

# 유도 전동기 회전자의 전기·기계 결함에 의한 전자기 가전에 의한 진동 특성 및 결함 진단

박 상 진\* · 장 권 회\*\*

(한양대학교 정밀기계공학과)

## 1. 머리말

최근 산업계에서는 전동기를 동력원으로 사용하는 시스템의 사용이 증가하는 추세에 있으며, 그에 따라 전동기의 결함을 미리 진단하고 예방하는 기술에 대한 관심도 높아지고 있다. 특히, 유도 전동기(induction motor)는 다른 전동기에 비하여 우수한 성능을 가지면서도 저렴하고 강인한 구조를 가지기 때문에 산업 현장 및 가정에서 가장 많이 사용되어져 왔고, 지금도 그 수요가 꾸준히 요구되고 있다. 중·대형의 용도로는 삼상(three-phase) 유도 전동기가 주로 사용되며, 가전 등의 비교적 소형의 용도로는 단상(single-phase)의 전력을 이용할 수 있는 단상 유도 전동기가 사용된다. 이러한 유도 전동기에 결함이 발생할 경우에는 기계 및 전기적인 다른 구성 요소에 문제점을 야기시킬 수 있으며, 더 나아가서는 중대한 산업 재해가 발생할 수 있다.

유도 전동기에 있어서 자주 발생하는 결함 중에는 과부하 및 장시간의 운전으로 인한 열 발생이 원인이 되는, 고장자 및 회전자 권선의 개방, 또는 절연의 파괴에 의한 단락 등이 있으며, 기계적으

로는 회전자의 편심, 베어링의 파손 등이 발생할 수 있다. 이러한 전기적, 기계적인 전동기의 결함은 개별적으로 발생하는 것이 아니라, 시스템의 전기 및 기계적인 특성에 상호 영향을 주게 된다. 유도 전동기의 회전자는 대부분이 농형(squirrel cage)의 구조를 가지고 있는데, 회전자 바(bar)의 개방과 회전자의 편심(eccentricity) 등의 회전자 결함은 공극(air gap)에서 비대칭적인 자속(magnetic flux) 분포를 발생시켜 입력 전류, 토크, 불균형 자기력, 편심, 진동 등의 기전 연성 변수(electromechanical parameter)들에 영향을 주고, 이런 변수들의 변화는 회전자의 파손 및 전체 시스템의 이상 작동을 더욱 촉진하게 된다.

과거에는 전동기의 내부에 센서 등을 설치하거나, 작동 중인 전동기를 정지시키고 시스템을 진단하는 방법을 사용했으나, 최근에는 이러한 전동기의 결함을 사전에 방지하기 위한 결함 진단 시스템의 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 전동기의 내부에 센서를 설치하지 않고 이미 작동 중인 전동기에서 외부의 신호만으로 결함을 예측하고 진단하는 non-invasive 진단 기술이 활발하게 연구 중에 있다. 예를 들면, 농형 유도 전동기에서 권선의 전류를 모니터링 함으로써 회전자 바의 개방을 진단하는 실험적인 방법을 제시하거나, 해석을 통해 권선 전류 또는 토크의 변화를 이용하여 회전자 바의 개방 또는 편심을 진단하는 것에 대한 자료를

\* E-mail: sjpark@ihanyang.ac.kr

\*\* 우리 학회 편집위원

E-mail: ghjang@hanyang.ac.kr

제공하는 등의 연구가 진행 중에 있다.<sup>(1~5)</sup> 이미 작동 중인 전동기 시스템에 non-invasive 진단 기술을 적용하기 위한 진단 변수로는 일반적으로 전동기의 입력 전류와 진동 신호를 이용한다. 그러나 지금까지는 회전자의 기계적인 운동을 전기적인 요소와 함께 해석에 고려하지 않았기 때문에, 복합적인 이상 신호를 분석할 수 있는 명확한 자료를 제공하는 것은 쉬운 일이 아니다.

여기에서 소개하고자 하는 것은 유도 전동기의 결합 진단에 대해 전기 및 기계적 신호를 동시에 효과적으로 분석하여 농형 구조의 단상 유도 전동기에서 회전자 바가 개방되었을 경우와 회전자에 편심이 발생하였을 경우의 기계 및 전기적인 연성 효과를 효과적으로 예측하는 방법이다. 이 글에서는 해석 모델을 단상 유도 전동기로 하며, 자계 방정식(maxwell equation), 회로방정식(circuit equation)과 기계 방정식(mechanical equation)을 결합한 비선형 시간 차분 유한요소 해석을 수행하여, 공극의 자속 밀도 분포, 고정자의 전류, 토크, 반경 방향 자기력, 회전자의 진동 등의 변수들이 상호 어떻게 변화하게 되는지와, 이를 이용한 결합 진단 가능성을 소개하고자 한다.

## 2. 단상 유도 전동기의 구조 및 기전 연성 해석

그림 1은 캐패시터(capacitor) 구동형 단상 유도 전동기(permanent split induction motor)의 고정자 및 회전자를 나타내고 있으며, 그림 2는 그 개략적인 전기적 구조를 나타내고 있다. 고정자는 주 권선(main winding)과 보조 권선(auxiliary winding)으로 구성되어 있는데, 보조 권선은 기동 시의 토크 발생과 운전 시의 전류, 전압간의 위상차 보상을 위해 캐패시터가 연결되어 있다. 회전자에는 축방향으로 도체 바(bar)를 삽입하여 양쪽 엔드링(end-ring)에 연결시켜 자계

를 형성하도록 되어있는 구조이다.

유도 전동기의 기전 연성 해석을 위해서는 자계의 지배 방정식과 고정자 및 회전자의 전압 방정식, 그리고 전동기의 기계 방정식을 연성하는 과정이 필요한데, 고정자 및 회전자 철심(core)의 포화 특성을 고려하기 위한 투자율의 비선형 처리가 필요하며, 차분법에 의한 시간 미분항 처리를 통하여 계행렬을 구성하게 된다. 유도 전동기에 적용되는 자계 방정식은 2차원 좌표계에서 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)을 계 변수로 하여 자계 방정식으로부터 나타낼 수 있으며, 그림 2에 나타난 것과 같이 주 권선과 보조 권선으로 이루어진 고정자의 전압방정식을 구할 수

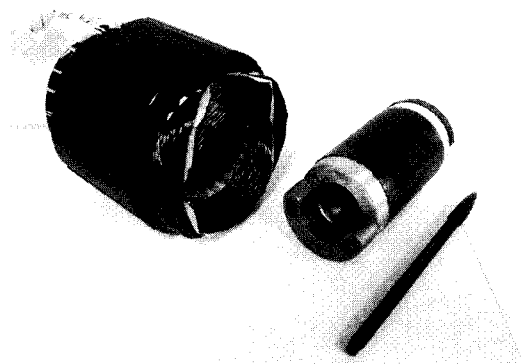


그림 1 단상 유도 전동기의 고정자 및 회전자

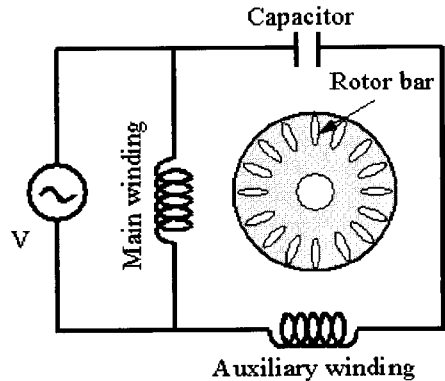


그림 2 단상 유도 전동기의 전기적인 구조

있다. 또한 그림 3에서 보이는 구조와 같이 회전자의 전압 방정식은 회전자 바가 엔드링(end-ring)에 연결된 다상(multi-phase) 회로로 모델링 되어질 수 있다.

기존의 전자장 유한요소 해석에서는 회전자의 운동 방정식을 단순히 회전 자유도만을 가지는 것으로 모델링 하였으나, 이는 반경 방향의 자기력이 발생시키는 전동기의 진동 성분을 관찰할 수 없다. 그러나 전동기를 탄성체로 모델링하여 전기계와 기계계의 유한요소 해석을 동시에 수행하는 것은 계산의 효율 측면에서 바람직하다고 할 수 없다. 반면 회전자의 운동을 단순한 강체 운동으로 가정하면, 비교적 간략한 수치해석 기법을 이용하여 기계계의 운동을 잘 묘사할 수 있다. 그러므로 자계에서 발생하는 토크와 자기력으로 인한 회전자의 운동은 회전자를 강체로 가정하고, 베어링 요소를 탄성체로 가정하면 Newton-Euler의 방정식으로부터 표현되어질 수 있다. 즉, 회전자의 병진(translation) 운동과 경사(tilting) 운동을 고려한 5자유도의 운동 방정식은 그림 4에서와 같이  $x, y, \theta_x, \theta_y, \theta_z$  방향에 대하여 식 (1)과 같은 방법으로 나타낼 수 있다.

$$m\mathbf{a} = \sum \mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{magnetic force}} + \mathbf{F}_{\text{mass unbalance}} + \mathbf{F}_{\text{stiffness}}$$

$$\mathbf{M}\mathbf{a} = \sum \mathbf{M} = \mathbf{M}_{\text{magnetic force}} + \mathbf{M}_{\text{mass unbalance}} + \mathbf{M}_{\text{stiffness}} \quad (1)$$

베어링의 강성은 힘의 평형과 기구학적 적합성

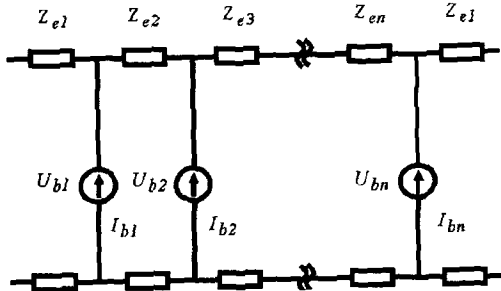


그림 3 회전자의 등가회로

에 의하여 계산할 수 있으며,<sup>(6)</sup> 자기력  $F_{mag}$ 와 토크  $T$ 는 맥스웰 응력법(maxwell stress tensor)에 의하여 계산할 수 있다.

유도 전동기의 기전 연성계 해석을 위하여 전기계에서 발생하는 토크에 의한 회전자의 운동을 효과적으로 묘사하는 방법이 필요하다. 이를 위해, 비선형 시간 차분 유한요소법에 의해 자기장 해석을 수행하고 자기력과 토크를 맥스웰 응력법에 의해서 계산한다. 주어진 기계·전기적인 가진력을 회전자의 운동 방정식에 적용하여 Runge-Kutta 법에 의해 비선형 미분 방정식을 계산한다. 여기에서 회전자의 운동 방정식은 회전자의 회전 방향과 반경 방향의 새로운 위치를 결정하고 자기장 해석을 위한 유한요소들은 이동 요소 기법(moving mesh technique)에 의하여 다시 배치되어진다. 요소(mesh)의 이동은 그림 5에 보여진 것과 같이 회전자와 회전자에 이웃한 공극의 가운데 부분에서 이루어지며, 이동되어지는 요소는 공극의 sliding line을 따라서 접선 방향으로 이동한 후 반경 방향으로 다시 이동하게 된다. 이러한 일련의 과정은 회전자의 속도가 일정해지고 주 권선 및 보조 권선의 전류, 발생 토크, 회전자 바 양단의 전압, 회전자의 변위 등의 모든 변수들이 각각

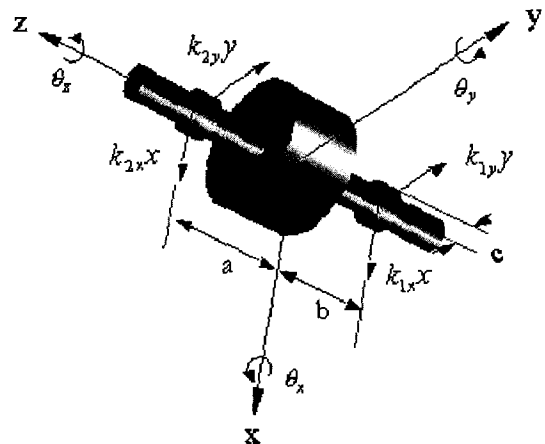


그림 4 회전자의 설정 좌표 및 자유 물체도

의 일정한 주기를 가지고 파형이 계속하여 반복되는, 정상 상태(steady state)에 도달할 때까지 계속되어진다.

이 글에서는 유도 전동기의 회전자 결함을 진단하기 위한 예로서 캐퍼시터 구동형 단상 유도전동기(permanent split capacitor motor)를 해석 모델로 선정하여, 위에서 제안한 방법을 적용하였다. 해석 전동기의 세부 사양은 표 1과 같다.

### 3. 결함 시 전동기의 전기 및 기계적 특성 변화

#### 3.1 회전자 바의 개방

단상 또는 3상 유도전동기는 대부분의 경우 구

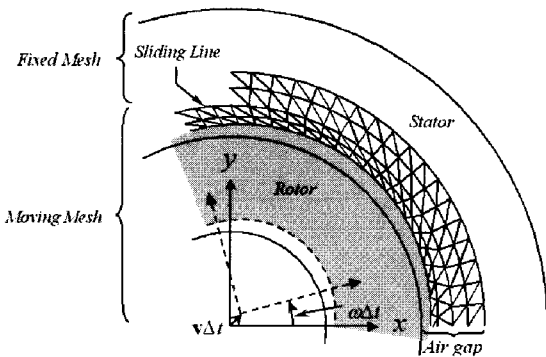


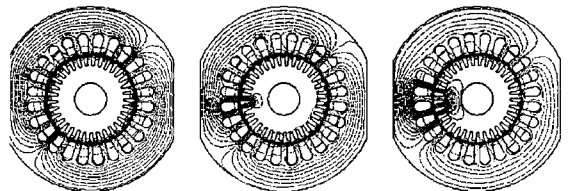
그림 5 이동 메쉬와 회전자의 위치 결정

표 1 해석 전동기의 세부 사양

Symbol	Description	Value
$P$	Power	2.1 kW
$V$	Input voltage	220 V
$f$	Supply frequency	50 Hz
$p$	Number of pole pair	1
$n$	Number of rotor bar	33
$T_L$	Rated load torque	7.848 N·m
$C$	Capacitance	40 $\mu$ m
$m$	Mass of rotor	3.0359 kg
$k_x, k_y$	Stiffness of bearing	4.752e7 N/m

리, 또는 알루미늄으로 이루어진 농형(squirrel cage) 형태의 회전자로 구성되어지는데, 생산 시에 회전자 바(bar)에 기포가 존재할 수 있다. 이런 상태에서 전동기가 계속 사용되어질 경우에는 기동시의 과전류 및 부하의 변동등에 의해 회전자 바가 개방(open)되어질 수 있다. 또한, 회전자 바와 단락 환(end-ring)사이에서 접촉불량이 발생할 수 있으며, 이러한 회전자 바, 또는 단락환의 손상은 과전류로 인한 열 응력의 발생으로 손상을 더욱 가속시키며, 1개의 회전자 바가 개방되었을 경우, 그 주변 바에 과전류를 유발하여 또 다른 바의 손상을 일으킬 수 있다.

그림 6은 정상, 1개, 3개의 개방된 회전자 바를 가지는 경우의 자속 분포를 각각 나타내고 있으며, 개방된 회전자 바 부근에서는 비대칭적 자속 분포를 관측할 수 있다. 실제로 회전자를 전동기로부터 분리시켜서 이러한 자속의 비대칭적 분포



(a) Normal (b) 1 Broken bar (c) 3 Broken bars  
그림 6 회전자 바의 개방에 따른 자속 밀도 분포

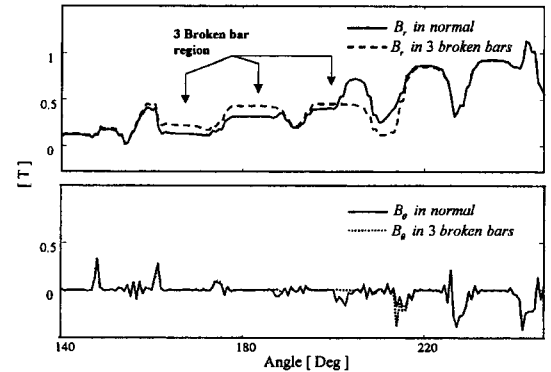


그림 7 공극에서 반경 방향과 접선 방향의 자속 밀도

를 관찰하면 결함 발생 회전자 바를 진단할 수는 있으나, 이는 이미 작동 중인 전동기에는 적용할 수 없다. 그림 7은 정상적인 경우와 3개 회전자 바가 개방된 경우, 공극을 따르는 자속 밀도를 비교하고 있다. 개방된 회전자 바 부근에서 접선 방향 자속 밀도  $B_\theta$  보다는 반경 방향 자속 밀도  $B_r$  값이 훨씬 두드러지게 변화함을 볼 수 있다. 반경 방향 자속밀도는 자기력에 큰 영향을 미치게 되며, 이는 회전자 바의 결함 진단이 입력 전류의 변화보다는 회전자 바의 진동에서 더욱 효율적으로 진단될 수 있다는 것을 말해 준다.

한편, 개방된 회전자 바 부근의 자기 포화는 권선의 역기전력에 영향을 주고, 이는 다시 권선 전류에 영향을 미치게 된다. 그림 8과 그림 9는 정상 회전자 바와 1개, 3개의 개방된 회전자 바가 발생하였을 경우에 시간 영역과 주파수 영역에서의

주 권선 전류의 변화를 각각 보여주고 있다. 그림 8에서 보듯이 개방된 회전자 바의 개수가 증가할수록 맥놀이(beatting) 현상의 증가가 관측되고 있으며, 그림 9로부터 50 Hz의 기본 주파수  $f$  주변에 새로운 주파수 성분(sideband frequencies)들이 생성되는 것을 알 수 있다. 이는 양과 음의 방향의 회전자 기자력(mmf)에 의해 발생되어지며, 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(2)</sup>

$$f_{sbf} = (1 \pm 2sn)f, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$s = 1 - \frac{f_1}{f} \quad (2)$$

여기서,  $f$ 와  $s$ 는 기본 입력 주파수와 슬립률(slip ratio)을 나타낸다. 그림 9의 주파수 분석을 확대한 그림에서 보면, 1개 및 3개 바가 개방된 상태에서 사이드밴드(sideband) 주파수 성분이 발

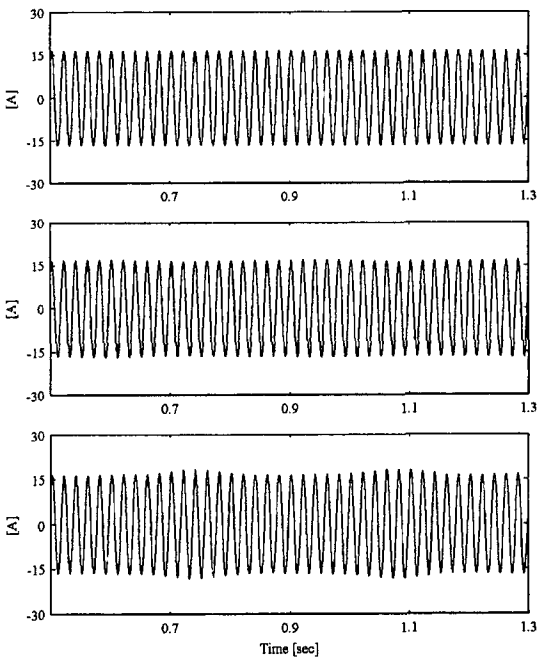


그림 8 정상, 1개, 3개의 바가 개방된 경우 주 권선 전류

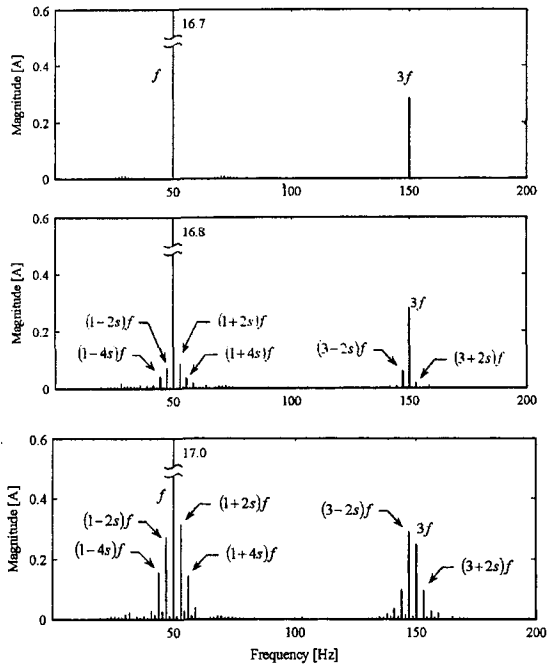


그림 9 정상, 1개, 3개의 바가 개방된 경우 주 권선 전류의 주파수 분석

생하는 것을 알 수 있다. 한편, 사이드밴드 주파수 성분은 주 권선 뿐만 아니라 보조권선 전류, 캐퍼시터 양단의 전압 등에서도 공통적으로 나타나게 되며, 그 성분들은 주 권선 전류와 마찬가지로 식 (2)로 나타낼 수 있다. 그러나 전류에서의 사이드밴드 주파수의 크기는 3개 회전자 바가 개방된 경우와 할지라도 기본 주파수  $f$ 의 크기에 비교하면 약 2% 이내의 상대적으로 작은 값이고, 1개 회전자 바가 개방된 경우에 있어서는 사이드밴드 주파수 성분들의 변화가 매우 미소하므로, 발생한 사이드밴드 주파수가 회전자 바의 개방으로 인한 것인지를 판별하기가 쉽지 않다.

그림 10은 정상, 1개, 3개의 회전자 바 개방에 대한  $x$  방향 자기력의 변화를 나타내고 있으며 절대 좌표  $x-y$ 는 그림 5에 나타낸 것과 같다. 정상적인 전동기에서의 자기력은 자속 분포의 대칭성 때문에 힘의 균형을 유지하고 있지만, 회전자

바가 개방되었을 경우 비대칭적인 자기 분포가 생기면서 자기력에는 불균형이 발생한다. 그림 10에 보여진 것과 같이 자기력은 전류나 속도와는 달리 1개의 회전자 바가 개방된 경우에도 두드러지는 맥놀이 현상을 보이고 있다. 이것은 그림 7에 보여진 것과 같이 자기력이 자속 밀도  $B$ , 값의 제곱에 비례하기 때문이다.

그림 11은 정상, 1개, 3개의 회전자 바 개방에 대한 회전자의  $x$ 방향 변위를 나타내며, 그림 12는 3개 바 개방 경우의 주파수 분석을 나타낸다. 자기력의 가진 성분이 모델로 사용된 회전자의 첫번째 고유주파수인 629 Hz 보다 저주파 영역에 분포하기 때문에, 회전자의 공진은 발생하지 않는다. 그러므로 회전자 변위는 자기력의 분포와 거의 동일한 형상을 가지게 되어 역시 뚜렷한 맥놀이 현상을 보인다.  $y$ 방향 자기력 및 변위의 경우에는  $x$ 방향 성분과 매우 유사한 파형을 가지게 되며,

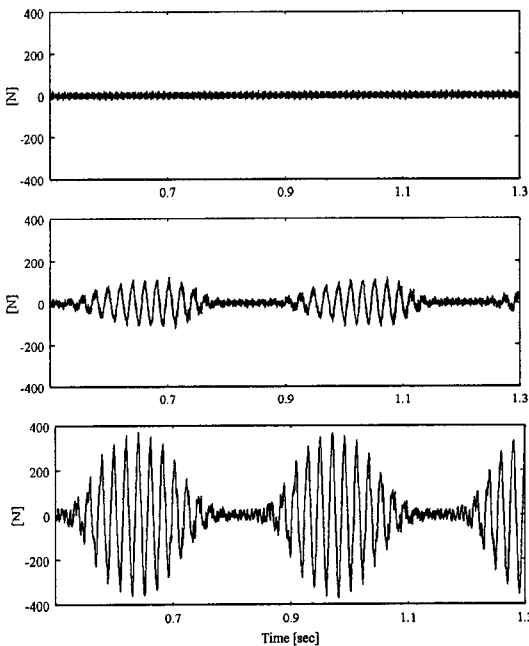


그림 10 정상, 1개, 3개 바가 개방된 경우  $x$ 방향 자기력

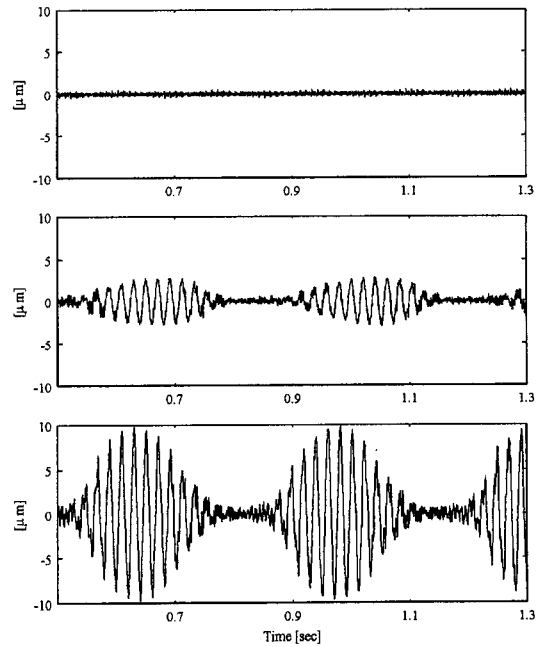


그림 11 3개 바가 개방된 경우  $x$ 방향 회전자 변위의 주파수 분석

90 deg.의 위상차를 가지게 되므로, 마찬가지로 뚜렷한 맥놀이 현상을 관측할 수 있다.

그림 12를 보면, 자속 분포가 회전자의 매 회전마다 반복되기 때문에, 기본 주파수는 회전자의 회전 주파수인  $f_1$ 으로 나타남을 알 수 있다. 사이드밴드 주파수 성분들은  $f_1 \pm 2nsf$ 의 구성을 가지며, 이는 양의 방향과 음의 방향의 회전자 기자력이  $2sf$ 의 주파수 차이를 가지기 때문이다.<sup>(2)</sup> 표 2는 이 사이드밴드 주파수의 각 성분 크기를 나타내고 있으며, 입력 전류나 속도의 경우보다 주파수 성분의 변화가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

### 3.2 회전자 바의 개방과 회전자 편심

실제의 전동기는 회전자의 불평형 질량으로 인한 동적(dynamic) 편심과 회전자 축의 잘못된 고정으로 인한 정적(static) 편심을 포함하고 있다.

표 2 정상, 1개, 3개의 바가 개방된 경우  $x$  방향 회전자 변위의 주파수 성분 및 크기

Frequency component	Normal		1 broken bar		3 broken bars	
	Freq. [Hz]	Amp. [rpm]	Freq. [Hz]	Amp. [rpm]	Freq. [Hz]	Amp. [rpm]
$f_1 - 4sf$	43.3	3.64e-3	43.1	1.07e-1	42.6	6.59e-1
$f_1 - 2sf$	46.0	1.22e-3	45.8	9.14e-1	45.6	2.92
$f_1$	48.7	1.97e-3	48.6	1.15	48.5	3.93
$f_1 + 2sf$	51.4	7.62e-4	51.4	5.23e-1	51.5	1.98
$f_1 + 4sf$	54.1	2.53e-3	54.2	6.11e-2	54.4	8.89e-2

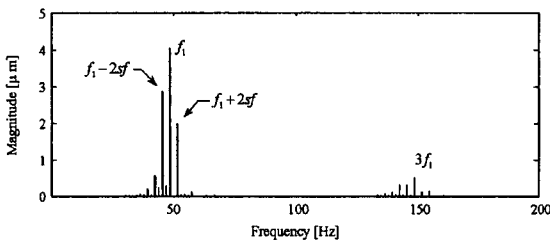


그림 12 3개 바가 개방된 경우  $x$  방향 회전자 변위의 주파수 분석

그림 13은 정적 및 동적 편심의 개념을 나타내고 있다. 정적 편심은 회전자의 중심이 고정자의 중심에서 벗어난 채로 고정되어 회전하는 경우를 말하며, 동적 편심은 회전자의 중심이 일정한 궤적을 가지고 회전하는 경우를 말한다.

이러한 정적 및 동적 편심은 동시에 복합적으로 작용하고 있다. 또한 전동기의 이상 동작시, 편심량 크기의 여부를 알 수 없으므로, 전동기의 이상 증상이 회전자 바의 개방 때문인지, 혹은 회전자 편심의 문제인지를 판별하기가 쉽지 않다. 단상 유도 전동기의 회전자 바의 개방과 회전자의 정적 및 동적 편심으로 인한 기계적·전기적인 변수들의 특성 변화를 효과적으로 고찰하기 위해 회전자 바의 개방뿐만 아니라, 회전자에 정적 또는 동적 편심이 존재하는 경우와 회전자 바의 개방과 편심이 동시에 존재하는 경우에 대해서도 고려해야 한다. 한편 회전자 바 개방의 경우와 마찬가지로, 회전자의 정적 또는 동적 편심이 입력 전류, 토크 등의 전기적인 변수에 미치는 영향은 자기력 및 회전자의 변위에 비하여 상대적으로 뚜렷한 변화를 발견하기가 쉽지 않다.

#### (1) 회전자의 정적 및 동적 편심

그림 14는 회전자에 0.11 mm의 정적 편심이 존재하는 경우의 회전자 변위와 그 주파수 성분을 나타내고 있다. 정적 편심이 있는 경우에는 반경 방향 자기력에서 전원 주파수의 두 배 주파수  $2f$ 를 가지는 불평형 자기력을 발생시키게 되며, 사이드밴드 주파수를 발생시키지는 않는다.

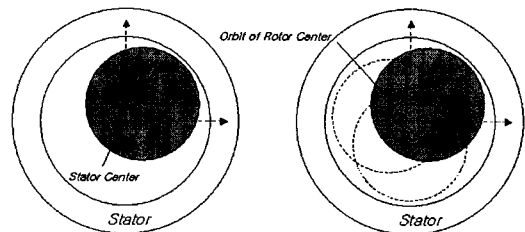


그림 13 정적 및 동적 편심의 개념도

그림 15는 회전자에 동적 편심이 존재하는 경우의 회전자 변위와 그 주파수 성분을 나타내고 있다. 회전자의 불평형 질량은  $0.002 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 이다. 원심력으로 인한 동적 편심은 회전자의 변위에서 회전 주파수인  $f_1$  과 그의 odd harmonics를 만들어

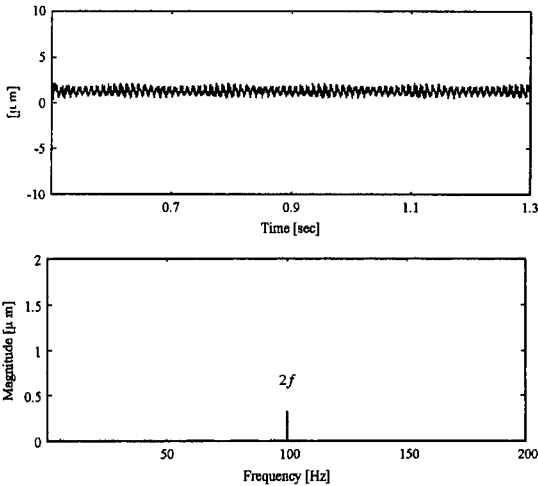


그림 14 정적 편심이 존재하는 경우  $x$  방향 회전자 변위와 주파수 분석( $f_1=48.7 \text{ Hz}$ )

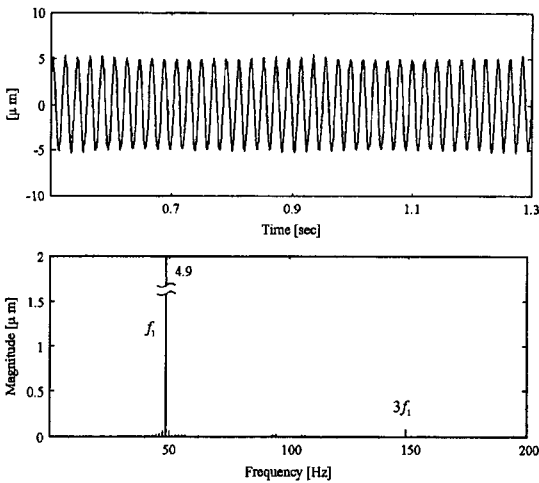


그림 15 동적 편심이 존재하는 경우  $x$  방향 회전자 변위와 주파수 분석( $f_1=48.7 \text{ Hz}$ )

내며, 각각에 회전자 바가 개방되었을 경우와 동일한 사이드밴드 주파수 성분을 발생시키는 것으로 알려져 있다.<sup>(5)</sup> 그러나 사이드밴드 주파수 성분이 검출되었지만 회전자 바 개방의 경우보다 그 크기가 상대적으로 작다. 따라서 동적 편심이 존재하는 경우  $f_1$  성분의 증가만으로도 충분히 동적 편심 여부를 판단할 수 있다.

(2) 회전자 바의 개방과 회전자 편심

그림 16은 1개의 회전자 바가 개방됨과 동시에 회전자의 중심으로부터 20%의 정적 편심이 존재하는 경우의 회전자의 변위의 변화를 보여주고 있다. 회전자 바의 개방의 영향으로 회전자의 회전 주파수  $f_1$  과 그 사이드밴드 주파수가 생성되었으며 정적 편심에 의한  $2f$  성분이 동시에 생성되었다. 그러나 정적 편심 자체는 회전자 바의 개방이 생성하는 사이드밴드 주파수 성분에는 거의 영향을 미치지 않았으며, 이는 정적 편심과 회전자 바의 개방이 회전자의 진동 성분에서 서로 독립적으로 분석되어 질 수 있다는 것을 보여준다.

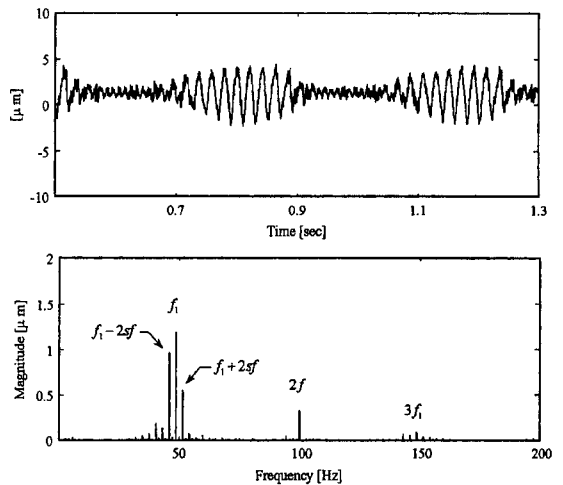


그림 16 1개 개방 바와 정적 편심을 가지는 경우  $x$ 방향 회전자 변위와 주파수 분석( $f_1=48.6 \text{ Hz}$ )



그림 17은 회전자에 1개 바의 개방과 동시에 동적 편심이 존재하는 경우의 회전자의 변위와 그 주파수 성분을 나타내고 있다. 회전자의 불평형 질량은  $0.002 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 이다. 동적 편심은 마찬가지로 회전자의 변위에서 회전 주파수인  $f_1$  과 그의 odd harmonics를 만들어 내며, 동적 편심만 존재하는 경우보다 그 사이드밴드 성분의 변화가 두드러진다. 즉, 동적 편심은  $f_1$  성분을 증가시키고, 회전자 바의 개방은 사이드밴드 성분을 증가시키기 때문에 이 두 가지 효과는 비교적 명확히 구분되어 질 수 있음을 나타낸다.

그림 18은 1개의 회전자 바가 개방된 경우에 정적 및 동적 편심이 동시에 존재하는 경우의 회전자 변위의 변화를 보여주고 있다. 불평형 질량은  $0.002 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 이며, 정적 편심은 마찬가지로 20%이다. 주파수 분석에서 알 수 있듯이, 동적 편심은  $f_1$  성분을 증가시키고, 정적 편심은  $2f$  성분을 증가시켰으며, 회전자 바의 개방은  $f_1$  성분의 주변에 비교적 큰 사이드밴드 성분을 생성하였다.

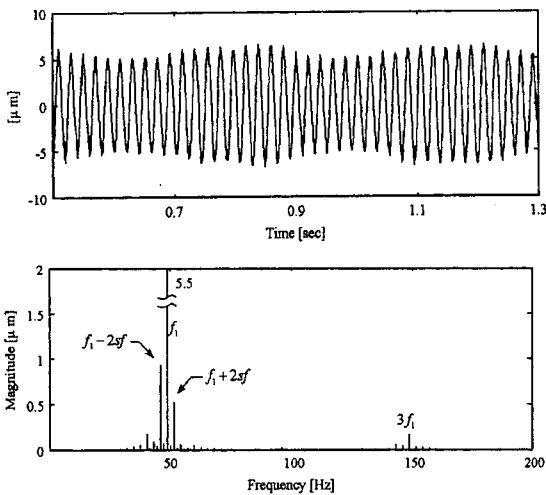


그림 17 1개 개방 바와 동적 편심을 가지는 경우  $x$  방향 회전자 변위와 주파수 분석 ( $f_1 = 48.6 \text{ Hz}$ )

그러므로 회전자 바의 개방, 정적 편심 그리고 동적 편심이 동시에 존재하는 경우에  $f_1$ ,  $2f$  및 사이드밴드 주파수 성분을 관찰함으로써 회전자 결함을 명확히 판별할 수 있음을 알 수 있다. 표 3은 지금까지의 해석 결과에서의 각각의 주파수 성분의 변화를 나타내고 있으며, 회색 칸의 수치는 각 경우 주요한 주파수 변화를 나타내고 있다.

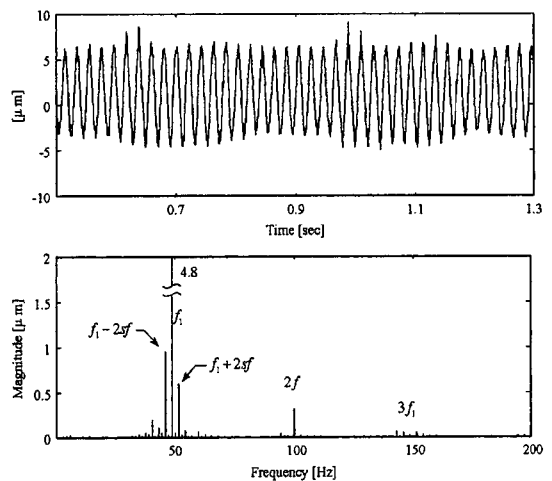


그림 18 1개 개방 바, 정적 편심 및 동적 편심을 가지는 경우  $x$  방향 회전자 변위와 주파수 분석 ( $f_1 = 48.6 \text{ Hz}$ )

표 3 회전자 바의 개방, 정적 및 동적 편심이 존재하는 각각의 경우에 대한  $x$  방향 회전자 변위의 주파수 성분 크기

Fault condition	$f_1 - 2sf$	$f_1$	$f_1 + 2sf$	$2f$
1 broken bar	9.14e-1	1.15	5.23e-1	1.79e-3
Static ecc.	2.50e-3	3.75e-3	1.20e-3	3.28e-1
Dynamic ecc.	3.44e-2	4.87	7.28e-3	3.22e-3
1 broken bar and Static ecc.	9.62e-1	1.19	5.50e-1	3.30e-1
1 broken bar and dynamic ecc.	9.36e-1	5.46	5.30e-1	3.57e-3
1 broken bar, static and dynamic ecc.	9.57e-1	4.79	6.00e-1	3.29e-1

#### 4. 맺음말

이 글에서는 단상 유도 전동기를 예로 들어서, 회전자 바의 개방과 회전자의 정적 및 동적 편심으로 인한 기계적, 전기적 변수들의 특성 변화에 대하여 살펴보았으며, 이는 농형의 회전자 구조를 가지는 중·대형 유도 전동기에도 유사하게 적용될 수 있다. 전동기는 기계 및 전기적 시스템이 서로 연성되어 있기 때문에, 결합 발생은 시스템의 전기적 특성 뿐 아니라 기계적 특성에도 동시에 영향을 미치게 된다. 특히 회전자의 결합은 전동기 내부에서 비대칭적인 자속 분포를 발생시키며, 이는 전류와 토크, 속도, 자기력과 회전자 변위 등의 기전 연성 변수들에서 동시에 특성 주파수를 발생시킨다. 그러므로 이러한 전동기의 결합 진단에 있어서 진동 성분의 측정이 상당히 효과적인 방법으로 사용될 수 있으며, 특히 기전 연성 해석을 수행하여 전기 및 기계적인 특성을 동시에 고찰하여 결합의 여부를 판별하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

#### 참고 문헌

- (1) William T. T. and Mark F., 2000, "Industrial Application of Current Signature Analysis to Diagnose Faults in 3-Phase Squirrel Cage Induction Motors," Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2000. Conference Record of 2000 Annual, pp. 205~211.
- (2) Thorsen, O. V. and Dalva, M., "Method of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Induction Motors," ETEP, Vol. 8, No. 5, pp. 383~395.
- (3) Bangura, J. F. and Demerdash, N. A., 1999, "Diagnosis and Characterization of Effects of Broken Bars and Connectors in Squirrel Cage Induction Motors by a Time-stepping Coupled Finite Element State Space Modeling Approach," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1167~1175.
- (4) Rastko F. and Stanislav F., 1998, "Magnetic Field Analysis of Induction Motor with Rotor Fault," COMPEL, Vol. 17, pp. 206~211.
- (5) David, G. D., William, T. T. and Steven, R., 1977, "Analysis of Airgap Flux, Current, and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic Airgap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 1, pp. 24~34.
- (6) Jang, G. H. and Jung, D. K., 1996, "Analysis of the Dynamic Characteristics of Ball Bearing in 3.5, HDD Spindle Motor," IMCSD Proceedings, Twenty-fifth Annual Symposium, pp. 167~174.
- (7) 박상진, 장정환, 장건희, 이용복, 김창호, 2002, "회전자 바 개방과 회전자 편심에 의한 단상 유도 전동기의 전기 및 기계적 특성 해석," 대한전기학회지, Vol. 51B, No. 8, pp. 425~433.