

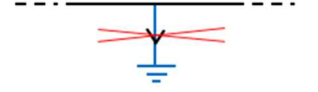
TAM DEVRE ANALİZİ

Bir devredeki bütün elemanların üzerindeki akım ve gerilimleri bulmak için tam devre analizi yöntemlerini görmeden önce bazı tanım ve kuralların bilinmesi gerekir.

Düğüm ve Şasi (Toprak)

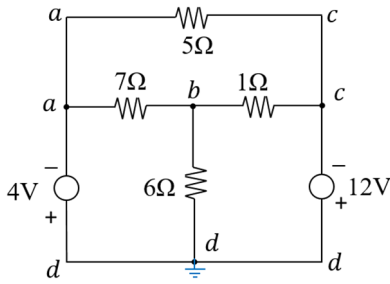
Devrede elemanların birleşim noktalarına “düğüm (*node*)” denir. İletkenle birleştirilen bütün noktalar aynı düğümdür. Düğümlerden keyfi bir tanesi tüm düğüm potansiyelleri için referans noktası olarak seçilirse bu noktaya “şasi” veya “toprak (*ground=GND*)” denir. Böylece potansiyel farkları yerine kısaca her bir noktanın potansiyelinden bahsedilebilir; ancak aslında bunlar da toprak noktasına göre potansiyel farkıdır.

Toprak seçilen düğüm noktasına bir toprak sembolü konur. Ancak bu sembolü üzerinden akım akan ayrı bir eleman zannetmemelidir. Şasi anlamındaki toprak ile “fiziksel toprak (*earth*)” çok farklıdır. Fiziksel toprağa doğru akım akabilir. Fiziksel toprak, şimdilik konumuzun dışındadır.



Devredeki toplam düğüm sayısının bir eksiği, “bağımsız düğüm sayısı”dır.

Örnek



a ile gösterilenlerin hepsi tek bir düğümdür.

c ile gösterilenlerin hepsi tek bir düğümdür.

d ile gösterilenlerin hepsi tek bir düğümdür.

Burada keyfi olarak *d* noktası toprak kabul edilmiştir.

Çevre

Aynı eleman üzerinden birden fazla geçmeden, uç uca bağlı elemanlar üzerinden dolaşarak başlanılan noktaya geline her bir halka şeklindeki yola “çevre (*loop*)” denir. Devredeki bütün elemanların en az bir çevrede bulunduğu asgari sayıda çevre kümesine “bağımsız çevreler” denir ve bu asgari sayıya da “bağımsız çevre sayısı” denir. Bağımsız çevre sayısı genellikle düzlemsel devre şemasında ilk bakışta en kısa yoldan kapandığı görülen halkaların (gözlerin) sayısı kadardır.

Örnek:

Önceki örnekteki devrede 7 çevre (hatta istenirse tersleri de sayılırsa 7 daha) tanımlanabilir

Ç1: a-5Ω-c-1Ω-b-7Ω-a

Ç4: a-7Ω-b-1Ω-c-12V-d-4V-a

Ç7: d-4V-a-5Ω-c-12V-d

Ç2: a-7Ω-b-6Ω-d-4V-a

Ç5: d-4V-a-5Ω-c-1Ω-b-6Ω-d

Ç3: b-1Ω-c-12V-d-6Ω-b

Ç6: d-6Ω-b-7Ω-a-5Ω-c-12V-d

Bunlardan sadece 3 tanesi bağımsız çevre kümesi olarak seçilebilir. Mesela, {Ç1, Ç2, Ç3} ya da {Ç1, Ç2, Ç4} ya da {Ç1, Ç3, Ç4} ya da {Ç2, Ç3, Ç7} gibi.

Kirchhoff Gerilim Yasası (*KVL = Kirchhoff Voltage Law*)

Bir çevre üzerindeki bir noktadan başlayıp belirli bir yönde (hep saat yönü ya da hep saatin tersi yönde) dolaşırken karşılaşılan gerilim düşümlerinin işaretleriyle birlikte toplamı sıfırdır. İstenirse gerilim düşümleri yerine hep yol üzerindeki noktalar arası potansiyel yükselmeleri toplanırsa da sıfır bulunur.

Karıştırmamak için hep aynı yönde (mesela saat yönünde) dolaşılması ve hep aynı potansiyel farklarının (mesela potansiyel yükselmelerinin) toplanması tavsiye edilir. Bazen bir türlü, bazen diğer türlü hesap yapan elektrik alanı dışındaki öğrencilerin karıştırma ihtimali artmaktadır.

Kirchhoff Akım Yasası (*KCL = Kirchhoff Current Law*)

Bir düğümde birleşen yollardaki akımların bileşkesi sıfırdır. İstenirse düğüme gelen tüm akımlar artı, çıkan tüm akımlar eksi alınır; istenirse düğüme gelen tüm akımlar eksi, çıkan tüm akımlar artı alınır.

Karıştırmamak için düğüme gelen akımların toplamı, çıkan akımların toplamına eşitlenerek de aynı denklemin bir çeşidi elde edilebilir.

Güç Dengesi

Devredeki bütün elemanlarının güçleri işaretleriyle birlikte toplanırsa sıfır bulunur. Mutlak değerce konuşursak, üretilen güçlerin toplamı, tüketilen güçlerin toplamına eşittir.

Bu kural, devre analizi sonuçlarının sağlanması amacıyla kullanılabilir. Ancak nadiren birbirini yok eden birden fazla hata ile de güç dengesi sağlanabileceğinden, güç dengesi analizin doğru yapıldığını garanti etmez.

Yasak veya Tanımsız Bağlantılar

1. İdeal gerilim kaynakları paralel bağlanmaz, voltajları eşit olsa bile. Daha genel ifadeyle tümüyle ideal gerilim kaynaklarından oluşan bir çevre tanımsızdır, KVL'yi sağlasa bile.

KVL sağlanmıyorsa, mesela farklı gerilimdeki ideal kaynaklar paralel bağlanmışsa bu, uçlar arası potansiyel farkı için çelişkili ifadelerde bulunmak anlamına gelir. Mesela $3V = 5V$ demek gibi.

Kısa devrenin de $0V$ 'luk ideal gerilim kaynağı sayıldığı unutulmamalıdır. Yani ideal gerilim kaynakları kısa devre edilemez.

KVL sağlanacak şekilde ideal gerilim kaynaklarının paralel bağlanması veya tümüyle ideal gerilim kaynaklarıyla bir çevre oluşturması, sadece o kaynakların akım paylaşımı için belirsizlik getirir ($0V/0\Omega$ belirsizliği). Devrenin diğer kısmı için belirsizlik veya tanımsızlık getirmez. Bu yüzden pratikte ideal olmayan kaynaklar için bu $(\sim 0V)/(\sim 0\Omega)$ belirsizliğinin karşılığı olan akım güvenli ise dikkatlice bağlanabilir.

2. İdeal akım kaynakları seri bağlanmaz, akımları eşit olsa bile. Daha genel ifadeyle sadece ideal akım kaynağı içeren kolların birleştiği bir düğüm tanımsızdır, KCL'yi sağlasa bile.

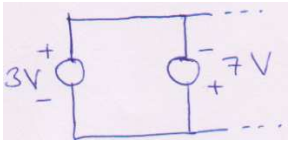
KCL sağlanmıyorsa, mesela farklı akımlı ideal kaynaklar seri bağlanmışsa bu, o koldaki akım için çelişkili ifadelerde bulunmak anlamına gelir. Mesela $2A = 6A$ demek gibi.

Açık devrenin de $0A$ 'lık ideal akım kaynağı sayıldığı unutulmamalıdır. Yani ideal akım kaynakları açık devre edilemez.

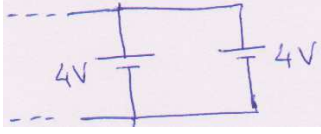
KCL sağlanacak şekilde ideal akım kaynaklarının seri bağlanması veya sadece ideal akım kaynağı içeren kolların birleştiği bir düğüm oluşturulması, yalnızca o kaynakların gerilim paylaşımı için belirsizlik getirir ($0A \times \infty\Omega$ belirsizliği). Devrenin diğer kısmı için belirsizlik veya tanımsızlık getirmez. Bu yüzden pratikte ideal olmayan kaynaklar için bu $(\sim 0A) \times (\sim \infty\Omega)$ belirsizliğinin karşılığı olan gerilim güvenli ise dikkatlice bağlanabilir.

Örnekler

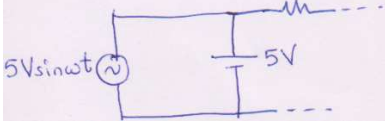
Her bir örneğin yasak mı uygulanabilir mi olduğunu açıklayınız.



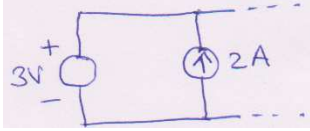
Cevap: Yasak.



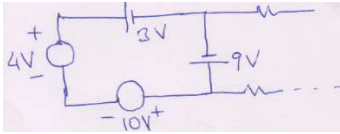
Cevap: Yasak ama sadece bu kaynak akımları belirsiz, devrenin diğer kısmı belirli.



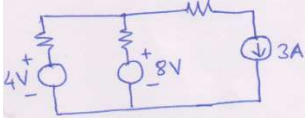
Cevap: Yasak. Her an için eşit olmadığından devrenin diğer kısmı için de tanımsız.



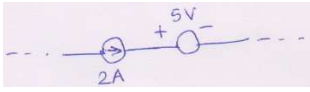
Cevap: Uygulanabilir. Biri gerilim kaynağı, biri akım kaynağı. Seri de bağlanabilir, paralel de.



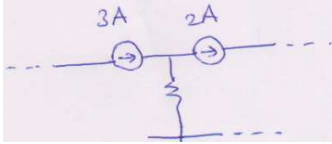
Cevap: Yasak ama KVL sağlandığı için devrenin diğer kısımları belirli. Sadece bu çevrenin akımı belirsiz.



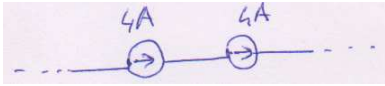
Cevap: Uygulanabilir.



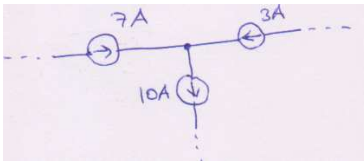
Cevap: Uygulanabilir. Biri gerilim kaynağı, biri akım kaynağı. Seri de bağlanabilir, paralel de.



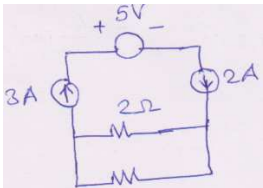
Cevap: Uygulanabilir. Düğümde birleşen kollardan birinde akım kaynağı yok.



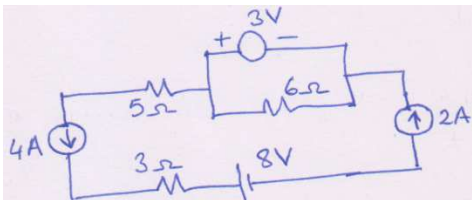
Cevap: Yasak ama devrenin diğer kısımları belirli. Sadece kaynak gerilimleri belirsiz.



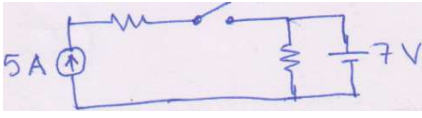
Cevap: Yasak ama KCL sağlandığı için devrenin diğer kısımları belirli, sadece bu düğümün potansiyeli belirsiz.



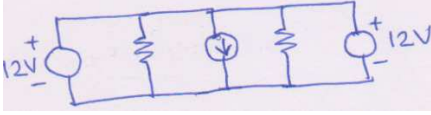
Cevap: Yasak. Akım kaynakları arasında başka tür eleman olsa da aynı kolda oldukları için.



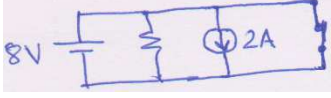
Cevap: Yasak. Akım kaynakları arasında başka elemanlar olsa da aynı koldalar.



Cevap: Yasak. Açık devre de akım kaynağı sayılır ve akım kaynağına seri bağlanamaz.



Cevap: Yasak. Arada başka tür elemanlar olsa da gerilim kaynakları paralel olmuş. Ama gerilimleri eşit olduğu için sadece o gerilim kaynaklarının akımları belirsiz. Devrenin diğer kısımları belirli.



Cevap: Yasak. Kısa devre de gerilim kaynağı sayılır ve gerilim kaynağına paralel bağlanamaz. Arada başka tür elemanlar olsa da kısa devre, 8V'luk kaynağa paralel olmuş.

ÇEVRE YÖNTEMİ İLE TAM DEVRE ANALİZİ

1) Bu yöntemde her bağımsız çevre için bir çevre akımı tanımlanır, öyle ki o çevrede en az bir eleman sadece o akımı taşımaktadır.

O çevrede akım kaynağı varsa çevre akımı o akım seçilir. Ancak her akım kaynağı sadece bir çevrenin çevre akımı olarak seçilebilir.

Bir çevrede birden fazla akım kaynağı olmayacak şekilde çevre tanımlanması (Örnek 2'deki gibi) kolaylıktır. Ancak olsa da sakınca yoktur.

Akım kaynaklarının hariç çevre akımları bağımsız bilinmeyen olarak tanımlanır.

2) Akım kaynakları için ise gerilim bilinmeyeni tanımlanır. Böylece bağımsız çevre sayısı kadar bilinmeyen tanımlanmış olur.

3) Diğer kollardaki akımlar ise yönleri de dikkate alınarak KCL'ye göre çevre akımlarının bileşkesi olarak düşünülür.

4) Her bağımsız çevre için bir KVL denklemi yazılır.

5) Çevre (KVL) denklemleri çözülerek bilinmeyenler bulunur.

6) Buradan tüm elemanlar üzerindeki akım ve gerilimler bulunur.

7) Güç dengesine bakılarak sağlama yapılır.

Dikkat:

- KVL denklemi yazılırken çok seçenek olması çoğu öğrencinin kafasını karıştırdığı için kendinizce bir seçenekte karar kılmanız önerilir. Meselâ çevreleri hep saat yönünde dolaşmak ve potansiyel yükselmelerini artı, düşümlerini eksi almak.

- Çevre akımlarını veya dolaşma yönünü kavisli oklarla göstermek çoğu öğrencinin kafasını karıştırdığından o okları hiç kullanmamanız tavsiye edilir! Tanımladığınız çevre akımını doğrudan hangi elemanın üzerinden hangi yönde geçtiği belli olacak şekilde (şekillerdeki $>$, $<$, vb ok uçları gibi) iletken üzerinde gösteriniz.

- Aynı çevre denkleminin aynı tarafında, aynı çevre akımı bütün dirençler için aynı işaretli olmaktadır. Meselâ aynı çevre denklemi içinde $\dots -3\Omega \times I_2 \dots -2\Omega \times (I_1 - I_2) \dots = 0$ gibi bir şeyler yazmışsanız kesin **yanlıştır**. Çünkü I_2 akımı, 3Ω için eksi, 2Ω için artı işaretli kullanılmış. (Bağımlı kaynak varsa bu kural geçerli olmayabilir.)

- Çözümlerde karışıklığı azaltmak için ara işlemlerde birimleri yazmayacağız ama sonuçlara mutlaka birim yazılmalıdır. Dirençlerin Ω cinsinden verildiği sorularda akımlar A, güçler W; dirençlerin $k\Omega$ cinsinden verildiği sorularda akımlar mA, güçler mW; gerilimler ise hep V anlaşılmalıdır.

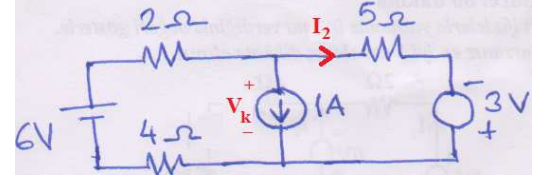
Örnekler

Soru kalıbı tüm örneklerde aynıdır: Verilen şekildeki devrede bağımsız çevre sayısı kadar bilinmeyen tanımlayıp çözünüz, her koldaki akımı bulunuz. Güç dengesinin sağlandığını gösteriniz. Her bir kaynağın üretici mi tüketici mi olduğunu belirtiniz.

Örneklerde şekil üzerinde farklı renklerdeki işlemler çözüme aittir.

Örnek 1)

1A'lık kaynak akımını sol çevre akımı alalım. Sağ çevre akımını da I_2 ile gösterelim. Akım kaynağı gerilimi için de V_k bilinmeyi tanımlayalım.



$$\text{Sol çevre: } 6 - 2(I_2 + 1) - V_k - 4(I_2 + 1) = 0$$

$$\text{Sağ çevre: } V_k - 5I_2 + 3 = 0$$

Düzenlenirse sol çevreden $V_k = -6I_2$ ve sağ çevreden $V_k = 5I_2 - 3$ bulunur. Bunlar eşitlenirse $11I_2 = 3$ ve $I_2 = \frac{3}{11}A$ bulunur. Bunu da son V_k denkleminde kullanarak $V_k = -\frac{18}{11}V$ bulunur.

Sol kol akımı da $I_2 + 1 = \frac{14}{11}A$ bulunur. Bunlarla güç dengesi şöyle doğrulanır:

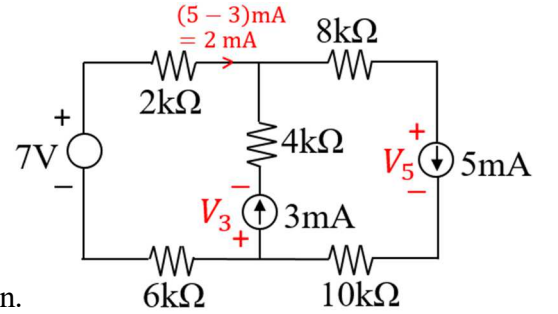
$$\underbrace{6 \cdot \left(\frac{-14}{11}\right)}_{(-)} + (2 + 4) \left(\frac{-14}{11}\right)^2 + \underbrace{\left(\frac{-18}{11}\right) \cdot 1}_{(-)} + 5 \cdot \left(\frac{3}{11}\right)^2 + \underbrace{3 \cdot \left(\frac{-3}{11}\right)}_{(-)} = 0$$

6V'luk kaynak üretici 1A'lık kaynak üretici 3V'luk kaynak üretici

Örnek 2)

2 bağımsız çevre ve 2 akım kaynağı olduğu için çevre akımları bu kaynak akımları seçilecektir.

(Bağımsız çevre sayısından fazla akım kaynağı olamazdı, çünkü öyle bir durumda sadece akım kaynaklı kolların birleştiği düğümler olurdu ki bu yasak bağlantılardandır.)



Sol çevre akımı 3 mA'lık, dış çevre akımı 5 mA'lık kaynak akımı olsun.

Buna göre sol koldan geçen akım da şekilde gösterildiği gibi olur. Kaynaklar için de gerilim bilinmeyenlerini şekil üzerinde gösterildiği gibi tanımlayalım.

$$\text{Sol çevre denklemi: } 7 - 2 \times 2 + 4 \times 3 + V_3 - 6 \times 2 = 0 \rightarrow V_3 = -3V$$

$$\text{Dış çevre denklemi: } 7 - 2 \times 2 - 8 \times 5 - V_5 - 10 \times 5 - 6 \times 2 = 0 \rightarrow V_5 = -99V$$

Bir çevrede birden fazla akım kaynağı olmaması kolaylık olduğu için ikinci çevreyi sağ çevre değil dış çevre seçtik. Ama sağ çevre seçseydik de sorun olmazdı.

Güç dengesinin sağlandığı şöyle gösterilebilir (mW cinsinden):

$$\underbrace{7 \cdot (-2)}_{(-)} + (2 + 6) \cdot 2^2 + 4 \cdot 3^2 + \underbrace{(-3) \cdot 3}_{(-)} + (8 + 10) \cdot 5^2 + \underbrace{(-99) \cdot 5}_{(-)} = 0$$

7V'luk kaynak üretici 3mA'lık kaynak üretici 5mA'lık kaynak üretici

Örnek 3)

Üst çevre akımı I_1 ve alt çevre akımı I_2 şekil üzerinde gösterildiği gibi tanımlansın. Orta kol akımı da gösterilen yönde $I_1 + I_2$ olur.

$$\text{Üst çevre denklemi: } 9 - 40I_1 + 6 - 20I_1 - 10(I_1 + I_2) = 0$$

$$\text{Alt çevre denklemi: } 12I_2 + 10(I_1 + I_2) + 18I_2 - 5 = 0$$

Düzenlenirse:

$$\text{Üst çevre: } -70I_1 - 10I_2 = -3$$

$$\text{Alt çevre: } 10I_1 + 40I_2 = 5 \quad \text{Bunu 7 ile çarpıp üsttekine ekleyelim: } 270I_2 = 32$$

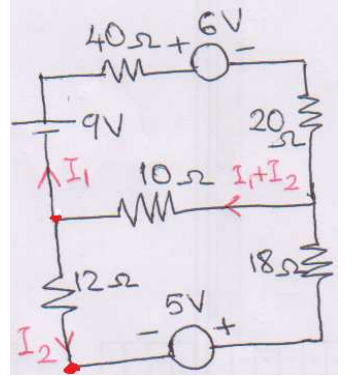
$$\rightarrow \boxed{I_2 = \frac{32}{270} A} \quad \text{Bunu alt çevre denkleminde kullanarak } 10I_1 = 5 - 40 \cdot \frac{32}{270} = \frac{7}{27} \rightarrow \boxed{I_1 = \frac{7}{270} A} \text{ bulunur.}$$

$$\text{Orta kol akımı ise: } \boxed{I_1 + I_2 = \frac{39}{270} A}$$

Güç dengesinin sağlandığı şöyle gösterilebilir:

$$\underbrace{9 \cdot \left(\frac{-7}{270}\right)}_{(-)} + \underbrace{(40 + 20) \cdot \frac{7}{270}}_{(+)} + \underbrace{6 \cdot \frac{7}{270}}_{(+)} + 10 \cdot \left(\frac{39}{270}\right)^2 + (12 + 18) \left(\frac{32}{270}\right)^2 + \underbrace{5 \cdot \left(\frac{-32}{270}\right)}_{(-)} = 0$$

9V'luk kaynak üretici 6V'luk kaynak tüketici 5V'luk kaynak üretici



Örnek 4)

2 mA'lık kaynağın akımı üst çevre akımı olsun. Sol alt çevre akımı i_1 ve sağ alt çevre akımı i_2 şekildeki gibi tanımlansın. 12 Ω'un akımı, sol orta düğüm denklemini sağlaması için şekildeki yönde $2 - i_1$ oldu (i_1 ile toplanınca 2 A olmalıydı). 20 Ω kolunun akımı, sağ orta düğüm denklemini sağlaması için şekildeki yönde $i_3 + 2$ oldu. 15 Ω'un akımı, alt orta düğüm denklemini sağlaması için şekildeki yönde $i_1 + i_3$ oldu. Akım kaynağı için şekildeki yönde v_2 gerilim bilinmeyi tanımladık.

$$\text{Üst çevre: } -3 \times 2 - 6 - 5 \times 2 - v_2 - 20(i_3 + 2) - 4 - 12(2 - i_1) = 0$$

$$\text{Sol alt çevre: } 10 + 12(2 - i_1) - 15(i_1 + i_3) - 8i_1 = 0$$

$$\text{Sağ alt çevre: } 15(i_1 + i_3) + 4 + 20(i_3 + 2) + 7i_3 + 18 = 0$$

Düzenlenirse:

$$-v_2 + 12i_1 - 20i_3 = 90$$

$$-35i_1 - 15i_3 = -34$$

$$15i_1 + 42i_3 = -62$$

$$2. \text{ denklemi } 14 \text{ ile, } 3. \text{ denklemi } 5 \text{ ile çarpıp toplarsak: } -415i_1 = -786 \rightarrow \boxed{i_1 = 1,8940 A}$$

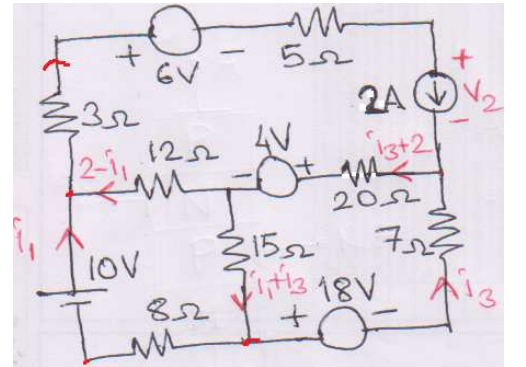
$$\text{Bunu } 3. \text{ denklemde kullanırsak: } 15 \times 1,8940 + 42i_3 = -62 \rightarrow \boxed{i_3 = -2,1526 A}$$

$$\text{Bu ikisini ilk denklemde yerine koyarsak: } v_2 = 12 \times 1,8940 - 20(-2,1526) - 90 \rightarrow \boxed{v_2 = -24,220 V}$$

$$12 \Omega \text{'un akımı } 2 - i_1 = 0,1060 A$$

$$20 \Omega \text{ kolunun akımı } i_3 + 2 = -0,1526 A$$

$$15 \Omega \text{'un akımı } i_1 + i_3 = -0,2586 A$$



Ara sonuçları hassas almak, güç dengesini doğrulamak için önemlidir:

$$(3 + 5) \cdot 2^2 + \overbrace{6 \times 2}^{(+)} + \overbrace{(-24,220) \times 2}^{(-)} + 12 \cdot (0,1060)^2 + \overbrace{4 \cdot (-0,1526)}^{(-)} + 20 \cdot (-0,1526)^2 + \overbrace{10 \cdot (-1,894)}^{(-)} \\ + 15 \cdot (-0,2586)^2 + 7 \cdot (-2,1526)^2 + 8 \cdot (1,8940)^2 + \overbrace{18 \cdot (-2,1526)}^{(-)} = 0$$

Gücü artı olan 6V'luk kaynak tüketici; diğer tüm kaynaklar ise güçleri eksi olduğundan üreticidir.

DÜĞÜM YÖNTEMİ İLE TAM DEVRE ANALİZİ

1) Bu yöntemde düğümlerden keyfi birisi, tercihen en çok eleman bağlanan, toprak(referans) noktası varsayılır. Diğer düğümler bağımsız düğümdür. Her bağımsız düğüm için bir düğüm potansiyeli (toprağa göre gerilim) bilinmeyi tanımlanır. Ancak o düğüme bağlı gerilim kaynağı varsa bunun iki ucundaki potansiyeller için ayrı bilinmeyenler tanımlanmaz, biri diğeri cinsinden yazılır.

2) Gerilim kaynakları için bağımsız bilinmeyen olarak gerilim kaynağının akımı tanımlanır. Böylece bağımsız düğüm sayısı kadar bilinmeyen tanımlanmış olur.

3) Dirençlerin akımı için iki ucunun düğüm potansiyelleri farkının dirence bölümü yazılır.

4) Her bağımsız düğüm için bir KCL denklemi yazılır.

5) Düğüm (KCL) denklemleri çözülerek bilinmeyenler bulunur.

6) Varsa gerilim kaynaklarının diğer uçlarının potansiyeli de bulunur.

7) Buradan tüm elemanlar üzerindeki akım ve gerilimler bulunur.

8) Güç dengesine bakılarak sağlama yapılır.

Dikkat:

• Dirençlerin güçlerini $(\Delta v)^2/R$ formunda yazmak düğüm yönteminde daha kolay olabilir. İstenirse Ri^2 formunda da yazılabilir.

• Bir devrede bağımsız çevre sayısı bağımsız düğüm sayısından az ise çevre yöntemi, çok ise düğüm yöntemi tavsiye edilir.

Örnekler

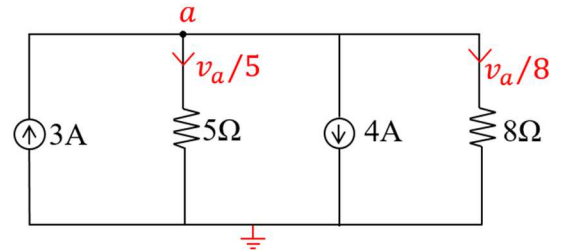
Soru kalıbı tüm örneklerde aynıdır: Verilen şekildeki devrede bağımsız düğüm sayısı kadar bilinmeyen tanımlayıp çözüyoruz, her düğüm çifti arasındaki gerilimi bulunuz. Güç dengesinin sağlandığını gösteriniz. Her bir kaynağın üretici mi tüketici mi olduğunu belirtiniz.

Örnek 1)

Tek bağımsız düğüm vardır. Altteki düğümü toprak seçip üsttekine a düğümü diyelim (potansiyeli v_a). Düğüm denklemi:

$$3 = \frac{v_a}{5} + 4 + \frac{v_a}{8} \rightarrow -1 = v_a \cdot \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{8}\right) = \frac{13}{40} v_a$$

$$v_a = -\frac{40}{13} V$$



$$\text{Güç dengesi ise: } \underbrace{\left(-\frac{40}{13}\right)(-3)}_{\substack{(+)} \\ 3A'lik \text{ kaynak} \\ \text{tüketici}}} + \underbrace{\left(-\frac{40}{13}\right)^2 \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{8}\right)}_{\substack{(-)} \\ 4A'lik \text{ kaynak} \\ \text{üretici}}} + \underbrace{\left(-\frac{40}{13}\right) \times 4}_{\substack{(-)}} = 0$$

Örnek 2)

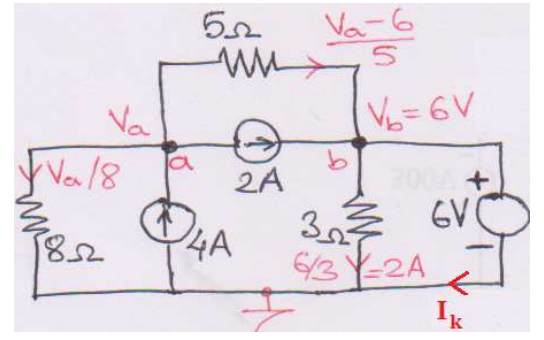
$$a \text{ düğümü: } 4 = \frac{v_a}{8} + 2 + \frac{v_a - 6}{5} \rightarrow \frac{16}{5} = \frac{13}{40} v_a \rightarrow \boxed{v_a = \frac{128}{13} V}$$

$$b \text{ düğümü: } 2 + \frac{v_a - 6}{5} = \frac{6}{3} + I_k \rightarrow 2 + \frac{13}{250} - \frac{6}{5} - 2 = \boxed{I_k = \frac{10}{13} A}$$

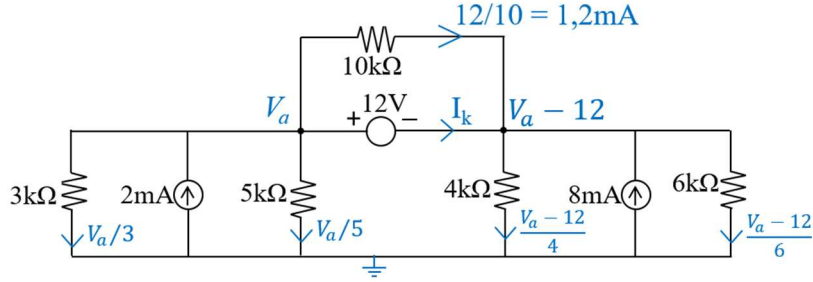
$$5\Omega\text{'un gerilimi} = v_a - 6 = \frac{50}{13} V \quad \text{Güç dengesi ise:}$$

$$\left(\frac{128}{13}\right)^2 \cdot \frac{1}{8} + \underbrace{\left(\frac{128}{13}\right)(-4)}_{(-)} + \left(\frac{50}{13}\right)^2 \cdot \frac{1}{5} + \underbrace{\left(\frac{50}{13}\right) \times 2}_{(+)} + \frac{6^2}{3} + \underbrace{6 \cdot \left(\frac{10}{13}\right)}_{(+)} = 0$$

4A'lık kaynak üretici. 2A'lık kaynak tüketici 6V'luk kaynak tüketici



Örnek 3)



$$\text{Sol düğüm: } \frac{V_a}{3} + \frac{V_a}{5} + I_k + \frac{12}{10} = 2$$

$$\text{Sağ düğüm: } \frac{V_a - 12}{4} + \frac{V_a - 12}{6} + 8 = \frac{12}{10} + I_k$$

$$\text{Sol düğüm düzenlenirse: } I_k = \frac{4}{5} - \frac{8}{5} V_a$$

$$\text{Sağ düğüm düzenlenirse: } I_k = \frac{9}{5} + \frac{5}{12} V_a$$

$$\text{Bunlar eşitlenirse: } \frac{4}{5} - \frac{8}{5} V_a = \frac{9}{5} + \frac{5}{12} V_a \rightarrow -1 = \frac{19}{20} V_a \rightarrow \boxed{V_a = \frac{-20}{19} V}$$

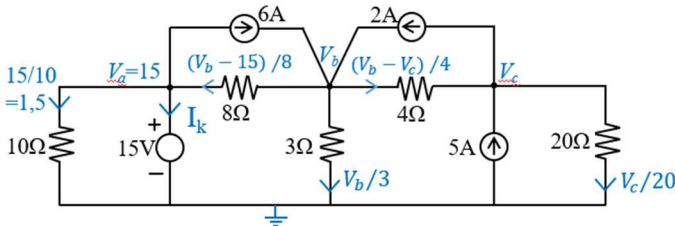
$$\text{Bunu ilk } I_k \text{ denkleminde yazarsak: } I_k = \frac{4}{5} - \frac{8}{5} \left(\frac{-20}{19}\right) \rightarrow \boxed{I_k = \frac{388}{285} \text{ mA}}$$

$$\text{Sağ düğüm potansiyeli ise } V_a - 12V = \frac{-248}{19} V \quad \text{Güç dengesine de bakalım:}$$

$$\left(\frac{-20}{19}\right)^2 \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{5}\right) + \underbrace{\left(\frac{-20}{19}\right)(-2)}_{(+)} + \frac{12^2}{10} + \underbrace{12 \cdot \frac{388}{285}}_{(+)} + \left(\frac{-248}{19}\right)^2 \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{6}\right) + \underbrace{\left(\frac{-248}{19}\right) \times 8}_{(+)} = 0$$

2mA'lık kaynak tüketici 12V'luk kaynak tüketici 8mA'lık kaynak üretici

Örnek 4)



$$a \text{ düğümü: } \frac{V_b - 15}{8} = 6 + I_k + 1,5$$

$$b \text{ düğümü: } 6 + 2 = \frac{V_b - 15}{8} + \frac{V_b}{3} + \frac{V_b - V_c}{4}$$

$$c \text{ düğümü: } 5 + \frac{V_b - V_c}{4} = 2 + \frac{V_c}{20}$$

b ve c düğüm denklemleri I_k içermediğinden önce onları çözelim:

$$b \text{ düğümü: } -\left(\frac{1}{8} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4}\right) V_b + \frac{1}{4} V_c = -6 - 2 - \frac{15}{8} \rightarrow -\frac{17}{24} V_b + \frac{1}{4} V_c = -\frac{79}{8}$$

$$c \text{ düğümü: } \frac{1}{4} V_b - \frac{3}{10} V_c = -3 \quad \times \frac{17}{6} \rightarrow \frac{17}{24} V_b - \frac{17}{20} V_c = -\frac{17}{2}$$

$$\left. \begin{aligned} & -\frac{17}{24} V_b + \frac{1}{4} V_c = -\frac{79}{8} \\ & \frac{17}{24} V_b - \frac{17}{20} V_c = -\frac{17}{2} \end{aligned} \right\} \frac{-3}{5} V_c = -\frac{147}{8} \rightarrow \boxed{V_c = \frac{245}{8} V}$$

$$\frac{1}{4} V_b = -3 + \frac{3}{10} \cdot \frac{245}{8} = \frac{99}{16} \rightarrow \boxed{V_b = \frac{99}{4} V}$$

$$V_b \text{ 'yi } a \text{ düğüm denkleminde kullanırsak: } \frac{1}{8} \cdot \frac{99}{4} - \frac{15}{8} = \frac{15}{2} + I_k \rightarrow \boxed{I_k = -\frac{201}{32} A}$$

Güç dengesine bakalım:

$$\frac{15^2}{10} + \underbrace{15 \cdot \left(-\frac{201}{32}\right)}_{(-)} + \underbrace{\left(\frac{39}{4}\right) \cdot (-6)}_{(-)} + \left(\frac{39}{4}\right)^2 \cdot \frac{1}{8} + \left(\frac{99}{4}\right)^2 \cdot \frac{1}{3} + \underbrace{\left(-\frac{47}{8}\right) \cdot (-2)}_{(+)} + \left(-\frac{47}{8}\right)^2 \cdot \frac{1}{4} + \underbrace{\frac{245}{8} \cdot (-5)}_{(-)} + \left(\frac{245}{8}\right)^2 \cdot \frac{1}{20} = 0$$

15V'luk kaynak üretici 6A'lık kaynak üretici 2A'lık kaynak tüketici 5A'lık kaynak üretici