

# 실시간 확률 모델링 기법을 이용한 유도기기의 고장검출 및 진단시스템

논 문
58P-3-2

## Fault Detection and Diagnosis Systems of Induction Machines using Real-Time Stochastic Modeling Approach

이진우\* · 김광수\*\* · 조현철\*\*\* · 이영진<sup>§</sup> · 이권순<sup>†</sup>

(Jin-Woo Lee · Kwang-Soo Kim · Hyun-Cheol Cho · Young-Jin Lee · Kwon-Soon Lee)

**Abstract** - This paper presents stochastic methodology based fault detection algorithm for induction motor systems. We measure current of healthy induction motors by means of hall sensor systems and then establish its probability distribution. We propose online probability density estimation which is effective in real-time implementation due to its simplicity and low computational burden. In addition, we accomplish theoretical analysis of the proposed estimation to demonstrate its convergence property by using statistical convergence and system stability theories. We apply our fault detection approach to three-phase induction motors and achieve real-time experiment for evaluating its reliability and practicability in industrial fields.

**Key Words** : Fault Detection, Induction Motor, Online Probability Density Estimation, Maintenance System

### 1. 서 론

유도전동기는 산업현장에서 다양한 회전기계의 주요 동력원으로 이용되고 있고, 플랜트 전체 소비전력의 약 40% 이상이 사용되고 있다. 이들 전동기는 산업의 발달과 함께 최근 고성능화(대형화, 고속화, 고전압화)되고 있고, 이를 위한 개발단계나 상업운전 시에 지금까지의 지식이나 경험으로는 고려될 수 없었던 사고나 고장이 많이 발생하고 있으나, 산업적인 중요성에 비해 비교적 소홀히 다루어져 왔다. 이에 효율적인 운전과 유지보수를 위한 상태감시 및 진단기술, 정비기술과 발생하는 문제들에 대한 트러블대책기술이 중요성을 점점 더하여 가고 있다. 오랜 사용과 운전 조건에 따라 각 요소별로 고장이 발생할 수 있으며, 이를 적시에 발견하지 못하고 방치하는 경우 유도전동기뿐만 아니라 전력 계통 시스템에도 악영향을 야기할 수 있다. 이는 시스템의 전체적인 신뢰도를 떨어뜨리고, 복구를 위한 추가 인력, 재정 및 시간의 손실을 초래한다. 따라서 유도전동기의 조기 고장 검출(fault detection)과 고장 분류(isolation)는 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 이에 따라 공정의 생산성 및 안정성의 향상을 위해 시스템 고장의 검출 및 분류에 관한 연구가 활

발히 진행되고 있다[1]-[3].

유도전동기는 사용 중에 베어링이 파손하기도 하고, 마모로 인한 동적 및 정적 언밸런스, 회전자 바의 손상, 권선의 열화로 인한 단락현상 등 다양한 결함을 일으키게 된다. 일반적으로 고정자, 회전자, 베어링의 3개 부분이 전동기 고장의 80 [%]를 차지하고 있으며, 고장 상태감시 기법의 대부분은 이 세 가지 구성요소들의 고장을 검출하는 것으로 이루어진다. 이외의 다양한 전동기의 고장은 Thermal, Magnetic, Residual, Dynamic, Environment, Mechanical stress 등이 주요 원인이 된다[4]-[6]. 이러한 유도전동기의 고장에 대하여 Thosom과 Thorsen 등은 농형 유도전동기에서 권선의 전류를 모니터링 함으로써 회전자 바의 소손을 진단하는 실험적인 방법을 제시하였고[7][8], Toliyat 등은 유도전동기에서 회전자 편심의 효과를 수학적 해석을 토대로 회전자 전류 또는 토크, 기전력의 변화에 미치는 영향을 연구하였다[9]. 그러나 이러한 연구들은 전기적 결함과 기계적 결함을 동시에 진단하는 방법에 대한 비교 분석에 관한 연구는 미비한 실정이다.

본 논문에서는 유도전동기의 고장 중 발생 빈도가 높은 회전자 편심과 회전자 바 단락, 고정자 권선 단락, 베어링 파손에 대하여 전류 스펙트럼 특성을 분석하고, 확률모델을 기반으로 확률밀도 분포를 추정하여 고장 검출 및 진단 알고리즘의 기반을 제시하고자 한다. 또한 모의 고장 전동기 실제 테스트 실험을 통한 측정치와 비교 검토를 통하여 해석 결과의 신뢰성을 검증하고자 하였다. 또한 확률추정 기법을 이용하여 3상 유도전동기에 있어서 고정자 권선 단락, 회전자 바 파손, 회전자 편심으로 인한 특성변화를 연구하고, 고장으로 인한 전류변화를 관찰하였다. 그리고 실험을 통해 제안 알고리즘의 우수성을 입증하고자 하였다. 이를 위해

<sup>†</sup> 교신저자, 시니어회원 : 동아대학교 전기공학과 교수 · 공박  
E-mail : kslee@dau.ac.kr

\* 정 회 원 : 동아대학교 전기공학과 포닥연구원 · 공박

\*\* 학 생 회 원 : 동아대학교 전기공학과 석사과정

\*\*\* 정 회 원 : 울산과학기술대 전기전자학부 조교수 · 공박

<sup>§</sup> 정 회 원 : 한국폴리텍 항공대학 항공전기과 부교수 · 공박

접수일자 : 2009년 2월 11일

최종완료 : 2009년 6월 26일

유도전동기에서 나타날 수 있는 결함에 대하여 FFT 기법을 이용한 방법과 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 기반으로 한 연구결과를 비교분석하였다.

## 2. 유도 전동기의 고장

유도 전동기는 구조가 간단하고 견고하며 가격이 비교적 저렴하고 취급이 편리함 등의 이점으로 인해 산업계에서 가장 널리 사용되고 있다. 전동기의 구조는 터빈과 압축기 등의 다른 회전 기계에 비하여 비교적 단순한 구조를 가지고 있으나, 기계적인 원인과 전기적인 원인에 의해 발생하는 진동 및 소음의 특징은 매우 복잡하고 높은 주파수까지의 넓은 주파수 대역의 성분을 가지고 있다. 그러므로 전동기의 결함 분석에는 많은 실무경험과 사례 데이터베이스의 구축, 고장 모드의 파악과 고장 원인과 증상의 인과 행렬 구축 등이 필요하다. 이러한 체계적인 고장 원인 분석을 통하여 전동기의 이상이나 고장으로 인해 정비 비용, 생산 손실 등의 경제적인 손실을 줄일 수가 있을 것이다[10]-[12].

대형 전동기는 일반적으로 설비의 신뢰성과 가동률 향상을 위해 기계를 정기적으로 운전 정지하고 점검하는 계획 정비(scheduled maintenance)의 정기 진단을 수행하고 있다. 그리고 중요한 핵심 설비에는 각종 변환기를 부착하여 운전 상태를 상시 감시(on-line monitoring)하는 예지 정비(predictive maintenance)기술이 설비 정비 측면에서 유용하게 활용되고 있다.

표 1 유도전동기의 고장 모드와 고장 패턴

Table 1 Fault modes and patterns of the induction motors

구성 요소	고장 모드	고장 패턴
고정자 권선	<ul style="list-style-type: none"> <li>권선간(turn to turn)</li> <li>상간(phase to phase)</li> <li>상-접지간(phase to ground)</li> <li>코일간(coil to coil)</li> <li>개방회로(open circuit)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>대칭적</li> <li>단상화</li> <li>비대칭적 및 접지</li> <li>비대칭적/비접지</li> </ul>
회전자 조립품	<ul style="list-style-type: none"> <li>축(shaft)</li> <li>베어링(bearing)</li> <li>적층(lamination)</li> <li>농형(squirrel cage) 회전자</li> <li>통풍시스템</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>열 응력, 자기 응력</li> <li>잔류응력/동적응력</li> <li>기계적 응력</li> <li>환경적 응력</li> </ul>
구름 베어링	<ul style="list-style-type: none"> <li>피로(fatigue spalling)</li> <li>프레팅(fretting)</li> <li>얼룩, 스미어링(smearing)</li> <li>미끄럼(skidding)</li> <li>마멸(wear)</li> <li>윤활 고장(lubrication failure)</li> <li>전기적 점부식(electric pitting)</li> <li>홈(fluting)</li> <li>균열(crack)</li> <li>녹아 붙음(seizure)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>과대응력</li> <li>과열</li> <li>진동 및 소음</li> <li>윤활 품질</li> <li>설치, 끼워 맞춤</li> <li>오염</li> <li>기계적 손상</li> <li>전기적 손상</li> <li>하중 패턴선</li> </ul>
축	<ul style="list-style-type: none"> <li>과부하(overload)</li> <li>피로(fatigue)</li> <li>부식(corrosion)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>연성 및 취성 파괴</li> <li>Beach 흔적</li> <li>조가비 모양 흔적</li> <li>갈매기 표시 흔적</li> <li>래칫 흔적</li> <li>Shear lips, 프레팅</li> </ul>

### 2.1 회전자 비대칭

고장에 대한 조사에 따르면, 전체의 10%가 회전자와 관련된 고장이 대부분인 것으로 조사되고 있다. 이 들 고장 중 대표적인 것이 회전자 파손에 의한 것이다. 회전자 파손은 회전자 바 혹은 회전자 엔드링에서 발생되며, 엔드링 이나 회전자 바의 부러진 조각은 고정자와 회전자 사이에 떨어져 갑작스런 고장을 일으킬 수 있다. 이것은 고비용의 수리비와 전동기 사용 불능상태로 이어지며, 이러한 이유로, 회전자 파손의 조기발견은 매우 중요한 사항이다[13].

회전자 파손을 발견하기 위한 많은 기술들이 있는데 고정자 전류법, 역상분 임피던스, 역상분 전류, 영상전류, 축 자속, 토크, 순시전력, the extend park' vectors, 저 주파수 신호 투입, 진동 등을 통해서 회전자 파손을 발견할 수 있다. 그러나, 고정자 전류로부터 회전자 파손을 알 수 있지만 이상적인 경우, 고정자 전류에 기본성분 주위에 다른 요소는 없다. 회전자의 경우, 바 혹은 엔드링 파손, 타원형이 아닌 회전자 형태 때문에 회전자가 비대칭형이 된다.

하나의 회전자 바가 파손이 된 유도전동기를 고려해볼 때 손상된 바의 위치는 2차측 회전자 바이다. 결점 때문에, 각 회전자 바에 유도된 전류는 대칭적이지 않다. 그림 1은 회전자 바 파손 구조를 나타내며, 그림 2는 회전자 바 파손이 된 유도전동기의 등가회로를 나타낸다.

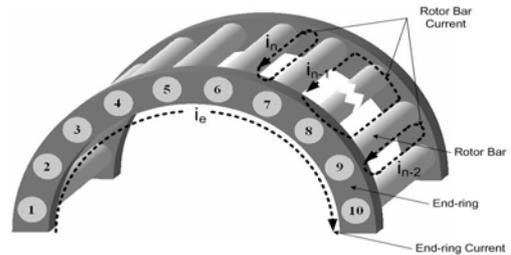


그림 1 회전자 바 파손 구조

Fig. 1 Structure of rotary bar crack

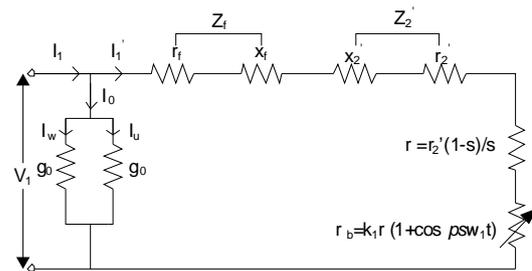


그림 2 회전자 바 파손이 된 유도전동기의 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit for rotary bar crack of the induction motors

그림 2에서  $r_b$ '는 회전자 바에 결함이 있는 경우 증가한 저항으로 파손된 회전자 바가 극을 통과할 때마다 저항이 증가하게 된다. 이것은 비대칭적인 회전자 MMF를 일으키고, 이것은 역방향 회전자 MMF의 원인이 된다. 역방향으로 흐르는 회전자 MMF는 고정자 권선의 특정 주파수에서 유기 전압을 발생시킨다. 정상적인 회전자 상태와 비대칭적 회전자 기기에 대한 내용은 [14]-[15]에서 참조할 수 있다.

**2.2 공극 비대칭: 정적 및 동적 편심**

공극 편심은 고정자와 회전자 사이의 균등하지 않은 공극의 상태이다. 균등하지 않은 자기력이나 불균등한 경방향 힘 때문에 발생한다. 경방향 자기력은 고정자 코어에 작용하고 고정자 권선에 불필요하고 해로운 진동을 일으키기 쉽다. 따라서, 공극 편심이 기기를 망치기 전에 발견하는 것이 중요하며, 편심에는 정적, 동적 그리고 둘이 혼합된 상태 3가지가 있다. 이들은 공극의 특성에 따라 구별될 수 있으며, 정적 편심의 경우, 제조시 생기는 고정자 코어의 형태, 조립시에 생기는 베어링 위치의 오차, 베어링 마모, 기계적 커플링의 오차정렬에 의해 발생된다. 동적 편심은 회전자가 고정자의 중심축에서 회전하지 않을 때 발생하며, 회전할 때 공극의 크기를 최소로 하게 한다. 회전자 중심이 전동기 중심의 주변으로 회전하는 것을 동적 편심이라고 하며, 동적 편심의 다른 경우들은 그림3과 같다. 이들 중 하나가 회전자 중심의 회전하는 속도가 회전속도와 일치하지 않는 것이 특징이다.

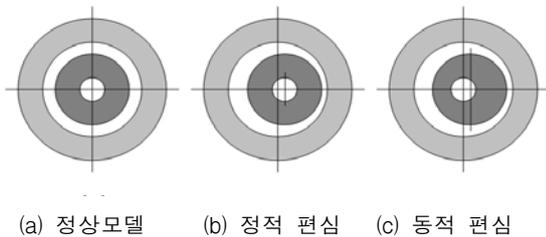


그림 3 회전자 편심  
Fig. 3 Rotary eccentricity

**2.3 고정자 비대칭: 내부 권선 고정자 권선 고장 모델링**

전동기 고정자와 연관된 주요 고장은 권선 간 절연을 잃어버리는 것이다. 비록 유도전동기가 어떤 부분에서 권선이 단락되었다 하더라도 운전은 할 수 있지만, 이는 인접한 코일과 고정자 코어에 손실을 야기시키고 접지 고장을 일으키는 원인이 된다. 고정자 권선 고장으로 인한 보수비용과 기기 사용 불능을 줄이기 위해서는 내부 권선 단락 회로를 빨리 찾는 것이 중요하다. 그 원인으로서는 과부하와 열로 인한 노후화의 열적 스트레스, 권선에서의 전압 스트레스로 인한 전기적 충격, 그리고 기계적 스트레스 등이 원인이 된다. 고정자 고장을 발견하는 가장 간단한 기술중 하나는 부분 방전을 통한 방법이라고 할 수 있다. 부임피던스나 전류 그리고 역상 성분을 모니터링 하는 축방향 쇄교자속은 고장 초기상태에서 내부 권선단락 고장을 발견하는 방법이라 할 수 있으며, 내부 권선단락 고장은 고정자 권선 권선수가 없어지는 것과 같다. 이는 공극자속밀도 영향을 줄이는 효과를 가져오며 회로 단락이 발생할 때, 상 권선은 권선수가 줄어들고, MMF 역시 줄어든다. 더구나, 단락 권선에 흐르는 전류는 역방향 MMF를 발생시킨다.

내부 권선 단락 고장은 회전자 슬롯 고조파가 상승하고 회전 주파수와 일치하는 성분들이 상승하여 선 전류에 영향을 받는 것도 포함된다. 하지만, 이는 정적, 동적 편심과 내부 권선 단락 고장을 판별하기에는 부족하며, 이들 고장을 구별하기 위해서는 각 상의 전류 진폭비와 각 상 전류사이의 위상차이가 필요하다. 정상상태에서는, 각 상 권선의 임

피던스는 균일하며, 각 상의 전류의 진폭비 역시 균일하다. 각 상의 위상차인 120° 권선에 결합이 발생하게 되면 3상 권선의 임피던스는 불균형을 이루게 되고, 3상 전류 또한 불균형을 이루게 된다. 각 상 사이의 위상 차이는 120°와 조금 차이를 보이며, 제 3고조파도 진폭비, 위상차, 그리고 제3고조파에 대한 정보가 내부 권선 단락 고장과 혼합 편심을 구별하기 위해서 필요하게 된다.

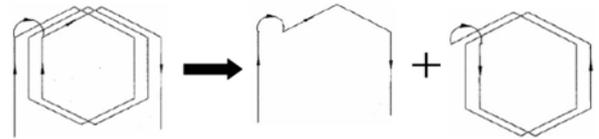


그림 4 한 상 코일 권선의 내부 권선 단락회로 단면도  
Fig. 4 Short circuit of the single-phase coils

**3. 확률분포를 이용한 실시간 고장진단 알고리즘 설계**

본 절에서는 확률적 모델에 기반을 두고 실시간으로 고장진단을 구현할 수 있도록 재귀형 추정알고리즘을 이용한 고장진단시스템 설계와 이에 대한 수렴 및 안정성 특성에 대하여 기술하였다.

**3.1 결정론적 모델기반 고장진단 기법**

모델기반 고장진단은 고장상태가 없는 이상적으로 동작하는 시스템에 대하여 수학적 또는 해석적 방법을 이용하여 모델을 설정한 후, 실제 시스템의 상태 및 출력을 서로 비교함으로써 고장유무를 검출하는 기법이다. 그림 5는 모델기반 고장진단 알고리즘의 개념도를 보여준다. 여기서 모델링 오차는 이상적인 시스템 상태신호  $x^*(t)$ 와 실제 시스템 상태  $x(t)$ 의 차이로 나타나며, 즉  $\zeta = x^* - x$ 이고, 고장유무의 판별에 적용된다. 가장 간단한 고장유무에 대한 의사결정법은 식 (1)의 이진 가설검정(binary hypothesis testing)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} H_0 : \text{no fault, if } |\zeta| < r \\ H_1 : \text{fault, otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $r > 0$ 이다. 식(1)의 가설검정에서  $H_0$ 는 정상적인 시스템 상태에 대한 가설로서 모델링 오차  $\zeta$ 의 절대값이 경계값  $r$ 보다 작을 때 시스템은 고장이 없는 상태로 간주한다. 가설  $H_1$ 은 그 반대의 경우로 모델링 오차의 절대값이  $r$ 보다 같거나 클 경우 시스템에 고장이 발생한 것으로 여긴다. 이러한 고장진단 알고리즘은 시스템 모델링 구축이 가장 중요하며 전체 시스템의 신뢰성과 성능에 영향을 좌우한다.



그림 5 모델기반 고장진단 시스템의 개요  
Fig. 5 Schematic diagram of the model based fault detection

**3.2 확률론적 모델기반 고장진단 기법**

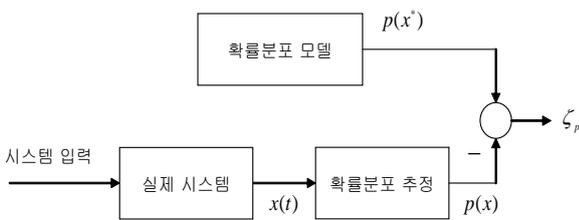
일반적으로 실시간 시스템 상태 또는 출력은 결정적 신호에 확률성분을 포함하고 있으며, 이러한 시스템에 대하여 결정론적 모델기반 기법을 사용하였을 경우 그 신뢰성 및 성능의 우수성을 보장할 수 없다. 또한 최근의 시스템은 그 구성이 복잡하여 확률론적 기법을 이용한 고장진단이 보다 더 신뢰성을 가지는 것으로 보고되고 있다. 확률론적 고장진단 기법은 시스템 상태신호를 확률기법을 이용하여 모델링을 실시한 후 시스템 상태에 대한 확률분포를 추정 및 결정하여야 한다. 마찬가지로, 이러한 확률모델은 실제 시스템 상태의 확률분포와 비교하여 고장유무를 판단한다. 그림 6은 확률모델 기반 고장진단 기법에 대한 개념도를 보여준다. 여기서, 시스템 상태는 실시간으로 확률분포가 추정되어 미리 결정된 확률분포 모델과 비교되어 편차를 발생시킨다. 이러한 신호는 식(1)과 마찬가지로 식(2)의 이진 가설검정을 적용하여 고장유무를 판별할 수 있다.

$$\begin{cases} H_0 : \text{no fault, if } |\zeta_p| < r_p \\ H_1 : \text{fault, otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서,  $r_p \in (0,1)$ 이며  $\zeta_p$ 는 시스템 모델의 상태  $x^*(t)$ 의 확률분포  $p(x^*)$ 와 실제 시스템 상태  $x(t)$ 의 확률분포  $p(x)$  사이의 편차를 나타내며 식(3)과 같다.

$$\zeta_p = p(x^*) - p(x) \quad (3)$$

식(3)의 가설검증을 이용한 고장진단 기법은 시스템 상태에 대한 확률분포 모델을 잘 구현하여야 하며 실시간 시스템의 경우 적절한 온라인 확률분포 추정이 진단 시스템의 성능을 좌우하게 된다.



**그림 6** 확률모델 기반 고장진단 알고리즘의 개요  
**Fig. 6** Stochastic model based fault detection algorithm

**3.3 재귀형 온라인 확률분포추정 알고리즘**

확률분포 추정은 일반적으로 신호처리 분야의 중요한 연구 내용으로서 주로 패턴인식 시스템에 적용되고 있다. 이러한 알고리즘은 대상 시스템에 대한 데이터를 미리 수집한 후 오프라인 상태에서 확률분포를 추정하는 방식이다. 그러나, 고장진단 시스템과 같이 실시간 데이터 처리나 온라인 추정 알고리즘의 구현에는 기존의 확률분포 알고리즘으로는 다소 적용하기가 어려운 점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 시스템에 적합한 온라인 추정 알고리즘을 제안한다.

가장 간단한 확률분포 추정은 전체 이산사건(discrete event)의 발생수에 대한 특정한 이산사건의 발생수의 비율(ratio)로 나타낼 수 있다. 예를 들어, 이산 시스템 상태

$x(k)$ 가  $n$ 개의 상태변수를 포함하고 있다고 가정하면 식(4)와 같이 나타낸다.

$$x(k) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (4)$$

식(4)의 이산상태에 대한 확률변수는 다음 식(5)와 같이 표현된다.

$$p(x(k)) = \{p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)\} \quad (5)$$

여기서, 확률공리(probability axiom)에 의하여 식(5)는 다음 식(6)의 제약조건(constraint)을 갖는다.

$$\sum_{i=1}^n p(x_i) = 1 \quad (6)$$

식(6)의 특정한 상태  $x_i$ 의 확률  $p(x_i)$ 는 초기 이산시간  $k_0$ 에서 현재시간  $k$  동안의  $x_i$ 의 발생 수  $N(x_i)$ 의 비율로서 다음 식(7)과 같이 정의된다.

$$p(x_i) = \frac{N(x_i)}{k - k_0}, \quad i \in [1, n] \quad (7)$$

여기서,  $k > k_0$ 이다. 식(7)의 확률분포 추정 알고리즘은 구성이 매우 간단하여 실시간 연산이 가능한 특징이 있다. 또한 정확한 추정을 위하여 비교적 많은 데이터의 양이 요구되며, 시간이 증가함에 따라 데이터의 양도 함께 증가하게 된다. 하지만, 시간이 계속 증가하면 식(7)의 분자와 분모의 값이 커지게 되며 컴퓨터 연산에 있어 데이터의 넘침(overflow)현상을 초래하게 된다.

본 논문은 이와같이 바람직하지 못한 현상을 해결하기 위하여 재귀형(recursive) 형태의 추정알고리즘을 제안한다. 우선 식(7)의 확률을 다음과 같이 정의한다.

$$p_i(k) = \rho m_i(k), \quad i \in [1, n] \quad (8)$$

여기서, 수식의 간략화를 위하여  $p_i(k) \equiv p(x_i)$ 와 같이 정의하며  $m_i(k)$ 는  $x_i(k)$ 에 대한 가능성(likelihood) 변수를 나타내며  $\rho$ 는 식(6)의 제약조건을 만족시키기 위한 정규화 계수이다. 식(8)의 현재시간의 가능성 변수  $m_i(k)$ 는 이전 값  $m_i(k-1)$ 과 새로운 변수  $\zeta_i(k)$ 로서 구성되며 다음과 같다.

$$m_i(k) = \left(\frac{k-1}{k}\right) m_i(k-1) + \frac{1}{k} \zeta_i(k) \quad (9)$$

여기서,  $\zeta_i(k)$ 는 현재시간  $k$ 에서 시스템 상태값이  $x_i$ 이면  $\zeta_i$ 는 양수인  $c$ 로 선택되며 그렇지 않는 경우는 0으로 결정되며, 수학적 표현은 다음과 같다.

$$\zeta_i(k) = \begin{cases} c, & \text{if } x(k) = x_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

여기서,  $c > 0$ 이다. 식(9)의 알고리즘은 시스템 상태  $x_i$ 의 발

생 수에 대한 가능성 값을 산출하며 이 값은 식(8)의 정규화 계수에 적용되어 최종적으로 확률값이 결정되는 방식이다. 이러한 알고리즘은 현재시간과 이전의 가능성 값만을 이용하여 확률값을 재귀적으로 연산하며 온라인 추정에 아주 적합한 알고리즘으로 구현할 수 있다.

#### 4. 실시간 실험

##### 4.1 시스템 구성

유도전동기의 전형적인 고장인 회전자 바 파손, 회전자의 동적 편심, 고정자 권선 단락에 의한 현상을 모의하기 위한 축소 모델 실험 장치로써, 각 현상에 따른 특성과 이상신호 데이터를 처리하기 위한 구축 시스템으로 그림 7과 같이 테스트 전동기 시스템, 부하 전동기 시스템, 진동 센서 및 전류 프로브와 센서 출력 단자 등으로 구성하였다. 취득된 데이터는 PC를 통해 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 했다. 이러한 실험 장치는 유도전동기 시스템의 고장 시 발생하는 진동을 주변 노이즈성 진동을 차단시키는 Isolator와 테스트 베이스위에 장착하였다.

부하용 전동기 사양은 22 [kW], 380 [V], 저압 전폐형 3상 유도전동기이며, 진동센서는 측정 주파수 4~10[kHz], 측정 범위 ±80 [G]로 테스트 전동기의 상측 커버 부분에 장착 되도록 구성하였다. 기타 사양은 각각 표 2와 3에 각각 나타내었다. 데이터 획득 및 분석을 위한 DAQ system은 입력버튼과 TMS320F2812 모듈을 장착하였으며, 각 channel ADC signal conditioning 회로로 구성하였으며, 교류전원 220V을 DC 5V와 ±15V로 바꾸는 과정에서 노이즈 성분 억제 위해 전원 SMPS는 DAQ보드와 분리하였다. DAQ 보드에 입력된 신호는 TMS320F2812에 저장되고 메모리에 저장된 파형을 code composer라는 DSP 전용 프로그램에서 볼 수 있다. 그 데이터를 노트북에 통신으로 전송하여 TMS320F2812에 저장된 파형과 일치하는지를 확인하여 DAQ의 동작을 확인하였다.

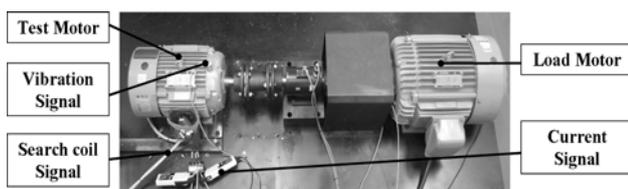


그림 7 유도전동기 실험 장치 구성  
Fig. 7 Real-time experimental setup for the induction motor

표 2 유도전동기 구동 인버터 사양  
Table 2 Specification of the inverter for the induction motor

구 분	치 수
입력전압	380 [V], 3상
인버터 용량	11.0 [kW] 이상
정격전류	23.0 [A] 이상
고정자주파수	60 [Hz]
WEIGHT	5.0 kg 이하

표 3 유도전동기 사양  
Table 3 Specification of the induction motor

구분	항 목	치 수
사양	정격 출력 [kW]	7.5
	정격 전압 [V]	220/380
	정격 속도 [rpm]	1768
	정격 토크 [Nm]	40
	주파수 [Hz]	60
고정자	슬롯 수	36
	외경 [mm]	220
	내경 [mm]	150
회전자	극수	4
	회전자 바 수	28
	공극 [mm]	0.5
	외경 [mm]	149
	적층길이 [mm]	110
	회전자 바	Al

##### 4.2 실험 결과

고장 모의 전동기의 실험은 정격부하 상태에서 정상, 회전자 편심, 회전자 바 파손, 고정자 권선 단락에 대해서 실험하였고, 각각의 주파수 성분을 검출하였으며 각각 20번의 실험을 실행하여 데이터를 평균화하여 실험결과 값을 취득하였다. 그림 8~11은 고장에 따른 0~1,000 [Hz] 범위에서의 전류 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림 10과 그림 11은 회전자 바 파손 전동기와 고정자 권선 단락 전류 스펙트럼을 나타내며, 그림 8은 정상 전동기의 전류 스펙트럼과 비교하여 특정 주파수에서 고장에 따른 특성을 확인할 수 있고, 표 4와 표 5에서 예측한 주파수 성분을 나타내었다. 이 분석결과 회전자 편심 전류 스펙트럼은 정상 전동기와 비교하여 거의 동일한 주파수 성분을 가지는 것을 알 수 있었다.

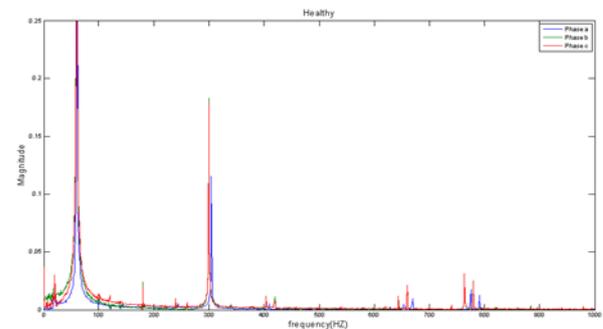


그림 8 정상 전동기  
Fig. 8 The healthy motor

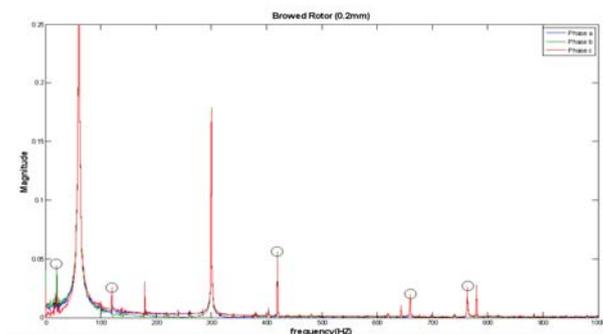


그림 9 편심 전동기  
Fig. 9 The eccentricity faulty motor

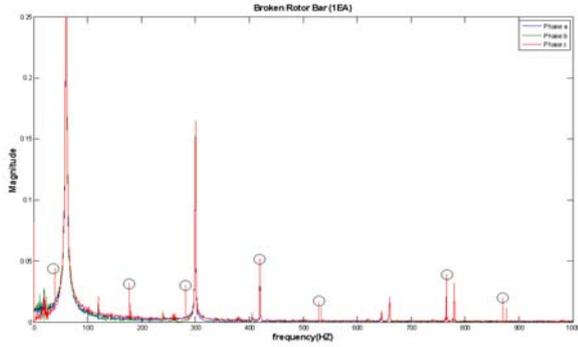


그림 10 회전자 바 파손 전동기  
Fig. 10 Rotary bar broken motor

표 4 회전자 비대칭에 따른 고정자 전류의 고조파  
Table 4 Harmonic waves for the stator current

$f_1$	s	k	$f_{brb} = (1 \mp 2ks)f_1$	k/p	$f_{brb} = [(\frac{k}{p})(1-s) \pm s]f_1$
60	0.0178	1	57	1	60
			62		57
			300		300
		2	64	5	289
			53		420
			66		405
		3	∴		∴

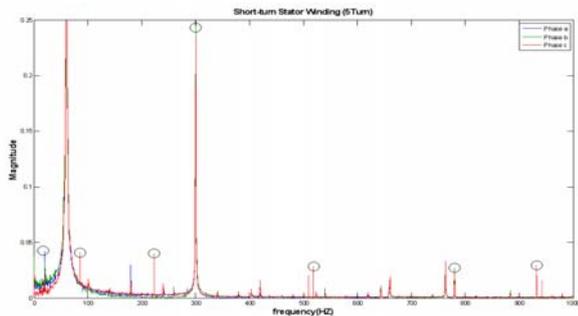
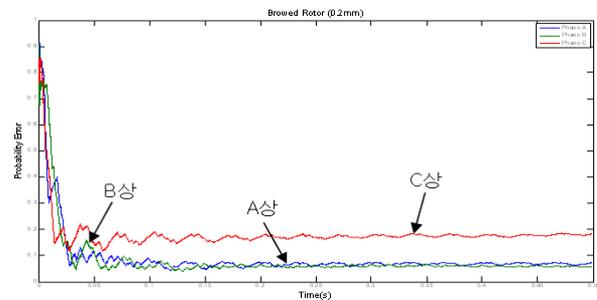


그림 11 고정자 권선 단락 파손 전동기  
Fig. 11 Stator circuit short motor

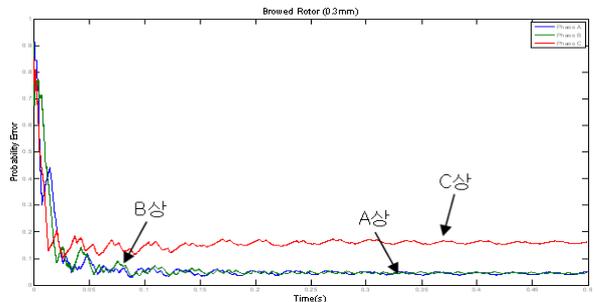
표 5 고장에 따른 전류 특성 주파수 성분 리스트  
Table 5 Frequency component for current characteristics

주파수 성분	고장 유형	바 파손 (Hz)	편심 (Hz)	권선 단락 (Hz)
전원 주파수		○	○	○
전원 주파수 고조파		○	○	○
$f_{brb} = [(\frac{k}{p})(1-s) \pm s]f_1$		○	×	×
$f_{brb} = (1 \mp 2ks)f_1$		○	×	×
$f_{d,ecc} = [(kQ_r \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm n] \cdot f_1$		×	○	×
$f_{s,ecc} = [kQ_r \frac{(1-s)}{p} \pm n] \cdot f_1$		×	○	×
$f_{st} = f_1 \cdot \left  \frac{n}{p}(1-s) \pm k \right $		×	×	○
$f_{st} = f_1 \left\{ kQ_r \frac{(1-s)}{p} \pm 2m \pm n \right\}$		×	×	○
$f_{st} = f_1 \left\{ (kQ_r \pm i) \frac{(1-s)}{p} \pm 2m \pm n \cdot s \right\}$		×	×	○

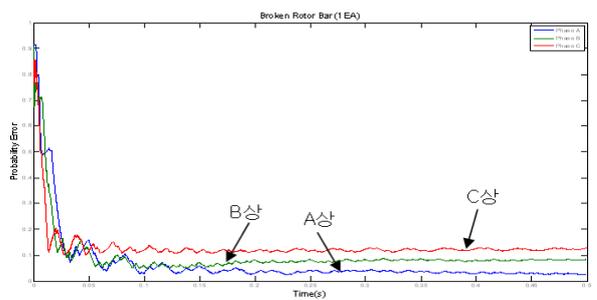
고장에 따른 확률오차는 확률분포추정값을 토대로 정상일 때의 추정값과 각 고장별 추정값과의 차이를 나타낸다. 이러한 오차값으로 인해 고장의 종류와 위치를 파악할 수 있다. 그림 12는 전류 확률분포오차를 나타내는 것으로서 (a)와 (b)는 회전자 편심 모델의 확률분포 오차를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 C상에서 고장확률이 가장 높은 것을 알 수 있다. 그림 12의 (c)와 (d)는 회전자 바 파손 모델의 확률분포 오차를 나타낸 것이다. 회전자 바가 1개 파손된 모델의 B상이 2개 파손된 모델의 B상보다 오차가 크고, C상이 작은 것으로 보아 회전자 바가 1개 파손된 모델은 2개 파손된 모델에 비해 B상에서 고장 확률이 높은 것을 알 수 있다. (e)와 (f)는 고정자 권선 단락 모델의 확률분포 오차를 나타낸 것이다. 두 가지 고장 모두 회전자 편심과 회전자 바 파손 모델과 비교하여 A상의 오차가 큰 것을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 고정자 권선 단락 고장은 A상에 고장 확률이 가장 높은 것을 알 수 있다.



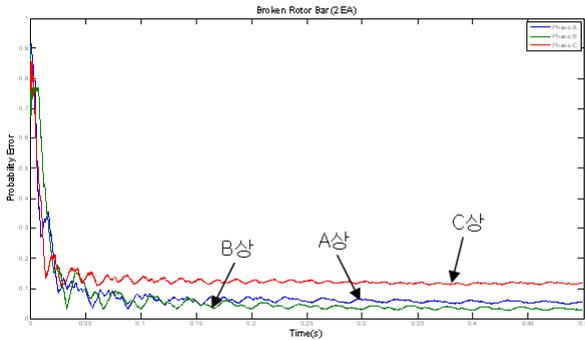
(a) 회전자 편심(0.2mm) 모델의 확률분포 오차  
(a) Stochastic distribution error for the eccentricity model(0.2mm)



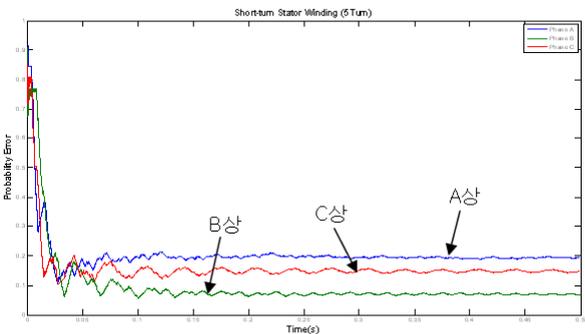
(b) 회전자 편심(0.3mm) 모델의 확률분포 오차  
(b) Stochastic distribution error for the eccentricity model(0.3mm)



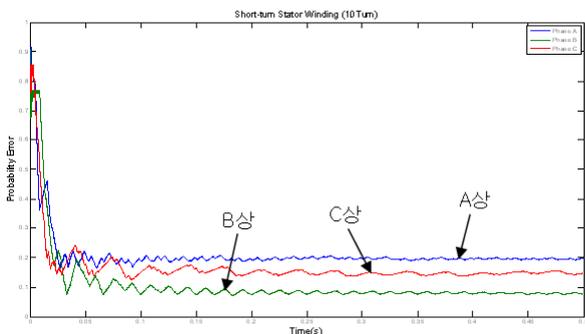
(c) 회전자 바 파손(1EA) 모델의 확률분포 오차  
(c) Stochastic distribution error for the rotary bar broken(1EA)



(d) 회전자 바 파손(2EA) 모델의 확률분포 오차  
(d) Stochastic distribution error for the rotary bar broken(2EA)



(e) 고정자 권선 단락(5 turn) 모델의 확률분포 오차  
(e) Stochastic distribution error for the stator circuit short(5 turn)



(f) 고정자 권선 단락(10 turn) 모델의 확률분포 오차  
(f) Stochastic distribution error for the stator circuit short(10 turn)

그림 12 고장에 따른 전류 확률분포 오차

Fig. 12 Stochastic distribution error for several faulty current

### 5. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 고장 진단을 위하여 결함이 발생했을 경우 전류 신호의 특성을 고찰하였다. 전기적 결함인 고정자 권선 단락과 회전자 바 파손, 기계적 결함인 회전자 편심에 대하여 FFT를 이용하여 전류 신호를 분석하였고, 고장진단 시스템을 구성해 실험을 통한 결과값을 검증하였다.

기존의 유도 전동기의 고장 진단을 위한 방식은 전류와 진동 신호를 분석하여 고장을 검출하였으나 진단의 어려움이

많아 확률분포추정기법을 이용하였다. 고장에 따른 확률분포는 평균화된 데이터를 이용하여 본 논문에서 제안한 재귀형 확률분포추정 알고리즘을 사용하였다. 전류 데이터의 최대, 최소 피크치를 10구간으로 나누어 신호가 해당 구간에 있을 확률분포를 추정하였다. 알고리즘의 우수성을 검증하기 위해 고장 유형별로 각각 두 가지 고장에 대해 실험하여 특성을 연구하였다. 회전자 편심 모델에서 FFT를 이용한 전류 스펙트럼 분석을 했을 경우 신호를 쉽게 판별하기가 어려웠다. 그러나 전류 데이터를 이용하여 확률분포 추정값을 추정해서 확률오차를 확인했을 경우 고장을 쉽게 알 수 있었다.

회전자 바 파손의 모델일 경우 FFT를 이용한 전류 스펙트럼 분석에서 기계적 결함인 회전자 편심에 비해서는 고장신호를 쉽게 판별할 수 있었으나 뚜렷하게 판별하기에는 어려움이 있었다. 고정자 권선 단락의 모델은 전류 스펙트럼 분석에서 다른 모델에 비해 확연히 고장 주파수 성분을 검출할 수 있었으며 확률분포추정을 통한 확률분포 오차에서도 쉽게 고장 성분을 확인할 수 있었다. 향후 본 논문의 데이터를 기반으로 베어링의 결함, 질량 불균형과 같은 기계적 결함을 전류신호로 분석할 수 있는 방법이 개발한다면 본 연구 결과와 함께 유도전동기 진단에 도움 및 활용이 되기를 바란다.

### 감사의 글

본 논문은 2009학년도 동아대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음

### 참 고 문 헌

- [1] R. Isermann, "Process fault detection based on modeling and estimation methods - A survey", *Automatica*, vol. 20 4, pp.387-404, 1984.
- [2] P.M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge - based redundancy - A survey and some new results", *Automatica*, vol. 26, no.3, pp. 459-474, 1990.
- [3] R. F. Stengel, "Intelligent failure-tolerant control", *IEEE Control Systems*, pp. 14-23, June, 1991.
- [4] 김미정, 김병국, 조윤현, 황돈하, 강동식, "농형유도전동기의 회전자 편심에 따른 특성 분석", *대한전기학회 하계 학술대회*, pp. 1180-1182, 2006.
- [5] 김미정, 김병국, 문지우, 조윤현, 황돈하, 강동식 "회전자 편심을 고려한 유도전동기의 특성 해석", *대한전기학회*, pp. 1174-1176, 2007.
- [6] Mi-Jung Kim, Byung-Kuk Kim, Ji-Woo Moon, Yun-Hyun Cho, Don-Ha Hwang, Dong-Sik Kang, "Analysis of PWM vector controlled squirrel cage induction motor during eccentricity rotor motion using FEM" *COMPUMAG* pp. 1790-1793, 2007.
- [7] W.T. Thosom and M. Fenger, "Industrial application of current signature analysis to diagnose faults in 3-phase squirrel cage induction motors", *Pulp & Paper Industry Technical Conference*, pp. 205-211, 2000.

[8] O.V. Thorsen and M. Dalva, "Method of condition monitoring and fault diagnosis for induction motors", *ETEP*, vol. 8, no. 5, pp. 383-395, 1998.

[9] H.A. Toliyat, "A method for dynamic simulation and detection of air-gap eccentricity in induction machines", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 32, no. 4, pp.910-918, 1996.

[10] 양보석, *진동신호분석기술을 이용한 유도전동기의 결함분석 및 진단*. 인터비전, 2007.

[11] 정병훈, "電流分析을 利用한 誘導電動機의 缺陷 檢出에 關한 研究", 호서대학교 박사학위 논문.

[12] 서중찬, "유도전동기의 고장진단을 위한 진동 및 전류 신호 해석", 순천대학교 석사학위 논문.

[13] G. B. Kliman, R.A. Koegl, j. Stein, R. D. Endicott and M. W. Madden, "Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors", *IEEE Trans. Energy Conv.* vol. EC-3, no. 4, pp. 873-879, Dec. 1988.

[14] A.H. Bonnett, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 28, no. 4, pp. 921-936, 1992.

[15] C. Yung, A. H. Bonnett, "Repair and replace - a decision model for industrial electric motors", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 10, no. 5, pp. 48-58, 2004.

저 자 소 개



**이진우 (李晉宇)**  
 1998년 경남대 전기공학과 졸업(학사).  
 2000년 동아대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2006년~현재 동아대 전기공학과 제어 및 시스템 연구실 포닥연구원  
 Tel : 051-200-6950  
 Fax : 051-200-7743  
 E-mail : jinwoo@donga.ac.kr



**김광수 (金廣秀)**  
 2007년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업(학사). 2009년 2월 동아대학교 전기공학과 졸업(석사) 2009년 3월 ~ 현재 LG 화학 주식회사  
 Tel : 051-200-6950  
 Fax : 051-200-7743  
 E-mail : kks7132@nate.com



**조현철 (曹賢哲)**  
 1997년 2월 부경대학교 제어계측공학과 졸업(학사). 1999년 2월 동아대학교 전기공학과 졸업(석사). 2006년 8월 미국 네바다 대학교 전기공학과 졸업(Ph.D.). 2006년 8월~2009년 2월 동아대학교 전기공학과 Post-Doc 연구원. 2009년 3월~현재 울산과학기술대학 전기전자학부 조교수  
 Tel : 052-279-3166  
 Fax : 052-277-1538  
 E-mail : hcjo@mail.uc.ac.kr



**이영진 (李榮珍)**  
 1992년 동아대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1994년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2005년~2006년 미국 조지아텍 Post-Doc 연구원. 2000년~현재 한국폴리텍 항공대학 항공전기와 부교수.  
 Tel : 055-830-3482  
 Fax : 055-830-3489  
 E-mail : airlee011@hanmail.net



**이권순 (李權純)**  
 1973년 충남대학교 공업교육학과 졸업(학사). 1997년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 미국 오레곤 주립대학교 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(Ph.D.). 1982년~현재 동아대학교 전기공학과 교수  
 Tel : 051-200-7739  
 Fax : 051-200-7743  
 E-mail : kslee@dau.ac.kr