

## 퍼지 Fault Tree 기법에 의한 모터 고장진단에 관한 연구

\*이성환<sup>1</sup>, 최철환<sup>1</sup>, 장낙원<sup>2</sup>

<sup>1</sup>위덕대학교 에너지전기공학부, <sup>2</sup>한국해양대학교 전기전자공학부

### A Study on Fault Diagnosis of the Motor by Fuzzy Fault Tree

\*SungHwan Lee<sup>1</sup>, ChulHwan Choi<sup>1</sup>, NakWon Jang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Energy & Electrical Engineering, Uiduk University,

<sup>2</sup>Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime University

**Abstract** - In this thesis, an algorithm of fault detection and diagnosis during operation for induction motors under the condition of various loads and rates is investigated. For this purpose, the spectrum pattern of input currents was used to monitor the state of induction motors, and by clustering the spectrum pattern of input currents, the newly occurrence of spectrums pattern caused by faults were detected. For diagnosis of the fault detected, the fuzzy fault tree was designed, and the fuzzy relation equation representing the relation between an induction motor fault and each fault type, was solved. The solution of the fuzzy relation equation shows the possibility of each fault's occurring.

#### 1. 서 론

모터는 강건한 설계와 제조로 이미 산업전반에서 널리 성공적으로 사용되고 있다. 그러나, 고장이 발생하였을 때 이를 적시에 발견하지 못한 채 방지하는 경우, 모터 뿐 만 아니라 전력계통의 마비까지도 야기할 수도 있으며, 전동기 고장에 대비하기 위한 여분의 설비를 준비해야 할 수도 있다. 이는 시스템의 전체적인 신뢰도를 떨어뜨리고, 복구를 위한 추가인력, 재정, 및 시간의 손실을 초래한다. 이러한 손실은 모터에 대한 온라인 점검을 통해, 고장발생 초기에 발견함으로써 최소화될 수 있다. 본 논문에서는 입력전류의 주파수 분석 결과를 클러스터링함으로써 모터 상태 모니터링을 수행하여 이상운전을 검출하고, 모터 이상운전과 각 고장 유형들 간의 관계를 나타내는 퍼지 관계식을 퍼지 Fault Tree의 구성으로부터 유도하여, 이의 해를 통해 고장의 원인을 진단하였다.[1]

#### 2. 모터 고장 유형

일반적으로 유도전동기에 발생할 수 있는 고장유형으로는 공극이상과 회전자 권선 손상, 베어링 고장, 상 불평형 등을 들 수 있다.

##### 2.1 공극 이상(air-gap eccentricity)

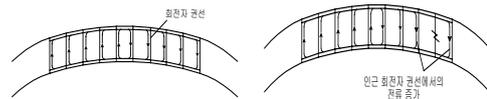
공극 이상은 회전자 축이 편향된 경우, 회전자가 고정자 위치에 대하여 부정확하게 설치되었을 경우, 고정자 권선이 움직이는 경우 등에 발생하는 고장으로서 회전자의 기계적 위치에 따라 증상이 변화한다. 따라서, 만약 공극 이상이 클 경우에는, 전자장에 의한 회전력 불평형이 발생하여 회전자-고정자간 마찰, 그리고, 그것에 의한 고정자 권선과 회전자 권선의 손상을 가져올 수 있다. 이러한 경우, 고정자 전류에 다음과 같은 주파수 성분이 발생한다.

$$f_{ecc} = f_e \left[ 1 \pm m \left( \frac{1-s}{2} \right) \right] \quad (1)$$

여기서  $f_e$ 는 공급전원의 주파수,  $m = 1, 2, 3, \dots$ ,  $s$ 는 단위 슬립(per unit slip), 그리고  $p$ 는 유도전동기 극의 개수이다.

##### 2.2 회전자 권선 손상

회전자 권선 손상의 가장 흔한 증상은 과도한 진동, 잡음, 그리고 시동 시 방전 불꽃이다. 회전자 권선 손상의 초기 증상을 알아보기 위해 먼저 회전자 권선 손상에 의해 생겨나는 회전자내 변화를 살펴보면 그림 1 (a), (b)와 같다.



(a)정상 상태 (b)단일 회전자 권선 손상  
 <그림 1> 회전자 권선 손상이 회전자 전류의 변화

그림 1 (a), (b)는 단일하게 발생한 회전자 권선 손상의 위치에서 전류의 분포가 최대가 되는 경우, 회전자 내 전류의 분포가 어떻게 달라지는가를 보여주고 있다. 즉, 회전자 권선 내부에서 흘러야 할 전류의 대부분이 인근의 두 회전자 권선으로 흐르고 있다. 이는 정상적인 회전자 권선에 반대 방향으로 흐르는 같은 크기의 전류가 중첩된 것으로 모델링 될 수 있다. 회전자 권선 손상에 의해 나타나는 이러한 현상은 회전자 전류에 의해 발생되는 자계의 비대칭을 초래하여 공극 이상을 유발한다. 이 때, 회전자 권선 손상에 의해 발생하는 주파수 성분은 다음과 같다.

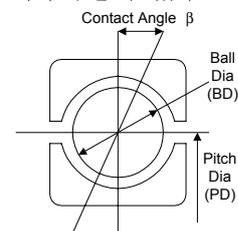
$$f_{brb} = f_e \left[ k \left( \frac{1-s}{s} \right) \pm s \right] \quad (2)$$

여기서  $f_e$ 는 전원 주파수,  $\frac{2k}{p} = 1, 5, 7, 13, \dots$ 이다.

위 식(2)에 의해 나타나는 고조파 성분들이 다른 공극 이상에 비하여 구별되는 점은 회전자 권선 손상의 경우가 전원 주파수 주변에서의 증상의 크기가 더 크고, 높은 주파수로 갈수록 다른 고장들은 회전자 권선 손상에 비해 빠르게 감쇄한다.

##### 2.3 베어링 고장

베어링 고장의 경우 고장 주파수는 베어링의 기계적 구조와 전동기의 회전속도에 의해 결정된다. 즉, 베어링의 기계적 치수가 아래의 그림 2와 같을 때, 베어링의 바깥쪽 링에 고장이 발생한 경우와 안쪽 링에 고장이 발생한 경우에 나타나는 주파수는 식(3)~(6)으로부터 각각 구할 수 있다.



<그림 2> 볼 베어링의 치수

바깥쪽 링 고장

$$f_o = f_e \pm k \left\{ \frac{n}{2} f_r \left[ 1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \right\} \quad (3)$$

안쪽 링 고장

$$f_i = f_e \pm k \left\{ \frac{n}{2} f_r \left[ 1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \right\} \quad (4)$$

여기서  $f_e$ 는 공급전원의 주파수,  $k$ 는 양의 정수,  $n$ 은 베어링 볼(bearing ball)의 수이다. 대부분의 베어링은 6~12개의 볼을 가지며, 이 때,  $f_o$ 와  $f_i$ 는 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$f_i = f_e \pm k (0.6 n f_r) \quad (5)$$

$$f_i = f_e \pm k (0.4 n f_r) \quad (6)$$

여기서  $f_r$ 은 전동기의 회전속도이다.

### 3. 모터 고장 진단

퍼지 고장 진단을 위한 방법으로서 Gmytrasiewicz등이 제안한 퍼지 Fult Tree[2]를 이용하였다. 즉, fault tree는 시스템에서 발생하게 되는 사고의 모델을 나타내며, 시스템 각 요소들의 고장과 관찰되는 증상간의 관계를 체계적으로 해석하기위한 방법으로서 시스템의 각 부분간의 고장에 의한 연관성을 규정한다. 그러나, 기존에 사용되어 왔던 fault tree의 전형적인 방법은 기본적 고장들에 대한 고장확률로부터 시스템 전체의 고장확률을 얻게 되어있다. 그러나, 과거 고장의 빈도로부터 기본적 사고에 대한 확률을 구하는 것은 어려운 뿐만 아니라, 시스템의 환경이 동적으로 변화하므로 과거의 운전 기록은 정확한 확률을 구할 수 없다. 따라서, 고장에 대한 부정확한 확률에 의해 발생하는 시스템 신뢰도 분석의 어려움을 덜기 위해 사고에 대한 상대적 빈도인 확률을 퍼지 수로 표현되는 가능성(possibility)으로 간주할 수 있다.

$X = \{x\}$ 를 기본적 고장들의 집합,  $A = \{a\}$ 를 발생할 수 있는 모든 고장 유형들의 집합, 그리고  $B = \{b\}$ 를 관찰할 수 있는 증상들의 집합이라고 할 때, 인과 행렬 R을 이용하여 인과 방정식(causality equation)은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$b = a \circ R \quad (7)$$

식(7)의 해를 구함으로써, 관찰된 증상으로부터 각 고장 유형들의 고장가능성을 얻을 수 있다.

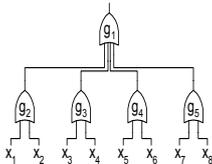
위의 식(7)의 해로부터 얻은 각 고장 유형들의 발생가능성으로부터 집합 A와 X의 관계를 나타내는 행렬 S를 이용하여 각 요소들의 고장 가능성을 구할 수 있다. 이를 위해 각 고장 유형들과 각 기본적 고장들 간의 관계를 규정하는 것이 전개 방정식으로서 식(8)이다.

$$a = \wedge (S^T a \ x) \quad (8)$$

식(8)의  $x$ 가 곧 각 기본적 고장들의 발생 가능성이 된다. 식(7),(8)은 퍼지집합 a, b와 그들 간의 관계를 규정하는 퍼지 관계 R에 의해 구성되는 퍼지 관계식과 같은 형태로서 이의 해는 Sugeno와 Pappis의 해법에 따른다.

fault tree와 퍼지화 된 증상을 이용한 퍼지 인과 방정식과 전개 방정식의 해는 fault tree의 기본적 고장들의 집합에 대한 상한과 하한값으로 표현된다. 일반적으로, 상한값과 하한값 사이의 범위를 갖는 해들의 수는 고장 진단과정에서 fault tree로부터의 정보가 얼마나 정확한가를 말해준다. 이러한 해의 유용성은 fault tree를 이루는 게이트들의 구조와 증상의 측정과정에서의 정확도와 특성에 좌우된다.

고장 유형들과 전동기 운전 상태의 관계를 나타내는 fault tree를 구성은 그림 3과 같다.



<그림 3> 모터 고장 진단을 위한 fault tree

- |                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| $g_1$ : 시스템으로서의 전동기 고장 가능성 | $x_1$ : 회전자 권선 손상 가능성 |
| $g_2$ : 공극 이상 발생 가능성       | $x_2$ : 베어링 고장 가능성    |
| $g_3$ : 상 A의 고장 가능성        | $x_3$ : 상 A 불평형 가능성   |
| $g_4$ : 상 B의 고장 가능성        | $x_4$ : 상 A 결상 가능성    |
| $g_5$ : 상 C의 고장 가능성        | $x_5$ : 상 B 불평형 가능성   |
|                            | $x_6$ : 상 B 결상 가능성    |
|                            | $x_7$ : 상 C 불평형 가능성   |
|                            | $x_8$ : 상 C 결상 가능성    |

이다.

### 4. 결과 고찰

모터 고장 검출과 진단에 있어 회전자 권선 손상, 베어링 고장, 상 불평형을 고장 유형으로서 고려하였다. 모터 고장 발생시 증상을 얻기 위해 모터 모델을 EMTP(Electro Magnetic

Transients Program)에 의하여 시뮬레이션 하였다.

<표 1> 각 고장별 진단 결과

	X							
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8
회전자 권선 손상	0.97	0.0	0.63	0.67	0.70	0.67	0.68	0.66
베어링 고장	0.67	0.73	0.67	0.67	0.64	0.64	0.69	0.67
상 A 불평형	0.00	0.00	0.98	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
상 A 결상	0.00	0.00	0.00	0.98	0.02	0.00	0.03	0.00
상 A,B 불평형	0.00	0.00	0.98	0.00	0.94	0.00	0.01	0.01
상 A,B 결상	0.00	0.00	0.14	0.96	0.56	0.98	0.05	0.05

위의 표 1에서 보는 바와 같이 단일 고장이 발생한 경우, 그에 해당하는 기본적 고장 원소의 고장 가능성이 다른 기본적 고장 원소들의 고장 가능성에 비하여 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 두 가지의 고장이 복합적으로 발생한 경우 해당되는 두 고장 원소들의 고장 가능성이 비슷하게 높게 나오는 것을 알 수 있다. 즉, 고장이 발생한 경우, 해당 종류의 고장 항목에서 고장 가능성이 상대적으로 높은 값으로 나타난다는 것을 알 수 있다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 다양한 부하 환경과 용량을 가지는 모터의 운전 도중 발생하는 고장을 적시에 발견하고, 고장의 원인을 진단하기 위한 알고리즘의 개발을 목적으로 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 모터 상태 모니터링을 위한 수단으로 입력 전류의 주파수 스펙트럼을 사용하였다. 입력전류 스펙트럼의 클러스터링을 통해 고장 발생시 새로운 형태로 나타나는 스펙트럼 패턴을 감지함으로써 고장을 검출하였다. 검출된 고장의 원인을 진단하기 위해 fault tree를 구성하여 모터 고장과 각 고장 유형들 간의 관계를 퍼지 관계식으로 표현한 후, 그 해를 구함으로써 고장 원인을 진단하였다.

위의 결과에서 제안된 고장 검출과 진단 기법을 사용함에 있어, 모터 상태 모니터링을 위한 수단으로 전동기 입력 전류만을 사용하였으나, 가속 센서, 축 코일등의 센싱 수단을 보강함으로써, 더욱 다양한 종류의 고장을 검출하고 더욱 정밀한 진단이 가능할 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2007년도 산업자원의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-068) 주관으로 수행된 과제임.

### [참 고 문 헌]

- [1] Stelios C. A. Thomopoulos, Dimitrios K. Bougoulis, and Chin-Der Wann, "Dignet: An Unsupervised-Learning Clustering Algorithm for Clustering and Data Fusion", IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 31, No. 1, January, 1995.
- [2] Piotr Gmytrasiewicz, Jere A. Hassberger, and John C. Lee, "Fault Tree Based Diagnostics Using Fuzzy Logic", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 12, No. 11, November, 1990.
- [3] C. P. Pappis, and M. Sugeno, "Fuzzy Relational Equations and The Inverse Problem", Fuzzy Sets and Systems, Vol 15, 1985.