

디젤엔진 위치서보시스템을 위한 고장 식별

박태건* · 허학범* · 이기상*

* 단국대학교 전기공학과 · † 천안공업전문대학 제어계측과

Fault Isolation for a Diesel Engine Actuator

Tae-Geon Park* · Hak-Bom Hur† · Kee-Sang Lee*

† Department of Electrical Engineering, Dankook University

* Department of Control and Measurement, Chonan National Technological College

Abstract - In a large diesel engine actuator position servo system, it is impossible to isolate an actuator fault from a load torque with conventional fault detection isolation (FDI) schemes because they are propagated through a channel. This paper deals with a parity equation based residual generation to isolate them in the system. The actuator fault is modelled by a multiplicative type fault that can be characterized as discrepancies between the nominal and actual plant parameters, whereas the load torque is modelled by an additive disturbance. The transformation implemented in the residual generator should be determined on-line to achieve the isolation. Simulation studies show the practical applicability of the FDI scheme.

1. 서 론

고장검출진단에 대한 연구는 지난 20여 년간 우주 항공, 원자력 발전 등 고도의 신뢰성이 요구되는 분야를 중심으로 발전되어왔으며, 최근에는 급속한 산업 발전과 더불어 고도로 신뢰성 있는 제어계 구성을 위한 필수적 요소로 인식되고 있다. 고장검출 및 식별 기법은 사용된 모델의 형태, 잔차발생 방법, 그리고 채택된 진단 알고리즘에 따라 여러 범주로 분류될 수 있다. 그 중 계통의 수학적(정량적) 모델에 근거한 해석적 기법은 고장검출 및 식별을 위한 잔차발생 방법에 따라 다음처럼 세분화될 수 있다. 상태 또는 출력 관측기에 의해 추정된 계통의 상태 또는 출력과 실제 계통의 측정 출력의 편차로부터 고장검출 및 식별을 위한 구조적 잔차를 발생시키는 기법 [1-2]과 방향성 잔차를 발생시키는 방법 [3-4], 추정된 계통의 파라미터에 관한 정보에 근거하여 고장을 검출하는 파라미터 추정에 근거한 기법 [5-6], 그리고 등가관계 접근법 (Parity relation approach) [7-11] 등으로 분류될 수 있다. 상술한 기법들 중 등가관계 접근법은 입출력 형태의 등가관계로부터 고장검출을 위한 잔차를 이끌어내는 방법으로 Willsky, Patton, Gertler 등에 의해 발전되어 왔다. 최근 이 분야의 중요 연구주제 중 하나는 곱하기형 고장 (Multiplicative faults)에 대한 검출 및 식별이다 [11]. 일반적으로 구동기 고장, 입력 센서 고장, 외란, 출력 센서 고장 등은 더하기형 고장 (Additive faults)으로 취급할 수 있는 반면 계통의 파라미터 변동과 관련된 고장은 곱하기형 고장으로 모델화하여 처리할 수 있다. 등가방정식을 이용하여 위의 두가지 형태의 고장을 검출 및 식별함에 있어서 근본적인 차이점은 잔차 발생에 요구되는 변환행렬에 있다. 즉, 더하기형 고장을 검출하기 위한 잔차발생을 위해서는 시불변 변환행렬이 요구되는 반면 곱하기형 고장을 검출하기 위한 잔차발생에서는 시변 변환행렬이 요구된다 [10].

한편, 대형 디젤 엔진의 위치 서보시스템은 실질적인 고장 시나리오, 고장의 영향, 수학적 모델과 그 특성이 잘 알려져 있어 고장진단 기법의 유용성을 입증하는 한 기준(Benchmark test)이 되고 있다 [9]. 그러나 부하 (외란) 및 전류 고장 (구동기 고장)이 같은 채널을 통해 시스템에 전파되기 때문에 현재까지 개발된 기법으로는 부하와 전류 고장을 식별할 수 없다.

본 논문에서는 위의 문제점에 대한 해결 방안으로 같은 채널을 통해 들어오는 부하 외란과 전류 고장을 각각 더하기형 고장 및 곱하기형 고장으로 모델링하고 두 고장을 식별하기 위한 잔차발생 기법을 제안하고자 한다.

2. 디젤 엔진 위치서보시스템

Benchmark test에 사용되는 대형 디젤 엔진의 수학적 모델은 크게 선형 및 비선형 모델로 나누어지며 고려되는 비선형성의 정도에 따라 세분되어 Data Set 1-5로 [9]에 분류되어 있다. 채택된 디젤

엔진의 속도제어를 위한 서보시스템은 속도제어를 위한 PI제어기를 포함한 선형 모델로서 고장을 포함한 계통의 블록 다이어그램은 그림 1과 같다. 그림1에 보여진 4고장 중 $\Delta n_{ref} = 0, \Delta n_m = 0, \Delta s_o = 0$ 로 가정하여 위치서보계에서 검출 식별되어야 할 고장은 구동장치 고장과 부하 외란으로 하였다. 여기서 구동장치 고장 Δi_m 은 기계적인 진동으로 인한 전류 제한 개폐기의 고장을 의미하며, 고장의 결과로 구동기에는 양의 전류가 흐른다. 그림1에서 $a_m = 1$ 이고 각 파라미터 값은 표1에, 각 변수 범위는 표2에 나타내었다. PI제어기를 포함한 대상 계통의 상태공간 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_c x + B_{2c} u + E_c p + B_{1c} w, \\ y &= Cx. \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $x = [i_2 \ n_m \ s_o]^T, u = n_{ref}, p = \Delta i_m$ 는 구동기 고장, w 는 부하 외란 (Q_i)이다.

$$\begin{aligned} A_c &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_v}{T_s} & 0 \\ \frac{K_q \eta}{I_{bst}} & -\frac{f_{bst} - K_v K_q \eta}{I_{bst}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{N} & 0 \end{bmatrix}, B_{2c} = \begin{bmatrix} \frac{K_v}{T_s} \\ \frac{K_v K_q \eta}{I_{bst}} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.978 \end{bmatrix}, B_{1c} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{NI_{bst}} \end{bmatrix}, E_c = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_q \eta}{I_{bst}} \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서 $rank(CE_c : CB_{1c}) = 1$ 이므로 구동기 고장과 부하 외란은 같은 경로를 통해 전파되어 현재까지 개발된 기법으로는 부하 외란의 영향으로 인해 구동장치 고장의 식별이 불가능해진다. 본 논문에서는 식(1)의 더하기형 구동기 고장을 식(3)의 곱하기형 고장으로 변형하였으며 이는 구동기 고장은 모터로 들어오는 전류의 변화로 모델링 될 수 있고 전류의 변화는 $K_q \eta$ 의 변화로 대체할 수 있다 [11]는 데에 근거를 두고 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [A_c + \Delta A_c]x + [B_{2c} + \Delta B_{2c}]u + B_{1c} w, \\ y &= Cx. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta A_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_q(\gamma-1)\eta}{I_{bst}} & -\frac{K_v K_q(\gamma-1)\eta}{I_{bst}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \Delta B_{2c} = \begin{bmatrix} \frac{K_v K_q(\gamma-1)\eta}{I_{bst}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

여기서 $0 \leq \gamma \leq 1$ 이고 $\gamma = 1$ 은 곱하기형 고장이 없음을 의미한다.

3. 고장식별을 위한 잔차발생 기법

구동기의 더하기형 고장과 부하의 곱하기형 외란을 포함한 식(3)의 계통을 이산치 계통으로 변환시 식(5)의 상태공간 표현 및 식(6)의 입출력 표현을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= [A_d + \Delta A_d]x(k) + [B_{2d} + \Delta B_{2d}]u(k) + B_{1d} w(k), \\ y(k) &= Cx(k), \end{aligned} \quad (5)$$

$$H(z)y(k) + \Delta H(z)y(k) = G(z)u(k) + \Delta G(z)u(k) + R(z)w(k) \quad (6)$$

식(6)에서 $H(z), G(z)$ 는 다음과 같고

$$H(z) = [det(I - z^{-1} A_d)]I, \quad (7a)$$

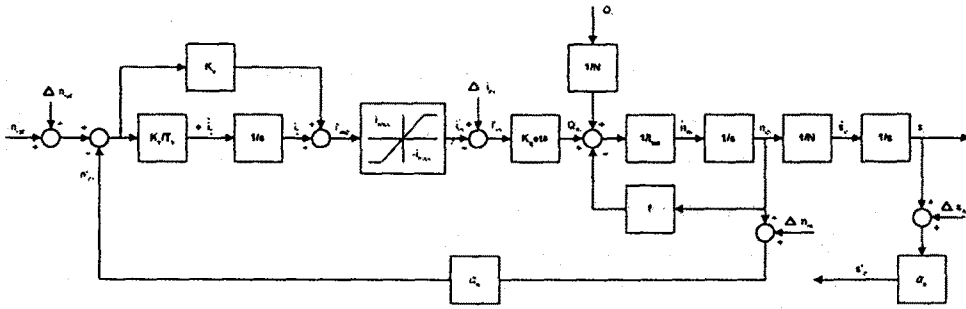


그림 1 고장을 포함한 대상계통의 블록 선도

표 1 선형 위치서보계의 파라미터 값

파라미터	값	단위	비고
f_{tot}	$19.7 \cdot 10^{-3}$	Nm/rad/s	서보 모터의 총 마찰계수
I_{tot}	$2.53 \cdot 10^{-3}$	kgm ²	서보 모터의 총 관성계수
K_d	0.54	Nm/A	서보모터의 토크 상수
K_v	0.9	A/rad/s	조속기 이득
N	89		기어비
η	0.85		기어 효율
T_v	$8.8 \cdot 10^{-3}$	s	조속기의 계산 주기
a_s	0.978		측정 scale factor

표 2 선형 위치서보계의 변수 범위

변수	범위	단위	비고
i_m	-30 ~ 30	A	서보 모터 전류
n_m	-314 ~ 314	rad/s	서보모터의 축 속도
n_{ref}	-314 ~ 314	rad/s	서보모터의 기준 축 속도
Q_{dm}	-6 ~ 6	Nm	서보모터로의 부하 토크
Q_m	-16 ~ 16	Nm	서보 모터에의해 생성되는 토크
s_s	-0.4 ~ 0.4	rad	기어를 통한 축의 위치

$$G(z) = \text{Cadj}(I - z^{-1}A_d)z^{-1}B_d. \quad (7b)$$

더하기형 고장과 곱하기형 고장이 동시에 발생하지 않는다는 가정 하에서 $R(z)$ 는 식(7c)와 같다.

$$R(z) = \text{Cadj}(I - z^{-1}A_d)z^{-1}B_d. \quad (7c)$$

식(6)으로부터 얻어지는 기본적인 잔차 발생식 (Primary residual equation)은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} o(k) &= H(z)y(k) - G(z)u(k) \\ &= -\Delta H(z)y(k) + \Delta G(z)u(k) + R(z)w(k). \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)에서 $\Delta H(z)$, $\Delta G(z)$ 는 식(4)의 γ 에 의존하게 되며 미지이다. 따라서 $\Delta H(z)$, $\Delta G(z)$ 는 식(9)처럼 표현할 수 있다.

$$\Delta H(z) = \Delta H(z, \gamma), \quad \Delta G(z) = \Delta G(z, \gamma). \quad (9)$$

식(9)에서 $\Delta H(z, \gamma)$ 및 $\Delta G(z, \gamma)$ 에 Taylor 급수 전개를 도입하고 1차항까지 고려하여 근사화하면 $\Delta H(z)$, $\Delta G(z)$ 를 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\Delta H(z) = \Delta H(z, \gamma) \approx P(z)\Delta\gamma, \quad (10a)$$

$$\Delta G(z) = \Delta G(z, \gamma) \approx Q(z)\Delta\gamma. \quad (10b)$$

여기서 $P(z)$ 와 $Q(z)$ 는 γ 에 대한 Jacobian 행렬로서 다음과 같다.

$$P(z) = \frac{dH(z, \gamma)}{d\gamma}, \quad Q(z) = \frac{dG(z, \gamma)}{d\gamma} \quad (11)$$

저차 계통의 경우와는 달리 고차 계통의 경우 해석적으로 $P(z)$ 와 $Q(z)$ 를 구하는 것은 어렵다. 본 논문에서 사용된 방법은 미분의 정의로 부터 얻어지며 다음과 같다.

$$P(z) = \frac{dH(z, \gamma)}{d\gamma} = \lim_{\Delta\gamma \rightarrow 0} \frac{\Delta H(z, \gamma)}{\Delta\gamma} = \frac{\Delta H(z, \gamma)}{\Delta\gamma} + \epsilon_H(z) \quad (12a)$$

$$Q(z) = \frac{dG(z, \gamma)}{d\gamma} = \lim_{\Delta\gamma \rightarrow 0} \frac{\Delta G(z, \gamma)}{\Delta\gamma} = \frac{\Delta G(z, \gamma)}{\Delta\gamma} + \epsilon_G(z) \quad (12b)$$

여기서 $\Delta\gamma \rightarrow 0$ 일 때 $\epsilon_H(z) \rightarrow 0$, $\epsilon_G(z) \rightarrow 0$ 이다. $\Delta\gamma$ 의 공칭값, $\Delta\gamma_0$ 및 그 근방에서 식(12)는 다음처럼 근사화될 수 있다.

$$P(z) \approx \frac{\Delta H(z, \gamma_0)}{\Delta\gamma_0}, \quad Q(z) \approx \frac{\Delta G(z, \gamma_0)}{\Delta\gamma_0} \quad (13)$$

$$\text{여기서 } \Delta H(z, \gamma) = \Delta H(z, \gamma_0) \frac{\Delta\gamma}{\Delta\gamma_0}. \quad (14a)$$

$$\Delta G(z, \gamma) = \Delta G(z, \gamma_0) \frac{\Delta\gamma}{\Delta\gamma_0}. \quad (14b)$$

$$\Delta H(z, \gamma_0) = H(z, \gamma_0) - H(z), \quad (15a)$$

$$\Delta G(z, \gamma_0) = G(z, \gamma_0) - G(z) \quad (15b)$$

이고, γ_0 는 γ 의 공칭값으로 표2의 변수범위에 제한되도록 적절히 선정되어야 하며 식(10) 및 식(13)의 근사화 오차가 만족스럽지 않은 경우 근사화 오차를 최소화하기 위해 여러개의 γ_0 를 선정할 수 있다. 식(14)를 식(13)에 대입함으로써 $P(z)$ 와 $Q(z)$ 를 얻는다.

$$P(z) \approx \frac{\Delta H(z, \gamma_0)}{\Delta\gamma_0}, \quad Q(z) \approx \frac{\Delta G(z, \gamma_0)}{\Delta\gamma_0}. \quad (16)$$

여기서 곱하기형 고장이 없을 때 $\gamma = 1$ 임을 고려하면 $\Delta\gamma_0 = 1 - \gamma_0$ 이다. 식(17)을 정의하면

$$e(k) = Q(z)u(k) - P(z)y(k) \quad (17)$$

식(8)은 다음처럼 표현될 수 있다.

$$o(k) = H(z)y(k) - G(z)u(k) = e(k)\Delta\gamma + R(z)w(k). \quad (18)$$

식(18)에 적절한 변환행렬 $W(k)$ 를 곱함으로써 고장을 식별하기 위한 식(19)의 잔차발생식을 얻을 수 있다.

$$r(k) = W(k)o(k). \quad (19)$$

더하기형 고장에서는 잔차발생을 위한 변환행렬이 시불변인 반면 곱하기형 고장에서는 식(18)에서처럼 $e(k)$ 가 시변이므로 시변 변환행렬이 요구된다 [10]. 식(19)에 식(18)을 대입함으로써 변환행렬 $W(k)$ 를 구하는데 이용될 수 있는 개념식(Internal form) (20a)과 실현식(Computational form) (20b)를 얻을 수 있다.

$$r(k) = W(k)[e(k)\Delta\gamma(k) + R(z)u(k)] \quad (20a)$$

$$= W(k)[H(z)y(k) - G(z)u(k)]. \quad (20b)$$

4. 시뮬레이션 및 결과 검토

다절연진 계통의 고장 검출 및 식별을 위하여 본 논문에서 제안된 잔차발생 기법의 타당성을 입증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며 이산치 계통으로의 변환시 샘플링 주기는 0.01[s]로 하였다. 식(20)의 $R(z)$ 는 다음과 같다

$$R(z) = \begin{bmatrix} R_1(z) \\ R_2(z) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$= \begin{bmatrix} 10^{-2}(1.5538z^{-1} - 3.1076z^{-2} + 1.5538z^{-3}) \\ 10^{-6}(1.2966z^{-1} - 0.5806z^{-2} - 0.7159z^{-3}) \end{bmatrix}.$$

식(17)의 $e(k) = Q(z)u(k) - P(z)y(k)$ 는 식(16)의 $Q(z)$, $P(z)$ 를 구함으로써 얻어진다. $\gamma_0 = 0.8$ 일 때 $Q(z)$, $P(z) = \begin{bmatrix} P_1(z) & 0 \\ 0 & P_2(z) \end{bmatrix}$ 는 각각 다음과 같다.

$$P_1(z) = P_2(z) \quad (22)$$

$$= \frac{10^{-1}}{0.2} (-1.2302z^{-1} + 1.9282z^{-2} - 0.6980z^{-3}),$$

$$Q(z) = \frac{1}{0.2} \begin{bmatrix} 10^{-2}(-7.5077z^{-1} + 9.6935z^{-2} - 2.1859z^{-3}) \\ 10^{-6}(-8.0536z^{-1} + 2.0134z^{-2} + 0.1922z^{-3}) \end{bmatrix}.$$

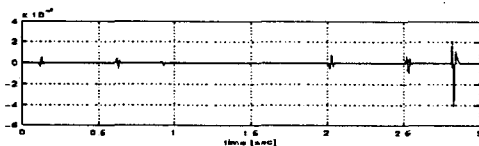
잔차발생을 위한 변환행렬 $W(k)$ 는 식별하고자 하는 고장에만 영이 아닌 잔차를 발생시키도록 다음처럼 선정하였다.

$$W(k) = \begin{bmatrix} R_2(z) & -R_1(z) \\ -e_2(k) & e_1(k) \end{bmatrix}, \text{ 여기서 } e(k) = \begin{bmatrix} e_1(k) \\ e_2(k) \end{bmatrix}. \quad (23)$$

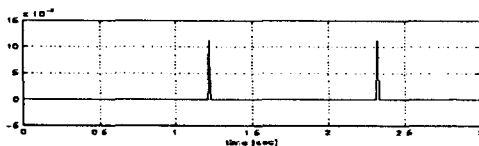
식(23)을 식(20a)에 대입하면 다음과 같은 잔차 개념식을 얻을 수 있다.

$$r^*(k) = (R_2(z)e_1(k) - R_1(z)e_2(k)) \begin{bmatrix} \Delta\gamma(k) \\ u(k) \end{bmatrix}. \quad (24)$$

시뮬레이션에서 $1.2 \leq t < 2.3$ (s)에 550(Nm)의 부하 외란 $u(t)$ (최대 부하 토크는 650(Nm))을 투입하였고 $t \geq 2.7$ 에 고장전류를 흐르게 하였다. 그림2와 3은 $\gamma_0 = 0.8$ 로 하고 실제의 고장이 가해진 고장 보다 작도록 $\gamma = 0.9$ (그림 2), 실제의 고장이 가해진 고장 보다 크도록 $\gamma = 0.6$ (그림 3)로 하였을 때 고장 식별 결과를 나타낸 것이다. 여기서 $\gamma = 1$ 은 곱하기형 고장이 없음을 의미한다. 식(24)에서 잔차 $r^*(k|\Delta\gamma)$ 은 구동장치 고장에 민감하고 부하외란에는 둔감하도록, 잔차 $r^*(k|u)$ 은 부하외란에는 민감하고 구동장치 고장에는 둔감하도록 설계하였으며 그림 2와 3은 잔차발생기 설계시 의도한 바대로 특정한 고장에만 민감한 잔차가 발생되었음을 의미한다. 고장 검출 성능을 향상시키고 오경보를 최소화하기 위해서는 잔차에 대한 적절한 임계치(Threshold)를 선정하여 검출 및 식별을 수행하여야 한다. 그림 2, 3의 잔차에 대해서는 $Th_\gamma = 10^{-1}$, $Th_u = 5 \cdot 10^{-3}$ 가 적절하다. 여기서 $|r^*(k|\Delta\gamma)| \geq Th_\gamma$ 는 구동장치 고장의 발생을, $|r^*(k|u)| \geq Th_u$ 는 부하외란의 발생을 나타낸다.

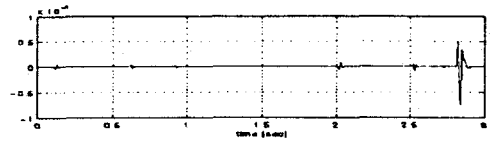


(a) 잔차 $r^*(k|\Delta\gamma)$

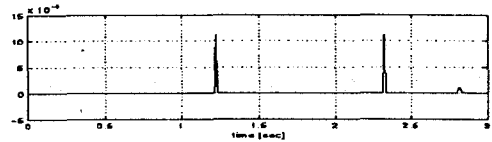


(b) 잔차 $r^*(k|u)$

그림 2 구동장치 고장 및 부하 외란 발생시 잔차 ($\gamma = 0.9$)



(a) 잔차 $r^*(k|\Delta\gamma)$



(b) 잔차 $r^*(k|u)$

그림 3 구동장치 고장 및 부하 외란 발생시 잔차 ($\gamma = 0.6$)

5. 결론

대형 다절 연진의 위치서보시스템은 실질적인 고장 시나리오, 고장의 영향, 수학적 모델과 그 특성이 잘 알려져 있어 고장 진단 기법의 유용성을 입증하는 한 기준(Benchmark test)이 되고 있다. 그러나 더하기형으로 모델링되어진 부하 외란 및 구동기 고장이 같은 채널을 통해 시스템에 전파되기 때문에 현재까지 개발된 기법으로는 부하와 전류 고장을 식별할 수 없다. 본 논문에서는 위의 문제점에 대한 해결 방안으로 같은 채널을 통해 들어오는 부하 외란과 전류 고장을 각각 더하기형 고장 및 곱하기형 고장으로 모델링하여 두 고장을 식별하기 위한 잔차발생 기법을 제안하고 다양한 시뮬레이션 결과로 부터 제안된 기법의 타당성을 입증하였다.

(참고 문헌)

- [1] P. M. Frank, "Enhancement of robustness in observer-based fault detection," *Proceedings of the IFAC SAFE-PROCESS Symposium*, Baden-Baden, Germany, pp. 99-111, 1991.
- [2] R. J. Patton and J. Chen, "A review of parity space approaches to fault diagnosis," *Proceedings of the IFAC SAFE-PROCESS Symposium*, Baden-Baden, Germany, pp. 65-81, 1991.
- [3] M. A. Massoumnia, "A geometric approach to the synthesis of failure detection filters," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-31, pp. 839-846, 1986.
- [4] J. E. White and J. L. Speyer, "Detection filter design: Spectral theory and algorithms," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-32, pp. 593-603, 1987.
- [5] B. Ninness, G. C. Goodwin, O. K. Kwon and B. Carlsson, "Robust fault detection based on low order models," *Proceedings of the IFAC SAFE-PROCESS Symposium*, Baden-Baden, Germany, pp. 199-204, 1991.
- [6] R. Isermann, "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing," *Automatica*, Vol. 29, pp. 815-836, 1993.
- [7] E. Y. Chow, A.S. Willsky, "Analytical Redundancy and Design of Robust Failure Detection Systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-29, No. 7, pp. 603-614, 1984.
- [8] J. Gertler, "Residual Generation in Model Based Fault Detection," *Control Theory and Advanced Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 259-285, March, 1993.
- [9] M. Blanke, S. A. Bogh, R. B. Jorgensen, and R. J. Patton, "Fault Detection for a Diesel Engine Actuator a Benchmark for FDI," *Control Eng. Practice*, Vol. 3, No. 12, pp. 1731-1740, 1995.
- [10] J. Gertler, "Fault detection and isolation using parity relations," *Control Eng. Practice*, Vol. 5, No. 5, pp. 653-661, 1997.
- [11] M. Medaviilla, L. J. Miguel, P. Vega, "Isolation of Multiplicative Faults in the Industrial Actuator Benchmark," *Proceedings of the IFAC SAFE-PROCESS Symposium*, pp. 855-860, 1997.