

전기 기본이론

(Basic Theories of Electrical Engineering) -VI

6. 변압기

연재목록

1. 전류
2. 전기와 자기
3. 임피던스
4. 발전기
5. 전동기
6. 변압기
7. 전력
8. 접지
9. 전기안전
10. 노이즈
11. 무정전 전원설비

전력계통에서 변압기는 교류전압을 승압하거나 강압하기 위해서 사용된다. 교류전압을 승압하거나 강압하는 이유는 한마디로 전력계통에서의 전력손실을 감소시키기 위한 것이다. 교류는 전압/전류의 순시치가时时각각 변화하기 때문에, 즉, 전압/전류의 시간에 대한 변화율이 0이 아니기 때문에 변압기를 사용할 수 있지만, 직류에서는 전압/전류의 시간에 대한 변화율이 0이기 때문에 변압기를 사용할 수 없다.

전압을 높이는 이유

우리나라의 송전전압으로는 765[kV], 345[kV]가 사용된다. 실제로 전기를 받아 쓰는 수용가에서는 이렇게 높은 전압이 필요하지 않은데, 왜 이렇게 높은 전압으로 승압해서 송전하는 것인가?

전력은 발전소에서 생산되어 송전선로, 배전선로를 거쳐 수용가에 공급된다. 발전소에서 수용가까지의 거리는 수백[km]이 되는 것이 보통이다. 이렇게 먼 거리를 거쳐 전력을 공급하다 보면 송전선로와 배전선로의 전선에도 저항이 있기 때문에 이 저항에서 손실되는 전력이 생기게 된다. 발전소에서 비싼 돈 들여서 생산한 전력이 송배전선로에서 소비되어 버리도록 내버려 둘 수는 없는 일이다.

3상 전력은 $P = \sqrt{3}VI \cos\theta [W]$

전류는 $I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos\theta} [A]$

가 되고, 전력손실은 $P = I^2 R [W]$

로 계산된다. 즉 손실전력은 전류의 제곱에 비례하니까, 손실전력을 감소시키기 위해서는 전류를 감소시켜야 하는데, 앞의 전류식에서 분모에 있는 전압을 높일수록 같은 전력에 대해서 전류가 감소하므로 전압을 높이는 것이다. 결국, 송전전압을 765[kV], 345[kV] 등과 같이 초고압으로 올리는 것은 송배전 선로에서의 전력손실을 감소시키기 위한 것이다.

변압기가 필요한 이유

발전공사의 발전기에서 발전되는 전압은 보통 22[kV]이다. 22[kV]를 345[kV]나 765[kV]로 승압하기(전압을 높이기) 위해서는 변압기가 필요하다. 변전소에서는 송전선로를 통해서 받은 전력을 보통 154[kV]나 22.9[kV]로 강압하기(전압을 낮추기)위해서도 변압기가 필요하다.

380[V]나 220[V]로 수전하는 저압 수용가에는 또다시 변압기를 써서 22.9[kV]를 380[V]나 220[V]로 낮추어 주기 위해서도 변압기가 필요하고, 154[kV]나 22.9[kV]로 수전하는 특고압 수용가에서는 한전으로부터 수전한 154[kV]나 22.9[kV] 특고압 전압을 6.6[kV] 고압이나 380[V], 220[V] 저압으로 강압하기 위해서 자체의 수전설비에 변압기를 설치해야 한다.

변압기 이론

그림과 같은 리액터에 교번 전압 $v_1 = V_{1m} \sin \omega t$ 를 인가하면 코일에는

$$i_0 = \frac{\sqrt{2}V_1}{\omega L_1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) A$$

의 여자전류 i_0 가 흐르고, 이 여자전류에 의해서 철심 중에는 자속 ϕ 가 생기게 되고,

이 자속과 코일이 쇠교하여 역기전력

$$E_1 = -V_{1m} \sin \omega t$$

가 유기된다. 그런데 유도 기전력 E_1 은

$$E_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -V_{1m} \sin \omega t$$

이므로 자속 ϕ 는

$$d\phi = \frac{V_{1m}}{N_1} \sin \omega t dt$$

$$\phi = \frac{V_{1m}}{N_1} \int \sin \omega t dt = -\frac{V_{1m}}{\omega N_1} \cos \omega t = \frac{V_{1m}}{\omega N_1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ wb}$$

여기서 N_1 은 코일의 권회수이고 ϕ_m 은 최대 자속이다. 이 식으로부터

$$V_{1m} = \omega N_1 \phi_m = 2\pi f N_1 \phi_m$$

이를 전압의 실효값으로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_m = 4.44 f N_1 \phi_m [V]$$

그런데 이 리액터에 권회수 N_2 인 2차 코일이 그림과 같이 감겨 있다면 이는 2권선 변압기가 되는데 이 변압기를 이상변압기라고 가정하면, 2차 코일도 같은 자속 ϕ 와 쇠교하므로

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_2 \phi_m = 4.44 f N_2 \phi_m [V]$$

의 기전력이 유기된다. 따라서

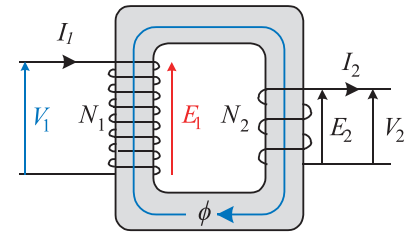
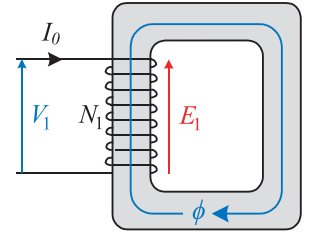
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

여기서 a 를 **변압비** 또는 **권수비**라 한다. 변압기의 입력과 출력은 같아야 하므로

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \rightarrow N_1 I_1 = N_2 I_2$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{a}$$

으로 표시되는 $1/a$ 를 **변류비**라고 한다. 변압기 이론은 이상변압기를 가정하고 전개하는데 **이상변압기**란 변압기 손실이 0[W]이고, 여자전류도 0[A] 라고 가정한 이상적인 변압기를 말한다.



변압기와 톱니바퀴 비교

다음 그림에서 변압기 1, 2차 권회수가 각각 1000턴, 100턴일 때 1차에 10[A]의 전류가 흐르면 2차에 흐르는 전류는

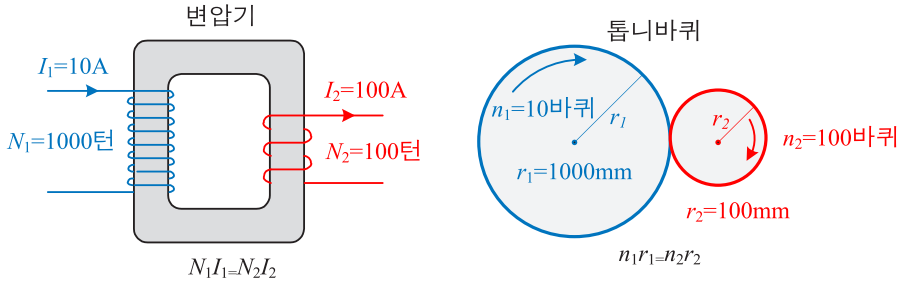
$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \rightarrow N_1 I_1 = N_2 I_2 \rightarrow I_2 = I_1 \times N_1 / N_2 \text{ 에서 권수비에 반비례하니까 } 10 \times 1000 / 100 = 100 \text{ [A]의 전류가 흐른다.}$$

두개의 톱니바퀴가 그림과 같이 맞물려 있는 경우 큰 톱니바퀴와 작은 톱니바퀴의 직경을 각각 1000[mm], 100[mm]라고 하면,

톱니바퀴는 맞물려 돌아가는 원동레의 길이가 같아야 하니까

$$2\pi r_1 n_1 = 2\pi r_2 n_2 \rightarrow r_1 n_1 = r_2 n_2$$

가 되어야 한다. 즉 큰 톱니바퀴가 10바퀴 돌면 작은 톱니바퀴는 100바퀴를 돌아야 한다.



즉, 변압기에서 $N_1 I_1 = N_2 I_2$ 라는 식이나, 톱니바퀴에서 $r_1 n_1 = r_2 n_2$ 라는 식은 동일한 물리적인 현상을 표현하는 것이다.

톱니바퀴는 어느 한쪽이 회전하면 다른 쪽도 회전해야 하고, 한쪽이 정지해 있으면 다른 쪽도 정지해 있어야 한다. 이와 마찬가지로 변압기도 이상 변압기의 경우에는 1차에 전류가 흐르면 2차에도 전류가 흘러야 하고, 2차에 전류가 흐르지 않으면 1차에도 전류가 흐를 수 없다.

변압기의 작동원리

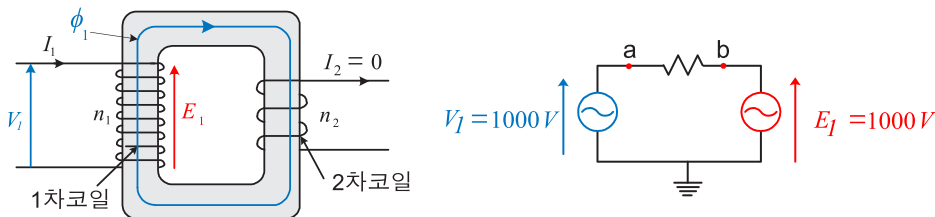
예를 들어 1차 코일의 저항이 2Ω인 변압기에 1000V의 전압을 가하면 옴의 법칙에 의해

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{1000}{2} = 500A$$

의 전류가 흘러야 할 것이다. 그러나 2차가 개방된 무부하 상태의 이상 변압기(Ideal Transformer)에서 $I_1=0$ 이다. 이상 변압기(Ideal Transformer)에서 무부하시 1차 전류 $I_1=0$ 가 되는 이유는 다음 그림에서 1차에 여자전류가 흐르면, 이 전류가 철심 내에 자속 ϕ_1 을 만들고, 이 자속이 1차 코일과 쇄교하여,

$E_1 = -L \frac{di}{dt} = -n \frac{d\phi}{dt}$ 에 의해서 역기전력 E_1 을 발생시키는데, 이때 가해진 전압 $V_1 =$ 역기전력 E_1 이 되지만, 방향이 반대라 되어 즉 $V_1 = -E_1$ 이 되어, 서로 상쇄되어 0이 되므로 전류가 흐르지 않는 것이다.

이 상태를 1차 코일부분만 등가회로를 그리면 오른쪽 그림과 같다.

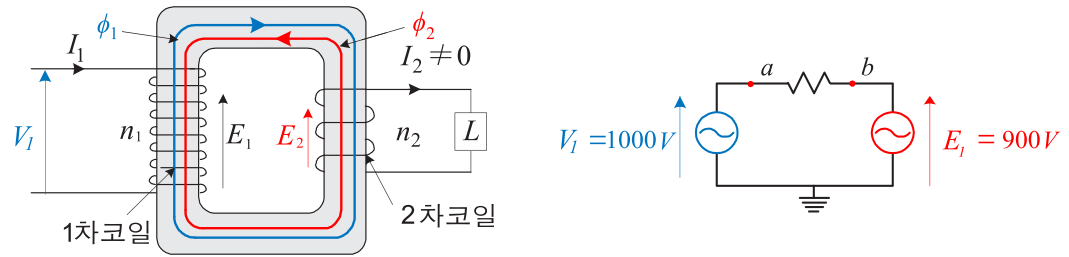


앞의 그림에서 R 양단의 전위가 1000V로 같으므로 저항에 걸리는 전위차가 없어서 코일에는 전류가 흐르지 않는다. 즉 다음과 같이 계산된다.

$$I = \frac{E}{R} = \frac{1000 - 1000}{2} = 0 [A]$$

이때 이상변압기에서는 $I = 0$ 이 되겠으나 실제로는 일정한 크기의 여자전류와 철손전류가 흐른다.

그렇다면 2차에 부하가 걸려 전류가 흐르면 왜 1차에도 전류가 흐르는가?



그림에서 2차에 전류가 흐르면, 2차 코일에 흐르는 전류도 철심 내에 자속을 만드는데

2차 코일이 만드는 자속 ϕ_2 는 ϕ_1 과 방향이 반대가 되어, ϕ_2 가 ϕ_1 을 상쇄시키므로 철심 내에 흐르는 자속은 $\phi = \phi_1 - \phi_2$ 가 되어, 철심 내에 흐르는 자속이 감소하므로 역기전력 E_1 이 감소한다

이때 예를 들어 역기전력이 900V로 감소했다면 이 경우에 등가회로는 그림과 같이 되어 R 양단에는 $1000 - 900 = 100[V]$ 의 전위차가 걸리게 된다. 그리고 이때 흐르는 전류는 다음과 같이 계산된다

$$I = \frac{E}{R} = \frac{1000 - 900}{2} = 50A$$

따라서 2차에 흐르는 전류가 커질수록 철심 내의 자속은 작아지고, 이에 따라 1차 코일에 유기되는 역기전력이 작아져서, 1차 코일에 흐르는 전류는 커지게 된다. 1차 코일에 흐르는 전류가 커지면 1차 코일이 만드는 자속도 커진다. 이상 변압기에서 1차 코일이 만드는 기자력 $n_1 I_1$ [AT]과 2차 코일의 기자력 $n_2 I_2$ [AT]는 항상 평형을 이룬다. 즉

$$n_1 I_1 = n_2 I_2 \rightarrow I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2$$

예를 들어 권수비가 10:1 이라 하고, 1차에 1000[V]의 전압이 인가 되었다면, 2차가 개방되어 $I_2=0$ [A]일 때는 $I_1=I_0$ [A], 즉 여자전류만 흐르다가, 2차에 부하가 걸려 100[A]의 전류가 흐르면 1차에는 10[A]의 전류가 흐를 것이다. 이때 1차 권회수가 1000 Turn, 2차 권회수가 100 Turn 이라면 2차가 만드는 기자력 $100 \times 100=10,000[AT]$, 1차가 만드는 기자력도 $1000 \times 10=10,000[AT]$ 가 되어 이들이 만드는 자속 ϕ_1 , ϕ_2 는 서로 상쇄되어 없어지므로 철심에 남는 자속은 여자전류 중에서 자화전류 I_ϕ 에 의해서 만들어지는 자속뿐이다.

실제 변압기에서는 I_1 에 여자전류 I_0 가 포함되므로 위식에 I_0 를 포함시키면

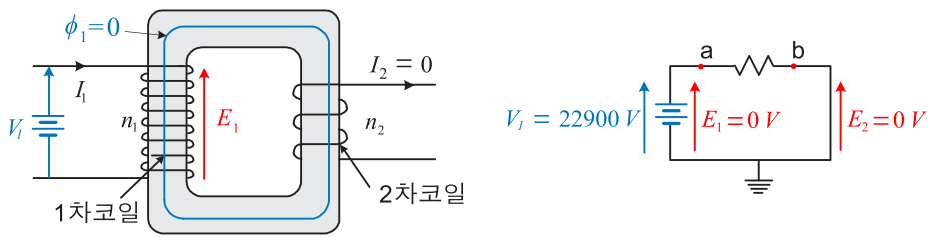
$$I_1 = I_0 + \frac{n_2}{n_1} I_2$$

예를 들어 1차 권회수가 1000 Turn, 2차 권회수가 100 Turn인 변압기의 여자전류가 2[A]이고 2차에 1000[A]의 전류가 흐른다면 1차에 흐르는 전류는 다음과 같이 계산된다.

$$I_1 = I_0 + \frac{n_2}{n_1} I_2 = 2 + \frac{100}{1000} \times 1000 = 102 [A]$$

직류에는 변압기를 사용할 수 없는 이유

1차 코일의 저항이 예를 들어 2[Ω]인 변압기 1차에 다음 그림과 같이 22.9[kV]의 직류전압을 인가했다면, 직류 전압은 시간에 대한 변화율이 0이니까, 즉 $dv/dt = 0$ 이니까 이 전압에 의해 흐르는 전류의 시간에 대한 변화율도 $di/dt = 0$ 가 된다.



$di/dt = 0$ 이면 다음 식에서 변압기 1, 2차 코일에 패러데이의 전자기유도법칙에 의해 유기되는 역기전력도 0[V]가 된다.

$$E = -L \frac{di}{dt} = L \times 0 = 0[V]$$

따라서 이때 2차에 흐르는 전류는 0[A]이고, 1차에 흐르는 전류는

$$I = \frac{22900}{2} = 11,450[A]$$

의 대전류가 흘러서 변압기가 타버리게 된다.

3상 변압기의 결선방법

3상 변압기 결선방법에는 Y-Y결선, Δ-Δ결선, Δ-Y결선, Y-Δ결선, V결선, 역V결선 등이 있는데, 주로 많이 사용되는 결선방식은 다음의 4가지 이다. 그림에서 각상을 대문자로 표시한 것은 변압기 1차측을 의미하고, 소문자로 쓴 것은 변압기 2차측을 의미한다. 📺

