

비선형 공정의 고장검출을 위한 잔차발생알고리즘

\*류지수, \*이상문, \*이기상, \*\*박태건  
\*단국대학교 전기공학과, \*\*충북과학대학 전자정보과

A residual generator for fault detection/isolation of a class of nonlinear systems

\*Ji-su Ryu, \*Sang-Moon Lee, \*Kee-Sang Lee, \*\*Tae-Geon Park  
\*Dept. of Electrical Eng., Dankook Univ, \*\*Dept. of Electron. & Inform Chungbuk Provincial College

**Abstract** - A residual generation scheme that can be employed in the process fault detection and isolation systems for a class of nonlinear (control) systems is suggested. Although the scheme is a kind of observer scheme, the design of the observers employed for residual generation is very simple and the order of the observer is very low. In spite of the simplicity, the residual generation scheme provides the same information for the detection and isolation of the anticipated faults as the conventional multiple observer based schemes. The residuals may be structured so that fault isolation can be performed by pre-selected logic. An FDIS using the residual generation scheme is constructed and evaluated for a nonlinear DC motor system.

1. 서 론

관측자개념에 근거한 고장검출식별기법은 다중관측자기법과 검출필터기법으로 분류된다[1]. 검출필터기법은 일반적으로 고장검출과 식별을 한 개의 필터에 의해 수행할 수 있다는 장점이 있지만 고유치-고유벡터배치기법에 의해 설계되므로 설계조건이 까다로우며 특히 비선형시스템으로의 확장이 곤란하다. 다중관측자를 이용한 검출식별기법은 DOS, GOS 등의 구조로 설계되며[2], 여기에 도입된 관측자들은 일반적으로 가관측조건이 만족될 경우 설계가능하다. 이러한 기법들은 최근에 보고된 다양한 비선형관측자 설계기법을 도입할 경우 비선형시스템에의 확장이 비교적 용이하다[3]. 다중 관측자기법 적용시 최대의 문제점은 잘 알려진 바와 같이 여러개의 관측자를 병렬적으로 구동해야하므로 실시간 적용이 어렵다는 점이며 이러한 문제점을 해결하기 위해 다중관측자기법의 직렬구동기법[3], 함수관측자기법[4], 등이 제안된 바 있다. 본 논문에서는 비선형다변수계의 프로세스 고장검출식별을 위한 한가지 잔차발생알고리즘과 이를 이용한 고장검출식별시스템의 설계방법을 소개하고 그 유용성을 검토한다. 이 잔차발생알고리즘은 최근 선형시스템을 위한 잔차발생을 위해 제안된 고장검출관측자기법 (FDO: fault detection observer)의 개념[5]을 비선형시스템에 도입한 결과이며 고장의 추정이 가능하도록 변경될 수 있다. 제안된 잔차발생알고리즘의 또 다른 특징은 미리 선정된 논리에 의해 고장식별이 가능하도록 설계될 수 있다는 점이다.

2. 비선형계의 고장검출

2.1 문제의 설정

식(1)의 비선형계통을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) + f_s(t), \quad x(0) = x_0 \\ y(t) &= c(x(t), u(t)) + f_y(t) \end{aligned} \quad (1)$$

위에서  $x$ 는  $n$ 차원 상태벡터,  $u$ 는  $m$ 차원 입력벡터,  $y$ 는  $p$ 차원의 출력벡터이며  $x_0$ 는 초기상태를 나타낸다. 또한  $f$ 와  $h$

는 연속미분가능한 함수이며  $f_p$ 과  $f_s$ 는 각각 발생 가능한 프로세스고장, 측정장치 고장이다. 고장검출식별을 위한 잔차발생장치에 요구되는 전제 조건은 발생되는 잔차에 대한 임계치 검사 및 논리적 연산을 수행함으로써 발생고장의 검출과 식별이 가능해야 한다는 점이다. 가장 많이 사용되는 잔차발생장치는 식(2)와 같은 관측자 구조를 가진다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= f(\hat{x}, u) + k(\hat{x}, u)(y - \hat{y}), \quad \hat{x}(0) = \hat{x}_0 \\ \hat{y} &= c(\hat{x}, u) \end{aligned} \quad (2)$$

이 관측자는  $f_p=0, f_s=0$ 이라는 가정하에 설계된다. 여기서  $\hat{x}$ 는 관측자의 상태로서  $n$  차원 벡터이고,  $\hat{y}$ 는 관측자의 출력벡터이며  $\hat{x}_0$ 는 관측자의 초기상태이다. 또한  $k(\hat{x}, u)$ 는 관측자 이득 행렬이며 잔차는 (3)으로 정의된다.

$$r = y - \hat{y} \quad (3)$$

프로세스고장과 측정장치고장의 검출식별은 별도의 검출식별시스템에 의해 수행되므로 본 논문에서는 프로세스고장만을 대상으로 한다. 고장검출은 잔차의 임계치 초과여부에 의해 결정되므로 매우 단순하지만 식별을 위해서는 식별정보 발생을 위해 일부 고장에 대해 둔감하고 또 다른 고장에 대해 매우 민감한 관측자를 도입해야 한다. 현재 비선형시스템을 대상으로 이러한 특성을 가진 잔차발생을 위해 NUO, DDNO등이 제안, 적용된바 있다[2]. 검출과 식별 기능을 모두 가지는 고장검출식별시스템을 위한 잔차발생기구의 설계개념을 설명하기 위해 두가지의 극단적인 경우를 고려한다. 검출식별대상은  $r$  차원 고장벡터이다.

$$f_p = [f_{p1} \ f_{p2} \ \dots \ f_{pr}] \quad (4)$$

**Case 1 :** 검출 대상 고장수와 동일한 관측자를 구동하며, 각 관측자는 특정한 한 개의 고장에 대해서 둔감하도록 설계한다[1]. 예를 들어  $i$  번째 관측자가 외란 및  $f_i$ 에 대하여 둔감하고 나머지 고장에 민감하도록 설계된다면 다음의 잔차를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} r_1(t) &= NO_1(f_{p2}, f_{p3}, \dots, f_{pr}) \\ r_2(t) &= NO_2(f_{p1}, f_{p3}, \dots, f_{pr}) \\ &\vdots \\ r_r(t) &= NO_r(f_{p1}, f_{p2}, \dots, f_{p,r-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $NO(\cdot)$ 는 비선형관측자를 의미하며 괄호 안의 변수들은 잔차에 영향을 주는 고장이다. 위의 잔차를 이용하면 단일 고장에 대한 고장식별논리는 매우 단순하다. 즉,

$$\text{IF } r_i < \text{th}(i) \text{ and } r_j \geq \text{th}(j),$$

$$j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, r, \text{ Then fault}(i)$$

위의 잔차발생을 위한 비선형관측자는 오직 한 개의 고장에 대해 둔감하도록 설계되므로 그 존재 조건이 비교적 부드럽다. 그러나 위의 잔차집합은 두 개 이상의 고장이 동시에 발생한 경우 고장식별이 불가능하다.

**Case 2 :** 동시에 발생하는  $r$  개의 고장을 식별하기 위해서는 다음과 같이 오직 한 개의 고장에 의해서만 영향을 받는 잔차를 발생시켜야 한다.

$$\begin{aligned} r_1(t) &= NO_1(f_{\mu 1}) \\ r_2(t) &= NO_2(f_{\mu 2}) \\ &\vdots \\ r_r(t) &= NO_r(f_{\mu r}) \end{aligned} \quad (6)$$

위의 잔차집합의 요소는 모두 독립적이므로  $r$  개의 동시고장 검출이 가능하며 다음과 같은 매우 단순한 논리에 의해 고장식별을 가능케 한다.

If  $r_i \geq th(i)$ , Then fault(i) for  $i=1,2,\dots,r$

이 잔차집합은 고장식별의 관점에서 매우 유용하지만 해당되는 고장신호를 제외한 모든 고장신호에 대해 둔감한 관측자를 설계해야 하며 이러한 비선형관측자의 존재 조건은 매우 까다롭다. 따라서 실제적인 잔차발생기구는 (5)와 (6)을 절충한 상태에서 비선형관측자 설계의 단순성과 식별성능을 고려하여 설계된다.

위에 언급한 고장검출식별시스템에 사용된 비선형관측자는 거의 모든 경우  $n$ 차원 동태방정식이며 결국 최소한  $q$ 개의  $n$ 차원 관측자가 병렬적으로 구동되어야 하므로, 이를 도입한 고장검출식별시스템의 실시간 적용은 곤란하다. 따라서 동일한 기능을 가지면서 알고리즘이 단순한 잔차발생알고리즘의 제안은 고장검출식별기구의 실질적 적용을 위해 매우 중요한 과제로 인식되고 있다. 다음 절에서는 이러한 문제점을 해결해 주는 한가지 잔차발생기구를 소개한다.

## 2.2 제안된 잔차발생기구

관측자에 근거한 잔차발생기구는 그 구성 및 설계방법이 관측자와 동일하지만 그 적용목적이 검출식별하고자하는 고장의 정보를 추출함에 있으므로 잔차발생에 필요한 변수(일반적으로 측정출력)들의 추정치를 제공하면 된다. 잔차발생기구의 평가 기준도 이상의 검출과 식별을 가능케하는 정보의 양과 질이며, 실질적 적용의 관점에서는 알고리즘의 단순성도 매우 중요하다. 제안하는 잔차발생기구는 식(1)의 비선형시스템을 수개의 부계통으로 분할하고 각 부계통에 대한 관측자를 설계한 결과로서, 결국 식(1)에 대한 분산형관측자(Decentralized observer)라 할 수 있다. 분산형 관측자의 설계대상인 각부계통의 차원과 상태변수는 가관측(observability) 조건이 만족되도록 선정되어야 한다. 본절의 전개는 선형계에 대해 제안된 잔차발생기구를 비선형계통으로 확장함에 의미를 두었으므로 전개의 복편의상 모든 상태변수가 측정된다고 가정한다. 이 경우에는 식(1)의 계통은 식(7)와 같이 한 개씩의 상태변수를 갖는  $n$ 개의 부계통으로 분할되며, 각 부계통은 다음식으로 표현된다.

$$\dot{\hat{x}}_i = f_i(x_i, \bar{x}_i, u_i) \quad (7a)$$

$$y_i = c_i(x_i, u_i) \quad (7b)$$

$$\bar{y}_i = \bar{c}_i(\bar{x}_i) \quad (7c)$$

위에서  $x_i$ 는  $i$  번째 부계통의 상태벡터,  $\bar{x}_i$ 는 다른 부계통으로부터의 상호작용변수,  $y_i$ 는  $i$  번째 부계통의 측정출력변수, 그리고  $\bar{y}_i$ 는  $i$  번째 부계통으로 유입되는 상호작용변수 중 측정변수를 나타낸다. 우선 모든 상호작용변수  $\bar{x}_i$ 가 측정되어  $\bar{y}_i = \bar{x}_i$  (8)

인 경우를 고려한다. 이 경우 상호작용변수는 불확실성이 없는 측정변수이므로 추가적인 입력변수로 간주할 수 있고 따라서 다음의 비선형 관측자를 설계할 수 있다.

$$\hat{x}_i = f_i(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i) + k_i(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i)(y_i - \hat{y}_i) \quad (9a)$$

$$\hat{y}_i = c_i(\hat{x}_i, u_i) \quad (9b)$$

관측자의 추정오차를 다음과 같이 정의하고

$$e_i = x_i - \hat{x}_i \quad (10)$$

식(7)을 다음의 관측자형으로 표현하자.

$$\dot{\hat{x}}_i = f_i(x_i, \bar{x}_i, u_i) + k_i(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i)(y_i - c_i(x_i, u_i)) \quad (11)$$

위의 비선형방정식은 선형화된 오차방정식을 구하기 위하여  $\hat{x}_i$ 에서 Taylor급수로 전개된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i &= [f_i(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i) + \frac{\partial f_i}{\partial x_i}(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i)(x_i - \hat{x}_i) + h.o.t.] \\ &\quad - k_i(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i)[c_i(\hat{x}_i, u_i) + \frac{\partial c_i}{\partial x_i}(\hat{x}_i, u_i)(x_i - \hat{x}_i) + h.o.t.] \\ &\quad + k_i(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i)y_i \end{aligned} \quad (12)$$

이제 식(12)에서 (9a)를 빼고 고차항을 무시하면 다음 오차식이 얻어진다.

$$\dot{e}_i = F_i e_i \quad (13)$$

$$F_i = [\frac{\partial f_i}{\partial x_i}(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i) - k_i(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i) \frac{\partial c_i}{\partial x_i}(\hat{x}_i, u_i)] \quad (14)$$

위식은 관측자 이득  $k_i(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i)$ 를 구하기 위해 직접 사용될 수 있으며  $F_i$ 가 안정한 행렬로 선정된 경우, (14)의 해는 다음과 같다.

$$k_i(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i) = [\frac{\partial f_i}{\partial x_i}(\hat{x}_i, \bar{x}_i, u_i) - F_i] / [\frac{\partial c_i}{\partial x_i}(\hat{x}_i, u_i)]^+ \quad (15)$$

## 2.3 더하기형 고장의 추정

식(1)에서와 같이 고장이 원래의 동태방정식에 추가되는 경우에는 관측자의 오차방정식에 근거하여 고장추정을 위한 추가적인 선형관측자를 설계할 수 있다. 본절에서 제시하는 고장추정기구는 일종의 미지입력관측자이다. 우선  $i$ 번째 부계통에 더하기형 고장이 발생한 경우, 식(9)의 관측자에 대한 상태추정 오차 방정식은 다음과 같이 수정되며,

$$\dot{e}_i = F_i e_i + f_{\mu} \quad (16)$$

출력관측방정식은 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$e_{\mu} = c_i(x_i, u_i) - c_i(\hat{x}_i, u_i) = \frac{\partial c_i}{\partial x_i}(\hat{x}_i, u_i) e_i \quad (17)$$

편의상  $\frac{\partial c_i}{\partial x_i}(\hat{x}_i, u_i) = h_i$ 라 정의하면

$$e_{\mu} = h_i e_i \quad (18)$$

고장 추정을 위해  $f_{\mu}$ 가 비교적 느리게 변화한다는 가정하에 (19)와 같은 동태방정식으로 모델링하고,

$$\dot{w} = E_i w \quad (19a)$$

$$f_{\mu} = H_i w \quad (19b)$$

식(16)(18)과 (19)를 결합하여 다음 식을 얻는다.

$$\dot{e}_i = F_i e_i \quad (20a)$$

$$e_{\mu} = h_i e_i \quad (20b)$$

여기서  $e_i = \begin{bmatrix} e_i \\ w \end{bmatrix}$ 이며,  $F_i = \begin{bmatrix} F_i & H_i \\ 0 & E_i \end{bmatrix}$ ,  $h_i = [h_i \ 0]$ 이다.

식(20)의 요소 중 (19)의 고장모델은 가관측이 보장되도록 선정할 수 있으므로 결국 식(20)에 대한 관측자는 (16)(18)의 가관측성이 보장되는 한 고전적인 관측기 설계기법에 의해 설계가능하며  $w(f_m)$ 의 추정치를 제공한다.

### 2.4 제안된 잔차발생기법의 응용

본 절에서는 제안한 잔차발생기법을 직류 분권전동기의 고장검출식별에 적용한다. 직류 분권전동기는 다음의 비선형 미분방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{di_f}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f}i_f + \frac{1}{L_f}V \\ \frac{di_a}{dt} &= -\frac{R_a}{L_a}i_a - \frac{M}{L_a}i_f\omega_m + \frac{1}{L_a}V \\ \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{M}{J}i_fi_a - \frac{B}{J}\omega_m \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,  $i_a, i_f, \omega_m$ 는 전기자 전류, 계자전류 및 회전각속도이며,  $R_a, L_a$ 는 전기자 저항과 인덕턴스,  $R_f, L_f$ 는 계자 저항과 인덕턴스,  $B, J$ 는 각각 점성마찰계수 및 관성모멘트,  $M$ 은 전기자회로와 계자회로간의 상호인덕턴스이고,  $V$ 는 입력전압이다. 본 논문에서는 직류 전동기에서 발생할 수 있는 고장 중, 브러쉬 결함과 축수와 베어링의 마모등 2가지 결함을 고려하였다. 분권전동기의 파라미터값은 표1와 같고 상태변수는  $x = [i_f, i_a, \omega_m]^T$ 이다. 그림1은 브러쉬 결함 ( $R_a \rightarrow 2R_a$ )의 경우, 상태변수와 잔차이며, 그림2는 베어링 결함 ( $B \rightarrow 3B$ )이 발생한 경우의 응답이다. 시뮬레이션 결과는 이들이 식(6)의 조건을 만족하고 따라서 동시고장의 검출식별까지 가능함을 입증해 준다.

표 1. 분권전동기의 파라미터값

$R_a$	3.8 [Ω]	M	0.221 [H]
$L_a$	0.5 [H]	B	0.042 [Nms/rad]
$R_f$	50 [Ω]	J	0.4 [kgm <sup>2</sup> ]
$L_f$	20 [H]		

### 3. 결 론

본 논문에서는 비선형시스템의 프로세스 고장검출식별을 위한 한가지 잔차 발생 알고리즘과 이를 이용한 고장검출식별시스템의 설계방법을 제시하고 그 유용성을 검토하였다. 제안된 잔차 발생 알고리즘은 기존의 다중관측자 기법과 동일한 식별 정보를 제공하면서도 매우 낮은 차원의 동태방정식으로 설계되며 미리 선정된 논리에 의해 고장식별이 가능하도록 설계될 수 있다. 제안된 잔차발생기구를 도입하여 비선형성을 가진 분권전동기에 대한 고장검출식별시스템을 설계하고 고장 시뮬레이션을 수행함으로써 제안된 기법의 유용성을 입증하였다. 이후의 연구과제는 비측정변수가 존재하는 경우에 대한 최근의 연구결과를 비선형계통으로 확장하는 것이다.

### [참 고 문 헌]

[1] R. N. Clark, "State estimation schemes for instrument fault detection." in *Fault Diagnosis in Dynamic Systems*, edited by R. Patton, P. Frank and R. N. Clark, prentice-Hall, 1989.  
 [2] P. M. Frank, "On-line fault detection in uncertain nonlinear systems using diagnostic observers: A survey",

*International Journal of System Science*, Vol.25, No.12, pp.2129-2154, 1994.

[3] K.S. Lee and J.S. Ryu, "Instrument fault detection and compensation scheme for direct torque controlled induction motor drives," *IEE proc. Control theory Appl.*, Vol. 150, No. 4, pp.376-382, 2003.  
 [4] 이기상, 류지수, "함수관측자를 이용한 고장검출식별에 관한 연구," *제어자동화시스템공학 논문지*, 제10권 11호, pp.883-890, 2003.  
 [5] 이기상, 이상문, "프로세스고장검출을 위한 새로운 잔차발생기구," *전기학회논문지*, 제52D권 10호, pp.575-582, 2003.

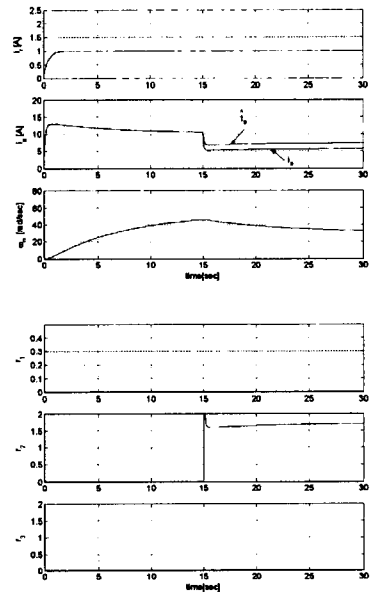


그림 1. 브러쉬 결함시 상태변수와 잔차

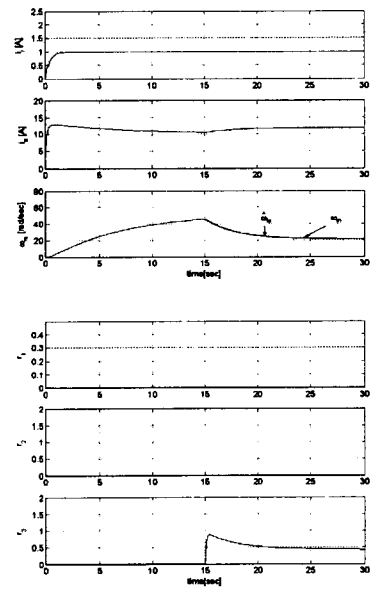


그림 2. 베어링 결함시 상태변수와 잔차