

확률분포추정기법을 이용한 유도전동기의 모델기반 고장진단 알고리즘 개발

김광수, 이영진, 송헌혜, 이권순  
 동아대학교 전기공학과

Model based Fault Detection and Diagnosis of Induction Motors  
 using Probability Density Estimation

Kwang Su Kim, Young Jin Lee, Xianhui Song, Kwon Soon Lee  
 Dept. of Electrical Eng., Dong-A University, Pusan 604-714, Korea

**Abstract** - This paper presents stochastic methodology based fault diction and diagnosis algorithm for induction motor systems. First, we construct probability distribution model from healthy motors and then probability distribution for faulty motors is recursively calculated by means of the proposed probability estimation. We measure motor current with hall sensors as system state. The estimated probability is compared to the model to generate a residue signal which is utilized for fault detection and diagnosis, that is, where a fault is occurred. We carry out real-time induction motor experiment to evaluate efficiency and reliability of the proposed approach.

상태를 모델의 상태와 서로 비교함으로써 고장유무를 검출 또는 진단하는 방식이다. 다시 말해, 동일한 시스템 입력에 대하여 시스템 모델의 상태  $x^*(t)$ 와 실제 시스템의 상태  $x(t)$ 에 대한 편차  $\zeta = x^* - x$ 를 발생시켜 미리 설정한 경계값(threshold)  $\gamma$ 와 비교하여 고장유무를 판단한다. 이러한 개념은 다음의 간단한 이진 가설검정(binary hypothesis testing)을 통해 표현할 수 있다[3].

$$\begin{cases} H_0 : |\zeta| < r \\ H_1 : |\zeta| \geq r \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서  $H_0$ 는 고장이 없는 시스템의 정상상태에 대한 가설을 나타내며, 즉 오차의 절대값이 경계값  $r$ 보다 작을 때 시스템은 고장이 없는 정상상태로 간주한다. 또한, 가설  $H_1$ 는 그 외의 경우로서 시스템에 고장이 발생한 것으로 여긴다.

1. 서 론

3. 확률기법을 이용한 고장진단 알고리즘

유도전동기는 산업현장에서 널리 사용되는 중요한 산업 기기로서, 최근 대전력 에너지변환 기술이 발전함에 따라 그 중요성이 높아지고 있다. 이러한 대전력 시스템은 고장으로 인한 경제적 손실이 막대하기 때문에 고장을 사전에 방지하기 위한 고장진단 알고리즘 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

일반적으로 실시간에서 시스템의 상태 또는 출력은 랜덤성분을 포함하고 있으며, 이러한 결정론적 모델기반 고장진단 기법은 실시간에서 성능이 저하되는 경우가 있다. 즉, 랜덤특성을 갖는 시스템에 대하여 확률론적 모델링을 기반으로 고장진단이 이루어져야 보다 효율적이다[4]. 확률론적 기법을 이용한 고장진단은 우선 정상상태에서의 시스템 상태의 확률분포를 미리 결정하거나 실험을 통해 그 분포값을 추정하여야 한다. 추정된 확률분포는 시스템 상태의 확률모델로서 정의되어 실시간 시스템상태의 확률분포와 비교하여 편차를 구함으로써 이상유무를 검출한다. 식 (1)과 마찬가지로 확률론적 고장진단의 경우의 가설검정은 다음과 같다.

$$\begin{cases} H_0 : |\zeta_p| < r_p \\ H_1 : |\zeta_p| \geq r_p \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $r_p \in (0,1)$ 이며  $\zeta_p$ 는 시스템 모델의 상태  $x^*$ 의 확률분포  $p(x^*)$ 와 실제 시스템상태  $x$ 의 확률분포  $p(x)$  사이의 오차를 나타낸다. 즉,

$$\zeta_p = p(x^*) - p(x) \quad (3)$$

이다. 식 (2)의 가설검정을 적용하기 위하여 우선 시스템 상태의 확률분포를 결정하여야 한다. 확률모델의 경우 실시간 시스템 구축에서 충분한 양의 데이터를 취득하여 확률분포를 추정할 수 있으며 실시간 확률분포 추정은 온라인 기법을 통해 실시간으로 확률값을 연산하여야 한다.

여러 가지 고장진단 기법이 보고되고 있으며 그 중 모델기반 알고리즘이 다양한 시스템에 적용되고 있다. 이러한 기법은 시스템의 수학적 및 해석적 동적 모델을 미리 결정하여 실시간 시스템의 상태 및 출력을 서로 비교하여 오차를 검출함으로써 고장유무를 판단한다[2].

대부분의 모델기반 고장기법은 시스템의 상태를 결정론적(deterministic) 신호로 간주하여 관측기나 신경회로망 등의 결정론적 모델링을 구현하고 있다. 하지만, 실 시스템에서의 시스템 상태나 출력은 대부분 확률성분을 포함하고 있으며 기존의 결정론적 방법을 이용할 경우 실시간에서 성능을 저하시키는 요인이 되고 있다. 또한 최근의 시스템은 그 구성이 매우 복잡하여 비정상(non-stationary) 랜덤신호 등과 같은 확률성분을 많이 내포하고 있어 기존의 결정론적 고장진단 알고리즘 보다 정교한 기법이 요구되고 있다.

본 논문은 확률추정기법을 이용한 유도전동기의 고장 검출 및 진단 알고리즘을 개발한다. 우선 정상상태인 전동기의 선간전류를 검출하여 확률분포를 추정하여 확률 모델로 정의한다. 실시간에서의 유도전동기의 선간전류는 홀센서를 이용하여 검출되며 제안한 확률추정알고리즘에 의해 온라인 추정된다. 두 확률분포를 비교하여 오차를 발생함으로써 고장의 유무를 판단한다. 여러 대의 고장이 있는 유도전동기를 적용하여 고장의 위치도 분석한다. 제안한 고장진단 알고리즘의 우수성과 신뢰성을 검증하기 위하여 3상 유도전동기에 적용하여 실시간 실험을 실시하였다.

2. 모델기반 고장진단 기법

4. 온라인 확률분포추정

모델기반 고장진단은 고장상태가 없는 이상적으로 동작하는 시스템에 대하여 수학적 또는 해석적 방법을 통하여 시스템 모델을 구현한 후, 실시간에서 실제 시스템의

가장 간단한 확률분포 추정은 전체 이산사건(discrete event)의 발생수에 대한 특정한 이산사건의 비(ratio)로 나타낼 수 있다. 센서로부터의 유도 전동기의 상태  $x$ 가

연속신호일 경우, 우선 다음과 같이 이산화를 실시한다.

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (4)$$

또한 식 (4)의 이산상태의 확률변수는 다음과 같다.

$$p(x) = \{p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_N)\} \quad (5)$$

여기서 확률공리(probability axiom)에 의하여

$$\sum_{i=1}^N p(x_i) = 1 \quad (6)$$

와 같은 제약조건을 갖는다. 식 (6)의 이산상태  $x_i$ 의 확률  $p(x_i)$ 는 초기시간  $k_0$ 에서 현재 이산시간  $k$ 까지의 발생수로 나타낸다. 즉,

$$p(x_i) = \frac{\text{number}(x_i)}{k - k_0} \quad (7)$$

여기서  $k_0 < k$ 이다. 식 (7)의 확률추정 알고리즘은 실시간 추정이 가능한 간단한 구조와 비교적 단순한 연산과정으로 구성된다. 하지만, 시간이 증가함에 따라 데이터의 양도 증가하며 과거의 데이터보단 최근의 데이터가 보다 더 효율적으로 사용되어야 한다. 보다 최근의 데이터를 이용한 확률분포 추정은 윈도우(window) 기법을 적용하여 나타낼 수 있다. 즉, 식 (7)의 알고리즘에 윈도우  $N_w$ 를 적용하여 표현하면

$$p(x_i) = \frac{\text{number}(x_i)}{k - k_0 - N_w} \quad (8)$$

여기서  $k_0 < N_w < k$ 이며 따라서  $\text{number}(x_i)$ 은 이산구간  $k - k_0 - N_w$ 동안의  $x_i$ 의 발생수가 된다.

### 5. 실시간 유도전동기의 고장진단 실험

제안한 고장진단 알고리즘은 3상 10마력 7.5kW의 유도전동기에 적용하여 실시간 실험을 실시하였다. 그림 1은 본 논문에서 구성한 유도전동기의 고장진단 실제 실험구성을 보여준다. 우선 전동기는 인버터의 제어입력에 의해 구동되며 시스템 상태인 전동기의 선간전류는 홀센서를 이용하여 3개의 상(phase) 모두 검출된다. 센서로부터의 검출 데이터는 PC로 인가되어 데이터가 처리된다. 제안한 알고리즘은 Matlab 프로그램에 의해 구현되며 인가된 시스템 상태 데이터는 Matlab에 의해 확률분포가 추정되며 이미 결정된 확률모델과 비교되어 고장의 유무 및 위치를 판단하게 된다. 전체 시스템 운영시간은 60초로 하였으며 샘플링 시간은 0.01초로 설정하였다. 총 3대의 전동기를 실험하였으며 1대는 정상적인 것이며 나머지 2대는 고정자 권선과 베어링 부분에 각각 고장이 있는 전동기로서 그 사양들은 모두 동일하다. 그림 2는 이 3가지 종류의 전동기에 대한 선간전류 파형을 각각 보여준다. 그림 2(b)와 2(c)는 고장난 전동기의 파형으로서 전류의 패턴이 정상상태와 명확히 차이가 남을 알 수 있다. 제안한 확률분포추정 알고리즘을 적용하기 위하여 우선 그림 2의 전류에 대한 이산화를 다음과 같이 실시한다.

$$x(k) = \{x_1, x_2, \dots, x_8\} \quad (9)$$

여기서 각 이산상태 변수는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} x_1 &= \{x|x > 3\}, & x_2 &= \{x|2 < x \leq 3\} \\ x_3 &= \{x|1 < x \leq 2\}, & x_4 &= \{x|0 < x \leq 1\} \\ x_5 &= \{x|-1 < x \leq 0\}, & x_6 &= \{x|-2 < x \leq -1\} \\ x_7 &= \{x|-3 < x \leq -2\}, & x_8 &= \{x|x \leq -3\} \end{aligned}$$

그림 3은 각 유도전동기에서 검출한 전류의 확률분포를 각각의 상에 대하여 보여준다. 그림 2와 마찬가지로 각각의 전동기에 대하여 확률분포의 패턴이 서로 차이가

있음을 알 수 있다. 마지막으로, 그림 4는 정상상태와 고장상태간의 확률분포에 대한 전체 오차파형을 각 상별로 보여준다. 전체 확률분포 오차는 다음과 같이 정의한다.

$$E = \sum_{i=1}^8 \zeta_{p,i}^2 \quad (10)$$

여기서  $\zeta_{p,i} = p(x_i^*) - p(x_i)$ ,  $i = 1, \dots, 8$ 이다.

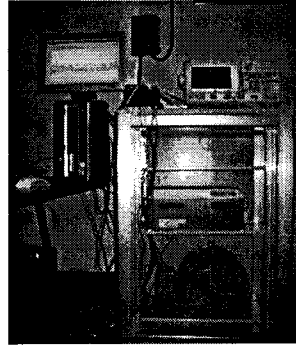
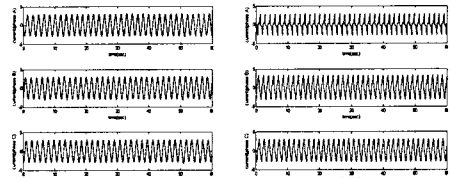
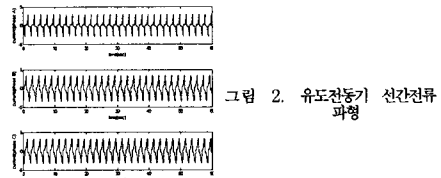


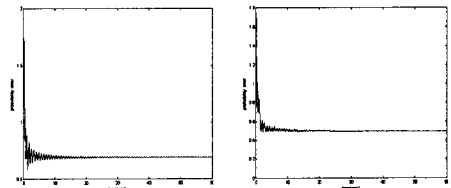
그림 1. 유도전동기 고장진단 실험장치



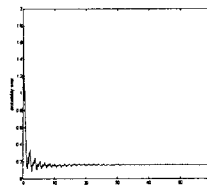
(a) 정상상태의 전류파형 (b) 고장자권선 이상의 전류파형



(c) 베어링 이상의 전류파형



(a) A상 (b) B상



(c) C상

그림 3. 고장자권선 이상의 전체 확률오차

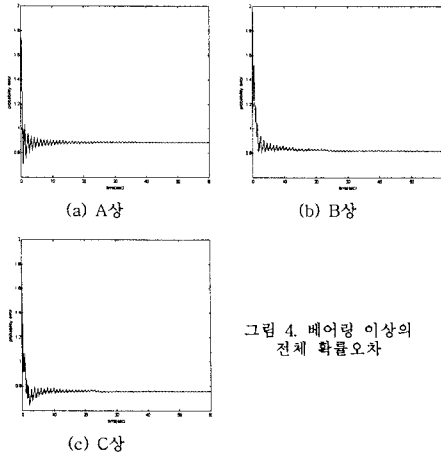


그림 4. 베어링 이상의 전체 확률오차

## 6. 결 론

본 논문은 확률분포추정 알고리즘을 이용한 유도전동기의 고장진단 기법을 제안하였다. 확률모델을 구축하기 위하여 정상상태의 전동기의 선간전류를 홀센서로 검출하여 각 상에 대한 확률분포를 추정하였다. 고장난 유도전동기의 전류는 PC를 통해 데이터가 전송되며 Matlab 프로그램을 이용하여 제안한 고장진단 알고리즘을 구현하였으며, 모델의 확률분포와 비교하여 고장여부 및 위치를 쉽게 파악할 수 있어 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

## 감사의 글

본 논문은 한국전력공사의 한국에너지자원기술기획평가원(KETEP)에서 지원한 전력변환시스템신기술 연구센터(과제번호 2007-0192)의 사업으로 수행되었습니다.

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

## [참 고 문 헌]

- [1] Z. Ye and B. Wu, "A Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis," *Int Power Electronics and Motion Control Conf.* vol. 3, pp. 1353-1358, 2000.
- [2] G. Stone and J. Kapler, "Stator winding monitoring," *IEEE Ind Appl Mag.*, vol. 4, pp. 15-20, 1998.
- [3] L. Xiaogang, L. Yuefeng, H. A. Toliyat, A. El-Antably, and T. A. Lipo, "Multiple coupled circuit modeling of induction machines," *IEEE Trans Ind Appl.*, vol. 31, pp. 311-318, 1995.
- [4] W.T. Thomas and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 7, pp. 26-34, 2001.
- [5] S. Nandi and H. A. Toliyat, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machine-A review," in *Conf. Rec IEEE IAS Annu Meeting*, vol. 5, pp. 197-204, 1999.
- [6] N. Arthur, and j. Penman, "Induction machine condition monitoring with higher order spectra," *IEEE Trans on Industrial Electronics*, vol. 47, pp. 1031-1041, 2000.
- [7] M. El Hachemi Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, pp. 984-993, 2000.
- [8] S. Nandi and H. A. Toliyat, "Novel frequency-domain-based technique to detect stator interturn faults in induction machines using stator-induced voltages after switch-off," *IEEE Trans.*

*Ind. Appl.*, vol. 38, pp. 101-109, 2002.

- [9] R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Transient model for induction machines with stator winding turn faults," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, pp. 632-637, 2002.
- [10] S. Nandim, S. Ahmed, and H. A. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, pp. 253-260, 2001.
- [11] W. J. Wiedenbrug, A. Ramme, E. Matheson, V. A. Jouanne, and maintenance and monitoring," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, pp. 1466-1472, 2002.
- [12] K. Kyusung and A. G. Parlos, "Induction motor fault diagnosis based on neuropredictors and wavelet signal processing," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 7, pp. 201-219, 2002.