

회전자 슬롯 고조파를 이용한 유도전동기의 회전속도 검출

양철오\*, 이경석\*\*, 이대성\*, 박규남\*, 송명현\*  
 순천대학교\*, POSCO\*\*

Detection of Rotating Speed of Induction Motor Using the Rotor Slot Harmonic

Chul-Oh Yang\*, Gyeong-Seok Lee\*\*, Dae-Sung Lee\*, Kyu-Nam Park\*, Myung-Hyun Song\*  
 Suncheon National University\*, POSCO\*\*

**Abstract** - Now a days, the induction motor is widely used in industry automation. Without monitoring the motor fault, maintenance cost is increased undesirably high. The slip frequency is included in the feature frequency, so rotating rotor speed is needed. In this paper, a sensorless motor speed estimation method, rotor slot harmonic(RSH) method is suggested and a solution of rotor bar diagnosis is proposed for motor running with light-load. When the rotor is rotating, it shows the harmonic signal of back-emf voltage related with number of rotor slot. So from the power spectrum of current signal, we can find the rotor speed.

같이 구할 수 있다.

$$B_{ag}(\varphi_s, \theta) = MMF_{ag}(\varphi_s, \theta) \cdot P_{ag}(\varphi_s, \theta) \tag{2.1}$$

여기서,  $\varphi_s$ 는 고정자 각 위치,  $\theta$ 은 기계적 회전자 위치,  $MMF_{ag}$ 는 고정자 전류에 의한 공극 기자력,  $P_{ag}$ 는 공극 투자도

공극 투자도의 변화는 회전자 슬롯과 회전자의 편심에 의해 발생한다. 회전자 슬롯에 의해 발생하는 전류 신호의 슬롯 고조파는 식 (2.2)에 의해 얻어질 수 있다[12].

$$f_{sh} = f_e \left( (kR + n_d) \left( \frac{1-s}{p/2} \right) + n_w \right) \tag{2.2}$$

여기서,  $k=0,1,2,\dots$ ,  $R$ 은 회전자 슬롯의 수,  $n_d=0,\pm 1,\dots$ 는 회전자 편심의 순서,  $s$ 는 슬립,  $p$ 는 극 수,  $n_w=\pm 1,\pm 3,\dots$ 는 공극 기자력 고조파의 순서,  $f_e$ 는 전원 주파수

유도전동기의 회전자 슬롯 고조파(RSH)는 첫 번째 RSH( $k=1, n_d=0, n_w \pm 1$  일 때)에서 가장 분명하게 나타난다. 따라서 가장 분명하게 나타나는 첫 번째 고조파 주파수는 식 (2.3)를 이용해 얻을 수 있다. 그리고 두 회전자 슬롯 고조파( $f_{sh1}, f_{sh-1}$ )의 주파수 대역의 차는 전원 주파수( $f_e$ )의 두 배이다. 따라서 두 회전자 슬롯 고조파( $f_{sh1}, f_{sh-1}$ )은 식 (2.4)와 같은 조건을 만족한다.

$$f_{sh \pm 1} = \left( R \left( \frac{1-s}{p/2} \right) \pm 1 \right) f_e \tag{2.3}$$

$$f_{sh1} = f_{sh-1} + 2f_e \tag{2.4}$$

2.2 실험 결과 및 검토

2.2.1 실험 장치 구성

실험에 사용된 효성 1마력 유도전동기는 극수( $p$ )는 4극, 회전자 슬롯 수( $R$ )는 44, 동기속도( $N_s$ )는 1800[rpm], 정격 속도( $N_r$ )는 1690[rpm]이다. 이 값들을 식 (2.3)에 대입해 정리하면 식 (2.5)를 얻을 수 있다. 따라서 식 (2.5)를 이용해 실험 전동기의 회전속도( $N$ )에 따른 회전자 슬롯 고조파( $f_{sh \pm 1}$ )를 연산 할 수 있다.

$$f_{sh \pm 1} = \left( 22 \left( 1 - \frac{1800 - N}{1800} \right) \pm 1 \right) 60 \tag{2.5}$$

그림 2.1은 실험에 사용된 실험장치의 구성도이다. 실험에 사용된 전동기는 효성 3상 1마력 유도전동기이다. 유도전동기의 부하 효과를 위해 다이나모메타를 연결하여 유도전동기의 회전속도를 제어하였다. 전류 신호 검출을 위해 FLIKE사의 i5s AC Current Clamp를 한 상에 연결하였으며, USB-DAQ 보드는 NI(National Instrument)사의 USB 9215A with BNC를 사용하였고, USB 2.0을 이용하여 팬티엄 노트북 컴퓨터와 연결하여 전류 신호를 수집하였다. 본 연구에서는 다이나모메타를 이용해 전동기 회전속도를 세 가지 속도(1690[rpm], 1750[rpm], 1790[rpm]) 구간에서 운전시켜가며 회전속도 검출 시험을 수행하였다. 실험을 통해 생성된 전류 신호는 DAQ-board 를 통해 수집되어 노트북의 LabVIEW 프로그램을 이용하여 분석하고 그 결과를 디스플레이 하였다.

1. 서 론

유도전동기는 전원공급이 용이하고 속도제어를 위한 장치 구성비용이 저렴하다는 구조적인 강점 때문에 많은 주요 기기의 구동장치로 산업영역 전반에 걸쳐 폭넓게 사용되고 있다. 전동기의 결함 상태는 전동기의 회전속도와 밀접한 상관관계를 가지므로 전동기의 상태 진단에 있어 회전속도의 측정은 매우 중요한 부분이다. 특히 전류의 스펙트럼 분석에 의한 회전자 바 고장 진단에서는 유도전동기의 회전 속도 측정이 필수적으로 선행되어야 한다. 그러나 기계적인 센서는 주변 환경이나 전동기의 설치조건에 따라서 속도 측정이 어려운 경우가 많을 뿐만 아니라 고가의 비용을 부담해야 하는 단점이 있어, 속도 센서리스 회전속도 추정에 대한 연구가 수행되었다.

센서리스 회전속도 예측에 대한 연구에는 전동기의 모델링을 바탕으로 연구가 활발히 진행되어 왔다[2-4]. 하지만 이러한 방법들은 시뮬레이션 조건에서는 정확한 속도 추정 성능을 가지지만, 부하의 상태나 온도에 따라 가변되는 고정자 및 회전자 저항으로 인해 실제 유도전동기의 속도를 정확하게 추정하기 어려운 단점이 있다. 따라서 정확한 속도 추정을 요하는 상태 진단 분야에서는 적용이 어렵다.

전동기의 상태 진단을 위한 센서리스 유도전동기의 회전속도 추정에는 주로 회전자의 편심 또는 회전자 슬롯 하모닉 주파수 스펙트럼을 이용한 회전수 예측 방법을 사용한다[5]. 국외에서는 이미 회전자 슬롯 고조파 주파수 스펙트럼을 이용한 유도전동기의 회전 속도 추정에 대한 연구가 진행되어왔다[6-11]. 이 속도 추정 방법은 정상 상태 운전 구간에서 비교적 정확하게 유도전동기의 회전속도를 추정할 수 있다. 따라서 정상상태 운전구간에서 정확한 회전속도 측정이 필요로 하는 회전자 바 고장 및 전동기 상태 진단 분야에 유용하게 적용할 수 있다.

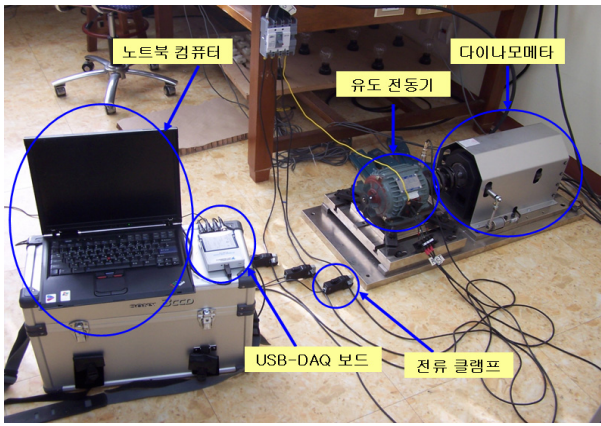
본 연구에서는 회전자 슬롯 고조파 주파수 스펙트럼을 이용한 회전속도 검출을 위해 유도전동기의 전류 신호 수집 및 분석을 위한 실험을 수행하였다. 1마력 3상 유도전동기 전류 신호의 주파수 스펙트럼 분석을 통해 회전자 슬롯 고조파 성분과 전동기의 회전속도와의 상관관계를 해석함으로써 회전자 슬롯 고조파를 통해 전동기의 회전속도를 검출하였다. 그리고 부하상태를 변화시켜가며 정상상태 운전구간에서 회전속도 검출이 가능한지 확인하였다.

2. 본 론

2.1 회전자 슬롯 고조파를 이용한 유도전동기 회전속도 측정

유도전동기의 회전자 바 회전할 때 슬롯은 공극에서 고조파 성분을 만들어내고, 이로 인해 고정자 권선에 고조파 전압이 유도되므로 상 전류 고조파 성분이 생성된다. 따라서 이를 이용해 고정자 상 전류에서 회전 속도에 따른 슬립 고조파 성분을 찾는 것이 가능하다. 공극에서 회전자 슬롯의 고조파는 회전속도에 비례하는 주파수를 발생시킨다. 따라서 유도전동기의 회전속도는 상 전류의 슬롯 고조파 주파수를 이용하여 추정할 수 있다[7].

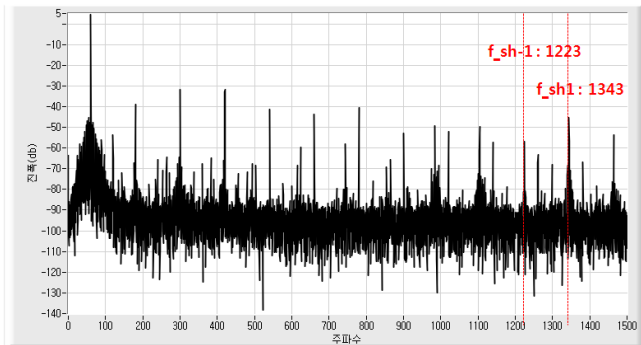
속도와 관련된 전류 고조파는 공극 기자력(mmf)과 상호작용하는 공극 투자도( $P_{ag}$ )의 변화에 의해 발생하고, 공극 자속 밀도는 식 (2.1)과



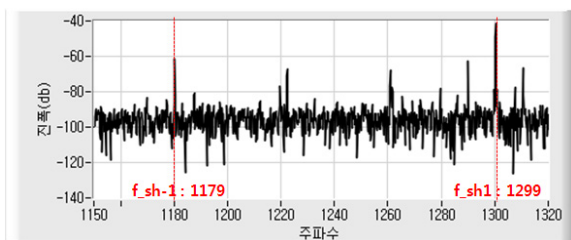
〈그림 2.1〉 실험장치 구성도

### 2.2.2 RSH를 이용한 회전속도 검출

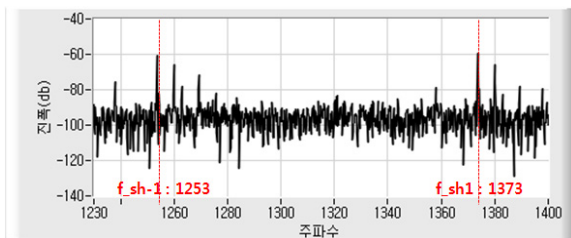
그림 2.2는 60[Hz]의 전원 전압에서 1750[rpm]으로 운전되는 실험 전동기 전류 신호의 주파수 스펙트럼을 보여준다. 여기서  $n_w = 1$ 일 때 회전자 슬롯 고조파 주파수( $f_{sh1}$ )는 1343[Hz]이고  $n_w = -1$ 일 때의 회전자 슬롯 고조파 주파수( $f_{sh-1}$ )는 1223[Hz]이다. 두 주파수 대역을 비교하면  $f_{sh1}$ 은 식 (2.4)와 같이  $f_{sh-1}$ 보다 120[Hz] 높은 주파수 대역에서 발생한다. 그리고 두 주파수 대역의 진폭의 크기를 비교해보면  $f_{sh1}$ 은  $f_{sh-1}$ 보다 높은 주파수 대역에서 발생함에도 불구하고 진폭의 크기가 더욱 분명하게 나타남을 알 수 있다.  $f_{sh1}$ 은  $f_{sh-1}$ 에 비해 진폭의 크기가 클 뿐만 아니라, 더 높은 주파수 대역에서 발생하므로 주변 주파수의 간섭이 적어 유도전동기 회전속도 추정에 적용하기가 유리하다.



〈그림 2.2〉 회전자 슬롯 고조파 주파수( $f_{sh \pm 1}$ )



(a) 1690[rpm]일 때 회전자 슬롯 고조파 주파수



(b) 1790[rpm]일 때 회전자 슬롯 고조파 주파수

〈그림 2.3〉 회전자 슬롯 고조파 주파수( $f_{sh \pm 1}$ ) 발생 대역

그림 2.3은 유도전동기의 회전속도가 각각 1690[rpm], 1790[rpm]으로 운전되는 실험 전동기 전류 신호의 주파수 스펙트럼에서 회전자 슬롯 고조파가 발생하는 주변 대역을 확대한 그래프이다. 식 2.4에 의해 얻어진 1690[rpm] 및 1790[rpm]에서의 회전자 슬롯 고조파는 각각 그림에 표기된 주파수이고, 해당 주파수에서 회전자 슬롯 고조파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이 회전자 슬롯 고조파를 검출하면 유도전동기의 회전속도를 추정할 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 유도전동기 회전자의 회전에 의해 발생하는 회전자 슬롯 고조파 성분을 분석하여 유도전동기의 회전속도 성분을 검출하는 방법을 제시하고 실험하였다. 실험을 통해 회전자 슬롯 고조파 성분을 이용한 회전속도 검출에서 다음과 같은 결과를 확인하였다.

유도전동기의 회전에 따라 발생하는 두 가지의 회전자 슬롯 고조파 주파수( $f_{sh \pm 1}$ ) 중  $f_{sh1}$ 가  $f_{sh-1}$ 에 비해 120[Hz] 더 높은 주파수 대역에서 발생하면서도 진폭이 더 크게 나타나므로,  $f_{sh1}$ 을 이용해 회전속도를 추정하는 것이 더 유용함을 확인하였다.

실험에 사용된 유도전동기의 정상상태 운전구간 내의 세 가지 회전속도 구간(1690[rpm], 1750[rpm], 1790[rpm])에서 운전시켜가며 실험한 결과, 각 속도 구간에서 회전속도에 따른 회전자 슬롯 고조파 대역에서 주변의 주파수보다 큰 진폭이 발생한다. 따라서 이 큰 진폭을 갖는 회전자 슬롯 하모닉 주파수 성분 검출을 통해 유도전동기의 회전속도 추정이 가능하다.

이러한 연구 결과를 바탕으로 유도전동기의 전류 신호를 측정 분석하여 회전자 슬롯 고조파 성분을 이용해 실시간으로 전동기의 회전속도를 추정하면 유도전동기의 회전자 바 고장 분야에 적용이 가능하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Dae-Cheul Shin, Young-Hwan Kim, "A Study of Rotor Fault Detection for the Induction Motor Using Axial Leakage Magnetic Flux," Journal of KIEE, Vol. 20, No. 1, January 2006.
- [2] Toshiyuki Kanmachi and Isao Takahashi, "Sensorless speed control of an induction motor with no influence of secondary resistance variation," IEEE IAS Annual Meeting conference record, pp 408-413, 1993.
- [3] Ichiro Miyashita, Akio Imanagida and Takashi Koga, "Recent industrial application of speed sensorless vector control in japan," Preceeding IECON'94, pp.1573-1578, 1994.
- [4] Hisao Kubota and Kouki Marsure, "Speed sensorless field oriented control of induction motor with rotor resistance adaption," IEEE Trans. Industry Applications, vol30, no.5, pp.1219-1224, 1994.
- [5] 정계천, 양보석, 송명현, "전원 신호분석 기술에 의한 회전기 진단," 인티비전 pp.241-250, 2008.
- [6] R Blasco, M Sumner and G M Asher, "Speed measurement of inverter fed induction motors using the FFT and the rotor slot harmonics", Power Electronics and Variable-Speed Drives, Fifth International Conference on, pp.470-475, Oct 1994.
- [7] Kevin D. Hurst, Thomas G. Habetler, " Sensorless speed measurement using current harmonic spectral estimation in induction machine drives," Power Electronics, IEEE Transactions on, pp.66'-73, Jan 1996.
- [8] Pillay, P, Xu, Z, "Motor current signature analysis," IAS 96, Conference Record of the IEEE, pp.587-594, 1996.
- [9] Pillay, P, Xu, Z, "Labview implementation of speed detection for mains-fed motor using motor current signature analysis," Power Engineering Review, IEEE, pp.47-48, June 1998.
- [10] Nandi, S. "Slot permeance effects on rotor slot harmonics in induction machines," IEMDC'03. IEEE International, pp.1633-1639, June 2003.
- [11] Qianxiang Li, Jingtao Hu, "A high accuracy FFT algorithm for induction motor sensor-less speed estimation," ICEMS. International Conference on, pp. 851-854, Oct. 2008.
- [12] P. L. Alger, Induction Machines-Their Behavior and Uses. New York: Gordon and Breach, 1970.