

Güç Elektronik

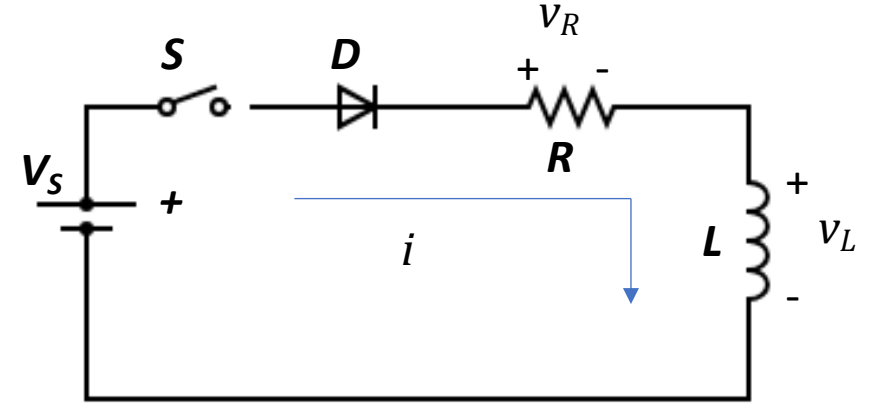
Fatih Evran

ÖRNEK- 3

Şekilde görülen R - L yüklü devrede s anahtarı kapandığında oluşan akımın bağıntısı şu şekilde yazılabilir.

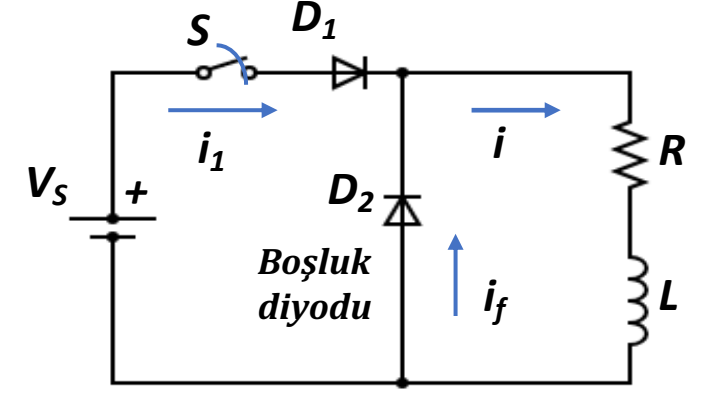
$$i(t) = \frac{V_s}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Akım devrenin zaman sabitine bağlı olarak belli bir süre sonra sürekli durum değeri olan V_s/R 'ye ulaşır. Artık devreden bir doğru akım akmaktadır. Devre bu koşullarda çalışırken s anahtarı yeniden açılırsa, i akımı çok küçük bir süre içinde sıfıra düşmeye zorlandığından endüktans uçlarında oluşacak $L di/dt$ gerilimi diyotun tahrip olmasına neden olur. Bu durumun önüne geçmek için ve akıma seçenek bir yol oluşturmak için, R - L yükü uçlarına bir diyot bağlanır. Bu diyoda '**boşluk diyodu**' ya da '**serbest döngü (free wheeling) diyodu**' adı verilir.



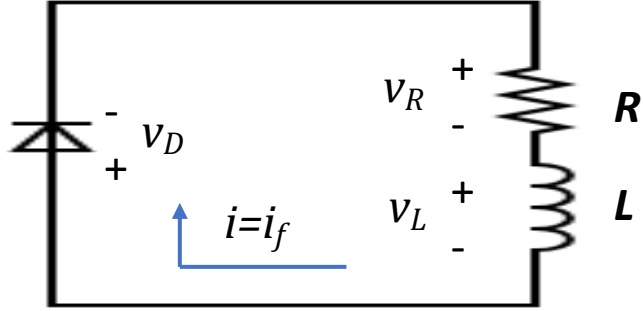
ÖRNEK- 3

- Bu devrede başlangıçta D_1 iletimde olup V_s/R akımını akıtmaktadır. D_2 ters yönde kutuplandığı için tıkalı olup, akım devresini R - L yükü üzerinden tamamlamaktadır. S anahtarı açıldığında yük akımı akacak başka yol bulamadığından D_2 üzerinden akmak zorunda kalır (D_2 , $L di/dt$ gerilimi nedeniyle ileri yönde kutuplanır ve iletme girer)



ÖRNEK-3

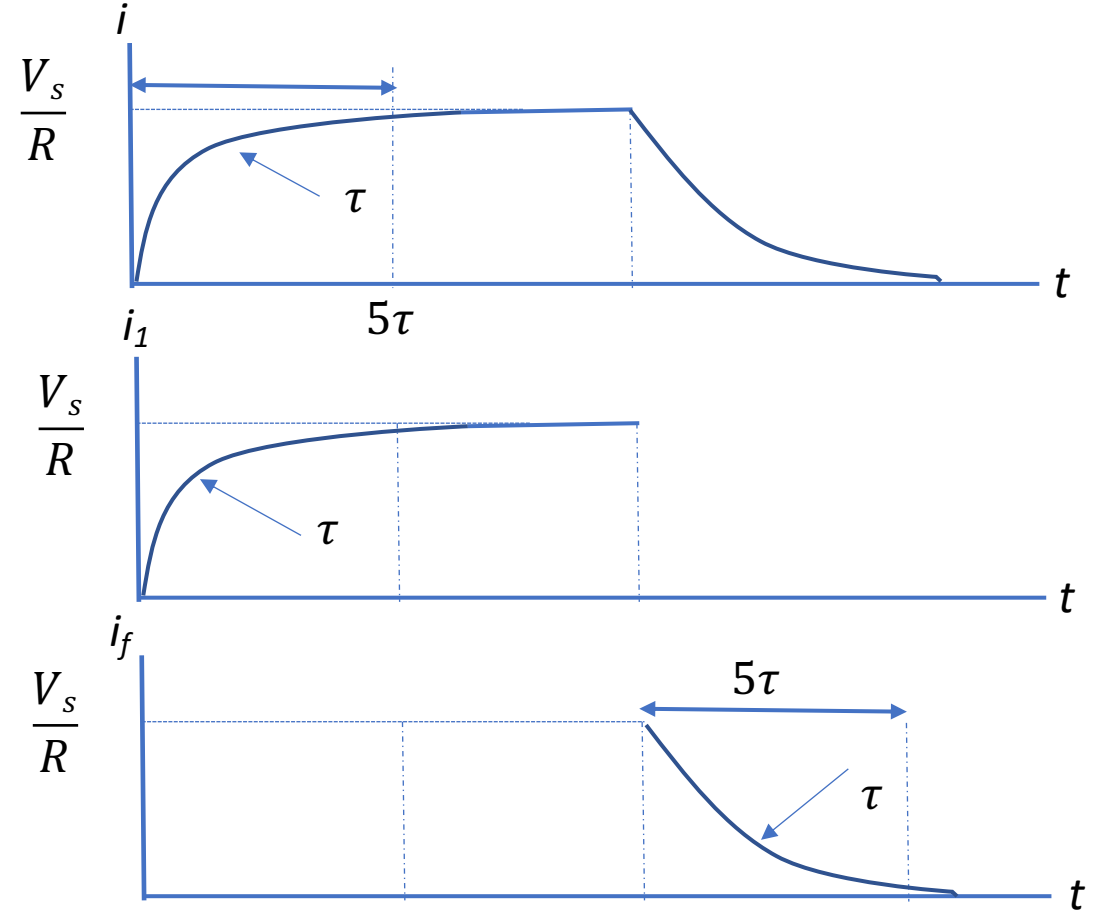
Bu durumda, şu biçimde gösterilebilir.



$$i(0) = \frac{V_s}{R}$$

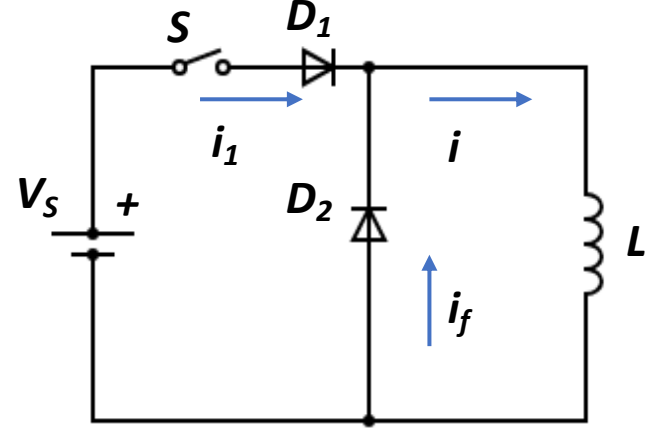
$v_D = 0$ (diyot iletimde)

$$v_R + v_L = v_D = 0$$
$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow i(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}}, \tau = \frac{L}{R}$$
$$t = 0 \Rightarrow \frac{V_s}{R} = A \Rightarrow i(t) = \frac{V_s}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$



ÖRNEK- 4

Şekildeki devrede $L=220\ \mu\text{H}$, $V_s=220\ \text{V}$ olarak verilmektedir. Anahtar $t=0$ anında kapanıp, $t=100\ \mu\text{s}$ 'de tekrar açılmaktadır. i , i_1 ve i_f akımlarının değişimini bularak çiziniz. Endüktansta biriken enerjiyi hesaplayınız.



ÖRNEK- 4

Çözüm:

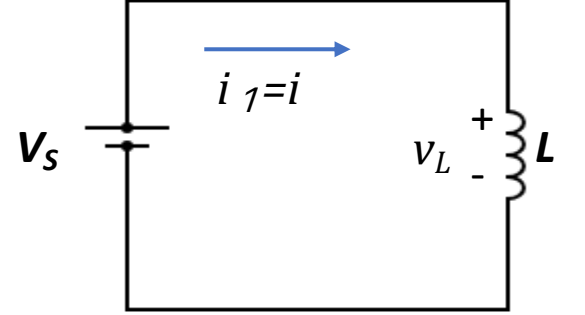
Anahtar kapandığında D_1 iletimde iken D_2 tıkamadadır. Buna göre; $i_1=i$ ve $i_f=0$ olmaktadır.

$$V_s = v_L = L \frac{di}{dt} \Rightarrow i(t) = t \frac{V_s}{L}$$

Akım doğrusal olarak artar ve $t=100 \mu s$ anında;

$$i(t = 100\mu s) = t \frac{V_s}{L} = 100 \times 10^{-6} \frac{220}{220 \times 10^{-6}} = 100 A$$

Değerine ulaşır ve bu anda anahtar açılırsa D_2 iletimde olurken D_1 tıkamada olmaktadır. Buna göre; $i_1=0$ ve $i_f=i$ olmaktadır.



ÖRNEK- 4

$v_D = 0$ (diyot iletimde)

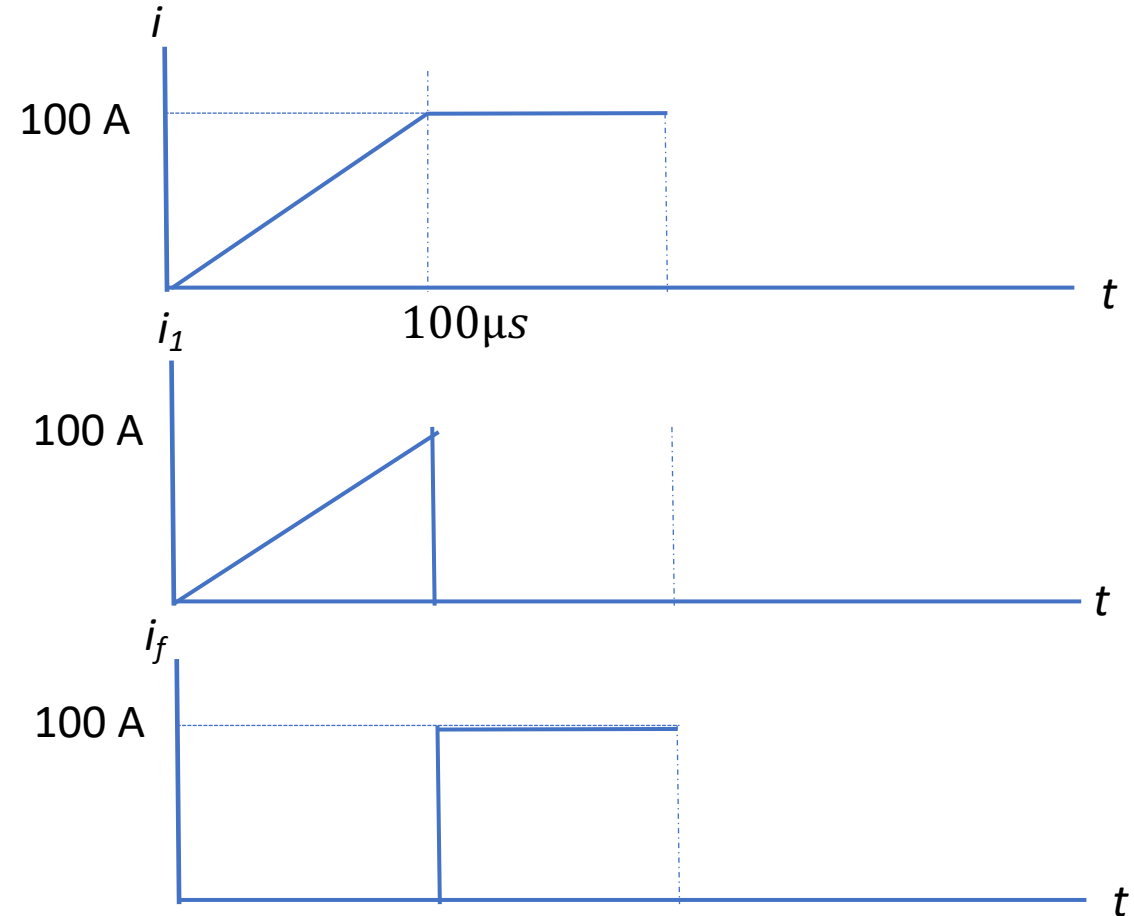
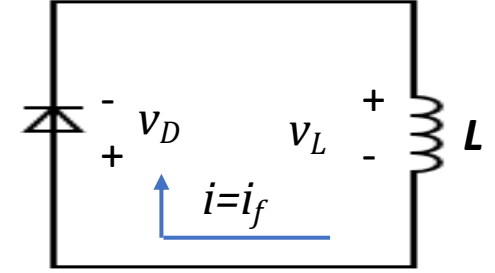
$$v_L = v_D = 0$$

$$L \frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow i = \text{sabit} = i(0) = 100 \text{ A}$$

Devrede sönmeye neden olacak direnç olmadığından dolayı, akım 100 A'de sabit kalmaktadır.

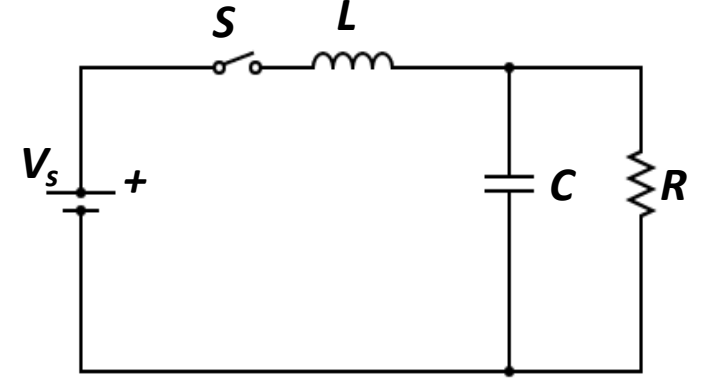
Endüktansta 100 A değerinde sabit bir akım aktığına göre endüktanta biriken enerji;

$$W_L = \frac{LI^2}{2} = \frac{220 \times 10^{-6} \times 100^2}{2} = 1.1 \text{ Joule}$$



ÖRNEK-5

Devre için sayısal değerler $V_s = 100 \text{ V}$, $L = 100 \text{ } \mu\text{H}$, $C = 100 \text{ } \mu\text{F}$ ve $R = 10 \text{ } \Omega$ olarak verilmektedir ($v_c(0) = V_{co} = 50 \text{ V}$ ve $i_L(0) = 0$). $t = 0$ anında anahtar kapandığında endüktans akımının ve kondansatör geriliminin değişimini bulunuz.



ÖRNEK- 5

$t=0$ 'dan sonra

$$V_s = v_L + v_c$$
$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow V_s = L \frac{di_L}{dt} + v_c$$

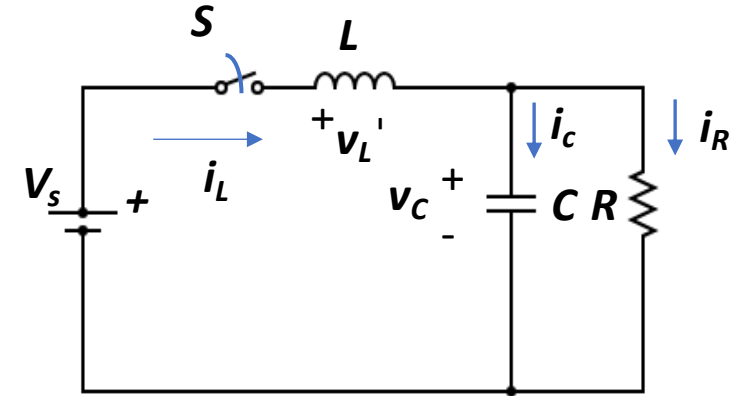
$$i_L = i_c + i_R = C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R}$$

$$V_s = L \frac{d}{dt} \left(C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \right) + v_c$$

$$V_s = LC \frac{d^2 v_c}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{dv_c}{dt} + v_c$$

Ya da

$$\frac{d^2 v_c}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv_c}{dt} + \frac{1}{LC} v_c = \frac{V_s}{LC}$$



ÖRNEK- 5

$$\frac{d^2 v_c}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv_c}{dt} + \frac{1}{LC} v_c = \frac{V_s}{LC}$$

Genel çözüm: $v_c = v_{cd} + v_{cö}$

Hatırlatma:

$$ay'' + by' + cy = 0 \Rightarrow y'' = \frac{d^2 v_c}{dt^2}, y' = \frac{dv_c}{dt}, y = v_c$$
$$y'' = r'', y' = r', y = 1$$

Yazılmak suretiyle $ar^2 + br + c = 0$ ikinci mertebeden bir denklem elde edilebilmektedir.

ÖRNEK-5

1. durum: $\Delta=b^2-4ac>0$ ise r_1 ve r_2 gibi 2 farklı reel kökü vardır.

$$r_{12} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}$$

Doğal çözüm:

$$y_d = Ae^{r_1 t} + Be^{r_2 t}$$

2. durum: $\Delta=b^2-4ac<0$ ise r_1 ve r_2 gibi kompleks iki kökü vardır.

$$\alpha = \frac{b}{2a} \text{ (sönüm katsayısı)}, \omega_d = \frac{\sqrt{4ac - b^2}}{2a} \text{ (sönüm frekansı)}, r_1 = -\alpha + j\omega_d, r_2 = -\alpha - j\omega_d$$

Doğal çözüm: $y_d = e^{-\alpha t}(A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t)$

ÖRNEK-5

3. durum: $\Delta=b^2-4ac=0$ kökler reel ve birbirine eşittir, yani iki katlı kök vardır.

$$r_1 = r_2 = -\frac{b}{2a}$$

Doğal çözüm: $y_d=e^{rt}(A+Bt)$

Örneğe geri döndüğümüzde;

$$\frac{d^2v_c}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv_c}{dt} + \frac{1}{LC} v_c = \frac{V_s}{LC}$$

$$a = 1, b = \frac{1}{RC} = \frac{1}{10 \times 100^{-6}} = 1000, c = \frac{1}{LC} = \frac{1}{100^{-6} \times 100^{-6}} = 10^8, \Delta = b^2 - 4ac < 0$$

Genel çözüm: $v_c=v_{cd}+v_{cö}$

ÖRNEK- 5

Doğal çözüm için 2. durum geçerlidir yani kökler kompleks olmaktadır. Bu durumda;

$$\alpha = \frac{b}{2a} = 500 \text{ (sönüm katsayısı)}, \omega_d = \frac{\sqrt{4ac - b^2}}{2a} = \frac{\sqrt{4 \times 10^8 - (10^3)^2}}{2} = 9987.5 \text{ (sönüm frekansı)}$$

Doğal çözüm:

$$v_{cd} = e^{-\alpha t} (A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t)$$

Özel çözüm: Kaynak doğru akım kaynağı ($V_s/(LC)$) olduğundan dolayı özel çözüm sabit bir sayıdır

$$v_{c\ddot{o}} = V_{dc}$$

$$\frac{d^2 v_{c\ddot{o}}}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv_{c\ddot{o}}}{dt} + \frac{1}{LC} v_{c\ddot{o}} = \frac{V_s}{LC} \Rightarrow \overset{=0}{\cancel{\frac{d^2 V_{dc}}{dt^2}}} + \overset{=0}{\cancel{\frac{1}{RC} \frac{dV_{dc}}{dt}}} + \frac{1}{LC} V_{dc} = \frac{V_s}{LC} \Rightarrow V_{dc} = V_s = v_{c\ddot{o}}$$

ÖRNEK- 5

Genel çözüm: $v_c = v_{cd} + v_{cö}$

$$v_c(t) = e^{-\alpha t}(A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t) + V_s$$

$$t = 0 \Rightarrow v_c(t = 0) = A + V_s = V_{co} \Rightarrow A = V_{co} - V_s$$

$$\begin{aligned} i_L(t) &= C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \\ &= C e^{-\alpha t}(-\alpha A \cos \omega_d t - \alpha B \sin \omega_d t - \omega_d A \sin \omega_d t + \omega_d B \cos \omega_d t) + \frac{e^{-\alpha t}(A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t) + V_s}{R} \\ &= \frac{V_s}{R} + e^{-\alpha t} \left[\left(-\alpha A C + \omega_d B C + \frac{A}{R} \right) \cos \omega_d t + \left(-\alpha B C - \omega_d A C + \frac{B}{R} \right) \sin \omega_d t \right] \end{aligned}$$

$$t = 0 \Rightarrow i_L(t = 0) = 0 = \frac{V_s}{R} + \left(-\alpha A C + \omega_d B C + \frac{A}{R} \right) \Rightarrow A(-\alpha C + \frac{1}{R}) + \omega_d B C = -\frac{V_s}{R}$$

ÖRNEK-5

$$\omega_d BC = -\frac{V_s}{R} - A \left(-\alpha C + \frac{1}{R} \right)$$

$$A = V_{co} - V_s$$

$$B = \frac{-\frac{V_s}{R} - (V_{co} - V_s) \left(-\alpha C + \frac{1}{R} \right)}{\omega_d C} = \frac{-(V_s + V_{co})}{\omega_d 2RC} = -\frac{(V_s + V_{co})}{\omega_d} \alpha$$

$$v_c(t) = e^{-\alpha t} (A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t) + V_s \Rightarrow v_c(t) = e^{-\alpha t} \left((V_{co} - V_s) \cos \omega_d t - \frac{(V_s + V_{co})}{\omega_d} \alpha \sin \omega_d t \right) + V_s$$

$$\begin{aligned} i_L(t) &= \frac{V_s}{R} + e^{-\alpha t} \left[\left(-\alpha AC + \omega_d BC + \frac{A}{R} \right) \cos \omega_d t + \left(-\alpha BC - \omega_d AC + \frac{B}{R} \right) \sin \omega_d t \right] \\ &= \frac{V_s}{R} + e^{-\alpha t} \left[-\frac{V_s}{R} \cos \omega_d t + \left(-\frac{(V_s + V_{co})}{2R\omega_d} \alpha - \omega_d C (V_{co} - V_s) \right) \sin \omega_d t \right] \end{aligned}$$

ÖRNEK-5

Sayısal değerleri yerine koyduğumuzda;

$$v_c(t) = e^{-\alpha t} \left((V_{co} - V_s) \cos \omega_d t - \frac{(V_s + V_{co})}{\omega_d} \alpha \sin \omega_d t \right) + V_s = e^{-500t} (-50 \cos \omega_d t - 7.51 \sin \omega_d t) + 100$$

$$\begin{aligned} i_L(t) &= \frac{V_s}{R} + e^{-500t} \left[-\frac{V_s}{R} \cos \omega_d t + \left(-\frac{(V_s + V_{co})}{2R\omega_d} \alpha - \omega_d C (V_s + V_{co}) \right) \sin \omega_d t \right] \\ &= 10 + e^{-500t} [-10 \cos \omega_d t + 50 \sin \omega_d t] \end{aligned}$$

ÖRNEK-5

$$M_1 \cos \omega t + M_2 \sin \omega t = M \cos(\omega t - \theta)$$

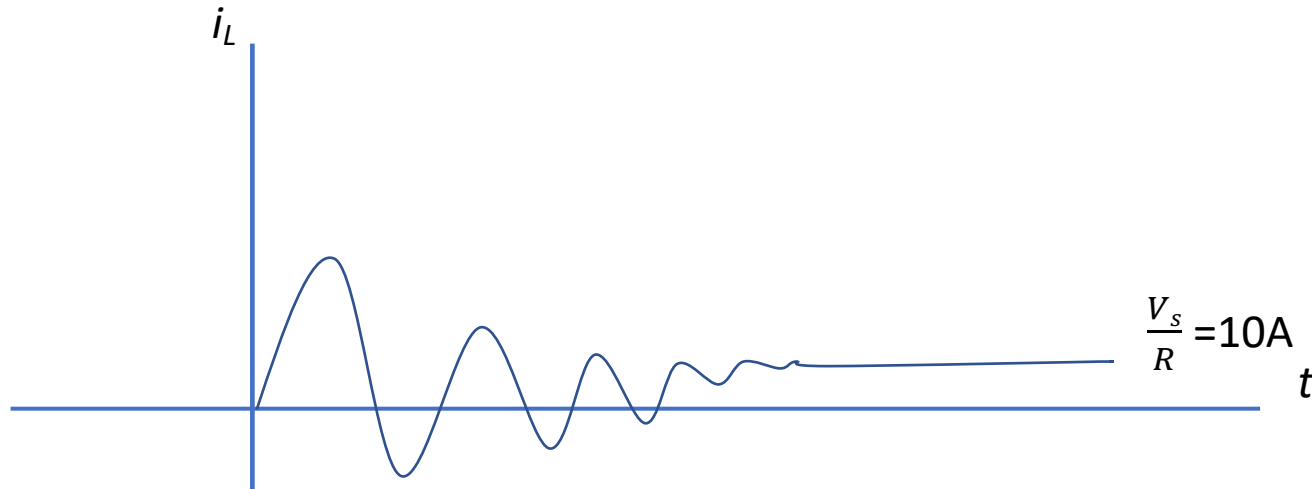
$$M = \sqrt{M_1^2 + M_2^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{M_2}{M_1}$$

Bağıntılarını kullanarak fonksiyonlar ***cosinüs*** cinsinden yazabilir

$$v_c(t) = e^{-500t}(-50 \cos \omega_d t - 7.51 \sin \omega_d t) + 100 = 100 - 51e^{-500t} \cos(\omega_d t - 8.53^\circ)$$

$$i_L(t) = 10 - 51e^{-500t} \cos(\omega_d t + 78.69^\circ)$$

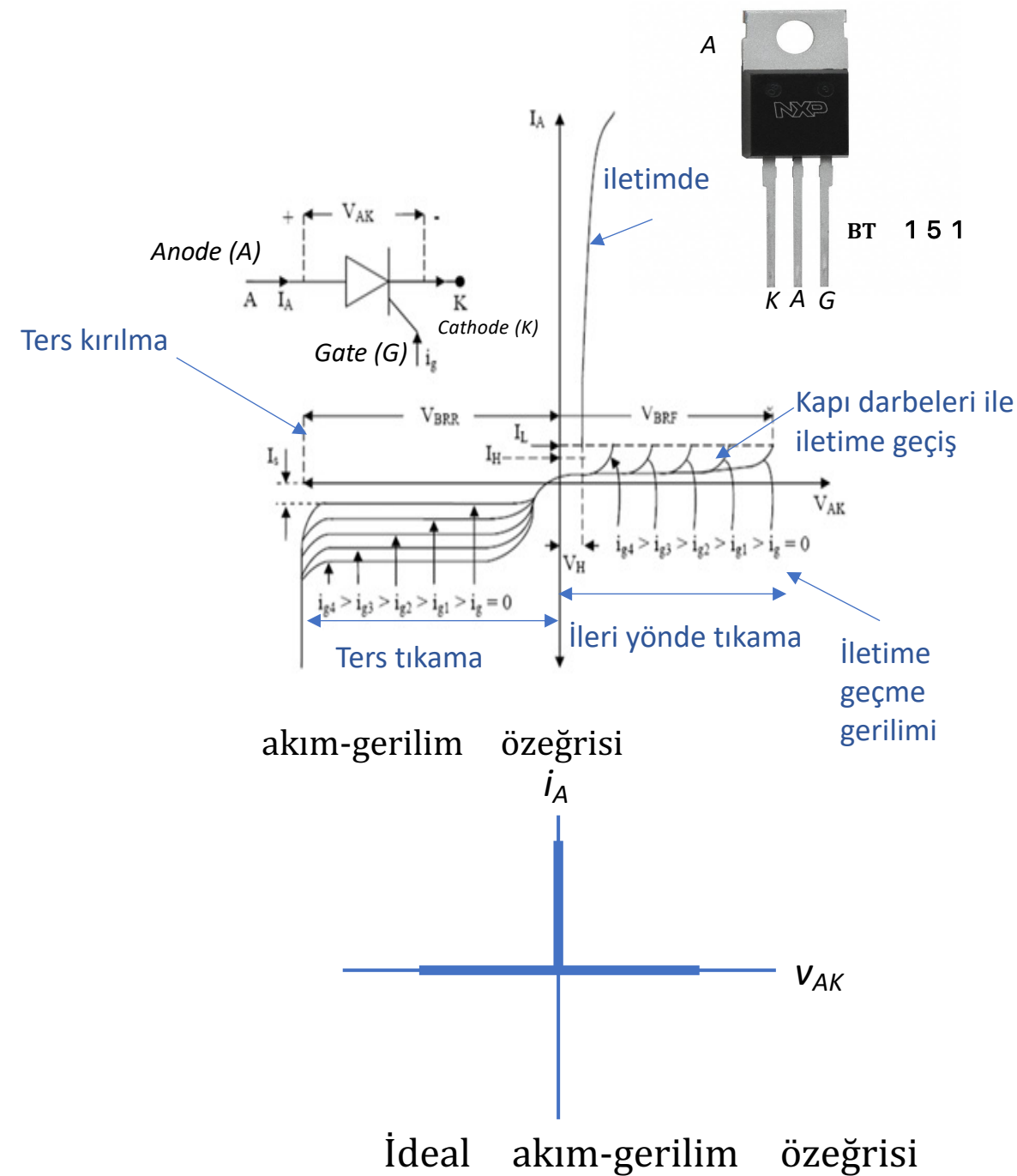


Tristörler (SCR)

V_{AK} gerilimi belli bir değerin üzerine çıkarsa tristör iletime geçer. Ancak bu değer oldukça yüksektir. $V_{AK} > 0$ iken kapıya kısa süre uygulanan bir darbe ile tristör iletime sokulabilir. İletim sırasında tristör üzerinde 1 V dolayında bir gerilim düşer. Tristör üzerindeki gerilim V_{AK} pozitif iken kapısına bir darbe uygulanırsa tristör iletime girer. İletime giren tristörün içinden, dış devre elemanları tarafından belirlenen bir akım akmaya başlar. Tristörün iletimde kalabilmesi için , içinden akan akım **”kenetleme akımı (latching current: I_L)”** değerine ulaşana kadar kapısına işaret uygulanması gerekir. Aksi takdirde kapı darbesi kesilir kesilmez tristör iletimden çıkar.

Tristörün tıkamaya geçebilmesi için de, içinden akan akımın **”tutma akımı (holding current: I_H)”** değerinin altına düşmesi gerekir.

$$I_H < I_L$$



Örnek- 1

Şekilde kullanılan tristörün kenetleme akımı 50 mA olup, kapısına 50 µs uzunluğunda bir darbe uygulanmaktadır. Devreye R direnci eklenmeden tristörün iletimde kalamayacağını gösteriniz ve tristörün iletime girebilmesi için gerekli R direncinin değerini hesaplayınız.

Çözüm:

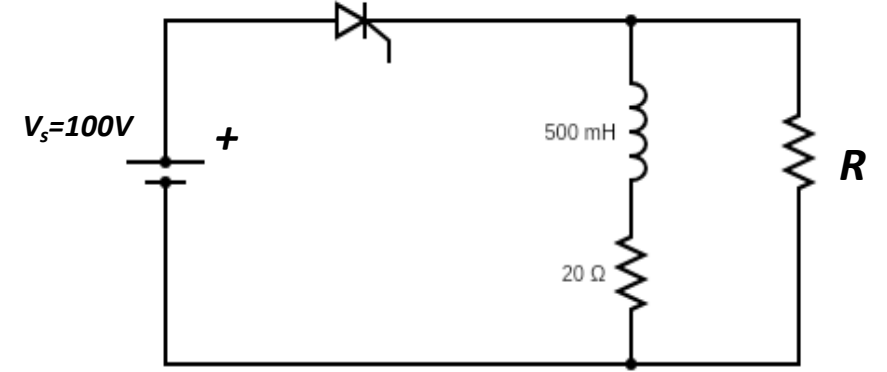
R olmadan tristör tetiklendiğinde içinden geçen akım:

$$i(t) = \frac{100}{20} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \tau = \frac{L}{R} = \frac{0.5}{20} = 0.025s$$

$$t = 50\mu s \Rightarrow i(t = 50\mu s) = 5 \left(1 - e^{-\frac{50 \times 10^{-6}}{0.025}}\right) = 10\text{mA} < I_L$$

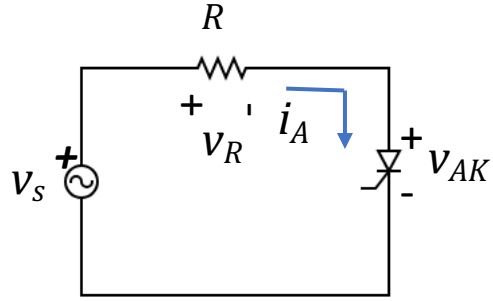
Darbe kalktığı zaman, tristörün içinden akan akım, kenetleme akımından 40 mA düşüktür. Bu 40 mA, R direnci üzerinden akıtılabilir.

$$\frac{100}{R} = 0.04 \Rightarrow R \leq 2500 \Omega$$

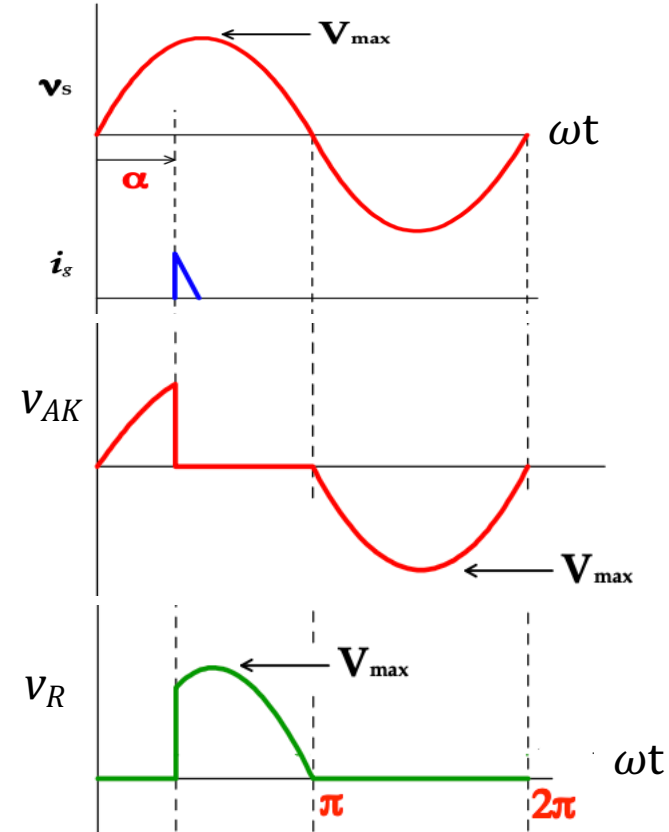


Tristörler

Tristörün tıkamaya geçmesi için içinden geçen akımın doğal yollardan ya da zorlamayla sıfıra düşmesi gerekir. Şekilde görülen devrede, akım sinüs biçimli olduğundan tıkamaya geçiş doğal olmaktadır.



Tristör $\omega t = \alpha$ anında tetiklenmiş ve iletme girmiştir. İletim sırasında tristör üzerinde gerilim düşümü olmadığını varsayarak $v_R = v_s$, $i_R = i_A = v_s / R$ olmaktadır. $\omega t = \pi$ anında akım eksi bölgeye geçmeye çalışırken tristör susar. Tıkamaya geçiş süreci aşağıdaki şekille birlikte açıklanmaktadır.



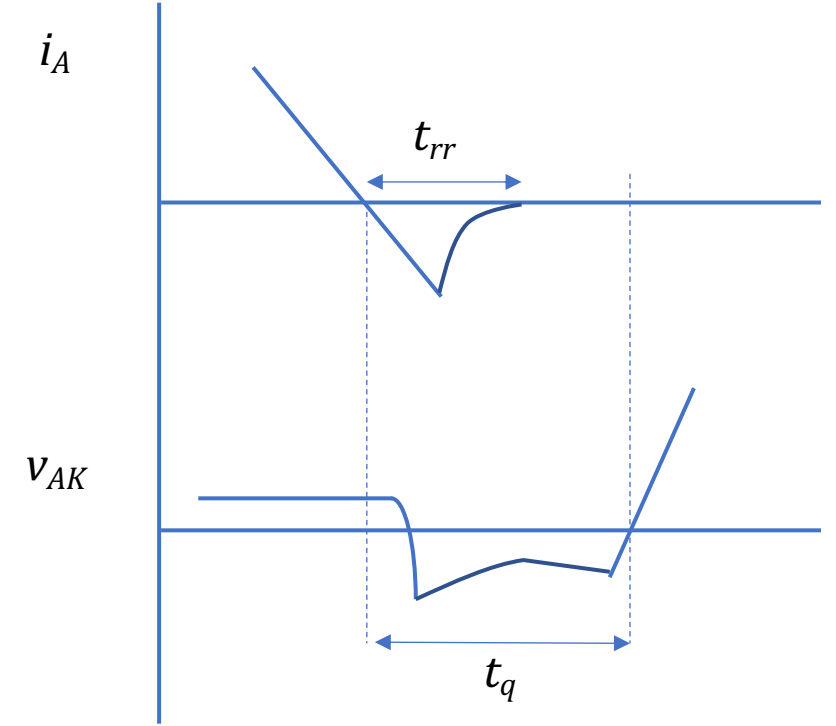
Tristörler

Akım önce diyotlarda olduğu gibi önce negatife geçer, sonra sıfıra döner. Bu toparlanma süresi t_{rr} ile adlandırılır. Ancak, gerilimdeki geçici olayın bitmesi biraz zaman alır (t_q). t_q süresince tristörün kapısına işaret uygulamamak gereklidir. İşaretin uygulanması tristörün erken iletme geçmesine yol açar ve hem tristör hem de devre için bir yanma tehlikesi oluşturur.

Tristörler için önemli olan bazı parametreler şöyle tanımlanmıştır.

- di/dt : iletme geçiş sırasında akımın yükselme hızı
- dv/dt : tıkamaya geçiş sırasında gerilimin değişme hızı

Bu değerlerin belirlenen sınırları aşması, tristörün yanmasına neden olur.



Örnek-2

Şekilde ideal olarak kabul edilen tristör $t=0$ anında tetiklenmektedir. Tristörün iletimde kalma süresini hesaplayınız ($i_L(0)=0$ ve $v_c(0)=0$, $L=100\text{ }\mu\text{H}$, $C=100\text{ }\mu\text{F}$).

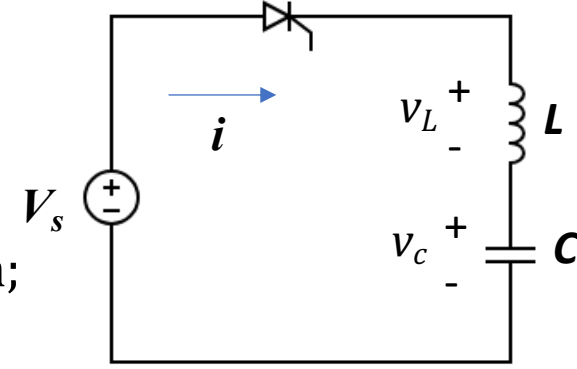
Çözüm:

$t=0$ anında tristör tetiklendiğinde oluşan denklem;

$$V_s = v_L + v_c = L \frac{di}{dt} + v_c$$

$$i = C \frac{dv_c}{dt}$$

$$V_s = LC \frac{d^2 v_c}{dt^2} + v_c \Rightarrow \frac{d^2 v_c}{dt^2} + \frac{v_c}{LC} = \frac{V_s}{LC}$$



Örnek- 2

Genel çözüm:
$$\frac{d^2 v_c}{dt^2} + \frac{v_c}{LC} = \frac{V_s}{LC}$$

$$v_c = v_{cd} + v_{c\ddot{o}}$$

Burada v_{cd} : doğal çözümdür ve $v_{c\ddot{o}}$: özel çözümdür.

Doğal çözümde genel çözüm eşitliğinin sağ tarafı sıfıra eşitlenir. Bu durumda oluşan denklem:

$$\frac{d^2 v_{cd}}{dt^2} + \frac{v_{cd}}{LC} = 0$$

olmaktadır. Doğal çözüm için 2. durum geçerlidir ($a=1$, $b=0$, $c=1/(LC)$, $\Delta < 0$). Ayrıca;

$$\alpha = \frac{b}{2a} = 0, \omega_d = \frac{\sqrt{4ac - b^2}}{2a} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Örnek- 2

Doğal çözüm:

$$v_{cd} = e^{-\alpha t}(A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t) = A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t$$

Özel çözüm: Kaynak doğru akım kaynağı ($V_s/(LC)$) olduğundan dolayı özel çözüm sabit bir sayıdır.

$$v_{cö} = V_{dc}$$

$$\frac{d^2 v_{cö}}{dt^2} + \frac{1}{LC} v_{cö} = \frac{V_s}{LC} \Rightarrow \frac{d^2 V_{dc}}{dt^2} + \frac{1}{LC} V_{dc} = \frac{V_s}{LC} \Rightarrow V_{dc} = V_s = v_{cö}$$

Genel çözüm: $v_c = v_{cd} + v_{cö}$

$$v_c(t) = A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t + V_s$$

Örnek- 2

Devreden akan akım;

$$i = C \frac{dv_c}{dt} = C \frac{d}{dt} (A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t + V_s) = C(-\omega_d A \sin \omega_d t + \omega_d B \cos \omega_d t)$$

Endüktans akımının ve kondansatör geriliminin başlangıç koşullarından A ve B katsayıları bulunmaktadır.

$$v_c(t) = A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t + V_s \Rightarrow t = 0 \Rightarrow v_c(t = 0) = 0 = A + V_s \Rightarrow A = -V_s$$

$$i(t) = C(-\omega_d A \sin \omega_d t + \omega_d B \cos \omega_d t) \Rightarrow t = 0 \Rightarrow i(t = 0) = 0 = \omega_d C B \Rightarrow B = 0$$

A ve B katsayılarının bulunması ile kondansatör gerilimi ve endüktans akımı bulunmaktadır.

$$v_c(t) = V_s - V_s \cos \omega_d t = V_s(1 - \cos \omega_d t)$$

$$i(t) = C(-\omega_d A \sin \omega_d t) = -C \omega_d A \sin \omega_d t = -C \omega_d (-V_s) \sin \omega_d t = C \omega_d V_s \sin \omega_d t = V_s \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_d t$$

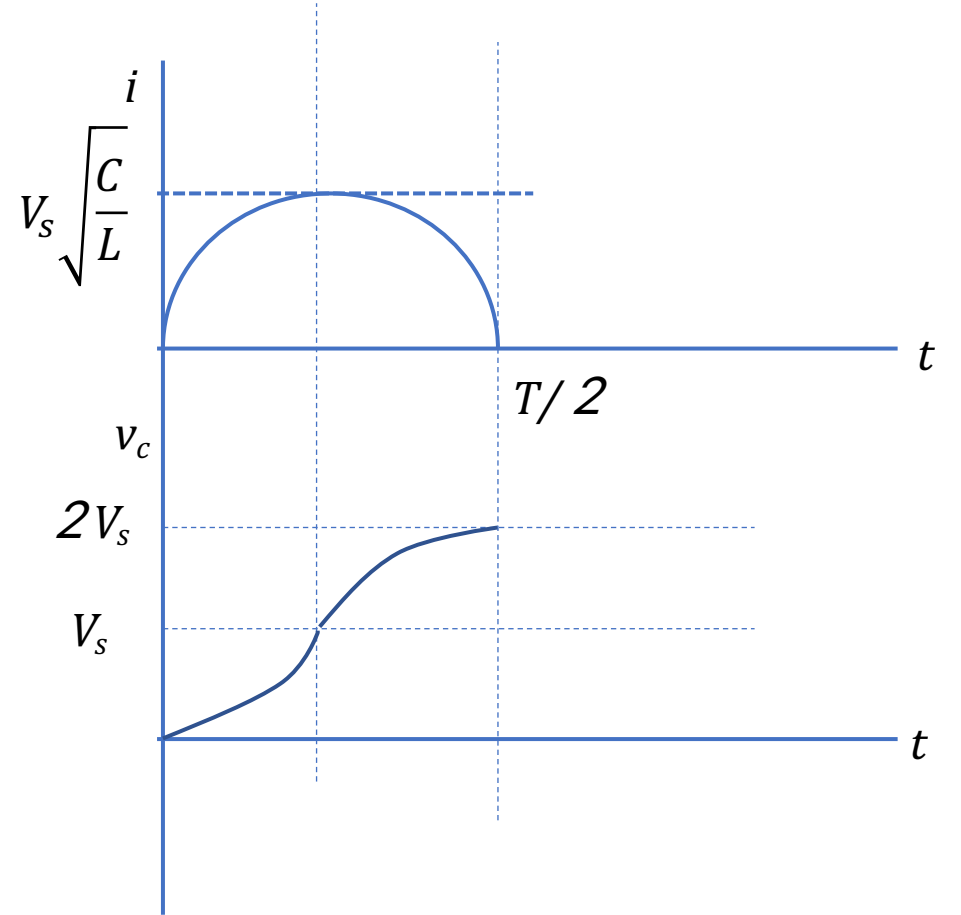
Örnek- 2

$$v_c(t) = V_s(1 - \cos\omega_d t)$$

$$i(t) = V_s \sqrt{\frac{C}{L}} \sin\omega_d t$$

- Thristörün iletimde kalma süresi $T/2$ 'dir.

$$\omega_d = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega_d} = \pi\sqrt{LC}$$



Örnek- 3

Devrenin çalışması şu şekilde açıklanabilir. Başlangıçta kondansatörün şekilde gösterildiği gibi polariteyle bir $V_c(0)$ gerilimine yüklendiği varsayılır. T_1 tristörünün sabit yük akımını (yük endüktiftir) iletmektedir. T_1 tristörü kapatılacaksa, T_2 ateşlenir. Kondansatör gerilimi T_1 üzerinde görülmektedir ve dolayısıyla T_1 üzerinde ters bir gerilim görülmektedir ve anahtar kapanmaktadır. Şimdi kondansatör T_2 ve yük üzerinden şarj olmaya başlar. Kondansatör gerilimi, kaynak gerilimi V 'ye kadar ulaşır. Bu zamana kadar kondansatör şarj akımı (T_2 üzerinden akım) sıfıra düşmüş olacak ve T_2 otomatik olarak kapanacaktır. Şimdi T_1 ve T_2 'nin ikisi de kapalı durumdadır. T_1 'i tekrar ateşlemeden önce, kondansatör gerilimi tersine çevrilmelidir. Bu işlem, T_3 iletime sokularak yapılır. Böylece, kondansatör T_3 ve L üzerinden deşarj olmaktadır ve kondansatör gerilimi tersine döner.

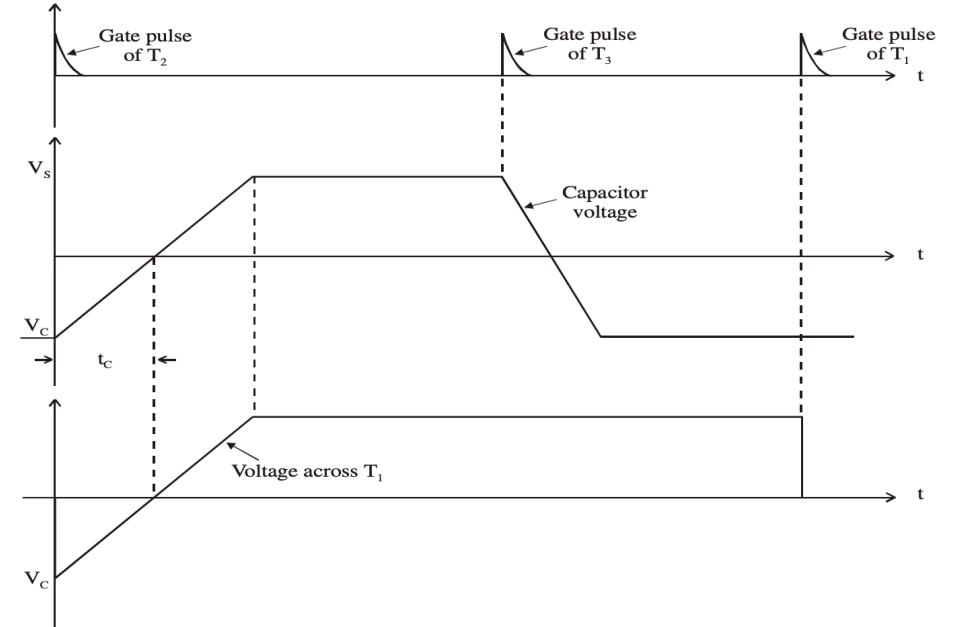
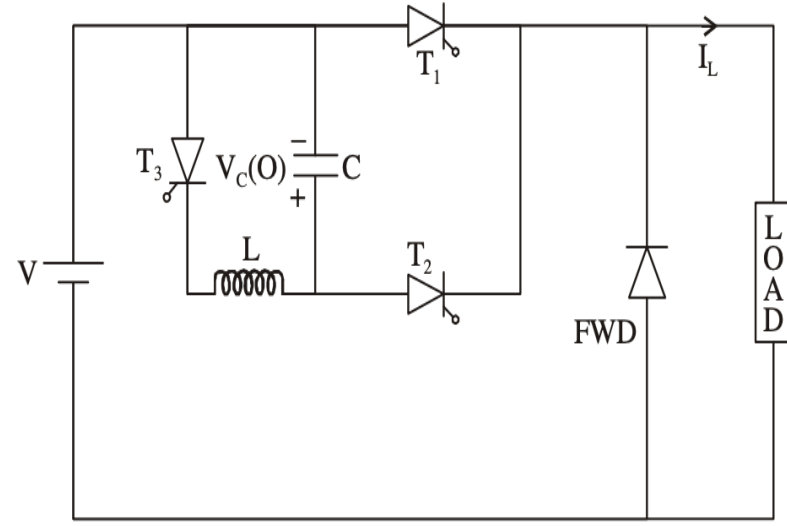
Kondansatör akımı;

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt}$$

Yük akımı sabit olduğu için

$$I_L = C \frac{dv_c}{dt} \Rightarrow I_L = C \frac{V_c(0)}{t_c} \Rightarrow t_c = C \frac{V_c(0)}{I_L}$$

T_1 anahtarının güvenli bir biçimde tıkamaya girebilmesi için $t_c \geq t_q$ olmalıdır.



Örnek- 3

$V_{c(0)} = 200$ V, $C = 30$ μ F ve $L = 3$ μ H olarak verildiğine göre 50 A ve 200 A yük akımları için t_c sürelerini bulunuz.

$$t_{c1} = C \frac{V_c(0)}{I_L} = 30 \times 10^{-6} \frac{200}{50} = 120 \mu s$$

$$t_{c2} = C \frac{V_c(0)}{I_L} = 30 \times 10^{-6} \frac{200}{200} = 30 \mu s$$