한 방식을 말한다.

한편, 그림 8.3(b)는 3상 교류전원의 △결선을 나타낸 것으로서, 그림 8.1(c)와 같은 단상 교류전압의 높은 전위와 낮은 전위를 교대로 결선한 방식을 말한다.

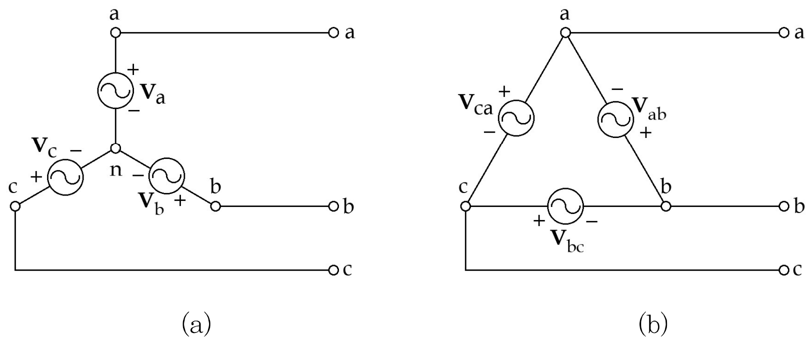


그림 8.3 3상 교류전압의 결선 방법

2 평형 3상 교류회로의 결선

2.1 전원의 결선

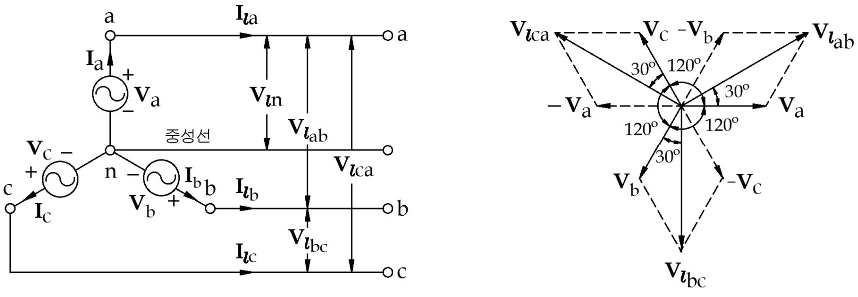
(1) Y결선

그림 8.4(a)는 평형 3상 교류전압을 Y결선한 전원부이다. 3상 교류전압에서 3상을 구성하고 있는 각 단상 교류전압을 상(phase)이라고 하면 상전압(phase voltage)은 각 상에 걸리는 전압으로 $\boldsymbol{V}_a$, $\boldsymbol{V}_b$, $\boldsymbol{V}_c$ 라고 하고 상전류(phase current)는 각 상에 흐르는 전류로 $\boldsymbol{I}_a$, $\boldsymbol{I}_b$, $\boldsymbol{I}_c$ 라고 한다.

선간 전압(line voltage)은 부하에 전력을 공급하는 선로 사이의 전압으로 $\boldsymbol{V}_{lab}$, $\boldsymbol{V}_{lbc}$, $\boldsymbol{V}_{lca}$ 라고 하고 선전류(line current)는 각 선로에 흐르는 전류로 $\boldsymbol{I}_{la}$, $\boldsymbol{I}_{lb}$, $\boldsymbol{I}_{lc}$ 라고 한다.

그림 8.4(a)로부터 각 상에 흐르는 상전류 $\boldsymbol{I}_a$, $\boldsymbol{I}_b$, $\boldsymbol{I}_c$ 는 각 선로에 흐르는 선전류 $\boldsymbol{I}_{la}$, $\boldsymbol{I}_{lb}$, $\boldsymbol{I}_{lc}$와 동일하기 때문에

$$\boldsymbol{I}_{la} = \boldsymbol{I}_a, \quad \boldsymbol{I}_{lb} = \boldsymbol{I}_b, \quad \boldsymbol{I}_{lc} = \boldsymbol{I}_c \qquad \cdots\cdots (8.3)$$



(a) (b)

그림 8.4 평형 3상 전원의 Y결선

이다. 그림 8.4(b)로부터 각 상에 걸리는 상전압 $\boldsymbol{V}_a$, $\boldsymbol{V}_b$, $\boldsymbol{V}_c$ 는 크기가 같고 120°의 위상차를 갖기 때문에 각 선로 간의 선간 전압 $\boldsymbol{V}_{lab}$, $\boldsymbol{V}_{lbc}$, $\boldsymbol{V}_{lca}$ 도 서로 대칭이다. 또한, 선간 전압의 크기는 상전압보다 $\sqrt{3}$ 배 만큼 크고 선간 전압의 위상은 상전압보다 30° 빠르기 때문에

$$\boldsymbol{V}_{lab} = \boldsymbol{V}_a - \boldsymbol{V}_b = \boldsymbol{V}_a + (-\boldsymbol{V}_b) = \sqrt{3}\,\boldsymbol{V}_a \angle 30°[\mathrm{V}]$$

$$\boldsymbol{V}_{lbc} = \boldsymbol{V}_b - \boldsymbol{V}_c = \boldsymbol{V}_b + (-\boldsymbol{V}_c) = \sqrt{3}\,\boldsymbol{V}_b \angle 30°[\mathrm{V}]$$

$$\boldsymbol{V}_{lca} = \boldsymbol{V}_c - \boldsymbol{V}_a = \boldsymbol{V}_c + (-\boldsymbol{V}_a) = \sqrt{3}\,\boldsymbol{V}_c \angle 30°[\mathrm{V}] \qquad \cdots\cdots (8.4)$$

이다. 따라서, 식 8.3과 8.4로부터 상전류를 $\boldsymbol{I}_p$, 선전류를 $\boldsymbol{I}_l$, 상전압을 $\boldsymbol{V}_p$, 선간 전압을 $\boldsymbol{V}_l$이라고 하면

$$\boldsymbol{I}_l = \boldsymbol{I}_p[\mathrm{A}] \qquad \cdots\cdots (8.5)$$

$$\boldsymbol{V}_l = \sqrt{3}\,\boldsymbol{V}_p \angle 30°[\mathrm{V}] \qquad \cdots\cdots (8.6)$$

이고 상전압 $\boldsymbol{V}_p$는 선로와 중성선 간의 전위차 $\boldsymbol{V}_{ln}$과 같으므로 식 8.6은

$$\boldsymbol{V}_l = \sqrt{3}\,\boldsymbol{V}_{ln} \angle 30°[\mathrm{V}] \qquad \cdots\cdots (8.7)$$

와 동일하다.

예제 8.1 평형 3상 교류전압이 Y결선 시 선간 전압이 $\boldsymbol{V}_l = 346[\mathrm{V}]$일 때, 상전압 $\boldsymbol{V}_p$[V]는?

풀이 식 8.6으로부터 상전압 $\boldsymbol{V}_p$는

$$\boldsymbol{V}_p = \frac{1}{\sqrt{3}}\boldsymbol{V}_l \angle -30°[\mathrm{V}]$$

선간 전압이 $\boldsymbol{V}_l = 346[\mathrm{V}]$ 이므로 상전압 $\boldsymbol{V}_p$는

$$\boldsymbol{V}_p = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 346\angle -30° \fallingdotseq 200\angle -30°[\mathrm{V}]$$

(2) △결선

그림 8.5(a)는 평형 3상 교류전압을 △결선한 전원부이다. 그림 8.5(a)로부터 각 상의 상전압 $\boldsymbol{V}_a$, $\boldsymbol{V}_b$, $\boldsymbol{V}_c$ 는 각 선로 간의 선간 전압 $\boldsymbol{V}_{lab}$, $\boldsymbol{V}_{lbc}$, $\boldsymbol{V}_{lca}$와 동일하기 때문에

$$\boldsymbol{V}_{lab} = \boldsymbol{V}_a,\ \boldsymbol{V}_{lbc} = \boldsymbol{V}_b,\ \boldsymbol{V}_{lca} = \boldsymbol{V}_c \qquad \cdots\cdots (8.8)$$

이다.

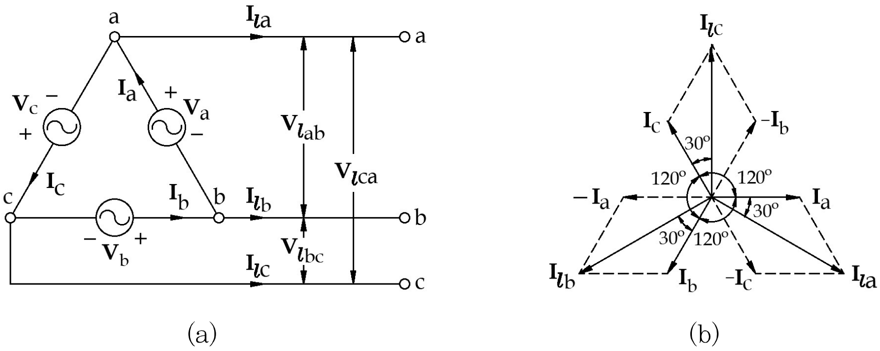


그림 8.5 평형 3상 전원의 △결선

그림 8.5(b)로부터 각 상에 흐르는 상전류 $\boldsymbol{I}_a$, $\boldsymbol{I}_b$, $\boldsymbol{I}_c$ 는 크기가 같고 120°의 위상차를 갖기 때문에 각 선로에 흐르는 선전류 $\boldsymbol{I}_{lab}$, $\boldsymbol{I}_{lbc}$, $\boldsymbol{I}_{lca}$도 서로 대칭이다. 또한, 선전류의 크기는 상전류보다 $\sqrt{3}$배 만큼 크고 선전류의 위상은 상전류보다 30° 느리기 때문에

$$\boldsymbol{I}_{la} = \boldsymbol{I}_a - \boldsymbol{I}_c = \boldsymbol{I}_a + (-\boldsymbol{I}_c) = \sqrt{3}\boldsymbol{I}_a \angle -30°[\mathrm{A}]$$
$$\boldsymbol{I}_{lb} = \boldsymbol{I}_b - \boldsymbol{I}_a = \boldsymbol{I}_b + (-\boldsymbol{I}_a) = \sqrt{3}\boldsymbol{I}_b \angle -30°[\mathrm{A}]$$
$$\boldsymbol{I}_{lc} = \boldsymbol{I}_c - \boldsymbol{I}_b = \boldsymbol{I}_c + (-\boldsymbol{I}_b) = \sqrt{3}\boldsymbol{I}_c \angle -30°[\mathrm{A}] \qquad \cdots\cdots (8.9)$$

이다. 따라서, 식 8.8과 8.9로부터 상전류를 $\boldsymbol{I}_p$, 선전류를 $\boldsymbol{I}_l$, 상전압을 $\boldsymbol{V}_p$, 선간 전압을 $\boldsymbol{V}_l$이라고 하면

$$\boldsymbol{V}_l = \boldsymbol{V}_p[\mathrm{V}] \qquad \cdots\cdots (8.10)$$

$$\boldsymbol{I}_l = \sqrt{3}\boldsymbol{I}_p\angle -30°[\mathrm{A}] \qquad \cdots\cdots (8.11)$$

이다.

예제 8.2 평형 3상 교류전압이 △결선 시 상전류가 $I_p = 150$[A]일 때, 선전류 I_l[A]은?

풀이 식 8.11로부터 선전류 I_l은

$$I_l = \sqrt{3} I_p \angle -30°[\mathrm{A}]$$

상전류가 $I_p = 150$[A] 이므로 선전류 I_l은

$$I_l = 150\sqrt{3} \angle -30°[\mathrm{A}]$$

2.2 부하의 결선

그림 8.6은 평형 3상 부하를 각각 Y결선과 △결선한 것으로서, 평형 3상 부하와 관련한 상전압과 상전류, 선로에 흐르는 선전류와 선간 전압은 전원부와 동일하기 때문에, 그림 8.6(a)와 같은 Y결선인 경우,

$$I_l = I_p[\mathrm{A}] \quad \cdots\cdots (8.12)$$

$$V_l = \sqrt{3} V_p \angle 30°[\mathrm{V}] \quad \cdots\cdots (8.13)$$

이고 그림 8.6(b)와 같은 △결선인 경우,

$$V_l = V_p[\mathrm{V}] \quad \cdots\cdots (8.14)$$

$$I_l = \sqrt{3} I_p \angle -30°[\mathrm{A}] \quad \cdots\cdots (8.15)$$

가 성립한다.

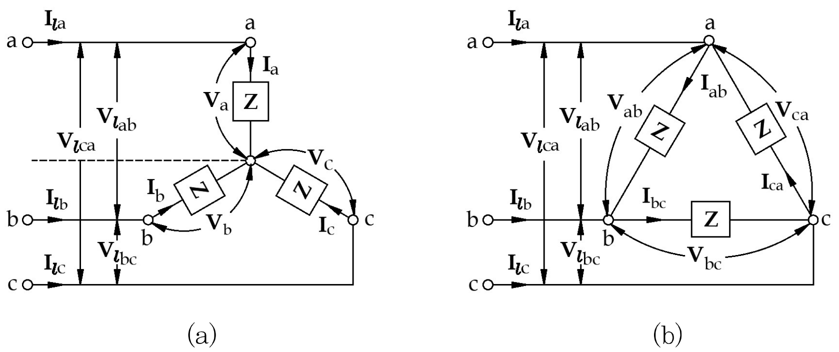


그림 8.6 평형 3상 부하의 Y−△ 결선

부하 한 상에 흐르는 상전류 I_p는

$$I_p = \frac{V_p}{Z} = \frac{50\sqrt{3}}{5} = 10\sqrt{3}\ [\mathrm{A}]$$

따라서, 평형 3상 부하에서의 유효 전력 P, 무효 전력 P_r 및 피상 전력 P_a는

$$P = 3I_p^2 R = 3 \times (10\sqrt{3})^2 \times 3 = 2{,}700[\mathrm{W}] = 2.7[\mathrm{kW}]$$
$$P_r = 3I_p^2 X = 3 \times (10\sqrt{3})^2 \times 4 = 3{,}600[\mathrm{Var}] = 3.6[\mathrm{kVar}]$$
$$P_a = 3I_p^2 Z = 3 \times (10\sqrt{3})^2 \times 5 = 4{,}500[\mathrm{VA}] = 4.5[\mathrm{kVA}]$$

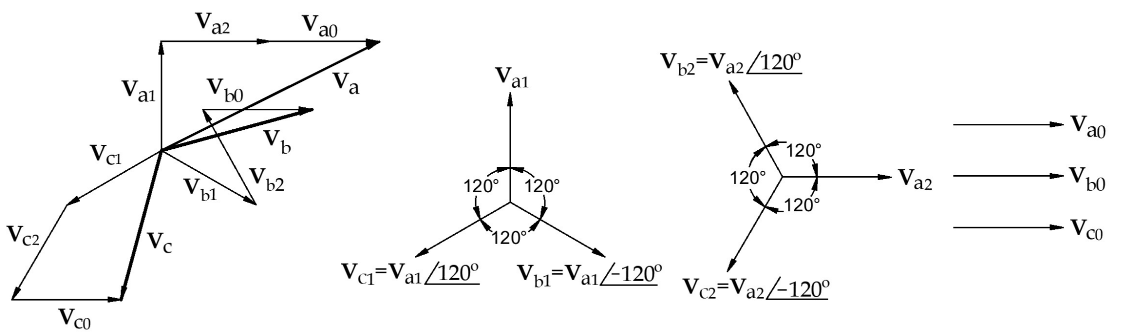
평형 3상 부하에서의 역률 $p.f$와 무효율 $r.f$는

$$p.f = \cos\theta = \frac{R}{Z} = \frac{3}{5} = 0.6$$
$$r.f = \sin\theta = \frac{X}{Z} = \frac{4}{5} = 0.8$$

4.4 대칭 좌표법

불평형 3상회로는 평형 3상회로에 비하여 회로 해석이 어렵기 때문에, 이를 해결하기 위해서 대칭 좌표법(method of symmetrical coordinate)을 사용하여 불평형 전압이나 전류 성분을 대칭성의 3성분으로 분해하여 회로를 해석할 수 있다.

그림 8.18(a)의 $\boldsymbol{V}_a$, $\boldsymbol{V}_b$, $\boldsymbol{V}_c$는 불평형 3상 전압으로서, 불평형인 3상 전압을 분해하면 그림 8.18(b)와 같이 상순이 abc인 정상분($\boldsymbol{V}_{a1}$, $\boldsymbol{V}_{b1}$, $\boldsymbol{V}_{c1}$)과 그림 8.18(c)와 같이 상순이 acb인 역상분($\boldsymbol{V}_{a2}$, $\boldsymbol{V}_{b2}$, $\boldsymbol{V}_{c2}$)과 그림 8.18(d)와 같이 상의 방향과 크기가 같은 영상분($\boldsymbol{V}_{a0}$, $\boldsymbol{V}_{b0}$, $\boldsymbol{V}_{c0}$)으로 구분할 수 있다.



(a) (b) (c) (d)

그림 8.18 대칭 좌표법

그림 8.18(a)로부터 불평형 3상 전압은 정상분, 역상분 및 영상분의 합이므로

$$\boldsymbol{V}_a = \boldsymbol{V}_{a0} + \boldsymbol{V}_{a1} + \boldsymbol{V}_{a2}[\mathrm{V}]$$
$$\boldsymbol{V}_b = \boldsymbol{V}_{b0} + \boldsymbol{V}_{b1} + \boldsymbol{V}_{b2}[\mathrm{V}]$$
$$\boldsymbol{V}_c = \boldsymbol{V}_{c0} + \boldsymbol{V}_{c1} + \boldsymbol{V}_{c2}[\mathrm{V}] \quad \cdots\cdots (8.49)$$

이고 그림 8.18(b)로부터 각 상의 정상분 중 $\boldsymbol{V}_{b1}$은 $\boldsymbol{V}_{a1}$과 비교하여 크기는 같지만 위상이 120° 늦고 $\boldsymbol{V}_{c1}$은 $\boldsymbol{V}_{a1}$과 비교하여 크기는 같지만 위상이 120° 빠르다. 또한, 그림 8.18(c)로부터 각 상의 역상분 중 $\boldsymbol{V}_{b2}$는 $\boldsymbol{V}_{a2}$와 비교하여 크기는 같지만 위상이 120° 빠르고 $\boldsymbol{V}_{c2}$는 $\boldsymbol{V}_{a2}$와 비교하여 크기는 같지만 위상이 120° 느리다.

여기서, $\boldsymbol{V}_{a1}$과 $\boldsymbol{V}_{a2}$를 기준으로 $\boldsymbol{V}_{b1}$, $\boldsymbol{V}_{b2}$와 $\boldsymbol{V}_{c1}$, $\boldsymbol{V}_{c2}$간의 위상을 비교해보면, 위상이 빠른 상태는 $1\angle 120°$, 위상이 느린 상태는 $1\angle -120°$로 나타낼 수 있기 때문에 식 8.49는

$$\boldsymbol{V}_a = \boldsymbol{V}_{a0} + \boldsymbol{V}_{a1} + \boldsymbol{V}_{a2}[\mathrm{V}]$$
$$\boldsymbol{V}_b = \boldsymbol{V}_{b0} + \boldsymbol{V}_{a1}\angle -120° + \boldsymbol{V}_{a2}\angle 120°[\mathrm{V}]$$
$$\boldsymbol{V}_c = \boldsymbol{V}_{c0} + \boldsymbol{V}_{a1}\angle 120° + \boldsymbol{V}_{a2}\angle -120°[\mathrm{V}] \quad \cdots\cdots (8.50)$$

이다.

여기서, $a = 1\angle 120°$ 라고 하면 $a^2 = (1\angle 120°)(1\angle 120°) = 1\angle 240° = 1\angle -120°$ 이고 영상분 $\boldsymbol{V}_{a0} = \boldsymbol{V}_{b0} = \boldsymbol{V}_{c0}$ 이므로 식 8.50은

$$\boldsymbol{V}_a = \boldsymbol{V}_{a0} + \boldsymbol{V}_{a1} + \boldsymbol{V}_{a2}[\mathrm{V}]$$
$$\boldsymbol{V}_b = \boldsymbol{V}_{a0} + a^2\boldsymbol{V}_{a1} + a\boldsymbol{V}_{a2}[\mathrm{V}]$$
$$\boldsymbol{V}_c = \boldsymbol{V}_{a0} + a\boldsymbol{V}_{a1} + a^2\boldsymbol{V}_{a2}[\mathrm{V}] \quad \cdots\cdots (8.51)$$

이다.

영상분인 $\boldsymbol{V}_{a0}$를 구하기 위해서 식 8.51의 3개의 식을 더하면

$$\boldsymbol{V}_a + \boldsymbol{V}_b + \boldsymbol{V}_c = 3\boldsymbol{V}_{a0} + (1 + a^2 + a)\boldsymbol{V}_{a1} + (1 + a + a^2)\boldsymbol{V}_{a2}[\mathrm{V}] \quad \cdots\cdots (8.52)$$

이고 여기서,

$$\begin{aligned} a^2 + a + 1 &= (1\angle -120°) + (1\angle 120°) + 1 \\ &= \{\cos(-120°) + j\sin(-120°)\} + (\cos 120° + j\sin 120°) + 1 \\ &= \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + 1 \\ &= 0 \end{aligned} \quad \cdots\cdots (8.53)$$

이므로 식 8.52는 8.53에 의해서 영상분 $\boldsymbol{V}_{a0}$는

$$\boldsymbol{V}_{a0} = \frac{1}{3}(\boldsymbol{V}_a + \boldsymbol{V}_b + \boldsymbol{V}_c)[\mathrm{V}] \qquad \cdots\cdots (8.54)$$

이다.

정상분인 $\boldsymbol{V}_{a1}$을 구하기 위해서 식 8.51의 두 번째 식에 a를 곱하고 세 번째 식에 a^2을 곱한 후, 3개의 식을 더하면

$$\begin{aligned}\boldsymbol{V}_a + a\boldsymbol{V}_b + a^2\boldsymbol{V}_c &= (1+a+a^2)\boldsymbol{V}_{a0} + (1+2a^3)\boldsymbol{V}_{a1} \\ &\quad + (1+a^2+a^4)\boldsymbol{V}_{a2}[\mathrm{V}] \qquad \cdots\cdots (8.55)\end{aligned}$$

이고 여기서,

$$\begin{aligned}a^3 &= a \times a \times a = (1\angle 120°) \times (1\angle 120°) \times (1\angle 120°) \\ &= 1\angle 360° = 1\angle 0° = 1 \qquad \cdots\cdots (8.56)\end{aligned}$$

$$a^4 = a^3 \times a = a \qquad \cdots\cdots (8.57)$$

이므로 식 8.55는

$$\begin{aligned}\boldsymbol{V}_a + a\boldsymbol{V}_b + a^2\boldsymbol{V}_c &= (1+a+a^2)\boldsymbol{V}_{a0} + 3\boldsymbol{V}_{a1} \\ &\quad + (1+a^2+a)\boldsymbol{V}_{a2}\ [\mathrm{V}] \qquad \cdots\cdots (8.58)\end{aligned}$$

가 되어 정상분 $\boldsymbol{V}_{a1}$은

$$\boldsymbol{V}_{a1} = \frac{1}{3}(\boldsymbol{V}_a + a\,\boldsymbol{V}_b + a^2\boldsymbol{V}_c)[\mathrm{V}] \qquad \cdots\cdots (8.59)$$

이다.

역상분인 $\boldsymbol{V}_{a2}$를 구하기 위해서 식 8.51의 두 번째 식에 a^2을 곱하고 세 번째 식에 a를 곱한 후, 3개의 식을 더하면

$$\begin{aligned}\boldsymbol{V}_a + a^2\boldsymbol{V}_b + a\boldsymbol{V}_c &= (1+a^2+a)\boldsymbol{V}_{a0} + (1+a^4+a^2)\boldsymbol{V}_{a1} \\ &\quad + (1+2a^3)\boldsymbol{V}_{a2}\ [\mathrm{V}] \\ &= (1+a^2+a)\boldsymbol{V}_{a0} + (1+a+a^2)\boldsymbol{V}_{a1} + 3\boldsymbol{V}_{a2} \quad \cdots (8.60)\end{aligned}$$

가 되어 역상분 $\boldsymbol{V}_{a2}$는

$$\boldsymbol{V}_{a2} = \frac{1}{3}(\boldsymbol{V}_a + a^2\,\boldsymbol{V}_b + a\,\boldsymbol{V}_c)[\mathrm{V}] \qquad \cdots\cdots (8.61)$$

이다.