

## 유도전동기 온라인 감시진단 시스템 개발

(Development of Online Monitoring System for Induction Motors)

김기범\* · 윤영우 · 황돈하 · 선종호 · 정태욱\*\*

(Ki-Bum Kim · Young-Woo Youn · Don-Ha Hwang · Jong-Ho Sun · Tea-Uk Jung)

### Abstract

This paper presents an on-line diagnosis system for identifying health and faulted conditions in squirrel-cage induction motors using stator current, temperature, and partial discharge signals. The proposed diagnosis system can diagnose induction motor faults such as broken rotor bars, air-gap eccentricities, stator winding insulations, and bearing faults. Experimental results obtained from induction motors show that the proposed system is capable of detecting induction motor faults.

Key Words : Induction Motor, Fault Diagnosis, Current, Vibration, Partial Discharge

### 1. 서 론

유도전동기는 산업 전반에서 핵심적인 동력원으로 자리 잡고 있다. 전동기는 오랜 사용과 운전조건에 따라 베어링이 파손되기도 하고, 마모로 인한 동적 및 정적 편심, 회전자 바의 손상, 권선의 절연열화로 인한 단락현상 등 다양한 결함을 일으키게 된다. 이를 적시에 발견하지 못하고 방치할 경우 유도전동기뿐만 아니라 구동되는 핵심 설비의 고장을 발생시키게 된다.

\* 주저자 : 경남대학교 전기공학과 석사과정  
\*\* 교신저자 : 경남대학교 전기공학과 부교수  
\* Main author : Master's course, Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University  
\*\* Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University  
Tel : 054-280-1545, Fax : 055-280-1490  
E-mail : foru37v@keri.re.kr  
접수일자 : 2013년 11월 19일  
1차심사 : 2013년 11월 26일  
심사완료 : 2014년 3월 14일

이는 주요 사용처인 생산현장의 시스템에 악영향을 미쳐 경제적 손실과 시스템의 복구를 위한 추가 인력 및 시간 손실을 초래하고, 심할 경우 인적피해도 가져올 수 있다. 따라서 유도전동기의 조기 감시 및 진단은 매우 중요한 문제라 할 수 있다.

최근에 유도전동기의 회전자와 고정자의 전류 및 진동 신호 분석, 고정자 권선의 부분방전(Partial Discharge : PD) 측정 등을 통하여 고장검출을 위한 다양한 방법들이 연구되고 있다[1-8]. 그러나 이러한 방법들은 각각 따로 실시하여 전동기에서 발생할 수 있는 복합결함들을 종합적으로 진단할 수 없으며, 유도전동기의 이상상태에 대한 결함의 정도를 구분할 수 없어 정확한 진단이 어려운 문제점이 있다.

본 논문에서는 유도전동기의 전류, 진동, 온도, 부분방전 신호를 동시에 측정하여 전동기에서 발생하는 대부분의 결함들을 종합적으로 진단할 수 있는 온라인 감시진단 시스템을 제안한다.

## 2. 온라인 감시진단 시스템 개발

### 2.1 전동기 진단 알고리즘

유도전동기는 전기적, 기계적 결함 발생 시 특정주파수에서 이상신호가 나타나게 되며 이 이상신호를 검출하여 결함을 진단할 수 있다.

그림 1은 특정 주파수에서의 이상신호를 추출하여 전동기 진단을 위해 제안한 알고리즘의 흐름도이다. 전류 1상과 진동, 부분방전 3상, 온도 신호를 종합적으로 분석하여 유도전동기를 진단한다. 전류와 진동신호 각각을 이용한 슬립 및 회전주파수 계산을 통해 시간 및 주파수 영역의 각 결함별 진단 파라미터를 계산한다. 온도는 연속적인 온도 값의 경향을 분석하며, 3상 부분방전 신호는 MPM(Maximum PD Magnitude) 및 POE(PD Occurrence Energy)를 계산한 후 경향 분석을 통해 전동기의 결함을 판단한다. 구체적으로 전류 신호는 회전자 바 결함과 편심결함, 진동신호는 베어링 결함, 부분방전 신호는 고정자 권선의 절연진단 파라미터 계산에 이용하였다[6, 10-13].

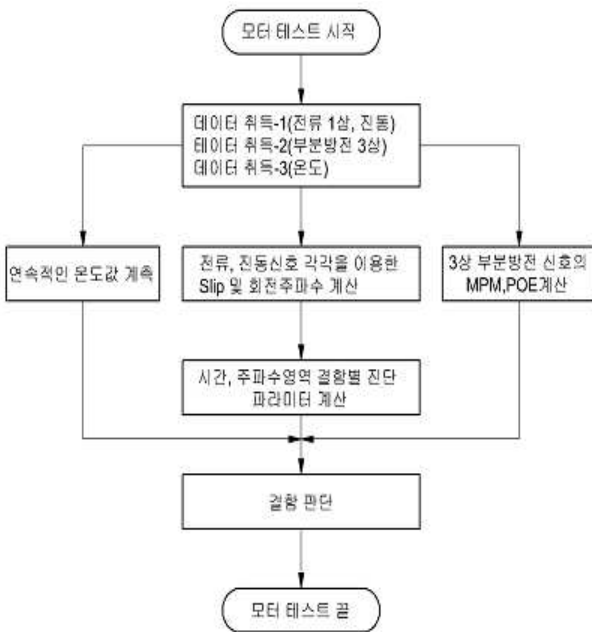


그림 1. 유도전동기의 진단 알고리즘 흐름도  
Fig. 1. Flow chart of diagnosis algorithm

### 2.2 시스템 설계 및 제작

유도전동기 온라인 감시진단 시스템은 그림 2에 나타난 것과 같이 고정자 전류, 진동, 온도 총 3개 채널을 측정하는 Analog Board #1, PD 센서로부터 입력신호를 받아 측정하는 Analog Board #2, 그리고 입력된 신호를 디지털 신호로 변환하고 진단 알고리즘을 연산하여 결함의 유무를 판단하는 Main Board로 구성하였다.

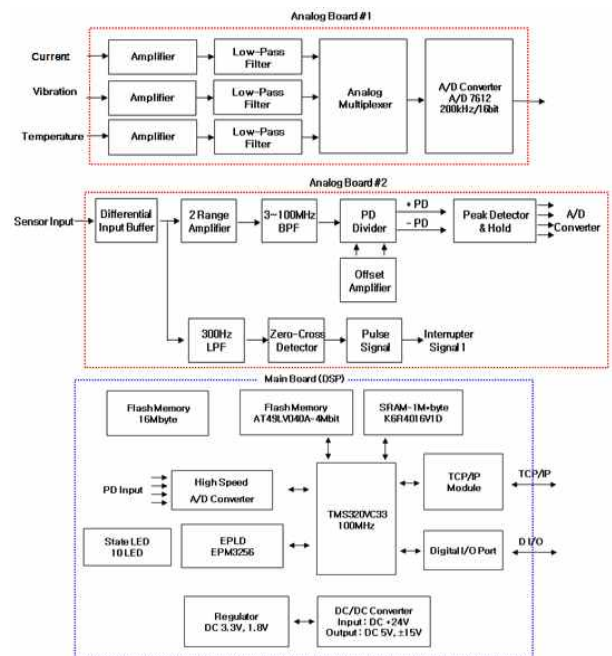


그림 2. 유도전동기 감시진단 시스템의 블록도  
Fig. 2. Block diagram of a diagnosis system for induction motor

그림 3, 4는 감시진단 모니터링 프로그램 화면과 시스템의 외관을 보여준다. 메인화면에는 전동기의 용량, 극수, 정격 회전수, 회전자 슬롯 수 등의 기본정보의 입력란이 있으며, 시스템에서 측정된 데이터를 알고리즘에 의거하여 결함이 판단되면 각 결함에 대해 프로그램 상에서 적색 표시로 전동기 사진에 도식화함으로써 사용자가 모터의 결함 부위를 쉽게 인지하여 전동기의 상태를 확인, 부품의 교체나 보수시기를 계획할 수 있게 하였다.

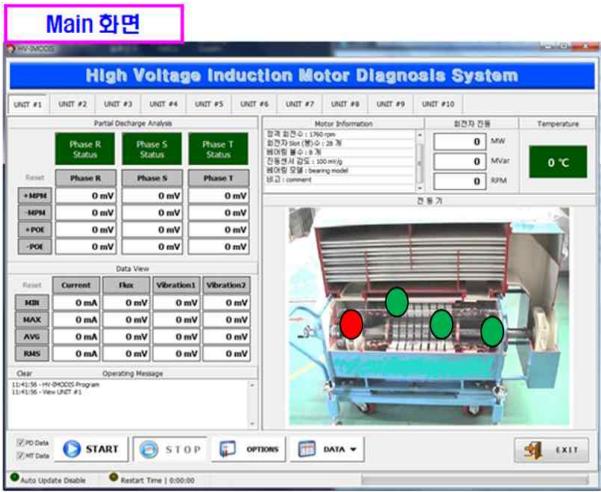


그림 3. 유도전동기 감시진단 프로그램  
Fig. 3. A diagnosis Monitoring Program for Induction Motor



그림 4. 유도전동기 감시진단 시스템  
Fig. 4. A diagnosis system for induction motor

### 2.3 고장모의 시뮬레이터 구성

진단 시스템의 성능을 검증하기 위하여 그림 5와 같이 고장모의 시뮬레이터를 구성하였다. 시험용 유도전동기와 부하용 유도전동기의 제원은 표 1과 같고, 두 전동기는 기계적으로 커플링 하였으며 부하실험은 부하용 유도전동기를 이용하여 테스트용 유도전동기에 역방향 토크를 가하여 수행하였다.

전류와 진동신호의 측정에는 DAS(Data Acquisition System)와 진단 시스템을 통해 200kS/s의 분해능으로 20.1초 동안 측정하였다. 부분방전 신호는 PRPDA (Phase Resolved Partial Discharge Analysis)를 위해 진단 시스템으로 3~100MHz 대역의 Band-Pass Filter를 통과한 후 4중의 고속 Peak Detector & Hold 회로에서 60Hz 한주기 동안의 Peak 신호만을 A/D

샘플링하여 계측하였고 120주기를 누적하여 표현하였다.

표 1. 전동기 제원

Table 1. Characteristics of motors

	Test Motor	Load Motor
Power	75kW	75kW
Voltage	3,300V	380V
Current	16.8A	139.4A
Frequency	60Hz	60Hz
Number of Pole	4	4
Rated Speed	1,778rpm	1,780rpm

표 2. DAS 제원

Table 2. Characteristics of DAS

	Synergy 고속 데이터 레코더
Sampling speed	2MS/s
Chanel Number	16
Streaming speed	200kS/s
Coupling impedance	1MΩ

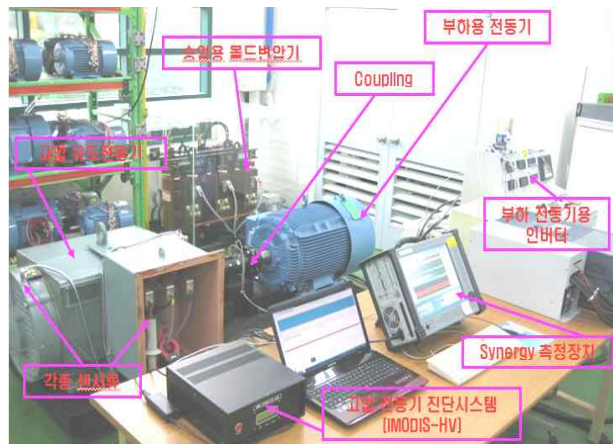


그림 5. 유도전동기 고장모의 시뮬레이터 구성

Fig. 5. Configuration of faulted simulator for induction motor

부분방전 신호 측정에 사용된 센서는 그림 6과 같은 세라믹 센서를 사용하였다. 이 센서는 부분방전 신

호를 측정하기 위해 세라믹이 직렬 결합되어 있으며 높은 전압에 견디기 위해 에폭시로 몰딩하였다[9]. 부분방전 센서의 정전용량은 110pF이고 세라믹을 2단으로 결합한 것을 사용하였으며, 전원인가부에 설치되어 신호증폭 회로를 거쳐 진단 시스템에 연결되도록 하였다.

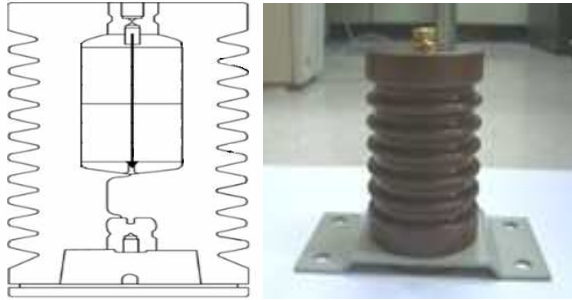


그림 6. 부분방전 신호 측정용 세라믹 센서  
Fig. 6. Ceramic sensor for measuring PD signals

유도전동기의 결함은 그림 7과 같이 모의하였다. 정적편심은 전동기 커버의 브라켓을 중심축에서 편심울 만큼 이동시켜 가공하였으며, 동적편심은 회전자의 엔드링에 홈을 내어 무게추를 달아서 회전자의 관성 모멘트가 중심축을 기준으로 대칭이 되지 않도록 고장 상태를 모의하였다. 회전자 바 단락은 가장 결함 빈도가 높은 엔드링과 회전자 바 연결부분을 끊어내어 제작하였으며, 베어링의 경우는 외경과 내경에 각각 결함을 모의하였다.



그림 7. 유도전동기의 고장모의  
Fig. 7. Faulted condition of induction motor

## 2.4. 실험결과

진단 시스템 및 알고리즘의 성능검증은 상용 DAS

로 측정된 신호의 주파수 영역 파형 비교와 특정 결함 발생 시 이상신호 추출 및 부분방전 신호 측정을 통하여 수행하였다.

특정 결함별 이상신호는 다음과 같이 특정 주파수에서의 신호 발생 유무 및 크기 증가를 통해 확인하였다. 식 (1)~(4)는 각각 고정자 턴 단락, 회전자 바 단락, 편심, 베어링 결함일 경우의 이상신호 발생 주파수를 나타낸다[10-13].

$$f_{rotorbar} = (1 \pm 2k_2s)f_0 \quad (1)$$

$$f_{eccn} = \left[ (Z \pm n_d) \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right] f_0 \quad (2)$$

$$f_{Bearing-I} = \frac{N}{2} f_r \left( 1 + \frac{RD}{PD} \cos\beta \right) \quad (3)$$

$$f_{Bearing-O} = \frac{N}{2} f_r \left( 1 - \frac{RD}{PD} \cos\beta \right) \quad (4)$$

여기서  $f_{rotorbar}$  는 회전자 바 결함 주파수,  $f_{eccn}$  는 공극편심에 의한 결함 주파수,  $f_{Bearing-I}$  및  $f_{Bearing-O}$  는 각각 베어링 외륜 및 내륜의 결함 주파수를 나타낸다. 또한  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $p$  는 극 쌍수,  $s$  는 슬립,  $f_0$  는 전원 인가 주파수,  $k = 1, 3, 5, \dots$ ,  $k_2 = 1, 2, 3, \dots$ ,  $Z$  는 회전자 slot 수,  $n_d = \pm 1$  는 편심 오더 정수,  $n_{ws} = 1, 3, 5, \dots$ ,  $N$  는 Bearing rolling element 수,  $f_r$  는 회전 주파수,  $RD$  는 Rolling element 직경,  $PD$  는 피치 직경,  $\beta$  는 크랙의 접촉각을 나타낸다.

그림 8~10은 각각 회전자 바 단락, 공극편심, 베어링 결함 전동기와 정상상태 전동기의 각 결함주파수 부근의 주파수 특성을 보여준다. 회전자 바 단락, 공극편심은 전류신호를 이용하여 분석하였으며, 베어링 결함은 진동신호를 이용하여 분석하였다. 신호의 크기는 주파수 영역 분석 시 사용되는 PSD(Power Spectrum Density)로 나타내었다.

그림 8은 슬립이 약 0.0091일 때의 정상과 회전자 바 단락 결함 전동기의 전류신호 분석결과를 보여준다. 회전자 바 결함의 경우에 결함신호는 전원 주파수의 양쪽에 나타난다. 그림에서 볼 수 있듯이 전원 주파수 (60Hz) 주변으로  $k_2 = 1$  일 때 식 (1)을 이용하여 계산



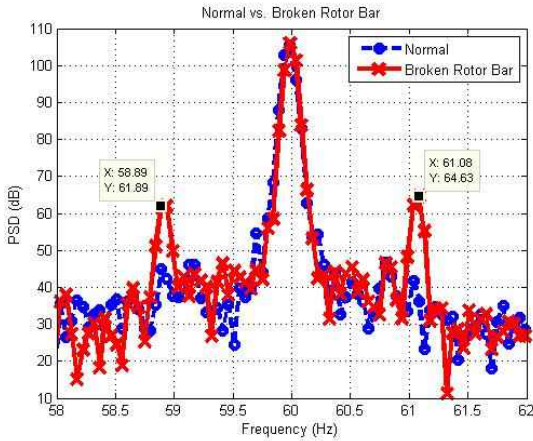


그림 8. 회전자 바 단락시의 주파수 분석  
Fig. 8. Frequency analysis of Broken Rotor Bar

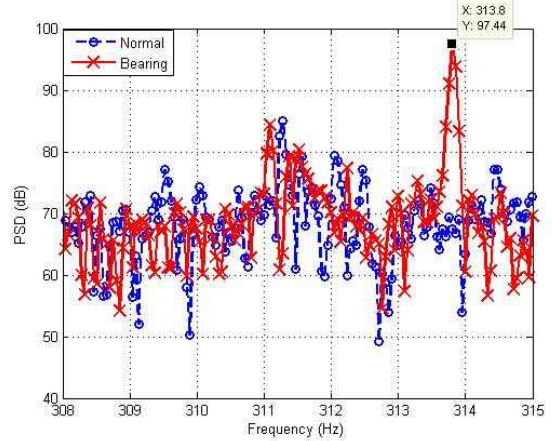


그림 10. 베어링 결함일 때의 주파수 분석  
Fig. 10. Frequency analysis of Bearing Fault

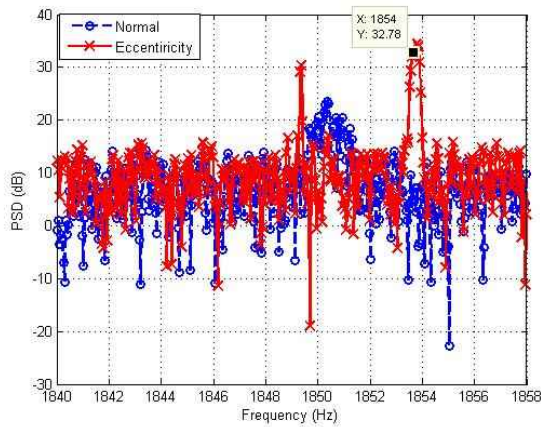


그림 9. 공극 편심일 때의 주파수 분석  
Fig. 9. Frequency analysis of Rotor Eccentricity

된 결함 주파수인 약 58.91Hz와 61.09Hz에서 정상상태에서는 미약했던 신호가 회전자 바 단락 결함 상태에서 확연히 나타남을 알 수 있다.

공극편심일 때에는 식 (2)에서 구해진 결함 주파수의 배수성분에서 이상신호가 나타난다. 공극편심과 정상상태 전동기의 진동신호 분석결과는 그림 9와 같다. 두 상태의 전동기 모두 슬립이 약 0.0043인 상태에서 운전중인 전류신호를 측정하였으며, 그림에서 볼 수 있듯이  $Z=47$ ,  $n_d=1$ ,  $n_{ws}=7$ 일 때의 결함 주파수인 약 1853.82Hz에서 정상상태에서는 미약했던 신호가

공극편심 상태에서는 확연히 나타남을 알 수 있다. 베어링 결함의 경우 내륜 결함과 외륜 결함으로 크게 나뉘는데 결함 주파수는 식 (3)과 식 (4)에서 구해진 주파수의 배수로 나타난다. 그림 10은 베어링 외륜 결함과 정상상태 전동기의 진동신호 분석결과를 보여 준다. 두 전동기 모두 약간의 슬립만 존재하는 무부하 상태로 운전할 때의 진동신호를 측정하였다. 식 (4)를 이용하여  $N=13$ ,  $RD=28\text{mm}$ ,  $PD=145\text{mm}$ 일 때의

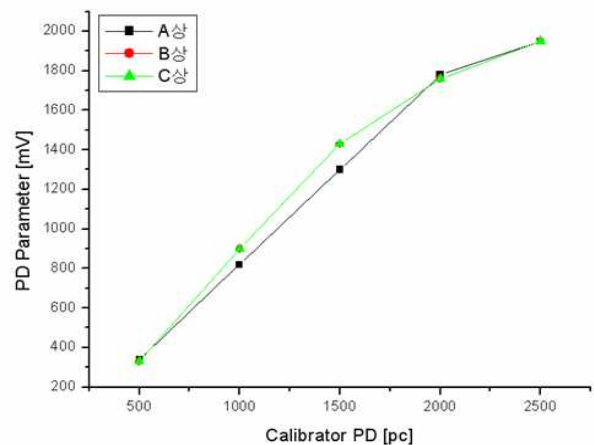


그림 11. 진단 시스템의 부분방전 신호 선형성 검증  
Fig. 11. Verification of the linearity of the system for measuring PD signals

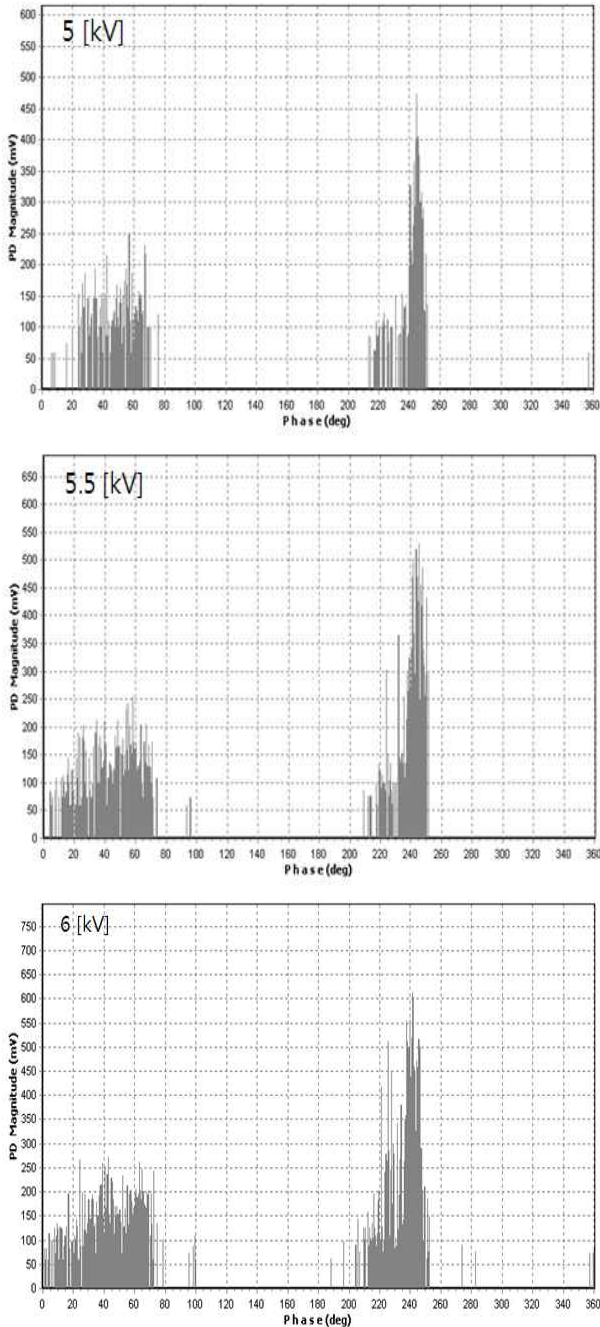


그림 12. 부분방전 패턴 분석  
 Fig. 12. Analysis of partial discharge pattern

$2 \times f_{\text{bearing-}O}$  약 314.69Hz 부근에서 정상상태에서는 미약하였던 신호가 베어링 외륜 결함상태 전동기에서는 이상신호가 나타남을 알 수 있다.

유도전동기 고정자 권선에 대한 절연진단 기법을 검증하기 위해서 PD Calibrator를 이용한 선형성 검증과 실제 전압 인가를 통한 부분방전 패턴분석을 수행하였다. Calibrator를 이용한 실험은 500pC부터 1000, 1500, 2000, 2500pC로 모의 부분방전 신호의 크기를 증가시키면서 진행하였으며, 그림 11과 같이 선형성이 유지됨을 알 수 있다.

부분방전 신호의 패턴은 실제 전압을 인가하여 확인하였다. 전압은 5, 6kV를 전동기 고정자 권선에 인가하였으며, 그림 12는 측정된 부분방전 신호의 PRPDA를 보여준다. 그림 12에서 볼 수 있듯이 진단 시스템으로 측정된 부분방전이 전동기의 전형적인 부분방전 패턴을 보임을 확인할 수 있다.

## 2.5 전동기 결함판단

유도전동기의 결함판단을 위해 온도는 순시확인을 통하여 경향을 분석하며, 임계치보다 높을 시 결함으로 판단한다. 세라믹 센서로부터 획득한 부분방전의 신호는 MPM(Maximum PD Magnitude) 및 POE(PD Occurrence Energy)를 계산한 후 그 경향이 기준치 이상이면 결함으로 판단한다.

전류 및 진동 신호를 이용한 결함 판단은 각 결함 진단 파라미터와 미리 설정된 임계값의 비교를 통해 결정한다. 먼저 진단 파라미터의 계산은 결함이 발생할 때 주변신호에 비해 높게 나타나는 이상신호를 이용하여 판단한다. 센서를 통해 실시간으로 측정된 신호를 이용하여 유도전동기의 슬립, 회전주파수와 각 결함 주파수를 계산한 후 계산된 각각의 결함 주파수에 대해 N개의 구간을 취하는 윈도우잉을 실시한다. 윈도우 내의 K개의 피크 값을 추출하여 K개의 피크 중 최대 피크 값과 이를 제외한 나머지 피크 값의 평균을 내어 그 차이를 계산한다. 임계값의 설정은 실험결과를 통해 선정하였다. 그림 13은 유도전동기의 정상상태와 베어링 외륜 결함상태를 진단 시스템으로 10회 측정된 베어링 외륜 결함의 임계값 설정방법을 보여준다. 이러한 방법으로 각 결함마다 임계값을 결정하였다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2013년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

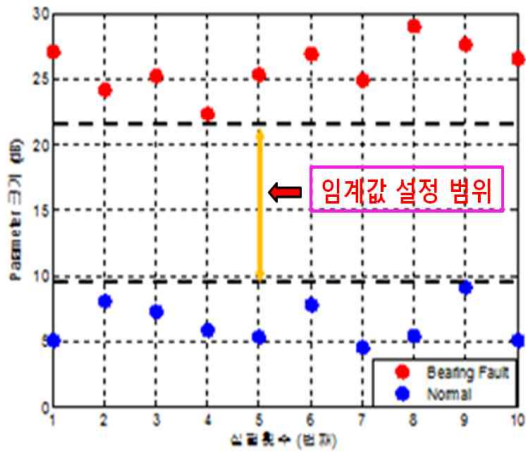


그림 13. 베어링 결함일 때 결함판단을 위한 임계값 설정  
Fig. 13. Set the threshold for detecting Bearing fault

### 3. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 회전자 및 고정자 결함을 운전중에 종합적으로 검출할 수 있는 온라인 감시진단 시스템을 제안하였다. 운전중인 전동기의 고정자 전류, 진동 및 부분방전 신호를 측정하여 회전자 바 단락, 편심, 베어링 결함, 고정자 권선 절연 열화를 감시진단 할 수 있음을 실험을 통하여 검증하였다. 또한 부하율을 반영함으로써 가동 중인 전동기의 부하에 상관없이 진단할 수 있으며, 산업현장에서 사용하기 편리하게 프로그램을 제작하였다. 제안한 시스템은 운전중인 전동기를 정지시키지 않고 진단할 수 있으므로 운전정지에 따른 경제적인 손실을 최소화할 수 있으며, 진단 시스템으로부터 통신을 통해 실시간으로 감시진단이 가능하기 때문에 사용자가 전동기의 결함을 사전에 예측, 정비를 수행하고, 부품의 교체시점을 적절하게 결정함으로써 정비비용 절감 효과도 기대된다.

본 논문에서 제안한 유도전동기 온라인 감시진단 시스템을 전동기의 사용처가 많은 다양한 산업현장에 적용함으로써 전동기와 관련 설비의 운전 신뢰성 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

### References

- [1] S. Nandi et al, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors - A Review", IEEE Trans. on Energy Conversion, 12. 2005, Vol. 20, No. 4, pp. 719-729.
- [2] G.C. Stone, et al., "Electrical Insulation for Rotating Machines", IEEE Press, Wiley, 2004.
- [3] Y.W. Youn, et al., "A Diagnosis Algorithm for Low Voltage Induction Motor Using Stator Current and Vibration", Conference Proceedings of CMD 2010.
- [4] Z. Ye and B. Wu, "A review on induction motor online fault diagnosis." in Proc. Int. Conf. IEEE-PIEMC, 8. 2000, vol. 3, pp. 1353-1358.
- [5] K. Kyusung and A. G. Parlos, "Induction motor fault diagnosis based on neuropredictors and wavelet signal processing," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 6. 2002, vol. 7, no. 2, pp. 201-219.
- [6] Don-ha Hwang et al, "Development of On-Line Partial Discharge Measuring System for Insulation Diagnosis of High-Voltage Motor Stator Windings", Conference Proceedings of The Korean institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 5. 2006, pp. 481-486.
- [7] D.H. Hwang, et al., "Robust Diagnosis Algorithm for Identifying Broken Rotor Bar Faults in Induction Motors", J Electr Eng Technol, 1. 2014, Vol. 9, No. 1, pp. 37-44.
- [8] D.H. Hwang, et al., "Detection of Air-gap Eccentricity and Broken-rotor Bar Conditions in a Squirrel-cage Induction Motor using the Radial Flux Sensor", AIP(American Institute of Physics), Journal of Applied Physics, 4. 2008, Vol. 103, No. 7, Part 3, pp. 07F131-1~3.
- [9] Jong-Ho Sun, et al., "Considerations on the Long-term Reliability of On-line Partial Discharge Ceramic Sensor for Thermal Power Generators and its Demonstration in the Field" Journal of Electrical Engineering & Technology, 1. 2012, Vol. 7 No. 1, pp. 103-108.
- [10] M. E. H. Benbouzid, M. Vieira, and C. Theys, "Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques," IEEE Trans. Power Electron., 1. 1999, vol. 14, no. 1, pp. 14-22.
- [11] M. El Hachemi Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," IEEE Trans. Ind. Electron., 10. 2000, vol. 47, no. 5, pp. 984-993.
- [12] W. T. Thomas and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults." IEEE Ind. Appl. Mag., 7/8. 2001, vol. 7, no. 4, pp 26-34.
- [13] R. L. Schiltz, "Forcing frequency identification of rolling element bearings." Sound and Vibration, 6. 1990, 24.5 : pp. 16-19.

◇ 저자소개 ◇



**김기범**(金起範)

1987년 7월 11일생. 2013년 경남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 재학(석사). 한국전기연구원 HVDC본부 전력기기센터 위촉연구원.



**윤영우**(尹永祐)

1983년 7월 9일생. 2005년 한국정보통신대 공학부 졸업. 2007년 동 대학원 정보통신공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 HVDC본부 전력기기연구센터 선임연구원.



**황돈하**(黃敦夏)

1969년 2월 10일생. 1991년 영남대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 HVDC본부 전력기기연구센터 책임연구원.



**신중호**(宣鍾好)

1962년 10월 10일생. 1986년 부산대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 HVDC본부 전력기기연구센터 책임연구원.



**정태욱**(鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~2006년 LG전자 DAC연구소 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 경남대학교 전기공학과 부교수.