유도전동기의 기본개념

2007.08.08

작성자: 이종수

목 차

1 유도전동기의 개요 1

2 유도전동기의 원리 1

2.1 기자력 보존법칙의 이해 1
2.2 아라고 원판 5
2.3 유도전동기의 회전원리 7

3 유도전동기의 기본개념 이해 7

3.1 유도전동기의 구조적인 개념 7
3.2 유도기전력의 이해 10
3.3 유도전동기의 권선방법 이해 15

4 유도전동기의 특성 이해 27

4.1 슬립의 개념 (Slip) 27
4.2 고정자 및 회전자 전류에 의한 회전자속의 관계이해 28
4.3 유도전동기의 등가회로 이해 29
4.4 기동전류의 이해 34
4.5 입력과 출력에 대한 이해 36
4.6 역학적인 개념들의 이해 39
4.6.1 관성모멘트 (Moment of Inertia) 39
4.6.2 회전체가 가진 운동에너지 45
4.7 속도-토크 특성곡선의 이해 46
4.8 NEMA의 속도-토크 특성이해 51
4.8.1 NEMA의 Type별 속도-토크특성 51
4.8.2 NEMA의 각 Type별 특성 53
4.9 권선형 유도전동기의 개념이해 55
4.9.1 권선형 유도전동기의 구조 55
4.9.2 비례추이와 속도-토크 특성곡선 56

5 유도전동기의 기동방법 58
5.1 직입기동 58
5.2 단권변압기 기동 59
5.3 Y-D 기동 60
5.4 직렬 임피던스 기동 60
5.4 정지형 기동 (Soft Start) 61

1 유도전동기의 개요

산업현장에서는 펌프, 컴프레서, Blower등 다양한 종류의 설비들이 운전되고 있으며 이들을 구동하는 동력원으로써 가장 많이 사용되는 것이 유도전동기이다.

유도전동기는 구조가 간단하고 매우 튼튼하며 다른 모터들에 비에 가격도 상대적으로 저렴하기 때문에 거의 모든 부하에 무난하게 적용되는 장점을 가지고 있기에 유도전동기를 일컬어 산업현장의 총아 (寵兒)라고 부른다.

이와 같은 사유로 유도전동기의 개념을 이해하는 것은 유도전동기의 운용을 위해 무척 중요한 사항이라고 생각하며, 여기서는 필자가 현장에서 알아 두면 무척 유용할 것이라고 생각한 기본 개념들을 위주로 설명하고자 한다.

또한 유도전동기의 기본 원리들은 동기전동기와 같은 타 교류기기에 확장적용이 가능하기 때문에 잘 이해해 두어야 한다고 생각한다.

여기서는 주로 3상 유도전동기의 원리 및 구조, 선정방법과 현업에서 활용할 수 있는 사항들을 위주로 기술하고자 한다.

2 유도전동기의 원리

전기로 구동되는 모든 회전기기는 그 원리가 플레밍의 왼손법칙을 따르도록 회전방향이 결정되며, 이렇게 하기 위해서는 반드시 자기장을 만들어 주는 자석과 이 자기장에서 자유롭게 회전할 수 있는 전류를 흘려주는 도체로 구성되어 있어야 한다.

우리가 잘 알고 있는 직류전동기와 동기전동기를 보면 자기장을 만들어 주는 전자석과 (또는 영구자석) 코일로 구성되어 있음을 알 수 있다.

따라서 직류전동기와 동기전동기는 전자석을 만들기 위한 계자전류 공급설비와 전류를 흘려주기 위한 주 전원공급설비를 반드시 갖추고 있어야 한다.

그런데 유도전동기를 보면 달랑 3상 전원만을 공급하면 전동기가 회전한다.

그렇다면 유도전동기는 자기장을 만들기 위한 자석이 필요하지 않은 것인가?

절대 그렇지 않고 반드시 자기장이 필요하며, 이때 자기장을 만드는 자석전류를 주 전원에서 유도하여 자기장을 만들기 때문에 유도전동기라 하는 것이다.

이와 같이 별도로 자기장을 만들기 위한 계자전류 공급설비가 필요한 타 전동기에 비해 유도전동기는 구조가 무척 간단하며 견고하고 Control이 무척 간단하여 산업현장에서 그야말로 부하의 종류를 막론하고 막 쓸 수 있는 것이다.

2.1 기자력 보존법칙의 이해

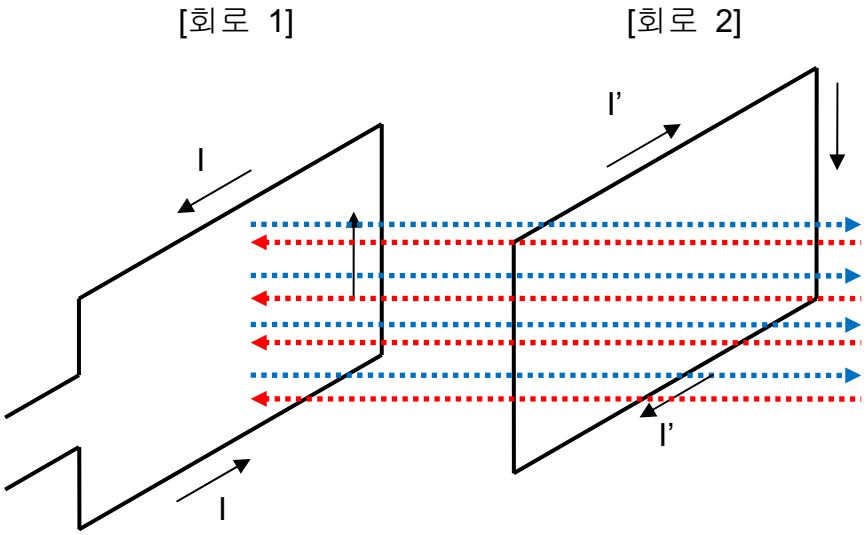
자기장과 자기장의 관계 및 자기장과 전류와의 관계를 포함한 자기회로의 기본 개념을 잘 이해하기 위해서는 기자력의 보존법칙에 대한 이해가 필수적이다.

이 원리는 갑작스런 것이 아니며 우리가 잘 알고 있는 통상의 보존원리들과 같은 개념에서 출발하게 된다.

간단하게 설명하면 자기장이 전류가 흐를 수 있는 도체 또는 전류가 흐르는 도체의 주위에서 변하면 이 자기장의 변화에 의해 주변 도체에 유도되는 전류는 자기장의 변화를 반대하는 방향으로 유도된다는 것이다.

이해를 돕기 위해 그림으로 설명해 본다.

하지만 어떤 물리현상을 말로써 잘 표현할 줄 알아야 하는 것도 기술자들한테는 무척 중요하게 요구되는 역량이라는 점을 잊지 않기 바란다.



위의 그림에서 두 회로는 전류가 없는 상태에서 회로1에 화살표 방향으로 전류I를 흘려주면 암페어의 법칙에 의해 회로2쪽으로 파란색의 자기장이 형성된다.

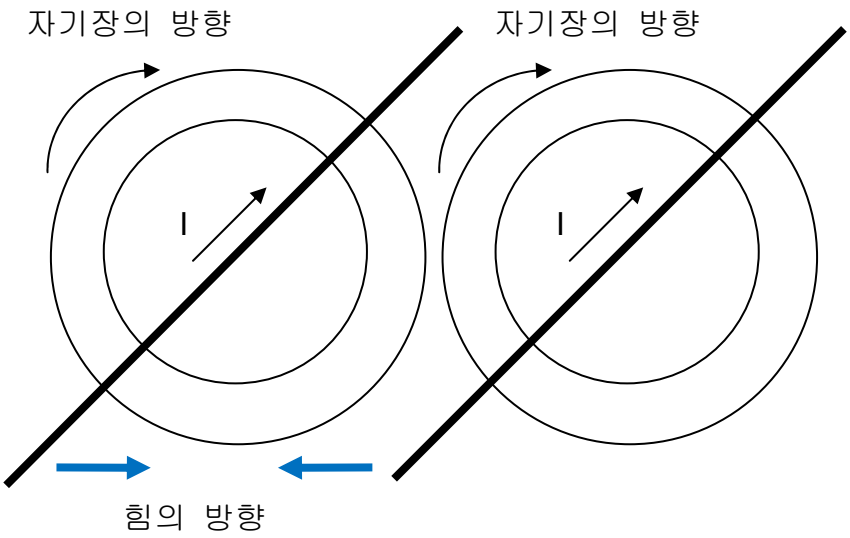
그런데 회로2는 자기장이 없는 상태였기 때문에 그 상태를 유지하기 위해 회로1에 의해 발생된 파란색 자기장을 상쇄시키려는 방향으로 빨강색 자기장을 만들도록 전류I'를 유도한다.

이와 같이 본래 자신이 가지고 있었던 기자력의 상태를 유지하고자 하는 성질을 기자력 보존법칙이라고 이해하면 된다.

모든 자연현상은 외부에서 어떤 작용이 들어오면 그 작용에 대하여 변화를 원래의 상태를 유지하려고 하는 방향으로 반작용이 생기게 되는데 이를 관성이라고 하는데 기자력 보존법칙도 이 관성의 하나라고 생각할 수 있다.

또한 전자유도작용을 설명하는 렌쯔의 법칙을 보면 미분의 앞에 (-) 부호가 붙어 있는 것도 외부에서 들어온 자기장의 변화에 대하여 원래의 상태를 유지하고자 하는 유도회로의 관성을 의미하는 것이다.

모든 전자기 회로는 이와 같은 기자력 보존법칙의 원리하에 설계되고 해석되는 구조이기 때문에 몇 가지의 예를 더 들어 기자력 보존법칙의 편리함을 설명하도록 한다.



[같은 방향의 전류를 가진 도체간에 발생하는 힘]

위의 그림과 같이 같은 방향으로 전류가 흐르는 도체가 인접하고 있을 경우 도체 사이에는 전류의 증가에 따라 자기장의 상쇄작용이 더욱 커져서 두 도체 사이의 공간에는 자기장이 약해지게 될 것이다.

이렇게 되면 원래의 자기장의 세기가 유지될 수 있도록 두 도체의 간격이 좁아져야 함을 알 수 있는데, 이와 같은 원리에 의해 두 도체가 서로 가까워지려고 하는 방향으로 힘이 발생하게 된다.

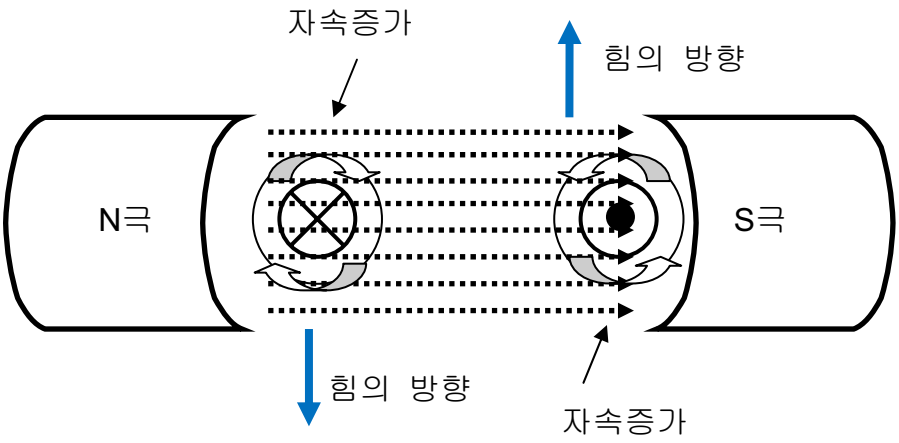
즉 서로 같은 방향의 전류가 흐르는 인접한 도체 사이에는 당기는 힘이 발생하고 있음을 알 수 있다.

만약 반대 방향의 전류라면 두 도체간에는 반발력이 발생할 것이다.

이와 같은 현상은 송전선로에 적용되는 복도체에서 나타나게 되는데 어느 한상의 복도체를 구성하는 여러 가닥의 소도체 간에는 서로 당기는 힘이 발생되며 단락고장과 같은 대 전류가 흐르게 되면 더욱 큰 흡인력이 발생되어 소도체들이 부딪치면서 표면이 손상될 수 있는데 이를 방지하기 위해 적당한 간격으로 스페이서를 설치하는 것이 필요하다.

통상 154KV 송전선은 2가닥의 소도체를, 345KV는 4가닥의 소도체를, 765KV는 6가닥의 소도체를 사용하여 한상의 복도체를 구성한다고 하는데 송전선을 살펴보면 일정한 간격으로 스페이서가 설치되어 있는 것을 확인할 수 있다.

이번에는 플레밍의 왼손법칙이 적용되는 모터에 기자력의 보존법칙이 어떻게 설명될 수 있는지 알아본다.



[모터의 권선에 전류가 흐를 때 발생되는 힘의 방향]

위 그림을 보면 모터의 권선에 전류가 흐르면 전류가 들어가는 도체의 윗부분에서는 주자속과 전류에 의한 자속이 합해져서 자속이 증가되고 아랫부분에서는 이와 반대로 될 것이다.

따라서 최초에 가지고 있던 기자력의 크기를 유지하려는 방향으로 도체에 힘이 작용하며 방향은 그림의 파란색 화살표와 같다.

우리에게 익숙한 플레밍의 왼손법칙에 의한 방향과 비교해 보기 바란다.

아울러 혼돈을 방지하기 위해 자기장안에서 전류가 흐르는 도체에 작용하는 힘은 자기장이 촘촘한 곳에서 자기장이 드문 곳으로 향한다는 것을 알아두면 편리하다.

발전기의 유도기전력 발생방향, 변압기의 자속 발생방향에도 기자력 보존법칙이 적용되는데 이는 독자들이 직접 그림으로 그려서 이해해 보기 바란다.

맨 처음에 그림을 그려서 이해를 하려다 보면 방향이 무척 혼돈되는 경우가 있는데 차근차근 생각하면 어려움 없이 알게 될 것으로 생각한다.

아울러, 개념을 정립할 때 많은 고민을 해 보는 것이 무척 중요하다고 생각하며 이렇게 자신이 직접 고민을 통해 습득한 개념은 항상 자신만의 것으로 남아있게 되고 이를 확장하여 많은 사항들을 쉽게 이해할 수 있다.

2.2 아라고 원판

유도전동기에 관련된 책자의 맨 첫머리에 소개되는 것이 바로 아라고 원판의 원리라고 생각한다.

1820년대에 유럽의 과학자 아라고라는 사람이 자유로이 회전할 수 있는 원판을 만들고 이 원판과 아주 작은 틈을 갖도록 자석을 바짝 붙여서 자석을 돌렸더니 신기하게도 원판이 같은 방향으로 따라 도는 것을 발견한 것이다.

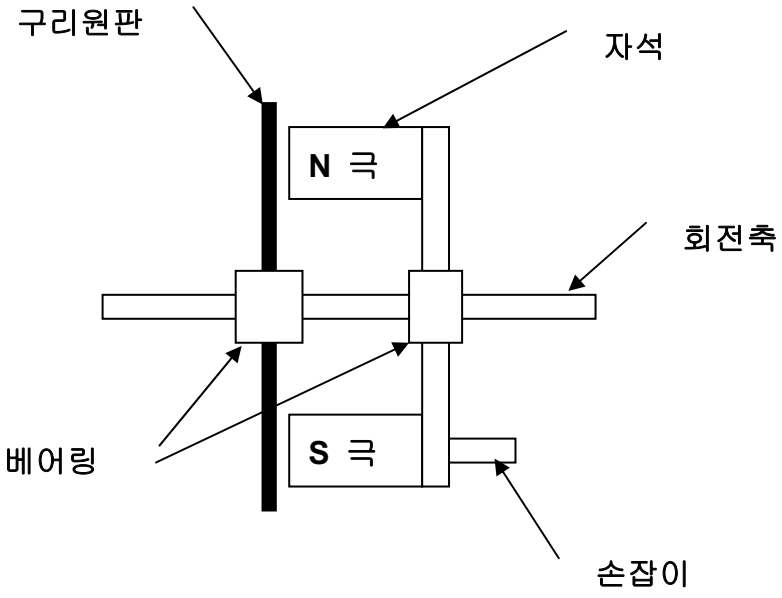
이것이 유도전동기의 원리가 발견되는 중요한 실험이 된 것인데 아라고라고 하는 과학자는 분명 호기심이 남달랐던 것으로 생각된다.

아라고 원판의 원리는 통상 다음과 같이 설명되어 있다.

"자석을 돌리면 원판이 자속을 끊으므로 원판의 표면에 와전류가 발생되고 이 와전류와 자석간에 힘이 작용하여 원판이 자석과 같은 방향으로 회전한다."

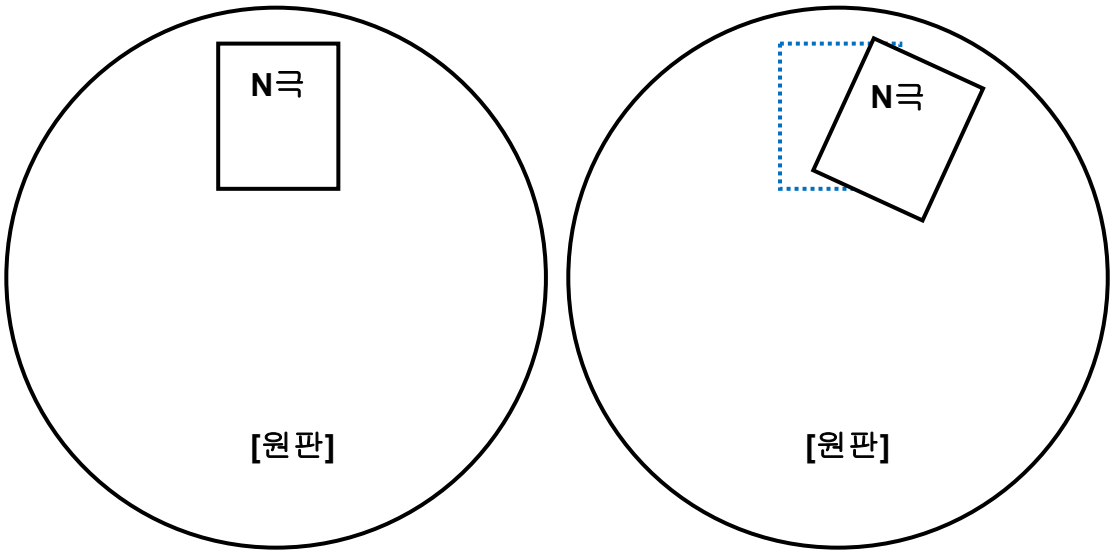
적절한 설명이지만 읽어보기에 따라서는 언뜻 이해하기에 쉽지 않은 것도 사실이다.

해서 이를 앞에서 설명한 기자력 보존법칙으로 설명해 보도록 한다.



[아라고 원판의 개념도]

위의 그림이 아라고 원판의 개념도라고 생각된다.



[기자력 보존법칙에 의한 아라고 원판원리 설명개념]

위 그림에서 자석을 시계방향으로 돌린다면 [위치1]에서 자석 바로 아래의 영역에서는 자석의 면적에 해당하는 부분에 자속이 통과하고 있으며 시계방향으로 자석을 돌려 [위치2]로 가면 [위치1] 바로 아래 부분의 자속이 감소하게 된다.

[위치2]의 점선부분은 원래 [위치1]에서 자석의 면적에 해당하는 자속을 가지고 있었지만 자석이 면적을 벗어났기 때문에 본래의 자속보다 작은 량의 자속을 가지게 되는 것이다.

이렇게 되면 원래 가지고 있던 자속을 유지하려고 자석이 회전하는 방향으로 원판이 따라 돌면서 자속을 회복하려고 하는 것이다.

이것이 바로 기자력 보존법칙을 아라고 원판의 회전원리에 적용한 설명이다.

필자의 필력이 부족하여 설명이 투박하지만 어느 정도 이해를 도왔을 것으로 생각하며 잘 읽어보고 더 좋은 설명방법을 고안하면 더욱 좋을 것이다.

이러한 아라고의 원판을 이용하여 실제로 유도전동기를 만든 사람은 테슬러라고 하는데 테슬러에 대해서는 전기쟁이라면 한번쯤 관심을 갖는 것이 좋다.

테슬러는 우리가 잘 알고 있는 에디슨의 견제로 인해 크게 빛을 보지는 못한 불우한 천재로 알려져 있으며 최근 재 평가를 받고 있다고 한다.

2.3 유도전동기의 회전원리

앞에서 설명한 내용을 토대로 살펴보면 모터가 회전하기 위해서는 반드시 자기장을 만들 수 있는 자석과 이 자기장에서 자유롭게 회전할 수 있는 구조를 가진 전류가 흐르는 도체가 있어야 함을 알 수 있었다.

아울러, 별도의 자석이 없더라도 아라고 원판 원리에 의해서 회전하는 자석과 자유로이 회전할 수 있는 도체가 있는 경우에도 가능함을 알았다.

이렇게 별도의 자석이 없이 회전하는 자석에 의해 원판의 표면에 와전류가 유도되고 이 와전류와 회전하는 자석과의 작용력으로 원판이 자석을 따라 회전하는 원리를 이용한다는 의미에서 유도전동기라는 이름이 생겼음도 알았다.

그렇다면 이제 회전하는 자석을 만들어야 하는데 실제 기계적으로 회전하는 자석을 만들어서 이를 돌리면서 유도작용에 의해서 도체가 뒤따라 회전하는 모터를 만든다는 것은 차라리 별도의 자석을 만드는 것보다도 복잡하게 될 것이다.

하지만 테슬러의 공헌으로 다상교류를 일정한 전기각 간격으로 원주상에 배치하여 전류를 흘려주면 회전자계가 생긴다는 것을 알아냈으며, 3상 전원을 이용하여 3상 유도전동기로 구현해 냈다.

3상 교류에 의한 회전자계의 발생개념은 필자가 작성해 놓은 해당 자료를 참고하면 될 것이며 여기서는 생략한다.

3 유도전동기의 기본개념 이해

유도전동기의 특성을 전부 설명하는 것은 필자에게는 불가능한 일이며, 주로 현업을 수행하면서 알고 있으면 편리한 사항을 위주로 기술하고자 한다.

여기서 인용되는 그림들은 출판되어 판매된 기존 기술서적 및 제작사의 카탈로그에서 발췌할 것이며 인용자료의 출처는 밝히도록 한다.

본 교재에서 주로 인용되는 그림은 Hubert가 저자인 서적을 활용할 예정임을 밝히며, 이는 필자가 참고한 책 중에서 개념적인 이해를 도와줄 수 있는 그림을 많이 포함하고 있기 때문이다.

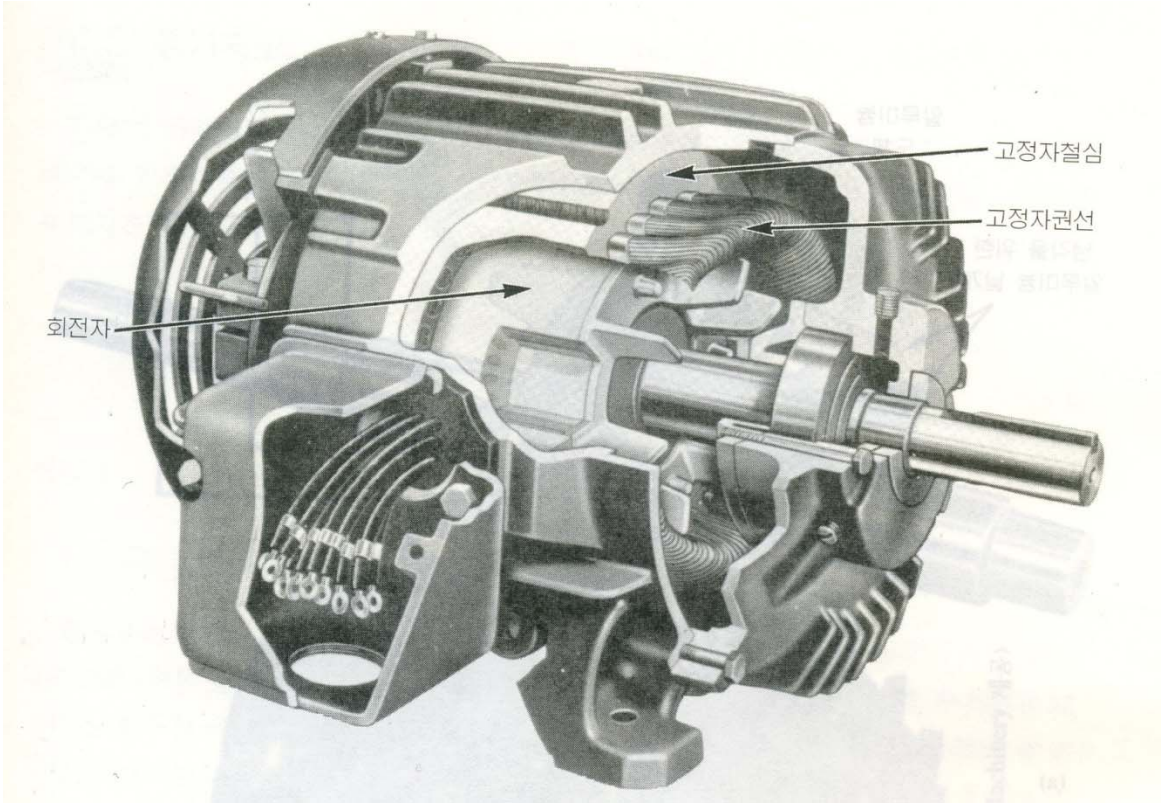
3.1 유도전동기의 구조적인 개념

유도전동기의 고정자 원주둘레에 일정한 전기각으로 분리된 3상 교류전류를 인가하면 동기속도로 회전하는 회전자계가 형성된다.

여기서 동기속도라고 하는 것은 극과 주파수로 결정되는 동기속도이며 회전자계의 회전속도 및 발생개념, 크기에 관한 사항은 필자가 작성해서 공유해 놓은 관련자료를 참고하기 바란다.

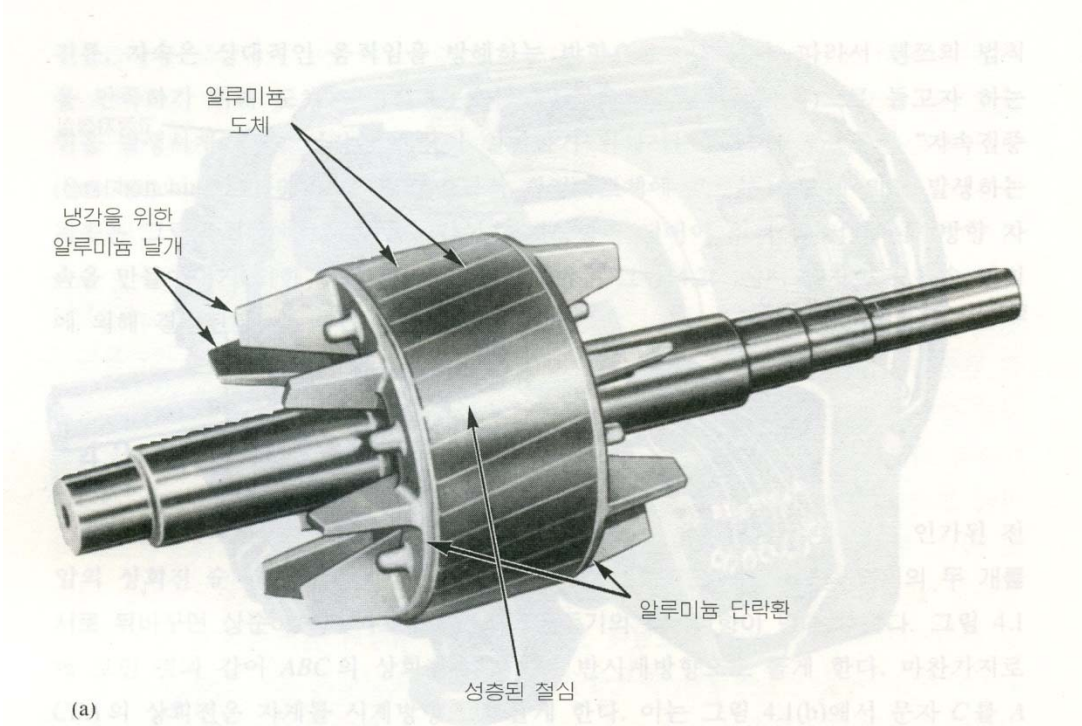
유도전동기는 고정자와 회전자로 크게 구성되며 고정자는 철심에 권선을 삽입한 구조이며 회전자는 철심에 권선을 삽입한 권선형과 철심에 단락봉을 삽입한 농형으로 구분된다.

회전자의 구조는 유도전동기의 특성을 결정하는데 매우 중요하기 때문에 뒤에서 좀더 상세하게 알아보도록 한다.



[유도전동기의 내부 구조 개념 도]

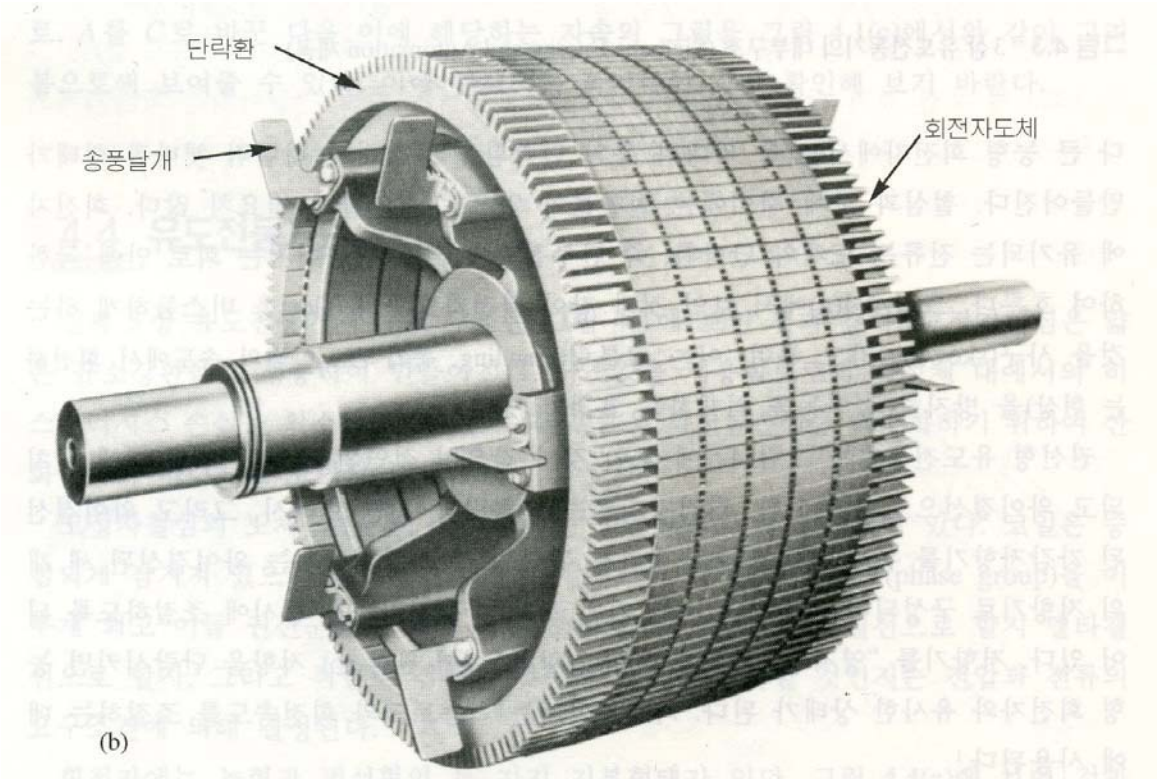
앞의 그림은 유도전동기를 내부가 보일 수 있도록 해 놓은 것인데 설명한 바와 같이 고정자와 회전자로 구성되어 있는데 알루미늄으로 주조된 구조이다.



앞의 그림은 내부구조를 보여주는 회전자와 동일한 구조를 갖는데 이는 회전자 철심에 슬롯을 내고 단락환 및 단락봉 및 냉각을 위한 통풍 팬을 하나의 몸체로 구성할 수 있도록 알루미늄으로 주조한 (Die-casted) 것으로써 주로 소형의 유도전동기에 주로 사용된다.

회전자에서 발생된 열을 원활하게 방산할 수 있는 구조는 아니며 표면의 열이 잘 발산될 수 있도록 냉각 팬이 큼을 알 수 있다.

또한 그림을 잘 보면 도체가 약간 경사를 이루면서 회전자의 슬롯에 삽입되어 있는 것을 알 수 있는데 이를 경사슬롯 (Skewed Slot)이라고 하며 이는 공극에 발생될 수 있는 고조파에 의해 전동기의 토크가 왜곡되는 현상을 방지하기 위해 설치하는 것이며 이에 대해서는 뒤에서 한번 더 설명하도록 한다.

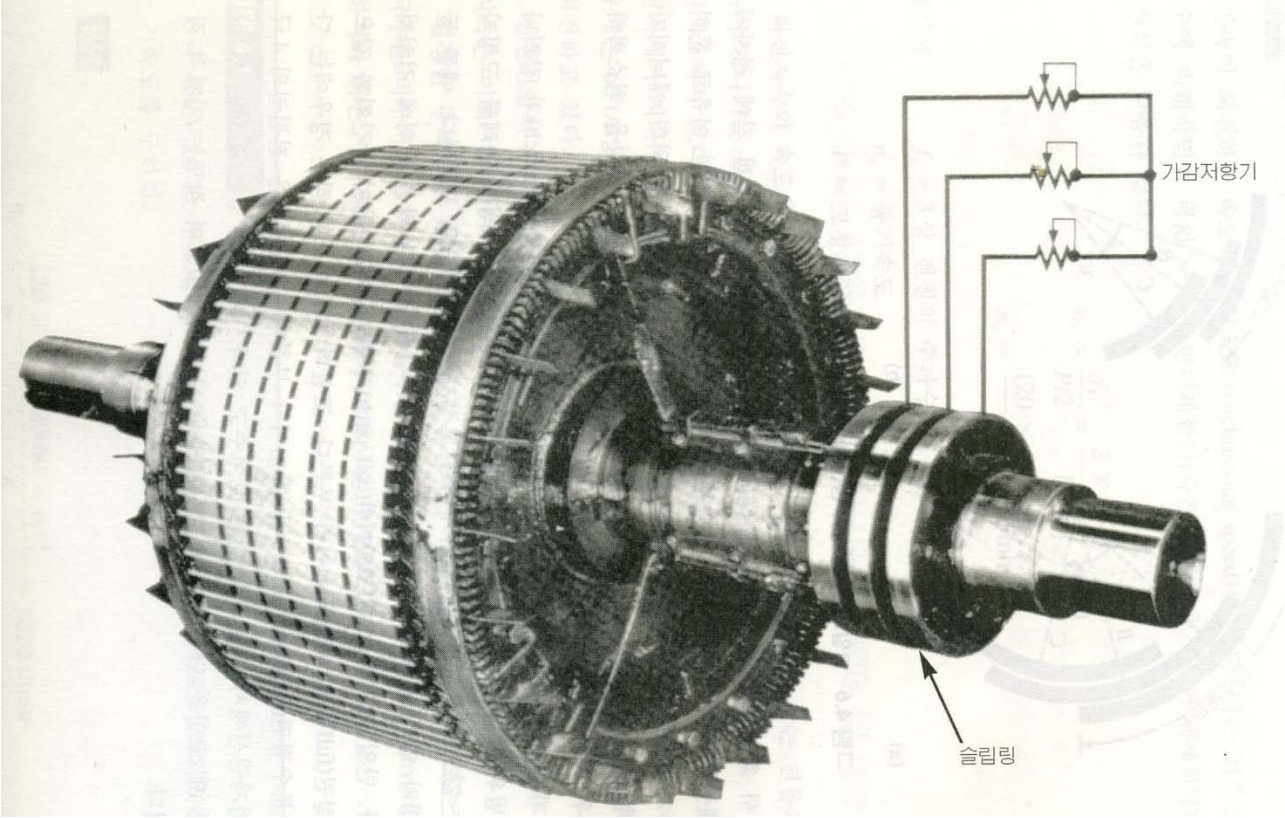


[농형 회전자의 구조]

앞의 그림은 철심에 구리재질의 단락봉을 넣고 양단에 단락환을 설치한 것으로써 주로 대용량에 적용된다.

회전자에서 발생된 열을 잘 발산할 수 있도록 슬롯에 통풍용 Louver가 설치되어 있음을 알 수 있으며 공기도 회전자의 내부에서 유입하여 통풍용 Louver를 통해 순환하면서 냉각을 돕고 있음을 알 수 있다.

회전자의 구조에 따른 토크와 특성에 대해서는 뒤에서 좀 더 상세히 알아보도록 한다.



[권선형 회전자의 구조]

앞의 그림은 권선형 회전자를 보여주는 것으로써 고정자와 동일한 구조로 권선을 설치하고 단락환 대신 슬립링과 브러시를 이용하여 밖으로 인출하고 여기에 각 상에 가감저항을 설치하여 회전자의 저항을 변화시킴으로써 기동전류를 억제함과 동시에 기동토크를 크게 하기 위하여 사용된다.

회전자의 저항을 통상 2차 저항이라고 부르는데 유도전동기의 독특한 특징인 비례추이를 이용할 수 있도록 2차 저항을 가감할 수 있도록 한 구조이다.

그림을 보면 외부에 가감저항이 접속되어 있음을 알 수 있으며 2차 저항을 가감하여 토크를 변화시키는 개념은 뒤에 다시 설명하도록 한다.

3.2 유도기전력의 이해

유도기전력에 대하여 이해하기 위해서는 일정한 자기장 안에서 운동하는 도체에 유기되는 기전력의 개념을 이해하여야 한다.

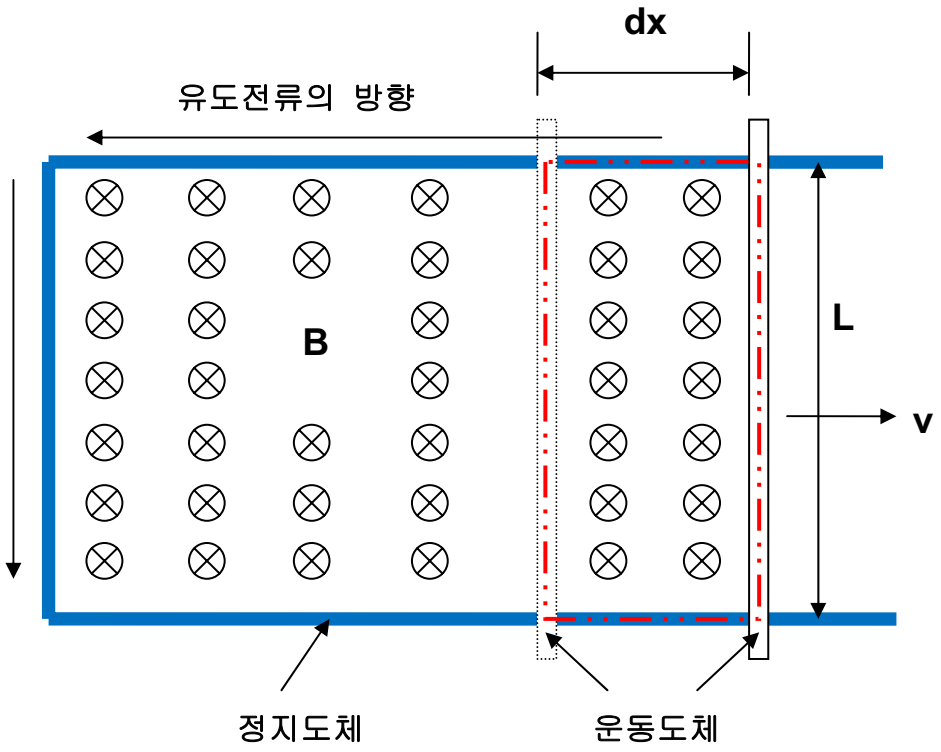
우리는 이미 시간적으로 변화하는 (즉 자속의 시간적인 변화) 자기장 안에 있는 도체에는 기전력이 유기된다는 패러데이의 법칙을 알 고 있다.

시간적으로 변화하는 자기장이란 일정한 자기장에서 도체가 운동하는 경우, 시간적으로 변화하는 자기장안에 도체가 정지되어 있는 경우 및 두 가지 경우가 동시에 발생하는 경우이다.

하지만 자속도 변하고 도체도 운동하게 되면 그 해석이 복잡하고 실용적이지도 못하다고 하며 앞의 두 가지 경우가 전기기계에 응용된다.

일정한 자기장에서 도체가 운동할 때 발생되는 기전력을 발전기 기전력이라고 하고 시간적으로 변화하는 자기장안의 도체에 발생되는 기전력을 변압기 기전력이라고 하며, 여기서는 발전기 기전전력의 개념만을 설명한다.

통상 발전기기전력을 설명할 때 사용되는 다음 그림을 이해하는 것으로 설명을 시작한다.



[일정한 자기장안에서 운동하는 도체]

각 기호의 물리 량

B [Wb/m^2]: 자속밀도 (지면으로 들어가는 방향)

L [m]: 운동도체의 유효길이

dx [m]: 운동도체의 미소 이동거리

v [m/sec]: 운동도체의 속도

자속밀도가 일정하기 때문에 dx만큼 도체가 이동하면 위 그림의 빨간색 4각형 내부에서 자속의 미소증가분은 dx와 도체의 길이 L을 곱한 것이 된다.

이때 자속의 변화 분을 시간의 변화 분으로 나눈 것 (즉 미분한 것)이 패러데이 법칙에 의한 유도 기전력이 될 것이다.

$$E = \frac{d\phi}{dt}\ [V]\ = \frac{d(BLdx)}{dt}$$

$$= BL\frac{dx}{dt} = BLv\ [V]$$

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 일정한 자기장안에서 운동하는 도체에 발생되는 유도 기전력은 자속밀도와 운동도체의 유효길이 및 운동도체 속도의 곱으로 결정된다는 것이다.

또한 유도 기전력의 방향은 기자력 보존법칙에 따라 앞의 그림에서 전류의 방향을 만족시키도록 유기된다.

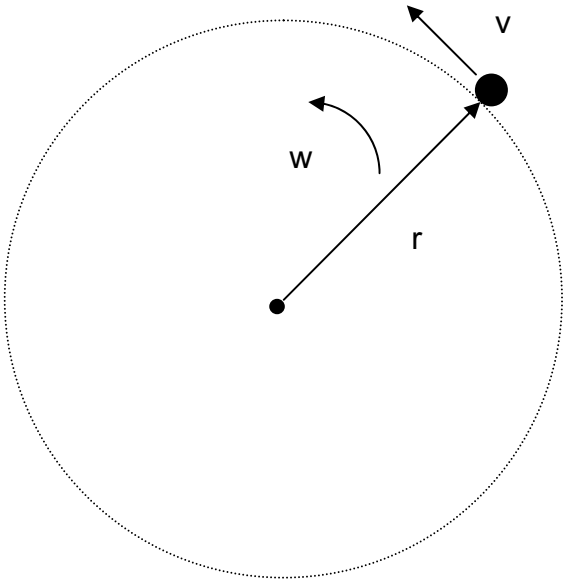
즉, 도체가 오른쪽으로 이동하면 도체로 구성된 사각형에 더 많은 자속이 포함되므로 이를 방해하여 원래의 자속을 유지하고자 하는 방향으로 상쇄자속을 만들어 내는 전류의 방향을 취한다는 것이다.

이제는 앞의 설명을 바탕으로 유도전동기의 회전자의 도체에 발생되는 유도기전력에 대하여 알아본다.

[유도전동기의 기전력 발생개념]

위 그림과 같이 고정되어 있는 회전자의 도체에 대하여 일정한 간격을 유지하면서 자석이 회전할 때 (이는 회전자계를 이해하기 쉽도록 회전하는 자석의 개념으로 한 것임.) 회전자 도체에 발생되는 유도기전력의 크기를 알아본다.

이를 위해서는 원운동에 대한 약간의 개념을 필요로 하는데 다음과 같은 것들이다.



r: 반지름
v: 주변속도
w: 각속도

[원 운동을 하는 물체의 개념도]

위 그림에서 다음과 같은 식이 성립한다.

$$v = wr$$
$$w = 2\pi f$$

앞의 식에서 f는 물론 주파수이며 [Hz]의 단위를 갖는 것이다.

이제 이 관계식을 사용하여 전동기의 유도기전력을 구해본다.
유도전동기는 임의의 동기속도에 대하여 실제로 회전하는 속도는 극수와 주파수에 의해서 결정되기 때문에 회전하는 도체의 운동속도 역시 이것에 의해 결정된다고 생각할 수 있다.
따라서 극수가 P개이고, 주파수가 f[Hz], 동기속도가 n_s [rps]인 경우에는 앞의 식은 다음과 같이 변경될 수 있다.
rps는 “revolution per second”를 의미하여 매초당의 회전수를 의미한다.

$$v = wr$$
$$w = 2\pi n_s = 2\pi \frac{2f}{P}$$

$$v = wr = 2\pi n_s r = 2\pi \frac{2f}{P} r \ [m/sec]$$

그리고 정지되어 있는 회전자의 임의의 도체 1개에 대하여 자석이 회전하고 있으므로 기전력은 자석이 회전함에 따라 도체와 이루는 각도가 변하기 때문에 도체의 입장에서 보면 자기장은 변하지만 그렇게 되면 해석이 어렵기 때문에 일정한 크기의 자속인 평균값이 공극에 존재한다고 생각한다.

자극 하나에서 발생되는 평균자속의 크기를 Φ라고 하면 P극인 경우에 전체의 자속은 P•Φ이 될 것이다.

따라서 회전자의 반지름을 r, 회전자 도체의 유효길이를 L이라고 하면 공극에 존재하는 평균 자속밀도는 다음과 같이 된다.

$$B_a = \frac{P\Phi}{2\pi r L} \ [wb/m^2]$$

앞에서 구해 놓은 결과들을 유도기전력의 식에 대입하면 다음과 같다.

$$E_a = B_a L v$$
$$= \frac{P\Phi}{2\pi r L} \times 2\pi \frac{2f}{P} r \times L$$
$$= 2f\Phi \ [V]$$

그런데 사인파의 성질에서 평균값과 실효 값과의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\text{실효치}}{\text{평균치}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}}{\frac{2}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11$$

$$\text{실효치} = 1.11 \times \text{평균치}$$

그런데 코일의 수가 w개라고 하면 한 코일당의 도체 수는 2개가 될 것이므로 (즉, 한 코일은 2개의 코일변으로 구성되어 있으므로) 전체의 도체 수는 2w개가 되며, 앞에서 언급한 실효치와 평균치의 관계를 종합하면 다음과 같은 유기기전력의 식이 만들어진다.

$$E_{rms} = 1.11 \text{ x } 2f\Phi \text{ x } 2w$$
$$= 4.44f\Phi w \text{ [V]}$$

위와 같이 우리에게 익숙한 기전력이 얻어졌다.
물론, 위 식에서 f는 주파수, 매극의 Φ는 자속, w는 코일의 수이다.

유도기전력을 이해하는 것은 무척 중요하며 여기서 설명된 방법 이외에도 다양한 방법으로 설명되어 있기 때문에 여기 저기 참고해서 익숙해 지기 바란다.

유도전동기의 회전자에 유기되는 기전력은 정지상태에서 앞의 식과 같은 값으로 출발하여 회전자가 회전자계와 같은 방향으로 돌기 시작하면 점점 감소하여 동기속도에 도달하면 회전자계의 속도와 회전자 도체간의 상대속도가 Zero가 되기 때문에 유도기전력의 값도 Zero가 된다.

이는 기동할 때는 정지상태이기 때문에 회전자의 도체에 최대의 전압이 유도되어 커다란 전류가 발생하게 되고 이에 따라 공극의 자속이 변하게 되며 기자력 보존의 법칙을 만족할 수 있도록 1차에서 커다란 기동전류가 유입하게 되는데 이것이 유도전동기의 가장 큰 단점인 과도한 기동전류 발생사유이다.
기동전류에 대해서는 이후에 좀더 살펴보도록 한다.

아울러, 한가지 부탁하고 싶은 것은 전동기 및 발전기는 전기적인 특성을 포함한 약간 특수한 형태의 기계라고 생각하고 기계적인 특성의 기본개념들을 확실하게 파악하고 있는 것이 중요하다는 것이다.
이를 위해서는 역학적인 에너지의 개념, 회전체의 운동 및 제반 특성을 가능하면 두루두루 파악하고 있어야 한다.
전기 엔지니어가 전기분야만을 알고 있어서는 그 깊이에 한계가 따르며, 우물을 깊이 파기 위해서는 터를 넓게 잡으라는 속담에서 알 수 있는 바와 같이 자신의 분야에서 깊이를 더하기 위해서는 관련분야를 두루 섭렵해야만 한다는 것을 인지하여야 할 것이다.

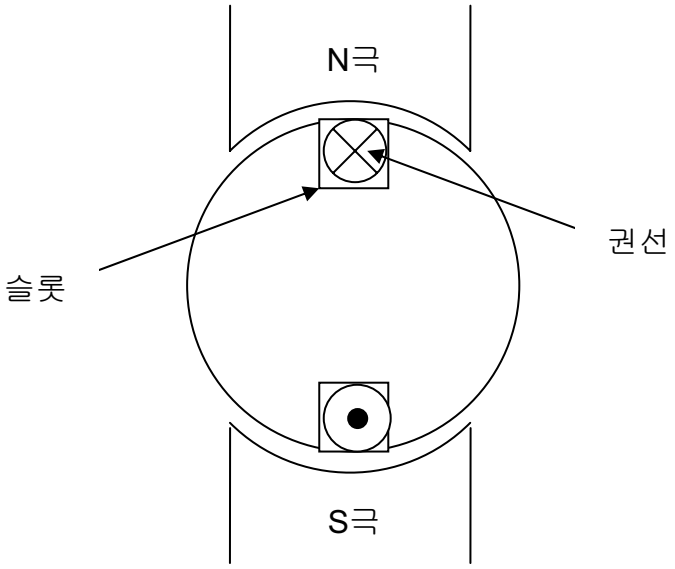
3.3 유도전동기의 권선방법 이해

유도전동기를 포함한 회전 전기기계를 공부하다 보면 꼭 나오는 것이 권선방법인데 사실 조금은 어렵게 느껴질 것이다.
이는 실물을 보지 않고 책에 있는 그림만을 가지고 이론적으로만 설명하는 한계에서 비롯된 것이라 생각하며 전기기계를 바르게 이해하기 위해서는 반드시 실물에 익숙하여야만 한다.
권선방법은 그 배치방법과 권선의 간격에 따라 다음과 같이 구분될 수 있다.

권선의 배치방법에 따라 집중권 (Concentrated Winding)과 분포권 (Distributed Winding)으로 구분되며, 권선의 간격에 따라 전절권 (Full Pitch Winding)과 단절권 (Short Pitch Winding)으로 구분된다.

3.3.1 집중권과 분포권 (Concentrated & Distributed Winding)

집중권이란 다음 그림과 같이 하나의 슬롯에 모든 코일을 삽입한 것이며, 이해를 돕기 위해 회전자계를 실제 자극처럼 나타냈음을 참고하기 바란다.

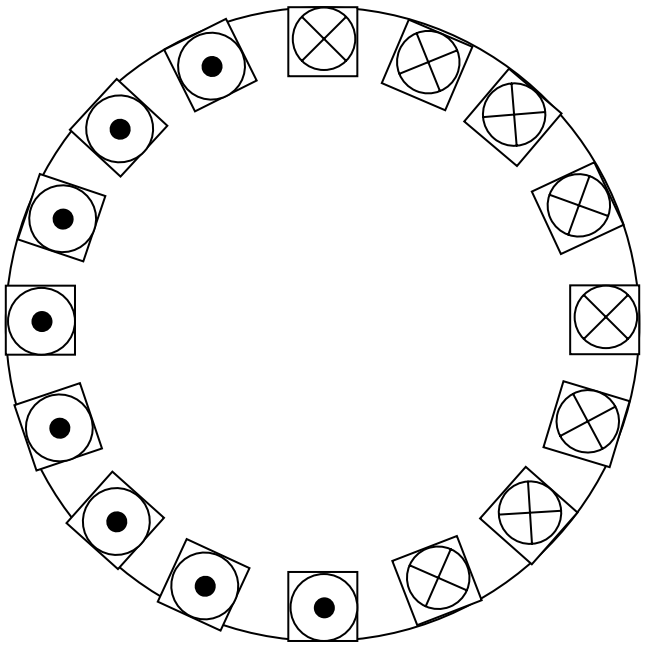


[집중권의 개념도]

위와 같이 하면 유도기전력을 가장 크게 얻을 수 있지만 권선이 들어 있는 부분의 철심만 이용되고 있기 때문에 바람직하지 않을 것이란 점을 쉽게 알 수 있을 것이다.

또한 자기저항이 균일하지 못하기 때문에 유도기전력의 파형도 매끄럽지 못한 점도 단점일 수 있을 것이다.

이와 같은 단점을 보완하기 위해서 적용되는 권선방법이 분포권이며 이름에서 알 수 있는 바와 같이 권선을 전기자의 전 표면에 일정한 간격으로 설치된 슬롯에 삽입한 구조를 가진다.



[분포권의 개념도]

3.3.2 전절권과 단절권 (Full & Short Pitch Winding)

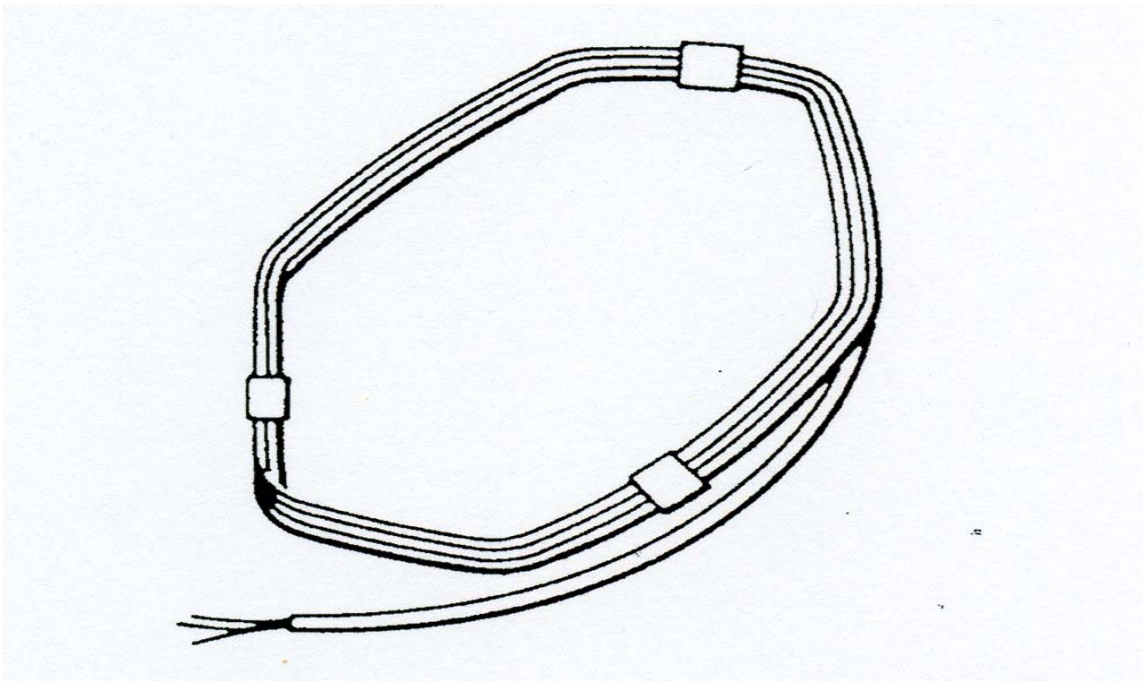
전기자의 권선의 코일은 한쌍의 코일변으로 구성되기 때문에 하나의 권선을 이루는 두 코일변의 간격을 Pitch라고 하며 이 간격이 전기 각으로 180° (라디안으로는 π)가 되도록 한 것을 전절권이라 부르고 180° 미만인 것을 단절권이라 부른다.

권선은 전동기의 정격전류 및 작업의 용이성을 고려하여 크게 2가지 종류로 구별된다.

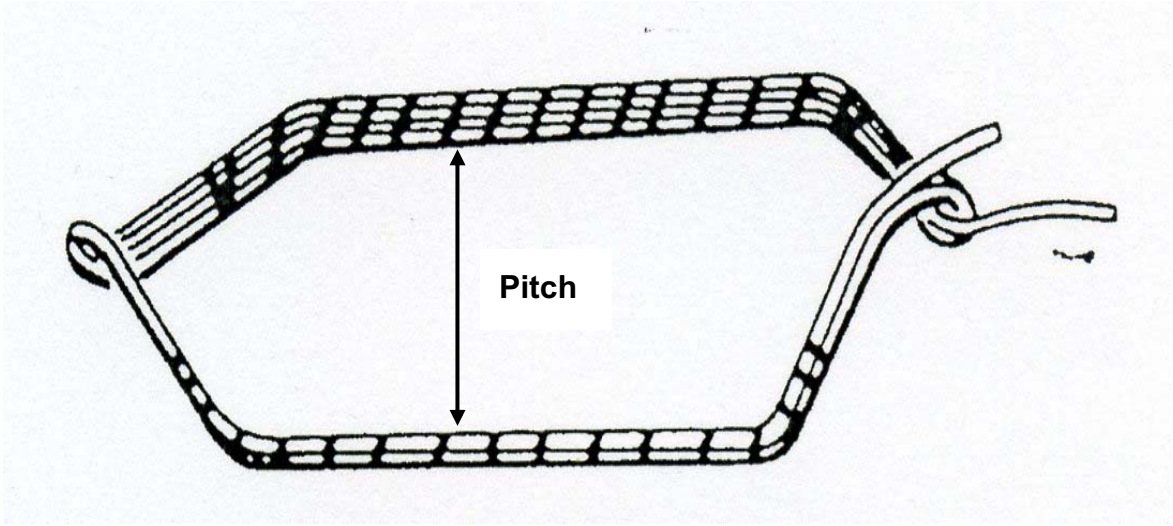
주로 낮은 전압의 작은 용량에 적용되는 권선을 Random Winding이라고 하며 이름이 의미하고 있듯이 자유롭게 휘어지기 때문에 다양한 용량의 전동기에 유연하에 적용할 수 있다.

고전압의 큰 용량에 적용되는 권선은 Formed Winding이라고 하며 용량 및 극수를 고려하여 적당한 형태를 가질 수 있도록 만들어진 것이다.

다음 페이지에 2가지 코일이 그림으로 나와있다.



[Random Winding]



[Formed Winding]

3.3.3 권선방법과 유도기전력의 관계

앞에서 살펴본 유도기전력의 크기는 집중권이면서 전절권인 전동기에서 발생되는 것이며 분포권 및 단절권의 경우에는 유도기전력도 영향을 받는다.

즉, 분포권일 경우 분포계수의 (Distributed Factor) 영향을 받고 단절권일 경우 단절계수의 (Short Pitch Factor) 영향을 받아 유도기전력의 크기가 원래의 값보다 줄어들게 된다.

이제 권선방법에 따른 유도기전력의 영향을 알아본다.

아래와 같이 설명을 쉽게 하기 위해 2극의 분포된 전절권을 갖는 유도전동기에 대하여 알아보며, 전절권은 그림의 점선과 같이 코일의 Pitch가 전기각 180°를 갖는 것이며 그림의 점선은 하나의 코일을 보여주고 있다.

이때 전기각 180°를 3으로 나눈 전기각 60°에 몇 개의 슬롯이 설치되어 있는지가 매상, 매극의 슬롯수라고 전기기계관련 전문서적에 표기되는 것이다.

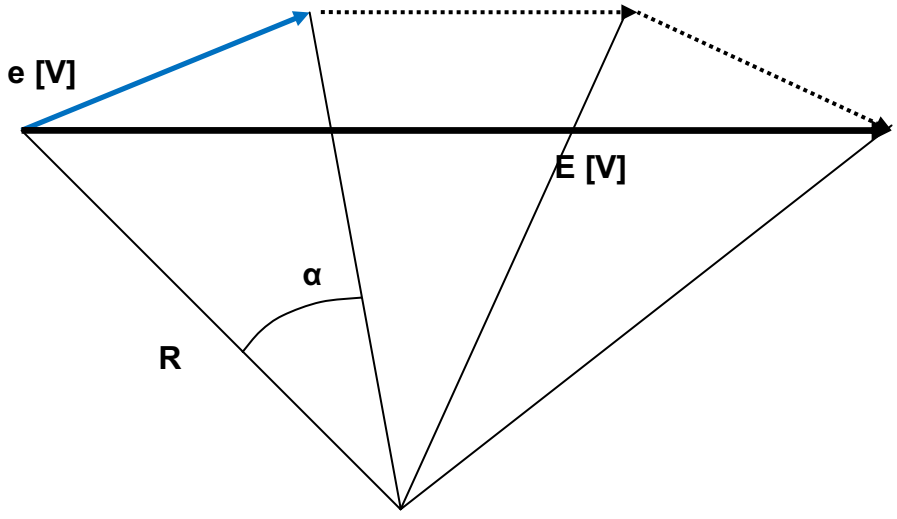
또한 그림에서 슬롯간의 전기각을 **α**로 표기하고 있는데 이 각도가 바로 위에서 설명한 개념이다.

이제는 분포된 권선에서 발생되는 유도기전력에 대하여 알아본다.

집중권의 유도기전력에 대하여 분포권에서 발생되는 유도기전력의 크기의 비를 분포계수라고 하며 이의 정량적인 개념을 이해해 보도록 한다.

지금 하나의 코일에서 발생할 수 있는 전압을 e [V]라고 하면 n개의 슬롯에 나누어 넣은 코일을 집중권으로 할 경우 n x e [V]의 전압이 유기될 것이다.

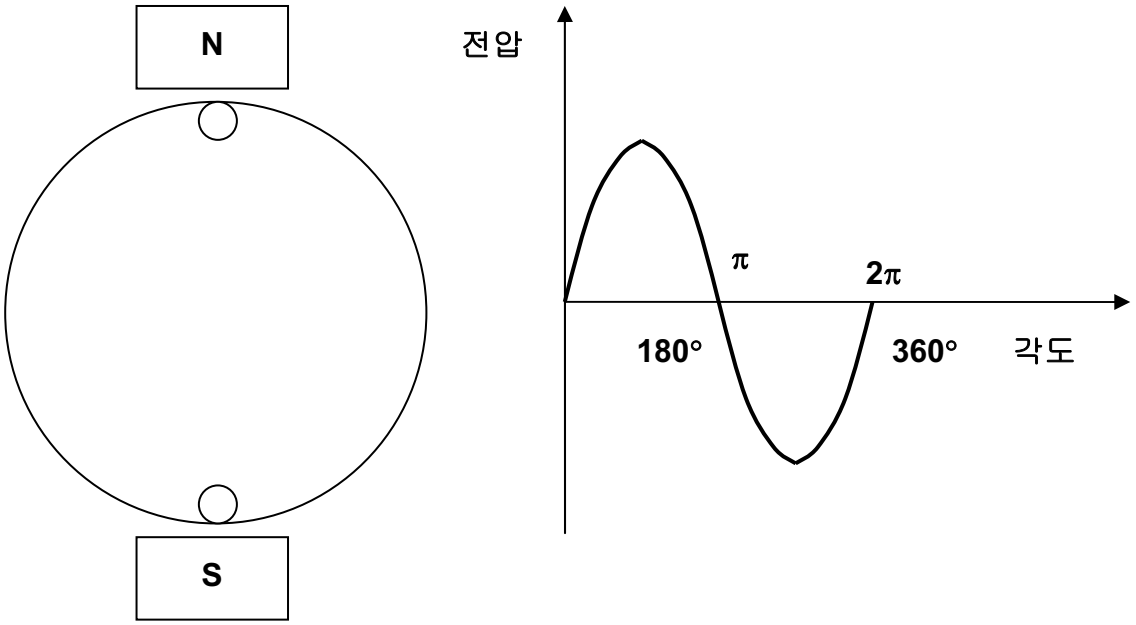
분포권에서는 각 슬롯의 유기기전력은 각각 **α** 만큼의 위상차를 갖게 되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.



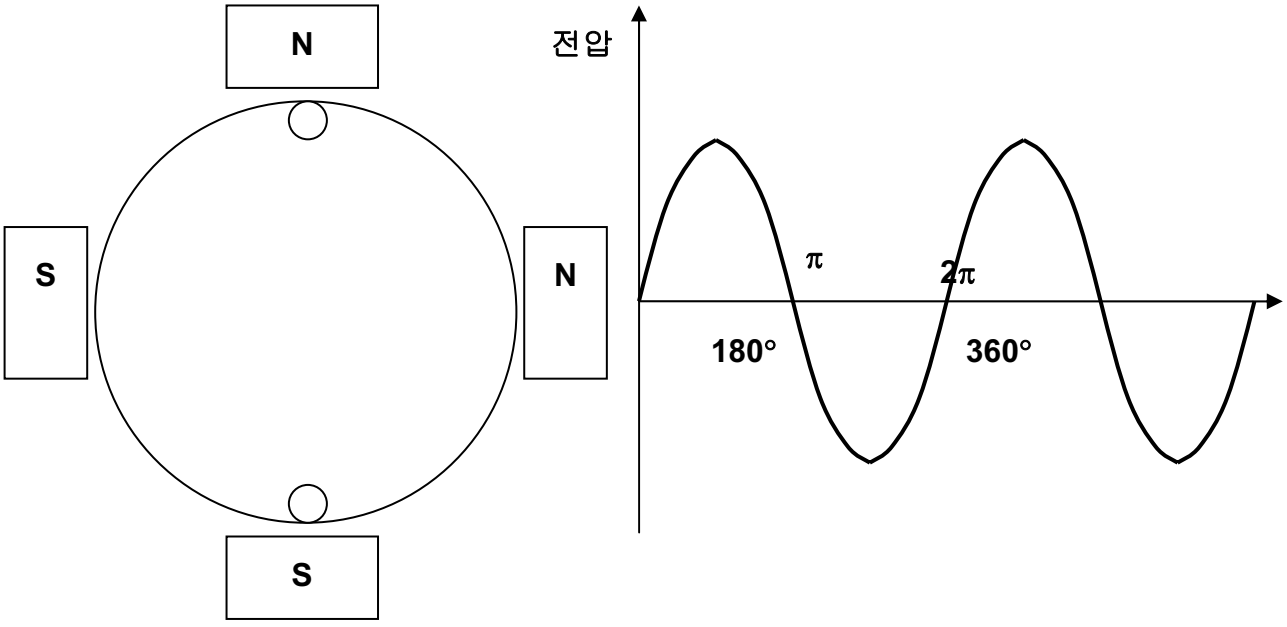
[분포계수의 설명 개념도]

이제 위 그림에서 각 코일간의 전기각 **α**와 θ의 개념을 알아본다.

먼저 전기각의 개념은 다음과 같이 회전자가 1바퀴 돌 때 몇 개의 사인파가 발생되는가에 따라 결정된다.



[2극의 경우 1바퀴당 2π 가 됨]



[4극의 경우 1바퀴당 4π 가 됨]

즉, 같은 1바퀴를 돌아도 극수에 따라 전기각이 달라지게 되는데 극수를 P라고 하면 1바퀴당의 전기각은 Pπ 라디안이 되는 것이다.

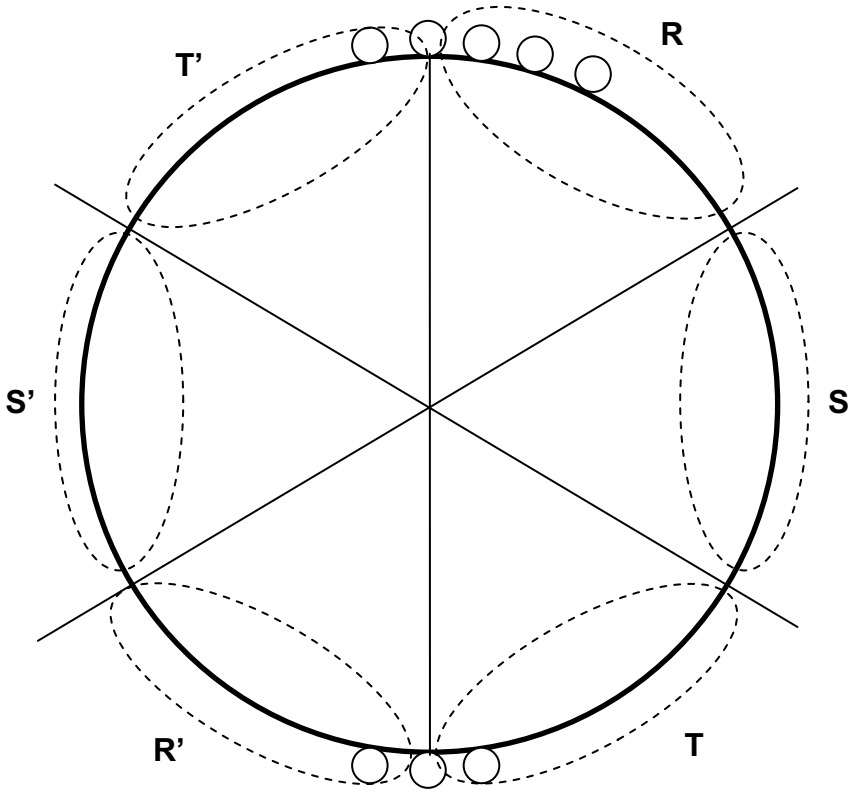
이와 같은 개념으로 본다면 슬롯의 간격이 같더라도 (즉, 기계적인 각도는 동일하더라도) 극수에 따라 전기적인 각도는 달라지게 된다.

예를 들어 회전자의 슬롯수가 54개라고 하면 2극기의 경우에는 슬롯간의 전기각은 2π를 54로 나눈 값이 되며, 동일한 슬롯수의 4극기는 슬롯간의 전기각이 4π를 54로 나눈 값이 되는 것이다.

본 자료는 3상 유도전동기에 대하여 기술하고 있으며, 이번에는 하나의 상이 점유하는 기계적인 공간에 대하여 알아본다.

3상 유도전동기에서 각 상은 동일하게 고정자의 슬롯을 나누어 갖는다.

즉 앞에서 예를 든 54개의 슬롯을 갖는 3상 유도전동기의 경우 각 상이 갖는 슬롯의 수는 18개가 되는 것이다.



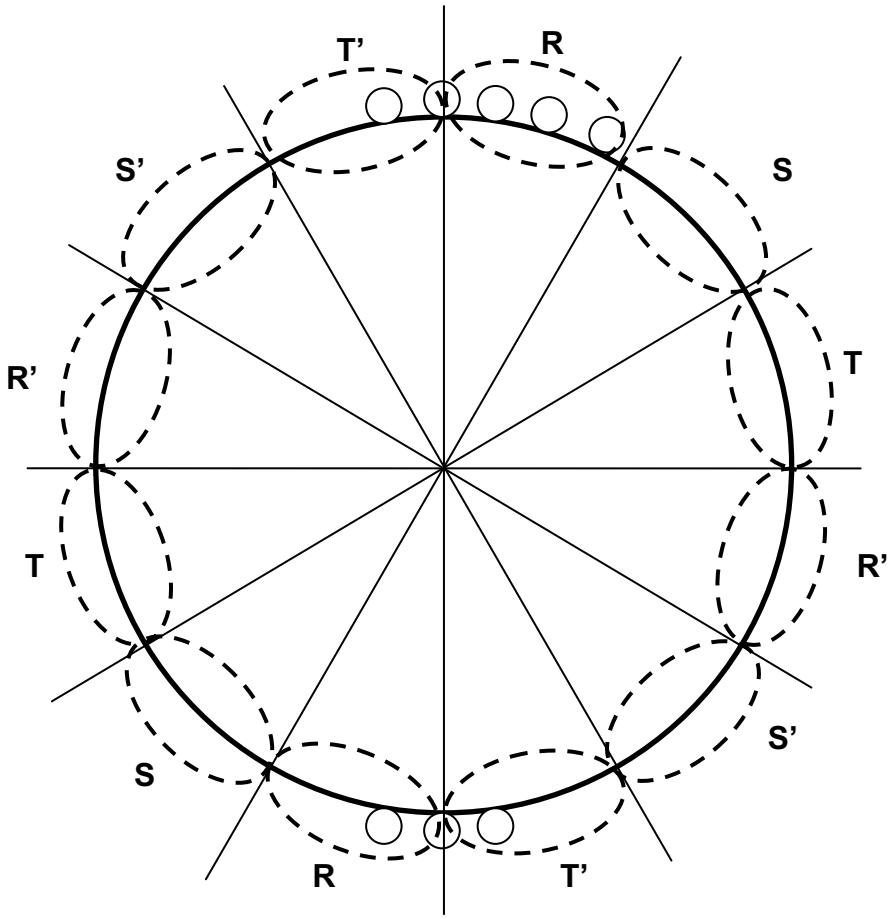
[2극 유도전동기의 각 상의 권선이 점유하는 기계적 공간]

2극 유도전동기의 경우에는 기계적인 각과 전기적인 각이 크기가 같기 때문에 각 상은 전기각 60°를 (기계적인 각 60°) 점유하게 된다.

따라서 앞 그림에서의 전기각 θ는 60°가 될 것이다.

또한 전체 슬롯의 수가 54개이므로 전기적인 각 60° 안에 (이때는 2극이므로 기계적인 각도 60°임을 기억하라.) 들어 있는 슬롯의 수는 9개가 될 것이므로 슬롯간의 전기각 **α**는 6.67°가 되는 것을 쉽게 알 수 있다.

이번에는 동일한 슬롯의 수를 가진 유도전동기가 4극인 경우를 알아본다.



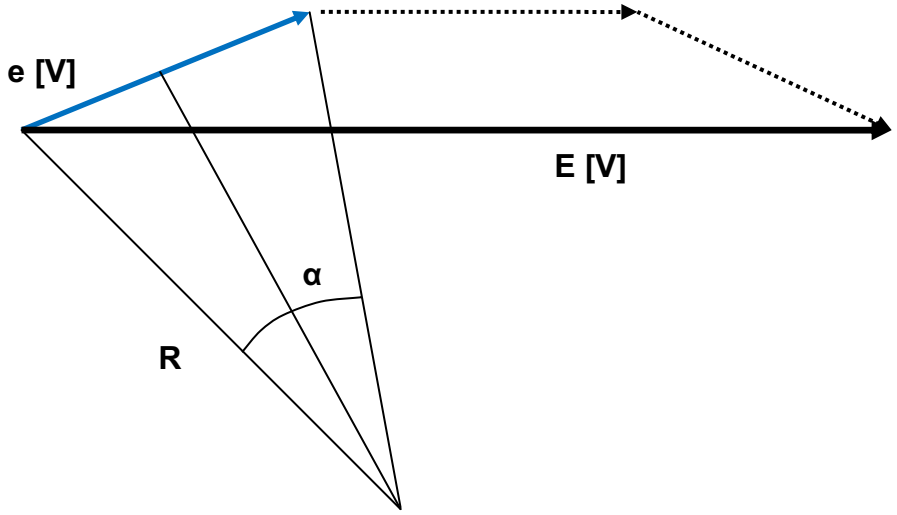
[4극 유도전동기의 각 상의 권선이 점유하는 기계적 공간]

4극 유도전동기의 경우에는 기계적인 각이 전기적인 각의 0.5배이며 이 경우에도 각 상은 전기각 60°를 (기계적인 각 30°) 점유하게 된다.

따라서 이 경우에도 2극기와 마찬가지로 전기각 θ는 60°가 될 것이다.

또한 전체 슬롯의 수가 54개이므로 전기적인 각 60° 안에 (이때는 4극이므로 기계적인 각도 30°임을 기억하라.) 들어 있는 슬롯의 수는 4.5개가 될 것이므로 슬롯간의 전기각 **α**는 13.3°가 되는 것을 쉽게 알 수 있다.

이제 분포계수를 구하기 위해 앞의 분포계수 그림에서 한 부분만을 이해를 돕기 위해 확대해서 다음과 같이 살펴본다.



[분포계수의 설명 개념도]

위 그림에서 전기각 60°안에 들어있는 슬롯의 수를 n개라고 하면 하나의 코일에서 발생되는 e [V]의 크기는 다음과 같이 구할 수 있다.

그림을 잘 보면 e의 크기는 그 각도를 반으로 나눈 사인 값에 R의 값을 곱한 것으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

사인함수의 내부에 있는 것은 라디안이 아닌 Degree의 값임을 참고하라.

$$e = 2R \times \sin\frac{60°}{2n} = 2R \times \sin\frac{30°}{n}[V]$$

이제는 분포계수 K_D를 쉽게 구할 수 있게 되었다.

$$K_D = \frac{E}{n \times e} = \frac{2R \times \sin\frac{60°}{2}}{2R \times n \times \sin\frac{60°}{2n}} = \frac{\sin 30°}{n \times \sin\frac{30°}{n}}$$

우리가 흔히 참고하는 대부분의 전기기계 관련 책자에서는 매상 매극의 슬롯 수를 q라하고 상수를 m이라고 해 놓고 분포계수를 다음과 같이 나타낸다.

$$K_D = \frac{E}{n \times e} = \frac{2R \times \sin\frac{180°}{2 \times m}}{2R \times q \times \sin\frac{180°}{2 \times m \times q}} = \frac{\sin\frac{180°}{2m}}{q \times \sin\frac{180°}{2mq}}$$

그러데 앞에서 설명한 매상 매극의 슬롯 수인 q는 전기각 60°안에 들어있는 슬롯의 수인 n의 값과 동일한 것이다.

또한 우리는 3상 유도전동기를 다루고 있으므로 m = 3의 값과 n = q인 조건을 대입하면 결국 같은 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

결국 전기기계 책자에서 소개하고 있는 분포계수의 개념에 대한 원리는 위에서 설명된 것에서 출발했음을 알 수 있다.

이와 같은 근본원리에 대한 이해를 잘 해 놓는 것이 무척 중요하며 이는 잘 기억이 나지 않을 경우 원리를 꺼내어 활용할 수 있기 때문이며 적어도 전기기술자들은 원리를 이해하지 않고 암기를 하려고 하는 것은 피해야 할 것이다.

이제 분포계수를 구하는 방법은 무척 간단해 졌는데, 만약 전체의 슬롯수가 주어지면 이를 극수와 상수를 곱한 값으로 나누어 앞의 식에 대입하기만 하면 되는 것이다.

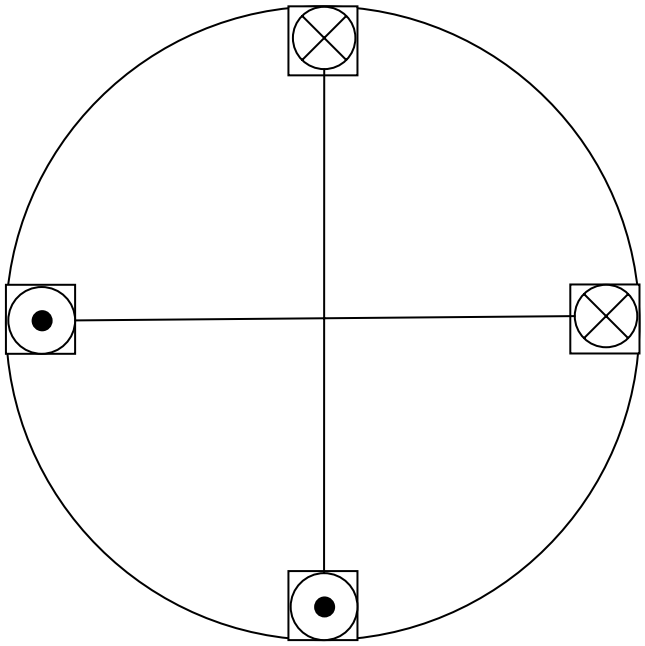
간단한 예를 들어보면, 전체의 슬롯수가 54개이고 6극의 3상 유도전동기의 분포계수를 구하기 위해서는 54를 3과 6을 곱한 18로 나누면 3이 되기 때문에 위 식의 n대신 3을 대입하여 다음과 같이 구하면 되는 것이다.

$$K_D = \frac{\sin 30°}{3 \times \sin\frac{30°}{3}} = \frac{\sin 30°}{3 \times \sin 10°} \cong 0.9598$$

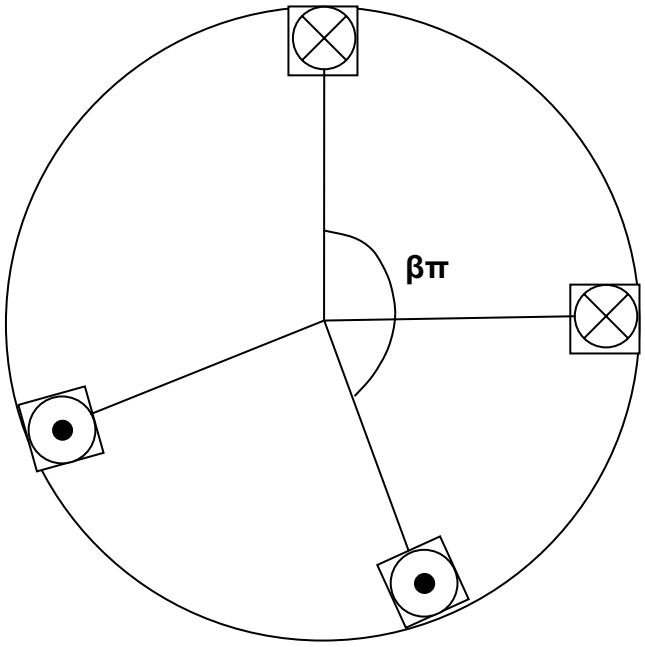
독자들이 몇 가지의 경우를 연습 삼아 계산해 보기 바라며 대개의 경우 분포계수는 1보다 약간 작은 값을 갖게 된다.

이번에는 단절권과 단절계수에 대하여 알아본다.

단절권이란 다음 그림과 같이 코일의 피치를 전기가 180°보다 약간 작게 한 권선방법을 말한다.

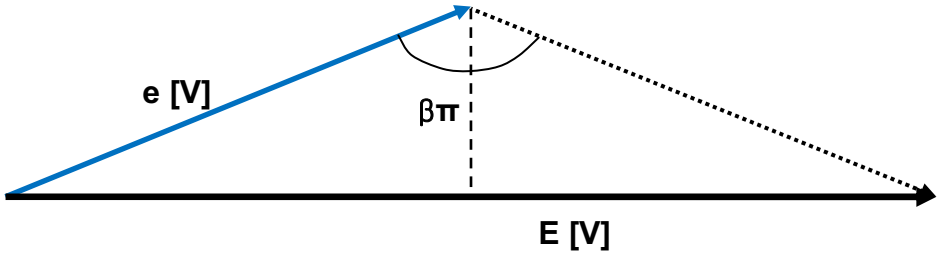


[전절권의 개념도]



[단절권의 개념도]

단절계수는 전절권의 유기기전력과 단절권의 유기기전력의 비로 나타낸다.



[단절계수의 설명 개념도]

단절계수는 흔히 K_S로 나타내는데 다음과 같이 간단하게 구해진다.

$$K_S = \frac{E}{2 \times e} = \frac{2 \times e \times \sin\frac{\beta\pi}{2}}{2 \times e} = \sin\frac{\beta\pi}{2}$$

위 식에서 단절계수를 구하는데 사용된 β는 다음의 의미를 갖는다.
즉 전절권의 극 피치가 9인데 실제로 코일의 피치는 8일 경우 β의 값은 다음과 같이 구해진다.

$$\beta = \frac{8}{9}$$

이해를 돕기 위해 하나의 예를 들면, 만약 극 피치가 9라면 코일은 1번 슬롯과 10번 슬롯을 통과하여야 하나 실제로는 코일이 1번 슬롯과 9번 슬롯을 통과했다면 이때 β의 값은 위의 식과 같은 값을 갖게 되며 분포계수와 마찬가지로 통상 1보다 약간 작은 값을 갖는다.

실제로 3상 유도전동기의 유도기전력은 앞에서 살펴본 분포계수와 단절계수를 고려하여 다음과 같이 나타낸다.

$$E = 4.44 \times K_D \times K_S \times f \times \Phi \times \omega \ [V]$$

4 유도전동기의 특성 이해

이 장에서는 유도전동기의 슬립과 등가회로의 이해, 기동전류 및 토크의 이해를 포함한 기본적인 특성들을 설명한다.

4.1 슬립의 개념 (Slip)

슬립의 개념을 설명하기 위해 앞에서 사용한 다음 그림을 다시 활용한다.

고정자에 3상의 대칭전원을 인가하면 고정자의 철심에 동기속도로 회전하는 회전자계가 발생한다는 것은 이미 알고 있는 사항이며 이 회전자계가 공극을 통해 회전자의 도체에 전압을 유기하고 이에 따라 회전자 도체에 전류가 흐르면서 회전자가 회전하게 되는데 이를 아라고 원판원리라고 설명했다.

전동기의 축에 부하가 걸리지 않은 상태에서는 회전자가 동기속도로 회전하게 되어 회전자속과의 상대속도가 Zero가 되어 자속을 끊을 수 없기 때문에 회전자의 도체에 전류가 흐르지 않는다.

회전자의 도체에 전류가 흐르지 않으면 전동기 축의 토크 또한 발생하지 않으며 이때 고정자에는 무부하 상태의 회전자를 동기속도로 돌려줄 수 있는 정도의 자속만을 만들어내는 전류가 흘러 들어가는데 이를 무부하전류라 한다.

만약 전동기의 축에 부하가 걸리면 회전자의 회전속도가 감소하여 회전자의 도체가 회전자속을 끊어 전류를 흐르게 하여 부하가 요구하는 토크가 발생할 수 있도록 하는데, 부하가 걸렸을 때 회전자의 속도감소분을 동기속도에 대한 비로 나타낸 것을 슬립이라 하며 다음과 같이 표현된다.

$$s = \frac{N_S - N}{N_S}$$

여기서 N_S는 회전자속의 속도 (즉 동기속도), N은 회전자의 회전속도를 의미하는 것이다.

부하가 많이 걸릴수록 이 슬립은 커지게 되는데 모터의 명판에 기재되어 있는 속도는 (즉 rpm) 그 모터에 정격부하가 걸릴 때인 정격속도를 의미한다.

즉, 부하가 정격보다 많이 인가되면 모터의 속도는 정격속도보다 작아지게 되며 이는 슬립이 커지는 것을 의미한다.

통상 슬립의 크기는 모터의 용량과 관계가 있는데 모터의 용량이 작을수록 정격슬립이 커지는 경향이 있으며, 통상 요즈음에 만들어지는 일반적인 산업용 모터의 경우 3[%] 이하가 대부분이다.

예를 들어 2극기의 모터 명판에 모터의 회전속도가 3550[rpm]이라고 기재되어 있을 경우 그 정격슬립은 다음과 같이 결정된다.

$$s\,[\%] = \frac{N_S - N}{N_S} \times 100 = \frac{3600 - 3550}{3600} \times 100 = 1.25[\%]$$

이 슬립은 다음에 설명되겠지만 모터의 효율과도 관계가 있기 때문에 잘 이해를 해 놓는 것이 중요하다.

앞에서도 설명했듯이 슬립과 회전자에 유도되는 전압은 비례관계가 있는데 이에 대하여 알아보자.

정지하고 있는 상태에서 모터의 고정자 권선에 3상 전원을 인가하면 동기속도로 회전하는 회전자속이 발생하고 이 회전자속은 공극을 통해 회전자의 도체와 상태운동을 함으로써 회전자의 도체에는 전압이 유도되고 이로 인해 단락 되어 있는 회전자의 도체에 순환전류가 흐르는 것은 쉽게 이해가 될 것이다.

또한 고정자의 권선도 자신의 전류가 만든 회전자속을 항상 동기속도로 끊고 있기 때문에 유도기전력이 발생하게 되는 이 유도기전력의 크기는 앞에서 설명하고 유도한 그 유도기전력이며 그 방향은 고정자의 전류증가를 억제하도록 발생되며, 이와 같은 특성으로 인해 역기전력 (Counter E.M.F) 이라 부른다.

만약 정지된 상태의 회전자 도체에 발생되는 전압을 E_2라고 하면 슬립이 s일일 때 회전자 도체에 발생되는 전압은 sE_2가 된다고 이해하면 된다.

왜냐하면 유도기전력의 크기는 도체가 자속을 끊는 속도와 비례하기 때문이다.

4.2 고정자 및 회전자 전류에 의한 회전자속의 관계이해

고정자 전류에 의한 회전자속은 전원주파수와 극수로 결정되는 동기속도와 같다는 것은 설명했고, 이제는 슬립 s로 회전하고 있는 회전자의 전류에 의한 회전자속은 어떻게 되는지 살펴본다.

앞의 슬립의 관계식으로부터 회전자의 속도는 다음과 같이 나타내진다.

$$s = \frac{N_S - N}{N_S}$$

$$N = N_S - s \times N_S$$

$$= (1 - s) \times N_S \ [\mathrm{rpm}]$$

고정자의 권선의 입장에서 측정한 회전자의 속도는 위와 같이 나타낼 수 있고, 고정자 전원의 주파수를 f[Hz]라고 하면 회전자에서 발생하는 전압의 주파수는 슬립이 고려된 s x f[Hz] 가 된다.

그런데 회전자 전류의 주파수가 sf[Hz]이므로 회전자 전류에 의해 공극에 발생되는 회전자속의 회전속도는 sN_S[rpm]이 되는 것은 자명하다.

이와 같은 관계를 종합하면 고정자 권선의 입장에서 보면 회전자 전류에 의한 회전자속의 속도는 회전자의 속도에 회전자의 전류에 의한 회전자속의 속도를 합한 것이 될 것이다.

따라서 고정자 권선에서 바라본 회전자가 발생시키는 회전자속의 속도는

$$N + s \times N_S = N_S - s \times N_S + s \times N_S$$

$$= N_S$$

와 같이 되어 고정자 전류에 의한 회전자속의 속도와 동일한 값을 갖는다.

즉, 고정자 전류에 의한 회전자속의 속도는 회전자 전류가 만들어내는 회전자속의 속도와 항상 동일한 속도가 되며 이는 마치 정지하고 있는 변압기와 같은 특성을 가지며 이와 같은 사유로 유도전동기를 변압기와 동일한 방법으로 해석해 낼 수 있다.

좀더 물리적인 개념을 이해하기 위해 앞에서 설명한 기자력 보존법칙과 대응시켜서 생각하더라도 꼭 들어맞는 것이라 생각된다.

즉 고정자 권선에 의한 회전자속이 공극에 발생하게 되면 당연히 자속의 변화를 방해하는 방향으로 회전자 전류에 의한 자속이 발생하여야 할 것이다.

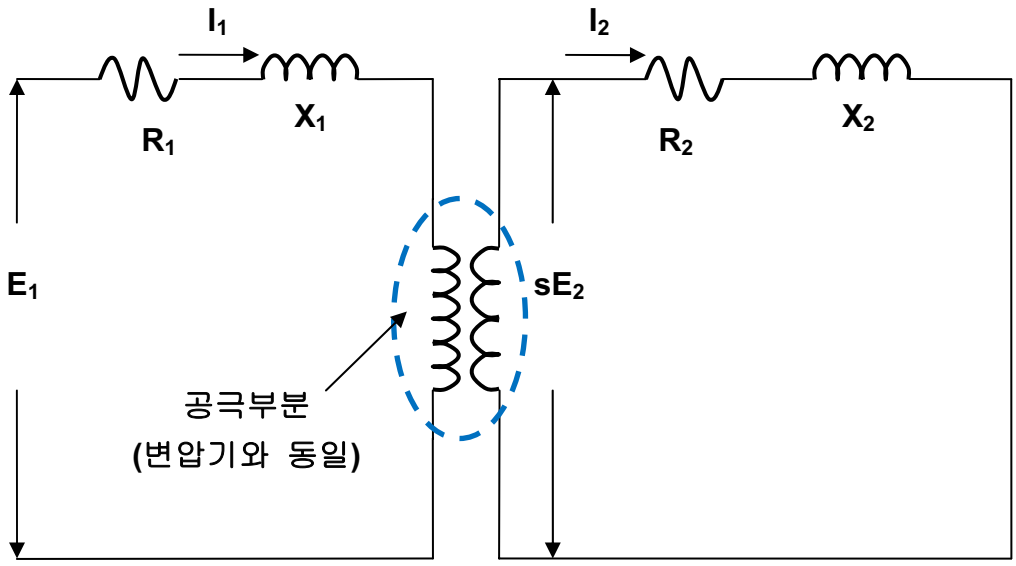
따라서 항상 같은 속도로, 또 방향으로 회전하며 권수비에 따라 결정되는 크기의 전류가 회전자와 고정자에 흐르게 되는 것이다.

통상 회전자의 전류를 1차 전류, 회전자의 전류를 2차 전류로 표기하며, 변압기의 경우와 또한 같다.

4.3 유도전동기의 등가회로 이해

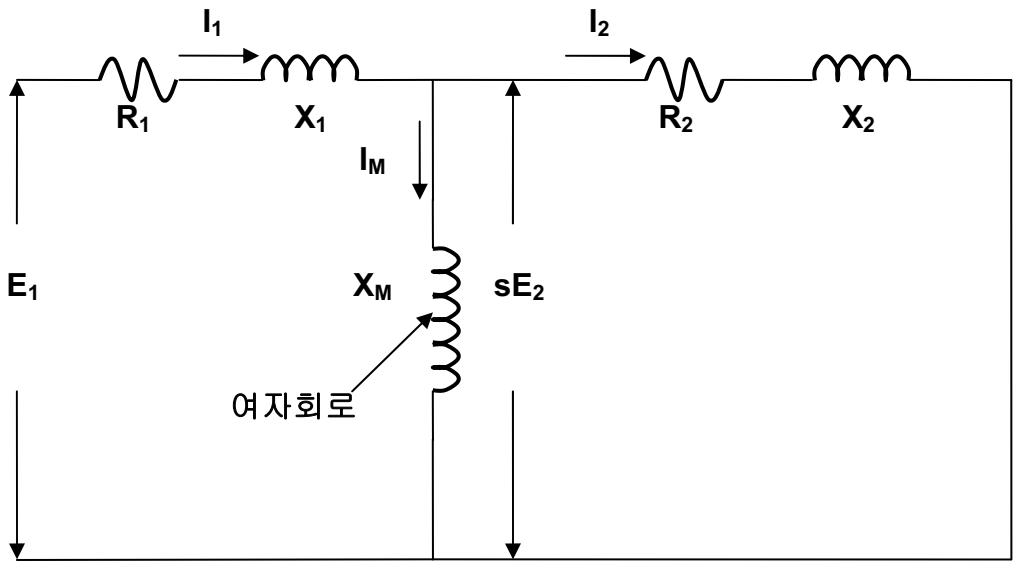
앞에서 설명한 내용을 가지고 이번에는 유도전동기의 제반 특성을 알아낼 수 있는 등가회로에 대하여 알아본다.

다음은 앞의 설명을 토대로 작성한 유도전동기의 전형적인 등가회로이다.



[유도전동기의 전형적인 등가회로]

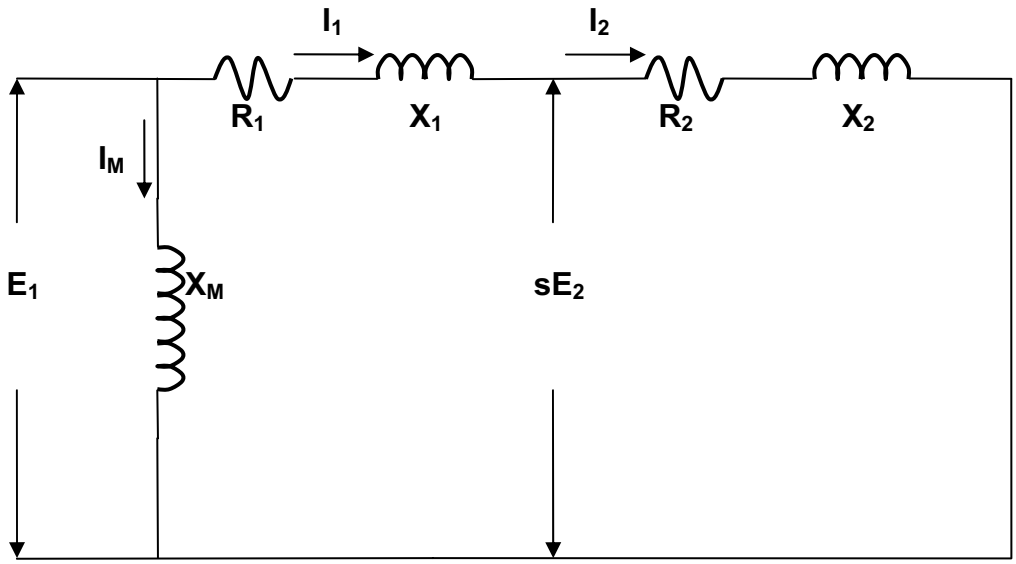
위 등가회로에서 공극부분을 전기회로로 대체하면 다음과 같다.



[유도전동기의 등가회로]

유도전동기도 변압기와 마찬가지로 간이 등가회로로 나타낼 수 있으며, 변압기의 경우보다는 여자전류가 (즉 무부하전류, 또는 현장에서 Solo-Test시 전류) 크기 때문에 간이 등가회로로 나타내는 것은 오차가 많겠지만 대용량 모터의 경우에는 정격전류에 비해 무부하전류가 작기 때문에 실용상 문제는 없을 것이다.

또한 현장에서 현업을 수행할 때 모터의 등가회로를 필요로 하는 경우는 거의 없다고 생각되지만, 적어도 전기기술자들은 등가회로를 이해하고 있어야 한다.



[유도전동기의 간이 등가회로]

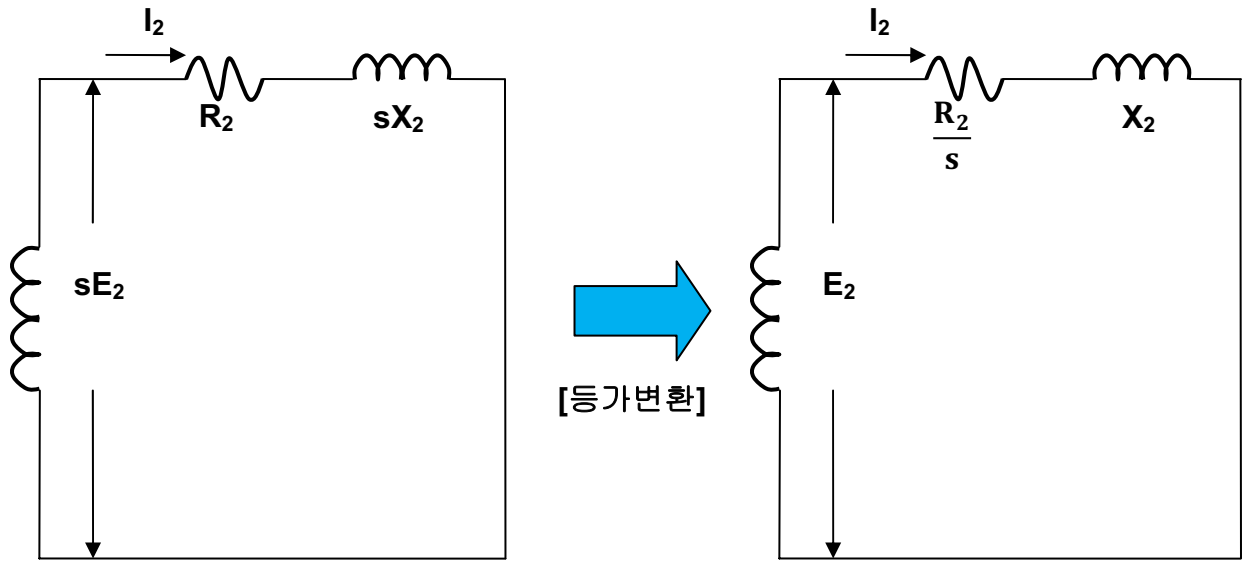
사실 앞의 등가회로에서 변압기처럼 권수비를 반영하여 2차의 임피던스를 1차로 환산하고 표기도 바꾸고 해야 하지만 이론적인 사항보다는 개념을 이해하는 의미에서 필자가 편리한 대로 표기했으니 참고하기 바란다.

유도전동기의 등가회로를 이해하는 것도 매우 중요하지만 2차 회로 (즉 회전자의 회로) 특성을 잘 파악하고 있는 것은 앞으로 설명될 기동전류와 토크의 관계를 비롯한 많은 개념을 이해하는데 중요하기 때문에 이에 대하여 설명한다.

앞에서도 여러 차례 언급되었듯이 회전자에 유도되는 전압은 회전자의 속도에 따라 변하게 되며 이를 하나의 값으로 나타내는 것은 어렵다.

하지만 유도전동기를 전기적으로 해석하기 위해서는 이를 하나의 대표적인 값으로 표시하는 것이 필요하기 때문에 이 회전자의 회로를 약간 변형하는 것이 필요하게 되는데 이에 대한 개념을 알아본다.

다음과 같이 회전자의 회로만을 따로 떼어서 생각해 본다.



[회전자만을 따로 떼어낸 회로] **[슬립으로 나누어준 회로]**

슬립에 따라 변하는 (즉, 회전자의 속도에 따라 변하는) 회전자의 유도전압을 하나의 값으로 나타내기 위해 슬립으로 전압을 나누어 주면 오른쪽과 같이 등가변환을 할 수 있다.

이를 수식으로 나타내면 다음과 같이 할 수 있다.

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2 + sX_2} = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + X_2}$$

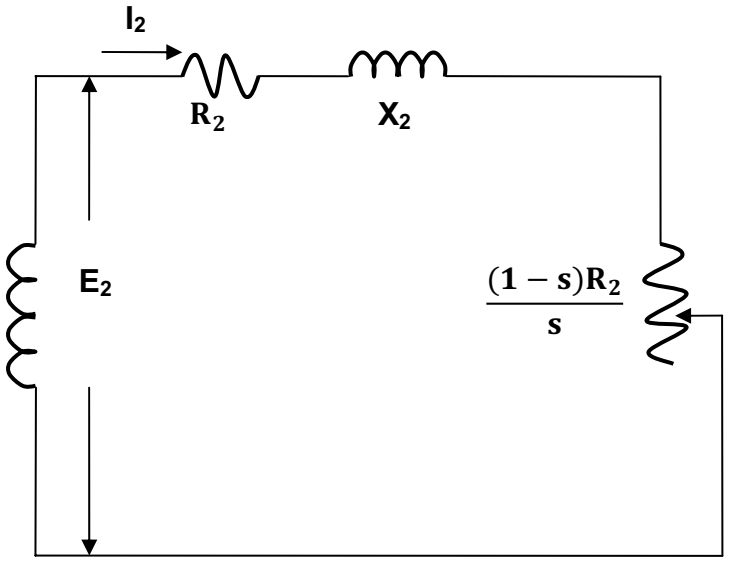
즉, 좌변 회로의 전류와 우변 회로의 전류는 같은 값을 가지기 때문에 이 두 회로는 등가회로로 취급할 수 있게 되는 것이다.

이번에는 2차 회로의 저항 R_2를 슬립과 무관한 성분과 슬립과 관계가 있는 성분으로 나누어 생각해 본다.

이렇게 하기 위해서는 일단 다음과 같이 수식을 사용하여 나눈다.

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{R_2}{s} - R_2$$
$$= R_2 + \frac{R_2}{s} - \frac{sR_2}{s} = R_2 + \frac{(1-s)R_2}{s}$$

이를 앞의 2차만의 등가회로에 나타내면 다음과 같이 된다.



[2차 저항을 둘로 구분한 등가회로]

위의 등가회로가 유도전동기의 특성을 설명하는데 가장 많이 활용되는 것이며 이렇게 나누는 것은 특성을 편리하게 이해하기 위함이다.

위의 회로에서, R_2를 2차 회로의 동손저항이라 하고 $\frac{(1-s)R_2}{s}$ 를 등가부하저항이라 한다.
즉, 부하가 걸리면 슬립 s가 변하게 되며 이는 마치 뒤의 등가부하저항이 변하는 것으로 이해하면 해석 및 특성의 이해에 유용하기 때문이다.

이제 특별한 경우인 s=0, s=1인 상태에 대하여 알아보도록 한다.

s=0은 무부하상태로써 등가부하저항이 무한대가 되어 전류가 흐르지 않는다.

이는 회전자의 속도가 동기속도로써 고정자의 전류에 의해 공극에 발생된 회전자속을 끊을 수 없어 2차 회로에 전압이 유기되지 않는 상태와 개념적으로 일치하고 있다.

s=1은 정지상태로써 등가부하저항이 0이 되어 2차 회로에 가장 큰 전류가 흐르게 되는데, 이는 기동상태를 의미하는 것이며 회전자의 도체가 가장 빨리 회전자속을 끊게 되어 큰 전압이 유기되어 큰 기동전류가 유입하는 상태와 개념적으로 일치함을 알 수 있다.

4.4 기동전류의 이해

유도전동기의 가장 큰 단점을 이야기할 때 가장 먼저 거론되는 것이 바로 기동전류가 크다는 것이다.

커다란 기동전류는 다음과 같은 문제점을 내포하고 있다.

- ▶ 전동기가 접속된 계통의 전압을 강하시켜 타 설비에 영향을 미친다.
- ▶ 전동기 자체에 과전류가 흐르기 때문에 기동이 잦을 경우 Thermal Stress가 누적되어 전동기의 수명단축 및 심할 경우 모터가 소손 되는 경우도 있다.
- ▶ 급격한 토크가 부하에 인가되어 부하에 기계적인 손상을 줄 수 있다.

앞의 등가회로를 통해 커다란 기동전류가 발생되는 과정을 이해해본다.

- ▶ 모터에 전원을 인가하면 고정자 전류에 의한 회전자속이 발생하고 회전자의 도체가 이를 끊음으로써 회전자 도체에 커다란 전류가 흐르게 된다.
- ▶ 이 회전자의 전류는 공극의 자속을 증가시키고 기자력 보존법칙에 의해 공극의 자속을 일정하게 유지시키려는 성질 때문에 고정자에서 이를 상쇄시키는 방향으로 자속을 발생시키기 위해 커다란 전류가 유입되며 이러한 과정으로 기동전류가 크게 되는 것이라고 이해하면 된다.

기동전류는 이와 같이 기동시에 회전자에 커다란 전류가 흐름에 따른 반작용으로 발생하는 것이며, 이번에는 기동전류의 특성을 살펴본다.

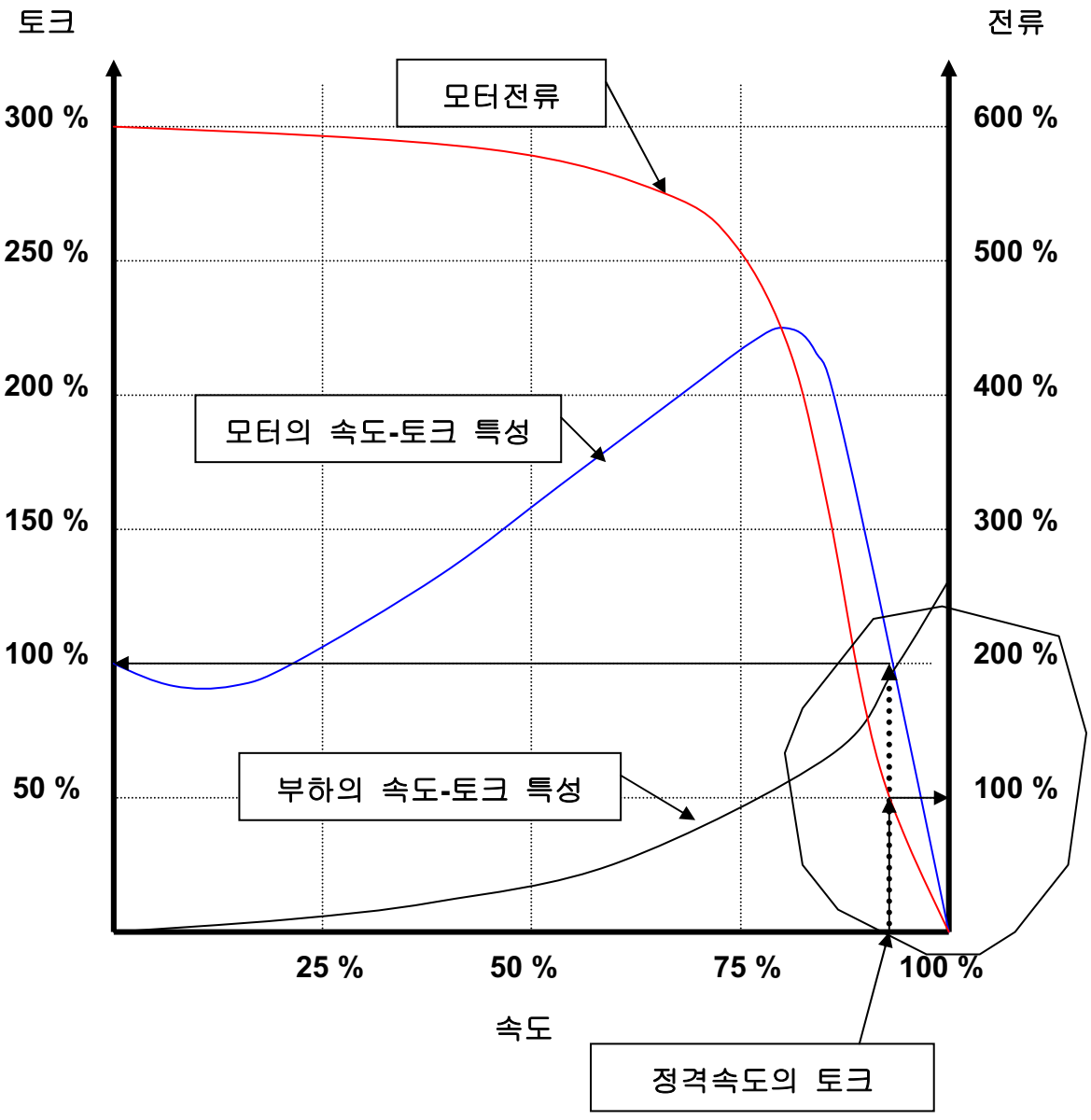
회전자 도체의 인덕턴스를 L이라고 하면 기동시 회전자의 전류는 다음과 같다.

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + \frac{(1-s)R_2}{s} + X_2} = \frac{E_2}{R_2 + \frac{(1-s)R_2}{s} + j2\pi sfL}$$

$$= \frac{E_2}{R_2 + j2\pi fL}$$

위 식에서 s는 슬립이며 기동시 s=1을 대입하면 식의 마지막 항이 얻어지며 이 식에는 기동시 회전자의 전류에 대한 중요한 정보가 포함되어 있으며 기동 전류의 특성을 결정하는 요소이기도 하다.

설명을 돕기 위해 유도전동기의 기동특성을 알 수 있는 가장 전형적인 속도-토크 특성곡선을 다음과 같이 인용한다.



[설명을 위한 속도-토크 특성 곡선]

앞의 식에서 기동시 회전자 전류에 대한 중요한 정보라고 언급한 것은 I_2의 역률에 관한 사항인데 식을 보면 알 수 있듯이 기동시 2차 회로의 (즉 회전자 회로) 리액턴스가 가장 큰 값을 갖게 된다는 것이다.

이는 회전자가 가속됨에 따라 회전자 도체가 회전자속을 끊는 속도가 감소하기 때문에 회전자 도체에 유기되는 전압의 주파수가 낮아지게 되며 기동시에 회전자 도체에 유기되는 전압은 가장 큰 주파수를 갖고 따라서 회전자 도체의 리액턴스 값이 최대가 되는 것이다.

이는 기동시 회전자 전류의 역률이 가장 나쁜 것을 의미하는데 이로 인해 고정자에도 이와 동상의 (In-Phase) 전류가 흘러야 하기 때문에 역률이 낮은 대 전류가 기동전류로 유입하게 되는 것이다.

이와 같은 사유로 전류가 가장 크게 유입되는 기동시에 발생되는 토크의 값은 최대가 되지 못하고 속도가 증가하면서 인덕턴스의 값이 감소하여야 최대 토크의 값에 이르게 되는데 이를 앞의 속도-토크곡선은 설명하고 있는 것이다.

전기기술자들은 유도전동기의 속도-토크곡선에 내포되어 있는 이와 같은 개념을 반드시 파악하고 있어야 한다.

이 개념은 유도전동기의 특성을 가장 잘 보여주는 것으로써 이에 대한 정확한 이해는 아무리 강조해도 지나치지 않아 다시 한번 강조하는 것이다.

4.5 입력과 출력에 대한 이해

전동기의 명판을 보면 정격전류와 정격출력이 기재되어 있는데 이에 대한 의미를 잘 이해하고 있으면 편리하다.

명판에 기재된 정격전류는 정격출력을 내기 위해 1차에서 유입되어야 하는 전류로써 고정자의 전류를 의미한다.

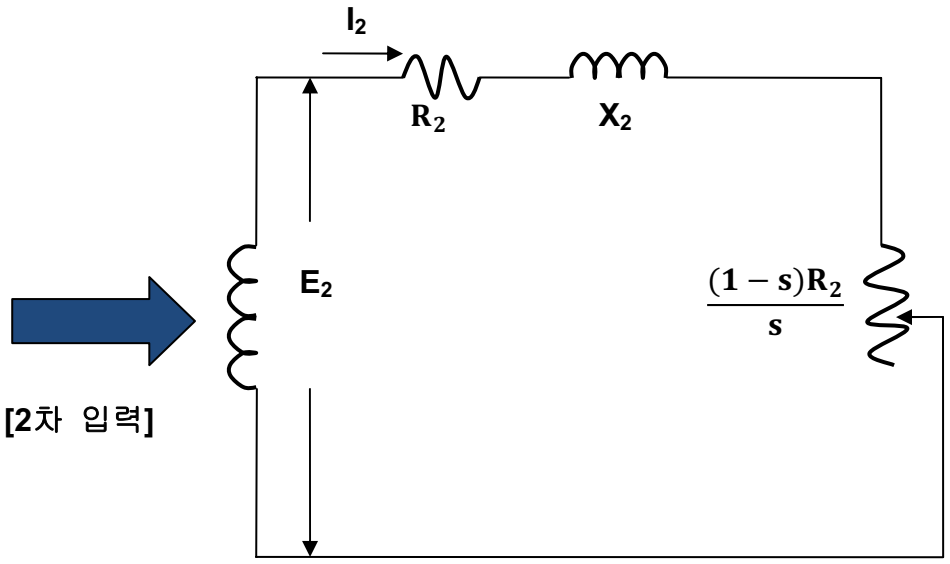
정격출력은 명판에 기재된 정격속도에서 (즉, 정격슬립에서) 모터가 발생시키는 기계적인 출력을 의미하며 (이를 축의 출력이라 함.) 전기적인 출력이 아님을 유의하기 바란다.

이때 축에서 발생되는 토크를 알기 위해서는 정격속도로 정격출력을 나누어 주기만 하면 된다.

1차에서 입력된 전기적인 입력은 1차 회로의 (즉, 고정자) 철손과 동손을 공급하고 난 나머지를 2차 회로에 (즉, 회전자) 입력으로 공급한다.

2차 회로의 전기적인 입력은 2차 회로의 동손을 공급하고 그 나머지를 기계적인 출력으로 부하에 공급하게 된다.

이러한 메커니즘을 앞에서 설명한 회전자에 대한 등가회로를 통해 설명한다.



[2차 입력 및 손실을 설명하기 위한 등가회로]

위 그림에서 1차에서 공극을 통해 전달되는 2차 입력은 (유효전력을 의미함.) 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_2 = I_2^2 \times R_2 + I_2^2 \times \frac{(1-s)R_2}{s} = \frac{I_2^2 \times R_2}{s}$$

$$= P_L + P = \frac{P_L}{s} = \frac{P}{1-s}$$

$$\text{위 식에서}, P_L = I_2^2 \times R_2, \qquad P = I_2^2 \times \frac{(1-s)R_2}{s}$$

2차만을 생각해 보면 2차의 입력은 슬립에 따라 2차의 동손과 (**P_L**) 등가부하에 공급되는 전력이 (**P**) 결정됨을 보여준다.

이는 전동기에 명판을 보면 2차의 동손을 구할 수 있음을 의미하는데 가끔 현실적으로 우리가 마주칠 수 있는 사항이니 간단하게 설명한다.

또한 전기기계에 대한 기사시험을 준비하거나 할 경우에도 필요한 사항이니 잘 알아놓으면 유용할 것이다.

만약 전동기의 명판에 60[KW], 3550[rpm]이라고 되어 있다고 할 때 2차의 동손은 어떻게 되며, 또한 정격부하에서 전동기가 낼 수 있는 토크는 얼마일까?

앞에서 설명한대로 슬립을 구하는 것으로부터 시작한다.

$$s = \frac{3600 - 3550}{3600} = \frac{450}{3600} = 0.125$$

$$P_2 = \frac{P}{1 - s} = \frac{60}{1 - 0.125} = 68.751[KW]$$

$$P_L = s \times P_2 = 0.125 \times 68.571 = 8.571[KW]$$

그리고 2차 효율은 2차 입력에 대한 모터의 기계적인 출력이므로 **P**를 **P_2**로 나누어주면 간단하게 알아낼 수 있다.

이제는 토크를 구하는데 토크를 알기 위해서는 기계적인 출력에 대하여 기본 개념을 잘 이해하고 있는 것이 중요하다.
모터를 이해하는데 필요한 기본적인 사항은 다음 절에서 설명하기로 하며 여기서는 이를 독자들이 이해한 상태라는 가정하에 설명한다.

회전하는 물체의 기계적인 출력과 (Power) 회전력의 (Torque) 관계는 다음과 같은 식으로 설명한다. (아래의 식에서 [rps: revolution per second] 임.)

$$P = \omega \times T$$

$$P: KW$$

$$T: N * m = J$$

$$\omega = 2\pi n, n: [rps]$$

위의 기계적인 출력과 회전력과의 관계를 모터의 출력에 적용해본다.

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n} = \frac{P}{2\pi \times \frac{N}{60}} [N * m]$$

위 식에서 N은 모터의 정격속도이며 명판에 기재된 [rpm]의 값이다.

위 식을 이용하여 예를 모터의 정격토크를 독자들이 구해보기 바란다.

앞의 토크의 식으로부터 우리가 흔히 책에서 접하면서도 무심코 지나가는 동기와트의 개념을 알아본다.

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n} = \frac{(1-s) \times P_2}{2\pi(1-s)n_s}$$
$$= \frac{P_2}{2\pi n_s}[N * m]$$

앞 식에서 s는 물론 모터의 정격슬립이며 n_s는 모터의 동기속도 [rps; 초당 회전속도]이고, 정격속도와 동기속도 및 정격출력과 2차 입력과의 관계에서 슬립 s가 관계되어 변화되는 것은 앞에서부터 계속 설명되어온 내용이라 이해가 쉽게 갈 것으로 생각된다.

앞의 식과 같이 동기속도로 토크를 나타내고 있는 것을 **"동기속도로 나타낸 토크 (Torque in Synchronous Speed)"**라고 책에서 소개하고 있는 것이다.
이렇게 나타낸 물리적인 의미는 필자도 잘 모르기 때문에 뭐라고 설명을 할 수는 없지만 회전자로 입력되는 전기적인 입력과 실제로 모터의 축에서 얻을 수 있는 기계적인 구동력과의 관계를 보여준다는 것이 아닐까 생각한다.

4.6 역학적인 개념들의 이해

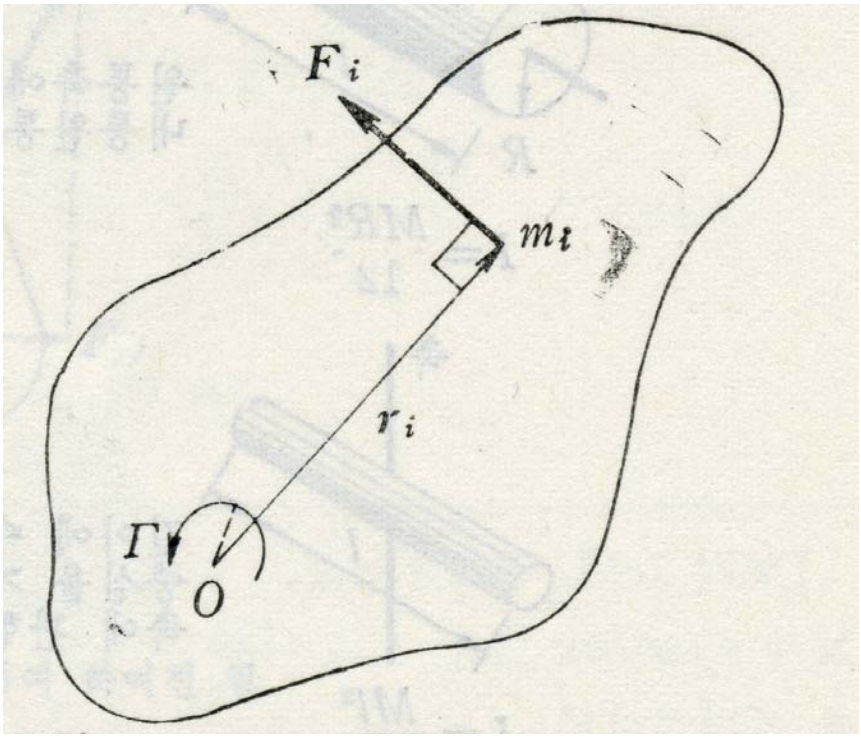
전기기계를 공부하다 보면 역학적인 기본개념을 요구할 때가 많은데 사실 전기를 전공한 엔지니어들은 이러한 사항들을 기본적으로 배웠지만 무심코 넘어가는 경우가 많으며, 그 중요성에 대한 이해가 부족한 것도 사실일 것이다.
하지만 전기기계를 잘 알기 위해서는 역학적인 개념들을 잘 알고 있어야 하며 여기서는 전기기술자들이 알고 있으면 유용할 것으로 생각되는 역학적인 개념들을 간단하게 설명하도록 한다.

4.6.1 관성모멘트 (Moment of Inertia)

그리고 우리가 잘 알고 있듯이 관성이라고 하면 자연계의 현상들이 자신의 본래 상태를 유지하고자 하는 성질이며, 회전하는 물체가 계속적으로 회전을 하고자 하는 성질을 관성모멘트라고 설명할 수 있다.
관성모멘트에 대한 정의와 개념은 물리학이나 동역학에 관련된 서적에 잘 설명되어 있으니 독자들이 직접 찾아서 참고하기 바란다.

필자의 물리학에 대한 한계로 인해 여기서는 간략하게 관성모멘트의 개념과 전기기계인 모터에 적용할 수 있는 정도로 설명을 하고자 한다.

관성모멘트는 다음과 같이 정의되며 여기서 인용된 그림은 청문각에서 출판된 대학기초물리학임을 밝힌다.



지금부터 설명되는 내용들은 가벼운 마음으로 읽어가기 바라며 어렵다고 느낄 경우에는 그냥 뛰어넘기 바란다.

앞의 그림처럼 강체가 회전축 O를 중심으로 하여 전체 회전력 에 의해 자유롭게 회전한다면 미소질량소 m_i와 이것의 가속도를 곱한 것이 작용하는 힘인 F_i가 되며 F_i에 의한 회전력 Γ_i는 F_i와 작용거리 r_i를 곱한 것이 되며, 또한 가속도는 회전반지름과 각 가속도 α를 곱한 것이 된다.

위에서 설명한 관계를 수식으로 정리내면 다음과 같다.

$$F_i = m_i \times a = m_i \times r_i \times \alpha$$

$$a = r \times \alpha$$

$$\Gamma_i = r_i \times F_i$$

$$= m_i \times r_i^2 \times \alpha$$

그리고 전체 회전력인 Γ는 다음과 같이 모든 미소질량소를 합한 것이 된다.

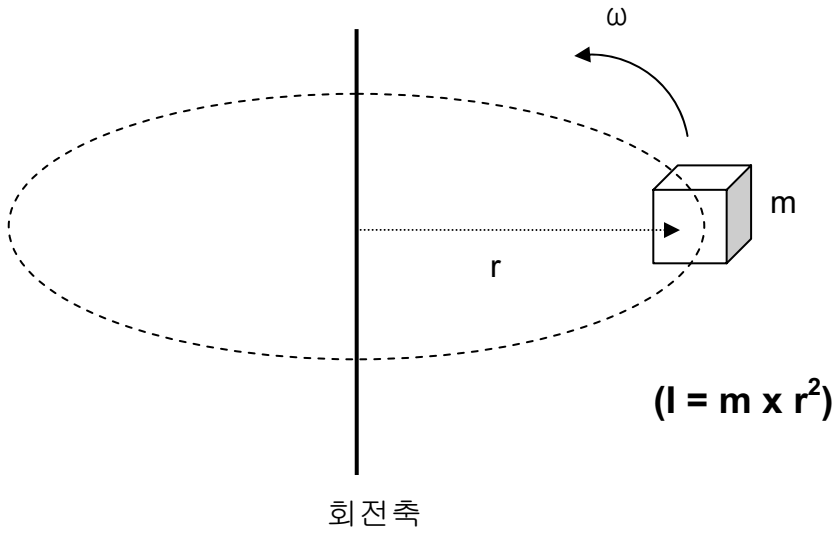
$$\Gamma = \sum_i \Gamma_i = \sum_i m_i \times r_i^2 \times \alpha = \sum_i (m_i \times r_i^2) \times \alpha$$

$$= I \times \alpha$$

$$\therefore I = \sum_i (m_i \times r_i^2)$$

여기까지가 관성모멘트라는 물리적인 개념을 수학적으로 계산하는 과정인데 일반식을 보여주었기 때문에 어렵다고 느낄 수도 있다.

이를 좀더 쉽게 설명하면 다음과 같이 질량 m인 하나의 물체가 회전축을 중심으로 회전할 경우 관성모멘트는 회전반경의 제곱과 질량을 곱하고 회전하는 물체의 각 가속도를 곱한 것으로 나타낸다는 것이다.

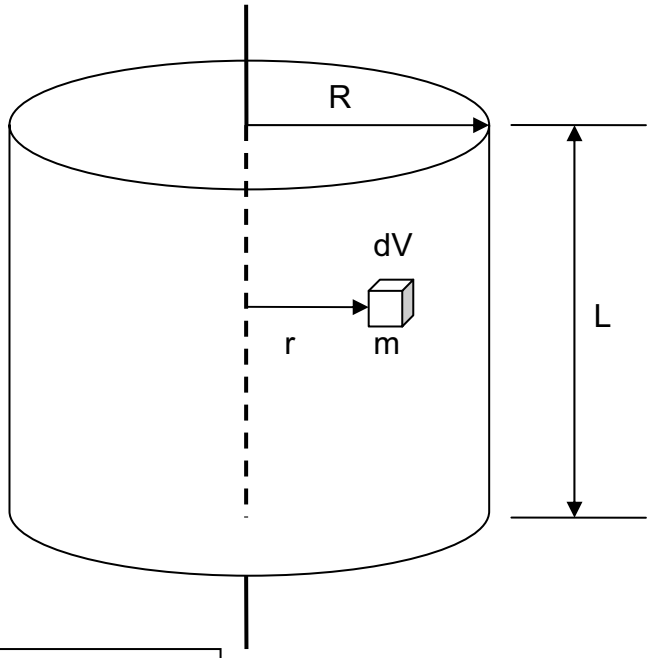


[단일 회전체의 관성모멘트]

그리고 전기기술자들은 모터의 회전자의 형태처럼 속이 꽉 들어찬 원통물체의 경우에 한정해서 생각해도 충분할 것이다.

여기서는 앞의 관성모멘트에 대한 식에서 정의된 것을 이용하여 모터의 회전자와 같은 원통형 물체에 대한 관성모멘트를 직접 구해 보도록 한다.

적분에 대한 약간의 지식이 필요하며 어렵다고 느낄 수 있는데 흥미가 있는 독자들은 읽어보기 바라며, 그렇지 않을 경우 결과만 참고하기 바란다.

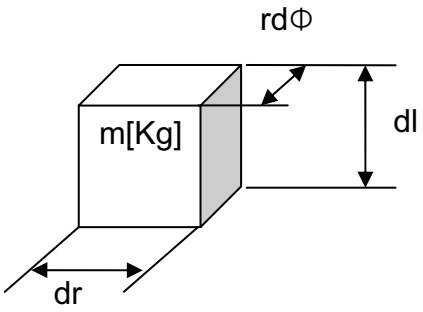


R: 반지름 **[m]**
L: 길이 **[m]**
r: 미소체적소까지의 거리 **[m]**
m: 미소체적소의 질량 **[Kg]**
ρ : 밀도 **[Kg/m^3]**
dV: 미소체적소의 부피 **[m^3]**

[모터의 회전자 형태의 원통의 관성모멘트]

위 그림의 미소체적소는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$dV = dr \cdot rd\Phi \cdot dl \ [m^3]$
$m = \rho \cdot dV \ [Kg]$



[미소체적소의 질량]

이제 관성모멘트를 구하기 위해서는 미소체적소를 회전체의 전 체적에 대하여 적분을 하면 되는데 각 변수의 적분구간은 다음과 같다.

$$0 \le r \le R,$$
$$0 \le \phi \le 2\pi,$$
$$0 \le l \le L$$

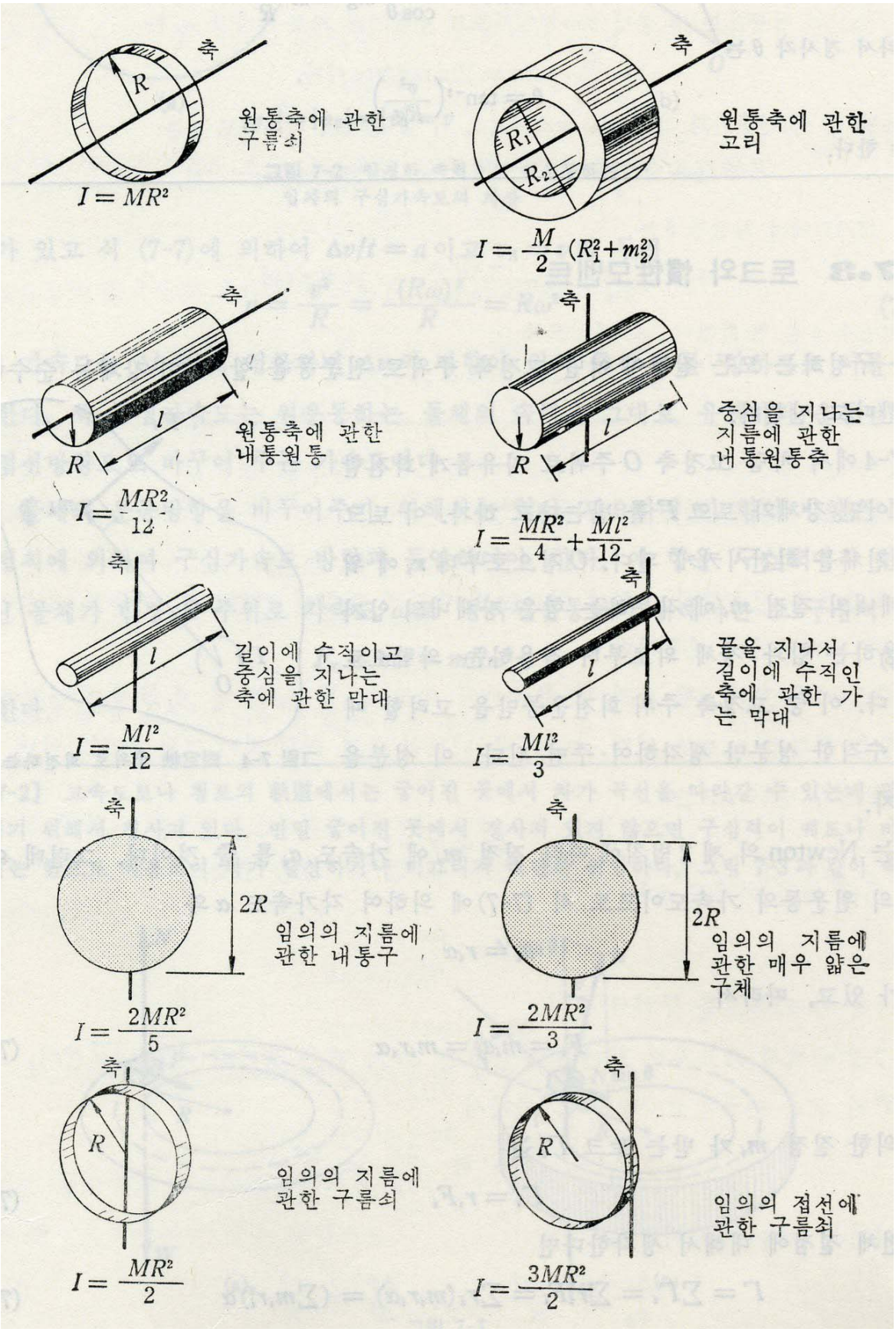
이제 변수가 3개인 삼중적분을 해 본다.

$$\rho \int_0^R \int_o^{2\pi} \int_0^L r^2 \times dr \times rd\phi \times dl$$
$$= \rho \times L \int_0^R \int_o^{2\pi} r^3 \times drd\phi$$
$$= \rho \times L \times 2\pi \int_0^R r^3 \times dr$$
$$= \frac{\rho \times \pi \times R^4 \times L}{2}$$
$$= \rho \times \pi \times R^2 \times L \times \frac{R^2}{2}$$
$$= \frac{M \times R^2}{2} [Kg \cdot m^2] \ (=> M = \rho \times \pi \times R^2 \times L)$$

앞 적분과정은 참고로 살펴보고 맨 끝 식은 원통의 전체 체적에 원통을 구성하는 물체의 밀도를 곱해주면 전체 질량인 M이 된다는 의미이다.

우리는 가끔 모터와 관련된 자료에서 GD^2이라는 것을 마주치게 되는데 바로 관성모멘트를 의미하며 여기서 G는 물체의 형상 및 구성하는 재질에 따라 결정되는 상수이며 D는 지름을 의미한다. (물론 D = 2R 임.)

앞에서 살펴본 회전자와 같은 물체의 G의 값은 $\frac{M}{8}$ 임을 알 수 있다.
다음은 다양한 형태의 물체에 대한 관성모멘트를 정리해 놓은 표이며 흥미가 있는 독자들은 몇 가지에 대하여 직접 구해볼 것을 추천한다.



[다양한 형태 및 회전축에 따른 관성모멘트]

이와 같이 관성모멘트는 같은 형태라고 하여도 회전축이 달라지면 그 값도 달라지는 특성이 있다.

이와 같은 원리를 이용하는 대표적인 스포츠가 피겨스케이팅인데 김연아 선수가 맨 처음 회전을 시작할 때 관성모멘트가 최대가 되도록 몸의 형태를 만들었다가 회전을 할수록 관성모멘트가 점점 작아지도록 몸의 형태를 만들어 항상 거의 같은 회전속도를 얻을 수 있도록 하는 것이다.

이와 같이 스포츠에도 과학의 원리가 숨어 있는 것이며, 우리의 일상생활에도 적용되고 있기 때문에 우리 전기기술자들도 기본적인 사항들은 반드시 숙지하여 업무에 활용할 수 있도록 하는 것이 무척 중요하다고 할 것이다.

관성모멘트에 대한 사항은 필자의 한계로 인해 여기까지로 한다.

4.6.2 회전체가 가진 운동에너지

물체가 (여기서의 물체란 강체 (强體: Rigid Body)를 의미함) 회전을 하며 정지하고 있는 상태라 하더라도 역학적인 에너지를 가지게 된다.

속도 v[m/sec]로 직선운동을 하는 물체는 $\frac{1}{2}\mathbf{mv^2}$[J]의 운동에너지를 갖는 것은 너무 자주 인용되어 누구나 잘 알고 있을 것이라 생각한다.

또한 각속도 ω[rad/sec]로 회전하는 물체는 $\frac{1}{2}\mathbf{I\omega^2}$[J]의 운동에너지를 갖는다.

두 식을 보면 알겠지만 무척 유사함을 알 수 있는데 잘 기억했다가 활용할 수 있기를 바라며, 회전체의 운동에너지 식의 I는 물론 관성모멘트이다.

그리고 중요한 사항인데 꼭 기억하고 활용하여야 하는 관계식이 하나 있다.

회전체가 가진 일률인 Watt인데 사실 우리의 관심은 전체 얼마나 일했는가 보다는 매시간 얼마의 일을 하는가가 더 중요하기 때문이며, 회전체의 일률은 다음과 같이 표현된다.

$$P = k \times D^2 \times L \times n \ [Kw]$$

위 식에서 각 기호의 의미는 다음과 같다.

k: 회전자의 형상이나 구조에 따른 계수

D: 회전자의 직경 (또는 고정자의 내경) [m]

L: 회전자의 유효길이 [m]

n: 회전속도 [rpm] 또는 [rps]

이제 위 식이 갖는 물리적이 의미와 출력을 제한하는 요소들에 대하여 하나씩 살펴보도록 한다.

직경 D가 커지는 경우 회전자의 주변속도가 커지기 때문에 원심력이 증가하여 문제를 일으킬 수 있어 D를 크게 하는데 제한이 된다.

길이 L을 크게 하면 기계적인 중량으로 인해 처짐이 발생할 수 있고 이로 인해 진동과 같은 기계적인 문제가 발생할 수 있어 L이 제한을 받는다.

n을 크게 하면 기계를 소형을 할 수 있으나 이때는 고속회전에 따른 기계적인 강도 및 소음, 진동으로 제한을 받는다.

이를 종합하면 다음과 같이 우리가 흔히 접하는 현상들에 대하여 그 숨은 개념을 이해할 수 있다.

저속도 모터의 경우 (즉 극이 많은 모터) 직경이 크고 길이는 작다.
고속도 모터의 경우 직경은 작지만 긴 형태를 갖는다.

그리고 고속으로 회전하는 터빈과 같은 설비는 용량에 비해 크기가 무척 작다고 생각하는 경우가 많은데 바로 위의 식에서 연유한 것이다.
이와 같이 모터를 잘 이해하기 위해서는 기계적인 사항들에 대한 기본개념을 잘 알고 있는 것이 무척 중요하며, 꼭 물리서적이나 역학서적을 같이 참고하는 전기기술자가 되기를 추천한다.

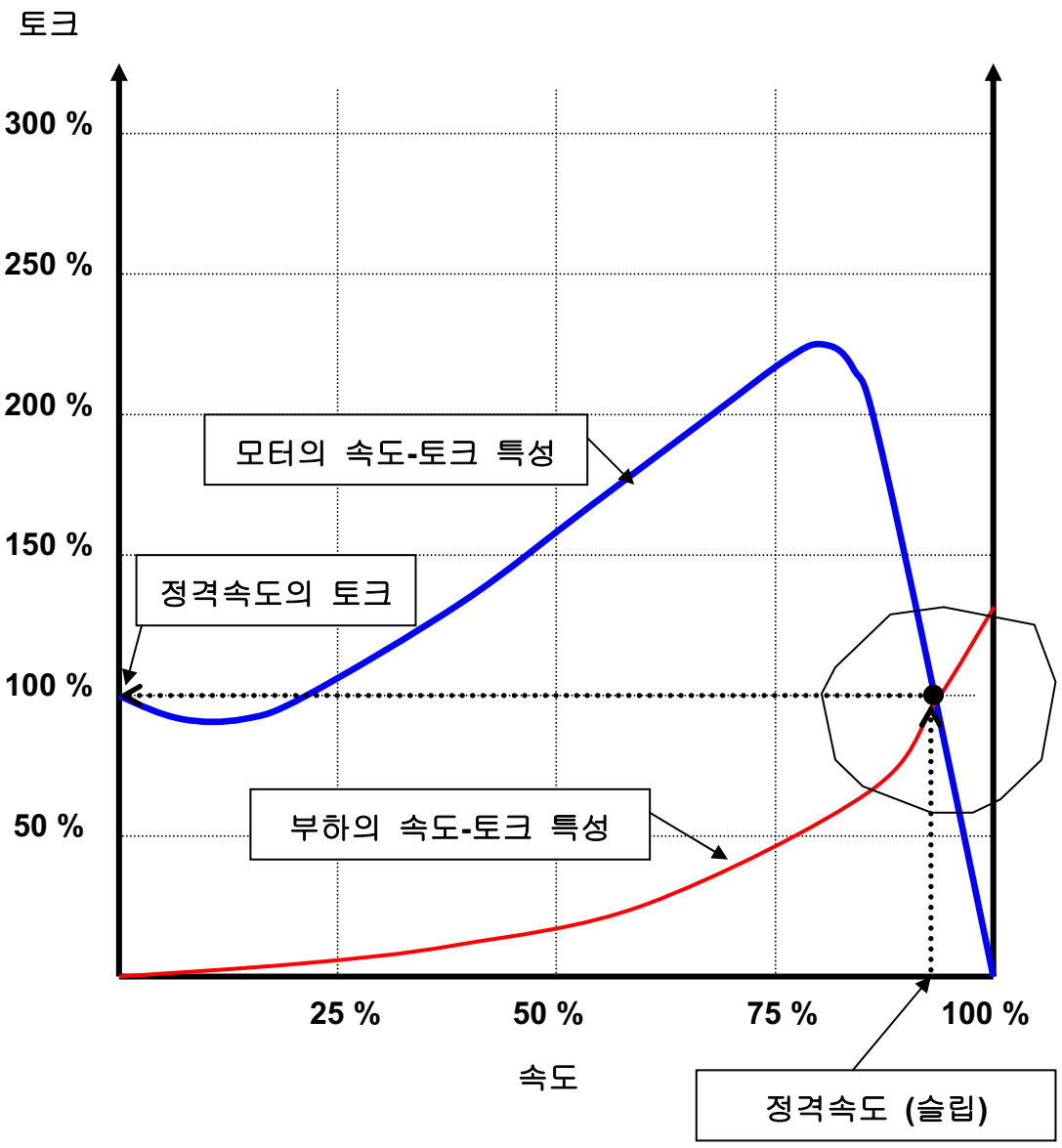
또한 전력계통을 학습하다 보면 안정도에 대한 이해가 필수적인데 과도안정도를 설명할 때 거의 대부분 회전체의 운동방정식과 함께 시작한다.
이는 전력계통이라고 하는 것이 수많은 발전기들이 접속되어 있는 하나의 커다란 회전체라고 볼 수 있기 때문이며 이 또한 회전체에 대한 역학적인 개념을 이해하고 있는 것이 안정도의 이해를 위한 필수조건이 되는 것이다.

4.7 속도-토크 특성곡선의 이해

동기전동기나 직류전동기는 일단 공급전압이 결정되면 부하의 크기에 관계없이 그 속도는 일정하게 유지된다.
물론 직류전동기의 경우에는 부하가 커지면 약간의 속도가 변할 수 있지만 실제의 운전에서는 그 영향을 무시해도 좋다는 것이 필자의 경험이다.

하지만 유도전동기의 경우에는 부하에 따라 속도가 변하는 특성이 있으며 정격부하에서의 속도를 기준으로 하여 명판에 기재하고 이때의 슬립을 앞에서 설명한 대로 정격 슬립이라고 한다.
따라서 다른 전동기들을 공부할 때 접할 수 없는 속도-토크 특성곡선이 유도전동기에서는 아주 중요하게 된다.
여기서는 속도-토크 특성곡선이 갖는 물리적인 개념들을 이해하도록 한다.

먼저 다음과 같은 전형적인 속도-토크곡선을 가지고 설명을 시작한다.



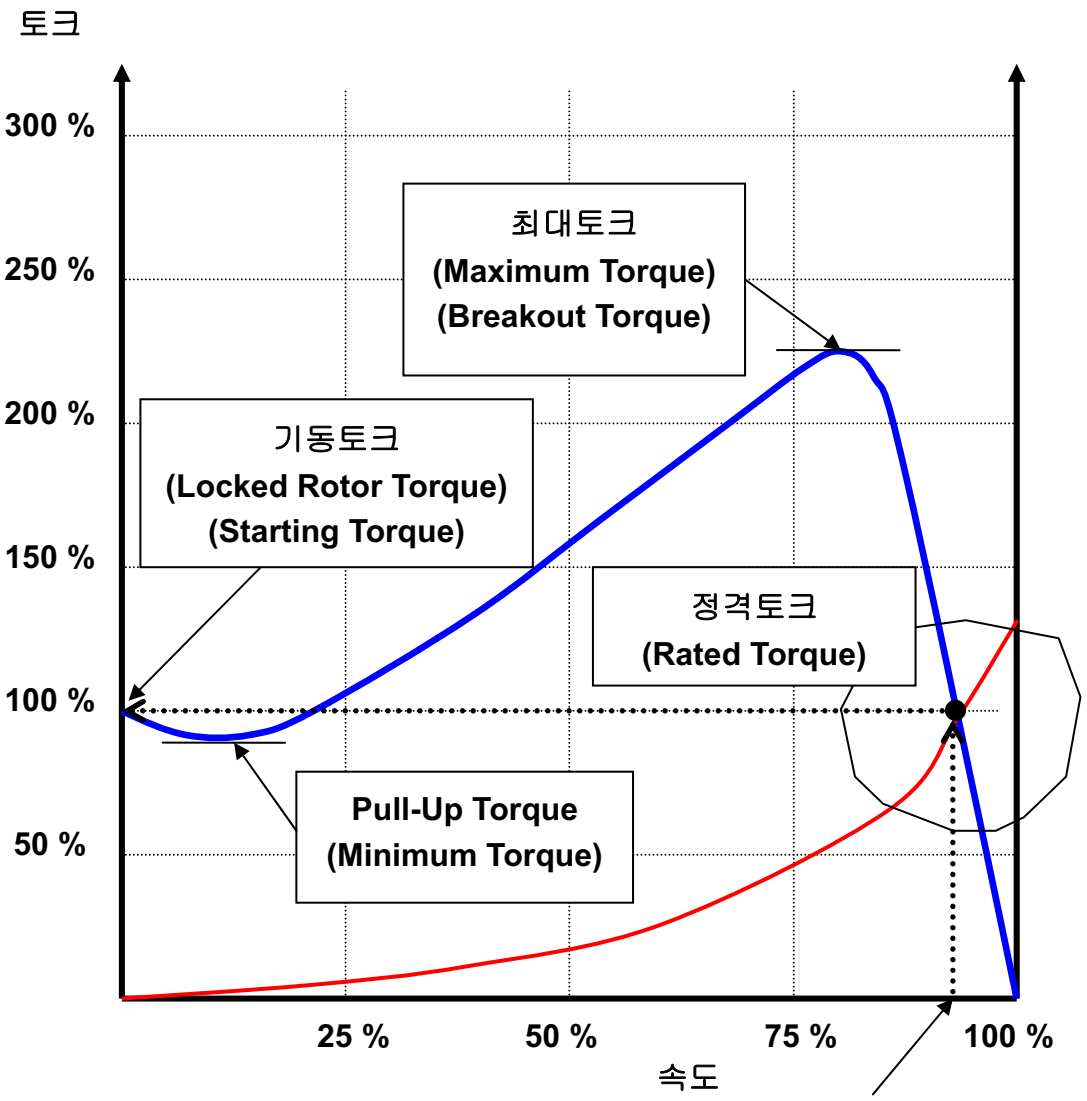
[설명을 위한 속도-토크 특성 곡선]

위의 그림에서 알 수 있듯이 모터를 기동하면 속도의 증가에 따라 토크가 약간 감소했다가 최대토크까지 증가하고 곧 바로 부하의 요구토크와 만나는 점인 정격토크를 지나 무부하토크로 된다.

이 무부하 토크가 우리가 흔히 현장에서 직접 수행하는 솔로테스트 시험에서 모토가 내는 토크이며 rpm을 재 보면 동기속도로 회전함을 확인할 수 있다.

그리고 펌프와 같은 부하의 경우 Discharge 밸브를 닫은 상태에서도 거의 동기속도로 회전함을 확인할 수 있는데 이를 무부하상태라고 이해하면 된다.

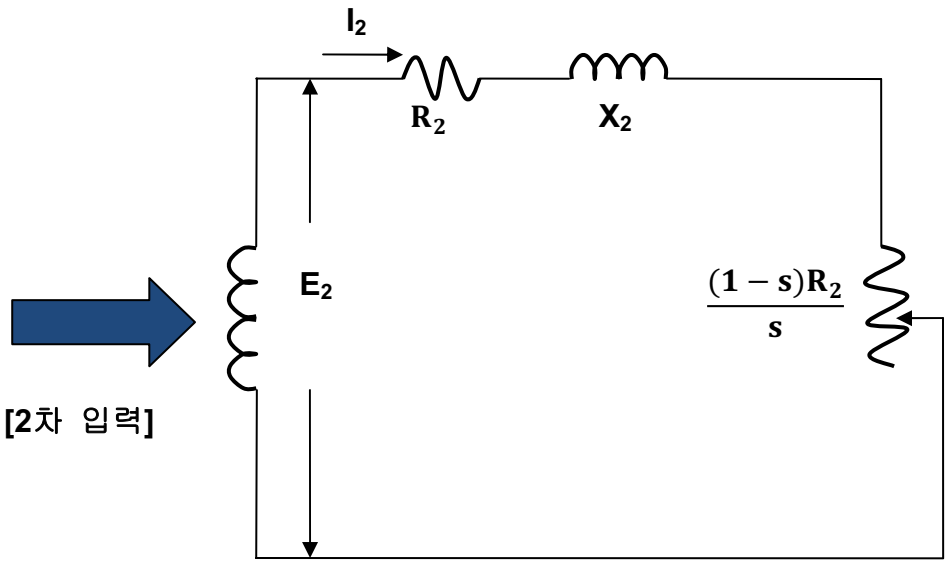
그리고 속도-토크곡선에서 토크의 구간에 따라 통상 부르는 이름이 있는데 아래 그림을 참고하여 파악해 놓기 바라며 영문으로 표기된 토크도 알아놓으면 관련자료들을 이해하는데 도움을 받을 수 있다.



[각 토크의 구분]

좀더 상세한 사항은 NEMA (National Electric Machinery Manufacturers Association; 미국 전기기계 제작자 협회)를 참고하기 바란다.

그렇다면 왜 속도에 따라 이러한 토크가 발생하는지 앞에서 사용했던 회전자 회로의 특성을 가지고 설명한다.



[토크특성 설명을 위한 회전자 회로]

다음 수식들은 위의 회전자 회로를 보면서 이해하기 바란다.

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}}$$

$$P = I_2^2 \times \frac{(1-s)R_2}{s}$$

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{I_2^2 \times \frac{(1-s)R_2}{s}}{2\pi(1-s) \times n_s} = \frac{I_2^2 \times R_2}{2\pi \times s \times n_s}$$

$$= \frac{R_2}{2\pi \times s \times n_s} \times \frac{E_2^2}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}$$

$$= \frac{sE_2^2}{2\pi \times n_s \times (R_2^2 + s^2X_2^2)}$$

토크의 식에서 알 수 있듯이 슬립과 (즉 회전자의 속도와) 관계를 갖는 것을 알 수 있으며 회전자의 속도를 변수로 하여 (슬립을 변수로 하여) 각 속도에 대한 토크의 값을 그래프로 나타낸 것을 속도-토크 특성곡선이라 하며 그 전형적인 형태를 앞의 그림이 보여준다고 생각하면 된다.

또한 회전자의 전류를 보면 역시 슬립과 관계가 있고 s=1인 기동순간에 가장 큰 값을 가졌다가 s가 감소함에 따라 감소하여 s=o인 동기속도에서 전류는 흐르지 않게 되는데 이는 회전자의 단락봉이 동기속도에서는 회전자속을 끊을 수 없어 회전자 회로에 전압이 유기되지 않아 전류가 흐르지 않는 물리적인 개념과 일치하고 있다.

기동전류가 정격전류에 비해서 매우 큰데 비해 기동토크는 그다지 크지 않은 것은 회전자 회로의 리액턴스 성분이 기동시에 가장 크고 이에 따라 회전자 전류의 역률이 나쁘기 때문에 유효전력이 상대적으로 작기 때문이다.

2차 회로의 (즉 회전자 회로의) 임피던스와 역률은 다음과 같다.

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2$$

$$\cos\theta = \cos\tan^{-1}\frac{sX_2}{R_2}$$

식에서 알 수 있는 바와 같이 기동시에 s=1이므로 역률이 가장 낮고 기동이 진행됨에 따라 s가 감소하므로 역률이 점점 좋아지기 때문에 기동순간의 속도-토크 특성곡선이 얻어지는 것이다.

식만을 보면 동기속도에서는 s=0이라서 역률이 가장 크다고 생각되지만 전류가 흐르지 않는 상태이기 때문에 역률은 의미를 갖지 않음도 같이 알아두자.

속도-토크 특성곡선에 대하여 한마디로 요약하면 “유도전동기만이 가진 특별한 특성으로써 회전자의 도체가 고정자 권선에 의한 회전자속을 끊는 속도인 슬립에 따른 토크를 그래프화 한 것”이라고 할 수 있다.

본 자료는 유도전동기의 개념을 정성적으로 이해할 수 있도록 작성하기에 복잡하게 수식을 나열하지는 않겠지만 독자들은 전기기계에 관련된 책자를 반드시 참고하여 수식이 가진 물리적인 개념을 파악하기를 권한다.

4.8 NEMA의 속도-토크 특성이해

NEMA에서는 구동되는 부하의 특성에 적합한 모터의 속도-토크 특성곡선을 지정해서 모터를 설계하고 제작하도록 하고 있다.

여기서는 NEMA에서 제시하고 있는 속도-토크특성 곡선의 종류와 이를 구현하기 위한 방법을 살펴보도록 한다.

4.8.1 NEMA의 Type별 속도-토크특성

NEMA에서는 구동부하에 적합하도록 5개 Type의 속도-토크특성으로 구분하여 표준 속도-토크 특성을 갖도록 설계기준을 정립하여 제작하고 있다.

구분	특성
A형	아래에 설명되는 모든 Type의 성능비교 표준이 되는 B형보다 항복토크가 다소 높은 것을 제외하고는 B형과 거의 같은 특성을 가짐.
B형	성능비교의 기준이 되며 따라서 가장 다양한 적용부하를 갖고 있고 대표적인 것으로 원심펌프, 팬, 송풍기 및 전동기구를 들 수 있음.
C형	B형에 비해 높은 구속토크와 낮은 항복토크를 갖는 것이 특징이며 큰 기동토크가 필요한 부하에 적용됨.
D형	매우 큰 구속토크와 슬립이 큰 것이 특징이며, 적용부하는 주로 관성이 큰 엘리베이터, 펀치프레스 등이 대표적임.
E형	고효율의 전동기로서 최근 NEMA에 구분 포함되었으며 특성은 B형과 유사하고 적용부하 역시 B형과 유사함.

위 표의 설명에서 항복토크란 최대토크, 구속토크란 기동토크와 같은 개념이다.

위의 표와 같은 성능은 회전자의 철심에 삽입하는 단락봉의 형태와 재질에 의해 결정되며 대표적인 회전자 철심의 슬롯은 다음과 같다.

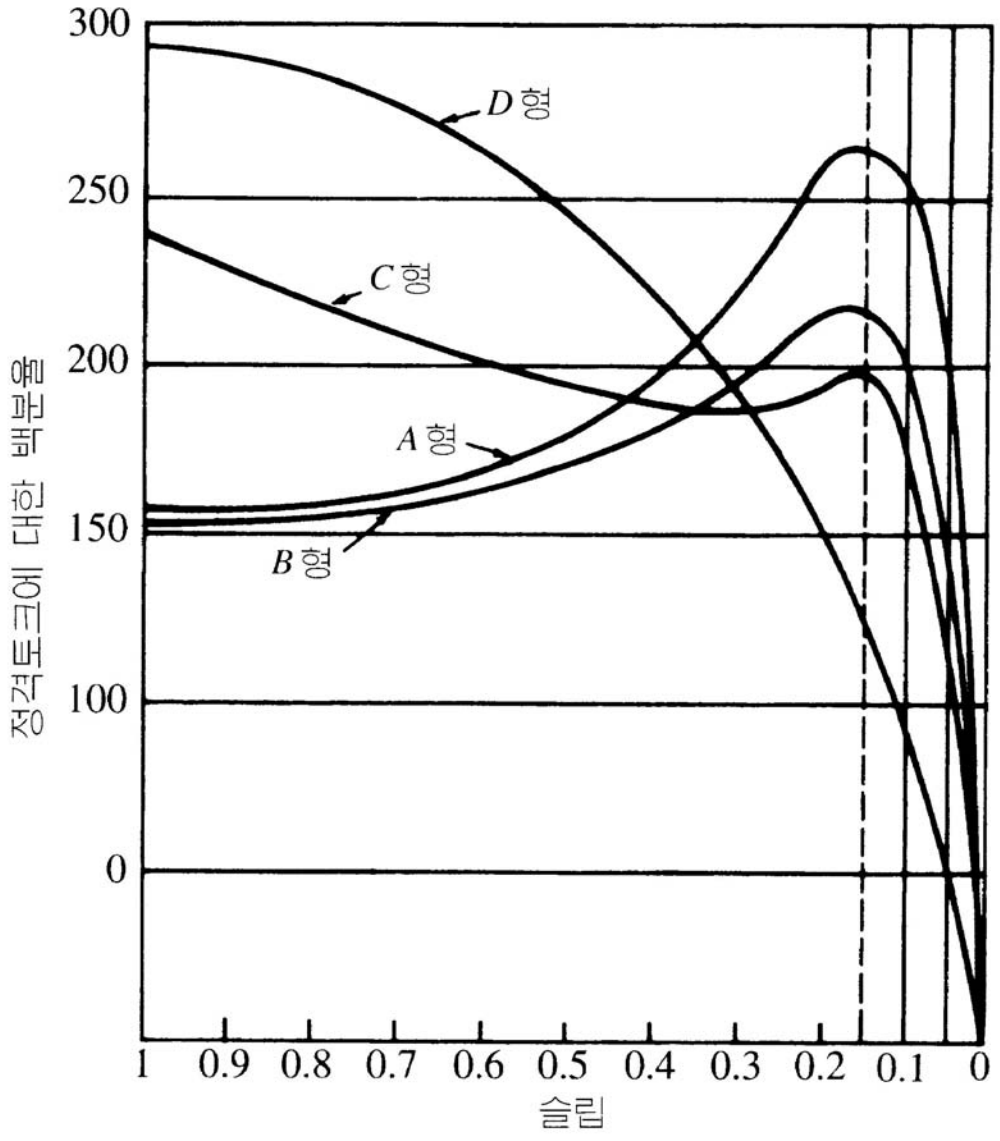
[회전자 철심의 슬롯 구조]

회전자 철심의 구조에서 B형의 것을 Deep Slot형이라 하고, C형의 것을 2중 농형 (Double Cage), D형을 고저항형 (High Resistance)라고 한다.

약간 특이한 형태인 2중 농형이라 불리는 C형의 경우에는 바깥쪽 단락봉과 안쪽 단락봉을 별개로 삽입하고 또한 별도의 단락환을 설치한다.

바깥쪽의 단락봉은 높은 저항과 낮은 리액턴스를 가지며 안쪽 단락봉은 낮은 저항과 높은 리액턴스를 갖게 하여 기동시에는 안쪽 단락봉으로 대부분의 전류가 흐르고 정격슬립으로 운전중에는 바깥쪽 단락봉으로 전류가 흐르도록 하여 아래의 C형에 해당하는 속도-토크 특성곡선을 얻으며 이와 같은 사유로 바깥쪽은 운전권선, 안쪽은 기동권선이라고 부르기도 한다.

이와 같이 얻어지는 각 Type에 대한 속도-토크 특성곡선은 다음과 같다.



4.8.2 NEMA의 각 Type별 특성

NEMA에서는 자신의 표준을 따르는 농형 유도전동기의 구속토크와 항목토크 및 풀업토크에 대한 정보들을 제공하고 있는데 아래의 표는 그 일례이다.

현업을 수행하면서 모터의 교체, 용량증대와 같은 업무들을 수행할 때 모터의 명판정보와 부하의 특성을 기준으로 하여 NEMA를 참고하면 좋다.

	동기속도(rpm)						
	60 Hz 3600	1800	1200	900	720	600	514
hp	50 Hz 3000	1500	1000	750	—	—	—
*A*형 및 *B*형							
$\frac{1}{2}$	—	—	—	140	140	115	110
$\frac{3}{4}$	—	—	175	135	135	115	110
1	—	275	170	135	135	115	110
$1\frac{1}{2}$	175	250	165	130	130	115	110
2	170	235	160	130	125	115	110
3	160	215	155	130	125	115	110
5	150	185	150	130	125	115	110
$7\frac{1}{2}$	140	175	150	125	120	115	110
10	135	165	150	125	120	115	110
15	130	160	140	125	120	115	110
20	130	150	135	125	120	115	110
25	130	150	135	125	120	115	110
30	130	150	135	125	120	115	110
40	125	140	135	125	120	115	110
50	120	140	135	125	120	115	110
60	120	140	135	125	120	115	110
75	105	140	135	125	120	115	110
100	105	125	125	125	120	115	110
125	100	110	125	120	115	115	110
150	100	110	120	120	115	115	—
200	100	100	120	120	115	—	—
250	70	80	100	100	—	—	—
300	70	80	100	—	—	—	—
350	70	80	100	—	—	—	—
400	70	80	—	—	—	—	—
450	70	80	—	—	—	—	—
500	70	80	—	—	—	—	—
*C*형							
1		285	255	225			
1.5		285	250	225			
2		285	250	225			
3		270	250	225			
5		255	250	225			
$7\frac{1}{2}$		250	225	200			
10		250	225	200			
15		225	210	200			
20–200, inclusive		200	200	200			

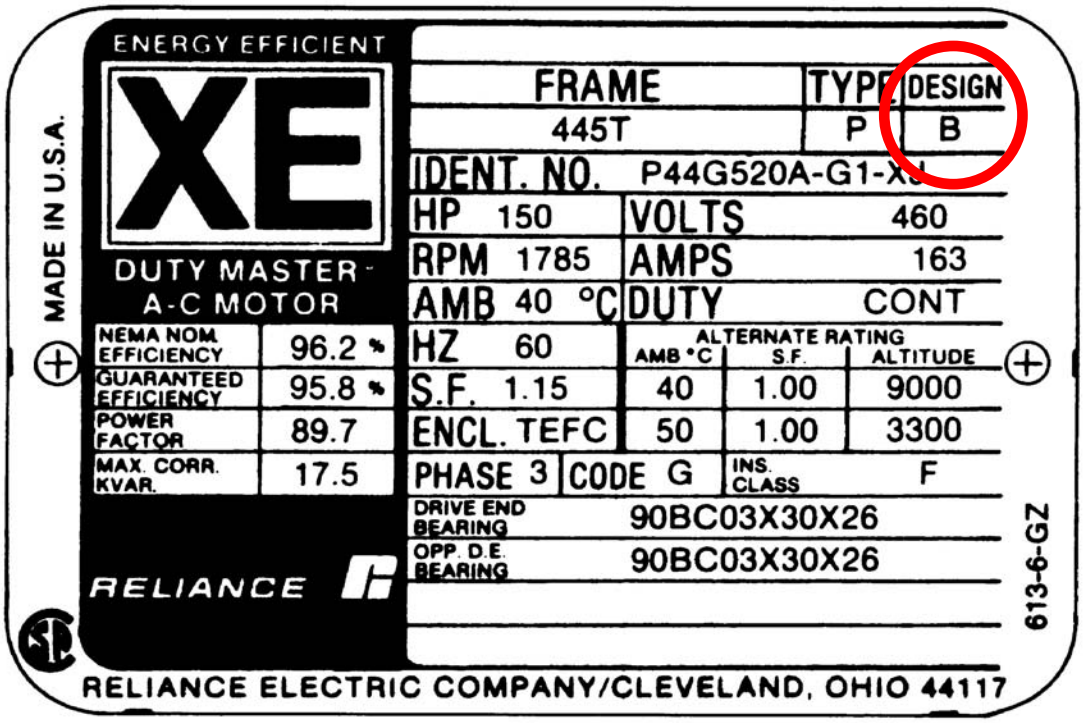
*D*형: 4, 6, 8 극의 150 hp 이하에 대하여 전부하토크의 275%

앞의 표는 기동토크를 정격토크의 백분율로 나타낸 표이다.

표를 보는 방법을 예를 든다면 앞의 네모 박스로 선택된 75마력 모터의 경우 기동토크는 정격토크에 대하여 2극일 경우 105[%], 4극일 경우 140[%], 6극일 경우 135[%]임을 보여주고 있는 것이다.

이와 더불어 최대토크인 항복토크의 값도 정격토크에 대한 백분율로 표기한 표를 제공하고 있으며, 전기 기술자들은 전동기와 관련된 업무를 수행하거나 검토할 때는 언제나 NEMA를 가까이 놓고 항상 참고할 것을 추천하며, 나머지 사항들은 독자들의 몫으로 남겨 놓으니 꼭 확인해 보기 바란다.

아래 그림은 앞의 기동-토크특성을 보여주는 실제 모터의 명판이다.



[실제 모터의 명판 샘플]

명판에서 붉은 색 점선으로 표기된 부분이 속도-토크특성의 유형을 나타내며 통상 “Design Letter”라고 부른다

위 명판을 갖는 모터는 B형의 속도-토크특성을 갖는다.

덧붙이자면 모터의 명판은 마치 사람의 주민등록과 같은 것으로써 각각이 의미하는 바를 잘 알고 있는 것이 현업을 수행하는 전기기술자에게 있어서 필수적이라고 생각하며, 이에 대해 관심이 있는 독자들은 모터의 명판에 대하여 필자가 작성해 놓은 자료를 참고하기 바란다.

4.9 권선형 유도전동기의 개념이해

여기서는 권선형 유도전동기에 대하여 간략하게 그 개념만을 살펴본다.

권선형 유도전동기는 앞에서 설명한 것처럼 회전자에 단락봉을 삽입한 농형과는 달리 회전자에 고정자와 동일한 방법으로 권선을 삽입한 구조를 갖는다.

따라서 회전자의 권선피치 및 상과 극의 수도 역시 고정자와 동일하다.

즉, 고정자의 극수가 P극이고 3상이면 회전자도 역시 그렇다는 것이다.

농형 회전자가 단락봉을 회전자에 붙어 있는 단락환으로 단락을 시켜서 회전자의 순환전류를 만들어 내는데 비해 권선형 회전자는 권선을 외부에 설치한 저항을 통해 단락 시키는 구조로 되어 있다.

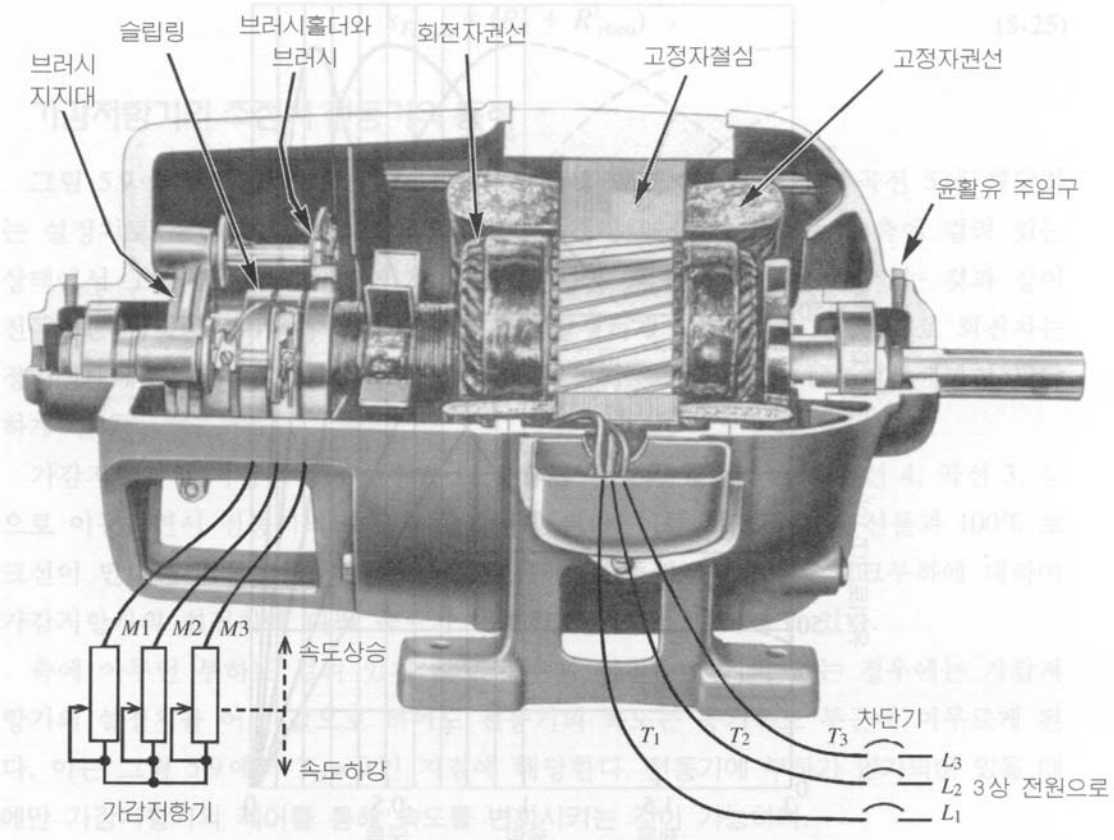
이를 위해 회전하는 물체에 전력을 공급하는 기구인 슬립링 및 슬립링에 접촉하는 브러시와 외부에 별도로 설치된 저항을 가지고 있다.

외부에 설치된 저항은 여러 개의 탭을 가지고 있으며 각 탭의 저항 값으로 기동전류의 제한 및 기동토크를 제어하는 역할을 하도록 한다.

주로 적용되는 부하는 기동토크를 크게 요구하는 대용량의 기중기를 예를 들 수 있으며 특성을 간단히 살펴보도록 한다.

4.9.1 권선형 유도전동기의 구조

앞에서 간단하게 언급한 내용과 함께 다음 그림을 참고하라.



그림을 보면 기동에서부터 가속을 시작하면 저항을 점차로 줄여가면서 동기속도에 도달하면 저항이 완전히 단락 되도록 (즉, 저항이 없는 상태가 되도록) 제어회로를 구성한다.

이렇게 저항의 가감을 제어하기 위해서는 속도를 감지해낼 수 있는 스피드 미터가 필요할 것으로 생각된다.

관심이 있는 독자들은 권선형 유도전동기의 Control Sequence를 찾아서 한번쯤은 검토해 볼 것을 추천한다.

호기심이 많은 독자들은 모터의 기동시간이 무척 짧은데 저항을 가감할 시간이 있겠는가 하겠지만 권선형 유도전동기의 부하는 기동토크가 무척 큰 것들이 주를 이루기 때문에 기동시간이 상당히 긴 것으로 생각되며 아래 속도-토크 특성곡선을 참고하면 이해가 될 것이다.

4.9.2 비례추이와 속도-토크 특성곡선

유도전동기를 공부하다 보면 비례추이라는 (Proportional Shift) 것을 접하게 되는데 수식과 함께 설명되는 것이 대부분이라서 어렵다고 생각하여 그냥 뛰어넘어 가는 경우가 많다고 생각한다.

필자의 경우에도 처음에는 대충 읽어보고 그냥 넘어갔었고 그 다음에는 잘 사용하지 않는 권선형에 주로 적용된다고 해서 대충 넘어갔던 경험이 있다.

그렇지만 전기기계 책을 여러 차례 읽으면서 잘 알아두면 편리할 것 같다는 생각이 들어 이해하려고 몇 번이고 반복해서 읽었던 적도 있다.

간단하게 말하면 비례추이란 회전자 회로의 저항과 회전자 슬립의 비율을 일정하게 유지하면 토크의 값도 일정하게 유지된다는 것이다.

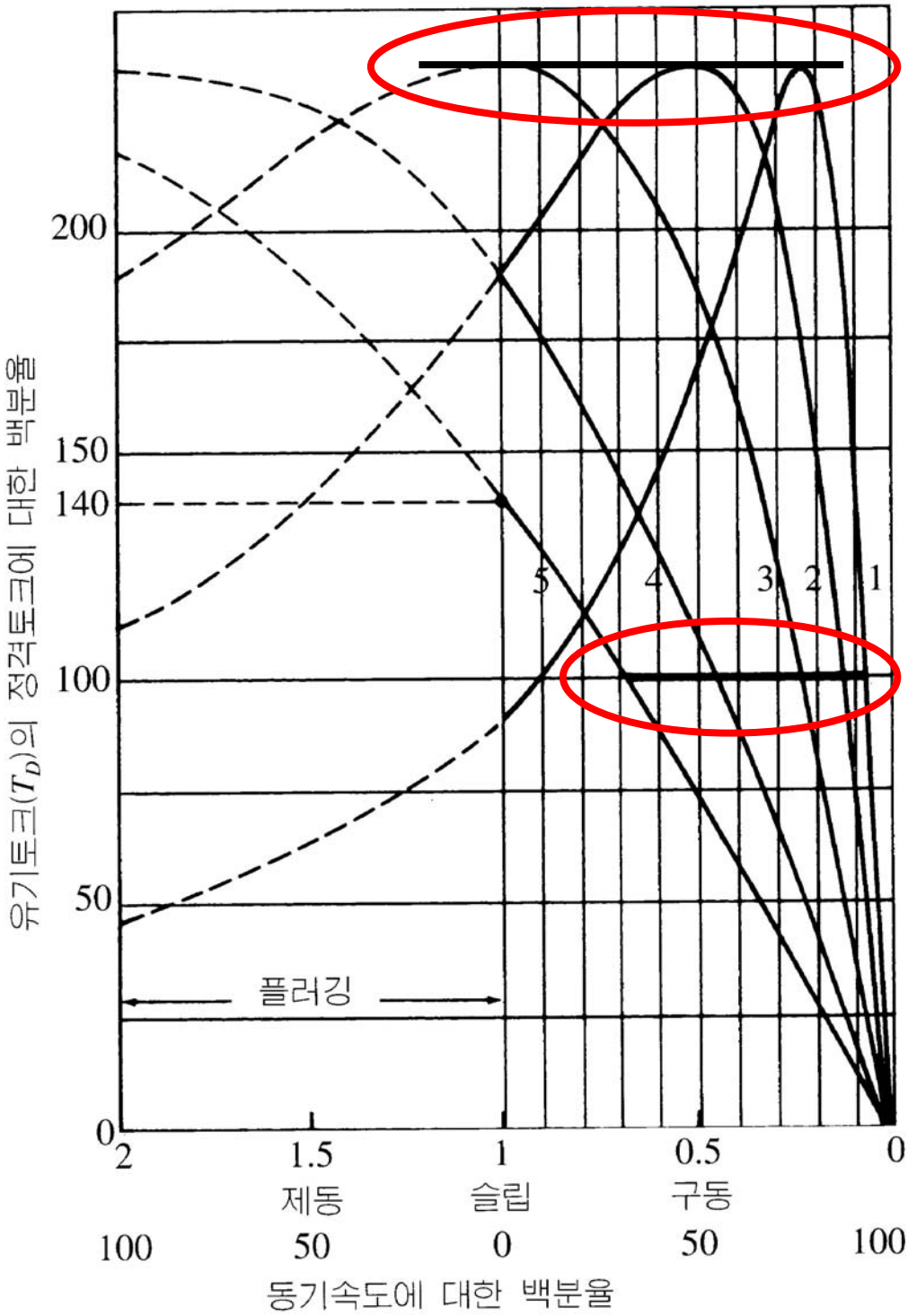
앞에서 설명한 회전자 회로를 참고하면서 읽어가기 바라며 토크는 다음의 식으로 나타냄을 알고 있다.

$$T = k \times I_2^2 \times \frac{R_2}{s}$$

토크의 식에서 만약 슬립을 m배로 변경하면서 동시에 회전자 저항 R_2를 역시 m배 해주면 토크는 변하지 않는다는 것을 알 수 있다.

$$T = k \times I_2^2 \times \frac{mR_2}{ms} = k \times I_2^2 \times \frac{R_2}{s}$$

이와 같은 특성을 비례추이라고 하며 이를 그림으로 나타내면 다음과 같다.



[비례추이를 보여주는 권선형 전동기의 속도-토크 특성곡선]

그림의 붉은 색 타원으로 표기한 부분에서 알 수 있는 바와 같이 슬립에 비례해서 R_2를 변화시키면 정격토크 및 최대토크를 포함하여 모든 토크가 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

5 유도전동기의 기동방법

앞에서 살펴본 바와 같이 유도전동기는 간단함과 견고함 및 높은 효율 등의 특성으로 인해 가장 좋은 동력원의 하나임에 틀림없지만 기동전류가 큰 것이 가장 커다란 단점이다.

이는 용량이 클수록 더욱 문제를 크게 일으킬 수 있는데, 커다란 기동전류는 전동기가 접속된 모선의 전압을 순간적으로 강하시켜 동일 모선에 접속된 다른 전동기를 포함한 타 설비에 영향을 미치기 때문이다.

경우에 따라서는 운전중인 공정의 가동정지를 유발하기도 하며, 조명이 깜박거려 불쾌감을 주기도 하고 또 근무중인 전기기술자들이 “어디서 사고가 났나?” 라고 생각하도록 하여 놀라게 만들기도 한다.

현재는 우리나라의 전력계통의 용량도 방대해지고 품질도 무척 좋아 대용량의 전동기를 직입기동 하더라도 별 문제가 없다고 하지만, 수전계통이 작은 수용가에서는 아직도 영향을 무시할 수 없을 것이다.

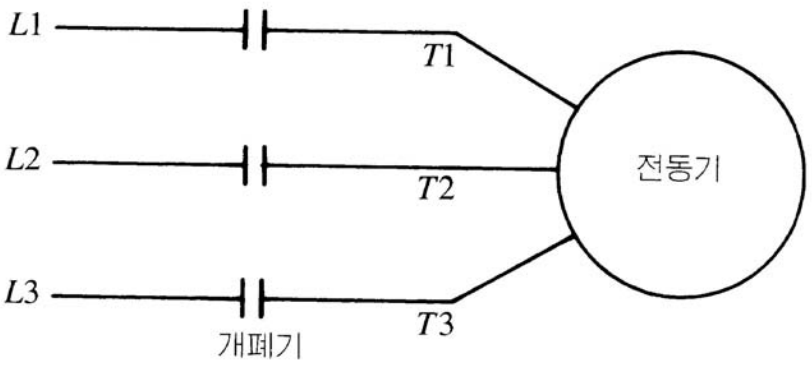
이와 같이 커다란 기동전류의 문제점을 완화시킬 수 있도록 기동방법들이 많이 고안되어 있는데 현업에 응용할 수 있도록 각각에 대하여 간단하게 살펴보자.

유도전동기의 기동방법에는 직입기동, 리액터기동, 단권변압기기동 (또는 콘돌파기동), Soft Starter 방식 및 Inverter를 이용하는 방식이 대표적이다.

5.1 직입기동

말 그대로 전동기의 단자에 정격전압을 전부 인가해서 기동하는 방식이며 구성상 가장 간단한 제어형태를 갖는다.

아래의 그림은 직입기동의 대표적인 기동회로이다.



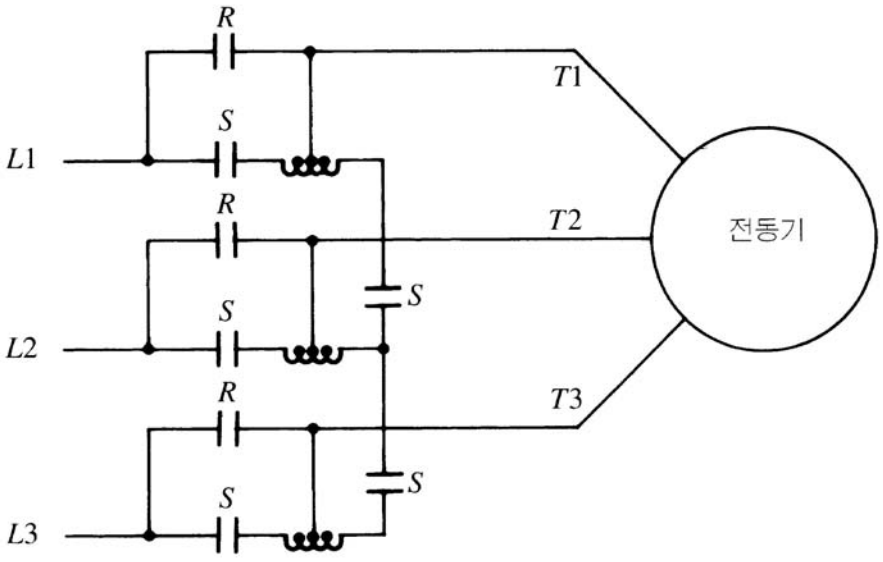
[직입기동회로]

5.2 단권변압기 기동

아래 그림과 같이 전 전압의 (Full Line Voltage) 50%, 65%, 80%의 탭을 갖는 Y-결선 단권변압기를 (또는 기동보상기 혹은 콘돌파) 사용하여 기동전압을 낮추어 공급함으로써 기동전류를 제한하는 방식이다.

Delta 결선된 단권변압기는 사용하지 않는데 이는 우리가 원하는 기동전압을 얻어내기가 번거롭기 때문이라고 한다.

다음 그림은 대표적인 단권변압기 기동회로이며 기동시에 S-접점이 닫히고 R-접점은 개방되어 주어진 탭 전압이 공급되며, 기동이 완료되면 S-접점은 열리고 R-접점은 닫혀서 전 전압이 공급되어 운전된다.



[단권변압기 기동회로]

단권변압기의 장점은 부하의 기동토크에 따라 탭 전압을 조정함으로써 기동전류를 적절하게 낮출 수 있다는 점이다.

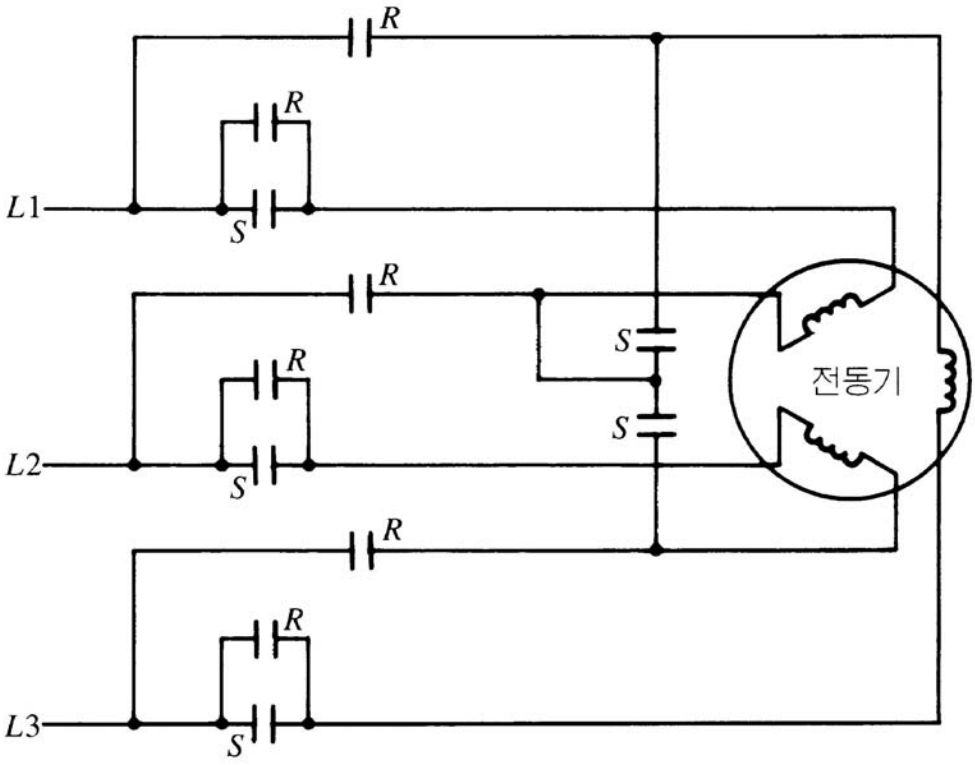
단점이라고 할 수 있는 사항은 MCC (Motor Control Center) 구성이 복잡하고 고전압의 모터에 사용할 경우 잦은 기동에 의해 단권변압기가 손상을 입는 경우가 발생할 수 있다는 점이다.

또한 모터에 공급되는 케이블이 장거리일 경우 단권변압기와 케이블의 정전용량 성분이 공진과 유사한 현상을 일으키는 문제가 발생될 수 있다는 점이다.

5.3 Y-D 기동

기동시에 Y-결선으로 하여 전압을 낮추어 공급함으로써 기동전류를 제한하고 운전시에는 Delta-결선으로 하여 부하토크를 얻는 방식이다.

다음 그림은 대표적인 기동회로이며 기동시에 S-접점이 닫혀서 모터권선을 Y-결선으로 하고 기동이 완료되면 R-접점이 닫혀서 모터권선을 Delta-결선으로 전환하는 방식이다.



[Y-D 기동회로]

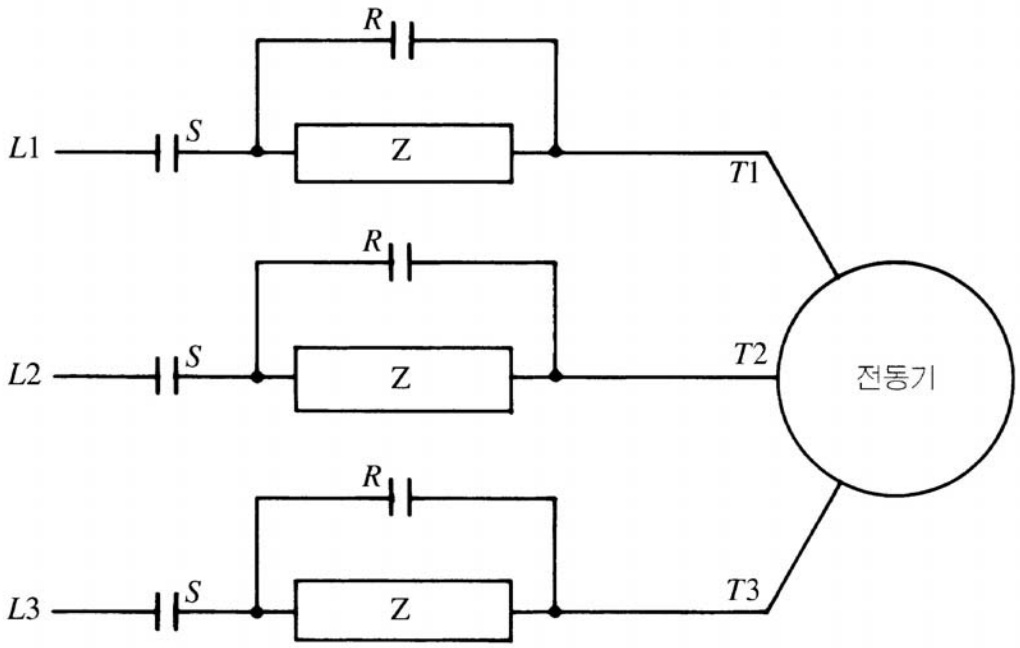
5.4 직렬 임피던스 기동

각 권선에 직렬로 임피던스를 삽입하여 기동전류를 제한하는 방식이며 임피던스에 의한 전압강하에 의해 공급전압이 인가된다.

기동시에는 S-접점이 닫히고 R-접점은 열린 상태로써 기동전류가 제한되고

기동이 완료되면 S-접점과 R-접점이 닫혀 직렬 임피던스를 건너뛰도록 하여 전전압이 공급되도록 한다.

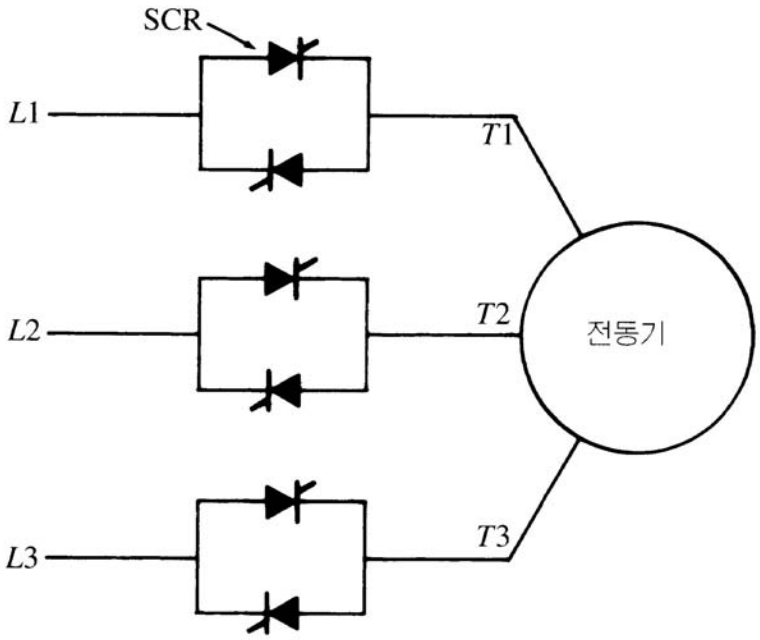
다음 그림은 대표적인 직렬 임피던스 기동회로이다.



[직렬 임피던스 기동회로]

5.4 정지형 기동 (Soft Start)

다음 그림과 같이 SCR을 사용하여 낮은 전압부터 연속적으로 공급전압을 변화시켜 부드러운 기동이 가능하도록 한 방식이다.



[Soft Start 기동회로]

이상으로 간단하지만 3상 유도전동의 기본적인 사항을 정리하여 보았다.

끝으로 모터를 부하에 따라 적절하게 적용하고, 항상 좋은 상태를 유지할 수 있도록 정비하고 또한 필요한 Specification을 적용하여 구매를 할 경우에는 반드시 모터의 기본적인 개념과 이론적인 토대가 필요하다는 것을 인지하고 늘 기본 개념을 충실하게 다져놓는 것에 힘을 써야 한다.

앞에서 설명한 내용들이 비록 미흡하지만 이러한 현업을 수행하는데 도움이 되었으면 작성한 사람으로써 더 없는 보람이라 생각한다.

좀더 내용을 풍부하게 하고 싶은 마음이 많았으나 필자의 일천한 지식과 현업을 수행하면서 틈틈이 짬을 내어 만들다 보니 두서도 없고 엉성한 면이 너무 많다고 생각하며 많은 양해를 구합니다. **[끝]**