

# 복합고장을 가지는 농형유도전동기의 모델링과 고장진단

## Fault diagnosis and modeling in squirrel-cage induction motor under a combination of unbalanced voltage and broken rotor bar

박진수<sup>1</sup>, 김연태<sup>2</sup>, 배현<sup>3</sup>, 김성신<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 부산시 금정구 부산대학교 전기공학과  
E-mail: soblessed@dreamwiz.com

<sup>2</sup> 부산시 금정구 부산대학교 전기공학과  
E-mail: dream0561@pusan.ac.kr

<sup>3</sup> 부산시 금정구 부산대학교 전기공학과  
E-mail: hyeonbae@puan.ac.kr

<sup>4</sup> 부산시 금정구 부산대학교 전기공학과  
E-mail: sskim@pusan.ac.kr

### 요 약

유도전동기는 산업시스템에 있어서 필수적인 요소이기 때문에 유지 관리, 모니터링 시스템, 고장 진단 등의 다양한 분야에서 많은 연구가 행해지고 있다. 유도전동기의 운전 중 하나의 고장이 발생한 경우 이것은 전동기의 다른 부분에 영향을 미치거나 또 다른 고장을 유발시키는 원인이 된다. 따라서 개별적인 고장뿐만 아니라 결합된 형태의 고장을 검출하고 진단하는 것은 유용한 방법이다. 본 논문에서는 전압불평형 고장과 회전자바 고장이 발생한 경우, 그리고 두 고장이 동시에 복합적으로 발생한 경우를 모델링하고 이에 대해 고장 진단을 하였다. 제안된 고장 검출 및 진단 알고리즘은 농형유도전동기의 고정자 전류를 이용하였으며 매트랩 시뮬링크를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

**Key Words** : Induction motor, Fault diagnosis, Modelling, Wavelet transformation

### 1. 서 론

산업 현장에서 많이 사용되고 있는 유도전동기의 갑작스런 고장은 전동기 자체의 교환 및 수리의 비용 문제보다 기계설비의 생산 중단에 따른 막대한 경제적인 손실과 생산의 효율성에 직접 영향을 미치기 때문에 지속적인 모니터링과 유지 및 고장진단이 필수적이다.

유도전동기를 모니터링 하는 방법은 센서 등을 이용하여 파라미터 등을 계측하여 전기적, 기계적 결합을 모니터링 하는 직접적인 방법과 유도전동기의 정상상태와 결합상태를 모델링한 후 시뮬레이션 하여 정상 및 결합 전동기의 데이터를 생성 하여 분석하는 간접적인 모니터링 방법이 있다. 유도전동기를 직접적으로 모니터링 하는 방법은 고장 신호를 실시간으로 모니터링 하여 분석 및 진단 할 수 있는 장점이 있는 반면 전동기에 센서 등을 부착해서 모니터

링 장비를 구축해야하고 유도전동기의 다양한 고장 신호를 얻기 위해서 다수의 모니터링 시스템을 설치해야하는 단점이 있다. 반면 시뮬레이션을 통한 간접적인 유도전동기의 모니터링은 실제의 유도전동기의 데이터를 획득하지 못한다는 문제점이 있지만, 모니터링 장비의 구축이 필요 없을 뿐만 아니라 다양한 변수들을 설정함으로써 실제 전동기로는 하기 힘든 여러 가지 실험을 할 수 있어서 유도전동기의 고장 진단 연구에 많이 사용되고 있다.

산업 현장에서 운전 중인 유도전동기의 고장을 보면 한 부분의 고장이 발생할 경우 그 고장이 다른 부분으로 파급되어 다른 구성부분의 고장 원인이 되며 복합적인 고장이 발생하는 경우도 많으므로 두 가지 이상의 고장이 동시에 발생할 경우를 가정하여 시뮬레이션 한 후 이를 고장진단 하는 것은 그 필요성이 크다고 할 수 있다.

## 2. 농형유도전동기의 고장 시뮬레이션

### 2.1 전압불평형 고장의 시뮬레이션

유도전동기의 안정적인 운전과 부하기기의 효율적 관리를 위하여 안정적인 공급은 필수적인 요소이다. 하지만 부하의 변동과 주위 환경적 요소에 의하여 전동기의 안정된 운전을 확실히 보장하기 힘든 경우가 많다. 전압불평형이 발생하는 경우 정상적인 고정자 전류의 상순과는 반대의 역상 전류가 발생하므로 고정자 전류 각 상의 전류 크기가 변하게 된다. 예를 들어 인가전압 3상 전원 중 a상의 전압 강하로 전압 불평형이 일어난 경우 고정자 전류의 a, b, c 상의 전류 크기가 모두 변하므로 이를 모두 측정해서 진단을 하여야 한다. 구성된 농형 유도전동기 시뮬레이션에서 전압불평형 고장을 일으키기 위하여 아래의 식(1)의 3상 중 한상에 전압 강하를 줌으로써 전압불평형 고장을 시뮬레이션 하였다.

$$\begin{aligned} V_{sA} &= \sqrt{2}(E - E_0)\cos\omega t \\ V_{sB} &= \sqrt{2}E\cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ V_{sC} &= \sqrt{2}E\cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \end{aligned} \quad (1)$$

$E$ : 정격전압

본 연구에서 실험한 전압강하의 크기는 아래 표 2.1 과 같다.

표 2.1 인가전압 각각의 상에서 전압 강하크기

전압 위상	전압강하
A phase voltage fault	10%
	20%
	30%
B phase voltage fault	10%
	20%
	30%
C phase voltage fault	10%
	20%
	30%

### 2.2 회전자바 고장의 시뮬레이션

회전자바의 고장은 주로 높은 온도와 운전 중의 과중한 기계적 부하와 제조 과정에서 결함 때문에 자기된다. 이러한 회전자바 고장의 시작은 높은 온도 때문에 야기된 높은 저항값에서 기동과 회전자바에 있는 작은 크랙과 구멍 때문에 시작된다. 회전자바의 고장은 식(2)와 같이 회전자바의 총수와 회전자바의 위치를 반영해야하지만 이러한 과정은 수학적으로 해석하기가 복잡하고 난해하다.

로 해석하기가 복잡하고 난해하다.

$$R_r = \frac{(2N_s)^2}{Z_r/3} \left[ R_b + \frac{2}{Z_r(2\sin\frac{\theta}{2})^2} R_c \right] \quad (2)$$

$R_r$ : 회전자의 등가저항  
 $R_b$ : 회전자바의 저항  
 $R_c$ : 엔드링의 저항  
 $Z_r$ : 회전자바의 수  
 $N_s$ : 고정자 권선의 턴수

따라서 본 연구에서는 회전자의 임피던스는 회전자바에 한정되고 슬립은 정격속도에 근접해있다는 가정을 하고 회전자 엔드링의 저항적 기여를 무시하여 식(2)를 식(3)과 같이 간략화할 수 있다.

$$R_r \cong \frac{(2N_s)^2}{Z_r/3} R_b \quad (3)$$

$n$ 개의 회전자바가 부러진 경우 회전자 저항은 아래의 식(4)와 같이 된다.

$$R_{rf} \cong \frac{(2N_s)^2}{Z_r/3 - n} R_b \quad (4)$$

$R_{rf}$  =  $n$ 개의 회전자바가 고장난 경우 회전자 저항

따라서 정상일 경우와  $n$ 개의 회전자바가 고장 난 경우 저항값의 변화를 구하면 식(5)와 같이 된다.

$$\Delta R = R_{rf} - R_r = \frac{n}{Z_r/3 - n} R_r \quad (5)$$

$\Delta R$ :  $n$ 개의 회전자바가 고장난 경우 변화된 저항  
 $R_{rf}$ :  $n$ 개의 회전자바가 고장난 경우 회전자 저항  
 $R_r$ : 회전자 저항

시뮬레이션에서 회전자바 고장을 위해 추가해야하는 저항값은 아래의 표2.2와 같다.

표 2.2 회전자바 고장을 위한 추가 저항값

고장난 회전자바의 수	$\Delta R_r$
n=1	0.1547
n=2	0.3610
n=3	0.6498
n=4	1.0830

### 2.3 전압불평형과 회전자바의 고장의 시뮬레이션

전압불평형과 회전자바의 결함이 동시에 발생한 경우의 고장 시뮬레이션은 표 2.3과 같은 상에서의 전원전압이 10%, 20%, 30%의 전압강하가 일어난 경우에 저항값의 변화를 줌으로써 전압불평형과 회전자바의 동시 고장을 발생시켰다.

표 2.3 전압불평형과 회전자바 고장이 동시에 일어난 경우의 각 값의 변화

a상에 10% 전압 강하		a상에 20% 전압 강하		a상에 30% 전압 강하	
BN	$\Delta R_r$	BN	$\Delta R_r$	BN	$\Delta R_r$
n=1	0.1547	n=1	0.1547	n=1	0.1547
n=2	0.3610	n=2	0.3610	n=2	0.3610
n=3	0.6498	n=3	0.6498	n=3	0.6498
n=4	1.0830	n=4	1.0830	n=4	1.0830

\* BN : 고장난 회전자바의 수

Matlab simulink를 이용한 시뮬레이션은 아래의 그림 2.1과 같다. 고장 시뮬레이션에 사용된 전동기는 5[Hp] 1750[rpm] 460V 4극의 농형유도전동기를 대상으로 하였다.

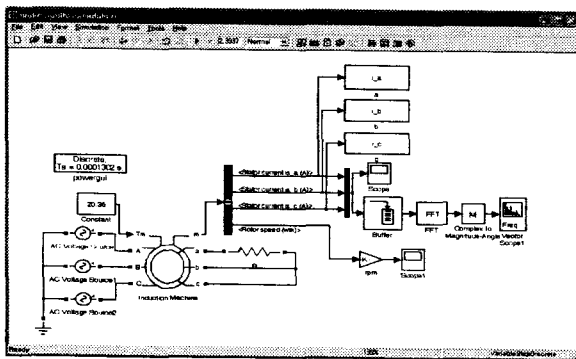


그림 2.1 Simulink를 이용한 고장 시뮬레이션

## 3. 농형유도전동기의 고장 진단 및 결과

### 3.1 전압불평형과 고장 진단

본 연구에서는 농형유도전동기의 고장을 진단하기 위해 고정자 전류를 이용하였다. 농형유도전동기에 입력되는 고정자 전류의 잡음을 제거하고 동기화하여 평균입력 신호를 구한다. 이 때 구해진 전류신호의 peak-to-peak값에서 정상전류신호의 peak-to-peak값의 차이를 구하여 전압불평형 고장을 진단한다. 표 3.1에서 볼 수 있듯이 각 상의 전류 변화는 그 크기가 거의 같고 상의 위상차만큼 지연되어 고정자 전류의 변화가 나타남을 알 수 있다. 따라서 전압 불평형의 고장은 인가전압 a, b, c 상의 한 상의 전류 변화를 측정함으로써 결함여부를 알 수 있게 된다.

표 3.1 전압강하가 일어난 경우의 peak-to-peak 값

전압강하		A상	B상	C상
Voltage Fault A	10%	-3.8255	7.8323	2.9725
	20%	-5.9164	14.6874	5.9668
	30%	-3.4576	21.8389	10.0173
Voltage Fault B	10%	2.9672	-3.8241	7.8410
	20%	5.9623	-5.9135	14.6913
	30%	10.0124	-3.4612	21.8342
Voltage Fault C	10%	7.8402	2.9727	-3.8235
	20%	14.6915	5.9658	-5.9144
	30%	21.8314	10.0171	-3.4562

### 3.2 회전자바 고장 진단

잡음을 제거하고 동기화된 평균입력 신호에서 정상 신호의 차이를 미세 고장신호를 구한다. 이 미세고장신호를 웨이블릿 변환하여 회전자바 고장일 경우의 미세 고장특성을 추출한다. 한편 회전자바의 고장데이터를 이용하여 만든 회전자바 고장템플릿과 입력되는 고장신호와 상관관계계수를 구하여 회전자바의 고장을 진단하게 된다.

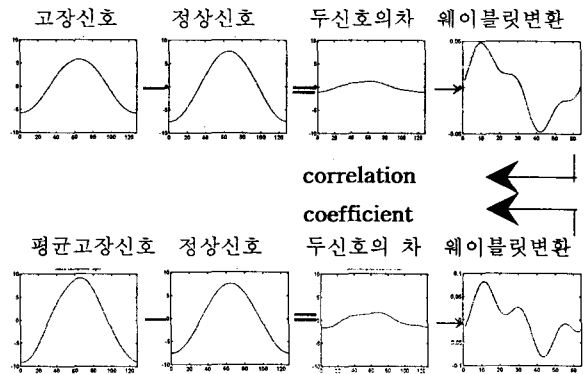


그림 3.1 회전자바의 고장 진단

표 3.2에서 볼 수 있듯이 고장 난 회전자바의 수가 증가할 수록 고장템플릿과의 상관관계 계수가 증가함을 알 수 있다.

표 3.2 고장템플릿과의 상관관계

	정상	n=1	n=2	n=3	n=4
correlation coefficient	-0.1904	0.7482	0.9615	0.9979	0.9957

### 3.3 전압불평형과 회전자바 동시 고장 시 진단

전압불평형과 회전자바가 동시에 고장 난 경우는 전압불평형 고장과 회전자바 고장을 각각 진단하였다. 앞서 전압 불평형 고장에서 알 수 있었던 것과 같이 각 상의 고장은 위상의 차이

만 있을 뿐 동일한 전압 강하가 일어났기 때문에 전압 불평형과 회전자 바가 함께 고장 난 경우 3상중 한 상의 전류를 사용하여 전압 불평형 고장을 진단하게 된다. 진단 방법은 전압 불평형 고장만 일어난 경우도 동일하게 전압 전압을 10%, 20%,30% 강하 시킨 후 한 상의 전류를 측정하여 peak-to=peak 값을 구한 후 정상일 경우의 peak-to=peak값과의 차이값을 구하여 진단하게 된다. 진단 결과는 표 3.3과 같다.

표 3.3 동시 고장 시 전압불평형 고장의 진단

	10%	20%	30%
	전압강하	전압강하	전압강하
n=0(정상)	2.9513	7.1403	11.7519
n=1	2.9358	7.1152	11.8146
n=2	3.1067	7.3079	12.0033
n=3	3.3371	7.5736	12.2599
n=4	3.6895	7.9538	12.6343

전압 불평형 및 회전자바가 함께 고장 난 경우는 회전자바의 고장 진단 결과는 아래의 표와 같다.

표 3.4 동시 고장 시 회전자바의 고장 진단

	10%	20%	30%
	전압강하	전압강하	전압강하
n=0(정상)	0.9519	0.9394	0.9101
n=1	0.9477	0.9445	0.9120
n=2	0.9588	0.9624	0.9146
n=3	0.4971	0.9821	0.9402
n=4	-0.3562	0.9866	0.9507

전압불평형과 회전자바가 동시에 고장 난 경우의 고장템플릿과 정상신호와의 상관관계계수는 0.1533(a상기준)로써 정상신호가 입력될 경우 고장템플릿과 상관관계가 낮으나 고장신호의 입력 시 그 상관관계가 비교적 높음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 농형유도전동기에 있어서 전압불평형 고장과 회전자바 고장이 동시에 발생한 경우를 모델링 한 후 시뮬레이션하여 고장데이터를 생성하고 생성된 데이터를 이용하여 전압불평형 고장과 회전자바 고장을 각각 진단하였으며 또한 두 고장이 동시에 발생한 경우를 고장진단 하였다. 각각의 고장 진단 뿐 만 아니라 두 고장이 동시에 발생한 경우도 제안된 고장 진단 방법이 유용함을

보여주고 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업(차세대물류IT기술연구사업단)의 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

[1] B.Lina, B.S.Payne, A.D.Ball, S.D.Iwnicki, "Simulation and fault detection of three-phase induction motors," Mathematics and Computers in Simulation, pp.1-15, 2002.

[2] 이상철, "Simulink를 이용한 유도전동기 모의실험," RIST 연구논문, 제12권 제4호, 1998.

[3] 최종우, "Matlab을 이용한 유도전동기 제어 시뮬레이션," 전력전자학회지, 제9권 제4호, 2004.

[4] Mohamed 띠 Hachemi Benbouzid, "A review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.47, No.5, October 2000.

[5] 이흥희, 이현영, "모델 기반 유도전동기 고장진단에 관한 연구," 전력전자기술대회 논문집, pp.644~647, 2003

[6] G.G.Acosta, C.J.Verucchi,E.R.Gelso, "A current monitoring system for diagnosing electrical failures in induction motors," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, pp. 953-965, 2006.

[7] 정병훈, 신대철, "전류분석을 이용한 유도전동기의 결함분석 알고리즘 개발," 한국소음진동공학회 논문집, 제14권 제8호, pp. 675-683, 2004

[8] 신현익, 이성환, 우천희, 강신준, 김학배, 우광방, "클러스터링 기법과 퍼지 Fault Tree를 이용한 유도전동기 고장 검출 및 진단에 관한 연구," 대한전자공학회 학술발표회 논문집, pp. 173-176, 1997.

[9] 김종겸, 박영진, 정종호, 이은웅, "불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작특성 해석," Trans. KIEE, Vol. 53Bm, No 6, 2004.

[10] Alberto Bellini, Fiorenzo Filippetti, Giovanni Faranceschini, Carla Tassoni, "Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars By Means of Electrical Signature Analysis," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 37, No. 5, 2001