

유도전동기를 위한 관측기 기반의 고장 감지 및 분리 기법 설계

한병조, 박기광, 구경완, 양해원

한양대학교 전자전기제어계측공학과, 호서대학교 국방과학기술학과

Design of Observer-Based Fault Detection and Isolation techniques for Induction Motors

Byung Jo Han, Gi Kwang Park, Kyung Wan Koo, Hai Won Yang

Dept. of Elec. Elec. Con. & Inst. Eng. Hanyang Univ., Dept. of Def. Sci & Tech. Hoseo Univ.

**Abstract** - Nonlinear system fault detection and isolation of this paper is about the failure of unknown function approximation using neural network for fault detection and isolation techniques of induction motors were applied. observer-based fault signal residual value was used. Induction motor using the speed controller of the backstepping controller. Proposed fault detection and isolation to prove the performance of the simulation was applied to and the actual system.

1. 서 론

산업용으로 널리 사용되는 유도전동기는 에너지의 효율을 최적화하기 위한 제어기 및 모터 설계, 고장 진단에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 FDI(Fault Detection and Isolation)기법은 고장 감지를 통한 고장성분을 진단 할 수 있는 과정을 포함하고 있다. 기존의 FFT, 상관함수 등의 주파수 특성을 이용한 방법과 파라미터, 상태 추정 방법들을 이용한 모델 기반의 해석방법이 있다[1]. 모델을 기반으로 해석하기 때문에 정확한 수학적 모델이 없는 경우 비선형 시스템에 직접 적용이 불가능한 경우가 발생 될 수 있다.

따라서 정확한 수학적 모델이 불필요한 고장의 감지 및 분리기법을 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

신경회로망을 이용한 고장의 진단 및 분리기법은 비선형성이 강한 고장 데이터가 주어질 경우 패턴 인식을 통한 정확한 고장을 감지 할 수 있을 뿐 아니라 약간의 오차에 대해서도 어느 정도 신뢰 할 수 있는 성능을 나타낸다. FDI 기법에서 고장 감지 기법은 동적 모델에서 이용 가능한 제어 입력과 측정 가능한 출력을 기반으로 예상 출력으로부터 플랜트와의 편차에 의한 특정신호(residual)를 생성하여 구성되었으며 시스템의 불확실한 성분의 상한 값을 이용하였다[2][3].

고장을 진단을 위해 퍼지추론 방식은 고장의 감지, 고장 식별, 고장 허용 등에 널리 사용되고 있으며 고장성분을 추정하기 위한 퍼지추론 방식은 입력에 대한 선형 다항식으로 대체하여 새로운 형태의 퍼지 방식을 제안하여 비선형 시스템의 모델링 및 제어에 사용하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2.1장은 유도전동기의 수학적 모델을 2.2장은 고장 감지 및 분리기법 설계 방법, 2.3장은 유도전동기 제어를 위한 속도제어기, 2.4장은 유도전동기의 고장 감지 및 분리를 위한 모의실험 및 실제 시스템에 적용한 결과를 나타내었다.

2. 본 론

2.1 유도전동기 수학적 모델

복잡한 유도전동기의 5차 모델식을 제어하기 위해 단순화 시킨 field-oriented 모델식은 다음과 같이 변환 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \mu\psi_d i_q - \frac{T_L}{J} - \frac{B}{J}\omega \\ \frac{di_q}{dt} &= -\gamma i_q - n_p \beta \omega \psi_d - n_p \omega i_d - \alpha M \frac{i_d i_d}{\psi_d} + \frac{1}{\sigma} u_q \\ \frac{d\psi_d}{dt} &= -\alpha \psi_d - \alpha M i_d \\ \frac{di_d}{dt} &= -\gamma i_d + \alpha \beta \psi_d + n_p \omega i_q + \alpha M \frac{i_q^2}{\psi_d} + \frac{1}{\sigma} u_d \\ \frac{d\rho}{dt} &= n_p \omega + \alpha M \frac{i_q}{\psi_d} \end{aligned} \tag{1}$$

고정자전압  $u_d, u_q$ 는 제어입력,  $\omega$ 는 회전속도,  $i_d, i_q$ 는  $d, q$ 축의 고정자 전류,  $\psi_d$ 는 회전자 자속이다.

여기서

$$\begin{aligned} \psi_d &= \sqrt{\psi_a^2 + \psi_b^2}, \psi_q = 0 \\ i_d &= \frac{\psi_a i_a + \psi_b i_b}{\psi_d}, i_q = \frac{\psi_a i_b - \psi_b i_a}{\psi_d} \\ \rho &= \tan^{-1}\left(\frac{\psi_b}{\psi_a}\right) \end{aligned}$$

이다.

간접벡터 제어기법은 먼저 슬립속도  $w_s$ 를 식 (1)로부터 다음과 같이 구한다.

$$w_s = \alpha M \frac{i_q}{\psi_d} \doteq \alpha \frac{i_{qref}}{i_{dref}} \tag{2}$$

고정자 좌표계와 field oriented 좌표계 사이의 상태 변환을 수행하기 위한 회전자계 속도  $w_r$ 는 회전자 속도  $w_r$ 과 슬립속도로부터 다음 식과 같이 구해진다.

$$w_e = \frac{d\rho}{dt} = w_r + w_s \tag{3}$$

2.2 고장 감지 및 분리기법 설계

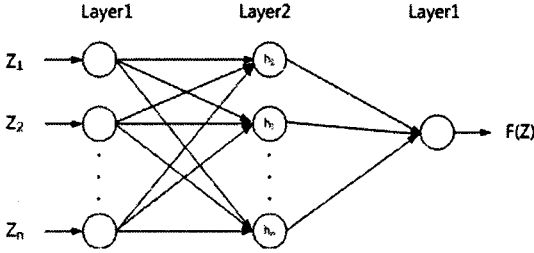
고장 감지를 위한 잔류 발생기의 신호는 다음과 같이 설계하였다.

$$r = w - w_r \tag{3}$$

$$T_{\delta_i} = t_i > T_0, |r_i| > \delta_i \quad (i=1,2,\dots,n) \tag{3}$$

이때  $r_i$ 는 잔류 값이며,  $T_0$ 는 고장이 발생한 시간,  $\delta_i$ 는 임계값이며 모델링 오차의 상한 값에 의해서 결정하였다.

유도전동기의 고장성분 분리를 위해 고장추정 방법으로 많이 사용되고 있는 신경회로망은 다음과 같이 구성하였다.



<그림 1> 신경회로망의 구조

<그림 1>에서 미지의 연속함수  $F(Z)$ 를 추정하기 위한 신경회로망의 입력력 관계는 다음과 같다.

$$F(Z) = W^T H(Z) \quad (4)$$

여기서, Layer1에서  $n$ 은 입력의 개수이며 입력벡터는  $Z = [z_1, z_2, \dots, z_n, 1]^T$ 이다. Layer2에서  $n$ 은 중간층의 노드 수이고,  $W = [w_1, w_2, \dots, w_n, 0]^T$ 는 Layer2와 Layer3 사이의 연결강도 벡터이다.

Layer2의 출력벡터  $H(Z) = [h_1(Z), h_2(Z), \dots, h_n(Z), 1]^T$ 에서  $i$ 번째 노드의 비선형 함수  $h_i(Z)$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$h_i(Z) = \exp\left(-\frac{[Z - c_i]^T [Z - c_i]}{\eta_i^2}\right) \quad (5)$$

여기서,  $c_i$ 는 가우스 함수의 중심이고,  $\eta_i$ 는 가우스 함수의 폭이다.

### 2.3 속도제어기

field oriented 모델식 으로부터 고장성분을 포함하는 미지의 비선형 함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} f_1(w) &= -\frac{T_L}{J}w - \frac{B}{J}w \\ f_2(w, i_q, \psi_d, i_d) &= -\gamma i_q - n_p \beta w \psi_d - n_p w i_d - \alpha M \frac{i_d i_q}{\psi_d} \\ g_1(\psi_d) &= \mu \psi_d \\ g_2 &= \frac{1}{\sigma} a \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{w} &= f_1(w) + g_1(\psi_d) i_q \\ \dot{i}_q &= f_2(w, i_q, \psi_d, i_d) + g_2 u_q \end{aligned} \quad (7)$$

속도 추종오차는 다음의 식 (8)과 같이 정의하였다.

$$e_1 = \omega - \omega_{ref} \quad (8)$$

안정화 함수 중 고장을 추정하기 위한 미지의 항을 새로운 함수로 다음과 같이 정의하였다.

$$F_1(Z_1) = \frac{1}{g_1(\psi_d)} [f_1(w) - \dot{w}] \quad (9)$$

신경회로망 연결강도의 추정 값을 사용한 가상 제어입력은 다음과 같다.

$$\alpha_1 = -k_1 e_1 - \hat{W}_1^T H_1(Z_1) \quad (10)$$

신경회로망의 연결강도에 대한 적응칙을 다음과 같이

정의하였다.

$$\hat{W}_1 = \gamma_1 [H_1(Z_1) e_1 - \sigma_1 \hat{W}_1] \quad (11)$$

### 2.4 모의실험 및 적용

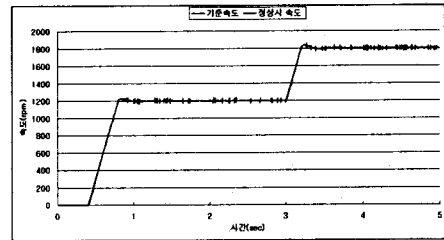
본 논문은 유도전동기의 정속 운전 시 발생하는 고장을 감지 및 분리하기 위해서 모의 실험 및 실제 적용에서 임의의 고장성분을 모델링하여 적용하였으며 속도제어를 위한 제어기의 상수는  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.001$ ,  $\gamma_1 = 10$ ,  $\gamma_2 = 20$ ,  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 4$ ,  $k_{sp} = 10$ ,  $k_{di} = 100$ 으로 설정하였다.

속도제어기의 경우 백스테핑 제어기에 의해 신경회로망의 적응칙을 유도하고 이로부터 직접 제어입력을 구함으로써 적용제어기가 단순화된 제어기를 사용하였다. 제어기 설계를 위해 단지 회전자 시정수의 전동기 파라미터만 알면 되므로 유도전동기에 대해 필요한 정보를 최소화 하였다.

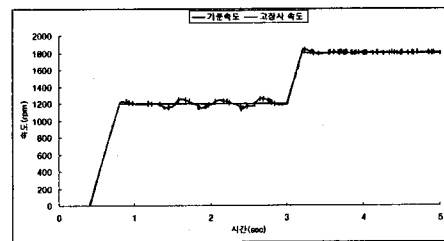
실험에 사용된 유도전동기의 파라미터는 [표 1]과 같으며 고장성분은 약 1.3초에서 모터의 회전을 방해하는 부하  $40\sin(15t)$ 로 적용 하여 고장을 발생시켜 고장의 크기를 추정되었다.

[표 1] 유도전동기 파라미터

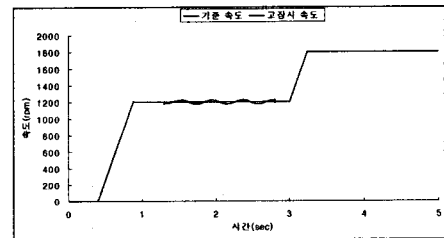
정격출력	2.2 [kW], 3[HP]	연속정격토크	14.1 [Nm]
정격회전속도	1750 [rpm]	최대회전속도	3600 [rpm]
전압	220 [V], 60 [Hz]	전류	8.5 / 5 [A]
극수	4 극	로터리엔코더	1024 [P/R]



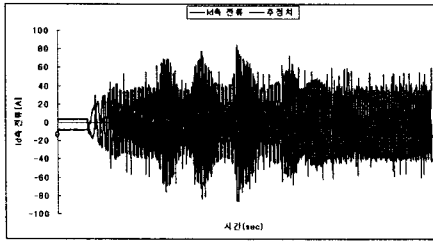
<그림 2> 고장이 없는 경우의 실제적용



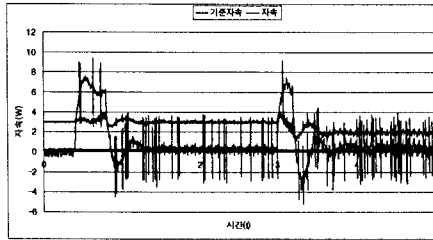
<그림 3> 고장이 발생한 경우의 실제적용



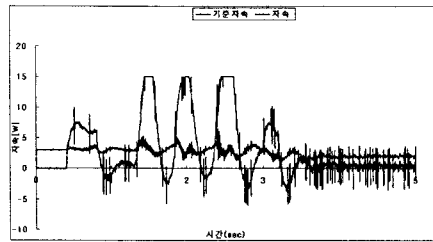
<그림 4> 고장이 발생한 경우의 모의실험



<그림 5> 고장이 발생한 경우의 실제적용



<그림 6> 고장이 없는 경우의 실제적용



<그림 7> 고장이 발생한 경우의 실제적용

### 3. 결 론

본 논문은 비선형 시스템의 고장성분 감지 및 분리에 관한 것으로서 미지의 고장함수를 추정하기 위한 뉴럴 네트워크를 이용하여 유도전동기의 고장감지 및 분리 기법을 적용하였다. 고장 신호는 잔류신호 값을 이용하였다. 유도전동기의 속도제어기는 백스테핑 제어기를 이용하였다. 제어기 모의실험 및 실제적용에서 고장 감지 및 분리 기법의 성능을 입증하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 한병조, 황영호, 김홍필, 양해원, “비선형 시스템의 액추에이터 고장과 센서 고장을 위한 감지 및 분리 기법”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp1724-1725, 2007.
- [2] Xiaodong Zhang, Polycarpou M.M., Parisini T. "A robust detection and isolation scheme for abrupt and incipient faults in nonlinear systems" Automatic Control, IEEE Transactions. Vol 47, pp. 576 - 593, April. 2002
- [3] Mattone, R. and De Luca, A. "Nonlinear Fault Detection and Isolation in a Three-Tank Heating System" Control Systems Technology, IEEE Transactions. Vol 14, pp. 1158 - 1166, Nov. 2006.