun tek bir diyot çok daha kullanışlıdır.

Tristör (SCR = Silicon Controlled Rectifier)

Bir PNPN elemandır. Katkı bölgeleri kabaca aşağıda soldaki gibidir. Aşağıda sağdaki ise daha ayrıntılı yapıdır. Çok sayıda katot bölgesi iletkenle birleştirilmiştir. Çok sayıda geçit elektrotu da iletkenle birleştirilmiştir.



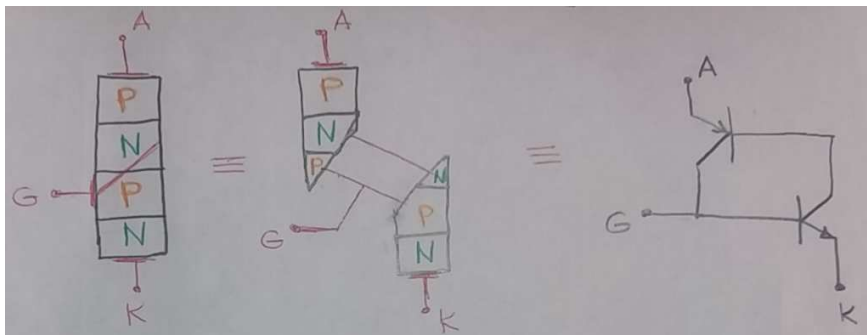
Anot-katod arası ters kutuplanmış ($v_{AK} < 0$) ise alt ve üstteki PN eklemeleri ters kutuplanır, bunların taşıyıcılardan boşalmış bölgeleri genişler ve taşıyıcıları olmadığı için anot-katod arası bir akım geçemez.

Anot-katod arası doğru kutuplanmış ($v_{AK} > 0$) ise ortadaki PN eklemi ters kutuplanır, bunun taşıyıcılardan boşalmış bölgesi genişler ve taşıyıcı olmadığı için anot-katod arası bir akım yine geçemez.

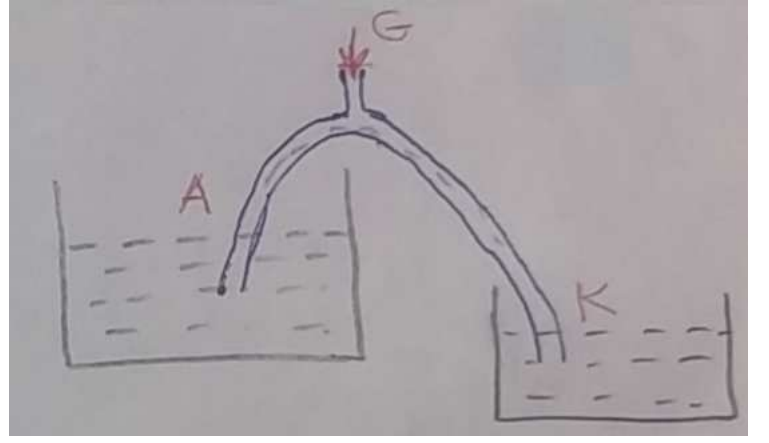
Aslında ters kutuplanmış PN eklemi N'den P'ye doğru, doğru kutuplanmış PN eklemi P'den N'ye doğru olan akımdan bile daha iyi akım geçirir eğer o eklem bölgesinde taşıyıcılar varsa. Mesela güneş pilleri aslında bir tür diyottur, akım P bölgesinden çıkar; çünkü eklem bölgesinde ışık etkisiyle serbest elektron ve hol çiftlerinin ayrışmasıyla taşıyıcılar oluşur ve holler P bölgesine, serbest elektronlar N bölgesine kolayca geçerler. Mesela BJT transistörün ters kutuplanmış C-B arasında beyz boştayken akım geçmese de, B-E akımı uygulanınca bu akımın taşıyıcıları ters kutuplanmış C-B eklem bölgesine de nüfuz ederler ve çok iyi bir kollektör akımı geçmeye başlar.

Tristörlerde de geçitten katoda doğru kısa süreli de olsa bir akım uygulanırsa, bu akımın taşıyıcıları ters kutuplanmış orta eklem bölgesine de nüfuz ederler ve anottan katoda akım geçmeye başlar. Hatta geçit akımı kesilse bile orta eklem sürekli gelen taşıyıcılar nedeniyle anot-katod arası akım devam eder, dış devre kesime zorlayana kadar. Dış devre zorlamasıyla anot-katod arası kesime giderse, sonrasında anot-katod arası doğru kutuplanınca yine geçitten kısa süreli de olsa bir akım uygulanmadıkça anot-katod arası kesimde kalır. Anot-katod akımını başlatmak için geçitten katoda akım uygulanmasına "ateşleme" veya "tetikleme" denir.

Tristörün bu çalışması iki transistör benzetimiyle şöyle açıklanabilir: Şekilde görüldüğü gibi tristör, biri PNP diğeri NPN iki transistörün sırt sırta bağlanmış (birinin kollektörü diğerinin beyzinde) diye düşünülebilir. Anot-katod arası doğru kutuplandığında her iki BJT'nin de kollektör-beyz arası ters kutuplu olduğundan beyz-emiter araları birer diyot gibi olmasına rağmen akım geçirmezler. Ama eğer kısa süreli de olsa geçitten katoda, yani NPN transistörün beyzinden emiterine akım uygulanırsa, NPN iletme geçer. Bunun kollektör akımı PNP'nin beyz akımı olduğu için PNP de iletme geçer. PNP'nin kollektör akımı da NPN'in beyz akımı olduğu için geçitten verilen akım kesilse de her iki transistör de iletme devam eder, dış devre kesime zorlayana kadar.



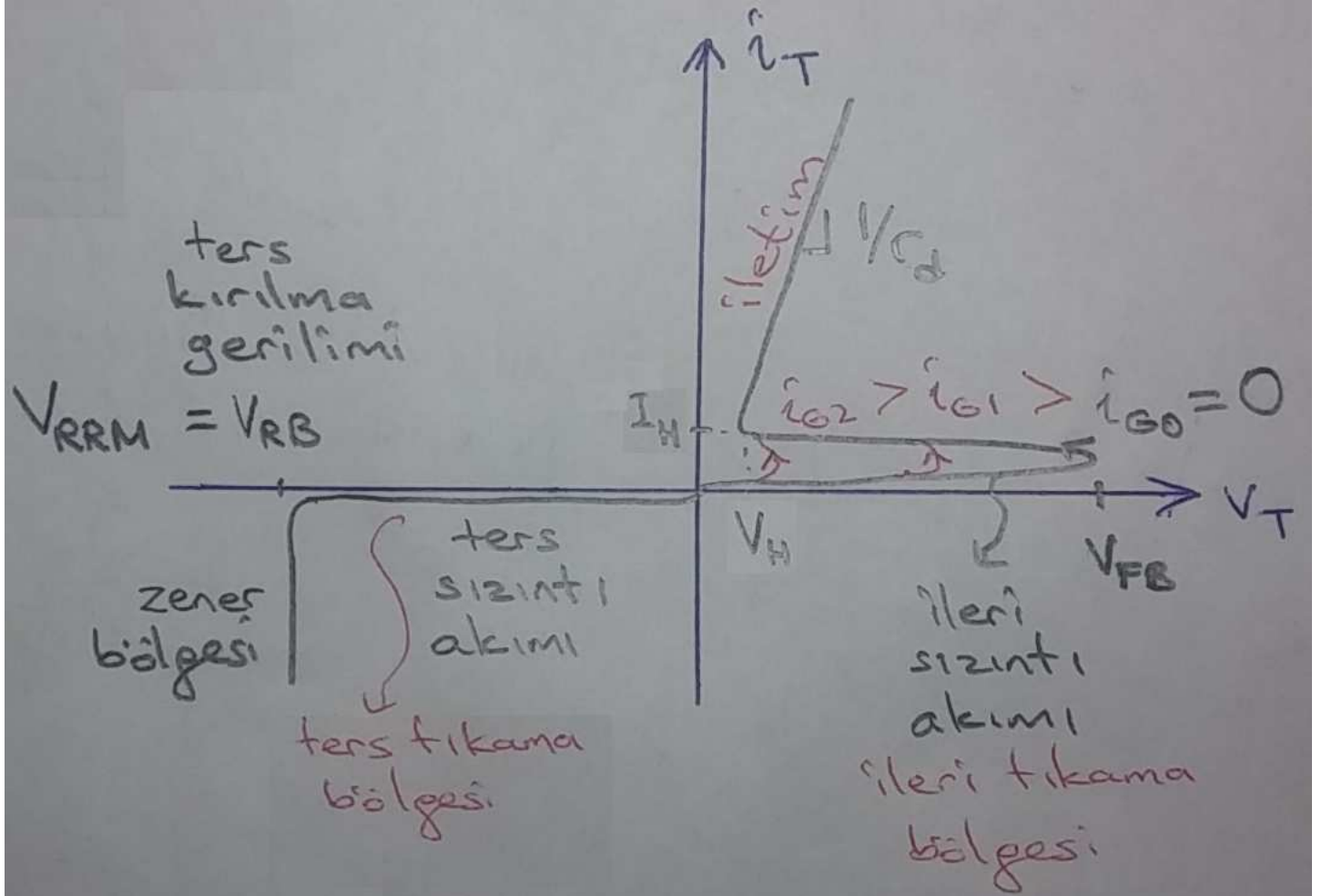
Tristörün çalışması, şekildeki gibi hidrolik bir sisteme de benzetilebilir: Anodu temsilen yukarıda (yüksek basınçta veya yüksek kütleli potansiyelde) bir sıvı kabı ve katodu temsilen aşağıda (alçak basınçta veya alçak kütleli potansiyelde) bir sıvı kabı düşünelim. İçi boş bir hortumun bir ucunu yüksekteki, bir ucunu alçaktaki kaba daldırırsak, kaplar arasında akım geçmez, potansiyel farkına rağmen. Bunun nedeni, elektroniktekiyle ortak terminoloji ile ifade edilirse, arada taşıyıcı bulunmamasıdır.



Fakat bir şekilde hortum sıvıyla doldurulup havası boşaltılırsa (araya yeterince taşıyıcı enjekte edilirse), mesela hortumun tepe noktasında geçidi temsilen açılan bir delikten sıvı enjekte edilip iki taraftan havanın dışarı çıkması sağlanırsa, yüksekteki kaptan alçak potansiyeldeki kaba doğru akış başlar. Delikten verilen akış kesilse bile (hava girişine izin verilmeyen bir şekilde) akış devam eder, basınç veya potansiyel farkı akışı kesime zorlayana kadar.

Tristör Karakteristiği

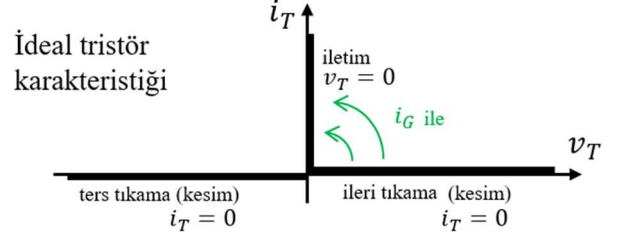
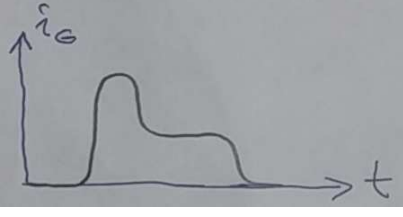
Şekildeki gibidir.



Ters kutuplu tristör ters kutuplu diyot gibi davranır. Ters kırılma gerilimine (V_{RRM}) ulaşırsa zener bölgesine geçer ve akım dış devre tarafından belirlenir. Akım tehlikeli dereceye ulaşmadan ters gerilim azaltılırsa sadece ters sızıntı akımı geçer.

Tristör doğru kutupluysen fakat iletme geçirilmemişken de bir sızıntı akımı (ileri sızıntı akımı) geçer. Doğru yöndeki gerilim, ileri devrilme gerilimine (V_{FB}) ulaşırsa başlayan akım, tristörü iletme geçirir. Eğer küçük bir geçit akımı varsa V_{FB} 'den daha küçük gerilimlerde iletim başlar. Yeterince büyük bir geçit akımı ile $v_T > V_H$

olan herhangi bir doğru kutuplama altında iletme geçer. Buradaki yeterlilik için geçit akımıyla gönderilen yük miktarı önemlidir. Daha hızlı iletme geçiş için geçit akımının aşağıda soldaki şekildeki gibi ilk anda büyük sonra normal bir değerde uygulanması, sonra kesilmesi tavsiye edilir.



Tristörün iletme geçiş ve kesime gidişte zamana karşı akım ve gerilim eğrileri, güç diyotlarınıninkilere benzerdir. Farklı olarak, kesimde t_q süresi beklenmeden yeniden $v_T > 0$ yapılırsa geçit akımı olmadan tristör iletme geçer.

Tristörün İletime Geçmesi

$v_T > 0$ iken, aşağıdaki durumların her birinde tristör iletme geçer:

- 1) $v_T = V_{FB}$ olursa tristör ileri devrilerek iletme geçer.
- 2) dv_T/dt kritik bir değeri geçerse kapasitif akım ile iletme geçer.
- 3) Isı etkisiyle eklem bölgesinde yeterli yoğunlukta taşıyıcılar oluşursa iletme geçer.
- 4) Geçit akımı etkisiyle, ya da ışığa duyarlı tristörler (*LASCR = Light Activated SCR*) ışık etkisiyle eklem bölgesinde yeterli yoğunlukta taşıyıcıların oluşmasıyla iletme geçer.

Sadece 4. seçenek tristörün istenen kontrollü kullanımınıdır. Diğer yollarla iletme geçmemesi için gerekli önlemler alınmalıdır.

Tristörün Kesime Girmesi

İletimdeki bir tristör, aşağıdaki durumların her birinde kesime gider:

- 1) Anot-katot arası kısa devre edilirse
- 2) Anot akımı, daha uygun başka bir yol bulursa
- 3) $v_T < 0$ yapılırsa (ters kutuplanırsa)
- 4) $i_T < I_H$ (tutma akımından daha küçük) yapılırsa

Aslında bu 4 durum $v_T < V_H$ olursa diye özetlenebilir.

Tristörün Kayıpları

1. İletim Kayıpları:

$$P_{itt} = \frac{1}{T_0} \int_{iletim} v_T i_T dt$$

formülü ile güç cinsinden hesaplanır. Bir periyot (T_0) içindeki iletim süresi ile hesaplanır. $v_T = V_H + r_d i_T$ yerine konursa

$$P_{ilt} = V_H \left(\frac{1}{T_0} \int_{iletim} i_T dt \right) + r_d \left(\frac{1}{T_0} \int_{iletim} i_T^2 dt \right) = P_{ilt} = V_H I_T^{dc} + r_d (I_T^{rms})^2$$

bulunur. Yani iletim kayıpları, akımın hem dc, hem rms değerine bağlıdır.

2. Kesimdeki Kayıplar:

$$P_{kes} = \frac{1}{T_0} \int_{kesim} v_T i_T dt$$

formülü ile güç cinsinden hesaplanır. Buradaki i_T ileri ya da ters yöndeki sızıntı akımıdır.

3. Denetim Kayıpları:

$$P_{den} = \frac{1}{T_0} \int_{i_G} v_{GK} i_G dt$$

süresince

formülü ile güç cinsinden hesaplanır.

4. Anahtarlama Kayıpları:

İletim kayıplarına yakın bir kayıptır. İletime geçerken akım sıfırdan itibaren büyük bir değere geçerken gerilim büyük bir değerden sıfıra yakın bir değere düşer. Akım ve gerilimin çarpımı ise iki uçta küçük fakat arada bir yerlerde büyüktür. Kesime giderken de gerilim sıfıra yakın bir değerden itibaren büyük bir değere geçerken akım büyük bir değerden sıfıra düşer. Akım ve gerilimin çarpımı ise yine iki uçta küçük fakat arada bir yerlerde büyüktür. Anahtarlama anlarında artan bu güç kaybına anahtarlama kaybı denir.

Anahtar olarak kullanılan bütün elemanlarda (manuel anahtarlar dahil) kaçınılmaz olarak ortaya çıkar. Kaçınmanın çaresi ancak sıfır gerilim altında ya da sıfır akım altında anahtarlama, ki bu ilerdeki bir konumuzdur. Anahtarlama kaybı, anahtar olarak kullanılan elemanın çalışma (anahtarlama) frekansını (mesela clock frekansını) sınırlandıran başlıca etkidir.

Bu kayıplar tüm denetimli anahtarlarda benzer biçimlerde bulunur.

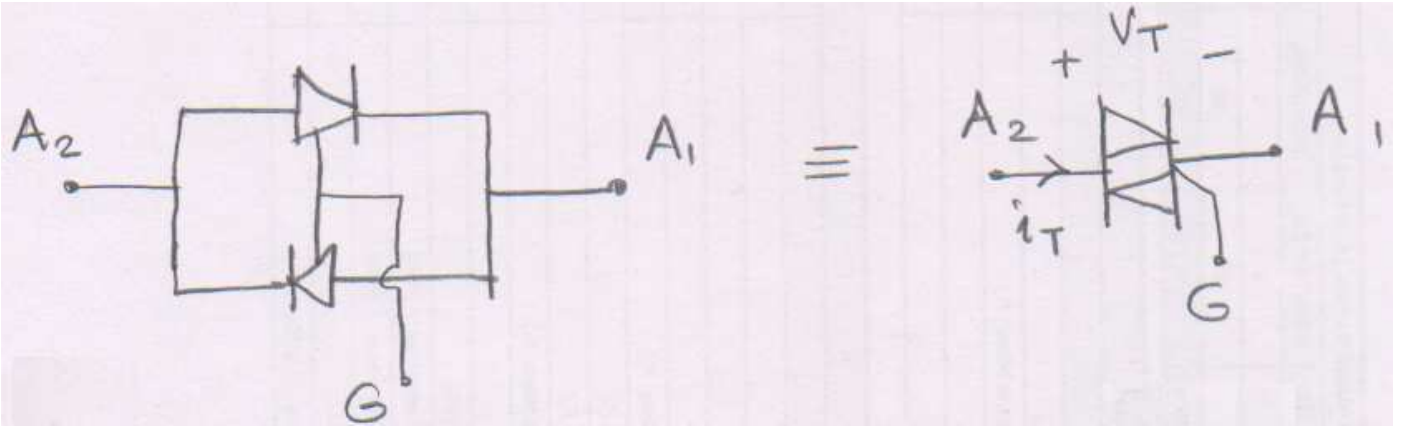
Tristör Seçimi

Gerilim yönünden; ters kırılma, ileri devrilme gerilimleri ve dv_T/dt kritik değeri, devredeki çalışma şartlarına uygun seçilmelidir. Güvenlik için devrede karşılaşılabilecek en büyük değerlerin 1,5-2 katına dayanıklı eleman seçilmelidir. Koruma devresi varsa güvenlik payı azaltılabilir.

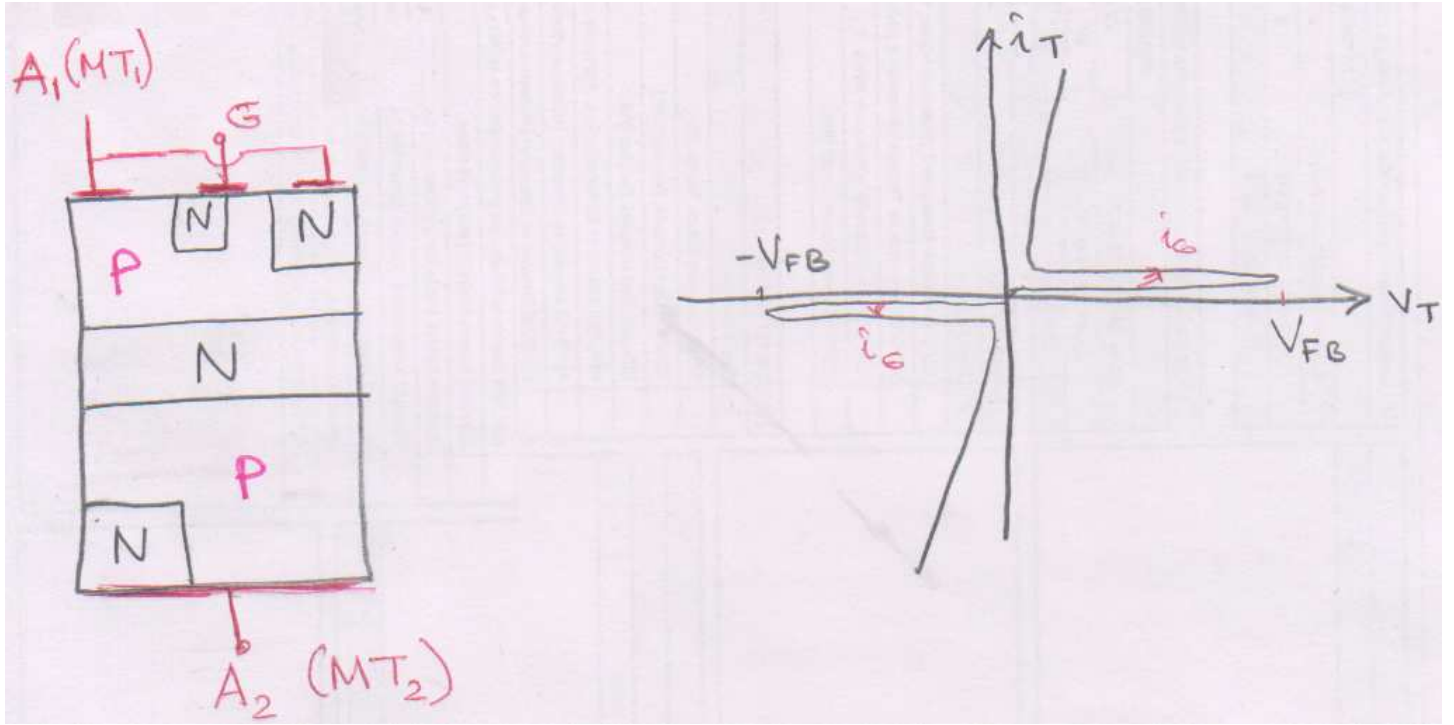
Akım yönünden; hem dc hem rms değeri hem de kısa süreli tepe değeri önemlidir. Kısa süreli tepe değeri yüksek kullanılırken soğuması için uygun bir süre de düşük akımla kullanılmalıdır. Ayrıca di_T/dt için de aşılması gereken kritik bir değer vardır. Çünkü iletme geçişte anot-katod arasında önce ince bir kanal oluşur ve bu kanal zamanla genişler. Kanal henüz genişlemeden akım çok yükselirse kanal yanabilir.

Triyak

Kabaca anot ve katotları ters paralel bağlanmış ortak geçitli iki tristör gibidir. Devre şeması aşağıda sağdadır.



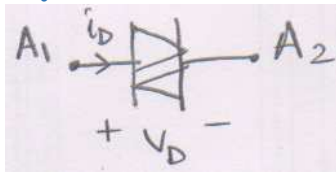
Daha ayrıntılı iç yapısı ve akım-gerilim karakteristiği ise aşağıdaki gibidir.



Triyakın A_1 ve A_2 uçları hangi yönde kutuplanmış olursa olsun (mutlak değerce tutma geriliminin altına düşmemek şartıyla) artı veya eksi yöndeki kısa süreli bir geçit akımıyla tetiklenerek ilettime geçer ve dış devre kesime zorlayana kadar iletimde kalır. Akım-gerilim karakteristiği simetriktrir. Artı ya da eksi yöndeki devrilme gerilimine ulaşıldığında geçit akımı olmaksızın devrilerek ilettime geçer.

Triyak genellikle AC kıyıcı devrelerde (*dimmer* gibi) gücü ayarlamak için kullanılır. Örnek devre az ileride verilmiştir.

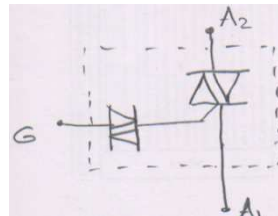
Diyak



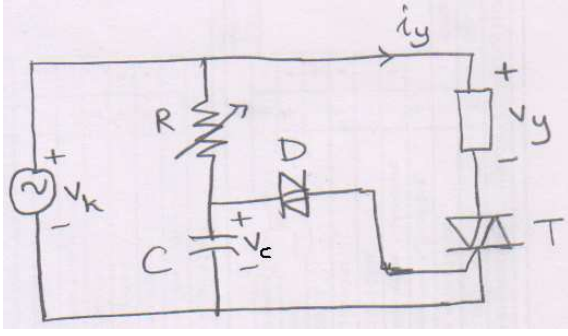
Geçidi olmayan triyaktır. Çeşitli devrilme gerilimlerinde üretilirler ve genellikle AC kıyıcılarda triyak tetikleme amacıyla kullanılırlar. Akım-gerilim karakteristiği triyakınki gibidir; fakat geçit olmadığı için ilettime geçişler sadece devrilme yoluyla olur.

Quadrac

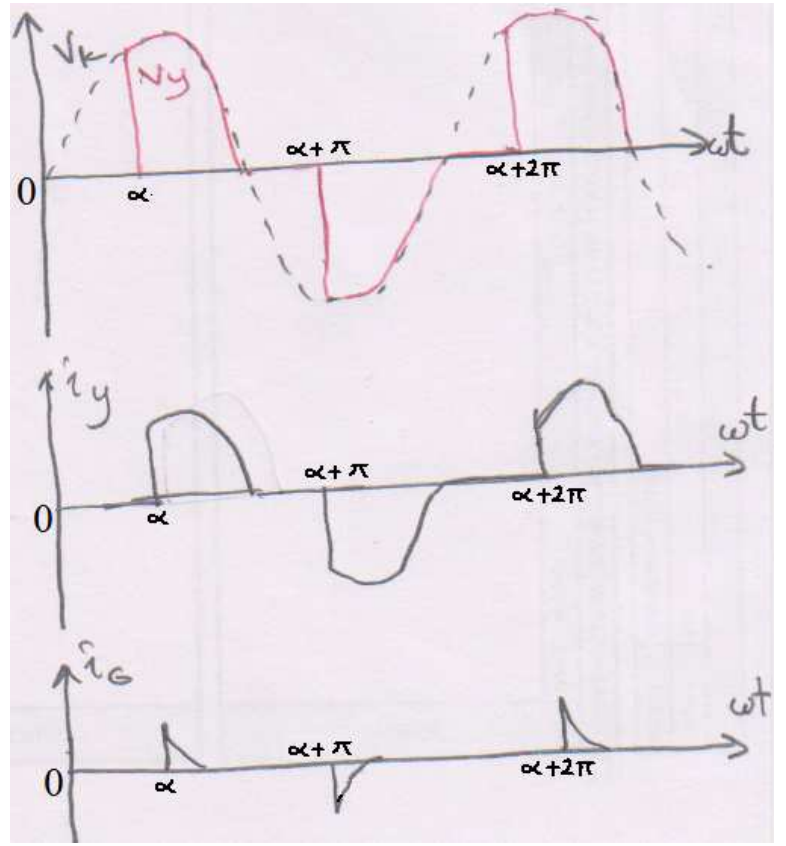
Triyak ile diyak sıkça birlikte kullanıldığı için ikisinin tek bir kılıfta paketlenmiş halidir.



Örnek: AC kıyıcı



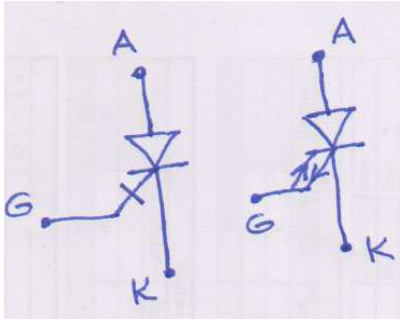
AC kaynak sıfırdan itibaren artı yönde artarken triyak kesimde $v_y = 0$ 'dır. C kondansatörü $v_c > 0$ yönünde dolmaya başlar. Dolma gecikmesi R potansiyometresi ile ayarlanır. v_c diyakın devrilme gerilimine ulaşınca diyak devrilerek iletme geçer ve kondansatör triyaka artı yönde geçit akımı sağlayarak boşalır. Triyak iletme geçer. Yani R ile ayarlı bir gecikmeden sonra $v_y = v_k$ olur. Yük dirençten ibaret ise v_k sıfıra düşene kadar bu durum devam eder.



Kaynak gerilimi sıfıra düşüncü (eksiye geçerken) triyak kesime gider. $v_y = 0$ olur. Kaynak eksi yönde artarken C kondansatörü $v_c < 0$ yönünde dolmaya başlar. v_c diyakın ters yöndeki devrilme gerilimine ulaşınca diyak devrilerek iletme geçer ve kondansatör triyaka eksi yönde geçit akımı sağlayarak boşalır. Triyak iletme geçer. Yani yine R'ye bağlı bir gecikmeden sonra $v_y = v_k$ olur. Yük dirençten ibaret ise v_k sıfıra çıkana kadar bu durum devam eder. Sıfıra ulaşınca (artıya geçerken) triyak kesime gider.

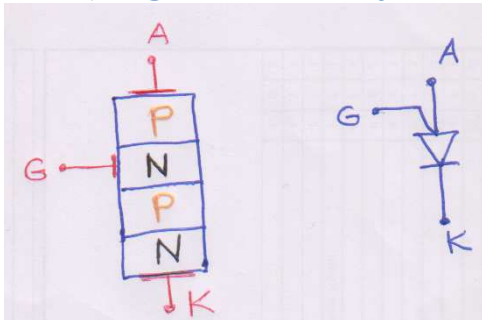
Burada α açısına "ateşleme (tetikleme) açısı" denir. Anahtar olarak kullanılan eleman yerinde diyot olsaydı ve yük saf direnç iken iletme geçeceği zamandan ne kadar sonra iletme geçirildiğinin ωt cinsinden (açı) karşılığıdır. $\omega = 2\pi f$ açısal frekans ve f ise frekanstır.

GTO (Gate Turn-Off Thyristor) = Geçitten Susturulan Tristör



Geçitten ters yönde (katottan geçide doğru) bir akım uygulanarak kesime götürülebilen tristör türüdür.

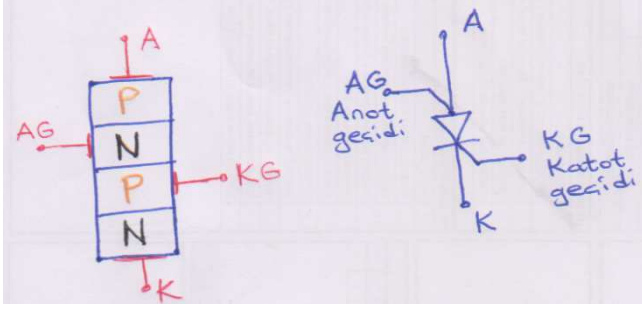
PUT (Programmable Unijunction Transistor) = Programlanabilir Tek Eklemli Transistör



Tristörün P ve N bölgeleri tam tersi olan da denebilir, geçidi anoda yakın N bölgesinde olanı da denebilir. Anot-katot arası doğru kutupluyken, anottan geçide doğru bir akımla iletme geçer. Tristör gibi, geçit akımı kesilse bile iletim devam eder, dış devre kesime zorlayana kadar.

Tristöre göre oldukça küçük gerilim ve akım değerlerinde bulunurlar, 200 V ve 1 A gibi.

SCS (Silicon Controlled Switch) = Silikon Denetimli Anahtar

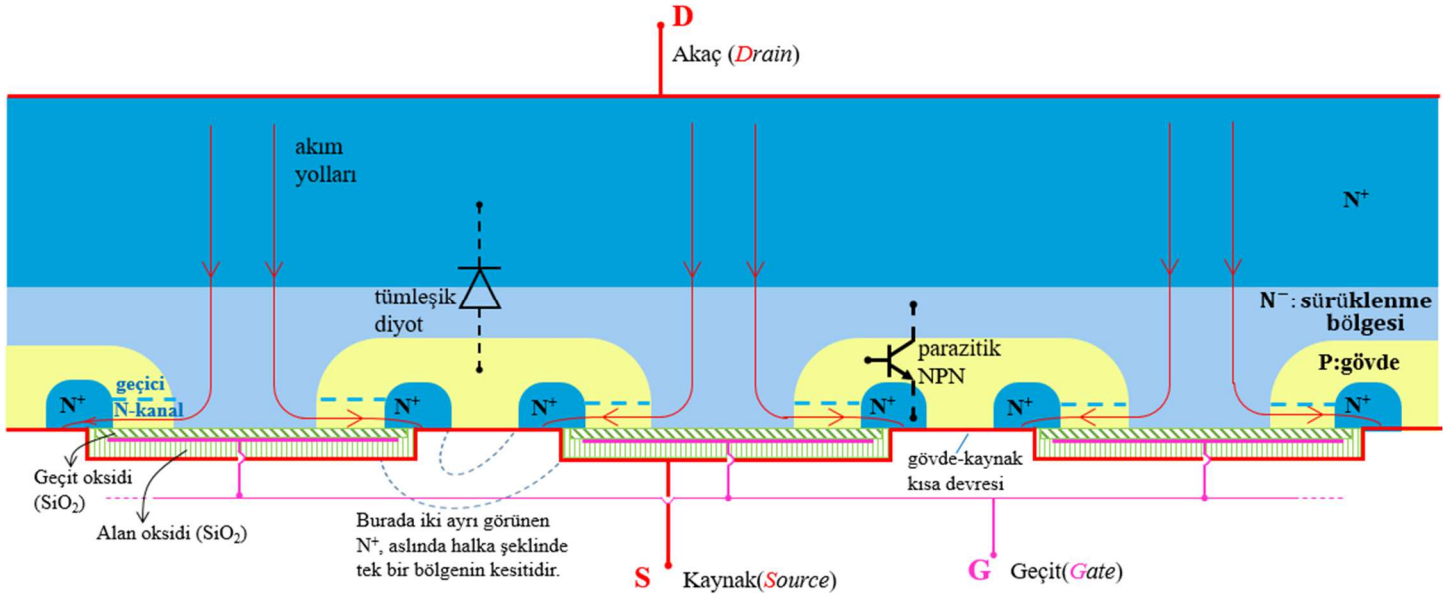


Hem tristörün hem PUT'unki gibi geçitlere sahip bir PNPN elemandır. Anot-katot arası doğru kutupluysen, anottan anot geçidine doğru veya katot geçidinden katoda doğru bir akımla iletme geçer. Tristör gibi, geçit akımı kesilse bile iletim devam eder, dış devre kesime zorlayana kadar.

Tristöre göre oldukça küçük gerilim ve akım değerlerinde bulunurlar, 200 V ve 1 A gibi.

Güç MOSFET'i

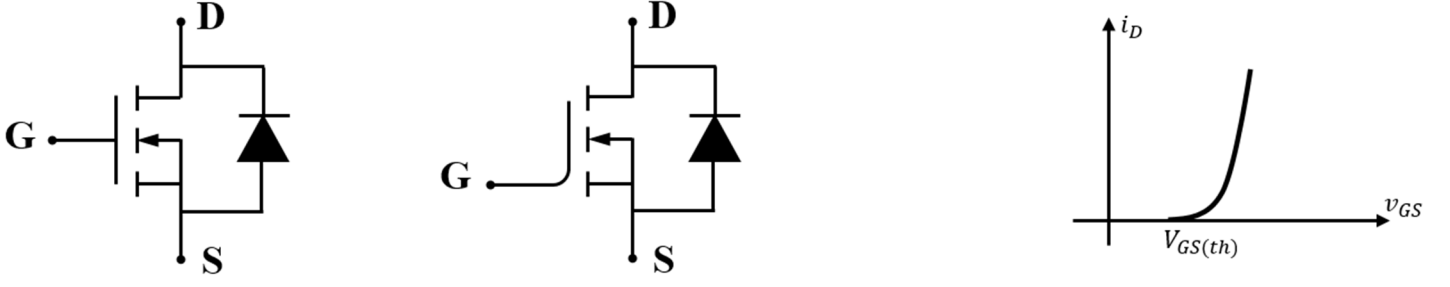
Güç elektroniginde genellikle kanal oluşturmali (enhancement) MOSFET kullanilir. N-kanalli bir güç MOSFET'inin katkı bölgeleriyle yapısı aşağıda gösterilmiştir.



Düşük dirençli bir bölge ile sağlamlık kazandırmak amacıyla akaç (*drain*) tarafında kalın bir N^+ bölgesi bulunur. Bu taraf olduğu gibi akaç elektroduna bağlıdır. Geçit (*gate*) ve kaynak (*source*) tarafı ise P gövde adacıkları ile oluşturulur. Her bir P adacığında kaynak elektrodu bağlanan N^+ adacığının vardır. Şekilde ikişer adacık gibi görünse de aslında, halka şeklinde birer adacıktır. N^+ 'dan kaynak ucu alındığına göre, kaynağa göre pozitif geçit voltajı ile oluşturulacak kanalın yeri, P adacığının içerisinde, N^+ ile sürüklenme bölgesi (N^-) arasında olur. Bu bölgeye çekilen serbest elektron yoğunluğu, P bölgesinin hol yoğunluğundan çok olunca bu bölge geçici olarak N türü katkılanmış gibi davranır ve kanal haline gelir. Böylece akaç ile kaynak arasında akım geçişi mümkün olur. Geçit voltajı sıfır veya negatif yapıldığında ise kanal yok olur ve akaç-kaynak arası akım kesilir, daha doğrusu kesilmesi istenir. Ancak bu MOSFET yapısında istenmeden ortaya çıkan (parazitik) bir BJT transistör vardır (N-kanallı güç MOSFET'inde NPN). Bunun kolektörü sürüklenme bölgesi, emiteri (ki emiterin katkı yoğunluğu kolektörününkinden daha çok olur) kaynak N^+ bölgesi, beyzi ise P-gövde bölgesidir. Kanal bölgesinin direncinin yüksek olması, fazla akım vb sebeple bu parazitik transistörün beyz-emiter arasındaki gerilim, geçit voltajı kaldırılırsa bile akaç-kaynak arasını iletimde tutmaya yetebilir. Bunu önlemek için parazitik transistörün beyz-emiter arası, yani MOSFET'in gövde-kaynak arası kısa devre edilir. Elemanın bu tarafı, geçit elektrodu için açılan delikler hariç tamamen iletkenle kaplanarak kaynak elektrodunu oluşturur. Yarı iletken malzeme ile geçit elektrodu arasındaki SiO_2 tabakasına "geçit oksidi" denir. Geçit elektrodu ile kaynak tabakası (kaplama) arasındaki SiO_2 tabakasına da "alan oksidi" denir. Her bir adacık tarafındaki geçit katmanları birbirleriyle birleştirilerek geçit elektrodunu oluşturur. Görüldüğü gibi güç MOSFET'i paralel bağlı çok sayıda MOSFET gibi düşünülebilir.

Gövde-kaynak kısa devresi ile akaç arasında bu defa PN eklemi üzerinden bir bağlantı, yani bir diyot ortaya çıkar. Bu diyot, "tümleşik diyot" adıyla anahtarlama devrelerinde anahtara ters paralel bağlanan serbest geçiş diyodu görevini görür. Özellikle endüktif yüklerin kesim komutu anında akımının ark yaparak aniden kesilmesini uygun

bazı bağlantılarda önler. Böyle bir N-kanallı güç MOSFET'inin devre sembolleri aşağıda solda ve ortada gösterilmiştir.



N-kanallı MOSFET'te geçit-kaynak arası gerilim, eşik değerini geçerse ($v_{GS} > v_{GS(th)}$) olursa) akaç-kaynak arasında dış devre izin vermek şartıyla

$$i_D = K \cdot (v_{GS} - v_{GS(th)})^2$$

değerinde bir akım geçer, yukarıda sağda gösterildiği gibi. Burada K , elemanın geometrisine bağlı bir sabittir. Eğer dış devre bundan daha küçük bir akımla sınırlıyorsa akaç-kaynak arası doyumda demektir ve bu durumda akaç-kaynak arasında $R_{DS(on)}$ denilen küçük bir direnç görülür.

Yalıtımlı diye MOSFET'in geçitinden hiç akım çekilmeyeceği zannedilmemelidir. Geçit-kaynak arası bir kondansatör gibi düşünülmelidir. Kayda değer bir kapasitif akım çeker, kondansatörün dolması gibi gecikmeli olarak dolar ve boşalır. Buna göre iletme ve kesime gecikmeli olarak geçer. Bunu hızlandırmak için büyük voltaj biraz daha büyük, küçük voltaj da biraz daha küçük (mesela negatif) uygulanabilir.

IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) = Yalıtılmış Geçitli Çift Kutuplu Transistör

Özellikle büyük tıkama gerilimlerinde BJT'lerin iletimdeki kayıpları düşüktür; ancak özellikle kesime gidişte anahtarlama süreleri uzundur. Ayrıca beyzleri yalıtımsızdır (akım kontrollü).

MOSFET'lerin iletme ve kesime gidişler çok daha hızlıdır; ancak özellikle tıkama gerilimi büyük (birkaç yüz volttan itibaren) olanlarda iletimdeki kayıpları yüksektir. Geçitlerinin yalıtımlı (gerilim kontrollü olması) da bir avantajdır.

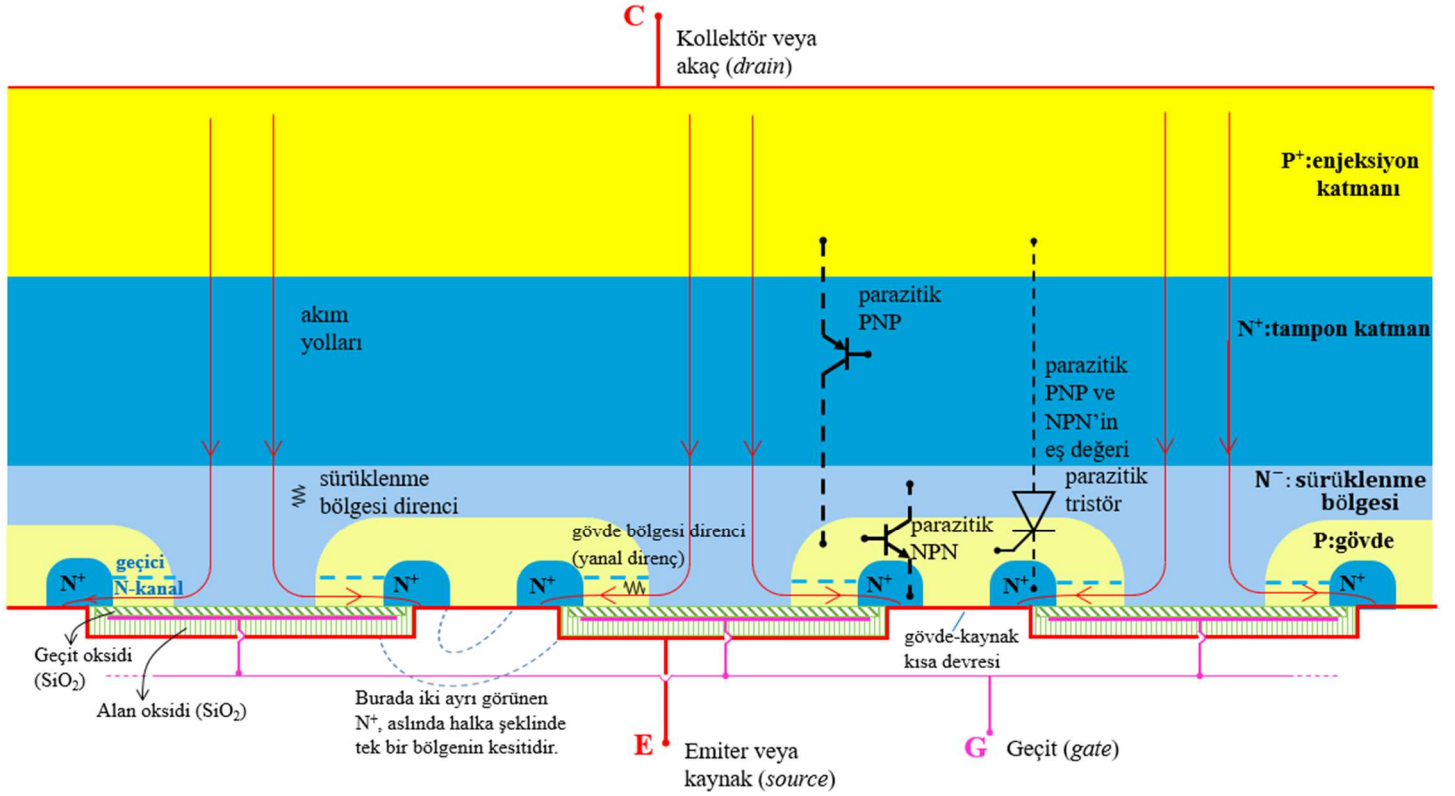
Tristörler çok daha yüksek (binlerce volt) tıkama gerilimlerinde yapılabilirler ve iletimdeki kayıpları düşüktür; ancak geçitleri yalıtımsızdır (akım kontrollü) ve bunlar geçitten kesime götürülemezler. GTO'lar geçitten kesime götürülebilse de bunların da tıkama gerilimleri çok büyük olamamaktadır.

Bunların avantajlı yönlerini birleştirmek amacıyla IGBT elemanı geliştirilmiştir. IGBT'ler tristörler kadar olmasa da MOSFET'lerden çok daha yüksek tıkama gerilimlerine sahiptir. MOSFET'ler gibi yalıtımlı geçitli ve gerilim kontrollüdürler. Güç kayıpları da tristörler MOSFET arasındadır.

N-kanallı IGBT yapısı, N-kanallı MOSFET'in kollektör (akaç=*drain*) tarafına bir P^+ enjeksiyon katmanı eklenmiştir. Böylece tıkama gerilimi yükseltilmiştir. Geçitine emitere göre eşik değeri ($V_{GE(th)}$) üzerinde pozitif gerilim (v_{GE}) uygulanırsa kollektör-emiter arası iletim sağlanır. Dış devre izin vermek şartıyla kollektör akımı (i_C) ile v_{GE} arasındaki ilişki ve en yaygın IGBT devre sembolü aşağıdaki gibidir:

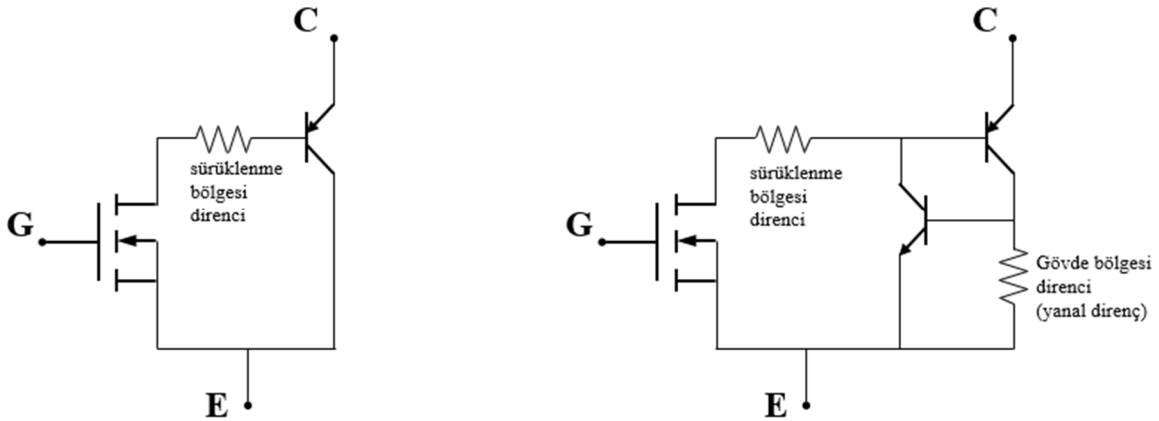


N-kanallı IGBT



Dış devre daha küçük bir akımla sınırlıyorsa $v_{CE} = V_{CE(sat)}$ doyma değerini alır ki bu 1,5-4V civarında bir değerdir. MOSFET'lerde olduğu gibi N-kanallı IGBT geçit gerilimi de eşik değerinin altına düşürüldüğünde eleman kesime gider. Geçit-emiter arası kondansatör gibi davranır, kapasitif akım çeker, voltaj değişimlerini gecikmeli olarak alır ve bu yüzden küçük birer iletim ve kesim gecikmeleri olur

Aşağıda N-kanallı IGBT'nin solda kaba, sağda daha ayrıntılı MOSFET'li eş değer devresi gösterilmiştir. $v_{CE} > 0$ iken geçide iletim voltajı uygulanınca eş değer MOSFET'in akaç akımı, PNP transistörü iletime geçirir (parazitik PNP'nin emiterine N-kanallı IGBT'nin kollektörü diyoruz). Böylece $v_{CE} = V_{CE(sat)}$ olur.



Daha ayrıntılı eş değer devrede ise sırt sırta iki parazitik transistör gösterilmiştir. Bunların tristör gibi davranarak hep iletimde kalmaması için gövde-kaynak(emiter) kısa devresi yapılmıştır. Ancak IGBT'nin aşırı akımla çalıştırılması halinde yanal direnç üzerindeki gerilim, parazitik NPN'i iletimde tutmaya yeter ve eleman tristör gibi davranmaya başlar, yani $v_{CE} > 0$ olduğu sürece iletimde kalır. Bir defa tristörleşen IGBT artık sık sık tristörleşmeye başlayacağından ona güvenilmez ve değiştirilmesi gerekir.