

EEM211 ELEKTRİK DEVRELERİ-I

Prof. Dr. Selçuk YILDIRIM

Siirt Üniversitesi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Kaynak (Ders Kitabı):

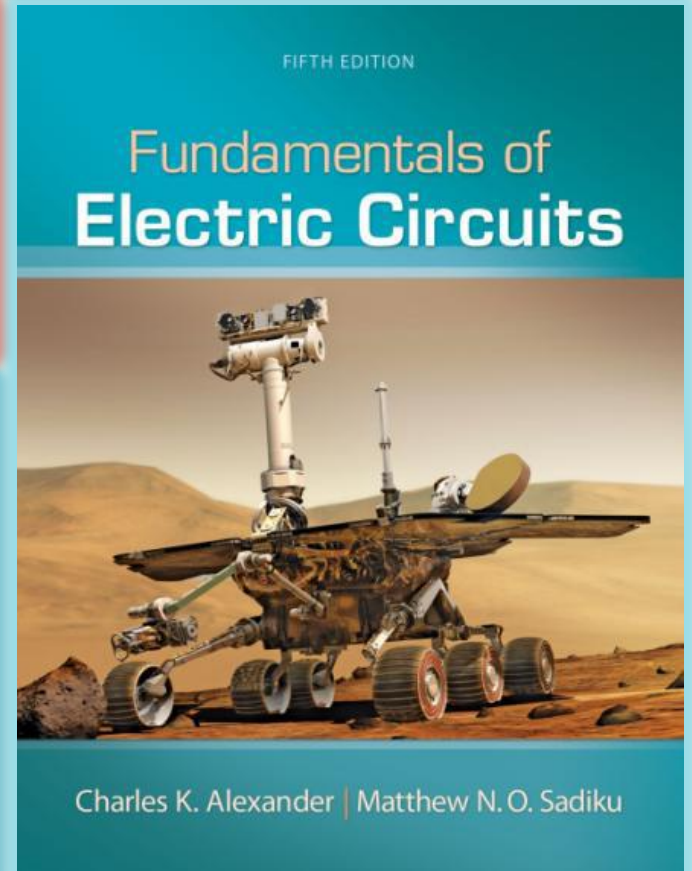
Fundamentals of Electric Circuits

Charles K. Alexander

Matthew N.O. Sadiku

McGraw Hill, 5th edition

ISBN: 978-0073380575, 2013.



4. Bölüm: Devre Teoremleri

4.1 Giriş

- Kirchhoff kanunlarının en büyük dezavantajı, büyük ve karmaşık devrelerde çok fazla hesaplama gerektirmesidir.
- Elektrik devrelerinin uygulama alanlarının büyümesi basit devrelerden karmaşık devrelere geçişe neden olmuştur.
- Karmaşıklıktan kurtulmak için, mühendisler son yıllarda devre analizini basitleştiren bazı teoremler geliştirilmiştir.
- Bu teoremler, **Thevenin ve Norton teoremleridir**.
- Bu teoremler lineer devrelere uygulanabildiğinden ilk önce devrenin lineerliği kavramını göreceğiz.
- Devre teoremlerine ilave olarak, bu bölümde süperpozisyon, kaynak dönüşümü ve maksimum güç transferi kavramlarını göreceğiz.

4.2 Lineerlik Özelliği

- Lineerlik, sebep ve sonuç arasında lineer bir ilişki tanımlayan eleman özelliğidir.
- Bu özelliğin birçok devre elemanına uygulanmasına rağmen, bu bölümde dirençlere uygulanabilirliği incelenecektir.
- Lineerlik özelliği, homojenlik özelliği ve toplamsallık özelliğinin bir birleşimidir.
- Homojenlik özelliğine göre; giriş bir sabit ile çarpılırsa, çıkışı (cevabı) da aynı sabit ile çarpılır.
- Bir direnç için, Ohm kanunu i girişine v çıkışı ile ilgilidir.

$$v = iR$$

- Akım bir k sabiti ile artırılırsa, gerilim buna bağlı olarak k kadar artar.

$$kiR = kv$$

- Toplamsallık özelliğine göre; bütün girişlerin toplamına cevabı, ayrı ayrı uygulanan her bir girişe cevapların toplamına eşittir.

- Bir direnç için, gerilim-akım ilişkisi kullanılarak,

$$v_1 = i_1 R$$

- ve

$$v_2 = i_2 R$$

- $(i_1 + i_2)$ uygulanarak,

$$v = (i_1 + i_2)R = i_1 R + i_2 R = v_1 + v_2$$

- Buradan, gerilim-akım ilişkisi hem homojenlik hem de toplamsallık özelliğini sağladığından direncin bir lineer eleman olduğunu söyleriz.
- Genel olarak, bir devre hem homojenlik hem de toplamsallık özelliğini sağlıyorsa lineerdir.
- Bir lineer devre; sadece lineer elemanlar, lineer bağımlı ve bağımsız kaynaklar içerir.
- Bir lineer devre, girişi ile çıkışı arasında lineer bir ilişki (veya doğru orantı) olan devredir.
- Bu derste sadece lineer devreler incelenecektir.

- $p = i^2 R = v^2 / R$ olduğundan güç ve gerilim (veya akım) arasındaki ilişki lineer değildir.
- Bundan dolayı bu bölümdeki devre teoremleri güce uygulanamaz. Örneğin,
- R_1 direncinden i_1 akımı aktığında, gücü $p_1 = Ri_1^2$ 'dir.
- R_2 direncinden i_2 akımı aktığında, gücü $p_2 = Ri_2^2$ 'dir.
- Eğer R direncinden $i_1 + i_2$ akımı akarsa çekilen güç,

$$p_3 = R(i_1 + i_2)^2 = Ri_1^2 + Ri_2^2 + 2Ri_1i_2 \neq p_1 + p_2$$
- Olduğundan güç ilişkisi lineer değildir.
- Şekil 4.1'deki lineer devrede R direncinden geçen i akımını çıkış olarak alabiliriz.

$v_s = 10 V$ uygulandığında $i = 2 A$

verdiğini kabul edelim.

Lineerlik özelliğine göre;

$v_s = 1 V$ uygulandığında $i = 0.2 A$

$v_s = 5 mV$ uygulandığında $i = 1 mA$

verecektir.

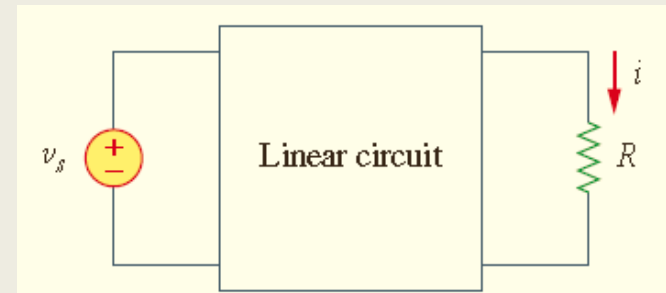


Figure 4.1

A linear circuit with input v_s and output i .

4.3 Süperpozisyon Kuralı

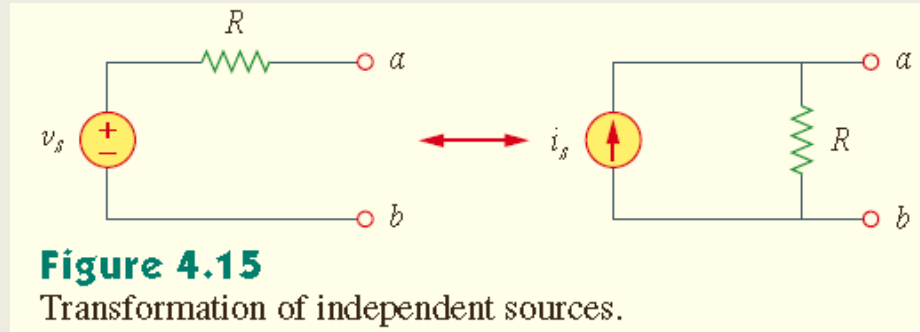
- Bir devrede iki veya daha fazla bağımsız kaynak varsa, belirli bir değişkenin (gerilim veya akım) değerini bulmak için düğüm analizi veya çevre analizini kullanmak bir yoldur.
- Diğer bir yol, her bir bağımsız kaynağın değişkene etkisini bulmak ve onları birbirlerine eklemektir.
- Süperpozisyon kuralı, lineerlik özelliğine dayanır.
- Süperpozisyon kuralı; lineer devrede bir elemandaki gerilim düşümü veya akım, her bir bağımsız kaynağın tek başına etkisi nedeniyle oluşan elemandaki gerilim düşümleri ve akımların cebirsel toplamıdır.
- Süperpozisyon kuralı, birden fazla bağımsız kaynak bulunan bir lineer devrede her bir kaynağın ayrı ayrı etkisini hesaplayarak, devreyi analiz etmek için kullanılır.

- Süperpozisyon kuralını uygulamak için iki hususa dikkat etmek gerekir:
 1. Bir bağımsız kaynağın etkisi incelenirken diğer bütün bağımsız kaynaklar kapatılır. Yani, her bir gerilim kaynağı $0 V$ (veya kısa devre) ve her bir akım kaynağı $0 A$ (veya açık devre) yapılır.
 2. Bağımlı kaynaklar, devre değişkenleri tarafından kontrol edildiği için bunlara karışılmaz.
- Süperpozisyon kuralının uygulanması için adımlar:
 1. Bir kaynak hariç bütün bağımsız kaynaklar kapatılır. Düğüm analizi ve çevre analizi kullanılarak, aktif olan kaynaktan dolayı oluşan çıkış (gerilim veya akım) bulunur.
 2. Diğer bağımsız kaynakların her birisi için 1. adım tekrarlanır.
 3. Bağımsız kaynakların bütün etkileri cebirsel olarak toplanarak toplam etki bulunur.
- Süperpozisyon kuralı, gerilim kaynaklarının kısa devre ve akım kaynaklarının açık devre edilmesiyle karmaşık devreleri basit devrelere indirger.
- Süperpozisyonun olumsuz yönü; bağımsız kaynak sayısı kadar devre analizi gerektirmesidir.

4.4 Kaynak Dönüşümü

- Devrelerin basitleştirilmesi için seri-paralel birleşimi ve yıldız – üçgen dönüşümlerini görmüştük.
- Kaynak dönüşümü devrelerin basitleştirilmesi için diğer bir araçtır. Bu araçlar eşdeğerlik kavramına dayanır. Bir eşdeğer devrede $v - i$ karakteristiğinin orijinal devreyle özdeş olduğunu hatırlayalım.
- Devre analizinde, bir direnç ile ona seri bağlı bir gerilim kaynağının yerine, bir direnç ile ona paralel bağlı bir akım kaynağı veya tam tersi alınabilir. Her iki durum kaynak dönüşümü olarak bilinir.
- Kaynak dönüşümü; bir R direnci ile seri bağlı bir v_s gerilim kaynağının, bir R direnci ile paralel bağlı bir i_s akım kaynağına dönüştürülmesi veya tam tersinin alınması işlemidir.

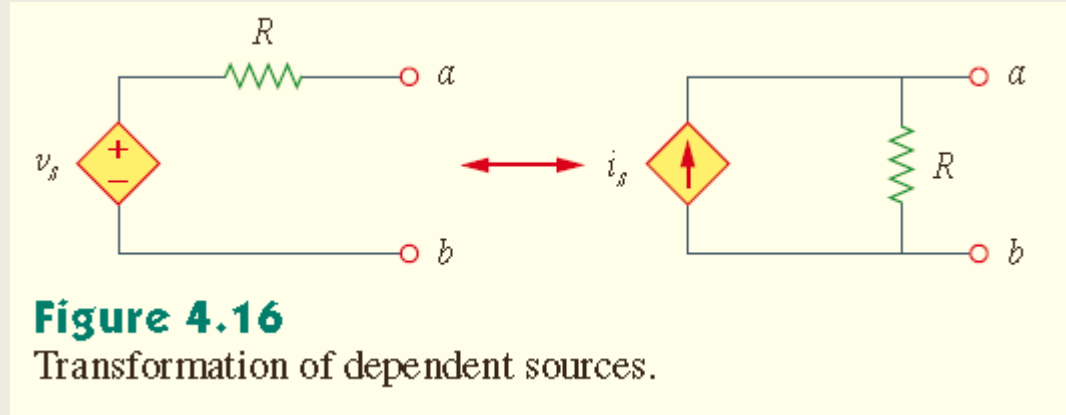
- Şekil 4.15'teki iki devrenin $a - b$ uçlarındaki gerilim-akım ilişkisi aynıdır.



- Kaynaklar kapatıldığında her iki devrenin de $a - b$ uçlarındaki eşdeğer direnci R olur.
- Ayrıca, $a - b$ uçları kısa devre edildiğinde a 'dan b 'ye akan akım kısa devre akımıdır. Kısa devre akımı, sol taraftaki devrede $i_{kd} = \frac{v_s}{R}$ ve sağ taraftaki devrede $i_{kd} = i_s$ 'dir.
- Böylece, $\frac{v_s}{R} = i_s$ olması durumunda iki devre eşdeğer olacaktır.
- Kaynak dönüşümünde kullanılan denklemler şu şekilde olur:

$$v_s = i_s R \quad \text{veya} \quad i_s = \frac{v_s}{R}$$

- Kaynak dönüşümü, bağımlı değişkenlerin korunmasına dikkat edilerek bağımlı kaynaklara da uygulanabilir.
- Şekil 4.16'daki gibi, bir direnç ile seri bağlı bağımlı gerilim kaynağı, bir direnç ile paralel bağlı bağımlı akım kaynağına veya tam tersine dönüştürülebilir.



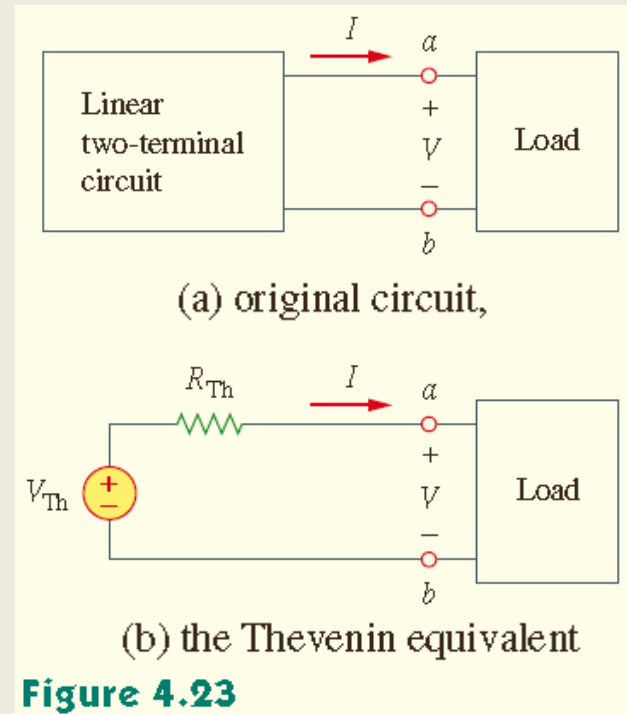
- Kaynak dönüşümünün devrenin geri kalan kısmına etkisi yoktur. Kaynak dönüşümünde dikkat edilmesi gereken noktalar:
 1. Akım kaynağının ok yönü, gerilim kaynağının pozitif ucuna doğru olmalıdır.
 2. İdeal gerilim kaynağı olması ($R = 0$) durumunda veya ideal akım kaynağı ($R = \infty$) durumunda kaynak dönüşümü yapılamaz.

4.5 Thevenin Teoremi

- Pratikte bir devrede, diğer elemanlar sabit iken belirli bir eleman (yük) değişkendir. Örneğin, evdeki bir prize değişken bir yük oluşturan farklı cihazlar bağlanabilir. Değişken eleman değiştiğinde, her defasında bütün devre her yönüyle tekrar analiz edilecektir.
- Bu problemden kaçınmak için, Thevenin teoremi, devrenin sabit kısmının bir eşdeğer devre ile gösterildiği bir teknik sağlar.

Thevenin teoremine göre,

- Şekil 4.23(a)'daki bir lineer devre Şekil 4.23(b)'deki devre ile gösterilebilir. (Şekil 4.23'deki yük tek bir direnç veya başka bir devre olabilir).
- Şekil 4.23(b)'deki devrenin $a - b$ uçlarının sol tarafındaki devre Thevenin eşdeğer devresi olarak bilinir.



4.5 Thevenin Teoremi

- Thevenin teoremi, lineer iki uçlu bir devrenin bir V_{Th} gerilim kaynağı ile ona seri bağlı bir R_{Th} direncinden oluşan bir eşdeğer devre ile gösterilebileceğini ifade eder.
- Burada, V_{Th} uçlardaki açık–devre gerilimi ve R_{Th} bağımsız kaynaklar kapatıldığında uçlardaki giriş direnci veya eşdeğer dirençtir.
- Şimdi, V_{Th} Thevenin eşdeğer gerilimi ile R_{Th} direncinin nasıl bulunduğunu görelim.
- Şekil 4.23'deki iki devrenin eşdeğer olduğunu kabul edelim.
- Uçlarındaki gerilim-akım ilişkisi aynı ise iki devre eşdeğerdir.
- Şimdi, Şekil 4.23'deki iki devrenin nasıl eşdeğer yapılacağını bulalım.
- $a - b$ uçları açık devre yapılırsa (yük kaldırılırsa) akım akmaz. Bu durumda, iki devre eşdeğer olduğundan Şekil 4.23(a)'da $a - b$ uçlarında düşen açık devre gerilimi, Şekil 4.23(b)'deki V_{Th} gerilim kaynağına eşit olur.

4.5 Thevenin Teoremi

- Böylece, Şekil 4.24(a)'da gösterildiği gibi V_{Th} uçlardaki açık–devre gerilimine eşit olur.

$$V_{Th} = v_{ad}$$

- Yükü devre dışı bırakalım ve $a - b$ uçlarını açık devre yaparak, bütün bağımsız kaynakları kapatalım.
- İki devre eşdeğer olduğundan, Şekil 4.23(a)'daki devrenin $a - b$ uçlarındaki giriş direnci (eşdeğer direnç), Şekil 4.23(b)'deki R_{Th} direncine eşit olmalıdır.

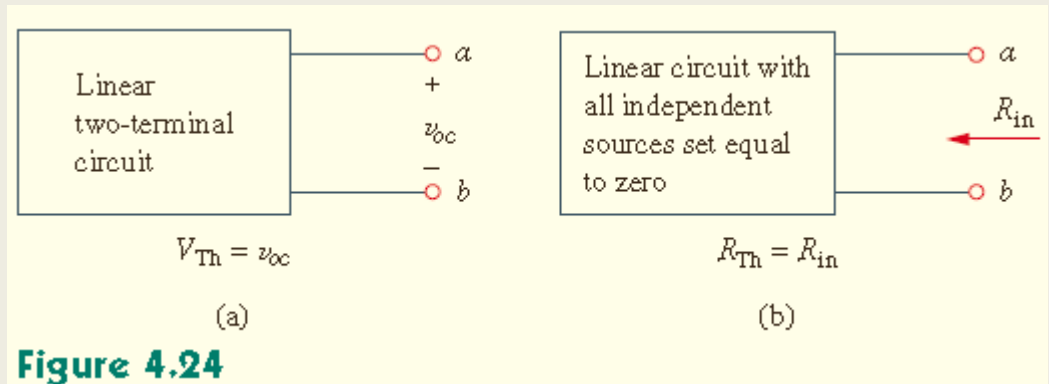


Figure 4.24

- Şekil 4.24(b)'de gösterildiği gibi, bağımsız kaynaklar kapatıldığında uçlardaki giriş direnci,

$$R_{Th} = R_g$$

olur.

4.5 Thevenin Teoremi

- R_{Th} Thevenin direncinin bulunmasında iki durumu göz önüne almamız gerekir:
 1. **Durum:** Devrede bağımlı kaynak yoksa, bütün bağımsız kaynakları kapatıyoruz. Şekil 4.24(b)'de gösterildiği gibi R_{Th} , devrenin $a - b$ uçları arasından görünen giriş direncidir.
 2. **Durum:** Devrede bağımlı kaynaklar varsa, bütün bağımsız kaynakları kapatıyoruz. (Süperpozisyonda olduğu gibi, bağımlı kaynaklar devre değişkenleri tarafından kontrol edildiğinden kapatılmazlar.)
- $a - b$ uçlarına v_0 gerilim kaynağını uyguluyoruz ve i_0 sonuç akımını buluyoruz.
- O zaman Şekil 4.25(a)'da gösterildiği gibi,

$$R_{Th} = v_0 / i_0 \quad \text{olur.}$$

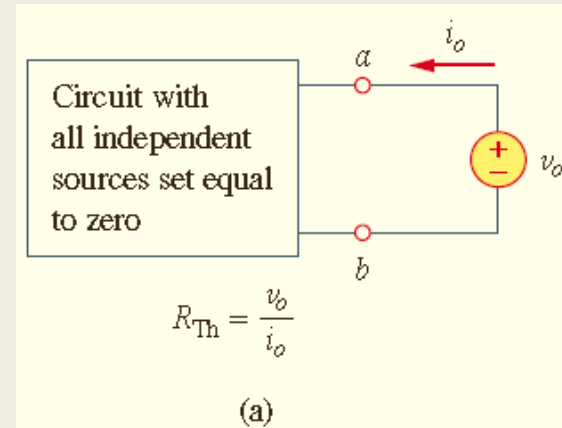


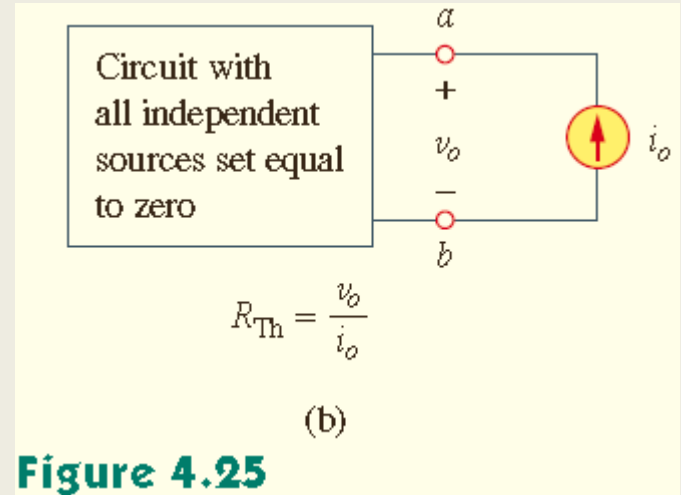
Figure 4.25

Finding R_{Th} when circuit has dependent sources.

4.5 Thevenin Teoremi

- Alternatif olarak, Şekil 4.25(b)'de gösterildiği gibi $a - b$ uçlarına i_0 akım kaynağı koyabilir ve v_0 uç gerilimini bulabiliriz. Yine,

$$R_{Th} = v_0/i_0 \text{ olur.}$$



- Her iki yaklaşım aynı sonucu verecektir. Her iki yaklaşımda, v_0 ve i_0 için herhangi bir değer kabul edebiliriz.
- Örneğin, $v_0 = 1 V$ veya $i_0 = 1 A$ alabiliriz. Hatta v_0 ve i_0 değerlerini belirtmeyebiliriz.
- Thevenin teoremi, devre analizinde çok önemlidir. Bu teorem, bir devreyi basitleştirmeye yarar. Büyük bir devre, tek bir bağımsız gerilim kaynağı ve tek bir direnç ile gösterilebilir. Bu değiştirme tekniği, devre tasarımında güçlü bir araçtır.

4.5 Thevenin Teoremi

- Daha önce bahsedildiği gibi, değişken yüklü lineer bir devre, yükün dışarıda tutulmasıyla, Thevenin eşdeğeri ile gösterilebilir.
- Eşdeğer devre, orijinal devre ile aynı şekilde davranır.
- Şekil 4.26(a)'da gösterilen, uçlarında R_L direnç yükü bulunan devreyi göz önüne alalım.
- Yükten geçen I_L yük akımı ve V_L yük gerilimi Şekil 4.26(b)'de gösterildiği gibi, yük uçlarından elde edilen devrenin Thevenin eşdeğerinden kolayca bulunur.
- Şekil 4.26(b)'den,

$$I_L = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_L}$$

$$V_L = R_L I_L = \frac{R_L}{R_{Th} + R_L} V_{Th}$$

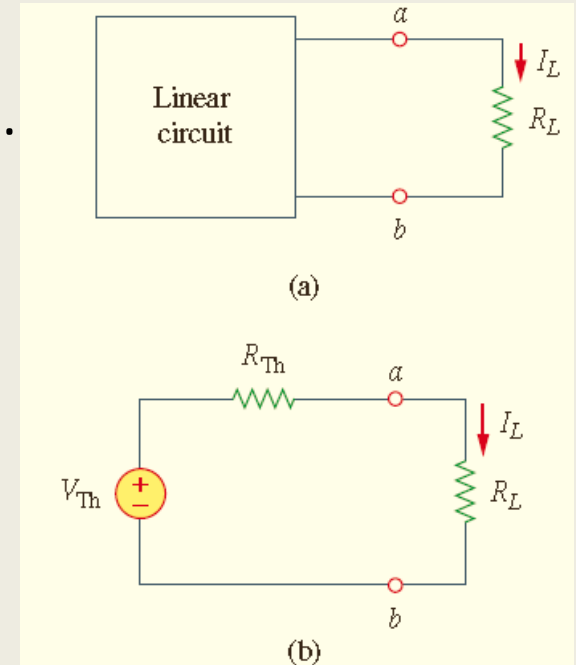


Figure 4.26

A circuit with a load: (a) original circuit, (b) Thevenin equivalent.

- Thevenin eşdeğeri basit bir gerilim bölen devredir.

4.6 Norton Teoremi

- Norton teoremi, lineer iki uçlu bir devrenin bir I_N akım kaynağı ile ona paralel bağlı bir R_N direncinden oluşan bir eşdeğer devre ile gösterilebileceğini ifade eder.
- Burada, I_N uçlardan geçen kısa-devre akımı ve R_N bağımsız kaynaklar kapatıldığında uçlardaki giriş direnci (eşdeğer) dirençtir.
- Böylece Şekil 4.37(a)'daki devre, Şekil 4.37(b)'deki devre ile gösterilebilir.
- Şimdi, I_N Norton eşdeğer akımı ile R_N direncinin nasıl bulunduğunu görelim.
- R_N direncini, R_{Th} direncini bulduğumuz gibi buluyoruz.
- Aslında, kaynak dönüşümü hakkımdaki bilgilerimizden Thevenin ve Norton dirençlerinin eşdeğer olduğunu biliyoruz.

$$R_{Th} = R_N$$

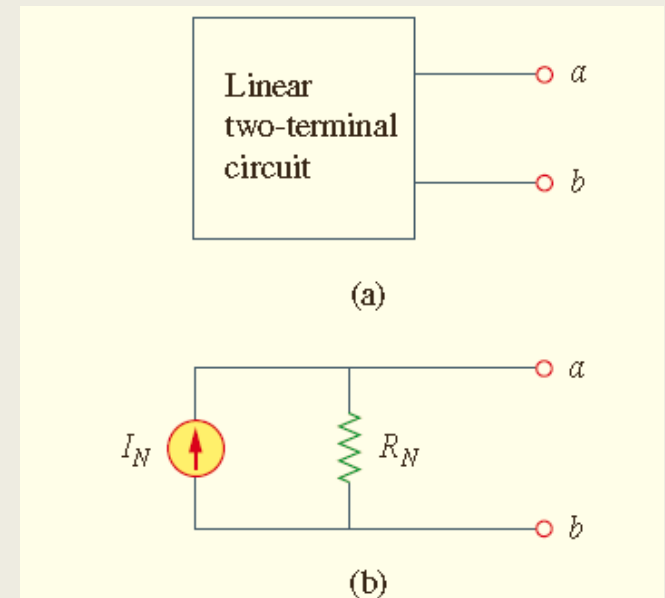


Figure 4.37

(a) Original circuit, (b) Norton equivalent circuit.

4.6 Norton Teoremi

- I_N Norton akımını bulmak için, Şekil 4.37'deki her iki devredeki $a - b$ uçlarından geçen kısa devre akımını belirliyoruz.
- I_N akımı, Şekil 4.37(b)'deki kısa devre akımıdır. Bu akım, iki devre eşdeğer olduğundan, Şekil 4.37(a)'da $a - b$ uçlarından geçen kısa devre akımı ile aynı olmalıdır. Böylece, Şekil 4.38'de gösterildiği gibi,

$$I_N = i_{kd}$$

olarak yazılır.

- Norton ve Thevenin teoremleri arasındaki ilişki şöyle olur:

$$R_{Th} = R_N \quad \text{ve} \quad I_N = \frac{V_{Th}}{R_{Th}}$$

- Bu aslında kaynak dönüşümüdür. Bu nedenle, Thevenin-Norton dönüşümü genellikle kaynak dönüşümü olarak isimlendirilir.

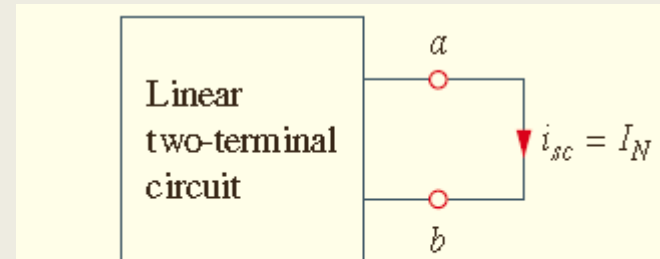


Figure 4.38
Finding Norton current I_N .

4.6 Norton Teoremi

- Yukarıdaki denkleme göre, V_{Th} , I_N ve R_{Th} birbirleriyle ilişkili olduğundan, Thevenin veya Norton eşdeğer devresini bulmak için aşağıdakileri bulmamız gerekir:
 1. $a - b$ uçlarında düşen v_{ad} açık-devre gerilimi.
 2. $a - b$ uçlarındaki i_{kd} kısa-devre akımı.
 3. Bütün bağımsız kaynaklar kapatıldığında $a - b$ uçlarındaki R_g giriş veya eşdeğer direnci.
- Yöntemi kullanarak, bu üçünden herhangi ikisini ve Ohm kanunu kullanarak üçüncüsünü az bir gayretle hesaplayabiliriz.

$$V_{Th} = v_{ad}$$

$$I_N = i_{kd}$$

$$R_{Th} = \frac{v_{ad}}{i_{kd}} = R_N$$

- Açık devre ve kısa devre testleri, en az bir bağımsız kaynak içeren bir devrenin Thevenin ve Norton eşdeğerini bulmak için yeterlidir.

4.8 Maksimum Güç Transferi

- Birçok pratik durumda, bir devre bir yüke güç sağlamak için tasarlanır.
- Bir yüke verilen gücün maksimize edilmesi, haberleşme gibi alanlarda uygulanır.
- Şimdi iç kayıpları bilinen bir sistemde, bir yüke maksimum güç verilmesi problemini inceleyeceğiz.
- Bu durumun, iç kayıpların yüke verilen güce eşit veya daha büyük olduğunda önemli sonuçları olacağı not edilmelidir.
- Thevenin eşdeğeri, lineer bir devrede bir yüke verilen maksimum gücün bulunmasında faydalıdır.
- R_L yük direncini ayarlayabildiğimizi kabul edelim. Şekil 4.48'deki gibi, yükün dışında tüm devre Thevenin eşdeğeriyle gösterilirse yüke verilen güç,

$$p = i^2 R_L = \left(\frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_L} \right)^2 R_L \text{ olur.}$$

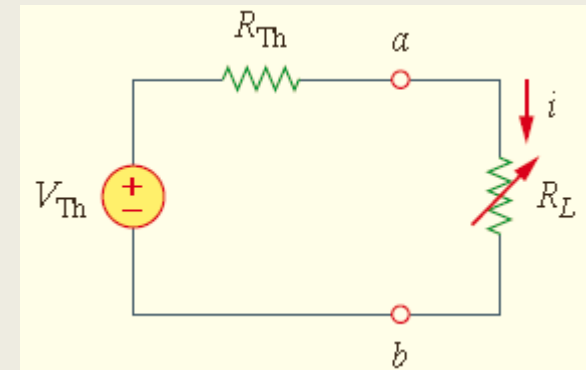
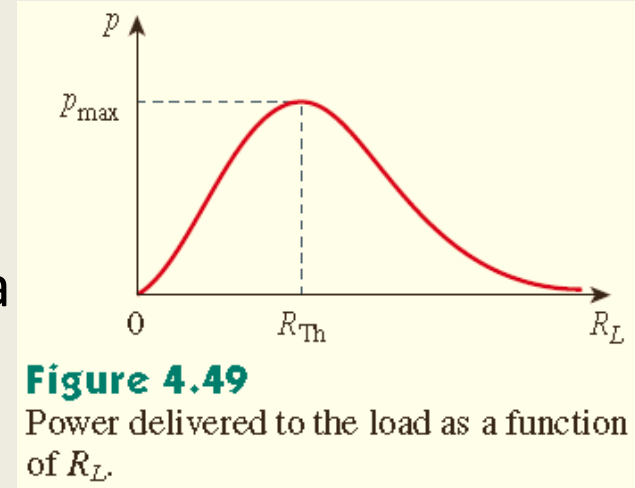


Figure 4.48

The circuit used for maximum power transfer.

4.8 Maksimum Güç Transferi

- Verilen bir devre için, V_{Th} ve R_{Th} sabittir. Yük direnci R_L 'nin değiştirilmesiyle Şekil 4.49'da çizildiği gibi yüke verilen güç değişir.
- Şekil 4.49'da R_L 'nin çok küçük veya çok büyük değerleri için gücün çok küçük olduğu, fakat 0 ile ∞ arasında R_L 'nin bazı değeri için gücün maksimum olduğunu görüyoruz.
- Şimdi R_L 'nin R_{Th} 'e eşit olduğu durumda maksimum gücün meydana geldiğini göstereceğiz.
- Bu **maksimum güç teoremi** olarak bilinir.
- Yük direncinin yük tarafından görünen Thevenin direncine eşit olduğu durumda ($R_L = R_{Th}$) yüke maksimum güç aktarılır.



4.8 Maksimum Güç Transferi

- Maksimum güç transferi teoremini ispatlamak için, $p = i^2 R_L = \left(\frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_L} \right)^2 R_L$ denkleminde p 'nin R_L 'ye göre türevini alıyoruz ve sonucu sıfıra eşitliyoruz.

$$\frac{dp}{dR_L} = V_{Th}^2 \left[\frac{(R_{Th} + R_L)^2 - 2R_L(R_{Th} + R_L)}{(R_{Th} + R_L)^4} \right]$$

$$\frac{dp}{dR_L} = V_{Th}^2 \left[\frac{(R_{Th} + R_L - 2R_L)}{(R_{Th} + R_L)^3} \right] = 0$$

$$0 = (R_{Th} + R_L - 2R_L) = R_{Th} - R_L$$

$$R_L = R_{Th}$$

Buradan, $(R_L = R_{Th})$ olduğunda aktarılan edilen maksimum güç,

$$p_{max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{Th}}$$

$(R_L \neq R_{Th})$ olduğunda yüke verilen gücü bulmak için,

$$p = i^2 R_L = \left(\frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_L} \right)^2 R_L \quad \text{formülünü kullanıyoruz.}$$

4.10 Uygulamalar

Bu bölümde, Thevenin ve Norton teoremlerinin iki önemli pratik uygulamasını göreceğiz.

a) Kaynak Modelleme:

- Kaynak modelleme, Thevenin veya Norton eşdeğerinin kullanılabilirliğine bir örnektir.
- Batarya gibi aktif bir kaynak Thevenin veya Norton eşdeğer devresiyle karakterize edilebilir.
- İdeal bir gerilim kaynağı, yük tarafından çekilen akıma bakmaksızın sabit bir gerilim verir.
- İdeal bir akım kaynağı da, yük gerilimi ne olursa olsun sabit bir akım verir.
- Şekil 4.58'de gösterilen pratik gerilim ve akım kaynakları, iç dirençleri veya kaynak dirençleri (R_s ve R_p) nedeniyle ideal değildir.
- $R_s \rightarrow 0$ ve $R_p \rightarrow \infty$ için bu kaynaklar ideal olur.

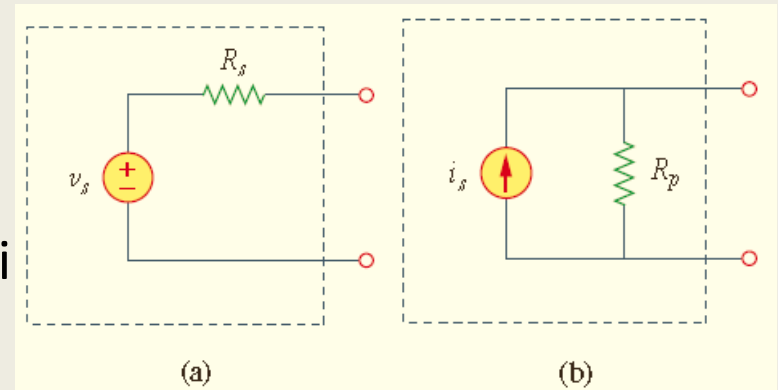


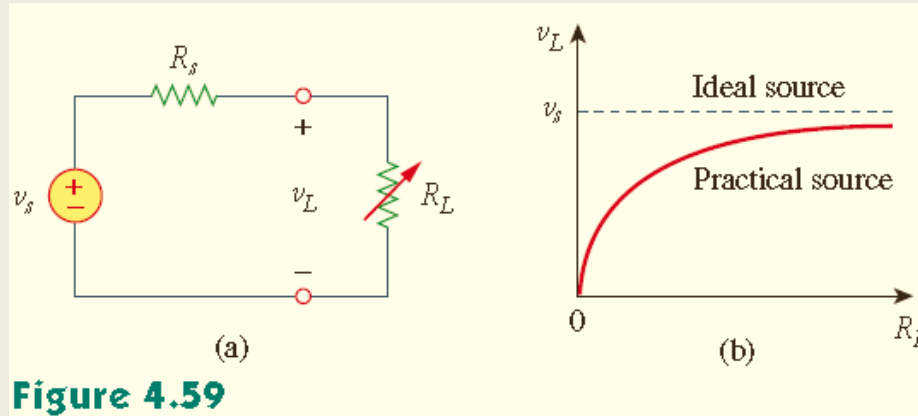
Figure 4.58

(a) Practical voltage source, (b) practical current source.

- Bu durumun gösterildiği Şekil 4.59'da gerilim kaynaklarının üzerinde yükün etkisini göz önüne alalım. Gerilim bölme kuralından,

$$v_L = \frac{R_L}{R_S + R_L} v_S$$

- R_L artarken, yük gerilimi Şekil 4.59(b)'de gösterildiği gibi v_S kaynak gerilimine yaklaşır. Bu denkleme göre şunlar söylenebilir:
 - Kaynağın iç direnci R_S sıfır veya $R_S \ll R_L$ olduğunda yük gerilimi sabit olacaktır. Yani, R_L 'yanında R_S çok küçük olduğunda gerilim kaynağı ideale daha yakın olur.

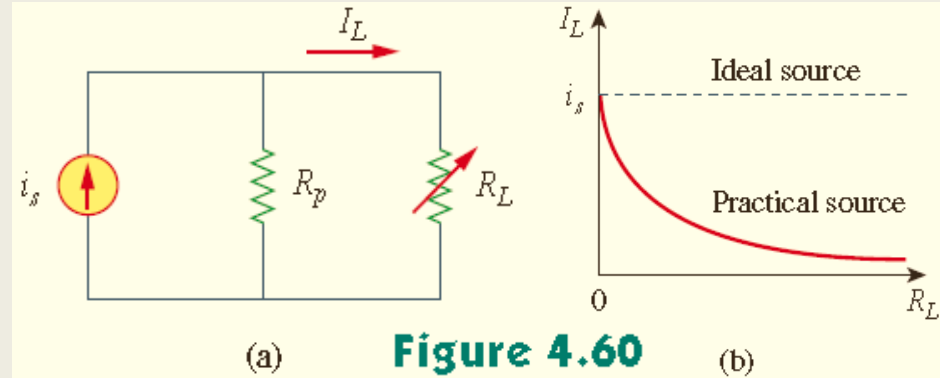


- Yük kaldırıldığında (yani, kaynak $R_L \rightarrow \infty$ için açık devre yapıldığında) $v_{ad} = v_S$ olur.

- Böylece, v_s yüksüz kaynak gerilimi olarak görülebilir.
- Yük bağlanması uç geriliminin büyüklüğünde düşmeye neden olur, bu **yük etkisi** olarak bilinir.
- Aynı yorum, Şekil 4.60(a)'da gösterildiği gibi pratik bir akım kaynağının bir yüke bağlandığı durum için de yapılabilir.
- Akım bölme kuralından,

$$I_L = \frac{R_p}{R_p + R_L} i_s$$

yazılır.

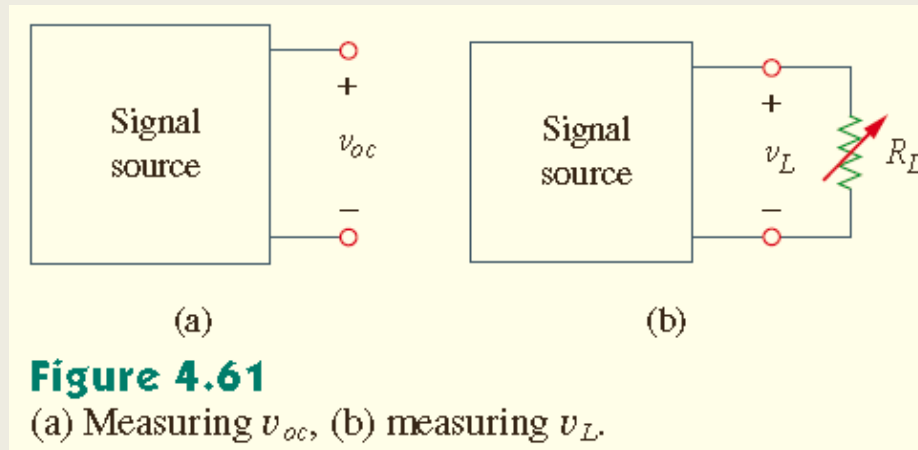


- Şekil 4.60(b) yük direnci artarken yük akımındaki değişim gösterilmiştir. R_L artarken yük akımı düşer.
- Aynı şekilde, yük nedeniyle akımdaki düşme yük etkisidir ve iç direnç çok büyük olduğunda (yani, $R_p \rightarrow \infty$ veya $R_p \gg R_L$ için) yük akımı sabit olur (ideal akım kaynağı).

- Bazen v_s yüksüz kaynak gerilimini ve gerilim kaynağının R_s iç direncini bilmemiz gerekir.
- v_s ve R_s 'i bulmak için Şekil 4.61'de gösterilen işlemi takip ediyoruz.
- İlk önce, v_{ad} açık-devre gerilimini ölçüyoruz ve v_s 'e eşitliyoruz.

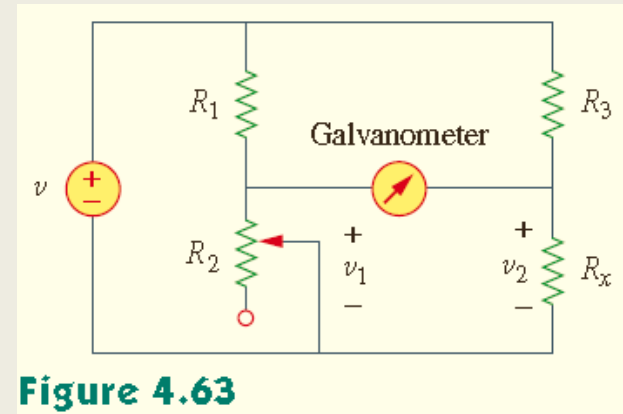
$$v_s = v_{ad}$$

- Sonra, Şekil 4.61(b)'deki gibi uçlara değişken bir yük direnci R_L bağlıyoruz.
- R_L direncini açık-devre geriliminin yarısı kadar bir yük gerilimi ölçünceye kadar ayarlıyoruz.
- $R_L = R_{Th} = R_s$ olduğundan, $v_L = v_{ad}/2$ olur.
- Bu noktada R_L 'yi çıkartıyoruz ve onu ölçüyoruz. $R_s = R_L$ yapıyoruz.



b) Direnç Ölçümü:

- Ohmmetre ile basit bir şekilde direnç ölçülmesine rağmen, Wheatstone köprüsü kullanarak daha doğru ölçüm yapılabilir.
- Ohmmetreler düşük, orta veya yüksek aralıklardaki dirençleri ölçmek için tasarlanırken, Wheatstone köprüsü orta aralıktaki 1Ω ve $1 M\Omega$ arasındaki dirençleri ölçmek için kullanılır.
- Çok küçük değerli dirençler miliohmmetre ile ölçülür. Çok büyük değerli olanlar Meger ile ölçülür.
- Wheatstone köprüsü (veya direnç köprüsü) devresi, bilinmeyen bir direncin ölçülmesi için kullanılacaktır.
- Bilinmeyen R_x direnci Şekil 4.63'te gösterildiği gibi köprüye bağlanır.
- Değişken direnç, galvanometreden akım akmayınca kadar ayarlanır.
- Galvanometre, hassas bir akım ölçen mikroamper aralığında ampermetreye benzeyen bir cihazdır.



- Wheatstone köprüsü, $v_1 = v_2$ şartını sağladığında dengededir, denir.
- Bu durumda, galvanometreden akım akmadığından, R_1 ile R_2 ve R_3 ile R_x seri olur.
- Galvanometreden akım akmaması $v_1 = v_2$ olduğu anlamındadır. Gerilim bölme kuralı uygulanarak,

$$v_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v = v_2 = \frac{R_x}{R_3 + R_x} v$$

- Buradan, galvanometreden akım akmayacağından,

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_x}{R_3 + R_x} \Rightarrow R_2 R_3 = R_1 R_x \Rightarrow R_x = \frac{R_3}{R_1} R_2$$

- $R_1 = R_3$ seçilir ve R_2 direnci galvanometreden akım akmayıncaya kadar ayarlanırsa, $R_x = R_2$ olur.
- Wheatstone köprüsü dengesiz olduğunda, galvanometreden geçen akımı bulmak için, Galvanometrenin uçlarına göre Thevenin eşdeğerini (V_{Th} ve R_{Th}) buluyoruz.
- Galvanometrenin direnci R_m olmak üzere, dengesiz durumda geçen akım,

$$I = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_m}$$