

EEM 204 - Analog Elektronik 1

Deney 3

Doğrultucu Devreleri

Ön-bilgi

Doğrultucu devreleri DC güç kaynaklarının temel bileşenlerindedir. Bu deney AC voltajdan DC voltaja doğrultma (AC to DC voltage rectification) yöntemlerine ve birkaç temel filtreleme tekniğine odaklanmaktadır. İdeal olarak, bir güç kaynağının değişen giriş ve yük koşullarına bakılmaksızın saf bir DC çıkışı sağlaması beklenir. Aşağıda, güç kaynaklarının kalitesini belirleyen temel özellikler verilmiştir.

Nominal Çıkış Voltajı ve Anma Akımı (Rated Current), bir güç kaynağının kullanım amacını tanımlayan temel parametrelerdir. Anma akımı, bir güç kaynağının normal çalışma koşullarında devamlı olarak sağlayabileceği DC akımını belirtir. Nominal çıkış voltajı ise, anma akımı çeken bir yük (load) için belirtilen DC voltajdır.

Yük Düzenlemesi (Load Regulation), (bir güç kaynağı için) yük değişiminin, DC çıkış voltajı üzerindeki değişimi gösterir. Genellikle, yük regülasyonu (yük düzenlemesi - load regulation) yüzde olarak tanımlanır:

$$\% \text{ Load Regulation} = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{NL}} \times 100 \% \quad [1]$$

V_{FL} , en yüksek akımı çeken yük için çıkış voltajıdır (belirtilen en düşük yük direnciyle) V_{NL} , en düşük akımı çeken bir yük için çıkış voltajıdır (belirtilen en yüksek yük direncine sahip - bazı tip lineer kaynaklar için çoğunlukla açık devre gibi davranan, genellikle geçiş transistörü minimum besleme seviyeleri ile sınırlı olan)

Entegre DC voltaj regülatörleri ve anahtarlama güç kaynakları için, yük regülasyonu, nominal çıkış voltajını standartlaştırmadan tanımlanır ve birimi voltuttur.

Hat Düzenlemesi (Line Regulation), (bir güç kaynağı için) giriş voltajındaki değişikliklere karşın sabit bir çıkış voltajını sürdürebilme yeteneğidir. Giriş voltajı güç kaynağının düzgün çalışmasına izin veren bir aralık içinde değişirken, sabit bir yük akımı (load current) için hat regülasyonu (hat düzenlemesi-line regulation) ölçülür veya belirtilir. Yük regülasyonuna benzer şekilde, hat regülasyonu çıkış voltajındaki değişimin yüzdesi olarak veya nominal voltajı standartlaştırmadan doğrudan ifade edilir.

Çıkış Dalgalanması, çıkış voltajındaki periyodik değişikliklerin bir sonucu olarak DC güç kaynağı çıkışındaki AC içeriğinin ölçüsüdür. Değişen yük koşullarına bağlı çıkış değişimleri yük regülasyonu altında değerlendirilir ve bu değişimler çıkış dalgalanmasına neden olmaz. Çıkış dalgalanmasının genel özelliği, AC voltajının RMS değerinin çıkıştaki DC voltajına oranı ile verilen **dalgalanma faktörüdür (ripple factor)**:

$$\text{Ripple Factor} = \frac{V_{AC-RMS}}{V_{DC}} \quad [2]$$

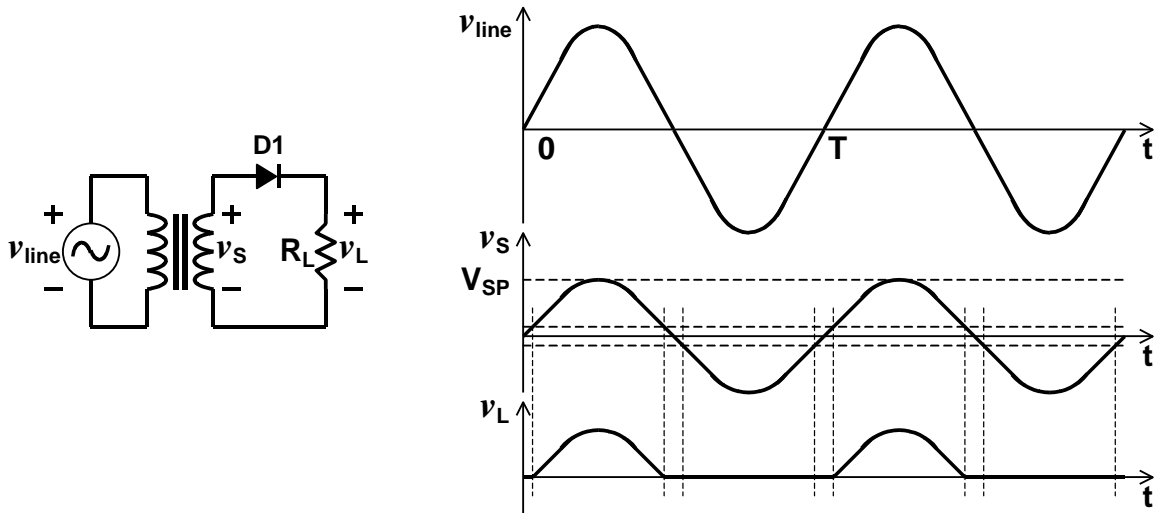
Dalgalanma faktörü, güç kaynağındaki DC çıkışının ne kadar "kirli (veya gürültülü)" olduğunun bir ölçüsüdür. Çıkış dalgalanmaları, doğrultucu devresinin (rectifier circuit) çıkışındaki hat frekansının veya üst harmoniklerinin iki katındaki voltaj değişimleridir. Bu, ses yükselteçlerinde (audio amplifiers) "uğultu" olarak adlandırılır, osiloskopta ekran bulanıklaşmasına veya başka bir şekilde enstrümantasyonda yabancı sinyallere neden olur. Güç kaynaklarının anahtarlanması durumunda, dalgalanmanın ana sebebi, kaynağın yüksek frekanslı anahtarlama devresidir.

Güç verimliliği (Power efficiency), çıkıştan alınan DC gücün girişte gereken güce oranıdır. Düşük verimli bir güç kaynağı, yüksek verimli bir kaynağa kıyasla daha fazla güç harcar ve soğutma problemleri gözlemlenebilir. Örneğin, % 75 verimlilikte çalışan bir güç kaynağı, 15 W sağlamak için girişe 20 W güç gerekir. 5 W fark, güç kaynağında harcanan güçtür ve bir soğutma mekanizmasıyla dışarı transfer edilir.

Yarım-Dalga Doğrultucuları (Half-Wave Rectifier)

Yarım-dalga doğrultucu devreleri Şekil 1 de gösterilmiştir. v_{line} , trafo primer sargısını (transformer primary winding) besleyen AC kaynaktır, v_s trafo ikinci çıkışı, v_L ise yük direnci (load resistor) R_L üzerindeki doğrultulmuş voltajı gösterir. Güç kaynağı uygulamalarında, DC besleme çıkışını yüksek gerilim AC hattından izole etmek için genellikle transformatör kullanılır. Transformatör (transformer) çıkışının pozitif yarım döngüsünde diyot elektriği iletir ve v_L transformatör voltajını takip eder. Diyotun iç direnci ve düz besleme voltajından (forward bias voltage) dolayı R_L üzerindeki voltaj değeri uygulanan voltaj değerinden biraz daha küçüktür. Negatif yarım döngü (negative half cycle) boyunca diyot kapalı (off) durumdadır ve çıkışta voltaj gözlenmez. Diyotun ideal olduğunu varsayarsak (düz besleme voltajının sıfır olması durumunda) doğrultulmuş dalga formunun ortalama değeri:

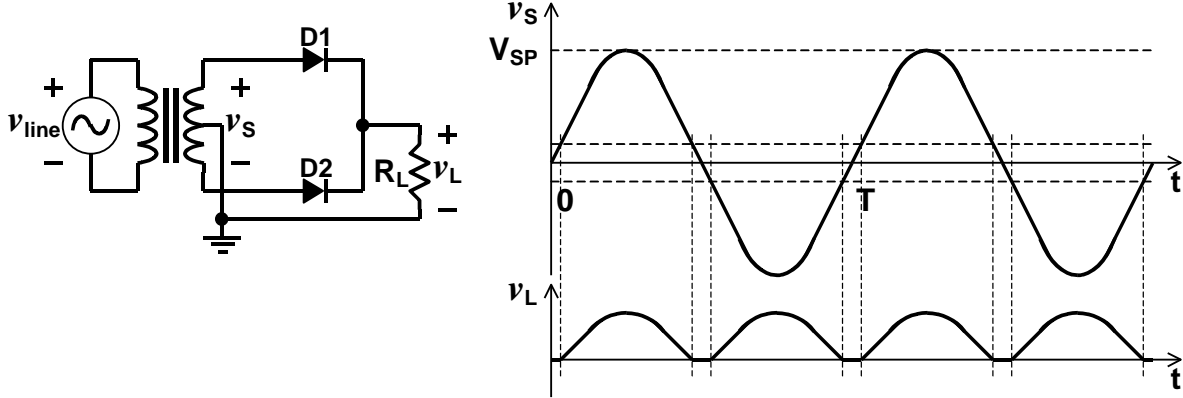
$$V_{LDC} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_{SP} \sin(\omega t) dt = \frac{V_{SP}}{\pi} \quad [3]$$



Şekil 1. Yarım-dalga doğrultucu devresi ve çıkış voltajı.

Orta Uçlu Transformatörlü Tam-Dalga Doğrultucu (Full-Wave Rectifier with Center-Tapped Transformer)

AC voltajının daha verimli kullanımı, transformatör çıkışının her iki yarım döngüsüne de doğrultma işlemi uygulanarak gerçekleştirilebilir. Bunun için Şekil 2'deki gibi iki diyot ve ikincil sargısının orta ucu topraklanmış bir **orta uçlu transformatör (center-tapped transformer)** kullanılabilir. Diyotlardan biri pozitif yarım döngüde diğeri ise negative yarı döngüde iletir, yani açıktır (ON). Sonuçta elde edilen doğrultulmuş voltaj dalgasının frekansı şebeke frekansının (line frequency) iki katıdır.



Şekil 2. Merkez kılavuzlu trafolu tam dalga doğrultucu.

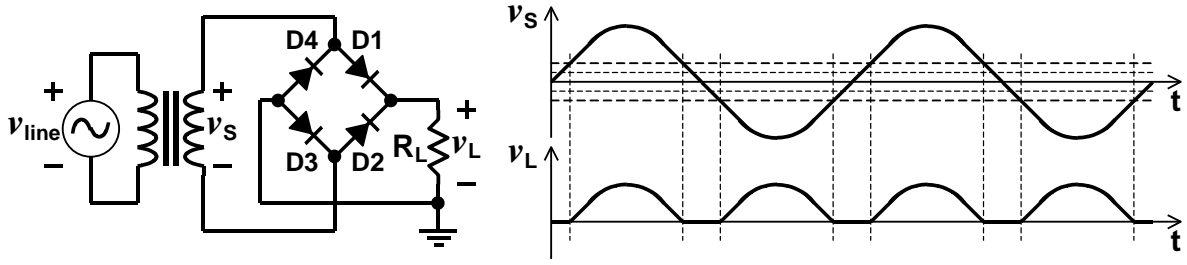
Tam-dalga doğrultucu çıkışının ortalama değeri (diyotun ideal olduğunu kabul edersek) şöyle hesaplanır:

$$V_{LDC} = \frac{2}{T} \int_{t=0}^{T/2} \frac{V_{SP}}{2} \sin(\omega t) dt = \frac{V_{SP}}{\pi} \quad [4]$$

Yarım-dalga doğrultucu için daha önce verilmiş V_{LDC} ile burada hesaplanan V_{LDC} , aynı transformatör çıkış tepe voltajı V_{SP} için eşittir. Yarım-dalga doğrultucuda kullanılan trafo besleme akımını sadece pozitif yarım döngülerde sağlar. Orta uçlu trafo ise her iki yarım döngüde de besleme akımı verir ve bir seferde transformatörün ikincil sargısının (secondary winding) sadece yarısı aktif olur.

Köprü Tipi Tam-Dalga Doğrultucuları (Full-Wave Bridge Rectifier)

Şekil 3'te gösterildiği gibi orta uçlu transformatör gerektirmeyen, **köprü tipi doğrultucu (bridge rectifier)** ile de tam-dalga doğrultucu elde etmek mümkündür. Bu devredeki diyotlar dört ayrı eleman da olabilir, tek bir köprü tipi doğrultucu entegresinin içine gömülmüş de olabilir. Transformatör çıkışının pozitif yarım-döngüsünde 2 diyot, $D1$ ve $D3$, düz besleme, $D2$ ve $D4$ ise ters besleme konumundadır. Bu nedenle $D1$ ve $D3$ diyotları pozitif yarım-döngüde R_L direncine seri bağlı bir şekilde elektriği iletir. R_L üzerindeki voltaj, transformatör çıkış voltajı ile, iki diyot üzerindeki voltaj düşüşünün farkına eşittir. Benzer şekilde, negatif yarım-döngüde, $D2$ ve $D4$ diyotları düz besleme (forward biased), $D1$ ve $D3$ diyotları ters besleme (reverse biased) durumuna geçer.



Şekil 3. Köprü tipi doğrultucu devresi.

Köprü tipi doğrultucu, orta uçlu transformatörlü tam-dalga doğrultucu ile karşılaştırıldığında, aynı transformatör voltajı için yaklaşık olarak iki kat daha fazla DC çıkış voltajı sağlar:

$$V_{LDC} = \frac{2}{T} \int_{t=0}^{T/2} V_{SP} \sin(\omega t) dt = \frac{2 V_{SP}}{\pi} \quad [5]$$

Bu denklem, diyotlardan kaynaklanan voltaj düşüşünü hesaba katmaz. Köprü tipi doğrultucunun bir dezavantajı, DC voltajındaki iki seri bağlı diyottan kaynaklanan düşüşün orta uçlu transformatörlü tam-dalga doğrultucudaki tek diyottan kaynaklı düşüşe göre daha fazla olmasıdır.

a) v_s nin positive ve negatif döngülerinde hangi diyot(lar) açık (on) konumdadır?

b) v_s nin frekansı 50 Hz ise v_L nin frekansı kaçtır?

c) Şekil 3'teki devre için v_s nin 9 V tepe değerine sahip 50 Hz sinüs dalgası olduğunu varsayın ve her bir diyotta harcanan ortalama gücü hesaplayın. (Diyotların eşik voltajının 0.6V olduğunu ve her diyotun v_s nin bir yarım döngüsünde ilettiğini varsayın.)

d) Şekil 2'deki orta uçlu transformatörlü tam-dalga doğrultucuya aynı giriş voltajı (v_s) uygulansaydı diyotların üzerindeki toplam harcanan güç ne olurdu?

Kapasitif Filtreleme (Capacitive Filtering)

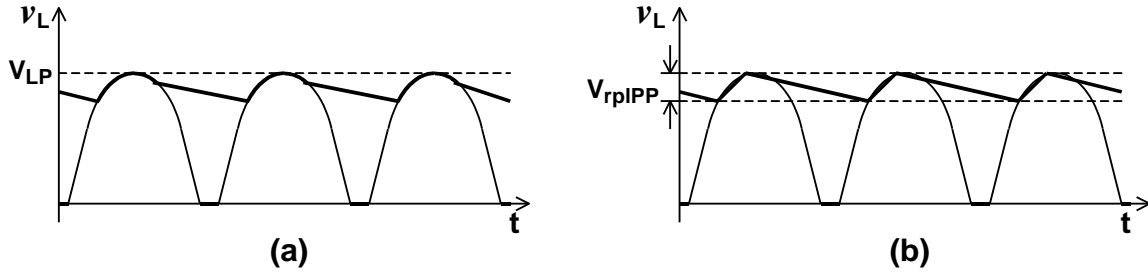
Bütün doğrultma yöntemleri DC çıkışa ek olarak biraz dalgalanma (ripple) üretirler. Halbuki çoğu uygulamada mümkün olduğunca sabit - dalgalanması minimum - DC güç ihtiyacı vardır. DC çıkışındaki sürekliliğin filtrelemeyi kolaylaştırması nedeniyle tam-dalga doğrultma yarım-dalga doğrultmaya tercih edilir. Dalgalanmayı azaltmak için

kullanılan yaygın yöntemlerden biri devrede yüke paralel bağlı büyük bir filtreleme kapasitörü kullanmaktır.

Şekil 4.a filtreleme kapasitörü eklenmiş bir tam-dalga doğrultucunun çıkışındaki yük voltajını, v_L , gösterir. v_L periyodik dalgasının iki bileşeni vardır. Pozitif eğimli bölge transformatör voltajını takip eder ve doğrultucu kapasitörü şarj eder (yükler). Negatif eğimli bölge, kapasitör RL üzerinden boşaldığı için, üstel azalan (exponential decay) formdadır. Unutmayın ki RL üzerindeki ortalama voltaj, kapasitörün olmadığı duruma kıyasla, daha yüksek olacaktır. Doğrultucu sadece kapasitörü şarj ettiği anlarda akım sağlar. Bu da doğrultucu akımının tepe değerinin bir periyottaki ortalama akımdan daha yüksek olacağı anlamına gelir, çünkü doğrultucu çıkışındaki ve yük üzerindeki akımların ortalama değerleri eşit olmalıdır. Dolayısıyla transformatör ikincil sargıları ile doğrultucu diyotların gereksinim duyduğu tepe akımı yüksektir ve diyotların bu yüksek tepe akımlarına dayanabilmesi, zarar görmemesi gereklidir.

Filtrelenmiş doğrultucu voltajına ait kesin bir denklem yazmak güçtür. Çıkış voltajı, Şekil 4.b deki gibi şarj ve deşarj döngüleri doğru parçaları ile temsil edilen bir üçgen dalgaya benzetilebilir. Bu dalganın tepe değeri V_{LP} dir ve transformatör tepe voltajı ile düz beslenme durumundaki doğrultucu diyotlarındaki voltaj düşüşünün farkı olarak hesaplanır. Tepeden-tepeye dalgalanma voltajı V_{rpIPP} ise çıkışın ortalama değeri olan V_{LDC} aşağıdaki bir hesaplanabilir:

$$V_{LDC} = V_{LP} - \frac{V_{rpIPP}}{2} \quad [6]$$



Şekil 4. a) Filtreleme kapasitörlü doğrultucunun çıkış sinyali, b) Dalgalanmanın (ripple) üçgen dalga yaklaşımı ile gösterimi

Bu üçgen dalganın RMS değeri doğru parçalarının eğimleri ve uzunluklarından bağımsızdır, sadece tepe değeri ile ilişkilidir. Bir üçgen dalgaya ait RMS dalgalanma voltajı şöyle hesaplanır:

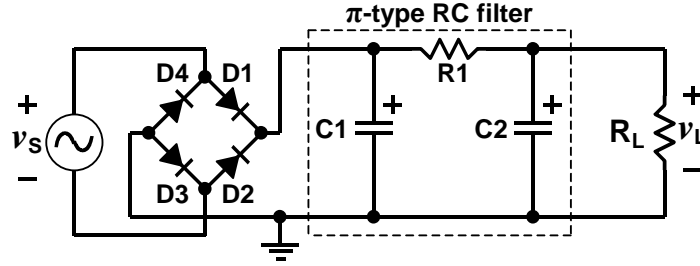
$$V_{rpIRMS} = \frac{V_{rpIPP}}{2\sqrt{3}} \quad [7]$$

Öyleyse dalgalanma faktörü (ripple factor) de

$$Ripple\ Factor = \frac{V_{rpIRMS}}{V_{LDC}} = \frac{V_{rpIPP}}{2\sqrt{3} V_{LDC}} \quad [8]$$

olur. Dalgalanma genliği (büyüklüğü, amplitude) yük akımı arttıkça artar ve kapasitör değeri büyüdükçe azalır. Dalgalanmayı düşük tutmak ve iyi bir doğrultma sağlamak için büyük kapasitörler (yüzlerce μF gibi) kullanılmalıdır. Bu tip doğrultucu uygulamalarında çoğunlukla elektrolitik kapasitörler kullanılır. Elektrolitik kapasitörler kutupludur, dolayısıyla kapasitörlerin aşırı yüklenip patlamamaları için + ve - uçlarının devreye doğru bağlanmasına özen gösterilmelidir.

Bazen dalgalanmayı azaltmak amacıyla devreye Şekil 5 teki gibi ikinci bir filtreleme kapasitörü ve bir direnç bağlanır. Bu konfigürasyona π -tipi filtre adı verilir.

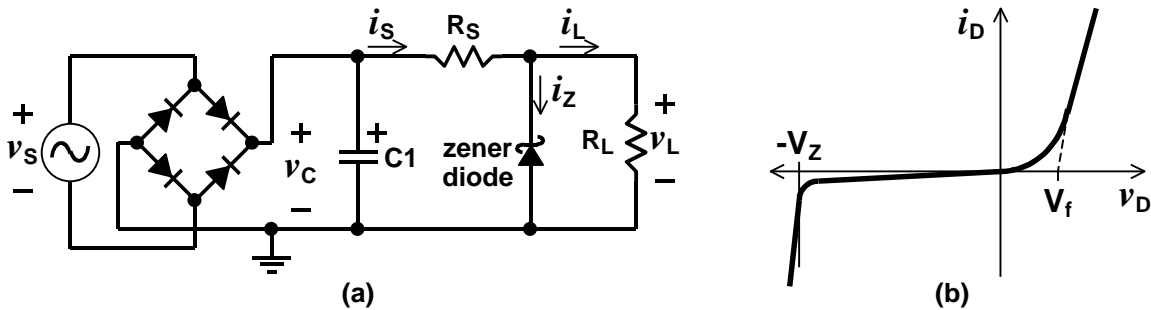


Şekil 5. Dalgalanma voltajını azaltmak için kullanılan π -tipi RC filtresi.

Kapasitif filtrenin yüksüz durumdaki voltajı transformatör voltajının tepe değeri ile doğrultucu diyotlardaki voltaj kaybının farkına eşittir. Kapasitif filtrelemenin dezavantajları nispeten kötü doğrultma, büyük değerli yüklerin bağlandığı durumda yüksek dalgalanma ve diyotların dayanması gereken yüksek tepe akımları olarak sayılabilir. Kötü doğrultma yükün uçlarındaki DC voltajın yük akımına bağlı olması anlamına gelir. Bu bağımlılık, idealde sıfır olması beklenen ama gerçekte sıfırdan farklı olan güç kaynağı çıkış direnci ya da Thevenin direnci ile ilişkili olarak değerlendirilmelidir. Yük voltajı ile akım arasında genellikle lineer bir ilişki yoktur ve dolayısıyla önemli bir nicelik olarak giderek artan çıkış direnci $\Delta v_L / \Delta i_L$ kullanılır.

Zener Diyotlu Doğrultucu (Zener Diode Regulation)

Basit bir voltaj doğrultma yöntemi olarak Şekil 6.a daki gibi yüke paralel bir zener diyot bağlanabilir. Şekil 6.b örnek bir diyot akım-voltaj karakteristik eğrisini gösterir. Zener diyotu düz beslendiğinde sıradan diyotlar gibi davranır. Ters beslendiğinde ters doygunluk akımı olarak tanımlanan ve I_S olarak gösterilen küçük bir akım geçirir. Ters beslemenin artmasına rağmen ters akım nispeten sabit kalır, ta ki zener kırılma gerilimine (zener breakdown voltage) ulaşıncaya dek. O anda kovalent bağların çığ etkisi şeklinde kopması nedeniyle ters akım hızla artar ve zener kırılması (zener breakdown) gerçekleşir. Diyot, üzerinden geçen akımın harici bir devre yardımıyla belli bir seviyede tutulması koşuluyla normal işlevini gerçekleştirmeye devam eder. Zener diyotun kırılma voltajı V_Z diyotun üretim şekline ve malzemesine bağlıdır. Zener diyotlar voltaj regülatörü ve voltaj referansı olarak kullanılır.



Şekil 6. a) Zener şant (shunt) regülatörü, b) Zener diyotu akım-voltaj karakteristik eğrisi.

Ters kırılma voltajına ulaşıldığında v_L nin artışına bağlı olarak i_Z hızla artar. Filtreleme kapasitörünün voltajı v_C artarsa, R_S üzerinde aynı miktarda voltaj kaybı olurken v_L nispeten sabit kalır. Bu durum zener diyotun yüke iletilmemesi gereken fazlalık gücü yok etmesi olarak düşünülebilir. Çeşitli R_L değerleri için zener diyot aşağıda belirtilen miktarda ortalama akım geçirebilmelidir.

$$I_{Zavg} = \frac{v_c - V_Z}{R_S} \quad (\text{for } v_c > V_Z \text{ always}). \quad [9]$$

Bu durumda zener diyotta harcanan ortalama güç şuna eşittir:

$$P_{Zavg} = V_Z I_{Zavg} = V_Z \frac{v_c - V_Z}{R_S} \quad (\text{for } v_c > V_Z \text{ always}) \quad [10]$$

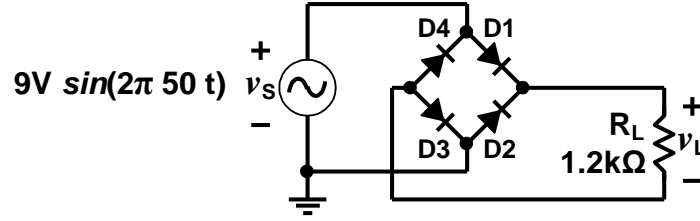
Örneğin, $v_c = 10 \text{ V}$, $R_S = 50 \Omega$, ve $V_Z = 5 \text{ V}$, ise

$$P_{Zavg} = V_Z \frac{v_c - V_Z}{R_S} = 5 \frac{10 - 5}{50} = 0.5 \text{ W}$$

Yük tarafından bakıldığında doğrultucu çıkışındaki direnç, R_S ye paralel çığ diyotunun (avalanche diode) dinamik direncidir. Diyotun dinamik direncinin genellikle çok küçük ($\sim 1 \Omega$) olmasından dolayı zener doğrultucu devreleri, ayarlanabilirlik özellikleri olmamasına ve sınırlı aralıkta yük akımı sağlamalarına rağmen, oldukça iyi kabul edilir. Bu dezavantajları azaltmak için zenerle doğrultulmuş voltaj ile yük voltajı arasındaki fark ölçülebilir, yükseltilebilir ve yük akımı bir transistör yardımıyla kontrol edilebilir. Çeşitli voltaj aralıkları için bu tip bir doğrultucu, sadece birkaç harici elemana ihtiyaç duyan entegre olarak mevcuttur.

Prosedür

1. Aşağıdaki devreyi kurun. Sinyal jeneratörünü belirtilen AC giriş voltajını elde etmek için kullanın.



Yük direnci R_L üzerindeki çıkış sinyalinin frekansını ve genliğini ölçün.

Tepe voltajı: _____

Periyot: _____

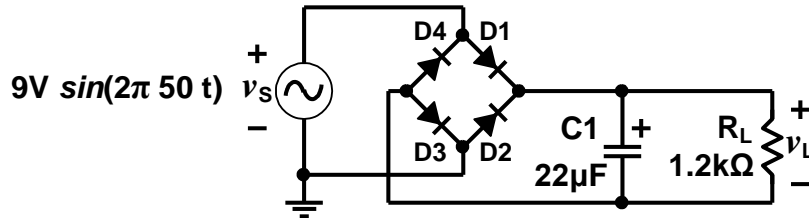
Frekans: _____

Osiloskop problemlerinin toprak bağlantılarını R_L terminallerine bağlayamayacağınıza dikkat edin. Aksi takdirde **D2** veya **D3** diyotlarında kısa devre meydana gelecektir. Topraklama konnektörleri (ground connectors), sinyal jeneratörü çıkışındaki toprak kablosuna bağlanmalıdır. İki prob kullanarak diferansiyel voltaj ölçümleri için ayarlama yaparak ölçümlerinizi elde edin. Osiloskopu diferansiyel voltaj ölçümü yapacak şekilde ayarlamayı unutmayın.

2. Farklı R_L değerleri için çıkış voltajının tepe (V_{Lpeak}) ortalama (V_{LDC}) değerlerini ölçün.

| R_L | 330 Ω | 560 Ω | 1.2 k Ω |
|-------------|--------------|--------------|----------------|
| V_{Lpeak} | | | |
| V_{LDC} | | | |

3. R_L direncine paralel olacak şekilde devreye 22 μF değerinde bir kapasitör ekleyin. (kapasitör polaritesinin V_L polaritesine uygun olduğundan emin olun).



v_L nin tepe voltajını (peak voltage), tepeden-tepeye dalgalanma voltajını (peak-to-peak ripple voltage), DC değerini ve DC yük akımını yukarıda kullandığınız 3 farklı R_L değeri için ölçün ve/veya hesaplayın. Ortalama DC yük voltajını (average DC load voltage), V_{LDC} , denklem [6] yı kullanarak hesaplayın.

| RL | 330 Ω | 1.2 k Ω | 10 k Ω |
|-----------------------------|--------------|----------------|---------------|
| V _{Lpeak} | | | |
| V _{rpIPP} | | | |
| V _{LDC} ölçülen | | | |
| V _{LDC} hesaplanan | | | |

3.a) $R_L = \infty$ ve $R_L = 330 \Omega$ dirençleri için yük regülasyonu (load regulation) nedir?

3.b) Bu 3 R_L değeri için dalgalanma faktörünü (ripple factor) hesaplayın.

3.c) Yük direncinin dalgalanma voltajı (ripple voltage) üzerindeki etkisini açıklayın.

4. $R_L = 330 \Omega$ kullanın ve C_1 e ek olarak R_L ye paralel olacak şekilde yeni bir $22 \mu F$ lık bir kapasitör bağlayın. Yukarıdaki tablonun ilk sütunundaki ölçümlerinizi aşağıya kopyalayın. İki kapasitörlü konfigürasyon için V_L tepe değerini, tepeden tepeye dalgalanma voltajını, V_L nin DC değerini ve DC yük akımını ölçüp ya da hesaplayıp sağdaki sütuna yazın.

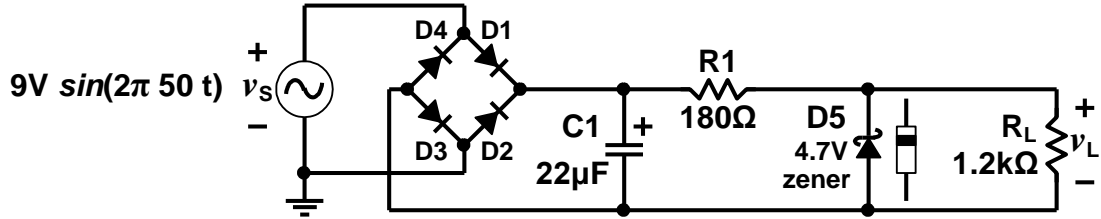
| Filtreleme Kapasitörü | 22 μF | 22+22 μF |
|-----------------------------|------------|---------------|
| V _{Lpeak} | | |
| V _{rpIPP} | | |
| V _{LDC} ölçülen | | |
| V _{LDC} hesaplanan | | |

4.a) 2 tane 22 μF lık kapasitörlerle birlikte yük regülasyonu (load regulation) nedir?

4.b) Filtreleme kapasitörünün dalgalanma voltajı üzerindeki etkisini açıklayın.

5. Sinyal jeneratörünü kapatın ve aşağıdaki devreyi kurun. Sinyal jeneratörünü çalıştırmadan önce zener diyot katodunun aşağıda gösterildiği gibi positive voltaj tarafında olduğundan emin olun.

Osiloskop problemlerinin toprak bağlantılarını RL terminallerine bağlayamayacağınıza dikkat edin. Aksi takdirde D2 veya D3 diyotlarında kısa devre meydana gelecektir. Topraklama konnektörleri (ground connectors), sinyal jeneratörü çıkışındaki toprak kablosuna bağlanmalıdır. Osiloskopu diferansiyel voltaj ölçümü yapacak şekilde ayarlamayı unutmayın.



| RL | 330 Ω | 1.2 kΩ | 10 kΩ |
|--------------------------|-------|--------|-------|
| V _{Lpeak} | | | |
| V _{rpp} | | | |
| V _{LDC} ölçülen | | | |

5.a) Her bir RL değeri için sonuçlarınızı kıyaslayın.

5.b) Sonuçlarınızı 3. kısım ile kıyaslayın.

5.c) Zener diyotun devreye etkisi nedir?