

진동 신호 이용 모델 기반 모터 결함 검출 시스템 개발

Development of a Model-Based Motor Fault Detection System Using Vibration Signal

임 호 순, 정 길 도*, A.G. Parlos
(Ho-Soon Lim, Kil To Chong, and A.G. Parlos)

Abstract : The condition assessment of engineering systems has increased in importance because the manpower needed to operate and supervise various plants has been reduced. Especially, induction motors are at the core of most engineering processes, and there is an indispensable need to monitor their health and performance. So detection and diagnosis of motor faults is a base to improve efficiency of the industrial plant. In this paper, a model-based fault detection system is developed for induction motors, using steady state vibration signals. Early various fault detection systems using vibration signals are a trivial method and those methods are prone to have missed fault or false alarms. The suggested motor fault detection system was developed using a model-based reference value. The stationary signal had been extracted from the non-stationary signal using a data segmentation method. The signal processing method applied in this research is FFT. A reference model with spectra signal is developed and then the residuals of the vibration signal are generated. The ratio of RMS values of vibration residuals is proposed as a fault indicator for detecting faults. The developed fault detection system is tested on 800 hp motor and it is shown to be effective for detecting faults in the air-gap eccentricities and broken rotor bars. The suggested system is shown to be effective for reducing missed faults and false alarms. Moreover, the suggested system has advantages in the automation of fault detection algorithms in a random signal system, and the reference model is not complicated.

Keywords : fault detection, steady state vibration signal, model-based method, FFT signal processing, residual generation, fault indicator

I. 서론

산업 현장에서 유도 모터는 동력 발생과 전달에 있어서 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나, 현재 사용되는 모터에서 다음과 같은 원인으로 다양한 결함이 발생하고 있다. 열이나 진동, 기름에 의한 고정자 권선의 단락과 개방, 다양한 스트레스에 의한 회전자 바의 파손, 잘못된 윤활이나 정렬로 인한 에어 갭 편심 등이 결함의 원인이 되고 있다[1]. 모터에서 발생하는 결함들을 사전에 방지하지 못하면 생산력 저하가 발생하거나 작동이 중단되는 등 많은 피해를 가져올 수 있다. 이러한 피해를 예방하기 위해 결함을 검출하고 진단하는 기술이 다양하게 개발되고 있다. 모터의 결함을 검출하는 기술을 결함 검출 방법(fault detection: FD)이라 부른다.

전류, 자력, 속도, 토크, 온도, 소음, 진동 신호 등은 결함 검출 시스템(fault detection system)의 설계에 필요한 인자들이다. 모터에 결함이 발생하면 위에서 언급한 인자들에서 변화가 발생하며, 이러한 인자들의 변화를 이용하여 결함 검출 시스템들이 개발되어 왔다. 결함 검출을 위해 개발된 방법에는 코일이나 권선에서 나오는 자력을 이용한 자기장 모니터링(electromagnetic field monitoring), 온도의 변화를 이용한 온도 측정법(temperature measurements), 열이나 온도를 이용한 적외선 인식법(infrared recognition), 소음과 진동을 이용한 소음, 진동 모니터링(noise and vibration monitoring), 철이 부식되는 성질을 이용한 화학적 분석법(chemical analysis), 소음을 이

용한 소음 측정법(acoustic noise measurements), 전류를 이용한 motor current signature analysis(MCSA) 등이 있다[2][3].

Penman[4]등은 축의 자속을 스펙트럼 분석을 통해 나온 주파수를 모니터링해서 고정자와 회전자의 결함을 검출했고, Sottile, Kohler[5]와 Kliman[6]등은 권선의 단락과 개방에 대한 결함을 순차 전류를 이용하여 검출하는 시스템을 개발한 바 있다. Schoen[7]등은 진동과 전류의 주파수 연관성을 통해 베어링 결함을 검출하는 방법을 소개하였다. 그밖에도 결함 검출의 많은 방법들이 개발되었다[8][9].

다양한 결함 검출 방법 중에서 중요한 방식의 하나는 진동 신호를 결함 검출에 적용하는 방식이다. 진동 신호 분석을 이용한 다양한 방법은 플랜트의 상태를 모니터링하고 결함을 검출하기에 효과적임이 입증되고 있다[10]. 모든 회전하는 기계에서는 진동이 발생하고 결함이 존재하면 진동 신호에 변화가 나타난다. 이러한 진동 특성의 변화를 이용하여 결함 검출 시스템을 개발하였다[10]-[15]. 그러나 지금까지 제안된 진동 신호를 이용한 결함 검출 방법은 단순히 시간상에서 진동의 크기(max, min)나 평균(mean), 분산(variance)등을 관찰해서 검출하거나, 좀 더 발전된 방법으로 주파수 스펙트럼을 통해서 그래프상에서 특이한 주파수가 형성되면 관측자의 식별을 통해 결함을 인식하는 방법이 보고된 바 있다[10]-[15]. 이러한 방법은 모터의 결함 상태가 아닌 플랜트의 상태가 갑자기 변할 때 생기는 외란(disturbance)과 실질적인 결함을 구별하지 못하여 누락된 결함(missed fault)이나 허위 경보(false alarm)를 일으키는 단점을 가지고 있다.

지금까지 제안된 많은 기술들은 결함 검출에 있어서 누락된 결함과 허위 경보를 최소화하여 효율성을 높이려는 노력

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 5. 15., 채택확정 : 2003. 9. 16.

임호순, 정길도 : 전북대학교 전자정보공학부

(darkhosoor@hotmail.com/kitchong@moak.chonbuk.ac.kr)

A.G. Parlos : Texas A&M 대학교 기계공학부(aparlos@tamu.edu)

을 기울여 왔다. 누락된 결함은 결함이 발생했을 경우에 결함을 검출하지 못하여 플랜트에 심각한 결과를 초래하는 것을 의미하고, 허위 경보는 결함 검출 시스템이 너무 민감해서 결함이 아닌데도 결함으로 오인하여 플랜트를 정지시키고 효율을 떨어뜨리는 경우를 말한다.

본 연구를 통하여 개발한 시스템은 진동 신호용 결함 검출 방법의 문제점을 최소화하고 검출 성능을 최대화하기 위해서 진동 신호용 모델 기반(model-based) 결함 검출 방법을 이용하였다. 이 방법은 랜덤한 진동 신호를 이용하여 표준 모델(Reference model)을 개발하는데 어려움이 있지만, 표준 모델이 개발되면 효율적으로 결함을 검출할 수 있다. 그래서, 본 논문에서는 FFT 신호 처리와 평균을 이용해서 진동 신호 표준 모델을 개발하였고, 표준 모델의 출력과 실제 플랜트에서 측정된 데이터(measured data)를 비교하는 모델 기반 결함 검출 방법에 적용하였다.

제안한 결함 검출 시스템은 다음과 같은 과정을 통하여 개발하였다. 플랜트의 진동 신호를 자료수집기(data acquisition system; DAQ)를 통해 취득 데이터(raw data)를 수집하고, 다운 샘플링과 신호 분리(segmentation)를 통하여 주파수 분석 및 잔여차 생성 등 본 연구에 적합한 데이터를 생성했다. 본 연구에서는 정상 상태의 결함을 검출하는 시스템을 개발하므로 시간에 급변하지 않는 정상 상태(stationary) 신호를 얻기 위해 과도 반응(non-stationary) 신호와 정상 신호를 모두 포함하는 전체 데이터에서 정상 상태의 신호만을 분리하였다. 정상 상태 데이터를 분리하는 방법으로 진동 신호의 RMS(root mean square) 값과 주파수 분석을 이용하였다. 정상 상태 신호에 대하여 스펙트럼 신호 처리(signal processing)를 실시하고, 주파수상의 스펙트럼 신호를 이용하여 무결함 상태(healthy condition)의 값을 대표하는 표준모델을 개발하였다. 기존의 방법은 시간상의 데이터를 이용하여 모델을 개발한 후에 스펙트럼 신호 처리를 실시하였다[16]-[18].

본 연구에서 실시한 신호 처리를 살펴보면, 시간에 독립적인 스펙트럼 신호 처리 방법인 fast Fourier transform(FFT)를 실시하였다[10]. FFT는 시간에 대한 정보가 손실되므로 윈도우 크기(window size)를 최적으로 설정하고 윈도우를 이동(moving window)시켜야 한다. 이렇게 해서 개발된 표준 모델을 통해 생성된 무결함 신호 데이터와 측정된 데이터를 이용하여 잔여차(residual)를 생성하였다. 결함 지시기(fault indicator)는 진동 잔여차의 root mean square (RMS) 값과 측정된 진동 스펙트럼 데이터의 RMS 값의 비율로 설계하였다.

개발된 결함 검출 시스템은 800 hp의 대형 유도 모터를 이용하여 실험을 실시하였으며, 결함은 부하의 상태에 따라서 에어 갭 편심(air-gap eccentricity)과 회전자 바의 파손(broken rotor bar)에 대하여 고찰하였다.

본 논문에서는 다음과 같이 기술 분야에 공헌하고 있다.

- 진동신호를 이용한 새로운 검출 방법 개발,
- 진동 신호를 이용한 기존의 방법에서는 FFT 분석 결과에 대한 전문가의 식별이 필요하지만, 제안한 방법은 결함 지시기를 이용하므로 무인 자동화 시스템 가능,
- 육안으로의 식별을 통한 분석보다 임계치를 이용하므로 누락된 결함과 허위 경보를 최소화하여 결함 검출 성능의 향상.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 본문에서는 지금까지 소개된 결함 검출 방법에 대해 서술 및 본 논문에서 제안한 결함 검출 방법을 소개 하며, 실험 및 분석에서는 제안한 방법을 실제 플랜트에 적용하여 결과를 분석하였으며, 마지막 장에서는 본 연구에 대한 결론을 실었다.

II. 본론

1. 결함 검출 방법

본 장에서는 모터 결함의 종류와 에어 갭 편심, 회전자 바의 파손에 대한 결함, 그리고 일반적으로 사용되는 결함 검출 방법과 지금까지 제안된 진동 신호용 결함 검출 방법을 살펴보겠다.

1.1 모터 결함의 종류

1.1.1 에어 갭 편심

에어 갭 편심은 정적인 에어 갭 편심과 동적인 에어 갭 편심으로 구분할 수 있다. 정적인 에어 갭 편심은 코어가 난형으로 되었거나, 고정자나 회전자의 위치 설정이 부정확하기 때문에 발생할 수 있다. 동적인 에어 갭 편심은 주로 회전자가 회전 중심에 위치하지 않기 때문에 발생한다. 정적인 에어 갭 편심은 공간에 의해서만 발생하지만, 동적인 에어 갭 편심은 공간과 시간의 영향을 받는다. 동적인 에어 갭 편심은 회전자 축의 굽음, 베어링의 마모, 베어링의 잘못된 정렬, 임계 속도의 기계적 공명등이 원인이 되고 있다.

1.1.2 회전자 바의 파손

회전자 바의 결함은 특히 대형 모터에서 빈번하게 발생하는데, 크게 두 가지의 원인에 의해 결함이 발생한다[1]. 첫 번째 원인은 고온과 운전을 시작할 때 발생하는 원심력에 의한 것이고, 둘째는 제조할 때의 잘못된 주물이나 엔드링 조인트(end-ring joint)의 문제에 의해서 발생한다. 이러한 원심력과 잘못된 설계 등의 원인으로 회전자 바가 휘어지거나, 결국은 부러져 전체 플랜트에 상당한 피해를 주게 된다.

1.2 결함 검출 방법

1.2.1 데이터 유도 방법(Data-Driven Method)

데이터 유도 방법은 무결함 상태의 데이터와 명확한 결함이 있을 때의 데이터를 수집해서 사용한다. 이 방법은 대부분 모델링이 용이하지 않은 분야에 이용되며, 방법의 성능은 수집된 데이터의 질과 양에 의해서 결정된다. 지금까지 대부분의 모터 결함 검출은 데이터 유도 방법을 사용해 왔다. 플랜트에서 측정된 진동 신호를 직접 결함 검출에 적용하는 것도 이 방법 중 하나이다. MCSA 방법도 전류 신호를 측정해서 이 방법에 적용한 것이다. 특히 에어 갭 편심과 회전자 바 파손의 결함 검출에 사용하고 있는 주파수 스펙트럼 분석도 이 방법에 속한다[21][22].

1.2.2 지식 기반 방법 (Knowledge-Based Method)

지금까지 지식 기반 방법이 다양하게 소개된 바 있다[23]. 지식 기반 방법에 있어서 기본 규칙은 측정된 신호의 결과를 분석하고, 결함을 발생시키는 원인과 결과의 상관 관계로 결함을 검출하는 것이다. 이 방법은 물리적 법칙이나 데이터를 분석하는데 있어서 계산이 복잡한 단점이 있다. 규칙 기반 숙련자 시스템(Rule-based expert system)은 지식 기반 방법의 대표적인 기술이다[24]. 숙련자 시스템도 지식을 이용하는 한

방법으로 모델링이 용이하지 않거나, 모델 개발이 어려울 때 자주 이용된다. 이 방법들은 간단한 규칙을 통해 결함을 쉽게 검출할 수 있는 능력이 있다.

1.2.3 잔여차 모델 기반 방법 (Residual Model-Based Method)

모델 기반 방법은 플랜트에 상응하는 분석적(analytical) 또는 실험적(empirical) 모델을 사용하여 결함을 검출하는 방법이다[16][17]. 이 방법은 모델에서 출력된 신호와 센서를 통해 측정된 신호를 비교한다. 모델 출력과 센서 측정 신호의 차를 잔여차라 정의하며 잔여차를 결함 검출에 이용하는 방법을 잔여차 모델 기반 결함 검출 방법이라 부른다. 무결함 상태에서 잔여차는 영(zero)에 가깝고, 결함이 발생하면 영이 아닌 큰 값을 가진다. 잔여차는 결함 검출 및 결함의 종류도 확인하는데 사용할 수 있다. 모델 기반 방법을 이용한 결함 검출의 효율은 무결함 상태의 모델을 설계할 때, 플랜트의 상태 변수에 독립적인 잔여차를 생성하는 것에 달려있다.

1.3 진동 신호용 결함 검출 방법

회전하는 기계는 결함이 발생하면 대체로 진동의 진폭이 증가하는 특성을 가지고 있다. 진동 신호를 이용한 결함 검출 시스템 개발은 이러한 특성을 이용하여 개발되고 있다. 진동 신호를 이용한 결함 검출 방법에는 시간상의 분석법(Time-domain analysis), 주파수상의 분석법(Frequency-domain analysis), 경향 분석법(Trend analysis) 그리고 궤도 분석법(Orbit analysis) 등이 있다[10][14][15][25][26][28].

시간상의 분석법은 센서를 통해 얻은 진동 신호를 시간상에서 진동 진폭의 크기를 이용하는 방법으로 크기 분석법(amplitude analysis)과 통계 분석법(statistical analysis)이 있다. 크기 분석법은 진동 진폭의 최대값, 최소값, 평균, 분산, RMS 등을 이용해서 결함을 검출하는 방법이다[14]. 단순히 크기만 이용하는 것은 결함 검출에 신뢰성이 떨어지기 때문에 진동 진폭 크기의 통계를 분석해서 결함 검출에 이용하는 통계 분석법을 동시에 사용한다[10][28].

주파수상의 분석법은 가장 잘 알려진 방법으로 주파수상에서 결함 상태의 특정 주파수를 찾아내는 방법이다. 진동 신호의 스펙트럼 분석을 통해 무결함 상태의 스펙트럼 분석 결과와 결함 상태의 스펙트럼 분석 결과를 비교해서 무결함 상태와 상이한 주파수가 발생하면 결함이 존재한다고 판단하는 방법이다. 주파수 스펙트럼 분석은 FFT를 이용하여 결함을 검출한다.

경향 분석법은 일반적으로 결함이 발생할 경우 장시간 동안 특정한 경향을 나타내는 사실에 근거하여 신호의 경향을 분석함으로써 결함을 검출하는 방법이다. 즉 결함의 발생은 갑자기 일어나지 않고 조금씩 결함의 징후를 보인 후 발생하는 특성을 이용하였다. 예를 들어 회전자 바의 결함을 살펴보면 결함의 다양한 원인에 의해서 갑자기 회전자 바가 부러지는 것이 아니라, 초기에는 약간 휘어지며, 시간이 흐를수록 더 심하게 휘어진 다음 부러진다. 이런 경향을 진동의 진폭 크기 등으로 분석하는 방법이다. 진동 신호는 모터에 이상 징후가 발생하면, 서서히 진동의 진폭 크기가 증가하는 경향을 미리 관측하여 결함을 검출하는 방법이다. 시간상에서 진동

의 최대값이나 최소값, 평균, 분산의 변동과 추이를 통해서 결함을 검출한다. 경향 분석법(trend analysis)은 매월 실시하는 단기 분석(short-term analysis)과 한달 이상의 기간 마다 실시하는 장기 분석(long-term analysis)이 있다.

그리고, 궤도 분석법은 모터 중심 축은 편심이 없이 원형의 궤도(orbit)를 그리며 회전해야 하지만, 결함이 발생하면 원형이 아닌 특이한 모양을 그리며 회전하는 특성을 이용하는 방법이다. 만약 모터에 결함이 발생하면 진폭의 크기가 증가하며 모터 중심 축이 타원이나 바나나 모양 및 랜덤 모양으로 궤도를 그리며 회전하게 된다. 이렇게 관측된 모터 중심축의 회전 궤도를 측정하여 결함을 검출하는 방법이다.

1.4 결함 지시기

결함 검출에서는 결함 지시기를 결정하는 것이 매우 중요하다. 결함 지시기는 시간에 따른 출력의 평균, 주파수 특성, 통계적 특성 등의 값들을 나타낸다. 이것은 시스템의 상태나 동적 상태를 대표하는 측정된 데이터를 이용하여 계산한다. 결함 검출에서 지시기 값이 임계치를 벗어나면 결함이 발생한 것으로 판단한다. 지시기를 구하는 방법은 데이터 유도 방법(data-driven method), 지식 기반 방법(knowledge-based method), 분석적 방법(analytical method) 등이 있다[27]. 데이터 유도 방법은 플랜트에서 측정된 신호를 데이터의 변환 없이 직접 이용하여 결함 지시기를 유도하는 방법이고, 지식 기반 방법은 관련된 일부의 정보 데이터를 사용하여 질적인 모델(qualitative model)을 구하고 이 모델을 결함 지시기에 이용한다. 분석적 방법은 풍부한 정보 데이터를 사용하여 수학적 모델(mathematical model)을 구하고 이를 결함 지시기 설계에 이용하는 방법이다. 본 연구는 모델 기반 결함 검출 방법에 적합한 분석적 방법을 이용하여 결함 지시기를 설계하였다.

2. 결함 검출 시스템 설계

진동 신호를 이용하여 모터의 결함을 검출하는 방법으로 새로운 모델 기반 결함 검출 시스템을 제안한다. 제안된 결함 검출 시스템의 설계를 간략하게 그림 1과 같이 도식화 할 수 있다. 대형 유도 모터를 이용한 실험을 통하여 진동 신호, $V_{raw}(t)$ 를 수집하고, 수집된 데이터를 필터링과 다운 샘플링을 통해 분석이 용이하도록 크기(scale)를 조절하여 $V_{DS}(t)$ 를 만든다. 데이터 분리를 통해 과도 반응 데이터에서 정상 상태의 데이터, $V_{DS}^s(t)$ 를 추출한다. 여기서 DS 와 St 는 각각 다운 샘플링과 정상 상태의 신호를 의미한다. 신호 처리는 FFT의 결과를 스펙트럼 신호 $V_{DS}^s(f)$ 로 변환하며 주파수 스펙트럼 데이터를 기반으로 표준 모델값 $V_{DS}^s(f)$ 를 결정하였고, 잔여차 $r_{DS}^s(f)$ 를 생성하였다. 잔여차와 플랜트에서 측정된 진동 신호 데이터의 비율을 이용하여 결함 지시기, $I_{DS}^s(t)$ 를 설계하였다. 결함 지시기의 값과 임계치를 비교하여 결함의 유무를 판단하고 경보를 전달할 수 있는 시스템을 구성하였다. 본 연구에서 제안한 시스템에서 중요한 신호 분리, 잔여차 생성 및 결함 지시기의 설계에 대하여 구체적으로 살펴보기로 하자.

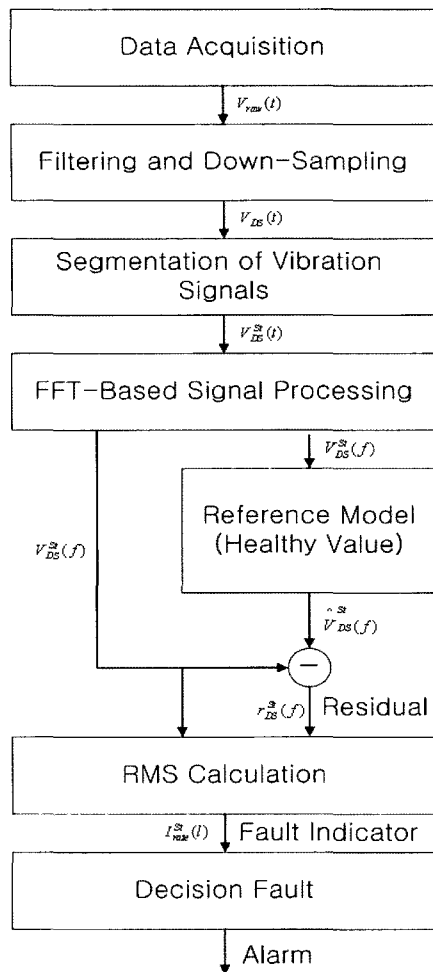


그림 1. 제안한 모델 기반 결함 검출 시스템.
 Fig. 1. Proposed model-based fault detection system.

2.1 정상 상태 신호 분리

모터에서 수집된 진동 신호는 시간에 따라서 변하는 과도 반응 상태와 정상 상태의 신호를 포함하고 있다. 모터의 결함 검출에 있어서 과도 반응과 정상 상태의 신호를 모두 이용하여 결함을 검출하는 방법의 개발은 신호의 특성상 상당히 많은 양의 작업을 요구하며 복잡하다. 본 연구에서는 과도 반응의 신호와 정상 상태의 신호를 분리해서 정상 상태의 진동 신호에 대한 결함 검출 시스템을 개발하였다. 과도 반응 신호와 정상 상태의 신호를 분리하는 방법은 (1)과 (2)와 같이 RMS 값 R 과 주파수 스펙트럼의 고조파 H 를 이용하였다.

$$\text{RMS값 비교: } |R_n - R_{n-1}| < \alpha \quad (1)$$

$$\text{고조파 비교: } |H_n - H_{n-1}| < \beta \quad (2)$$

여기에서 $n=1, 2, \dots, N$ 은 n 번째 윈도우를 나타내고, α 와 β 는 비교를 위한 임의의 작은 수이다.

수집된 데이터를 1.5초간격으로 윈도우를 설정하고 각 윈도우 진동신호의 RMS 값과 주파수 스펙트럼의 고조파를 구한다. 현재 윈도우의 진동신호 RMS 값과 고조파가 전 윈도우의 값과 유사하면 정상 상태이고, 그렇지 않은 경우에는

과도 반응 상태의 신호이다. 이러한 RMS 값과 주파수 특성을 이용하여 정상 상태 신호와 과도 반응 상태 신호를 분리하였다.

2.2 표준 모델 설계

본 연구를 통하여 제안한 검출 시스템에서 사용한 표준 모델은 FFT 처리된 데이터를 이용하여 설계하였다. 모델 설정과 관련된 FFT 신호 처리, 표준 모델 설정 및 잔여차 생성 과정을 구체적으로 살펴보자.

2.2.1 푸리에 변환 신호 처리

신호 분리 방법을 통해 구한 정상 상태 데이터를 신호 처리 하기 위하여 시간에 의존하지 않은 푸리에 변환을 이용하였다[10]. 본 논문에서는 이산 데이터를 고속으로 처리하기 위해서 FFT 신호 처리를 실시하였으며 스펙트럼 데이터를 결합 검출 시스템에 이용하였다.

2.2.2. 모델 설정

모델 기반 방법의 모델링을 위해 무결함 상태의 값을 구하는 표준 모델 설계가 필요하다. 이전의 많은 논문에서 표준 모델을 신경회로망이나 퍼지논리와 같은 인공 지능을 이용하여 설계하였다[9]. 인공 지능 표준 모델은 무결함 상태의 취득 데이터의 학습(learning)을 통해 표준 모델을 설정하고, 결함이 발생하였을 때도 무결함 상태에 대한 출력값을 결정한다. 그리고 전류 또는 전압 등의 정현파로 주기성이 있는 신호를 결합 검출에 사용하였다. 그러나, 본 논문에서 이용되는 신호는 랜덤 진동 신호 데이터이므로 인공 지능을 이용하여 표준 모델을 설계하는 것은 많은 계산과 시간이 소요된다.

본 논문에서 제안한 방법은 진동의 주파수 특성을 이용하여 무결함 상태의 모델을 설계하였다. 모델 설정을 위해 데이터의 분석을 실시하였으며, 정상 상태 신호의 주파수 특성은 일정한 주파수에서 피크를 이루는 것을 볼 수 있었다. 시간에 따라 스펙트럼 크기(amplitude)에 약간의 차이가 존재한다 할지라도, 동일한 운전 상태에서는 유사한 주파수 특성이 형성됨을 알 수 있었다. 이러한 특성을 이용하여 무결함 상태의 모델을 설계하였다. 취득 데이터의 FFT를 이용해 각각의 부하량에 따라서 데이터의 양에 적절한 윈도우 크기를 설정하고 수초 동안 각각의 100% 부하와 50%부하의 무결함 상태에 대한 신호 처리를 실시하였다. 표준 모델은 무결함 정상 상태의 전체 신호를 여러 개 윈도우로 구분하고 FFT한 결과의 평균 값을 이용하여 설계하였다. 하나의 윈도우에서 진동 신호의 FFT 결과 스펙트럼 크기(amplitude)는 $V_{DS}^{NF}(f)$ 이고, 표준 모델의 스펙트럼 크기는 $\hat{V}_{DS}(f)$ 이며, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{DS}^{NF}(f) = FFT\{V_{DS}^{NF}(t)\} \quad (3)$$

$$\hat{V}_{DS}(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{V_{DS,n}^{NF}(f)\} \quad (4)$$

$n=1, 2, 3, \dots, N$ 이며 윈도우의 수를 나타내고, $V_{DS}^{NF}(t)$ 는 시간상의 진동의 크기이고, NF(no fault)는 무결함 상태의 진동 신호를 의미한다. 본 연구에서는 윈도우의 크기를 1.5초로 설정하였다. 이러한 방법을 통하여 설계한 무결함의 표준 모델 값은 어느 정도의 노이즈를 포함하고 있지만 모델 기반 방법

의 표준 모델로 이용하기에 만족할 만한 결과를 보였다.

2.2.3 잔여차 생성

잔여차는 모델 기반 방법의 중요한 요소이다. 이것은 실제 플랜트에서 측정된 데이터와 표준 모델을 통해 나온 데이터의 차이이다. 결합이 없는 경우에는 잔여차가 영에 가깝고, 결합이 발생하면 결합에 의해서 영이 아닌 어떤 특정 값이 발생한다. 이론적으로 결합이 없는 경우에는 잔여차가 영이어야 하지만, 실질적으로 측정된 신호는 노이즈를 포함하고 있기 때문에 영이 아니다. 또한 랜덤 성질의 진동 신호이기 때문에 표준 모델을 통해 무결합 상태의 값을 정확히 계산할 수 없는 특성으로 인해 발생하는 에러도 포함되어서 영이 아닌 작은 값의 잔여차가 존재한다. 그러나 결합이 발생했을 때의 값보다는 상대적으로 작기 때문에 쉽게 비교, 분석이 가능하다.

이전의 논문에서 잔여차는 시간상에서 측정된 데이터와 표준 모델을 통해 얻은 데이터의 차이로 생성하였고, 그 다음에 신호 처리를 하였다[16]-[18]. 그러나, 본 논문에서는 주파수상에서 잔여차를 생성하였다. 표준 모델을 통해 얻은 신호, $\hat{V}_{DS}(f)$ 와 플랜트에서 측정된 취득 데이터를 FFT 신호 처리한 값, $V_{DS}(f)$ 의 차이로 잔여차를 생성했다. 잔여차 $r_{DS}(f)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_{DS}(f) = V_{DS}(f) - \hat{V}_{DS}(f) \tag{5}$$

참고로 시간상에서 잔여차를 생성하면 무결합 상태에서도 잔여차가 결합이 발생했을 때의 값과 비슷하게 나온다. 따라서 결합 지시기 설계와 결합의 존재 유무를 구분하기가 어렵다.

2.3 결합 지시기 설계

최종적으로 결합의 존재 여부를 결정할 인자인 결합 지시기의 선택이 필요하다. 결합 지시기의 값이 임계치보다 작으면 무결합이고, 임계치보다 큰 값이면 결합이 존재한다고 판단한다. 에어 갭 편심과 회전자 바 파손의 결합 검출용 지시기를 다음과 같이 설계하였다. 본 논문에서는 잔여차를 생성하기 전에 신호 처리를 실시하고, 결합 지시기 설계에 주파수 RMS 값의 비율을 사용하였다. 윈도우 크기를 $t_2 - t_1$ 신호 처리한 주파수 상의 잔여차 데이터를 $r_{DS}(f)$, 측정된 데이터를 신호 처리한 진동 신호 데이터를 $V_{DS}(f)$ 라 하였다. 주파수상에서 잔여차의 RMS 값 $r_{RMS}(l)$, 플랜트에서 측정된 진동 신호의 RMS 값 $V_{RMS}(l)$ 을 시간 $t_1 \leq t \leq t_2$ 에서 다음과 같이 구하였다.

$$r_{RMS}(l) = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} r_{DS,i}^2(f)} \quad l = 0, 1, 2, \dots, L \tag{6}$$

$$V_{RMS}(l) = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} V_{DS,i}^2(f)} \quad l = 0, 1, 2, \dots, L \tag{7}$$

여기에서 N_l 는 한 윈도우 상에서 주파수 데이터 수를 나타내고, $p = t_2 - t_1$ 로 윈도우 크기를 나타내며, $l \times p$ 로 윈도우 크기를 이

동하면서 측정하고자 하는 시간을 나타낼 수 있다.

결합 지시기는 (6)과 (7)을 이용하여 두 식의 비율로 구하면 된다. 진동 신호의 랜덤 성질로 인한 FFT 결과를 살펴보면 전체 주파수에서 신호의 크기가 랜덤한 것을 볼 수 있다. 결합이 발생할 경우에 특정한 주파수의 잔여차가 다른 주파수에서보다 크게 나타남을 또한 알 수 있다. 이러한 특징을 바탕으로 잔여차 크기가 2보다 작은 주파수를 필터링한 값들을 이용하여 최적의 결합 지시값을 설정하였다. 결합 지시기, $I_{rate}(l)$ 는 다음과 같다.

$$[r_{RMS, filter}(l), V_{RMS, filter}(l)] = filter[r_{RMS}(l), V_{RMS}(l)] \tag{8}$$

$$I_{rate}(l) = r_{RMS, filter}(l) / V_{RMS, filter}(l) \tag{9}$$

잔여차 또는 진동 스펙트럼의 RMS 값을 결합 지시기로 사용하게 되면 입력 전원의 불균형과 부하 토크 변동 등의 외란이 발생할 경우 지시기의 값이 결합과 비슷하게 진동을 하기 때문에 결합으로 잘 못 인식할 가능성이 커지며 이로 인하여 허위 경보를 유발할 수 있다. (9)과 같이 결합 지시기를 설정하게 되면 외란이 존재하는 경우의 잔여차도 진동의 크기와 같은 비율로 증가하기 때문에 지시기가 나타내는 비율은 일정하게 유지되는 결과를 가져온다.

III. 실험 및 분석

본 논문에서 제안한 방법을 실제 플랜트에 적용해서 결합 검출 시스템의 성능을 조사하고 분석하였다. 결합 검출 실험은 무결합 상태와 결합 상태인 에어 갭 편심과 회전자 바 파손을 실제 플랜트에 임의로 설정하고 데이터를 수집하였다.

1. 실험 장치 설치 및 데이터 수집

대형 모터의 실험은 Public Service Electric and Gas Motor Repair Facility, Sewaren, New Jersey에서 시행하였다. 이때 실시한 실험 장치는 그림 2와 같으며 사용한 모터는 Allis Chalmers사의 3상, 8극, 800 hp 유도 모터이다. 모터의 구동 전원은 3상 교류 전원이다. 데이터 수집은 IOTechTM 의 13채널 자료수집기를 사용하여 진동 신호, 속도, 전압, 전류 데이터를 얻었다. 채널 1~6은 진동 신호, 7은 속도, 8~10은 3상 전압 신호, 11~13은 3상 전류 신호로 구성되었고, 샘플링 주파수는 40,000Hz이다. 본 논문의 목적은 진동 신호용 결합 검출 시스템 개발이기 때문에 채널 1~6인 진동 신호 데이터만 이용하였다. 6개 채널의 진동 신호는 그림 3과 같이 가속도계를 설치하여 측정하였다. 가속도계를 X, Y, Z축의 3방향으로 모터 양쪽의 베어링 부근에 설치하였다. 동력계(dynamometer)는 부하로 사용되었고, 부하의 정도를 변화시켜 가면서 에어 갭 편심과 회전자 바 파손이 존재할 경우의 데이터와 무결합 상태의 데이터를 각각 수집하였다. 본 논문에서는 100%와 50%의 부하에 대한 실험을 실시하고 데이터를 수집하였다. 수집한 데이터를 이용하여 제안한 결합 검출 시스템의 성능을 판단하였다. 신호 처리의 효율성을 높이기 위해 다운 샘플링을 실시하여 40,000Hz인 샘플링 주파수를 4,000Hz로 줄였다. 다운 샘플링을 실시할 때 얼리어이싱을 막기 위해 저역 통과 필터링을 실시하였다.

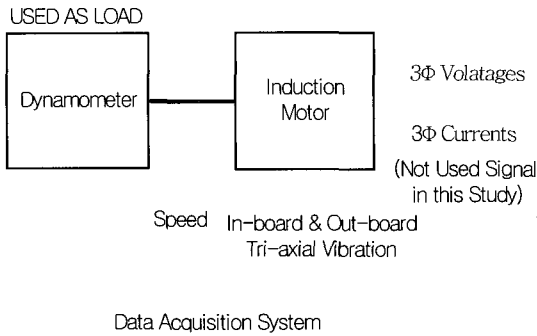


그림 2. 실험 장치 설치도.
Fig. 2. Motor Experimental Set-up.

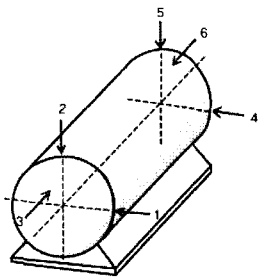


그림 3. 진동 신호 측정을 위한 센서의 위치.
Fig. 3. Position of sensors to measure vibration signals.

2. 실험 결과 및 분석

결함인 에어 갭 편심과 회전자 바의 파손을 플랜트에 걸어주고, 데이터를 수집하여 본 논문에서 제안한 방법을 적용해서 무결함일 때의 데이터와 비교 분석하였다. 신호 처리할 때의 윈도우 크기는 1.5초, 이때 취득 데이터 수는 60,000개로 설정하였다. 또한 본 연구에서 사용한 실험 데이터는 부하가 100%와 50%의 경우를 이용하였다.

2.1 에어 갭 편심 검출

에어 갭 편심 실험은 두 가지 경우에 대해 실시하였다. 첫번째 경우는 안쪽 축의 끝부분에서 회전자 중심의 상단부로 25% 이동한 상태이고, 두번째 경우는 바깥쪽 축의 끝부분에서 회전자 중심이 하단부로 20% 이동과 우측으로 10% 이동한 상태이다.

그림 4에서 그림 7은 에어 갭 편심의 실험 결과를 보여주고 있다. 그림 4는 100% 부하를 주었을 경우, 무결함일 때의 진동 스펙트럼과 에어 갭 편심이 있을 경우의 진동 스펙트럼을 나타낸 것이다. 두 상태의 진동 스펙트럼을 관찰자 식별을 이용하면 결함 발생 유무의 구별이 어렵다. 그림 5는 100% 부하시 무결함 상태와 에어갭 편심의 결함이 존재할 경우에 대한 잔여차를 나타내고 있다. 처음 약 9초 동안은 무결함일 때의 잔여차를 나타낸 것이고, 9초 이후는 결함이 발생했을 경우를 나타낸 것이다. 스펙트럼을 이용하여 결함 유무를 판단하는 방법에서는 판단이 어려웠으나 잔여차를 이용한 분석에서는 무결함일 때와 결함이 발생하였을 때의 차이가 뚜렷함을 볼 수 있다. 무결함 상태에 비하여 결함이 존재할 때는 진동이 증가하며 잔여차가 커진다.

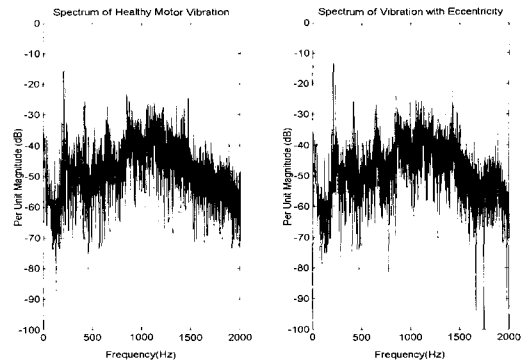


그림 4. 에어 갭 편심 테스트; 모터 무결함 상태의 진동 스펙트럼(좌), 에어 갭 편심의 진동 스펙트럼(우).
Fig. 4. Air-gap eccentricity test; motor vibration spectra of healthy condition (left), vibration spectra of air-gap eccentricity condition (right).

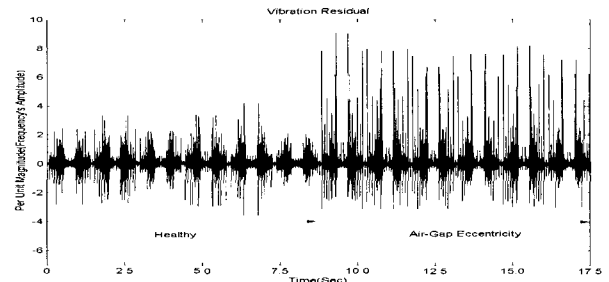


그림 5. 에어 갭 편심 테스트; 무결함과 에어 갭 편심의 잔여차.
Fig. 5. Air-gap eccentricity test; Residual generated between healthy and air-gap eccentricity condition.

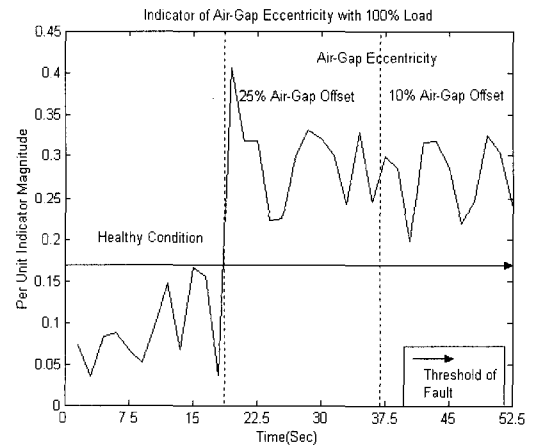


그림 6. 에어 갭 편심의 결함 지시기; 100% 부하를 걸어 줄 때의 결함 지시기.
Fig. 6. Fault Indicator of air-gap eccentricity; 100% load.

그림 6과 그림 7은 결함 지시기와 임계치를 이용하여 결함이 검출되는 것을 보여주고 있다. 그림 6은 100% 부하 상태, 그림 7은 50% 부하 상태의 결함 지시기인 $I_{rate}(I)$ 의 값을 그래프로 각각 보여 주고 있다. $I_{rate}(I)$ 는 그림 4와 5에서 나타낸

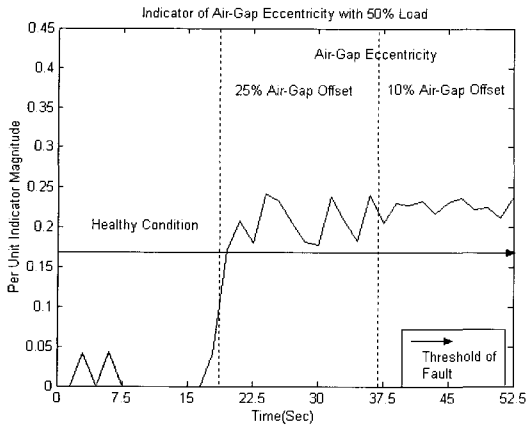


그림 7. 에어 갭 편심의 결함 지시기; 50% 부하를 걸어 줄 때의 결함 지시기.

Fig. 7. Fault Indicator of air-gap eccentricity; 50% load.

진동 스펙트럼과 잔여치의 비율로 구한다. 에어 갭 편심도 25%와 20%의 편심율을 가해서 무결함 상태와 비교하였다. 무결함 상태를 18초까지 유지 하고 18초 후에는 에어 갭 편심의 결함 상태를 나타낸다. 그래프를 통해서 알 수 있듯이 반복 실험을 통해 최적의 임계치를 설정하면 누락된 결함과 허위 경보 없이 결함을 검출할 수 있음을 보여주고 있다. 임계치는 반복된 실험을 통해 0.17을 최적의 값으로 결정하였다.

$I_{rate}(I)$ 값이 임계치 이내에 있으면 무결함 상태이고, 벗어나면 결함이 발생 한 것으로 판단한다. 그림 6과 그림 7에서 결함 상태의 편심율에 따른 각각의 결함을 구분하기는 어렵지만, 부하의 정도에 관계없이, 100%와 50%의 경우 모두 우수한 결함 검출의 성능을 보여 주고 있다.

2.2 회전자 바의 파손 검출

회전자 바의 파손 실험은 바의 파손 정도에 따라서 1/2바, 1바, 2바, 4바의 부러진 경우로 실험을 실시하였다. 에어 갭 편심의 경우와 마찬가지로 스펙트럼과 잔여치를 그래프를 통해서 살펴 보았고, 결함 지시기를 사용하여 결함 발생의 유무를 그래프를 통해서 살펴 보았다.

그림 8에서 그림 11은 회전자 바 파손의 실험 결과를 나타내고 있다. 그림 8은 100% 부하를 인가했을 때, 무결함 상태의 데이터와 결함 상태 데이터의 스펙트럼을 보여주고 있으며 그림 9는 무결함과 회전자 파손에 대한 잔여치의 비교를 보여주고 있다. 에어 갭 편심 실험과 마찬가지로 무결함과 결함시의 스펙트럼 데이터만으로는 관찰자 식별을 통한 결함을 검출하는 것은 어렵지만, 잔여치는 확실한 변화가 있음을 보여주고 있다. 회전자 바의 파손 실험에서도 9초 동안은 무결함 상태를 유지하다가, 이후 9초 동안은 결함이 발생할 경우를 보여 주고 있다.

그림 10과 그림 11은 각각 100%와 50% 부하에서 회전자 바 파손의 결함 지시기인 $I_{rate}(I)$ 를 나타내고 있다. 무결함 상태와 1/2바, 1바, 2바, 4바의 파손 상태일 경우를 각각 18초씩 연속적으로 나타내었다. 결함의 정도가 증가함에 따라서 진동 신호도 증가하여, $I_{rate}(I)$ 값이 커지는 것을 보여주고 있다.

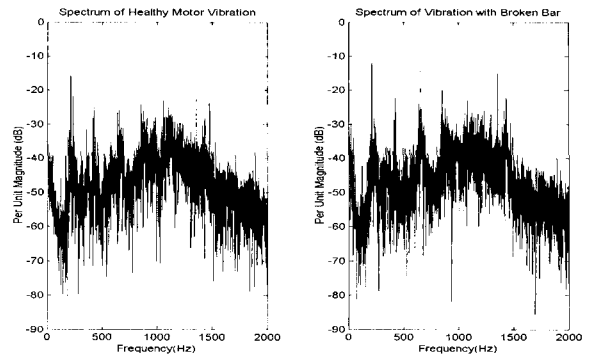


그림 8. 회전자 바의 파손 테스트; 무결함 상태의 진동 스펙트럼(좌), 회전자 바 파손의 진동스펙트럼(우).

Fig. 8. Broken rotor bar test; motor vibration spectra of healthy condition (left), vibration spectra of broken rotor bar condition (right).

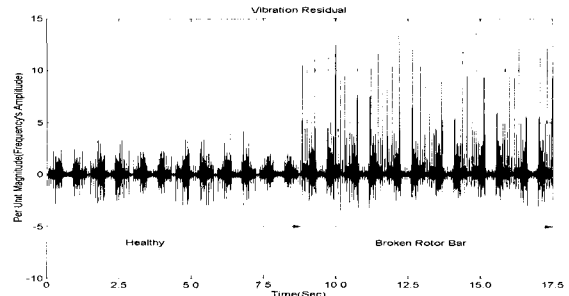


그림 9. 회전자 바의 파손 테스트; 무결함과 회전자 바 파손의 잔여치.

Fig. 9. Broken rotor bar test; residual generated between healthy and broken rotor bar condition.

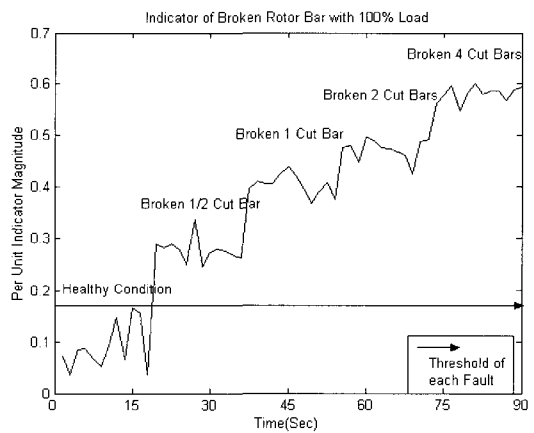


그림 10. 회전자 바 파손의 결함 지시기; 100% 부하를 걸어 줄 때 결함 지시기.

Fig. 10. Fault Indicator of broken rotor bar, 100% load.

그림 10과 그림 11에서 무결함을 유지하다 결함이 발생하면 결함 지시기와 임계치를 비교하여 결함 발생 유무를 명확하게 판단할 수 있다. 그리고 각각의 회전자 바의 파손 정도를 식별하는 것은 약간의 어려움이 있을 수 있지만, 에어 갭 편심

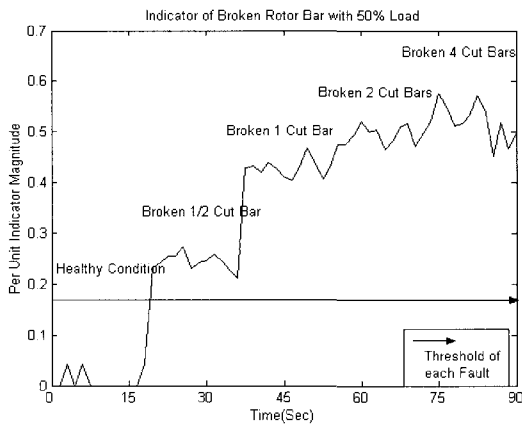


그림 11. 회전자 바 파손의 결함 지시기; 50% 부하를 걸어 줄 때 결함 지시기.

Fig. 11. Fault Indicator of broken rotor bar; 50% load.

검출 때와 마찬가지로 누락된 결함과 허위 정보를 발생하지 않고 결함 검출에는 이상이 없음을 보여주고 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 진동 신호용 모델 기반 결함 검출 시스템을 설계하였다. 제안한 시스템은 플랜트에서 진동 신호 데이터를 수집하고, 수집한 데이터의 신호 처리를 통하여 스펙트럼 크기의 평균을 이용한 모델을 설계하였으며 정상 상태의 데이터만을 고려하였다. 무결함 상태의 표준 모델값과 측정된 데이터의 스펙트럼 크기를 이용하여 잔여차를 생성한 뒤 잔여차의 RMS값과 진동 스펙트럼 RMS값의 비율로 결함 지시기를 설계하였다. 결함 지시기의 값을 임계치와 비교하여 결함의 존재 여부를 경고 시스템에 전달하는 시스템을 개발하였다.

개발한 시스템을 이용하여 대형 유도 모터에서 발생한 에어 갭 편심과 회전자 바의 파손을 검출하는 실험을 실시했으며 시스템의 성능이 우수함을 확인하였다. 기존의 방법은 관찰자의 식별로만 가능했던 방법을 평균 모델과 임계치를 적용하여 보다 효율적으로 결함을 검출할 수 있음을 보여주었다. 또한 전기 신호용 결함 검출에 이용했던 모델 기반 결함 검출 방법을 진동 신호용 결함 검출 방법에 적용함으로써 결함 검출에 있어서 무인 자동화 시스템의 가능성을 확보하였다. 또한 본 논문에서 제안한 시스템은 대형 유도 모터뿐만 아니라, 소형 유도 모터에도 적용할 수 있고, 에어 갭 편심과 회전자 바의 파손 이외에 베어링 결함, 고정자 결함 등의 다양한 결함에도 적용할 수 있다.

참고문헌

[1] P. J. Tavner and J. Penman, *Condition monitoring of electrical machines*, Letchworth, UK: Research Studies Press, 1987.
 [2] P. Vas, *Parameter estimation, condition monitoring and diagnosis of electrical machines*, Clarendon Press, Oxford, 1993.
 [3] G. B. Kliman and J. Stein, "Induction motor fault detection via passive current monitoring," *International Conference in Electrical Machines*, Cambridge, MA, pp. 13-17, August, 1990.

[4] J. Penman, M. N. Dey and J. R. Smith, "A new approach to the protection of industrial drives," in *Conference Record of the 17th Annual IAS Meeting*, pp. 1226-1270, Piscataway, New Jersey: IEEE Press, September, 1982.
 [5] J. Sottile and J. L. Kohler, "An on-line method to detect incipient failure of turn insulation in random wound motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 8, no. 4, pp. 762-768, December, 1993.
 [6] G. B. Kliman, W. J. Premerlani, R. A. Koegl and D. Hoewler, "A new approach to on-line turn fault detection in AC motors," in *Proc. Of IEEE-IAS Annual Meeting*, pp. 687-693, San Diego, California, October, 1996.
 [7] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran and R. G. Bartheld, "Motor bearing damage detection using stator current monitoring," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 6, pp. 1274-1279, November/December, 1995.
 [8] M. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 984-993, October, 2000.
 [9] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni and P. Vas, "Recent development of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 994-1004, October, 2000.
 [10] Y. Zhang, J. Jiang, M. Flatley and B. Hill, "Condition monitoring and fault detection of a compressor using signal processing techniques," *Proceedings of the American Control Conference*, Arlington, VA June, 2001.
 [11] R. Barron, *Engineering condition monitoring*, Longman, Essex, England, 1996.
 [12] J. Courrech, Condition monitoring of machinery, in C. M. Harris, editor, *Shock and Vibration Handbook (4th Ed.)*, pp. 16.1-16.26, McGraw-Hill, 1996.
 [13] A. Dimarogonas, *Vibration for Engineers (2nd)*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
 [14] R. Du, M. A. Elbestawi and S. M. Wu, "Automated monitoring of manufacturing processes, part 1: Monitoring methods; part 2: Applications", *Journal of Engineering for Industry*, 117:121-141, 1995.
 [15] S. Edwards, A. W. Lees and M. I. Friswell, "Fault diagnosis of rotating machinery," *The Shock and Vibration Digest*, 30(1): 4-13, 1998
 [16] K. S. Kim and A. G. Parlos, "Sensorless fault diagnosis of induction motors", *PhD Paper of Nuclear Engineering Texas A&M University*, May, 2001.
 [17] K. S. Kim and A. G. Parlos, "Induction motor fault diagnosis based on neuropredictors and wavelet signal processing", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 7, no. 2, June, 2002.
 [18] A. G. Parlos, K. S. Kim and R. Bharadwaj, "Detection of induction motor faults-combining signal-based and model-based techniques", *Proceedings of the American Control Conference*, Anchorage, AK, May 8-10, 2002.
 [19] P. F. Albrecht, J. C. Appiarius, R. M. McCoy, E. L. Owen, and D. K. Sharma, "Assessment of the reliability of motors in utility applications - updated," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. EC-1, no. 1, pp. 39-46, March, 1986.
 [20] IAS Motor Reliability Working Group, "Report of large motor

- reliability survey of industrial and commercial installations, part I," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IV-21, no. 4, pp. 853-864, July, 1985.
- [21] 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 Transactions and Power Systems*, vol. 20, no. 5, pp. 873-879, December, 1988.
- [22] J. R. Cameron, W. T. Thomson and A. B. Dow, "On-line current monitoring of induction motors - A method for calculating the level of air-gap eccentricity," in *IEE 3rd International Conference on Electric Machines and Drivers*, pp. 173-177, IEE Publication no. 282, November, 1987.
- [23] P. Torasso and L. Console, *Diagnostic Problem Solving*, Oxford, UK: North Oxford Academic, 1989.
- [24] L. F. Pau, "Survey of expert systems for fault detection, test generation, and maintenance," *Expert Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 100-111, April, 1986.
- [25] K. A. Loparo, N. Afshari and M. M. Abdel, "Fault detection and diagnosis in rotating machinery," in *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. On Systems, Man and Cybernetics*, pp. 2986-2991, San Diego, CA, 1998.
- [26] R. G. Smiley, "Rotating machinery: Monitoring and fault diagnosis," *Sound and Vibration*, pp. 26-28, Sept. 1983.
- [27] P. M. Frank, "Robust model-based fault detection in dynamic systems," in *On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries*. P. S. Dhurjati and G. Stephanopoulos, Ed., Oxford, UK: Pergamon Press, 1993, vol. 1, pp. 1-13.
- [28] Y. M. Zhang and J. Jiang, "Design of integrated fault detection, diagnosis and reconfigurable control systems," in *Proceeding of the 38th IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 3587-3592, Phoenix, AZ, Dec. 7-10, 1999.



임 호 순

2000년 전북대학교 제어계측공학과 졸업. 2000년~2003.08 전북대학교 대학원 제어계측공학과 석사졸업. 현재 한국전력 전력연구원 신기술 센터 근무. 관심 분야는 모터제어, 비선형제어.



정 길 도

1960년 7월 24일생. 1984년 미국 오레곤 주립대학 기계공학(공학사), 1986년 미국 조지아공대 기계공학(공학석사). 1993년 미국 텍사스 A&M대학 기계공학과(공학박사). 1993년 ~1995년 영남대학교 기계공학과 전임강사. 1995년~현재 전북대학교 전자정보공학부 부교수. 관심분야는 시스템규명, 멀티미디어전송, 시간지연 시스템제어, 컴퓨터 네트워크 모델링.



A.G. Parlos received the B.S. degree in Nuclear Engineering from Texas A&M University in 1983, the S.M. Degree in Nuclear Engineering and the S.M. degree in Mechanical Engineering from MIT in 1985 and the Sc.D. degree in Automatic Control and System Engineering, also from MIT. In 1986. Dr. Parlos is currently a Professor of

Mechanical Engineering at Texas A&M University. His research interests are multimedia streaming, fault detection and automatic control.