The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 61, No. 4, pp. 643~649, 2012
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.4.643

유도전동기의 고정자 권선고장 진단을 위한 팍스벡터 패턴의 왜곡률 연산에 대한 연구

Study on Distortion Ratio Calculation of Park's Vector Pattern for Diagnosis of Stator Winding Fault of Induction Motor

양 철 오* · 박 규 남** · 송 명 현†
(Chul-Oh Yang · Kyu-Nam Park · Myung-Hyun Song)

Abstract - The diagnosis technique of stator winding faults based on Motor Current Signature Analysis(MCSA) was suggested. Park's vector pattern, the circle that is drawn by d-q transformed currents(i_d, i_q), is widely used for stator winding faults detection. The current Distortion Ratio(DR), defined by the ratio of max·axis and min·axis of ellipse of Park's vector's pattern, was more simple and powerful method than the Park's vector pattern. In this study, a calculation method of distortion ratio of Park's vector pattern was suggested for auto diagnosis of stator winding short fault and usefulness of suggested calculation method of distortion ratio was verified through simulation using LabVIEW program.

Key Words : Distortion ratio calculation, Induction motor, Diagnosis, Stator winding fault, Park's vector

1. 서 론

전동기의 전기적인 고장의 대부분은 고정자 고장이 차지하고 있으며, 절연 파괴가 고장의 주된 원인이다. 절연 파괴의 형태는 고장의 진행 정도에 따라 코일 대 코일, 상 대 상, 코일 대 접지 등으로 나타난다.

턴 간(코일 대 코일) 단락과 같은 초기 고장은 상간 단락 또는 상 접지 단락과 같은 보다 큰 고장의 원인이 된다. 따라서 턴 단락 고장의 조기 검출을 통해 전동기의 순차적인 손상을 막을 필요성이 있다. 이러한 전동기 단락 고장의 조기 검출은 전동기 정지시간, 부가적인 인력 그리고 수리비용을 최소화함으로써 경제적인 손실을 줄일 수 있다.

전동기의 권선고장 초기 진단을 위해 많은 방법이 시도되었다. 전동기 고정자 전류 주파수 분석이나 진동 주파수 분석 방법[1-4]은 각 특성 주파수를 찾는 것이 어렵고, 찾는다 할지라도 적은 턴 수의 고장에서는 정상 전동기와의 차이를 구별하기 어려우며, 역상 전류를 이용한 방법[5-7]은 외부 환경에 영향을 많이 받는 단점이 있다.

고정자 권선 단락으로 인해 상 전류의 불평형이 나타나는 것을 이용하여, 고정자 권선 고장 및 고장 상 검출에 팍스벡터(Park's vector)를 이용한 방법[8-9]이 제시되었다. 그러나 적은 수의 턴 고장 패턴과 정상 패턴을 육안으로 구별하기는 매우 어렵다. 최근에는 팍스벡터 패턴의 찌그러짐의 정도를 수치적으로 연산하여 정상 전동기와 고장 전동기를 명확하게 구분하기 위한 연구[10-11]가 진행되었고, 시뮬레이션 분석을 통한 왜곡률 영향 분석에 대한 연구가 진행되었다[12-13]. 이 연구에서는 팍스벡터 패턴의 왜곡률을 분석하기 위해 가상의 실험 조건에 맞는 3상 전류신호를 생성하여 부하 변화에 따른 팍스벡터 패턴의 변화에 따른 왜곡률의 변화를 분석하였으나, 고조파 노이즈의 영향 및 왜곡률 연산 데이터 처리 등에 대한 문제는 고려되지 않으므로 명확한 왜곡률 연산이 어려웠다.

따라서 본 연구에서는 명확한 왜곡 연산을 위해서 고조파 노이즈의 영향 및 권선 단락 상의 위치 및 왜곡률 연산 데이터 처리에 따른 팍스벡터 패턴의 왜곡률 차이를 분석함으로써, 왜곡률 연산을 위한 알고리즘을 제안하고 LabVIEW를 이용한 시뮬레이션 분석을 통해 그 유용성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 유도전동기 전류 신호의 팍스벡터 패턴

3상전류의 변수(i_A,i_B,i_C)로부터 팍스벡터의 성분(i_d, i_q)으로 변환하는 식은 식(1), (2)와 같다.

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

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

여기서, 주파수와 진폭이 일치하고 각각 정확하게 120°의 위상차를 갖는 이상적인 전류 신호의 팍스벡터 변환 결과는 식 (3), (4)와 같다.

* 정 회 원 : 순천대학교 공대 전기공학과 박사과정
** 정 회 원 : 순천대학교 공대 전기제어공학과 교수
† 교신저자, 정회원 : 순천대학교 공대 전기제어공학과 교수
E-mail : mhsong@sunchon.ac.kr
접수일자 : 2012년 1월 6일
최종완료 : 2012년 3월 27일

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

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

여기서, i_M는 공급 전류의 피크값(A), ω는 공급 각 주파수(rad/s), t는 시간 변수(s)

i_d와 i_q의 성분을 두 축으로 하여 두 성분의 벡터 궤적을 그리면 i_d, i_q 좌표상의 원점에 중심을 둔 원이 그려진다. 이 원의 궤적의 크기는 $(\sqrt{6}/2)i_M$ 이고, 궤적의 회전 주기는 ω 이다. 이상적인 정상 유도전동기의 경우 전동기의 고정자 권선 전류에는 단지 정상분(i_+)만을 포함하므로 위 조건과 같은 이상적인 전류 신호가 공급된다. 따라서 이상적인 유도전동기에 i_M의 피크를 갖는 60[Hz]의 3상 전류신호(i_A, i_B, i_C)가 입력되면, 그림 1의 실선과 같이 궤적의 반지름의 크기가 $(\sqrt{6}/2)i_+$인 정(正) 원의 궤적이 $120\pi[rad/s]$의 속도로 그려진다.

전동기의 고정자 권선에 턴 간 단락이 발생하면 공급 전류에 비대칭 성분이 발생한다. 이 경우 전동기의 공급전류는 정상분과 역상분(i_-)의 합으로 표현된다. 이러한 두 성분의 존재는 전류의 팍스 벡터의 궤적이 그림 1의 점선과 같은 타원이 되도록 한다[10]. 이 타원의 팍스 벡터 궤적이 1회전 하는 한주기 동안 벡터 크기의 최대값과 최소값은 각각 $r_{\max}$, $r_{\min}$로 나타낼 수 있다.

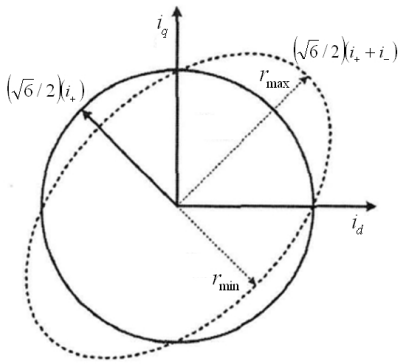


그림 1 이상적인 전동기와 권선단락 전동기의 팍스벡터 패턴 비교

Fig. 1 Comparison of the Park's vector pattern of ideal motor with winding short motor

고장 턴 수가 증가할수록 공급 전류의 비대칭 성분이 증가하고 이에 따라 팍스벡터 패턴의 궤적의 왜곡이 커지므로 이를 이용해 고정자 권선의 고장을 진단할 수 있다. 팍스벡터 패턴의 궤적은 두 벡터 성분(i_d, i_q)의 합성에 의해 결정되므로, 식 (5)를 이용해 팍스벡터의 크기 성분을 얻을 수 있다. 만약 권선의 턴 단락으로 인해 상 전류의 크기가 커진다면, 한 주기 동안의 벡터는 크기의 편차가 발생한다. 최근 저자 등은 팍스벡터 패턴의 찌그러짐의 정도를 왜곡률(DR: Distortion Ratio)이라고 정의하고, 식 (6)을 이용해 왜곡률을 수치적으로 연산하였다[10]. $r_{\max}$와 $r_{\min}$의 크기가 같으면 왜곡률(DR)이 1로 전동기가 가장 이상적인 상태이고, $r_{\max}$와 $r_{\min}$의 차가 클수록 왜곡률이 커지므로 전동기의 권선단락으로 인한 상전류의 불평형이 큰 상태이다.

$$r = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \tag{5}$$

$$DR = \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \tag{6}$$

여기서, r은 팍스벡터 패턴의 진폭, $r_{\max}$는 팍스벡터 패턴 중 가장 큰 진폭, $r_{\min}$은 팍스벡터 패턴 중 가장 작은 진폭

2.2 왜곡률 알고리즘

종래의 왜곡률 알고리즘에서는 팍스벡터 패턴의 생성 주기를 고려하지 않고, DAQ 보드 설정에 따른 1회의 신호 수집 주기 동안 전체의 팍스벡터 스칼라 중에서 $r_{\max}$와 $r_{\min}$을 찾아 왜곡률을 계산하였다[10].

DAQ 보드로 전류 신호를 수집하는데 있어 샘플링 속도와 샘플 수는 중요한 요소이다. 샘플링 속도를 $v[S/s]$로 하고 샘플링 수를 $n[S]$로 하는 DAQ 설정에서 신호 수집 주기($T_s[s]$)는 식 (7)과 같은 조건을 만족한다. 신호 수집 주기($T_s[s]$)로 수집된 3개 채널의 3상전류 신호를 식 (1)과 식 (2)를 이용해 팍스벡터 변환 하고, 식 (5)에 의해 시간에 따른 팍스벡터 패턴의 크기(r_{na})는 식 (8)과 같은 1D 배열로 표현할 수 있다. 데이터 수집 보드의 3개의 채널에서 3상전류 신호를 수집한다면 $T_s[s]$ 동안에 연산된 r_{n_a} 배열의 크기는 n_a이다.

$$T_s = \frac{n_a}{v}[s] \tag{7}$$

$$r_{n_a} = \sqrt{i_{d_{n_a}}^2 + i_{q_{n_a}}^2} \tag{8}$$

여기서, T_s는 신호 수집 주기, n_a는 r_{na}배열의 인덱스로 n_a =0, 1, 2, $\cdots$, $n-1$

종래의 알고리즘에서는 배열 r_{n_a}의 내림차순 정렬 배열 또는 오름차순 정렬 배열을 각각 $r_{\max i}$, $r_{\min i}$로 정의하고, 식 (9), (10)을 이용해 $r_{\max}$와 $r_{\min}$을 연산하였다. 여기서, $r_{\max}$와 $r_{\min}$은 신호 수집 주기 동안 발생하는 d개의 팍스벡터 패턴의 $r_{\max i}$와 $r_{\min i}$의 평균값이다.

$$r_{\max} = \frac{\sum_{\max i=0}^{d-1} r_{\max i}}{d} \tag{9}$$

$$r_{\min} = \frac{\sum_{\min i=0}^{d-1} r_{\min i}}{d} \tag{10}$$

여기서, i는 $r_{\max i}$, $r_{\min i}$ 배열의 인덱스, d는 T_s 동안에 생성되는 팍스벡터 패턴의 수

종래의 알고리즘에서는 팍스벡터 패턴의 정확한 $r_{\max}$, $r_{\min}$값을 추출하기 어려워 적은 턴 수의 고장을 정확하게 진단하기가 어려웠다. 본 논문에서는 팍스벡터 패턴의 생성 주기를 고려하여 왜곡률을 연산하는 새로운 왜곡률 알고리즘을 다음과 같이 제안하였다.

60[Hz]주파수를 갖는 전류 신호는 한 주기 동안 1회전의 팍스벡터 패턴을 만든다. 따라서 T_s 동안에 만들어지는 팍스벡터 패턴의 수(d)는 $60T_s$이다. 한 주기 동안의 샘플 데이터 수(n_p)는 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$n_p = \frac{n_a}{d} \tag{11}$$

팍스벡터의 패턴의 왜곡은 한 주기에 각각 1 개의 $r_{\max}$와 $r_{\min}$을 만들어내므로 T_s 동안 $2d$ 개의 $r_{\max}$와 $r_{\min}$이 생성된다[12, 13]. 시간에 따른 팍스벡터의 크기(r_{na})의 1D 배열 데이터를 다음과 같이 처리하면 $2d$ 개의 $r_{\max}$와 $r_{\min}$을 얻을 수 있다.

- r_{n_a}의 1D 배열 데이터를 $n_p/2$개씩 분리하여 $i(n_p/2)$행 $j(2d)$열의 2D 배열(r_{ij})로 변환
- r_{ij}의 각 행(i) 배열을 내림차순 및 오름차순 정렬하여 내림차순 배열(r_{dij})과 오름차순 배열(r_{aij}) 생성
- 식 (12)와 같이 r_{dij}, r_{aij} 배열에서 각각 첫 번째 행($i=0$)의 배열을 추출하여 최대값 배열($r_{\max j}$)과 최소값 배열($r_{\min j}$) 생성
- $r_{\max j}$과 $r_{\min j}$를 이용해 식 (13)과 같이 각 왜곡률의 평균을 연산
- 식 (13)에서 전류 신호 측정 초기에 필터링에 의해 생기는 왜곡된 신호 성분을 고려하기 위해 첫 번째(인덱스 $j=0$일 때) 값을 제거하여 계산

$$r_{\max j} = r_{d0j}, \quad r_{\min j} = r_{a0j} \tag{12}$$

$$DR = \frac{\sum_{j=1}^{2d-1} \frac{r_{\max j}}{r_{\min j}}}{2d-1} \tag{13}$$

여기서, i와 j는 2D 배열의 인덱스로 $i=0,1,2\ldots, \lfloor n_p/2 \rfloor -1$, $j=0,1,2,\ldots, \lfloor 2d \rfloor -1$ 이고, $r_{\max j}$와 $r_{\min j}$는 T_s 동안에 얻어진 $r_{\max}$와 $r_{\min}$의 배열,

그림 2에 종래의 알고리즘과 제안한 알고리즘을 비교하였다. 종래의 알고리즘은 식 (8)에 의해 얻어진 r_{n_a}의 전체 배열에서 큰 값들($r_{\max i}$)과 작은 값들($r_{\min i}$)의 평균을 각각 $r_{\max}$, $r_{\min}$으로 정의하고 식 (6)을 통해 왜곡률을 연산하였다.

본 논문에서 제안한 왜곡률 알고리즘은 보다 정확한 왜곡률을 연산하기 위해 $r_{\max}$와 $r_{\min}$의 발생 주기에 맞춰 데이터를 분리하였다. 분리된 데이터를 통해 매 발생 주기마다 왜곡률을 구하고, $r_{\max}$와 $r_{\min}$의 발생 주기마다 구해진 왜곡률의 평균값을 왜곡률(DR)로 정의하였다.

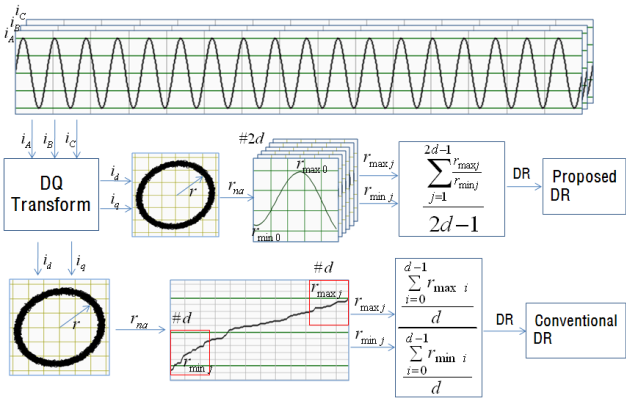


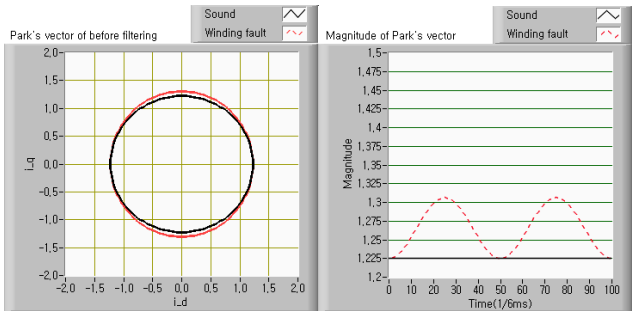
그림 2 종래의 알고리즘과 제안한 알고리즘의 비교

Fig. 2 Comparison of conventional algorithm with proposed algorithm

2.3 팍스벡터 패턴의 시뮬레이션 분석

각 상 전류의 변화에 따른 팍스벡터 패턴의 변화를 알아보기 위해 가상의 신호 생성으로 팍스벡터 패턴의 변화를 시뮬레이션 할 수 있다. 유도전동기의 상태가 이상적일 때는 동일한 진폭 및 주기를 가지며 120°의 위상차를 갖는 3상전류 신호가 입력된다. 그러나 A상에 권선단락이 발생하면 A상의 전류 신호는 진폭의 크기가 커진다. 따라서 A상 전류의 진폭 크기를 더 크게 하여 권선 단락 고장 전동기의 전류 신호를 시뮬레이션 생성할 수 있다.

그림 3(a)는 정상 및 턴 단락 고장 전동기의 3상전류 신호를 생성하여 팍스벡터 변환한 후 팍스벡터 패턴을 구한 결과를 보여준다. 그림 3(b)는 식 (5)를 이용해 한 주기 동안 두 가지 전동기의 팍스벡터 패턴의 크기(스칼라) 변화를 나타낸 것이다. 정상 전동기의 경우 한 주기 동안 팍스벡터 패턴의 크기 변화가 없이 일정한 반면 턴 단락 고장 전동기는 팍스벡터 패턴의 크기 변화가 한 주기 동안 두 번 발생한다[12]. 권선 단락 고장이 발생하면 팍스벡터 패턴 크기의 최대값이 커지므로 식 (6)을 통해 얻어지는 왜곡률(DR)은 1보다 커진다. 따라서 왜곡률의 크기 비교를 통해 고정자 권선단락 고장을 자동으로 진단할 수 있다.

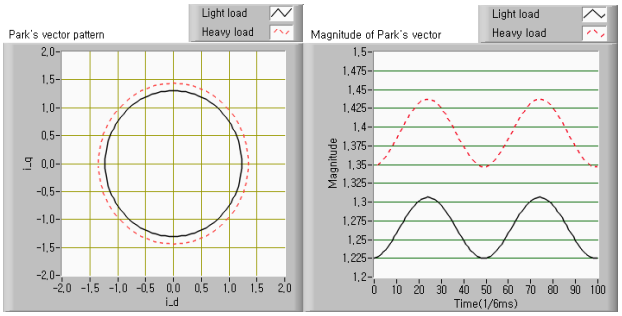


(a) Park's vector pattern (b) Magnitude of pattern

그림 3 전동기 상태에 따른 팍스벡터 패턴

Fig. 3 The Park's vector patterns of healthy motor and winding fault motor

그림 4는 부하 변화에 따른 팍스벡터 패턴의 변화를 시뮬레이션 한 결과 그래프이다. 그림 4의 (a)에서는 부하의 증가에 따라 팍스벡터 패턴의 직경이 증가함을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 부하 증가에 따라 팍스벡터 패턴의 크기는 증가하지만 최대 크기와 최소 크기의 차에 의한 진폭이 같으므로 부하 변화는 왜곡률의 크기에 영향을 미치지 않음을 보여준다. 따라서 왜곡률을 이용하여 유도전동기의 권선단락 고장을 자동으로 진단함에 있어 부하 변화에 관계없이 일정한 문턱값을 적용할 수 있다[12].

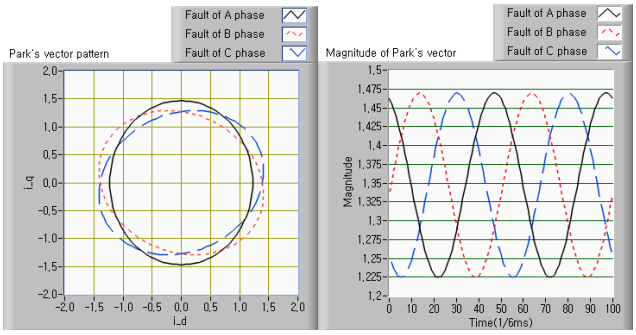


(a) Park's vector pattern (b) Magnitude of pattern

그림 4 부하 변화에 따른 팍스벡터 패턴의 변화

Fig. 4 Variation of Park's vector pattern according to load change

그림 5는 각 상 고장별 팍스벡터 패턴의 시뮬레이션 결과 그래프이다. 그림 5(a)는 각 상 고장별 팍스벡터 패턴을 보여주는 것으로, 고장이 발생한 상에 따라 i_d, i_q 평면에서 $r_{\max}$와 $r_{\min}$의 생성 위치가 변화되는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 고장이 발생한 상에 따른 팍스벡터 패턴의 크기를 나타내는 그래프로, 권선 단락이 발생한 상의 위치에 따라 위상의 차가 있지만 진폭의 크기는 동일함을 보여준다. 그리고 권선 단락이 발생한 상의 위치와 관계없이 팍스벡터 패턴의 최대, 최소 크기와 왜곡률은 동일함을 확인할 수 있다. 따라서 권선 단락이 발생한 위치에 관계없이 왜곡률을 이용하여 동일한 문턱값으로 권선단락 고장을 진단할 수 있다[13].

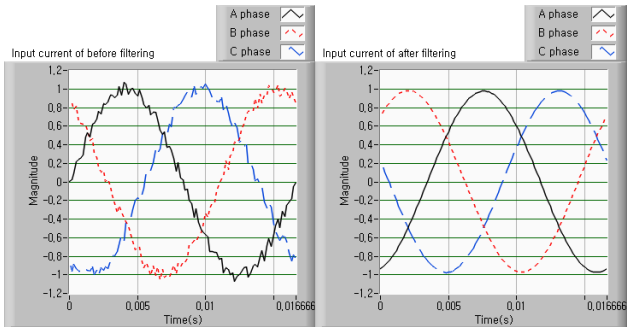


(a) Park's vector pattern (b) Magnitude of pattern

그림 5 각 상 고장에 의한 팍스벡터 패턴

Fig. 5 Park's vector pattern for each phase short

유도전동기의 전원 전류 신호에는 전동기의 상태에 따라 60[Hz]의 전원 신호 외에 노이즈 성분이 포함되어 있다. 이러한 노이즈 성분은 특히 인버터를 이용해 유도전동기를 운전할 때 더욱 크게 나타난다. 따라서 유도전동기 권선단락 고장 진단에서는 전원 전류 신호에 노이즈 성분이 포함되어 있을 경우를 고려하여야 한다. 노이즈 성분이 추가된 전류 신호 시뮬레이션을 위해 그림 5의 전류 신호에 0.08의 진폭을 갖는 노이즈 성분을 추가한 전류 신호를 생성하였다. 그림 6(a)는 노이즈 성분이 포함된 한 주기 동안의 전류 신호이고 6 (b)는 필터링 후의 그래프이다. 유도전동기의 전류 신호는 60[Hz]의 전원 신호를 가지므로 노이즈를 제거하기 위해 100[Hz]의 컷오프 주파수를 갖는 디지털 저역 통과 필터를 사용하였다. 필터의 스펙 설정은 IIR(무한 임펄스 응답)필터로 토폴로지는 버터워스, 차수는 3으로 하였다.



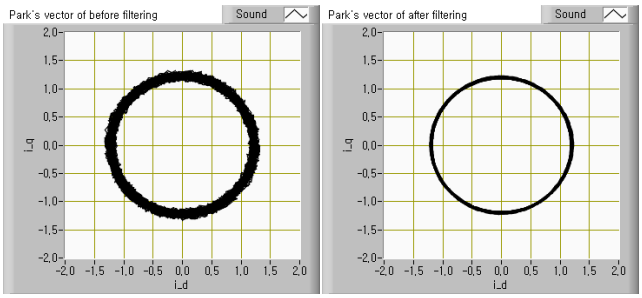
(a) Before filtering (b) After filtering

그림 6 노이즈 성분이 포함된 전류 신호의 필터링

Fig. 6 Filtering of current signal with noise components

그림 7은 3상 입력 전류 신호를 필터링 하기 전과 후의 팍스벡터 패턴의 변화를 비교하기 위해, 1초 동안의 전류신호를 팍스벡터로 변환한 그래프이다. 여러 주기의 전류 신호를 생성하기 위해 초당 샘플링 속도를 6000[S/s]로 하고 1초 동안 6000S의 데이터로 60[Hz]의 전류 신호를 시뮬레이션 하였다.

그림 7의 (a) 그래프는 정상 전동기 입력 전류 신호에 노이즈가 포함된 팍스벡터 패턴이고, (b) 그래프는 필터링을 통해 노이즈 성분을 제거한 후의 팍스벡터 패턴이다. 필터링 된 전류 신호가 필터링 되지 않은 전류 신호에 비해 팍스벡터 패턴의 변화 폭이 작음을 확인할 수 있다.

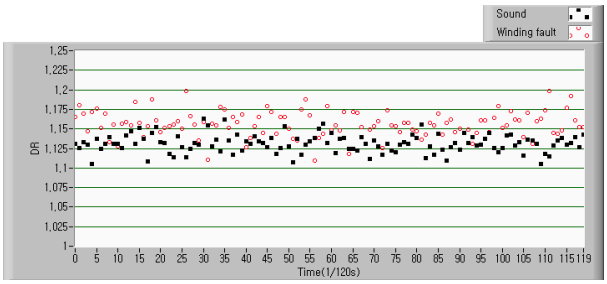


(a) Before filtering (b) After filtering

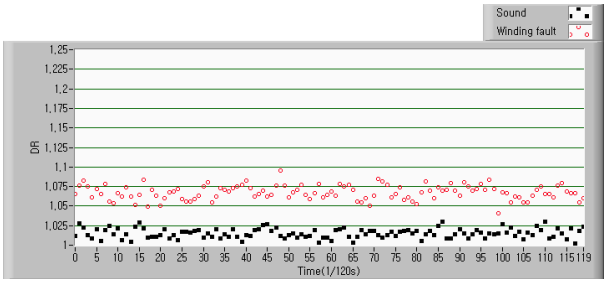
그림 7 필터링 전 후의 팍스벡터 패턴 비교

Fig. 7 Comparison of before/after filtering Park's vector pattern

그림 8은 신호 시뮬레이션으로 생성된 정상 및 고장 전동기 전류 신호의 각각 왜곡률을 연산한 결과로, 그림 8의 (a)는 필터링 하기 전 전류 신호의 왜곡률의 그래프이고 그림 8의 (b)는 필터링 한 전류 신호의 왜곡률 그래프이다. 필터링 하기 전 전류 신호의 왜곡률은 노이즈 성분으로 인해 모두 왜곡률의 크기가 크고 정상과 고장 전동기를 구분하기 어렵다. 반면에 필터링 후 전류 신호의 왜곡률은 필터링 전에 비해 크기가 작으며 정상과 고장 전동기를 구분할 수 있을 정도로 차이가 난다. 따라서 왜곡률 알고리즘을 이용한 권선단락 진단에서는 필터링 과정이 필요하다.



(a) DR without filtering



(b) DR with filtering

그림 8 시뮬레이션 전류 신호의 필터링 전 후 왜곡률 비교
Fig. 8 Comparison of DR with/without filtering

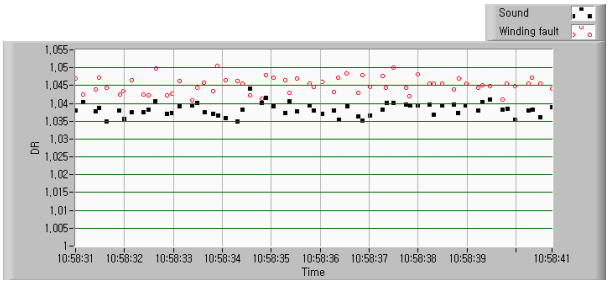
종래의 알고리즘과 제안한 알고리즘의 성능을 비교하기 위해 노이즈 포함 조건에서 표 1과 같은 조건으로 전류 신호를 생성하였다. 적은 턴 수의 권선단락 전동기는 상 별로 전류 진폭의 차가 크지 않으므로 시뮬레이션 조건에서는 전류 신호 생성 파라미터에서 전류 진폭의 크기를 1.02로 설정하여 진단이 어려운 조건에서 두 알고리즘의 성능을 비교하였다.

표 1 왜곡률 알고리즘 성능 비교를 위한 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameter for performance comparison of DR algorithm

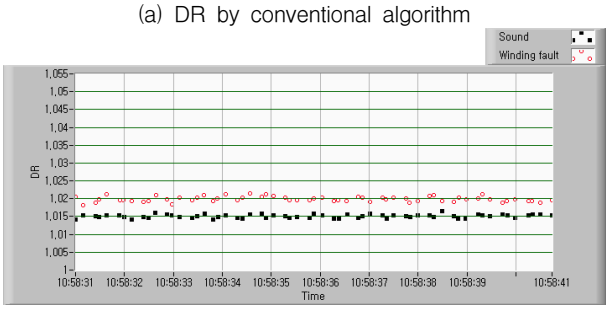
phase current	magnitude of current		sampling speed $v[S/s]$	no. of sample $n_a[S]$
	sound	Fault		
A	1	1.02	6000	6000
B	1	1		
C	1	1		

시뮬레이션 신호 생성 설정을 표 1과 같이 하면 식 (7)에 의해 각 채널별로 신호 수집 주기(T_s=1초)당 6000개의 샘플이 생성된다. 전류 신호의 주기 주파수는 60Hz이므로 T_s동안 팍스벡터는 원의 궤적을 60번 그린다. 따라서 신호생성 주기 동안 팍스벡터 패턴의 회전수 d는 60이다.

그림 9는 표 1의 동일한 시뮬레이션 신호 조건에서 1분 동안 1초에 한 번씩 두 가지 알고리즘에 의해 왜곡률을 연산하여 얻어진 그래프이다. 그림 9(a)는 종래의 알고리즘에 의해 얻어진 왜곡률 그래프이고, 그림 9(b)는 제안한 알고리즘에 의해 얻어진 그래프이다. 제안한 알고리즘에서는 왜곡률의 크기를 각 주기별로 연산하므로 그림 9의 그래프에 비해 왜곡률의 크기 변화가 안정되고 변동폭이 적어 정상과 고장 전동기의 구분이 명확하다.



(a) DR by conventional algorithm



(b) DR by proposed algorithm

그림 9 알고리즘에 따른 왜곡률 비교
Fig. 9 Comparison of DR on each algorithm

표 2는 두 가지 왜곡률 연산 알고리즘의 성능을 비교하기 위해 연산된 왜곡률을 분석한 결과이다. 먼저 노이즈가 포함되지 않은 신호를 통해 각 상태별 왜곡률의 참값(TV: True Value)을 연산하고, 그림 9와 그림 10의 각 상태별 샘플 데이터들의 평균값을 연산하였다. 그리고 이 참값과 평균값을 이용해 오차율(EF: Error Factor)과 상대표준편차(RSD: Relative Standard Deviation)를 연산하였다.

표 2 연산된 왜곡률의 분석
Table 2 Analysis of the calculated distortion ratio

algorithm	conventional		proposed	
state	sound	fault	sound	fault
TV	1	1.0131	1	1.0131
avg	1.0384	1.0451	1.0151	1.0199
EF[%]	3.8372	3.1542	1.5087	0.6680
RSD[%]	20.6638	21.1720	5.4353	8.4597

참값과 왜곡률 평균의 차(오차) 및 표준편차는 신호에 포함된 노이즈로 인해 생긴다. 이러한 노이즈 영향에 민감하게 반응하지 않고 참값에 가깝고 낮은 표준편차를 갖는 정확도 높은 왜곡률을 얻는 알고리즘이 우수한 성능을 갖는다.

표 2에서는 종래의 알고리즘이 제안한 알고리즘에 비해 왜곡률 연산 오차율이 정상 전동기에서는 경우 약 2.5배, 고장 전동기에서는 약 5.2배 더 크게 나타난다. 따라서 종래의 알고리즘에 비해 제안한 알고리즘에 의한 왜곡률이 더 높은 확도를 갖는다.

두 가지 알고리즘의 정밀도 비교를 위해 왜곡률 연산 결과의 상대표준오차를 계산하였다. 실험을 통해 얻어진 상대표준오차는 종래의 알고리즘의 왜곡률이 제안한 알고리즘의 왜곡률에 비해 정상 전동기에서는 약 3.8배, 고장 전동기에서는 약 2.5배 크다. 따라서 제안한 왜곡률 알고리즘이 종래의 왜곡률 알고리즘의 비해 정밀도가 더 높다.

3. 결 론

3상 유도전동기는 권선 턴 단락 고장이 발생하면 상 불평형으로 인해 상전류의 크기가 달라지므로 팍스벡터 패턴의 왜곡이 발생한다. 따라서 팍스벡터 패턴의 왜곡의 정도를 이용해 권선 단락 고장을 진단할 수 있다. 본 논문에서는 단락 고장 자동진단을 위해 팍스벡터 패턴의 왜곡을 계산하기 위한 새로운 왜곡률 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 저역통과 필터를 통해 필터링 된 전류 신호의 왜곡률을 이용한 진단은 필터링 되지 않았을 때보다 정상과 고장 전동기를 구분하기가 더욱 용이하므로 왜곡률을 이용한 권선 단락 진단을 위해서는 전류 신호의 필터링 과정이 필요하다.
- 제안한 알고리즘을 이용해 정상 및 고장 전동기의 왜곡률을 연산할 결과 종래의 왜곡률 알고리즘보다 왜곡률의 크기가 작고 변화폭이 작아 정상 전동기와 고장 전동기의 구분이 명확하다.
- 제안한 알고리즘과 종래의 알고리즘에 의해 얻어진 왜곡률을 비교·분석한 결과 제안한 알고리즘이 종래의 알고리즘에 비해 오차율 및 상대표준오차가 낮게 나타났다. 따라서 제안한 왜곡률 알고리즘이 종래의 왜곡률 알고리즘에 비해 정확도가 높아 성능이 우수함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] S. Williamson, and K. Mirzoian, "Analysis of cage induction motors with stator winding fault," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 7, pp. 1838-1842, July 1985.

[2] J Penman, H.G. Sendding. B. A Lloyd, and W.T Fink. "Detection and location of interturn short circuit in the stator windings of operating motors," IEEE Transactions of Energy Conversion. vol.9 no.4 pp.652-658, December 1994.

[3] R. A. Leonhard, and W. T. Thompson, "Vibration and stray flux monitoring for unbalanced supply and inter-turn winding fault diagnosis in induction machines," British Joural of Nondestructive testing. pp.211-215, July 1986.

[4] 한민관, 우혁재, 송명현, 박규남, “주파수 해석 방법에 의한 유도전동기의 고정자 권선 고장 진단,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.2313-2315, 2002년 7월.

[5] 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.

[6] J. Sottile. and J.L. Lohler, "An on-line method to detect incipient failure of tyrn insulation in random-wound motors," IEEE Transactions on Energy Conversion vol. 28. no.5 pp.1109-1117, September/October 1992.

[7] Sang-Bin Lee, R. M Tallam, T. G Habetler, "A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix", Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. IEEE 32nd Annual, vol 4, pp. 2217-2223, June 2001.

[8] A.J.M. Cardoso, S.M.A Cruz, D.S.B Fonseca, "Inter turn stator winding fault diagnosis in three phase induction motors, by Park's Vector Approach," IEEE Trans. vol. 14 no.3, pp.595-598, Sept. 1999.

[9] 한민관, 우혁재, 송명현, 박규남, “Park's Vector 기법을 이용한 소형 3상 유도전동기의 권선고장 진단," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.2070-2072, 2003년 7월.

[10] 송명현, 박규남, 한동기, 우혁재, “LabVIEW를 이용한 소형 유도전동기의 권선고장 자동진단,” Trans. KIEE vol. 55p, no. 4. 2006년 12월

[11] 송명현, 박규남, 한동기, 양철오, “Park's 벡터 패턴의 왜곡률을 이용한 고정자 권선 고장 자동진단,” Trans. KIEE. vol. 57p, no. 2, 2008.

[12] 양철오, 김종선, 김준영, 박규남, 송명현, “유도전동기의 권선 단락고장 자동진단을 위한 팍스벡터 패턴의 왜곡률 분석,” 광주전남지역 전기학회 합동 추계학술대회 논문집, pp.9-12, 2010년 12월

[13] 양철오, 김종선, 김준영, 박규남, 송명현, “유도전동기 권선 단락 상에 따른 팍스 벡터 패턴 왜곡률의 영향 해석,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.2075-2076, 2011년 7월.

저 자 소 개

양 철 오 (梁 哲 午)
2009년 순천대 전기공학과 석사 졸업, 2009년~현재 동 대학원 박사과정
Tel : 061-752-4928
E-mail : chualo75@naver.com

박 규 남 (朴 奎 南)
전남대 전기공학과 졸업 공박, 1984년~현재 순천대 전기제어공학과 교수
Tel : 061-750-3541
E-mail : knpark@sunchon.ac.kr

송 명 현 (宋 明 現)
고려대 전기공학과 졸업 공박, 1977년~1981년 삼성전자(주) 모터설계, 1988년~현재 순천대 전기제어공학과 교수
Tel : 061-750-3542
E-mail : mhsong@sunchon.ac.kr