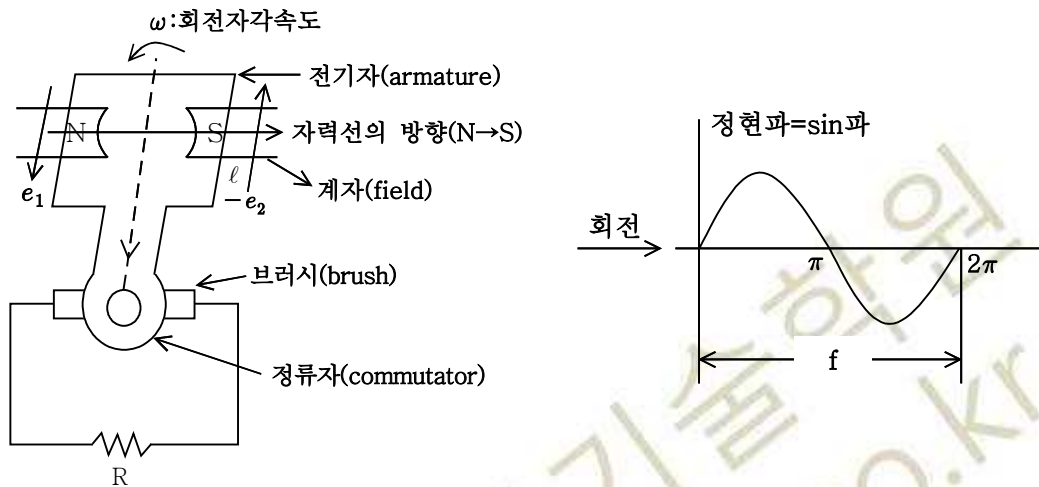


제1장 직 류 기

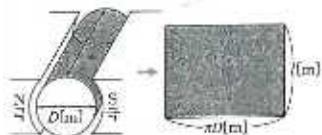
1. 직류 발전기의 원리 및 구조



(1) 도체 1개에 유도된 기전력

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

1) 자속밀도(B)



원의 표면적

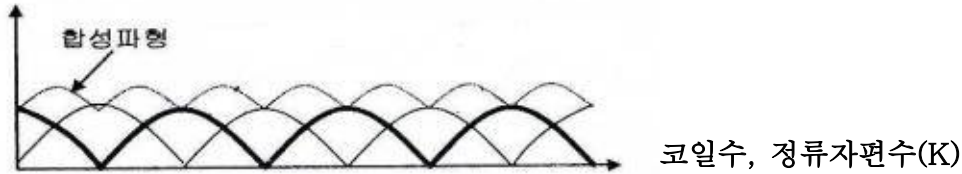
$$S = 2\pi r \ell = 2\pi \times \frac{D}{2} \times \ell = \pi D \ell$$

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

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

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

(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.

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

(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

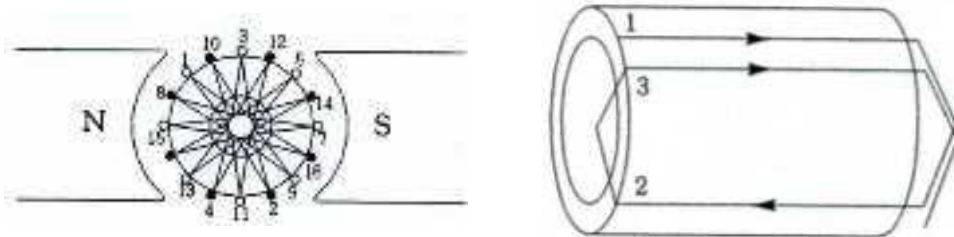
2. 전기자권선법(armature winding)

: 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

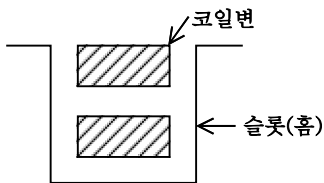


(2) 폐로권

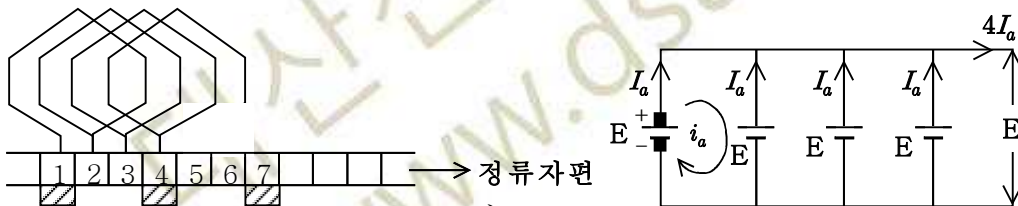
○ 권선의 시종점이 없이 폐회로를 이루고 있는 권선법

(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

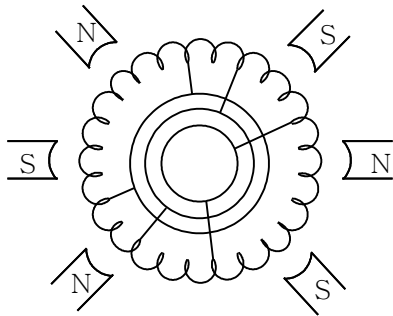
② 병렬회로에 흐르는 전류

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

③ 정류자편수

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

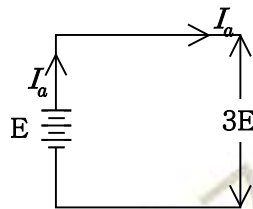
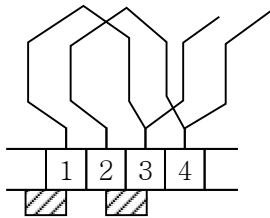
④ 균압환(균압결선) 설치 : 기전력의 차 보상(정류 양호)



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)

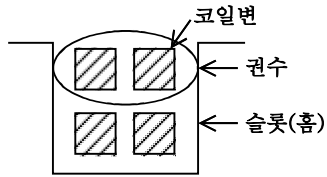
E =도체 1개에 유기되는 기전력×도체수

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

(1) P : 극수

(2) Z : 총도체수

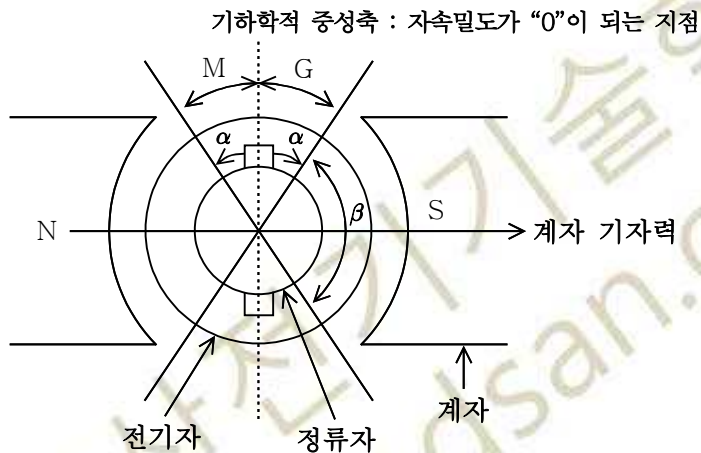
Z =전슬롯수×한 슬롯내 코일변수(권수×2)



- (3) ϕ : 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 : 중성축과 자극축 사이의 각도

기하각도 : 전기자가 1회전시 각도(2π)

- (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 magento 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 $\begin{cases} \text{발전기} : \text{회전방향} \\ \text{전동기} : \text{회전반대방향} \end{cases}$

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

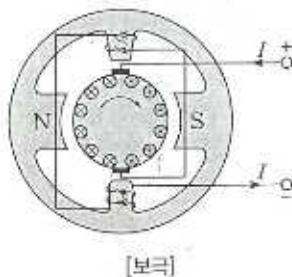
(5) 방지대책

1) 중성축이 이동하는 방향으로 브러시 이동

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

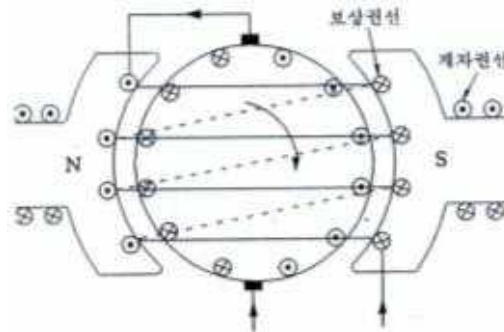
2) 보극 설치(전압정류)

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



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 효과적**이다.

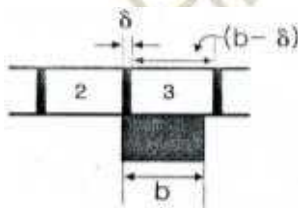


* 모든 기계 기구에는 보극과 보상권선 함께 설치

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

δ : 정류자편 사이의 절연물 두께

(2) 정류주기(정류시간)

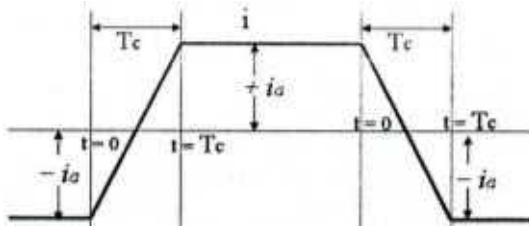
$$T_c = \frac{b - \delta}{V} = \frac{2b - \frac{\pi D}{K}}{\pi D \frac{N}{60}} \text{ [s]}$$

b : 브러시 두께

δ : 정류자편 사이의 절연물 두께

D : 직경

V : 주변속도[m/s]



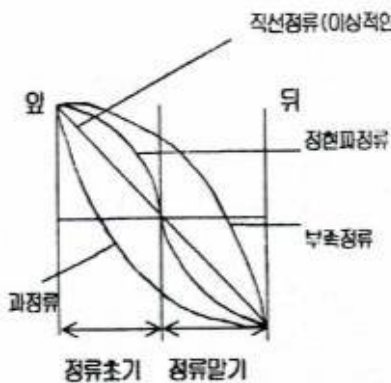
(3) 리액턴스 전압 : 자기 인덕턴스에 의해 발생하는 전압

- 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 정전류**를 얻는데 이용, **전기용접용 전원**에 사용

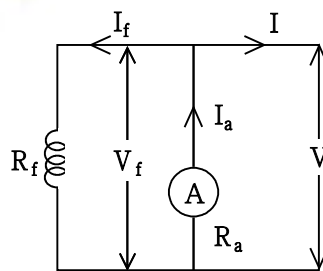
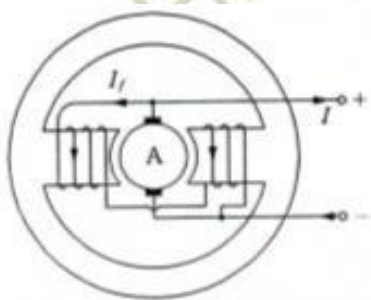
(2) 타여자 방식

1) 독립된 직류 전원에서부터 여자전류를 공급하여 계자 자속을 만드는 방식

2) 타여자 발전기

7. 발전기의 종류 및 특징

(1) 분권 발전기



1) E (유기기전력 : 발전기 내부에서 발생하는 전압)

$E = \text{단자전압} + \text{전기자권선전압} + \text{전압강하}$ { e_a : 전기자반작용 전압강하
 e_b : 브러시접촉면 전압강하

$$= V + I_a R_a + e$$

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

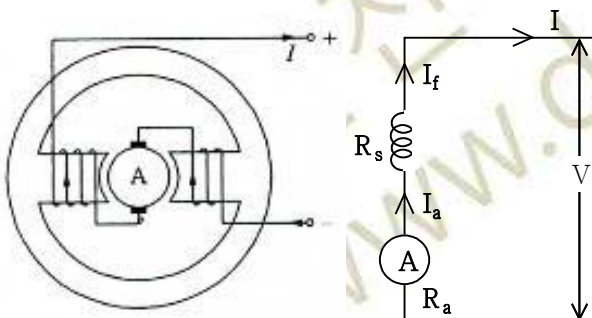
6) I_a (전기자전류) : $I_a = I + I_f = \frac{P}{V} + \frac{V}{R_f}$

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



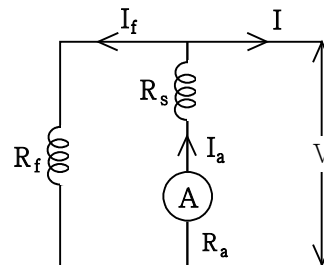
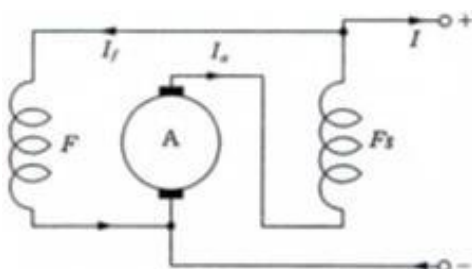
1) 전기자전류 :

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

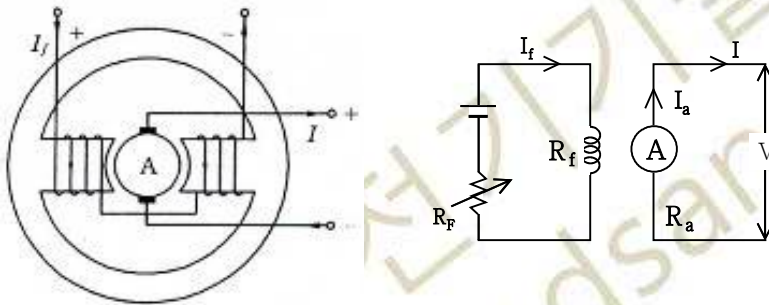
2) 유기기전력 :

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

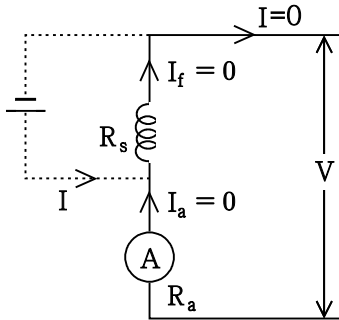
(3) 외분권 복권 발전기



- 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)



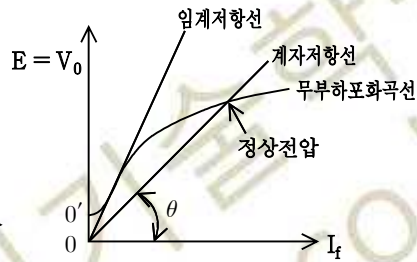
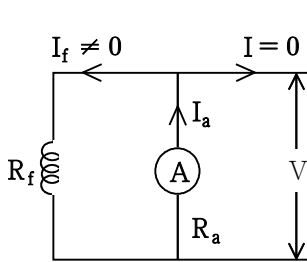
- 1) 전기자전류 : $I_a = I = \frac{P}{V}$
 - 2) 유기기전력 : $E = V + I_a R_a + e$
 - 3) 용도 : 단자전압을 정밀하고 광범위하게 조정할 필요가 있는 분야에 사용
8. 발전기의 특성곡선
- 무부하 포화 곡선 : 유기기전력(E) + 계자전류(I_f)
 - 부하 포화 곡선 : 단자전압(V) + 계자전류(I_f)
 - 외부 특성 곡선 : 단자전압(V) + 부하전류(I)
- (1) 무부하 포화곡선($I=0$)
 - 1) 직권 발전기



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

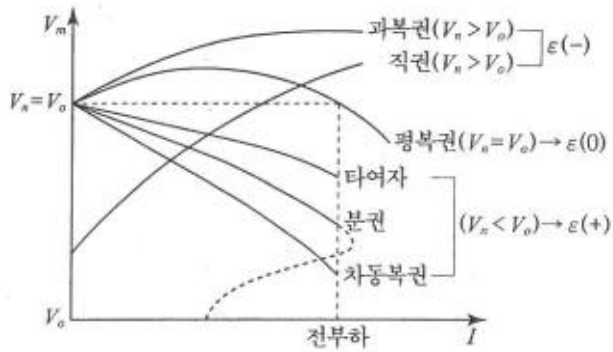
$$\varepsilon = \frac{\text{무부하시 단자전압} - \text{정격전압}}{\text{정격전압}} \times 100 = \frac{V_0 - V_n}{V_n} \times 100$$

$$\begin{cases} V_0 > V_n \rightarrow \varepsilon(+): \text{타여자, 분권, 차동복권} \\ V_0 = V_n \rightarrow \varepsilon(0): \text{평복권} \\ V_0 < V_n \rightarrow \varepsilon(-): \text{과복권, 직권} \end{cases}$$

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

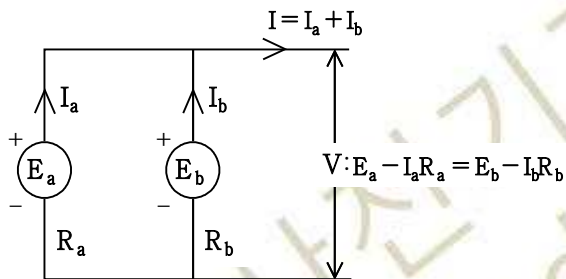
② 정격전압 : $V_n = \frac{V_0}{1+\epsilon}$

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

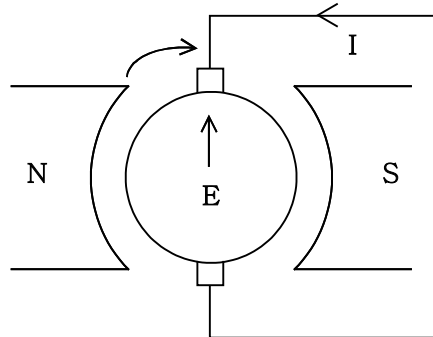
- ① 균압선이 필요한 발전기 : 직권, 복권
- ② 균압선이 필요없는 발전기 : 타여자, 분권

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

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

- 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

$$f = B\ell I_a [\text{N}]$$

- 2) 전 도체에 가해지는 힘

$$F = f \times \frac{Z}{a} = B\ell I_a \times \frac{Z}{a} [\text{N}]$$

- 3) 토오크

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

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

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

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

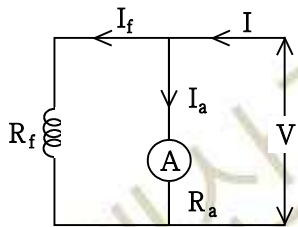
(5) 입력 : $P = VI [\text{W}]$

(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 : $V = E + I_a R_a + e [\text{V}]$

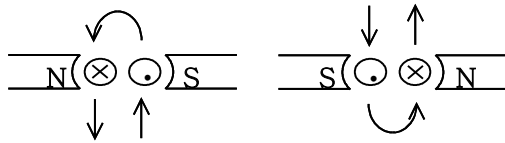
4) 회전 속도

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

5) 토오크(회전력)

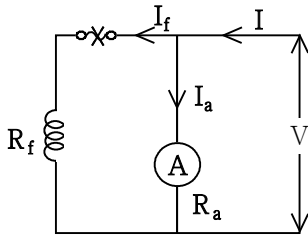
$$T = K \phi I_a [\text{N} \cdot \text{m}]$$

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

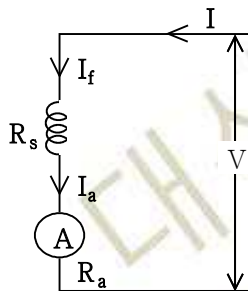
○ 대책

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 : $E = V - I_a(R_a + R_s)$

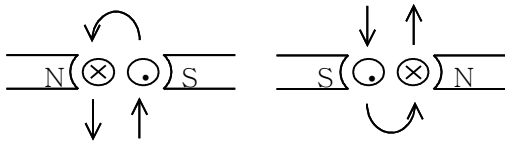
3) 회전수

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

4) 토크 : $I_a = \phi$

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

5) 극성을 반대로 하면



: 극성을 반대로 하여도 회전방향 변화없다.

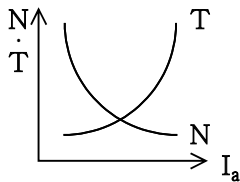
6) 무부하 : $I_a = 0$

① 벨트를 걸고 운전시 벨트가 벗겨진 경우

② $\uparrow n = K \frac{E}{\phi} \rightarrow$ 속도가속 { 위험상태 : 벨트가 벗겨진 경우
정격전압, 무부하상태

③ 대책 : 기어나 체인을 걸고 운전

7) 속도 및 토크 특성 곡선

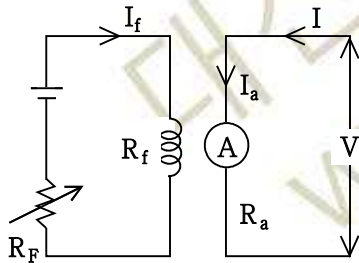


8) 용도 { 부하 변동이 심하고 기동 토크가 큰 곳 : 전철, 크레인, 기중기
가변속도 전동기

(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

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

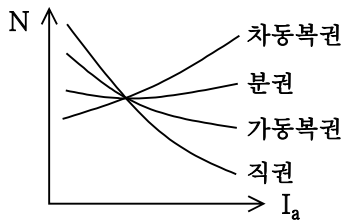
4) 토크 : $T = K \phi I_a [\text{N} \cdot \text{m}]$

5) 용도

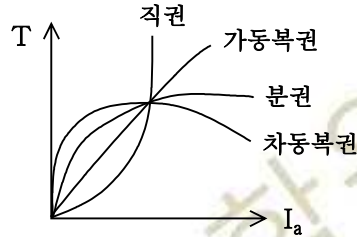
- ① 대형 압연기, 엘리베이터에 사용(정속도 전동기)
- ② 속도를 광범위하고 정밀하게 제어할 수 있는 곳에 사용

(5) 전동기의 속도 및 토오크 특성 곡선

1) 속도 특성곡선



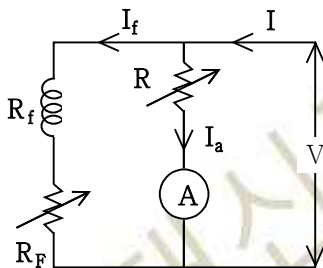
2) 토오크 특성곡선



3) 속도 및 토오크 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)(ϕ 변화 → R_F 이용)

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

(2) **저항 제어법**(R_a 변화 → R 이용)

- 손실이 크고 효율이 저하되기 때문에 단독 사용 불가능

(3) **전압 제어법**(voltage control)

- 전동기 전기자에 인가되는 단자전압 V 를 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)

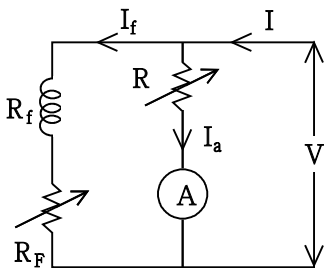
② 제철 공장의 대형 압연기용 주전동기로 사용

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($R_F = 0$)

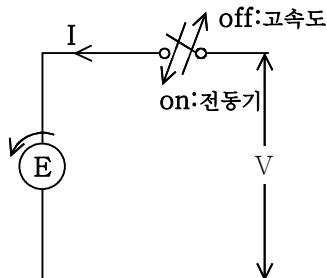
$$3) \text{ 기동저항 : } R = \frac{V}{I_a \times \text{배수}} - R_a$$

(2) 운전시

- ① 손실 小 → 기동저항(R) 최소
- ② 계자 저항 : 부하에 따라서 적당히 선정

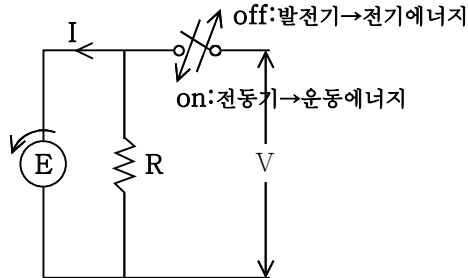
14. 전동기 제동법

○ 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) = $I^2 R$

- 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[℃]	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 : $P = 1.026NT [\text{W}]$

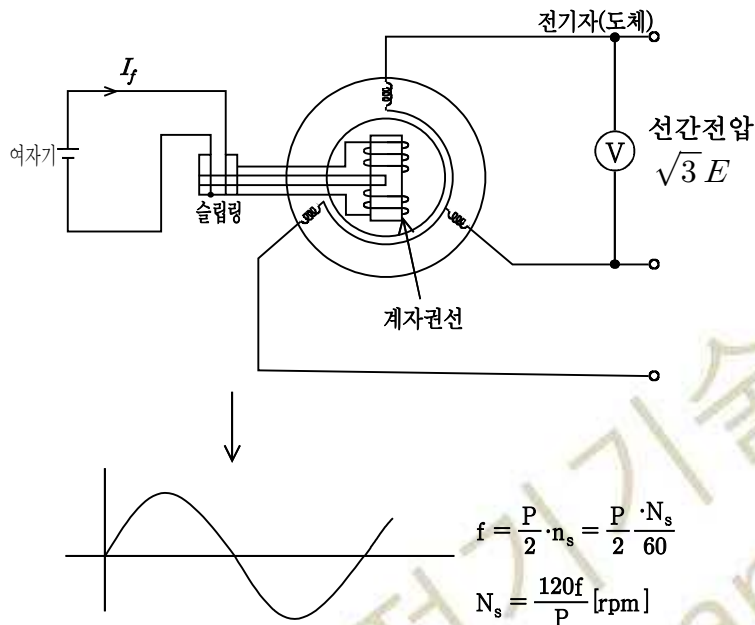
18. 온도시험

(1) 실부하법

(2) 반환부하법 : 카프법, 블론델법, 흠킨스법

제2장 동 기 기

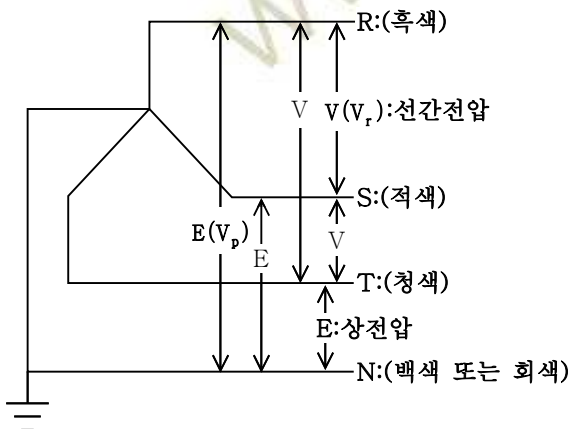
1. 동기발전기 원리



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

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

(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 조	고정	계자	전기자	전기자, 계자
	회전	전기자	계자	유도자
용 도		회전변류기	동기발전기	고조파 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 △결선

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 △결선보다 위상이 30° 앞선다.

2) △결선(환상 결선)

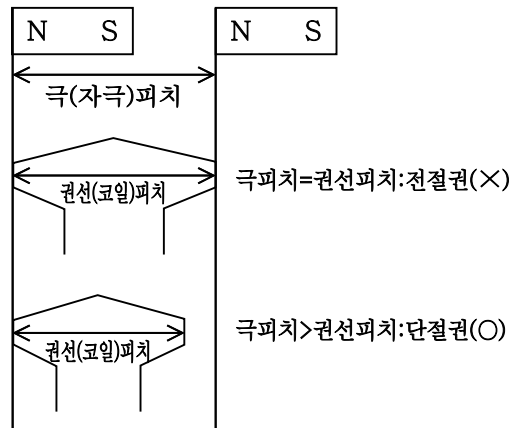
- ① 전압 관계 : $V_L = V_P$
- ② 전류 관계 : $I_L = \sqrt{3} I_P$
- ③ 출력(기준 : 선간) : $P = \sqrt{3} V_L I_L$
- ④ 결선 :
- ⑤ 위상 : △결선이 Y결선보다 위상이 30° 뒤진다.

* Y결선 및 △결선에서 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

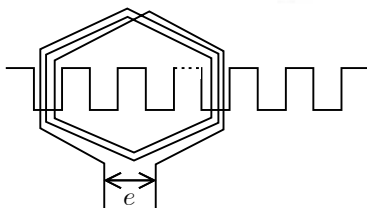
$$K_p = \sin \frac{\beta\pi}{2} \xrightarrow{n\text{차 고조파가 포함된 경우}} \sin \frac{n\beta\pi}{2} < 1$$

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

(2) 집중권과 분포권(동량이 동일)

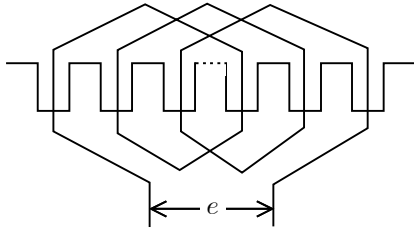
- 집중권 : 매극 매상의 슬롯수 1개(×)
- 분포권 : 매극 매상의 슬롯수 2개 이상(○)

○ 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) $E = 4.44 f \phi w K_w$

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) ϕ : 자속[Wb]

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

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

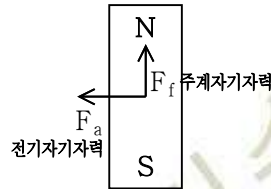
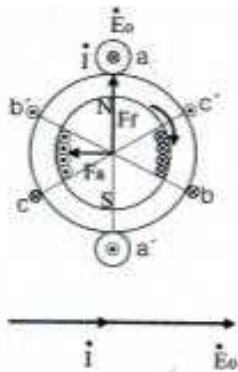
(2) $E = V \pm I_a Z_s \begin{cases} + : \text{지상} \\ - : \text{진상} \end{cases}$

4. 전기자 반작용

(1) 동기 발전기

1) R만의 부하

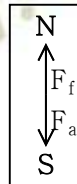
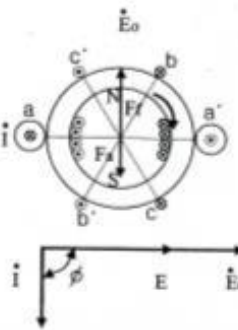
: 전기자전류와 무부하 유기기전력이 동상인 경우



: 교차자화작용(횡축 반작용)

2) L만의 부하(지상 : 자속 감소)

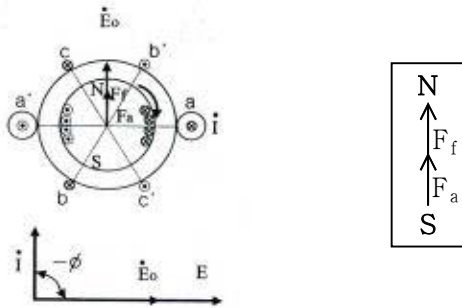
: 전기자전류가 무부하 유기기전력보다 $\pi/2$ 뒤진 경우



: 직축반작용(자극축과 일치하는 감자작용)

3) C만의 부하(진상 : 자속이 증가)

: 전기자전류가 무부하 유기기전력보다 $\pi/2$ 앞선 경우

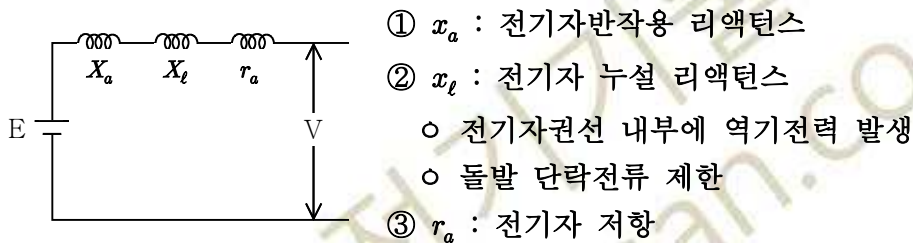


: 직축반작용(자극축과 일치하는 증자 또는 자화 작용)

(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

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

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

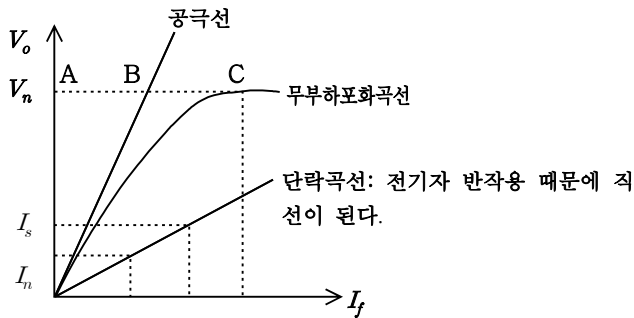
$$3) \text{동기기} : r_a = 0 \rightarrow Z_s = jx_s$$

(3) 단락전류

1) 처음은 큰 전류지만 점차 감소한다.(전기자 반작용으로 인하여)

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

③ 3상 단락특성곡선



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

(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

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

(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) $K \uparrow \rightarrow Z_s \downarrow$: 전기자반직용, 전압변동을 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°

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, 전압변동을 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 최대출력 : 90°

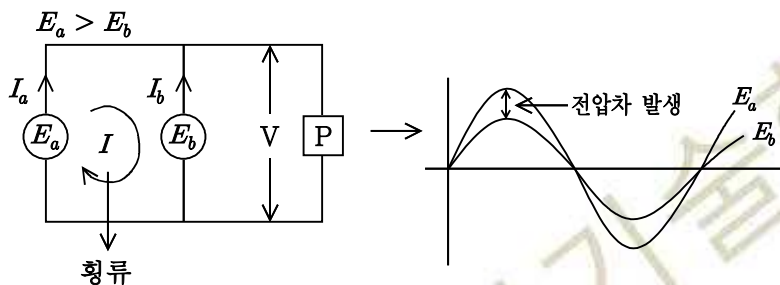
※ 철기계와 동기계 비교

	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 설 치
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.

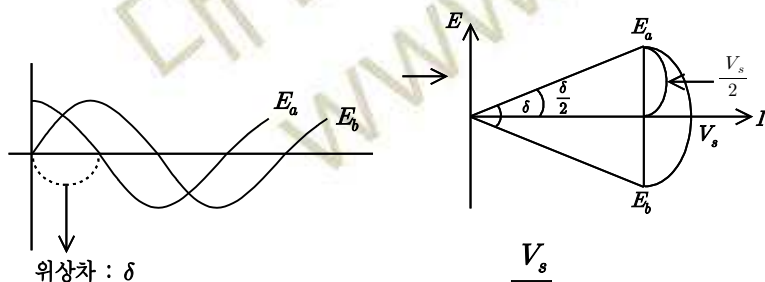


1) 상이하면 : 무효순환전류(무효횡류) 발생

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

2) 대 책 : 계자(여자)전류 변화

(2) 기전력의 위상이 같아야 한다.



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

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, δ : 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 율류) 발생
- 2) 대책 : 발전기 개선

(5) 상회전 방향이 같아야 한다.

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

※ 난조의 원인과 방지 대책 : 자극면에 제동권선 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

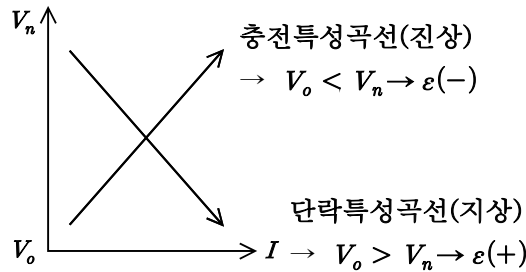
- 무부하, 경부하시 충전전류로 인하여 단자전압이 상승하여 기기의 절연이 파괴되는 현상

(2) 대책

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

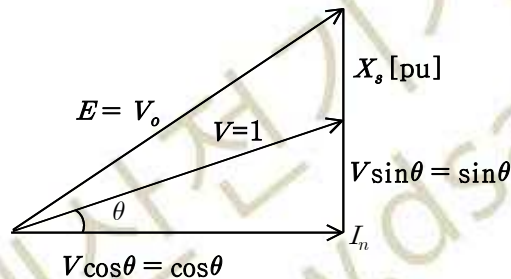
- 3) 변압기 설치
- 4) 발전기 2~3대 병렬 운전(단락비 증가)
- 5) 충전전압을 낮은 전압으로

(3) 특성곡선



10. 단위법[PU법]

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



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

(1) 전압변동율

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

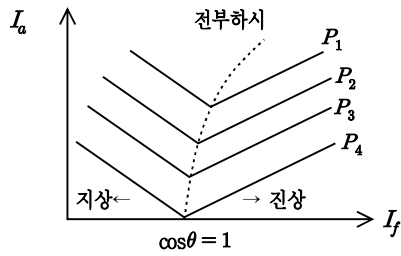
(2) 최대전력(정태안정극한전력)

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

11. 동기전동기

(1) 위상특성곡선(V곡선)

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



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

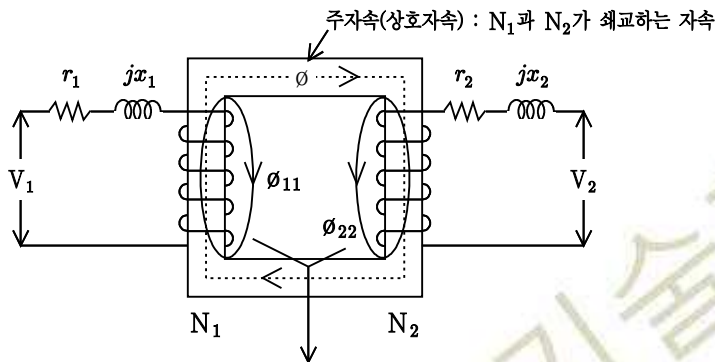
2) 단점

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

제3장 변 압 기

- 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

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

$$LI = N\phi$$

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

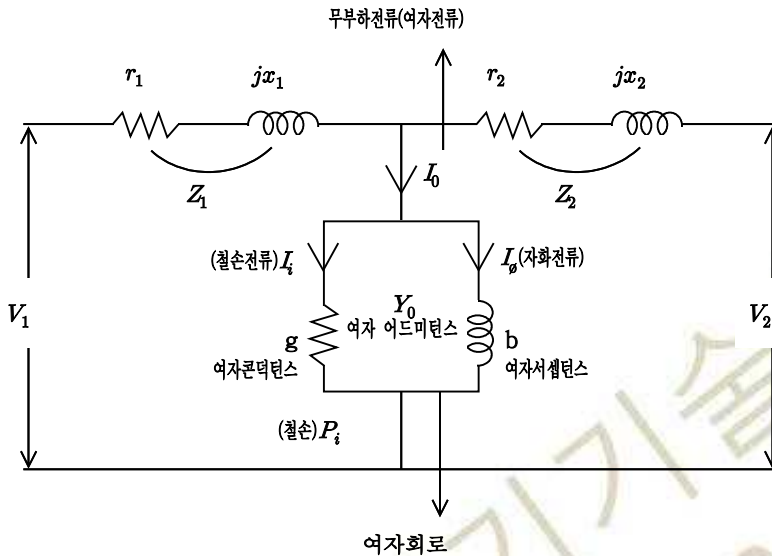
3) 유기기전력 { 변압기 내부에 유도되는 전압 권수에 의해서 결정

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

○ ϕ_m = 자속밀도 [Wb/m²] × 단면적 [m²]

4) 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 : $Y_0 = \sqrt{g^2 + b^2} = \frac{I_0}{V_1} [v]$

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 $\begin{cases} \text{분해 : 수소}(H_2) \\ \text{대책 : 콘서베이터 설치} \end{cases}$

- 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)

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

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

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

6. 상수 변환

\circ 부하의 종류에 따라서 3상 전원이 필요없는 경우

- (1) 3상 \rightarrow 2상으로 상수 변환 : 부하의 불평형 방지

- 1) 메이어 결선 (Meyer 결선)
- 2) 우드 브리지 결선 (Wood bridge 결선)
- 3) 스코트 결선 (Scott 결선 : T결선)

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

- (2) 3상 \rightarrow 6상으로 상수 변환 : 맥동율 방지

- 1) 포오크 결선(수은정류기에 사용)
- 2) 환상결선
- 3) 2중 성형 결선
- 4) 2중 3각 결선
- 5) 대각 결선

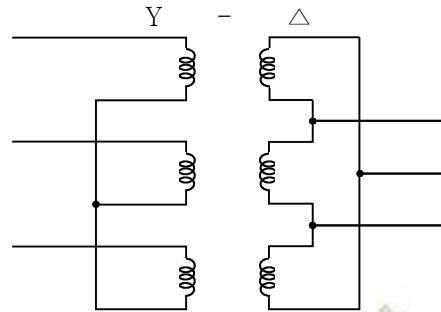
7. 변압기 병렬운전

- (1) 병렬운전

- 1) 가능한 경우

- ① 1차와 2차가 짝수로 조합된 경우(Y Δ 와 $\Delta\Delta$)
- ② 1차와 2차가 짝수이면서 위상차가 생기는 경우(Y Δ 와 ΔY)
 : 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	

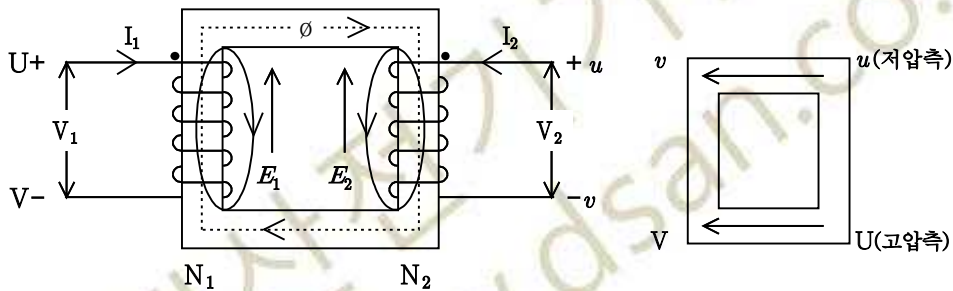


(2) 병렬운전 조건

1) 단상

① 극성이 같아야 한다.

가. 변압기 극성 { 가극성 : $V_0 = V_1 + V_2$
감극성(표준) : $V_0 = V_1 - V_2 = V_1 - \frac{V_1}{a}$



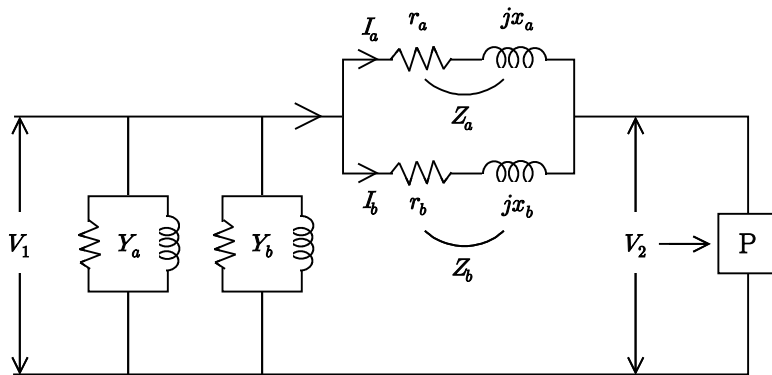
나. 극성이 같지 않으면

: 변압기 내부에 큰 순환전류(형류)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.

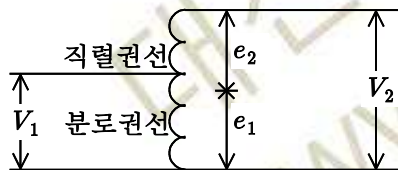
④ 저항과 리액턴스 비가 같아야 한다.

: 상이하면 위상차가 발생하여 동손이 증가

2) 3상 : 단상 4가지+상회전 방향과 위상 변위

8. 특수 변압기

(1) 단권변압기



V_1 : 승압전 전압, V_2 : 승압후 전압

e_1 : 승압기 1차 정격전압, e_2 : 승압기 2차 정격전압

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

1) 승압 후 전압

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

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

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

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, 단권변압기3대 (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)

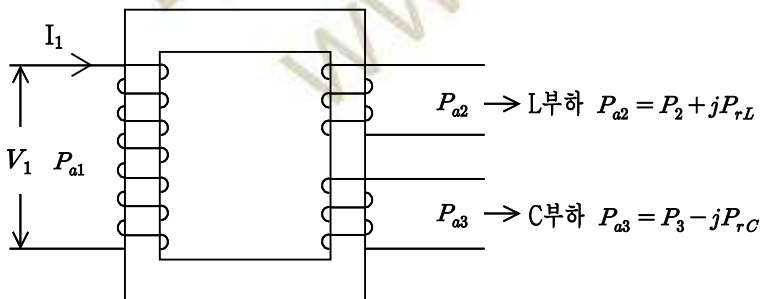
① 제3고조파 제거

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 $P_h = k f B_m^{1.6}$ $\begin{cases} k : \text{파형률} \\ t : \text{규소강판 두께} \end{cases}$
 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) $P_e = k \left(f \cdot \frac{E}{f} \right)^2 = k E^2 \rightarrow \begin{cases} P_e \propto f \\ P_e \propto E^2 \end{cases}$

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

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

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

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

(2) 부하가 $\frac{1}{m}$ 감소시 효율

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

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

(3) T시간 운전시 효율

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

$$1) \text{ 최대조건} : 24P_i = P_c \times T$$

$$2) \text{ 짧은 시간(24시간 이하)} : P_i < P_c$$

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

(4) 전일 효율

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

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

$$P'_i = 24P_i$$

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

$$2) \text{ 손실} : P_\ell = P'_i + P'_c$$

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

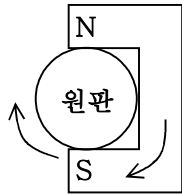
2) 권선형

- 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



→ 자석의 회전방향 = 동기속도 = 고정자 속도 = 1차 주파수

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

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

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

→ 회전자속도는 동기속도보다 s배만큼 늦다.

② 슬립의 범위

가. 발전기 : $s < 0$

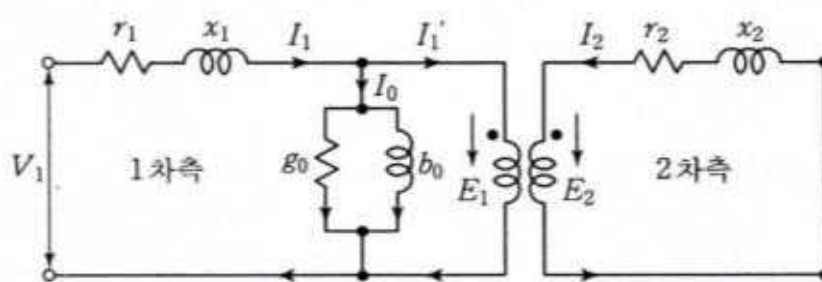
나. 전동기 : $0 < s < 1$

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

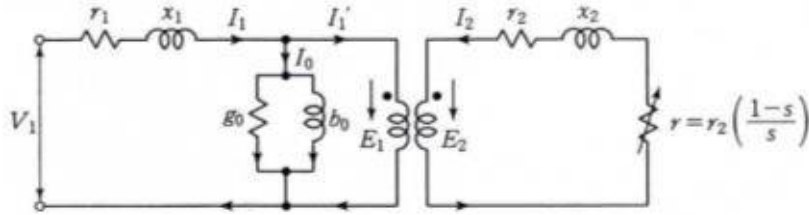
$$\textcircled{1} \text{ 유기기전력 : } E = 4.44f\phi_m NK_w$$

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

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 : $\beta = \frac{m_1}{m_2}$

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

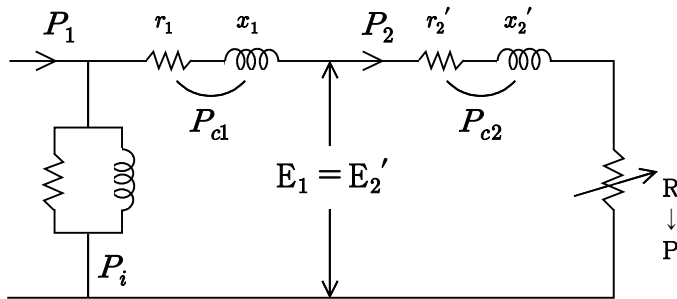
○ $I_1 = I_2' = \frac{m_2 k w_2 N_2}{m_1 k w_1 N_1} I_2 = \frac{I_2}{\alpha \beta}$

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 : $P_1 = P_i + P_{cl} + P_2$

(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

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

(ω : 회전자 각속도, ω_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

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

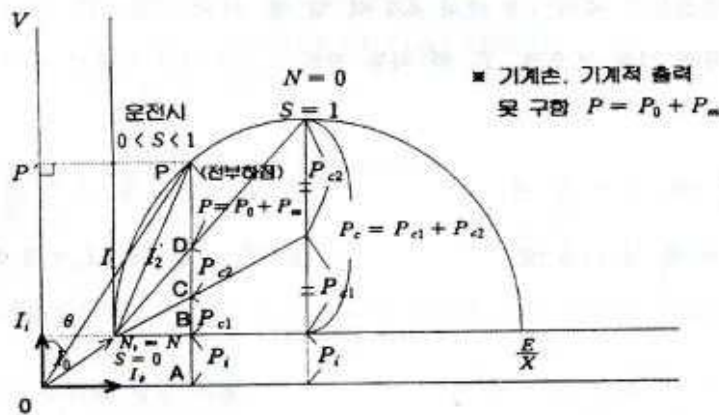
$$2) E_2' = sE_2 \rightarrow s = \frac{E_2'}{E_2} \times 100$$

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

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

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) 전력원선도 지름 : $\frac{E}{x}$
- 7) 전력원선도에서 나타낼 수 없는 것 : 기계손, 기계적 출력

4. 토크

(1) 토크(회전력)

○

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

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

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

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

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

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

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

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

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

: 최대 토크는 2차 저항과 슬립에 관계없이 일정(비례추이)

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

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

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 $\begin{cases} \text{기동 토크 증가} \\ \text{기동전류 감소} \end{cases}$

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

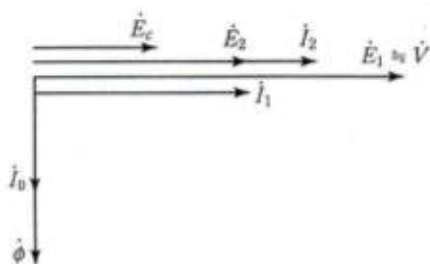
③ 차동 종속법

가. 2대 전동기 극수의 차로 속도 제어

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

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



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

○ 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(직접 기동법)

① 정지하고 있는 전동기에 정격전압을 직접 인가하는 방법

② 5[kW]이하 소용량에 사용

2) Y-△기동법

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

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

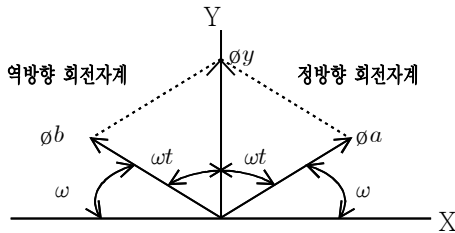
④ 대책 : 경사슬롯(사구 슬롯) 채용

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

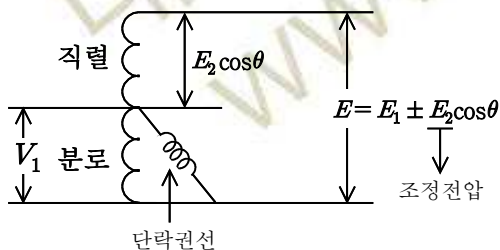
(2) 기동장치의 특징

- 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

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

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

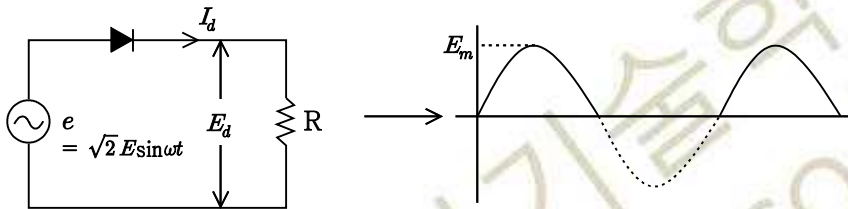
- 1) 역호 : 정류기의 밸브 기능이 상실되는 현상
- 2) 통호 : 아크가 방전되는 현상
- 3) 실호 : 양극의 점호가 실패하는 현상
- 4) 이상전압 : 리액턴스 전압이 유도되어 절연이 파괴되는 현상

(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 : $E_{d0} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} V(1 + \cos\alpha)$ (α : 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

○ $E_d = 1.17 V$

(4) 3상 전파=6상 반파 : 다이오드 6개

○ $E_d = 1.35 V$

(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%

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

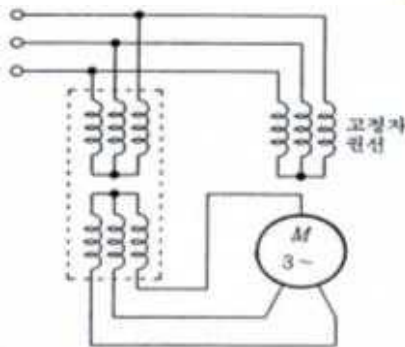
- 2) 특성 : 직류 직권 전동기에 교류 전원을 인가하는 형태의 전동기로서 교
직 양용 전동기 또는 만능 전동기라 한다.

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