

## 패리티 공간기법을 이용한 위치 서보계의 고장검출

최 경 영\* 박 태 건\* 이 기 상\*

\*단국대학교 전기공학과

### A PARITY SPACE APPROACH TO FAULT DETECTION FOR A POSITION SERVO SYSTEM

Kyung-Yung Choi\* Tae-Geon Park\* Kee-Sang Lee\*

\*Dept. of Electrical Eng. Dankook University

**Abstract** - The parity relation approach for the fault detection and isolation (FDI) of a large diesel engine actuator position servo system is presented. Main purpose of the FDI system is to detect and isolate two important faults, actuator fault and sensor fault, that, if not detected and compensated, degrade the overall system performance. Simulation results are given to show the practical applicability of the FDI scheme.

#### 1. 서 론

본 논문에서는 계통의 수학적 모델에 근거한 고장 검출 진단 기법 중 패리티 공간 (Parity Space) 기법을 이용하여 선박용 대형 디젤 엔진의 위치 서보계[1]를 위한 고장 검출 식별 시스템을 설계하고 그 성능을 검토하였다. 대상 프로세스인 위치 서보계에서 검출 식별 되어야 할 중요고장은 구동장치의 고장과 궤환정보를 제공하는 측정장치의 고장으로 선정하였다. 이들 고장은 일차적으로 위치 서보계의 성능 감퇴를 초래 할 뿐 만 아니라 신속히 검출 보상 하지 않을 경우 엔진 성능을 저하시키는 원인이 된다. 패리티 공간기법에 근거한 고장 검출 시스템은 패리티 함수가 검출 대상이 아닌 외란에 대한 강인성과 검출대상 고장에 대한 민감성을 가지는 동시에 발생하는 잔차 벡터가 각 고장마다 독립적인 방향성을 가지도록 설계된다. 고장 검출 식별 알고리즘의 성능개선을 위해 잔차에 대한 검사와 함께 Trend 검사를 병행 함으로써 동일 경로로 전파되는 부하 외란과 구동장치 고장의 식별을 가능케 하였다. 본 논문의 내용은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 패리티 공간 기법에 근거한 잔차 생성 방법 및 성질을 서술하고, 3절에서는 대상 계통에 대한 고장 검출 계통을 설계하고 그 성능을 검토하였으며, 4절에는 결론을 기술했다.

#### 2. 패리티 공간 기법을 이용한 FDI

##### 2.1 계통 구성

구동장치 고장 및 센서 고장을 포함한 다음의 계통 방정식을 고려하자.

$$\begin{aligned} x(t+1) &= \Phi x(t) + \Gamma u(t) + F_{ac} p(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + F_s q(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $x \in \mathbb{R}^n$ 인 상태 벡터이고,  $F_{ac}$ 와  $F_s$ 는 고장 행렬이며 기지로 가정한다. 그리고  $u(t)$ 는  $k$  차원의 입력벡터,  $y(t)$ 는  $m$ 차원의 출력벡터, 그리고  $p(t)$ 는  $i$ 차원의 프로세스 고장벡터,  $q(t)$ 는  $j$  차원의 센서 고장벡터이다. 식(1)을 입력력 형태의 등가 계통으로 표현하면,

$$y(t) = S(z)u(t) + F_s q(t) + R(z)p(t) \quad (2)$$

$$S(z) = C(zI - \Phi)^{-1}\Gamma + D$$

$$R(z) = C(zI - \Phi)^{-1}F_{ac}$$

이다. 식(2)는 패리티 관계 함수 표현을 위하여 다음의 등가 형태로 나타 낼 수 있다.

$$H(z)y(t) = G(z)u(t) + H'(z)q(t) + V(z)p(t) \quad (3)$$

식(3)에서  $H'(z) \triangleq H(z)F_s$  되고  $H(z)$ ,  $G(z)$ ,  $V(z)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H(z) &= I + H_1 z^{-1} + \dots + H_n z^{-n} \\ &= [\det(I - z^{-1}\Phi)]I \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G(z) &= G_0 + G_1 z^{-1} + \dots + G_n z^{-n} \\ &= \text{Cadj}(I - z^{-1}\Phi)z^{-1}\Gamma + D[\det(I - z^{-1}\Phi)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V(z) &= V_0 + V_1 z^{-1} + \dots + V_n z^{-n} \\ &= \text{Cadj}(I - z^{-1}\Phi)z^{-1}F_{ac} \end{aligned}$$

##### 2.2 패리티 관계를 이용한 잔차 방정식 설계

###### 2.2.1 패리티 관계

잔차 방정식은 각각의 잔차가 패리티 공간 내에서

미리 결정된 방향성을 갖도록 설계되어야 한다. 이러한 특성을 갖는 잔차 방정식은 계통을 입출력 형태로 나타낸 식(3)의 변형된 형태인 식(4)의 패리티 관계 함수를 이용하여 유도 할 수 있다.

$$o(t) = H(z)y(t) - G(z)u(t) \quad (4-1)$$

$$= H'(z)q(t) + V(z)p(t) \quad (4-2)$$

식(4-1)은 측정 가능한 입력과 출력에 의한 표현이며, 그리고 식(4-2)는 센서 고장 및 프로세스 고장의 향으로 표현된 패리티 함수이다. 고장 검출 식별에 이용된 잔차 방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$r(t) = W(z)o(t) \quad (5)$$

여기서  $W(z)$ 는 특성방정식 변환 행렬이다. 잔차 방정식은 검출 하고자 하는 고장에 의해서만 영이 아닌 잔차가 발생 하도록 행렬  $W(z)$ 를 선택하는 문제로 귀결된다.

### 2.2.2 방향성을 갖는 구조적 잔차 설계

검출 식별하고자 하는 두 개 또는 그 이상의 고장이 동일한 set에서 영이 아닌 잔차를 발생하는 경우에는 각 고장으로 인한 잔차 벡터가 패리티 공간 내에 미리 결정된 방향에 놓이게 함으로써 각 고장을 식별할 수 있다. 이와 같이 미리 결정된 방향성을 갖는 잔차를 구조적 잔차라 하며 그 표현은 다음과 같다.

$$r^*(t|p_i) = d_i \gamma_i(z) p_i(t) \quad (6-1)$$

$$r^*(t|q_i) = c_i \delta_i(z) q_i(t) \quad (6-2)$$

여기서  $r^*(t|p_i)$ 는 고장  $p_i(t)$ 에 의한 잔차 벡터이다. \*는 방향성을 의미하고  $d_i$ 와  $c_i$ 는 검출하고자 하는 고장  $p_i(t)$ 와  $q_i(t)$ 에 대한 패리티 공간 내에 미리 선정된 잔차의 방향으로 고장 출력 행렬인  $CF_{ac}$ 와  $CF_s$ 의 열 벡터를 구성한다.  $\gamma_i$ 와  $\delta_i$ 는 고장  $p_i(t)$ 와 고장  $q_i(t)$ 에 대한 잔차의 동특성 응답이며 식(4-2)를 식(5)에 대입하여 얻는다. 잔차의 방향  $d_i$ 와  $c_i$ 는 서로 독립적이어야 하고, 그렇지 않다면 식별 가능한 고장의 수는 감소된다. 식(4-2)의 패리티 관계 함수는 고장  $p_i(t)$ 와 고장  $q_i(t)$ 에 대한 함수의 합으로 쓸 수 있다.

$$o^*(t) = o^*(t|p_i) + o^*(t|q_i) \quad (7-1)$$

$$o^*(t|p_i) = v_i(z)p_i(t) \quad (7-2)$$

$$o^*(t|q_i) = h_i'(z)q_i(t) \quad (7-3)$$

여기서  $v_i(z)$ 와  $h_i'(z)$   $V(z)$ 와  $H'(z)$ 의 열 벡터이다. 식(5)에 식(7)을 대입하면,

$$r^*(t) = W(z)o^*(t) \quad (8)$$

$$= W(z)v_i(z)p_i(t) + W(z)h_i'(z)q_i(t)$$

이를 식(6)과 비교해보면,

$$W(z)v_i(z) = d_i \gamma_i(z) \quad (9-1)$$

$$W(z)h_i'(z) = c_i \delta_i(z) \quad (9-2)$$

식(9)를 행렬 형태로 표현하면,

$$W(z)[V(z)H'(z)] = [D'(z)C'(z)] \quad (10)$$

여기서  $[V(z)H'(z)]$ 은  $v_i(z)$ 와  $h_i'(z)$ 로 이루어진 행렬이고,  $[D'(z)C'(z)]$ 는  $d_i \gamma_i(z)$ 과  $c_i \delta_i(z)$ 의 열 벡터로 이루어진 행렬이다. 변환 행렬  $W(z)$ 는 식(10)으로부터 구할 수 있다.

$$W(z) = [D'(z)C'(z)][V(z)H'(z)]^{-1} \quad (11)$$

식(4-1)과 식(11)을 식(8)에 대입하여 방향성을 갖는 구조적 잔차를 표현하며,

$$r^*(t) = W(z)[H(z)y(t) - G(z)u(t)] \quad (12)$$

이것은 다음과 등가이다.

$$r^*(t) = [D'(z)C'(z)] \begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

식(13)의 잔차 벡터는 고장량에 비례하며 해당하는 고장의 방향에 관계 되어 있어 입출력 경로로 전파되는 고장의 식별을 가능하게 한다.

## 3. 시뮬레이션 결과 및 해석

디젤 엔진의 속도 제어를 위한 서보 시스템은 기준 속도와 부하 외란을 입력으로, 전동기 속도와 기어 위치를 측정 출력으로 하며 속도 제어를 위한 PI 제어기를 포함한다. 제어기를 포함한 계통의 상태 공간 표현은 다음과 같다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.507 & -0.358 & 0 \\ 0.635 & -9.15 \cdot 10^{-2} & 0 \\ 5.42 \cdot 10^{-5} & 3.93 \cdot 10^{-5} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.380 \\ 1.064 \\ 7.07 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.978 \end{bmatrix}$$

$$F_{ac} = \begin{bmatrix} -1.21 \cdot 10^{-2} & -0.493 \\ 1.55 \cdot 10^{-2} & 0.635 \\ 1.33 \cdot 10^{-6} & 5.42 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$$

$$F_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.978 \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 행렬  $F_{ac}$ 의 첫 번째 열은 부하 외란을, 두 번째 열은 구동장치 고장성분을 포함한다.

### 3.1 구동장치 고장 및 센서 고장 검출

대상 계통의 구동장치 고장과 센서 고장에 대한 출력 행렬  $CF_{ac}$ 와  $CF_s$ 의 독립성을 검사함으로써 두 고장의 식별을 가능하게 하는 변환 행렬  $W(z)$ 가 존재함을 알 수 있다. 구동장치 고장  $p(t)$ 와 센서 고장  $q(t)$ 에 대한 잔차 그리고 변환

행렬  $W(z)$ 는 다음과 같이 설계된다.

$$W(z) = \begin{bmatrix} 4.44z^{-1}(1-z^{-1}) & 0 \\ -0.000052z^{-1}(1-0.62z^{-1}-0.35z^{-2}) & 0.62z^{-1}(1-2z^{-1}+z^{-2}) \end{bmatrix}$$

$$r^*(t|p) = [4.441y_1(t-1) - 10.728y_1(t-2) + 8.935y_1(t-3) - 3.451y_1(t-4) + 0.803y_1(t-5)] + [-4.727u(t-2) + 10.781u(t-3) - 7.383u(t-4) + 1.3282u(t-5)]$$

$$r^*(t|q) = [-0.518y_1(t-1) + 0.915y_1(t-2) - 0.496y_1(t-3) + 0.078y_1(t-4) + 0.050y_1(t-5) - 0.033y_1(t-6)] \cdot 10^{-5}$$

$$+ [0.621y_2(t-1) - 1.953y_2(t-2) + 2.413y_2(t-3) - 1.564y_2(t-4) + 0.595y_2(t-5) - 0.112y_2(t-6)]$$

$$+ [4.842u(t-2) - 12.378u(t-3) + 9.920u(t-4) + 2.080u(t-5) - 0.206u(t-6)] \cdot 10^{-5}$$

그림 1, 그림 2는 계통에 2.7초에서 구동장치 고장과 0.7초에서 0.9초까지 센서 고장 발생 시 설계된 변환행렬  $W(z)$ 로부터 얻어진 구조적 잔차이다. 각 잔차는 해당 고장에만 영이 아닌 값을 가지며,  $r^*(t|p)$ 는 2.72초에서 구동장치 고장을  $r^*(t|q)$ 는 0.75초에서 센서 고장을 식별 하였다.

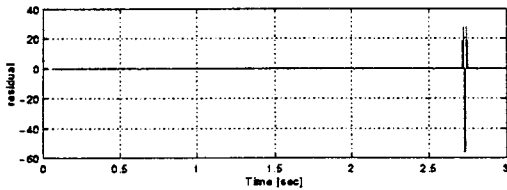


그림 1 0.7초에서 0.9초까지의 센서 고장, 2.7 초에서 구동장치 고장 발생시 잔차  $r^*(t|p)$

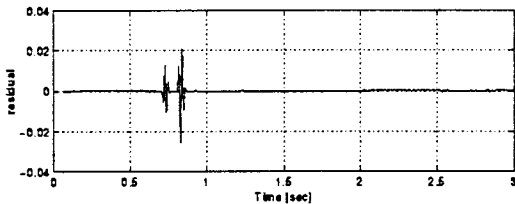


그림 2 0.7초에서 0.9초까지의 센서 고장, 2.7초에서 프로세스 고장 발생시 잔차  $r^*(t|q)$

대상 시스템의 특성상 구동장치 고장은 부하 외란과 동일한 경로를 따라 전파되므로 식별이 곤란하다. (그림 3). 여기서는 구조적 잔차에 대한 문턱값 시험과 속도 측정치의 기율기 검사를 병행하여 식별을 가능케 하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 패리티 공간 개념에 근거한 구조적

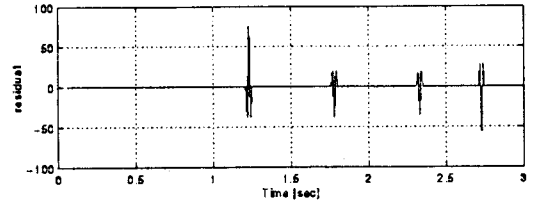


그림 3 0.7초에서 0.9초까지의 센서 고장, 1.2초에서 부하 투입, 1.75초에서 부하 감소, 2.3초에서 부하 제거, 2.7 초에서 구동장치 고장 발생시 잔차  $r^*(t|p)$

잔차 발생 기법을 이용하여 선박용 대형 디젤 엔진의 조속기 제어를 위한 위치 서보 시스템의 고장 검출 진단 시스템을 설계하고, 대상 계통에 발생할 수 있는 구동장치 고장 및 센서 고장에 대한 검출 식별 성능을 분석하였다. 대상 시스템이 부하 외란이 구동장치 고장과 같은 경로로 전파되지만, 사용된 기법에 의하여 생성된 잔차는 기율기 검사와 병행하여 구동장치 고장을 정확히 분류할 수 있었다. 향후 연구과제는 같은 경로를 통해 들어오는 고장 및 동시에 발생하는 고장, 그리고 모델링 오차, 파라미터 변동, 잡음 등의 비선형성을 갖는 Benchmark Data Set에 대한 패리티 공간 기법 설계의 확장이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] M. Blanke, S.A. Bogh, R.B. Jorgensen, R. Patton, "Fault Detection for a Diesel Engine Actuator a Benchmark for FDI", IEEE Control Eng. Practice, Vol. 3, No 12, pp. 1731-1740, 1995.
- [2] J. Gertler, "Residual Generation in Model Based Fault Detection", Control Theory and Advanced Technology, Vol 9, No 1, pp 259-285, March, 1993.
- [3] J. Gertler, R. Monajemy, "Generating Directional Residual with Dynamic Parity Relations", Automatica, Vol 31, No 4, pp 627-635, 1995.
- [4] R. Patton, P. Frank, R. Clark(ed), "Fault Diagnosis in Dynamic Systems", PRENTICE HALL, Englewood Cliffs, N J, 1989.
- [5] E.Y. Chow, A.S. Willsky, "Analytical Redundancy and Design of Robust Failure Detection Systems", IEEE Trans. Automatic Control, AC-29, No 7, pp 603-614, 1984.