

## 회전자 바 손상 및 고정자 권선 단락 고장 조건에 따른 유도전동기의 구동 특성

장석명\*, **박유섭\***, 최장영\*, 유대준\*\*, 구철수\*\*\*  
 충남대학교\*, 청양도립대학\*\*, 한국원자력안전기술원\*\*

### Operating Characteristics of Induction Motors with Broken Rotor Bar and Stator Winding Fault

Seok-Myeong Jang\*, Yu-Seop Park\*, Jang-Young Choi\*, Dae-Joon You\*\*, Cheol-Soo Goo\*\*\*  
 Chungnam National University\*, Cheongyang Provincial College\*\*, Korea Institute of Nuclear Safety\*\*\*

**Abstract** - This paper deals with the operating characteristics of induction motors with broken rotor bar, stator winding inter-turn short and their complex fault conditions. The considered operating characteristics are phase current, torque and speed. Since the operating characteristics of induction motors are directly related to their slip conditions, this paper built the experimental set to adjust the speed of induction motor with a permanent magnet synchronous generator connected to a load bank. From the various experimental results, it is shown that the faults do not highly affect on the operating characteristics of induction motors in low slip conditions, but the fault characteristics can be easily found in larger slip conditions.

회전자 바의 도전율의 변화에 따른 토크의 감소량이 매우 적은 반면, 슬립이 0.573인 경우 토크의 감소량이 매우 큰 것을 확인할 수가 있다. 이는 슬립이 작은 경우에는 2차측 전류, 즉 회전자 바의 전류가 거의 존재하지 않으므로 회전자 바의 도전율이 전동기 특성에 큰 영향을 미치지 않으나 회전자 바의 전류가 상대적으로 크게 흐르는 슬립 0.573의 조건에서는 상호 인덕턴스의 감소가 두드러지기 때문이다. 본 논문에서는 유한요소법에 의한 결과를 실험적으로 검증하기 위해 그림 2과 같이 영구자석형 동기 발전기 및 부하뱅크로 구성된 실험 세트를 구성하고 회전자 바 파손 뿐만 아니라 고정자 권선 단락 및 복합고장조건을 고려한 모의 고장 실험을 수행하였다.

그림 3은 회전자 바 파손만을 고려하여 수행한 무부하 조건의 실험결과를 제시하고 있으며, 각 유도전동기는 일정 V/F 비에 의한 가속구간 및 등속구간을 가지는 구동조건에 의해 구동된다. 유도전동기의 동기속도는 1800[rpm]이며 가속구간에서의 슬립은 1에서부터 점차 감소하며, 등속구간에서의 슬립은 0에 가깝다. 여기서 회전자 바 파손은 그림 1의 회전자 바의 도전율이 0인 것과 같다. 전동기의 정상상태와 비교하였을 때 전동기 가속 구간에서의 속도가 회전자 바 파손의 경우 지연됨을 확인할 수가 있으며 동일 속도에 다다르기 위한 더 큰 전류가 발생한다. 또한 전동기 기동 후 무부하 상태에서는 속도 및 전류의 차이가 거의 없다. 이는 그림 1의 유한요소해석법에 의한 결과에서와 같이 전동기 기동 시에는 슬립이 매우 크기 때문에 2차측 전류의 영향이 전동기의 구

### 1. 서 론

견고한 구조 및 저렴한 유지보수 비용 등의 장점을 가지는 유도전동기는 산업계에서 사용되는 전동기의 80[%]를 차지하고 있으며 [1], 현재 영구자석의 수급에 어려움이 발생함에 따라 그 관심이 증가되고 있고, 이에 따라 유도전동기의 고효율화 및 고속화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 산업계에서 응용되는 유도전동기의 가혹한 운전 조건은 전동기의 고장을 빈번하게 발생시킬 수 있으므로 사전에 유도전동기의 고장을 예측할 수 있는 기술 또한 매우 필수적이라 할 수 있다. 유도전동기의 고장은 크게 베어링 파손 등과 같은 기계적 고장, 회전자 고장 및 고정자의 고장으로 구분되어질 수 있으며, 이러한 고장은 공기자속 밀도의 왜곡으로 인한 토크 리플 발생 및 소음을 유발하고 전동기의 연속적인 고장을 초래할 수 있어 고장에 관한 초기 진단이 매우 중요하다. 현재 이러한 고장을 진단하기 위한 연구 또한 매우 활발히 진행되고 있으며, 상전류를 분석하여 특정 주파수를 찾아내는 MCSA(Motor Current Signal Analysis)가 널리 응용되고 있다 [2]. 유도전동기의 구동 특성은 슬립에 따라 변화하며, 이러한 특정 주파수에 의한 진단 또한 유도전동기의 슬립이 반드시 고려되어야 한다. 이에 따라 회전자 바 파손의 고장조건을 가지는 유도전동기의 측대역 주파수가 무부하 상태에서는 존재하지 않음을 [3]에서 이미 제시한 바 있다. 본 논문에서는 회전자 바 파손 및 고정자 권선 단락의 고장 조건을 고려하여 부하조건에 따른 유도전동기의 구동 특성에 관한 연구를 수행하였다. 모의 고장 실험을 위한 유도전동기는 SVPWM (Space Vector PWM) 방식의 인버터에 의해 구동되며, 유도전동기 슬립의 변화는 유도전동기에 맞물려 있는 영구자석형 동기발전기의 부하에 따라 조정된다.

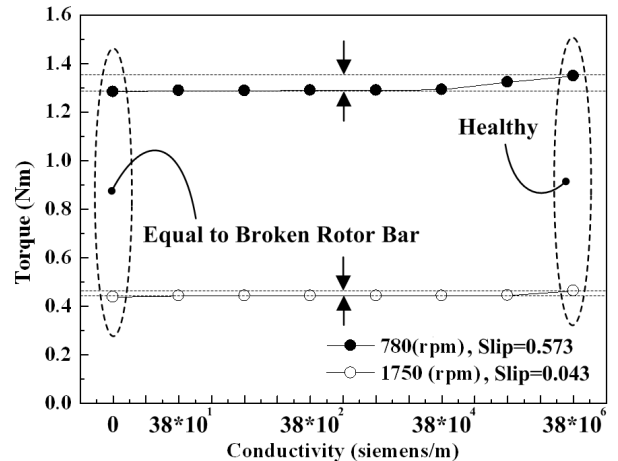
### 2. 부하조건에 따른 고장 유도전동기의 구동 특성

#### 2.1 회전자 바 파손에 따른 구동 특성

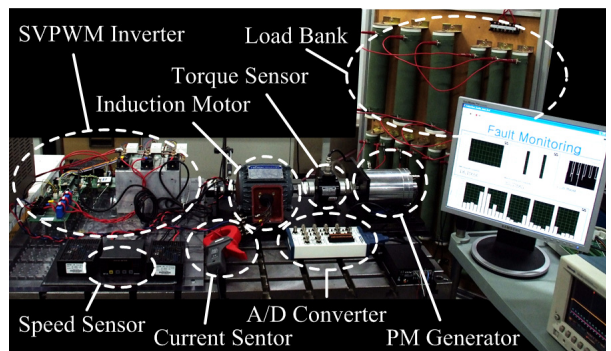
본 논문에서의 모의 고장 실험을 위한 0.4[kW]급 농형 유도전동기의 알루미늄 회전자 바의 도전율은 전동기 구동 특성에 매우 큰 영향을 미치며, 특히 토크 감소로 인한 전동기 효율 감소를 초래하게 된다. 이는 식 (1)로 표현되는 유도전동기의 토크의 상호 인덕턴스 성분의 감소로 인해 발생된다. 그러나 부하 조건, 즉 유도전동기의 슬립에 따라 그 영향이 달라지며, 2차측 전류의 크기가 매우 낮은 무부하 조건의 경우에는 그 영향이 매우 작다 [4].

$$T_e = \left[ \frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_{rm}} \right], W_{co} = \frac{1}{2} (i_s^t L_{ss} i_s + i_s^t L_{sr} i_r + i_r^t L_{sr} i_s + i_r^t L_{rr} i_r) \quad (1)$$

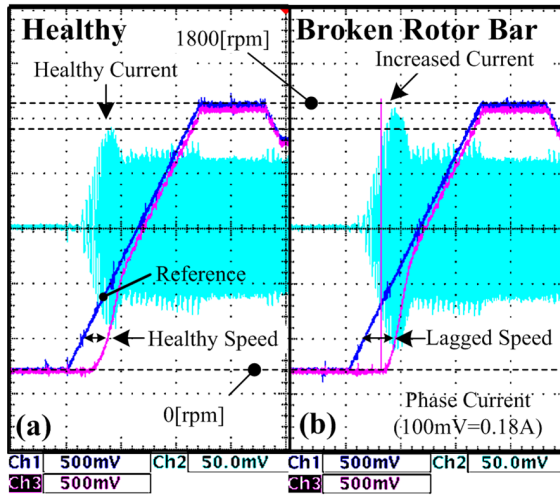
그림 1은 본 논문의 해석모델인 0.4[kW]급 농형 유도전동기의 알루미늄 회전자 바 도전율 및 슬립에 따른 토크 특성을 유한요소해석법(FEM)을 통해 분석한 결과이다 [4]. 슬립이 0에 가까운 경우에는 회전자



<그림 1> 회전자 바 도전율 및 전동기 슬립에 따른 토크 특성 (FEM).



<그림 2> 유도전동기 모의 고장 실험 세트.



〈그림 3〉 회전자 바 파손에 따른 속도 및 전류 특성 (무부하) : (a) 정상 전동기, (b) 회전자 바 파손 전동기.

동 특성에 영향을 미치며 일정시간이 지난 전동기의 등속 구간에서는 2차측 전류의 영향이 매우 적기 때문이다. 따라서 회전자 바의 파손이나 회전자 바 제작 중 낮은 충진률로 발생하는 기포 등으로 인해 도전율이 저하된 경우 무부하 정상상태에서는 고장 진단을 하는데 매우 큰 어려움이 발생할 수 있으며, 가속구간에서도 그 차이가 크지 않기 때문에 전동기 고장 진단에 있어서 무부하 실험을 부적합하다.

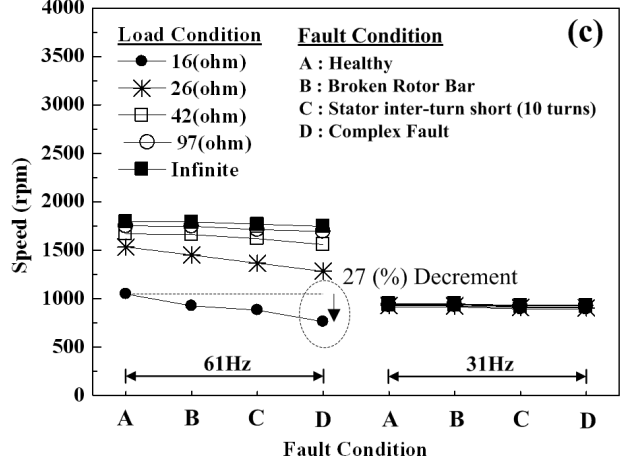
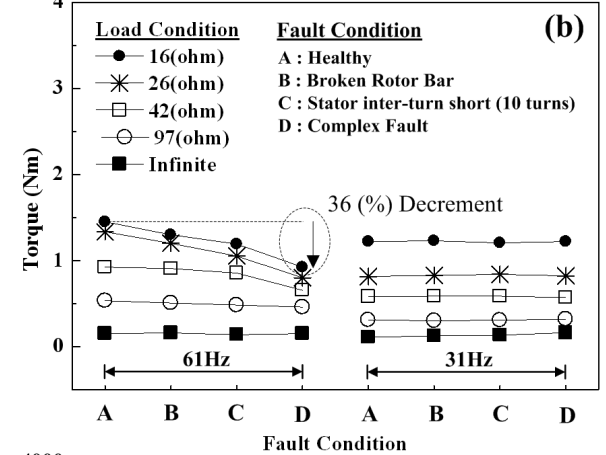
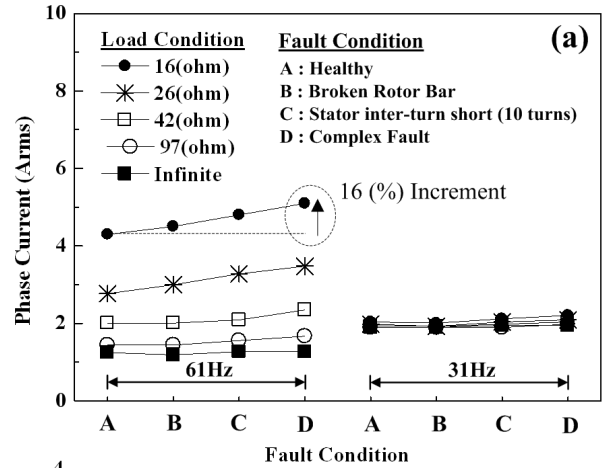
### 2.2 고장자 권선 단락 및 복합고장에 따른 구동 특성

고장자 권선 단락을 진단하기 위해 [3]에서 Park's Vector Approach와 MCSA를 통한 진단법을 적용하여 비교한다. Park's Vector Approach는 회전자 바 존재하지 않는 경우에는 상전류의 원래적이 타원의 형태를 보여 고장자 권선 단락에 유용하였으나, 부하조건과 회전자 바 고장이 동시에 발생한 경우 진단에 어려움을 초래함을 제시하였다. 이는 MCSA를 통한 상전류 주파수 분석으로 극복될 수 있으며, 본 논문에서는 [3]에서 주파수 분석을 수행한 유사한 부하조건에 대해 회전자 바 파손에 따른 전동기의 구동 특성과 고장자 권선 단락 및 복합 고장에 따른 구동 특성을 비교하기 위한 모의고장실험을 수행하였다. 그림 4는 각각 고장 조건 및 부하조건에 따른 유도전동기의 상전류, 토크 및 속도 특성이며, 인버터는 100[V]의 DC link 조건 및 31[Hz]와 61[Hz]의 주파수 입력 조건을 가진다. 또한 그림 2의 영구자석형 동기발전기의 부하뱅크는 16(ohm), 26(ohm), 42(ohm) 및 97(ohm)의 저항으로 구성되어 있으며 부하저항의 변화에 따라 유도전동기의 슬립이 변화된다.

그림 4의 실험 결과에서 상대적으로 V/F 비가 큰 31(Hz)에서는 부하 조건의 변화에 따라 전동기 속도가 크게 달라지지 않고 슬립이 거의 0에 가까운 속도 특성을 보이는데 따라 고장조건에 따른 유도전동기의 상전류와 속도 특성에 큰 변화가 없다. 그러나 61(Hz)의 경우에는 전동기의 구동특성이 고장 조건 및 부하 조건에 따라 크게 달라짐을 확인할 수 있다. 무부하 조건인 경우는 고장이 발생함에 따라 상전류, 토크 및 속도에 큰 변화를 보이지 않으며 저항이 작아지는 조건, 즉 전동기의 슬립이 커지는 부하조건에서는 상전류의 크기가 증가하고 토크는 감소하며 동일 인버터 입력에 대해 속도가 저하된다. 특히 부하저항의 크기가 가장 작은 16(ohm)의 부하조건에서는 상전류가 정상상태인 경우에 비해 16(%) 증가하였고, 토크는 36(%) 감소하였으며, 회전속도는 27(%) 감소하였다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 회전자 바 파손을 가지는 유도전동기의 슬립조건이 구동특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 유한요소해석법을 통한 전자기 특성 해석을 수행하고 무부하 조건, 즉 슬립이 0에 가까운 경우에는 회전자 고장 조건이 등속운동을 하는 정상상태에서 전동기 구동 특성에 큰 영향을 미치지 않음을 보이고 무부하 실험을 통해 이를 검증하였다. 또한 회전자 바 파손 뿐만 아니라 고장자 권선 단락 및 복합고장을 고려한 실험결과를 통해 유도전동기의 2차측 전류의 크기를 결정하는 슬립은 그 크기가 클수록 유도전동기의 속도 및 토크를 저하시키며, 상전류의 급격한 증가를 초래하는 반면, 이러한 다양한 고장 조건이 슬립이 0이 가까워지는 부하조건에서는 상전류, 토크 및 속도 특성에 큰 영향을 미치지 않음을 제시하였다. 따라서 MCSA등과 같은 고장진단법을 적용하는 경우 유도전동기의 고장은 무부하시에서는 진단에 큰 어려움을 초래할 수 있으며, 반드시 부하 조건이 고려된 고장 특성 모니터링을 수행해야만 한다.



〈그림 4〉 고장조건 및 부하조건에 따른 유도전동기 구동 특성 실험 결과 : (a) 상전류, (b) 토크, (c) 속도.

### [참 고 문 헌]

[1] Bulent Ayhan, Mo-Yuen Chow, and Myung-Hyun Song, "Multiple Signature Processing-Based Fault Detection Schemes for Broken Rotor Bar in Induction Motors", IEEE Trans. Energy Convers., vol.20, no.2, pp.336-343, 2005.  
 [2] Jee-Hoon Jung, Jong-Jae Lee, and Bong-Hwan Kwon, "Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA", IEEE Trans. Ind. Electron., vol.53, no.6, pp.1842-1852, 2006.  
 [3] 장석명, 박유섭, 유대준, 구철수, "전류 분석을 통한 농형 유도전동기의 회전자 파손 및 고장자 권선 단락 진단", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, 2011.  
 [4] 장석명, 박유섭, 고정진, 최장영, 유대준, 구철수, "SVPWM 인버터에 의해 구동되는 유도전동기의 회전자 고장에 따른 속도 특성", 대한전기학회 전기기기 및 에너지 변환시스템부문회 추계학술대회, 2010.