



# 05

## 회로해석 정리

Circuit Theorems

전원변환이론 \_5.1

중첩의 원리 \_5.2

테브난과 노턴의 정리 \_5.3

최대전력전달 정리 \_5.4

핵심요약

연습문제

기출문제

### 학습목표

- 회로를 간략화하기 위한 회로해석 정리에 대해 이해한다.
- 선형회로의 중첩의 원리를 이해한다.
- 전류전원과 전압전원 간의 전원변환 정리를 이해한다.
- 복잡한 회로를 간략화하기 위한 테브난과 노턴의 정리를 이해하고, 각 등가회로를 만드는 방법을 이해한다.
- 최대전력을 전달하기 위한 조건을 이해한다.

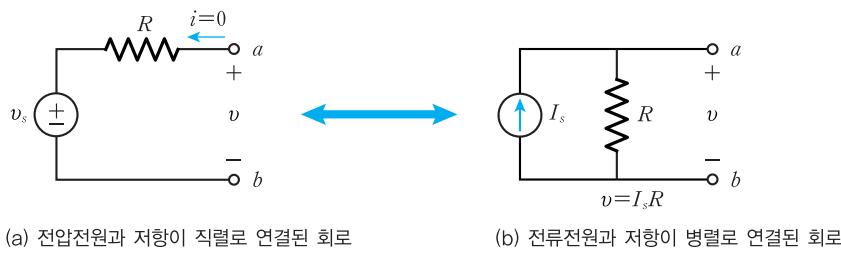
## 5.1 전원변환이론

전원변환이론은 전압전원과 저항이 직렬로 연결된 저항소자 회로를 필요에 따라 전류전원과 병렬로 연결된 저항소자 회로로 변환할 수 있는 이론으로 전원소자 간의 관계를 규정한다.

[그림 5-1]에서 (a)는 전압전원과 저항이 직렬로 연결된 회로이고, (b)는 전류전원과 저항이 병렬로 연결된 회로이다. 이때 회로의 단자  $a$ 와  $b$  사이는 개방되어 있으므로 저항  $R$ 에 흐르는 전류  $i$ 는 0이 되고, 전압강하가 없으므로 전압  $v$ 는  $v_s$ 의 값과 같다. 즉,  $v = v_s$ 이다. 반면 (b)의 병렬회로를 보면 역시 단자  $a$ 와  $b$  사이가 개방되어 있으므로 전류전원 값  $I_s$ 는 모두 저항  $R$ 에 흐른다. 그러므로 이 회로에서  $v = I_s R$ 의 관계를 얻을 수 있다. 따라서 이 두 회로를 같은 회로라고 한다면,  $v = v_s = I_s R$ 이 되어 다음과 같은식을 유도할 수 있다.

$$R = \frac{v_s}{I_s} \quad (5.1)$$

그러므로 주어진 회로에서 전원이 변환된 회로를 얻을 수 있다.



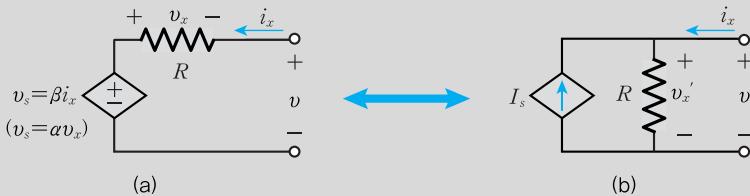
[그림 5-1] 전원변환 회로

### 정의 5-1 전원변환이론

전압전원과 저항이 직렬로 연결된 회로는 하나의 전류전원과 동일저항이 병렬로 연결된 회로로 변환할 수 있고, 두 전원 값 간의 관계는  $v_s = I_s R$ 로 주어진다.

### 참고 5-1 종속전원이 연결된 경우

[그림 5-2] 회로와 같이 독립전원이 아닌 종속전원이 연결된 경우에도 전원변환이론이 성립할까?  
이 물음에 대한 대답은 ‘그렇기도 하고 아니기도 하다’이다.



[그림 5-2] 종속전원이 있는 경우

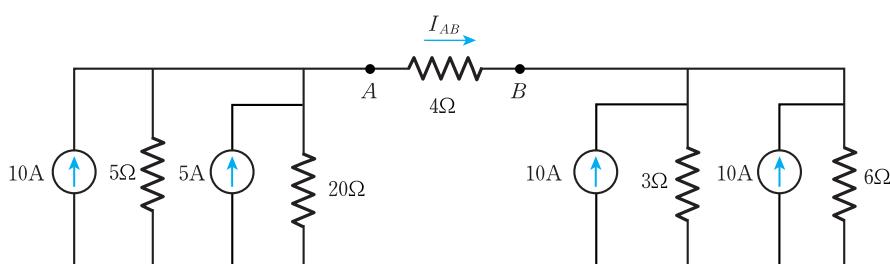
예를 들어 그림과 같은 회로에서 종속전압전원의 값이  $v_s = \beta i_x$ 로 종속변수  $i_x$ 가 전원을 변환한 이후에도 다른 값으로 변하지 않으면, 이러한 회로는 변환하여 하나의 종속전류전원과 병렬로 연결된 저항회로로 변환할 수 있고 새로운  $I_s = \frac{v_s}{R}$ 의 값으로 변환될 수 있다. 하지만 만약  $v_s$ 의 값이  $\alpha v_x$ 와 같이 주어지고 이 전원의 종속변수인  $v_x$ 의 값이 전원변환 이후에 다른 값을 가지는 경우, 즉 달리 설명하여 [그림 5-2] 회로처럼 (a) 회로의  $R$ 과 (b) 회로의  $R$ 에 걸리는 전압  $v_x$ 가 다른 값을 가진다면 ( $v_x \neq v_x'$ ) 이 회로에는 전원변환이론을 적용할 수 없다.

종속전원이 있는 경우에 변환 이후에도 종속변수가 그대로 같은 값으로 존재한다면 변환에 문제가 없으나 같은 값이 아니라면 이러한 회로에는 전원변환이론을 적용할 수 없다.

### 예제 5-1

#### ■ 전원변환을 이용한 메시해석법

[그림 5-3] 회로에서 전원변환을 이용하여  $I_{AB}$ 의 값을 찾아라.

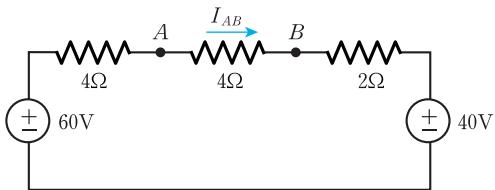


[그림 5-3] 전원변환이론 적용 예

#### 풀이

위 회로를 먼저 저항의 직병렬연결에 의해 통합저항과 통합전류전원으로 바꾸고 전원변환이론을 적용하여 차례로 변환하면 [그림 5-4]와 같이 변환된다.

$$20//5 = 4[\Omega], \quad 3//6 = 2[\Omega], \quad 10 + 5 = 15[A], \quad 10 + 10 = 20[A]$$



[그림 5-4] 간략화된 회로

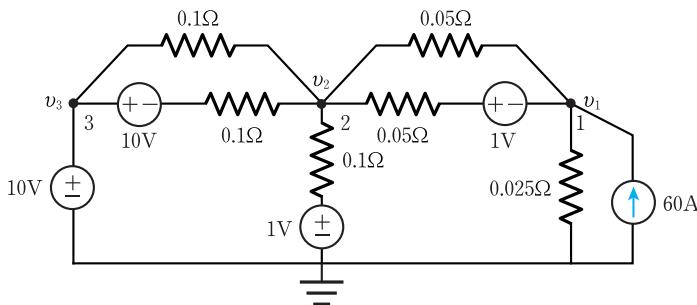
결국 [그림 5-4] 회로에서  $4\Omega$ 에 흐르는 전류  $I_{AB}$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$I_{AB} = \frac{(60 - 40)}{(4 + 4 + 2)} = 2[A]$$

### 예제 5-2

#### ■ 전원변환을 이용한 노드분석 회로해석

전원변환이론으로 [그림 5-5]의 회로를 간략화하고, 노드해석법을 적용하여 각 노드의 접지전압변수 값  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$ 를 구하라.



[그림 5-5] 전원변환이론 적용 예

#### 풀이

[그림 5-5] 회로를 전원변환이론에 의해 [그림 5-6]과 같이 변환할 수 있다. 이렇게 변환된 회로는 원래의 전압전원의 상당수가 전류전원으로 변환돼서 노드에 KCL을 적용하기 쉽다. 따라서 이 변환된 회로에 노드해석법을 적용하여 다음과 같은 수식을 유도할 수 있다.

- 노드 1 : KCL을 적용

$$40(v_1 - v_2) + 40v_1 = 60 - 20$$

- 노드 2 : KCL을 적용

$$20(v_2 - v_3) + 10v_2 + 40(v_2 - v_1) = 20 + 10 - 100$$

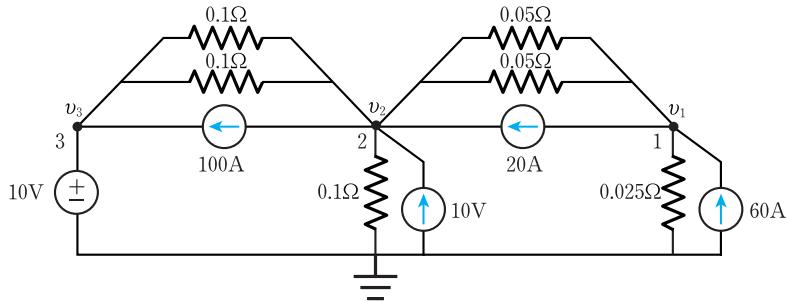
- 노드 3 : 접지전압전원이 연결되어 있으므로 회로에서 직접 제약식을 구한다.

$$v_3 = 10[V]$$

그러므로  $v_3 = 10$ 의 값을 첫째, 둘째 식에 대입하여 행렬방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} -80 & -40 \\ -40 & 70 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40 \\ 130 \end{bmatrix}$$

이 식을 풀면,  $\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix} [V]$ 를 얻을 수 있다.



[그림 5-6] 전원변환된 회로

## 5.2 중첩의 원리

원래 중첩의 원리는 선형시스템의 특징인데, 우리가 다루는 회로는 선형소자로 이루어진 선형 시스템이므로 회로해석에도 그대로 적용될 수 있다.

### 정의 5-2 중첩의 원리

임의의 시스템 함수  $f(\cdot)$ 가 선형함수면 다음과 같은 중첩의 원리가 적용된다.

$$f(ax + by) = af(x) + bf(y)$$

단, 여기서  $a, b$ 는 상수다.

중첩의 원리를 회로해석에 적용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

### 정의 5-3 회로해석에서 중첩의 원리

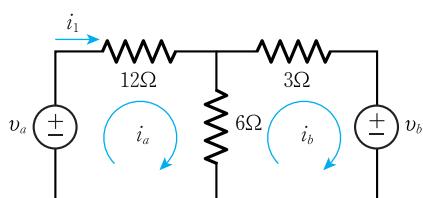
선형회로에 다수의 독립전원이 있는 경우 주어진 소자에 걸리는 전압이나 전류 값을 구할 때는 각 독립전원을 개별적으로 고려하고, 다른 독립전원을 비활성화하여 얻은 개별적인 전압 혹은 전류 값의 단순합으로 얻는다.

이때 비활성화 deactivating라는 말은 다른 독립전원의 값을 0으로 만든다는 뜻이다. 다시 말해 독립 전압전원의 경우는  $v_0 = 0$ 인 단락회로 short circuit를 뜻하고, 독립전류전원의 경우는  $i_0 = 0$ 인 개방회로 open circuit를 만든다는 뜻이다.

### 예제 5-3

#### ■ 중첩의 원리를 적용한 회로해석(1)

[그림 5-7] 회로에서  $i_1$ 의 값을  $v_a$ 와  $v_b$ 를 이용하여 나타내라.



[그림 5-7] 중첩의 원리 적용 예

### 풀이

먼저 메시해석법을 적용해보자.

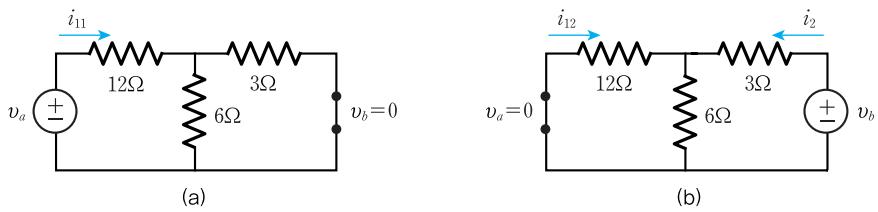
메시해석법을 적용하기 위해 두 개의 메시에서 독립된 KVL 방정식을 찾으면 다음과 같다.

$$v_a = 12i_a + 6(i_a - i_b)$$
$$-v_b = 3i_b + 6(i_b - i_a)$$

그리고 이 두 개의 방정식을 연립하여 풀면  $i_1 = i_a = \frac{1}{14}v_a - \frac{1}{21}v_b$ 를 얻을 수 있다.

이 문제를 중첩의 원리를 이용하여 풀려면 어떻게 해야 할까?

회로에는 두 개의 독립전원이 있으므로  $i_1$ 의 값은 [그림 5-8]과 같은 두 개의 회로에서 얻은  $i_{11}$ ,  $i_{12}$ 의 값을 단순합하여 얻을 수 있다.



[그림 5-8] 중첩의 원리 적용 회로

[그림 5-8(a)] 회로를 보면 이 회로는  $v_a$ 를 제외한 독립전압전원  $v_b$ 를 비활성화함으로써(즉, 전원  $v_b$ 를 단락하여) 구한다. 이 회로에서  $i_{11}$ 의 값은 저항의 직병렬 결합으로 얻은  $R_{eq}$ 의 값과  $v_a$ 와의 관계에서 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$i_{11} = \frac{v_a}{R_{eq}} = \frac{1}{14}v_a$$

또한 [그림 5-8(b)] 회로를 보면,  $v_a$ 를 비활성화한( $v_a = 0$ ) 회로에서  $i_{12}$ 를 구할 수 있다.

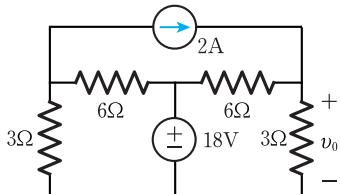
$$i_{12} = -i_2 \frac{6}{12+6}$$
$$= -\frac{v_b}{3+12/6} \times \frac{6}{12+6}$$
$$= -\frac{1}{21}v_b$$

그러므로  $i_1 = i_{11} + i_{12} = \frac{1}{14}v_a - \frac{1}{21}v_b$ 가 되며, 결과는 메시해석법으로 계산한 값과 같다.

예제 5-4

■ 중첩의 원리를 적용한 회로해석(2)

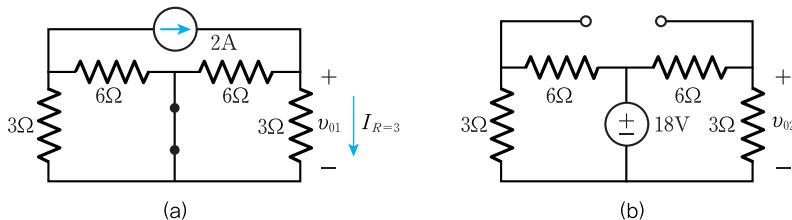
[그림 5-9] 회로에서  $v_0$ 의 값을 구하라.



[그림 5-9] 중첩의 원리 적용 예

풀이

[그림 5-9] 회로는 두 개의 독립전원에 의해 [그림 5-10]과 같은 회로로 나누어질 수 있다. 이러한 분리된 회로는 고려하는 전원을 제외한 모든 전원을 비활성화하여 만든다. 즉 독립전압전원은 단락회로로 표현하고 독립전류전원은 개방회로로 표현한다.



[그림 5-10] 중첩의 원리 적용 회로

그러므로 이 회로에서  $v_{01}$ ,  $v_{02}$ 를 구하여 두 값을 단순합하여  $v_0$ 를 구할 수 있다. 즉, 전류분배기 이론에 의해 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

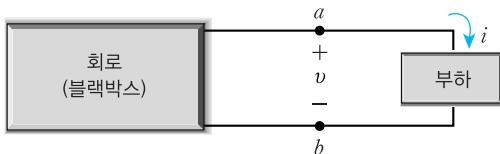
$$I_{R=3} = 2 \times \frac{6}{6+3} = \frac{4}{3}[\text{A}]$$

$$v_{01} = 3 \times I_{R=3} = 4[\text{V}], \quad v_{02} = 18 \times \frac{3}{6+3} = 6[\text{V}]$$

따라서  $v_0 = v_{01} + v_{02} = 10\text{V}$ 이다.

## 5.3 테브난과 노턴의 정리

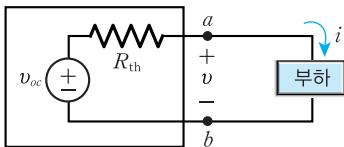
회로를 간략화하는 이론 중에 테브난 Thevenin과 노턴 Norton의 정리는 매우 효율적이다. 이 정리는 [그림 5-11]과 같이 많은 소자로 만들어진 복잡한 회로를 블랙박스로 본다. 그리고 그 블랙박스를 단순한 전압전원 하나와 직렬로 연결된 저항소자로 표현하거나(테브난 등가회로), 단순한 전류전원 하나와 병렬로 연결된 저항소자로 표현한다(노턴 등가회로). 이러한 전원과 저항 값의 계산이 단자 간 전류 및 전압 값의 측정으로 이루어질 수 있으므로 매우 실용적인 정리라고 할 수 있다.



[그림 5-11] 블랙박스 등가회로

### 5.3.1 테브난의 정리

[그림 5-11]에서 블랙박스 내부를 [그림 5-12]와 같이 하나의 전압전원과 그와 직렬로 연결된 저항소자로 표현하는 것을 테브난 등가회로라고 한다.



[그림 5-12] 테브난 등가회로

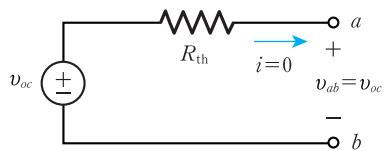
이때  $a - b$  단자를 통해 부하로 흐르는 전류를  $i$ , 단자 간의 전압을  $v$ 라고 하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$v_{oc} = R_{th}i + v$$

이때 복잡한 블랙박스 내의 회로를 간단하게 테브난 등가회로로 고치려면  $v_{oc}$ 의 값과  $R_{th}$ 의 값을 어떻게 계산해야 할까? 다음과 같이 주어진 회로에서 테브난 등가회로를 찾아내는 기법을 테브난의 정리라고 한다.

### $v_{oc}$ 의 계산

[그림 5-13] 회로와 같이 단자  $a-b$ 가 개방되어 있다면  $R_{th}$ 에 흐르는 전류  $i$ 는 0이 되고, 단자  $a-b$  사이의 전압  $v_{ab}$ 의 값은  $v_{oc}$ 와 같다.

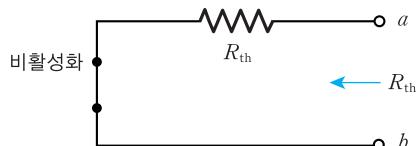


[그림 5-13]  $v_{oc}$  계산

그러므로 아무리 블랙박스 안에 복잡한 회로가 있다 해도 이 테브난 등가회로의  $v_{oc}$ 는 회로에서 단자  $a-b$ 를 개방하고(즉, 부하를 떼어내고), 이 단자 간 전압  $v_{ab}$ 를 측정하여 얻을 수 있다. 이와 같이 단자의 개방회로에서 전압전원  $v_{oc}$ 를 구할 수 있으므로  $v_{oc}$ 를 개방회로전압 open circuit voltage이라고 한다.

### $R_{th}$ 의 계산

$R_{th}$ 는 [그림 5-14] 회로와 같이 등가회로에서 전압전원  $v_{oc}$ 의 값을 0으로 두고, 단자  $a-b$ 에서 블랙박스 쪽으로 들여다본 저항 값으로 계산할 수 있다. 전압전원을 0으로 둔다는 말은 회로를 단락시킨다는 말이고, 다른 말로는 독립전원을 비활성화시킨다는 뜻이다.



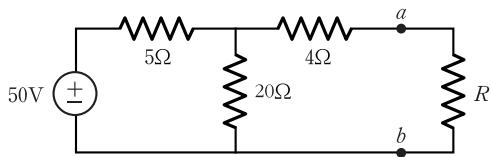
[그림 5-14]  $R_{th}$ 의 계산

- 비활성화는 독립전압전원의 경우에 단락시키고, 독립전류전원의 경우에 개방시킨다는 뜻이다. 따라서 실제로  $R_{th}$ 의 계산은 블랙박스 내에 있는 모든 독립전압전원 혹은 독립전류전원을 비활성화시키고 단자  $a-b$ 에서 들여다본 저항 값을 말한다.

예제 5-5

■ 독립전원과 저항소자로 이루어진 회로의 테브난 등가회로

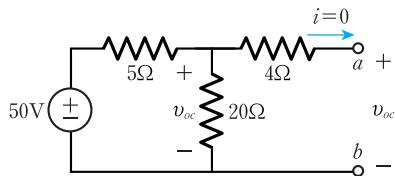
[그림 5-15] 회로에서 단자  $a-b$ 의 테브난 등가회로를 구하라.



[그림 5-15] 테브난의 정의를 적용한 회로

풀이

테브난 등가회로를 구하기 위해 [그림 5-15] 회로에서 단자  $a-b$ 를 개방하면 [그림 5-16]과 같은 회로가 된다.

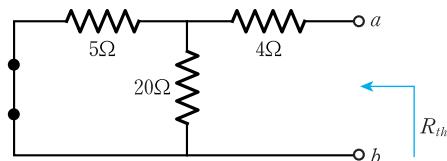


[그림 5-16] 단자  $a-b$ 를 개방한 회로

이때  $v_{oc}$ 는 개방된 단자  $a-b$  간의 전압을 측정하여 얻을 수 있다. 위 회로는  $a-b$ 가 개방되어 있어  $4\Omega$ 에 흐르는 전류가 없으므로  $v_{oc}$ 의 값은  $20\Omega$ 에 걸리는 전압으로 구할 수 있다. 즉,  $v_{oc}$ 의 값은 원래 회로의 전압 50V를 전압분배기 회로에 의해 나누어 쓰는 전압이 된다.

$$v_{oc} = 50 \times \frac{20}{5 + 20} = 40[\text{V}]$$

$R_{th}$ 를 구하기 위해 모든 독립전원을 비활성화시켜 회로를 만들면 [그림 5-17]과 같다.

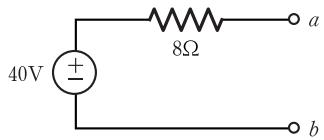


[그림 5-17] 모든 독립전원을 비활성화시켜 만든 회로

이 회로 단자  $a-b$ 의 저항 값은  $4\Omega$  저항소자와  $5\Omega // 20\Omega$ (병렬연결)의 직렬연결에서 얻은 총 저항 값이므로 다음과 같다.

$$R_{th} = 4 + \frac{5 \times 20}{5 + 20} = 8[\Omega]$$

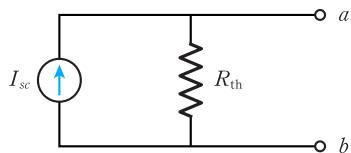
따라서 회로의 테브난 등가회로는 [그림 5-18]과 같이 40V 전압전원과  $8\Omega$  저항의 직렬회로로 표현할 수 있다.



[그림 5-18] 독립전원과 저항소자로 표현한 테브난 등가회로

### 5.3.2 노턴의 정리

[그림 5-11]의 복잡한 블랙박스 회로를 [그림 5-19]와 같이 독립전류전원 하나와 병렬로 연결된 저항소자의 회로로 표현한 회로를 노턴의 등가회로라고 한다. 그리고 이러한 회로의  $I_{sc}$ 와  $R_{th}$ 를 구하는 정리를 노턴의 정리라고 한다.

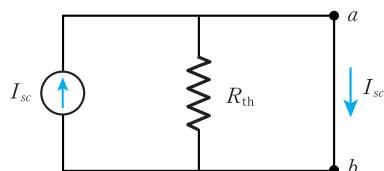


[그림 5-19] 노턴의 등가회로

그렇다면 노턴의 정리를 이용하여 어떻게  $I_{sc}$ 와  $R_{th}$ 를 구할 수 있을까?

#### $I_{sc}$ 의 계산

[그림 5-20] 회로와 같이 단자  $a-b$ 가 단락되어 있다면 모든 전류는 단락된 단자로 흘러가고,  $R_{th}$ 에 흐르는 전류  $i$ 는 0이 된다. 따라서 단자  $a-b$ 로 흐르는 전류 값은 곧  $I_{sc}$ 의 전류 값과 같아진다.

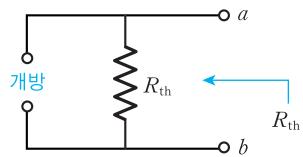


[그림 5-20]  $I_{sc}$ 의 계산

그러므로 아무리 블랙박스 안에 복잡한 회로가 있다고 해도 이 노턴 등가회로의  $I_{sc}$ 는 회로에서 단자  $a-b$ 를 단락하고 이들 단자에 흐르는  $i_{ab}$ 를 측정하여 얻을 수 있다. 이와 같이 단자의 단락회로에서 전류전원  $I_{sc}$ 를 구할 수 있기 때문에  $I_{sc}$ 를 단락회로전류 closed circuit current라고 부른다.

### $R_{th}$ 의 계산

$R_{th}$ 는 [그림 5-21]과 같이 등가회로에서 전류전원  $I_{sc}$ 의 값을 0으로 두고 단자  $a-b$ 에서 블랙박스 쪽으로 들여다본 저항 값으로 계산할 수 있다. 전류전원을 0으로 둔다는 말은 회로를 개방시킨다는 말이고, 다른 말로는 독립전원을 비활성화시킨다는 말이 된다. 따라서 전원을 비활성화시킨 후의  $R_{th}$ 는 테브난의 정리에서 정의한  $R_{th}$ 의 값과 같다는 것을 알 수 있다.

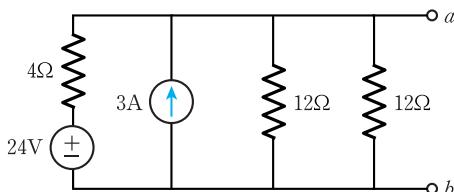


[그림 5-21]  $R_{th}$ 의 계산

### 예제 5-6

#### ■ 독립전원과 저항소자로 이루어진 회로의 노턴 등가회로

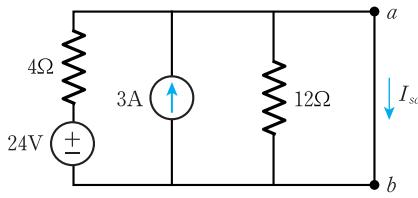
[그림 5-22] 회로에서 노턴 등가회로를 찾아라.



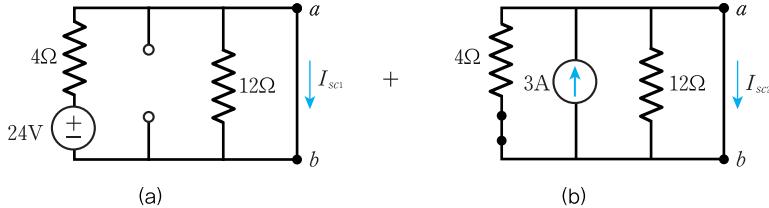
[그림 5-22] 노턴의 정리 적용 회로

#### 풀이

먼저 노턴 등가회로의  $I_{sc}$ 를 찾기 위해 [그림 5-23]과 같이 단자  $a-b$ 를 단락시키고, 이 단락단자에 흐르는 전류를 측정하면 그 전류 값이  $I_{sc}$ 가 된다. 따라서 단자  $a-b$ 를 단락시키면 실제로  $12\Omega$ 에 흐르는 전류는 없고 모든 전류가 단락단자로 흐른다. 다시 이 회로를 중첩의 원리를 이용하여 해석하면 [그림 5-24]와 같이 두 개의 독립전원에 의한 독립회로를 분석하여, 해당하는 전류 값의 단순합으로  $I_{sc}$ 를 구할 수 있다.



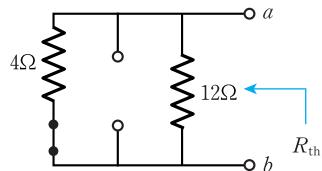
[그림 5-23]  $I_{sc}$ 의 계산 회로



[그림 5-24] 중첩의 원리 적용

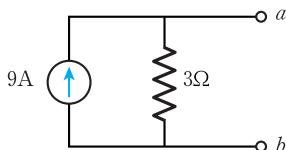
그러므로 전류전원을 비활성화시키고 얻은 [그림 5-24(a)] 회로에서  $I_{sc1} = \frac{24}{4} = 6\text{A}$ 이고, 전압 전원을 비활성화시키고 얻은 [그림 5-24(b)] 회로에서  $I_{sc2} = 3\text{A}$ 이므로, 전체  $I_{sc} = I_{sc1} + I_{sc2} = 6 + 3 = 9\text{A}$ 가 된다.

다음으로  $R_{th}$ 의 값은 두 독립전원을 모두 비활성화시키고 얻은 [그림 5-25] 회로로부터 단자 a-b에서 들여다본 저항 값이므로  $R_{th} = 4//12 = \frac{4 \times 12}{4 + 12} = 3\Omega$ 이다.



[그림 5-25]  $R_{th}$ 의 계산

그러므로 노턴 등가회로는 [그림 5-26]과 같아  $I_{sc}$ 와  $R_{th}$ 가 병렬연결된 회로로 표현할 수 있다.



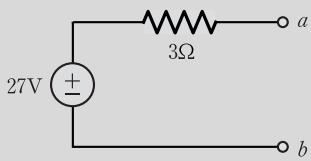
[그림 5-26] 노턴 등가회로

### 참고 5-2 테브난 등가회로와 노턴 등가회로 간의 전원변환

테브난 등가회로는 하나의 전압전원과 저항소자를 직렬로 연결한 회로이고, 노턴 등가회로는 하나의 전류전원과 저항소자를 병렬로 연결한 회로다. 따라서 두 등가회로 간에는 완벽한 전원변환 관계가 성립한다.

$$R_{\text{th}} = \frac{v_{oc}}{I_{sc}}$$

그러므로 테브난 등가회로나 노턴 등가회로 중에서 다른 등가회로를 간접적으로 구할 수 있다. 예를 들어 [예제 5-6]에서 구한 노턴 등가회로의  $I_{sc}$ 와  $R_{\text{th}}$  값을 이용하여  $v_{oc}$  값을 구하면  $v_{oc} = I_{sc} R_{\text{th}} = 9 \times 3 = 27V$ 이므로 간접적으로 아래의 테브난 등가회로를 구할 수 있다.



[그림 5-27] 간접적으로 구한 테브난 등가회로

### 5.3.3 종속전원이 있을 때 테브난과 노턴의 정리

회로에 독립전원과 종속전원이 있으면  $R_{\text{th}}$ 를 계산할 때 문제가 생긴다. 앞에서 이야기했듯이  $R_{\text{th}}$ 를 계산할 때 모든 독립전원을 비활성화시키고 전체 저항을 계산하는 방법으로  $R_{\text{th}}$ 를 계산하게 되는데, 종속전원이 있으면 비활성화시킬 수 없다. 그러므로 전원이 존재하는 가운데 순수한 저항의 직병렬연결에서 전체 저항 값을 산출할 수 없다. 따라서 이런 경우  $R_{\text{th}}$ 의 값을 [참고 5-2]에서 살펴본 바와 같이 다음과 같은 관계를 통해 구한다.

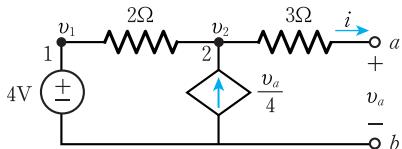
$$R_{\text{th}} = \frac{v_{oc}}{I_{sc}} \quad (5.2)$$

이러한 방법으로  $R_{\text{th}}$ 를 구하려면 테브난 정리를 이용하여  $v_{oc}$ 를 구하고, 노턴 정리를 이용하여  $I_{sc}$ 를 구한 뒤 식 (5.2)에 대입하여 계산한다.

예제 5-7

■ 종속전원이 있을 때  $R_{th}$ 의 계산

[그림 5-28] 회로에서 테브난 등가회로를 구하라.



[그림 5-28] 종속전원이 있는 회로

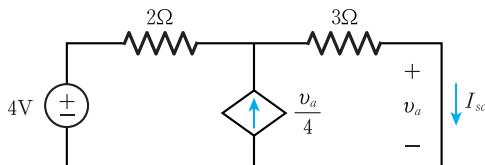
풀이

먼저  $v_{oc}$ 는 단자  $a-b$  사이 전압  $v_a$ 와 같다. 이때 단자  $a-b$ 가 개방회로이므로 전류  $i = 0$ 이고, 노드전압  $v_2$  값은  $v_a$  값과 같다. 결과적으로 이 회로는  $v_1$ ,  $v_2$ 를 노드 해석법으로 구하는 문제다. 이 변수 값 두 개를 구하기 위해 필요한 방정식 두 개는 다음과 같이 구한다.

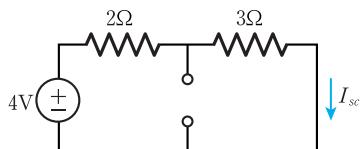
첫째, 노드 1의 방정식은 4V의 독립접지전압전원이 연결되어 있으므로 KCL로 구하지 않고 직접 회로에서 제약식을 구한다. 즉  $v_1 = 4V$ 이다.

둘째, 노드 2의 방정식은 KCL로 구할 수 있으므로  $\frac{v_1 - v_2}{2} = -\frac{v_a}{4}$ 이다. 또한 종속전원의 종속변수를 구하기 위해 변수  $v_1$ ,  $v_2$ 로 표현하면  $v_a = v_2$ 이므로 이 수식에서  $v_{oc} = v_a = 8V$ 를 얻을 수 있다.

이제 노턴의 정리를 이용하여  $I_{sc}$ 를 구한다. [그림 5-29]와 같이 단자  $a$ ,  $b$ 를 단락시키면 종속변수  $v_a$ 의 값은 0이 되고 종속전류전원의 값 역시  $\frac{v_a}{4}$ 로 0이 된다. 결국 이 회로는 [그림 5-30]과 같이 되고, 간단한 하나의 전압전원과 저항으로 이루어진 회로에서  $I_{sc} = \frac{4}{(2+3)} = 0.8A$ 을 구할 수 있다.

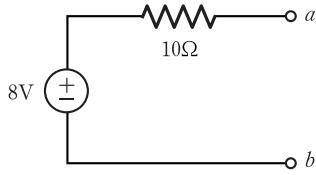


[그림 5-29]  $I_{sc}$ 의 계산



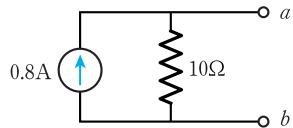
[그림 5-30] 간략화된 회로

따라서 최종  $R_{th}$ 의 값은  $R_{th} = \frac{v_{oc}}{I_{sc}} = \frac{8}{0.8} = 10\Omega$ 이 되고, 테브난 등가회로는 [그림 5-31]과 같다.



[그림 5-31] 테브난 등가회로

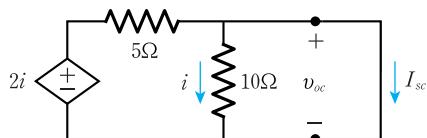
참고로 이 테브난 등가회로에 대응하는 노턴 등가회로는 [그림 5-32]와 같다.



[그림 5-32] 노턴 등가회로

### 5.3.4 종속전원과 저항만 있을 때 테브난과 노턴의 정리

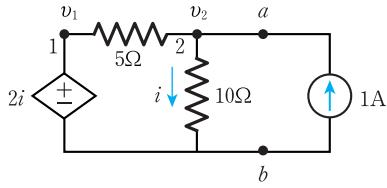
만약 테브난과 노턴의 정리를 적용하려는 회로에 독립전원은 없고 종속전원과 저항만 있다면 등가회로를 어떻게 구할까? [그림 5-33]과 같은 회로에서 테브난 등가회로나 노턴 등가회로를 구해보자.



[그림 5-33] 종속전원과 저항만 있는 회로

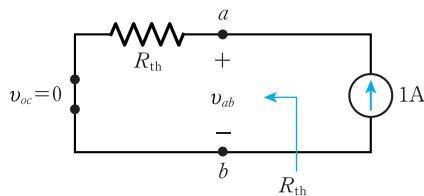
회로에 종속전원이 있으면  $R_{th}$ 의 값은 전원을 비활성화하여 얻을 수 없고,  $R_{th} = \frac{v_{oc}}{I_{sc}}$ 에서 구해야 한다. 따라서 먼저  $v_{oc}$ 를 구해보면 종속변수  $i$ 의 값은 독립전원이 없으므로 0이 되고, 이에 따라 종속전원 값  $2i$  역시 0이 된다. 회로에는 아무런 전류가 흐르지 않으므로  $v_{oc} = 0$ 이 된다. 마찬가지로  $I_{sc}$ 의 경우도 흐르는 전류가 없으므로 0이 된다. 결국  $v_{oc} = 0[V]$ ,  $I_{sc} = 0[A]$ 을 얻을 수 있고, 이를  $R_{th} = \frac{v_{oc}}{I_{sc}}$ 에 대입하면  $\frac{0}{0}$ 이 되어 부정의 값이 나온다.

그렇다면 어떻게  $R_{th}$ 를 구해야 하는가? 이러한 경우  $R_{th}$ 를 구하려면 [그림 5-34]과 같이 1A 용량의 전류전원을 연결하여 구하면 된다.



[그림 5-34] 부가전원 삽입 회로

즉, [그림 5-34] 회로가 궁극적으로 테브난 등가회로가 되었을 때를 가정하면 [그림 5-35]와 같은 회로가 되고, 이 회로에서 단자  $a-b$  사이에 걸리는 전압  $v_{ab}$ 의 값은 바로  $R_{th}$ 에 걸리는 전압  $R_{th} \times 1 = R_{th}$ 가 된다. 즉,  $R_{th}$ 의 값의 계산은 부가전원 1A 전류전원을 단자  $a-b$  사이에 연결하고 측정한 단자 간 전압  $v_{ab}$ 의 값과 같다.



[그림 5-35]  $R_{th}$ 의 계산

#### + 종속전원과 저항만의 회로

단자  $a-b$  사이에 1A의 전류전원을 연결하고, 단자  $a, b$  간의 전압을 측정하면 그 크기는  $R_{th}$ 의 값과 같다.

$$R_{th} = v_{ab} \quad (5.3)$$

이제 위 문제를 해결하기 위해 실제  $R_{th}$ 를 구해보자.

#### 예제 5-8

##### ■ 종속전원과 저항만 있는 회로의 $R_{th}$ 의 계산

1A의 전원을 삽입한 [그림 5-34]의 회로에서  $R_{th}$ 의 값을 구하라.

##### 풀이

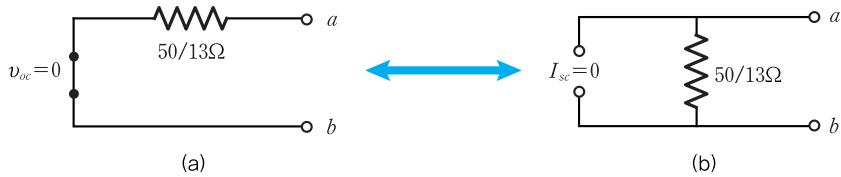
[그림 5-34]의 회로는 노드가 세 개 있으므로 변수 두 개를 가지는 노드해석으로 풀 수 있다. 노드방정식 두 개 중 노드 1은 접지전압전원이 연결되어 있으므로 회로에서 제약식  $v_1 = 2i$ 이다. 노드 2에서는 KCL에 의하여 다음과 같은 수식을 만들 수 있다.

$$1 + \frac{v_1 - v_2}{5} = \frac{v_2}{10}$$

마지막으로 종속변수  $i$ 의 값을 변수  $v_1, v_2$ 로 표현하면 다음과 같다.

$$i = \frac{v_2}{10}$$

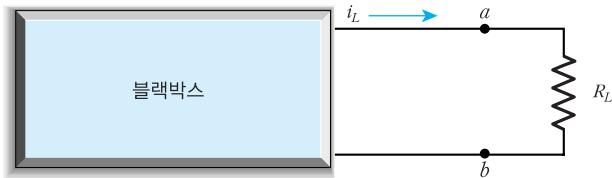
이 수식을 연립하면  $v_{ab} = v_2 = 50/13\text{V}$ 이고, 이 값은  $R_{th}$ 의 값과 같으므로 최종적으로  $R_{th} = 50/13\Omega$ 이 된다. 따라서 이 회로의 테브난과 노턴 등가회로는 [그림 5-36]과 같다.



[그림 5-36] (a) 테브난 등가회로, (b) 노턴 등가회로

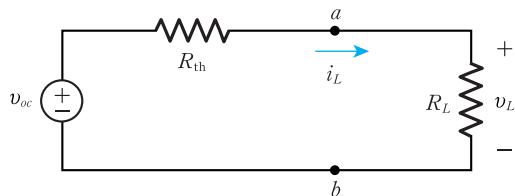
## 5.4 최대전력전달 정리

최대전력전달 정리는 회로에서 발생한 전력이 연결된 다른 회로에 전달될 때 최대전력이 전달되는 조건을 말해주는 정리다. 예를 들어 [그림 5-37]과 같은 블랙박스 회로에 부하  $R_L$ 이 연결되었을 때, 블랙박스 회로에서 발생된 전력이 어떤 조건 하에서 부하  $R_L$ 에 전달되어 최대로 소비될 수 있는가를 말해주는 정리다.



[그림 5-37] 최대전력전달 정리

이 정리를 설명하기 위해 블랙박스의 내용을 테브난 등가회로로 고치면 [그림 5-38]과 같다.



[그림 5-38] 테브난 등가회로와  $R_L$

이때 단자  $a$ ,  $b$ 에 연결된 부하에서 소비하는 전력을  $P_L$ 이라고 하면 전력을 구하는 공식에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_L(t) = i_L^2(t)R_L = \left[ \frac{v_{oc}(t)}{R_{th} + R_L} \right]^2 \cdot R_L$$

즉,  $P_L(t)$ 를 최대로 만드는  $R_L$  값을 구하려면, 최적화 기법으로 위의 식을 변수  $R_L$ 에 대하여 편미분하고 그 값을 0으로 만드는 변수  $R_L$  값을 찾으면 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\neq P_L(t)}{\neq R_L} &= \frac{\mathbf{v}_{oc}^2}{(R_{th} + R_L)^2} - 2 \frac{\mathbf{v}_{oc}^2 R_L}{(R_{th} + R_L)^3} \\ &= \mathbf{v}_{oc}^2 \frac{R_{th} - R_L}{(R_{th} + R_L)^3} = 0 \end{aligned}$$

따라서 위 식을 만족시키려면 분자가 0이 되어야 하므로  $R_{th} - R_L = 0$ 이고, 다음과 같은 조건이 성립한다.

$$R_{th} = R_L \quad (5.4)$$

그리고 이때 얻을 수 있는 최대전력은 다음과 같다.

$$P_{\max} = \mathbf{v}_L \cdot i_L = \frac{\mathbf{v}_{oc}}{2} \cdot \frac{\mathbf{v}_{oc}}{2R_L} = \frac{\mathbf{v}_{oc}^2}{4R_L} \quad (5.5)$$

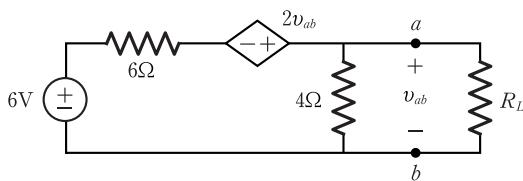
#### 정의 5-4 최대전력전달 정리

임의의 회로에서 발생된 전력을 이 회로에 연결된 부하 회로에 최대로 전달하려면 부하저항 값  $R_L$ 이 테브난 등가회로의  $R_{th}$ 의 값과 같아야 한다.

#### 예제 5-9

##### ■ 최대전력전달 정리

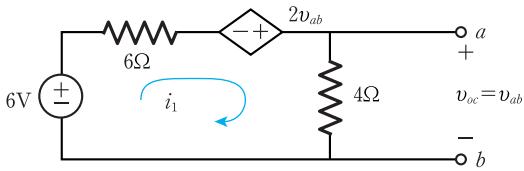
[그림 5-39]에서 부하  $R_L$ 의 값이 얼마일 때 최대의 전력이 부하에 전달되는가? 또 이때 부하에 전달되는 최대 전력  $P_{\max}$ 는 얼마인가?



[그림 5-39] 최대전력전달 정리 적용 회로

##### 풀이

먼저 단자  $a$ ,  $b$  원쪽 회로를 테브난 등가회로로 바꾸기 위해 단자  $a$ ,  $b$ 를 개방하면 [그림 5-40]과 같이 된다. 여기에서 이 회로의  $\mathbf{v}_{oc}$ 와  $R_{th}$ 를 구한다.



[그림 5-40] 테브난 등가회로의 계산

이 회로는 독립전원과 종속전원, 그리고 저항으로 이루어진 회로다. 따라서  $v_{oc}$ 의 값은 회로해석으로 단자  $a-b$  사이의 전압  $v_{ab}$ 을 구하여 얻고,  $R_{th}$ 의 값은  $R_{th} = \frac{v_{oc}}{I_{sc}}$ 의 공식으로 얻는다. 먼저  $v_{oc}$ 의 계산은 KVL을 기반으로 풀 수 있는데, 메시 한 개에 흐르는 전류  $i_1$ 은 다음 방정식으로 구한다.

$$6 = 6i_1 - 2v_{ab} + 4i_1 = 10i_1 - 2v_{ab}$$

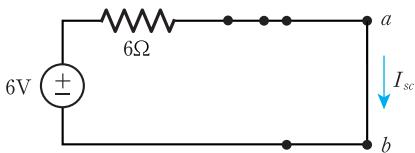
또한 수식에 포함된 종속변수  $v_{ab}$ 의 계산에 필요한 제약식은 회로에서 다음과 같이 구한다.

$$v_{ab} = 4i_1$$

위 두 식에 의하여  $i_1 = 3A$ 이므로  $v_{oc}$ 는 다음과 같다.

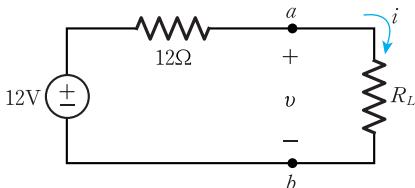
$$v_{oc} = 12[V]$$

다음으로  $R_{th}$  값을 구하는 데 필요한 값  $I_{sc}$ 를 얻기 위해 단자  $a, b$ 를 단락하여 회로를 만들면  $v_{ab}$ 는 0이 되고 종속전압전원의 값도 0이 되므로 [그림 5-41]과 같이 회로가 바뀐다.



[그림 5-41]  $I_{sc}$ 의 계산

이 회로에서  $I_{sc}$ 의 값은 음의 법칙에 의해  $I_{sc} = \frac{6}{6} = 1A$ 이다. 그러므로  $R_{th} = \frac{v_{oc}}{I_{sc}} = 12\Omega$ 이고, 테브난 등가회로는 [그림 5-42]와 같다.



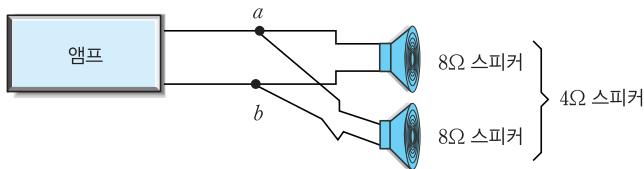
[그림 5-42] 테브난 등가회로

결국 부하저항  $R_L$ 의 값은 최대전력전달 정리에 의해  $R_{th}$ 의 값과 같은 값인  $12\Omega$ 이 되어야 하고, 이때의 최대전달 전력  $P_{max} = \frac{v_{oc}^2}{4R_L} = 3W$ 다.

## 오디오 앰프와 스피커의 연결

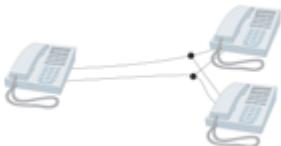
집에서 사용하는 오디오 앰프의 뒷면을 보면 스피커 선을 연결하는 곳에  $8\Omega$ 이라고 표시되어 있는 것을 볼 수 있는데, 오디오 앰프 테브난 등가회로의  $R_{th}$ 의 값을 표시한 것이다. 즉 최대전력전달 정리에 의해 연결하는 스피커의 부하저항 값이  $8\Omega$ 이 되어야 앰프의 최대전력이 전달된다는 것을 뜻한다.

예를 들어 한 개의  $8\Omega$  스피커가 연결된 오디오 시스템을 다른 장소에서도 나누어 듣기 위해 [그림 5-43]과 같이  $8\Omega$  스피커 두 개를 병렬로 연결하면 부하저항은  $8\Omega$  대신  $4\Omega$ 이 된다. 그래서 앰프에서 출력되는 소리가 최대로 스피커에 전달되지 못해 시스템이 제 성능을 내지 못하게 된다.



[그림 5-43] 오디오 스피커 시스템의 병렬연결

이와 비슷한 예로 같은 전화번호를 사용하는 전화를 집에서 여러 대 연결하여 사용할 때 제3자가 다른 전화기를 들어 대화 내용을 듣는 경우 갑자기 소리가 작아질 때가 있다. 그 이유는 순간적으로 병렬연결된 전화기로 인해 부하저항이 달라져 최대전력이 전달되지 못하기 때문이다.



[그림 5-44] 전화기의 병렬연결

## ⇒ Chapter\_05 핵심요약

이 장에서는 복잡한 회로를 단순한 회로로 변환할 수 있도록 도와주는 여러 회로이론에 대해 공부했다. 전원변환이론은 전류전원과 전압전원 간의 변환을 통해 회로를 단순화하는 이론이며 중첩의 원리는 다수의 독립전원이 있을 때 각각의 전원에 대해 개별 회로해석으로 할 수 있는 논리적 근거가 되는 이론이다. 또한 테브난과 노턴의 정리는 복잡한 회로를 단순한 전압전원과 직렬로 연결된 저항회로 또는 전류전원과 병렬로 연결된 저항회로로 각각 단순화할 수 있는 이론이다.

우리는 이러한 회로이론을 여러 가지 회로에 적용하여 공부했다. 마지막으로 테브난 등가회로에 연결된 부하에 최대전력이 전달되는 조건을 제시하는 최대전력전달 정리에 대하여 공부했다.

### 5.1 전원변환이론

전압전원과 저항이 직렬로 연결된 회로는 하나의 전류전원과 동일저항이 병렬로 연결된 회로로 변환될 수 있고, 두 전원 값 간의 관계는  $v_s = I_s R$ 이다.

### 5.2 회로해석에서 중첩의 원리

선형회로에서 다수의 독립전원이 있을 때 주어진 소자에 걸리는 전압이나 전류 값을 구할 때는 각 독립전원을 개별적으로 고려하고, 다른 독립전원을 비활성화시킨 회로에서 얻은 개별적인 전압 혹은 전류 값의 단순합으로 얻는다.

### 5.3 테브난과 노턴의 정리

테브난과 노턴의 정리를 이용한 회로의 간략화 방법은 세 가지로 요약할 수 있다.

- 독립전원과 저항만으로 이루어진 회로

①  $v_{oc}$ 의 계산 방법 : 회로를 분리하여  $a-b$  단자를 개방시키고, 단자  $a-b$  사이의 전압  $v_{ab}$ 를 측정하여 구한다.

②  $I_{sc}$ 의 계산 방법 : 회로의  $a-b$  단자를 단락시키고, 단자  $a$ 에서  $b$ 로 흐르는 전류  $i_{ab}$ 를 측정하여 구한다.

③  $R_{th}$ 의 계산 방법 : 회로 안의 모든 독립전원을 비활성화시키고(즉, 독립전압전원은 단락시키고, 독립전류전원은 개방시킴), 단자  $a-b$  사이에서 회로 쪽으로 들여다본 통합저항 값을 구한다.

- 독립전원, 종속전원, 저항으로 이루어진 회로

①  $v_{oc}$ ,  $I_{sc}$ 의 계산 방법 : 독립전원과 저항만으로 이루어진 회로의 ①, ②와 같은 방법으로 계산한다.

②  $R_{th}$ 의 계산 방법 : 이 경우는 종속전원을 비활성화시킬 수 없으므로  $v_{oc}$ ,  $I_{sc}$ 를 각각 구한 후에  $R_{th} = \frac{v_{oc}}{I_{sc}}$ 의 공식에 대입하여 구한다.

- 종속전원과 저항만으로 이루어진 회로

①  $v_{oc} = 0[V]$ ,  $I_{sc} = 0[A]$ 가 된다.

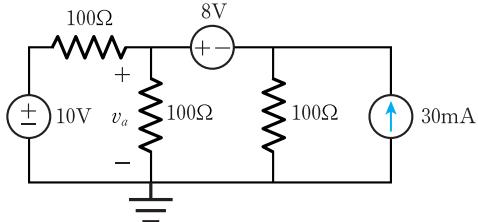
②  $R_{th}$ 의 계산 방법 : 단자  $a-b$  사이에 1A의 전류전원을 삽입하고, 회로해석에 의하여 단자 간 전압  $v_{ab}$ 를 찾으면, 그 값이  $R_{th}$ 의 값과 같다.

#### 5.4 최대전력전달 정리

임의의 회로에서 발생한 전력을 연결된 부하 회로에 최대로 전달하는 조건은  $R_L = R_{th}$ 이다.

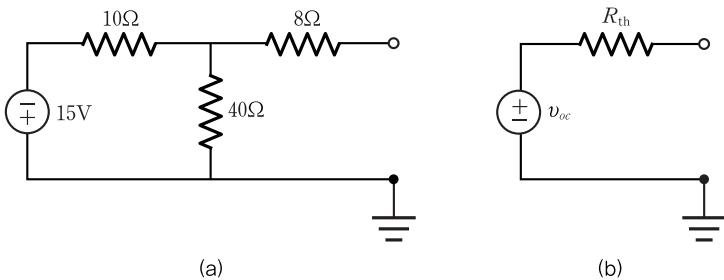
## ⇒ Chapter\_05 연습문제

5.1 다음 회로에서 전원변환 공식을 이용하여 전압  $v_a$ 를 구하라.



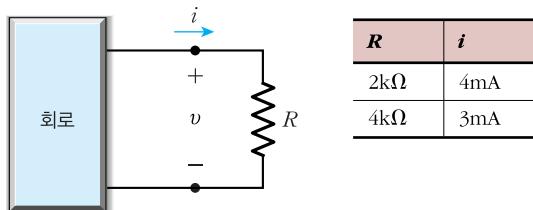
[그림 5-45]

5.2 [그림 5-46]에서 회로 (b)는 회로 (a)의 테브난 등가회로를 나타낸 것이다. 이때  $v_{oc}$ 와 테브난 저항  $R_{th}$ 의 값을 구하라.



[그림 5-46]

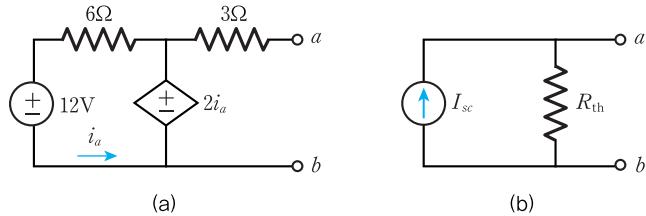
5.3 다음 그림과 같이 저항  $R$ 이 박스에 연결되어 있고, 전류  $i$ 가 측정되었다. 그리고 이 저항  $R$ 의 값을 변화하면서 전류  $i$ 를 측정한 값이 아래 표와 같다.



[그림 5-47]

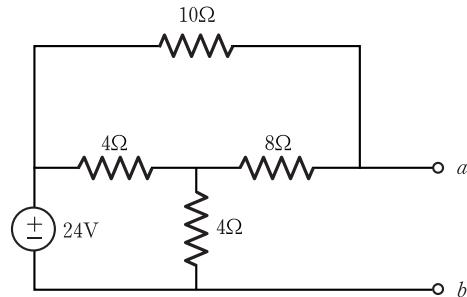
- (1) 박스 안 회로의 테브난 등가회로를 구하라.
- (2)  $i = 2\text{ mA}$ 가 되기 위한 저항  $R$ 의 값을 구하라.

**5.4** 회로 (a)와 회로 (b)가 같은 회로일 때,  $R_{th}$ 와  $I_{sc}$ 의 값을 구하라.



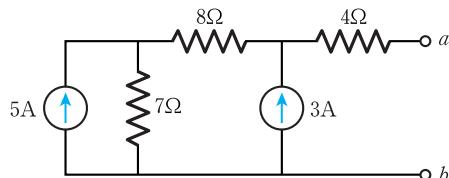
[그림 5-48]

**5.5** 다음 회로에서 단자  $a-b$ 의 테브난 등가회로를 구하라.



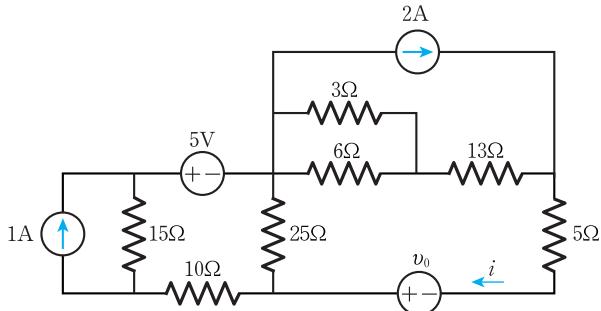
[그림 5-49]

**5.6** 다음 회로에서 단자  $a-b$ 의 노턴 등가회로를 구하라.



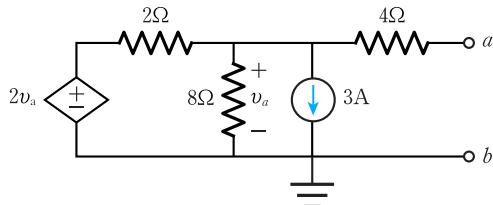
[그림 5-50]

5.7 다음 회로에서 전원변환공식을 이용하여  $i = 2\text{A}$ 일 때  $v_0$ 의 값을 구하라.



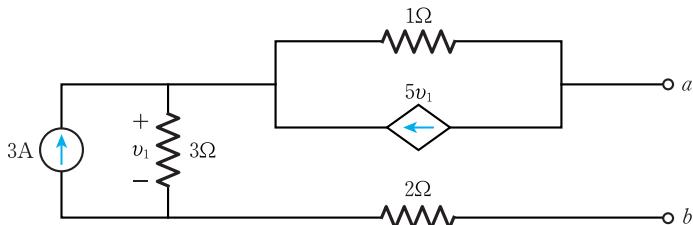
[그림 5-51]

5.8 다음 회로의 테브난 등가회로를 구하라.



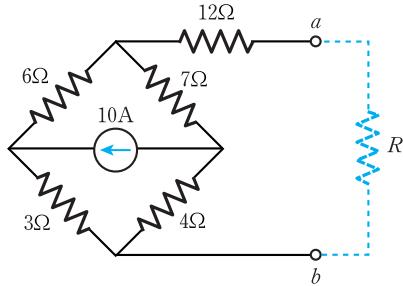
[그림 5-52]

5.9 다음 회로의 노턴 등가회로를 구하라.



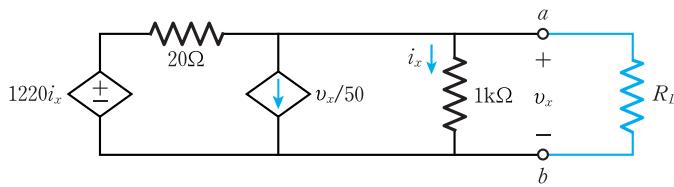
[그림 5-53]

5.10 다음 회로에서 단자  $a-b$ 에 연결될 저항  $R$ 이 최대로 소비하게 될 최대전력 값을 구하라.



[그림 5-54]

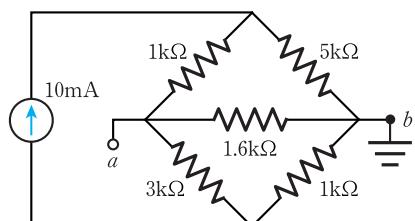
5.11 다음 회로를 보고 물음에 답하라.



[그림 5-55]

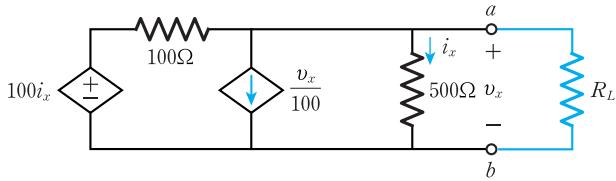
- (1) 단자  $a, b$ 의 노턴 등가회로를 그려라.
- (2) 부하  $R_L$ 을 그림과 같이 접속시킬 때, 최대전력을 전달받을 수 있는  $R_L$ 의 값을 구하라.
- (3) 만약 노턴 등가회로의 단락회로전류가  $I_{sc}(t) = 10A$ 로 주어졌다면, 이때 부하에 전달되어 부하가 소비하는 최대전력 값은 얼마인가?

5.12 다음 회로의 단자  $a, b$ 의 테브난 등가회로를 그려라.



[그림 5-56]

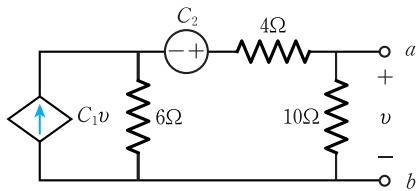
5.13 다음 회로를 보고 물음에 답하라.



[그림 5-57]

- (1) 테브난 등가회로를 그려라.
- (2) 최대전력전달을 위한 부하저항 값을 구하라.
- (3) 최대전력전달이 이루어질 때 부하에 전달되는 전력은 얼마인가?

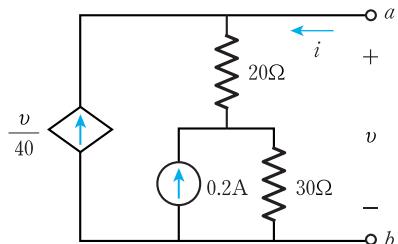
5.14 다음 각각의 경우에 대하여 회로의 테브난 등가회로를 구하라.



[그림 5-58]

- (1)  $C_1 = 0.2$ ,  $C_2 = 12V$  일 때
- (2)  $C_1 = 0.2$ ,  $C_2 = 0V$  일 때

5.15 다음 회로에서 전류  $i$ 와 전압  $v$ 의 관계식을 구하고, 이를  $i - v$  도표 위에 도시하라.

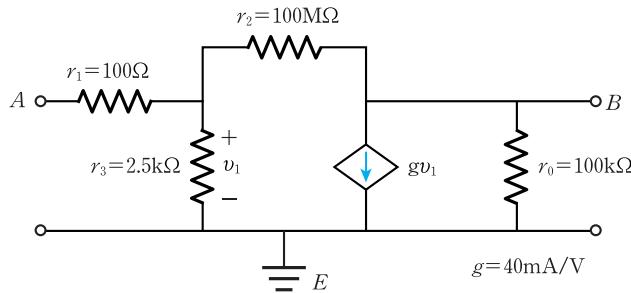


[그림 5-59]

## ⇒ Chapter\_05 기출문제

06년 행정고시 기술직

5.1 다음은 어떤 반도체 능동소자의 소신호 등가회로다.

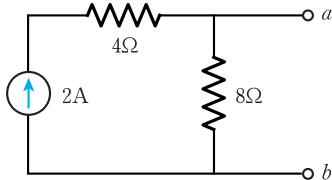


[그림 5-60]

내부저항이  $1\text{k}\Omega$ 인 포트(단자  $A-E$ )에 인가되고, 부하저항  $R_L = 10\text{k}\Omega$ 인 출력포트(단자  $B-E$ )에 연결되었을 때, 이 등가회로의 전압이득(출력전압  $V_L$  / 입력전압  $V_S$ )을 구하라.

08년 전기기사

5.2 다음 회로를 테브난 등가회로로 변환하려고 한다. 이때 테브난 등가저항  $R_{th}[\Omega]$ 과 등가전압  $V_T[V]$ 는?



[그림 5-61]

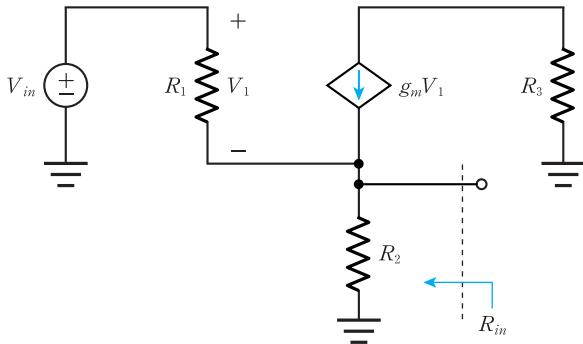
$$\textcircled{1} R_T = \frac{8}{3}, V_T = 8$$

$$\textcircled{2} R_T = 6, V_T = 12$$

$$\textcircled{3} R_T = 8, V_T = 16$$

$$\textcircled{4} R_T = \frac{8}{3}, V_T = 16$$

08년 행정안전부 7급 공무원

5.3 다음 회로에서 입력저항  $R_{in}$ 은?

[그림 5-62]

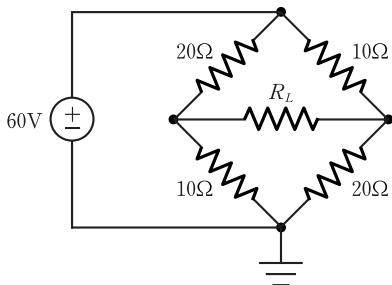
$$\textcircled{1} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + g_m}$$

$$\textcircled{2} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + g_m R_1 R_2}$$

$$\textcircled{3} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\textcircled{4} \frac{g_m R_1 R_2}{R_1 + R_2 + g_m R_1 R_2}$$

09년 행정안전부 7급 공무원

5.4 다음 회로에서 전원으로부터 저항  $R_L$ 에 최대전력이 전달될 수 있도록 하는  $R_L[\Omega]$ 은?

[그림 5-63]

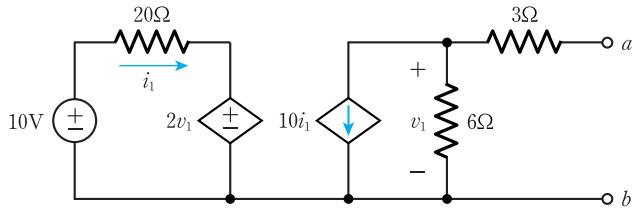
$$\textcircled{1} \frac{10}{3}$$

$$\textcircled{2} \frac{20}{3}$$

$$\textcircled{3} \frac{30}{3}$$

$$\textcircled{4} \frac{40}{3}$$

09년 행정안전부 7급 공무원

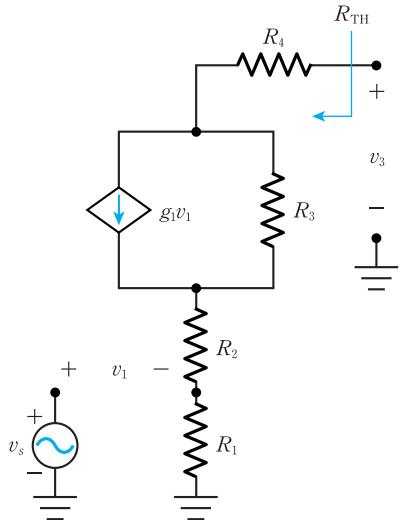
5.5 다음 회로의  $a, b$  단자에서 본 노턴 등가회로를 구할 때 테브난 저항값  $R_{th}[\Omega]$ 은?

[그림 5-64]

- ① 1.8      ② 2.0      ③ 3.6      ④ 4.0

09년 행정고등고시 기술직

5.6 아래의 회로에 대해 다음 물음에 답하라.

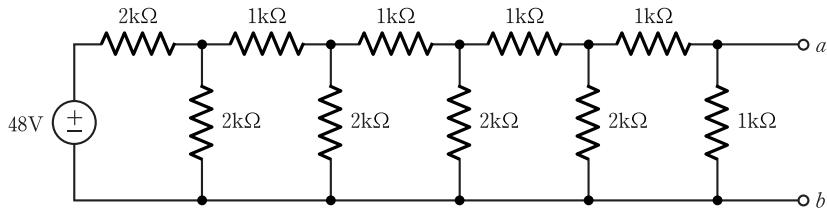


[그림 5-65]

- (1) 전압비 $A_v \equiv \frac{v^3}{v_s}$ 을 구하라.  
 (2) 테브난의 등가저항( $R_{th}$ )을 전압비 $(A_v)$ 으로 표현하라.

## 10년 행정안전부 7급 공무원

5.7 다음 회로의 단자  $a-b$  좌측을 노턴 등가회로로 대치할 때 노턴 등가전류원  $I_N[\text{mA}]$ 와 노턴 등가저항  $R_N[\text{k}\Omega]$  값은?

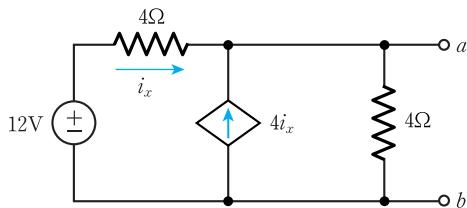


[그림 5-66]

- | $\frac{I_N}{\text{mA}}$ | $\frac{R_N}{\text{k}\Omega}$ |
|-------------------------|------------------------------|
| ① 0.5                   | $\frac{2}{3}$                |
| ② 1.5                   | $\frac{2}{3}$                |
| ③ 0.5                   | 2                            |
| ④ 1.5                   | 2                            |

## 10년 행정안전부 7급 공무원

5.8 다음 회로의 단자  $a-b$  좌측을 테브난 등가회로로 대치할 때 테브난 등가저항  $R_{th}[\Omega]$ 은?



[그림 5-67]

- |                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ① $\frac{5}{3}$ | ② $\frac{3}{2}$ | ③ $\frac{3}{5}$ | ④ $\frac{2}{3}$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|

## 11년 제1회 전기기사

5.9 기전력  $E$ , 내부저항  $r$ 인 전원으로부터 부하저항  $R_L$ 에 최대전력을 공급하기 위한 조건과 그 때의 최대전력  $P_m$ 은?

$$\textcircled{1} R_L = r, P_m = \frac{E^2}{4r}$$

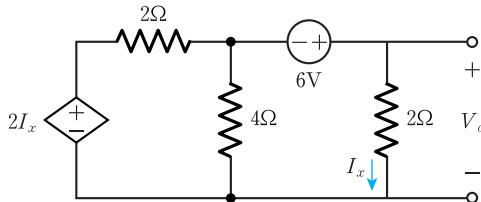
$$\textcircled{2} R_L = r, P_m = \frac{E^2}{3r}$$

$$\textcircled{3} R_L = 2r, P_m = \frac{E^2}{4r}$$

$$\textcircled{4} R_L = 2r, P_m = \frac{E^2}{3r}$$

## 11년 행정안전부 7급 공무원

5.10 다음 회로에서 출력전압  $V_o$ [V]는?



[그림 5-68]

$$\textcircled{1} 4$$

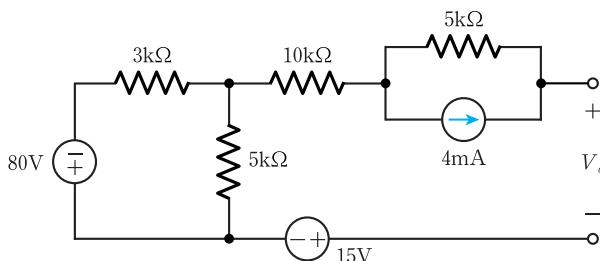
$$\textcircled{2} 5$$

$$\textcircled{3} 6$$

$$\textcircled{4} 7$$

## 11년 행정안전부 7급 공무원

5.11 다음 회로에서 전압  $V_o$ [V]는?



[그림 5-69]

$$\textcircled{1} -30$$

$$\textcircled{2} -45$$

$$\textcircled{3} 30$$

$$\textcircled{4} 45$$