기초전기기기

(강의자료 #4)

교과목명 : 기초전기기기

담당교수 : 이 수 형

E-mail : soohyong@uu.ac.kr

교재명 : 2023 전기기능사 필기, 동일출판사

04. 유도기
(Induction Motor)

4장. 유도기

1. 유도 전동기의 원리
2. 유도 전동기의 구조
3. 유도 기전력 및 등가 회로
4. 전력 변환
5. 동기 와트
6. 3상 유도 전동기의 특성
7. 유도전동기의 기동법 및 속도제어
8. 속도제어
9. 제동
10. 단상 유도 전동기
11. 3상 유도 전압조정기

1. 유도 전동기의 원리

- 아라고의 원판
  - 구리판에 영구자석을 넣고 회전
    플레밍의 오른손 법칙
    플레밍의 왼손 법칙
    ⇒ 구리판이 회전
  - 구리판에 회전자계 ⇒ 구리판 회전

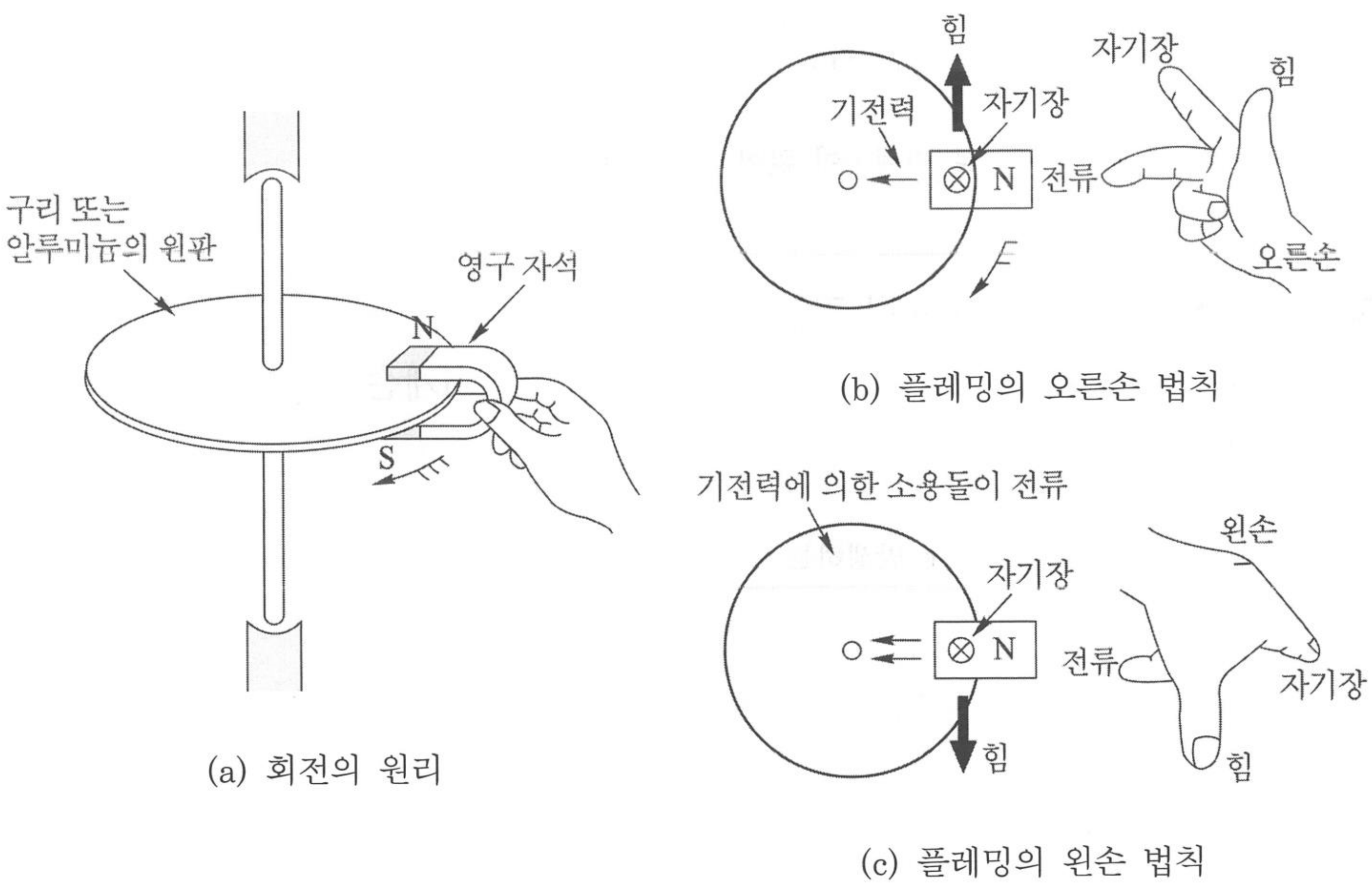


그림 4-1 유도 전동기의 원리

※ 참고 : https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o

1. 유도 전동기의 원리

- 유도 전동기의 회전 원리
  - ➢ 영구자석 설치 자속 Φ_1 생성 → ③ 그림의 방향으로 회전
  - ➢ ④ 도체에 유도전류 i_2 생성
  - ➢ ⑤ 플레밍의 왼손 법칙 : 힘 F 생성
  - ➢ ⑥ 단락 순환전류 i_2가 자속 Φ_2 생성 → Φ_1 사이의 토크 발생
  - ➢ 전동기는 동기속도보다 항상 늦게 회전 → **슬립 s**

❖ 동기 속도 : $N_s = \frac{120f}{p}$ $[rpm]$, 슬립 : $s = \frac{N_s - N}{N_s}$ $[rpm]$

❖ 전 부하시의 슬립 : 소용량기 10~5[%], 중・대용량기 5~2.5[%]

❖ 회전자 정지시 : $s = 1$

❖ 동기 속도, 무부하 : $s = 0$

$$s \begin{cases} \text{유도 전동기} : 1 > s > 0 \\ \text{유도 발전기} : 0 > 0 \end{cases}$$

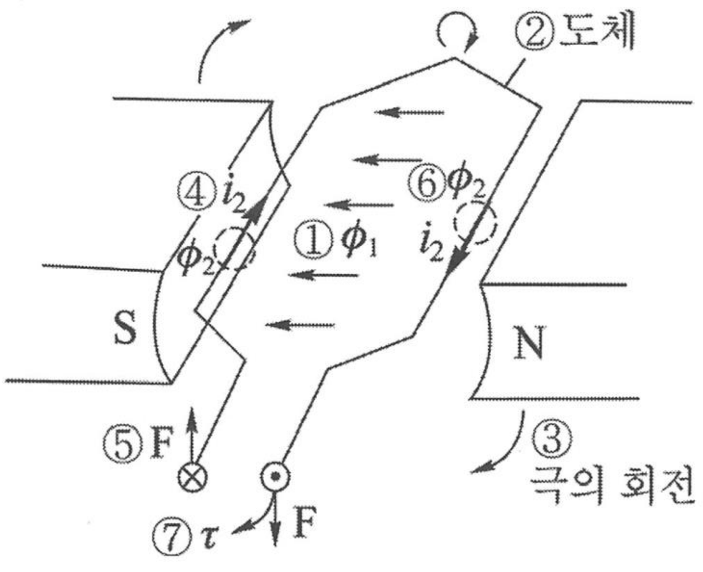


그림 4-2 유도 전동기의 회전원리

f : 주파수, p : 극수

N : 회전자 회전 속도 [rpm]

$N = (1 - s)N_s$, N_s : 동기 속도

※ 참고 : https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o

2. 유도 전동기의 구조

- 고정자 : 자속이 통과하는 자기회로, 규소 강판을 수십겹 성층하여 3상 코일 감음
- 회전자 : 2가지 종류(**농형, 권선형**)
  - 농형 : 구조 간단하며 튼튼, 중・소형 유도 전동기에 널리 사용, 대형은 기동 토크가 작음
    - ✓ 소음 방지 : 스큐슬롯(skew slot) 사용
  - 권선형 : 대형 유도전동기에 사용, 기동 토크가 크고, 2차 회로에 저항 삽입 가능 → **비례추이 가능** 구조

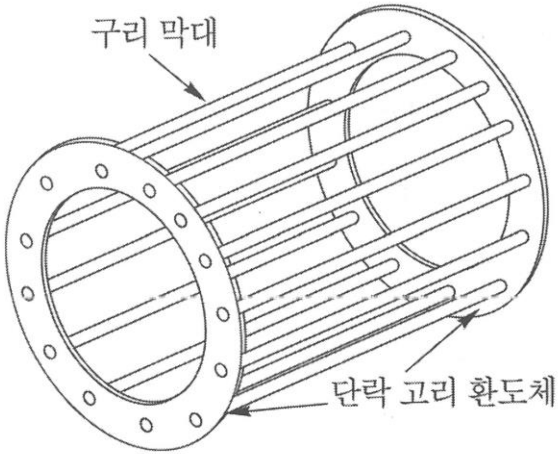


그림 4-4 농형 회전자

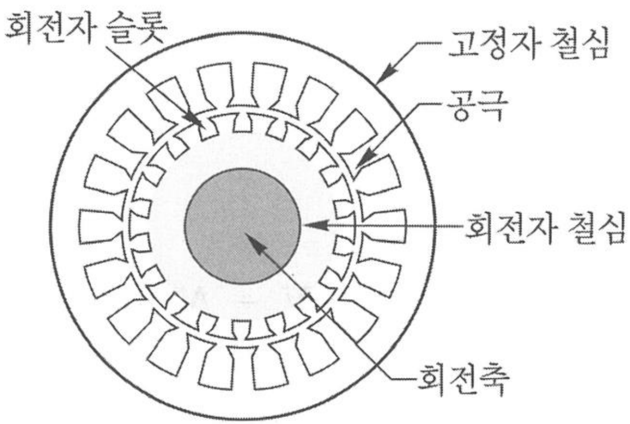


그림 4-5 권선형 회전자

- 1차 권선의 유도 기전력
  - ➢ $E_1 = 4.44 k_{w1} f n_1 \phi$ [V]
- 2차 권선의 유도 기전력
  - ➢ 정지시 : $E_2 = 4.44 k_{w2} f n_2 \phi$ [V]
  - ➢ 슬립시 2차 주파수 f_2

$$f_2 = f \times \frac{N - N_s}{N_s} = f \times \frac{sN_s}{N_s} = sf$$

  - ➢ $E_2' = 4.44 k_{w2} s f n_2 \phi = sE_2$ [V]

f : 전원 주파수, f_2 : 회전자 기전력 주파수

k_{w1} : 1차 권선 계수, k_{w2} : 2차 권선 계수

n_1 : 1차 권선의 1상의 권수, n_2 : 2차 권선의 1상의 권수

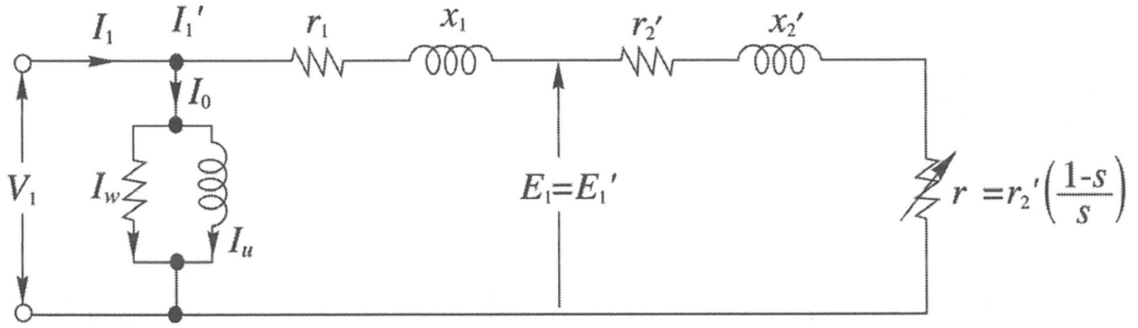
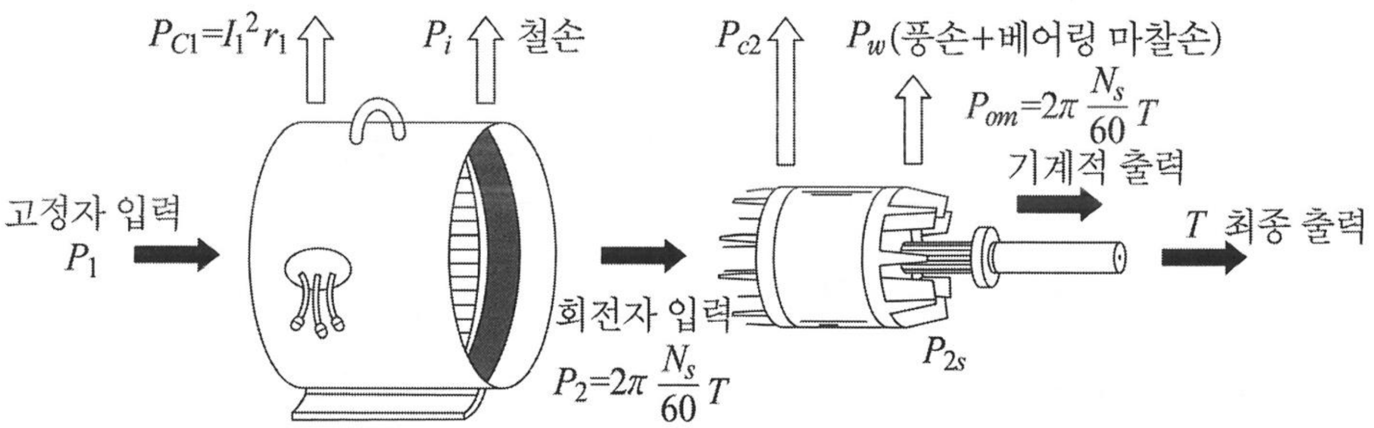


그림 4-6 등가회로

- ➢ V_1 : 1상의 공급 전압
- ➢ I_1 : 1차 전류
- ➢ I_1' : 1차 부하 전류
- ➢ r_1 : 1차 1상의 저항
- ➢ x_1 : 1차 1상의 리액턴스
- ➢ r_2' : 1차로 환산한 2차 1상 저항
- ➢ x_2' : 1차로 환산한 2차 1상 리액턴스
- ➢ $r = \frac{r_2}{s} - r_2$: 기계출력을 나타내는 정수

4. 전력의 변환

- 1차 : 고정자
- 2차 : 회전자

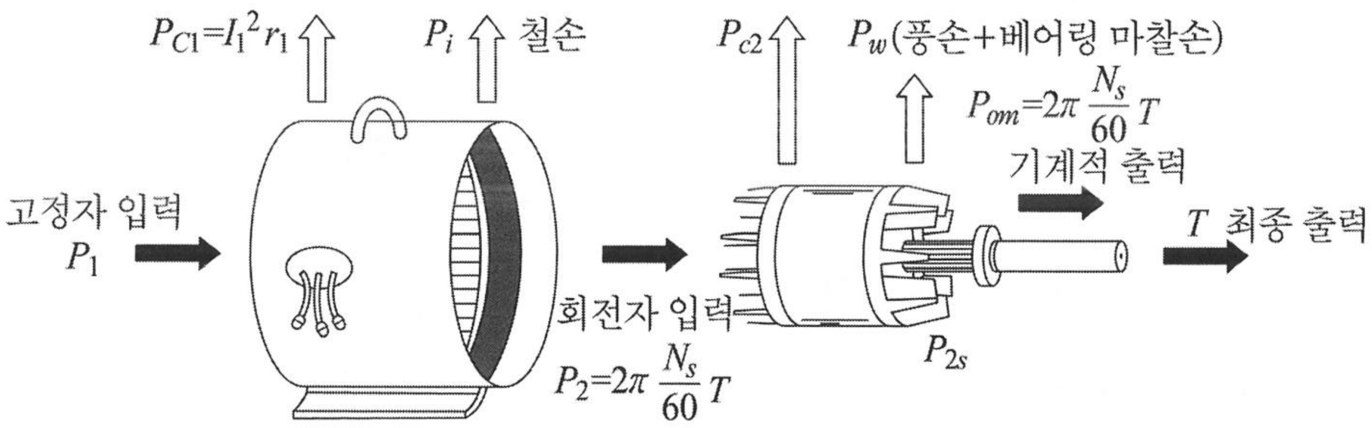


- 유도 전동기 입력 P_1 = 1차 저항손 $P_{1c}(= I_1^2 r_1)$ + 철손 P_i + 2차 저항손 P_{2c} + 풍손 P_w + 기계 출력 P_o
- 회전자(2차) 입력 P_2 = 고정자(1차) 입력 – (철손 + 1차 동손) = 2차 동손 $I_1'^2 r_2'$ + 출력 $I_1'^2 r$ = $I_1'^2 \frac{r_2'}{s}$

$$P_2 = I_1'^2 r_2' + I_1'^2 r = I_1'^2 \frac{r_2'}{s}$$

$$\therefore\ s = \frac{P_{2c}}{P_2} = \frac{\text{2차 저항손}}{\text{2차 입력}}$$

- $P_1 = P_{1c} + P_i + P_{2c} + P_w + P_o$
- $P_2 = I_1'^2 r_2' + I_1'^2 r = I_1'^2 \frac{r_2'}{s}$



- 기계적 출력 (회전자 출력) P_o = 2차 입력 P_2 – 2차 저항손 P_{2c}

$$P_o = P_2 - P_{2c} = P_2 - sP_2 = (1-s)P_2 = \frac{N}{N_s} P_2 \ [W]$$

$$P_2 : P_{2c} : P_o = P_2 : sP_2 : (1-s)P_2 = 1 : s : (1-s)$$

- 2차 효율 (회전자 효율)

$$\eta_2 = \frac{P_0}{P_2} = 1 - s = \frac{N}{N_s} \times 100 \ [\%]$$

5. 동기 와트

- 동기 와트
  - 동기 속도로 회전할 때 2차 입력을 토크로 표현한 것

$$\tau = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n} = \frac{(1-s)P_2}{2\pi(1-s)n_s} = \frac{P_2}{2\pi n_s} = \frac{P_2}{\omega_s}\ [\mathrm{N\cdot m}]$$

$$= \frac{60}{2\pi}\cdot\frac{P_2}{N_s}\ [\mathrm{N\cdot m}] = \frac{1}{9.8}\cdot\frac{60}{2\pi}\cdot\frac{P_2}{N_s}\ [\mathrm{kg\cdot m}]$$

$$= 0.975\frac{P_2}{N_s}\,[\mathrm{kg\cdot m}] \quad\rightarrow\quad P_2 = 1.026N_s\,\tau\ [\mathrm{W}]$$

- 기계적 출력
  - 전동기가 슬립 s로 회전 시 출력을 토크로 표현한 것

$$\tau = 0.975\frac{P_0}{N}\,[\mathrm{kg\cdot m}]$$

6. 3상 유도 전동기의 특성

- 속도 특성
  - 슬립과 전류의 관계 $I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}$

    회전시 정지시에 비해서 슬립비만큼 기전력(sE_2)및 리액턴스(sx_2) 의 차이가 발생

  - 슬립과 토크 $\tau = K_0 \frac{sE_2^2 r_2}{r_2 + (sx_2)^2}$
  - 최대 토크 $\tau_m = K_0 E_2^2 \frac{1}{2x_2}$ [N · m]
  - 최대 토크 시 슬립 $s_t = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \fallingdotseq \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} \fallingdotseq \frac{r_2'}{x_2}$
  - 최대 출력 $P_m = \frac{V^2}{2\{(r_1 + r_2') + \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}\}}$

    $\fallingdotseq \frac{V^2}{2(r_1 + r_2' + x_1 + x_2')}$ [W]

  - 최대 출력시 슬립 $s_p = \frac{r_2'}{r_2' + \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}$

6. 3상 유도 전동기의 특성

- 비례 추이
  - 권선형 유도전동기에서 2차저항을 이용해서 기동 및 속도제어에 응용

$$\tau = \frac{P}{\omega} = \frac{P_2}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} \cdot E_2 I_2 \cos\theta_2 \ \ [\mathrm{N \cdot m}]$$

$$= \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{sE_2^2 r_2}{r_2^2 + (sx_2)^2} \quad \leftarrow I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}, \cos\theta_2 = \frac{r_2}{Z} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}$$

  - 최대 토크의 경우 : $r_2 = sx_s, x_s = \frac{r_2}{s}$
  - 2차 저항(R)추가

$$\frac{r_2}{s} \Rightarrow \frac{r_2 + R}{s} \qquad \tau_m = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{sE_2 r_2}{(sx_2)^2 + (sx_2)^2} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{sE_2 sx_2}{2(sx_2)^2} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{sE_2^2 sx_2}{2(sx_2)^2} = \boxed{\frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{E_2^2}{2x_2}}$$

최대 토크는 R과 무관하며 불변

6. 3상 유도 전동기의 특성

- 비례 추이
  - 권선형 유도전동기에서 2차저항을 이용해서 기동 및 속도제어에 응용
  - 2차 저항(R)추가 : 최대 토크는 불변 $\tau_m = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{E_2^2}{2x_2}$
  - 2차 저항 ↑ 토크 ↑ 속도 ↓ 전류 ↓ 슬립 ↑
  - 비례 추이로 할 수 없는 것
    - ❖ 출력, 2차 효율, 2차 동손, 부하 저항, 동기 속도

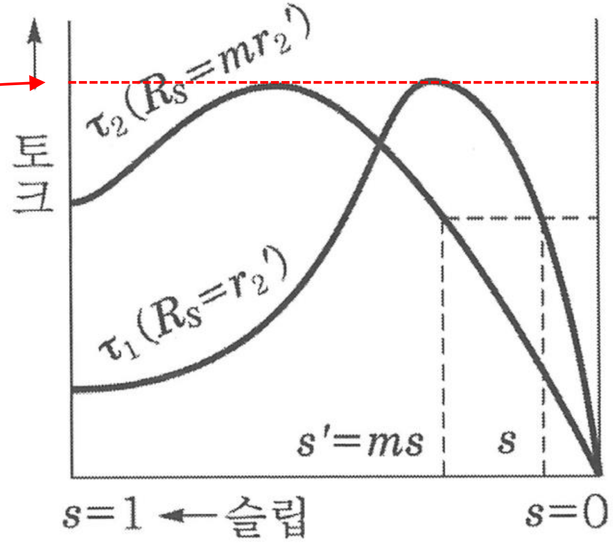


그림 4-8 비례추이

6. 3상 유도 전동기의 특성

- 원선도
  - 유도 전동기의 1차 부하 전류의 벡터 자취의 궤적을 따라 간이 등가 회로의 해석에 이용
  - 원선도 작성에 필요한 실험 : 저항 측정, 무부하 시험, 구속 시험

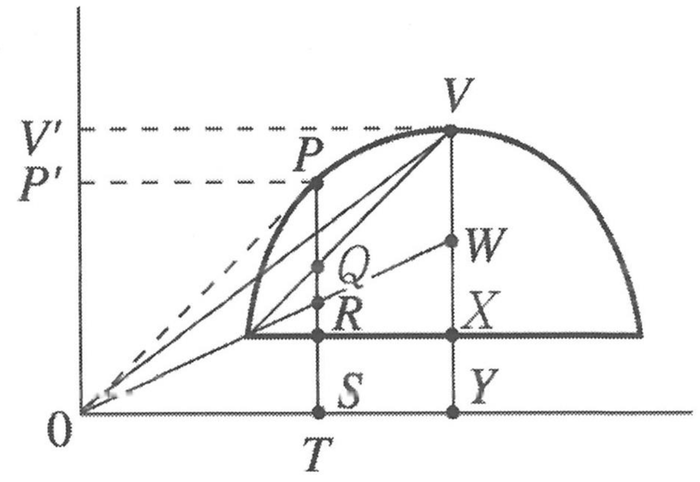


그림 4-9 원선도

7. 유도 전동기의 기동법 및 속도제어

- 기동법
  - 기동 전류 : 정격 전류의 몇 배에 해당하는 전류 흐름 → 기동 전류 제한
  - 농형 유도 전동기
    - 저전압 기동법 (직입기동) : 5kW 이하의 소형 전동기에 사용 (기동 시간이 짧음)
    - 감전압 기동법
      - ✓ Y-Δ 기동법 : (기동은 Y결선, 운전은 Δ 결선) 기동전압이 $1/\sqrt{3}$배 감소, 기동 전류 및 토크는 1/3배 감소 [5~15kW]
      - ✓ 기동 보상기법 : 단권변압기의 원리 이용 → 전압을 낮춰서 기동 [15kW 이상]
      - ✓ 리액터 기동 : 리액터에 의해서 감전압
  - 권선형 유도 전동기
    - 2차 저항을 이용해서 가변 저항을 사용하여 기동 전류 억제 (큰 토크, 작은 전류)
    - 게르게스법 : 3상 전원선 중에서 2개만 사용함

8. 속도제어

- 농형
  - 주파수 변환법
    - 인견공업의 포트 모터, 선박의 추진기
    - 인버터(inverter) 사용 : 전압/주파수 조정
  - 극수 변환법
    - 엘리베이터
  - 전원 전압 제어법
    - 전원전압을 주파수에 반비례하여 변화 (안씀)

- 권선형
  - 2차 저항법
  - 2차 여자법
    - 2차 회전자에 2차 유기기전력과 같은 주파수를 갖는 슬립 주파수 전압을 가하는 방법
  - 종속접속법
    - 극수가 다른 2개의 전동기를 연결하여 제어
    - 직렬 종속법 : $N = \dfrac{120f}{p_1 + p_2}$
    - 병렬 종속법 : $N = \dfrac{2 \times 120f}{p_1 + p_2}$
    - 차동 종속법 : $N = \dfrac{120f}{p_1 - p_2}$

9. 제동

- 제동 방법
  - 발전 제동
  - 회생 제동
  - 단상 제동
  - 역상 제동 (역전 제동, 플러깅) : 3선중 2선을 반대로 연결 (역상이 되면서 반대로 회전)

- 단상 유도 전동기
  - ➢ 기동이 어려움 → 보조 권선 추가
- 종류
  - ➢ 반발 기동형
  - ➢ 반발 유도형
  - ➢ 콘덴서 기동형
  - ➢ 콘덴서 운전형
  - ➢ 분상 기동형
  - ➢ 셰이딩 코일형

※ 참고 : https://www.youtube.com/watch?v=awrUxv7B-a8