

전기 기본이론

(Basic Theories of Electrical Engineering) -VI

7. 전력

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

전력은 직류전력과 교류전력으로 나누어 생각할 수 있고, 교류전력은 다시 단상 교류전력과 3상 교류전력으로 나눌 수 있다. 교류전력은 또한 유효전력 [kW]와 무효전력 [kVar] 및 이 둘을 합한 피상전력 [kVA]로 나누어 생각할 수도 있다.

직류전력

직류전력은 교류전력에 비해 매우 간단하다. **직류전력**은 단순히 전압 $E[V]$ 과 전류 $I[A]$ 의 곱이다. 즉

$$P_{DC} = EI[W]$$

[W]라는 단위는 1초 동안에 1 [J]의 에너지가 발전되거나 소비되는 것을 의미한다. 따라서 [W]의 공학적인 단위는 [J/sec]가 된다.

예를들어 20[Ω]의 저항에 200[V]의 직류전압을 인가하면 회로에 흐르는 전류는 옴의 법칙에 의해서

$$I = \frac{E}{R} = \frac{200}{20} = 10 [A]$$

의 전류가 흐르고 이때 저항에서 소비되는 전력은

$$P = EI = 200 \times 10 = 2000 [W] = 2 [kW]$$

가 된다. 그런데 옴의 법칙에서 $E = IR$ 로 쓸 수 있으므로 소비전력은 다음과 같이 계산할 수도 있다.

$$P = EI = IR \cdot I = I^2 R [W] = 10^2 \times 20 = 2000 [W]$$

또는 전력식에서 I 대신에 E/R 를 대입해서 다음과 같이 계산해도 된다.

$$P = EI = E \cdot \frac{E}{R} = \frac{E^2}{R} = \frac{200^2}{20} = 2000 [W]$$

[W]는 [J/s]로 **전력이 소비되는 속도**를 말한다. 위의 조건에서 저항에서 2[kW]의 전력을 1시간 동안 소비했다면 소비된 총 에너지량(열량)은 다음과 같이 계산된다.

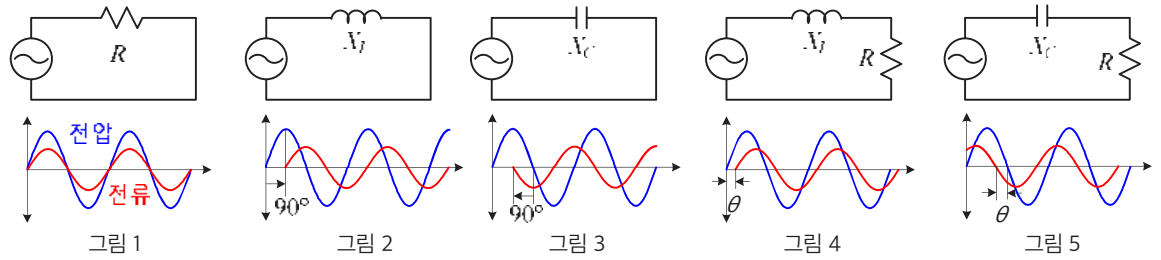
$$2[kW] \times 1[hour] = 2[kJ/s] \times 1[hour] = 2[kJ/s] \times 3600[s] = 7200[kJ] = 7200 \times 0.24[kcal] = 1,728[kcal]$$

교류전압이 인가될 때 흐르는 전류의 위상

교류전압이 회로에 인가될 때 흐르는 전류는 회로의 임피던스에 따라서 위상이 변화한다.

[그림 1]과 같이 회로에 저항만 있는 경우에는 전압과 전류는 위상차가 없어서 동상이 된다.

[그림 2]와 같이 회로에 유도성 리액턴스만 있는 경우에 전류는 전압보다 90° 위상이 늦어진다.



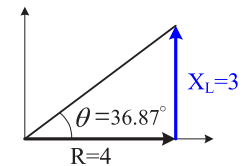
[그림 3]과 같이 회로에 용량성 리액턴스만 있는 경우에 전류는 전압보다 90° 위상이 앞선다

[그림 4]와 같이 회로에 저항과 유도성 리액턴스가 직렬로 있는 경우에 전류는 전압보다 위상이 $\angle \theta$ 만큼 뒤진다. 이 경우 예를 들어 인가된 전압이 100[V]이고 저항이 4[Ω], 유도성 리액턴스가 3[Ω]이면 임피던스는

$$Z = 4 + j3 [\Omega]$$

이를 극좌표 형태로 바꾸면

$$Z = 4 + j3 [\Omega] = \sqrt{4^2 + 3^2} \angle \tan^{-1}\left(\frac{3}{4}\right) = 5 \angle 36.87^\circ$$



이때 흐르는 전류는 다음과 같이 계산되어 전압보다 위상이 36.87° 늦어지는 것을 알 수 있다.

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{100 \angle 0^\circ}{5 \angle 36.87^\circ} = 20 \angle (0^\circ - 36.87^\circ) = 20 \angle (-36.87^\circ) [A]$$

위의 계산에서 전압의 위상각을 0°로 한 것은 전압을 기준벡터로 했기 때문이다. 교류전력을 계산할 때는 항상 전압을 기준벡터로 사용한다. 또한 위의 계산에서 임피던스의 위상각은 (+)인데 전류의 위상각은 (-)된다는 점을 눈여겨 봐두어야 한다.

[그림 5]와 같이 회로에 저항과 용량성 리액턴스가 직렬로 있는 경우에 전류는 전압보다 위상이 $\angle \theta$ 만큼 앞선다. 이 경우 예를 들어 인가된 전압이 100[V]이고 저항이 4[Ω], 용량성 리액턴스가 3[Ω]이면 임피던스는

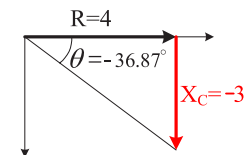
$$Z = 4 - j3 [\Omega] = \sqrt{4^2 + 3^2} \angle \tan^{-1}\left(\frac{-3}{4}\right) = 5 \angle (-36.87^\circ)$$

위의 계산에서 용량성 리액턴스의 부호가 (-)된 것은 다음과 같이 계산되기 때문이다.

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j\omega C} \cdot \frac{j}{j} = j \frac{1}{j^2 \omega C} = j \frac{1}{-\omega C} = j \frac{1}{-\omega C} \cdot \frac{-1}{-1} = -j \frac{1}{\omega C}$$

이때 흐르는 전류는 다음과 같이 계산되어 전류가 전압보다 위상이 36.87° 앞서는 것을 알 수 있다.

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{100 \angle 0^\circ}{5 \angle (-36.87^\circ)} = 20 \angle (0^\circ + 36.87^\circ) = 20 \angle 36.87^\circ [A]$$



이 경우에는 임피던스의 위상각은 (-)인데 전류의 위상각은 (+)가 된다는 점을 눈여겨 봐두어야 한다.

운동에너지와 정전용량 및 인덕턴스에 저장되는 에너지

질량을 가진 물체가 운동할 때는 **운동에너지**를 가지고 있다. 이 운동에너지의 크기는 그 물체가 운동하는 힘(f[N])과 속도(v[m/s])의 곱으로 표시된다. 힘(f[N])은 그 물체의 질량에 가속도(a[m/sec²])를 곱한 것이다. 즉 $f = ma$ 이다. 가속도는 속도의 시간에 대한 변화율(dv/dt) 이다.

이상의 결과로 운동하는 물체가 가지는 운동에너지(Kinetic Energy)는 힘(f[N])과 속도(v[m/s])의 곱을 시간에 대해 적분해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_K = \int f v dt = \int m a v dt = m \int \frac{dv}{dt} v dt = m \int v dv = \frac{1}{2} m v^2 [Joule]$$

교류회로에서 전류흐름에 영향을 주는 3요소는 저항(R)과 인덕턴스(L) 및 정전용량(C)이다. 이 3가지 요소 중에서 전류가 흐를 때 실제로 전력을 소비하는 것은 저항 하나뿐이다. 저항에 전압이 인가되어 전류가 흐르면 저항은 전류가 흐른 순간에 $P = I^2R[W]$ 의 에너지를 소비한다. 그러나 “정전용량과 인덕턴스는 유효전력을 소비하지 않는다”는 점을 분명히 알아 두어야 한다.

정전용량에 인가되는 전압이 증가해 갈 때는 정전용량이 충전되어 에너지가 저장되고, 인가되는 전압이 낮아지면 정전용량에 충전되었던 전하가 방전되면서 저장되었던 에너지가 방출된다. 즉, 정전용량은 인가되는 전압의 증감에 따라 에너지를 “저장했다 방출했다” 하기만을 반복하고 자체에서 에너지를 소비하지 않는다.

콘덴서에 저장되는 전력은 콘덴서에 인가된 전압과 그때 흐르는 전류의 곱으로 표시된다. 즉 $p = vi$ 이다.

그리고 콘덴서에 흐르는 전류는 그 콘덴서의 정전용량과 전압의 시간에 대한 변화율로 표시된다. 즉 콘덴서에 흐르는 전류는 $i = Cdv/dt$ 이다. 이상의 관계에서 콘덴서에 저장되는 에너지는 $p = vi$ 를 시간에 대해 적분에서 다음과 같이 구할 수 있다

$$E_C = \int v i dt = \int v C \frac{dv}{dt} dt = C \int v dv = \frac{1}{2} C v^2 [Joule]$$

인덕턴스에 흐르는 전류가 증가해 가면 인덕턴스에 저장되는 전자(電磁)에너지가 증가해 가다가, 전류가 감소하면 저장되었던 에너지가 방출된다. 인덕턴스도 이와 같이 인덕턴스 코일에 흐르는 전류의 증감에 따라 에너지를 “저장했다 방출했다” 하기만을 반복할 뿐이지 자체에서 에너지를 소비하지 않는다.

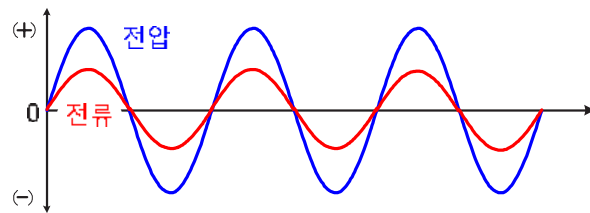
인덕턴스에 공급되는 전력은 $p = vi$ 이다. 그리고 인덕턴스에 전류가 흐를 때 인덕턴스에 걸리는 전압은 인덕턴스(L[H])에 전류의 시간에 대한 변화율을 곱한 것으로 표시된다. 즉 $v = L di/dt$ 이다. 이상의 관계에서 인덕턴스에 저장되는 에너지는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_L = \int p dt = \int v i dt = \int L \frac{di}{dt} i dt = L \int i di = \frac{1}{2} L i^2 [Joule]$$

이상의 결과에서 운동하는 물체가 가지는 운동에너지와 정전용량(콘덴서)에 저장되는 에너지 및 인덕턴스 코일에 저장되는 에너지의 식의 형태가 매우 유사함을 볼 수가 있다. 식은 똑 같은데 변수들만 바뀐 것 뿐이다.

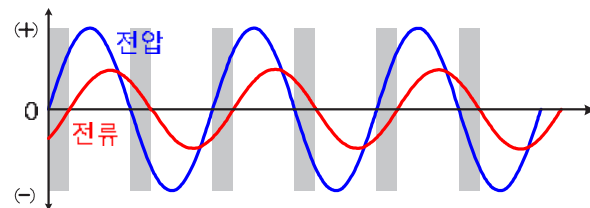
교류회로에서 전력의 흐름

다음 그림에서 전압과 전류는 동상이다. 이 경우에는 **전력 = 전압 x 전류의 부호**가 항상 (+)임을 알 수 있다. 즉 전압이(+)이면 전류도(+), 전압이(-)이면 전류도(-)가 되어 둘의 곱은 항상 (+)가 된다. 전력의 부호가 (+)라는 것은 **전원 → 부하**로 전력이 흘러가는 것을 의미한다.

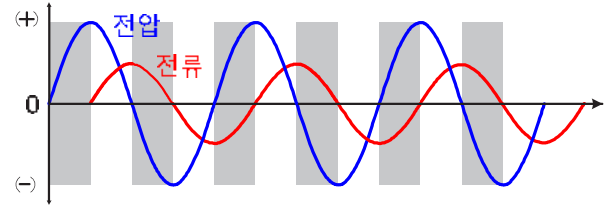


다음 그림은 전류가 전압보다 위상이 약간 뒤지는 것을 보인 것인데, 그림에서 회색 부분에서는 전압이 (+)이면 전류는(-), 전압이(-)이면 전류가(+)가 되어 전력의 부호가(-)가 된다. 전력의 부호가(-)가 된다는 것은 전력이 **부하 → 전원**으로 흐른다는 것을 의미한다. 다시 말해서 전력의 부호가(-)가 되는 동안은 부하의 인덕턴스나 콘덴서에 저장되어 있던 **에너지가 전원으로 반환**되는 것이다.

그렇다면 “부하측에 발전기가 있는 것도 아닌데 어떻게 전력이 부하에서 전원으로 전달되는가?” 하는 의문에 생길 수 있다. 전류위상이 전압보다 뒤진다는 얘기는 부하에 인덕턴스가 있다는 것을 의미한다. 그래서 이 인덕턴스에 저장되었던 에너지가 전력의 부호가(-)가 되는 순간에 전원으로 반송되는 것이다. 이와 같이 전력이 부하에서 전원으로 반송되는 것을 **무효전력**이라고 한다. 즉, **무효전력**이란 전원으로부터 부하에 공급된 전력의 일부가 부하에서 유효하게 사용되지 못하고 전원으로 되돌아가는 전력을 말한다.



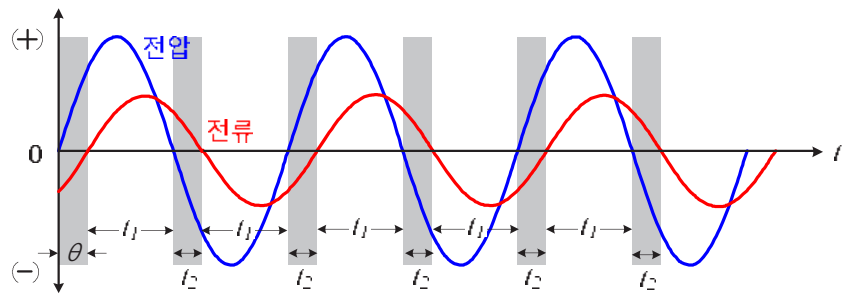
다음 그림은 전압과 전류의 위상차가 90° 인 경우이다. 이 경우 $1/4$ 사이클 동안은 부하가 전력을 받고, 다음 $1/4$ 사이클 동안은 받았던 전력을 모두 전원으로 반환하는 것을 반복하므로 실제로 부하에서 받아 쓰는 유효전력은 0 이 된다



교류회로에서의 역율

다음 그림에서와 같이 전류의 위상이 전압보다 $\angle \theta$ 만큼 뒤진 경우, t_1 시간동안은 전원에서 부하로 전력이 전달되고, t_2 시간동안은 인덕턴스에 저장되었던 전력이 전원으로 반환된다. 전력은 전압과 전류의 곱이므로 단위는 [VA] 또는 [kVA]가 된다.

그림에서 t_1 시간동안에 전원에서 부하로 전달된 전력이 100[VA]이었는데, t_2 시간동안에 이중 20[VA]를 전원으로 반환했다면 실제로 부하에서 사용된 전력은 $100-20=80$ [VA]가 된다. 이와 같이 실제로 부하에서 소비된 전력 80[VA]를 **유효전력**이라고 하고 [W] 또는 [kW]로 표시하고, 부하에서 사용되지 않고 전원으로 반송된 전력 20[VA]를 **무효전력**이라고 하고 [Var] 또는 [kVar]로 표시한다. 즉, 무효전력이라고 하는 것은 실제로 부하에서 유효하게 사용되지도 않으면서 쓸데없이 전원과 부하 사이를 왔다 갔다 하기만 하는 전력이다.



위의 경우에 전원에서 부하로 전달된 총 전력은 100[VA] 인데 이중 80[VA] (80[W]) 만 유효하게 사용되었으므로 전원에서 부하로 전달된 총 전력 중에서 유효하게 사용된 전력의 비율은 $(80/100) \times 100\% = 80\%$ 가 되는데 이 비율이 **역율**이다. 즉, 이런 경우 역율이 80%라고 한다.

위의 그림에서 보는 바와 같이 전원으로 반송되는 전력의 크기는 $\angle \theta$ 의 크기에 따라 변화한다. $\angle \theta$ 가 클수록, 또는 90° 에 가까울수록 반송되는 전력, 즉, 무효전력이 커지고, $\angle \theta$ 가 작을수록 무효전력이 적어지다가, $\angle \theta$ 가 0° 이면 무효전력은 0 이 되어 역율은 100%가 된다. 그래서 $\angle \theta$ 를 **역율각**이라고 한다. 역율은 $\angle \theta$ 의 여현(cos함수)에 비례한다. 그래서 역율(pf : Power Factor)을 $pf = \cos \theta$ 로 표시한다. 예를들어 $\theta = 36.87^\circ$ 이면 역율은 $\cos 36.87^\circ = 0.8$ 이 되고 여기에 100을 곱해서 80%라고도 한다.

단상 교류전력

앞에서 설명한 바와 같이 단상 교류전력은 전압 $\times$ 전류로 표시되므로 단위는 [VA] 또는 [kVA]이다. 즉

$$\text{피상전력 } P_{VA} = VI \text{ [VA]}$$

그러나 위와 같이 계산한 전력은 유효전력과 무효전력을 모두 포함한 전력이기 때문에 이를 **피상전력**이라고 한다. 유효전력을 계산하려면 윗식에 역율을 곱해야 한다. 즉

$$\text{유효전력 } P_W = VI \cos \theta \text{ [W]}$$

무효전력을 계산하려면 피상전력의 식에 $\sin \theta$ 를 곱한다. 즉

$$\text{무효전력 } P_{Var} = VI \sin \theta \text{ [Var]}$$

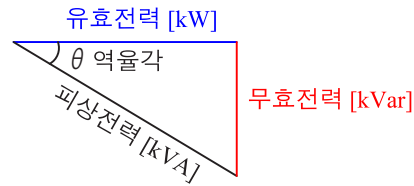
예를들어 피상전력이 1000[kVA]이고 역율각이 $\theta = 36.87^\circ$ 이면 역율과 유효전력과 무효전력은 각각 다음과같이 계산된다.

역율 $pf = \cos 36.87^\circ = 0.8$ 또는 80%

유효전력 $P_{kW} = P_{kVA} \times \cos \theta = 1000 \times \cos 36.87^\circ = 800[\text{kW}]$

무효전력 $P_{kVar} = P_{kVA} \times \sin \theta = 1000 \times \sin 36.87^\circ = 600[\text{kVar}]$

따라서 피상전력과 유효전력, 무효전력 및 역율각은 그림과 같이 그려진다. 그림에서 직각삼각형을 거꾸로 그린 것은 전압을 기준벡터로 했을 때 전류는 일반적으로 전압보다 위상이 뒤지기 때문에 (이를 지상역율이라고 한다) 전류벡터의 위상각이 (-)가 되기 때문이다.



3상 교류전력

3상 전원의 A B C 각상과 중성선 사이에 그림과 같이 부하가 걸려있어서 부하에 $I_A I_B I_C$ 의 전류가 흐르고, 부하역율각이 모두 $\angle \theta$ 인 경우 $L_A L_B L_C$ 부하에 공급되는 유효전력은

$$P_A = E_a I_a \cos \theta$$

$$P_B = E_b I_b \cos \theta$$

$$P_C = E_c I_c \cos \theta$$

전원에서 공급되는 총 유효전력은

$$P = E_a I_a \cos \theta + E_b I_b \cos \theta + E_c I_c \cos \theta$$

전원전압이 3상 평형전압이고, 부하전류가 3상 평형이면 각상 전압과 전류의 절대값은 같으니가, 즉

$$|E_a| = |E_b| = |E_c| = E, \quad |I_a| = |I_b| = |I_c| = I$$

가 되므로 3상 전력은

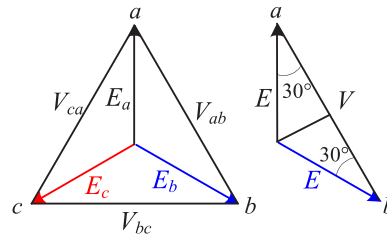
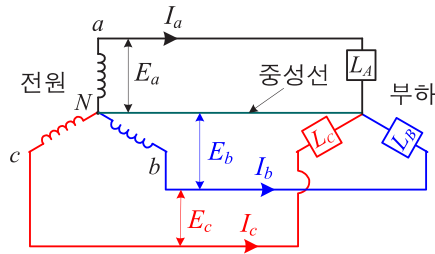
$$P = E_a I_a \cos \theta + E_b I_b \cos \theta + E_c I_c \cos \theta = 3EI \cos \theta$$

상전압이 $E[V]$ 일 때 선간전압 $V[V]$ 는 그림에서

$$V = 2E \cos 30^\circ = 2E \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}E \rightarrow E = \frac{V}{\sqrt{3}}$$

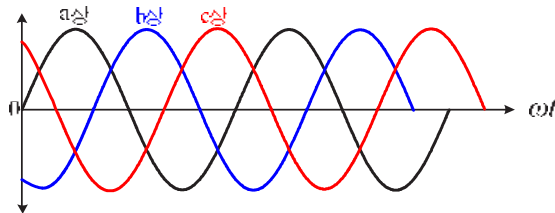
이 되는데 이를 3상 전력의 식에 대입하면

$$P = 3EI \cos \theta = 3 \times \frac{V}{\sqrt{3}} I \cos \theta = \sqrt{3}VI \cos \theta$$



평형 3상전압 전류의 합

3상 교류회로에 평형3상 전류가 흐르거나 평형3상 전압이 걸려있을 때 전류 또는 전압은 다음그림과 같이 각상에 120° 의 위상차를 가지고 정현파를 그린다.



각상 전압과 전류는 다음식으로 표시된다.

$$e_a = E_m \sin \omega t$$

$$i_a = I_m \sin \omega t$$

$$e_b = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$i_b = I_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$e_c = E_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$

$$i_c = I_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$

평형 3상 전압 또는 전류의 벡터합은 항상 0 이 된다. 즉, $E_a + E_b + E_c = 0$, $I_a + I_b + I_c = 0$ 이다.

예를들어 전압의 최대치 E_m 이 100[V] 인 경우 a 상이 위상이 0° 일 때 각상 전압의 크기를 계산해 보면

$$\left. \begin{aligned} e_a &= E_m \sin \omega t = 100 \sin 0^\circ = 0 \\ e_b &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) = 100 \sin(0^\circ - 120^\circ) = 100 \sin(-120^\circ) = -86.6 \\ e_c &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = 100 \sin(0^\circ - 240^\circ) = 100 \sin(-240^\circ) = 86.6 \end{aligned} \right\} \text{ 합하면 } 0$$

a 상이 임의의 각도 25° 인 경우를 계산해 보면

$$\left. \begin{aligned} e_a &= E_m \sin \omega t = 100 \sin 25^\circ = 42.26 \\ e_b &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) = 100 \sin(25^\circ - 120^\circ) = 100 \sin(-95^\circ) = -99.62 \\ e_c &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = 100 \sin(25^\circ - 240^\circ) = 100 \sin(-215^\circ) = 57.36 \end{aligned} \right\} \text{ 합하면 } 0$$

이와 같이 어느 위상각에서 계산해도 평형 3상 전압/전류의 합은 0 이다.

상전류와 선전류

변압기가 Y결선 되어 있는 경우에는 다음 [그림 1]과 같이 각상에 흐르는 상전류가 그대로 선로에 흐르는 선전류가 되므로 상전류와 선전류의 크기와 위상은 같다.

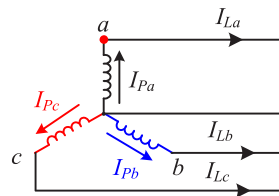


그림 1

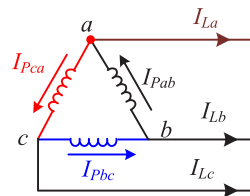


그림 2

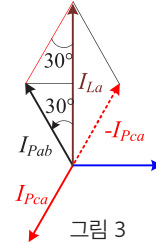


그림 3

변압기가 Δ결선 되어 있는 경우에는 [그림 2]에서 I_{Pab} 는 a점으로 흘러 들어가고, I_{Pca} 와 I_{La} 는 흘러 나가므로

$$I_{Pab} - I_{Pca} - I_{La} = 0 \rightarrow I_{La} = I_{Pab} - I_{Pca} \rightarrow I_{La} = I_{Pab} + (-I_{Pca})$$

결국 선전류 I_{La} 는 I_{Pab} 와 $-I_{Pca}$ 의 벡터합이 되므로 [그림 3]에서 다음과 같이 계산된다.

$$I_{La} = 2 \times I_{Pab} \times \cos 30^\circ = 2 \times I_{Pab} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_{Pab}$$

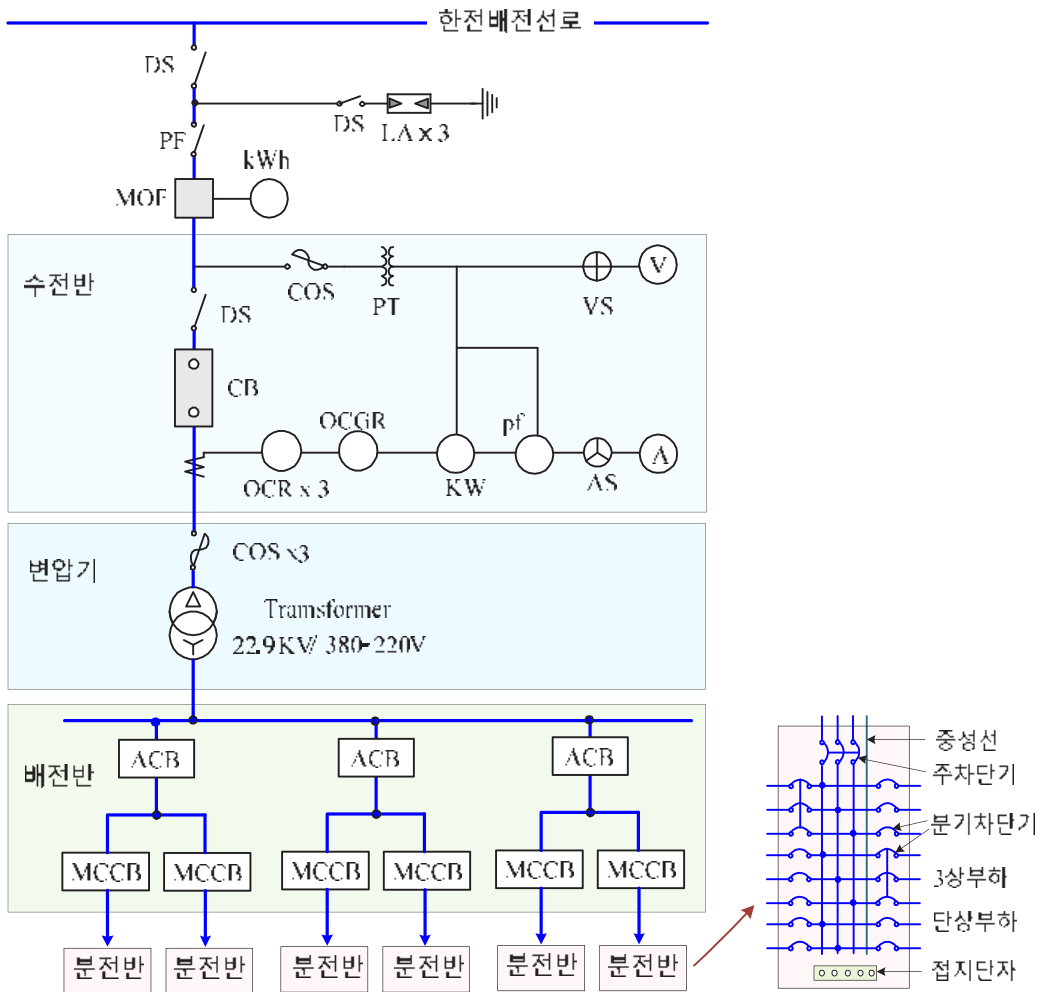
[그림 3]과 계산에서 Δ결선시 선전류는 상전류의 $\sqrt{3}$ 배가 되고 위상은 상전류가 30° 앞서는 것을 볼 수 있다.

특고압 수용가의 수전설비

특고압 수용가의 수전설비는 그림과 같이 구성된다. 그림은 단선도로 그린 것이기 때문에 분전반을 제외한 모든 선은 단선으로 되어 있으나, 실제로는 3상 4선식이기 때문에 4가닥 (3상전선+중성선)으로 구성된다.

그림에서 **DS**(Disconnect Switch)는 단로기, **LA**(Lightning Arrester)는 피뢰기, **PF**(Power Fuse)는 전력퓨즈, **MOF**는 전력량계(kWh)를 가동시키기 위한 PT와 CT가 3개씩 들어있는 함이고, **CB**(Circuit Breaker)는 수용가 주차단기, **COS**(Cut Out Switch)는 퓨즈가 내장된 스위치, **pf**(Power Factor Meter)는 역율계, **VS**(Voltage Selector Switch)는 전압절환 스위치, **AS**(Ammeter Selector Switch)는 암페어미터 절환스위치, kW는 전력계, **OCR**(Over Current Relay)는 과전류 계전기, **OCGR**(Over Current Ground Relay)는 지락과전류 계전기, **ACB**(Air Circuit Breaker)는 저압 기중 차단기, **MCCB**(Molded Case Circuit Breaker)는 배선용 차단기이다.

변압기(Transformer)는 수전한 특고압 22.9[kV]를 저압 380/220V로 강압한다.



분전반(Panel Board)은 배전반(Distribution Board)으로부터 받은 전력을 전등, 콘센트, 전동기 등의 부하에 배선을 분기하는 개소에 설치되는 것이다. 건물 복도의 벽 등에 설치되는 경우가 많다. 분전반은 주차단기와 분기회로용 배선용 차단기(MCCB) 또는 누전차단기(ELCB)를 외함안에 내장한 것이다. 외함은 주로 강판이 사용되나 고급건물에는 스테인레스 강판을 쓰기도 한다. 🏠