1 서 론

1.1 전기회로의 기본개념
1.2 전 하
1.3 전 류
1.4 전위차, 전압
1.5 전 력
1.6 전류, 전압의 기준방향
1.7 키르히호프의 법칙
1.8 저항 및 옴의 법칙
1.9 전 원
연습문제

전기공학은 전기적 에너지와 신호(signal)의 발생, 변환, 전송 및 이용을 다루는 학문이다. 이 네 가지 과정에 대한 실제 예는 우리 주변에서 얼마든지 볼 수 있다. 가령 수력, 화력, 원자력으로부터 전력이 발생되고, 이것이 원거리에 있는 가정, 공장에 전송되어서 전등, 전열기, 기타 각종의 전기 및 전자기기를 동작시키는 데 이용된다. 또 TV나 라디오의 전기적 신호는 처음에 연주실에서 발생되어 전송에 알맞은 형식으로 변환되어 전자파로 발사되고 수신 후 재생에 알맞은 형식으로 재차 변환된다. 이와 같은 과정은 다수의 전기적 및 전자적 부품, 장치의 연결로 이루어진다. 각 기기에 대한 완전한 이해를 위해서는 전기공학 각 부분의 특수한 지식이 필요하나 회로이론(circuit theory)은 이 모든 부분의 연구에 기초적인 무기가 된다. 따라서 회로이론의 명확한 이해는 모든 전기공학자에게 요구되는 기초적인 소양이다.

이 장에서는 전기회로에서 취급되는 기초적인 여러 가지 양, 전기회로의 기본

적 법칙에 대하여 기술한다.

1.1 전기회로의 기본개념

그림 1.1은 1.5 V 건전지에 1.5 V, 0.1 W의 꼬마전구를 연결한 2개의 회로소자로 된 가장 간단한 전기회로이다. 여기서 일어나는 전기현상을 살펴보자.

전류 I는 그림에 표시한 방향(시계방향)으로 회로를 순환한다. 이 전류는 전지에서는 $-$에서 $+$로 흐르고 전구에서는 $+$에서 $-$로 흐른다. 즉, 전류의 방향으로 전지에서는 1.5 V의 전압상승이 있고 전구에서는 1.5 V의 전압강하가 있게 된다.

다음에는 이 회로에서 일어나는 에너지의 발생과 소비에 관해서 고찰하자. 전류가 흐름으로써 전구에서는 빛과 열이 발생하는데, 이것은 전원에서 전달된 전기적 에너지가 변환된 것이다. 한편 이 전기적 에너지는 원래 전지가 보유하고 있던 화학적 에너지가 변환된 것으로서 전류의 흐름에 따라 전지는 계속 소모된다. 이상과 같이 전류가 흐름으로써 전지에서의 화학적 에너지의 전기적 에너지로의 변환과 전구에서의 전기적 에너지의 빛 및 열에너지로의 변환이 계속적으로 일어나는데, 에너지 불멸법칙에 의하여 각 변환에서 변환 전후의 에너지는 같다.

전기회로에서 한 소자의 두 단자(그림 1.1에서 a, b) 사이를 흐르는 전류를 I, 전류 I의 방향으로의 전압강하를 V라 할 때 그 소자에 공급되는 전력은 $P = V \times I$ [W]이다. 그리고 t초 동안에 소비되는 에너지는 $P \times t$ [W·s]이다.

그림 1.1에서 꼬마전구의 규격을 1.5 V, 0.1 W라 한 것은 이 전구에 1.5 V를 걸 때 여기에서 소비되는 전력이 0.1 W라는 것을 의미한다. 그러므로 이때 전류 $I = 0.1\,\mathrm{W}/1.5\,\mathrm{V} = 0.067\,\mathrm{A}$이다. 또 옴(Ohm)의 법칙에 의하여 전구의 저항 $R = V/I = 1.5 \div (0.067) = 22.5\,\Omega$이다.

이상은 중·고등학교에서 배운 전기회로에 대한 기초지식이다. 위에서는 전

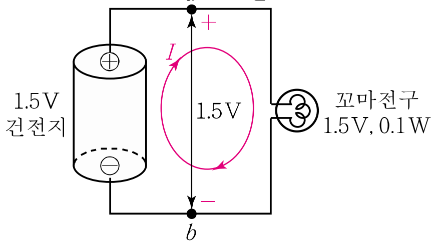


그림 1.1 간단한 전기회로

압, 전류, 전력 등이 시간에 따라 변하지 않는 직류(DC)의 경우를 생각했지만 가정에 들어오는 전기처럼 시간에 따라 크기와 방향이 바뀌는 교류(AC)의 경우도 있다.

이하 우리는 이상에서 사용한 용어들에 대한 더 엄격한 정의를 한다.

1.2 전 하

전기기기 또는 전기회로의 특성과 동작은 이하의 1.4절에서 정의할 몇 가지 기본적인 전기적 양에 의하여 기술된다. 가장 기본적인 양은 **전하**(electric charge)이다. 모든 전기적 효과는 전하와 그 공간적 분포 및 운동에 의하여 일어난다. 전하에는 양자, 양이온(ion), 정공(반도체 내에 존재하는, 전자와 동일한 +전하를 띤 입자) 등이 갖는 양전하(positive charge)와 전자나 음이온이 갖는 음전하(negative charge)의 두 가지가 있다. 전자 1개가 갖는 전하는 전기량으로서는 더 이상 쪼갤 수 없는 최소의 양이다. 그러나 이 양은 너무 적으므로 MKS 단위계(길이, 질량, 시간의 단위로 각각 meter, kilogram, second를 쓰는 단위계)에서는 전하의 단위로 **쿨롬**(coulomb)을 사용한다.

전자 1개의 전하는 1.601×10^{-19}쿨롬이다. 따라서 $1/1.601 \times 10^{-19} = 6.25 \times 10^{18}$개의 전자가 모이면 1쿨롬이 된다.

이하 시간적으로 변하지 않는 양은 대문자, 변하는 양은 소문자의 기호로 표시한다.

1.3 전 류

전기회로에서 에너지가 전송되려면 전하의 이동이 있어야 한다. 전하의 이동은 **전류**를 형성한다. 전류의 크기는 회로의 어느 단면을 단위시간에 통과하는 전하의 양으로써 정의되며 그 MKS 단위는 **암페어**(ampere)이다. 1암페어는 1초간에 1쿨롬의 율로 전하가 이동할 때의 전류이다. 따라서 일정한 율로 t초간에 Q쿨롬의 전하가 이동하였다면 이때의 전류 I는

$$\boxed{I = \frac{Q}{t}} \text{ A(ampere) 또는 } Q = It \text{ C(coulomb)} \tag{1.1}$$

와 같다. 전하가 이동하는 시간적 변화율이 일정하지 않을 때에는 각 순간의 전류를 생각하여야 하며, 미소시간 dt초간에 이동한 전하를 dq쿨롬이라 하면 그 순간의 전류는

$$i = \frac{dq}{dt} \quad \text{A} \tag{1.2}$$

따라서 $dq = i\,dt$ 이다. 이로부터 $t_1 \sim t_2$ 사이에 회로의 단면을 지나는 총전하는 다음과 같다.

$$q = \int_{t_1}^{t_2} i\,dt \quad \text{C} \tag{1.3}$$

전류의 양의 방향은 관례에 따라 양전하가 이동하는 방향으로 정하고 있다. 따라서 전자의 이동방향은 전류의 양의 방향과 반대가 된다. 회로도에 전류의 양의 방향을 표시할 때에는 화살표를 사용한다(그림 1.2 참고). 때로는 회로 내의 한 점 a 에서 다른 점 b 로 흐르는 전류를 i_{ab} 라고 표시하기도 한다. 그러면 물론 $i_{ba} = -i_{ab}$ 이다.

전류가 흐를 때의 전하의 운반체는 도선 내에서는 자유전자, 진공관 내에서는 음극에서 튀어나와 양극으로 흡인되는 열전자, 트랜지스터나 반도체 다이오드에서는 전자와 정공, 전지나 전해조(전기분해장치)에서는 +, −의 이온이다(그림 1.2).

전류에 관해서 갖기 쉬운 한 가지 그릇된 생각은 전파가 광속으로 전파되므로 전류가 흐르는 도체 내의 전자도 이와 같은 속도로 이동하리라는 것이다. 그러나 대전류의 경우에도 도체 내의 자유전자의 평균이동속도는 보통 매초 수 mm를 넘지 않는다. 그럼에도 불구하고 전기회로의 한 부분에서 일어난 교란이 광속에 가까운 속력으로 다른 부분에 전달될 수 있는 것은 물이 충만된 긴 파이프의 1단에 가한 압력이 거의 순식간에 다른 단에 미치는 것으로 미루어 수긍할 수 있으리라.

[수치예] (a) 어떤 도선 중을 5 A의 일정전류가 10초간 흘렀다면, 이 동안에 도선 단면을 통과한 전하의 총량은 $5\,\text{A} \times 10\,\text{s} = 50\,(\text{C/s})\,\text{s} = 50\,\text{C}$ 이고, 통과한 전자의 총수는 $50 \times 6.25 \times 10^{18} = 3.125 \times 10^{20}$ 개

(b) 어떤 반도체 막대의 수직단면을 좌측에서 우측으로 정공이 매초 $10^{-4}\,\text{C}$ 의 율로 흐르고 동시에 반대방향으로 전자가 매초 $10^{-3}\,\text{C}$ 의 율로 흐르고 있다면, 그 순간 좌측에서 우측으로 흐르는 전류는 $(10^{-4} + 10^{-3})\,\text{A} = 1.1\,\text{mA}$

(c) $i = e^{-t}$A로 표시되는 전류가 어떤 도선을 $t = 0 \sim 2$초 동안 흘렀다면 이 동안에 도선단면을 통과한 전하의 총량은

$$\int_0^2 e^{-t} dt = -e^{-t}\Big|_0^2 = 1 - e^{-2} = 0.865\,\mathrm{C}$$

1.4 전위차, 전압

전류에 관하여 항상 염두에 두어야 할 가장 중요한 사실은 전류가 흐를 때에는 반드시 에너지의 변환과 전달이 수반된다는 것이다. 예를 들면, 그림 1.2와 같은 회로에서는 축전지 내에서 화학적 에너지가 전기적 에너지로 변환되고, 이 전기적 에너지는 전류에 따라 회로의 각 부분에 전달되어 전열기, 전해조, 다이오드, 모터 내에서 각각 열에너지, 화학적 에너지, 열에너지, 기계적 에너지로 변환된다. 즉, 이 예에서 양전하가 축전지를 통할 때에는 전기적 에너지를 얻고, 회로의 다른 부분을 통할 때에는 그 에너지를 잃게 된다. +1쿨롬의 전하가 회로의 두 점 사이를 이동할 때 얻든지 또는 잃는 에너지를 두 점간의 **전위차**(electric potential difference) 또는 **전압**(voltage)이라고 하며, 그 MKS 단위는 **볼트**(volt)이다. 1볼트는 1쿨롬의 전하가 두 점간을 이동할 때 얻거나 잃는 에너지가 1줄(joule)일 때의 전위차이다. 따라서 Q쿨롬의 전하가 전위차가 일정한 두 점간을 이동할 때 얻거나 잃는 에너지가 W줄이라면 그 두 점간의 전위차 V는

$$V = \frac{W}{Q}\ \mathrm{V(volt)} \quad 또는 \quad W = VQ\ \mathrm{J(joule)} \tag{1.4}$$

가 된다. 더 일반적으로 미소한 전하 dq쿨롬이 두 점간을 이동할 때에 수반되는

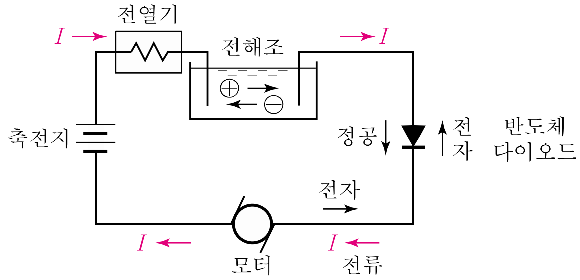


그림 1.2 전류의 방향과 전하의 이동방향

에너지가 dw 줄이라 하면 그 두 점간의 전압은

$$v = \frac{dw}{dq} \text{ V} \tag{1.5}$$

따라서 $dw = v\,dq$ 이다. 이로부터

$$w = \int v\,dq \text{ J} \tag{1.6}$$

회로 내의 한 점 a에서 다른 점 b까지 +전하를 이동시키는 데 일을 해주어야 할 때, 즉 이동하는 전하가 에너지를 얻을 때 우리는 (1) b의 전위는 a의 전위보다 높다(a의 전위는 b의 전위보다 낮다), 또는 (2) a를 기준으로 했을 때의 b의 전위는 양(positive)이다[b를 기준으로 했을 때의 a의 전위는 음(negative)이다]. 또는 (3) a로부터 b로 전압상승(voltage rise)이 있다[b로부터 a로 전압강하(voltage drop)가 있다]고 말한다. 점 a에서 점 b까지 +전하가 이동함에 있어서 전하 자신이 일을 할 때, 즉 전하가 에너지를 잃을 때에는 위와 반대로 말한다.

두 점간의 전압을 말할 때에는 어느 점이 어느 점보다 전위가 높은가, 즉 어느 점에서 어느 점으로 전압상승이 있는가 하는 것을 명백히 해야 한다. 이와 같은 전압의 **극성**(polarity)을 회로도에 표시할 때에는 전위가 높은 점에 +, 낮은 점에 −를 표시한다(그림 1.3). 때로는 점 b의 전위를 기준으로 했을 때의 점 a의 전위를 v_{ab}라고 표시하기도 한다. 만일 점 b에서 점 a로 전압상승이 있으면 $v_{ab} > 0$, 반대로 전압강하가 일어나면 $v_{ab} < 0$이다. 그리고 물론 $v_{ba} = -v_{ab}$이다. 많은 경우에 전기공학에서는 접지점, 전자공학에서는 샤시(chassis) 또는 인쇄기판(printed circuit board ; PCB)의 그라운드면을 회로의 공통되는 전위기준점으로 택한다.

$v_{ab} < 0,\ v_{ba} > 0$ $v_{ab} > 0,\ v_{ba} < 0$

(a) +전하가 에너지를 얻는 경우 (a에서 b로 전압상승)

(b) +전하가 에너지를 잃는 경우 (a에서 b로 전압강하)

그림 1.3 전류, 전압의 극성표시

회로 내에서 어느 두 점간의 전위차는 어떤 경로를 통하여 계산하든 모두 같다[예제 1.1 (b)의 풀이 참고]. 전원에서는 비전기적 에너지가 전기적 에너지로 변환하여 양전하를 전위가 낮은 점에서 높은 점으로 이동시켜 외부회로에 전류를 흐르게 한다.

이상 모든 진술에서 실제로는 +전하가 아니라 −전하가 회로의 점 a에서 b로 흐를 때(도선 내에서의 전자의 흐름처럼) +전하가 반대방향으로, 즉 점 b에서 a로 흐르는 것처럼 생각하여 전류는 b에서 a로 흐른다고 생각한다.

물이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 것과 같이 전류도 항상 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다는 것은 틀린 말이다. 펌프에 의해서 물이 낮은 곳에서 높은 곳으로 흐를 수 있는 것과 같이 전원을 지날 때 전류는 −에서 +로 흐를 수 있다.

[수치예] 전기회로 내의 점 a에서 점 b까지 +1 C의 전하를 이동시키는 데 100 J의 일을 해야 할 때 점 b는 점 a보다 100 J/1 C = 100 V만큼 전압이 높다(v_{ba}=100 V ; +전하의 이동방향, 즉 전류의 방향으로 100 V의 전압상승이 생긴다).
반대로 점 a에서 점 b까지 +1 C의 전하가 이동할 때 전하가 100 J의 일을 하면(에너지를 잃는다면), 점 b는 점 a보다 100 V만큼 낮다(v_{ab} = 100 V ; 전류의 방향으로 100 V의 전압강하가 생긴다).

1.5 전 력

단위시간에 변환 또는 전달되는 에너지를 **전력**(power)이라 하며, 그 MKS 단위는 **와트**(watt)이다. 1와트는 1초간에 수수(주고 받는 것, 즉 공급, 전달, 변환의 총칭)되는 에너지가 1줄일 때의 전력이다. 따라서 에너지가 수수되는 시간적 율이 일정할 때의 전력을 P라 하면

$$P = \frac{W}{t} \quad \text{W(watt) (또는 J/s)} \tag{1.7}$$

식 (1.4)에 의하여 $W = VQ$이고, 또 식 (1.1)에 의하여 $Q/t = I$이므로 윗식은

$$P = VI \quad \text{W (또는 J/s)} \tag{1.8}$$

또 에너지는

$$W = Pt = VIt \ \text{W·s (또는 J)} \tag{1.9}$$

에너지가 수수되는 시간적 율이 일정하지 않을 때에는 각 순간에서의 전력을 생각해야 하며, 미소시간 dt초 동안에 수수된 에너지를 dw라 하면 그 순간의 전력은

$$p = \frac{dw}{dt} \ \text{W} \tag{1.10}$$

$\dfrac{dw}{dt}$는 $\dfrac{dw}{dq} \times \dfrac{dq}{dt}$라 쓸 수 있고, 이 각 항은 식 (1.5), (1.2)에 의하여 v, i와 같으므로

$$p = vi \ \text{W (또는 J/s)} \tag{1.11}$$

또 식 (1.10)으로부터 $dw = pdt$이므로 시간 $t_1 \sim t_2$ 사이에서 일어난 에너지의 수수는

$$w = \int_{t_1}^{t_2} p\, dt = \int_{t_1}^{t_2} vi\, dt \ \text{W·s (또는 J)} \tag{1.12}$$

이상에서 전압의 정의에 의하여 전압상승의 방향으로(−에서 +로) 전류가 흐를 때에는 전기적 에너지 또는 전력의 발생, 공급이 있고 전압강하의 방향으로(+에서 −로) 전류가 흐를 때에는 전기적 에너지의 전달, 소비(변환)가 있다.

전력공학에서는 흔히 다음과 같은 단위들이 쓰인다.

1 kW = 10^3 W, 1 hp (horse power) = 746 W
1 W·h (watt·hour) = 3600 W·s (또는 J), 1 kW·h = 10^3 W·h
1 cal (calorie ; 열량) = 4.2 J (1 J = 0.24 cal), 1 kcal = 10^3 cal

[수치예] (a) 어떤 회로에 공급되는 전력이 시간에 따라 $p(t) = 2t + 1$ W와 같이 변할 때 $t = 0$에서 $t = 2$s까지 공급되는 에너지는

$$\int_0^2 p(t)dt = [t^2 + t]_0^2 = 6\ \text{J}$$

(b) 200 V, 1 kW의 전열기를 두 시간 사용했을 때, 흐르는 전류는 $I = P/V = 1000\,\mathrm{W}/200\,\mathrm{V} = 5\,\mathrm{A}$, 소비된 전력량(전기에너지)은 2 kW·h, 발생된 총열량은 $2000\,\mathrm{W} \times (60 \times 60)\mathrm{s} = 7.2 \times 10^6\,\mathrm{J} = 7.2 \times 10^6 \times 0.24\,\mathrm{cal} = 1714\,\mathrm{kcal}$, 전기요금은 1 kW·h당 200원이면 400원이다.

표 1.1

전기적 양	기　호	단위(MKS 계)	단위의 약자	관　계　식
전　하	q, Q	coulomb	C	$Q = It$ 또는 $q = \int_{t_1}^{t_2} i\,dt$
전　류	i, I	ampere	A	$I = \dfrac{Q}{t}$ 또는 $i = \dfrac{dq}{dt}$
전　압	v, V	volt	V	$V = \dfrac{W}{Q}$ 또는 $v = \dfrac{dw}{dq}$
전　력	p, P	watt	W	$P = VI$ 또는 $p = vi$
에너지 또는 일	w, W	joule, volt-coulomb 또는 watt·sec	J 또는 W·s	$W = Pt$ 또는 $w = \int_{t_1}^{t_2} p\,dt$

표 1.1은 기본적인 전기적 여러 가지 양을 총괄한 것으로, 기호에서는 보통 소문자는 시간적으로 변하는 경우에, 대문자는 시간적으로 불변인 DC의 경우에 쓰인다.

[비고] 수식의 계산에서는 먼저 모든 단위를 MKS 단위로 통일한 다음 수치 계산하는 것이 혼동을 피하는 길이다.

예 1 : 어떤 저항에 10 mA의 전류가 흐를 때 그 양단전압이 2 V가 있다면 그 저항은 $R = V/I = 2\,\mathrm{V}/(10 \times 10^{-3})\,\mathrm{A} = 200\,\Omega$ (단위 V, A는 생략해도 무방). 그러나 $\mathrm{k\Omega \cdot mA = V}$, $\mathrm{V/k\Omega = mA}$, $\mathrm{V/mA = k\Omega}$이라는 것을 기억하면 편리하다. 예컨대 2 kΩ 양단에 10 V의 전압이 인가될 때 흐르는 전류는 $10/2 = 5\,\mathrm{mA}$이다.

예 2 : 5 kΩ의 저항에 10 mA의 전류가 흐를 때 소비전력은 $P = RI^2 = (5 \times 1000\,\Omega)(10 \times 10^{-3}\mathrm{A})^2 = 0.5\,\mathrm{W}$ (단위 Ω, A는 생략해도 무방)

예제 1.1

그림 1.4의 회로에서 화살표방향으로 일정한 전류 0.5 A가 흐르고 있다. 회로의 일부분 A에서는 매분 600 J의 전기적 에너지가 얻어지고, 다른 부분 B, C, D에서는 각각 150, 300, 150 J의 에너지가 소비된다고 한다(에너지 불멸법칙에 의하여 발생된 전기

적 에너지와 소비된 전기적 에너지는 같도록 하였다).

(a) 각 부분에서 발생 또는 소비되는 전력을 구하고, 각 부분의 양단에 나타나는 전압의 크기와 극성을 표시하라.

(b) 점 d를 기준으로 했을 때 점 a의 전하는 D를 거쳐서 계산한 것과 $C \to B \to A$의 경로를 거쳐서 계산한 것이 같음을 보여라.

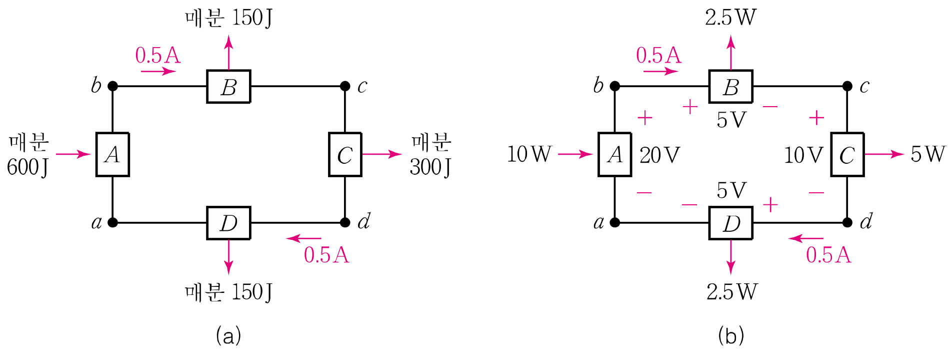


그림 1.4 예제 1.1의 회로

풀 이

(a) 식 (1.7)에 의하여 각 부분의 전력은 각각 $600/60 = 10$, $150/60 = 2.5$, $300/60 = 5$, $150/60 = 2.5$ W이다. 또 전압은 이것들을 전류 0.5 A로 나누면 얻어지고 각각 20, 5, 10, 5 V이다. 또 전압의 극성은 A에서는 전력이 발생하므로 전류의 방향으로 $-$, $+$, 기타에서는 전력이 소비되므로 전류의 방향으로 $+$, $-$가 된다. 즉, 그림 1.4 (b)에 표시한 바와 같다.

(b) 점 d를 기준으로 했을 때 점 a의 전위는 $V_{ad} = -5\,\text{V}$이 된다. 또는 $V_{cd} = V_{cd} + V_{bc} + V_{ba} = 10\,\text{V} + 5\,\text{V} - 20\,\text{V} = -5\,\text{V}$이 된다.
즉, 어느 쪽의 경로를 생각하여 계산해도 같다.

1.6 전류, 전압의 기준방향

많은 경우에 회로의 전류는 시간적으로 크기가 변할 뿐 아니라 흐르는 방향이 변한다. 또 전압도 크기와 더불어 전압강하의 방향이 변한다. 이 경우 전류, 전압을 i, v와 같은 기호를 써서 또는 그래프(graph)로써 나타낼 때에는 반드시 전류의 양의 방향과 전압의 극성을 가정한 다음에 취급해야 한다. 가령 그림 1.5의 $0 < t < t_1$에서 점 a로부터 점 b로 3 A의 전류가 흐르고 $t > t_1$에서 b로부터 a로 5 A의 전류가 흐른다고 하자. 이 사실을 기호 i를 써서 수식화하려면 우선 i의 양의 방향을 가정해야 한다. 가령 a로부터 b로 흐르는 전류, 즉 i_{ab}를 i라 하면

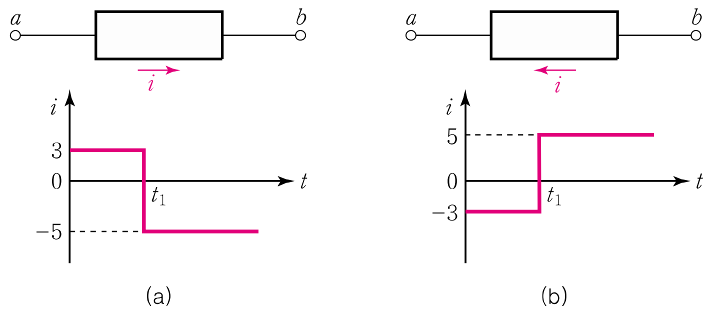


그림 1.5 전류의 양의 방향의 가정

$$i = 3\,\mathrm{A}, \qquad 0 < t < t_1$$
$$i = -5\,\mathrm{A}, \qquad t > t_1$$

와 같이 표시된다. 그러나 b로부터 a로 흐르는 전류, 즉 i_{ba}를 i라고 가정하면

$$i = -3\,\mathrm{A}, \qquad 0 < t < t_1$$
$$i = 5\,\mathrm{A}, \qquad t > t_1$$

와 같이 표시된다. 그리고 이것을 그래프로 나타낼 때에는 두 가지 가정에 따라 시간축에 대하여 정반대가 된다(그림 1.5). 이상은 전압에 대해서도 마찬가지이다. 즉, 실제의 전류, 전압이 그 가정한 방향으로 나타났을 때에는 그것을 양으로 취급하고, 반대방향으로 나타났을 때에는 음으로 취급한다. 반대로 i의 양의 방향, v의 극성을 가정하고 문제를 취급한 결과 i, v가 양 또는 음의 값을 가졌을 때 그것을 가정에 비추어 적당히 해석해야 한다. 따라서 그림 1.6과 같이 화살표에 i, 또 +, −의 극성표시 옆에 v라는 기호를 썼을 때, 그것은 문제를 취급하기 위해서 필요한 제 1 단계로서 임의로 가정한 전류의 양의 방향과 전압의 극성을 나타낸 것일 뿐 그 회로에서 항상 전류, 전압이 그와 같이 나타난다는 것을 의미하는 것이 아님을 명심해야 한다. 그리고 이와 같은 전류와 전압의 기준방향

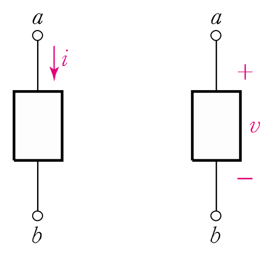


그림 1.6 전류, 전압의 기준방향의 표시

(reference direction)은 서로 관계없이 가정할 수 있다.

1.7 키르히호프의 법칙

모든 전기회로에서 성립되는 가장 기본적인 법칙은 실험적으로 밝혀진 두 가지 키르히호프의 법칙(Kirchhoff's law)이다.

키르히호프의 전류법칙(KCL)

도선의 임의의 접합점(2개 또는 그 이상의 소자가 연결되는 점)에 유입되는 전류의 대수적 합은 각 순간에서 0이다.

$$\sum_k i_k = 0 \tag{1.13}$$

이 법칙을 적용함에 있어서 접합점으로 유입되는 전류와 유출되는 전류는 부호를 달리하여 생각해야 한다. 가령 그림 1.7에서 접합점 O로 유입되는 전류를 +로 잡으면

$$i_1 - i_2 - i_3 + i_4 - i_5 = 0$$

이 성립된다. 반면 유출되는 전류를 +로 잡으면 이 식의 부호를 전부 바꾼 것이 된다. 또 윗식을

$$i_1 - i_4 = i_2 + i_3 - i_5$$

와 같이 고쳐 쓰면, 좌변은 유입되는 전류의 합, 우변은 유출되는 전류의 합이므로 KCL은 "임의의 접합점에 유입되는 전류의 총합은 항상 유출되는 전류의 총합과 같다."고 표현할 수도 있다.

주의해야 할 것은 KCL이 어느 순간에서도 각 접합점에서 성립한다는 것이다.

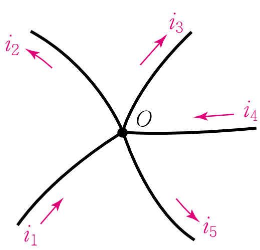


그림 1.7 키르히호프의 전류법칙($i_1 - i_2 - i_3 + i_4 - i_5 = 0$)

예제 1.2

그림 1.8에서 5개의 도선이 한 접합점을 이루고 있다. 어떤 순간에 그 중 4개의 도선에 각각 그림에 표시한 바와 같은 크기와 방향을 가지는 전류가 흘렀다고 했을 때 제 5의 도선에 흐르는 전류의 크기와 방향을 결정하라.

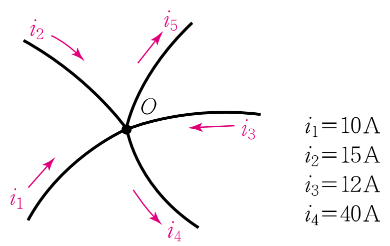


그림 1.8 예제 1.2의 그림

풀 이

제 5의 도선에 흐르는 전류 i_5의 방향을 그림과 같이 가정하고, 접합점에 KCL을 적용한다. 접합점에 유입하는 전류를 i 의 양의 방향으로 취하면

$$i_1 + i_2 + i_3 - i_4 - i_5 = 0$$

또는 $10 + 15 + 12 - 40 - i_5 = 0$

$$\therefore\ i_5 = -3\,\text{A}$$

$-$부호는 제 5의 도선을 흐르는 이 순간의 실제의 전류가 처음에 가정했던 방향과 반대방향, 즉 접합점을 향하여 흐름을 의미한다.

키르히호프의 전압법칙(KVL)

임의의 폐회로(closed path)에 따라 한 방향으로 일주하면서 취한 전압상승의 대수적 합은 각 순서에서 0이다.

$$\sum_k v_k = 0 \tag{1.14}$$

이 법칙을 적용함에 있어서 일주하는 방향으로의 전압상승은 $+$로 하고, 그 방향으로의 전압강하는 $-$로 해야 한다. 일주하는 방향은 시계방향이나 반시계방향이라도 좋다. 가령 그림 1.9에서 시계방향으로 일주하면서 KVL을 적용하면

$$-v_1 + v_2 + v_3 - v_4 = 0$$

이 성립한다. 이 식의 좌변은 반시계방향으로의 전압강하의 대수적 합이므로

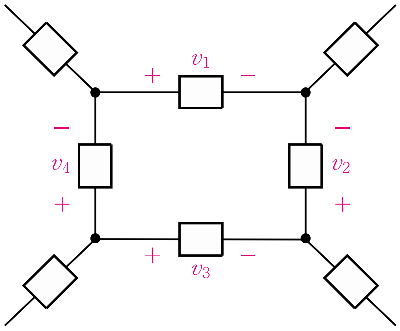


그림 1.9 **키르히호프의 전압법칙**$(-v_1+v_2+v_3-v_4=0)$

KVL은 또 다음과 같이 표현할 수 있다. "임의의 폐회로에 따라 한 방향으로 일주하면서 취한 전압강하의 대수적 합은 각 순간에 있어서 0이다." 또 윗식을 바꾸어

$$v_2+v_3=v_1+v_4$$

와 같이 쓰면 좌변은 시계방향으로의 전압상승, 우변은 시계방향으로의 전압강하를 나타내므로 KVL은 다음과 같이 표현할 수도 있다. "임의의 폐회로에 따라 일주하면서 취한 전압상승의 합은 전압강하의 합과 같다."

주의할 것은 KVL이 어떤 순간에서도 각 폐회로에 대하여 성립한다는 것이다.

예제 1.3

그림 1.10에서 R 양단의 전압 V_R의 크기와 극성을 결정하라.

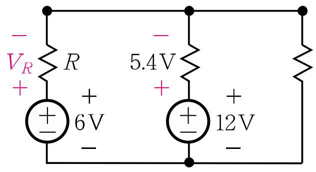


그림 1.10 **예제 1.3의 회로**

풀 이

V_R의 극성을 그림과 같이 가정하고 좌측의 폐회로에 따라 시계방향으로 일주하면서 KVL을 적용하면

$$6-V_R+5.4-12=0 \quad \therefore V_R=-0.6\,\text{V}$$

−부호는 실제의 R 양단 전압의 극성이 처음에 가정하였던 것과 반대임을 의미한다.

1.8 저항 및 옴의 법칙

잘 알려진 바와 같이 도선 양단에 인가된 전압을 변화시키면서 흐르는 전류를 측정하여 보면 그림 1.11과 같은 직선적 관계가 성립함을 알 수 있다. 따라서

$$v = Ri \quad \text{V} \tag{1.15}$$

라고 표시할 수 있다. 여기서 R은 직선의 기울기로 **저항**이라 하며, 전기적인 특성이 주로 저항인 실물을 **저항기**(resistor)라고 한다.

저항의 MKS 단위는 **옴**(ohm ; Ω)이다. 1옴은 저항기 양단의 전위차 1볼트에 의하여 흐르는 전류가 1암페어일 때의 저항이다. 식 (1.15)의 전압-전류 관계를 **옴의 법칙**(Ohm's law)이라고 한다. 이 식을 바꾸어 쓰면

$$i = \frac{1}{R}v = Gv \quad \text{A} \tag{1.16}$$

여기서 $G = 1/R$을 **컨덕턴스**(conductance)라고 하며, 그 단위는 **지멘스**(siemens ; S)*이다.

도체는 모두 다소의 저항을 가지고 있으며 이를 통하여 전류가 흐를 때 열이 발생된다는 것을 실험적으로 알 수 있다. 즉, 저항에서는 전기적 에너지의 소비가 있으므로 전류의 방향으로 전압강하가 일어난다. 따라서 전류의 방향과 전압의 극성을 그림 1.12와 같이 택했을 때, 즉 전류 i의 방향으로의 전압강하를 v라 하였을 때에 한하여 옴의 법칙은 식 (1.15)와 같이 표시되며, 만일 그 어느 한쪽을 반대방향으로 택했다면 $v = -Ri$와 같이 표시해야 한다. 양쪽이 다 반대이면 그대로이다.

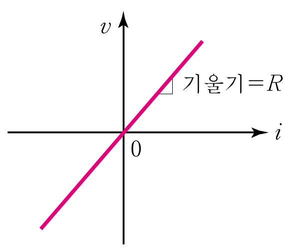


그림 1.11 저항에서의 전압-전류 관계

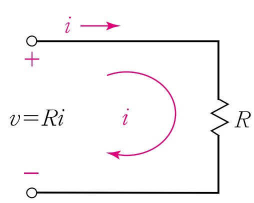


그림 1.12 전기저항에서의 옴의 법칙

* 과거에는 **모**(mho ; ℧)를 써왔지만 최근에는 siemens(S)를 쓰고 있다.

예제 1.4

그림 1.13과 같은 직류회로에서 전류 i의 방향을 그림에 표시한 대로 가정하고, 반시계방향으로 일주하면서 KVL을 세워서 i를 구하라. 또 두 저항의 단자전압 v_1, v_2의 극성을 그림과 같이 택했을 때의 v_1, v_2를 구하라.

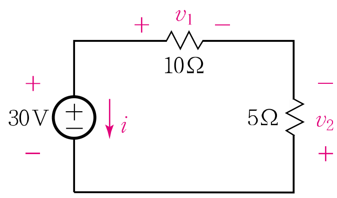


그림 1.13 예제 1.4의 회로

풀 이

반시계방향으로 일주하면서 전압상승의 합을 0이라 놓으면

$$-30-v_2+v_1=0$$

여기서 v_2는 i의 방향으로의 전압강하이므로 $v_2=5i$, 그러나 v_1은 i의 방향으로의 전압상승이므로 $v_1=-10i$이다. 이들을 윗식에 대입하면

$$-30-5i-10i=0 \qquad \therefore\ i=-2\,\mathrm{A}$$

따라서 실제의 전류는 처음에 가정했던 바와 반대방향으로 흐른다. 또 $v_1=-10i=-10(-2)=20\,\mathrm{V}$, $v_2=5i=5(-2)=-10\,\mathrm{V}$이다. 따라서 실제 전압의 극성은 $10\,\Omega$에서는 가정한 바와 같으나 $5\,\Omega$에서는 반대가 된다(이 문제에서 전류의 방향을 처음부터 시계방향으로 택했더라도 같은 결과가 얻어진다).

저항기에서의 전력과 에너지

저항기에서 전류의 방향으로의 전압강하를 v라 하면 옴의 법칙으로부터 $v=Ri$이므로 저항기에 공급되는 전력(=단위시간에 공급되는 에너지)은(그림 1.14)

$$p=vi=Ri^2 \quad \mathrm{W} \tag{1.17}$$

따라서 시간 t_1과 t_2 사이에 저항기에 공급된 총에너지를 구하려면 윗식을 적분하면 된다. 즉,

$$w_R = \int_{t_1}^{t_2} p\,dt = \int_{t_1}^{t_2} Ri^2\,dt \quad \mathrm{J} \tag{1.18}$$

전류의 음, 양에 관계없이 그 제곱은 양이므로 p와 w_R은 결코 음이 되지 않는다. 이것은 어떤 경우에도 전기적 에너지가 저항기로부터 외부회로에 나오는 일이 없음을 의미한다. 실제로 저항기에 공급된 전기적 에너지는 다른 에너지(열, 빛, 기계적 에너지 등)로 변환되어 버린다.

식 (1.17), (1.18)을 저항기 양단의 전압으로 표시하면

$$p = Ri^2 = \frac{v^2}{R} = Gv^2 \quad \mathrm{W} \tag{1.19}$$

$$w_R = \int_{t_1}^{t_2} Gv^2\,dt \quad \mathrm{J} \tag{1.20}$$

넓은 의미에서 전기적 에너지를 소비하는 장치는 모두 저항으로 대표할 수 있다. 예컨대 그림 1.4 (b)에서 B가 전기분해장치일 때 이것을 $R = \dfrac{2.5\,\mathrm{W}}{(0.5\,\mathrm{A})^2}$ $\left(\text{또는 } \dfrac{5\,\mathrm{V}}{0.5\,\mathrm{A}}\right) = 10\,\Omega$의 저항으로 대표할 수 있다.

[수치예] $20\,\Omega$의 니크롬선 양단에 $100\,\mathrm{V}$ 전압을 인가할 때 전력소비는 $100^2/20 = 500\,\mathrm{W}$이고, 1분간에 소비되는 에너지(발생되는 열, 빛 등의 에너지)는 $500 \times 60 = 3 \times 10^4\,\mathrm{J}$이다.

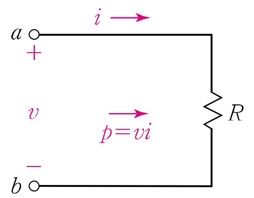


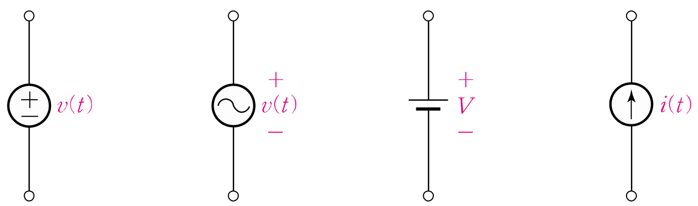
그림 1.14 저항기에서의 v, i, p의 기준방향

1.9 전 원

저항은 전기적 에너지를 소비하지만 전기적 에너지를 발생시키는 장치를 **전원**(electric source)이라고 한다. 축전지, 발전기, 태양전지, 발진기 등은 그 예이다. 한편 전원에 연결되는 장치를 **부하**(load)라고 한다. 여기서 두 가지 이상적 전원을 생각한다.

이상적 전압원(ideal voltage source)

이를 흐르는 전류 여하에 불구하고, 즉 부하 여하에 불구하고 단자전압의 시간적 변화가 주어진 시간함수 $v(t)$와 같은 전원을 이상적 전압원이라 한다. 이상적 전압원의 일반적 기호는 그림 1.15 (a)와 같다. 특히 발생되는 전압이 사인파(교류전압; AC)인 경우에는 그림 (b), 불변전압(직류전압; DC)인 경우에는 그림 (c)와 같이 한다. +, −는 전원압의 극성을 나타내는 것이다.



(a) 일반적 전압원 (b) AC 전압원 (c) DC 전압원 (d) 일반적 전류원

그림 1.15 이상적 자원에 대한 기호

이상적 전류원(ideal current source)

그 양단에 걸리는 전압 여하에 불구하고, 즉 부하 여하에 불구하고 출력전류의 시간적 변화가 주어진 시간함수 $i(t)$와 같은 전원을 이상적 전류원이라 한다. 이상적 전류원의 일반적 기호는 그림 1.15 (d)와 같다. 여기서 화살표는 전원전류의 양의 방향을 나타낸다.

회로도에는 반드시 전원의 극성을 표시해야 한다.

이상적 전원을 16.1절에서 배울 종속전원과 대비하여 **독립전원**(independent source)이라 부를 때가 있다. 그러나 앞으로 명백할 때에는 단순히 전압원, 전류원이라고 호칭할 것이다.

그림 1.16에는 전원에서 발생되는 대표적인 전압, 전류의 파형을 그렸다.

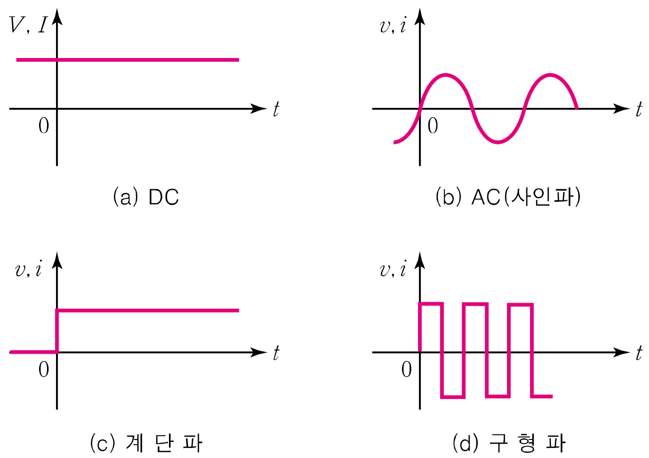


그림 1.16 대표적인 전원파형

전원에서의 전력

다음에 이상적 전압원과 이상적 전류원에서의 전력과 에너지를 고찰하자. 그림 1.17 (a)에 표시한 바와 같이 전압원에서 전압상승 v의 방향으로 흐르는 전류를 i라 하면 전원이 외부회로에 공급하는 전력은 $p = vi$가 된다. v, i는 실제로 양이 될 수도 있고 음이 될 수도 있으므로 실제의 전력은 어느쪽 방향으로도 흐를 수 있고 에너지도 마찬가지이다. 이 사실은 전류원에서도 성립된다[그림 (b)]. 예컨대 배터리를 충전할 때에는 충전기로부터 배터리의 +단자에서 전류를 유입시키므로 그림 (a)에서 $p = v(-i) < 0$, 즉 배터리에 외부에서 전력이 공급된다. 요컨대 회로의 한 부분(특수한 경우 전원)에서 전압상승의 방향으로 전류가 흐를 때에는 그 부분에서 전력이 발생되어 여타 부분에 공급되고, 반대로 전압강하의 방향으로 전류가 흐를 때에는 그 부분(특수한 경우 전원)에서 전력이 소비(흡수)된다.

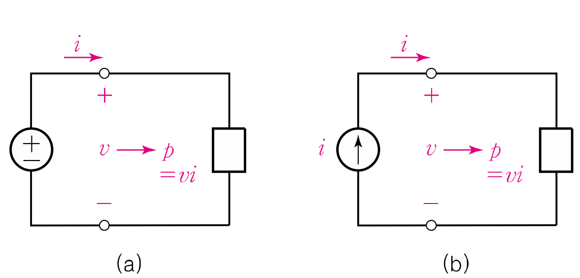


그림 1.17 전원이 공급하는 전력

예제 1.5

그림 1.18 (a)의 회로에서 각 부품이 공급 또는 흡수하는 전력을 구하라.

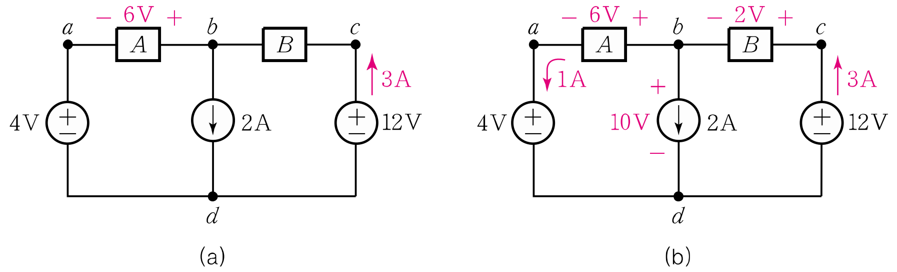


그림 1.18 예제 1.5의 회로

풀 이

KVL에 의하여 $v_{bd} = 4\,\mathrm{V} + 6\,\mathrm{V} = 10\,\mathrm{V}$, $v_{cb} = 12\,\mathrm{V} - v_{bd} = 2\,\mathrm{V}$

KCL에 의하여 $i_{ba} = i_{ad} = 3\,\mathrm{A} - 2\,\mathrm{A} = 1\,\mathrm{A}$

그러므로 회로의 전류, 전압 분포는 그림 (b)와 같다. 이것으로부터 12V 전원에서는 전압상승의 방향으로 3A의 전류가 흐르므로 $12\,\mathrm{V} \times 3\,\mathrm{A} = 36\,\mathrm{W}$의 전력공급(발생)이 있지만 기타의 모든 부품에서는 전압강하의 방향으로 전류가 흐르므로 전력의 흡수(소비)가 있다. 즉, 4V 전원에서는 $4\,\mathrm{V} \times 1\,\mathrm{A} = 4\,\mathrm{W}$, 2A 전원에서는 $16\,\mathrm{V} \times 2\,\mathrm{A} = 20\,\mathrm{W}$, A에서는 $6\,\mathrm{V} \times 1\,\mathrm{A} = 6\,\mathrm{W}$, B에서는 $2\,\mathrm{V} \times 3\,\mathrm{A} = 6\,\mathrm{W}$의 전력 흡수가 있다(체크 : $36\,\mathrm{W} = 4\,\mathrm{W} + 20\,\mathrm{W} + 6\,\mathrm{W} + 6\,\mathrm{W}$).

실제적 전원의 등가회로

지금 어떤 실제적 직류전원(전지 등)의 전기적 특성을 알기 위하여 그 양 단자에 가변저항 R_L을 연결하고[그림 1.19 (a)], R_L을 큰 값에서 작은 값으로 변화시키면서 전원의 양 단자에 나타나는 전압 v와 단자를 흐르는 전류 i를 측정하여 그림 (b)와 같은 그래프가 얻어졌다고 하자. 여기서 V_0는 $R_L = \infty$, 즉 전원단자를 개방했을 때의 단자전압으로, 이 그래프상에서의 직선부분에 대한 $v-i$ 관계는 다음과 같다.

$$v = V_0 - R_0 i \quad (y = b + mx \text{ 의 형식}) \tag{1.21}$$

여기서 R_0는 직선부분의 기울기의 절대치이며, 이것을 보통 전원의 **내부저항**이라 한다.

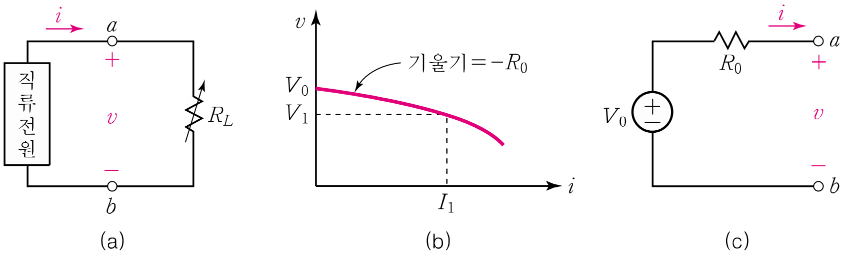


그림 1.19 실제적 전원의 등가회로

식 (1.21)은 그림 (c)의 회로에서의 $v-i$ 관계와 같으므로 그림 (a)의 실제적 전원을 그림 (c)와 같이 일정전압 V_0(이것은 단자의 개방전압이다)를 발생시키는 이상적 전압원과 내부저항 R_0의 직렬로 대표할 수 있다(단, $i \leq I_1$, $v \leq V_1$의 범위에서). 이와 같이 실물의 전기적 특성을 전기회로로 표현한 것을 **등가회로**(equivalent circuit) 또는 **회로모델**이라 한다.

예제 1.6

그림 1.19 (a)의 실험에서 R_L을 달지 않았을 때의 단자전압이 10V, 가변저항 R_L을 달고 단자전류 i와 단자전압 v을 측정하여 그림 (b)와 같은 곡선을 얻었다. 여기서 $I_1 = 0.2\,\mathrm{A}$, $V_1 = 9.5\,\mathrm{V}$, $V_0 = 10\,\mathrm{V}$이다. $0 \leq i \leq 0.2\,\mathrm{A}$, $9.5\,\mathrm{V} \leq v \leq 10\,\mathrm{V}$에서의 전원의 등가회로를 구하라.

풀 이

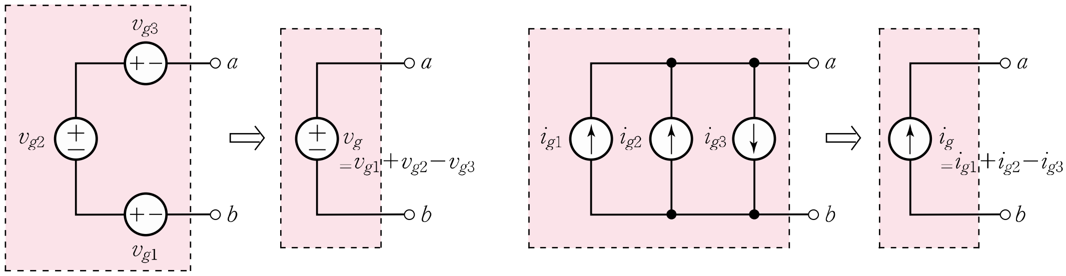
측정곡선의 기울기 $= \dfrac{\Delta v}{\Delta i} = \dfrac{9.5\mathrm{V} - 10\mathrm{V}}{0.2\,\mathrm{A} - 0} = -2.5\,\Omega$

따라서 등가회로는 그림 (c)에서

$$V_0 = 10\,\mathrm{V}, \qquad R_0 = 2.5\,\Omega$$

전원의 직렬 및 병렬

그림 1.20 (a)와 같이 여러 개의 전압원이 직렬로 연결된 경우 KVL에 의하여 이것을 하나의 등가전압원으로 대치할 수 있다. 또 그림 (b)와 같이 여러 개의 전류전원이 병렬로 연결된 경우 KCL에 의하여 이것은 하나의 등가전류원으로 대치할 수 있다.



(a) 전압원의 직렬 (b) 전류원의 병렬

그림 1.20

연/습/문/제

1.1 그림 p 1.1의 회로에서 시계방향으로 일주하면서 KVL 식을 써라.

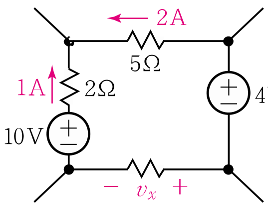


그림 p 1.1

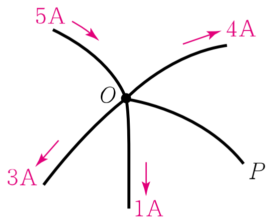


그림 p 1.2

1.2 그림 p 1.2에서 지로 OP에는 실제로 어떤 방향의 전류가 몇 A 흐르는가?

1.3 그림 p 1.3의 회로에서 다음을 구하라(힌트 : 전류의 방향을 임의로 가정하고 KVL을 써라).

(a) 전류의 크기와 방향 (b) V_{ba} 및 V_{ca}

(c) 2 Ω에서 소비되는 전력

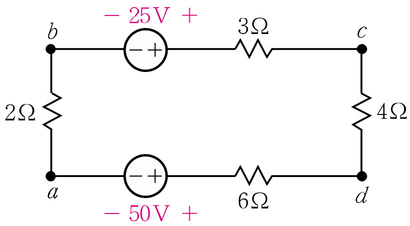


그림 p 1.3

1.4 다수의 크리스마스 트리의 전등을 연결하는 데 그림 p 1.4의 (a), (b) 중 어느 쪽을 택할 것인가? 그 이유를 설명하라.

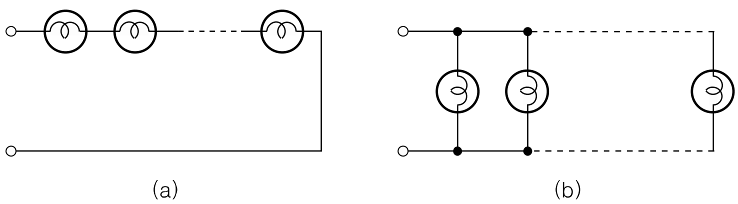


그림 p 1.4

1.5 그림 p 1.5와 같이 12 V 배터리에 2개의 헤드라이트가 연결되어 있다. 각 헤드라이트에 3 A의 전류가 흐를 때 배터리가 공급하는 전력을 구하라.

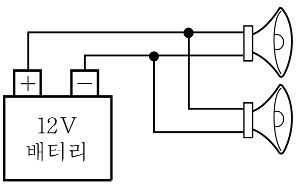


그림 p 1.5

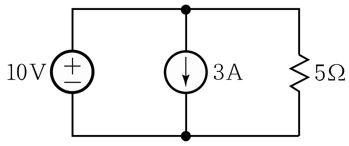
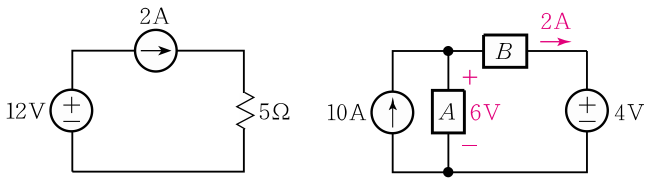


그림 p 1.6

1.6 그림 p 1.6의 회로에서 각 부품이 공급 또는 흡수하는 전력을 구별하여 구하라.

1.7 그림 p 1.7의 두 회로에서 각 부품이 공급 또는 흡수하는 전력을 구별하여 구하라.



(a) (b)

그림 p 1.7

1.8 그림 p 1.8의 회로에서 $t=0$에서 스위치가 닫힌 후 $v(t)=t$ V, $i(t)=5\dfrac{dv}{dt}$ A와 같이 변할 때 $t=0$에서 $t=2$ s 동안에 부하에 공급된 에너지를 구하라.

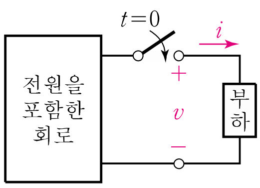


그림 p 1.8

1.9 그림 1.4 (a)에서 B와 D에서는 각각 450 W, 50 W의 전력이 발생되고 A, C에서는 각각 200 W, 300 W의 전력소비가 있다고 한다. 또 시계방향으로 2 A의 전류가 흐르고 있다고 한다. 다음을 구하라.

(a) 각 부분의 전압과 극성

(b) 점 d를 기준으로 할 때의 점 b 및 점 c의 전위, 즉 b에서 d로의 전압강

하 및 c에서 d로의 전압강하

(c) C에서의 등가저항

(d) 1분간에 A에서 소비되는 전기적 에너지

1.10 120 V, 40 W의 형광등 5개와 120 V, 100 W의 백열전등 10개를 매일 5시간씩 30일간 사용할 때의 전기요금을 계산하라. 단, 1 kW·h의 요금은 200원이다.

1.11 전압 120 V, 1 kW의 전열기로 1 l의 물의 온도를 50℃ 올리는 데 필요한 시간을 계산하라. 단, 소비된 전력의 70%만이 물을 끓이는 데 이용된다고 한다(힌트 : 1 g의 물을 1℃ 올리는 데 1 cal가 필요하다).

1.12 어떤 직류전원에 10 Ω의 저항을 연결하였더니 2 A의 전류가 흘렀다. 다음에 50 Ω의 저항을 연결하였더니 0.41 A가 흘렀다면, 이 전원의 내부저항이 일정하다고 가정하고 이 전원에 대한 등가회로를 그려라.

1.13 전기장판이 너무 뜨겁다. 니크롬선을 재설계해야 하겠는데 어떻게 할 것인가? 이유도 함께 설명하라.

(a) 선을 짧게 한다. (b) 선을 길게 한다.

(c) 가는 선을 쓴다. (d) 굵은 선을 쓴다.

(e) 경제적으로는 어느 것을 선택할 것인가?

(힌트 : $P = V^2/R$, $R \propto$ 길이/단면적)

1.14 120 V, 1 kW의 전열기를 240 V에 사용하면 어떻게 될 것인가? 이유를 설명하라. 단, 니크롬선의 저항은 온도에 따라 증가하지만, 여기서는 간단을 위해서 불변이라고 가정한다.

1.15 응용회로에서 저항을 선택할 때에는 저항치뿐만 아니라 최대허용전력(**정격전력**이라고 한다), 허용오차, 온도특성 등을 고려해야 한다. 정격전력이 높은 것은 덩치가 크고 값이 비싸다. 실험실에서 흔히 쓰이는 탄소저항의 정격전력은 1/8, 1/4, 1/2, 1 W 등이다. 그림 p 1.15의 회로의 경우 R_1, R_2는 어떤 정격전력의 것을 사용해야 하는가?

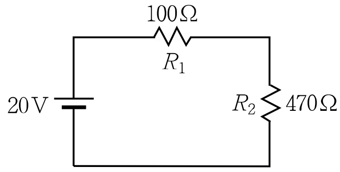


그림 p 1.15

1.16 어떤 전원의 단자전압과 단자전류의 관계가 그림 p 1.16과 같을 때 이 전원에 대한 회로모델을 그려라.

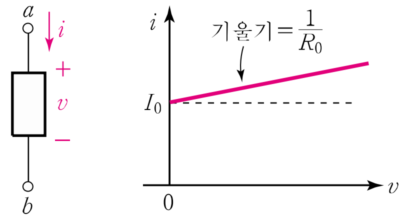


그림 p 1.16