

## 고정자 권선 단락에 따른 농형 유도전동기의 특성해석

김미정, 김병국, 문지우, 조운현, 황돈하\*, 강동식\*  
 동아대학교 전기공학과, \*한국전기연구원 전력설비진단연구그룹

### Analysis of Squirrel Cage Induction Motors with Stator Winding Inter-turn Short Circuit

Mi-Jung Kim, Byong-Kuk Kim, Ji-Woo Moon, Yun-Hyun Cho, Don-Ha Hwang\*, Dong-Sik Kang\*  
 Dong-A University, \*Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

**Abstract** - The stator faults yield asymmetrical operation of induction machines, such as irregular current, torque pulsation, increased losses and decreased average torque. So it is necessary to detect the stator faults and develop the monitoring system for detecting faults including vibration and noise. This paper describes the method to analysis the induction motors with the stator winding inter-turn short for investigation of the asymmetrical operation during normal and transient states. And a simple method is used for the simulation and analysis of the induction machines with stator asymmetries. Finally, simulation results, finite element analysis and experimental ones are presented. The results can be useful for real-time on-line monitoring of an induction motor.

### 1. 서 론

최근 들어 산업 발전으로 인한 동력 설비의 증가에 따라 전동기의 회전자 및 고정자 권선의 손상으로 인한 고장 발생이 기하급수적으로 증가하는 추세에 있다. 이러한 전동기 자체의 문제로 인하여 운전 중에 국부적 파손 등의 결함이 발생한 경우 그 기계 및 설비가 정지하기도 하고 기능이 저하되는 등 여러 가지 부적합한 상황이 발생하여 예상외로 조기에 베어링이 파손하기도 하고, 고정자 권선이 소손되기도 하는 등 기계 설비 시스템 전체에 이상이 발생하여 문제가 되는 경우가 많기 때문에 발생의 원인을 단기일 내에 추정하고, 이에 대한 대책을 실시할 필요가 있다[1-2].

전동기의 고장 원인은 기계적인 결함, 전기적인 결함 및 유지 보수의 미숙과 같은 3종류로 구분될 수 있으며, 그 종류로는 베어링이 파손하기도 하고, 마모로 인한 동적 및 정적 언밸런스, 회전자 바의 손상, 권선의 열화로 인한 단락현상 등 다양한 결함들이 있다. 실제 산업 현장에서 발생한 사례를 수집하여 고장 원이별로 분석하여 정리한 결과를 보면 베어링 마모가 가장 많고, 이어서 절연 열화, 과부하 순이다. 권선의 절연 상태 및 베어링이 전동기 고장 원인의 60 [%] 이상을 차지하고 있으며, 고장 상태감시 기법의 대부분은 이 세 가지 구성요소들의 고장을 검출하는 것으로 이루어진다. 다양한 전동기의 고장 중에서 고정자 권선의 단락은 지속적인 과부하, 고온, 비정상적인 습도, 비정상적인 전압 및 외부 기계적 충격 등이 주요 원인이 된다[1-2].

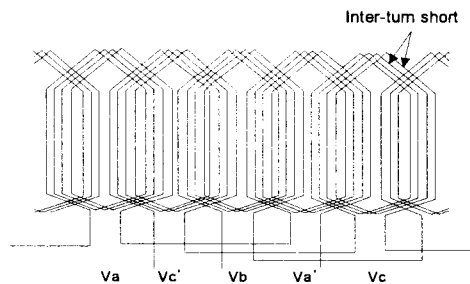
이러한 유도전동기의 고장에 대하여 Thomsom과 Thorsen 등은 농형 유도전동기에서 권선의 전류를 모니터링 함으로써 회전자 바의 소손을 진단하는 실험적인 방법을 제시하였고[3-4], Toliyat 등은 유도전동기에서 회전자 편심의 효과를 수학적 해석을 토대로 회전자 전류 또는 토크, 기전력의 변화에 미치는 영향을 연구하였다[5].

본 논문에서는 3상 7.5 [kW], 4P, 1,768 [rpm]의 정격 을 갖는 농형 유도전동기의 고정자 턴 단락에 따른 전자기적 특성을 유한요소 해석을 통해 시뮬레이션 하고, 본 해석 결과를 토대로 대형 전동기의 실시간 고장 진단 알고리즘 개발을 위한 기초 자료로 활용한다.

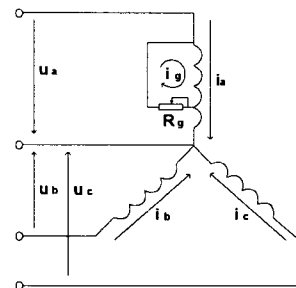
## 2. 고정자 권선 단락에 따른 특성해석

### 2.1 고정자 권선 단락

고정자 권선 고장은 유도전동기에서 사용 정지의 가장 중요한 원인의 하나이다. 고정자 권선 고장의 대부분이 권선간(turn-to-turn) 절연의 파손으로부터 오는 것을 나타내고 있다. 유도전동기의 고정자 권선은 절연 시스템에 작용하는 열적 과부하, 기계적 진동 등의 다양한 요소들에 의해 발생하는 응력을 받는다. 권선간 단락은 특히 임의 권선형(random-wound) 전동기를 비롯한 고정자 고장의 가장 일반적인 유형의 하나로, 대부분의 경우 코일간(coil-to-coil), 상간(phase-to-phase) 또는 상 접지간(phase-to-ground) 고장으로 진전되고, 전동기의 최종적인 파손으로 이어진다[1-2]. 그림 1은 고정자 권선 단락 회로도도를 보여주고 있다.



(a) 고정자 권선도



(b) 고정자 A상 권선 단락회로 루프

그림 1. 고정자 권선 단락 회로

## 2.2 공극 자속 측정용 센서

서치 코일에 유기되는 유기 전압은 식 (1)과 같은 패러데이(Faraday)의 전자유도법칙에 의해 권선수와 자속의 합수로 나타난다. 유기 전압은 전동기에 문제가 발생하는 경우 슬롯에서의 쇄교 자속이 차이를 보임으로서 건전한 전동기에 비하여 유기전압의 차이를 가져오게 된다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 원리를 이용하여 전동기 이상 유무를 감지하여 전동기의 건전성을 분석한다. 서치 코일은 각상별(A, B, C) 최초 입력 슬롯에 삽입하였다.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad [V] \quad (1)$$

여기서,  $e$ =자속센서의 유기기전력,  $N$ =센서의 코일 턴수,  $\Phi$ =자속,  $t$ =시간을 나타낸다.

## 2.3 FEM에 의한 해석

유한요소 해석에 사용되는 자계 방정식은 2차원 좌표계에서 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)을 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_{ext} + \sigma \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \vec{v} \times \vec{B} - \nabla \phi \right) \quad (2)$$

여기서,  $A_z$ 는  $z$ 축 방향 자기 벡터 포텐셜,  $J_{ext}$ 는 입력 전류 밀도,  $v$ 는 회전자 속도,  $\phi$ 는 전기 스칼라 포텐셜,  $\sigma$ 는 회전자 바의 전도율을 나타낸다.

표 1은 본 논문에서 해석하고자 하는 유도전동기의 제원을 나타낸다.

표 1. 유도전동기 제원

구분	항목	치수
사양	정격 출력 [kW]	7.5
	정격 전압 [V]	220/380
	정격 속도 [rpm]	1760
	정격 토크 [Nm]	40
고정자	슬롯 수	36
	슬롯 당 턴수 [turns]	21
	외경 [mm]	220
회전자	극수	4
	공극 [mm]	0.5
	외경 [mm]	149
	적층길이 [mm]	110
	슬롯 수	28
	바재질	Al

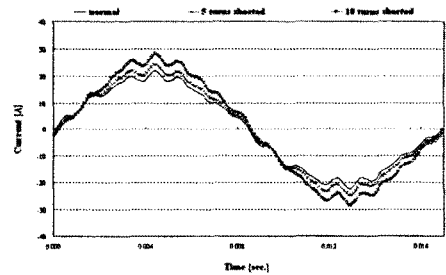
## 2.4 특성해석 및 실험결과

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 Flux 2D를 이용하여 유도전동기를 해석하였다. 고정자 권선 단락에 따른 전자계 현상을 연구하기 위해 B상의 권선을 정상적인 턴수 21턴 보다 각각 5턴, 10턴 단락 시켜 해석하였다.

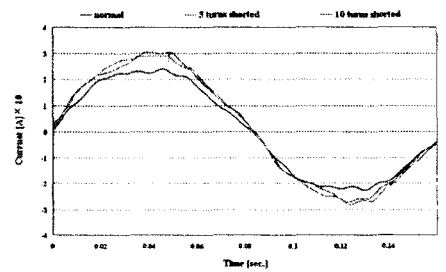
전동기 동작 시 샤프트에 과중한 부하나 외부 환경에 의하여 권선에 열이 발생하면 권선 절연 파괴가 일어나 고정자의 내부 코일이 단락되게 되며, 권선의 층간 단락 시 내부 저항이 낮아져 과전류가 흐르게 된다. 그림 2는 고정자 턴 단락에 따른 B상 전류를 나타낸다. 그림 2(a)의 해석 값에서 보는 것과 같이 턴 단락 현상이 일어나지 않은 권선에서의 피크 전류값이 22[A]인 반면, 5턴

단락 시 피크 전류값 24[A]와 10턴 단락 시 피크 전류값 28[A]로 단락 턴 수가 증가함에 따라 이에 비례하게 내부 저항이 낮아져 전류도 증가함을 볼 수 있다. 그림 2(b)는 실험전류 파형으로 정상 모델의 피크 전류값은 24[A]인 반면, 5턴 단락 시 피크 전류값 27[A]와 10턴 단락 시 피크 전류값 30[A]로 단락 턴 수에 비례하게 증가함을 볼 수 있다. 해석과 실험값의 상이함은 2D 자계 해석 특성 상 회전자 바 스쿠가 고려되지 않았으며, 고정자 권선의 저항값의 차이로 해석된다. 그림에서 보는 것과 같이 내부 권선이 단락됨에 따라 전류의 비대칭성이 일어남을 알 수 있다. 단락된 턴 수에 따라 전류 비대칭이 심화되며 이는 비대칭 자속 밀도분포를 일으키며, 불평형 기자력이 생성되어 진동의 원인이 된다.

그림 3과 그림 4는 자속센서에 유기된 기전력 파형을 나타낸다. 해석을 통해 최대, 최소 사이의 유기기전력은 정상 모델의 경우 4.91 [V], 5턴 단락된 전동기의 경우 4.75 [V], 10턴 단락된 전동기의 경우 4.56 [V]의 전압이 유기됨을 볼 수 있다. 실제 모의 고장 전동기의 측정 파형에서도 해석 결과와 같은 턴 단락에 기전력이 반비례하게 유기됨을 확인 하였다. 실험 결과, 유기기전력은 정상 모델에서 4.5 [V], 5턴 단락 모델에서 4.25 [V], 10턴 단락 모델에서 4.14 [V]로 나타 나왔다. 이 결과로 볼 때 정상인 경우에 비하여 턴 단락이 발생하였을 때 자속센서의 유기 기전력의 변화를 알 수 있으며, 턴 단락 수가 증가할수록 그 차이는 더 커짐을 알 수 있다.



(a) 시뮬레이션



(b) 실험

그림 2. 고정자 B상 전류 파형

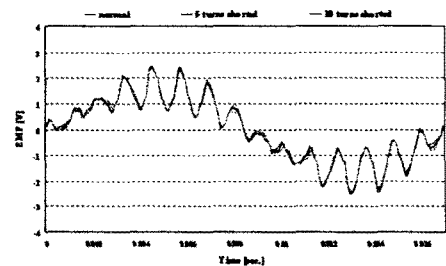
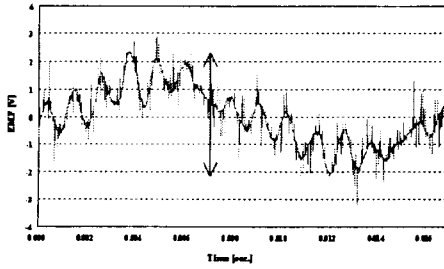
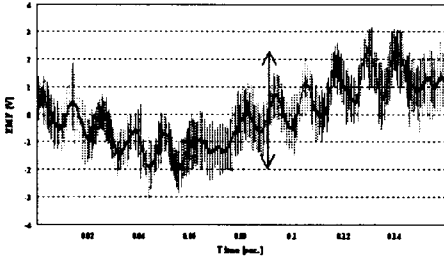


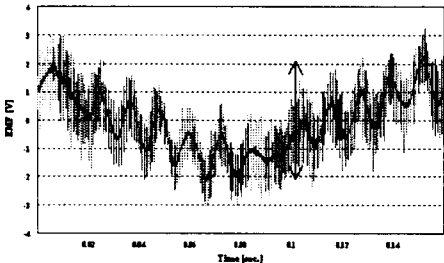
그림 3. 자속센서 유기 기전력 (시뮬레이션)



(a) 정상



(b) 5턴 단락



(c) 10턴 단락

그림 4. 자속 센서 유기기전력 (실험)

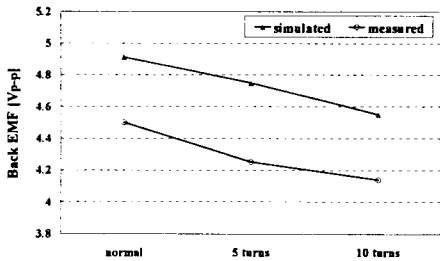


그림 5. 턴 단락에 따른 유기 기전력

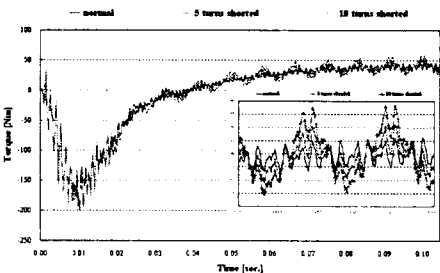


그림 6. 기동 시 토오크 특성

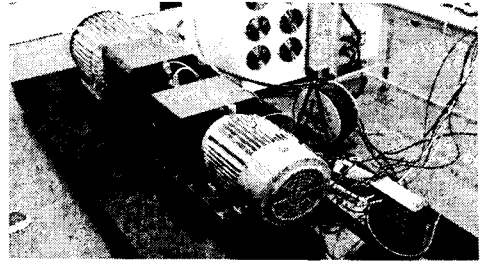


그림 7. 유도전동기 특성 측정 시스템

그림 5는 고정자 권선 단락 상태에 따른 피크 투 피크 유기기전력을 나타내고 있다. 단락된 턴 수의 비율이 커질수록 유기 기전력이 감소함을 알 수 있다. 그림 6은 정격 부하 기동 시 토오크 곡선을 나타낸다. 고정자 턴 단락이 일어 날 경우 정상 상태에서 정상 유도전동기보다 토오크 리플이 크게 생김을 알 수 있으며, 단락된 수가 더 많을 경우 1.5배에서 2배가량 더 심화됨을 볼 수 있다. 이는 곧 진동의 원인이 되며 유도전동기는 큰 스트레스를 받게 된다. 그림 7은 유도전동기 특성을 측정하기 위한 시스템을 나타낸다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 유한요소 해석을 이용하여 3상 농형 유도전동기에 있어서 고정자 권선 단락으로 인한 전자기적 현상의 특성변화를 연구하였고, 이를 모의 고장 전동기를 이용한 실험을 통해 검증하였다. 고정자 권선 단락으로 인하여 비대칭 전류가 흐름을 확인할 수 있었다. 공극 자속밀도의 변화를 검출하기 위해 슬롯 내부에 서치 코일형태의 자속 센서를 삽입하여 정상 모델과 고장 모의 모델의 자속 센서 출력 전압을 비교함으로써 고정자 권선 단락 여부와 상태를 확인할 수 있었다. 또한, 고정자 권선 단락으로 인한 토오크 리플이 증가함을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 연구결과는 유도전동기 고정자 고장감시 알고리즘 개발의 기초자료가 될 것으로 기대된다.

본 논문은 산업자원의 지역혁신인력양성사업 주관과 한국 전기연구원 기본연구사업의 위탁으로 수행된 연구결과임.

### [참 고 문 헌]

- [1] 황돈하 외, "유도전동기의 회전자 진동에 따른 공극의 자속 변화 해석", 2004 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템분회 춘계학술대회 논문집, pp. 62-64, 2004.
- [2] 김미정 외, "회전자 편심을 고려한 농형 유도전동기의 특성 해석", 전기학회논문지, 제56권 제2호, pp. 289-294, 2007.
- [3] W.T. Thosom and M. Fenger, "Industrial Application of Current Signature Analysis to Diagnose Faults in 3-Phase Squirrel Cage Induction Motors", Conference Record of 2000 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp. 205-211, 2000.
- [4] O.V. Thorsen and M. Dalva, "Method of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Induction Motors", ETEP, Vol. 8, No. 5, pp. 383-395, 1998.
- [5] H.A. Toliyat, et al., "A Method for Dynamic Simulation and Detection of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No. 4, pp. 910-918, Jul./Aug. 1996.
- [6] Andreas Stavrou, Howard G. Sedding, "Current Monitoring for Detecting Inter-turn Short Circuits in induction Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 16, No. 1, pp.32-37, 2001.