

왜곡률을 이용한 고정자 권선고장 자동진단

송명현, 박규남, 한동기, 양철오
순천대학교 전기제어공학과

Automatic Diagnosis for Stator Winding Faults Using Distortion Ratio

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 the stator winding fault for small induction motor is suggested. 3-phase stator currents are sampled, filtered, and transformed with Park's vector transformation. After then Park's vector patterns are obtained. To detect the stator winding fault automatically, a distortion ratio (id/iq) is newly defined and compared with the one of healthy motor, and the threshold levels are suggested. The 2-turn, 4-turn, 8-turn winding fault are tested with no load, 25%, 50%, 75%, and 100% rated load. The distortion ratio of the Park's vector patterns are increased as the increase of the faulted turns, but are same as the increase of the load.

1. 서 론

전동기의 전기적인 고장의 대부분은 고정자 고장이 차지하고 있으며, 절연 파괴가 고정자 고장의 주된 원인이다. 고장의 형태는 턴 대 턴, 코일 대 코일, 회로개방, 상 대 상, 코일 대 접지 등으로 나타난다. 전동기의 권선고장을 고장진행 초기에 진단하기 위해 많은 방법이 시도되었다. 전동기 고정자 전류 주파수 분석이나 진동 주파수 분석[1], 고정자의 권선고장 및 고장 상 검출에 파크벡터(Park's vector)를 이용한 방법[2], 역상 전류를 이용한 방법[3], 역상 임피던스를 이용하는 방법[4], 인공신경망을 이용한 파크 벡터의 패턴인식[5][6], 등이 있다. 이러한 유도전동기 고정자 권선 고장의 고장진단 방법들은 각 특성 주파수를 발견하는 것이 어렵고, 찾는다 할지라도 작은 턴 수의 고장에서는 정상과의 차이를 구별하기 어렵다는 점과, 작은 단락 턴 수의 패턴이 정상 패턴과 구분이 되지 않는 점, 외부 환경에 영향을 많이 받고, 임피던스를 이용하는 경우 3상전류, 전압을 이용하기 때문에 측정 장치가 복잡해질 수 있고, 전압 불 평형과 상 개방 고장에 국한되는 많은 단점들을 가지고 있다. 인공신경망을 이용한 방법은 다른 방법들보다 정확한 진단 결과를 얻을 수는 있으나, 가중치를 선정과 학습시 복잡한 과정을 거쳐야 하는 등의 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 실제 진단 장치에서는 사용하는 데 어려움을 갖고 있어 간단한 진단방법을 필요로 한다. 뿐만 아니라 숙달된 작업자가 직접 프로그램 조작을 통해 파크벡터 패턴을 만들어 고장진단을 해야 하므로 전문적인 지식이나 관련 분야 종사자가 아닌 단순 작업자가 고장진단을 하기란 너무 어려웠다.

따라서 본 연구에서는 고정자 권선고장 자동 진단장치를 구현하고 그 유용성을 확인하였다. 상용 프로그램인 LabVIEW[7]를 이용하여 인위적인 고정자 권선고장의 전류를 측정후 파크벡터 패턴의 왜곡률을 계산하여 자동 진단을 하였으며 부하별로 진단의 유용성을 확인하였다.

2. 본 론

3상전류의 파크벡터변환을 통하여 파크벡터 패턴을 얻는 고정자 권선고장 진단방법은 매우 간단하면서도 효과적인 방법이다. 따라서 본 연구에서는 이 방법을 이용하여 자동으로 권선고장을 진단할 수 있는 휴대용 자동권선 고장 진단장치를 제안하고자 한다.

3상전류의 변수(i_A, i_B, i_C)로부터 파크 벡터의 성분(i_D, i_Q)으로 변환하는 식은 식(1), (2)와 같다.

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)i_A - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_C \quad (1)$$

$$i_Q = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_C \quad (2)$$

이상적인 조건에서, Park's Vector 성분은 다음과 같다.

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_M \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$i_Q = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_M \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (4)$$

여기서, i_M, ω, t 는 각각 공급 전류의 최대값[A], 공급 각 주파수 [rad/s], 시간 변수[s]를 나타낸다.

위 식에 상응하는 그림은 좌표상의 원점에 중심을 둔 원 궤적이다. 정상 전동기의 경우는 완벽한 대칭전압이 공급되며, 전동기의 공급전류에는 단지 정상(positive-sequence)분(i_+)만을 포함하게 된다. 이것은 그림 1의 실선과 같이 전류에 대한 파크 벡터의 궤적을 완벽한 원으로 만든다.

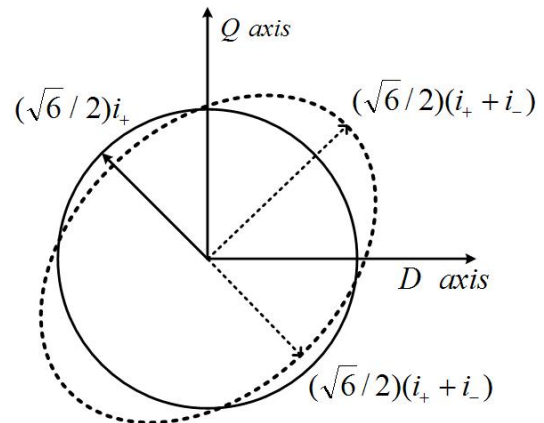


그림 1 이상적인 파크벡터 패턴(●)과 권선 고장의 파크벡터 패턴(○)

전동기의 고정자 권선에 턴 간 단락이 발생하면 공급 전류에는 비대칭 성분이 발생하게 된다. 이 경우 전동기의 공급전류는 정상 분과 역상(negative-sequence)분(i_-)의 합으로 표현된다. 이러한 두 성분의 존재는 전류의 파크 벡터의 궤적이 그림 1의 점선과 같은 타원이 된다. 장축의 길이는 직접적으로 전동기 공급전류의 정상과 역상분의 진폭의 합에 비례하며, 단축의 길이는 두 성분의 진폭의 차에 비례한다.

따라서 고정자 권선 자동고장 진단을 위해 파크벡터 패턴의 찌그러짐 정도, 즉 왜곡률을 I_d 와 I_q 의 비로 정의하여 기준 값을 정하고 자동으로 고장을 판별하였다.

3. 실험 결과 및 검토

그림 2는 본 실험에 사용한 하드웨어 구성도를 보여주고 있다. Current Probe를 통해 얻어진 전류 신호를 파크변환을 이용하여 파크벡터 패턴을 만들고, D축의 피크 값과 Q축의 피크 값을 이용하여 왜곡율을 계산하여 자동으로 고정자 권선 고장을 진단하였다.

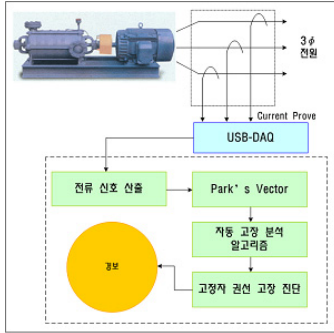


그림 2 고장진단 시스템 구성도

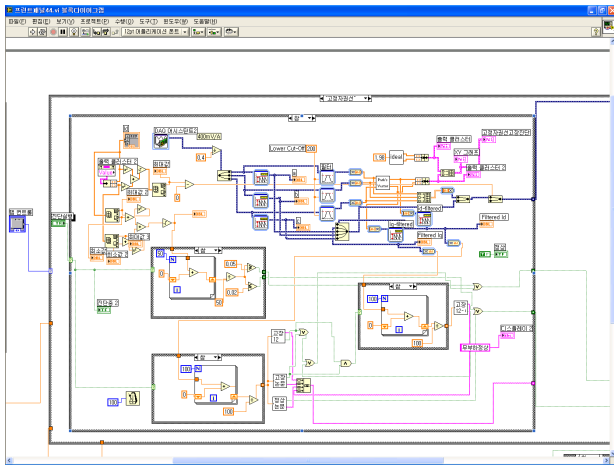


그림 3 고정자 권선 고장진단 블록다이어그램

그림 3은 LabVIEW로 구성된 고정자권선 고장진단 블록다이어그램이다. 부분 부분에 Expression VI를 사용하여 수정을 쉽게 할 수 있다.

그림 4는 고정자권선 고장 알고리즘을 보여주고 있다. USB-DAQ 보드[8]를 통해 전류신호를 측정하여 파크벡터변환을 이용하여 파크벡터 패턴을 얻고 왜곡율을 계산하고, 왜곡율의 문턱 값과 비교하여 자동으로 고장을 검출할 수 있게 하였다.

정상, 2턴, 4턴, 6턴 8턴 단락 고장 전동기에 대하여 실험하였고, 부하 변화에 따른 패턴의 변화를 살펴보기 위해 무 부하, 25%, 50%, 75% 부하 및 100% 부하 조건에서 실험을 하여 각각의 상황에서 나타나는 파크 벡터 패턴 특징을 검토하였다.

그림 5는 무 부하 일 때 정상과 2턴, 4턴, 6턴, 8턴 고장일 때의 파크벡터 패턴이다. 턴 고장이 증가할수록 I_d 값은 증가하는 반면, I_q 값은 미세한 차이지만 조금씩 줄어들어 왜곡율이 증가하는 성향을 보여준다.

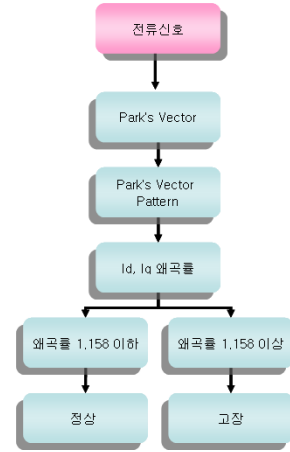
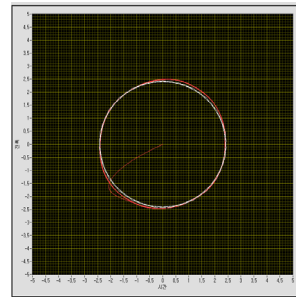
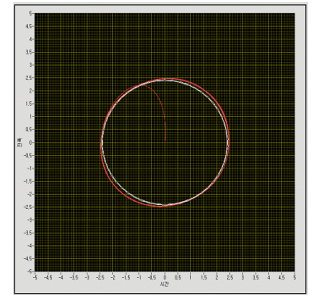


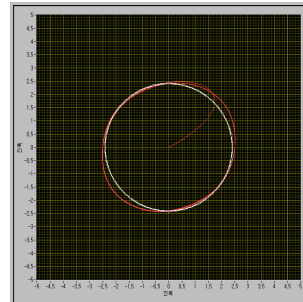
그림 4 권선고장 자동 진단 알고리즘



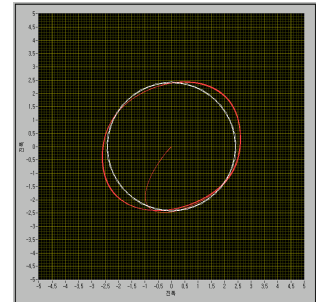
(a) 정상



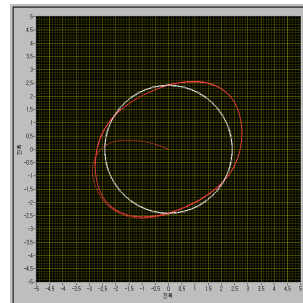
(b) 2턴 단락



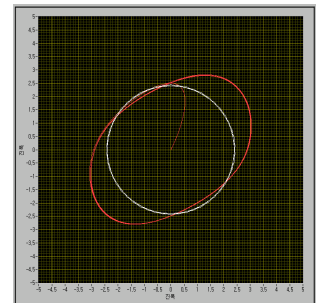
(c) 4턴 단락



(d) 6턴 단락

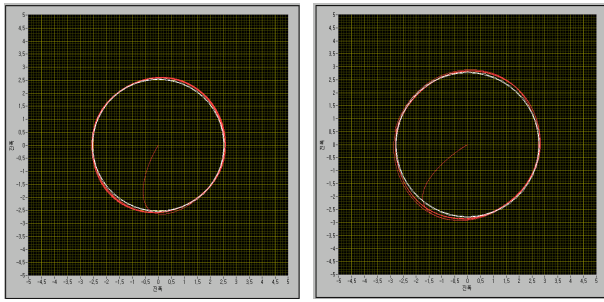


(e) 8턴 단락



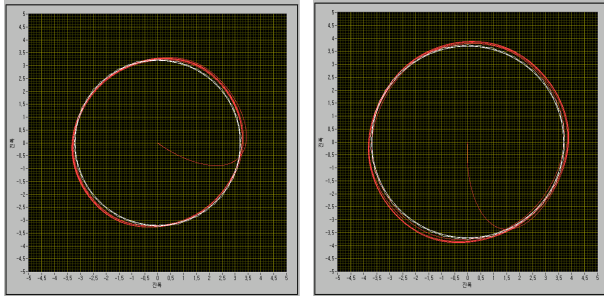
(f) 12턴 단락

그림 5 무 부하일 때 각 턴 고장에 대한 파크벡터 패턴



(a) 25% 부하

(b) 50% 부하



(c) 75% 부하

(d) 100% 부하

그림 6 각 부하에 대한 2턴 파크벡터 패턴

그림 6은 2턴 고장일 때 부하별 파크벡터 패턴을 보여준다. 부하가 늘어남에 따라 파크벡터 패턴 또한 증가하는 것을 보여주고 있다. 가운데 정원은 이상적인 경우이며 바깥 실선은 턴 고장의 경우이다. 그림에서 볼 수 있듯이 왜곡율의 차이는 거의 느낄 수 없었다.

표 1은 실험을 통해 구한 I_d 와 I_q 의 찌그러짐의 정도, 즉 왜곡율이다. 표에서도 볼 수 있듯이 왜곡율은 고장 턴이 증가할 때 증가하고 부하에 따라서는 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 표 1과 그림 7을 통해 기준 값을 1.158로 정하고 그 기준 값보다 클 경우를 고장으로 자동 판별하게 할 수 있었다.

표 1 왜곡률의 평균값

부하	정상	2턴	4턴	8턴
무 부하	1.153238	1.167887	1.181798	1.217983
25%	1.155142	1.163536	1.182202	1.222023
50%	1.155661	1.160313	1.181714	1.217141
100%	1.153954	1.162898	1.182176	1.211761

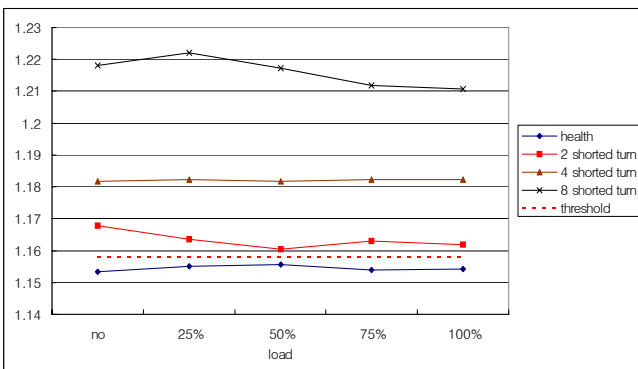


그림 7 왜곡률 실험 결과

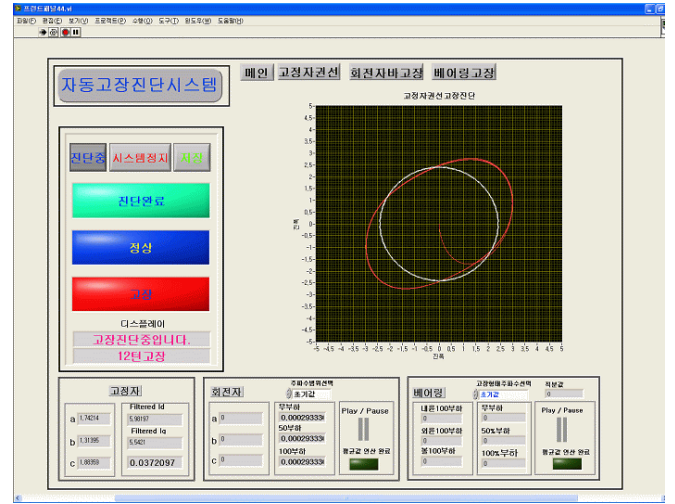


그림 8 고정자권선 진단 프론트 패널

그림 8은 문턱 값을 적용하여 실험한 고정자 권선 고장의 프론트 패널을 보여주고 있다. 문턱 값 이하의 값이 들어올 경우 정상 램프에 녹색 불이 켜지며 정상에 대한 고정자 권선의 파크벡터 패턴을 보여준다. 지정한 문턱 값 이상의 값이 들어올 경우는 고장 램프에 빨간색 불이 켜지며 고장에 대한 고정자 권선의 파크벡터 패턴을 보여준다. 고장램프에 불이 켜지면 각 상의 전류 값이 바로 저장되도록 하여 리포트를 통해 고장진동기에 대한 이력관리를 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 LabVIEW를 이용하여 유도전동기 고장 자동진단 시스템을 개발하였다.

각 부하에 대한 2턴, 4턴, 6턴, 8턴 고장의 왜곡율을 구하여 문턱 값과 비교한 결과 정의한 왜곡율로 2턴을 제외하면 쉽게 권선 고장을 자동으로 판별할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 왜곡율은 부하의 변화에 같은 비율로 변화하므로, 부하의 변화에도 동일하게 자동으로 진단이 가능함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] S. Williamson, et al., "Analysis of cage induction motors with stator winding fault," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 7, pp. 1838-1842, July 1985.
- [2] A. J. M. Cardoso et al., "Inter turn stator winding fault diagnosis in three phase induction motors, by Park's Vector Approach," IEEE Trans. Ind Applicat., vol. 29 no.3, pp.595-598, Sept. 1999.
- [3] G. B. Kliman, et al., "A new approach to on-line turn fault detection in AC motors," Conference Records IEEE-IAS Annual Meeting, vol.1, pp.687-693, 1996.
- [4] Sang-Bin Lee, et al., "A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix", PESC, Volume 4, pp 2217-2223 17-21 June 2001.
- [5] A. J. M. Cardoso et al., "Inter turn stator winding fault diagnosis in three phase induction motors, by Park's Vector Approach," IEEE Trans. IA, vol. 29 no.3, pp.595-598, Sept. 1999.
- [6] F. Filippetti, et al., "Integrated condition monitoring and diagnosis of electrical machines using minimum configuration artificial intelligence" Proceedings of EPE97, 1997, Vol 2, pp. 983-988.
- [7] LabVIEW 7 Express User Manual, N. I, co, 2003
- [8] A Technical Introduction to USB 2.0, www.usb.org