

3장 전기기기

학습목표

- 전기기기를 회전기와 정지기로 구분 할 수 있다.
- 직류전동기 및 변압기 그리고 유도전동기에 대하여 설명할 수 있다.
- 전자기유도 현상 및 렌츠의 법칙에 대하여 설명할 수 있다.

[핵심 용어]

- 직류기, 직류전동기, 변압기, 유도전동기, 토크 등

3.1 철도차량 전기기기의 분류

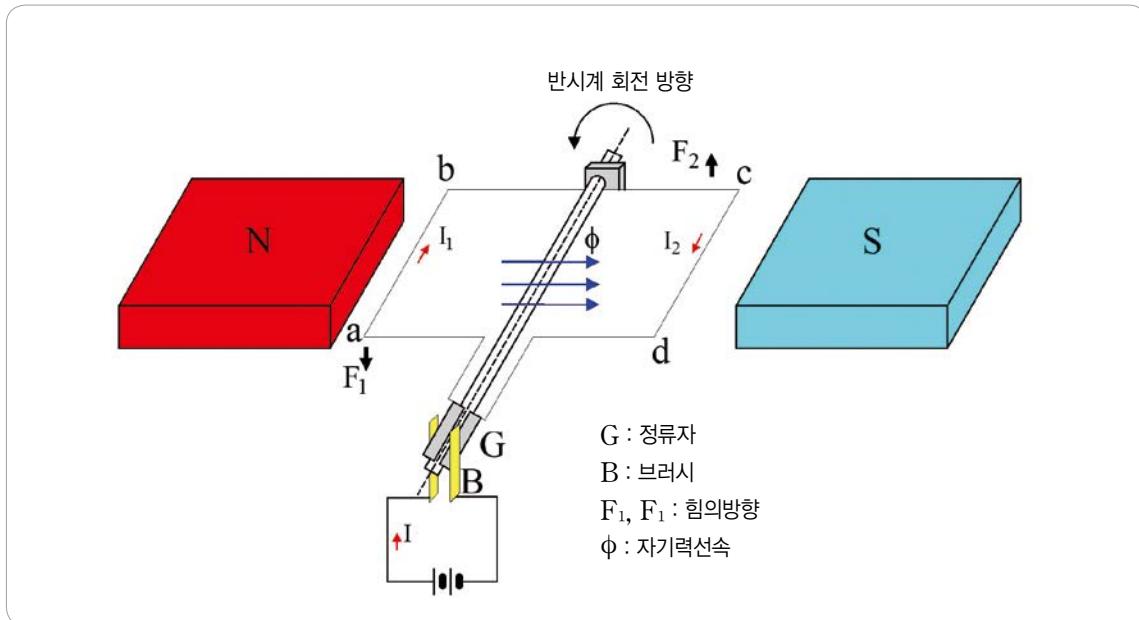
[표 3-1] 전기기기의 분류

전기기기	회전기	직류기	직류전동기
		교류기	유도전동기
		변압기	일반 변압기

직류 전기를 공급받아서 회전력을 얻는 직류전동기와 직류 전기를 발생하는 직류발전기를 총칭하여 직류기라고 한다. 특히, 직류전동기는 자기장 속에 있는 회전자에 전류를 공급하여 회전자에 전자기력이 만들어지는 원리를 이용한 장치이며, 직류발전기는 자기장 속에서 회전자를 움직이면 전자기유도 현상에 의하여 전기가 발생되는 원리를 이용한 장치이다.

3.1.1 직류전동기

직류전동기는 직류 전기에너지를 이용하여 회전력을 얻는 기계로서, 전기에너지를 기계에너زي로



[그림 3-1] 직류 전동기

변환시키는 시스템이다. 직류전동기는 속도 제어가 쉽고, 급격한 부하가 전동기에 작용하여도 큰 힘을 낼 수 있다. 또 회전 방향을 쉽게 제어할 수 있으며, 직선적인 시동 회전력을 얻을 수 있다. 직류전동기의 역기전력은 단자전압보다 작다.

3.1.2 직류발전기

고정자 코일 속에서 회전자를 움직이면 회전자에는 자기장이 형성되고, 이렇게 형성된 자기장은 전자기유도 현상에 의하여 고정자 권선에 자기장을 형성하여 유도전압을 만든다. 이렇게 만든 전압은 교류이고, 직류발전기는 정류 과정을 통해서 코일에 발생된 교류전압을 직류전압으로 정류시키는 것이다. 즉, 직류발전기의 출력전압이 직류라고 하더라도 발전기 내의 코일에 발생된 전압은 교류전압이다. 직류발전기의 유도기전력은 단자전압⁵⁾ 보다 크다.

5) 단자전압 : 단자전압은 회로에 연결된 전지의 양쪽 단자에서 측정되는 전압의 세기이다. 전지의 내부저항 때문에 전지가 회로에 연결되었을 때 기전력 보다 작은 단자전압이 측정된다. 단자전압을 $V_{단}$, 기전력을 $E_{기}$, 내부저항을 $R_{내}$ 이라 할 때, 다음과 같이 단자전압을 나타낼 수 있다.

$$V_{단} = E_{기} - R_{내}$$

3.1.3 직류전동기의 원리

자기장 속에서 회전자에 전류를 공급하면, 회전자는 자기장으로부터 힘을 받는다. 즉, 전류와 자기장 사이에 작용하는 힘을 전자력⁶⁾이라고 하는데, 플레밍의 원손 법칙으로 설명할 수 있다. 원손의 중지, 검지, 엄지를 서로 직각으로 벌리고 중지를 전류의 방향으로, 검지를 자기장의 방향으로 놓으면, 힘의 방향은 엄지가 가리키는 방향이 된다.

여기서 회전자에서 발생되는 힘을 F , 회전자 주위에서 나오는 자기장을 B , 전류를 I , 회전자에 감긴 도체의 유효 길이를 L 이라 할 때 다음과 같이 정의할 수가 있다.

$$F = B \cdot I \cdot L, (N), \dots \dots 3-1\text{식}$$

직류전동기의 회전자가 권선에 전압을 가하여 전류를 공급하면 전자력으로 인하여 회전자는 회전하여 직류전동기로 작용한다. 직류전동기가 회전하면 회전자는 고정자의 권선으로부터 나오는 자기력선속(자속)을 끊으므로 직류발전기와 같이 기전력을 만들게 된다. 여기서 만들어진 기전력은 직류전동기 회전자에 공급하는 단자전압 V_t 와 반대 방향이 되고 회전자 전류 I_r 를 방해하는 방향으로 작용하기 때문에 역기전력이라고 한다. 따라서 역기전력을 E_c , 회전자 저항을 R_r , 회전자 전류를 I_r , 단자전압을 V_t , 자극 수를 p , 한 극당 자기력선속(자속)을 Φ , 도체 수를 Z , 병렬회로 수를 a , 매 분당 회전수를 n , 기계 상수를 k , k_1 , k_t 라 하면 역기전력 E_c 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$E_c = V_t - I_r R_r (V), \dots \dots 3-2\text{식}$$

$$E_c = V_t - I_r R_r = \frac{p Z \Phi n}{60a} = k_1 \cdot \Phi \cdot n (V), \dots \dots 3-3\text{식}$$

$$k = \frac{1}{k_1} = \frac{60a}{pZ}, k_1 = \frac{pZ}{60a}, k_t = \frac{pZ}{2a\pi}$$

위 식에서와 같이 역기전력은 회전속도에 비례하므로 직류전동기에 기계적 부하가 증가하게 되면 회전속도는 감소하게 된다. 그러므로 역기전력 또한 감소하게 된다.

6) 전자력 : 자기장 내 도선을 두고 전류를 공급하면 도선 주위에 발생하는 자기장으로 인하여 도선에 힘이 작용하는 것

직류전동기가 한쪽 방향으로 계속적인 회전력을 얻기 위해서는 회전자가 일정한 위치를 지날 때마다 전류의 방향을 바꾸어 주어야 한다. 이와 같이 전류의 방향을 바꾸어 한쪽 방향으로 흐르게 하는 것을 정류작용이라고 한다.

3.1.4 직류전동기의 구조

큰 기동 토크와 부하의 변동에 적응하는 직류직권전동기는 속도 제어와 회전 방향의 변환이 쉬운 우수한 특성을 가지고 있어 전기동차의 전동기로 활용하고 있는데 다음과 같은 구조를 가지고 있다.

3.1.4.1 계자(field magnet)

계자 철심, 계자권선, 자극 및 계철로 구성되어 N, S의 자극과 같이 자기력선속을 발생하는 부분이며, 계자 철심은 계자권선으로 자극을 만드는 부분이다. 대형 직류전동기의 공극은 6~8mm정도 된다.

3.1.4.2 회전자(armature)

회전자 철심과 회전자 권선, 정류자 및 축으로 구성되어 있으며, 회전자에 전기를 공급해 주면 전자기력에 의해서 전동기가 되어 회전을 하게 된다.

3.1.4.3 정류자(commutator)

브러시와 접촉하며, 유도된 교류 기전력을 직류로 바꾸어 주는 부분으로 직류기의 가장 중요한 부분이다.

3.1.4.4 브러시(brush)

전동기의 내부 회로와 외부 회로를 전기적으로 연결시켜 주며, 기전력을 외부로 인출하는 부분이다. 종류에는 탄소브러시와 전기 흑연 브러시, 그리고 금속브러시가 있다. 일반적으로 양호한 정류를 하기 위하여 접촉 시 저항이 큰 탄소브러시를 사용한다.

3.1.5 직류전동기의 종류

직류전동기는 타(他)여자 전동기와 자(自)여자 전동기로 분류하며 특히, 자여자 전동기는 직권전동기, 분권전동기, 복권전동기로 나눠진다. 여기서 복권전동기는 가동복권전동기와 차동복권전동기

로 분류한다. 타여자 전동기는 계자권선과 회전자 권선이 각각 다른 전원에 연결된다. 직권전동기는 계자권선과 회전자 권선이 전원에 직렬로 연결되고, 분권전동기는 계자권선과 회전자 권선이 전원에 병렬로 연결된다.

- (1) 타여자 전동기
- (2) 자여자 전동기
 - 1) 직권전동기
 - 2) 분권전동기
 - 3) 복권전동기
 - ① 가동복권전동기
 - ② 차동복권전동기

3.1.6 직류전동기의 토크

자기장 속에 놓여 있는 회전자에 전압을 가하면 회전자에는 전류가 흐르게 되고, 회전자를 회전시키려는 토크(torque)가 발생한다. 여기서 회전력을 T , 한 극당 자기력선속을 Φ , 병렬회로수를 a , 도체수를 Z , 자극수를 p , 기계 상수를 k_t ($= \frac{pZ}{2a\pi}$), 회전자에 공급된 전류를 I_r 이라하면 다음과 같이 정의된다.

$$T = k_t \Phi I_r = \frac{p Z \Phi I_r}{2a\pi} \text{ (Nm), 3-4식}$$

따라서 토크는 회전자에 공급되는 전류 크기와 한 극당 자기력선속에 비례한다.

특히 직권전동기의 토크는 회전자에 공급되는 전류가 작을 때 부하 전류, 계자 전류, 회전자 전류가 모두 같기 때문에 $T = k_t \Phi I_r$ 에서 Φ 는 $\propto I_r$ 이므로 $T = k_t I_r I_r = k_t (I_r)^2$ 가 된다.

3.1.7 직류전동기의 속도

직류전동기의 회전속도는 다음 식으로부터 유도하면 다음과 같다.

직류전동기 회전속도는 역기전력에 비례하며, 한 극당 자기력선속에 반비례한다.

$$k = \frac{1}{k_1}, k_1 = \frac{1}{k}, E_c = V_t - I_r R_r = k_1 \Phi n$$

$$n = \frac{V_t - I_r R_r}{k_1 \Phi} = k \frac{V_t - I_r R_r}{\Phi}, \dots \text{ 3-5식}$$

3.1.8 직류직권전동기의 속도 특성

직류전동기가 정지 상태에서 운전 상태로 하는 것을 기동이라고 한다. 기동 시 직류전동기의 회전자 권선에 흐르는 전류의 크기는 가해 주는 전압, 권선의 저항, 그리고 권선에서 발생하는 역기전력에 의하여 달라진다. 직권전동기는 계자권선과 회전자 권선이 직렬로 연결되어 있으므로 공급되는 전류가 작을 때는 부하 전류와 회전자 전류, 계자 전류는 모두 같아서 자기력선속 Φ 이 부하 전류 I 에 비례한다. 회전자 저항을 R_r , 회전자 전류를 I_r , 단자전압을 V_t , 자극 수를 p , 한 극당 자기력선 속(자속)을 Φ , 도체 수를 Z , 병렬회로 수를 a , 매 분당 회전수를 n , 기계 상수를 k, k_1, k_t 라 하면 전동기의 분당회전수 n 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$n = \frac{V_t - I_r R_r}{k_1 \Phi} = k \frac{V_t - I_r R_r}{\Phi} \text{ 에서 자기력선속은 부하 전류 } I \text{에 비례하므로 다음과 같이}$$

정의 할 수 있다.

$$n = \frac{V_t - I_r R_r}{k_1 \Phi} = k \frac{V_t - I_r R_r}{\Phi} = k \frac{V_t - R_r I_r}{I}$$

그리고 회전자 전류와 회전자 저항은 단자 전압에 비해 매우 작은 값이므로 직권전동기의 회전속도는 다음과 같이 정의한다.

$$n = k \frac{V_t}{I}, (\text{rpm}), \dots \text{ 3-6식}$$

직권전동기는 부하 전류가 감소하면 급격하게 속도가 상승하고, 부하 전류가 증가함에 따라서 속도는 감소하게 된다. 직권전동기는 무(無)부하 상태가 지속되면 속도가 높아져서 위험한 상황이 발생한다.

3.1.9 직류직권전동기 속도 제어

직류직권전동기의 속도를 제어하는 데는 전기자 저항, 자속, 단자전압을 변화시키는 방법이 있다.

[표 3-2] 직류직권전동기의 속도 제어 방식

전동기	회전력 제어(torque)	회전수 제어(revolutions per minute)
	전류(I)	전압(V), 계자(ϕ)
직류직권전동기	$T = k_t \Phi I_r$	$n = k \frac{V_t - I_r R_r}{\Phi}$

3.1.9.1 저항제어 방식

회전자 권선의 저항을 변화시키는 방법으로 정 토크⁷⁾ 특성을 나타내지만, 속도 변동이 크고 효율이 좋지 않다. 주로 직권전동기에서 사용한다.

3.1.9.2 계자제어 방식

계자 전류의 크기를 변화시키면 자속이 변하게 되는데, 이와 같은 방법으로 속도를 제어하면 정 출력⁸⁾의 특성을 가지지만, 응답성이 좋지 않다. 주로 분권 및 복권전동기에서 사용한다.

3.1.9.3 전압 제어 방식

회전자에 가해 주는 전압을 변화시키는 방법으로 정 토크, 정 속도 특성을 가지고 있으며, 속응성(자동 조정 체계가 설정 값의 변동에 신속히 응답하는 성질)이 양호하다. 주로 타여자 직류전동기에 사용된다.

3.2 변압기

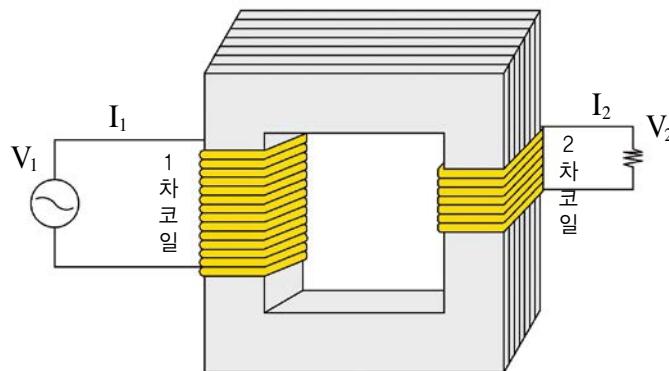
변압기는 렌츠의 법칙과 패러데이 전자기유도의 법칙으로 설명할 수 있다. 1차 권선과 2차 권선은

7) 정 토크 : 모든 속도에서 같은 크기의 토크가 발생하는 전동기

8) 정 출력 : 모든 속도에서 같은 크기의 출력이 발생하는 전동기

전기적으로 분리되어 있으나 자기적으로 결합되어 있다. 1차 권선에 교류전류를 공급하면 철심을 통과하는 자기력선속(자속)이 변화하여 전자기유도 작용에 의하여 2차 권선에 유도기전력이 발생한다. 이때 유도기전력의 크기는 자기회로를 통과하는 자기력선속의 변화 속도와 양쪽 권선에 감긴 코일의 권선 수에 따라 달라진다. 즉, 1차 측 주파수를 일정하게 하면 2차 측도 같은 크기의 주파수를 갖게 된다. 그리고 1차 권선 수가 2차 권선 수보다 많이 감게 되면 2차 전압이 1차 전압 보다 낮아진다. 반대로 1차 권선 수가 2차 권선 수보다 적으면 1차 전압보다 2차 전압이 커진다. 여기서 V_1 , V_2 를 각각 1차 전압, 2차 전압(V), N_1 , N_2 를 각각 1차 권선 수, 2차 권선 수(회), I_1 , I_2 를 각각 1차 전류, 2차 전류(A)라 하면 변압비, 권수비, 변류비는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{V_1}{V_2}(\text{변압비}) = \frac{N_1}{N_2}(\text{권수비}) = \frac{I_2}{I_1}(\text{변류비}), \dots \dots 3-8\text{식}$$



[그림 3-2] 변압기

3.2.1 변압기 구조

변압기의 구조는 자기회로를 구성하는 철심, 전자회로를 구성하는 권선, 절연을 위한 절연유, 본체를 이루는 외함과 커버 등으로 구성되어 있다.

3.2.1.1 철심

자기회로를 구성하여 1차 측에 인가된 전압을 2차 측에 다른 전압으로 나타나도록 하는 역할을 한다. 구조적으로 자기장 안에 철심이 있게 되므로 맴돌이전류에 의한 철 손실과 누설 자기력선속이

중요한 요소가 된다.

3.2.1.2 권선

1차 권선과 2차 권선을 나누어 간게 되면 1차 전류에 의해서 발생된 자기력선속이 2차 권선에 모두 도달하지 못하도록 누설 자기력선속이 생기게 된다. 그렇게 되면 변압기 효율이 나빠지게 되므로 대부분 변압기는 1차 권선과 2차 권선이 하나의 몸체가 되도록 한다.

3.2.2 변압기 정격

3.2.2.1 정격전압

변압기의 운전과 성능 특성을 나타낼 때의 기준전압으로 무부하 운전 시에 출력되는 전압을 말한다.

3.2.2.2 정격 용량

정격전압, 정격 주파수, 정격 역률에서 지정된 온도 상승 한도를 넘지 않고, 출력 단자 사이에서 얻어지는 값을 정격 용량이라 한다.

3.2.2.3 정격전류

정격전압과 정격 용량에서 산출되는 전류의 실현값으로, 정격 2차 전류는 정격 용량을 정격 2차 전압으로 나누면 된다.

3.3 유도전동기

유도전동기는 도체와 자기장 사이에서 발생되는 전자기유도 작용을 이용한 것으로, 플레밍의 오른손 법칙으로 기전력이 발전되는 원리와 왼손 법칙으로 전동력이 발생되는 원리로 설명할 수 있다. 기전력 발생 원리는 다음과 같이 설명할 수 있다. 일정한 자기장 안에 도체를 자기장과 직각 방향으로 놓고 도체를 운동시키면 플레밍의 오른손 법칙에 따라 기전력이 유도된다. 이것은 교류 기전력이고, 그 방향은 도체가 한 바퀴 회전할 때마다 반대로 유도된다. 즉, 코일이 완전히 한 바퀴 회전하면 1[Hz]의 기전력이 유도된다. 유도기전력의 순시 값을 E 라고 하면, 도체의 회전속도가 $v(m/s)$, 공간 자기력선속 밀도가 $B(Wb/m^2)$, 도체의 유효 길이가 1(m)일 때 유도기전력 E 의 크기는 다음과 같이 정의한다.

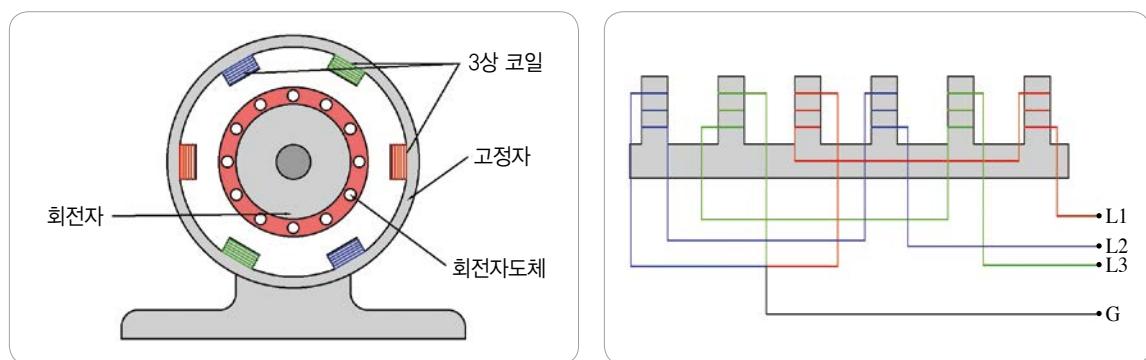
$$E = B \cdot l \cdot v, (V), \dots 3-9식$$

플레밍의 원손 법칙에 의하여 전동력이 발생되는 원리는 유도전동기 원리에서 설명한다.

3.3.1 유도전동기의 원리

고정자 철심에 권선 수, 선의 굵기, 선의 크기가 같은 ①코일, ②코일, ③코일을 120° 간격으로 배치하고 대칭인 3상 전류를 공급하면 고정자에 회전자기장이 발생된다. 고정자에서 만들어진 회전자기장으로 인하여 전자기유도 작용으로 회전자 권선에 유도전류가 만들어지므로 또 하나의 회전자기장이 만들어진다. 이렇게 두 개의 회전자기장이 형성하게 되면 토크가 발생하여 회전자는 회전을 한다. 회전자의 토크는 회전자 권선에 흐르는 전류와 자속의 곱에 비례한다.

무부하 상태에서 회전자 속도 $N(\text{rpm})$ 이 점점 증가해 고정자의 회전자기장의 속도인 동기속도 $N_s(\text{rpm})$ 에 가까워지면, 회전자를 관통하는 자기력선속 수는 줄어들게 된다. 자기력선속이 감소하면 회전자에 유도되는 전류가 줄고, 회전자 토크도 감소한다. 그러나 부하가 연결되면 회전자의 속도는 떨어져 동기속도와 속도 차가 증가한다. 그렇게 되면 회전자를 관통하는 자기력선속 수도 증가하여 회전자 권선에 발생하는 전류는 커지고 이것은 전동기의 토크를 크게 하여 속도는 다시 증가하게 된다. 즉, 전동기가 큰 토크로 부하를 돌려주기 위해서는 회전자 속도가 동기속도보다 느린 회전수를 가져야 한다.



[그림 3-3] 유도전동기의 구조

3.3.1.1 유도전동기의 구조

3상 유도전동기의 구조는 크게 고정자와 회전자로 구성되어 있으며, 회전자에는 권선형 회전자와 농형 회전자로 분류한다.

(1) 고정자 : 고정자 철심과 권선으로 구성되어 있다.

1) 고정자 철심 : 고정자 철심은 자기력선속이 통과하는 자기회로로서 규소강판을 수십 겹 성 층하여 3상 코일을 감을 수 있도록 되어 있다. 공기보다 자기저항이 적은 자기력선속 통로가 있다.

2) 고정자 권선 : 회전자기장(회전자계)을 만드는 고정자의 권선이다.

(2) 회전자 : 회전자는 축과 철심, 그리고 권선 세 부분으로 구성되어 있으며 농형 회전자와 권선형 회전자로 분류한다.

1) 축 : 회전자 철심을 지지하고 회전의 중심이 된다.

2) 회전자 권선 : 2차 유도 전자기력을 만드는 회전자의 권선이다.

3.3.1.2 유도전동기의 슬립

동력 운전 시 회전자의 회전속도는 고정자 회전 자속의 속도와 거의 비슷하나 완전하게는 일치하지 않는다. 이렇게 일치하지 않는 부분을 슬립이라고 한다. 동력 운전 시 회전자에 부하가 걸리면 회전자는 회전자계보다 약간 늦은 속도로 회전을 하게 되며, 반대로 회생제동 상태가 되면 회전자가 회전자계보다 약간 빠르게 회전을 한다. 여기서 회전자계의 회전수 N_n , 회전자계의 회전 주파수 f_{nr} , 극수 p , 회전자의 슬립 주파수를 f_{rs} , 회전자의 회전 주파수 f_{rr} , 슬립률 s , 회전수 N_r 라 하면 다음과 같이 정의한다.

$$f_{rs} = f_{nr} - f_{rr}, \dots \dots 3-9식$$

$$s = \frac{f_{nr} - f_{rr}}{f_{nr}} = 1 - \frac{f_{rr}}{f_{nr}}, \dots \dots 3-10식$$

$$s = \frac{N_n - N_r}{N_n} = 1 - \frac{N_r}{N_n}$$

또한 슬립의 범위는 다음과 같다.

$$1 > s > 0$$

즉, 슬립이 1일 때 회전자의 회전수는 0이 되므로 전동기는 정지 상태가 된다. 슬립이 0일 때 회전자의 회전수는 동기속도(회전자계)와 같으므로 무부하 상태와 같다.

전기동차의 동력 운전에서 회생제동으로, 또는 회생제동에서 동력 운전으로의 변경은 슬립을 양

(+), 또는 음(−)으로 전력 반도체소자의 게이트 제어에 의하여 이행되며, 전동기의 회전 방향 변경은 교류 전원 3상의 순서를 바꿔 자기력선속의 회전 방향을 변경함으로 이루어진다. 여기서 회전자계의 회전주파수를 f_{nr} , 회전자의 슬립주파수를 f_{rs} , 회전자계의 회전수 N_n 는 다음과 같이 정의한다.

$$N_n = \frac{120f_{nr}}{p}, \dots \dots 3-11식$$

3.3.1.3 유도전동기 동기속도

견인전동기로 사용하는 경우는 회전자의 속도를 고정자 회전 자속의 회전속도보다 느린 속도로 회전하게 하고, 발전기로 사용하는 경우는 회전자를 고정자 회전 자속의 회전속도보다 빠른 속도로 회전하게 한다. 이러한 현상은 회전자와 고정자 회전 자속의 회전속도 간의 슬립 제어에 의해 발생한다. 일반적으로 유도전동기는 다음 식처럼 전원 주파수(인버터 주파수) f_{inv} 와 극수 p 에 의해 결정되는 동기속도 N_n 을 중심으로 회전하는 정속도(定速度) 특성을 갖는다. 현재 국내에서 과천선이나 분당선에서 사용되는 전동기의 극수는 4극을 사용하고 있다.

$$N_n = \frac{120f_{inv}}{p}, (\text{rpm}), \dots \dots 3-12식$$

기관사가 제동을 체결하여 회생제동 상태가 되면 회전자계의 회전 주파수 f_{nr} 가 회전자의 회전 주파수 f_r 보다 작기 때문에 슬립 주파수 f_{rs} 와 슬립률 s 는 0보다 작은 값을 갖는다. 그리고 회전자 속도 N_r 및 전원 주파수 f_{inv} 와 동기속도 N_n 와의 관계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$N_r = N_n(1 - s) = \frac{120f_{nr}}{p} (1 - s), (\text{rpm}) \dots \dots 3-13식$$

3.3.1.4 유도전동기 회전수 제어

유도전동기의 회전수를 변화시키기 위해서는 전원 주파수(인버터 주파수)와 극 수, 그리고 슬립을 변경해 주면 되지만 설계 시부터 극 수는 고정되어 있어 곤란하다. 그래서 전원 주파수와 슬립을 조정하여 제어한다.

- (1) 주파수 제어 : 회전자의 속도를 높게 하려면 회전자계의 속도를 높여야 하고, 회전자계의 속도를 높이려면 회전자계의 회전 주파수를 높여야 한다. 여기서 회전 주파수 변화는 전원 주파수를 변화시키는 것이다.

- (2) 슬립 제어 : 슬립 주파수를 증가시켜 전동기의 출력을 일정하게 유지시키면서 제어하는 방법으로, 슬립이 양(+)일 때 동력 운전 상태가 되며, 슬립이 음(−)일 때 회생제동 상태가 된다.
- (3) 극 수 제어 : 전동기의 극 수와 회전자 회전수는 반비례하므로 극 수가 많을수록 속도는 낮아진다. 그리고 전기동차는 설계 시 전동기의 극 수가 이미 고정되어 있기 때문에 변경하기 어렵다.

[표 3-3] 유도전동기의 속도 제어 방식

전동기	회전력 제어(torque)	회전수 제어(revolutions per minute)
유도전동기	주파수(F), 전압(V)	극 수(P), 주파수(F)
	$T = K_4 \cdot \left(\frac{V_m}{f_{ivn}}\right)^2 \cdot f_{rs}$	$N_r = N_n(1-s) = \frac{120f_{nr}}{p} (1-s)$

3.3.1.5 유도전동기 토크

유도전동기는 1차 측 고정자 권선에서 2차 측 회전자 권선으로 전자기유도 작용에 의해 전력을 전달하고, 이 전력을 동력으로 변환시킨다. 이 경우 회전자에 발생하는 토크 T 는 슬립 주파수가 작은 범위에서는 전동기의 자속 Φ_m 과 회전자 2차 전류에 의해 발생되는데, 기계 상수를 K_1 , 전동기의 자속을 Φ_m , 회전자 2차 전류를 I_r 이라 할 때 토크 T 는 다음과 같이 정의한다.

$$T = K_1 \cdot \Phi_m \cdot I_r = K_2 \left(\frac{V_m}{f_{ivn}} \right)^2 \cdot f_{rs} (N \cdot m), \dots \dots 3-14\text{식}$$

전동기의 자속은 인버터 출력전압(전동기 전압)에 비례하고, 인버터 주파수(진원 주파수)에 반비례하기 때문에 기계 상수를 K_2 , 인버터의 출력전압을 V_m , 인버터 주파수를 f_{ivn} 라 하면 전동기의 자속은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Phi_m = \frac{K_2 \cdot V_m}{f_{ivn}}, (Wb/m^2), \dots \dots 3-15\text{식}$$

또한 회전자 2차 전류 I_r 은 자속과 슬립 주파수에 비례하기 때문에 회전자 전류는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$I_r = K_3 \cdot \Phi_m \cdot f_{rs}, \dots \dots 3-16\text{식}$$

위의 식으로부터 삼상 유도전동기의 토크는 다음과 같이 정의한다.

$$T = K_4 \cdot \left(\frac{V_m}{f_{ivn}} \right)^2 \cdot f_{rs}, \dots \dots 3-17\text{식}$$

토크를 최적의 조건으로 제어하기 위해서는 전원 전압(인버터 출력전압)과 전원 주파수를 제어할 필요가 있다. 자속과 회전자 2차 전류는 전원 전압과 전원 주파수가 부여되면 결정된다. 전원 주파수만 변화시킨 경우의 토크 특성(전원 전압 일정)은 속도는 상승하지만 토크는 $\left(\frac{1}{f_{ivn}}\right)^2$ 에 비례하여 감소하고, 전원 전압만 변화시킨 경우의 토크 특성(전원 주파수 일정)은 V_m^2 에 비례해 증가하지만 속도가 상승하지 않기 때문에 전원 전압과 전원 주파수를 조합하여 제어하지 않으면 전기동차에는 적합하지 않게 된다.

3.3.2 인버터 전기동차의 운전 모드

VVVF 전기동차에서는 인버터 출력전압 제어, 인버터 주파수 제어, 슬립 주파수 제어를 사용하고 있으며, 직류직권전동기를 사용하는 전기동차와 동등한 차량 성능을 얻고 있다. 운전 모드별 특성은 다음과 같다.

3.3.2.1 정 토크 영역(저속)

[주파수와 전압의 일정 제어 영역, 전류 일정, 토크 일정]

슬립 주파수(f_{rs})를 일정하게 제어함과 동시에 전동기에 공급되는 전압(V_m)과 인버터 주파수(f_{ivn})의 비를 일정하게 유지하는(V_m/f_{ivn}) 일정 제어를 한다. 인버터 주파수를 상승시키면 전기동차가 가속한다. 이 영역에서 발생하는 토크는 다음과 같이 정의한다.

$$T = K_2 \left(\frac{V_m}{f_{ivn}} \right)^2 f_{rs}, \dots \dots 3-18\text{식}$$

3.3.2.2 정 전력 제어(중속)

전동기에 공급되는 전압이 최대로 되면 정 토크 영역으로부터 정 전력 영역으로 되고, 인버터 주파수의 상승으로 발생되는 토크는 $\left(\frac{1}{f_{ivn}}\right)$ 에 비례해서 급격히 감소된다. 토크의 감소를 억제하는 방법이며,

전력을 일정하게 유지하도록 인버터 주파수에 비례해서 슬립주파수를 증대시키는 정 전력 영역이다. 이 영역에서 발생하는 토크는 다음과 같다.

$$T = K_3 \left(\frac{I_r V_m}{f_{inv}} \right), \dots \dots 3-19식$$

$$I_r = K_3 \cdot \Phi_m \cdot f_{rs}, (I_m \cdot V_m) = \text{일정}, \dots \dots 3-20식$$

자속 Φ_m 은 $\frac{1}{f_{inv}}$ 에 비례해서 감소하지만 f_{rs} 에 의해 전동기에 공급되는 전류는 일정하게 제어되고 있다. 여기서 f_{rs} 가 최대로 증가하면 일정 영역으로 이행된다.

3.3.2.3 일정 영역(고속)

전동기에 공급되는 전압과 슬립 주파수가 최대로 된 후 인버터 주파수만 높여서 속도를 올리는 영역이기 때문에 전동기에 공급되는 전압과 슬립 주파수는 일정하다.

따라서 자속($\Phi_m \propto \frac{V_m}{f_{inv}}$)과 전류(I_r)는 동시에 감소하고 토크는 전원주파수(f_{inv})의 제곱에 반비례하여 감소하며 전류의 감소로 출력 또한 떨어진다. 토크는 다음과 같다.

$$T = K_2 \left(\frac{V_m}{f_{inv}} \right)^2 f_{rs}$$

$$(f_{rs} \cdot V_m) = \text{일정}$$

$$I_r = K_2 \left(\frac{V_m}{f_{inv}} \right) f_{rs}, \dots \dots 3-21식$$

3.3.2.4 회생제동 영역

지금까지 행한 제어를 역으로 이행시키는 영역으로, 슬립 주파수 f_{rs} 를 음(−)으로 하기 위하여 $f_{inv} = f_{rr} + f_{rs}$ 로 계산한다. 이렇게 제어함으로 전동기를 발전기로 전환시켜 제동 토크를 발생한다.

3.3.3 유도전동기 분류

3.3.3.1 단상유도전동기

- (1) 분상 기동형
- (2) 콘덴서형
- (3) 셰이딩 코일형
- (4) 반발 기동형

3.3.3.2 3상 유도전동기

- (1) 농형
- (2) 권선형

핵심정리

>>>

1. 전기기기의 분류

- 직류전동기
- 유도전동기
- 일반 변압기

2. 직류전동기

전동기	회전력 제어(torque)	회전수 제어(revolutions per minute)
직류직권전동기	전류(I) $T = k_t \Phi I_r$	전압(V), 계자(ϕ)
		$n = k \frac{V_t - I_r R_r}{\phi}$

3. 변압기

$$T = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

4. 유도전동기

전동기	회전력 제어(torque)	회전수 제어(revolutions per minute)
유도전동기	주파수(F), 전압(V)	극 수(P), 주파수(F)
	$T = K_4 \cdot \left(\frac{V_m}{f_{inv}} \right)^2 \cdot f_{rs}$	$N_r = N_n(1-s) = \frac{120f_{nr}}{p} (1-s)$