

# 오버샘플된 전류신호를 사용한 인버터 구동형 전동기의 베어링 고장검출 시스템

김남훈\*, 김민회\*\*, 최창호\*\*\*, 이상훈\*\*\*, 최경호\*\*\*\*  
\*청주대학교, \*\*영남이공대학, \*\*\*POSCON, \*\*\*\*경북전문대학

## High Precision Bearing Fault Detect System of Inverter Driven System Using Oversampled Current Signals

Namhun Kim\*, Minheui Kim\*\*, Changho Choi\*\*\*, Sanghoon Lee\*\*\*, Keynggho Choi\*\*\*\*  
\*Cheungjoo Univ., \*\*Yeungnam College of Sci. & Tech., \*\*\*POSCON, \*\*\*\*Keyngbook college,

### ABSTRACT

In this paper, the induction motor bearing fault diagnosis system using current signals which are measured by over-sampling method is presented. In the case of inverter fed motor drive unlike line-driven motor drive, that make a lot of noise which can cause a wrong fault signals because of PWM(pulse width modulation) voltage. So, the current signals for fault diagnosis need very precise and high resolution information, which means this system demand additional hardware such as low pass filter, high resolution ADC system and so on to use fault diagnosis system. Therefore, the proposed over-sampling method is expected to contribute to low cost fault diagnosis system even though previous inverter fed motor drive without any additional hardware.

In order to confirm the presented algorithms, various experiments for bearing faults are tested and the line current spectrum of each faulty situation using park transformation is compared with a FFT results.

Keywords : fault diagnosis, low-cost, current, bearing fault, inverter driven system

### 1. 서 론

최근, 수 십년 동안 인버터 구동형 전동기에 주목할 만한 발전이 있었고, 이로 인해 전동기에는 스위칭 소자의 온, 오프 전압으로 인한 심각한 전압 스트레스를 초래하였다. 결과적으로 높은 스위칭 전압으로 인한 스트레스는 전동기의 수명을 짧게 하였고, 예상치 못한 고장이라든지 여러 가지 문제점들을 발생시키고 있다. 따라서 전동기로 인한 시스템의 예상치 못한 고장을 방지하기 위해서 상태 진단(condition monitoring) 기술이나 초기고장 검출 기술이 중요한 기술 중에 하나로 부각되고 있다. 일부 산업현장에서는 인버터 구동형 전동기 시스템의 고장을 방지하기 위해서 주기적으로 많은 비용이 요구되는 보수를 하고 있는 실정이며 이러한 정기적인 보수 비용의 절감과 고장진단을 위해서 지속적으로 인버터 구동형 전동기에 대한 진단기술이 연구되고 있다.

전동기 진단기술에는 가속센서를 사용해서 진동을 분석하는

기술, 서치 코일을 이용한 공극자속을 측정하는 방법, 전동기의 온도를 분석하는 방법등 여러 가지 방법들이 있다<sup>[1-4]</sup>. 그러나 이러한 방법들은 추가적인 센서들과 기기(instruments)들을 요구하고 있으며, 기계적인 설치, 그리고 신호들의 송수신들을 고려하여야 하고, 결과적으로 진단 시스템의 가격 상승을 초래하게 된다. 따라서 최근 많이 연구되고 있는 전동기 진단기술들로는 Expert system, ANN(Artificial neural network), 퍼지(fuzzy) 시스템, ANFIS(Adaptive neuron-fuzzy inference system), 그리고 GA(genetic algorithm)등이 있다<sup>[5,6]</sup>. 그러나 이러한 진단 기술 역시 전동기의 정상상태 특성과 고장상태 특성을 추출하기 위해서는 시뮬레이션이나 실험에 의한 학습이 필수적이며, 복잡한 계산 과정을 요구한다.

하지만 산업현장에서는 간단한 알고리즘을 가지면서 큰 비용을 요구하지 않는 진단 기술에 대해서 지속적인 관심을 가지고 있다. 더욱이 실질적인 관점에서, 진단을 위해 전동기의 전류 신호를 분석하는 방법은 매우 유용하다. 왜냐하면 인버터 구동형 전동기에서는 시스템 제어와 보호 차원에서 전동기의 전류를 측정하고 있기 때문에, 추가적인 비용과 하드웨어의 설치가 필요없다.

지금까지는 전동기의 전류신호를 이용한 전동기 고장 검출 방법은 제한적으로 라인드라이브 전동기에 대해서 연구가 이루어지고 있으며, 인버터 구동형 전동기에 대해서는 스위칭 소자의 노이즈와 제어기 대역폭(Bandwidth)으로 인해서 전류 신호를 분석하는데 있어서 더 많은 연구가 필요하고<sup>[8]</sup>, 따라서 전류를 측정하는데 있어서 충분한 분해능을 가지는 ADC(analog to digital converter)를 사용해야 한다.

전동기의 베어링 고장은 전동기 전체 고장의 40%정도로 보고되고 있으며, 다른 고장에 비해서 신호가 미세하기 때문에 많은 어려움이 있는 것이 사실이다. 따라서 본 논문에서는 전동기의 베어링 고장을 검출하는데 있어서 전동기 전류를 사용하고, 전류를 측정하기 위해서 12bit on-chip ADC를 사용하였다. 전류 신호로부터 베어링 고장을 추출하기 위해서 간단한 좌표변환 이론을 제시하였으며, 전류 신호의 분해능을 높이기 위해서 오버샘플링 방법을 사용하였다. 제안된 베어링 고장 검출 방법을 검증하기 위해서 2.2[kW]유도전동기와 TMS320F2812 DSP를 사용하였다.

### 2. 베어링 고장

베어링 고장의 원인으로는 윤활 부족, 오염 등의 이유가 있으며, 또한 베어링의 비정렬, 전기적인 부식, 부정확한 설치 등

과 같은 이상적이지 못한 환경으로 인해서 고장이 시작된다.

산업현장에서 구동되는 대부분의 회전기기는 비이상적인 조건에서 구동되고 있으며, 이러한 비이상적인 조건들은 처음에는 무시할 만한 고장에서 시작되어 점점 베어링의 inner race, outer race 그리고 rolling element에 심각한 고장을 만들게 되고, 이렇게 발생한 고장은 점점 청각적인 노이즈와 기계적인 진동을 발생하게 된다. 기본적으로 베어링 고장은 outer race, inner race, ball 그리고 cage 고장으로 분류할 수 있으며, 베어링의 고장으로 인한 기계적인 진동은 공극에서 회전자의 변위를 만들게 되고, 결과적으로 공극의 편심(eccentricity)을 초래하게 된다<sup>[2]</sup>.

기계적인 진동분석은 가장 많이 사용되고 있는 진단기술 중에 하나이고, 진동과 전류와의 관계는 여러 연구자들에 의해서 이루어져 왔다<sup>[7][8]</sup>. 기계적인 진동은 회전자 전류에서 일정한 성분의 주파수로 나타낼 수 있으며 아래와 같은 수식으로 주어진다.

$$f_{bn} = f_s \pm m f_{fault} \quad (1)$$

여기서  $f_s$ 는 고정자에 공급되는 전원 주파수이고,  $m$ 은 상수(1, 2, 3, ...)이고  $f_{fault}$ 는 베어링 고장에 의해서 야기되는 특정진동 주파수이다.

각각의 고장은 고장 특성에 따라서 특정한 고장 주파수성분을 가지고 있으며, 일반적으로 베어링의 경우는 크게 cage 결함, inner race 결함, outer race 결함, ball 결함으로 구분하고, 이들은 베어링의 외형이나 회전자의 속도에 대한 함수로 표현할 수 있다<sup>[9]</sup>. 각각의 고장에 의한 진동 주파수는 아래와 다음과 같은 수식으로 쓸 수 있다<sup>[2]</sup>.

- Outer race 결함( $f_{od}$ ) :

$$f_{od} = \frac{n}{2} f \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \phi\right) \quad (2)$$

- Inner race 결함( $f_{id}$ )

$$f_{id} = \frac{n}{2} f \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \phi\right) \quad (3)$$

- Ball 결함( $f_{bd}$ )

$$f_{bd} = \frac{PD}{2BD} f \left(1 - \frac{BD^2}{PD^2} \cos^2 \phi\right) \quad (4)$$

- cage 결함( $f_{cd}$ )

$$f_{cd} = \frac{1}{2} f \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \phi\right) \quad (5)$$

여기서  $f_{rm}$ 은 회전자의 기계적인 속도,  $BD$ 는 ball 직경,  $PD$ 는 베어링의 pitch diameter,  $\phi$ 는 ball의 접촉각이다. 일반적으로 베어링의 수치에 대한 정보는 베어링 제조사로부터 쉽게 얻을 수 있다.

### 3. 오버 샘플링

베어링의 고장신호 성분을 추출하는데 있어서 충분한 분해능(resolution)을 가지는 전류신호를 측정하기 위해서 오버샘플링이론이 적용된다. 분해능을 증가시키기 위해서는 디지털 신호의 유효 비트수를 증가시켜야 하는데, 이것은 시스템의 필요한 샘플링 주파수보다 더 높게 ADC(analog to digital converter)의 샘플링 주파수를 설정하는 것을 의미한다. 각각의 추가적인 비트의 분해능을 가지기 위해서는 아래의 수식(6)이 적용되고 식(6) 같은 값으로 신호를 오버샘플해야 한다.

$$f_{os} = 4^w f_s \quad (6)$$

여기서  $f_{os}$ 는 오버샘플링 주파수,  $w$ 는 원하는 분해능의 추가적인 비트수,  $f_s$ 는 원래의 샘플링 주파수이다.

기존의 연구를 보면 베어링 고장으로 인해 발생하는 고주파 성분은 기본과 성분에 비해서  $-80[\text{dB}]$  정도의 신호에서 발생된다는 것을 알 수 있다. 아래의 수식은 베어링 고장을 검출하기 위한 필요한 유효비트수를 보여주고 있다.

$$-80[\text{dB}] = 20 \log I_s \quad (7)$$

$$I_s = 10^{-4}$$

여기서  $I_s$ 는 베어링 고장성분을 포함하는 전류신호이다. 표 1은 ADC의 비트에 따른 신호의 분해능을 보여주고 있다.

표 1 ADC의 dB와 분해능  
Table 1 The resolution and dB value of ADC

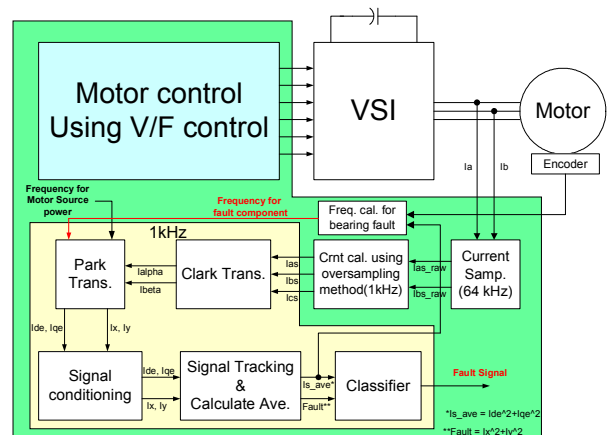
ADC	Resolution	dB
12 bit ADC	$2^{-11} = 4.88 \times 10^{-4}$	$-66.22[\text{dB}]$
13 bit ADC	$2^{-12} = 2.44 \times 10^{-4}$	$-72.24[\text{dB}]$
14 bit ADC	$2^{-13} = 1.22 \times 10^{-4}$	$-78.26[\text{dB}]$
15 bit ADC	$2^{-14} = 6.1 \times 10^{-5}$	$-84.29[\text{dB}]$
16 bit ADC	$2^{-15} = 3.05 \times 10^{-5}$	$-90.3[\text{dB}]$

수식(7)과 표1에 의하면 베어링 고장성분을 검출하기 위해서는 최소한 15bit ADC가 필요하다는 것을 보여주고 있다. 그러나 베어링 고장 진단을 위해 구성된 시스템은 12bit on-chip ADC를 사용하고 있으므로, 신호의 분해능을 높이는 작업이 필요하다. 분해능을 15bit로 소프트웨어적으로 높이기 위해서 전류신호의 샘플링 주기를 증가시켰으며, 샘플링 주파수는 아래의 수식(8)에 의해서 얻어진다.

$$f_{os} = 4^3 \times 1\text{kHz} = 64\text{kHz} \quad (8)$$

### 4. 시스템 구성 및 실험결과

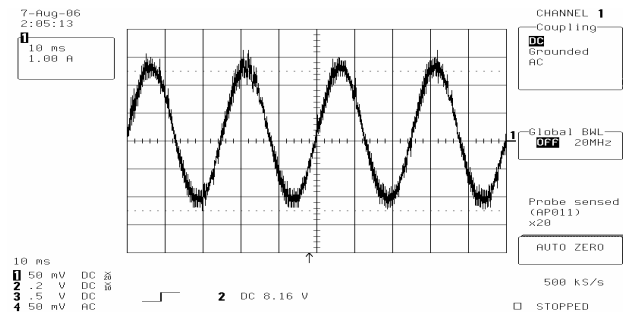
그림 1은 베어링 진단을 위한 전체 시스템을 보여주고 있다. 인버터와 고장진단 시스템을 위해서 TMS320F2812 DSP를 사용하였고, 12bit on-chip ADC를 이용하여 64kHz의 샘플링 타임으로 전류를 측정했으며, 특정성분을 측정하기 위해서 좌표 변환(park trans.)를 사용하였다.



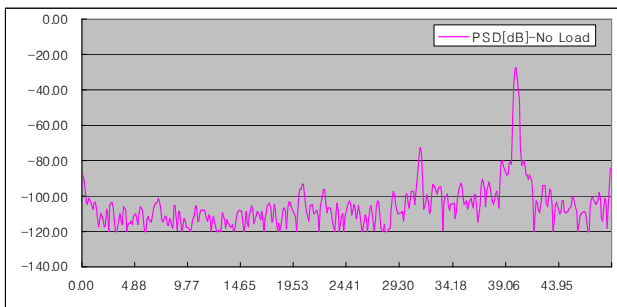
TMS320F2812 DSP board for fault diagnosis

그림 1 시스템 구성도  
Fig. 1 The system configuration

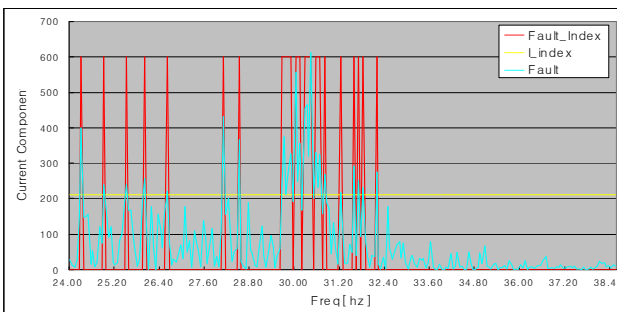
그림 2는 제안된 알고리즘을 사용한 베어링 고장진단 실험 결과를 보여주고 있다. (a)는 베어링 고장상태의 전류파형을 나타내고, (b)는 전류파형의 PSD결과를 나타내고 있고, (c)는 오버샘플링을 사용하지 않았을 경우의 전류 스펙트럼을 (d)는 오버샘플링을 사용한 경우의 전류 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림 2(b)에서 알 수 있듯이 29–30Hz영역에서 베어링 고장 주파수가 나타난다. 오버샘플링을 사용하지 않았을 경우는 신호의 분해능 때문에 다른 주파수 영역에서도 고장 신호를 발생하지만, 오버샘플링을 사용한 경우는 실험결과와 같이 고장 주파수 영역에서만 고장 신호를 발생하고 있다.



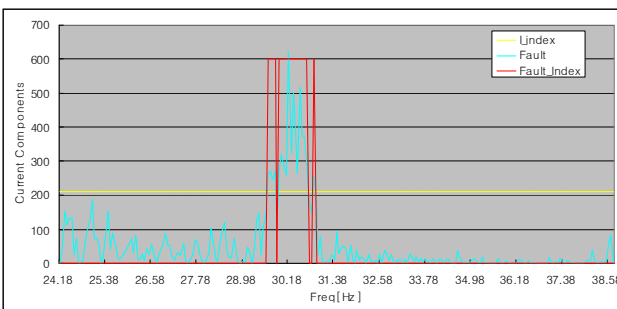
(a) Phase current waveform



(b) Current spectrum results of bearing defect motor



(c) Without over-sampling



(d) With over-sampling

그림 2. 제안된 알고리즘을 사용한 실험결과

Fig. 2. Results of the proposed diagnosis algorithm

## 5. 결론

본 논문에서는 전류 신호를 사용한 인버터 구동형 유도전동기의 베어링 고장 검출 방법에 대한 가능성에 대해서 조사하였다.

베어링 결함에 의해서 발생하는 유도 전동기 고장은 전류신호의 주파수 스펙트럼에서 특정 주파수 영역 신호를 발생지만, 이 전류 신호의 크기는 매우 작아서 12bit ADC를 이용하여 검출하는데 어려움이 따른다.

그러나 본 논문에서 제시된 방법과 같이 오버 샘플링 이론과 좌표 변환을 이용함으로써 베어링의 고장을 검출할 수 있었으며, 실험을 통하여서 제시된 방법의 타당성을 증명할 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] 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. 3, pp. 873–879, Dec. 1988.
- [2] R. Schoen, T. Habetler, F. Kamran, and R. Bartfield, "Motor bearing damage detection using stator current monitoring," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 6, pp. 1274–1279, Nov./Dec. 1995.
- [3] M.E.H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 47, no. 5, pp. 984–993, Oct. 2000.
- [4] S. Nandi, M. Bharadwaj, and H.A. Toliyat, "Performance Analysis of a Three-Phase Induction Motor Under Mixed Eccentricity Condition," IEEE Trans. Energy Conv., vol. 17, pp. 392–399, Sep. 2002.
- [5] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, "Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 47, no. 5, pp. 994–1004, Oct. 2000.
- [6] M. A. Awadallah and M. M. Morcos, "Application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drives—an overview," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 18, no. 2, pp. 245–251, Jun. 2003.
- [7] C.M. Riley, B.K. Lin, T.G. Habetler, and R.R. Schoen, "A method for sensorless on-line vibration monitoring of induction machines," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 34, no. 6, pp. 1240–5, Nov/Dec 1998.
- [8] C.M. Riley, B.K. Lin, T.G. Habetler, and G. B. Kliman, "Stator current harmonics and their causal vibration: a preliminary investigation of sensorless vibration monitoring applications," IEEE trans. on Industry Application, vol. 35, no. 1, pp. 94–9, Jan/Feb 1999.
- [9] L. Eren, "Bearing Damage Detection via Wavelet Package Decomposition of Stator Current," PhD Thesis, School of Electrical Engineering, University of Missouri–Columbia, 2002.