

유도전동기의 권선 단락 상에 따른 팩스 벡터 패턴 왜곡률의 영향 해석

양철오*, 김종선**, 김준영*, 박규남*, 송명현*
 순천대학교*, LG 화학**

Interpretation of Influence Winding Short Phase of Induction Motor to Distortion Ratio of Park's Vector Pattern

Chul-Oh Yang*, Jong-Sun Kim**, Jun-Young Kim*, Kyu-Nam Park*, Myung-Hyun Song*
 Suncheon National University*, LG Chemistry**

Abstract - The stator winding faults diagnosis technique based on MCSA is as follows. Firstly, collecting the 3 phase motor currents, that signal is transformed by (d-q transform, i_d, i_q). Park's vector pattern, the circle that is down by d-q transformed currents(i_d, i_q). The circle 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.

In this study, distortion ratio of Park's vector pattern is suggested for Auto diagnosis of stator winding short fault and usefulness of distortion ratio is verified through simulation using LabVIEW program.

1. 서 론

전동기의 전기적인 고장의 대부분은 고정자 고장이 차지하고 있으며, 절연 파괴가 고장의 주된 원인이다. 따라서 턴 단락 고장의 초기 검출을 통해 전동기의 순차적인 손상을 막을 수 있고, 전동기 정지시간, 부가적인 인력 그리고 수리비용을 최소화함으로써 경제적인 손실을 상당히 줄일 수 있다.

전동기의 권선고장을 고장진행 초기에 진단하기 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 정상과의 차이를 구별하기 어려우며, 역상 전류를 이용한 방법[5-7]은 외부 환경에 영향을 많이 받는 단점이 있다.

고정자 권선 단락으로 인해 상 전류의 불 평형이 나타나는 것을 이용해, 고정자 권선 고장 및 고장 상 검출에 팩스 벡터(Park's Vector)를 이용한 방법[8-9]이 제시되었다. 그러나 이를 육안으로 확인하여 고장을 진단하기에는 적은 단락 턴 수의 패턴이 정상 패턴과 구분이 어렵다. 최근에는 팩스벡터 패턴의 찌그러짐의 정도를 수치적으로 연산하여 정상 전동기와 고장 전동기의 차이를 명확하게 구분하기 위한 연구[10-11]가 진행되었고, 팩스벡터 패턴의 찌그러짐의 정도를 왜곡률(DR : distortion ratio)로 정의하였다[11]. 그리고 팩스벡터 패턴의 왜곡률 연산에 있어 명확한 왜곡률 연산에 대한 연구를 위해 시뮬레이션 분석을 통한 왜곡률 연산에 대한 연구가 진행되었다[12]. 이 연구에서는 팩스벡터 패턴의 왜곡률을 분석하기 위해 LabVIEW를 이용해 가상의 실험 조건에 맞는 3상 전류신호를 생성하여 부하 변화에 따른 팩스벡터 패턴의 변화에 따른 왜곡률의 변화를 분석하였으나, 권선 단락 상의 위치에 대한 부분은 고려되지 않았다. 정확한 단락 고장 진단을 위해서는 고정자 권선 단락 고장이 발생한 상의 위치에 변화가 팩스벡터의 패턴과 그 패턴의 왜곡률에 어떤 영향을 미치는지를 연구하여 그 영향을 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 LabVIEW 프로그램을 이용해 고정자 권선 단락이 발생한 상의 위치가 변화할 경우의 유도전동기의 3상 전류 신호를 시뮬레이션 생성한다. 시뮬레이션 생성한 각 상별 전류 신호를 이용해 단락 고장이 발생한 상 위치 변화가 팩스벡터 패턴과 왜곡률에 미치는 영향을 분석함으로써 단락고장 진단 시 단락 고장 상 위치 차이로 인해 발생할 수 있는 문제를 예측하여 권선고장 진단 알고리즘을 명확히 하는데 그 목적이 있다.

2. 본 론

2.1 유도전동기 전류 신호의 팩스벡터 패턴

3상전류의 변수(i_A, i_B, i_C)로부터 팩스벡터의 성분(i_d, i_q)으로 변환하는 식은 식(2.1), (2.2)와 같이 정의한다.

$$i_d = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)i_A - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_C \quad (2.1)$$

$$i_q = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_C \quad (2.2)$$

여기서, 주파수와 진폭이 일치하고 각각 정확하게 120°의 위상차를 갖는 이상적인 전류 신호의 팩스벡터 변환 결과는 식 (2.3), (2.4)와 같다.

$$i_d = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_M \sin(\omega t) \quad (2.3)$$

$$i_q = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_M \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (2.4)$$

여기서, i_M 는 공급 전류의 피크값(A), ω 는 공급 각 주파수(rad/s), t 는 시간 변수 (s)

팩스벡터의 기법을 이용한 고정자 권선의 고장진단의 기본적인 원리는 단락된 턴 수가 증가할수록 공급 전류의 비대칭 성분이 증가한다는 데 있다. 비대칭 성분이 증가할수록 팩스벡터 패턴의 왜곡의 왜곡이 더 심해지므로, 이 왜곡의 정도를 수치적으로 연산하여 권선단락 고장을 진단할 수 있다.

팩스벡터 패턴의 왜곡은 두 벡터 성분(i_d, i_q)의 합성에 의해 결정되므로, 식 (2.5)를 이용해 팩스벡터의 스칼라 성분을 얻을 수 있다. 유도전동기의 상태가 이상적인 조건을 만족한다면 벡터의 크기는 $\sqrt{6}/2i_M$ 로 일정한 크기를 나타낼 것이다. 만약 권선의 턴 단락으로 인해 한 상 전류의 크기가 커진다면, 한 주기 동안의 팩스벡터의 스칼라는 편차가 발생할 것이다. 최근 한 논문에서는 팩스벡터 패턴의 찌그러짐의 정도를 왜곡률(DR : Distortion Ratio)이라고 정의하고, 식 (2.6)을 이용해 왜곡률을 수치적으로 연산하였다. 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 상 전류의 불평형이 큰 상태이다[11].

$$r = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (2.5)$$

$$DR = \frac{r_{max}}{r_{min}} \quad (2.6)$$

여기서, r 은 팩스벡터의 스칼라, r_{max} 는 팩스벡터 패턴의 가장 큰 벡터 스칼라, r_{min} 은 팩스벡터 패턴에서 가장 작은 벡터 스칼라

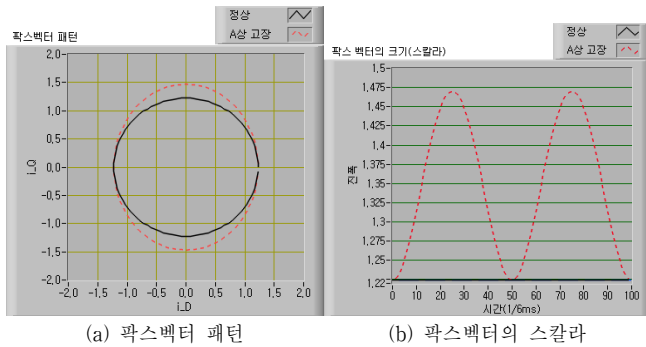
2.2 시뮬레이션 결과 및 검토

본 연구에서는 각 상 전류의 변화에 따른 팩스벡터 패턴의 변화를 알기 위해 가상의 신호 생성으로 팩스벡터 패턴의 변화를 시뮬레이션 하였다. 유도전동기의 상태가 이상적일 때는 표 2.1의 정상 전동기 조건과 같이 동일한 진폭 및 주기를 가지며 120°의 위상차를 갖는 3상 전류 신호가 입력될 것이다. 이 때 한 상에 권선단락이 발생하면 권선 단락이 발생한 상 전류 신호의 진폭은 증가할 것이므로, 각 상별 고장 전류 신호를 시뮬레이션 하기 위해서는 고장이 발생한 상 전류 신호의 진폭을 더 크게 설정해야한다. 따라서 표 2.1의 '각 상별 권선단락 고장 전동기 조건과 같이' A, B, C상의 전류 신호 진폭을 각각 0.1[A]만큼 더 크게 하여 각 상별 권선단락 고장 전동기의 전류 신호를 시뮬레이션 하였다.

〈표 2.1〉 팩스벡터 패턴 변화 시뮬레이션을 위한 전류 신호 파라미터

상 전류	정상 전동기				각 상별 권선단락 고장 전동기					
	신호 종류	진폭	주기	위상	신호 종류	진폭			주기	위상
						A상 고장	B상 고장	C상 고장		
A상	사인파	1	60Hz	0°	사인파	1.3	1	1	60Hz	0°
B상	사인파	1	60Hz	120°	사인파	1	1.3	1	60Hz	120°
C상	사인파	1	60Hz	240°	사인파	1	1	1.3	60Hz	240°

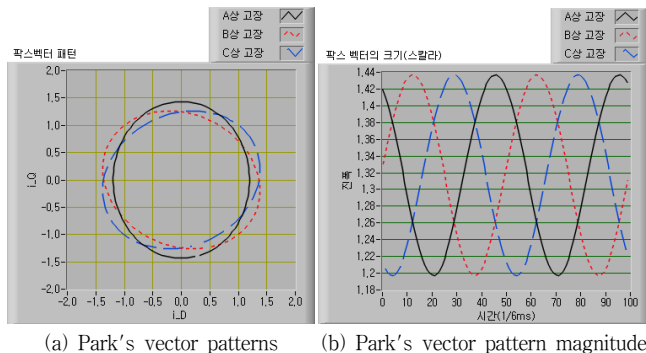
그림 2.1의 (a)는 표 2.1과 같은 조건의 파라미터로 두 가지 상태(정상 상, A상 권선단락) 전동기의 3상 전류 신호를 생성하여 팩스벡터 변환한 결과를 보여준다. 그림 2.1의 (b)는 식 (2.5)를 이용해 한 주기 동안 두 가지 팩스벡터 스칼라 성분(r)의 변화를 나타낸 것이다. 정상 전동기의 경우 한 주기 동안 r 의 변화가 없는 반면 턴 단락 고장 전동기는 r 의 변화가 한 주기 동안 두 번 발생하는 것을 확인할 수 있다[12].



〈그림 2.1〉 정상 전동기와 턴 단락 고장 전동기의 팩스벡터 패턴 스칼라(r) 비교

그림 2.2는 각 상 고장별 팩스벡터 패턴의 시뮬레이션 결과 그래프이다. 그림 2.2의 (a) 그래프는 각 상 고장별 팩스벡터 패턴을 보여주는 것으로, 고장이 발생한 상의 변화에 따라 i_d, i_q 평면에서 r_{max} 와 r_{min} 의 생성 위치가 변화되는 것을 확인할 수 있다. 각 고장 상태에서 r_{max} 의 위치를 각각 비교해보면 A상 단락 고장에서는 y축, B상 단락 고장에서는 2사분면 및 4사분면의 중앙 축, C상 단락 고장에서는 1사분면 및 3사분면의 중앙 축에 나타난다. 반면에 r_{min} 의 위치는 r_{max} 가 나타나는 축의 교차 축이 된다. 따라서 이를 해석하면 권선 단락의 여부뿐만 아니라 권선 단락이 발생한 상의 위치까지 진단할 수 있다.

그리고 권선 단락이 발생한 상의 변화에 따라 위상의 차이가 있을 뿐 진폭의 크기는 동일함을 확인할 수 있다. 따라서 왜곡률의 크기는 권선 단락 고장이 발생한 상의 위치에 관계없이 일정함을 예상할 수 있다.



〈그림 2.2〉 각 상 고장별 팩스벡터 패턴의 비교

표 2.2는 권선 단락이 발생한 상의 변화에 팩스벡터 패턴의 변화를 시뮬레이션하여 팩스벡터 패턴의 r_{max}, r_{min} 의 크기와 왜곡률을 연산한 결과이다. 위에서 예상했던 바와 같이 권선 단락이 발생한 상의 위치에 관계없이 팩스벡터 패턴의 r_{max}, r_{min} 의 크기와 왜곡률은 동일함을 확인할 수 있다. 따라서 유도전동기의 권선단락 고장 진단 시, 권선 단락이 발생한 상의 위치에 관계없이 왜곡률을 이용하여 동일한 문턱값으로 권선단락 고장을 진단할 수 있다.

〈표 2.2〉 단락된 상 변화에 따른 팩스벡터 패턴의 r_{max}, r_{min} 과 왜곡률

	A상 단락	C상 단락	C상 단락
r_{max}	1.47	1.47	1.47
r_{min}	1.22	1.22	1.22
DR	1.2	1.2	1.2

3. 결 론

왜곡률을 이용하여 권선단락 고장을 진단하는데 있어, 단락이 발생한 상의 위치에 따른 팩스벡터 패턴의 모양의 변화와 그 변화가 왜곡률에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 LabVIEW 프로그램을 이용해 전류 신호를 시뮬레이션 생성하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 권선단락 고장이 발생한 상의 위치 변화에 따라 i_d, i_q 평면에서 r_{max} 와 r_{min} 의 생성 위치는 달라진다. 따라서 팩스벡터 패턴의 r_{max} 와 r_{min} 의 생성 위치를 해석하면 권선 단락의 여부뿐만 아니라 권선 단락이 발생한 상의 위치까지 진단할 수 있다.
- 권선 단락이 발생한 상의 위치에 관계없이 팩스벡터 패턴의 r_{max}, r_{min} 의 크기와 왜곡률은 동일하므로, 유도전동기의 권선단락 고장 진단 시 권선 단락이 발생한 상의 위치에 관계없이 왜곡률을 이용하여 동일한 문턱값으로 권선단락 고장을 진단할 수 있다. 이를 바탕으로 팩스벡터 패턴의 r_{max} 와 r_{min} 의 생성 위치를 수치적으로 해석하여 권선단락이 발생한 상의 위치를 자동으로 진단할 수 있는 알고리즘에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Williamson, and K. Mirzoiian, "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. SENDING, 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 Journal 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 turn 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. 2001 IEEE 32nd Annual, Volume 4, pp 2217-2223 17-21 June 2001.
- [8] 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.
- [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.w. 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, 김중선, 김준영, 박규남, 송명현, "유도전동기의 권선 단락 고장 자동진단을 위한 팩스벡터 패턴의 왜곡률 분석," 광주전남지역 전기학회 합동 추계학술대회 논문집, pp.9-12, 2010년 12월