



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시, 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리, 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지, 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

단상 유도전동기의 설계 및
특성해석에 관한 연구

2008年 2月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

林 采 洪

工學碩士學位論文

단상 유도전동기의 설계 및
특성해석에 관한 연구



指導教授 朴 瀚 錫

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함.

2008年 2月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

林 采 洪

이 論文을 林采洪의 碩士學位
論文으로 認准함

2008年 2月

主審 工學博士 洪 淳 一 (印)

委員 工學博士 禹 炅 一 (印)

委員 工學博士 朴 瀚 錫 (印)

목 차

1. 서 론	1
1.1. 연구배경	1
1.2. 연구내용	2
2. 단상 유도전동기 이론	3
2.1. 단상 유도전동기의 기본구조	3
2.2. 단상 유도전동기의 회전원리	4
2.2.1. 이중 회전자계 이론	6
2.3. 단상 유도전동기의 기동	9
2.3.1. 분상권선 전동기	9
2.3.2. 커패시터기동 전동기	12
2.3.3. 영구분상-커패시터 전동기	14
2.3.4. 커패시터기동 커패시터운전 전동기	15
2.3.5. Shaded pole 유도전동기	16
3. 단상 유도전동기 특성해석	18
3.1. 유한요소법 개요	18
3.2. 유한요소해석 정식화	21
4. 해석결과 및 고찰	23
5. 결 론	36
참고문헌	37
Abstract	39

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

전기 에너지를 기계 에너지로 변환하는 전기기기로서 유도전동기는 구조가 간단하며, 제작 및 유지보수가 비교적 용이하여 산업 전반에 널리 사용된다. 그리고 최근 20여 년간 전력전자 분야와 제어기술의 급속한 발전으로 직류기에 비해 단점이었던 유도전동기의 제어성능이 향상되어 저속에서 고속 영역까지 광범위하고 우수한 속도제어 특성을 갖게 되었다.

유도전동기는 전자기 유도현상을 이용하여 에너지를 변환 전달하는 시스템으로 그 물리적 현상은 직류기, 동기기 등의 전동기에 비해 훨씬 복잡하다.

지속적인 경제성장과 국민생활 수준의 향상으로 전력수요가 계속 증가하고 있으며, 3상 유도전동기는 상업적인 목적으로 대규모의 산업계에서 널리 사용되고 있으며 전력의 많은 부분을 소모하고 있다. 다음으로 많은 전력을 사용하는 부분이 가정이나 소규모 사업장이며 이곳에서는 3상 전력을 사용할 수 없다. 그런 곳에서는 단상전원으로 구동되는 단상전동기를 운전해야 하며 최근 고효율 단상 유도전동기 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. [1-14].

1.2 연구내용

본 논문에서는 단상 유도전동기 종류 중에서 영구분상-커패시터 전동기의 설계 및 특성해석에 대하여 고찰하며 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

1장에서는 연구배경 및 연구내용에 대해서 설명한다.

2장에서는 단상 유도전동기의 기본구조와 회전원리 및 기동방법에 따른 단상 유도전동기의 종류에 대하여 고찰한다.

3장에서는 단상 유도전동기 특성해석 부분으로 유한요소법에 대한 기본적인 이론을 서술한 뒤 맥스웰 방정식을 사용하여 해석에 사용되는 방정식을 유도한다.

4장에서는 설계 및 특성해석 부분으로 상용 프로그램인 Rmxpert를 사용하여 기본설계를 하고 Maxwell 상용 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 특성해석을 한다. 일정한 속도로 회전하는 단상 유도전동기의 특성 결과를 통하여 해석의 정확성을 확인한다.

5장에서는 결론부분으로 단상 유도전동기의 설계 및 특성해석에 대한 결과를 고찰한다.

제 2 장 단상 유도전동기 이론

2.1 단상 유도전동기의 기본구조

일반적인 단상 유도전동기는 그림 2.1과 같이 농형 회전자와 단상 고정자로 이루어져 있다. 단상 유도전동기는 몇 가지 결정적인 단점이 있다. 고정자 권선이 단상으로 되어 있기 때문에 단상 유도전동기의 자계는 회전하지 않는다. 다만 그 크기만 커졌다 작아졌다 맥동하면서 항상 같은 방향으로 고정되어 있다. 고정자의 자계가 회전하지 않기 때문에 단상 유도전동기는 기동 토크가 없다.



그림 2.1 단상 유도전동기의 구성

2.2 단상 유도전동기의 회전원리

단상 유도전동기의 기동 토오크가 없는 것은 전동기의 회전을 정지시켜 놓고 실험해 보면 알 수 있다. 고정자 자속은 증가했다가 다시 감소하지만 항상 같은 방향을 향해 있다. 고정자 자계가 회전하지 않기 때문에 고정자 자계와 회전자 도체 바 사이의 상대운동은 존재하지 않는다.

따라서 상대운동에 기인한 유전압이 회전자에 발생하지 않으며 회전자에 전류가 흐르지 않기 때문에 토오크가 발생하지 않게 된다. 실제로 회전자 도체 바에서 변압기 작용에 의해 전압이 유기되고 도체 바는 단락회로이기 때문에 회전자에는 전류가 흐른다.

그러나 이것에 의한 자계는 고정자 자계와 일직선상의 방향이므로 식(2.1) 처럼 회전자에 합성 토오크가 발생하지 않는다. 회전자가 정지해 있는 경우 전동기는 그림 2.2와 같이 2차측 권선이 단락된 변압기와 같다.

$$\begin{aligned}\tau &= k\vec{B}_R \times \vec{B}_S \\ &= kB_R B_S \sin\gamma \\ &= kB_R B_S \sin 180^\circ = 0\end{aligned}\tag{2.1}$$

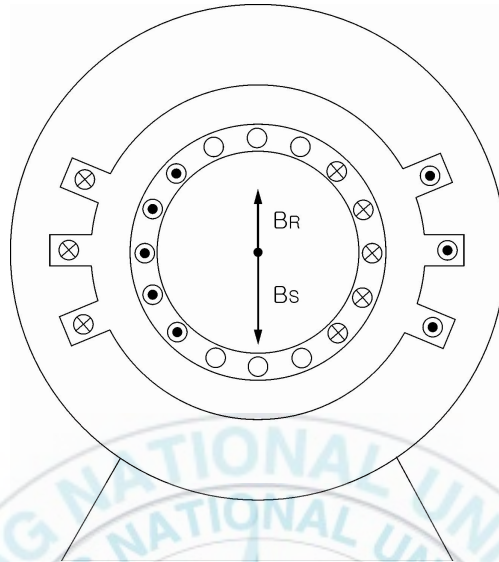


그림 2.2 기동상태의 단상 유도전동기

단상 유도전동기가 본질적으로 기동 토크가 없다는 사실은 일찍이 유도전동기의 개발에 있어서는 심각한 장애가 되었다. 처음 유도전동기가 개발되었을 때 최초로 이용 가능한 교류전원은 133Hz 단상이었다.

당시 이용 가능한 재료와 기술로서는 제대로 동작하는 전동기를 만들기 불가능했다. 3상 60Hz 전원이 개발되기 전까지는 유도전동기는 일반적으로 많이 쓰이지 않았다.

그러나 회전자가 한번 돌기 시작하면 유도 토크가 발생한다. 회전자가 돌기 시작하면 토크가 발생하는 이유를 설명하는 두 가지 기본이론이 있으며 이중 회전자계 이론에 대해서 설명한다.

2.2.1 이중 회전자계 이론

단상 유도전동기의 이중 회전자계 이론은 기본적으로 정지 맥동자계는 크기가 같고 반대방향으로 회전하는 두 개의 회전자계로 분리될 수 있음을 설명한다. 유도전동기는 각각의 자계에 대해 따로 반응을 보이며 기기의 합성토크는 2개의 자계 각각에 의해 발생하는 토크를 합한 것이다.

그림 2.3은 정지 맥동자계가 어떻게 같은 크기로 서로 반대방향으로 회전하는 자계로 분리될 수 있는가를 설명한다. 정지자계의 자속밀도는 다음으로 주어진다.

$$\vec{B}_s(t) = (\vec{B}_{\max} \times \cos \omega t) \vec{j} \quad (2.2)$$

시계 방향의 회전자계는 다음으로 표시될 수 있다.

$$\vec{B}_{CW}(t) = \left(\frac{1}{2} B_{\max} \cos \omega t\right) \vec{i} - \left(\frac{1}{2} B_{\max} \sin \omega t\right) \vec{j} \quad (2.3)$$

그리고 반시계 방향의 회전자계는 다음으로 표시된다.

$$\vec{B}_{CCW}(t) = \left(\frac{1}{2} B_{\max} \cos \omega t\right) \vec{i} + \left(\frac{1}{2} B_{\max} \sin \omega t\right) \vec{j} \quad (2.4)$$

시계 방향과 반시계 방향의 회전자계를 서로 합하면 정지 맥동자계 $\vec{B}_s$ 와 같아진다.

$$\vec{B}_s(t) = \vec{B}_{cw}(t) + \vec{B}_{ccw}(t) \quad (2.5)$$

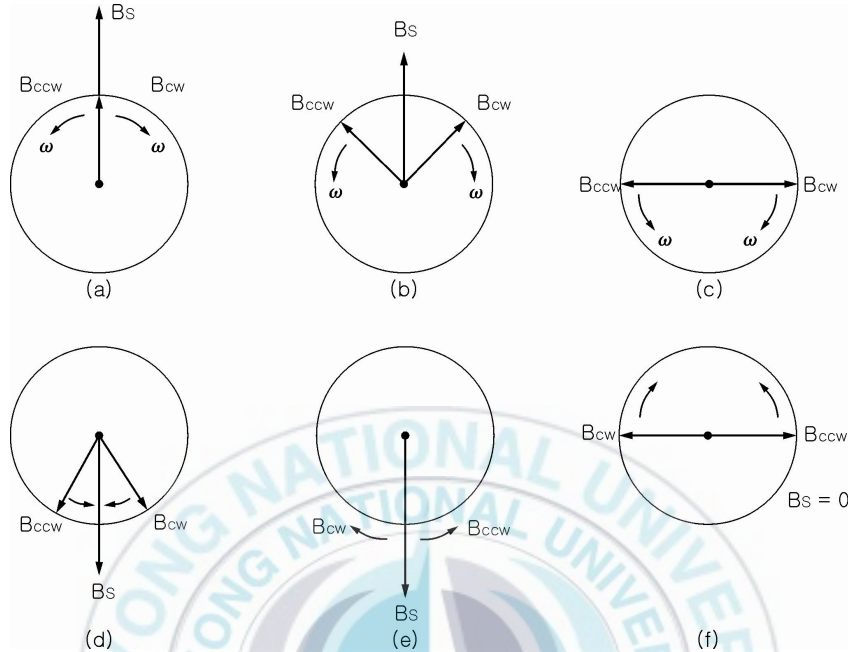


그림 2.3 이중 회전자계 원리도

단일 회전자계에 의한 3상 유도전동기의 토오크-속도 특성이 그림 2.4(a)에 나타나있다. 두 개의 자계 각각에 대한 단상 유도전동기의 토오크-속도 특성도 그림에 나타나있으며 전동기의 합성유도 토오크는 두개의 토오크-속도 곡선의 차이로 나타난다.

이 합성 토오크는 그림 2.4(b)에 나타나있다. 속도가 0일 때는 합성 토오크가 존재하지 않으며 따라서 이 전동기는 기동 토오크가 없음을 알 수 있다.

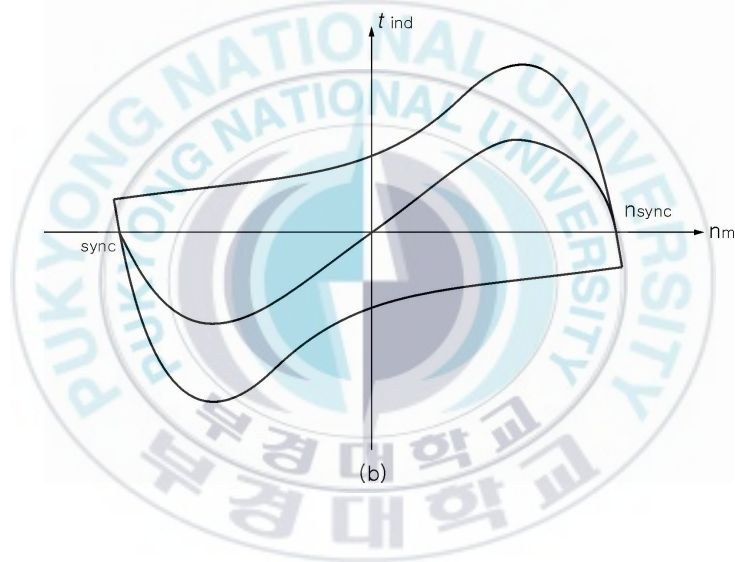
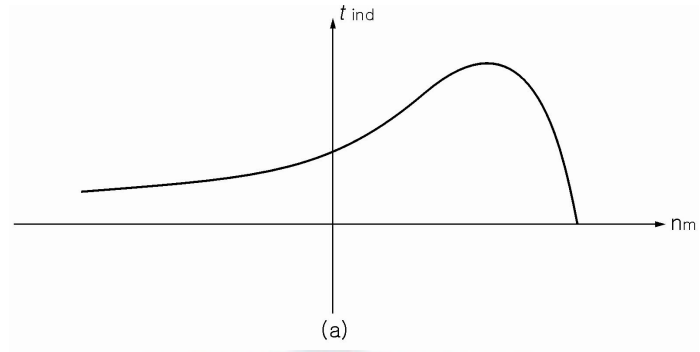


그림 2.4 (a) 3상 유도전동기의 토오크-속도 특성
(b) 단상 유도전동기의 토오크-속도 특성

2.3 단상 유도전동기의 기동

앞 절에서 설명한 것과 같이 단상 유도전동기는 본질적으로 기동 토크 크가 없다. 단상 유도전동기를 기동하기 위해서 흔히 3가지 방법이 있다. 그리고 단상 유도전동기는 기동방법에 따라 분류가 된다. 이 기동방법에 따라 소비되는 비용이 다르고 기동 토크의 크기도 다르다.

그리고 전동기 기술자들은 보통 주어진 응용분야에서 토크 특성을 만족시키면서도 가장 적은 비용이 드는 기동법을 택하게 되며 3가지 주요한 기동법은 다음과 같다.

1. 분상권선
2. 커패시터형 권선
3. shaded 고정자 극

이 3가지 기동법 모두가 두개의 회전자계 중 하나를 다른 하나보다 강하게 만들어서 전동기를 처음에 어느 한쪽 방향으로 살짝 움직이게 한다.

2.3.1 분상권선 전동기

분상 기동형 단상 유도전동기는 그림 2.5와 같이 주고정자 권선(M) 과 보조 기동권선 (A) 두 개의 고정자 권선을 가지고 있다. 이 두 권선은 전기각으로 90° 어긋나게 고정자에 취부되어 있고 보조권선은 원심분리 스위치에 의해 회전자가 일정속도에 도달했을 때 회로에서 분리되도록 설계되어 있다. 보조권선은 저항/리액턴스 비가 주권선에 비해 크도록 설계되어 보조권선에 흐르는 전류는 주권선보다 앞서게 된다.

이러한 높은 저항/리액턴스 비율은 보통 보조권선에 가는 동선을 써서 실현된다. 보조권선은 기동시에만 그 역할을 하며 따라서 전 전류가 연속적으로 흐르지 않기 때문에 보조권선에 가는 동선을 쓰는 것이 가능하다.

보조권선의 역할을 이해하기 위해 그림 2.6을 참조한다. 보조권선의 전류가 주 권선의 전류보다 앞서기 때문에 자계 $\vec{B}_A$ 보다 앞서게 된다. 처음에 $\vec{B}_A$ 가 최대치로 나타나고 그 다음에 $\vec{B}_M$ 의 최대치가 나오므로 반시계 방향의 합성자계가 발생한다. 그림 2.6(a)(b) 즉 보조권선은 반대방향으로 회전하는 두 회전자계 중 어느 하나를 다른 하나보다 강하게 만들고 합성 기동토크를 생성한다. 그림 2.6(c)가 전형적인 토크-속도 특성 곡선을 나타낸다.

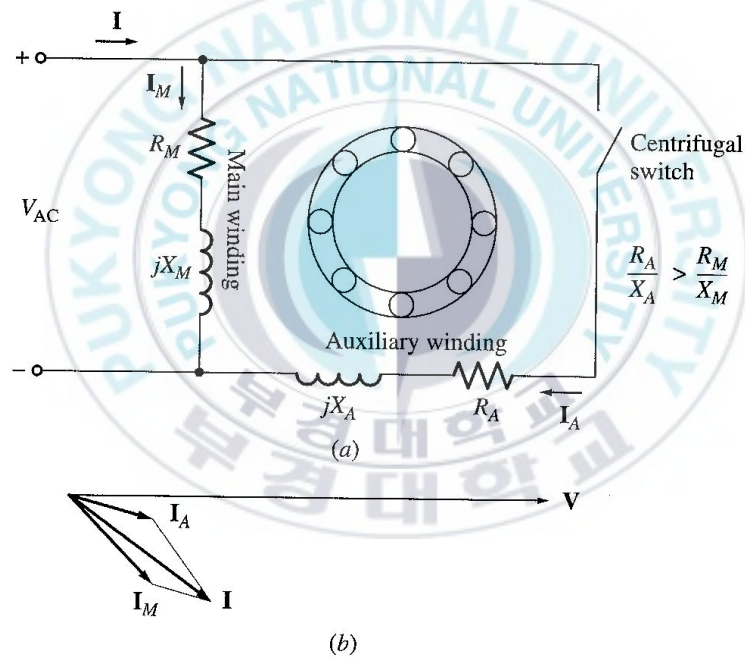


그림 2.5 (a) 분상 유도전동기, (b) 기동 조건에서 흐르는 전류

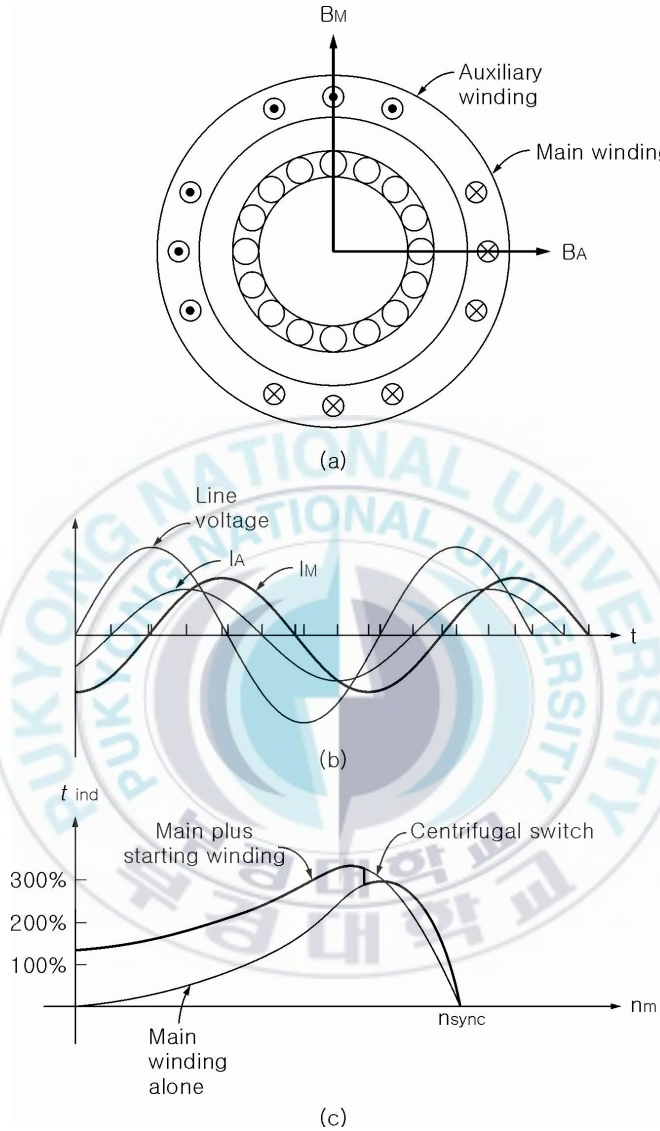


그림 2.6 (a)(b) $\vec{I}_A$ 전류의 최대값 다음에 $\vec{I}_M$ 의 최대값이 되므로 반시계 방향으로 회전하는 합성자계가 발생함. (c) 토오크-속도 특성곡선

분상 기동형 전동기는 상당히 적은 기동전류로 적당한 기동 토크를 발생한다. 이런 종류의 전동기는 선풍기, 송풍기, 원심분리 펌프 등과 같이 기동 토크를 많이 필요로 하지 않는 응용분야에 많이 쓰인다. 1 마력 미만의 소출력용으로 적당하고 가격도 싼 편이다.

분상 기동형 유도전동기에서 주 권선에 흐르는 전류가 최대치에 도달하기 전까지 보조권선의 전류는 항상 최대치이고, 자계가 최대치에 도달하기 전까지 보조권선의 자계는 항상 최대치이다.

보조권선에 의한 자계의 공간적인 각이, 주권선에 의한 자계보다 앞서게 되므로 전동기의 회전방향이 결정된다. 그 각도는 보조권선의 접속을 바꿈으로써 90° 앞서거나 90° 뒤지게 할 수 있기 때문에 주권선의 접속을 그대로 둔 채 보조권선의 접속을 스위치로 전환시킴으로써 회전방향을 바꿀 수 있다.

2.3.2 커패시터기동 전동기

어떤 응용분야에 있어서는 분상기동형 전동기의 기동 토크는 전동기 축에 연결된 부하를 기동하기에는 불충분한 경우가 있다. 그런 경우에는 그림 2.7(a)와 같은 커패시터기동 전동기가 쓰일 수 있다. 커패시터기동 전동기에서 커패시터는 보조권선과 직렬로 연결되어 있다.

커패시터의 크기를 적절히 선택하면 보조권선에 흐르는 기동전류에 의한 기자력이 주권선에 흐르는 전류에 의한 기자력과 크기가 같아질 수 있으며 보조권선에 흐르는 전류의 위상각이 주권선에 흐르는 전류의 위상각보다 90° 앞서게 할 수 있다.

두 권선은 물리적으로 90° 분리되어 있고 전류에 있어서 90° 의 위상차는 균일한 하나의 고정자 회전자계를 생성하고 이것은 마치 3상 유도전동기가 기동할 때와 유사하다. 이 경우 전동기의 기동 토크는 그림 2.8

과 같이 정격의 300%에 달한다. 커패시터 기동 전동기는 분상 기동형 전동기보다 훨씬 고가이다.

그리고 이 전동기는 높은 기동 토크가 절대적으로 필요한 분야에 사용된다. 일반적인 응용분야는 컴프레서, 펌프, 에어컨 그리고 부하를 물린 상태에서 기동하는 다른 장치들에 사용된다.

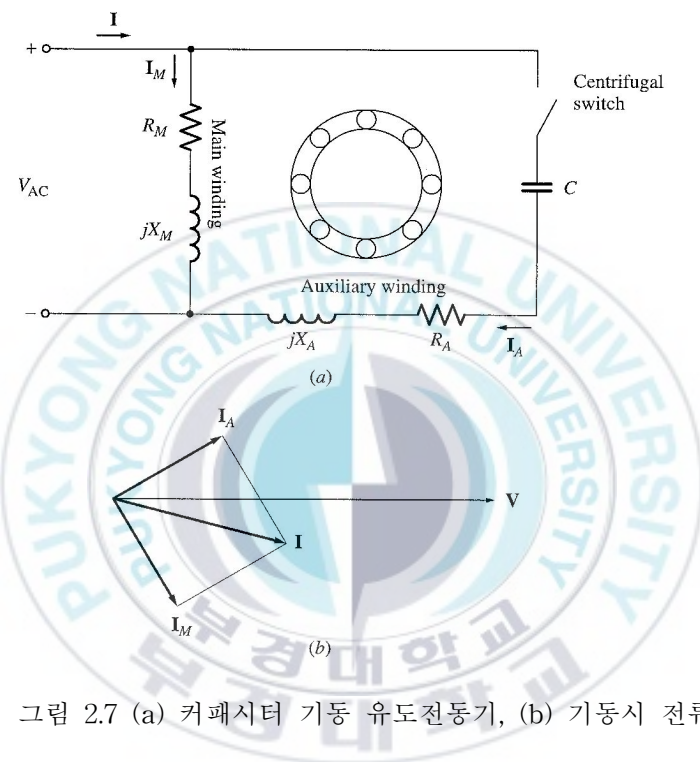


그림 2.7 (a) 커패시터 기동 유도전동기, (b) 기동시 전류의 위상각

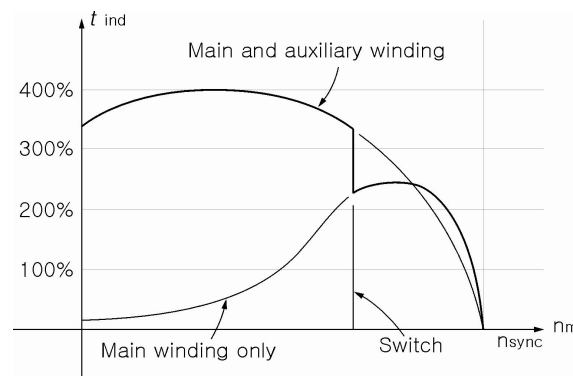


그림 2.8 커패시터 기동 유도전동기의 토크-속도 특성

2.3.3 영구분상-커패시터 전동기

더 작은 커패시터와 연결된 보조권선이 때로는 전동기회로에서 영구히 분리되지 않는 유도전동기에서 기동 커패시터는 토오크-속도 특성을 향상시키는 역할을 한다. 만약 커패시터의 용량을 정확히 선정하였다면 그 전동기는 어떤 특정한 부하에서 완전히 균일한 회전자계를 가질 것이며 바로 그 시점에서는 마치 3상 유도전동기처럼 동작할 것이다.

이렇게 동작하도록 설계된 전동기를 영구분상-커패시터 전동기라 하며 그림 2.9에 나타나 있다. 영구분상-커패시터 전동기는 커패시터 기동 전동기보다 단순한데 이것은 기동 스위치가 필요 없기 때문이다.

정상적인 부하에서는 일반적인 3상 유도전동기에 비해 훨씬 더 효율적이고 더 높은 역율을 가지며 더 부드러운 토오크를 발생한다.

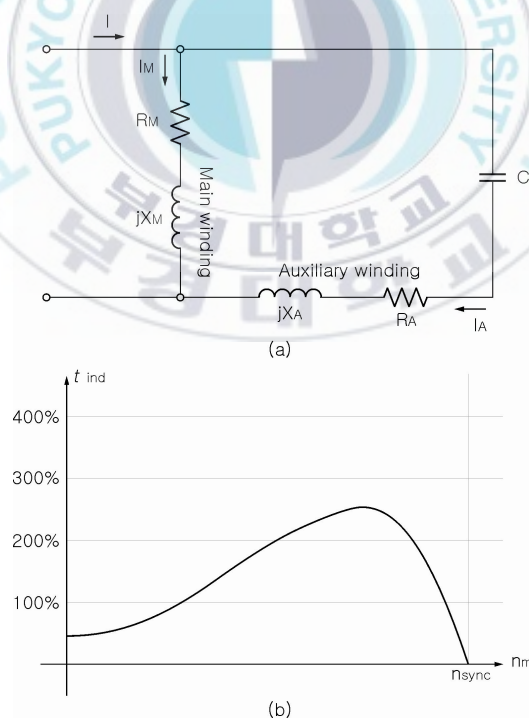


그림 2.9 (a) 영구분상-커패시터 유도전동기, (b) 토오크-속도 특성

영구분상-커패시터 전동기는 커패시터기동 전동기보다 낮은 기동 토크를 가지는 데 그 이유는 정상부하 조건에서 주권선과 보조권선에 흐르는 전류가 균형을 이루도록 커패시터 용량을 결정하기 때문이다.

정상부하시 흐르는 전류에 비해 기동시의 전류가 훨씬 크므로 정상부하시 상의 균형을 이루도록 하는 커패시터가 기동 조건에서는 심각한 상 불평형을 일으킨다.

2.3.4 커패시터기동 커패시터운전 전동기

가능한 최대의 기동 토크와 최적의 운전조건이 필요하다면 보조권선에 2개의 커패시터를 쓸 수 있다. 2개의 커패시터를 가진 전동기를 커패시터 기동, 커패시터 운전 전동기 혹은 이중 커패시터 전동기라 하며 그림 2.10에 나타나 있다.

큰 용량을 가진 커패시터는 기동시에만 쓰이고 주권선과 보조권선에 흐르는 전류가 대충 균형이 잡혔을 때 매우 큰 시동 토크를 발생한다. 전동기의 속도가 빨라지면 원심분리 스위치가 떨어지고 영구분상-커패시터는 보조권선 회로에 연결된 채 계속 남아 있게 된다. 영구분상-커패시터는 정상부하에 흐르는 전류가 균형이 잡힐 정도의 용량을 가지며 전동기는 고효율, 고토크 고역율의 상태로 운전된다.

이런 전동기에서 영구분상-커패시터는 대략 기동 커패시터의 10-20% 정도의 용량을 가지고 있다. 커패시터형 전동기는 보조권선의 접속을 바꿈으로써 회전방향을 바꿀 수 있다.

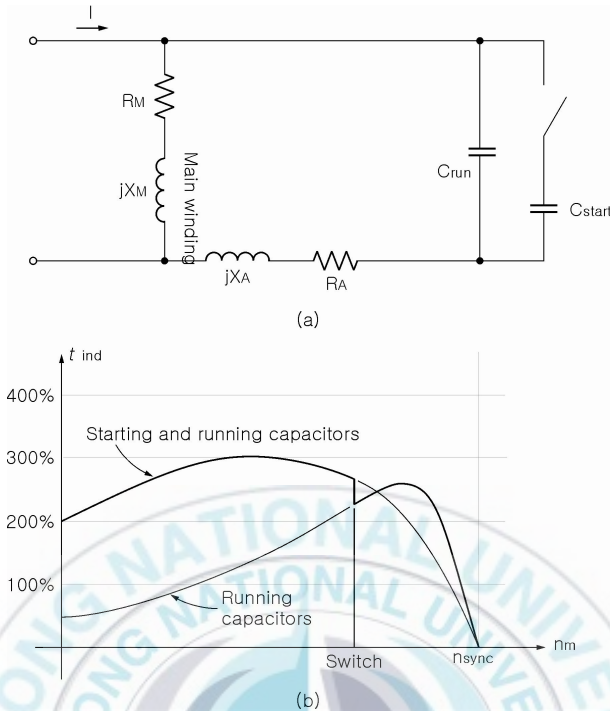


그림 2.10 (a) 커패시터 기동 커패시터 운전 유도전동기, (b) 토오크-속도 특성

2.3.5 Shaded pole 유도전동기

Shaded pole 유도 전동기는 주권선만 있는 유도전동기이다. 그림 2.11과 같이 보조권선 대신 돌극을 가지고 있으며 각 극의 한 쪽 부분이 셰이딩 코일이라는 단락된 코일로 감겨져 있다.

주 권선에 의해 각 극에서 시변자속이 발생한다. 그 극에서 자속이 변화하면 셰이딩 코일에 원래 자속의 변화를 방해하는 방향으로 전압과 전류가 유기된다. 이러한 저항은 셰이딩 코일로 감긴 부분의 자속변화를 방해하고 두개의 반대방향으로 회전하는 자계에 약간의 불균형을 초래한다.

합성 회전방향은 자극 면의 셰이딩 코일이 감겨져 있지 않는 부분에서 감겨져 있는 부분으로 향한다. Shaded pole 전동기의 토오크-속도에서

알 수 있듯이 다른 유도전동기에 비해 적은 기동 토크를 발생한다. 그리고 다른 형태의 단상 유도 전동기에 비해 효율이 훨씬 낮고 슬립이 매우 높으므로 매우 낮은 기동 토크를 요구하는 아주 적은 출력(1/20 마력 이하)의 낮은 전동기에만 쓰인다.

Shaded pole 전동기는 기동 토크의 발생을 셰이딩코일에 의존하는 전동기이므로 회전방향을 바꾸기가 쉽지 않다. 회전방향을 바꾸기 위해서는 각 극의 면에 두개의 셰이딩코일을 설치하고 그들 중 어느 하나 혹은 다른 하나를 선택하여 단락시킴으로써 가능하다.

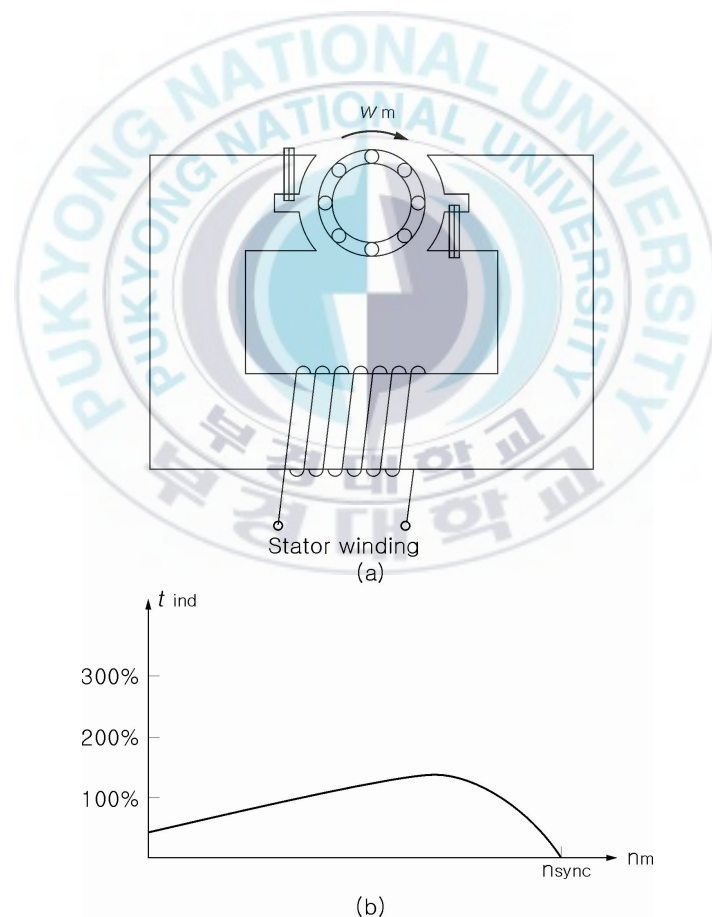


그림 2.11 (a) Shaded pole 유도전동기, (b) 토크-속도 특성

제 3 장 단상 유도전동기의 특성 해석

3.1 유한요소법 개요

자연현상에 대한 수식적 표현은 계변수에 의해 특성화되는 경계치를 가지는 연속치 문제로서 볼 수 있으며 이는 계 전체를 지배하는 편미분 방정식으로 표현된다. 따라서 이와 같은 편미분 방정식을 만족하는 해를 구하면 그 해의 분포함수를 알 수 있다.

편미분 방정식의 해를 구하는 방법으로 계를 집중적인 정수로 보는 해석적인 방법과 분포계로 보는 수치해석적인 방법으로 나눌 수 있다. 해석적인 방법으로는 변수분리법이나 푸리에 급수에 기반을 둔 공간고조파법 등이 있으며 이를 이용하여 계의 지배방정식을 풀기 위해서는 많은 가정을 수반하여야 해석이 가능하므로 해의 정밀도가 낮고 모델에 따라서 해석식이 달라지므로 범용성에 제약을 가지고 있다.

반면에 수치해석적인 방법은 이러한 연속치 문제를 유한개의 이산 값을 가지는 대수방정식 문제로 치환하여 푸는 방법으로써 해석적 방법에 의해 해의 정밀도와 범용성 면에서 우수한 장점을 가지고 있으며 최근 컴퓨터의 급속한 발달로 고속화, 대용량화, 저가격화가 실현되어 점차 관심이 증대되고 있다.

수치해석적인 방법으로는 여러가지 있으나 해석모델의 복잡한 형상 및 재질의 비선형성 등을 처리하기가 비교적 용이한 유한요소법이 많이 사용되고 있다. 유한요소법은 1950대 항공기의 기체강도를 계산하기 위한 구조역학 분야에 처음 도입되어 그 후 토목, 조선공학 등의 분야로 널리 확산되어 이용되었으며 특히 전기공학 관련 분야에서는 1960년대 후반부터 1970년대를 거쳐 지금까지 가장 널리 사용되고 있다.

유한요소법은 그 명칭에서 알 수 있듯이 대상물체 또는 영역을 유한한

크기를 갖는 부분영역(요소)으로 나누고, 각 영역에 대해 원래의 미분방정식으로부터 변분원리 또는 가중잔차법 등과 같은 방법을 이용하여 근사화 시켜 얻어진 관계식을 개개의 요소에 적용하여 전 영역에 대한 유한개의 방정식을 구하고 이것의 미지수를 구하는 방법이다.

유한요소법을 이용하여 편미분방정식을 정식화하는 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있는데 그 하나는 변분법으로서 임의의 포텐셜분포를 가정할 때 실제의 자연현상으로 존재하는 분포는 포텐셜 에너지가 최소로 되도록 한다는 자연법칙을 이용하는 방법이고, 또 하나는 Galerkin법으로서 계에서 에너지 범함수의 구성이 불가능한 경우에 그 계의 지배방정식을 구하면 가중잔차법의 원리에 의해 형상함수를 가중함수로 하여 근사해를 구할 수 있다.

유한요소법을 전기기기의 해석에 적용할 경우 전처리, 유한요소정식화, 풀이, 후처리의 순서로 이루어지며 각 단계를 설명하면 아래와 같다.

1. 해석문제의 정의 : 해석하고자 하는 현상에 대해 정의를 하고 그 계의 지배방정식을 유도한다. 이때에 해석방법(차원, 재료의 취급 및 구동함수 등)을 결정한다.

2. 전처리 : 해석문제가 정의되고 해석대상을 유한개의 영역으로 분할(요소분할 : Preprocess)한다. 이때 분할하는 요소의 종류는 시험함수와 각 절점의 자유도에 의해 결정된다. 일반적으로 2차원의 경우 3절점의 3각형 요소가 이용되고 3차원의 경우 8절점 6면체 요소가 많이 사용되고 있다. 요소의 절점이나 자유도에는 여러가지 조합이 있을 수 있으나 일반적으로는 1차원 요소를 사용하고 요소수를 늘리는 것이 해의 정확도면에서 유리한 것으로 알려져 있다.

3. 유한요소 정식화 : 요소의 형태를 정의하고 요소분할을 한 다음 각 요소에 대하여 요소방정식을 유도하여야 한다. 이때에 요소방정식은 변분원리 또는 가중잔차법을 사용하여 각 절점에 대한 선형 대수방정식을 유도하게 되는데 이것을 유한요소 정식화라고 한다. 각 요소방정식이 얻어진 후 각 요소방정식을 합하여 계전체에 대한 계 방정식을 유도하게 된다. 이때 얻어진 방정식은 미분방정식에서 선형대수 방정식으로 변환되기 때문에 컴퓨터를 사용하여 쉽게 해를 구할 수 있게 된다.

4. 후처리 : 유한요소 해석결과 얻어진 결과는 보통 미지수가 포텐셜이므로 여기서 바로 물리적인 의미를 도출해 내는 것은 어렵다. 따라서 구해진 포텐셜을 이용하여 물리적인 의미가 있는 다른 양을 계산하거나 또는 물리적인 의미가 있는 양들을 시각적으로 그래프 처리를 하는 과정을 후처리 과정이라고 한다. 자체해석에서 주로 얻고자 하는 물리적인 양은 자속밀도, 인덕턴스, 전자력이고 그래픽적으로 유용한 정보는 자속 분포, 자속밀도 분포 및 힘 밀도 등이다.

3.2 유한요소해석 정식화

변위전류를 무시할 수 있는 준 정상상태에서, 임의의 해석영역에 대한 Maxwell 방정식 및 보조방정식은 다음과 같다.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_o + \vec{J}_e \quad (3.1)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (3.2)$$

해석영역을 2차원 유한요소법으로 풀기 위해 맥스웰 전자계 방정식 (3.1)과 (3.2)로부터 이동좌표계를 사용하였을 경우 지배방정식을 구하면 식(3.3) 과 같다[15].

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z + \sigma \frac{dA_z}{dt} \quad (3.3)$$

단, A_z : 자기벡터 포텐셜의 z축 성분

J_z : 슬롯에 흐르는 코일의 전류밀도

σ : 2차측 도체판의 도전율

μ : 재료의 투자율

또한 전압이 1차측의 여자코일에 인가되었을 때 코일에 흐르는 전류는 미지수이며 이때의 회로방정식은 식(3.4) 과 같다.

$$\{V\} = [R][I] + [L_0] \frac{d}{dt} \{I\} + \{E\} \quad (3.4)$$

여기서, $\{V\}$: 각 상에 인가되는 전압

$\{I\}$: 각 상에 흐르는 전류

$[R]$: 각 상의 코일 및 외부회로 저항

$[L_0]$: 각 상의 코일단의 누설 인덕턴스

$\{E\}$: 각 상의 유기전압

식(3.1)과 (3.2)를 결합하여 Galerkin 유한요소법으로 정리하고 시간 미분항에 대해서는 후퇴차분법으로 정리하면 식(3.5)과 같다.

$$\left\{ \begin{bmatrix} \frac{1}{\mu} S & -N \\ 0 & R \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} T & 0 \\ L_{eff}N^T & L_0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_t = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} T & 0 \\ L_{eff}N^T & L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_{t-\Delta t} + \begin{bmatrix} 0 \\ V \end{bmatrix}_t \quad (3.5)$$

여기서, T : 와전류와 관련된 계수행렬

L_{eff} : z축 방향으로의 유효 적층폭

A : 자기 벡터 포텐셜

I : 출력전류

V : 입력전압

제 4 장 해석결과 및 고찰

본 논문에서는 단상 유도전동기의 설계를 위하여 상용 프로그램인 Rmxpert를 사용하고, Maxwell 상용 유한요소해석 프로그램을 사용하여 특성을 해석 한다. 그림 4.1은 설계 및 해석 순서도를 나타낸다.

먼저 고정자 및 회전자를 설계하고 등가회로 해석법으로 해석 결과를 확인한다. 그 후 유한요소법을 사용할 수 있는 형식으로 변환 한 후 유한요소 해석을 실시하고 해석결과가 만족이 되면 프로그램을 종료하고 그렇지 않으면 재설계를 실시한다.

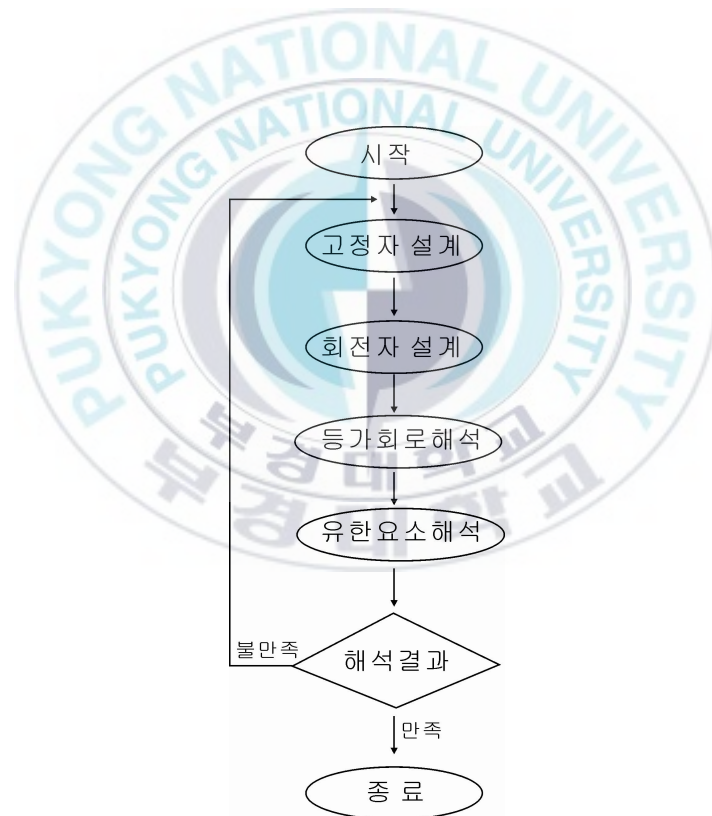


그림 4.1 설계 및 해석 순서도

상용 설계프로그램인 Rmxpert는 설계하고자 하는 전동기의 고정자, 권선, 회전자 그리고 축의 순으로 원하는 설계값을 대입하게 되면 기본 설계를 해주며, 자기 등가회로법을 사용하여 특성해석을 해 주는 프로그램이다.

본 논문에서 설계하고자 하는 단상 유도전동기의 설계제원은 상 수 : 1, 출력 : 0.057[kW], 정격전압 : 220[V], 극수 : 4, 슬롯 수 : 24, 정격 속도 : 1600[RPM], 주파수 : 60[Hz], 기동 커패시턴스 : 2.5[uF]이다. 그림 4.2는 단상 유도 전동기 설계를 위한 입력 창이다.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Machine Type	Single Phase Induction Motor				☒
Number of Poles	4			Number of poles of the ...	☐
Rotor Position	Inner Rotor			Inner rotor or outer rotor	☒
Frictional Loss	0	W	0W	The frictional loss meas...	☐
Wind Loss	0	W	0W	The wind loss measure...	☐
Reference Speed	1600	rpm		The reference speed at ...	☐
Operation Mode	C-Run			Operation mode	☐
Run Capacitance	2.5	uF	2.5uF	Capacitance of run cap...	☐
Run Resistance	0	ohm	0ohm	Resistance of run capac...	☐

☐ Show Hidden

확인 취소

그림 4.2 단상 유도전동기 설계 입력창

그림 4.3은 고정자에 감기는 전기자권선에 대한 입력창을 나타낸다. 주 권선과 보조권선의 형상 설계가 가능하며 그림 4.4는 고정자설계를 위한 입력창이며 축 방향 길이는 45[mm]이며, 고정자슬롯의 형상도 결정할 수 있다. 또한 고정자의 재료의 특성도 입력할 수 있다.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Slot Liner	0.1	mm		Insulation: slot liner thickness
Wedge Thickness	0	mm		Insulation: wedge thickness
Limited Fill Factor	0.75			Limited slot fill factor for wire design
Winding Type	Sin_2			Main Phase winding type

그림 4.3 고정자권선 설계 입력창

Name	Value	Unit	Evaluated ...	Description	Read
Outer Diameter	82.95	mm	82.95mm	Outer diameter of the stator core	
Inner Diameter	47.8	mm	47.8mm	Inner diameter of the stator core	
Length	45	mm	45mm	Length of the stator core	
Stacking Factor	0.95			Stacking factor of the stator core	
Steel Type	steel_1008			Steel type of the stator core	
Number of Slots	24			Number of slots of the stator core	
Slot Type	3			Slot type of the stator core	
Overall Width	82.95	mm	82.95mm	Overall width of the stator outer profile	

그림 4.4 고정자형상 설계 입력창

그림 4.5는 그림 4.4에서 결정한 고정자슬롯의 설계를 위한 입력창이다. 고정자슬롯에 대한 자료 중에서 원하는 슬롯을 선택하였으며 각 변수에 대한 값을 입력할 수 있다.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Descript...	Read-only
Auto Design	☐			Auto de...	☐
Parallel Tooth	☐			Design ...	☐
Hs0	0,6	mm	0,6mm	Slot dim...	☐
Hs1	0,5	mm	0,5mm	Slot dim...	☐
Hs2	9,32	mm	9,32mm	Slot dim...	☐
Bs0	2,2	mm	2,2mm	Slot dim...	☐
Bs1	3,95	mm	3,95mm	Slot dim...	☐
Bs2	6,39	mm	6,39mm	Slot dim...	☐
Rs	1	mm	1mm	Slot dim...	☐

☐ Show Hidden

확인 취소

그림 4.5 고정자슬롯 설계 입력창

그림 4.6은 고정자권선의 상세설계를 위한 입력창이다. 그림 4.3을 기준 값으로 하여 권선의 연결, 병렬회로수, 권선수, 피복두께, 권선직경 등을 입력할 수 있다. 오른쪽 그림은 입력에 따른 고정자 권선의 배치를 자동적으로 보여주고 있다.

그림 4.7은 회전자형상 설계를 위한 입력창이다. 회전자는 농형이며 회전자 재료의 특성을 입력할 수 있으며 스큐각도 입력할 수 있다.

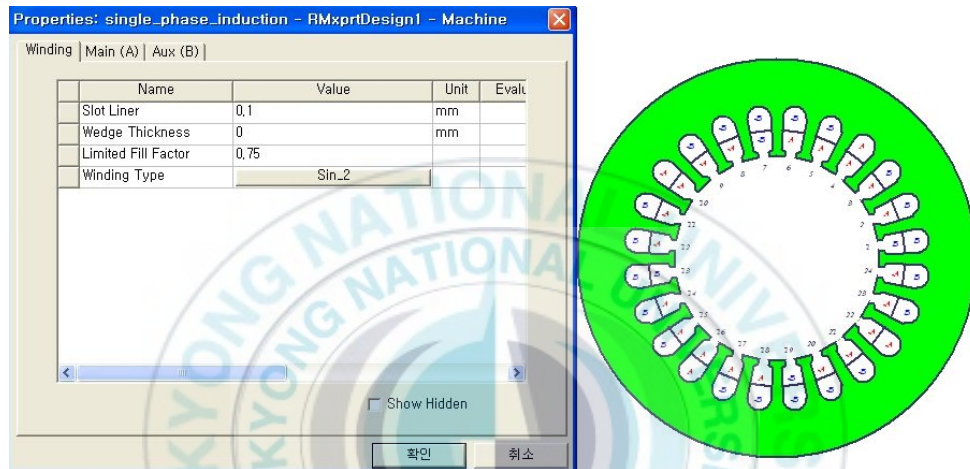


그림 4.6 고정자권선 상세 설계 입력창

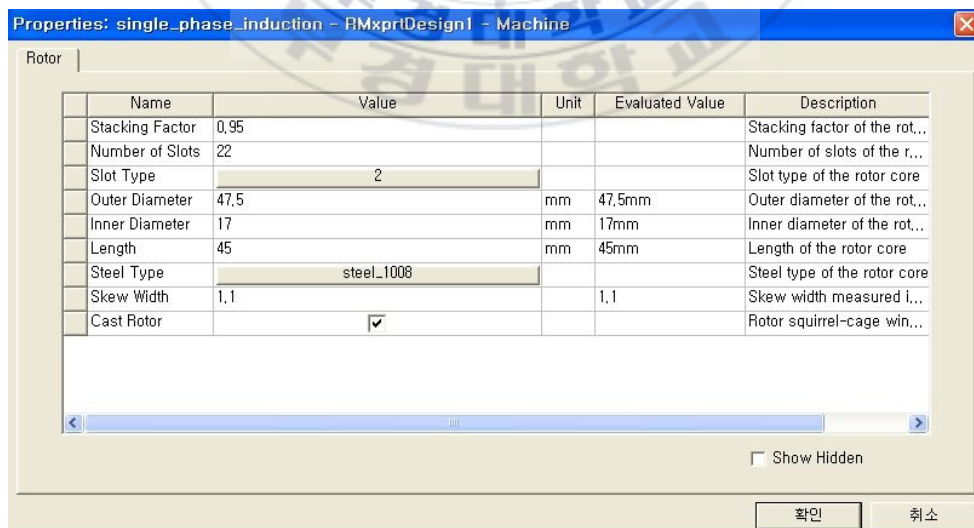
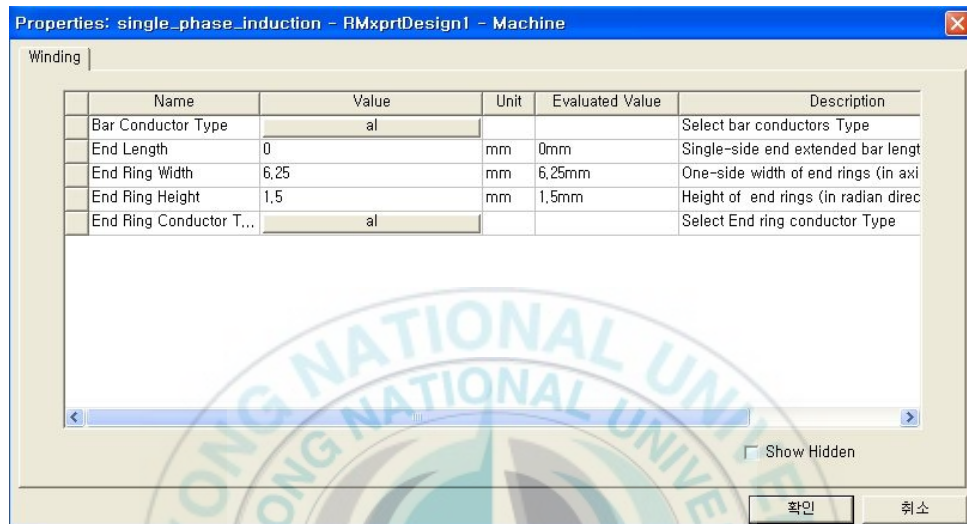


그림 4.7 회전자형상 설계 입력창

그림 4.8은 농형회전자의 형상설계를 위한 입력창이다. 농형 바 및 엔드링의 재질의 특성을 입력할 수 있을 뿐만 아니라 엔드링의 높이와 길이도 입력할 수 있다.

그림 4.9는 해석을 위한 입력 조건을 위한 창을 나타낸다.



Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Bar Conductor Type	al			Select bar conductors Type
End Length	0	mm	0mm	Single-side end extended bar length
End Ring Width	6,25	mm	6,25mm	One-side width of end rings (in axial direction)
End Ring Height	1,5	mm	1,5mm	Height of end rings (in radial direction)
End Ring Conductor Type	al			Select End ring conductor Type

그림 4.8 농형회전자 형상설계 입력창



Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Name	Setup1			
Operation Type	Motor			Motor or Generator
Load Type	Const Power			Mechanical load Type
Rated Output Power	0,057	kW	0,057kW	Rated Output Power
Rated Voltage	220	V	220V	Applied rated line-to-line voltage
Rated Speed	1600	rpm	1600rpm	Given Rated Speed
Operating Temperature	75	°C	75°C	Operating Temperature

그림 4.9 해석조건 입력창

그림 4.10은 해석조건을 이용해서 해석한 결과를 나타낸다. 일반적인 설계자료뿐만 아니라 무부하에 따른 해석결과, 전부하에 따른 해석결과도 함께 주어진다.

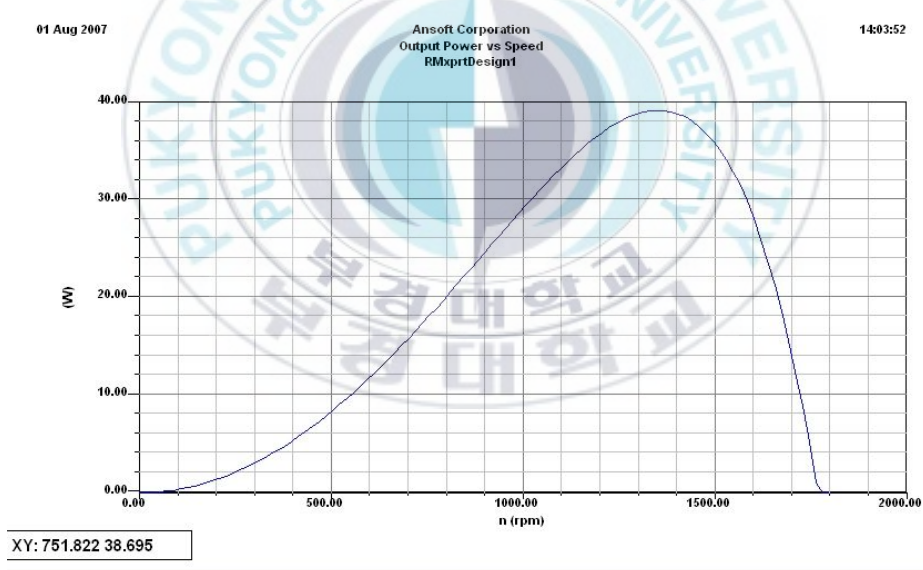
그림 4.11은 설계결과에 따라 자기 등가회로 해석을 행한 특성곡선을 보여준다. 그림 4.11 (a)는 효율, (b)는 출력특성을 나타낸다.



그림 4.10 설계결과



(a) 효율특성



(b) 출력특성

그림 4.11 특성곡선

그림 4.12는 설계된 단상 유도전동기를 보여준다. 그림 4.13은 설계 프로그램에서 얻은 자료를 유한요소 해석을 위한 자료로 변환한 후 이차원 유한요소 해석을 위한 입력창을 나타낸다. 단상 유도 전동기가 4극이므로 해석 시간을 줄이기 위해서 경계조건을 사용하여 그림과 같이 전 모델의 1/2만 해석해도 무방하다.

유한요소 해석은 3.1에서 나타낸 것과 같이 전처리, 유한요소 정식화 그리고 후처리로 이루어져 있다. 먼저 solver를 Transient로 바꾼 후 전처리 과정(각 재료에 대한 특성 부여, 경계조건 및 소스 입력, 요소 분할)을 행하면 그림의 왼쪽에 보는 것과 같이 체크 표시가 나타난다. 유한요소 정식화는 프로그램에서 이미 이루어져 있으므로 해석을 시행하면 된다.

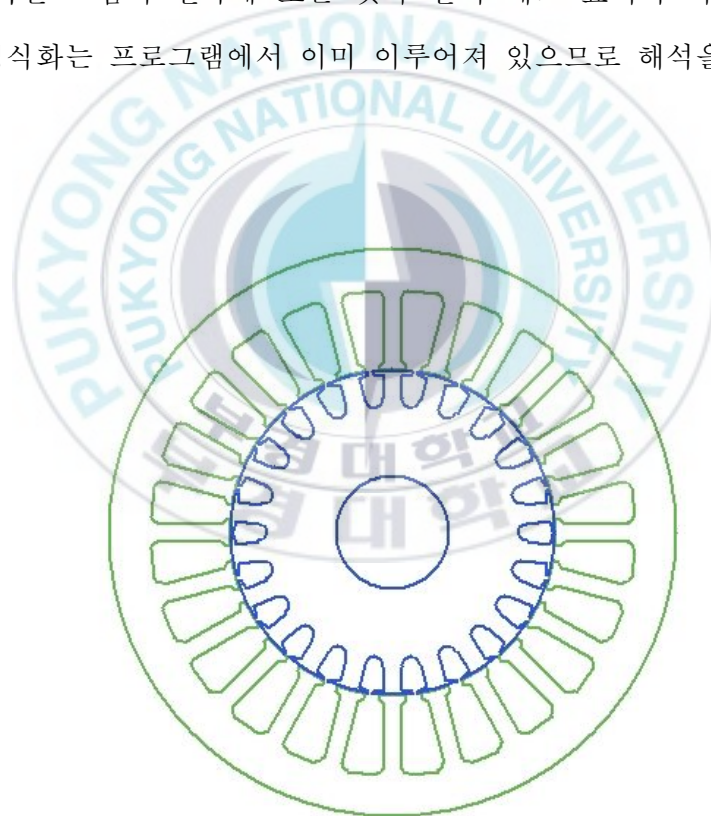


그림 4.12 설계된 단상 유도전동기

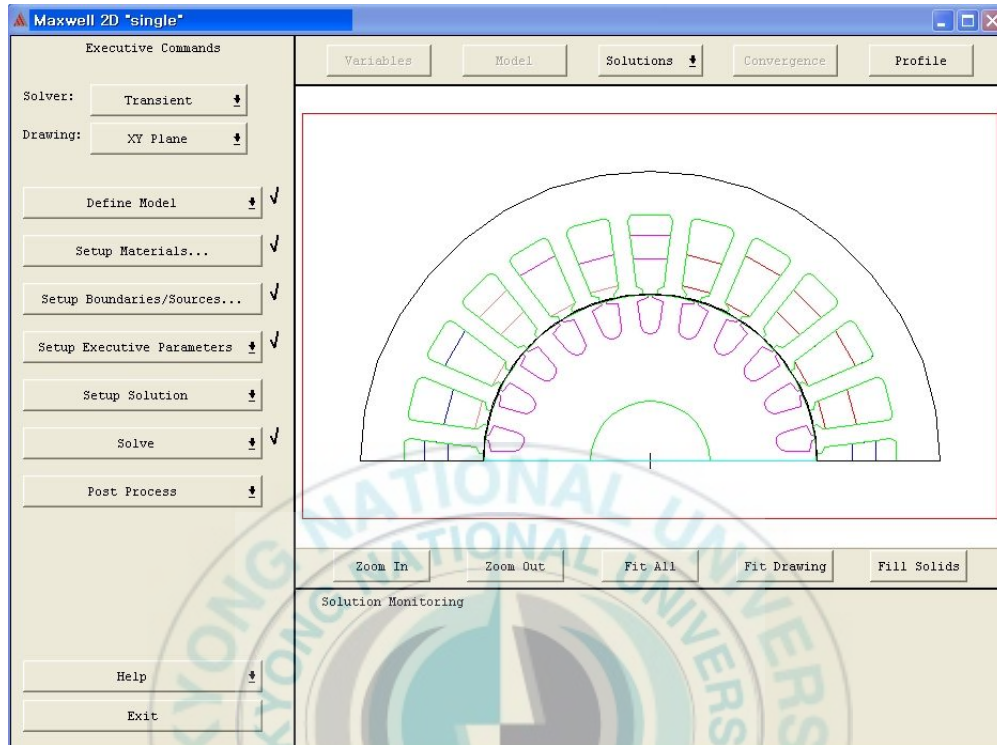


그림 4.13 2차원 유한요소 해석을 위한 창

그림 4.14는 단상 유도전동기에 전압을 입력하기 위한 외부 회로도이다. 그림에서 V_s 는 입력전압을 나타내며, L_A 와 L_B 는 주권선과 보조권선의 누설 인덕턴스, R_A 와 R_B 는 주권선과 보조권선의 권선저항이며, LP_{HA_L} , LP_{HA_M} , LP_{HA_S} , LP_{HB_L} , LP_{HB_M} , LP_{HB_S} 는 각각 주권선과 보조권선을 나타낸다. 그리고 C_R 은 기동 커패시터를 나타낸다.

그림 4.15는 권선전류와 바에 흐르는 전류특성을 나타낸다. 바에 흐르는 전류는 권선에 흐르는 전류보다 훨씬 전류의 주파수가 낮음을 알 수 있다.

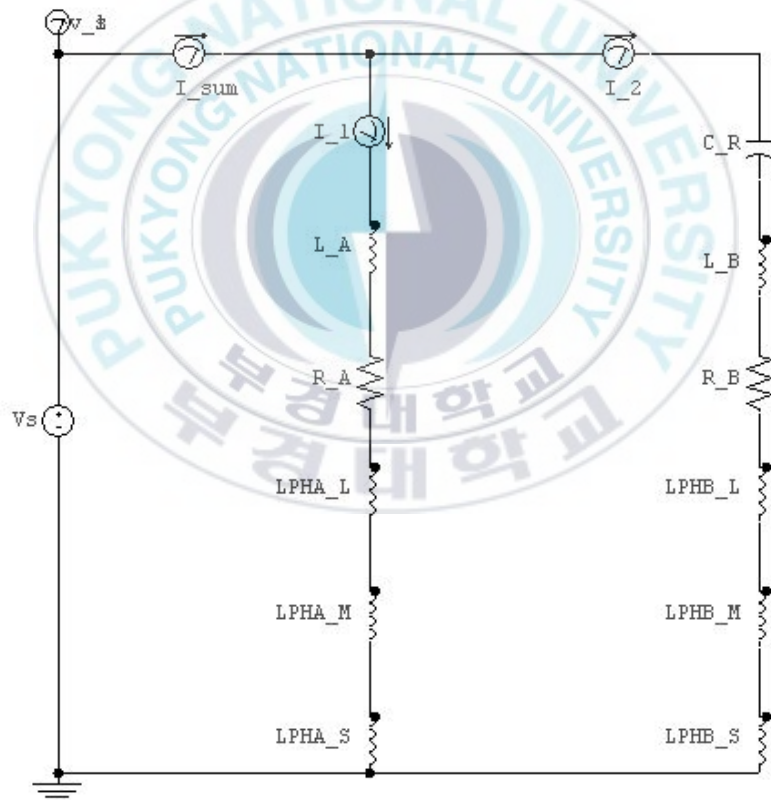
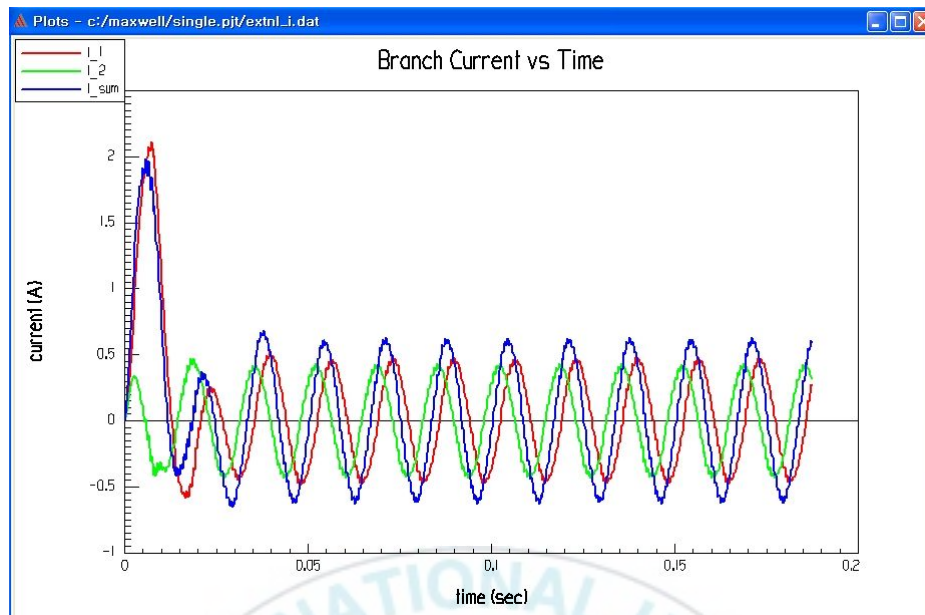
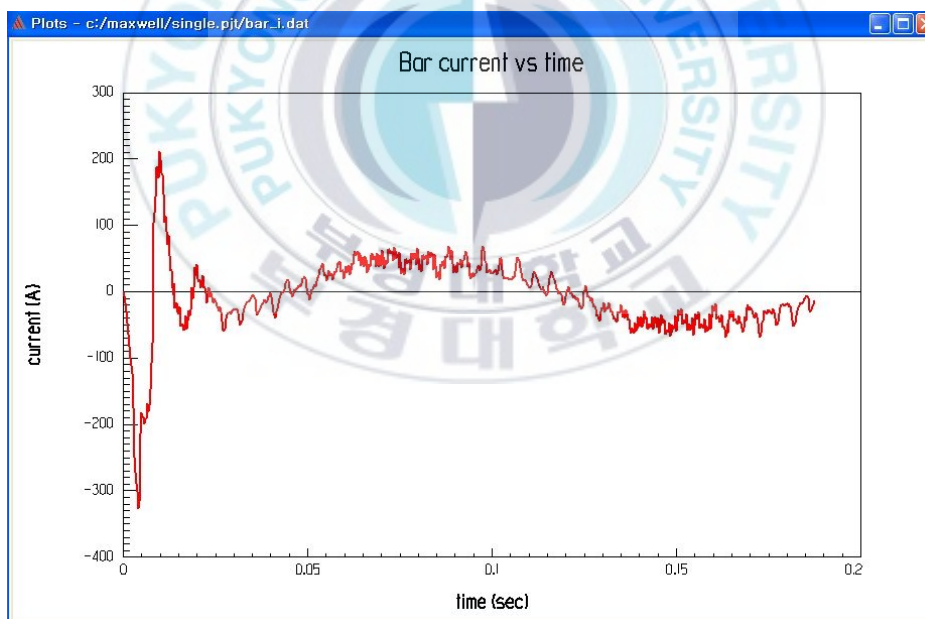


그림 4.14 단상 유도전동기 구동용 외부회로



(a) 권선전류



(b) 바에 흐르는 전류

그림 4.15 유한요소 해석결과

그림 4.16은 시간이 $\text{Time} = 0.14[\text{sec}]$ 정도일 때의 단상 유도전동기의 자속선도를 나타낸다. 2극을 해석하였지만 자속이 잘 발생하고 있음을 알 수 있으며, 그림에 나타나 있지 않은 부분은 자속선도로부터 유추할 수 있다.

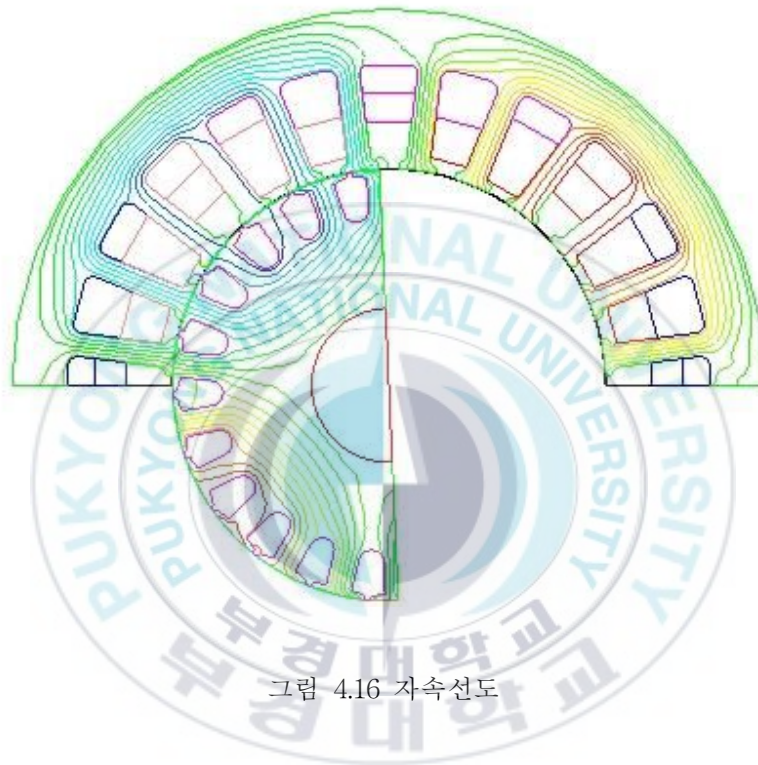


그림 4.16 자속선도

제 5 장 결 론

본 논문에서는 단상 유도 전동기의 설계 및 특성해석에 대하여 고찰하였으며 연구결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 단상 유도전동기의 기본원리와 회전원리 그리고 단상 유도전동기 종류 중 하나인 영구분상-커패시터 전동기를 채택하여 이론적인 특성을 고찰하였다.

2. 단상 유도전동기의 특성해석을 위한 유한요소법에 대한 기본적인 이론을 고찰한 뒤 맥스웰 방정식을 사용하여 해석에 사용되는 방정식을 유도하였다.

3. 상용 프로그램인 Rmxpert를 사용하여 기본설계를 하였고 특성해석을 위하여 Maxwell 상용 유한요소 해석 프로그램을 사용하였다. 유한요소 해석결과인 단상 유도전동기의 권선전류 및 바에 흐르는 전류 그리고 자속선도로부터 정확한 특성해석이 이루어 졌음을 알 수 있었다.

4. 단상 유도전동기의 설계 및 특성해석을 행한 경험을 바탕으로 다른 전동기의 설계 및 3차원 유한요소 특성해석도 가능할 것이라고 생각된다.

참고문헌

- [1] John C. Andreas, *Energy Efficient Electric Motors*, Marcel Dekker, Inc., pp. 243-245, 1992
- [2] D. Sarker, P. K. Mukherjee, S. K. Sen, "Temperature rise of an induction motor during plugging," *IEEE Trans. on Energy conversion*, Vol. 7, No. 1, pp. 116-124, 1992.
- [3] S. Nonaka, M. Yamamoto, M. Nakano, M. Kawase, "Analysis of ventilation and cooling system for induction motors," *IEEE Trans. on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-100, No. 11, pp. 4635-4643, 1981.
- [4] A. Williams, "Heat flow across Stacks of Steel Lamination," *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol. 13, No. 3, pp. 217-223, 1971.
- [5] D. Sarker, P. K. Mukherjee and S. K. Sen, "Approximate Analysis of Steady State Heat Conduction in an induction Motor," *IEEE Trans. on EC*, Vol. 8, No. 1, 1992
- [6] A. F. Armor, "Transient three dimensional finite element analysis of heat flow in turbine generator rotors," *IEEE Trans on PAS*, Vol. PAS-99, No. 3, 1980.
- [7] J. H. Bone, "Cooling and cooling circuits for electric motors," *IEE J. on Electric Power Applications*, Vol. 1, No. 2, pp. 37-44, 1978.
- [8] Austin H. Bonnett, "Analysis of Rotor Failures in Squirrel Cage Induction Motors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 24, No. 6, pp. 1124-1130, 1988.

- [9] S. Williamson, "Steady state analysis of 3 phase motors with rotor bar and end ring faults," *IEE Proc.* Vol. 129, No. 3, pp. 93-100, 1982.
- [10] Joachim Lindstrom, "Calorimetric Methods for Loss Measurement of Small Cage Induction Motors," *Report 42, Helsinki University of Technology*, Lab of Electromechanics, Espoo, Finland.
- [11] Huang, H., Fuchs, E.F., White, J.C., "Optimization of single-phase induction motor design. II. The maximum efficiency and minimum cost of an optimal design," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 3, No. 2, pp. 357-368, 1988.
- [12] Huang, H., Fuchs, E.F., White, J.C., "Optimal placement of the run capacitor in single-phase induction motor designs," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 3, No. 3, pp. 647-652, 1988.
- [13] Bousbaine, A., "A thermometric approach to the determination of iron losses in single phase induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp. 277-283, 1999.
- [14] Domijan, A., Jr., Yuexin Yin, "Single phase induction machine simulation using the Electromagnetic Transients Program: theory and test cases," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 3, pp. 535-542, 1994.
- [15] 임달호, *전기계의 유한요소법*, 동명사, 1992

A Study on the Design and Characteristics Analysis of a Single Phase Induction Motor

Chea-Hong Lim

Department of Electrical Engineering
Graduate School of Industry
Pukyong National University

Abstract

The need for power is increasing with the economic growth and advance of life level. The 3 phase induction motor is widely used in every industry and consume much power because its structure and manufacture are very simple and maintenance fee is low. Recently its speed control characteristics are better than before due to the development of power electronics and control technology.

In the house and small industry the 3 phase power can be used. Therefore, the single phase induction motor is used to get the mechanical power in that places. Researches for the high efficiency of the single phase induction motor are activated.

This paper describes the characteristics analysis of the single phase induction motor by using the commercial finite element method. The basic design is done by the commercial software(Ansoft RM Expert) and the characteristic analysis of the brushless DC motor is done by Maxwell software.

We can get design data and characteristics curve of the single phase induction motor from the design software. The design software can change

the design data to the analysis model for finite element analysis.

