

# 24 3 상 회 로

- |                        |                                   |
|------------------------|-----------------------------------|
| 24.1 3상전압의 발생          | 24.5 평형3상부하에서의 선전류, 선전압과 상전압과의 관계 |
| 24.2 각종 3상회로           |                                   |
| 24.3 상전원 및 3상전원의 등가변환  | 24.6 3상회로의 전력                     |
| 24.4 평형3상회로에 대한 등가단상회로 | 24.7 3상전력의 측정 연습문제                |

주파수가 같으나 위상을 달리하는 많은 기전력이 동시에 존재하는 교류방식을 **다상방식**(polyphase system)이라 한다. 그 중 실제로 중요한 것은 **3상방식**(three-phase system)이다. 이제까지의 각 장에서 취급한 **단상회로**에 비하여 3상방식은 몇 가지 이점을 갖는다.

첫째로 평형3상방식의 순간전력의 총합은 일정하므로 3상전동기는 일정한 회전력을 받아 진동이 적다. 둘째로 3상방식은 단상방식이나 기타의 다상방식에 비하여 전체적으로 경제적이고 또 동작상 편리하다. 셋째로 3상전력은 적당한 변압기에 의하여 다른 다상전력(6상, 12상 등)으로 용이하게 변환할 수 있다. 이와 같은 여러 가지 이유로 현재 보통의 발전, 송전, 배전 등 공업용 전력계통은 거의 전부 3상방식에 의존하고 있다.

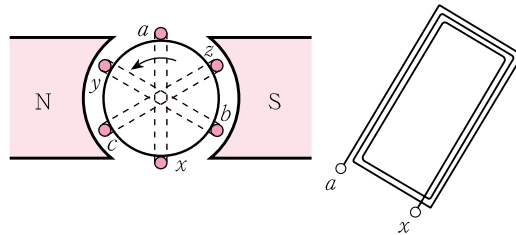
3상회로는 회로망의 일종이므로 이제까지의 방법으로 충분히 풀 수 있으나 평형다상회로의 계산은 적당한 방법으로 단상회로의 계산에 귀착시킬 수 있다.

이 장에서는 평형3상회로의 사인파 정상상태를 가정한다. 따라서 복소량은  $V$ ,  $I$ ,  $Z$ ,  $Y$  등 볼드체로 표시한다.

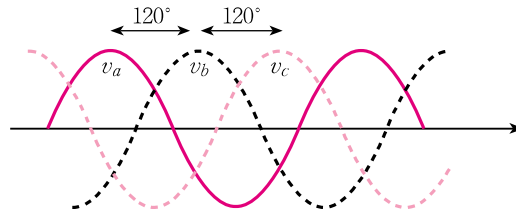
### 24.1 3상전압의 발생

그림 24.1 (a)는 3상발전기의 원리도이다. 동일한 구조를 갖는 3개의 권선이 공간적으로  $120^\circ$ 의 각으로 전기자에 감겨져 있고, 균일자계 내에서 반시계방향으로 일정속도로 회전하고 있다. 각 권선의 단자간에 나타나는 유기전압  $v_a, v_b, v_c$  (각 권선의 한 단자  $x, y, z$ 로부터 다른 단자  $a, b, c$ 로의 전압상승)는 크기와 주파수가 같은 사인파이지만, 위상은  $v_b$ 가  $v_a$ 보다  $120^\circ$  늦고  $v_c$ 는  $v_b$ 보다 또  $120^\circ$  늦다. 따라서 이 세 전압의 순간치곡선은 그림 24.1 (b)와 같다. 그림 (a)에서는 전기자가 반시계방향으로 회전한다고 가정하였기 때문에 세 전압은 이와 같이  $v_a, v_b, v_c, v_a, v_b, \dots$ 의 순서로 최대치에 도달한다. 이것을 **상순**(相順; phase sequence)이  $abc$ 라고 한다. 만일 이 원리도에서 전기자가 시계방향으로 회전한다면 전압이 최대치에 도달하는 순서는  $v_a, v_c, v_b, v_a, v_c, \dots$ 와 같을 것이다. 이 경우 상순은  $acb$ 가 된다. 그림 24.2에는 두 가지 상순에 대하여  $V_a$ 를 기준으로 한 3상전압의 페이지도가 그려져 있다. 즉, 상순이  $abc$ 일 때에는

$$\mathbf{V}_a = V \angle 0^\circ, \mathbf{V}_b = V \angle -120^\circ, \mathbf{V}_c = V \angle +120^\circ \quad (24.1)$$



(a) 3상발전기의 원리도



(b) 3상전압의 순간치곡선

그림 24.1

와 같고, 상순이  $acb$  일 때에는

$$V_a = V \angle 0^\circ, V_b = V \angle +120^\circ, V_c = V \angle -120^\circ \quad (24.2)$$

와 같다.  $V_a, V_b, V_c$ 를 각각 상  $a$  (phase  $a$ ), 상  $b$ , 상  $c$ 의 전압이라고 한다.

그림 24.1 (a)의 원리도에서 회전하는 각 권선은 단자 외부에 대해서 각각 하나의 단상전원을 대표하지만 이 3개를 일괄하여 생각할 때 **3상전원**이라고 한다. 세 **상전압**(phase voltage)의 위상관계를 명시하기 위하여 3상전원을 그림 24.3과 같이 표시한다. 여기서  $Z_g$ 는 각 상전원의 내부임피던스이다.

3상발전기에서 발생된 전압을 이용할 때 다음 두 가지 방법을 쓴다. 하나는 그림 24.3에서 단자  $x, y, z$ 를 함께 묶고, 각 권선의 다른 단자  $a, b, c$ 에서 하나씩의 도선을 빼내는 방식이다. 이것을 **Y결선**(Y-connection)이라 한다. 그림 24.4 (a)는 Y결선의 3상전원을 표시한 것이다. 여기서 공통접속점  $n$ 을 **중성점**(neutral point)이라고 한다[중성점에서 또 하나의 도선을 빼내는 경우도 있으며, 이 선을 **중성선**이라고 한다]. 또 한 가지 방식은 그림 24.3에서 단자  $x$ 와  $b, y$ 와  $c, z$ 와  $a$

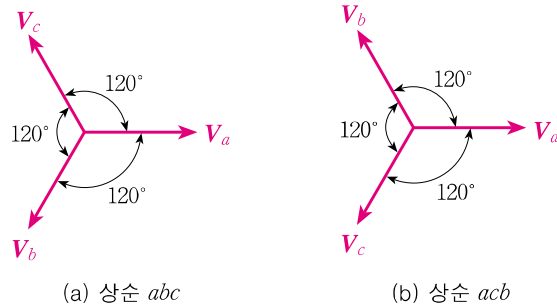


그림 24.2 3상전압의 페이지도

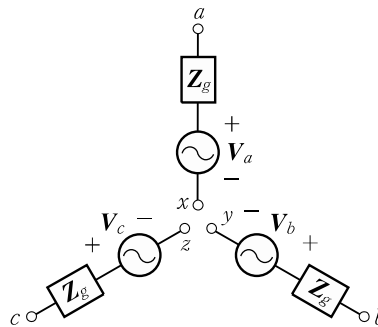


그림 24.3 3상전원의 표시

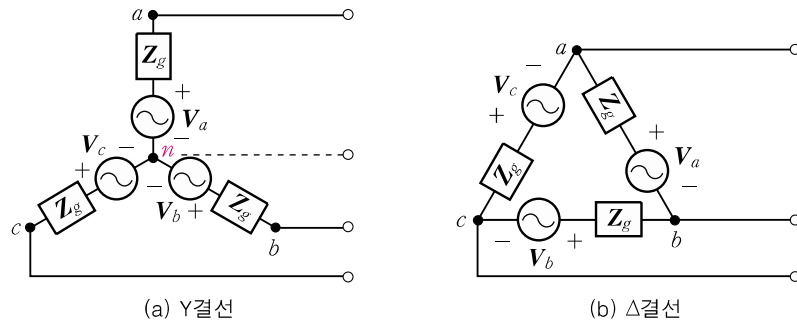


그림 24.4 3상전원의 결선방식

를 각각 접속하고 이 각 접속점에서 하나씩의 도선을 빼내는 방식이다. 이것을 **Δ 결선**( $\Delta$ -connection)이라고 한다. 그림 24.4 (b)는  $\Delta$ 결선의 3상전원을 표시한 것이다.

3상전원에서 (1) 각 상전압의 크기가 같고, (2) 상전압의 상차가 서로  $120^\circ$ 씩 이고, (3) 각 상전원의 내부임피던스가 동일한 경우 이것을 **평형3상전원**(balanced 3-phase source) 또는 **대칭3상전원**이라고 한다. 실제의 3상전원은 거의 전부 평형을 이루고 있으며 또 내부임피던스는 3상회로의 다른 임피던스에 비해서 무시할 수 있는 경우가 많다. **평형3상전압**, **평형3상전류**의 정의도 명백하다.

## 24.2 각종 3상회로

Y 또는  $\Delta$ 로 결선된 3상전원의 단자에서 3개의 도선을 빼내어 여기에 그림 24.5 (a)와 같이  $\Delta$ 형으로 또는 그림 (b)와 같이 Y형으로 3개의 부하임피던스를 연결하는 것이 보통이다. 그러나 배전선로에서는 그림 (c)와 같이 Y결선전원과 Y결선부하의 중성점 사이를 또 하나의 도선, 즉 중성선으로 연결하는 경우가 있다. 이 방식을 **3상4선식**이라고 한다. 4선식에 대하여 그림 (a), (b)와 같이 3선만을 쓰는 경우 **3상3선식**이라고 한다.

3상부하의 복소임피던스가 모두 같을 때 이것을 **평형부하**라고 하고, 그렇지 않은 것을 **불평형부하**라고 한다. 대전력 장거리 송전시에는 주로 3상4선식이 사용된다. 그 이유는 예기치 않은 부하의 큰 불평형으로 인한 좋지 않은 영향을 감소하기 위해서이다.

한 발전기가 3상전원을 이루는 것처럼 하나의 물리적 장치가 3상부하를 형성하는 경우가 많다. 예를 들면, 3상전동기는 등가적으로 하나의 평형  $\Delta$  또는 평형 Y 부하로 대표할 수 있다. 또 3상부하는 전등, 전기로 등의 단상부하를  $\Delta$  또

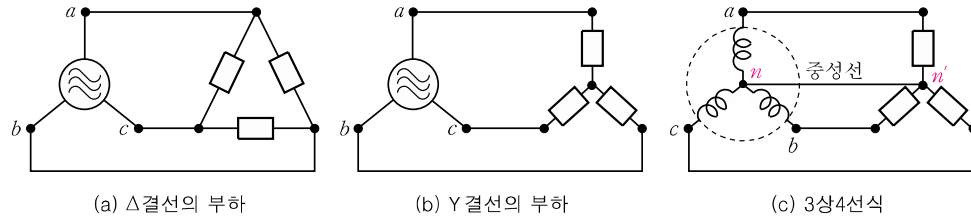


그림 24.5 각종 3상회로

는 Y형으로 접속함으로써도 형성된다. 이 경우에는 단상부하를 3상계의 각 상에 대략 동일하게 배당하여 평형부하가 되도록 노력하고 있다.

평형3상전원과 평형3상부하로 된 회로를 **평형3상회로**라고 하며, 그렇지 않은 것을 **불평형3상회로**라고 한다.

3상회로의 해석의 주과제는 3상전압이 주어졌을 때 회로 각부의 전류, 전압의 분포와 전력을 구하는 것이다. 이 경우 교류회로망의 일반적 해석법을 그대로 적용할 수 있으나 평형3상회로는 특별한 기교로써 해석을 간이화할 수 있다. 그러므로 우리는 주로 평형회로를 취급하고 불평형회로는 일반적인 망로해석법 또는 절점해석법을 적용하면 되므로 별도로 취급하지 않는다.

3상회로의 해석에 앞서 상순이 지정되어야 한다. 상순을 바꾼다는 것은 지면 상으로는 3선 중 임의의 두 선의 기호를 바꾸는 것을 의미한다. 실제적으로는 이것은 임의의 두 선을 서로 바꾸는 것을 의미하며, 이 경우 유도전동기 등의 회전방향이 반대가 된다.

## 24.3 상전원 및 3상전원의 등가변환

3상회로의 해석에서는  $\Delta$ 결선의 전원을 이와 등가적인 Y결선의 전원으로 또  $\Delta$ 결선의 부하를 이와 등가적인 Y결선의 부하로 대치한 다음(또는 반대로  $\Delta$ 로 대치한 다음) 생각하는 것이 편리할 때가 많다. 차차 알게 되겠지만 이와 같은 등가변환은 특히 평형3상회로의 해석에서 중요한 의미를 갖는다.

### 평형3상전압의 등가변환

먼저 그림 24.6의 (a), (b)에 표시한 내부임피던스가 0인 평형 Y전원과  $\Delta$ 전원의 상호변환을 고찰한다. 이 두 전원의 전압  $V_a, V_b, V_c$ 와  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ 가 어떤 특별한 관계를 가질 때 두 전원은 단자  $a, b, c$ 에 관하여 등가가 된다. 각 전원은 이상적으로 세 단자를 통하여 외부회로로 어떠한 전류가 유출되더라도 단자 전압은 일정하게 유지된다. 따라서 두 전원에서 대응하는 단자간 전압이 서로

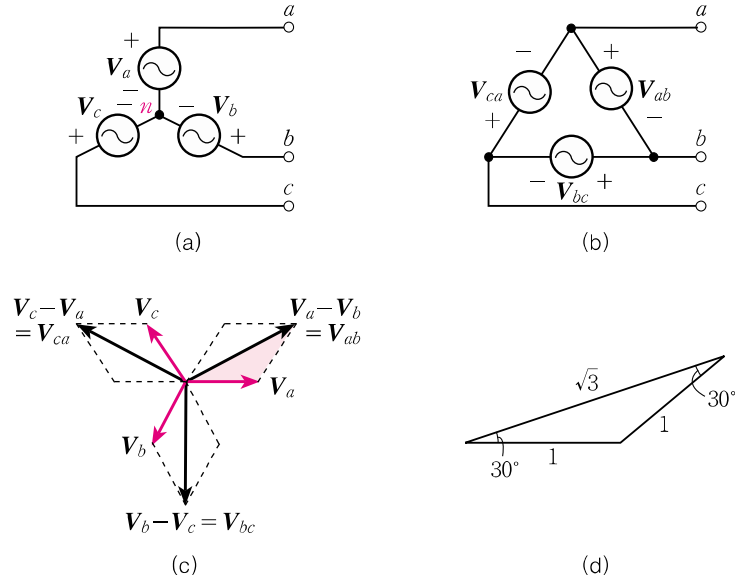


그림 24.6 이상적 평형 3상전원의 등가변환(상순은 abc)

동일하면 양자는 등가적이다. 즉, 등가조건은 다음과 같다.

$$V_{ab} = V_a - V_b, \quad V_{bc} = V_b - V_c, \quad V_{ca} = V_c - V_a \quad (24.3)$$

식 (24.3)의 관계는 페이지도를 그려보면 더욱 명백히 파악할 수 있다. 그림 24.6 (c)는 평형 Y전원의 전압의 상순이 abc 일 때  $V_a$ 를 기준으로 하여 페이지  $V_a, V_b, V_c$ 를 그리고, 이들의 차로부터 등가 $\Delta$ 전원의 각 전압  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ 의 페이지를 그린 것이다. 여기서  $V_a = V_m \angle 0^\circ$ 라 하면  $V_b = V_m \angle -120^\circ$ 가 되고,

$$V_{ab} = V_m - V_m(-0.5 - j0.866) = V_m(1.5 - j0.866) \quad (24.4)$$

따라서  $V_{ab} = \sqrt{3} V_a \angle +30^\circ$

마찬가지로  $V_{bc} = \sqrt{3} V_b \angle +30^\circ, \quad V_{ca} = \sqrt{3} V_c \angle +30^\circ$

$V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ 는 각각  $V_a, V_b, V_c$ 보다 위상이  $30^\circ$ 씩 앞서고, 크기는 전자가 후자의  $\sqrt{3}$  배와 같다. 그림 24.6 (a)는 이 삼각형의 세 변의 길이 관계를 확실하게 하기 위하여 그린 것이다.

그림 24.6 (a)의 Y결선의 3상전원에서 상전압  $V_a, V_b, V_c$ 를 선-중성점간 전압 ( $n$ 이 중성점)이라고도 하며, 단자  $a, b, c$  간의 전압  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ 를 선전압이라고 한다. 위에서 밝혀진 바에 의하여

평형 Y 전원에서는

$$\text{선전압의 크기} = \sqrt{3} \times (\text{상전압의 크기}) \quad (\text{평형 Y 전원에서}) \quad (24.5)$$

평형 Δ 전원에서는

$$\text{선전압의 크기} = \text{상전압의 크기} \quad (\text{평형 Δ 전원에서}) \quad (24.6)$$

그리고 식 (24.3)의 세 식을 합하든지 또는 그림 24.6 (d)의 페이지도로부터 평형 Δ 전원에서는

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0 \quad (\text{평형 Δ 전원에서}) \quad (24.7)$$

또 평형 Y 전원에서는

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (\text{평형 Y 전원에서}) \quad (24.8)$$

임을 알 수 있다. 평형 Δ 전원의 경우 세 전원이 루프를 형성하며 연결되어 있음에도 불구하고 외부단자에 회로가 연결되어 있지 않는 한 Δ 결선 내를 순환하는 전류는 없다. 이 사실은 각 상전원의 내부임피던스가 0이 아닐 때나 그것들이 같지 않을 때에도 상전압이 평형되어 있으면 성립한다. 일반적으로 평형 3상전압의 합은 0이 된다는 것을 기억해둘 필요가 있다.

### 3상부하의 등가변환

모든 Δ 회로는 이와 등가적인 Y 회로로 변환할 수 있으므로 3상부하는 Δ, Y 어느 쪽으로도 대표할 수 있다. 특히 평형 3상부하인 경우 Δ와 Y의 변환은

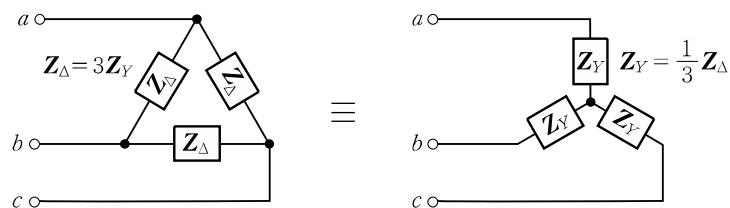


그림 24.7 평형 3상부하의 등가변환

$$Z_Y = \frac{1}{3} Z_{\Delta} \quad (24.9)$$

에 의하여 이루어진다. 그림 24.7에는 이것을 표시하였다. 각 부하에서 임피던스  $Z_Y$  또는  $Z_{\Delta}$ 를 상임피던스(phase impedance)라고 한다.

**[수치예]** Y결선 평형3상부하의 각 상임피던스가  $15+j3\Omega$ 이면 이와 등가인  $\Delta$ 결선의 상임피던스는  $45+j9\Omega$ 이다.

## 24.4 평형3상회로에 대한 등가단상회로

불평형3상회로의 해석은 일반적인 회로해석법을 적용하면 된다. 예컨대 그림

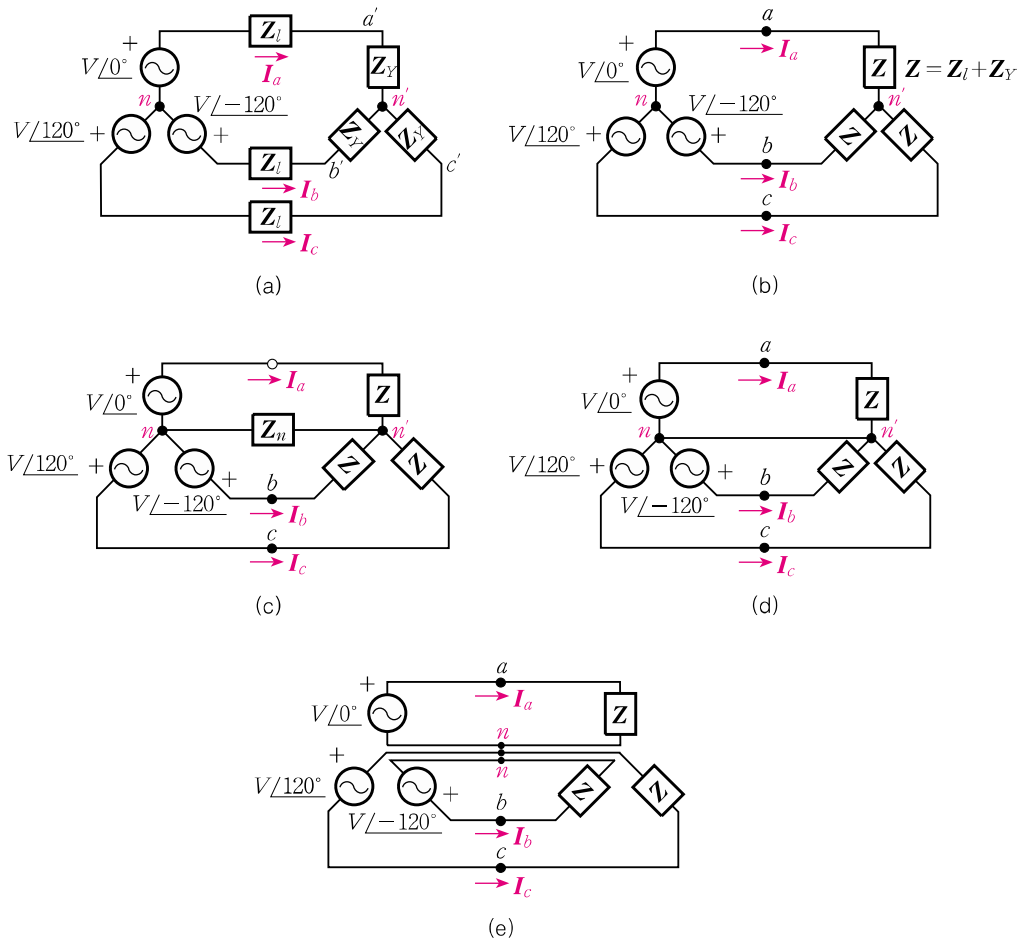


그림 24.8 평형3상회로 [(a) ~ (d)의 3상회로 및 (e)의 3개의 단상회로는 모두 등가]



24.8 (a)의 회로에서 전원, 부하의 한쪽 또는 양쪽이 다 불평형을 이루고 있을 때에는 2개의 망로전류를 가정하여 회로를 해석할 수 있다. 그러나 평형3상회로에 대해서는 이하에서 설명하는 매우 간단한 방법으로 해석할 수 있다.

앞의 절에서 설명한 바와 같이  $\Delta$ 전원이나  $\Delta$ 부하는 이것을 Y형으로 변환할 수 있으므로 3상3선식의 모든 평형3상회로는 그림 24.8 (a)와 같은 Y-Y 회로로 대표할 수 있다. 여기서 선임피던스  $Z_l$  및 부하임피던스  $Z_Y$ 를 하나의 임피던스  $Z$ 로써 대치하면 그림 (b)와 같이 된다. 이 회로에서 점  $n'$ 와  $n$  사이의 전압은

$$\begin{aligned} V_{nn'} &= V_a - ZI_a = V_b - ZI_b = V_c - ZI_c \\ \therefore 3V_{nn'} &= (V_a + V_b + V_c) - Z(I_a + I_b + I_c) \end{aligned}$$

우변에서 첫 번째 ( ) 안은 3상전원의 평형조건으로부터 0이 되고 두 번째 ( ) 안은 KCL에 의하여 0이 된다. 따라서

$$V_{nn'} = 0 \quad (24.10)$$

즉, 평형3상회로에서는 전원의 중성점과 부하의 중성점간의 전압은 항상 0이다. 그러므로 이 두 점 사이에 어떠한 임피던스를 연결해도 이를 통하여 전류는 흐르지 않는다. 따라서 그림 24.8 (c)와 같이  $n, n'$  간을 유한치의 임피던스  $Z_n$ 으로 연결하든지 또는 그림 (d)와 같이 단락하더라도 회로의 타부에는 전혀 영향을 주지 않는다. 이상으로 3선식이든, 4선식이든 평형3상회로는 모두 그림 24.8 (d)의 회로와 등가가 된다. 이 회로에서 폐로  $n-a-n'-n$ 에 연하여 KVL을 적용함으로써 선전류(line current)  $I_a$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$I_a = \frac{V_a}{Z} \quad (24.11)$$

$$\text{마찬가지로 } I_b = \frac{V_b}{Z}, \quad I_c = \frac{V_c}{Z}$$

지금 그림 24.8 (d)의 회로를 세 부분으로 분리하여 그림 (e)와 같이 하여 보면 이 3개의 단상회로의 각 전류는 식 (24.11)과 일치함을 볼 수 있다. 따라서 평형3상회로는 3개의 독립적인 단상회로로 대치하여 생각할 수 있다. 이 등가단상회로로부터 어느 한 상에 관한 전류, 전압이 구해지면 다른 상에 대한 것은  $120^\circ$ 의 상차만을 고려함으로써 곧 알 수 있다. 예를 들면, 상순이  $abc$  이고, 상전압이  $V$ ,  $Z = Z/\theta$  일 때 상  $a$ 의 선전류  $I_a$ 만을  $I_a = V/0^\circ / Z/\theta = (V/Z)/-\theta$ 에

의하여 구하면 다른 상의 선전류는  $I_b = I_a \angle -120^\circ$ ,  $I_c = I_a \angle +120^\circ$ 와 같이 된다[식 (24.1)]. 평형3상회로의 어느 부분에 나타나는 각 상의 전압들도 이와 같이 평형을 이룬다. 그러므로 각 상을 따로따로 생각할 필요가 없다. 전력도 등가단상회로에서 계산한 것을 3배하면 실제의 평형3상회로 전체의 전력이 된다.

이상과 같이 평형3상회로의 해석은 등가단상회로에 의하여 매우 간단하게 수행할 수 있다.

### 예제 24.1

그림 24.9 (a)의 회로에 대하여 (a) 선전류, (b) 부하전압, (c) 전원이 공급하는 총전력을 구하라.

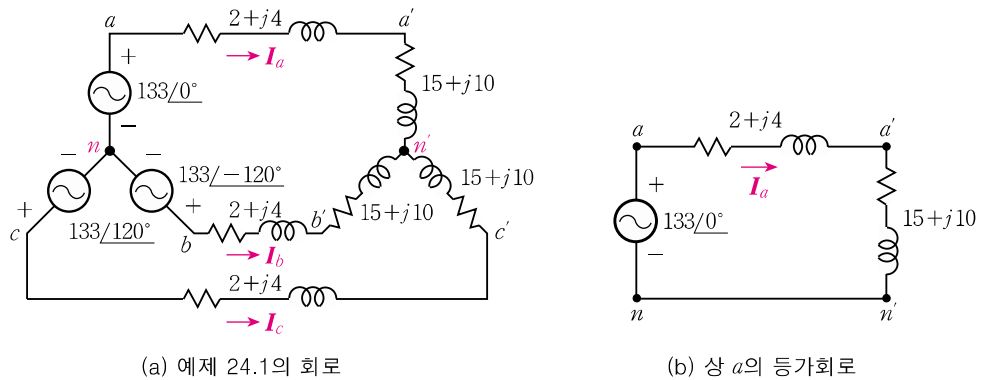


그림 24.9

### 풀이

평형회로이므로 그림 24.9 (b)와 같은 등가단상회로에 의하여 생각하는 것이 편리하다.

$$(a) \quad I_a = \frac{133 \angle 0^\circ}{2 + j4 + 15 + j10} = 6.04 \angle -39.5^\circ \text{ A}$$

$$\therefore I_b = 6.04 \angle -39.5 - 120^\circ \text{ A}, \quad I_c = 6.04 \angle -39.5 + 120^\circ \text{ A}$$

$$(b) \quad V_{a'n'} = I_a (15 + j10) = 6.04 \angle -39.5^\circ \times 18 \angle 33.7^\circ = 109 \angle -5.8^\circ$$

$$\therefore V_{a'n'} = 109 \angle -5.8^\circ - 120^\circ \text{ V}, \quad V_{c'n'} = 109 \angle -5.8^\circ + 120^\circ \text{ V}$$

$$(c) \quad \text{상 } a \text{의 전원이 공급하는 전력은 그림 24.9 (b)로부터 } 133 \times 6.04 \cos 39.5^\circ = 620 \text{ W,}$$

$$\text{또는 } (2+15) \times 6.04^2 = 620 \text{ W. 그러므로 3상전원이 공급하는 총전력은 } 620 \text{ W} \times 3 = 1860 \text{ W.}$$

## 24.5 평형3상부하에서의 선전류, 선전압과 상전압과의 관계

많은 경우 3상계통 전체가 아니라 부하측에서만 전압, 전력 등이 문제된다. Y 또는  $\Delta$ 로 결선된 3상부하에서 각 상임피던스를 흐르는 전류를 **상전류**, 상임피던스 양단의 전압을 **상전압**이라고 한다. 명백히 Y 부하에서는 선전류는 그대로 상전류가 되고 또  $\Delta$ 부하에서는 선전압이 그대로 상전압이 된다. 그러므로 우리는 Y 부하에서는 선전압과 상전압과의 관계,  $\Delta$ 부하에서는 선전류와 상전류와의 관계에 관심을 가진다. 이하 부하는 평형3상회로의 일부를 형성하고 있다고 가정한다.

### 평형 Y 부하에서의 선전압과 상전압

그림 24.10 (a)의 평형 Y 부하가 평형3상회로의 일부를 형성하고 있을 때 앞절에서 밝혀진 바와 같이 선전류  $I_a, I_b, I_c$ 가 평형을 이루고, 따라서 상전압  $V_{an}(=ZI_a)$ ,  $V_{bn}(=ZI_b)$ ,  $V_{cn}(=ZI_c)$ 도 평형을 이룬다. 선전압  $V_{ab}$ 는

$$V_{ab} = V_a - V_b$$

여기서 상순을  $abc$ 라 하면 그림 (b)의 페이저도에서 그림 24.6 (d)를 참고로

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_a$$

그러므로 선전압 및 상전압의 크기를 각각  $V_L, V_P$ 라 하면

$$V_L = \sqrt{3} V_P \quad (\text{평형 Y 부하에서}) \quad (24.12)$$

이 관계는 반드시 기억해야 한다.

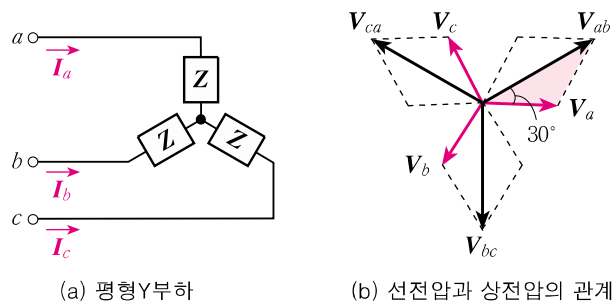


그림 24.10

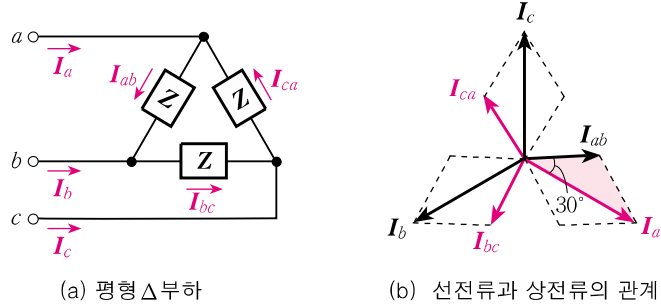


그림 24.11

### 평형 $\Delta$ 부하에서의 선전류와 상전류

그림 24.11 (a)의 평형  $\Delta$  부하가 평형 3상 회로의 일부를 형성하고 있을 때 앞절에서 밝혀진 바에 의하여 선전압  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ 는 평형을 이루고, 따라서 상전류  $I_{ab}(=V_{ab}/Z)$ ,  $I_{bc}(=V_{bc}/Z)$ ,  $I_{ca}(=V_{ca}/Z)$ 도 평형을 이룬다. 선전류는

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}$$

그림 (b)의 페이저도로부터 그림 24.6 (d)를 참고로

$$I_a = \sqrt{2} I_{ab} \quad (24.13)$$

그러므로 선전류 및 상전류의 크기를  $I_L, I_p$ 라 하면

$$I_L = \sqrt{3} I_p \quad (\text{평형 } \Delta \text{ 부하에서}) \quad (24.14)$$

이 관계도 반드시 기억해야 한다.

- 
- [수치예]** (a) 평형 3상계통에서 선전압이 240V일 때  $\Delta$ 결선전원(또는  $\Delta$ 결선부하)의 상전압은 240V이고 Y결선전원(또는 Y결선부하)의 상전압은  $240/\sqrt{3}$  V이다.
- (b) 평형 3상계통에서 선전류가 20A일 때 Y결선전원(또는 Y결선부하)의 상전류는 20A이고  $\Delta$ 결선전원(또는  $\Delta$ 결선부하)의 상전류는  $20/\sqrt{3}$  A이다.
- (c) 선전압  $V_L$ 인 평형 3상계통에서 부하로서 동일  $Z$  3개를  $\Delta$ 결선한 경우의 선전류와 Y결선한 경우의 선전류의 비는  $\sqrt{3} \left( \frac{V_L}{Z} \right) : \frac{V_L/\sqrt{3}}{Z} = 3 : 1$
-

**예제 24.2**

그림 24.12 (a)의 회로에서 Y부하와  $\Delta$ 부하가 병렬연결되어 있다. 등가단상회로를 그리고, 이로부터 선전류의 실효치  $I_a$  및 부하측에서의 선간전압의 실효치  $V_{ab}$ 를 구하라.

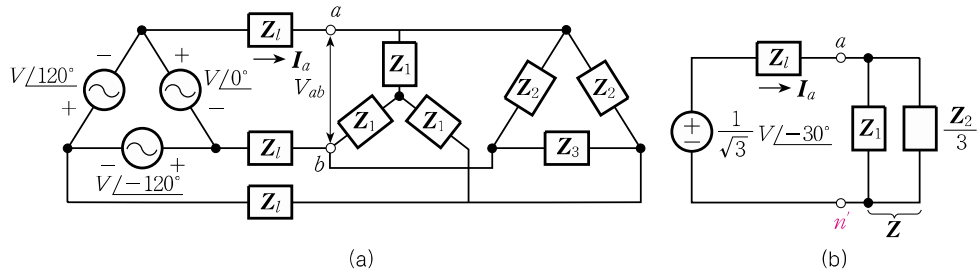


그림 24.12 예제 24.2의 회로

**풀이**

전원 및  $\Delta$ 부하를 Y형으로 변환한 다음 등가단상회로를 그리면 그림 24.12 (b)와 같다 (그림 24.6 (c) 참조). 이로부터

$$I_a = \frac{(1/\sqrt{3}) V / -30^\circ}{Z_l + Z}, \quad \text{단 } Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2/3}{Z_1 + Z_2/3}$$

또 이 등가회로에서 선-중성점간 전압은

$$V_{an'} = \frac{1}{\sqrt{3}} V / -30^\circ \frac{Z}{Z_l + Z}$$

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_{an'} / 30^\circ = V / 0^\circ \frac{Z}{Z_l + Z} \quad (\text{그림 24.10 (b) 참조})$$

선전류, 부하선간전압의 실효치는 각각  $|I_a|$ ,  $|V_{ab}|$ 로부터 구해진다.

**24.6 3상회로의 전력**

3상회로의 전력계산은 각 상에 대한 것을 기초로 한다. 즉, Y,  $\Delta$ 에 불구하고 또 평형, 불평형에 불구하고 각 상에 대한 평균전력의 합 및 무효전력의 합이 각각 3상 전체의 평균전력 및 무효전력을 준다. 특히 모든 평형3상회로는 그림 24.8 (e)와 같은 3개의 단상회로로 대표할 수 있으므로 한 상에 대한 평균전력  $P_p$  및 무효전력  $Q_p$ 의 3배가 3상 전체의 평균전력  $P$  및  $Q$ 를 준다. 즉,

$$P_p = V_p I_p \cos \theta = R_p I_p^2 \quad (24.15)$$

$$Q_p = V_p I_p \sin \theta = X_p I_p^2 \quad (24.16)$$

$$P = 3P_p = 3 V_p I_p \cos \theta \quad (24.17)$$

$$Q = 3Q_p = 3 V_p I_p \sin \theta \quad (24.18)$$

$$\text{단, } \theta = \tan^{-1} \frac{X_p}{R_p} = \cos^{-1} \frac{R_p}{Z_p} = \sin^{-1} \frac{X_p}{Z_p} \quad (24.19)$$

위에서  $V_p, I_p, R_p, X_p$ 는 각각 한 상(相)의 전압, 전류, 저항 및 리액턴스이며, 또  $\theta$ 는 상전압과 상전류의 상차인 동시에 상임피던스  $Z_p$ 의 각과 같다.

많은 경우 선전압과 선전류로 전력을 표시하는 것이 요망된다. 평형 Y 부하에 대해서는  $V_p = V_L / \sqrt{3}$ ,  $I_p = I_L$ 을, 평형  $\Delta$  부하에 대해서는  $V_p = V_L$ ,  $I_p = I_L / \sqrt{3}$ 을 식 (24.17), (24.18)에 대입하면 어느 경우에도나

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \quad (24.20)$$

$$Q = \sqrt{3} V_L I_L \sin \theta \quad (24.21)$$

이 식을 이용할 때 특히 주의할 것은  $\theta$ 가 선전압과 선전류와의 상차가 아니라는 것이다.

평형 3상 회로의 피상전력(볼트-암페어)도 단상 회로에서와 같이

$$VA = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (24.22)$$

에 의하여 정의되며, 따라서 그 역률은

$$\text{pf} = \frac{P}{VA} = \cos \theta \quad (24.23)$$

여기서  $\theta$ 는 상임피던스의 각과 같다.

---

**[수치예]** 선전압이 240 V, 선전류가 20 A인 평형 3상 계통에서 부하에 공급되는 총 전력은 부하가  $\Delta$  연결, Y 연결에 관계없이  $\sqrt{3} \times 240 \times 20 \cos \theta$  W이다. 여기서  $\theta$ 는 부하 임피던스의 각이다.

---

### 예제 24.3

그림 24.13에서와 같이 평형  $\Delta$  부하에 평형 3상 전압이 인가되어 있다. 선전류, 전(全) 전력, 무효전력, 피상전력 및 역률을 구하라.

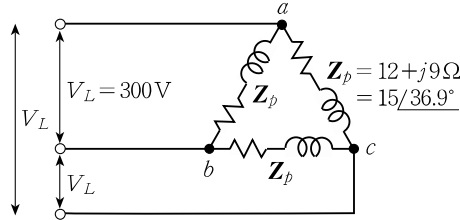


그림 24.13 예제 24.3의 회로

**풀이**

$$V_p = V_L = 300 \text{ V}$$

$$I_p = \frac{V_p}{Z_p} = \frac{300}{15} = 20 \text{ A}$$

$$\therefore I_L = \sqrt{3} I_p = \sqrt{3} \times 20 = 34.64 \text{ A}$$

$$P = 3P_p = 3R_p I_p^2 = 3 \times 12 \times 20^2 = 14,400 \text{ W}$$

$$Q = 3Q_p = 3X_p I_p^2 = 3 \times 9 \times 20^2 = 10,800 \text{ var}$$

$$VA = \frac{P}{\cos \theta} = \frac{14,400}{\cos(36.9^\circ)} = 18,000 \text{ VA}$$

$$\text{pf} = \cos \theta = \cos 36.9^\circ = 0.80 \text{ 지상}$$

**예제 24.4**

그림 24.14와 같이 선간전압 1143 V하에 지상역률 0.89로 75 kW를 취하는 평형3상부하가 있다. 부하의 역률을 0.95로 올리기 위하여 3개의 커패시터를  $\Delta$  또는 Y로 결선하여 부하와 병렬로 연결한다. 각 경우에 필요한 커패시터의 커패시턴스를 구하라. 단, 주파수는 60 Hz이다.

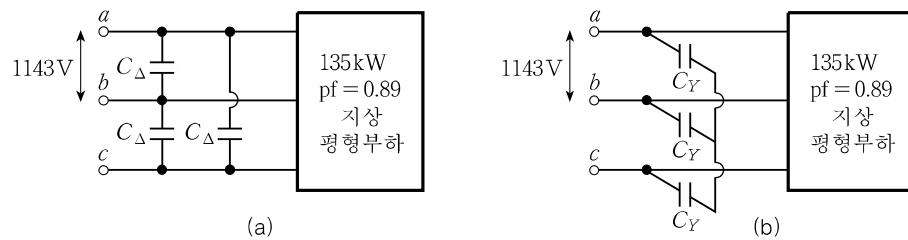


그림 24.14 역률개선용 커패시터의 두 가지 결선법

**풀이**

등가단상회로는  $1143/\sqrt{3} = 660 \text{ V}$ 에 역률 0.89,  $P = 135/3 = 45 \text{ kW}$ 의 부하를 연결한 것과 같다( $Q = 28.9 \text{ kvar}$ ). 그러므로 이 문제는 예제 12.5의 문제에 귀결하고 소요의  $C_Y = 50 \mu\text{F}$ , 따라서  $C_\Delta = 50/3 = 27 \mu\text{F}$ .

### 평형3상계통의 전순간전력

평형3상전원에 의하여 평형부하에 공급되는 전순간전력은 시간에 관계없이 일정하며, 따라서 전(全)순간전력은 전평균전력과 같게 된다. 즉, 그림 24.15에서 보는 바와 같이

$$\text{전순간전력 } p = p_a + p_b + p_c = \text{일정} = \text{전평균전력} \quad (24.24)$$

(이 증명은 연습문제 24.13으로 미룬다) 그러므로 3상전동기(평형부하임)에 유입하는 순간전력은 시간에 관계없이 일정한 회전력(torque)을 발생시키며, 따라서 3상전동기는 단상전동기에 비해서 진동, 따라서 잡음이 매우 적고 또 시동이 용이하다.

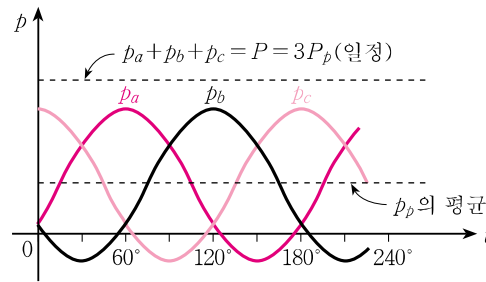


그림 24.15 평형3상회로의 순간전력의 총합

## 24.7 3상전력의 측정

3상부하에 공급되는 전력은 수개의 단상전력계를 써서 측정할 수 있다.

### 전 력 계

그림 24.16은 전력계의 기호이다. 여기서 인덕턴스의 기호는 전류코일을, 또 저항의 기호는 전압코일과 고저항의 직렬을 나타낸다. 양 코일의 한쪽 단자에는  $\pm$ 의 기호가 붙어 있다.

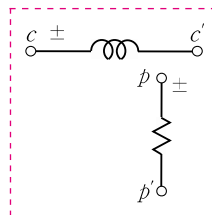


그림 24.16 전력계의 기호



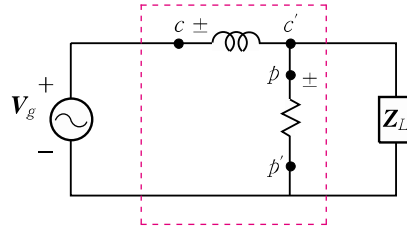


그림 24.17 부하전력 측정시의 전력계의 두 코일의 연결방법

전력계를 그림 24.17과 같이 전원과 부하 사이에 삽입할 때 전력계의 지시를  $W$  라 하면

$$W = V_{pp'} I_{cc'} \cos(\angle V_{pp'}, \angle I_{cc'}) \quad (24.25)$$

와 같이 된다. 여기서  $(V_{pp'}, I_{cc'})$ 는  $V_{pp'}$ 가  $I_{cc'}$ 보다 앞서는 위상각을 의미한다.

### 3상 전력계법

3상4선식 회로에서는 그림 24.18과 같이 3개의 전력계를 중성선과 각 선 사이에 연결하면

$$\text{전력계 } W_a \text{의 지시} = V_{an} I_{an} \cos(\angle V_{an}, \angle I_{an}) = Z_a \text{에 공급되는 전력}$$

마찬가지로  $W_b$ ,  $W_c$ 의 지시는 각각  $Z_b$ ,  $Z_c$ 에 공급되는 전력을 나타낸다. 따라서 세 전력계의 지시의 합은 부하에 공급되는 총전력을 나타낸다. 평형부하인 경우에는 총전력은 하나의 전력계의 지시의 3배가 됨은 물론이다.

$\Delta$ 결선이나 중성선이 외부에서 이용될 수 없는  $Y$ 결선에서는 그림 24.19와 같

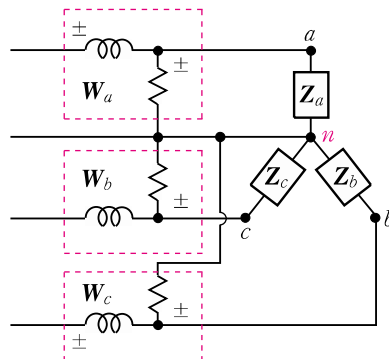


그림 24.18 3상4선식에서의 전력측정

이 연결한다. 그림 (a)에서는 3개의 단상전력계가 대칭적으로 각 선에 연결되어 있으며, 전압코일의 공통접속점  $n'$ 는 부하의 중성점과 연결되어 있지 않다. 이 경우 식 (24.25)에 의하여

전력계  $W_a$ 의 지시  $= (v_{an} + v_{nn'})i_{an}$ 의 평균치

전력계  $W_b$ 의 지시  $= (v_{bn} + v_{nn'})i_{bn}$ 의 평균치

전력계  $W_c$ 의 지시  $= (v_{cn} + v_{nn'})i_{cn}$ 의 평균치

$\therefore$  세 전력계의 지시의 대수적 합

$$= [v_{an}i_{an} + v_{bn}i_{bn} + v_{cn}i_{cn} + v_{nn'}(i_{an} + i_{bn} + i_{cn})] \text{의 평균치}$$

$$= [v_{an}i_{an} + v_{bn}i_{bn} + v_{cn}i_{cn}] \text{의 평균치}$$

$$= \text{부하에 공급되는 평균전력의 합} \quad (24.26)$$

앞에서 KCL에 의하여 ( ) 안의 세 전류의 합은 0이 된다.

## 2전력계법

식 (24.26)은 점  $n'$ 의 전위 여하에 불구하고 성립하므로 특히  $n'$ 이 한 선, 예를 들면 그림 24.19 (b)와 같이 선  $c$ 에 연결되는 경우에도 성립한다. 이때에는  $W_c$ 의 지시는 0이 되므로  $W_c$ 는 불필요하다. 즉, 2개의 전력계를 이용하여 3상 전력을 측정할 수 있다. 이 방법을 **2전력계법**이라고 하며 3상전력 측정에 가장 널리 사용된다. 이 방법에서 주목되는 사실을 들면

- (1) 부하가 Y,  $\Delta$ 에 불구하고 또 평형, 불평형에도 불구하고 이 방법은 적용된다.
- (2) 전류, 전압이 사인파가 아니더라도(따라서 부하가 비선형이더라도) 동일주

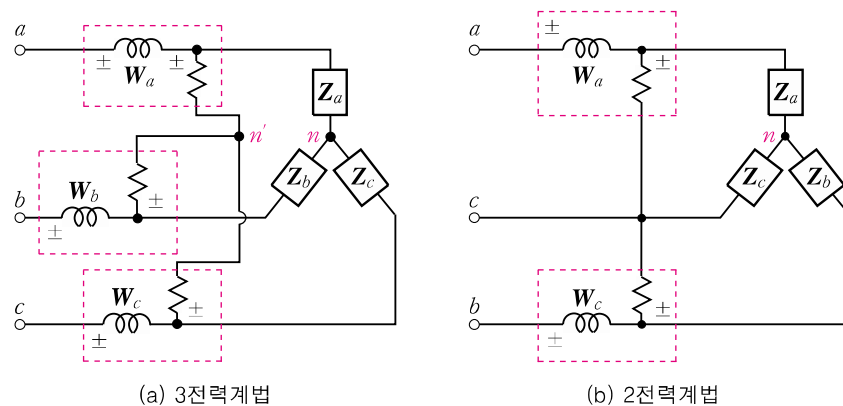


그림 24.19 3상3선식에서의 실제적인 전력측정방법

기를 갖는 주기파이면 이 방법은 적용된다. [식 (24.26)의 유도는 전류, 전압의 순간치를 써서 했다는 것을 주목하라]

- (3) 두 전력계는 동일한 것이 아니라도 무방하다.
- (4) 한쪽 전력계의 지시가 -가 될 때가 있다. 이때에는 그 전력계의 한쪽 코일을 반대극성으로 접속하여 +의 지시치를 읽어야 하며, 전전력은 두 전력계의 지시의 차로 구해진다. 수동부하에 공급되는 전전력은 +이므로 큰 쪽의 지시는 항상 +이다.

---

**[수치예]** 2전력계법에 의하여 3상부하전력을 측정하려고 하였더니, 한쪽은 3kW를 지시하였고 다른 쪽은 지침이 반대로 움직이려고 하였으므로 그 전압코일을 반대극성으로 하여 측정하였더니 1kW를 지시하였다면, 전부하력은  $3 - 1 = 2\text{kW}$

---

## 연/습/문/제

**24.1** 그림 p 24.1의 평형 Y결선 3상회로에서  $R=6\Omega$ ,  $L=0.01\text{H}$ , 주파수  $f=60\text{Hz}$ , 선간전압의 크기  $=200\text{V}$ 이다. 다음을 구하라.

- (a) 부하의 각 상임피던스  $Z$       (b) 부하의 역률  
(c) 선전류의 크기  $I_L$       (d) 부하의 상전압의 크기  $V_p$   
(e) 부하의 전소비전력  $P$

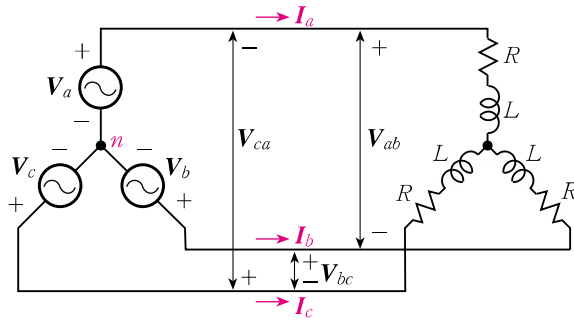


그림 p 24.1

**24.2** 그림 p 24.2의 평형  $\Delta$ 결선회로에서  $R=10\Omega$ ,  $L=0.02\text{H}$ , 주파수  $f=60\text{Hz}$ , 선간전압의 크기  $=200\text{V}$ 이다. 다음을 구하라.

- (a) 부하의 각 상임피던스  $Z$       (b) 부하의 역률  
(c) 선전류의 크기  $I_L$       (d) 부하의 상전압의 크기  $V_p$   
(e) 부하의 전소비전력  $P$

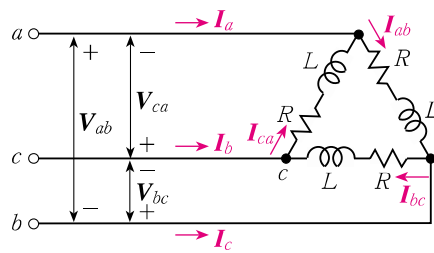


그림 p 24.2

**24.3** 3개의 동일한 임피던스가 있다. 이것을 Y로 결선하여 선간전압  $200\text{V}$ 의 평균 3상선에 연결할 때 선전류가  $10\text{A}$ 였다고 한다. 여기서 다음 표의 왼쪽欄과 같이 전원 및 부하의 결선을 여러 가지로 바꿀 때 상전압, 상전류, 선전

류들이 어떻게 변하는지 공란에 기입하라. 단, 선간전압은 항상 200V로 유지된다고 가정하자.

| 결 선 방 식  |          | 전 원   |       | 선 로   | 부 하   |       |
|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 전 원      | 부 하      | $V_p$ | $I_p$ | $I_L$ | $V_p$ | $I_p$ |
| Y        | Y        |       |       | 10 A  |       |       |
| Y        | $\Delta$ |       |       |       |       |       |
| $\Delta$ | Y        |       |       | 10 A  |       |       |
| $\Delta$ | $\Delta$ |       |       |       |       |       |

- 24.4 그림 p 24.4와 같은 평형3상회로에서 전원전압의 크기=220V, 선로임피던스  $Z_l = 2 + j4 \Omega$ , 부하임피던스  $Z = 10 + j2 \Omega$ 일 때 선전류 및 부하단자간 전압의 크기를 구하라.

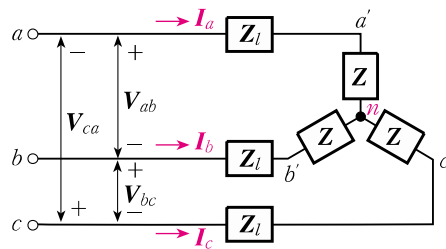


그림 p 24.4

- 24.5 Y로 결선된 세 임피던스  $Z_1 = 40 + j30 \Omega$ 과  $\Delta$ 로 결선된 세 임피던스  $Z_2 = 240 - j450 \Omega$ 이 그림 p 24.5와 같이 병렬로 연결되어 있다. 173V의 평형3상 전압이 인가될 때 선전류, 역률 및 전전력을 구하라. (힌트 : 등가단상회로를 그리면 그림 10.8과 같이 되므로 그 결과를 이용하라)

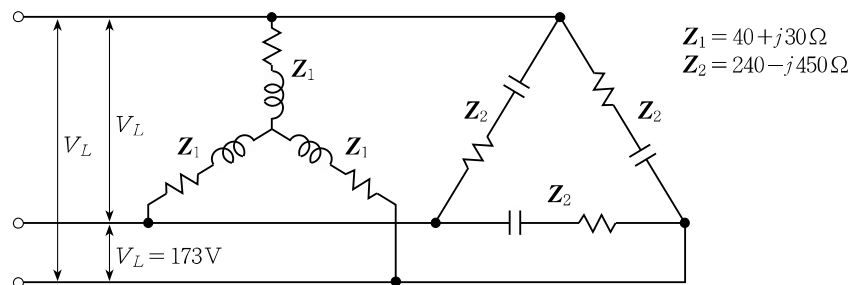


그림 p 24.5

**24.6** 그림 p 24.5의 부하가 임피던스  $Z_l = 2 + j3 \Omega$  인 선로를 통하여 전력을 공급 받고 있을 때, 송전단에서의 선간전압 및 역률을 구하라. (힌트 : 등가단상회로 그려서 생각하라)

**24.7** 그림 p 24.7에서 상순  $abc$  인 평형3상전압이 불평형 $\Delta$ 회로에 인가되고 있다. 각 선전류의 크기  $I_a, I_b, I_c$ 를 구하라. (힌트 : 등가Y 회로를 그리고 2개의 망로방정식을 써라)

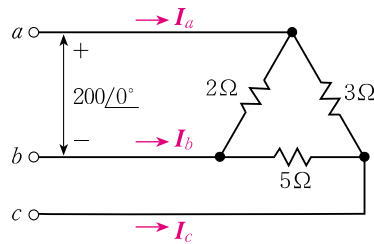


그림 p 24.7

**24.8** 2개의 평형3상부하가 평형3상선에 병렬로 연결되어 있다. 제 1 부하는 지상역률 0.5로 50kW를 취하고, 제 2 부하는 지상역률 0.707로 20kW를 취한다. 이 두 부하가 저항  $1.0 \Omega$ , 인덕티브 리액턴스  $1.0 \Omega$ 을 갖는 급전선을 통하여  $\Delta$ 결선으로 된 평형발전기로부터 전력을 공급받고 있다. 부하측의 선간전압이 230V일 때 다음을 구하라. (힌트 : 등가단상회로를 생각하라)

- |               |               |
|---------------|---------------|
| (a) 부하의 합성역률  | (b) 선전류       |
| (c) 송전단의 선간전압 | (d) 송전단에서의 역률 |

**24.9** 위 문제 24.8의 전력계통에서

- (a) 부하의 합성역률을 0.8로 개선하기 위하여 부하단자간에 연결해야 할 커패시터의 kVA 정격(定格)을 결정하라.
- (b) 이와 같은 역률개선의 결과로 선로손실( $R_l I_l^2$ )은 얼마나 감소되었는가? 단, 부하측의 선간전압 230V는 그대로 유지된다고 가정하라.

**24.10** 3상부하에 공급되는 전력을 2전력계통을 이용하여 측정하려고 하였더니 하나는 10.5kW를 지시하고 또 하나는 지침이 반대방향으로 움직이려고 하였으므로 전압코일의 극성을 반대로 하여 측정하였더니 6.3kW를 지시하였다.

- (a) 부하에 공급된 총전력은 얼마인가?
- (b) 이 결과는 회로가 평형이 아닐 때에도 맞는가?

**24.11** 평형3상계통에서 부하에 공급되는 피상전력이  $24\text{kVA}$ 이고 부하임피던스의 각이  $30^\circ$ 이다. 한 상당 평균전력을 구하라.

**24.12** 그림 p 24.12는 주택가에서 흔히 보는 주상단상변압기이다. 1차측은 단상  $13.8\text{kV}$ , 2차측은 중앙 탭에 연결된 선을 이용하여 수개의 호구에  $120\text{V}$  및  $240\text{V}$ 을 공급하고 있다. 지금 10개의 호구에 호구당  $100\text{A}$ 을 공급해야 한다면 요구되는 변압기의 용량  $[\text{VA}]$ 과 1차의 최대전류를 구하라.

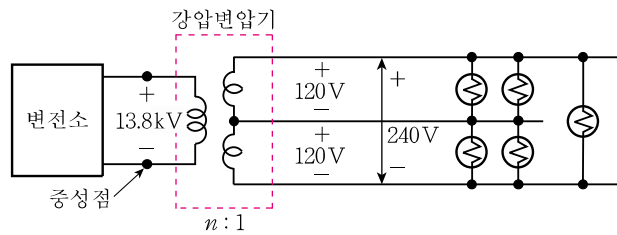


그림 p 24.12

**24.13** 식 (24.24)를 유도하라.