

직류전동기 구동 원심펌프-파이프 계통의 고장검출진단시스템 : 등가관계 접근법

박 태 건 · 류 지 수 · 이 기 상
단국대학교 전기공학과

Fault Detection and Isolation System
for DC motor driven Centrifugal Pump-Pipe Systems: Parity Relation Approach

Tae-Geon Park · Ji-Su Ryu · Kee-Sang Lee
Department of Electrical Engineering, Dankook University

Abstract - This paper deals with a method of a residual generation for fault isolation in a centrifugal pump with a water circulation system, driven by a speed controlled dc motor. It is based on parity relations derived from the moving-average model of the system and is used to identify sensor faults and two possible brush and impeller faults, where the former is dealt with additive faults, while the latter characterized as discrepancies between the nominal and actual plant parameters of the system is modelled by multiplicative faults. We will represent the propagation of this uncertainty to the model matrices by the approximate handling of partial derivatives of polynomials. With multiplicative faults, the transformation matrix implemented in the residual generator are calculated on-line. The simulation studies demonstrate that small changes of the system can be detected and diagnosed by using the method.

1. 서 론

고장검출 및 진단에 대한 연구는 지난 20여년간 우주 항공, 원자력 발전 등 고도의 신뢰성이 요구되는 분야를 중심으로 발전되어 왔으며, 최근에는 고도로 발달된 컴퓨터 기술을 배경으로 한 신뢰성있는 제어계 구성을 위한 필수적 요소로 인식되고 있다.

액체 수송 계통의 핵심요소인 전동기-펌프 계통은 일상생활 및 매우 다양한 산업 현장에서 관을 통한 액체의 수송에 매우 많이 사용되고 있지만 아직 이 계통에 대한 해석적 고장검출 및 진단에 관한 연구는 미흡하다 [1-2]. 이 계통을 위한 고장검출 및 진단시스템 설계의 대표적 결과는 파라미터 추정기법에 근거하여 공정요소 고장을 검출 진단한 Isermann의 연구 [3-5], 파라미터 추정기법 및 패턴분류 알고리즘에 근거하여 팬 고장 (Fan break-down) 및 원심펌프의 공동화 (Cavitation)의 이상을 검출하기 위한 Geiger의 연구 [6] 등이며 국내에서는 상태관측기에 근거한 공정요소 고장의 검출 진단 [2], 배관망에서의 유출 진단에 대한 연구 결과 [7]가 제시된 정도이다.

본 논문에서는 속도제어 타여자 직류전동기로 구동되는 원심펌프에 의한 액체 수송관 계통에 대하여 공정요소에서 발생할 수 있는 중요 고장과 센서 고장을 조기에 검출, 진단하기 위한 잔차발생 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 실질적 적용 가능성을 검토함에 그 목적을 두었다. 제안된 기법은 계통의 입출력 관계에 근거하여 잔차를 발생시키는 해석적 기법 중 등가관계 접근법을 이용하여 설계되었으며, 여기서 브러쉬 고장, 임펠러 고장 등의 중요 공정요소 고장은 곱하기형 고장으로, 이 공정의 제어와 감시를 위한 정보제공 수단인 센서 고장은 더하기형 고장으로 모델링 하였다.

2. 고장진단대상 시스템

2.1 액체수송 계통의 수학적 모델

타여자 직류전동기로 구동되는 원심펌프에 의한 파이프라인 액체 수송계통은 타여자 직류전동기, 원심펌프, 파이프라인의 세 요소로 구성되어 있으며 본 논문에서 사용된 직류전동기는 일진전기공업 [8], 원심펌프는 동해펌프공업 [9]에서 제작된 것으로 주요 사양은 각각 표 1, 표 2에 나타내었다. 표 2의 원심펌프의 사양에서 효율 48 [%]는 토출량이 0.2 [m³/min]일때이다 [2]. 각 구성요소의 수학적 모델 [4]은 다음과 같고 계통의 정상상태 파라미터 값은 표 3과 같다.

$$\frac{di_a(t)}{dt} = -\frac{R_o}{L_o} \Delta i_a(t) - \frac{K_b}{L_o} \Delta w(t) + \frac{1}{L_o} \Delta u_a(t), \quad (1)$$

표 1 직류전동기의 사양

정의	사양	정의	사양
최대전력	3.52[Kw]	정격전력	3.0[kw]
최대속도	1250[rpm]	정격속도	1000[rpm]
정격전압	160[V]	정격주파수	60[Hz]
정격전류	22[A]		

표 2 원심펌프의 사양

정의	사양	정의	사양
소용동력	3.32[Kw]	정격속도	1000[rpm]
흡입구경	50[mm]	전압정	37[m]
토출구경	50[mm]	효율	0.48

표 3 정상상태 파라미터 데이터

기호	정의	파라미터 데이터
R_o	전기저항	0.45[Ω]
L_o	전기자인덕턴스	0.0054[H]
K_b	전동기의 역기전력상수	1.433[Vsec/rad]
K_t	전동기의 토크상수	1.433[Nm/A]
J_m	전동기의 관성모멘트	0.199[Nmsec ² /rad]
J_p	펌프의 관성모멘트	0.199[Nmsec ² /rad]
C_f	마찰계수	0.02[Nmsec/rad]
a_{ac}	유체의 가속화계수	17.6190[m ² /kg]
a_R	유체의 저항계수	14.0952[m ² /kgsec]

표 4 공정요소 고장과 매개변수의 영향

고장	파라미터	R_o	g_w	h_w	a_R
브러쉬 고장		+			
임펠러 고장			-	-	+

$$\frac{dw(t)}{dt} = \frac{K_t}{J} \Delta i_a(t) - \frac{g_w + C_f}{J} \Delta w(t) - \frac{g_M}{J} \Delta M(t), \quad (2)$$

$$\frac{dM(t)}{dt} = \frac{h_w}{a_{ac}} \Delta u(t) + \frac{h_M - a_R}{a_{ac}} \Delta M(t), \quad (3)$$

여기서 i_a 는 전기자 전류 [A], w 는 각속도 [rad/sec], M 는 질량 유속 [kg/sec], u_a 는 전기자 전압 [V], $J = J_m + J_p$ 이다. 식(2)와 식(3)에서 T_p 를 펌프의 회전우력, Y 를 비에너지 (specific energy) [4]라할 때 g_w , g_M , h_w , h_M 은 다음과 같다.

$$g_w = \frac{\partial T_p}{\partial w} = 0.2736 [Nmsec/rad], \quad g_M = \frac{\partial T_p}{\partial M} = 0.1459 [Nmsec/kg]$$

$$h_w = \frac{\partial Y}{\partial w} = 0.564 [m^2/radsec], \quad h_M = \frac{\partial Y}{\partial M} = 0.015 [m^2/kgsec]. \quad (4)$$

2.2 진단대상 시스템의 고장

액체 수송계의 각 구성요소에서 발생할 수 있는 고장과 그 원인은 다음과 같다 [2]. 먼저 직류전동기에서 발생할 수 있는 고장은 정류자와 브러쉬간의 마찰에 의해 발생하는 브러쉬 결함, 전기자 코일의 절연, 자기회로의 균열에 의한 전기자 코어의 결함 그리고 부하의 급변 등이 있다. 원심펌프에서 발생하는 고장은 여러 고장 중 기체 주

머니, 공동화, 과도한 톨새, 배어링과 같은 부품의 손상 등을 대표적인 고장으로 간주할 수 있다 [10]. 또한 파이프라인에서는 침전물 등으로 인해 관이 막히는 현상과 관의 특정 부분에서 유체가 유출되는 현상 등이 있다 [7]. 본 연구에서는 공정요소 고장 중 대표적인 두 고장, 즉 직류 타여자 전동기에서 발생할 수 있는 브러쉬 결함, 원심 펌프에서 발생 가능한 임펠러 고장 및 측정센서 고장을 검출 진단한다. 대상시스템에서 검출 진단하고자 하는 두 공정요소 고장과 관련된 매개변수의 영향을 표 4에 나타내었다 [2]. 표 4에서 "+"는 해당 파라미터 값의 증가, "-"는 파라미터 값의 감소를 의미한다.

3. 고장식별을 위한 잔차발생 기법

3.1 고장을 포함한 계통 표현

서론에서 기술된 것 처럼 구동기 고장, 입력센서 고장, 외란, 출력센서 고장 등은 더하기형 고장으로 취급할 수 있는 반면 계통의 파라미터 변동과 관련된 고장은 곱하기형 고장으로 모델화하여 처리할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 두 공정요소 고장을 곱하기형 고장으로 모델링하고, 센서 고장은 더하기형 고장으로 취급하여 고장검출 및 진단을 위한 잔차를 발생시키고자 한다. 고장으로 인한 계통 파라미터의 최대 변화범위를 $\pm 100\%$ 로 가정하면, 즉 $0 \leq \Delta R_a \leq R_a$, $-g_r \leq \Delta g_r \leq 0$, $-h_r \leq \Delta h_r \leq 0$, $0 \leq \Delta a_r \leq a_r$ 표 4에 근거하여 브러쉬 고장은 식(5a), 임펠러 고장은 식(5b)로 표현될 수 있다.

$$\Delta A_{d1} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a}(1-\gamma_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, 0 \leq \gamma_1 \leq 1 \quad (5a)$$

$$\Delta A_{d2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{g_r(\gamma_{21}-1)}{J} & 0 \\ 0 & \frac{h_r(\gamma_{22}-1)}{a_{ac}} & -\frac{a_r(1-\gamma_{23})}{a_{ac}} \end{bmatrix} \quad (5b)$$

$0 \leq \gamma_{21} \leq 1, 0 \leq \gamma_{22} \leq 1, 0 \leq \gamma_{23} \leq 1.$

식(5)에서 $\gamma_1 \neq 1$ 은 브러쉬 고장을, $\gamma_{21} \neq 1, \gamma_{22} \neq 1, \gamma_{23} \neq 1$ 은 임펠러 고장이 발생했음을 의미한다. 곱하기형 공정요소 고장 및 더하기형 센서 고장을 포함한 계통 표현은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [A_c + \Delta A_c]x + B_c u, \\ y &= Cx + Ff, \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 f : 센서 고장, $\Delta A_c = \Delta A_{d1} + \Delta A_{d2}$.

3.2 잔차발생방정식

식(6)의 계통에 대한 이산치 상태공간 표현은 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= [A_d + \Delta A_d]x(k) + B_d u(k), \\ y(k) &= Cx(k) + Ff, \end{aligned} \quad (7)$$

더하기형 고장과 곱하기형 고장이 동시에 발생하지 않는다는 가정하에서 식(8)의 MA (Moving average) 입출력 표현을 얻을 수 있다.

$$H(z)y(k) + \Delta H(z)y(k) = G(z)u(k) + \Delta G(z)u(k) + R(z)f(k) \quad (8)$$

식(8)에서 $H(z), G(z), R(z)$ 는 다음과 같다

$$H(z) = [\det(I - z^{-1}A_d)]I, \quad (9a)$$

$$G(z) = \text{Cadj}(I - z^{-1}A_d)z^{-1}B_d, \quad (9b)$$

$$R(z) = H(z)F. \quad (9c)$$

식(8)로부터 얻어지는 기본적인 잔차발생식은 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} o(k) &= H(z)y(k) - G(z)u(k) \\ &= -\Delta H(z)y(k) + \Delta G(z)u(k) + R(z)f(k) \\ &= -\Delta H_1(z)y(k) + \Delta G_1(z)u(k) \\ &\quad - \Delta H_2(z)y(k) + \Delta G_2(z)u(k) + R(z)f(k). \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)에서 곱하기형 고장의 영향으로 나타나는 $\Delta H_1(z), \Delta G_1(z), j=1,2$ 는 식(5)의 $\gamma_1, \gamma_2 = \{\gamma_{21}, \gamma_{22}, \gamma_{23}\}$ 에 의존하며 미지이다. 따라서 $\Delta H_j(z), \Delta G_j(z)$ 는 식(11)처럼 표현할 수 있다.

$$\Delta H_j(z) = \Delta H_j(z, \gamma_j), \quad j=1,2, \quad (11a)$$

$$\Delta G_j(z) = \Delta G_j(z, \gamma_j). \quad (11b)$$

식(11)에서, $\Delta H_j(z)$ 및 $\Delta G_j(z)$ 에 Taylor 급수 전개를 도입하고 1차항까지 고려하여 근사화하면 $\Delta H_j(z), \Delta G_j(z)$ 를 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\Delta H_j(z) = \Delta H_j(z, \gamma_j) \approx P_j(z) \Delta \gamma_j, \quad j=1,2, \quad (12a)$$

$$\Delta G_j(z) = \Delta G_j(z, \gamma_j) \approx Q_j(z) \Delta \gamma_j, \quad (12b)$$

여기서 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 는 Jacobian 행렬로 다음과 같다.

$$P_j(z) = \frac{\partial \Delta H_j(z, \gamma_j)}{\partial \gamma_j}, \quad j=1,2, \quad (13a)$$

$$Q_j(z) = \frac{\partial G_j(z, \gamma_j)}{\partial \gamma_j} \quad (13b)$$

식(14)를 정의하면

$$e_j(k) = Q_j(z)u(k) - P_j(z)y(k), \quad j=1,2, \quad (14)$$

식(10)은 다음처럼 표현될 수 있다.

$$o(k) = H(z)y(k) - G(z)u(k) = \sum_{j=1}^2 e_j(k) \Delta \gamma_j + R(z)f(k). \quad (15)$$

식(15)에 적절한 변환행렬 $W(k)$ 를 곱함으로써 고장을 식별하기 위한 식(16)의 잔차발생식을 얻을 수 있다.

$$r(k) = W(k)o(k). \quad (16)$$

더하기형 고장에서는 잔차발생을 위한 변환행렬이 시불변인 반면 곱하기형 고장에서는 식(15)에서 처럼 $e(k)$ 가 시변이므로 시변 변환행렬이 요구된다 [11]. 식(16)에 식(15)를 대입함으로써 변환행렬 $W(k)$ 를 구하는데 이용될 수 있는 개념식 (17a)과 실현식 (17b)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} r(k) &= W(k) \left[\sum_{j=1}^2 e_j(k) \Delta \gamma_j + R(z)f(k) \right] \\ &= W(k) [H(z)y(k) - G(z)u(k)]. \end{aligned} \quad (17a)$$

곱하기형 고장을 식별함에 있어서 가장 중요한 사항은 식(13)의 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 를 구하는 방법이 있다. 저차 계통의 경우와는 달리 고차 계통의 경우 해석적으로 $H_j(z, \gamma_j), G_j(z, \gamma_j)$ 를 구하고 이를 γ_j 에 관해 미분하여 식(13)의 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 를 얻는 것은 간단하지 않다. 따라서 이러한 방법은 모든 계통에 적용될 수 있는 일반성있는 방법이 될 수 없으며 본 논문에서는 3.3절에 기술되는 근사화 방법을 사용하였다.

3.3 근사화 방법

식(13)의 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 를 얻기 위한 근사화 방법에는 Euler 방법, 쌍변환 (Bilinear Transform) 방법 등 여러 가지가 있으나 본 논문에서 사용된 방법은 미분의 정의로 부터 얻어진다. 식(13)에 다음의 정의를 도입한다.

$$P_j(z) = \frac{\partial H_j(z, \gamma_j)}{\partial \gamma_j} = \frac{\Delta H_j(z, \gamma_j)}{\Delta \gamma_j} + \varepsilon_{H_j}(z), \quad j=1,2, \quad (18a)$$

$$Q_j(z) = \frac{\partial G_j(z, \gamma_j)}{\partial \gamma_j} = \frac{\Delta G_j(z, \gamma_j)}{\Delta \gamma_j} + \varepsilon_{G_j}(z), \quad (18b)$$

여기서 $\Delta \gamma_j \rightarrow 0$ 일 때 $\varepsilon_{H_j}(z) \rightarrow 0, \varepsilon_{G_j}(z) \rightarrow 0$ 이다. $\Delta \gamma_j$ 의 공칭값을 $\Delta \gamma_j^0$ 로 정의하면 $\Delta \gamma_j^0$ 및 그 근방에서 식(18)은 다음처럼 근사화될 수 있다.

$$P_j(z) \approx \frac{\Delta H_j(z, \gamma_j^0)}{\Delta \gamma_j^0}, \quad j=1,2, \quad (19a)$$

$$Q_j(z) \approx \frac{\Delta G_j(z, \gamma_j^0)}{\Delta \gamma_j^0} \quad (19b)$$

식(19)의 $\Delta H_j(z, \gamma_j^0), \Delta G_j(z, \gamma_j^0)$ 는 $\Delta \gamma_j^0$ 및 그 근방에서 식(20)처럼 표현될 수 있다.

$$\Delta H_j(z, \gamma_j) = \Delta H_j(z, \gamma_j^0) \frac{\Delta \gamma_j}{\Delta \gamma_j^0}, \quad j=1,2, \quad (20a)$$

$$\Delta G_j(z, \gamma_j) = \Delta G_j(z, \gamma_j^0) \frac{\Delta \gamma_j}{\Delta \gamma_j^0}. \quad (20b)$$

$$\text{여기서 } \Delta H_j(z, \gamma_j^0) = H(z, \gamma_j^0) - H(z), \quad (21a)$$

$$\Delta G_j(z, \gamma_j^0) = G(z, \gamma_j^0) - G(z) \quad (21b)$$

이고, γ_j^0 는 γ_j 의 공칭값으로 식(11) 및 식(19)의 근사화 오차가 만 족스럽지 않은 경우 근사화 오차를 최소화하기 위해 다수의 γ_j^0 를 선정할 수 있다. 식(20)을 식(19)에 대입함으로써 다음의 $P_j(z)$ 와 $Q_j(z)$ 를 얻는다.

$$P_j(z) \approx \frac{\Delta H_j(z, \gamma_j^0)}{\Delta \gamma_j^0}, \quad j=1,2, \quad (22a)$$

$$Q_j(z) \approx \frac{\Delta G_j(z, \gamma_j^0)}{\Delta \gamma_j^0} \quad (22b)$$

여기서 곱하기형 고장이 없을 때 $\gamma_j = 1$ 임을 고려하면 $\Delta \gamma_j^0 = 1 - \gamma_j^0$ 이며 시물레이션시 $\Delta \gamma_j^0(k)$ 를 기저로 가정하고 $f(k)$ 를 영 또는 기저로 가정하여 식(15)의 동식의 성립으로부터 확인할 수 있다.

4. 시물레이션 및 결과 검토

모터-펌프 계통의 고장검출 및 식별을 위하여 본 논문에서 제안된 잔차발생 기법의 타당성을 입증하기 위하여 PI 속도제어 직류전동기

에 의해 구동되는 원심펌프 계통에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며 이산치 계통으로의 변환시 샘플링 주기는 0.005[s]로 하였다. 속도 센서의 고장을 가정하면 식(6)에서 $F = [0 \ 1 \ 0]^T$ 이고 식(9c)에서 $R(z) = H(z)F = [0 \ h(z) \ 0]^T$ (23)이다. 여기서 $h(z) = 1 - 2.6321z^{-1} + 2.2864z^{-2} - 0.6542z^{-3}$. 식(15)에서

$$e_j(k) = [e_j^1(k) \ e_j^2(k) \ e_j^3(k)]^T \quad (24)$$

이며 $e_j(k) = Q_j(z)x(k) - P_j(z)y(k)$ 는 γ_j^0 를 선정하여 식(22)로부터 $Q_j(z), P_j(z), j = 1, 2,$ 를 구함으로써 얻어진다. $\gamma_1^0 = 0.5,$

$$\gamma_2^0 (= \gamma_{21}^0 = \gamma_{22}^0 = \gamma_{23}^0) = 0.8 \text{ 일 때}$$

$$P_j(z) = \begin{bmatrix} P_j^1(z) & 0 & 0 \\ 0 & P_j^2(z) & 0 \\ 0 & 0 & P_j^3(z) \end{bmatrix}, \quad Q_j(z) \text{ 는 각각 다음과 같다.}$$

$$P_1^1 = 0.2444z^{-1} - 0.4905z^{-2} + 0.2461z^{-3}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

$$P_2^2 = 10^{-3}(0.5922z^{-1} - 0.8834z^{-2} + 0.3682z^{-3}),$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} -0.1369z^{-1} + 0.2728z^{-2} - 0.1359z^{-3} \\ -0.0009z^{-1} - 0.0007z^{-2} + 0.0016z^{-3} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} -0.0027z^{-1} + 0.4199z^{-2} - 0.4188z^{-3} \\ 0.0086z^{-1} + 0.0351z^{-2} - 0.0105z^{-3} \\ -0.0004z^{-1} - 0.0015z^{-2} - 0.0003z^{-3} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

고장식별을 위한 변환행렬 $W(k)$ 는 다음과 같이 선정하였다.

$$W(k) = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{33} \end{bmatrix} \text{adj}(M(k)) \quad (26)$$

$$= \begin{bmatrix} W_{11}(k) & 0 & W_{13}(k) \\ W_{21}(k) & 0 & W_{23}(k) \\ W_{31}(k) & W_{32}(k) & W_{33}(k) \end{bmatrix}$$

여기서 $M(k) = [e_1(k) \ e_2(k) \ R(z)], W_{11}(k) = -\alpha_{11} e_1^3(k) h(z),$

$$W_{13}(k) = \alpha_{11} e_2^3(k) h(z), \quad W_{21}(k) = \alpha_{22} e_1^3(k) h(z),$$

$$W_{23}(k) = -\alpha_{22} e_1^1(k) h(z),$$

$$W_{31}(k) = \alpha_{33}(e_1^1(k) e_2^2(k) - e_1^2(k) e_2^1(k)),$$

$$W_{32}(k) = \alpha_{33}(e_1^1(k) e_2^1(k) - e_1^2(k) e_2^2(k)),$$

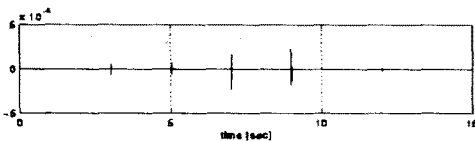
$$W_{33}(k) = \alpha_{33}(e_1^1(k) e_2^3(k) - e_1^2(k) e_2^3(k)).$$

식(26)을 식(18a)에 대입하면 다음과 같은 잔차 개념식을 얻을 수 있다.

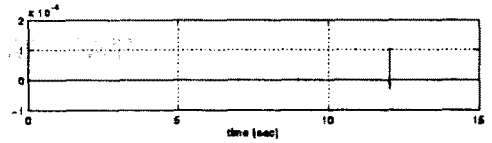
$$r^*(k) = A(k) \begin{bmatrix} \Delta \gamma_1(k) \\ \Delta \gamma_2(k) \\ f(k) \end{bmatrix} = \det(M(k)) \begin{bmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \gamma_1(k) \\ \Delta \gamma_2(k) \\ f(k) \end{bmatrix} \quad (27)$$

시뮬레이션에서 식(26)의 $\alpha_{11} = 2, \alpha_{22} = 1, \alpha_{33} = 1$ 로 하였다. 그림 2는 $3 \leq t < 5$ [s]에 속도센서 고장 ($f = 0.03$ [rad/sec]), $7 \leq t < 9$ [s]에 브러쉬 고장 ($\gamma_1 = 0.8$), $12 \leq t < 15$ [s]에 임펠러 고장 ($\gamma_{21} = \gamma_{22} = \gamma_{23} = 0.5$)이 발생하였을 때 잔차를 나타낸 것이다. 여기서 브러쉬 고장의 경우는 실제의 고장이 가정된 고장 ($\gamma_1^0 = 0.5$)보다 크도록, 임펠러 고장은 가정된 고장 ($\gamma_2^0 = 0.8$)보다 작도록 하였다. 고장식별을 위하여 식(27)에서 잔차 $r^*(k | \Delta \gamma_1)$ 은 브러쉬 고장에 민감하고 임펠러 및 센서 고장에는 둔감하도록, 잔차 $r^*(k | \Delta \gamma_2)$ 은 임펠러 고장에는 민감하고 브러쉬 및 센서 고장에는 둔감하도록, $r^*(k | f)$ 은 공정요소 고장에는 둔감하고 센서 고장에만 민감하도록 설계하였으며 그림 2는 잔차발생기 설계시 의도한바대로 특정한 한 고장에만 민감한 잔차가 발생되었음을 의미한다. 측정 값을 등이 존재하는 실제적 상황에서는 고장이 발생하지 않은 경우에도 영이 아닌 잔차가 발생된다. 따라서 고장검출 성능을 향상시키고 오경보를 최소화하기 위해서는 잔차에 대한 적절한 임계치 (Threshold)를 선정하여 검출 및 식별을 수행하여야 한다. 그림 2의 잔차에 대해서는 $Th_{r_1} = 10^{-6}, Th_{r_2} = 5 \cdot 10^{-7}, Th_{r_3} = 2 \cdot 10^{-9}$ 가 적절하다.

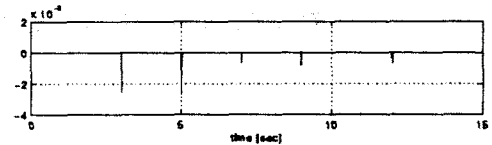
여기서 $|r^*(k | \Delta \gamma_1)| \geq Th_{r_1}$ 는 브러쉬 고장, $|r^*(k | \Delta \gamma_2)| \geq Th_{r_2}$ 는 임펠러 고장, $|r^*(k | f)| \geq Th_{r_3}$ 는 속도센서 고장의 발생을 나타낸다.



(a) 잔차 $r^*(k | \Delta \gamma_1)$



(b) 잔차 $r^*(k | \Delta \gamma_2)$



(c) 잔차 $r^*(k | f)$

그림 2 브러쉬, 임펠러 및 센서 고장 발생시 잔차

5. 결 론

본 논문에서는 PI 속도제어 타여자 직류전동기로 구동되는 원심 펌프에 의한 액체 수송관 계통에서 발생할 수 있는 중요 프로세스 고장과 센서 고장을 조기에 검출 및 식별하기 위한 잔차발생 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 실질적 적용 가능성을 검토하였다. 제안된 기법은 계통의 입력력 관계에 근거하여 잔차를 발생시키는 해석적 기법 중 등가관계 접근법에 의해 설계되었으며, 여기서 브러쉬 고장, 임펠러 고장 등의 중요 공정요소 고장은 곱하기형 고장으로, 이 공정의 속도제어와 감시를 위한 정보제공 수단인 속도센서 고장은 더하기형 고장으로 모델링하였다.

본 논문은 학술진흥재단의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과 의 일부임. (과제번호:1997-001-E00444)

[참 고 문 헌]

- [1] 과학기술처, "Motor Pump의 성능 평가에 관한 연구", 1986.
- [2] 김태한, 함영민, 이기상, "액체 수송계에 대한 고장 검출 진단시스템의 설계," 한국화학공학회 논문지, 제33권, 제 6호, 1995.
- [3] R. Isermann and B. Freyermuth, "Process fault diagnosis based on process model knowledge. Parts I and II. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 113, pp. 620-626, 627-633, 1991.
- [4] R. Isermann, "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation," Automatica, Vol. 20, pp. 387-404, 1984.
- [5] Frank, P.M. and J. Wünnenberg, "Process fault diagnosis based on dynamic models and parameter estimation methods," In: *Fault Diagnosis in Dynamical Systems: Theory and Applications* (R.J. Patton, P.M. Frank and R.N. Clark, (1st Ed.)), Prentice Hall, New York, Chap. 7, pp. 253-291, 1989.
- [6] G. Geiger, "Fault identification of a motor-pump system using parameter estimation and pattern classification," *Proceedings of the 9th IFAC Congress, Budapest*, pp. 184-189, 1984.
- [7] 이주형 외 3인, "Leakage detection of pipeline system based on modeling and identification," *Journal of KICHe*, Vol. 30, pp. 526-, 1992.
- [8] 일전전기공업(주), 직류전동기 매뉴얼: 모델 DM30.
- [9] 동해펌프공업(주), Catalogue.
- [10] S. Yedich, "Diagnosing trouble of centrifugal pumps," *Chem. Eng.*, Vol. 24, pp. 124, 1977.
- [11] J. Gertler, "Fault detection and isolation using parity relations," *Control Eng. Practice*, Vol. 5, No. 5, pp. 653-661, 1997.