

전기 기본이론 (Basic Theories of Electrical Engineering) - V

5. 전동기

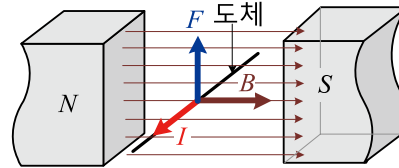
연재목록

1. 전류
2. 전기와 자기
3. 임피던스
4. 발전기
5. 전동기
6. 변압기
7. 전력
8. 접지
9. 전기안전
10. 노이즈
11. 무정전 전원설비

전동기는 직류전동기와 교류전동기로 구분된다. 직류전동기는 직권전동기, 분권전동기, 복권전동기 등으로 나뉘고, 교류전동기는 또다시 동기전동기, 유도전동기로 분류된다. 유도전동기는 또다시 단상 유도전동기와 3상 유도전동기로 나누어진다. 이와 같이 전동기의 종류는 여러 가지가 있으나 모든 전동기가 회전하는 원리는 자계 내에 있는 코일에 전류가 흐르면 자계와 전류의 상호작용에 의한 전자력에 의해서 플레밍의 왼손법칙 방향으로 회전하는 것이다.

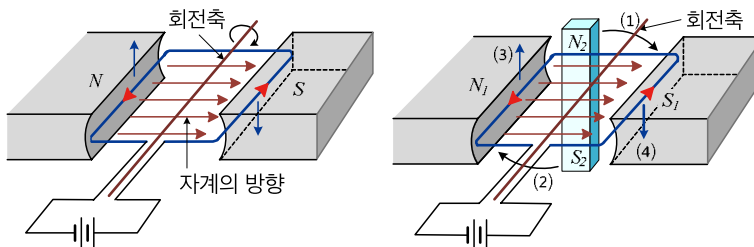
자계와 전류 사이에 작용하는 힘의 방향

자계 내에 있는 도체에 전류가 흐르면 자계와 전류의 상호작용에 의해서 도체에 전자력(電磁力 : Electro-Magnetic Force)이 작용한다. 이때 작용하는 힘(전자력)의 방향은 **플레밍의 왼손법칙**에 의해서 그림의 화살표 방향으로 작용한다. 플레밍의 왼손법칙에서 엄지는 힘, 검지는 자계, 중지는 전류의 방향을 표시한다.



플레밍의 왼손법칙 방향으로 힘이 작용하는 원리

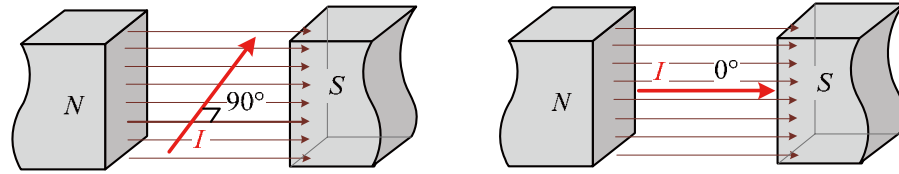
아래의 왼쪽 그림과 같이 자계 내에 코일을 두고 이 코일에 그림의 빨간 화살표 방향으로 전류가 흐르면 이 전류는 암페어의 오른나사 법칙에 의해서 위쪽이 N극이 되고 아래쪽이 S극이 되는 자계를 형성하는데 이 자계를 **가상의 자석**으로 그리면 오른쪽 그림과 같다. 오른쪽 그림에서 자극 N_1 은 N_2 를 밀고, S_1 은 N_2 를 잡아당기고, S_1 은 S_2 를 밀고, N_1 은 S_2 를 잡아당기므로 가상의 자석은 그림의 (1)(2)번 화살표 방향으로 회전하려는 힘을 받는다. 그런데 이 가상의 자석은 코일과 한 몸으로 붙어 있는 것이므로 코일이 그림의 (3)(4)번 화살표 방향으로 회전하려는 힘을 받게 된다. 즉, 자계와 전류 사이에 힘이 작용한다는 것은, 자계와 코일 사이에 직접 힘이 작용하는 것이 아니라, 실질적으로는 두 개의 자석 사이에 작용하는 힘인 것이다.



작용하는 힘의 크기

자기장 내에서 전류가 흐르는 도체에 작용하는 힘은 다음의 왼쪽 그림과 같이 자계의 방향과 전류의 방향이 90° 일 때 최대가 되고, 오른쪽 그림과 같이 자계와 전류의 방향이 동일해서 자계방향과 전류방향의 각이 0° 일 때는 0이 된다. 즉, 작용하는 힘의

크기는 자계와 전류의 방향이 만드는 각의 정현(sine) 함수에 비례한다.



자속밀도 $B[\text{Wb}/\text{m}^2]$ 인 자계 내에서 길이 ℓ 인 도체에 $I[\text{A}]$ 의 전류가 흐를 때 작용하는 힘의 크기는

자계의 방향과 전류의 방향이 수직인 경우에는

$$f = (I \times B) \cdot \ell [\text{N}]$$

자계의 방향과 전류의 방향이 수직이 아니고 $\angle \theta$ 인 경우에는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f = (I \times B) \cdot \ell \sin \theta [\text{N}]$$

힘의 단위가 뉴턴[N]이 되는 이유

자속밀도의 단위는 $[\text{Wb}/\text{m}^2]$ 이고, 자계의 단위는 자계 내에 $1[\text{Wb}]$ 의 점자하를 두었을 때 여기에 얼마만큼의 힘 $[\text{N}]$ 이 작용하는가로 정의한다. 즉, 기자력 $[\text{AT}]$ 의 단위는 그 기자력이 $1[\text{Wb}]$ 의 자극에 할 수 있는 일 $[\text{J}]$ 로 정의한다. 그리고 $1[\text{J}] = 1[\text{N} \cdot \text{m}]$ 이다. 즉

$$[\text{AT}] = \left[\frac{\text{J}}{\text{Wb}} \right] = \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{Wb}} \right]$$

$$[\text{AT}/\text{m}] = \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{Wb}} \cdot \frac{1}{\text{m}} \right] = \left[\frac{\text{N}}{\text{Wb}} \right]$$

윗식에서 $[\text{AT}]$ 는 전류에 코일의 권회수를 곱한 것이므로 전류의 크기가 권회수를 곱한 것 만큼 커졌다는 것을 의미하므로, 그 커진 전류를 기준으로 하면 $[\text{AT}] = [\text{A}]$ 로 써도 된다. 예를들어 $10[\text{Turn}]$ 의 코일에 $5[\text{A}]$ 의 전류가 흐르면 이는 $5[\text{A}] \times 10[\text{Turn}] = 50[\text{AT}]$ 이 되지만, 이는 1턴의 코일에 $50[\text{A}]$ 가 흐르는 것과 같으므로 이를 $50[\text{A}]$ 로 써도 된다는 얘기다.

$$[\text{AT}] = [\text{A}] = \left[\frac{\text{J}}{\text{Wb}} \right] = \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{Wb}} \right]$$

$$[\text{AT}/\text{m}] = [\text{A}/\text{m}] = \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{Wb}} \cdot \frac{1}{\text{m}} \right] = \left[\frac{\text{N}}{\text{Wb}} \right]$$

$$f = (I \times B) \cdot \ell = I[\text{A}] \times B \left[\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \right] \times \ell [\text{m}] = IB\ell \left[\text{A} \times \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \times \text{m} \right] = IB\ell \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \times \frac{\text{Wb}}{\text{m}} \times \text{m} \right]$$

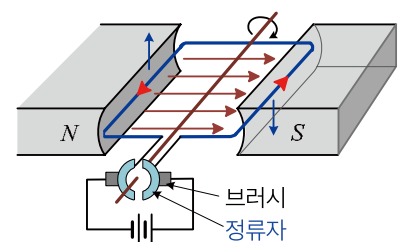
윗식에서 $[\text{A}/\text{m}] = [\text{N}/\text{Wb}]$ 이므로 전자력은 다음과 같이 $[\text{N}]$ 단위가 된다.

$$f = IB\ell \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \times \frac{\text{Wb}}{\text{m}} \times \text{m} \right] = IB\ell \left[\frac{\text{N}}{\text{Wb}} \times \frac{\text{Wb}}{\text{m}} \times \text{m} \right] = IB\ell [\text{N}]$$

직류전동기의 회전원리

직류전동기의 구조는 자극철심, 전기자철심, 계자권선, 전기자권선, 정류자 및 브러쉬로 구성되어 있다.

그림과 같이 Brush에 직류전압을 가하면 그림의 화살표 방향으로 코일에 전류가 흐르게 되어 플래밍의 왼손법칙에 의해 시계방향으로 회전하게 된다. 회전자가 180° 회전한 뒤에는 정류자에 의해서 코일에 가해지는 전압의 극성이 바뀌어 처음의 상태

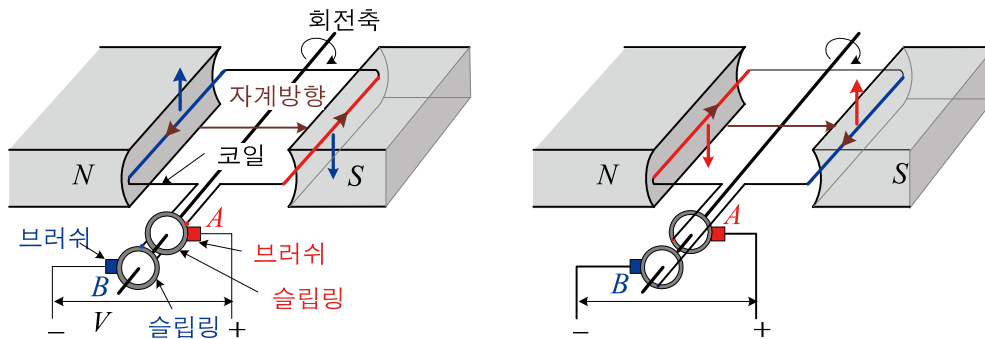


로 되므로, 전기가 권선에 전류가 흐르는 동안에는 계속해서 회전하게 된다. 이때 회전력 (토크)는 $f = IB\ell[N]$ 식에 의해 결정되므로, 식에서 (1) 코일에 흐르는 전류가 클수록, (2) 자계의 세기가 클수록, (3) 코일의 길이가 길수록 (코일의 권회수가 많을수록) 회전력(토크)이 커지는 것을 알 수 있다.

직류전동기에 정류자가 필요한 이유

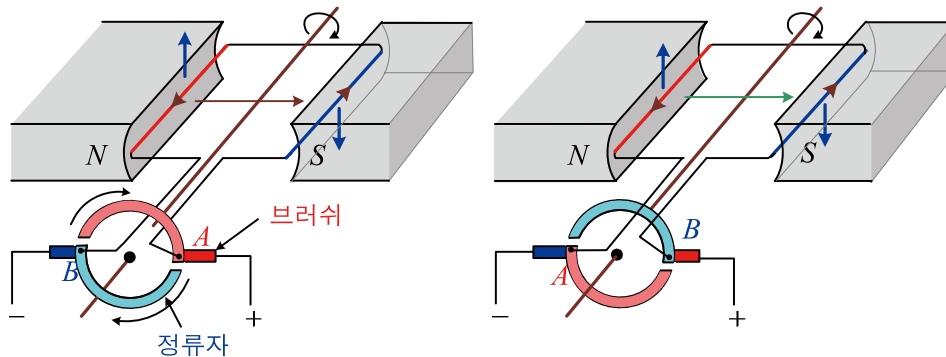
직류발전기는 교류전압을 직류로 변환시키기 위해 전기자에 정류자를 설치하고, 이것에 브러시를 접촉시켜 두면 브러시를 통해 기전력이 나와 직류전압을 얻게 되는데, “직류전동기는 입력이 직류인데 설치된 정류자가 왜 필요합니까?”하는 의문을 가지고 있는 사람들이 많다.

다음 왼쪽 그림은 직류전동기에 정류자를 사용하지 않고 (+) (-) 극을 각각 하나씩의 슬립링에 접속한 것을 보인 것이다. 왼쪽 그림의 상태에서는 플레밍의 왼손법칙에 의해서 전류와 자계의 방향을 보면 힘의 방향은 그림의 파란 화살표 방향으로 작용하여 시계 방향으로 회전하게 되는 것을 알 수 있을 것이다.



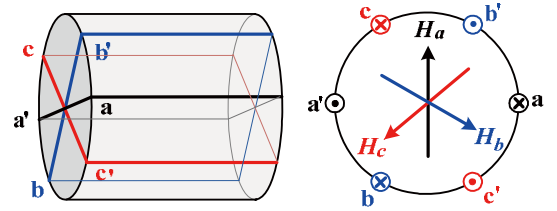
이 코일이 180° 회전하면 코일과 슬립링과 회전축이 함께 180° 회전하니까 180° 회전 후에는 오른쪽 그림과 같이 된다. 어느 경우에도 전류는 그림의 화살표 방향으로 흐르므로 180°를 회전한 후에는 플레밍의 왼손법칙에 따라 코일이 시계방향이나 반시계방향으로 회전하게 된다. 이걸 그냥 두면 전동기는 회전하지 않고 180° 앞으로 돌다가... 다음엔 180° 뒤로 돌다가를 반복할 것이다. 이런 전동기는 당연히 쓸모가 없다.

정류자는 그림과 같이 한 개의 슬립링을 두 개 또는 그 이상의 여러 개로 나누어 그 각각을 절연하고 여기에 각각의 코일을 접속한 것이다. 다음 왼쪽 그림에 플레밍의 왼손법칙을 적용해 보면 그림의 파란 화살표 방향으로 회전하는 힘이 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 180°를 회전한 후에는 전류 극성이 정류자에 의해 바뀌어 처음 상태로 되었기 때문에 오른쪽 그림에서와 같이 시계방향으로 계속해서 도는 힘이 생기게 된다. 즉 직류전동기의 정류자는 전동기가 한 방향으로 계속해서 돌도록 하기 위해서 필요한 것이다.



회전자계

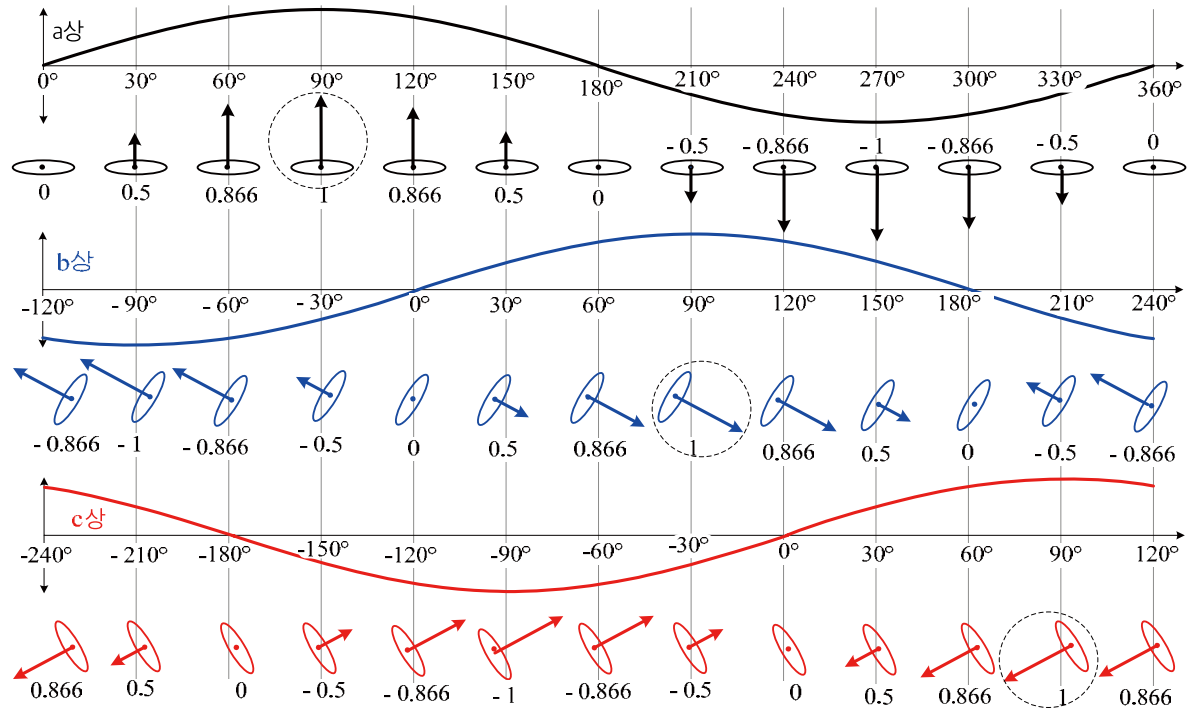
전동기 고정자에 왼쪽 그림과 같이 3상 코일을 감고, 3상 전압을 인가하면 각각의 코일은 오른쪽 그림의 방향으로 자계를 만든다. 그림에서 $\otimes$ 는 전류가 흘러들어 가는 방향이고, $\odot$ 는 전류가 흘러나오는 방향이다.



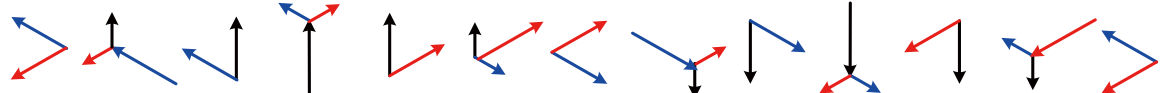
각상 코일이 1턴이고 최대치 1[A]의 전류가 흐를 때, 각도를 30°씩

변화시켜 가면, 전류는 sine 함수에 비례하고, 자계는 전류의 크기에 비례하므로 각각의 각도에서 각상 코일이 만드는 자계의 세기는 다음 그림과 같이 된다.

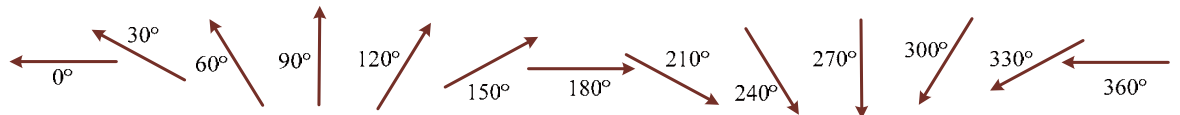
b, c상은 a상보다 120° 및 240° 위상이 뒤지므로 a상이 0°일 때 b상은 -120°, c상은 -240°가 되고, 코일이 물리적으로 120°씩 위상차가 있기 때문에 각상 코일에서 만드는 자계는 각도 변화에 따라 그림의 방향으로 다음과 같이 변해간다. 그림에서 점선 원은 각상에 (+)방향으로 최대전류가 흐를 때의 자계를 표시한다.



a상 기준으로 0°에서 360°까지 각각의 각도에서 만들어지는 각상 자계를 평행이동시켜 모으면 다음과 같다.

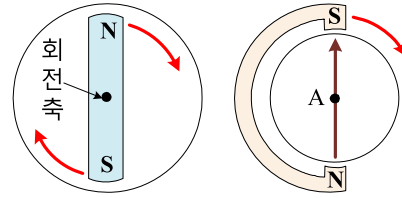


a상 기준으로 0°에서 360°까지 30°간격으로 각상 자계를 벡터 합성하면 다음과 같다.



위 그림에서, 합성자계의 방향은 코일에 흐르는 전류의 위상각 변화에 따라 회전하는 것을 볼 수 있다. 즉, 0°에서 왼쪽을 향하던 벡터가 30°에서는 시계방향으로 30° 회전했고, 60°에서는 60° 회전했고... 360°가 되면 360° 회전해서 처음 0°의 위치로 오게 되는 데 이것이 **회전자계가 만들어지는 원리**이다.

결국 회전자계는 왼쪽 그림과 같이 막대자석이 회전축을 중심으로 1 사이클에 한 바퀴씩 회전하는 것과 같다. 또는 오른쪽 그림과 같이 말굽자석이 A점을 중심으로 회전하는 것과 같다. 이와 같이 회전하는 자계를 **회전자계**라고 한다. 교류전동기가 회전하는 원리는 모두 이 **회전자계**에 의한 것이다.

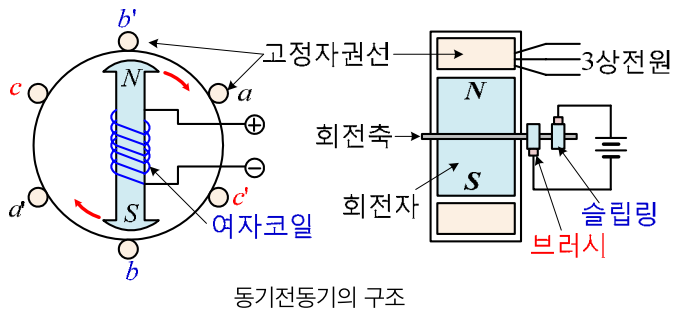


정지된 코일에 3상 정현파 전류가 흐르면, 이와 같이 회전하는 **회전자계**가 형성된

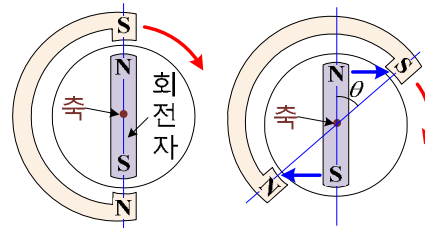
다는 것은 참으로 신기한 일이다. 회전자계는 3상 코일과 3상 전원에서만 생기고, 단상 코일과 단상 전원에서는 회전자계가 형성되지 않는다. 단상 코일에 단상전원이 인가되면 좌우로 극성이 바뀌는 **교번자계**가 형성된다.

동기전동기의 구조와 회전원리

동기전동기는 그림과 같이 3상 코일이 감겨진 **고정자**, 여자코일에 의해서 형성된 자극 N·S로 구성된 **회전자**, 여자코일에 직류전압을 가해주기 위한 **슬립링**과 **브러시** 등으로 구성되어 있다. 극히 소용량 동기전동기는 회전자에 영구자석을 사용하는 경우도 있으나, 대부분의 동기전동기는 **전자석**을 회전자로 사용한다.



동기전동기의 구조



동기전동기의 회전원리

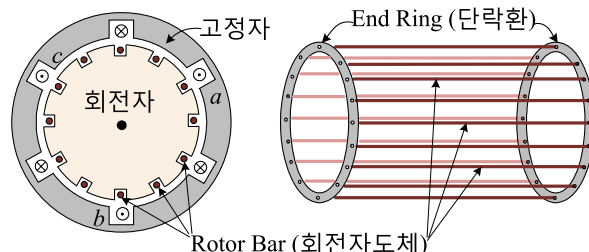
회전자계의 N·S극과 회전자의 N·S극이 일직선으로 되어있는 상태에서는 회전자에 회전력(토크)이 발생하지 않으나, 회전자계의 N·S극과 회전자의 N·S극이 그림과 같이 $\angle \theta$ 의 각을 이루면 회전자계의 S극이 회전자의 N극을 잡아당기고 회전자계의 N극은 회전자의 S극을 잡아당겨서 회전자에 회전력이 생겨 회전한다.

동기전동기는 항상 동기속도로 회전한다.

동기속도란 전동기 회전자 주파수 1 [Cycle]에 전기각으로 360° 회전하는 것을 말한다. 주파수가 60[Hz]인 경우 2극기는 기계적으로 한 바퀴 돌 때 전기각으로도 360° 이므로 60[rps: Revolution Per Second]가 되고, 4극기는 기계적으로 한 바퀴 돌 때 전기각으로는 720° 이므로 30[rps] (=1800 [rpm])로 회전하는 것을 말한다.

3상 유도전동기의 구조

유도 전동기에는 농형 유도전동기와 권선형 유도전동기가 있다. 농형 유도전동기는 그림과 같이 고정자 철심, 고정자 권선, 회전자 철심, 회전자 도체 및 회전자 도체를 단락시키기 위한 단락환 등으로 구성되어 있다. 권선형 유도전동기는 회전자 도체 대신에 철심에 코일을 권선한 것이다.



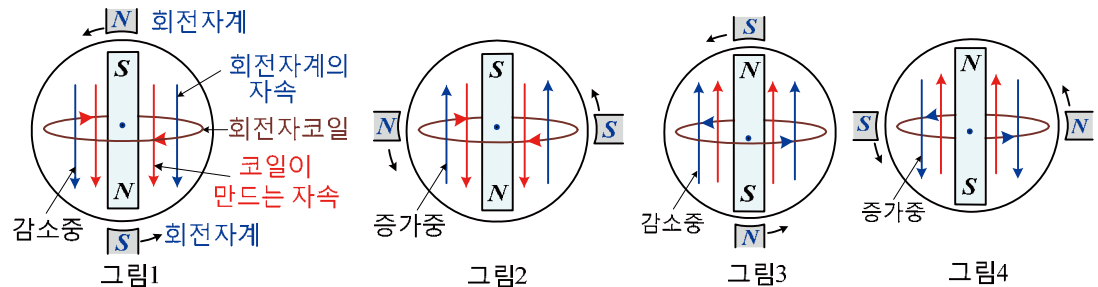
고정자 권선에 3상 전압을 인가하면 회전자계가 형성되고, 회전자속이 2차 도체와 쇠교하여 Rotor Bar에 전압이 유기된다. 이 전압에 의해 단락환을 통해서 전류가 흐르고 이 전류와 회전자계에 의해서 플레밍의 왼손법칙에 따른 방향으로 회전하게 된다.

3상 유도전동기의 회전원리

질량을 가진 물체는 관성의 법칙에 의해서 그 속도를 영원히 그대로 유지하려고 한다. 코일의 인덕턴스도 이와 같아서 자신을 관통하는 자속이 영원히 그대로 변치 않기를 원한다. 만일 코일을 관통하는 자속에 변화가 생기면, 코일은 패러데이 전자기유도법칙에 의한 역기전력을 발생시켜 전류를 흐르게 해서 그 전류가 만드는 자속이 변화하는 자속의 반대방향으로 자속을 만들어서 자신을 관통하는 자속의 변화를 억제하려고 한다.

다음 [그림 1]에서 회전자계가 왼쪽으로 회전하면 코일을 위에서 아래로 관통하던 자속이 감소하므로 코일은 자속의 감소를 억제하기 위해서 그림의 화살표 방향으로 전류가 흘러서 그림과 같은 가상의 자극을 형성한다. 이때 회전자계의 N극과 S극은 회전하면서 가상의 자석 S극과 N극을 끌어서 가상의 자석, 즉 코일에 회전력이 생긴다.

회전자계가 90° 회전해서 [그림 2]의 위치에 오면 이번에는 아래서 위로 관통하는 자속이 증가하게 되어 코일에는 그림의 화살표 방향으로 전류가 흘러서 가상의 자극을 형성한다. 이때 회전자계의 자극 N·S는 가상의 자극 S·N을 끌고 민다.



회전자계가 180° 회전해서 [그림 3]의 위치에 오면 이번에는 아래서 위로 관통하는 자속이 감소하게 되므로 이를 보상하기 위해서 코일에는 그림의 화살표 방향으로 전류가 흘러서 가상의 자극을 형성한다.

회전자계가 270° 회전해서 [그림 4]의 위치에 오면 이번에는 위에서 아래로 관통하는 자속이 증가하므로 코일은 자속의 증가를 억제하기 위해서 그림의 화살표 방향으로 전류가 흘러서 그림과 같은 가상의 자극을 형성한다. 회전자계가 360° 회전하면 다시 [그림 1]의 위치로 와서 같은 사이클을 반복한다.

만일 회전자계의 회전속도와 코일의 회전속도가 같다면, 즉 코일도 동기속도로 회전한다면 코일과 회전자계의 상대적인 위치에 변함이 없으니까 코일을 관통하는 자속에 변화가 없고, 따라서 코일에 전압이 유기되지 않아서 전류가 흐르지 않으므로 토크는 발생하지 않는다. 이런 이유로 유도전동기는, 동기 전동기처럼 동기속도로 회전하지 못하고, 동기속도보다는 약간 낮은 속도로 회전한다. 