

복합 고장을 갖는 3상 농형 유도 전동기의 특성 해석

우경일*, 주대석*, 박상훈*, 박한석*
부경대*

Analysis of 3-phase Squirrel Cage Induction Motor with Mixed Fault

Kyungil WOO*, Daesuk JOO*, Sanghoon PARK*, Hanseok PARK*
Pukyong National University*

Abstract - 본 논문은 정적 편심과 회전자 도체 봉 파손에 대해서 각각 특성 해석을 한 후, 두 고장이 복합된 상태를 특성 해석하였다. 해석 대상 전동기는 coupled magnetic circuits 방법으로 모델링 하고, 시뮬레이션하였다. 특성 해석에 필요한 중요 파라미터인 인덕턴스는 winding function 이론으로 계산하였다. 시뮬레이션 결과 중에서 고장자 전류를 전류 신호 분석 기술로 특성 해석을 하였다. 특성 해석 결과에서 고장 상태가 변하면 특정 주파수의 크기가 변하는 것을 알 수 있었다. 복합 고장에서는 정적 편심은 아래쪽 즉 대역 성분의 크기를 증가시키고, 회전자 도체 봉 파손은 기본 특이 주파수 주변에 기생 성분을 만드는 것을 알 수 있었다.

1. 서 문

유도 전동기는 구조가 간단하고 견고하며 가격이 비교적 저렴하고 취급이 편리한 등의 장점으로 산업계에서 가장 널리 사용되고 있다. 그래서 안정적인 기능 유지와 신뢰성 확보를 통한 품질 향상, 수명 연장, 그리고 정비 비용의 절감은 매우 중요하다. 상태 감시와 고장 진단의 목적은 전동기의 이상이나 고장 때문에 생기는 정비 비용, 생산 손실 등의 경제적인 손실을 줄이려는 것이다.

전동기 설비에 응력이 가해지면 손상이 발생하고 이는 성능 저하로 이어지며 결국에는 고장에 이르게 된다. 실제 유도 전동기에서는 공극 편심이 존재하는 것이 일반적이다. 그리고 회전자 도체 봉 파손은 농형 유도 전동기의 보편적인 결함이다. 하지만, 회전자 도체 봉 파손에 의한 영향보다 2차 영향이 더욱 심각하다 [5].

상태 감시와 고장 진단을 위한 자료를 얻으려면 시뮬레이션용 모델이 필요하다. 종래의 d-q 모델은 해석시간이 짧은 대신 고장자 권선이 정현적인 형태의 분포라는 가정에 따라 기자력에 포함된 고조파를 무시한다. 그러므로 고조파 영향을 고려하는 전류 신호 분석 기술에 부적당하다. 그리고 유한 요소 해석에 의한 방법은 정밀 해석에 유용하나 해석시간이 길어지는 단점이 있다.

본 논문은 복합 고장(정적편심, 회전자 도체 봉 파손)을 갖는 3상 농형 유도 전동기 모델을 시뮬레이션하고, 특성을 해석한다. 기자력의 고조파를 고려하기 위해 winding function approach를 사용하고, 인덕턴스를 계산한다. 해석을 위한 모델링은 coupled magnetic circuits 방법을 사용하고, MATLAB 으로 시뮬레이션한다. 고장 특성 해석은 전류 신호 분석(motor current signature analysis, MSCA)기술을 이용한다.

2. 3상 농형 유도 전동기 모델링

3상 농형 유도 전동기(고정자 슬롯 : m 개, 회전자 슬롯 : n 개)는 coupled magnetic circuits 방법으로 모델링하기 위하여 다음과 같이 가정한다.

- 고정자, 회전자 철심의 투자율은 무한대
- 고정자와 회전자는 축에 대해 대칭
- 자기포화 효과 무시
- 와류 손, 마찰 손, 풍 손 무시
- 회전자 봉은 절연된 상태
- 회전자 봉 비틀림(skew) 없음

2.1 전압 방정식

3상 농형 유도 전동기 모델의 전압 방정식은 다음과 같다 [1-2].

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (1)$$

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \quad (2)$$

$$\lambda_s = L_{ss} I_s + L_{sr} I_r \quad (3)$$

$$\lambda_r = L_{rs} I_s + L_{rr} I_r \quad (4)$$

$$V_s = [v_1^s \ v_2^s \ \dots \ v_m^s]^t \quad (5)$$

$$I_s = [i_1^s \ i_2^s \ \dots \ i_m^s]^t \quad (6)$$

$$I_r = [i_1^r \ i_2^r \ \dots \ i_n^r]^t \quad (7)$$

여기서 t 는 전치행렬을 의미한다. 고장자 권선저항 $R_k = r_s I$ 이다. I 는 $m \times m$ 단위행렬, r_s 는 권선저항이고 각 권선은 같은 저항이라고 가정한다. 농형 회전자의 전압 $v_k^r = 0; k=1,2,\dots,n$ 이다. 회전자 도체 저항 R_r 은 $n \times n$ 대칭, 순환 행렬이다.

2.2 인덕턴스 계산

기자력의 공간 고조파 영향을 고려하기 위해 winding function 이론을 사용하고, 자기회로 이론으로 인덕턴스를 유도한다 [3, 6]. 결함을 고려하기 위한 인덕턴스 계산식은 다음과 같다.

$$L_{AB}(\theta_r) = \mu_0 \ell \int_0^{2\pi} r(\theta_r, \phi) \frac{N_A(\theta_r, \phi) \cdot N_B(\theta_r, \phi)}{g_e(\theta_r, \phi)} d\phi \quad (8)$$

위 식에서 θ_r 은 회전자의 위치각이고, ϕ 는 고정자 내부의 원 둘레이다. ℓ 은 축 방향 길이이고, $r(\theta_r, \phi)$ 은 공극의 평균 반지름이고, $g_e(\theta_r, \phi)$ 은 공극의 길이이다. $N_A(\theta_r, \phi)$ 는 A 권선의 winding function이고, $N_B(\theta_r, \phi)$ 는 B 권선의 winding function이다.

2.3 정적 편심과 회전자 도체 봉 파손

회전자가 정적 편심일 경우 공극 함수는 다음과 같다 [4].

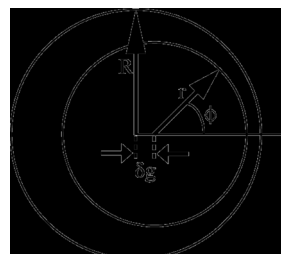
$$g_e(\phi) = g_0 - \delta g \cdot \cos\phi \quad (9)$$

그림 1은 정적 편심을 나타낸 것으로 편심이 없는 상태의 공극 길이가 g_0 이고, 고정자 안지름의 중심과 회전자 중심의 거리가 δg 이다.

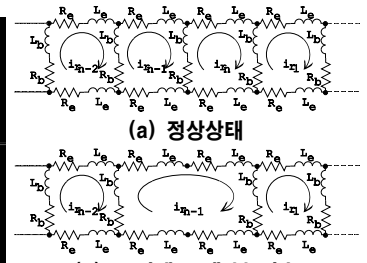
농형 회전자의 등가 회로는 그림 2.(a) 이고 회전자 도체 봉 파손 상태의 등가 회로는 그림 2.(b) 이다 [3]. 회전자 도체 봉이 파손되면 그 부분의 winding function이 변한다 [2].

3. 특성 해석 결과 및 고찰

해석 대상 3상 농형 유도 전동기의 사양은 표 1과 같다. 전압 방정식을 상미분 방정식으로 유도하고 [1], MATLAB 에서 Runge-Kutta 법으로 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과에서 고장자 전류의 정상 상태 부분을 FFT 하여 주파수 영역으로 나타내었다.



〈그림 1〉 회전자의 정적 편심.



〈그림 2〉 회전자 등가 회로.

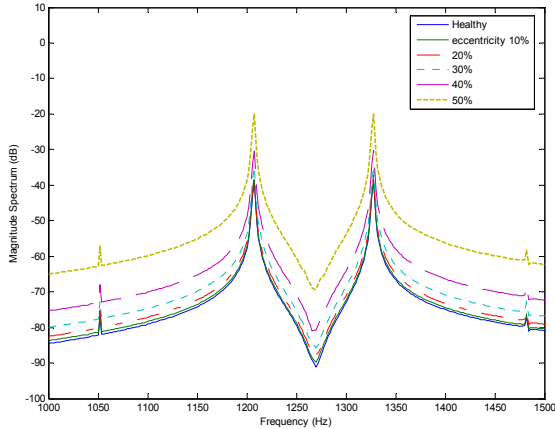
3.1 정적 편심

편심 상태의 전류 특성 패턴은 다음과 같다 [5].

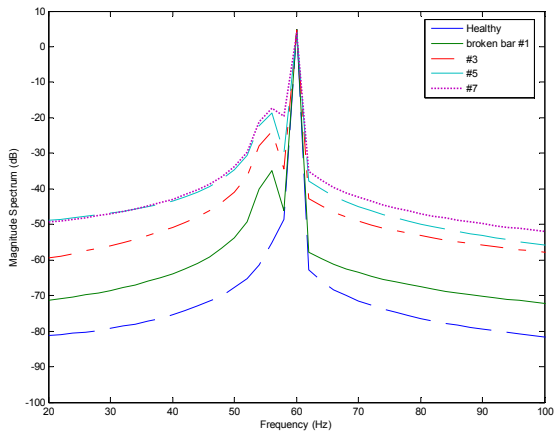
$$f_{cc} = f_1 \left[(R \pm n_d) \frac{1-s}{p} \pm n_{ws} \right] \quad (10)$$

<표 1> 3상 농형 유도 전동기 일반사항

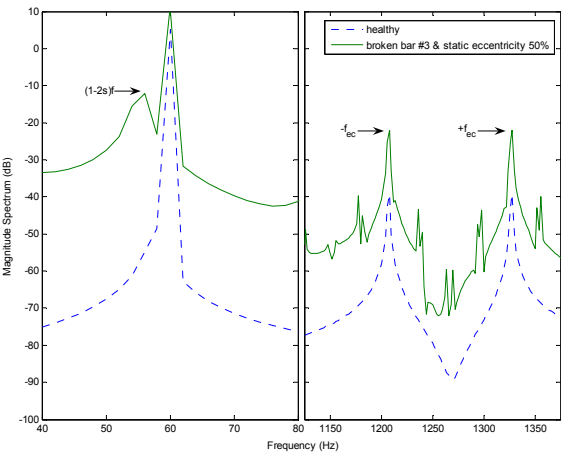
정격출력	1 [HP]	정격전압	380 [V]
주파수	60 [Hz]	상	3
권선 턴 수	69	극수	4
고정자 슬롯 수	36	적층	70.00 [mm]
회전자 슬롯 수	44	공극 길이	0.35 [mm]
회전자 관성 모멘트	0.0024 [kg · m ²]	고정자 안지름	82.50 [mm]
회전자 도체 저항	7.0539×10 ⁻⁵ [Ω]	고정자 저항	5.8141 [Ω]
엔드링 저항	9.9251×10 ⁻⁷ [Ω]		



<그림 3> 고정자 전류 스펙트럼 - 회전자 정적 편심.



<그림 4> 고정자 전류 스펙트럼 - 회전자 도체 봉 파손.



<그림 5> 고정자 전류 스펙트럼 - 회전자 정적 편심 50% & 회전자 도체 봉 3개 파손.

f_{ec} 는 편심의 특이 주파수 성분, f_1 은 전원 주파수, R 은 회전자 슬롯 수, n_d 는 정적 편심 (0, 동적 편심 : 1), s 는 슬립, p 는 극 쌍 수, $n_{ws} = 1, 3, 5, 7, \dots$ 이다. $n_d = 0$, $s = 4\%$, $n_{ws} = 1$ 로 놓으면 기본 특이 주파수 성분을 얻을 수 있다. 그림 3에서 기본 특이 주파수는 1207.2 [Hz] 와 1327.2 [Hz] 이다. 정적 편심과 기본 특이 주파수의 크기를 표 2 에 나타내었다.

3.2 회전자 도체 봉 파손

회전자 도체 봉 파손 시의 전류 특성 패턴은 다음과 같다 [5].

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s) \quad (11)$$

f_{sb} 는 2배 슬립 주파수 측 대역(sideband) 성분이다. 그림 4의 시뮬레이션 결과에는 $f_1(1-2s) = 55.2[Hz]$ 성분만 나타나는데, 이것은 회전자 도체 봉 파손 시에 나타나는 토크 맥동에 의한 속도의 진동 때문이다 [5]. $f_1(1+2s) = 64.8[Hz]$ 성분은 회전자 진동에 의한 영향으로 시뮬레이션 결과에는 나타나지 않았다. 회전자 도체 봉 파손과 아래쪽 측 대역 성분의 크기를 표 2 에 나타내었다.

<표 2> 결합 상태의 주파수-스펙트럼 크기

정적 편심		도체 봉 파손		
구분	1207.2 [Hz]	1327.2 [Hz]	구분	55.2 [Hz]
정상(Healthy)	-39.08 [dB]	-38.96 [dB]	정상	-55.06 [dB]
편심 10%	-38.45 [dB]	-38.34 [dB]	1개 파손	-34.81 [dB]
편심 20%	-37.23 [dB]	-37.12 [dB]	3개 파손	-23.86 [dB]
편심 30%	-34.82 [dB]	-34.71 [dB]	5개 파손	-18.78 [dB]
편심 40%	-30.29 [dB]	-30.18 [dB]	7개 파손	-17.35 [dB]
편심 50%	-20.13 [dB]	-20.03 [dB]		

3.3 복합 고장(정적 편심 50%, 3개 도체 봉 파손)

그림 5 는 정적 편심 50%와 회전자 도체 봉이 3개 파손된 복합 고장 3상 농형 유도 전동기의 전류 스펙트럼이다. 아래쪽 측 대역 주파수 55.2 [Hz]에서 크기는 -12.09 [dB] 이다. 기본 특이 주파수 1207.2 [Hz] 에서 크기는 -21.97 [dB] 이고, 기본 특이 주파수 1327.2 [Hz]에서 크기는 -21.98 [dB] 이다.

4. 결 론

본 논문은 복합 고장을 가진 3상 농형 유도 전동기를 모델링하고 전류 신호 분석으로 특성 해석을 하였다. 표 2 에서 고장 상태의 정도에 따라서 특정 주파수의 크기가 변하는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 5 에서 회전자 도체 봉의 파손은 기본 특이 주파수 주변에 기생 성분을 만들고 정적 편심은 아래쪽 측 대역 성분의 크기를 11.77 [dB] 증가시키는 것을 알 수 있다. 따라서 이 방법은, 상태 감시와 고장 진단을 위한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 그리고 이 자료의 신뢰성을 높여려고 유효요소법을 이용한 정밀한 수치해석과 실험에 의한 방법으로 비교, 검토 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] H. A. Toliyat, T. A. Lipo, and J. C. White, "Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications part 1 (motor analysis)," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, pp.679-683, Dec 1991.

[2] H. A. Toliyat and T. A. Lipo, "Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, pp. 241-247, June 1995.

[3] X. Luo, Y. Liao, H. A. Toliyat, A. El-antably, and T. A. Lipo, "Multiple coupled circuit modeling of induction machines," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 2, pp. 311-318, March/April 1995.

[4] H. A. Toliyat, M. S. Arefeen and A. G. Parlos, "A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 4, pp. 910-918, July/August 1996.

[5] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor faults," IEEE Industry Applications Magazine, pp. 26-34, July/August 2001.

[6] T. A. Lipo, "Theory and control of synchronous machines," Lecture Notes for ECE 511, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin, Madison, 2002.