



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

유한요소법을 이용한 3상
유도전동기의 고장해석



2009 年 8 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

金 在 坤

工學碩士 學位論文

유한요소법을 이용한 3상 유도전동기의 고장해석

指導教授 朴 瀚 錫

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함.



2009 年 8 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

金 在 坤

金在坤의 碩士學位 論文으로 認准함

2009年 8月



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. 3상 유도전동기 이론	3
2.1. 기본구조	3
2.2. 회전자계	4
2.3. 운전특성	8
3. 고장 발생	10
3.1. 고장 발생의 원인	10
3.2. 회전자 결함	13
4. 특성해석	15
4.1. 유한요소법 개요	15
4.2. 유한요소해석 정식화	18
5. 고장 진단 방법 및 해석결과	20
5.1. 고장 진단 방법	20
5.2. 해석 방법	21
5.3. 해석 결과	31
6. 결론	33
참고문헌	34
Abstract	35

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

전동기(electric motor)는 전력을 이용하여 기계 동력을 발생하는 회전 기로서, 전기에너지를 기계 에너지로 변환하는 회전 기계이다. 즉, 펌프, 송풍기, 압축기 등을 구동하는 구동기로서 산업 현장에서 가장 널리 사용되고 있고, 중요한 역할을 담당하고 있다.

전동기는 단일 품목으로 국내 최대 전력 소비량을 차지하고, 특히 3상 유도 전동기는 국내 전체 소비 전력의 약 40% 이상을 차지하는 것으로 알려져 있다. 선진국의 경우에도 총 소비 전력량 중 약 60%를 산업용 전동기가 소비하는 것으로 추산되고 있다.

유도 전동기는 구조가 간단하고 견고하며 가격이 비교적 저렴하고 취급이 편리한 등의 이점으로 인해 산업계에서 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 유도 전동기는 최근 대용량화, 고속화에 따라 대규모화하고 있고, 고속의 운전 속도, 대규모의 하중 그리고 가혹한 운전 조건으로 인해 고장이 많이 발생하고 있다[1]. 전동기의 고장 분석에는 고장 원인과 증상과의 관계에 대한 정보가 필요하다. 고장이 발생했을 경우, 그 원인을 추정하는 데에는 매우 전문적인 지식이 필요하다. 이러한 배경으로 고장 진단 기술의 자동화에 대한 연구가 현재 세계적으로 활발히 진행되고 있다[2-19].

1.2 연구내용

본 논문에서는 유도전동기 중에서 3상 농형 유도전동기의 회전자 불결함시의 특성해석에 대하여 고찰하며 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

1장에서는 연구배경 및 연구내용에 대해서 설명한다.

2장에서는 3상 유도전동기의 기본구조와 회전자계 및 운전특성에 대하여 고찰한다.

3장에서는 3상 유도전동기의 고장 발생의 원인과 고장의 종류 중 회전자 결함에 대해서 고찰한다.

4장에서는 특성 해석을 위한 유한요소법에 대한 기본적인 이론을 서술한다.

5장에서는 결함 진단방법 및 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 JMAG-studio을 이용한 해석결과를 확인한다.

6장은 결론에 대해서 설명한다.

제 2 장 3 상 유도전동기 이론

2.1 기본 구조

3 상 유도 전동기의 3상 권선은 전동기 프레임(frame) 내부에 있는 고정자 슬롯 속에 설치되어 있다. 회전자 철심은 성층된 강자성체를 사용하며 철심의 표면에는 슬롯이 절단되어 있다. 회전자 권선의 형식은 농형(squirrel-cage type) 또는 권선형(wound-rotor type) 이다. 그림 1(a) 는 3 상 농형 유도전동기의 단면도이다. 각 상권선 사이의 위상각은 전기적으로 120° 떨어져 있다. 권선 aa' 는 a 상 권선, bb' 는 b 상 권선, cc' 는 c 상 권선으로 표시한다. 이러한 상권선의 끝부분은 3 상 연결 방식을 이루기 위하여 그림 1(b) 와 같이 Y 방식 또는 그림 1(c) 와 같이 델타(Δ) 방식으로 연결되어 있다. 평형 3상 전류가 이러한 3상 권선에 흐를 경우 공극에서는 일정 크기, 일정 속도의 회전자계가 발생하고, 회전자 회로에서는 전류가 유도되어 토크가 발생된다.

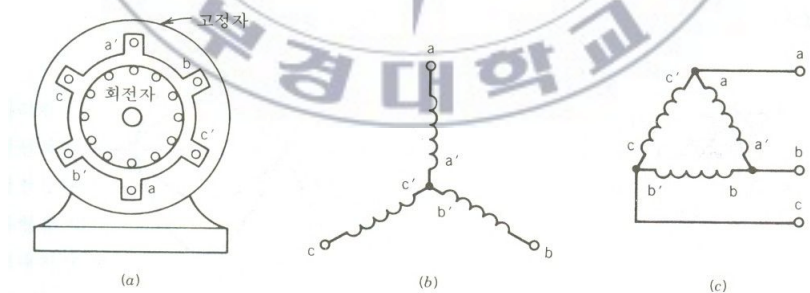


그림 1. 3상 농형유도기.

(a) 단면도, (b) Y결선 고정자 권선, (c) Δ 결선 고정자 권선

2.2 회전 자계

그림 2(a) 에서 aa', bb' 및 cc' 로 표시된 3상 권선은 고정자 내부 표면의 공간에서 서로 전기적으로 $2\pi/3$ 떨어져 설치되어 있다. 전류가 상 권선에 흐를 때 상(相) 권선으로 표시 되는 코일의 축에는 정현파 형태로 분포된 기자력이 발생되고 교류 전류가 코일에 흐른다면 이에 따라 발생하는 기자력 파형은 진동한다. 이때 기자력 파형의 크기와 방향은 권선에 흐르는 전류의 순시치에 따라 결정된다.

그림 2(b) 는 기자력의 공간적인 분포도로서 코일 aa' 에 교류 전류가 흐를 때 기자력의 순시치가 변화됨을 보여주고 있다. 각 상권선은 정현파에 가까운 기자력 파형을 발생하며 공간에서 서로 $2\pi/3$ 전기적으로 떨어져 있다.

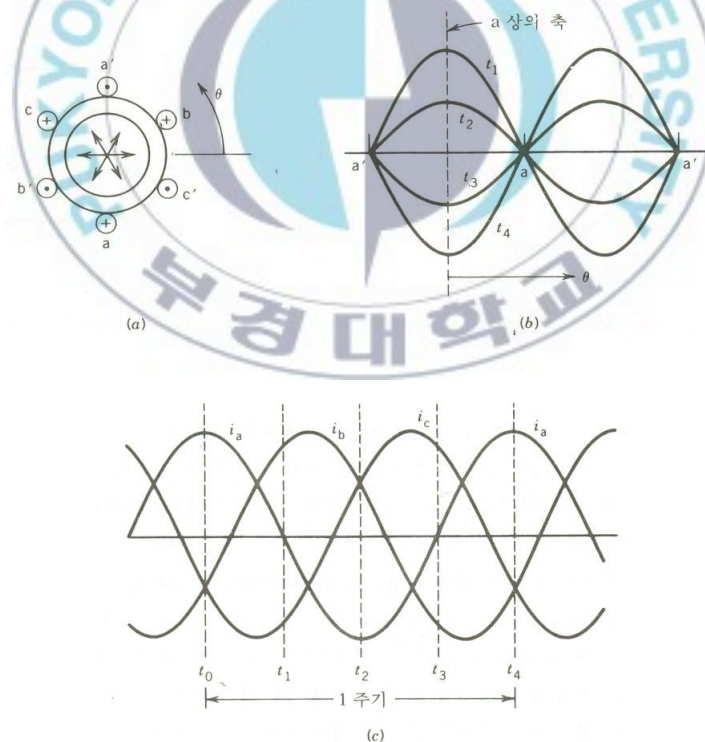


그림 2. 기자력 파형

3상 권선에 평형 3상 전류가 흐른다고 가정하자. 3상 전류는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$i_a = I_m \cos \omega t \quad (1)$$

$$i_b = I_m \cos (\omega t - 120^\circ) \quad (2)$$

$$i_c = I_m \cos (\omega t + 120^\circ) \quad (3)$$

이러한 순시전류는 그림 2(c) 에서 보여 주고 있다. 그림 2(a) 에서는 각 상의 전류가 권선에서 흐를 때의 기준 방향을 코일 단면에서 점(•) 과 십자(+) 로서 표시하였다. 상 전류가 각각의 상 권선에 흐를 때 각 상 권선은 공간적으로 정현파 형태의 기자력 파형을 발생시킨다.

각 상의 축을 따라서 기자력은 진동하고 상의 축에서 기자력의 최대치가 유지된다. 각 기전력의 파형은 상의 축에 위치하는 공간 벡터로 표시 할 수 있으며 그 크기는 전류의 순시치에 비례한다. 기자력의 합성 파형은 3 상 기자력 파형의 각각 성분을 합한 것으로서 이는 그림으로 설명 할 수 있다.

각각 순간의 위치와 이 때 합성 기자력 파형의 크기와 위치를 생각해 보자. 그림 2(c) 로부터 $t = t_o$ 인 순간, 상 권선에서 흐르는 전류의 크기는 다음과 같다.

$$i_a = I_m \quad : a \text{ 상 권선에 흐르는 전류} \quad (4)$$

$$i_b = -\frac{I_m}{2} \quad : b \text{ 상 권선에 흐르는 전류} \quad (5)$$

$$i_c = -\frac{I_m}{2} \quad : c \text{ 상 권선에 흐르는 전류} \quad (6)$$

그림 2(a)에서는 점과 십자로서 각 권선에서 흐르는 전류 방향을 표시하고 있다. a 상 권선에 흐르는 전류가 최대일 때 기자력은 최대치를 가지며 그림 2(a)에서 보는 것과 같이 a 상 축의 정방향으로 벡터 $\vec{F}_a = \vec{F}_{\max}$ 로서 표시된다. b 상과 c 상의 기자력은 각각 벡터 $\vec{F}_b$ 와 $\vec{F}_c$ 로서 표시되며, 그 크기는 $\vec{F}_{\max}/2$ 이며, 그 방향은 각축의 정방향으로 표시된다. 세 벡터의 합성은 a 상 축의 정방향이며 그 크기는 $\vec{F} = \frac{3}{2}\vec{F}_{\max}$ 이다. 그러므로 이 순간 기자력 합성 파형은 a 상 기자력과 같은 정현파 형태로 분포되었으며 크기는 a 상 기자력 파형에 대해 1.5배이다. 그림 2(b)는 $t = t_0$ 일 때 각 상의 기자력 파형과 합성 파형을 보여주고 있다.

그림 2(c)에서 $t = t_1$ 일 때, 각 상전류와 기자력은 다음과 같다.

$$i_a = 0, \quad F_a = 0 \quad (7)$$

$$i_b = \frac{\sqrt{3}}{2}I_m, \quad F_b = \frac{\sqrt{3}}{2}F_{\max} \quad (8)$$

$$i_c = -\frac{\sqrt{3}}{2}I_m, \quad F_c = -\frac{\sqrt{3}}{2}F_{\max} \quad (9)$$

그림 2(c)는 $t = t_1$ 일 때 각 상전류의 방향, 기자력의 벡터의 성분 및 기자력의 합성 벡터를 보여주고 있다. 여기서 기자력 합성 벡터는 $t = t_0$ 에서와 같이 그 크기가 1.5배이다. 그러나 그 방향은 공간에서 시계 반대 방향으로 90° (전기각) 회전하였다. $t = t_2$ 와 $t = t_3$ 일 때 전류와 합성 기자력은 각각 그림 3(d) 와 3(e)에서 보여주고 있다.

시간에 대한 합성 기자력 파형은 공간적으로 같은 크기의 정현파 모양으로 분포하며 공극을 통하여 이동한다. 전류 변화의 한 주기에서 합성 기자력 파형은 그림 3(a)의 위치로 되돌아온다.

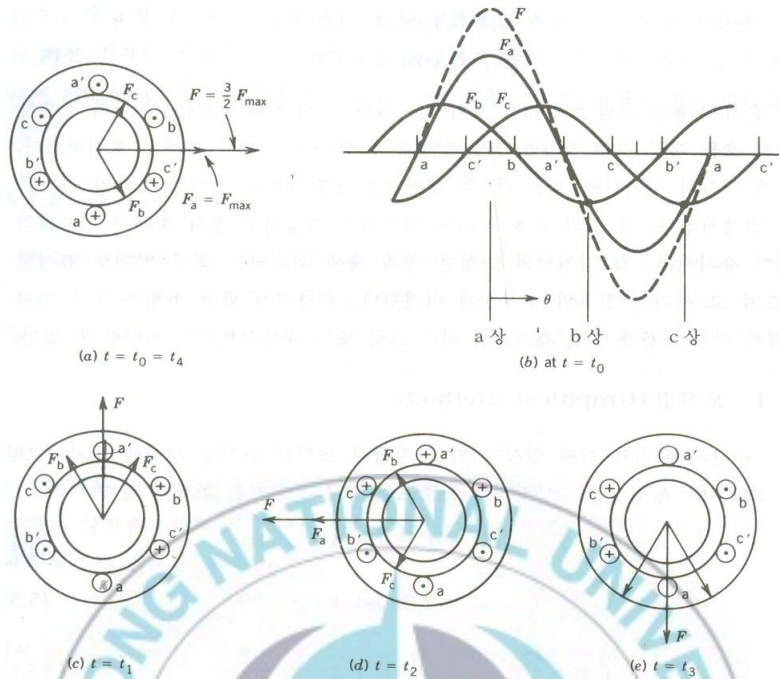


그림 3. 그림 형식으로 보여주는 회전 자계:
여러 순간의 기자력

그러므로 합성 기자력 파형은 양극기에서 전류 변화의 한 주기에 대해 1 회전하게 된다. p 극기에서 전류가 한 주기 동안 변화 할때 기자력 파형은 $2/p$ 동안 회전하게 된다. 입력 전류의 초당 주파수가 f 인 p 극기에서 회전 기자력 파형 (rotating mmf wave) 의 분당 회전수 (rpm: revolution per minute; rpm) 는 다음과 같다.

$$N = \frac{2}{p} f 60 = \frac{120f}{p} [rpm] \quad (10)$$

만약 i_a 가 a 상 권선에 흐르고, i_b 는 c 상 권선에 흐르고, i_c 는 b 상 권선에 흐른다면 회전 기자력 파형은 시계 방향으로 회전하게 된다. 즉, 권선에서 상의 순서 (phase sequence) 를 반전하게 되면 이에 따라 회전 기자력 파형도 반대 방향으로 회전하게 된다.

2.3 운전 특성

고정자 권선이 3상 전원에 연결되고 회전자 회로가 단락될 경우, 회전자 권선에서는 기전력이 유기되며 이 기전력에 의하여 회전자 전류가 발생한다. 이 회전자 전류는 공극 속의 회전 자계와의 상호 작용에 의하여 토크를 발생시킨다. 이에 따라 회전자는 회전하기 시작한다. 렌츠의 법칙 (Lenz's law) 에 의해 회전 자계와 회전자 권선 사이의 상대 속도를 감소시키기 위하여 회전자는 회전 자계의 방향으로 회전한다.

공극에서 회전 자계의 속도를 동기 속도 N_s 라고 하며, 회전자의 속도는 동기 속도 N_s 보다는 작지만 안정된 속도 N 에 도달하게 된다. 회전자의 속도가 동기 속도와 같을 경우 회전자 회로에서는 기전력과 전류가 발생하지 않으며 따라서 토크도 발생하지 않는다.

회전자 속도 N 과 회전 자계의 동기 속도 N_s 와의 차이를 슬립(slip) s 라고 하며, 이를 정의하면

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (11)$$

만약 당신이 회전자 위에 앉아 있다면 당신은 회전자가 회전 자계에 대해 슬립 회전수는 $slip \text{ rpm} = N_s - N = sN_s$ 로서 미끄러지는 것을 알 수 있을 것이다. 회전자 회로에서 유기되는 기전력과 전류의 주파수 f_2 는 이러한 슬립 회전수 (slip rpm) 에 대응하게 된다. 왜냐하면 슬립 회전수는 회전 자계와 회전자 권선 사이의 상대 속도이기 때문이다. 식 (10) 으로부터

$$\begin{aligned}
f_2 &= \frac{p}{120}(N_s - N) \\
&= \frac{p}{120}sN_s \\
&= sf_1
\end{aligned} \tag{12}$$

이러한 회전자 회로의 주파수 f_2 를 슬립 주파수 (slip frequency) 라고 한다. 슬립 s 의 회전자 회로에서 유기되는 기전력은

$$\begin{aligned}
E_{2s} &= 4.44f_2N_2\Phi_pK_{w2} \\
&= 4.44sf_1N_2\Phi_pK_{w2} \\
&= sE_2
\end{aligned} \tag{13}$$

여기서 E_2 는 회전자가 정지할 때 회전자 회로에서 유기되는 기전력으로서, 이때의 주파수는 고정자 주파수 f_1 과 같다.

3상 회전자 권선에서 유기된 전류는 회전 자계를 발생시킨다. 이때 회전자측의 상대 속도 n_2 는

$$\begin{aligned}
N_2 &= \frac{120f_2}{p} \\
&= \frac{120sf_1}{p} \\
&= sN_s
\end{aligned} \tag{14}$$

회전자는 N [rpm] 의 속도로 회전하므로 공극 내의 회전자 자계의 속도는 $N_1 + N_2 = (1-s)N_s + sN_s = N_s$ [rpm] 가 된다. 그러므로 고정자 자계와 회전자 자계는 공극에서 같은 동기 속도 N_s 로 회전한다. 이러한 두 자계의 상호 작용이 토크를 발생한다.

제 3 장 고장 발생

3.1 고장 발생의 원인

기계 설비에 응력이 가해지면, 손상이 발생하고 이는 성능 저하로 이어지며 결국에는 기능 상실을 통하여 고장(failure)에 이르게 된다. 최종 고장까지의 진행 단계로는 초기 고장, 초기 손상, 피로(distress), 열화(deterioration), 손상 및 최종 고장으로 이어진다[1].

전동기의 사용 중, 전동기를 구성하는 어느 부품이 설계에서 의도한 기능의 일부 또는 전부를 잃어버릴 때 이를 고장이라 하고, 고장 상태의 형식에 따라 분류하는 형태를 고장 형태 또는 고장 모드(failure mode)라 한다. 고장 모드에는 변형, 균열, 파손, 마모, 부식, 표면 균열, 헐거움, 탈락, 고착, 소손, 이물질, 오염, 누설, 침식, 변질, 개방, 단선, 단락, 이상음 등이 있다. 이들 고장 모드와 그 발생 원인의 규명은 고장 분석(failure analysis)과 진단 분야의 중요한 문제이다. 고장 해석의 목적은 향후 고장 발생을 예방하며, 설비의 수명 기간을 통하여 기계의 안전(safety), 신뢰도(reliability) 및 정비도(maintainability)를 보증하기 위한 것이다.

전동기의 설계에서부터 현장설치, 운용 및 폐기까지의 전체 수명주기(life cycle) 동안에 발생할 수 있는 결함 및 그 발생 원인은 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 설계상의 결함(faulty design): 설계 실수, 도면의 준비 부족 및 실수
- 재료 결함(material defects): 부적절한 재료의 선정
- 제작/조립상 결함(manufacturing/assembly deficiencies)
- 품질 관리(quality control) 결함
- 설치상 결함(installation defects)

- 사용상 결함(off-design service condition)
- 정비상 결함(maintenance deficiency)

표 1 은 유도 전동기의 주요 구성 요소들에서 발생할 수 있는 주요 고장 모드와 결함 패턴을 나타낸다. 따라서 이 표는 고장이 발생한 전동기의 조사를 실시할 때 점검 시트(check-off sheet)로서 활용될 수 있을 것이다.

표 1. 유도 전동기의 고장 모드와 고장 패턴 예 (Bonnett)

구성요소	고장 모드	고장 패턴
고정자 권선	권선간(turn to turn) 상간(phase to phase) 상-접지 간(phase to ground) 코일간(coil to coil) 개방회로(open circuit)	대칭적 단상화 비대칭적 및 접지 비대칭적 및 비접지
회전자	축(shaft), 베어링(bearing) 적층(lamination) 농형(squirrel cage) 회전자 통풍 시스템	열 응력, 자기 응력 잔류 응력, 동적 응력 기계적 응력 환경적 응력
베어링	피로(fatigue spalling) 프레팅(fretting) 얼룩, 스미어링(smearing) 미끄럼(skidding) 윤활 고장(lubrication failure) 홈(fluting) 균열(crack) 녹아 붙음(seizure)	과대응력, 과열 진동 및 소음 윤활 품질 설치, 끼워 맞춤 오염 기계적 손상 전기적 손상 하중 패턴
축	과부하(overload) 피로(fatigue) 부식(corrosion)	연성(ductile), 취성(brittle) 파괴 Beach 흔적, 조가비 모양 흔적 갈매기 표시(chevron) 흔적 래칫(ratchet) 흔적, cup/cone, Shear lips, 프레팅

다른 회전 기계와는 달리 유도 전동기는 전자기력(electromagnetic force)과 기계력(mechanical force)의 영향을 동시에 받고 있기 때문에, 전동기는 정상 상태에서 이들 힘 사이의 상호작용이 진동과 소음에 미치는 영향을 최소화 되도록 설계·제작되어야 한다.

그러나 결함이 발생하게 되면, 전자기력과 기계력 사이의 평형(equilibrium)을 잃게 되고 결함의 발생과 성장으로 나타나게 된다. 따라서 정상 운전 시에 기계의 상태를 감시하고, 전동기에 결함이 발생하여 이상 상태가 되었을 때 그 원인을 진단을 하기 위한 측정이 중요하다. 더구나 대형 전동기와 같이 중요 회전 기계의 구동기로 사용되는 경우에는 기계의 상태를 나타내는 파라미터들의 연속적인 감시에 의해 온라인으로 이를 수행하는 것이 필요하다.

결함들은 전류 신호의 스펙트럼을 비교해 보면 고유의 특징을 가지고 있다. 대부분의 전기적인 문제는 진동 또는 전류 신호 스펙트럼 분석에서 전원 주파수(line frequency)의 2배 성분에서 정상 상태보다 높은 진동 진폭이 발생하며, 기계적인 문제는 운전 주파수 성분이 탁월하다.

3.2 회전자 결함

유도 전동기의 농형 회전자는 그림 4 와 같이 슬롯을 가공한 얇은 규소 강판을 적층하여 철심(core)을 만들고, 이 슬롯 속에 동 또는 알루미늄의 도체 봉(bar)을 삽입하며, 철심의 외측에 회전자 봉의 양단을 단락 링(end ring)으로 단락된 형태로 이루어져 있다. 이 도체 부분(회전자 봉과 단락 링)만을 보면, 농형(cage)을 하고 있다.

3상 유도전동기에서 회전자 관련 결함들의 대부분은 회전자 봉 파손과 단락 링 파손에 기인하고 있다. 최근 고정자 권선의 설계 및 제작에 괄목할 만한 지속적인 향상이 이루어졌다. 유도전동기는 매우 부식성이 있고 열악한 환경에서 운전될 것이 요구되고 있고, 이는 다양한 절연 재료와 처리 절차의 개발을 필요로 하였다. 그러나 농형 회전자의 설계와 제작 기술은 그다지 변하지 않았다. 그 결과로 회전자 봉의 파손 결함은 1980년대에는 유도 전동기에서 발생하는 고장의 약 5~10% 를 차지하였으나, 최근에는 가장 보편적인 결함으로 현장에서 경험되고 있다.

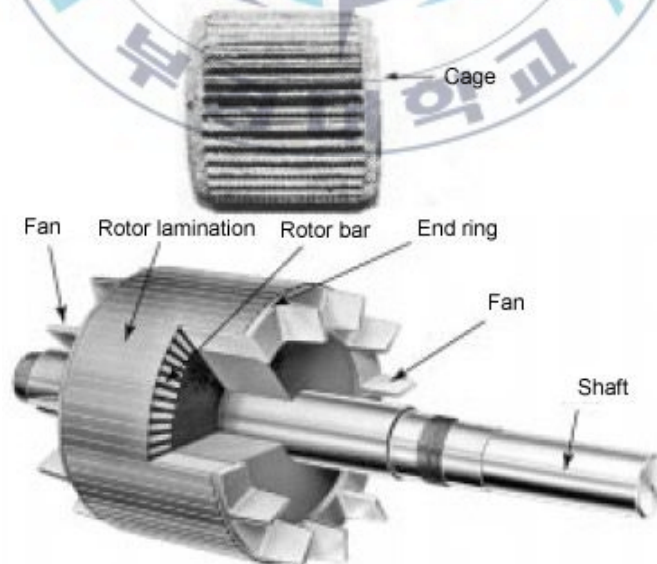


그림 4. 기본적인 농형 회전자 구조

회전자의 결함 문제는 주로 다이캐스팅 회전자의 주조 불량 또는 조립 회전자의 빈약한 용접이나 경랍 땀(brazing)에 의한 높은 저항의 조인트(joint)로부터 발생한다. 이러한 경우 봉에 발생하는 불균일한 응력은 피할 수 없다. 그러나 흔히 대부분의 고장은 피로에 의해 야기되는 봉의 파괴(fracture)에 기인하여 발생한다. 이는 급속 제동과 가속 주기 동안에 필연적으로 회전자 내에 높은 응력을 받는 불균일 하고 무거운 부하 운전을 하는 기계에서는 일반적으로 나타나는 현상이다.

직접적인 고장의 원인은 아니지만, 봉의 파손은 다음과 같은 심각한 2차 결함을 발생시킨다. 첫째로 회전자 봉의 균열에 의해 발생한 미소한 칩(chip)이 고속 회전 중인 고전압 전동기 내부를 따라 돌다가 고정자 코일의 권선 종단(end winding) 부위에 박히게 되면, 전압에 의해 이 부분에서 국부적인 과열이 발생하고 절연 손상을 일으키고, 이는 고정자 권선의 고장으로 발전된다. 두 번째는 고정자와 회전자 사이의 마찰을 일으키고 베어링의 열화 및 과대한 진동을 발생시킬 수 있다.

제 4 장 특성해석

전동기의 정특성 및 동특성을 지배하는 방정식은 편미분 방정식으로 표현되므로 이를 정밀, 신속하게 해를 구해야만 한다. 수치 해석법의 경우 물리적으로 연속적인 형상을 갖는 제반의 형상들을 편미분 방정식으로 표현하여 유한개의 이산치 값을 구하는 방법으로 치환하여 푸는 방법이다.

4.1 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 여러가지가 있으나 해석모델의 복잡한 형상

및 재료의 비선형성 등을 처리하기가 비교적 용이한 유한요소법(FEM)이 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 근사화시켜 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 유도한게 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. 자계해석에서 주로 얻고자 하는 물리적인 양은 자속밀도, 인덕턴스, 전자력이고 그래픽적으로 유용한 정보는 자속 분포, 자속밀도 분포 및 힘 밀도 등이다.

4.2 유한요소해석 정식화

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

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_o + \vec{J}_e \quad (15)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (16)$$

해석영역을 2차원 유한요소법으로 풀기 위해 맥스웰 전자계 방정식 식 (15) 와 식 (16) 으로부터 이동좌표계를 사용하였을 경우 지배방정식을 구하면 식 (17) 과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z + \sigma \frac{dA_z}{dt} \quad (17)$$

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 18 과 같다.

$$\{V\} = [R]\{I\} + [L_0] \frac{d}{dt} \{I\} + \{E\} \quad (18)$$

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 (15) 와 식 (16) 를 결합하여 Galerkin 유한요소법으로 정리하고 시간 미분항에 대해서는 후퇴차분법으로 정리하면 식 (19) 와 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\mu} S & -N \\ 0 & T \\ 0 & L_{eff} N^T \\ R + \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} T & 0 \\ L_{eff} N^T & L_0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_t = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} T & 0 \\ L_{eff} N^T & L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_{t-\Delta t} + \begin{bmatrix} 0 \\ V \end{bmatrix}_t \quad (19)$$

여기서, T : 와전류와 관련된 계수행렬

L_{eff} : z축 방향으로의 유효 직층폭

A : 자기 벡터 포텐셜

I : 출력전류

V : 입력전압

제 5 장 고장 진단 방법 및 해석결과

5.1 고장 진단 방법

지금까지 회전자 봉 파손을 검지하기 위한 다음과 같은 다양한 기술들이 개발되어 왔다.

- 고정자 치단(tooth tips) 및 요크(yoke) 주위에 내부적으로 설치된 검색 코일(search coil)을 이용한 유도 전류(induced current)의 시간 및 주파수 영역 분석
- 전동기 축 주위에 감긴 외부 검색 코일을 이용한 축 누설 자속의 시간 및 주파수 영역 분석
- 전동기 선 전류 또는 전동기 전류 신호 분석(Motor Current Signature Analysis; MCSA)의 스펙트럼 분석
- 전동기 토크 및 속도의 조화 분석(harmonic analysis)

위의 기술 중에도 최근에는 MCSA 가 가장 최적의 기술로 많이 적용되고 있다. 이는 검색 코일로 고정자 권선을 이용하며, 부하 형태나 다른 비대칭성에 영향을 받지 않는 장점이 있다. 봉에 파손이나 균열이 발생하면, 식 (20) 에 주어지는 결함 주파수가 고정자 전류에서 발생하고, 회전자 봉의 파손이나 균열에 대한 특징 주파수로 이용된다.

$$f_b = (1 \pm 2ks)f_L (k=1,2,3,\dots) \quad (20)$$

$k = 1$ 인 기본파의 주파수 측대역 성분 $(1 \pm 2s)f_L$ 이 봉의 파손 결함을 검지하기 위해 일반적으로 사용된다. 결함의 증가는 전류 스펙트럼의 $f_b = (1 - 2s)f_L$ 성분의 진폭을 증가시킨다.

5.2 해석 방법

회전자 봉 결함 시에 발생하는 고정자 전류 성분을 분석하기 위하여 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 JMAG-studio 를 사용하였다.

5.2.1 해석 대상 전동기

진단을 하기 위한 유도 전동기는 아래와 같다. 그림 5 는 유도 전동기 단면적을 표 2 와 표 3 은 재료 특성과 사양을 나타내고 있다. 고정자, 회전자, 그리고 회전자 축의 B-H 곡선은 그림 6 과 같다.

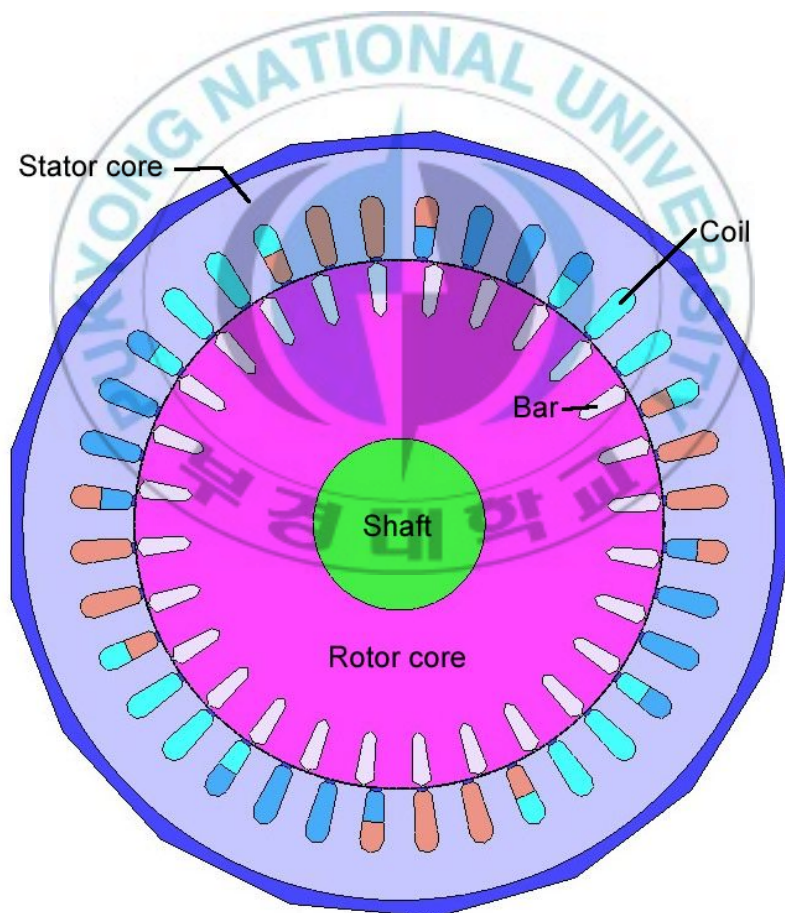


그림 5. 유도 전동기 모델

표 2. 재료 특성

재료 Material	자화특성 Magnetizing properites
고정자 Stator core	등방성 재료 Isotropic magnetic material
회전자 Rotor core	등방성 재료 Isotropic magnetic material
코일 Coil	비자성 재료 Non-magnetic material
회전자 봉 Bar	비자성 재료 Non-magnetic material
회전자 축 Shaft	등방성 재료 Isotropic magnetic material

표 3. 유도 전동기 사양

극수		4
고정자 슬롯		36 개
회전자 슬롯		28 개
전원	전압	220 V
	주파수	50 Hz
	상	3 상 교류
코일	턴수	30 (턴/슬롯)
	저항	8.86157 (Ω /상)
고정자 치수		높이 210 × 너비 210 × 적층 250 (mm)
회전자 치수		반지름 73.65 × 적층 250 (mm)

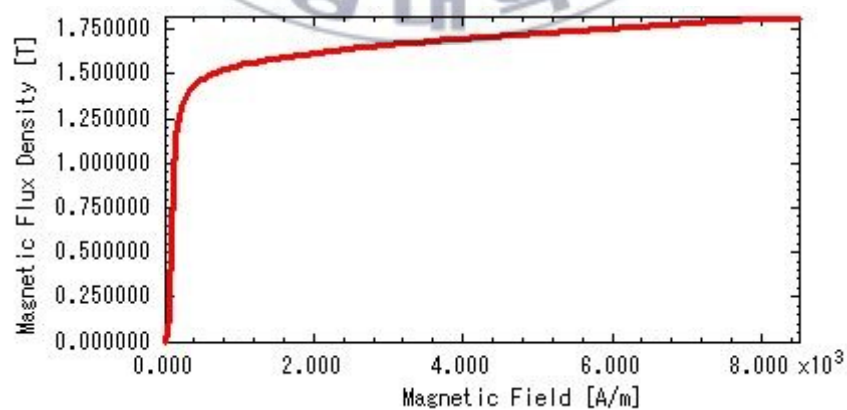


그림 6. B-H 곡선 (고정자, 회전자, 회전자 축)

5.2.2 해석 모델링

유한요소해석을 위한 모델링은 다음과 같다.

- 2D 모델

해석의 편의성과 시간 단축을 위해서 2D 모델링을 한다[20].

- 단락 링

회전자 봉의 저항은 아래 식을 이용해서 계산한다. 회전자 봉의 저항 R_b 와 단락 링의 저항 R_r 을 구하고, 전체 저항 R_2 를 계산한다. 회전자 봉과 단락 링은 알루미늄을 사용하고 도전율은 (3.0×10^7 S/m) 이다. 단락 링의 인덕턴스는 전동기의 특성에 큰 영향을 미치지 않으므로 무시한다.

$$R_b = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l_b}{S_b}$$

$$R_r = 2 \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l_r}{S_r}$$

$$R_2 = R_b + R_r \frac{N_2}{(P\pi)^2}$$

R_b : Resistance of bar

R_r : Resistance of end ring

R_2 : Corrected resistance of bar

N_2 : Number of rotor slots

P : Number of poles

l_b : Length of bar

S_b : Bar cross-section

l_r : Peripheral length of end ring

S_r : End ring cross-section

σ : Conductivity of the conductor

- Mesh

유한요소법을 위해서 해석 대상 전동기 모델 메쉬를 다음과 같이 만들었다.

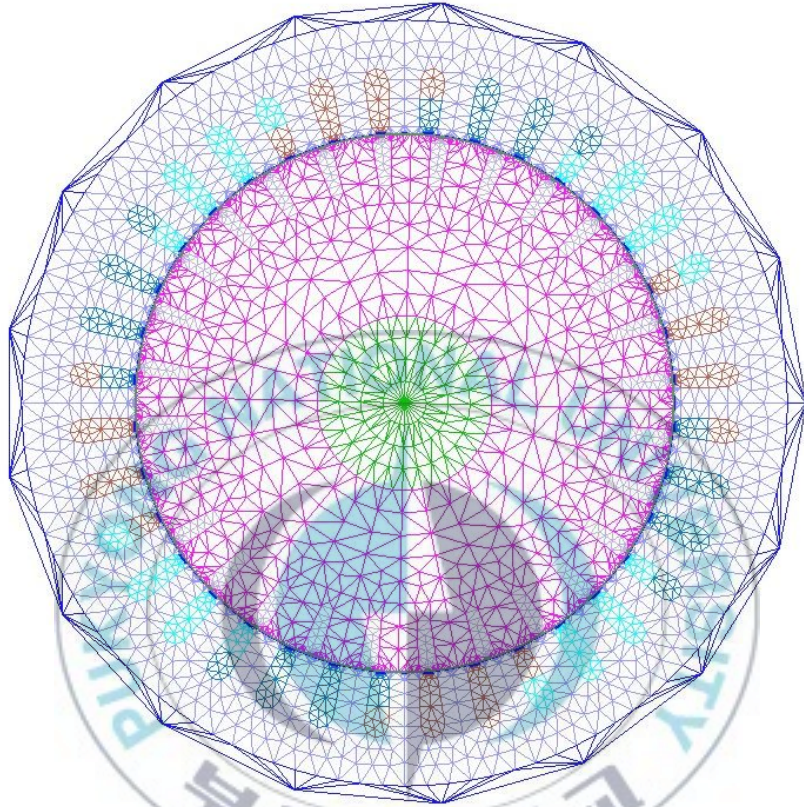


그림 7. 해석 모델 메쉬 모양
(요소개수 : 11500개, 절점개수: 8200개)

5.2.3 해석 상태 설정

특성 해석에 필요한 상태 설정은 다음과 같다.

- Analysis Control
- Step
- Motion
- Electromagnetic Force and Torque Calculation
- FEM Coil
- FEM Conductor
- Adaptive Mesh Control

- Analysis Control

전자기력과 회전자의 회전은 시간에 따라 변하고, 와전류 영향을 고려하기 위해서, 해석 유형을 2D Transient Response Analysis 로 선택한다. 고정자와 회전자의 적층 길이(축 방향 길이)가 같으므로 2D 모델을 사용한다. 그리고 적층 구조 때문에 축 방향 자속의 영향은 무시한다[20].

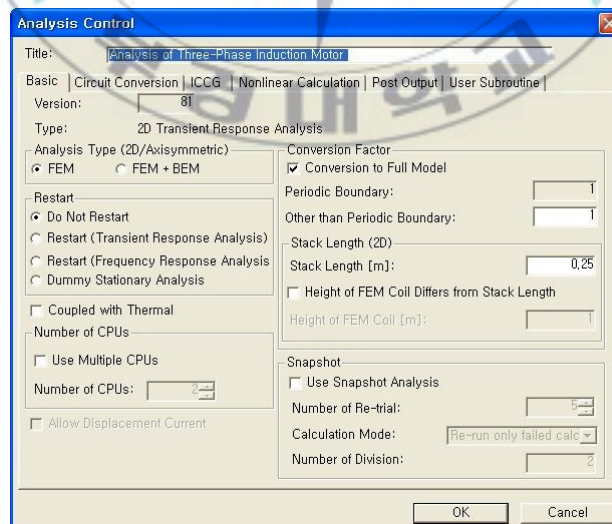


그림 8. Analysis Control

- Step

해석시간을 설정하고, 시간 간격을 결정한다. 이는 토크의 계산에 영향을 미친다. 해석 시간 간격이 작으면 해석시간이 길어진다.

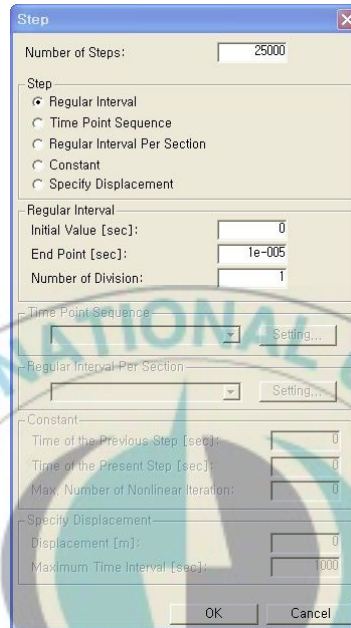


그림 9. Step

- Motion

회전 속도 1350 [rpm] 을 설정한다.(정격 슬립 0.1)

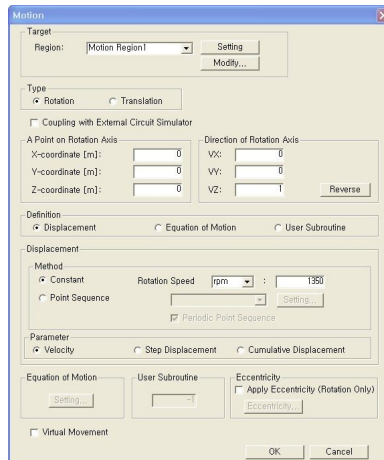


그림 10. Motion

- Electromagnetic Force and Torque Calculation

해석 모델에서 회전자의 전자기력과 토크를 Nodal force 방법으로 계산한다.

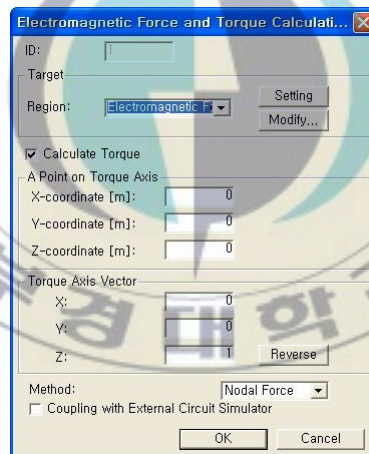


그림 11. Electromagnetic Force and Torque Calculation

- Adaptive Mesh Control

전동기는 고정자와 회전자 사이의 공극에서의 자계 변화가 중요하다. 이 모델에서 공극의 메쉬는 다른 부분과 달리 매우 촘촘한데, 자계의 변화는 공극에서 크고, 다른 부분에서는 비교적 작기 때문에 모델의 크기를 줄이는데 유용한 방법이다[20].

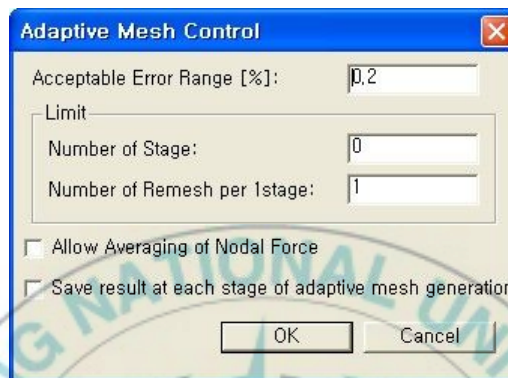


그림 12. Adaptive Mesh Control

- FEM Coil

FEM Coil 은 회로 모델에서 유한요소 모델의 코일을 지정한다. 해석 모델에서 전류의 방향은 아래 그림에 표시된 것과 같다.

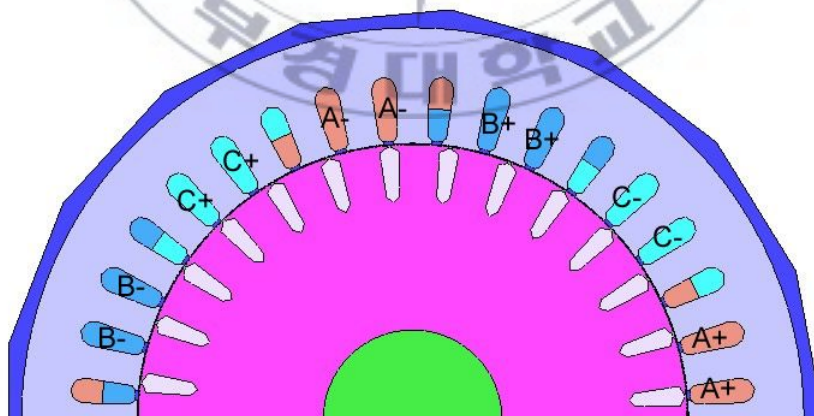


그림 13. FEM Coil (+: 위 방향, -: 아래 방향)

- 고정자 회로 모델

자계 해석은 고정자 회로에서 권선의 전압과 전류를 해석 할 수 있다. 회로의 구성은 3상 전압원과 3상 Y-결선 권선으로 구성되어 있다. 회로의 파라미터는 표3 에 표시되었다. 3상 전압원은 각 상이 120° 위상 차이를 가지고 상전압이 220 [V], 60 [Hz]이다. 권선의 턴수는 30 턴이고 저항은 8.86157 [Ω] 이다.

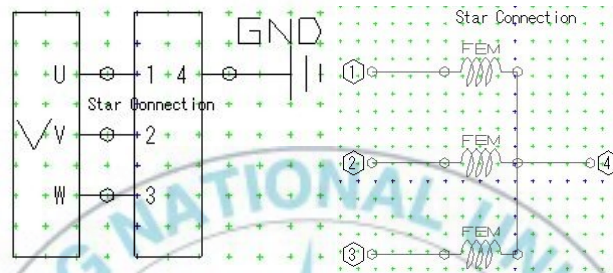


그림 14. 고정자 회로도(좌: 전체회로, 우: Y-결선)

- 회전자 회로 모델

통상 회전자 농형의 파손은 붕이 단락 링과 연결되는 곳과 가까운 부분에서 발생한다. 파손은 붕의 상부 또는 하부에서 시작하는 반경 방향 균열(radial crack)에 의해 진전된다. 회전자 붕이 5개 파손된 상태라 가정 하면, 파손된 회전자 붕에는 전류가 흐르지 않으므로 아래와 같이 회전자 회로도를 구성할 수 있다.

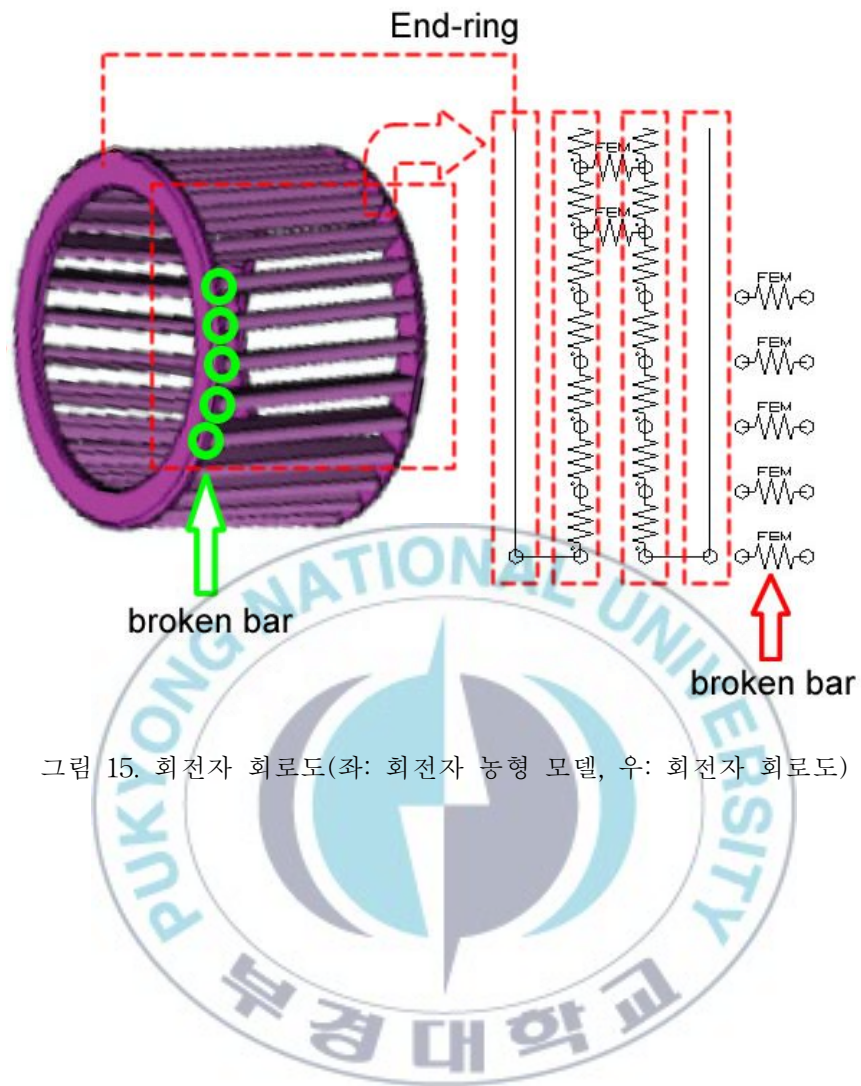


그림 15. 회전자 회로도(좌: 회전자 농형 모델, 우: 회전자 회로도)

5.3 해석 결과

- 고정자 전류

그림 16 은 A 상 권선의 전류이다. 위의 그림은 정상상태인 경우, 아래 그림은 회전자 봉 5 개가 결함 상태인 경우의 시간 변화에 대한 전류 특성 곡선이다. 결함상태의 전류 특성이 많이 왜곡됨을 확인 할 수 있다.



그림 16. A상 권선의 고정자 전류(위:정상상태, 아래:결함상태)

- 고정자 전류 신호 분석

식 (20) 을 이용하면 회전자 봉 결함시의 특징 주파수는 40 Hz, 60Hz 임을 알 수 있다. 그림 17 은 해석 결과의 A 상 전류를 Matlab 으로 고속 푸리에 변환하고 전원 주파수 부분을 확대한 것이다. 정상 상태의 전류 스펙트럼은 실선으로, 회전자 봉 결함 상태의 전류 스펙트럼은 점선이다. 그림 17 에서 결함 상태의 특징 주파수 40 Hz 성분이 정상 상태보다 10% 크게 나타났다.



그림 17. 고정자 전류 신호 분석(전류 스펙트럼)

제 6 장 결 론

본 논문에서는 3상 농형 유도전동기의 회전자 봉 결함시의 특성해석에 대하여 고찰하였으며 연구결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 3상 유도전동기의 기본구조와 회전자계 그리고 3상 농형 유도전동기의 이론적인 특성을 고찰하고, 고장 발생의 원인과 증상을 살피고, 회전자 봉 결함에 대해 고찰하였다.
2. 3상 농형 유도전동기 특성해석을 위한 유한요소법에 대한 기본적인 이론을 고찰한 뒤 상용 유한요소해석 툴인 JMAG-studio를 이용하여 고장 특성을 해석하였고, 고정자 전류의 특성곡선 결과를 얻었다.
3. 고장 특성 해석으로 구한 고정자 전류의 주파수 특성을 고찰하기 위하여 고속 푸리에 변환하였고, 정상 상태와 회전자 봉 결함 상태 사이의 특징주파수 변화를 확인하였다. 이러한 결과로 부터 유한요소법에 의한 전동기 결함 상태 해석이 가능함을 알 수 있고, 회전자 봉 결함 상태에서 특징 주파수가 나타나는 것을 알 수 있었다.
4. 회전자 봉 결함 상태 해석 결과를 바탕으로 다른 유형(편심, 고정자)의 결함 상태의 모델 설계와 3차원 유한요소 특성해석도 가능할 것이라고 생각된다.

참고문헌

- [1] 양보석, 기계 설비의 진동 상태 감시 및 진단, 인터비전, p. 396, 2006
- [2] A.H. Bonnett, G.C. Soukup, Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors, IEEE Trans. Industry Applications, Vol.28, No.4, pp.921-937, 1992
- [3] G.K. Sin호, S.A.S.A. Kazzaz, "Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research- a survey", Electric Power Systems Research, Vol.64, pp.145-158, 2003
- [4] A.H. Bonnett, Squirrel-Cage Rotor Options for AC Induction Motors, IEEE Trans. Industry Applications, Vol.37, No 4, pp.1197-1209, 2001
- [5] J.Penman, A.Stavrou, Broken rotor bars: their effect on the transient performance of induction machines, IEEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 6, pp.449-457, 1996
- [6] W.T. Thomson, M. Fenger, Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults, IEEE Industry Applications Magazine, pp.26-34, 2001
- [7] A. Bellini, et al., On-field experience with online diagnosis of large induction motors cage failures using MCSA, IEEE Trans. Industry Applications, Vol.38, No.4, pp.1045-1053, 2002
- [8] JRI Solutions, Ltd. JMAG Application Note - Analysis of a Three Phase Induction Motor, Version 8.4, October, 2006
- [9] H. A. Toliyat, T. A. Lipo, and J. C. White, "Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications part 1 (motor analysis)," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, pp.679-683, Dec 1991.

- [10] H. A. Toliyat and T. A. Lipo, "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, pp. 241-247, June 1995.
- [11] X. Luo, Y. Liao, H. A. Toliyat, A. El-Antably, and T. A. Lipo, "Multiple coupled circuit modeling of induction machines," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 2, pp. 311-318, March/April 1995.
- [12] H. A. Toliyat, M. S. Arefeen and A. G. Parlos, "A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 4, pp. 910-918, July/August 1996.
- [13] Gojko, J.M.; Momir, D.D.; Aleksandar, O.B., "Skew and linear rise of MMF across slot modeling-winding function approach," Energy conversion, iee transactions on, vol.14, no.3, pp.315-320, sep 1999
- [14] T. A. Lipo, "Theory and control of synchronous machines," Lecture Notes for ECE 511, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin, Madison, 2002.
- [15] Mohamed B.; Mohamed Y.K.; Abdelmalak K., "Park model of squirrel cage induction machine including space harmonics effects," Journal of Electrical Engineering, vol.57, no.4, pp.193-199, 2006.
- [16] F.J. Watson, G.D. Dorrell, "The use of finite element methods of improve techniques for the early detection of faults in three-phase induction motors", IEEE Trans. Energy Convers. 14 (3) (1999) 655-660
- [17] J. Siau, A. Graff, W. Soong and N. Ertugrul, "Broken Bar Detection in Induction Motors Using Current and Flux Spectral Analysis", Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering, Vol 1, Issue 3, pp.174-178, 2004

[18] Obaid, R.R., Habetler, T.G., and Gritter, D.J. "A Simplified Techniaue for Detecting Mechanical Faults using Stator Current in Small Induction Motors", Conference Record of 2000 IEEE 35th IAS, Vol 1, pp.479-483. 2000.

[19] Kliman, G.B. and Stein, J., "Induction Motor Fault Detection via Passive Current Monitoring" Int. Conf. Elec. Mach., pp.13-17, 1990.

[20] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992



Fault Analysis of 3-Phase Cage Induction Motor by using Finite element Method

Jae-Gon Kim

Department of Electrical Engineering Graduate School of Industry
Pukyong National University

Abstract

The induction machine is the most widely used machine in industry and consume much power because its structure and manufacture are very simple and maintenance fee is low. Three-phase induction motors are the most important ones and are most widely used in industry.

This paper describes on the constructional features, rotating magnetic field, and running operation of the 3-phase induction motor. This paper present rotor faults and characteristics analysis of the 3-phase induction motor by using the finite element method.

The characteristics analysis involves two steps. We first simulate the 3-phase cage induction motor by using the commercial software. Then we use motor current signature analysis to diagnose faults in three-phase cage induction machine.

The simulation results indicated that the twice slip frequency sideband due to broken rotor bars. We are going to analyze another fault, such as, rotor eccentricity which could be generated in 3-phase cage induction motor.

감사의 글

이제 비로소 모든 과정을 마치고 논문의 마지막 마무리를 글로 남기려 하니 옛일이 스쳐 지나가면서 베풀지는 못하고 받기만 한 삶을 반성하게 됩니다. 저를 도와주신 분이 이렇게도 많았음에도 불구하고 일일이 찾아 뵙고 감사드리지 못하는 점 용서를 구합니다.

참으로 부족한 저를 학문의 길로 불러 들여 오늘의 제가 있게 해 주신 평생의 스승인 지도교수 박한석 교수님의 은혜에 고개 숙여 깊이 감사드립니다. 바쁘신 가운데 초라한 논문을 맡아서 열과 성으로 심사해 주신 우경일 교수님, 권성열 교수님의 세심한 배려 덕분에 그나마 비로소 논문으로서의 틀을 갖추게 되어 대단히 감사하게 생각합니다.

대학원 생활을 통해 제게 귀감이 되어 주신 박형범 기술사님, 정홍섭 박사님의 도움이 없었더라면 어찌면 학위과정을 무사히 마치지 못했을 지도 모릅니다. 또한 여러가지로 도움을 준 실험실의 선.후배님들께도 감사의 마음을 전합니다.

신라대학교에 재직 중인 송임용 팀장님, 이명철 선생님, 이종완 선생님 등 학교에서 공부를 할 수 있게 도와주신 여러 선생님들에게도 감사드립니다.

사랑과 희생으로 제 인생의 든든한 후원자가 되어 주신 아버님, 어머님, 항상 관심과 걱정으로 보살펴 주신 장인, 장모님께도 감사드립니다. 변함없는 사랑으로 나의 옆자리에서 지켜주던 아내와 아이들이 없었다면 제가 오늘 이 자리에 없었을지도 모릅니다.

끝으로, 참으로 긴 시간을 학업에 매달리느라 집을 비운 시간을 묵묵히 내조해 준 아내 연목에게 이 작은 기쁨을 바칩니다. 그리고 언제나 내 꿈의 언저리에서 맴도는 눈에 넣어도 아프지 않을, 사랑스런 내 인생의 보배 시윤, 나윤, 태경의 앞날에 아버지라는 이름의 작은 등불이 되길 간절한 마음으로 기원합니다.

2009. 7. 1

김 재 곤