

기초전기기기

(강의자료 #2)



2013~2022년 출제문제 수록
새로운 출제기준에 따른 **2023**
전기기사 필기

김정연구회 저

전기기사 필기! 이 책 하나로 충분하다



무료 동영상 강의 제공

1. 2013~2022년 출제문제 수록
2. 출제기준에 따른 과목별 내용과 출제예상문제 수록
3. 홈페이지 게시판을 통한 질의 및 응답

최신 출제문제 (전기이론, 전기기기 해설)
www.dongilbook.com

2023년 한국전기설비규정 개정(안) 완벽적용

교과목명 : 기초전기기기

담당교수 : 이 수 형

E-mail : soohyong@uu.ac.kr

교재명 : 2023 전기기사 필기, 동일출판사

02. 동기기

(Synchronous Generator/Motor)

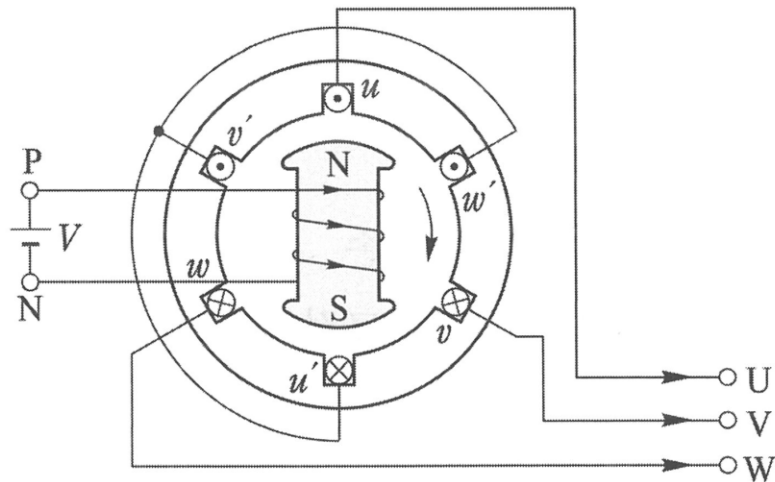
2장. 동기기

1. 동기 발전기의 동기 속도
2. 유기 기전력
3. 동기기의 분류
4. 수소 냉각 발전기
5. 전기자 권선법
6. 전기자 반작용과 동기리액턴스
7. 출력
8. 동기발전기의 특성
9. 병렬 운전
10. 동기 전동기

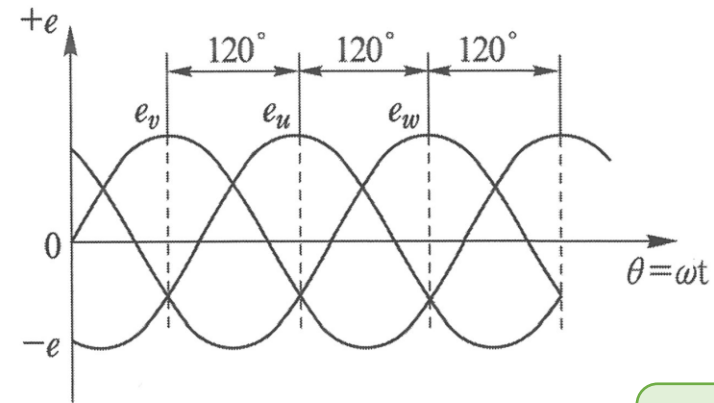
1. 동기 발전기의 동기 속도

- 동기 발전기

- 직류발전기와 같이 플레밍의 오른손 법칙에 따라 유기
- 대표 : 3상 교류 발전기, 회전계자형의 구조



(a) 2극 회전 계자형 3상 동기 발전기



(b) 3상 교류 기전력

그림 2-1 3상 동기 발전기

회전 속도와 주파수의 관계

$$N_s = \frac{120f}{p} \text{ [rpm]}$$

- N_s : 동기 속도 [rpm]
- f : 주파수 [Hz]
- p : 극 수

※ 참고 : <https://www.youtube.com/watch?v=tiKH48EMgKE>
<https://www.youtube.com/watch?v=RycspJC4OKM>

2. 유기 기전력

- 동기 발전기의 유기 기전력

$$E = 4.44k_{\omega}fW\phi = 4.44k_dk_pk_fW\phi \text{ [V]}$$

- ❖ E : 1상의 기전력 [V], ϕ : 1극의 자속 [Wb], W : 직렬접속된 코일의 권수
- ❖ $k_{\omega} = k_d \times k_p$ (k_{ω} : 권선 계수, k_d : 분포권 계수, k_p : 단절권 계수)

- 자속의 변화에 대한 유기전압 (패러데이법칙)

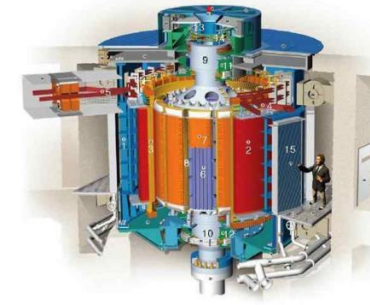
- ❖ 패러데이 법칙 : $E = W \frac{d\phi}{dt}$  $E = W \frac{d\phi}{dt} = W \frac{d}{dt}(\phi_m \sin \omega t)$
 $= W\omega \phi_m \cos \omega t$
 $= 2\pi f W \phi_m \cos \omega t$
- ❖ 자속 ϕ 가 시간에 따라 변하면
 $\phi = \phi_m \sin \omega t$

↓ 실효값을 구하면

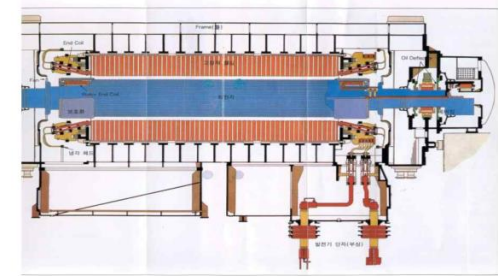
$$E_{rms} = \frac{E_{p-p}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi W \phi_m}{\sqrt{2}}$$
$$= 4.44W \phi_m$$

3. 동기기의 분류

- 회전자에 의한 분류
 - 회전 계자형 : 고전압, 대전류용, 구조 간단, 튼튼, 절연 용이
 - 회전 전기자형 : 저전압, 소전류으로 특수한 발전기
 - 유도자형 : 수백~수천[Hz]의 **고주파 발전기로 사용**
- 원동기에 의한 분류
 - 수차 발전기 : 직축형, 돌극형 회전자 - 저속도 발전기 → **수력발전**
 - 터빈 발전기 : 횡축형, 원통형 회전자 - 고속도 발전기 → **화력발전, 원자력 발전**
 - 엔진 발전기 : 디젤 엔진, 가스터빈 엔진 → 자가용 전기설비
- 상수에 의한 분류 : 단상 발전기, 3상 발전기
- 통풍 방식에 의한 분류 : 자기 통풍형, 타력 통풍형
- 냉각 방식에 의한 분류 : 공기 냉각식, 가스 냉각식, 수냉식 및 유냉식



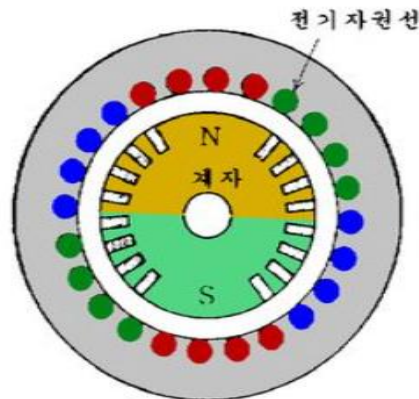
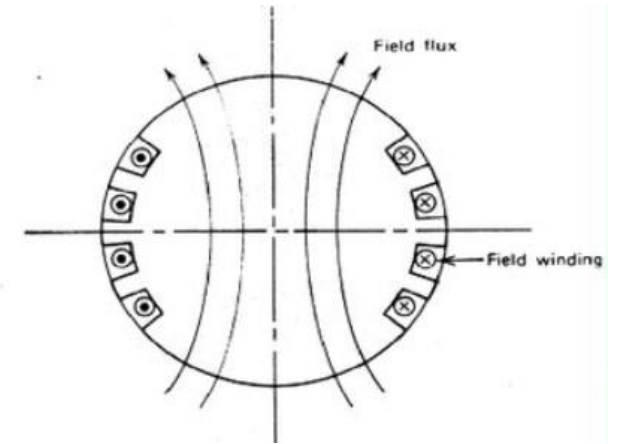
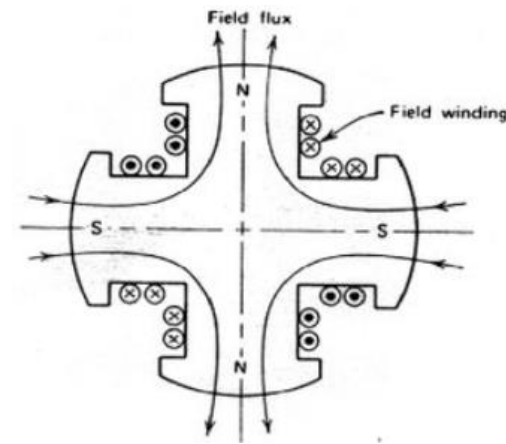
돌극형



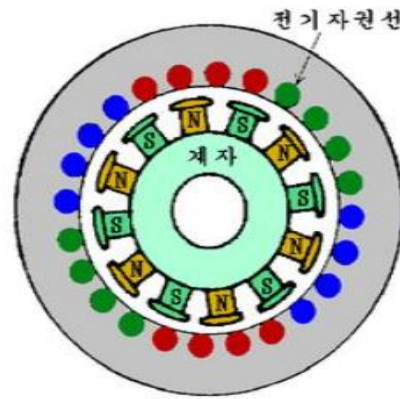
비돌극형

3. 동기기의 분류

- 계자권선의 형태에 따라
 - 돌극형
 - ❖ 저속도 발전기 → 수력발전
 - 원통형
 - ❖ 고속도 발전기 → 화력발전, 원자력 발전

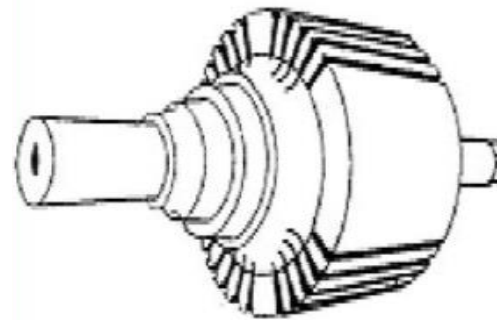


원통형



돌극형

회전계자형



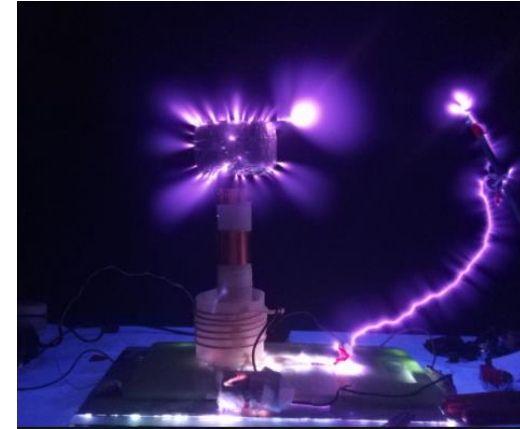
(a) 원통형



(b) 돌극형

4. 수소 냉각 발전기

- 수소냉각 방식 : 터빈 발전기
 - 비중이 공기의 약 7[%] → 풍손이 공기 냉각의 1/10
 - 비열이 공기의 14배 → 냉각 효과 크고, 동일 발전기에서의 온도 상승은 2/3배
온도 상승 동일, 같은 치수이면 공기냉각보다 출력이 25% 증가
 - 절연 파괴되어 아크 발생시 연소하지 않으며, 코로나 발생이 적음
 - 공기혼합시 폭발가능 → 방폭 구조 필요 : 설비가 많이 듬
 - 저소음



5. 전기자 권선법

- 권선법

- 집중권 (concentrated winding)

- ❖ 1극 1상의 슬롯수가 1개 ($q = 1$)

- 분포권 (distributed winding)

- ❖ 1극 1상의 슬롯수가 2개 이상 ($q \geq 2$)

- ❖ 권선의 누설 리액턴스 감소

- ❖ 전기자 동손에 의한 열을 골고루 분포, 과열 방지

- ❖ 유지기전력은 감소, 기전력의 **고조파 감소**

⇒ **파형이 좋아짐**

- ❖ 분포 계수

$$k_d = \frac{\text{분포권의 합성기전력}}{\text{집중권의 합성기전력}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}}$$

q : 매극 매상의 슬롯 수, m : 상(phase)수

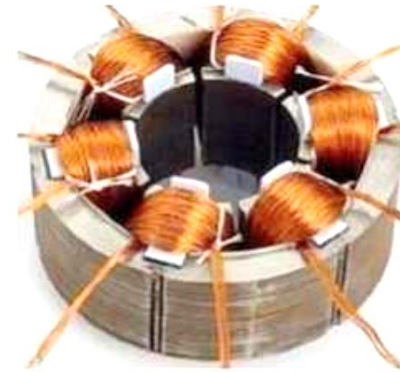


그림 1. 집중권선형 고정자

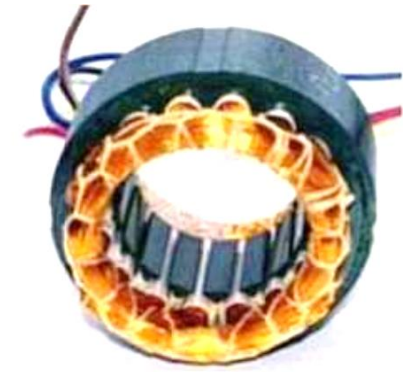
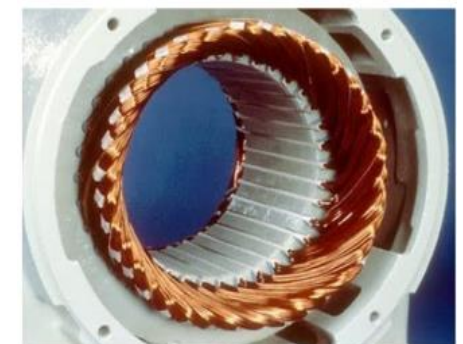


그림 2. 분포권선형 고정자

Concentrated Winding



Distributed Winding



※ 출처 : <https://www.electrical4u.net/>

5. 전기자 권선법

- ▶ 전절권 (full pitch winding)
 - ❖ 자극간격과 코일 간격이 같은 경우
 - ❖ 기전력이 최대
- ▶ 단절권 (short pitch winding)
 - ❖ 자극간격보다 코일 간격이 작은 경우
 - ❖ **고조파 제거** → 정류를 용이하게 하며 파형이 좋음
 - ❖ 동역 양이 감소 (**권선절약**) → 기계 축소
 - ❖ 유기기전력 적음 (단전권 계수)

$$k_p = \sin \frac{\beta\pi}{2}, \quad \left(\beta = \frac{\text{코일 간격}}{\text{극 간격}} \right)$$

※ 참고 : <https://www.youtube.com/watch?v=JxAECu2X3Fg>

6. 전기자 반작용과 동기리액턴스

- 전기자 반작용
 - 발전기에 부하가 접속 → 전류 발생 → 자속
 - 전기자 자속 → 계자 자속에 영향

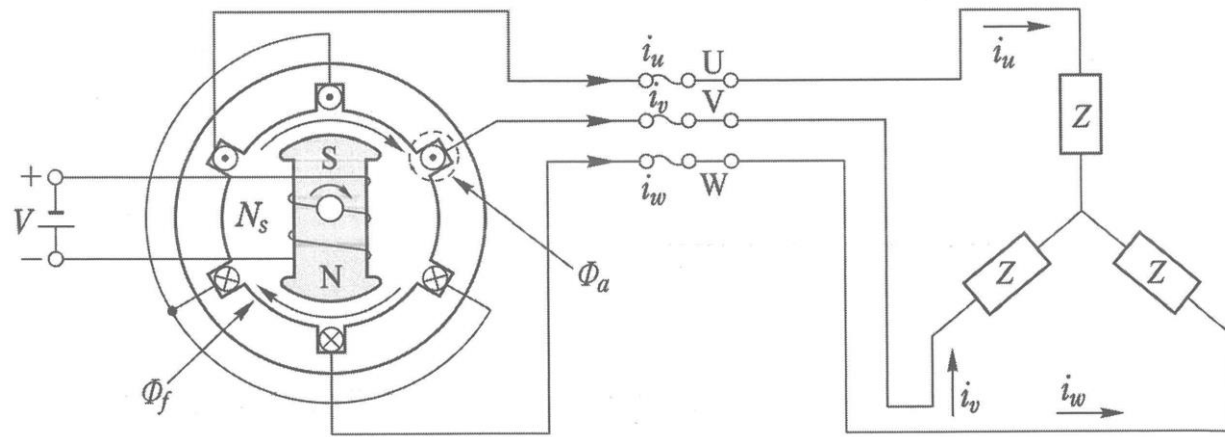
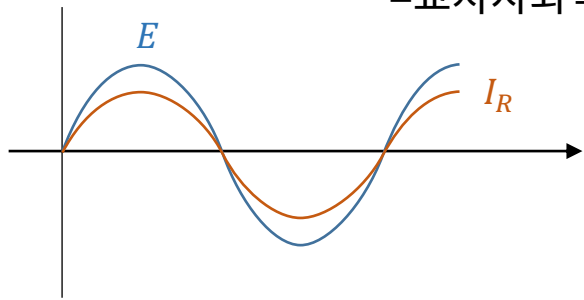
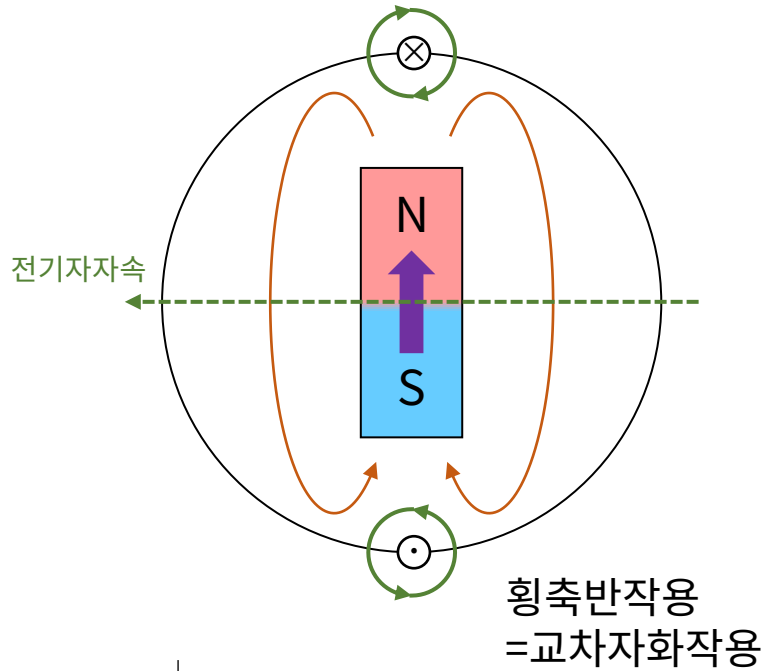
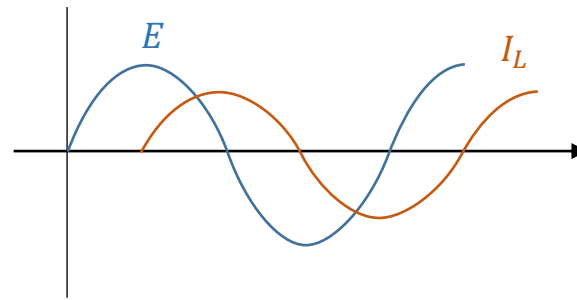
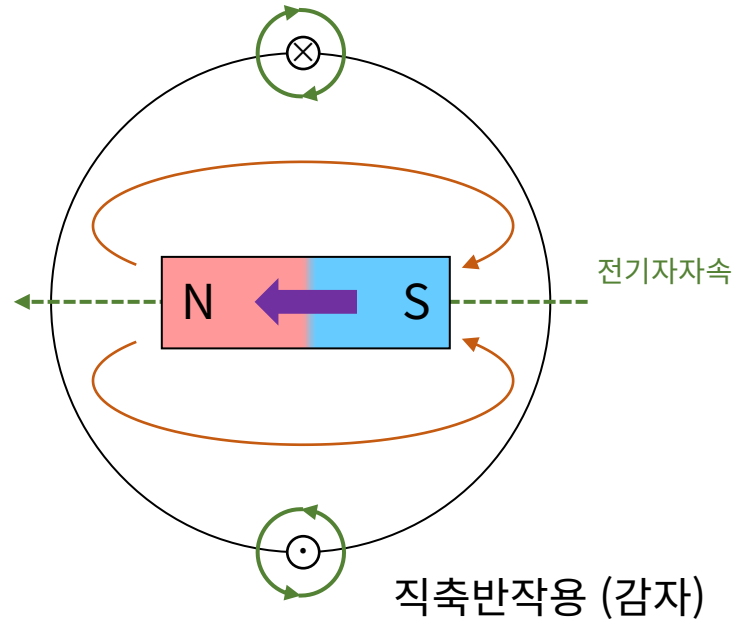


그림 2-2 전기자 반작용

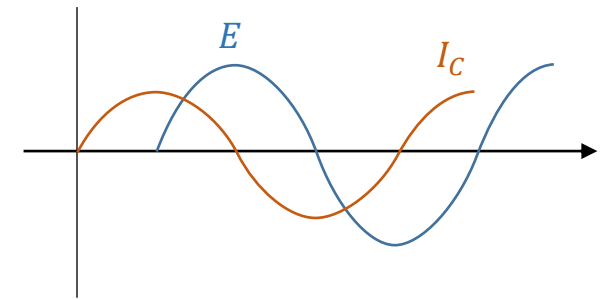
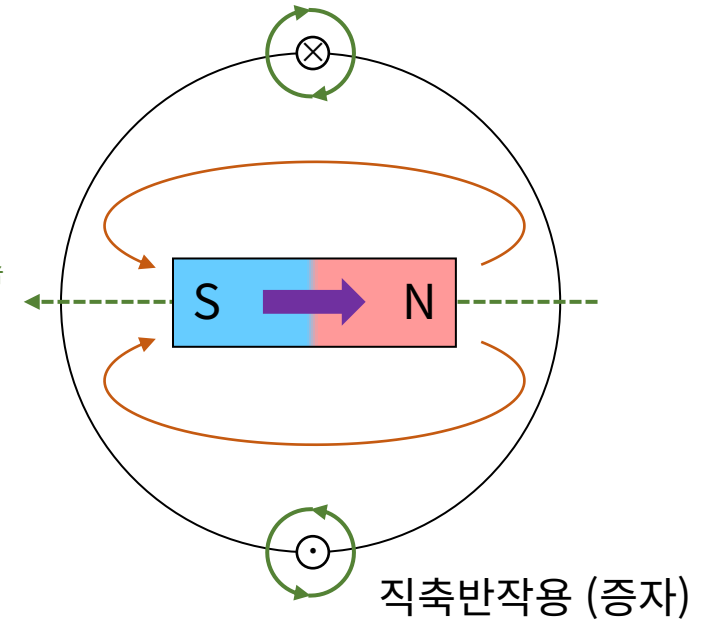
6. 전기자 반작용과 동기리액턴스



R 부하 : 전압/전류 동상



L 부하 : 지상(뒤진) 전류



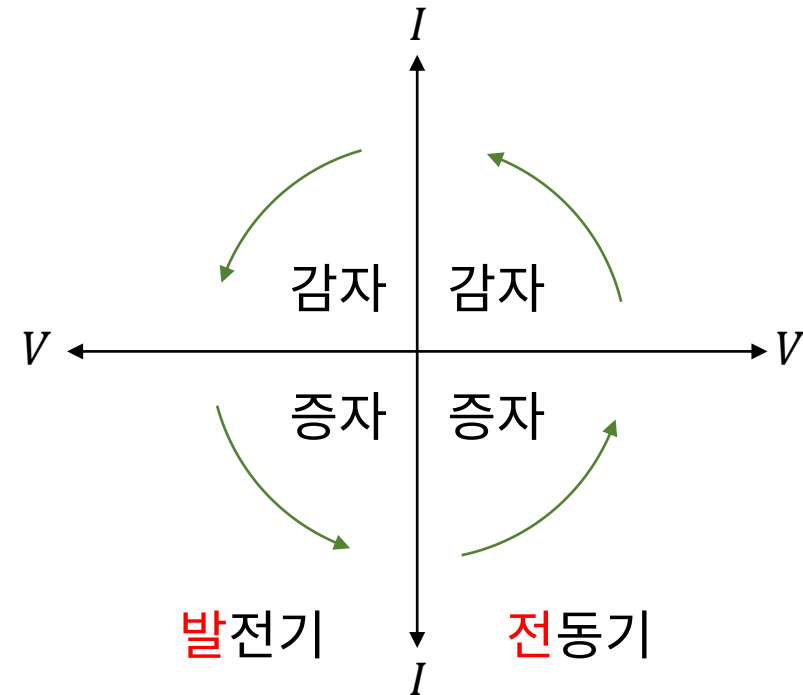
C 부하 : 진상(앞선) 전류

6. 전기자 반작용과 동기리액턴스

- 종류

- ▶ 전압/전류가 동상 : 횡축반작용 (교차자화작용) – R(resistor) 부하
- ▶ 진상(進相) 전류 : 직축반작용(증자작용) – C(capacitor) 부하
- ▶ 지상(遲相) 전류 : 직축반작용(감자작용) – L(inductor) 부하

⇒ 전동기의 경우 진상/지상이 반대로 나타남



6. 전기자 반작용과 동기리액턴스

- 동기 임피던스 (impedance)

- ▶ 임피던스 : 회로에서 전압이 가해졌을 때 전류의 흐름을 방해하는 값

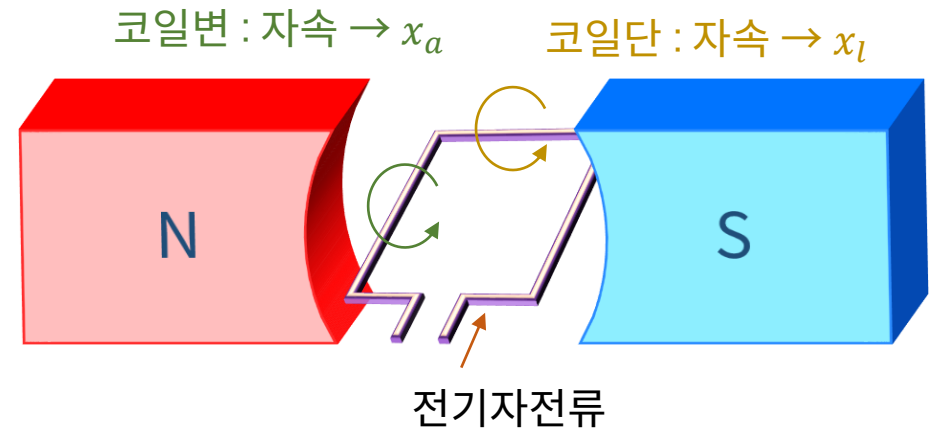
- ▶ 동기 임피던스 : 전기저항 + 전기자 반작용 리액턴스 + 누설 리액턴스

⇒ 동기 리액턴스

$$Z_s = r_a + jx_s [\Omega]$$

아주 작은 값

$$x_s = x_a + x_l [\Omega] : \text{동기 리액턴스}$$



7. 출력

- 1상의 출력

- ▶ 비돌극기의 출력

$$P = \frac{EV}{Z_s} \sin(\alpha + \delta) - \frac{V^2}{Z_s} \sin \alpha \quad \Rightarrow \quad P \doteq \frac{EV}{x_s} \sin \delta \quad [\text{W}]$$

- ❖ 여기서, E : 1상의 유기기전력, V : 단자 전압, δ : 부하각 (E 와 V 의 위상차이)

- 3상의 출력

$$P_s = \frac{E_l V_l}{x_s} \sin \delta \times 10^{-3} \quad [\text{kW}]$$

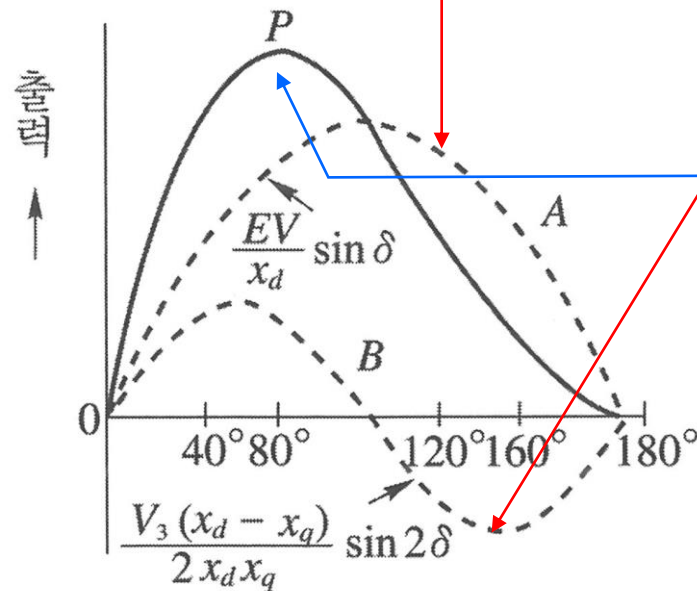
- ❖ 여기서, E_l : 선간 기전력, V_l : 선간 전압, δ : 부하각

7. 출력

- 최대 출력 부하각
 - 돌극형의 출력식

$$P = \frac{EV}{Z_s} \sin(\alpha + \delta) + \frac{V^2(x_d - x_q)}{2x_d \cdot x_q} \sin 2\delta$$

⇒ EV 일정한 상태에서, δ 변화하면



대체로 60°부근에서 최대

비돌극기의 출력은 90°에서 최대

그림 2-3 부하각에 따른 출력의 변화

8. 동기 발전기의 특성

- 무부하 포화 곡선

- 동기 발전기의 부하를 분리하고 원동기(③)를 동기속도로 발전기를 구동

- 스위치(④) 투입, 계자저항(②)을 서서히 감소 → 계자전류 I_f 증가 : 단자전압(①) 측정

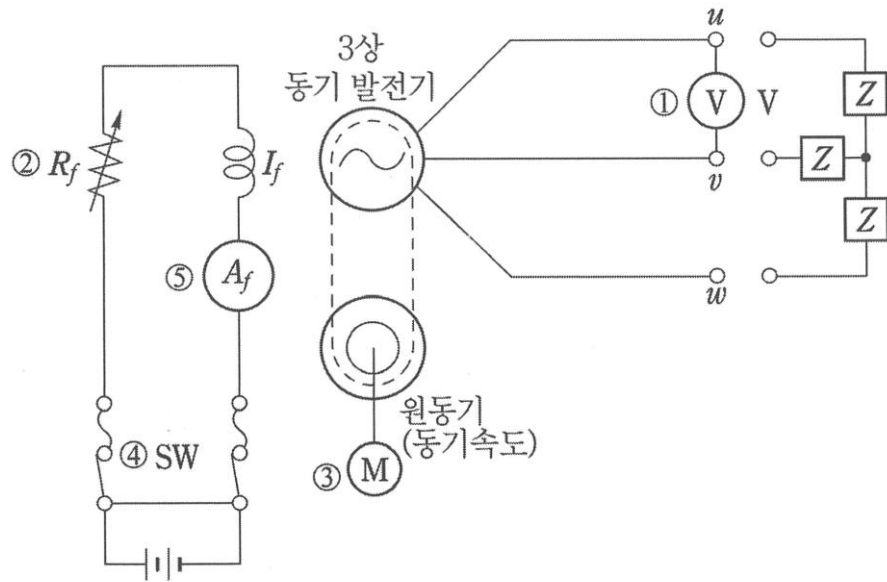


그림 2-4 무부하 포화시험

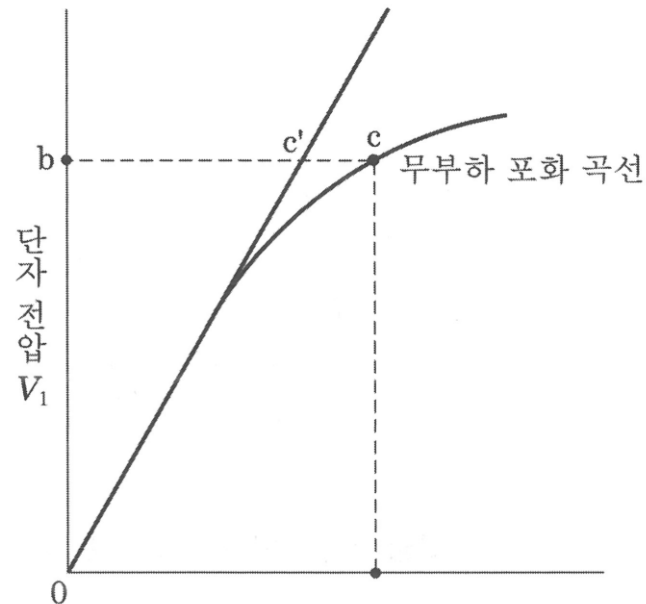


그림 2-5 무부하 포화곡선

- oc : 공극선
- 공극선과 cc'와의 교점으로 포화율 계산

$$\text{포화율} : \delta = \frac{cc'}{bc'}$$

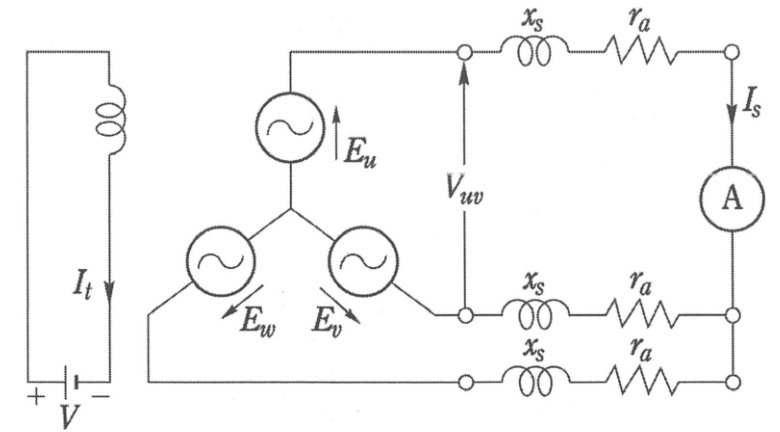
8. 동기 발전기의 특성

• 3상 단락곡선과 단락비

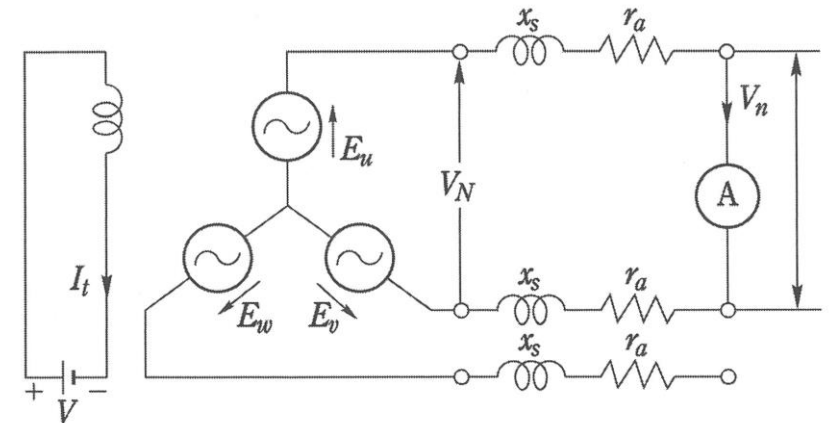
- 3상 단락곡선 : 계자 전류 I_f 와 단락 전류 I_s 와의 관계 곡선
- 단락 회로 실험
 - ❖ 동기 발전기의 단자를 단락하고 서서히 계자전류를 증가
→ 3상 단락전류가 흐름

$$I_s = \frac{E}{Z_s} = \frac{E}{\sqrt{r_a^2 + x_s^2}} \doteq \frac{E}{jx_s} \text{ [A]}$$

- ✓ E : 발전기 유도기전력, I_s : 3상 단락전류, Z_s : 동기 임피던스
 r_a : 전기자 저항, x_s : 동기 리액턴스
- ✓ 단락전류 : 전기자 저항을 무시하면 동기 리액턴스에 의해 결정됨
→ 동기 리액턴스에 의해 흐르는 전류 : 90° 늦은 전류
→ **전기자 반작용이 감자 작용이 되므로 3상 단락곡선은 직선이 됨**



(a) 단락회로실험



(b) 무부하 회로실험

그림 2-6 단락 회로 및 무부하 회로 시험

8. 동기 발전기의 특성

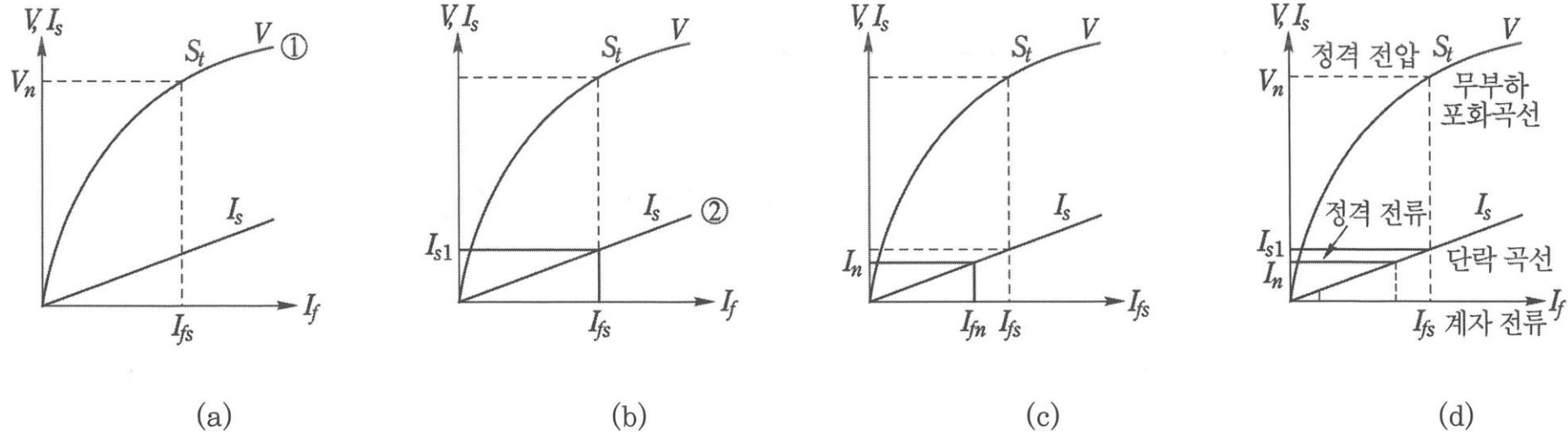


그림 2-7 단락 곡선

➤ 단락비(short circuit ratio) K_s - 단락되기 전과 후의 전류의 비율

$$K_s = \frac{\text{무부하에서 정격전압을 유지하는 데 필요한 계자 전류}}{\text{정격 전류와 같은 단락전류를 흘리는데 필요한 계자 전류}}$$

8. 동기 발전기의 특성

▶ 단락비(short circuit ratio) K_s

$$K_s = \frac{\text{무부하에서 정격전압을 유지하는 데 필요한 계자 전류}}{\text{정격 전류와 같은 단락전류를 흘리는데 필요한 계자 전류}}$$

❖ 단락비가 큰 기계

- ✓ 동기 임피던스(리액턴스)가 작다.
- ✓ 전압강하 및 전압강하율, 전압변동률이 작다.
- ✓ 안정도가 좋다.
- ✓ 철이 많이 사용됨 → 철기계라 불림
- ✓ 공극이 크고, 기계 형태 중량이 증가

❖ 단락비가 작은 기계

- ✓ 동기 임피던스가 큼 → 전기자 반작용이 큼
- ✓ 좁은 공극, 계자 기자력 < 전기자 기자력
- ✓ 터빈 발전기 : $K_s = 0.6 \sim 1.0$ < 수차 발전기 : $K_s = 0.9 \sim 1.2$

8. 동기 발전기의 특성

- %동기 임피던스

▶ 정격 전류에 대한 임피던스 강하와 정격 상전압의 비 (I_n : 정격 전류, Z_n : 동기 임피던스, E : 동기 발전기의 유도 기전력 = 단자전압을 $\sqrt{3}$ 으로 나눈 값) → 손실의 개념

$$\%Z_s = \frac{Z_s I_n}{E} \times 100 [\%]$$

$$\left(I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}V_n}, E = \frac{V_n}{\sqrt{3}} \right) \Downarrow$$

$$\%Z_s = \frac{\frac{Z_s I_n}{\frac{1}{\sqrt{3}}}}{\frac{V_n}{\sqrt{3}}} \times 100 \times \frac{V_n}{V_n} = \frac{\sqrt{3}Z_s V_n I_n}{V_n^2} \times 100$$

$$P_n = \sqrt{3}V_n I_n$$

$$\%Z_s = \frac{P_n Z_s}{V_n^2} \times 100 \Rightarrow \frac{Z_s P_n \times 1000}{V_n^2 \times 1000^2} \times 100 = \frac{Z_s P_n}{V_n^2 \times 1000} \times 100 = \frac{P_n Z_s}{10V_n^2}$$

전압 V_n 의 단위가 kV 인 경우

참고

$$\%Z_s = \frac{Z_s I_n}{E} \times 100 \rightarrow Z_s = \frac{\%Z_s \times E}{100 I_n}$$

$$I_s = \frac{E}{Z_s} = \frac{\frac{E}{\frac{\%Z_s \times E}{100 I_n}}}{\frac{\%Z_s \times E}{100 I_n}} = \frac{100}{\%Z_s} \times I_n$$

$$K_s = \frac{I_s}{I_n} = \frac{100}{\%Z_s}$$

8. 동기 발전기의 특성

- 전압 변동률(ϵ)

$$\epsilon = \frac{V_0 - V_n}{V_n} \times 100 [\%]$$

➤ 여기서 V_0 : 무부하 단자전압 [V], V_n : 정격 단자 전압 [V]

➤ 특성

- ❖ 부하 전류의 대소에 따라 달라지며
- ❖ 동일한 부하에서도 역률에 따라 값이 달라짐
- ❖ 유도 부하 (L) : $\epsilon > 0$ ($V_0 > V_n$)
- ❖ 용량 부하 (C) : $\epsilon < 0$ ($V_0 > V_n$)

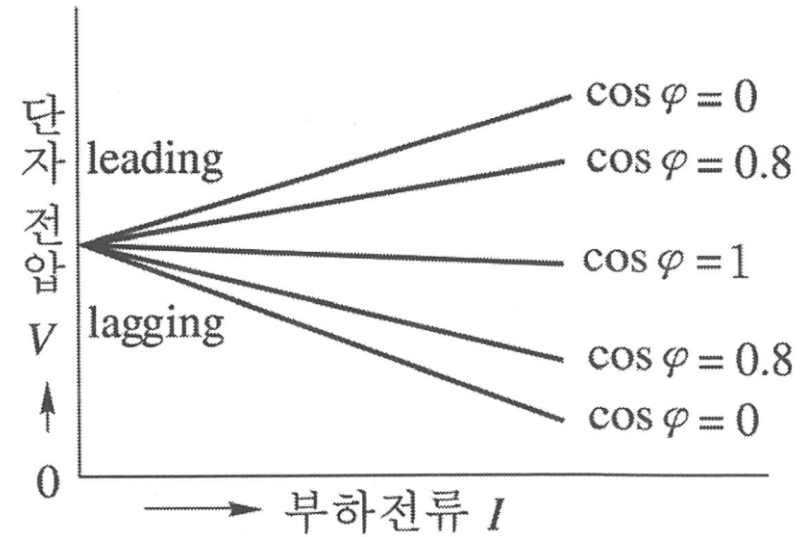


그림 2-8 전압 변동률

8. 동기 발전기의 특성

- 자기 여자

- ▶ 무여자 운전 동기 발전기에 무부하의 장거리 송전선을 접속 (C 부하)
 - 발전기의 잔류자기에 의한 전압으로 90° 앞선 전류 생성 → 전기자 반작용
 - 전기자 반작용 : 자화 작용 → 단자 전압 \uparrow , 충전 전류 \uparrow ⇒ 자기 여자

- ▶ 방지법

- ❖ 발전기 2대 또는 3대를 병렬로 모선에 접속
- ❖ 수전단에 동기 조상기 접속 → 부족 여자로 하여 지상 전류를 취하면 충전 전류 감소
- ❖ 송전 선로의 수전단에 변압기 접속
- ❖ 수전단에 리액터를 병렬로 접속

※ 조상기 : 무부하로 운전하는 동기전동기

9. 병렬 운전

- 병렬 운전의 필요 조건

- 기전력의 크기가 같을 것 (발전기 내부에 무효 유향류가 흐름)

- 기전력의 크기가 같지 않은 경우

$$I_c = \frac{E_1 - E_2}{2Z_s} = \frac{E_r}{2Z_s} [A]$$

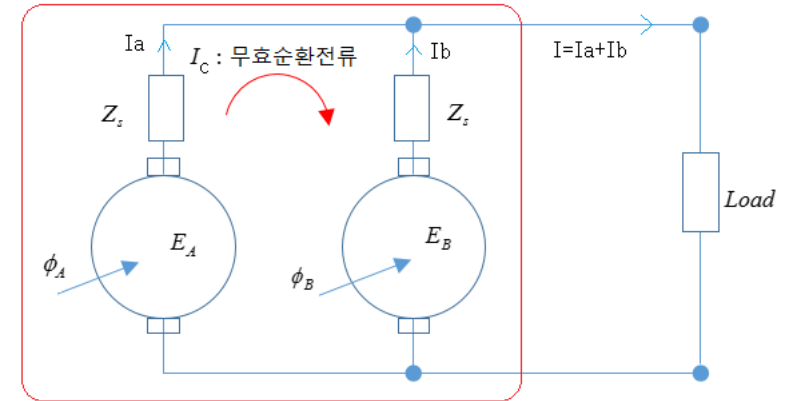
$$\theta = \tan^{-1} \frac{2x_s}{2r_a} = \tan^{-1} \frac{x_s}{r_a} \cong \frac{\pi}{2} (\because x_s \gg r_a)$$

- 상회전이 일치하고, 기전력이 동위상일 것

- 기전력의 위상이 다를 경우 : 위상이 앞선 G_1 이 위상이 뒤진 G_2 에 전력 공급 → 자동으로 동위상으로 유지하는 동기화 전류(유효 유향류) 생성

- 기전력과 주파수가 같을 것 : 다를 경우 난조(hunting)의 원인

- 기전력과 파형이 같을 것 (다를 경우 고조파 무효 순환 전류가 흐름)



순환전류는 두 발전기만 보고 분석

※ 난조 : 부하 급변 시 동기속도보다 낮아져 속도 재조정을 위한 진동이 발생하게 되며 진동주기가 동기기의 고유진동에 가까워지면서 공진작용으로 진동이 계속 증대하는 현상

※ <https://www.youtube.com/watch?v=PrOH2O3DXQQ>

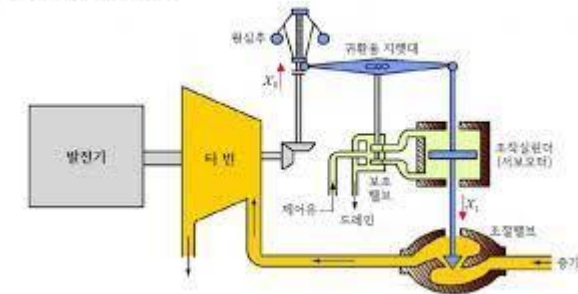
※ 그림 : <https://blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=skp1659&logNo=222253397165>

9. 병렬 운전

- 병렬 운전시 원동기에 필요한 조건
 - 균일한 각속도
 - 적당한 속도 조정률
 - 조속기가 적당한 불감도를 가질 것

※ 조속기: 원동기의 속도저하를 검출하여 물, 증기의 입력을 조절하여 원동기의 회전 속도를 일정하게 유지하는 장치

[참조 2] 증기터빈 조속기



10. 동기 전동기

- 토크 (torque)

➤ V_l : 선간 전압, E_l : 선간 기전력, ω : 각속도 ($2\pi N_s/60$ [rad]), δ_m : 부하각

$$\tau = \frac{V_l E_l}{\omega x_s} \sin \delta \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

$$P = \omega \tau = \frac{V_l E_l}{x_s} \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

$$\tau' = \frac{\tau}{9.8} \text{ [kg} \cdot \text{m]} \quad \therefore 1 \text{ [kg} \cdot \text{m]} = 9.8 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

10. 동기 전동기

- 위상 특성 곡선(V 곡선)

- 정 출력에서 유기 기전력 E (또는 계자 전류 I_f)를 변화시킬 때 E (또는 I_f)와 전기자 전류 I_a 와의 관계

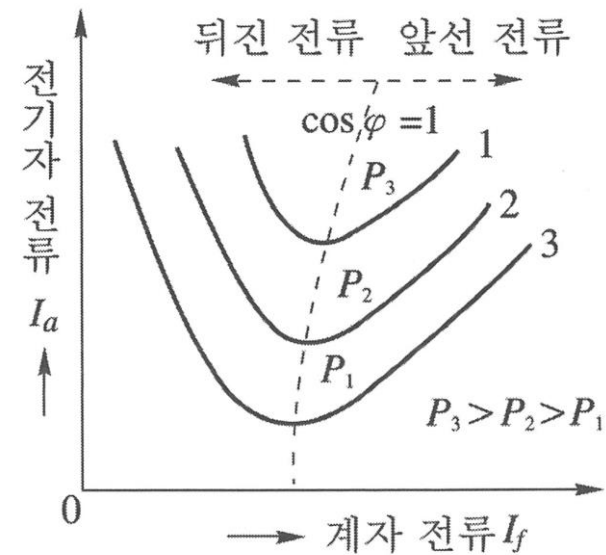


그림 2-9 위상 특성 곡선(V곡선)

10. 동기 전동기

- 동기 전동기의 기동

- ▶ 기동 토크 : 기동 토크는 0이므로 제동 권선을 기동 권선으로 이용
- ▶ 인입 토크 : 전동기 자체와 연결된 부하의 관성에 맞서 동기로 들어갈 수 있는 최대 부하 토크
- ▶ 동기 인입 조건

$$\diamond s < \frac{242}{N} \sqrt{\frac{P_m}{(GD^2)f}}$$

- ▶ 탈출 토크 : 정격 주파수, 정격 전압 및 규정의 여자 상태에서 동기 운전할 수 있는 최대 토크

10. 동기 전동기

• 동기 전동기의 특징

장점

- 속도가 일정 불변
- 항상 역률 1로 운전
- 필요시 앞선 전류를 통함
- 유도 전동기에 비해 좋은 효율

단점

- 기동 토크가 적고 속도 조정 불가능
- 난조를 일으킬 수 있다
- 여자용 직류 전원필요하며 설비비가 많이 든다

용도

- 저속도 대용량: 시멘트 공장의 분쇄기, 각종 압축기, 송풍기, 제지용 쇄목기, 동기 조상기
- 소용량: 전기 시계, 오실로그래프, 전송 사진

• 동기기의 입력과 출력

➤ 입력 $P_1 = VI \cos \phi = \frac{V^2}{Z_s^2} \cos \alpha - \frac{VE_0}{Z_s} \cos(\alpha + \delta)$ [W]

➤ 출력 $P_1 = E_0 I \cos \phi = \frac{VE_0}{Z_s} \cos(\alpha - \delta) - \frac{E_0^2}{Z_s} \cos \alpha \doteq \frac{VE_0}{Z_s} \sin \delta$ [W]

$\left(\alpha = \tan^{-1} \frac{x_s}{r_a} \rightarrow x_s \gg r_a \Rightarrow \alpha \doteq \frac{\pi}{2} \right)$

※ 조상기: 무효전력을 조정
- 전압조정, 역률조정