

시스템 식별 기법을 이용한 고장 탐지기 설계

박대동*, 이재호, 백산림, 박기현
성균관대학교 정보통신공학부

Design of a Fault Detector by using System Identification

TaeDong Park*, Jeaho Lee, Shanlin Bai, Kiheon Park
Sungkyunkwan University, Department of Electrical and Computer Engineering

Abstract - Demand for reliability and safety in modern systems has been increased in the research on fault detection and isolation. At traditional approaches to fault detection, redundant sensors have been used. More advanced methods are the residual analysis of signals which are created by the comparison between the actual plant behavior and the output response of a mathematical model. However, mathematical system models are difficult to obtain by using physical laws. These problems can be solved by system identification. In this paper, the transfer function of a direct current motor is estimated by using the system identification. And, the efficiency of the fault detector design is verified by using experiments.

Abstract - Fault Detection, System Identification, Structured Residuals Analysis, Direct Current Motor

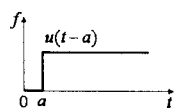
1. 서 론

시스템들의 정교화가 이루어지고 단일 시스템이 아닌 복합 시스템으로 발전해 가면서, 신뢰성을 향상시키는 문제가 대두되고 있다. 특히 항공기, 조선, 무기체계 등에 있어서 고장이 발생할 때까지 사전 조치가 이루어지지 않는다면 심각한 문제를 야기할 수 있는데, 이러한 문제를 해결하기 위해서 많은 연구가 진행되어 왔다. 기존에는 여분의 물리적인 센서정보 등을 이용하여 고장을 사전에 감지하는 방법이 이용되었으나, 비용의 증가와 효율성 문제가 지적되고 있다. 이를 보완하기 위해서, 물리적인 센서를 사용하지 않고도 신뢰성을 보장할 수 있는 기법들이 연구되어 왔는데, 대표적으로 시스템의 수학적 모델을 이용하는 관측기 기반의 고장 탐지 기법을 들 수 있다. 이 기법은 시스템의 수학적 모델을 정확하게 얻어낼 수 있다면, 실제 시스템과 관측 시스템과의 잔차 정보를 이용하여 시스템의 이상 징후를 알아낼 수 있는 방법으로 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 그러나 일반적으로 정확한 시스템의 수학적 모델을 구하기가 어렵는데, 이러한 불확실성으로 인하여 정확한 고장정보를 얻어내기가 어렵게 된다. 따라서, 본 논문에서는 물리 방정식을 이용한 수학적 모델을 사용하지 않고, 실험적으로 수학적 모델을 얻어내는 시스템 식별 기법을 이용하여 직류전동기를 대상으로 하는 고장 탐지기를 설계하고 분석해보고자 한다.

2. 본 론

2.1 선형 시스템과 덧셈형 고장

고장탐지 기능을 수행하기 위해서는 고장에 대하여 적절한 모델링이 필요하다. 시스템이 고장을 일으키는 요인에는 여러 가지가 있지만 대표적으로 잘못된 설계 및 제작, 오동작 및 정비 불량, 마모, 침식, 수명저하 등이 있다. 이러한 물리적인 요인을 개별적인 수학적 모델로 표현하는 것은 어려운 문제이기 때문에 본 논문에서는 그림 1과 같은 스텝 형태의 고장만을 고려하도록 한다.

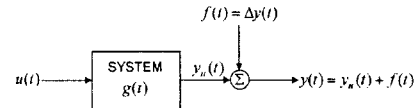


<그림 1> 스텝 형태의 고장

또한, 시스템 외란에 의한 고장, 센서 및 구동기 고장등이 시스템에 미치는 형태를 수학적 표현으로 나타내면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 이를 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = y_n(t) + f(t) \quad (1)$$

덧셈형 고장이 선형 시스템에 미치는 영향을 고려하기 위하여 단일 입력 단일 출력(SISO: Single Input Single Output)을 가지는 시스템이라 가정한다. 또한, 실제 물리 시스템은 측정할 수 없는 외란과 노이즈가 포함되고,



<그림 2> 덧셈형 고장

덧셈형 고장이 추가되는 형태이므로 전체 시스템의 수학적 표현은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[1].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Vv(t) + Lf_1(t) \quad (2)$$

$$y(t) = Cx(t) + Ni(t) + Mf_m(t)$$

$$v \in \mathbb{R}^{m \times 1}, n \in \mathbb{R}^{1 \times r}$$

본 논문에서는 식 (2)와 같은 시스템에서 고장을 고려하지 않은 시스템 모델을 시스템 식별 기법을 이용하여 구한 후, 고장 탐지 기법을 적용시키고자 한다.

2.2 시스템 식별

시스템 식별은 미지의 시스템에서 관측된 입·출력 자료를 이용하여 원래의 시스템과 동일한 특성을 가지는 수학적 모델을 결정하는 것이다. 시스템 식별은 외란이 가해진 선형 시스템을 고려하는데, 외란 $v(t)$ 를 백색잡음 $e(t)$ 가 선형필터 $H(q)$ 를 통과한다고 가정하면, 출력 $y(t)$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad (3)$$

시스템 식별을 이용하기 위하여 시간 $t-1$ 까지의 입·출력 자료가 주어졌을 때, 시간 t 에서의 출력 값 $y(t)$ 를 예측하는 one-step-ahead 예측기에 $G(q), H(q)$ 의 미지의 계수 값 θ 를 적용하면 식 (4)와 같다.

$$\hat{y}(t|\theta) = H^{-1}(q, \theta)G(q, \theta)u(t) + [1 - H^{-1}(q, \theta)]y(t) \quad (4)$$

즉, 시스템 식별의 목적은 식 (5)와 같이 시간 t 에서의 예측 오차를 최소화 하는 파라미터 θ 를 추정하는 것이다[2].

$$\epsilon(t, \theta) = y(t) - \hat{y}(t|\theta) \quad (5)$$

이와 같은 원리를 적용하여 본 논문에서는, parametric방법 중에 하나인 state-space모형을 구하여 적용하고자 한다.

2.2 잔차 생성기 설계

시스템에서 발생할 수 있는 고장을 탐지하기 위해서는 실제 시스템의 출력과 모델과의 출력 차이, 즉 잔차로부터 고장을 탐지하게 된다. 이러한 방법은 물리적인 센서를 이용하여 하드웨어적인 여유를 두는 것이 아니라 모델에 기반한 해석적 기법이다. 또한 하나 이상의 고장을 탐지하고 분리 기능을 수행하기 위해서 잔차 해석 기법중에 하나인 구조적 잔차 기법(Structured Residuals Method)이 있는데, 이것은 다중 고장에 대해서 고장 패턴(Fault Patterns)을 구성하여 고장 탐지 기능을 수행 할 수 있기 때문에 유용하게 이용된다. 본 논문에서 대상으로 하는 직류 전동기의 실제 출력 응답과 시스템 식별 기법으로 얻어진 모델의 출력과의 차이인 잔차로부터 서로 독립된 시스템 특성을 갖도록 분리하면 다음과 같다.

$$r(s) = W(s) \left[\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} E_n(s) - \begin{bmatrix} R_n + sL_n \\ -K_i \end{bmatrix} \tilde{I}_n(s) - \begin{bmatrix} K_o \\ B_m + sJ_m \end{bmatrix} \tilde{w}_m(s) - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} T_L(s) \right]$$

$$\text{여기서, } \tilde{x} = x - \hat{x}, W(s) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ K_i & R_a + sL_a \\ B_m + sJ_m & -K_b \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 직류 전동기의 출력과 시스템 식별 모델과의 오차 즉, 잔차로부터 고장 신호를 검출할 수 있다. 하지만 실제 시스템에 적용하기 위해서는 시스템 특성을 고려하여 허용오차 범위 내에서 고장 여부를 판단하여야 하는데, 최종적인 고장 판단은 다음 식으로 결정된다.

$$f_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } |r_i(t)| < r_{th} \\ 1, & \text{if } |r_i(t)| > r_{th} \end{cases} \quad (7)$$

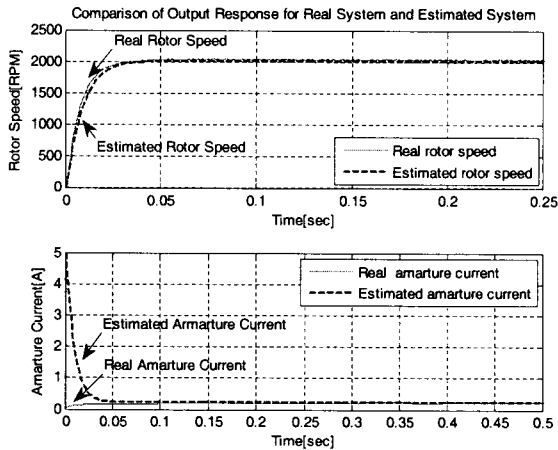
3. 모의실험 및 실험 결과

3.1 실험 방법

시스템 식별기법으로 state-space 형태의 모델 구조를 얻기 위하여 사용된 입력 신호는 백색잡음 형태인 PRBS(Pseudo Random Binary Signal)를 사용하였고, 신호의 크기는 동작점에서 $\pm 1.25[V]$ 를 갖도록 선택하였다. 이때, 샘플링 간격은 0.001초로 입·출력 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터를 이용하여 MATLAB의 System Identification Toolbox를 이용하여 시행착오적인 방법으로 얻어진 속도 모델과 전류 모델을 다음과 같이 얻을 수 있다.

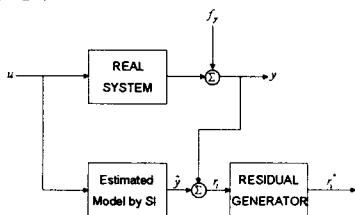
$$\begin{aligned} A_w &= \begin{bmatrix} 0.91589 & 0.15072 \\ -0.14889 & 0.084362 \end{bmatrix} & A_c &= \begin{bmatrix} 0.5576 & -0.30912 \\ -0.77188 & 0.16637 \end{bmatrix} \\ B_w &= \begin{bmatrix} -3.7614 & -3.1971 \end{bmatrix}^T & B_c &= \begin{bmatrix} -0.0029638 & -0.0059884 \end{bmatrix}^T \\ C_w &= \begin{bmatrix} -3.7627 & 3.2448 \end{bmatrix} & C_c &= \begin{bmatrix} 56.123 & -101.88 \end{bmatrix} \\ D_w &= 0.035297 & D_c &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)과 같이 나타나는 식별 모델과 실제 시스템과의 출력 응답특성을 비교하면 그림 3과 같고, 오차율은 관심있는 정상상태 구간에서 속도오차는 0.25%, 전류오차는 1.36%로써, 만족할 만한 식별 모델을 얻을 수 있다.



<그림 3> 실제 시스템과 식별모델의 출력특성 비교

또한, 본 논문에서 이용된 고장탐지기의 구조는 그림 4와 같으며, 직류 전동기에서 발생할 수 있는 고장형태 중 단위 계단 입력 형태의 과부하 고장만을 고려하도록 한다.

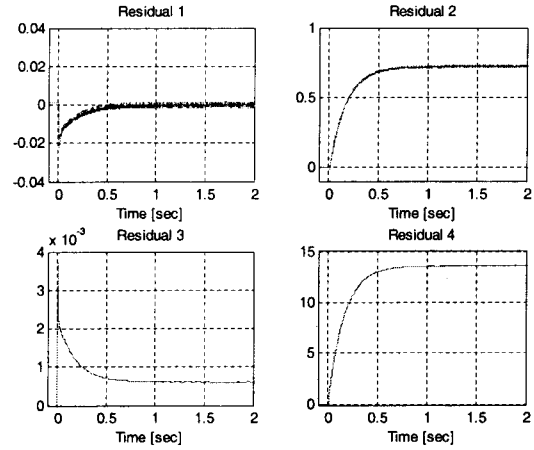


<그림 4> 고장 탐지기 구조

3.2 실험 결과

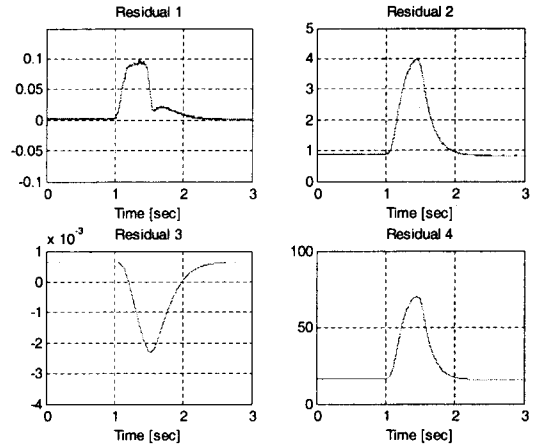
직류 전동기를 이용하여 과부하 고장이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우의 상태를 비교하기 위하여 수행한 실험 결과는 다음과 같다. 먼저, 입력

전압 12.5[V]를 인가시켜 2000[RPM]으로 정상적인 동작이 이루어진다고 가정한다. 이때 시스템의 거동만을 관찰하기 위하여 저주파 통과 필터를 통과한 잔차 생성기의 출력을 관찰하면 그림 5와 같은 결과를 얻을 수 있다.



<그림 5> 고장이 없을 때 잔차

과부하 고장은 회전축의 톨립이나 마찰력의 증가로 발생할 수 있는데, 본 논문에서는 1초일 때, 단위 계단 입력 형태의 과부하 고장이 발생한다고 가정하였다. 이때의 크기는 약 0.1[Nm]이다. 고장이 발생하면 실제 시스템의 출력과 시스템 식별 모델의 출력 특성이 달라지게 되는데, 잔차 정보의 결과는 다음과 같다.



<그림 5> 과부하 고장일 때 잔차

이 잔차 정보로부터 시스템의 특성을 적절히 고려하고 식 (7)을 이용하면 고장을 판별할 수 있으며, 고장패턴을 구성하여 하나 이상의 고장에 대해서도 적절히 판별해 낼 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 산업 현장에서 대표적으로 이용되는 직류 전동기를 이용하여 과부하 고장을 가정하고, 시스템 식별 모델이 고장 탐지에 적절히 이용될 수 있음을 실험을 통하여 검증하였다. 수학적 모델을 구하여 고장 탐지기 설계가 곤란한 경우, 적절한 방법이 될 수 있다. 또한 시스템 식별을 이용하는 경우, 구현하는데 있어서 간단하게 구현이 가능하다는 장점도 있다. 과부하 고장이외에도 잔차 생성기에 적용된 구조적 잔차 설계 기법은 고장 패턴을 구성할 수 있다 때문에, 이것을 적절히 이용하면 하나 이상의 고장에 대해서도 분리가 가능하다는 장점이 있다.

본 논문은 대학 IT 전공 역량 강화(NEXT) 사업(2008-0162-000) 지원으로 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1] Rolf Isermann, "Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance", Springer, 2006
- [2] Lennart Ljung, "System Identification Theory for the User", Prentice Hall, 1999