

팩스벡터 패턴을 이용한 회전자 바 고장 자동 진단

송명현 박규남 한동기 양철오
순천대학교 전기제어공학과

An Automatic Diagnosis for Rotor Bar Faults using Park's vector Pattern

Myung-hyun Song, Kyu-nam Park, Dong-gi Han, Chul-oh Yang
Dept. of Electrical Control Eng, Suncheon National University

Abstract - In this paper, an auto-diagnosis method of rotor bar fault for small induction motor is suggested. Usually FFT of stator currents are given the good results, but to detect the fault, slip is needed for calculating the feature frequency. The slip is varied as the load is changed. So in this paper, some alternative method for estimating the load is suggested. This method is based on the Park's vector pattern. The magnitudes of the feature frequency are compared with the threshold that is predefined in the bounded range of load. The healthy rotor, single rotor bar fault and double rotor bar fault are tested with no load, 25%, 50%, 75%, and 100% rated load. From 50% to 100% rated load case, the rotor bar faults are detectable using indirect estimation of the load and the comparing the magnitudes of feature frequency. The no load case and under 40% rated load case, rotor fault are undetectable.

차적으로 발생한다[8].

$$f_b = (1 \pm 2ks)f_e \quad k=1,2,3,\dots \quad (1)$$

여기서, f_b 는 회전자 바 결함 주파수, f_e 는 전기적 공급 전류 주파수, s 는 슬립(slip), k 는 상수이다.

$k=1$ 일 때, $f_b = (1 \pm 2s)f_e$ 이며, $(1-2s)f_e$ 성분 (the 1st lower sideband: LSB1)은 회전자 바 고장으로 인하여 발생하게 되고, $(1+2s)f_e$ 성분(the 1st upper sideband: USB1)은 속도 진동의 결과로서 발생한다[9]. 전동기의 부하는 식(1)과 같은 공급주파수 주변의 측파대 성분의 크기에 영향을 주며, 공급 주파수 성분에 비하여 매우 작으나 충분히 검출 할 수 있다.

회전자 고장을 검출하기 위하여 식(1)의 많은 측파대 성분들 중에서 진폭이 다른 측파대에 비하여 큰 성분, $(1 \pm 2s)f_e$, LSB1과 USB1 성분만을 이용하여 효과적으로 검출 할 수 있다[10].

1. 서 론

회전자 바(bar) 고장과 엔드링(end-ring) 손상은 과부하에 의한 열, 불 평형, 국부 열과 같은 열적 스트레스, 불균일한 자력, 진동에 의한 자기적인 요인, 등의 요인들에 의해 발생한다[1]. 회전자 도체의 고장 진단은 유한 요소법을 이용하여 회전자 도체의 자속 량의 변화에 따른 전류 파형으로 진단하는 방법[2]과, 공극의 자속, 고정자의 전류, 토크, 자기력, 회전자 진동 등의 기전연성 변수의 변화를 이용하는 방법[3], 측파대 성분과 공급 주파수 성분 사이의 크기 차이에 따른 전동기 회전자 바 고장의 심각성의 연구[4], 회전자 비대칭을 한 상의 회전자 권선에 저항을 추가하여 파손된 회전자 바 고장을 검출하는 방법[4][5], 전류 신호해석을 통한 전동기의 회전자 바 고장진단 방법[6], 전기 신호해석을 통해 유도전동기의 파손된 바의 정량해석 방법[7] 등이 제안되었다. 대부분의 회전자 바 고장은 전동기에 유입되는 전류 신호의 주파수 성분을 분석하여 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform) 후 전류의 주파수 스펙트럼 슬립에 따른 회전자 바 고장 특징 주파수의 진폭을 비교하여 고장을 진단하였다. 전동기의 슬립은 부하에 따라 달라지기 때문에 회전속도를 측정하여야 하고, 회전속도에 따른 특징주파수를 계산해 문턱값과 비교하여 고장 여부를 판단해야 하는 번잡한 과정을 거쳐야 한다.

회전자 바 고장 자동진단의 문제점은 슬립과 회전속도에 따른 특징주파수가 달라 슬립을 알고 있어야만 특징주파수를 찾을 수 있으며, 부하가 증가함에 따라 특징주파수가 공급주파수를 기준으로 좌우로 멀어지게 되어 부하별 특징주파수에서 진단용 문턱값을 지정하여야 하는 점이다. 그러나 정상에 비하여 좌우 측파대의 고장 진폭은 크게 차이가 나기 때문에 문턱값의 여유가 있어 슬립을 정확하게 알지 않아도 부하의 범위를 알 수 있으면 진단용 문턱값을 이용하여 고장을 진단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 부하를 측정할 수 있는 간접적인 방법을 제시하고 이 방법을 이용한 특징주파수의 문턱값을 비교함으로써 회전자 바 고장을 자동으로 진단하는 방법을 제시하였다.

3. 실험 결과 및 검토

실험에 사용한 하드웨어 구성도이다. 전류 측정을 위해 FLUKE사의 i5s AC Current Clamp 3개를 각각 3상전류에 연결하였으며, USB-DAQ 보드는 NI(National Instrument)사의 USB 9215A with BNC 사용하였고, USB 2.0을 이용하여 펜티엄 4 노트북과 연결하였으며, 효성 3상 1마력 유도전동기를 사용하였으며, 부하로는 다이나모메타를 사용하였다[11].

따라서 본 연구에서는 보다 간편하게 자동으로 회전자 바 고장을 진단할 수 있는 방법을 제안하였다. 고정자 권선의 3상전류 파크벡터 변환으로 손쉽게 얻을 수 있는 파크벡터 패턴을 이용한 부하예측 방법과, 이에 따른 특정 부하 범위별 특징주파수 진폭의 문턱값을 이용하여 보다 간단하게 회전자 바 고장 진단을 자동으로 할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 유용성을 확인하기 위하여 회전자 바 하나와 두 개 고장에 대하여 실험을 하였으며, LabVIEW 프로그램을 통하여 휴대용 진단장비를 개발하여 자동으로 진단할 수 있도록 하였다.

2. 본 론

회전자 고장은 고정자 선 전류에서 관측되는 회전자 바 결함 주파수 성분을 이용하여 회전자 바 고장을 검출 할 수 있다.

선 전류 스펙트럼상의 회전자 바 고장의 특성 주파수는 식(1)과 같이 전기적 공급 전류 주파수 주변에 새로운 측파대에서 순

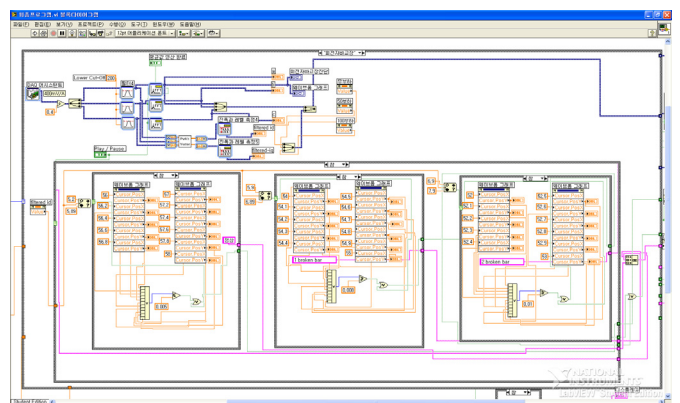


그림 1 회전자 바 고장진단 블록다이어그램

그림 1은 회전자 바 고장진단 LabVIEW 블록다이어그램을 나타낸다. FFT를 수행하기 위하여 DAQ Expression VI에서 샘플링율과 샘플수를 다르게 설정하여 전원주파수의 측과대역에 나타나는 특징주파수를 정확하게 측정할 수 있도록 하였다.

또한 3상전류의 파크변환을 통해 파크벡터 패턴을 구하고 이 패턴을 이용한 지정함수를 통하여 자동으로 부하를 예측하고, 예측된 부하에 대한 특징주파수 대역을 자동으로 검지하고 그 대역의 주파수 진폭값을 샘플링 하여 미리 입력된 문턱값과 비교하여 고장 여부를 자동으로 판별하도록 하였다.

식 (1)에 제시한 상수 k에 1을 대입한 1차 측과대에, 각각 부하에 따른 회전수를 대입하여 슬립을 구해, 특징 주파수를 찾을 수 있었다.

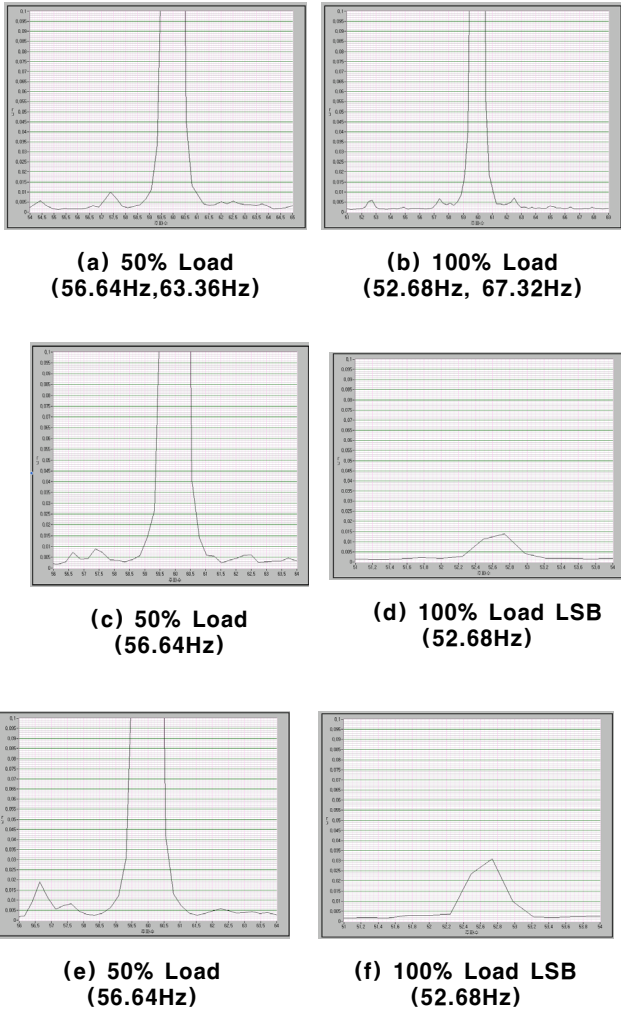


그림 2 50%, 100% 부하별 FFT 특징주파수 1차 측과대 정상(a,b), 1바 고장(c,d), 2바 고장(e,f)

그림 2에 부하별 특징주파수 1차 측과대를 비교하였다. 부하와 바 고장수가 증가할수록 측과대 진폭이 증가함을 알 수 있다. 또한 부하가 증가할수록 측과대가 공급주파수를 기준으로 좌우로 떨어짐을 알 수 있다.

표 1 부하별 특징주파수 진폭 값

	주파수대역	정상	1 broken bar	2 broken bar
부부하	LSB	0.092321	0.093214	0.093391
	USB	0.012799	0.011664	0.011922
25부하	LSB	0.00287	0.002101	0.003519
	USB	0.003657	0.004214	0.004467
50부하	LSB	0.003186	0.00726	0.018947
	USB	0.003012	0.003225	0.003363
75부하	LSB	0.005557	0.012466	0.027153
	USB	0.004448	0.005932	0.007048
100부하	LSB	0.002549	0.0139029	0.30919
	USB	0.00189	0.002103	0.002867

표 1은 부하별 정상, 1 broken rotor bar 그리고 2 broken rotor bar 특징주파수 진폭값을 보인 표이다. 부하의 증가 그리고 바 고장 수 증가에 따라 진폭값은 증가하며, LSB가 USB 보다 검출 가능성이 높음을 보여준다. 따라서 본 연구에서는 LSB를 이용하여 진폭을 비교하기로 하였다.

회전자 바 자동 고장진단의 문제점은 슬립 즉 회전속도에 따른 특징주파수를 찾는 문제와 진단용 문턱값의 설정이다. 슬립을 알고 있어야만 정확한 특징주파수를 찾을 수 있었는데, 특징주파수 진폭의 문턱값으로 고장 판별을 하기 때문에 정확한 슬립을 알 필요가 없으며 일정 슬립범위에 대하여 최소 문턱값으로 판별이 가능하였다. 따라서 슬립대신에 간접적인 부하범위를 예측함으로써 슬립 범위를 대체할 수가 있었다. 파크벡터 패턴은 부하에 따라 직경이 커질 뿐만 아니라 정원에 가까워 직경의 크기로 부하를 예측할 수가 있다. 따라서 파크벡터 패턴의 I_d 값을 통해 부하를 예측할 수 있었다.

$$i_{d-filtered} = i_{d-max} + |i_{d-min}| \quad (2)$$

식(2)와 같이 filtered-id를 정의하고 이 값의 크기로 예측된 부하에 따른 특징주파수 진폭 값을 미리 입력한 문턱 값과 비교하여 자동으로 고장을 진단할 수 있도록 하였다.

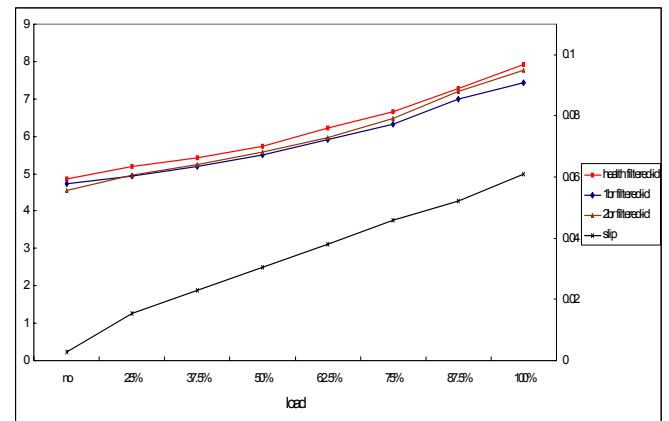


그림 3 슬립과 filtered- i_d 값 비교

그림 3은 슬립과 filtered-id 값을 비교한 그림이다. 부하가 증가함에 따라 filtered-id 값 또한 증가하고 슬립도 증가함을 볼 수 있다. 정상 상태의 전동기와 회전자 바 고장 전동기의 파크벡터 패턴의 차이가 거의 없음을 보여주고 있다. 따라서 정상이든 어떤 바 고장이든 filtered-id 값으로 부하범위를 예측할 수 있다.

표 2에서는 정상 전동기, 1 broken rotor bar 그리고 2 broken rotor bar 고장의 특징주파수의 측정진폭과 문턱값을 설정하였다. 정상과 고장사이에 문턱값을 충분히 여유가 있음을 알 수 있다.

표 2 각 부하별 특징주파수 진폭 값과 문턱값 설정

	정상	1br	2br	threshold
25% load	0.00287	0.002101	0.003519	
37.5% load	0.003457	0.005981	0.017024	0.005
50% load	0.003857	0.00726	0.019473	0.005
62.5% load	0.003421	0.010214	0.024249	0.008
75% load	0.005557	0.012466	0.027153	0.008
87.5% load	0.004998	0.013245	0.029276	0.01
100% load	0.00586	0.013902	0.03091	0.01

그림 4에서 볼 수 있듯이 무 부하에서는 고장 유무를 분별하기 힘들어 문턱값을 적용하여도 고장 검출율이 낮지만, 50% 부하 이상에서는 정상과 1 broken rotor bar, 2 broken rotor bar 사이에 진폭 차이가 있어 손쉽게 고장을 진단할 수 있다.

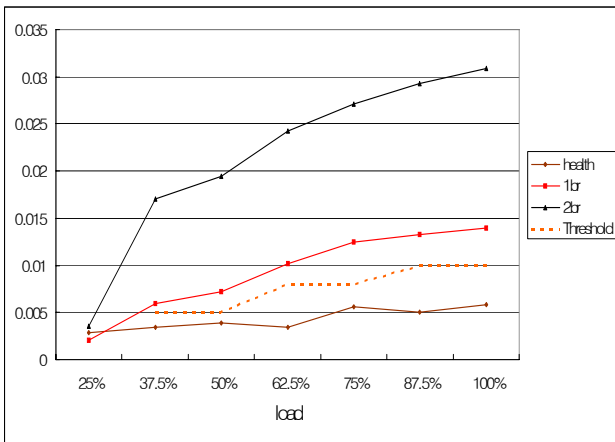


그림 4 각 부하에 대한 진폭 값

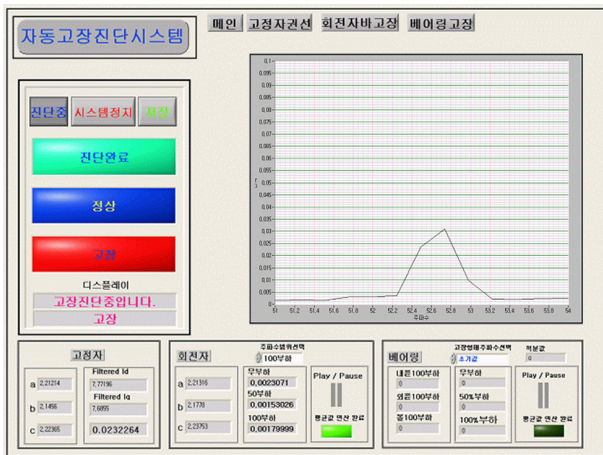


그림 5 2바 고장의 100% 부하

그림 5는 100% 부하일 때 회전자 2바 고장 자동진단용 LabVIEW 프론트 패널을 보여주고 있다. FFT를 통한 전류 진폭을 부하별로 구분하여 문턱값과 비교한 후 고장이 자동으로 진단되면 패널 상에 고장이라는 문자 표시를 보이고 고장 램프에 불이 켜지고, 입력된 전류신호의 부하 예측을 통해 자동으로 부하에 대한 비교주파수 대역과 특징주파수의 값을 보여줘 사용자의 편의를 더했다. 또한 고장 램프가 켜지면 자동으로 고장에 대한 데이터를 저장하여 전동기 고장 진단 후 전동기 관리를 더욱 효과적으로 할 수 있게 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 LabVIEW를 이용하여 유도전동기 회전자 바

고장 자동진단 시스템을 개발하였다. 전동기 슬립에 따라 특징주파수가 달라지기 때문에 자동으로 고장 진단하기 위하여 회전속도 측정이 필요한데 본 연구에서는 간편한 부하추정 방법을 이용하여 일정 슬립범위에 대하여 문턱값을 지정하여 회전자 바 고장을 자동으로 진단하는 휴대용 진단장치를 제안하였다.

파크벡터 패턴의 i_d 의 최대값과 최소값을 이용하여 filtered- i_d 값을 구하고 부하범위를 정할 수 있었으며, 측정된 전류의 특징주파수 대역의 진폭 값을 읽어 지정한 문턱 값과 비교함으로써 자동으로 회전자 고장을 진단할 수 있었다.

LabVIEW와 USB-DAQ 보드를 이용하여, On-line으로 자동 고장 진단할 수 있는 휴대용 진단 시스템을 구현하였으며, 실험을 통해 유용성을 보였다.

[참고 문헌]

- [1] S. Nandi, and H. A. Toliyat, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines - A review", in Conf. Rec. 1999 IEEE-IAS Annu. Meeting, Vol. 1, Phoenix, AZ, pp. 197-204. 1999.
- [2] 김창업, 정용배, "유한요소법을 이용한 농형유도전동기의 회전자 불량 진단에 관한 연구," 한국자기학회, Vol. 6, No.5 pp. 287-292, Oct. 1996
- [3] 박상진, 장정환 외, "기전연성계 해석을 이용한 단상유도전동기의 회전자 결함진단에 관한 연구," 한국소음진동공학회 2000년도 추계학술대회논문집 pp. 802-808, 2000
- [4] Z. Janda et al. "New approach for broken rotor bars detection in induction motors", ICEM'94 proceeding, pp.6-10.
- [5] A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, and C. Tassoni, "Closed-Loop control impact on the diagnosis of induction motors faults", IEEE Trans. Ind. Applications. Vol.36, No.5, 2000.
- [6] W. T. Thomson, and M. Fenger, "Current signature analysis to detect Induction Motor Faults", IEEE Ind. Applicati. Magazine, pp.26-34, July/August 2001.
- [7] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, G. B. Kliman, "Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis", IEEE Trans. Industry. Applications., Vol. 5, 2001
- [8] O. V. Thorsen and M. Dalva, "Methods of condition monitoring and fault diagnosis for induction motors", ETEP Journal, Vol. 8, No. 5, pp. 383-395, 1998.
- [9] G. B. Kliman, W. J. Premerlani, R. A. Koegl, and D. Hoeweler "A new approach to on-line turn fault detection in AC motors," Conference Records IEEE-IAS Annual Meeting, vol.1, pp.687-693, 1996.
- [10] M.-H. Song, E.-S. Kang, C.-H. Jeong, M.-Y. Chow, B.Ayhan, "Mean Absolute Difference Approach for Induction Motor Broken Rotor Bar Fault Detection.", IEEE Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Devices, pp.115-118, 2003.
- [11] 송명현, 박규남, 한동기, 우혁재. "LabVIEW를 이용한 소형 유도전동기의 권선고장 자동진단, 대한전기학회". vol. 55p. No.4 pp.202-206. DEC, 2006.