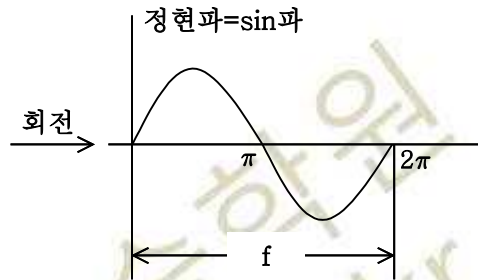
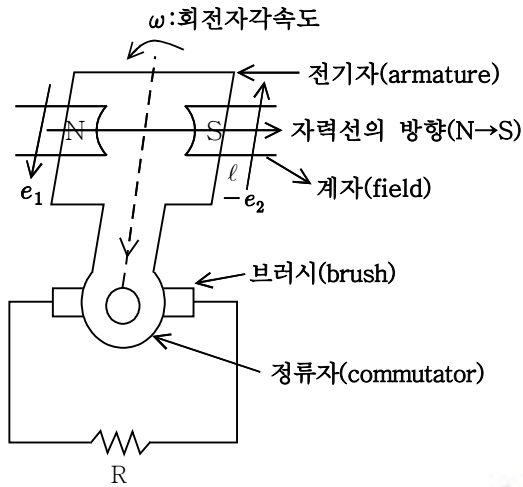


# 제1장 직류기

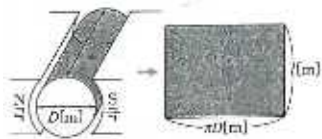
## 1. 직류 발전기의 원리 및 구조



(1) 도체 1개에 유도된 기전력

$$e = BlV [V] \begin{cases} B : \text{자속밀도} [Wb/m^2] \\ l : \text{도체의 길이} [m] \\ V : \text{주변속도} [m/s] \end{cases}$$

1) 자속밀도(B)



원의 표면적

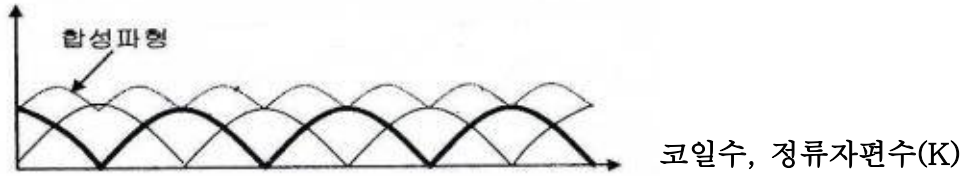
$$: S = 2\pi r l = 2\pi \times \frac{D}{2} \times l = \pi D l$$

$$B = \frac{\text{총자속수}}{\text{전기자표면적}} = \frac{\phi}{\pi D l} = \frac{P\phi}{\pi D l} [Wb/m^2]$$

2) 주변 속도(기준 : 초당)  $\begin{cases} \text{초당 속도}(n) : [rps] \\ \text{분당 속도}(N) : [rpm] \end{cases}$

○  $V = \text{원의 둘레} \times \text{초당 속도} = \pi D n = \pi D \frac{N}{60} [m/s]$

(2) 정류자를 통과한 파형 → 직류 파형



1) 도체수 및 정류자편수가 적은 상태에서 합성하면 최대 및 최소의 차가 큰 맥류 전압이 발생

→ 방지대책 : 도체수 및 정류자편수를 많이 감으면 거의 맥동이 없는 크기가 일정한 직류 파형을 얻을 수 있다.

2) 위상차 :  $\theta = \frac{\text{한주기}}{\text{정류자편수}} = \frac{2\pi}{K}$

(3) 직류기의 구조

1) 계자(field : 자석, 극수) : 자속을 만드는 부분

2) 전기자(armature) : 자속을 절단하여 기전력을 유도하는 부분

3) 정류자(commutator)

: 브러시와 접촉하여 전기자에 유도된 교류기전력을 직류로 변환하는 부분

4) 브러시(brush)

① 정류자면과 접촉하여 전기자권선과 외부 회로 연결

② 브러시홀더(brush holder)

: 브러시를 정류자면에 일정한 압력으로 접촉시키는 장치

→  $0.15 \sim 0.25 [\text{kg}/\text{cm}^2]$

③ 로커(rocker) : 브러시 홀더를 정류자면에 따라 이동시키는 경우 사용

④ 브러시 종류

• 탄소 브러시(carbon brush)

: 전류용량이 적은 소형기, 저속기에 사용(직류기)

• 전기흑연 브러시(electro graphite brush)

: 접촉저항 및 마찰계수가 크므로 각종 기계에 광범위하게 사용

• 금속흑연 브러시(metallic carbon brush) : 저전압, 대전류

※ 직류기 3대 요소 : 전기자, 계자, 정류자

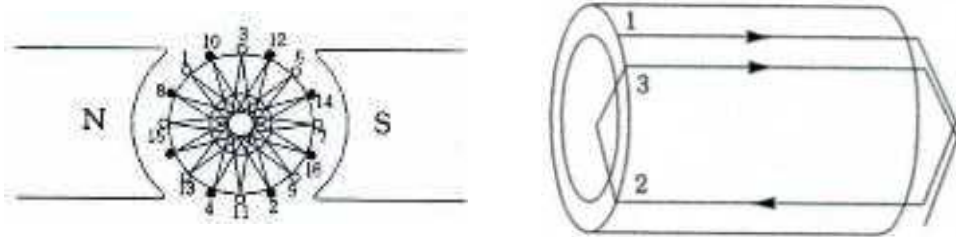
2. 전기자권선법(armature winding)

: 많은 도체가 전기자표면에 등간격으로 축과 평행하게 슬롯 안에 배치되어 있으므로 위상과 시간에 따라 서로 다른 방향의 유기기전력이 발생하고 서로 상

쇄됨이 없이 완전히 이용될 수 있도록 접속하는 방법

→ 직류기에는 고상권, 폐로권, 이층권 사용

(1) 고상권(drum winding) : 원통형 철심 표면에만 권선을 배치하는 방법

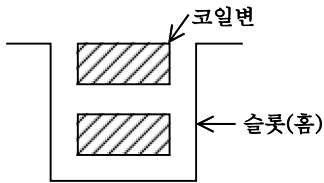


(2) 폐로권

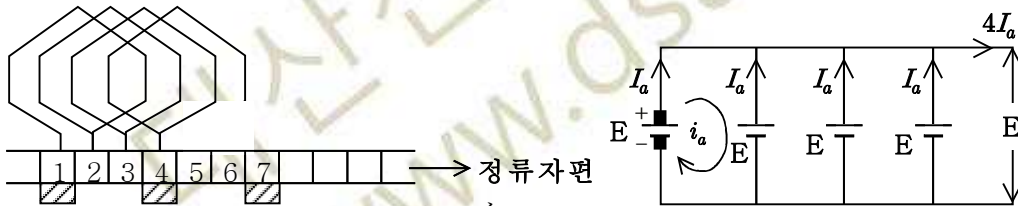
○ 권선의 시종점이 없이 폐회로를 이루고 있는 권선법

(3) 이층권

○ 1개의 슬롯에 코일변을 상하로 넣는 방법



1) 중권(lap winding, 병렬권)



$a$  : 병렬회로수,  $p$  : 극수,  $B$  : 브러시수

① 병렬회로수 :  $a = p = B$  (다중도  $m$ 이 주어진 경우 :  $a = mp$ )

※ 다중도 : 1주 1회의 독립된 권선이 2~3개 있는 것

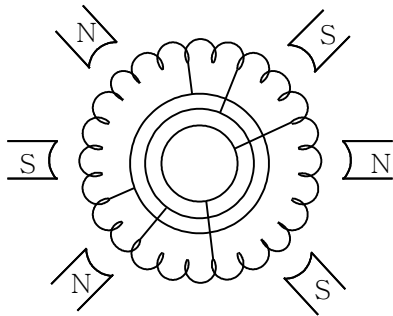
② 병렬회로에 흐르는 전류

$$i_a = \frac{I_a}{a} = \frac{I_a}{p} \text{ [A]} (I_a : \text{전기자전류})$$

③ 정류자편수

$$K = \frac{\text{총도체수}}{2} = \frac{\text{전슬롯수} \times \text{한 슬롯내 코일변수}}{2}$$

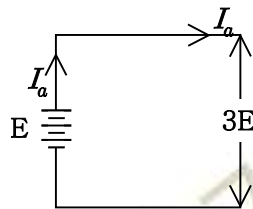
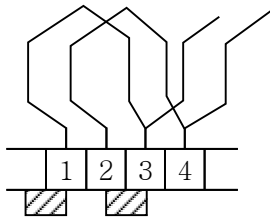
④ 균압환(균압결선) 설치 : 기전력의 차 보상(정류 양호)



균압환 : 중권과 같이 다극기에서는 각 병렬회로의 발생 기전력은 재료의 불균질, 공작상의 오차 등에 의해서 각 자극의 자기저항에 차가 발생하고 이것으로 인하여 브러시 사이의 각 회로에도 기전력의 차가 발생하여 기계기구가 과열되는 것을 방지하기 위해서 설치

⑤ 용도 : 저전압, 대전류

2) 파권(wave winding, 직렬권)



① 병렬회로수 :  $a=2$

② 회로에 흐르는 전류

$$i_a = \frac{I_a}{a} = \frac{I_a}{2} \text{ [A]}$$

③ 용도 : 고전압, 소전류

3) 정류자편간 평균전압

$$e_k = \frac{E \cdot a}{k} \text{ [V]}$$

$E$  : 유기기전력,  $a$  : 병렬회로수(중권  $a=p$ , 파권 :  $a=2$ )

$k$  : 정류자편수

### 3. 도체 전체에 유도되는 기전력(유기기전력)

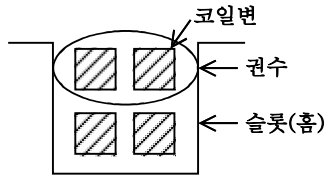
$E$ =도체 1개에 유기되는 기전력×도체수

$$= Blv \times \frac{Z}{a} = \frac{P\phi}{\pi D l} \times l \times \pi D \frac{N}{60} \times \frac{Z}{a} = \frac{PZ}{60a} \phi N = K\phi N$$

(1)  $P$  : 극수

(2)  $Z$  : 총도체수

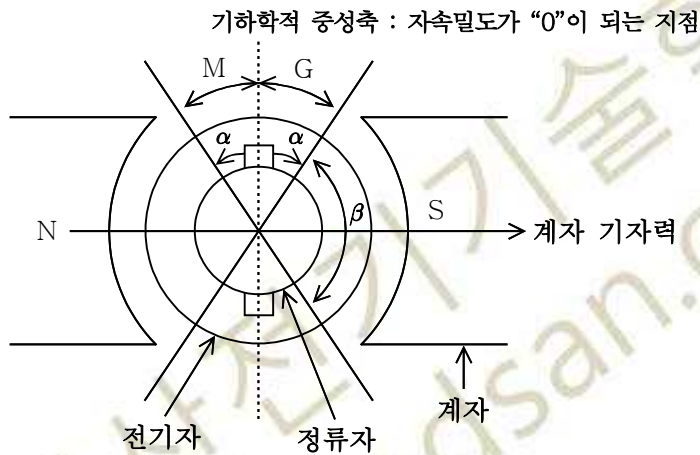
$Z$ =전슬롯수×한 슬롯내 코일변수(권수×2)



- (3)  $\phi$  : 자속[Wb]
- (4)  $a$  : 병렬회로수(중권 :  $a=P$ , 파권 :  $a=2$ )
- (5)  $N$  : 분당 회전수[rpm]

#### 4. 전기자 반작용

- (1) 정의 : 부하 접속시 전기자권선에 흐르는 전류로 인하여 주자속(계자극)에 영향을 주는 현상



- (2) 전기각도

1) 공식 : 전기각도 = 기하각도  $\times \frac{P}{2}$

2) 각도 : 전기각도 =  $\frac{360}{\text{슬롯수}} \times \frac{P}{2}$

※ 전기각도 : 증성축과 자극축 사이의 각도

기하각도 : 전기자가 1회전시 각도( $2\pi$ )

- (3) 교차기자력과 감자기자력이 발생

- 1) 교차기자력 (cross mageneto motive force)

○ 전기자기자력이 계자기자력과 전기각도  $\pi/2$ 의 방향으로 발생하는 현상

$$AT_c = \frac{I_a Z}{2ap} \cdot \frac{\beta}{\pi} = K \frac{\beta}{\pi} (\beta = \pi - 2\alpha)$$

- 2) 감자기자력 (demagnetizing mageneto motive force)

- 브러시를 중성축으로 이동시킨 다음 이 각도에 의해 도체에 발생하는 기자력은 계자기자력과 반대방향이 되어 기자력이 감소하는 현상

$$AT_d = \frac{I_a Z}{2ap} \cdot \frac{2\alpha}{\pi} (\alpha : \text{브러시 이동각})$$

(4) 전기자반작용 영향

1) 편자작용 발생

- ① 부하 접속시 전기자 및 계자전류로 인하여 자속 분포가 한쪽으로 기울어지는 현상
- ② 중성축 이동  $\begin{cases} \text{발전기 : 회전방향} \\ \text{전동기 : 회전반대방향} \end{cases}$

2) 감자작용 발생

- 기계 내부에는 철심의 자기 포화 현상으로 인하여 극당 자속이 감소되는 현상

① 발전기

- 유기기전력 감소 :  $\downarrow E = K \downarrow \phi N$

② 전동기

- 유기기전력(역기전력) 감소 :  $\downarrow E = K \downarrow \phi N$
- 토크(회전력) 감소 :  $\downarrow T = K \downarrow \phi I_a$

- 회전속도 증가 :  $\uparrow n = K \frac{E}{\downarrow \phi}$

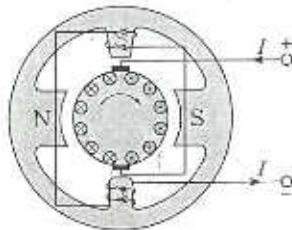
(5) 방지대책

1) 중성축이 이동하는 방향으로 브러시 이동

- $\begin{cases} \text{발전기 : 회전방향} \\ \text{전동기 : 회전반대방향} \end{cases} \rightarrow \text{보극이 없는 경우}$

2) 보극 설치(전압정류)

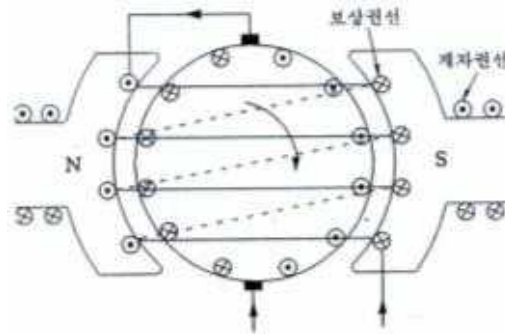
- ① 기하학적 중성축상에 설치한 작은 소자극
- ② 극성 : 회전방향으로 하나 빠르게 극성 표시
- ③ 보극 기자력의 크기 : 전기자기자력의 1.3~1.4배 정도



[보극]

3) 보상권선 설치 : 전기자전류와 반대 방향의 전류

- ① 자극편에 전기자도체와 평행하게 슬롯을 파고 여기에 권선을 감아 넣어 전기자전류와 반대 방향으로 전류를 흐르게 하여 전기자 기자력을 상쇄시킨다.
- ② 부하의 변화에 따라 항상 전기자전류에 의한 기자력을 없애기 때문에 브러시와 정류자 사이에 플래시 오버(flash-over) 현상이 없고 중성축을 이동하지 않아도 된다.
- ③ 정류 작용이 곤란한 경우에 사용하며 **전기자 반작용 방지에 가장 효과적이다.**

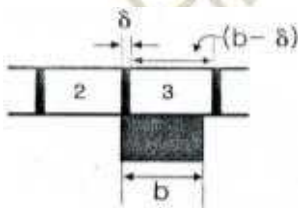


\* 모든 기계 기구에는 보극과 보상권선 함께 설치

## 5. 정류 작용(commutation)

### (1) 정의

: 전기자도체에 흐르는 전류가( $I_c$ ) 정류자편에 부착된 브러시 밑을 통과하면서 전류의 방향이 바뀌는 작용(교류기전력을 직류로 변환하는 작용)



$b$  : 브러시 두께

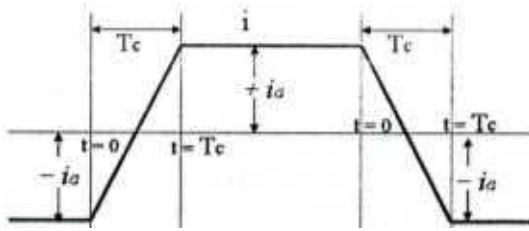
$\delta$  : 정류자편 사이의 절연물 두께

### (2) 정류주기(정류시간)

$$T_c = \frac{b - \delta}{V} = \frac{2b - \frac{\pi D}{K}}{\pi D \frac{N}{60}} \text{ [s]}$$

{

- $b$  : 브러시 두께
- $\delta$  : 정류자편 사이의 절연물 두께
- $D$  : 직경
- $V$  : 주변속도 [m/s]



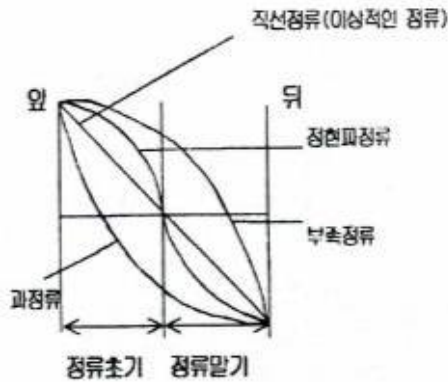
(3) 리액턴스 전압 : 자기 인덕턴스에 의해 발생하는 전압

- ① 전기자 코일에는 자기 인덕턴스(self inductance)가 존재하기 때문에 전류의 변화를 방해하고 정류자 내부에 고압을 유발하게 된다.
- ② 정류자편과 브러시 사이에 불꽃을 발생하여 정류자나 브러시를 손상시키게 된다.

$$e = -L \frac{di}{dt} = L \frac{I_c - (-I_c)}{T_c} = L \frac{2I_c}{T_c}$$

(4) 정류 곡선(commutating curve)

- 정류시간 중에서 단락코일 내부의 전류 변화를 나타낸 곡선



- 가장 양호한 정류 곡선 : 직선정류곡선, 정현파 정류곡선

- 과정류 곡선 : 정류초기

- 부족정류 곡선 : 정류 말기

(5) 양호한 정류를 얻는 방법

$$1) \downarrow e = \downarrow L \frac{2I_c}{T_c} \left\{ \begin{array}{l} \text{리액턴스 전압} \downarrow \\ \text{리액턴스 값} \downarrow \\ \text{정류주기} \uparrow \end{array} \right.$$

2) 회전속도를 감소시킨다.

$$\downarrow e = - \downarrow L \frac{di}{dt} = - \downarrow N \frac{d\phi}{dt}$$

3) 리액턴스 전압 < 브러시 접촉면 전압강하

4) 접촉저항이 큰 탄소브러시 사용

→ 저항 정류

## 6. 직류 발전기의 여자 방식

○ 여자 방식 : 전기자에 전원을 공급하는 방식 { 내부 : 자여자 방식  
외부 : 타여자 방식

### (1) 자여자 방식

: 발전기 자체에 발생하는 기전력에 의해 계자전류를 공급하여 여자하는 방식

- 1) 분권 발전기 : 계자와 전기자를 병렬로 접속
- 2) 직권 발전기 : 계자와 전기자를 직렬로 접속

3) 복권 : 직권 + 분권

[	외분권	[	가동복권	[	평복권 : $V_n = V_0$
			차동복권		과복권 : $V_n > V_0$
[	내분권	[	가동복권	[	
			차동복권		

#### ① 가동복권 발전기(cumulative compound generator)

: 두 개의 계자권선이 만드는 기자력이 서로 합해지도록 접속된 것

#### ② 차동복권 발전기(differential compound generator)

가. 양 계자권선의 기자력이 서로 상반되게 접속되어 있는 것

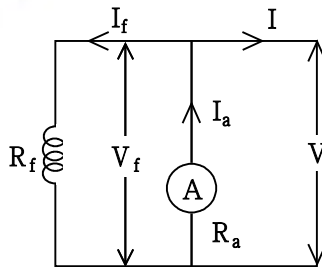
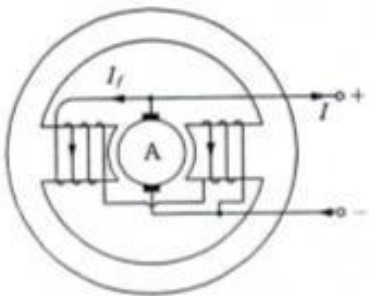
나. 수하특성 및 정전류를 얻는데 이용, 전기용접용 전원에 사용

### (2) 타여자 방식

- 1) 독립된 직류 전원으로부터 여자전류를 공급하여 계자 자속을 만드는 방식
- 2) 타여자 발전기

## 7. 발전기의 종류 및 특징

### (1) 분권 발전기



#### 1) $E$ (유기기전력 : 발전기 내부에서 발생하는 전압)

$E = \text{단자전압} + \text{전기자권선전압} + \text{전압강하}$ 

$$\left\{ \begin{array}{l} e_a : \text{전기자반작용 전압강하} \\ e_b : \text{브러시접촉면 전압강하} \end{array} \right.$$

$$= V + I_a R_a + e$$

2)  $V$  (단자전압=정격전압 : 부하에 공급되는 전압)

$$V = E - I_a R_a - e$$

3)  $V_f$  (분권계자전압=단자전압)

$$\textcircled{1} V_f = I_f R_f = V$$

② 무부하 상태에서 전기자에 전원 공급

③ 부하 접속시 전기자 정격속도로 회전

4)  $I$  (부하전류) :  $I = \frac{P}{V}$

5)  $I_f$  (계자=자화=여자전류) :  $I_f = \frac{V}{R_f}$

○ 계자권선에 자속을 발생시키기 위해 공급되는 최소한의 전류

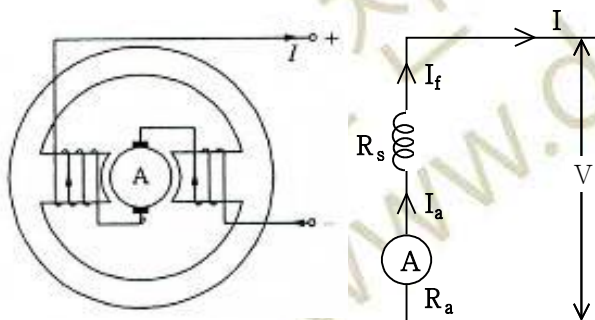
6)  $I_a$  (전기자전류) :  $I_a = I + I_f = \frac{P}{V} + \frac{V}{R_f}$

7) 입력 :  $P_1 = EI_a$  [W], 출력 :  $P_2 = VI$  [W]

8)  $R_a$  : 전기자저항(기기 내부에 존재)

9)  $R_f$  : 분권계자저항(단자전압의 크기 결정)

(2) 직권 발전기



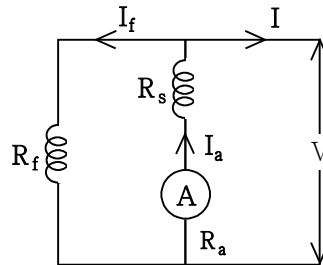
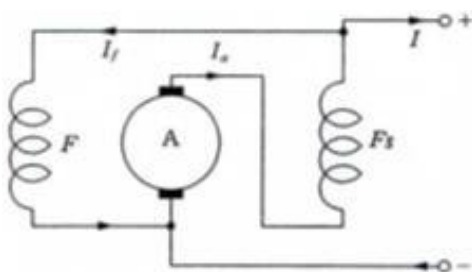
1) 전기자전류 :

$$I_a = I_f = I = \phi = \frac{P}{V}$$

2) 유기기전력 :

$$E = V + I_a (R_a + R_s) + e$$

(3) 외분권 복권 발전기



1) 전기자전류 :  $I_a = I + I_f = \frac{P}{V} + \frac{V}{R_f}$

2) 유기기전력 :  $E = V + I_a(R_a + R_s) + e$

3) 복권 발전기를 직권 및 분권 발전기로 사용하는 경우

① 직권 발전기로 사용시 : 분권계자권선 개방(open)

② 분권 발전기로 사용시 : 직권계자권선 단락(short)

4) 발전기를 전동기로, 전동기를 발전기로 사용하는 경우

① 가동복권 발전기  $\longleftrightarrow$  차동복권 전동기

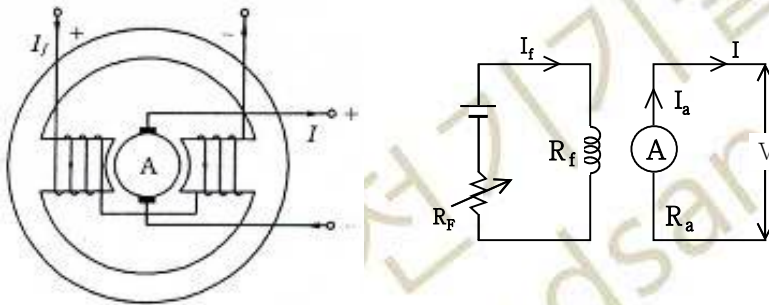
② 차동복권 발전기  $\longleftrightarrow$  가동복권 전동기

5) 자여자 발전기를 역회전하면

① 전류 방향이 반대가 되어 잔류자기가 소멸된다. ( $I_f = 0$ )

② 잔류자기가 소멸되어 전압이 확립되지 않으므로 발전이 되지 않는다.

(4) 타여자 발전기(separately excited generator)



1) 전기자전류 :  $I_a = I = \frac{P}{V}$

2) 유기기전력 :  $E = V + I_a R_a + e$

3) 용도 : 단자전압을 정밀하고 광범위하게 조정할 필요가 있는 분야에 사용

## 8. 발전기의 특성곡선

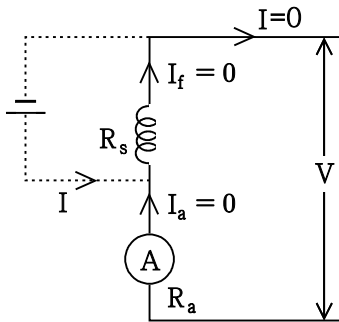
○ 무부하 포화 곡선 : 유기기전력( $E$ ) + 계자전류( $I_f$ )

○ 부하 포화 곡선 : 단자전압( $V$ ) + 계자전류( $I_f$ )

○ 외부 특성 곡선 : 단자전압( $V$ ) + 부하전류( $I$ )

(1) 무부하 포화곡선( $I=0$ )

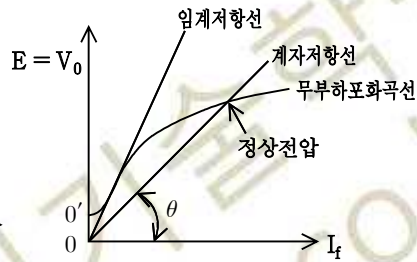
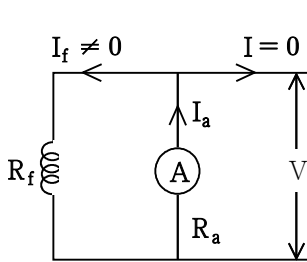
1) 직권 발전기



① 무부하 :  $I_a = I = I_f = \phi = 0$

② 무부하 상태에서 전류가 "0"이므로 전압이 형성되지 않는다.

2) 분권 발전기



① 조건

가. 잔류자기가 존재

나. 계자저항과 임계저항 회전방향 정방향

○ 계자저항선 :  $R_f$ 가 일정 → 단자전압 안정

○ 임계저항선 :  $R_f$ 가 일정하지 않을 때 → 단자전압 불안정

다. 계자저항값이 임계저항값에 도달하게 되면 전압이 불안정해진다.

② 정상전압 : 발전기가 이룰 수 있는 최고전압

(2) 외부 특성곡선(external characteristic curve)

1) 전압변동율 (voltage regulation)

: 정격부하에서 무부하로 변화시켰을 경우 전압변동의 정도

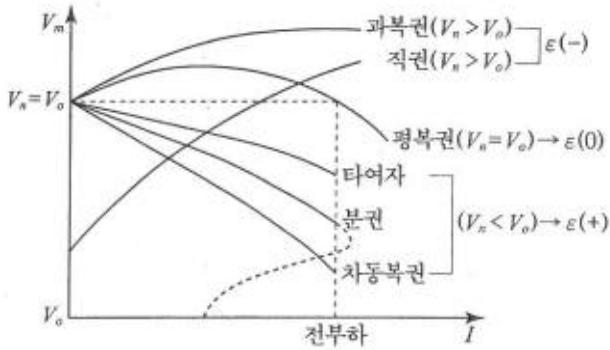
$$\varepsilon = \frac{\text{무부하시 단자전압} - \text{정격전압}}{\text{정격전압}} \times 100 = \frac{V_0 - V_n}{V_n} \times 100$$

- $V_0 > V_n \rightarrow \varepsilon(+)$  : 타여자, 분권, 차동복권
- $V_0 = V_n \rightarrow \varepsilon(0)$  : 평복권
- $V_0 < V_n \rightarrow \varepsilon(-)$  : 과복권, 직권

① 무부하시 단자전압 :  $V_0 = V_n(1 + \varepsilon)$

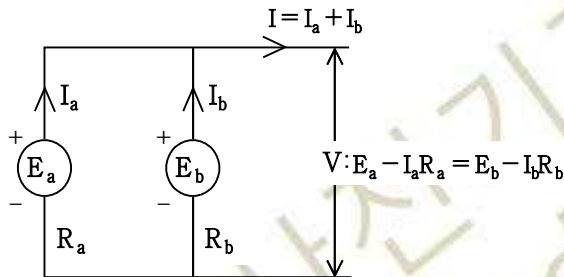
② 정격전압 :  $V_n = \frac{V_0}{1+\epsilon}$

2) 외부특성곡선



9. 직류 발전기의 병렬운전 조건

(1) 병렬운전 조건



- ① 극성이 동일할 것
- ② 단자(정격)전압이 동일할 것
- ③ 외부 특성 곡선이 수하 특성일 것

(2) 계산 방법

- ① 유기기전력과 전기자저항이 각각 주어진 경우 :  $R \propto I$
- ② 유기기전력이 동일하고 전기자저항이 각각 주어진 경우 :  $R \propto \frac{1}{I}$
- ③ 용량이 주어진 경우 :  $P \propto I$

(3) 균압모선(equalizerbus) 설치

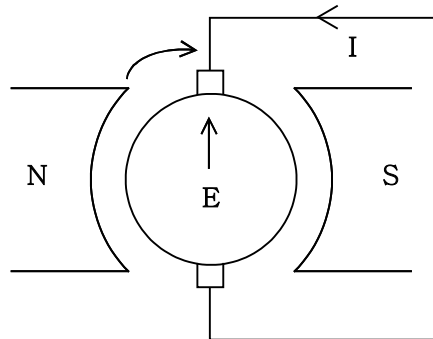
1) 전기자와 계자가 직렬로 연결된 발전기를 병렬로 연결하여 운전을 안정적으로 하기 위하여 설치한 모선

- ① 균압선이 필요한 발전기 : 직권, 복권
- ② 균압선이 필요없는 발전기 : 타여자, 분권

2) 계자전류와 부하 용량과의 관계 : 비례관계

10. 직류 전동기 ┌ 전기에너지→기계에너지  
└ 유기기전력(E)<단자전압(V)

- 직류전원을 전기자에 공급하여 기계동력(회전력)으로 변환시키는 장치이며 구조는 직류 발전기와 동일하다.



- 전기자권선에 흐르는 전류와 자계와의 사이에 전자력이 발생하며 전기자도체는 플레밍의 왼손 법칙에 따라 화살표 방향으로 힘을 받아서 전기자가 회전하게 된다.
  - 직류 전동기는 이와 같은 원리에 의해 회전함으로 직류 발전기는 그대로 전동기로 작용한다.
  - 자극 및 단자의 극성, 회전 방향을 같게 하면 발전기와 전동기는 전기자전류의 방향만이 반대가 된다.
- (1)  $E$  : 유기기전력 = 역기전력  
: 전류의 흐름을 방해하는 전압
  - (2)  $V$  : 단자전압 = 정격전압 = 공급전압
  - (3) 회전 속도(기준 : 초당)

1) 발전기 유기기전력에서

$$E = Blv \times \frac{Z}{a} = \frac{P\phi}{\pi D\ell} \times \ell \times \pi Dn \times \frac{Z}{a} = P\phi n \times \frac{Z}{a} = K\phi n \left( K = \frac{PZ}{a} \right)$$

2) 회전수

$$n = \frac{E}{K\phi} = K \frac{E}{\phi} [\text{rps}] \times 60 [\text{rpm}] \quad (K : \text{기계정수} \rightarrow \text{문제에서 주어진다.})$$

(4) 토크(회전력)

1) 전기자도체 1개에 가해지는 힘

$$f = BlI_a [\text{N}]$$

2) 전 도체에 가해지는 힘

$$F = f \times \frac{Z}{a} = BlI_a \times \frac{Z}{a} [\text{N}]$$

3) 토오크

$$T = F \times r = BlI_a \times \frac{Z}{a} \times \frac{D}{2} = \frac{P\phi}{\pi D\ell} \times \ell \times I_a \times \frac{Z}{a} \times \frac{D}{2} = \frac{PZ}{2\pi a} \phi I_a = K\phi I_a [\text{N} \cdot \text{m}]$$

① 회전자각속도를 이용한 토크

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n} = \frac{P}{2\pi \frac{N}{60}} = \frac{60EI_a}{2\pi N} [\text{N} \cdot \text{m}] \left( E = \frac{PZ}{60a} \phi N \right)$$

② 출력이 주어진 경우의 토크

$$\circ 1 [\text{kg} \cdot \text{m}] = 9.8 [\text{N} \cdot \text{m}] \rightarrow [\text{N} \cdot \text{m}] = \frac{1}{9.8} [\text{kg} \cdot \text{m}]$$

$$T = \frac{1}{9.8} \times \frac{P}{\omega} = \frac{1}{9.8} \times \frac{60P}{2\pi N} = 0.975 \frac{P}{N} [\text{kg} \cdot \text{m}]$$

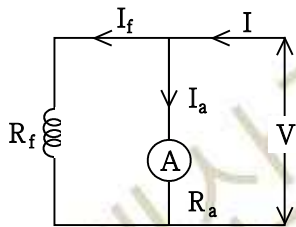
(5) 입력 :  $P = VI [\text{W}]$

(6) 출력

$$P = EI_a = P\phi n \times \frac{Z}{a} \times \frac{2\pi a}{PZ\phi} T = 2\pi n T = 2\pi \frac{N}{60} \times 9.8 T = 1.026 NT [\text{W}]$$

## 11. 전동기의 종류 및 특성

(1) 분권 전동기



1) 전기자전류 :  $I_a = I - I_f = \frac{P}{V} - \frac{V}{R_f} [\text{A}]$

2) 역기전력 :  $E = V - I_a R_a - e [\text{V}]$

3) 단자전압 :  $V = E + I_a R_a + e [\text{V}]$

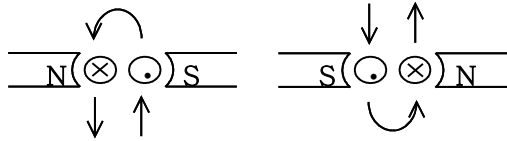
4) 회전 속도

$$n = K \frac{E}{\phi} = K \frac{V - I_a R_a}{\phi} [\text{rps}] \quad (K : \text{기계정수} \rightarrow \text{문제에서 주어진다.})$$

5) 토오크(회전력)

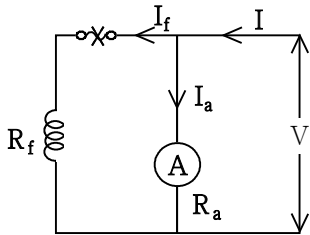
$$T = K\phi I_a [\text{N} \cdot \text{m}]$$

6) 극성을 반대로 하면



: 극성을 반대로 하여도 회전방향 변화없다.

7) 계자회로가 단선이 된 경우



fuse가 용단된 상태

$$: I_f = \phi = 0$$

○ 무부하시 :  $I_a = 0$

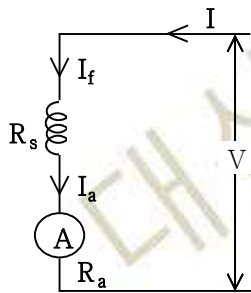
$\uparrow n = K \frac{E}{\phi} \rightarrow$  속도가속 { 위험상태 : fuse가 용단된 경우  
정격전압, 무여자상태

○ 대책

- ① 계자회로에 fuse 및 개폐기를 설치하지 않는다.(직입 결선)
- ② 속도감지기 설치

8) 특징 : 속도변동율이 적다.(정속도 전동기)

(2) 직권 전동기



1) 전기자전류 :  $I_a = I_f = I = \phi = \frac{P}{V}$

2) 역기전력 :  $E = V - I_a(R_a + R_s)$

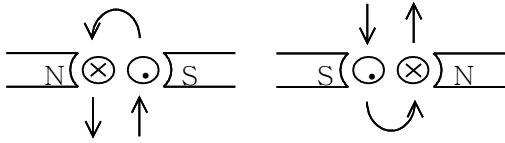
3) 회전수

$$n = K \frac{E}{\phi} = K \frac{V - I_a(R_a + R_s)}{\phi} \text{ [rps]}$$

4) 토크 :  $I_a = \phi$

$$T = K\phi I_a (I_a = \phi) = KI_a^2 = K \frac{1}{N^2} [\text{N} \cdot \text{m}]$$

5) 극성을 반대로 하면

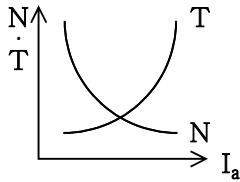


: 극성을 반대로 하여도 회전방향 변화없다.

6) 무부하 :  $I_a = 0$

- ① 벨트를 걸고 운전시 벨트가 벗겨진 경우
- ②  $\uparrow n = K \frac{E}{\downarrow \phi} \rightarrow$  속도가속 { 위험상태 : 벨트가 벗겨진 경우  
정격전압, 무부하상태
- ③ 대책 : 기어나 체인을 걸고 운전

7) 속도 및 토크 특성 곡선

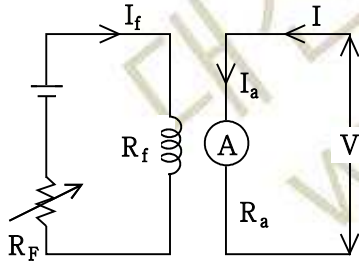


8) 용도 { 부하 변동이 심하고 기동 토크가 큰 곳 : 전철, 크레인, 기중기  
가변속도 전동기

(3) 가동복권 전동기

- 기동 토크가 크고, 경부하에서 위험하게 급속히 속도가 상승하지 않는다.
- 크레인, 엘리베이터, 공작기계, 공기압축기 등에 사용

(4) 타여자 전동기(separately excited motor)



1) 전기자전류출력전류 :  $I_a = I = \frac{P}{V}$

2) 유기기전력(역기전력) :  $E = V - I_a R_a$

3) 회전수

$$n = K \frac{E}{\phi} = K \frac{V - I_a R_a}{\phi} \text{ [rps]}$$

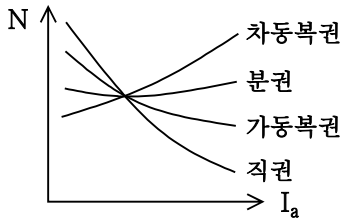
4) 토크 :  $T = K \phi I_a \text{ [N} \cdot \text{m]}$

5) 용도

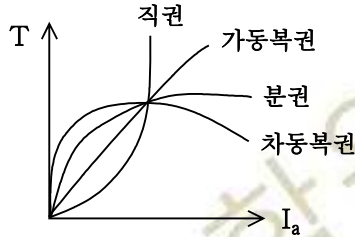
- ① 대형 압연기, 엘리베이터에 사용(정속도 전동기)
- ② 속도를 광범위하고 정밀하게 제어할 수 있는 곳에 사용

(5) 전동기의 속도 및 토크 특성 곡선

1) 속도 특성곡선



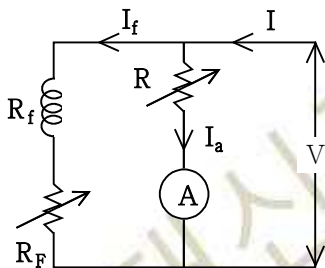
2) 토크 특성곡선



3) 속도 및 토크 대소

- 직권 → 가동복권 → 분권 → 차동복권

12. 전동기의 속도 제어법



$$n = K \frac{V - I_a R_a}{\phi} \text{ [rps]}$$

(1) 계자 제어법 (field control) ( $\phi$  변화 → R<sub>F</sub> 이용)

- 정출력 가변 속도(constant power variable speed)의 용도에 적합

(2) 저항 제어법 (R<sub>a</sub> 변화 → R 이용)

- 손실이 크고 효율이 저하되기 때문에 단독 사용 불가능

(3) 전압 제어법 (voltage control)

- 전동기 전기자에 인가되는 단자전압 V를 변화시켜 속도를 제어하는 방법
- 제어 범위가 광범위하고, 연속적으로 원활하게 정밀한 속도 제어를 할 수 있다.

1) 워드 레오나드 방식 : 엘리베이터에 사용

2) 일그너 방식

- ① 부하변동이 심한 곳(플라이 휠 설치)

② 제철 공장의 대형 압연기용 주전동기로 사용

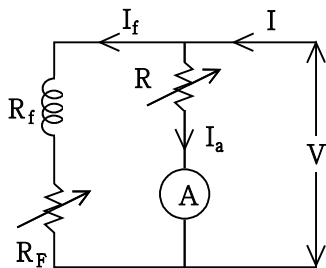
3) 직류 초퍼 방식(DC chopper system) : 직류 전압으로 속도 제어

(4) 직병렬 제어(series parallel control)

1) 두 대의 동일한 정격의 전동기를 이용하는 경우에 이것을 직병렬 연결하여 한 대의 전동기에 인가되는 단자전압을 1 : 2로 변화시켜서 그 속도를 2단 제어하는 방법

2) 전기철도에서 직권전동기에 저항제어와 조합하여 사용

### 13. 전동기 기동법



(1) 기동시

1) 기동전류 제한 → 기동저항(R) 최대

2) 기동 토크 大 → 계자저항 최소( $R_F = 0$ )

3) 기동저항 :  $R = \frac{V}{I_a \times \text{배수}} - R_a$

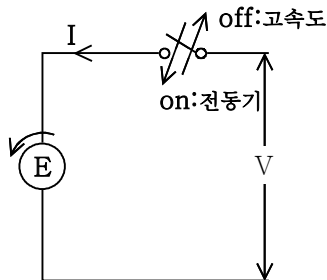
(2) 운전시

① 손실 小 → 기동저항(R) 최소

② 계자 저항 : 부하에 따라서 적당히 선정

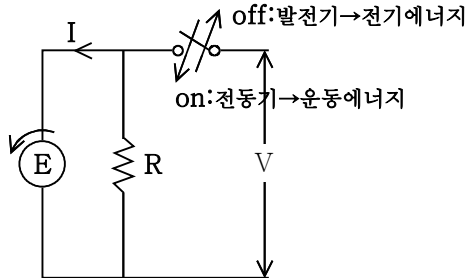
### 14. 전동기 제동법

○ 제동 : 전동기가 회전하고 있을 때에 전원을 개방하여도 회전 부분의 관성 때문에 즉시 정지하지 않고 고속도가 되는 것을 방지하기 위하여 운동에너지를 어떤 방법으로든 소비(정지)시키는 방법



(1) 발전 제동(dynamic braking)

: 운전중인 전동기를 전원에서 분리하여 발전기로 작동시키고, 회전체의 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 이것을 저항 중의 열에너지로 소비시켜서 제동하는 방법



(2) **회생 제동**(regenerative braking)

- 1) 전동기가 가지고 있는 운동에너지를 전기에너지로 변환하고 이 전기에너지를 전원 측으로 환원하여 제동하는 방법
- 2) 전기 기관차가 내리막길을 내려가는 경우에 이용

(3) **역전 제동**(plugging braking)

- 1) 단상 : 전기자의 접속을 반대로 한다.
- 2) 3상 : 3선 중 2선의 접속을 반대로 한다.

15. 손실

(1) 무부하손(고정손)(no load loss, constant loss)

- 1) 부하의 변화에 관계없이 일정한 손실  

$$\text{철손}(P_i) = \text{히스테리시스손}(P_h) + \text{와류손}(P_e)$$

감소 ↓	↓ 80[%]	↓ 20[%]
규소강판	사용	성층

- 2) 규소강판 두께 : 0.35~0.5[mm]

(2) 가변손=부하손 : 동손( $P_c$ )= $I^2R$

- 1) 부하의 변화에 따라 현저하게 변하는 손실
- 2) 종류 : 전기자손, 계자손, 브러시손, 표유부하손

(3) 기계손

- 1) 베어링손 : 기계적 마찰에 의해 발생
- 2) 마찰손 : 브러시와 정류자의 접촉에 의해 발생
- 3) 풍손 : 전기자가 회전하면서 발생

○ 절연물의 최고 허용온도

절연물 종류	Y	A	E	B	F	H	C
최고 허용 온도[°C]	90	105	120	130	155	180	180초과

## 16. 효율(efficiency)

### (1) 실측 효율(actual measured efficiency)

1) 직류기에 실제로 부하를 인가하여 측정한 효율

$$2) \eta = \frac{\text{출력}}{\text{입력}} \times 100 \begin{cases} \text{입력} = \text{출력} + \text{손실} \\ \text{출력} = \text{입력} - \text{손실} \end{cases}$$

3) 실측 효율 측정

① 보조 발전기를 사용하는 방법

② 프로니 브레이크법

③ 전기동력계 사용

4) 최대효율 조건 : 무부하손=부하손(전부하에서 설계)

### (2) 규약 효율

① 정해진 방법에 따라서 측정한 효율

② 기준 : 전기자가 회전하는 원동력을 변화시킨 것(발전기 : 입력, 전동기 : 출력)

③ 발전기, 변압기

$$\eta = \frac{\text{출력}}{\text{입력}} \times 100 = \frac{\text{출력}}{\text{출력} + \text{손실}} \times 100$$

④ 전동기

$$\eta = \frac{\text{출력}}{\text{입력}} \times 100 = \frac{\text{입력} - \text{손실}}{\text{입력}} \times 100$$

## 17. 특수 직류기

1) 증폭 발전기 : 앰플리다인, 로토틀, HT다이아모

2) 정전압형 발전기 : 로젠베르그, 베르그만, 제3브러시 발전기

3) 전기동력계

① 원동기의 출력, 토오크 측정시 사용

② 토오크 :  $T = W \times L [\text{kg} \cdot \text{m}]$  (W : 중량, L : 아암의 길이)

③ 출력 :  $P = 1.026NT [\text{W}]$

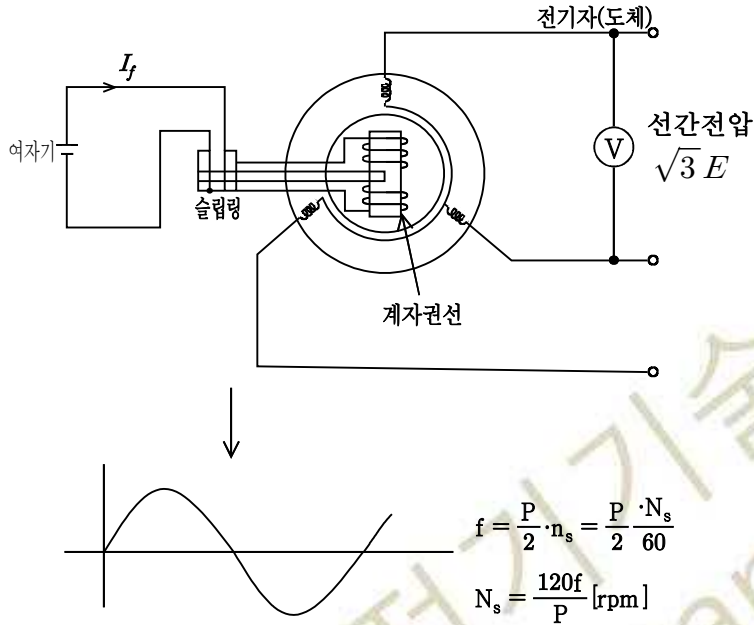
## 18. 온도시험

(1) 실부하법

(2) 반환부하법 : 카프법, 블론델법, 홉킨스법

# 제2장 동 기 기

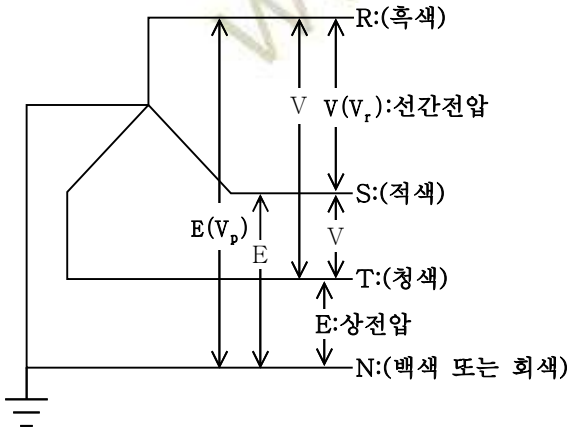
## 1. 동기발전기 원리



(1) 동기속도 :  $N_s = \frac{120f}{P}$  [rpm]

→ 주파수 :  $f = \frac{N_s P}{120}$  [Hz]

(2) Y결선(스타결선, 성형결선)을 사용하는 이유



- 1) 이상전압 방지 대책이 양호
- 2) 제3고조파 순환전류가 흐르지 않는다.
- 3) 상전압이 낮기 때문에 코로나손과 열화손 감소

(3) 동기발전기 회전자 분류

구 분		회 전 전기자형	회 전 계자형	유도자형
구	고정	계자	전기자	전기자, 계자
조	회전	전기자	계자	유도자
용 도		회전변류기	동기발전기	고주파 발전기

(4) 동기발전기에서 회전계자형을 사용하는 이유

- 1) 계자회로는 직류 저전압이며 소요 전력이 적다.
- 2) 절연이 용이하고 구조가 간단하다.
- 3) 기계적으로 튼튼하기 만들기 쉽다.

(5) Y결선과 Δ결선

1) Y결선(스타 결선, 성형 결선)

- ① 전압 관계 :  $V_L = \sqrt{3} V_P$
- ② 전류 관계 :  $I_L = I_P$
- ③ 출력(기준 : 상) :  $P = 3 V_P I_P$
- ④ 결선 :
- ⑤ 위상 : Y결선이 Δ결선보다 위상이 30° 앞선다.

2) Δ결선(환상 결선)

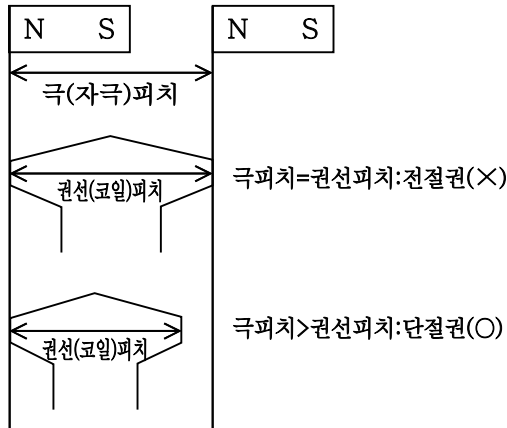
- ① 전압 관계 :  $V_L = V_P$
- ② 전류 관계 :  $I_L = \sqrt{3} I_P$
- ③ 출력(기준 : 선간) :  $P = \sqrt{3} V_L I_L$
- ④ 결선 :
- ⑤ 위상 : Δ결선이 Y결선보다 위상이 30° 뒤진다.

\* Y결선 및 Δ결선에서 출력은 항상 일정하다.

2. 전기자 권선법(기전력의 파형을 개선하기 위해 사용)

- 직류기 권선법 사용 : 고상권, 폐로권, 이층권(중권, 파권)
- 동기기 : 단절권 및 분포권 사용

(1) 전절권과 단절권(동량이 상이)



1) 단절권 특징

- ① 고조파를 제거하여 파형 개선
- ② 코일 끝부분이 단축되어 동량(구리량) 감소
- ③ 전절권에 비해서 합성기자력이 감소
- ④ 항상 1보다 작다.

2) 단절권 계수

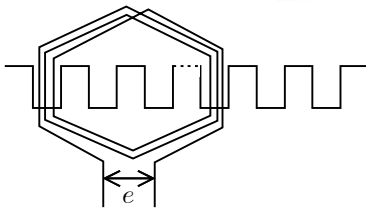
$$K_p = \sin \frac{\beta\pi}{2} \xrightarrow{n\text{차 고조파가 포함된 경우}} \sin \frac{n\beta\pi}{2} < 1$$

$$\left( \beta = \frac{\text{권선피치}}{\text{극피치}} = \frac{\text{권선피치}}{\frac{\text{전슬롯수}}{\text{극수}}} \right)$$

(2) 집중권과 분포권(동량이 동일)

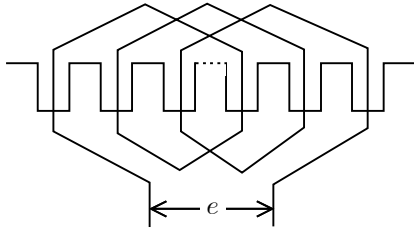
- ┌ 집중권 : 매극 대상의 슬롯수 1개(X)
- └ 분포권 : 매극 대상의 슬롯수 2개 이상(O)

○ 집중권 : 하나의 홈에 권선을 집중 배치하는 방법



고조파 증가, 누설 리액턴스 증가, 합성기자력 증가

○ 분포권 : 각각의 홈에 권선을 분산 배치하는 방법



고조파 감소, 누설 리액턴스 감소, 합성기자력 감소

1) 분포권 특징

- ① 고조파를 감소시켜 기전력 파형 개선
- ② 권선의 누설 리액턴스 감소
- ③ 열을 골고루 분산시켜 권선의 과열 방지
- ④ 합성기자력 감소

2) 분포권 계수

$$K_d = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}} \xrightarrow{\text{n차 고조파가 포함된 경우}} \frac{\sin \frac{n\pi}{2m}}{q \sin \frac{n\pi}{2mq}} < 1$$

- ① m ; 상수(3상, 6상, ...)
- ② q : 매극 매상의 슬롯수

$$q = \frac{\text{전슬롯수}}{\text{극수} \times \text{상수}}$$

3. 유기기전력(상전압, 실효값)

(1)  $E = 4.44 f \phi \omega K_w$

1)  $E = \frac{V}{\sqrt{3}}$  (V : 선간전압 = 단자전압)

2)  $4.44 = 4 \times 1.11$  (1.11 : 파형률)

○ 파형률 =  $\frac{\text{실효값}}{\text{평균값}} = \frac{E_m / \sqrt{2}}{2E_m / \pi} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11$

3)  $f(\text{주파수}) = \frac{N_s \cdot P}{120}$

4)  $\phi$  : 자속 [Wb]

5)  $w(\text{권선}) \left( \begin{array}{l} 1\phi : w = \text{전슬롯수} \times \text{한슬롯내 권선} \\ 3\phi : w = \frac{\text{전슬롯수} \times \text{한슬롯내 권선}}{3} \end{array} \right)$

6)  $K_w$  (권선계수) =  $K_p \times K_d < 1$  (문제에서 주어지지 않으면 1)

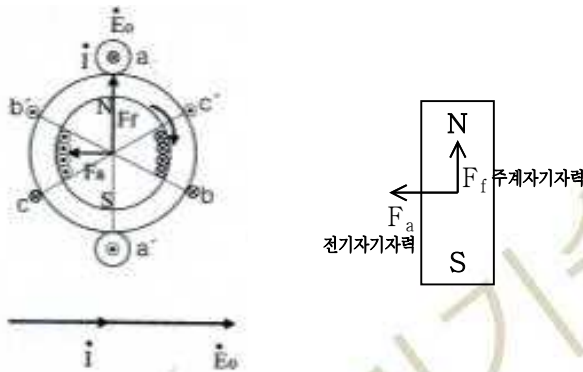
(2)  $E = V \pm I_a Z_s \begin{cases} + : \text{지상} \\ - : \text{진상} \end{cases}$

#### 4. 전기자 반작용

##### (1) 동기 발전기

##### 1) R만의 부하

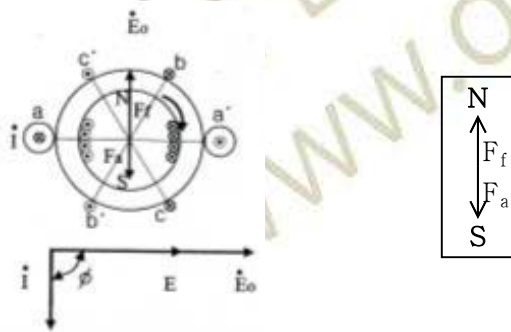
: 전기자전류와 무부하 유기기전력이 동상인 경우



: 교차자화작용(횡축 반작용)

##### 2) L만의 부하(지상 : 자속 감소)

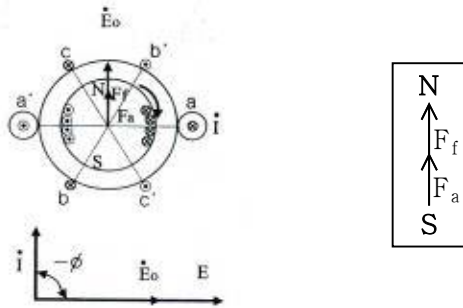
: 전기자전류가 무부하 유기기전력보다  $\pi/2$  뒤진 경우



: 직축반작용(자극축과 일치하는 감자작용)

##### 3) C만의 부하(진상 : 자속이 증가)

: 전기자전류가 무부하 유기기전력보다  $\pi/2$  앞선 경우

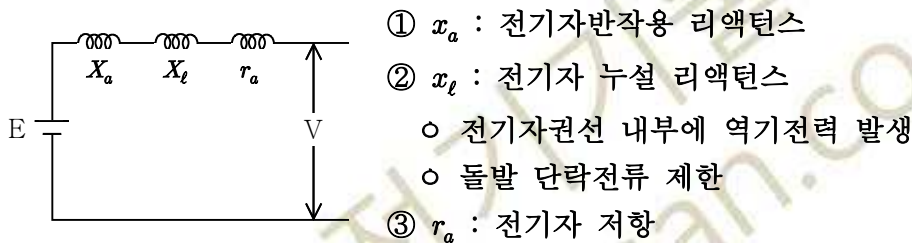


: 직축반작용(자극축과 일치하는 증자 또는 자화 작용)

(2) 전동기

- R작용은 발전기와 동일
- L과 C는 반대 작용

5. 동기 임피던스 및 단락전류



(1) 동기 리액턴스 :  $x_s = x_a + x_l$

(2) 동기 임피던스

1)  $Z_s = r_a + jx_s = r_a + j(x_a + x_l) = \sqrt{r_a^2 + (x_a + x_l)^2}$

2)  $Z_s = \frac{E}{I_s}$  ( $I_s$ : 단락전류)

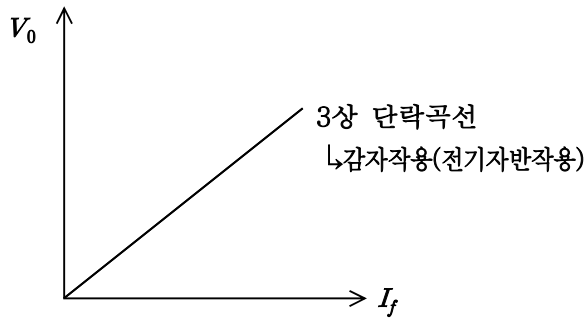
3) 동기기 :  $r_a = 0 \rightarrow Z_s = jx_s$

(3) 단락전류

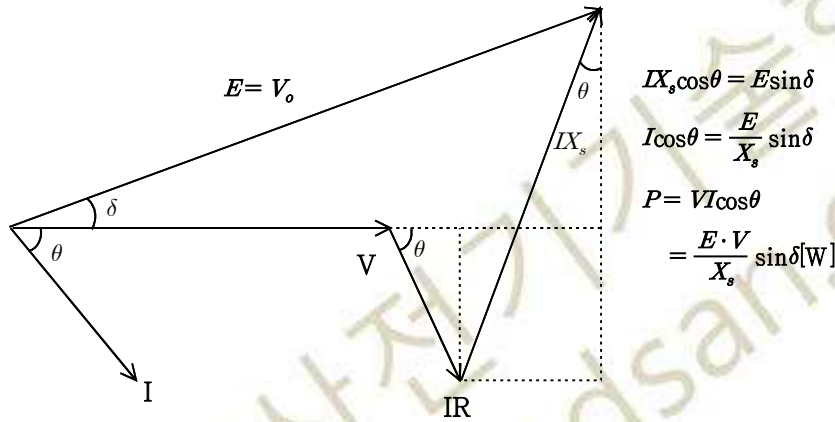
1) 처음은 큰 전류지만 점차 감소한다.(동기자 반작용으로 인하여)

2) 단락전류 :  $I_s = \frac{E}{Z_s} = \frac{V/\sqrt{3}}{Z_s} = \frac{V}{\sqrt{3}Z_s} = \frac{V}{\sqrt{3}\sqrt{R^2 + X^2}}$

③ 3상 단락특성곡선



## 6. 출력(발전기, 전동기 동일)



$$IX_s \cos\theta = E \sin\delta$$

$$I \cos\theta = \frac{E}{X_s} \sin\delta$$

$$P = VI \cos\theta$$

$$= \frac{E \cdot V}{X_s} \sin\delta [W]$$

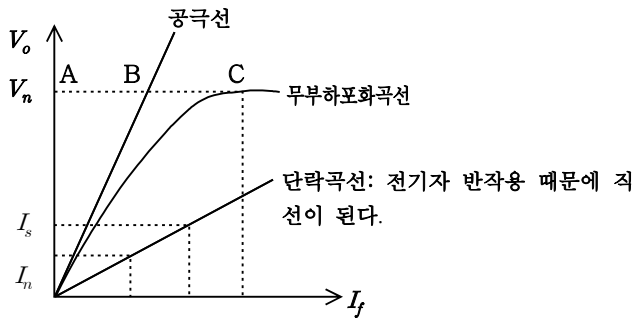
○ 출력 :  $P = \frac{E \cdot V}{x_s} \sin\delta [W]$  (기기 1상에 대한 값)  $\begin{cases} E : \text{유기기전력} \\ V : \text{단자전압} \\ \delta : \text{상차각(부하각)} \end{cases}$

## 7. 단락비 산출

### (1) 시험

- 1) 무부하 포화 시험(개방시험) : 철손, 단락비
- 2) 3φ 단락시험 : 동손, 동기 임피던스, 단락비

### (2) 단락비



1) 포화율 :  $\delta = \frac{\text{포화구간}}{\text{비례구간}} = \frac{BC}{AB}$

○ 포화율 계산 : 공극선과 무부하포화곡선이 필요하다.

2) 단락비

$$K = \frac{\text{무부하(개방)하고 정격전압이 될때까지의 필요한 계자전류}}{\text{3상을 단락하고 정격전류가 흐를때까지의 필요한 계자전류}} = \frac{I_s}{I_n}$$

① 단상 :  $K = \frac{I_s}{I_n} = \frac{\frac{V}{Z_s}}{\frac{P}{V}} = \frac{V^2}{PZ_s}$

② 3상 :  $K = \frac{I_s}{I_n} = \frac{I_s}{\frac{P}{\sqrt{3}V}} = \frac{\sqrt{3}VI_s}{P}$

(3) %동기 임피던스

$$\%Z_s = \frac{\text{정격전류} \times \text{동기 임피던스}}{\text{정격전압(상전압)}} \times 100 = \frac{I_n Z_s}{V_n (V_p)} \times 100$$

1) V[V], P[VA]로 주어진 경우

$$\%Z_s = \frac{I_n Z_s}{V} \times 100 = \frac{\frac{P}{V} Z_s}{V} \times 100 = \frac{PZ_s}{V^2} \times 100$$

2) V[kV], P[kVA]로 주어진 경우

$$\%Z_s = \frac{PZ_s}{V^2} \times 100 = \frac{P \times 10^3 \times Z_s \times 10^2}{(10^3 V)^2} = \frac{PZ_s}{10V^2}$$

(4) %동기임피던스와 단락비와의 관계

$$\%Z_s = \frac{I_n Z_s}{V} \times 100 = \frac{I_n \frac{V}{I_s}}{V} \times 100 = \frac{I_n}{I_s} \times 100 = \frac{1}{K} \times 100$$

$$K = \frac{100}{\%Z_s} \text{ 를 단위법(pu법)으로 나타내면 } K = \frac{1}{Z_s[\text{pu}]}$$

(5) 단락비가 큰 기계(철기계=철극기=돌극기)

$$\uparrow K = \frac{1}{\downarrow Z_s[\text{pu}]}$$

- 1)  $K \uparrow \rightarrow Z_s \downarrow$  : 전기자반작용, 전압변동율 감소
- 2)  $K \uparrow \rightarrow Z_s \downarrow$  : 사용재료 증가  $\left\{ \begin{array}{l} \text{철손} \uparrow \\ \text{동손} \downarrow \end{array} \right. \rightarrow \text{손실 증가} \rightarrow \text{효율 감소}$   
 $\rightarrow$  기계기구 대형화
- 3)  $K \uparrow \rightarrow Z_s \downarrow$  : 극수 증가  $\rightarrow$  속도 감소(저속기)  $\rightarrow$  수차 발전기
  - ① 직경大, 길이小  $\rightarrow$  수직으로 설치
  - ② 직축 리액턴스 > 횡축 리액턴스
  - ③ 최대출력 :  $60^\circ$
- 4) 증량 증가  $\left\{ \begin{array}{l} \text{① 과부하내량 증가} \\ \text{② 충전용량 증가} \\ \text{③ 안정도 향상} \\ \text{④ 가격 고가} \end{array} \right.$

(6) 단락비가 작은 기계(동기계=비철극기=비돌극기)

- 1)  $K \downarrow \rightarrow Z_s \uparrow$  : 전기자반작용, 전압변동율 증가
- 2)  $K \downarrow \rightarrow Z_s \uparrow$  : 사용재료 증가  $\left\{ \begin{array}{l} \text{철손} \downarrow \\ \text{동손} \uparrow \end{array} \right. \rightarrow \text{손실 증가} \rightarrow \text{효율 감소}$   
 $\rightarrow$  기계기구 소형화
- 3)  $K \downarrow \rightarrow Z_s \uparrow$  : 극수 감소  $\rightarrow$  속도 증가(고속기) : 터빈(원통형) 발전기
  - ① 직경小, 길이大  $\rightarrow$  수평으로 설치
  - ② 직축 리액턴스=횡축 리액턴스
  - ③ 최대 출력 :  $90^\circ$

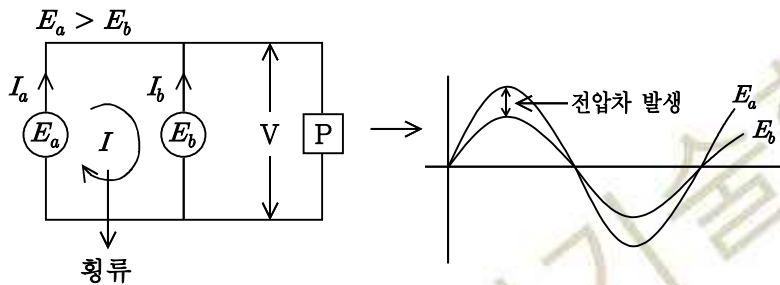
※ 철기계와 동기계 비교

	구성재료	동기 임피던스	단락비	계자 자속	공극	용량	안정도	발전기
철기계	동小철大	小	0.9~1.2	大	大	大	大	수차발전기
동기계	동大철小	大	0.6~1.0	小	小	小	小	터빈발전기(원통형)

	극수	속도	회전자 분류	리액턴스	최대 출력	발전기 설치
철기계	16~32	저속기	직경大, 길이小	직축리액턴스 > 횡축리액턴스	60°	수직
동기계	2~4	고속기	직경小, 길이大	직축리액턴스 = 횡축리액턴스	90°	수평

### 8. 동기 발전기의 병렬운전 조건

(1) 기전력의 크기가 같아야 한다.

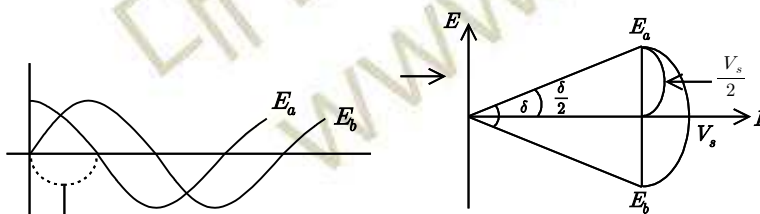


1) 상이하면 : 무효순환전류(무효횡류) 발생

$$I = \frac{\text{전압차}(V_s)}{2X_s} \text{ [A]}$$

2) 대책 : 계자(여자)전류 변화

(2) 기전력의 위상이 같아야 한다.



위상차 :  $\delta$

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{V_s}{E} = \frac{V_s}{2E} \rightarrow V_s = 2E \sin \frac{\delta}{2}$$

1) 상이하면 : 동기화전류(유효횡류) 발생

$$I = \frac{V_s}{2X_s} \text{ 에서 } V_s = 2E \sin \frac{\delta}{2} \text{ 를 대입하면 } I = \frac{E}{X_s} \sin \frac{\delta}{2} \text{ [A]}$$

E : 상전압,  $\delta$  : A기와 B기의 위상차

## 2) 수수전력

- 위상이 앞선 발전기가 위상이 늦은 발전기에 전력을 공급하여 동일한 위상으로 유지

$$P = \frac{E^2}{2X_s} \sin\delta [W]$$

## 3) 동기화력

- 두 발전기의 전압 위상을 일치시켜서 동기속도가 되도록 작용하는 힘

$$P = \frac{E^2}{2X_s} \cos\delta [W]$$

## 4) 대책 : 출력 변화

### (3) 기전력의 주파수가 같아야 한다.

- 1) 상이하면 : 난조 발생
- 2) 대책 : 속도 변화

### (4) 기전력의 파형이 같아야 한다.

- 실효값이 같고 파형이 다르면 기전력의 크기도 같지 않기 때문에 고조파 무효순환전류가 흘러서 기기가 과열이 된다.

- 1) 상이하면 : 고조파 무효순환전류(고조파 무효 유향류) 발생
- 2) 대책 : 발전기 개선

### (5) 상회전 방향이 같아야 한다.

- 1) 상이하면 : 동기검정기 점등
- 2) 대책 : 상회전 방향 일치

### ※ 난조의 원인과 방지 대책 : 자극면에 계동권선 설치

- 1) 조속기 감도가 예민한 경우 : 조속기 감도를 무디게 한다.
- 2) 원동기 토오크에 고조파가 포함된 경우 : 플라이 휠 설치(관성 모우멘트 증가)
- 3) 부하가 맥동하는 경우
- 4) 전기자 회로의 저항이 큰 경우

## 9. 자기여자작용

### (1) 정의

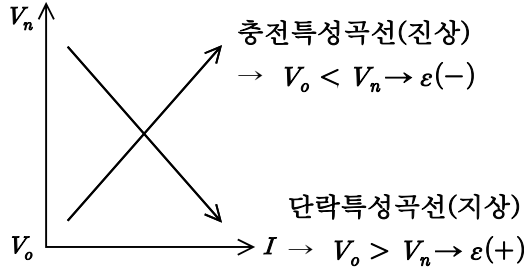
- 무부하, 경부하시 충전전류로 인하여 단자전압이 상승하여 기기의 절연이 파괴되는 현상

### (2) 대책

- 1) 동기조상기 설치(지상전류 공급)
- 2) 리액터를 병렬로 연결(진상전류 흡수)

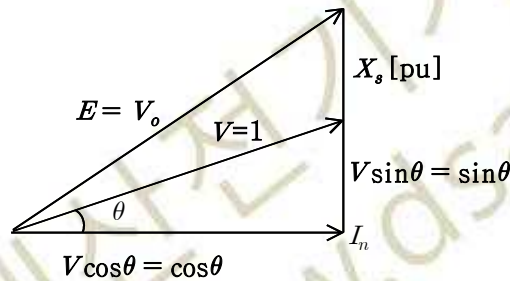
- 3) 변압기 설치
- 4) 발전기 2~3대 병렬 운전(단락비 증가)
- 5) 충전전압을 낮은 전압으로

(3) 특성곡선



10. 단위법 [PU법]

○ 동기리액턴스가 [p.u]법으로 주어진 경우 단자전압 V를 1로 보고 계산하는 방법



$$E = V_0 = \sqrt{(\cos\theta)^2 + (\sin\theta + X_s)^2}$$

(1) 전압변동율

$$\varepsilon = \frac{V_0 - V_n}{V_n} \times 100 = \left( \sqrt{(\cos\theta)^2 + (\sin\theta + X_s)^2} - 1 \right) \times 100$$

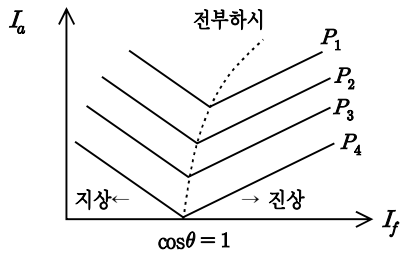
(2) 최대전력(정태안정극한전력)

$$P = \frac{E \cdot V}{X_s [pu]} \times \text{기준용량} = \frac{\sqrt{(\cos\theta)^2 + (\sin\theta + X_s)^2}}{X_s [pu]} \times \text{기준용량}$$

11. 동기전동기

(1) 위상특성곡선(V곡선)

- 1) 공급전압과 부하를 일정하게 유지하고  $I_a$ 와  $I_f$ 와의 관계를 나타낸 곡선



무부하, 경부하	중부하, 전부하
↓	↓
리액터 작용	콘덴서 작용
↓	↓
부족여자로 운전	과여자로 운전

2) 출력 관계 :  $P_1 > P_2 > P_3 > P_4$

3)  $\cos\theta = 1$  (과여자(진상) :  $I_a$  증가)  
 (부족여자(지상) :  $I_a$  증가)

4)  $I_f$  변화 :  $I_a$ 와 역률(부하각)이 변화

(2) 동기전동기 특성

1) 장점

- ① 항상 역률 1로 운전 가능
- ② 지상, 진상 자유롭게 조정
- ③ 정속도 전동기
- ④ 유도기에 비하여 전부하시 효율이 양호

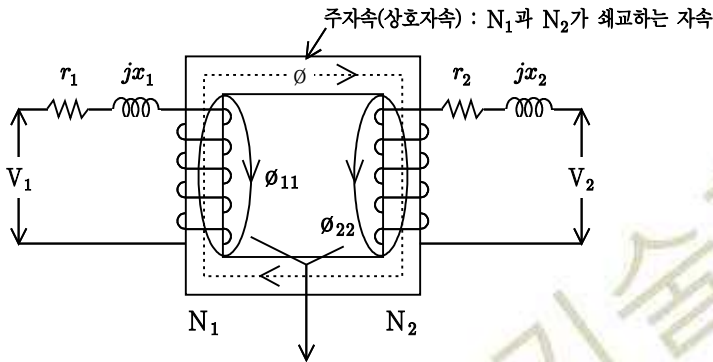
2) 단점

- ① 기동 토크 "0"
  - 기동장치 및 여자전원이 필요하다.
  - 구조가 복잡하고 설치비가 비싸다.
- ② 속도 조정 곤란 : 난조가 일어나기 쉽다.

# 제3장 변압기

- 1차와 2차에 권선을 감아서 사용하는 비회전기
- 교류 전압, 전류의 크기를 변성하는 장치

## 1. 변압기의 원리



### (1) 이상적인 변압기

#### 1) 입력 = 출력

- ① 권선의 저항 및 누설 리액턴스 무시
- ② 철손 및 자화전류 무시
- ③ 자기포화현상 무시
- ④ 1차와 2차의 자속이 전부 쇄교(결합)

#### 2) 역기전력

$$e = -L \frac{di}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

$$LI = N\phi$$

$$L = \frac{N}{I} \phi = \frac{N}{I} \cdot \frac{\mu ANI}{\ell} \rightarrow L \propto N^2 \text{에 비례}$$

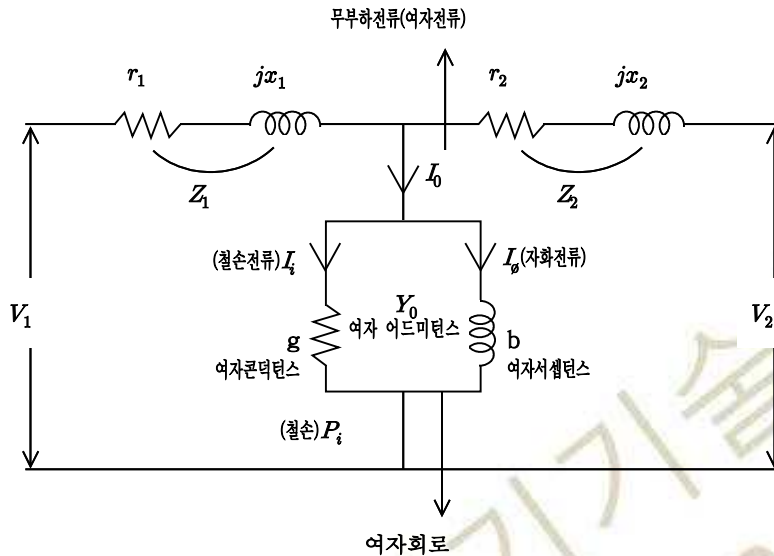
#### 3) 유기기전력 { 변압기 내부에 유도되는 전압                           { 권수에 의해서 결정

$$E = 4.44f\phi_m N \begin{cases} \text{1차 유기기전력 : } E_1 = 4.44f\phi_m N_1 \\ \text{2차 유기기전력 : } E_2 = 4.44f\phi_m N_2 \end{cases}$$

○  $\phi_m$  = 자속밀도 [Wb/m<sup>2</sup>] × 단면적 [m<sup>2</sup>]

$$4) \text{ 권수비 : } a = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$$

(2) 실제 변압기(등가회로로 표현)



1) 변압기는 2차가 무부하 상태에서도 여자회로에 전류가 공급된다.

: 여자회로를 자화시키기 위해서

2) 여자회로

① 파형 : 자기포화현상 및 히스테리시스현상에 의해 정현파가 아닌 제3고조파를 포함한 왜형파가 된다.

② 여자전류(무부하전류)

가. 철손전류 :  $I_i = \frac{V_1}{R}$

나. 자화전류 :  $I_\phi = \frac{V_1}{X_L} \rightarrow$  자속을 발생하는 전류

$$I_0 = \sqrt{I_i^2 + I_\phi^2} = \sqrt{\left(\frac{V_1}{R}\right)^2 + \left(\frac{V_1}{X_L}\right)^2} = \frac{V_1}{Z_0} \rightarrow Z_0 = \frac{V_1}{I_0} [\Omega]$$

3) 여자 어드미턴스 :  $Y_0 = \sqrt{g^2 + b^2} = \frac{I_0}{V_1} [S]$

4) 철손(변압기 내부에 발생하는 손실)

$$P_i = V_1 I_i = \frac{V_1^2}{R} = GV_1^2 [W]$$

5) 임피던스 환산  $\left( a = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \rightarrow a^2 = \frac{Z_1}{Z_2} \right)$

$$Z_1 = r_1 + jx_1, Z_2 = r_2 + jx_2$$

① 1차로 환산한 임피던스

$$\begin{aligned} Z_1' &= Z_1 + a^2 Z_2 = (r_1 + jx_1) + a^2 (r_2 + jx_2) \\ &= (r_1 + a^2 r_2) + j(x_1 + a^2 x_2) \\ &= \sqrt{(r_1 + a^2 r_2)^2 + (x_1 + a^2 x_2)^2} \end{aligned}$$

② 2차로 환산한 임피던스

$$\begin{aligned} Z_2' &= \frac{Z_1}{a^2} + Z_2 = \frac{(r_1 + jx_1)}{a^2} + (r_2 + jx_2) = \left( \frac{r_1}{a^2} + r_2 \right) + j \left( \frac{x_1}{a^2} + x_2 \right) \\ &= \sqrt{\left( \frac{r_1}{a^2} + r_2 \right)^2 + \left( \frac{x_1}{a^2} + x_2 \right)^2} \end{aligned}$$

6) 변압기 등가회로 시험

- ① 무부하(개방) 시험 : 철손, 여자전류, 여자 임피던스, 여자 어드미턴스
- ② 단락 시험 : 임피던스 전압, 임피던스 와트(동손)
- ③ 권선 저항 측정 시험

7) 절연유 구비조건  $\left\{ \begin{array}{l} \text{분해 : 수소}(H_2) \\ \text{대체 : 콘서베이터 설치} \end{array} \right.$

- ① 절연내력이 커야 한다.
- ② 점도가 낮고 냉각효과가 커야 한다
- ③ 인화점이 높고 응고점이 낮아야 한다.
- ④ 절연재료 및 금속에 접촉하여도 화학 작용을 일으키지 말아야 한다.
- ⑤ 높은 온도에서 석출물이 생기거나 산화하지 말아야 한다.

## 2. 백분율 전압강하

(1) % 저항강하(%R=p)

$$p = \frac{\text{정격전류} \times \text{저항}}{\text{정격전압(상전압)}} \times 100 = \frac{I_n R}{V_n} \times 100 = \frac{\text{동손(임피던스 와트)}[W]}{\text{변압기 용량}[kVA]} \times 100$$

1) V[V], P[VA]로 주어진 경우  $: p = \frac{I_n R}{V_n} \times 100 = \frac{\frac{P}{V} \cdot R}{V} = \frac{PR}{V^2} \times 100$

2) V[kV], P[kVA]로 주어진 경우

$$: p = \frac{PR}{V^2} \times 100 = \frac{P \times 10^3 R}{(10^3 V)^2} \times 10^2 = \frac{PR \times 10^5}{10^6 V^2} = \frac{PR}{10 V^2}$$

(2) % 리액턴스 강하(%X=q)

$$q = \frac{\text{정격전류} \times \text{리액턴스}}{\text{정격전압(상전압)}} \times 100 = \frac{I_n X}{V_n} \times 100$$

1) V[V], P[VA]로 주어진 경우 :  $q = \frac{PX}{V^2} \times 100$

2) V[kV], P[kVA]로 주어진 경우 :  $q = \frac{PX}{10 V^2}$

(3) %Z =  $\frac{\text{정격전류} \times \text{임피던스}}{\text{정격전압(상전압)}} \times 100 = \frac{I_n Z}{V_n} \times 100 = \sqrt{p^2 + q^2}$

1) V[V], P[VA]로 주어진 경우 :  $\%Z = \frac{PZ}{V^2} \times 100$

2) V[kV], P[kVA]로 주어진 경우 :  $\%Z = \frac{PZ}{10 V^2}$

3) 임피던스 전압

①  $V_s = I_n Z$

: 변압기 내에 정격전류가 흐를 때의 내부 전압강하

② 임피던스 전압을 걸 때의 입력 : 임피던스 와트(동손)

### 3. 전압변동률(voltage regulation)

○ 전부하일 때와 무부하일 때의 2차 단자전압이 서로 다른 정도를 표시한 것

○ 전압변동률은 전등의 광도, 수명, 전동기의 출력 등에 영향을 미친다.

$$\varepsilon = \frac{V_{20} - V_{2n}}{V_{2n}} \times 100 = p \cos \theta \pm q \sin \theta \begin{cases} + : \text{지상(기준)} \\ - : \text{진상} \end{cases}$$

(1) 무부하시 2차 단자전압 :  $V_{20} = V_{2n}(1 + \varepsilon)$

(2) 2차 정격전압 :  $V_{2n} = \frac{V_{20}}{1 + \varepsilon}$

(3)  $\cos \theta = 1$ 인 경우의 전압변동률

$$\varepsilon = p \cos \theta + q \sin \theta \rightarrow \varepsilon = p$$

(4) 전압변동률이 최대일 때 :  $\varepsilon_{\max} = \%Z = \sqrt{p^2 + q^2}$

(5) 전압변동율이 최대일 때 역률 :  $\cos\theta = \frac{p}{\sqrt{p^2 + q^2}}$

(6) 전압변동율이 최소일 때 역률 :  $\cos\theta = \frac{q}{\sqrt{p^2 + q^2}}$

#### 4. 단락전류

(1)  $I_s = \frac{E}{Z}$

(2)  $I_s = \frac{100}{\%Z} I_n \begin{cases} \text{단상} : I_s = \frac{100}{\%Z} \cdot \frac{P}{V} \\ \text{3상} : I_s = \frac{100}{\%Z} \cdot \frac{P}{\sqrt{3} V} \end{cases}$

#### (3) 임피던스로 환산한 단락전류

##### 1) 1차 임피던스로 환산한 단락전류

$$I_{s1} = \frac{E_1}{Z_1'} = \frac{E_1}{Z_1 + a^2 Z_2} = \frac{E_1}{\sqrt{(r_1 + a^2 r_2)^2 + (x_1 + a^2 x_2)^2}}$$

##### 2) 2차 임피던스로 환산한 단락전류

$$I_{s2} = \frac{E_2}{Z_2'} = \frac{E_2}{Z_1/a^2 + Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_1}{a^2} + r_2\right)^2 + \left(\frac{x_1}{a^2} + x_2\right)^2}}$$

#### 5. 변압기 용량 계산

○뱅크(bank) : 전로에 접속된 변압기 및 콘덴서의 결선상 단위

##### (1) 변압기 2대 : V결선

1) 용량 :  $P_v = \sqrt{3} P_1 [\text{kVA}]$

##### 2) 이용률

① 단상 변압기 2대로 3상 부하에 전력을 공급하는 경우

② 이용률 =  $\frac{\sqrt{3} P_1}{2 P_1} \times 100 = 86.6[\%]$

##### 3) 출력비

① 단상변압기 3대를  $\Delta$ 결선하여 운전 중 1대 고장시 나머지 2대로 V결선하여 3상 부하에 전력을 공급하는 경우

② 출력비 =  $\frac{\text{고장후 출력(2대 : V결선)}}{\text{고장전 출력(3대 : } \Delta \text{결선)}} = \frac{\sqrt{3} P_1}{3 P_1} \times 100 = 57.7[\%]$

- (2) 변압기 3대( $\Delta$ 결선) :  $P_{\Delta} = 3P_1$  [kVA]  
 (3) 변압기 4대(V-V결선) :  $P_{v-v} = 2\sqrt{3}P_1$  [kVA]  
 (4) 과부하율 =  $\frac{\text{실제부하} - \text{변압기용량}}{\text{변압기용량}} \times 100$   
 ○ 실제부하 = 변압기용량(1+과부하율)

## 6. 상수 변환

○ 부하의 종류에 따라서 3상 전원이 필요없는 경우

- (1) 3상 → 2상으로 상수 변환 : 부하의 불평형 방지  
 1) 메이어 결선 (Meyer 결선)  
 2) 우드 브리지 결선 (Wood bridge 결선)  
 3) 스코트 결선(Scott 결선 : T결선)

\* T결선  $\left\{ \begin{array}{l} \text{용도 : 전기철도에 사용} \\ \text{이용률 : } \frac{\sqrt{3}}{2} \times 100 = 86.6[\%] \\ \text{권수비 : } a = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_1}{E_2} \end{array} \right.$

- (2) 3상 → 6상으로 상수 변환 : 맥동율 방지  
 1) 포오크 결선(수은정류기에 사용) 2) 환상결선 3) 2중 성형 결선  
 4) 2중 3각 결선 5) 대각 결선

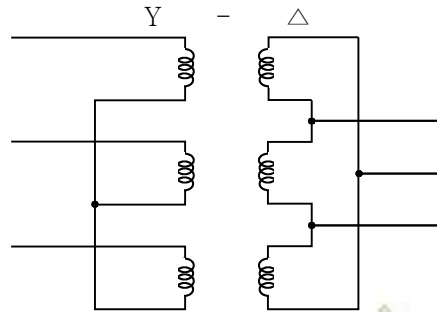
## 7. 변압기 병렬운전

### (1) 병렬운전

#### 1) 가능한 경우

- ① 1차와 2차가 짝수로 조합된 경우(Y-Y 와  $\Delta$ - $\Delta$ )  
 ② 1차와 2차가 짝수이면서 위상차가 생기는 경우(Y- $\Delta$ 와  $\Delta$ -Y)  
 : 1차의 권수비보다 2차의 권수비를 3배 증가하면 할 수 있다.

운전 가능	운전 불가능
1 차 : 2 차	1 차 : 2 차
Y Y : Y Y	Y Y : Y Δ
Δ Δ : Δ Δ	Δ Δ : Δ Y
Y Y : Δ Δ	Y Δ : Δ Δ
Δ Δ : Y Y	Δ Y : Y Y
Y Δ : Δ Y	
Δ Y : Δ Y	



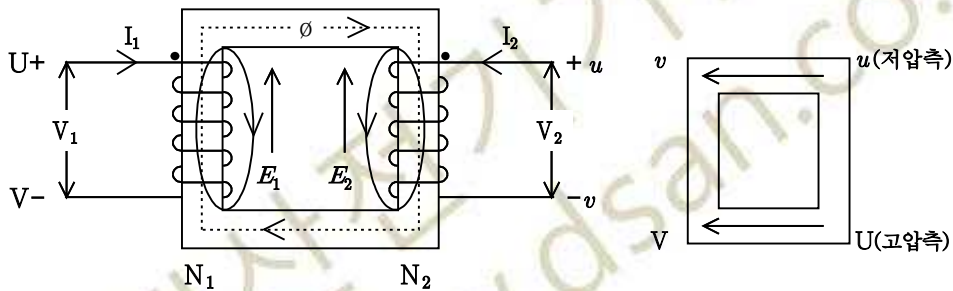
(2) 병렬운전 조건

1) 단상

① 극성이 같아야 한다.

가. 변압기 극성

$$\begin{cases} \text{가극성} & : V_0 = V_1 + V_2 \\ \text{감극성(표준)} & : V_0 = V_1 - V_2 = V_1 - \frac{V_1}{a} \end{cases}$$



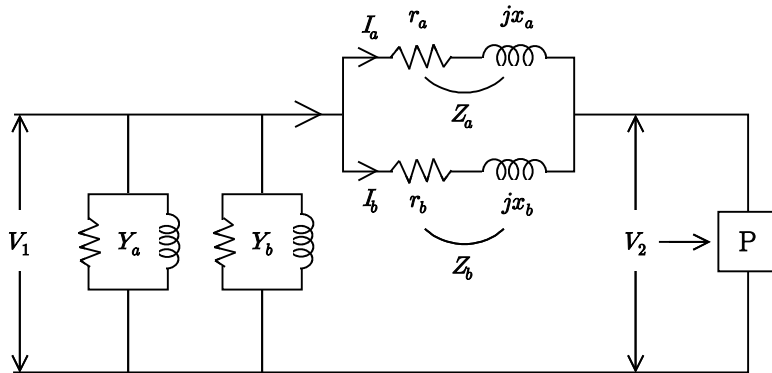
나. 극성이 같지 않으면

: 변압기 내부에 큰 순환전류(횡류)가 흘러서 권선이 소손된다.

② 1차, 2차 정격전압이 같고 권수비가 같아야 한다.

: 권수비가 다르면 2차 권선에 순환전류가 흘러서 권선이 과열된다.

③ %Z강하가 같아야 한다.



가. 부하분담전류 :  $\frac{I_b}{I_a} = \frac{Z_a}{Z_b} \rightarrow$  부하분담전류는 임피던스에 반비례

나. 부하분담비 :  $\frac{P_b}{P_a} = \frac{\%Z_a}{\%Z_b} \cdot \frac{P_B}{P_A} \rightarrow$  분담전류 { 임피던스 : 반비례  
용량 : 비례

( $P_a, P_b$  : 자기 용량,  $P_A, P_B$  : 정격용량)

다. %Z비가 같지 않으면 부하 분담이 부적당하게 된다.

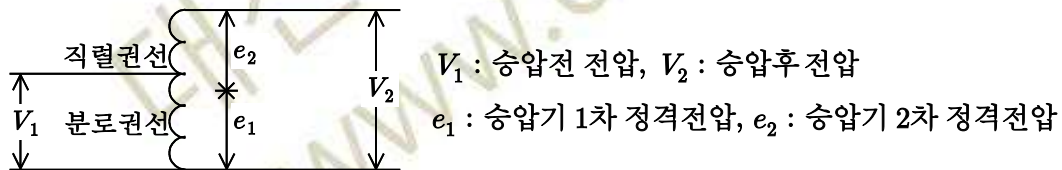
④ 저항과 리액턴스 비가 같아야 한다.

: 상이하면 위상차가 발생하여 동손이 증가

2) 3상 : 단상 4가지+상회전 방향과 위상 변위

## 8. 특수 변압기

(1) 단권변압기



$$V_1 = V_L, V_1 = e_1 \rightarrow V_2 = e_1 + e_2, V_1 \neq e_1 \rightarrow V_2 \neq e_1 + e_2$$

1) 승압 후 전압

$$\textcircled{1} V_1 = e_1 \rightarrow V_2 = e_1 + e_2$$

$$\textcircled{2} V_1 \neq e_1 \rightarrow V_2 = V_1 \left(1 + \frac{1}{a}\right) = V_1 \left(1 + \frac{e_2}{e_1}\right)$$

2) 승압기 용량 :  $P = \frac{e_2}{V_2} \times \text{부하용량 [kVA]}$

3) 용도 : 승압 및 강압용, 기동보상기

4) 특징

- ① 1차와 2차에 공통된 권선을 사용한다
  - 가. 사용재료가 적기 때문에 손실이 적고 효율이 향상된다.
  - 나. 전압강하, 전압변동율이 작다.
  - 다. 기계기구를 소형화 할 수 있다.
- ② 단상 및 3상 모두에 사용
- ③ 1차와 2차가 절연이 되어 있지 않기 때문에 단락사고시 단락전류 증가

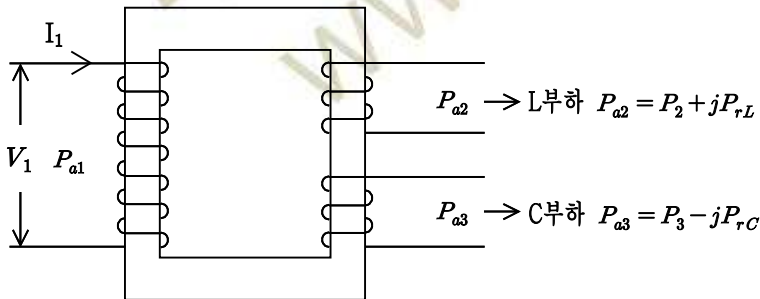
5) 용량 계산

- ① 자기용량 = 변압기용량 = 등가용량
- ② 부하용량 = 선로용량 = 출력

	단권변압기 1대, 단권변압기 3대 (Y결선)	단권변압기 2대 (V결선)	단권변압기 3대 (Δ결선)
자기용량 부하용량	$\frac{V_h - V_L}{V_h}$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{V_h - V_L}{V_h}$	$\frac{V_h^2 - V_L^2}{\sqrt{3} V_h V_L}$

(2) 제3권선 변압기

- 1) 결선 : Y-Y-Δ
- 2) 3차 권선(안정권선 : Δ)
  - ① 제3고조파 제거
  - ② 조상설비 접속
    - { 전압 조정 : 전기의 성질을 바꾸지 않는 것(승압 및 강압은 제외)
    - { 역률 개선
  - ③ 발전소내 전원 공급
- 3) 1차 전류



$$P_{a1} = P_{a2} + P_{a3} = (P_2 + jP_{rL}) + (P_3 - jP_{rC}) = (P_2 + P_3) + j(P_{rL} - P_{rC})$$

$$\rightarrow I_1 = \frac{P_{a1}}{V_1} = \frac{P_2 + P_3}{V_1} + j \frac{P_{rL} - P_{rC}}{V_1} \text{ [A]}$$

9. 철손 :  $P_i \propto \frac{1}{f}$

$P_i = \text{히스테리시스손}(P_h) + \text{와류손}(P_e)$

(1) 실험식

①  $P_h = k f B_m^{1.6}$        $\left\{ \begin{array}{l} k : \text{과형률} \\ t : \text{규소강판 두께} \end{array} \right.$   
 ②  $P_e = k(f B t)^2 = f^2 B^2 t^2$

(2) 유도식

$E = 4.44 f \phi_m N$ 에서  $\phi_m = B \times A \begin{cases} B \propto \frac{1}{f} \\ B \propto \frac{E}{f} \end{cases}$

1)  $P_h = k f B_m^{1.6} = k f \frac{1}{f^{1.6}} = k \frac{1}{f^{0.6}} \propto \frac{1}{f}$

2)  $P_e = k \left( f \cdot \frac{E}{f} \right)^2 = k E^2 \rightarrow \begin{cases} P_e \neq f \\ P_e \propto E^2 \end{cases}$

10. 주파수와 비례, 반비례 관계

(1) 비례 : 전압강하, 역률, 효율, 동기속도, 회전자속도, %임피던스 강하, 누설 리액턴스

(2) 반비례 : 손실(철손), 여자전류, 자속밀도, 온도

11. 효율

$\eta = \frac{\text{출력}}{\text{출력} + \text{손실}} \begin{cases} \text{출력} = \text{유효전력} : P = P_a \cos\theta \\ \text{손실} = \text{철손}(P_i) + \text{동손}(P_e) \end{cases}$

(1) 전부하시 효율

$\eta = \frac{\text{출력}}{\text{출력} + \text{철손} + \text{동손}} \times 100 = \frac{P_a \cos\theta}{P_a \cos\theta + P_i + P_c} \times 100$

1) 최대 조건  $\begin{cases} \text{전부하시} : P_i = P_c \\ \text{과부하시} : P_i > P_c \end{cases}$

2) 최대효율 조건 :  $P_i = \eta^2 P_c \rightarrow \eta = \sqrt{\frac{P_i}{P_c}}$

(2) 부하가  $\frac{1}{m}$  감소시 효율

$$\eta_{\frac{1}{m}} = \frac{\frac{1}{m} P_a \cos\theta}{\frac{1}{m} P_a \cos\theta + P_i + \left(\frac{1}{m}\right)^2 P_c} \times 100$$

$$\circ \text{ 손실} : P_l = P_i + \left(\frac{1}{m}\right)^2 P_c$$

(3) T시간 운전시 효율

$$\eta = \frac{P \times T}{P \times T + 24P_i + P_c \times T} \times 100$$

1) 최대조건 :  $24P_i = P_c \times T$

2) 짧은 시간(24시간 이하) :  $P_i < P_c$

3) 무부하손(철손) :  $P_i = \frac{P_c}{24} T$

(4) 전일 효율

$$\eta = \frac{\text{1일중 출력}}{\text{1일중 출력} + \text{1일중 철손} + \text{1일중 동손}} \times 100 = \frac{P'}{P' + P'_i + P'_c} \times 100$$

1)  $P' = P_a \cos\theta \times \text{전부하시간} + \frac{1}{m} P_a \cos\theta \times \text{반부하시간}$

$$P'_i = 24P_i$$

$$P'_c = P_c \times \text{전부하시간} + \left(\frac{1}{m}\right)^2 P_c \times \text{반부하시간}$$

2) 손실 :  $P_l = P'_i + P'_c$

## 12. 계기용 변성기 점검

(1) PT : 계기용변압기

1) 고압을 저압으로 변성하는 기기

2) 2차 전압 : 110[V]

3) PT 점검 : 2차측 개방

(2) CT : 변류기

1) 대전류를 소전류로 변류하는 기기

2) 2차 전류 : 5[A]

3) CT { 점검 : 2차측 단락  
이유 : 2차측 절연 보호

4) CT 결선 방법에 따른 전류 계산

① 가동 결선(기준)

$$I_1 = \text{전류계 지시값}(I_2) \times CT\text{비}$$

$$I_2 = I_1(\text{부하전류}) \times \text{역}CT\text{비}$$

$$CT\text{비} = \frac{I_1}{I_2}$$

② 차동 결선

$$I_1 = \frac{\text{전류계 지시값}(I_2)}{\sqrt{3}} \times CT\text{비}$$

$$I_2 = \sqrt{3} I_1(\text{부하전류}) \times \text{역}CT\text{비}$$

### 13. 내부고장 보호 장치

1) 비율차동계전기=전류차동계전기=차동계전기

- ① 기기 내부고장 보호 : 발전기, 변압기
- ② 모선 보호
- ③ 1차와 2차의 전류차로 동작
- ④ 상간 및 층간 단락보호

2) 부흐홀쯔 계전기 : 변압기 내부 고장 보호

- ① 변압기 주탱크와 콘서베이터를 연결하는 관 도중에 설치
- ② 절연유 열화 방지

## 제4장 유 도 기

### ○ 유도기(induction machine)

- (1) 변압기와 같이 1차 권선, 2차 권선이 있고, 1차 권선에만 전력을 공급하고 2차 권선에는 전자유도작용에 의해서 전력을 간접적으로 공급받는 회전기기
- (2) 1차와 2차 권선이 원주상에 분포되어 감겨져 있고, 회전에 의해서 항상 변화한다.

### ○ 유도기 분류

- (1) 단상 유도전동기 : 가정용에 사용
- (2) 3상 유도전동기 : 농형, 권선형

#### 1) 농형

- ① 구조가 간단하고 튼튼하다.
- ② 회전자 슬롯 내부에 권선 삽입
- ③ 기동전류가 크고 기동 토크가 작다.
- ④ 사구 슬롯 채움 : 크로우링 현상 방지
- ⑤ 소형 및 중형에 이용

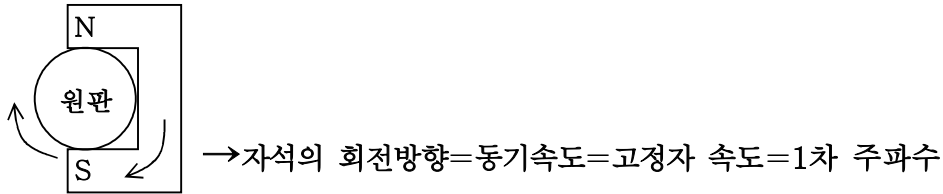
#### 2) 권선형

- ① 속도 조정 및 기동이 양호 : 2차 저항 이용
- ② 기동전류가 작고 기동 토크가 크다.
- ③ 게르게스 현상 발생
- ④ 중형 및 대형에 이용

### ○ 유도전동기가 사용되는 이유

- 1. 전원을 간단히 얻을 수 있다.
- 2. 구조가 간단하고 튼튼하다.
- 3. 취급이 용이하고 운전이 쉽다.
- 4. 정속도 전동기로서 부하의 증감에 대해서 속도 변화가 적다.
- 5. 가격이 저렴하다.

# 1. 유도기의 원리



원판의 회전방향=회전자 속도(기준)

- {회전자 속도는 동기 속도와 동일한 방향으로 회전
- {회전자 속도는 동기 속도보다 약간 늦게 회전

## (1) 슬립

1) 슬립 : 동기속도와 회전자 속도와의 비

$$s = \frac{\text{동기속도} - \text{회전자속도}}{\text{동기속도}} = \frac{N_s - N}{N_s}$$

① 회전자 속도 :  $N = N_s(1 - s) = N_s - sN_s = \frac{120f}{P}(1 - s)$

→ 회전자속도는 동기속도보다 s배만큼 느다.

## ② 슬립의 범위

가. 발전기 :  $s < 0$

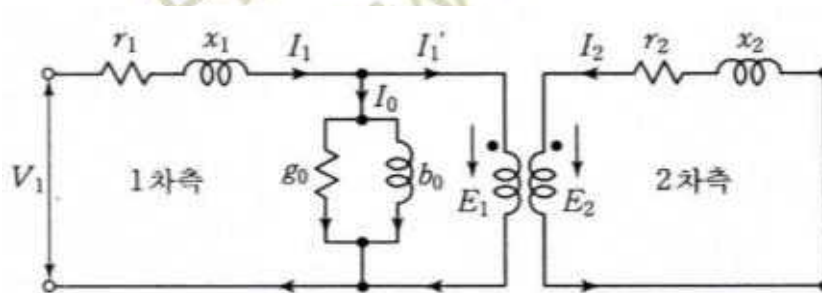
나. 전동기 :  $0 < s < 1$

다. 역상 제동

○ 3선중 2선의 접속을 바꾸어서 전동기를 급정지시키는 방법

$$s = \frac{N_s - (-N)}{N_s} = \frac{N_s + N}{N_s} \rightarrow 1 < s < 2$$

## (2) 유도기 관계식



### 1) 고정자 관계식

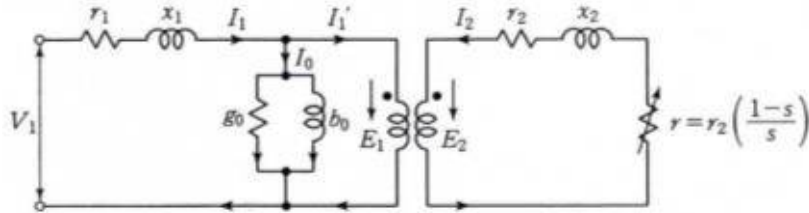
① 유기기전력 :  $E = 4.44f\phi_m NK_w$

가. 1차 유기기전력 :  $E_1 = 4.44f\phi_m N_1 K_{w1}$

나. 2차 정지시 전압 :  $E_2 = 4.44f\phi_m N_2 K_{w2}$

② 정지시 권수비 :  $\alpha = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 K_{w1}}{N_2 K_{w2}}$

2) 회전자관계식



① 회전자 전압 :  $E_2' = sE_2 = \frac{N_s - N}{N_s} E_2$  ( $E_2$  : 2차 정지시 전압)

② 회전자 주파수 :  $f_2' = sf_1 = \frac{N_s - N}{N_s} f_1$

③ 회전자 전류

$$I_2' = \frac{E_2'}{Z_2} = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}$$

④ 회전자 전압비 :  $a = \frac{E_1}{E_2'} = \frac{E_1}{sE_2} = \frac{N_1 K_{w1}}{sN_2 K_{w2}} = \frac{\alpha}{s}$

⑤ 1차 전류

○ 상수비 :  $\beta = \frac{m_1}{m_2}$

○  $I_1 m_1 k w_1 N_1 = I_2 m_2 k w_2 N_2$

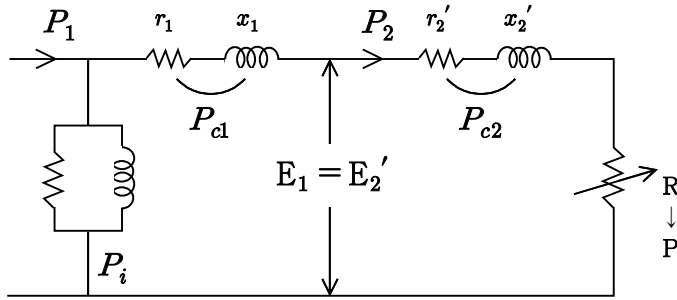
○  $I_1 = I_2' = \frac{m_2 k w_2 N_2}{m_1 k w_1 N_1} I_2 = \frac{I_2}{\alpha \beta}$

⑥ 2차 역율 :  $\cos\theta_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}$

⑦ 외부저항(회전자의 기계적 출력 표시)

$$R = r_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) = r_2 \left( \frac{1}{s} - 1 \right) = \alpha^2 \beta r_2 \left( \frac{1-s}{s} \right)$$

## 2. 전력 변환식



(1) 1차 입력 :  $P_1 = P_i + P_{c1} + P_2$

(2) 2차 입력 :  $P_2 = P + P_{c2}$

(3) 2차 동손 :  $P_{c2} = sP_2$

(4) 출력 :  $P = P_0 + P_m = P_2 - P_{c2} = P_2 - sP_2 = P_2(1-s)$   $\begin{cases} P_0 : \text{원출력} \\ P_m : \text{기계손} \end{cases}$

(5) 전력관계식

2차 입력	출력	2차 동손
$P_2$	$P$	$P_{c2}$
$P_2$	$P_2(1-s)$	$sP_2$
1	$(1-s)$	$s$

(6) 2차 입력과 기계적 출력과의 관계식

$$: P = P_2 - P_{c2} = P_2 - sP_2 = (1-s)P_2 = \frac{N}{N_s} P_2$$

(7) 1차 효율 :  $\eta_1 = \frac{P}{P_1} \times 100$

(8) 2차 효율

1)  $\eta_2 = \frac{N}{N_s} \times 100 = \frac{N_s(1-s)}{N_s} \times 100 = (1-s) \times 100 = \frac{\omega}{\omega_0} \times 100$

( $\omega$  : 회전자 각속도,  $\omega_0$  : 동기 각속도)

2)  $\eta_2 = \frac{P}{P_2} \times 100 = \frac{P_2(1-s)}{P_2} \times 100 = (1-s) \times 100$

$$= \frac{P}{P_2} \times 100 = \frac{P}{P + P_{c2}} \times 100 = \frac{P_0 + P_m}{P_0 + P_m + P_{c2}} \times 100$$

(9) 슬립 구하는 공식

$$1) s = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100$$

$$2) E_2' = sE_2 \rightarrow s = \frac{E_2'}{E_2} \times 100$$

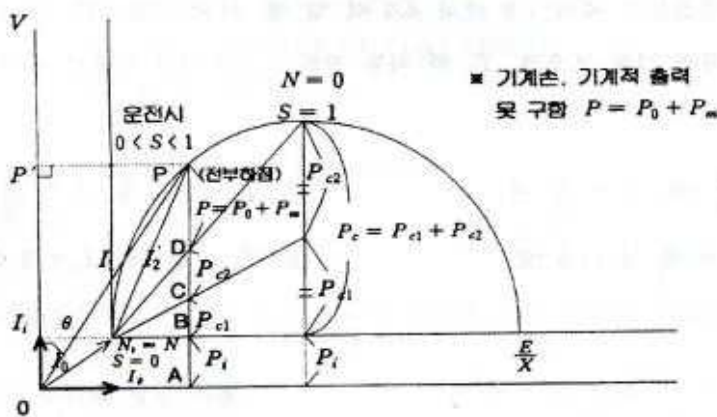
$$3) f_2' = sf_1 \rightarrow s = \frac{f_2'}{f_1} \times 100$$

$$4) P_{c2} = sP_2 \rightarrow s = \frac{P_{c2}}{P_2} = \frac{P_{c2}}{P + P_{c2}} = \frac{P_{c2}}{P_0 + P_m + P_{c2}}$$

### 3. 원선도

(1) 시험법 : 무부하시험, 구속시험, 권선저항 측정 시험

(2) 원선도 작성



$$1) 1차 입력 : P_1 = P_i + P_{c1} + P_{c2} + P = AP$$

$$2) 2차 입력 : P_2 = P_{c2} + P = CP$$

$$3) \eta_1 = \frac{P}{P_1} \times 100 = \frac{DP}{AP} \times 100$$

$$4) \eta_2 = \frac{P}{P_2} \times 100 = \frac{DP}{CP} \times 100$$

$$5) \cos\theta = \frac{OP'}{OP} \times 100$$

$$6) \text{ 전력원선도 지름 : } \frac{E}{x}$$

7) 전력원선도에서 나타낼 수 없는 것 : 기계손, 기계적 출력

#### 4. 토크

##### (1) 토크(회전력)

○

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n} = \frac{P}{2\pi \frac{N}{60}} = \frac{60P}{2\pi N} = \frac{60P}{2\pi \cdot N_s(1-s)} = \frac{60P}{2\pi \cdot \frac{120f}{P}(1-s)} = \frac{PP}{4\pi f(1-s)}$$

1) 기계적 출력 :  $P = \frac{4\pi f(1-s)}{P} T[\text{W}]$

2)  $1[\text{kg} \cdot \text{m}] = 9.8[\text{N} \cdot \text{m}] \rightarrow [\text{N} \cdot \text{m}] = \frac{1}{9.8}[\text{kg} \cdot \text{m}]$

① 동기속도 및 2차 입력이 주어진 경우

$$: T = \frac{1}{9.8} \cdot \frac{60P}{2\pi N_s(1-s)} = \frac{1}{9.8} \cdot \frac{60P_2(1-s)}{2\pi N_s(1-s)} = 0.975 \frac{P_2}{N_s} [\text{kg} \cdot \text{m}]$$

② 회전자속도 및 출력이 주어진 경우

$$: T = \frac{1}{9.8} \cdot \frac{60P}{2\pi N} = 0.975 \frac{P}{N} [\text{kg} \cdot \text{m}]$$

##### (2) 전부하 토크

1) 출력

$$P = E_2 I_2' \cos\theta = E_2 \times \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \times \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}$$

$$= \frac{E_2 \cdot sE_2 \cdot r_2}{r_2^2 + (sx_2)^2} = \frac{sE_2^2 r_2}{r_2^2 + (sx_2)^2}$$

2) 토크 :  $T = \frac{P}{\omega} = \frac{1}{\omega} \frac{sE_2^2 r_2}{r_2^2 + (sx_2)^2} = K \frac{sE_2^2 r_2}{r_2^2 + (sx_2)^2}$

3)  $T \propto P \propto V^2, s \propto \frac{1}{V^2}$

##### (3) 최대 토크 : $r_2 = sx_2, s=1$ 일 때 발생

○ 전부하 토크에서  $T_{\max} = K \frac{sE_2^2 sx_2}{2(sx_2)^2} = K \frac{E_2^2}{2x_2}$

: 최대 토크는 2차 저항과 슬립에 관계없이 일정(비례추이)

1) 최대 토크를 갖는 슬립 :  $r_1 \doteq 0, x_1 \doteq 0$

$$s_t = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} = \frac{r_2'}{(x_1 + x_2')} = \frac{r_2'}{x_2'}$$

2) 최대 토크시 회전자속도 :  $N = N_s(1 - s_t) = \frac{120f}{P} \left(1 - \frac{r_2'}{x_2'}\right)$

3) 최대 토크시 슬립( $s_t$ )과 최대 출력시 슬립( $s_p$ )의 대소 관계 :  $s_t > s_p$

## 5. 비례추이

○ 2차 저항을 가감하여 속도 제어하는 방법(권선형 유도전동기에서만 사용)

(1) 기동시 외부저항

$$\frac{r_2'}{s_t} = \frac{r_2' + R}{1} \rightarrow R = r_2' \left( \frac{1 - s_t}{s_t} \right)$$

기동시 외부저항식에 최대 토크시 슬립을 대입하면

$$\frac{r_2'}{s_t} = \frac{r_2' + R}{1} \rightarrow \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} = r_2' + R$$

$$R = \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} - r_2' : \text{공식}$$

$$(r_1 \approx 0) = (x_1 + x_2') - r_2' : \text{계산}$$

(2) 비례추이 원리

1) 최대토크는 항상 일정

2)  $r_2'$  값이 클수록 { 기동 토크 증가  
기동전류 감소

3)  $s_t \propto r_2', R \propto r_2'$

4) 비례추이 할 수 없는 것 : 출력, 2차 동손, 효율

## 6. 속도제어법

(1). 권선형

1) 2차 저항 제어법

① 비례추이 원리 이용

② 조작이 간단하고 동기속도 이하의 속도에서 제어를 연속적이고 광범위하게 할 수 있다.

③ 크레인이나 권상기에 사용

2) 종속법

① 직렬 종속법

가. 2대 전동기 극수의 합으로 속도 제어

나.  $N = \frac{120f}{P_1 + P_2} [\text{rpm}]$

② 병렬 종속법

가. 1대 발전기, 1대 전동기 극수의 합으로 속도 제어

나.  $N = \frac{240f}{P_1 + P_2}$  [rpm]

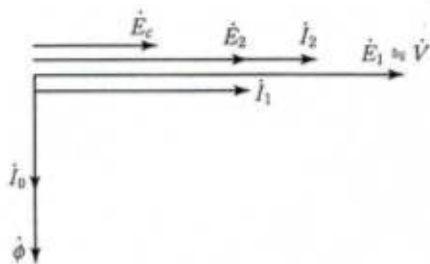
③ 차동 종속법

가. 2대 전동기 극수의 차로 속도 제어

나.  $N = \frac{120f}{P_1 - P_2}$  [rpm]

3) 2차 여자 제어법

- ① 유도전동기 2차 회로에 2차 주파수  $f_2'$ 와 동일한 주파수로 적당한 크기 및 위상을 외부에서 인가하는 것
- ② 전동기의 속도를 상하로 광범위하게 제어가 가능하고 역률도 개선할 수 있다.
- ③ 여자 전원 :  $E_c = E_2' = sE_2$
- ④ 여자 주파수 :  $f_c = f_2' = sf_1$
- ⑥ 2차 유기기전력과 여자전원 동일



$$\uparrow I_2 = \frac{\uparrow sE_2 + E_c}{\sqrt{r_2^2 + (sX_2)^2}}$$

○ 속도 증가, 역률 증가

→ 속도가 증가하면 전압, 전류 벡터가 근접이 되어서 역률이 향상된다.

(2) 농형 :  $N = N_s(1-s) = \frac{120f}{P}(1-s)$

- 1) 주파수 변환법 : 방직공장의 포트모터, 선박의 전기추진장치에 이용
- 2) 극수 변환법 : 공작기계, 엘리베이터, 송풍기 펌프에 이용

3) 전압 제어법

(3) 속도변동을 대소

○ 1상 → 3상 농형 → 3상 권선형

(4) 역률 대소

○ 주파수 제어 → 극수 변환 → 전압 제어 → 저항 제어

## 7. 유도전동기의 기동법

(1). 권선형 유도 전동기: 2차 저항제어 이용

(2) 농형 유도 전동기

1) 전전압법(직입 기동법)

① 정지하고 있는 전동기에 정격전압을 직접 인가하는 방법

② 5[kW]이하 소용량에 사용

2) Y-Δ기동법

① 기동 : Y결선  $\left\{ \begin{array}{l} \text{기동전압} : \frac{1}{\sqrt{3}} \text{ 감소} \\ \text{기동 토크, 기동 전류} : \frac{1}{3} \text{ 감소} \end{array} \right.$

② 5~15[kW] 정도의 전동기에 사용

3) 기동보상기법

① 단권 변압기를 이용하여 기동전류 제한

② 15[kW]이상에서 사용

(4) 이상기동현상

1) 크로우링 현상(농형)

① 회전자 속의 기본파와 고정자 속의 고조파에 의해서 일어나는 현상

③ 유도 전동기를 기동할 때 낮은 속도의 어느 점에서 회전자가 걸려 그 이상 가속되지 않고 전류가 매우 커져서 전동기를 태우게 되는 현상

③ 고조파 차수 발생 :  $h = 2nm \pm 1$

가.  $h = 2nm$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{기본파 : 회전자계가 발생하지 않는다.} \\ h = 3, 6, 9, \dots \end{array} \right.$

나.  $h = 2nm + 1$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{기본파와 동일방향, } 1/n\text{배의 속도} \\ h = 7, 13, 19, \dots \end{array} \right.$

다.  $h = 2nm - 1$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{기본파와 반대방향, } 1/n\text{배의 속도} \\ h = 5, 11, 17, \dots \end{array} \right.$

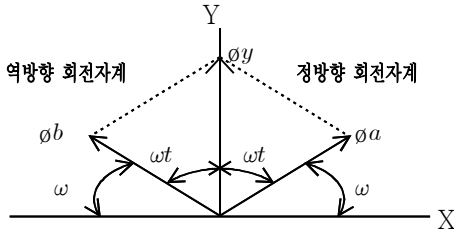
④ 대책 : 경사슬롯(사구 슬롯) 채용

2) 게르게스 현상(권선형)

: 3상 권선형 유도 전동기의 2차 회로 중 1선이 단선하는 경우에는 2차 회로에 단상 전류가 흐르기 때문에, 부하가 약간 무거우면 슬립 50[%]인 곳에서 걸리어 그 이상 가속되지 않는 현상

## 9. 단상 유도전동기

- 정방향 및 역방향 회전자계가 동시에 존재하기 때문에 기동 토크가 발생하지 않으므로 기동장치가 필요하다.



### (1) 기동장치의 종류 및 기동 토크 대소

- 반발기동형 → 반발유도형 → 콘덴서기동형 → 분상기동형 → 세이딩코일형

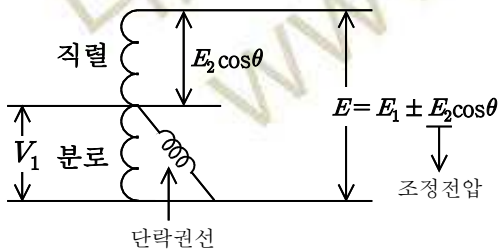
### (2) 기동장치의 특징

- ① 반발기동형 특징 : 브러시 및 정류자편 부착
- ② 콘덴서 기동형
  - 가. 역율 및 효율 양호
  - 나. 기동토크 증가, 기동전류 감소
  - 다. 소음 감소
- ③ 분상기동형 : 저항 : 대, 리액턴스 : 소

## 10. 유도전압조정기(IVR)

### (1). 단상 유도전압조정기

- 1) 원리 : 변압기의 교번자계 원리 이용
- 2) 입출력의 위상차 : 없다.
- 3) 단락권선 설치
  - : 직렬권선의 누설리액턴스에 의한 전압강하 방지



- 4) 전압조정범위 :  $V = V_1 + E_2 \sim V_1 - E_2$
  - 5) 출력측 전압 :  $E = E_1 \pm E_2$
  - 6) 정격출력 :  $P = E_2 I_2 \times 10^{-3} [\text{kVA}]$
  - 7) 회전자와 위상각으로 전압 조정
- ### (2) 3상 유도전압조정기

- 1) 원리 : 3상 유도전동기 회전자계 원리 이용
  - 2) 입출력의 위상차 : 있다.
  - 3) 단락권선 불필요
  - 4) 전압조정범위 :  $V = \sqrt{3}(V_1 + E_2 \sim V_1 - E_2)$
  - 5) 출력측 전압 :  $E = \sqrt{3}(E_1 \pm E_2)$
  - 6) 정격출력 :  $P = \sqrt{3} E_2 I_2 \times 10^{-3} [\text{kVA}]$
  - 7) 회전자와 위상각으로 전압 조정
3. 용량 계산

$$\frac{\text{조정}}{\text{부하}} = \frac{V_h - V_L}{V_h} \begin{cases} V_h = E_1 + E_2 \\ V_L = E_1 \end{cases}$$

대산전기기술학원  
www.dsansan.co.kr

## 제5장 정 류 기

### 1. 회전변류기

(1) 전압비 :  $\frac{E_a}{E_d} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{m}$  ( $E_d$  : 직류측 전압,  $E_a$  : 교류측 전압)

(2) 전류비 :  $\frac{I_a}{I_d} = \frac{2\sqrt{2}}{m \cos \theta}$  ( $I_d$  : 직류 전류,  $I_a$  : 교류 전류)

(3) 직류전압 조정 방법

- 1) 직렬 리액턴스에 의한 방법
- 2) 유도전압 조정기를 사용하는 방법
- 3) 부하시 전압 조정기를 사용하는 방법
- 4) 동기 승압기에 의한 방법

(4) 난조의 원인

- 1) 브러시의 위치가 중성축보다 뒤에 있는 경우
- 2) 직류측 부하가 급변하는 경우
- 3) 교류측 주파수가 주기적으로 변동하는 경우
- 4) 역률이 몹시 나쁜 경우

### 2. 수은정류기

(1) 결선

- 1) 1차 결선 : 포오크 결선
- 2) 2차 결선 : 6상 2중 성형 결선

(2) 전압비 :  $\frac{E_a}{E_d} = \frac{\frac{\pi}{m}}{\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{m}}$

(3) 전류비 :  $\frac{I_a}{I_d} = \frac{1}{\sqrt{m}}$

(4) 이상 현상

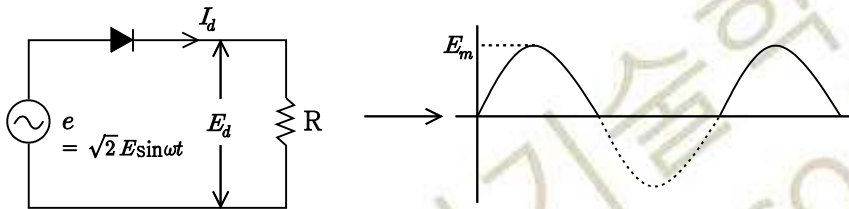
- 1) 역호 : 정류기의 밸브 기능이 상실되는 현상
- 2) 통호 : 아크가 방전되는 현상
- 3) 실호 : 양극의 점호가 실패하는 현상
- 4) 이상전압 : 리액턴스 전압이 유도되어 절연이 파괴되는 현상

(5) 역호의 발생 원인

- 1) 내부 잔존 가스 압력의 상승
- 2) 화성 불충분
- 3) 양극의 수은 방울 부착
- 4) 양극 표면의 불순물 부착
- 5) 양극 재료의 불량
- 6) 전압, 전류의 과대
- 7) 증기 밀도의 과대

3. 다이오드

(1) 단상 반파 정류 회로 : 다이오드 1개



1) 직류 전압 :  $E_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V = 0.45 V$  (V : 상전압, 실효값, 교류 전압)

2) 직류 전류 :  $I_d = \frac{E_d}{R} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{V}{R} = 0.45 \frac{V}{R}$

3) 위상 제어시 직류 전압 :  $E_{d0} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} V(1 + \cos\alpha)$  ( $\alpha$  : 점호각)

4) 최대 첨두전압(PIV)

① 전압강하 무시 :  $PIV = \pi E_d$

② 전압강하 존재 :  $PIV = \pi(E_d + e)$

(2) 단상 전파 정류 회로 : 다이오드 2개, 4개

1) 직류 전압 :  $E_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V = 0.9 V$

2) 직류 전류 :  $I_d = \frac{E_d}{R} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{V}{R} = 0.9 \frac{V}{R}$

3) 위상제어시 직류 전압 :  $E_{d0} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V(1 + \cos\alpha)$

4) 최대첨두전압

① 다이오드 2개 :  $PIV = 2\sqrt{2} V$

- ② 다이오드 4개 :  $PIV = \sqrt{2} V$
- (3) 3상 반파 : 다이오드 3개
- $E_d = 1.17V$
- (4) 3상 전파=6상 반파 : 다이오드 6개
- $E_d = 1.35V$
- (5) 다이오드 보호
- 1) 과전압 : 다이오드 추가 직렬 접속
  - 2) 과전류 : 다이오드 추가 병렬 접속
- (6) 맥동율
- 맥동율 =  $\frac{AC}{DC} \times 100$  { 단상전파 : 48%  
3상반파 : 17%

대산전기기술학원  
www.dsansan.co.kr

## 제6장 교류 정류 자 기

- 교류 전원을 이용하여 전동기 속도를 경제적으로 가감하기 위하여 사용하는 전기기계기구
- 교류정류자 전동기의 특징
  - 1) 연속적으로 광범위한 속도 제어가 가능하다.
  - 2) 기동 토크가 크다.
  - 3) 역률이 양호하다.
  - 4) 구조가 복잡하고 가격이 비싸다.
  - 5) 고장이 발생할 경우 취급이 어렵다.
  - 6) 효율이 낮다.
  - 7) 직류기에 비해서 정류가 어렵다.

### 1. 단상 직권 정류자 전동기

#### (1) 원리

- 1) 계자권선과 전기자권선이 직렬로 접속되어 있다.
- 2) 전기자권선이 회전하면서 자속을 끊어 기전력을 발생시킨다.(속도기전력)
- 3) 속도기전력

① 속도기전력의 최대치 :  $E_m = \frac{PZ}{60a} \phi_m N$

② 속도기전력의 실효치(주자속이 정현파인 경우)

$$E_r = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{PZ}{60a} \sqrt{2} \phi N = \frac{PZ}{60a} \phi N$$

※ 단상직권전동기는 속도가 높을수록 속도기전력이 증가하므로 전압 및 전류 벡터가 근접되어 역률이 좋아진다.

#### (2) 단상직권전동기 설계시 주의사항

- ① 와전류 증가 방지 : 성층 철심 사용
- ② 역률 저하 방지 { 계자권선의 권수를 감소시킨다.  
보상권선 설치 : 역률 개선 및 전기자반작용 감소
- ③ 직류기에 비해 항상 정류가 나쁘다.(저항도선 설치 : 정류 개선)
- ④ 전기자 코일의 권수를 증가시켜 변압기 기전력을 감소시킨다.
- ⑤ 접촉 저항이 큰 브러시를 사용하여 저항 정류를 한다.

(3) 종류 : 직권형, 보상 직권형, 유도보상 직권형

#### (4) 용도 및 특성

- 1) 용도 : 1[kW]이하의 가정용 전기청소기, 전기드릴, 믹서기, 가정용 미싱기, 치과 의료용 엔진기, 영사기 등에 사용

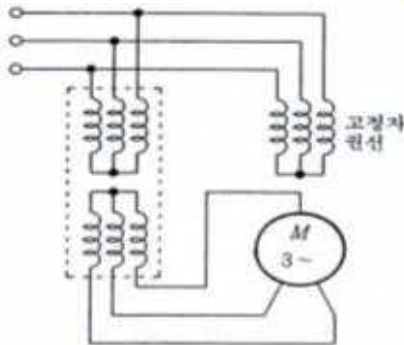
2) 특성 : 직류 직권 전동기에 교류 전원을 인가하는 형태의 전동기로서 교 직 양용 전동기 또는 만능 전동기라 한다.

## 2. 단상 반발 전동기

- (1) 특성 : 권선이 1개로 구조가 간단하고 브러시 위치를 변화하여 속도 제어를 자유롭게 할 수 있다.
- (2) 종류 : 아트킨슨형, 톰슨형, 데리형

## 3. 3상 직권 정류자 전동기

- (1) 3상 유도전동기와 같은 구조의 고정자와 직류기의 전기자와 같은 정류자 권선을 가진 회전자로 구성되어 있다.
- (2) 회전자는 직렬 변압기를 거쳐서 직렬로 접속되어 있다.
- (3) 중간변압기(직렬변압기)를 사용하는 이유
  - 1) 회전자 전압을 정류 작용에 알맞게 선정할 수 있다.
  - 2) 권수비를 조정하여 전동기의 특성을 조정할 수 있다.
  - 3) 경부하시 속도가 상승하는 것을 방지



- (4) 용도 : 송풍기, 펌프, 공작기계 등에 사용

## 4. 3상 분권 정류자 전동기(시라게 전동기 주로 사용)

- 토크의 변화에 대한 속도의 변화가 매우 적어 정속도 및 가감 속도 전동기로 널리 사용