

한 상 전류를 이용한 유도전동기 센서리스 회전자 바 고장 진단기법

양철오*, 이경석*, 표연준*, 박규남*, 송명현*
순천대학교*

Sensorless Diagnosis method of Rotor Bar Fault of Induction Motor Using the One Phase Current

Chul-oh Yang*, gyeong-seok Lee*, Yeon-jun Pyo*, Kyu-nam Park*, Myung-hyun Song*
Sunchon National University*

Abstract - 본 연구에서는 소형 유도전동기의 회전자 바 고장을 자동 진단을 함에 있어, 한 상 전류를 이용하여 센서 없이 회전자 바 고장을 진단하는 방법을 제안하였다. 먼저 한 상 전류를 이용하여 유도전동기의 회전 속도를 추정하고, 추정 된 유도전동기의 회전 속도를 이용해 회전자 바 고장의 특징 주파수를 계산하였다. 또 계산된 특징 주파수 대역의 주변의 일정한 구간을 스캐닝하여 스캐닝 구간의 피크 값을 추출하는 방법으로 유도전동기 회전속도 추정의 오차를 보정함으로써 정확한 진단이 가능하게 하였다.

$$f_{b1} = (1 - 2s)f_e \tag{2}$$

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \tag{3}$$

여기서, f_e 는 공급전원 주파수, s 는 슬립, N_s 는 전동기의 동기속도, N 은 전동기의 회전속도

2.1.2 실효 전류(I_{RMS})

전력량은 일정시간 동안 부하에 전류를 흘렸을 때 발생시키는 열량을 나타내며 이것을 식으로 표현하면, 식 (4)와 같다. 여기서 I 는 실제로 부하에 흐르는 전류이며 열을 발생시키는 에너지가 되고, 실제로 부하에 흐르는 전류 I 를 실효전류라 한다.

$$W = P \cdot T = V \cdot I \cdot T = \frac{V^2}{R} T [W] \tag{4}$$

식 (4)를 이용하여 전류의 실효값을 계산하면 최종적으로 최대 전류 (I_m)와 실효 전류(I_{RMS})의 관계식은 식 (5)와 같으며, 식 (5)는 정현파인 경우에 유효하다[5]. 유도전동기 부하가 감소하면 유도전동기 공급전원의 실효 전류(I_{RMS}) 역시 감소한다.

$$I_{RMS} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \tag{5}$$

2.2.1 전동기 회전속도 추정

<그림 1>에서 점선은 전동기의 회전속도에 따른 한 상 전류의 I_{RMS} 변화를 나타내고 각각의 실선은 1구간 추정 방법과 4구간 추정 방법 간 비교 그래프이다. 정상운전 구간에서는 유도전동기의 회전속도가 증가하면 전동기의 부하가 감소함에 따라 상 전류의 I_{RMS} 가 감소함을 점선의 그래프를 통해 알 수 있다. 여기서, 유도전동기의 회전속도 증가에 따라 상 전류의 I_{RMS} 는 선형적으로 감소하지 않으므로, 본 연구에서는 보다 정확한 유도전동기 회전속도 추정을 위해 4구간으로 분할하여 회전속도를 추정하였다.

1. 서 론

유도전동기의 회전자 바 고장에 따른 토크성능 저하는 파손된 회전자 바가 1개(40개중)인 경우 성능저하는 2~4[%]이고 3~5개의 파손인 경우 10~15[%]로 연구되었다[1]. 유도전동기 회전자 바 고장 진단은 회전자 바에 흐르는 전류의 스펙트럼 분석으로 행해진다. 전류의 스펙트럼 분석은 회전자 바 고장 특징 주파수에서의 진폭의 크기를 비교하는 방법이다. 유도전동기 회전자 바 고장의 특징 주파수 대역은 부하 변화에 따른 슬립에 의해 계산되고, 슬립은 전동기의 회전속도에 의해 구해지므로, 유도전동기 회전자 바 고장을 위해서는 유도전동기의 회전속도 측정이 필요하다.

회전속도 측정을 위해 레졸버나 펄스 엔코더 등의 기계적인 센서를 이용하였으나 설치 조건의 제약과, 가격이 고가인 문제가 있다. 유도전동기의 회전자 바 고장의 진단을 위해서는 정확한 회전속도 추정을 요하지 않는다. 따라서 전류 신호를 이용해 유도전동기의 부하 변화에 따른 대략적인 회전속도 추정을 이용하여 회전자 바 고장을 진단 할 수 있다.

최근에는 센서 없이 회전자 바 고장을 자동으로 진단하기 위해 부하 변화에 따라 팩스벡터 패턴의 크기가 변화하는 점을 이용해 특징 주파수 대역을 추정하는 방법이 제안되었다[2]. 이 방법은 전동기 공급전원의 3상 전류신호를 모두 수집해야 되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 한 상의 전류만으로 유도전동기의 회전속도를 간단하게 추정하여 회전자 바 고장의 특징 주파수 진폭의 크기를 찾아내는 방법을 제안하였다.

2. 본 론

2.1.1 회전자 바 고장 특징 주파수

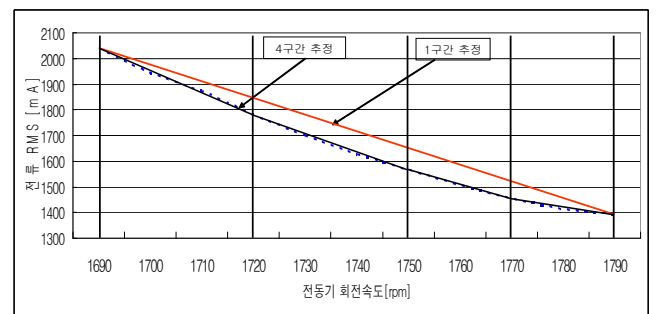
회전자 바 고장은 고정자 선 전류에서 관측되는 회전자 바 결합 주파수 성분을 이용하여 회전자 바 고장을 검출 할 수 있다. 선 전류 스펙트럼상의 회전자 바 고장의 특징 주파수는 식(1)과 같이 k 값에 따라 전기적 공급 전류 주파수 주변 측파대에서 순차적으로 발생한다[3].

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

여기서, f_b 는 회전자 바 결합 주파수, f_e 는 공급전류 주파수, s 는 슬립(slip), k 는 상수

f_b 의 $(1 - 2ks)f_e$ 성분(the Lower Sideband : LSB)은 회전자 바 고장으로 인하여 발생하게 되고, f_b 의 $(1 + 2ks)f_e$ 성분(the Upper Sideband : USB)은 속도 진동의 결과로서 발생한다. f_b 의 크기는 LSB가 USB보다 진폭의 크기가 크게 나타나고, k 가 커질수록 f_b 의 진폭의 크기는 작아진다[4].

본 연구에서는 $k=1$ 일 때 LSB의 회전자 바 결합 특징 주파수를 f_{b1} 이라 하고 식 (2)와 같이 정의하고, 유도전동기 회전자 바 고장 진단을 위해 f_{b1} 을 이용하였다. 슬립(s)은 유도전동기의 동기속도(N_s)와 회전속도(N)를 이용해 식 (3)에 의해 구할 수 있다.



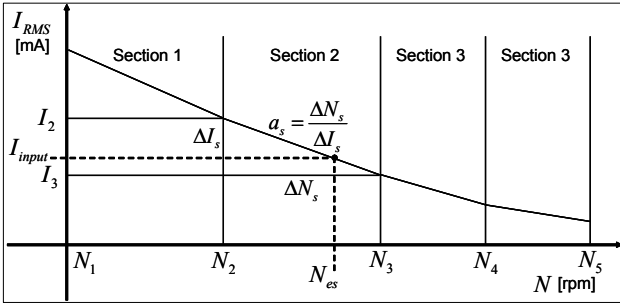
<그림 1> I_{RMS} -회전속도 관계(---) 및 추정 방법 간 비교(—)

<표 1>은 4구간 분할 회전속도 추정을 위해 실험을 통해 얻은 다섯 개의 분할 점의 회전속도와 설정 I_{RMS} 이다. <표 1>의 분할 점에서의 회전속도와 설정 I_{RMS} 의 파라미터는 분할 점의 순번(n)에 따라 각각 N_n, I_n 으로 표기하였다.

<표 1> 기준점에서의 회전속도와 설정 I_{RMS}

N_n	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
N [rpm]	1690	1720	1750	1770	1790
I_n	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
I_{RMS} [mA]	2189	1859	1647	1524	1441

<그림 2>는 유도전동기의 회전속도 추정 개념도이다. 유도전동기 한 상전류의 RMS(I_{input})에 따라 구간의 순번(s)이 정해지고, 각 분할점의 파라미터 I_n , N_n 을 이용해 식 (6)에 의해 구간에서의 기울기(a_s)를 구한다. 또 구해진 기울기와 기준 파라미터를 이용해 식 (7)에 의해 유도전동기의 추정 회전속도(N_{es})를 계산한다.



<그림 2> 유도전동기 회전속도 추정

$$a_s = \frac{\Delta N_s}{\Delta I_s} = \frac{N_{s+1} - N_s}{I_{s+1} - I_s} \quad (6)$$

$$N_{es} = N_{s+1} - a_s (I_{input} - I_s) \quad (7)$$

여기서, a_s 는 각 구간에서의 기울기, 아래첨자 s는 구간의 순번, N_{es} 는 추정된 유도전동기의 회전속도, I_{input} 은 유도전동기 한상전류의 I_{RMS} , I_n 은 분할 점에서의 I_{RMS} 파라미터, N_n 은 분할 점에서의 N 파라미터

2.2.2 유도전동기 회전속도 추정 오차

유도전동기의 회전속도를 추정하여 추정된 회전속도에 의해 $k=1$ 일 때의 추정된 회전자 바 특징주파수(f_{es})는 식 (2), (3)를 이용해 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$f_{es} = \left(1 - \frac{N_s - N_{es}}{N_s}\right) f_e \quad (8)$$

회전속도 추정오차(N_{er})는 식 (9), 특징주파수 추정오차(f_{er})는 식 (10)과 같이 정의하고 식 (11)~(13)을 이용해 식 (14)와 같이 f_{er} 과 N_{er} 의 관계식을 유도할 수 있다.

$$N_{er} = N - N_{es} \quad (9)$$

$$f_{er} = f_{bl} - f_{es} \quad (10)$$

$$f_{er} = 2f_e \left(-\frac{N_s - N}{N_s} + \frac{N_s - N_{es}}{N_s} \right) \quad (11)$$

$$f_{er} = 2f_e \left(\frac{N - N_{es}}{N_s} \right) \quad (12)$$

$$f_{er} = 2 \times 60 [Hz] \times \frac{N_{er} [rpm]}{1800 [rpm]} \quad (13)$$

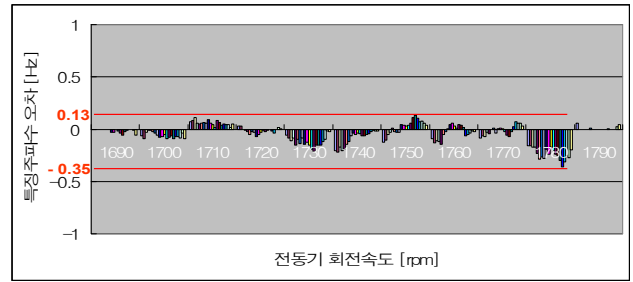
$$f_{er} = \frac{2}{30} N_{er} [Hz] \quad (14)$$

2.3 실험 결과 및 검토

본 연구에서는 한 개의 고정자에 정상 회전자와 1 broken bar 회전자를 교체해가며 두 가지의 회전자 바 상태별 유도전동기 샘플을 이용하여 실험하였다. 다이노모메타를 이용해 유도전동기 회전자 바 상태별 회전속도를 1690[rpm]부터 1790[rpm]까지 10[rpm]씩 증가시키며 20회 반복해서 한 상 전류의 전류 신호를 샘플링 했다.

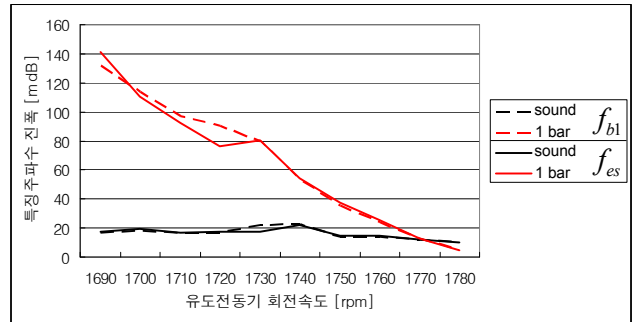
<그림 3>은 1 broken bar 샘플 유도전동기의 I_{RMS} 를 이용해 f_{bl} 을 추정한 결과 f_{er} 을 구한 결과이다. 실험 결과 특징주파수 추정오차(f_{er})의 최대 최소 값은 각각 0.13[Hz], -0.35[Hz]으로 오차의 크기는 미세하다. 따라서 본 연구에서는 특징 주파수 추

정오차 여유를 고려하여 f_{es} 의 $\pm 0.4[Hz]$ 구간을 스캐닝하여 진폭의 피크 값을 찾아 f_{bl} 의 진폭의 크기를 찾아내는 방법을 제안하였다.



<그림 3> 특징주파수 추정 오차

<그림 4>는 정상 전동기와 1 broken bar의 전동기의 스펙트럼 분석에 의해 f_{bl} 에서 진폭의 크기와 f_{es} 를 이용해 검출한 진폭의 피크 값을 비교한 그래프이다. <그림 4>에서 점선은 종래의 방법대로 전동기의 실제 회전속도를 이용하여 계산된 f_{bl} 에서의 진폭의 크기 그래프이고, 실선은 본 연구에서 제안한 방법으로 추정된 전동기 회전속도를 이용하여 계산된 f_{es} 의 $\pm 0.4[Hz]$ 구간을 스캐닝하여 검출한 진폭의 피크 값 그래프이다. 종래의 방법으로 얻어낸 결과 그래프와 본 연구에서 제안한 방법으로 얻어낸 결과 그래프에 차이가 없으며, 회전속도가 1770[rpm] 이하에서는 정상 유도전동기와 1 broken bar 유도전동기의 진폭의 크기 차이가 있어 진단이 가능함을 확인하였다.



<그림 4> f_{bl} 의 진폭과 f_{er} 의 $\pm 0.4[Hz]$ 구간 진폭의 피크값

2. 결 론

본 연구에서는 센서 없이 한 상 전류를 이용하여 유도전동기의 회전속도를 추정하여 회전자 바 고장을 진단할 수 있는 기법을 제안하였다. 한상 전류를 이용하여 얻어낸 특징주파수 구간의 진폭의 피크 값을 종래의 방법에 의해 얻어낸 특징주파수의 진폭의 크기와 비교하여 그 차이가 없음을 확인하였다. 이로써 한 상 전류만을 이용하여 센서 없이 유도전동기의 회전자 바 고장을 진단할 수 있음을 입증하였다.

유도전동기 회전속도가 1770[rpm]보다 빠른 속도의 경 부하 구간에서는 정확한 진단이 어렵다. 따라서 앞으로 경 부하에서 진단의 정확도 향상을 위한 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] Elkasabgy NM, Easthan AR & Dawson GE, "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine", IEEE Transactions on Industry applications 28(1), pp165-171, 1992.
- [2] 송명현, 박규남, 한동기, 양철오, "팍스벡터 패턴을 이용한 회전자 바 고장 자동진단", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp18-20, 2007
- [3] O. V. Thomson. and M. Dalva, "Methods of condition monitoring and fault diagnosis for induction motors", ETEP Journal, Vol. 8. No. 5, pp. 383-395, 1998.
- [4] G. B. Kilman, R.A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott, M. W. Madden, "Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors", IEEE Trans. Energy Conv. Vol. EC-3. No. 4, pp. 873-879, December 1988.
- [5] 정재천, 양보석, 송명현, "전원 신호분석 기술에 의한 회전기 기 진단", 인터비전 pp. 241-250, 2008년 8월.