

증기발생기 모델을 이용한 계통 및 계측기 고장검출에 관한 연구

김정수*, 유준**, 나난주*, 권기춘*

*한국원자력연구소, **충남대학교 공과대학 전자공학과

Process and Instrument Faults Detection Based on Steam Generator Model

Jung Soo Kim*, Joon Lyoo**, Nan Ju Na*, Kee Choon Kwon*

*Korea Atomic Energy Research Institute

**Dept. of Electronics Eng., Chungnam University

Abstract

In this paper, for detection and isolation of instrument and process faults related with steam generator(S/G) in nuclear power plant, two types of observers are designed based on the linearized dynamic model of S/G: a bank of Dedicated Observers(DOS) for instrument faults detection and a bank of Unknown Input Observers(UIO) for process faults detection. And then, they are combined to decide which one between the above two faults occurs. In principle, the failure in ith instrument(process) can be isolated by monitoring the error between the ith output and its estimation obtained from the ith DOS(UIO). It is shown via computer simulations that the present scheme is feasible in finding out the source of a fault.

1. 서론

원자력 발전소는 각종 계측장비를 설치하여 운전상태를 감시 및 제어하고 있으며, 운전원이 계측장비의 고장이나 잘못된 정보에 의해 운전상태를 오판할때 TMI-II와 같은 대형사고가 발생할 가능성을 내포하고 있다. 이러한 운전원의 오판이나 계측장치 혹은 하드웨어 고장을 컴퓨터로 검출하는 것이 고장검출에 관한 연구이다.

최근 이 분야에 관한 연구는 기존의 하드웨어 중복도(hardware redundancy)를 탈피하여 계산속도와 신뢰성 임장에서 커다란 개선을 이룬 컴퓨터 기술을 바탕으로 소프트웨어 중복도를 이용한 해석적 다중기법(analytical redundancy)들이 주류를 이루고 있다. [1-6] 이들 기법들은 주로 Kalman filter 나 parity space등을 이용하여 고장을 검출하였는데, 이 방법들은 계산상의 복잡성 및 잡음의 특성 그리고 고장의 형태등을 어느정도는 파악하고 있어야하며, 각각의 상태값들이 서로 연관성이 심할 경우 이를 분리 추정해 내기가 쉽지않은 단점이 있다. 또한 대부분의 연구가 계측장치 고장 또는 계통고장중 한가지만을 고려하므로 계통고장 및 계측장치 고장 두가지를 동시에 검출하는 방안이 요구되고 있는 실정이다.

원전에서 증기발생기는 원자로 계통에 필수불가결한 요소로써 증기발생기에 관련되어 있는 계통이나 계측기의 오동작에 의해 원자로 전계통을 운전하는데 미치는 영향이 지대하므로 본 논문에서는 증기발생기 모델을 이용하여, 계통고장 및 계측장치 고장검출에 효과적으로 대처할 수 있는 계산량이 비교적 적고 설계가 간단한 방법을 제시한다. 이 방법은 정상상태 동작시 계통의 상태값을 추정하기 위한 UIO(Unknown Input Observer)[7]와 계측기 정상상태 추정치를 얻기위한 DOS(Dedicated Observer Scheme)[10]를 복합 구성하고 고장 판단논리에 의하여 계통고장 및 계측기 고장을 구분할 수 있도록 하였다.

취급된 계통고장은 원자로노심 출구관온도에 의한 1차계통 고장, 급수히터의 온도변화에 의한 2차계통 고장, 그리고 증기 제어밸브를 고려하였고, 계측기 고장은 증기발생기 내의 계측장치인 노심냉각재 온도센서, 급수슈트 온도센서, 증기압력센서를 대상으로 하였다.

2. 증기발생기의 수학적 모델

J.D.Freels[9]는 기존의 연구를 종합하여 57개의 연립방정식으로 가압경수로형 원자로의 모델을 세우고 각 계통변수들의 이론치와 실험치를 비교하여 거의 일치함을 보였다. 본 논문에서는 이 모델을 근거로해서 간략화된 3차의 증기발생기 모델을 수립하였다. 본 논문에서 대상으로 고려한 증기발생기는 수직형 U 튜브 재순환형(UTSG:U-tube recirculation type steam generator)이다. UTSG에 대한 동특성 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \delta T_p = -\left(\frac{1}{\tau_p} + \frac{U_{pm} S_{pm}}{M_p C_{pi}}\right) \delta T_p + \frac{U_{pm} S_{pm}}{M_p C_{pi}} \delta T_m + \frac{1}{\tau_p} \delta T_{h1} \quad (2.1)$$

$$\frac{d}{dt} \delta T_m = \frac{U_{pm} S_{pm}}{M_m C_m} \delta T_p - \frac{U_{pm} S_{pm} + U_{ms} S_{ms}}{M_m C_m} \delta T_m + \frac{U_{ms} S_{ms}}{M_m C_m} \frac{\partial T_{sat}}{\partial P_s} \delta P_s \quad (2.2)$$

$$\frac{d}{dt} \delta P_s = \frac{1}{K_a} [U_{ms} S_{ms} \delta T_m - (U_{ms} S_{ms} \frac{\partial T_{sat}}{\partial P_s} + W_s \frac{\partial h_s}{\partial P_s} + \epsilon_o (h_s - h_w))] \quad (2.3)$$

$$\delta P_s + W_s C_{p2} \delta T_w - W_s (h_s - h_w) \frac{\delta \epsilon}{\epsilon_o}$$

여기서,

$$\tau_p = M_p / W_p$$

$$K_a = M_{sw} \frac{\partial h_f}{\partial P_s} + M_{ms} \frac{\partial h_s}{\partial P_s} - M_{ma} \frac{\partial h_{fs}}{\partial P_s}$$

δT_p = UTSG내의 노심냉각재의 평균온도 변화 (°F)

δT_m = UTSG내의 평균급속튜브 온도변화 (°F)

δP_s = UTSG의 평균증기압력의 변화 (psig)

δT_{h1} = 원자로노심의 출구관온도의 변화 (°F)

δT_w = 급수히터 출구온도의 변화 (°F)

ϵ_o = 주증기 제어밸브계수 (lbm/sec-psig) = W_s / P_s

$\delta \epsilon / \epsilon_o$ = 주증기 제어밸브계수의 변화율

U_{pm} = 노심냉각재로부터 튜브급속에 대한 UTSG의 전열전달 계수

$$= \left[\frac{1}{H_p} + \left(\frac{T_{od} - 2T_{mt}}{24K_m} \right) \ln \left(\frac{T_{od} - T_{mt}}{T_{od} - 2T_{mt}} \right) \right]^{-1}$$

U_{ms} = 튜브급속으로부터 2차급속에 대한 전열전달 계수

$$= \left[\frac{1}{H_s^2} + \left(\frac{T_{od}}{24K_m} \right) \ln \left(\frac{T_{od}}{T_{od} - T_{mt}} \right) \right]^{-1}$$

S_{pm} = 금속류브에 대한 노심냉각재의 열단면적 =

$$H_{ta}[(T_{od} - 2T_{mt})/T_{od}]$$

S_{ms} = 2차 급수에 대한 금속류브의 열전달면적 = H_{ta}

$$\frac{T_{od}^2 - (T_{od} - T_{mt})^2}{T_{od}}$$

M_m = 금속류브의 중량 = $H_{ta} \left[\frac{48T_{od}}{12} - \frac{2T_{mt}}{12} \right] R_{op}$

M_p = 류브내측의 물의 중량 = $\left[\frac{T_{od}}{12} - \frac{2T_{mt}}{12} \right]^2 \left[\frac{3H_{ta}}{T_{od}} \right] R_{op}$

M_{sw} = 2차급수의 중량 = $V_{sw} R_{os}$

M_{ma} = 2차측 중기의 중량 = V_{ma} / V_g

(2.1)식은 원자로노심의 출구관 온도 변화에 의해 영향을 받음으로 원자로노심과 증기발생기의 동특성이 결합되어 있음을 나타낸다. 이 모델에 필요한 설계파라미터는 정격출력 1200 Mwe W/H 발전소의 100% 출력시 출력값을 이용하였다. 이들 파라미터값들을 대입하여 상태방식으로 표현하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Px(t) + Gu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

여기서,

$$x(t) = [\delta T_p, \delta T_m, \delta P_s]^T$$

$$u(t) = [\delta T_{b1}, \delta T_w, \delta \epsilon / \epsilon_0]^T$$

$$y(t) = [T_{pa}, T_{ms}, P_{sa}]^T$$

$$P = \begin{bmatrix} -1.6055 & 1.2805 & 0 \\ 4.7874 & -7.7818 & 0.41922 \\ 0 & 5.5986 & -0.93311 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.32502 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1914 & -12.338 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

위의 선형모델식으로부터 다음과 같은 이산치모델로 변환할 수 있다.

$$x(kh+h) = Ax(kh) + Bu(kh) \quad (2.5)$$

$$y(kh) = Cx(kh) \quad (2.6)$$

여기서, $A = \exp(Ph) = I + Ph + \frac{(Ph)^2}{2!} + \dots$
 $B = \left(\int_0^h \exp(Ph) ds \right) B$

h = 샘플링 구간

그리고 샘플링구간을 1초로 하였을때 증기발생기의 최종모델은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A x(k) + B u(k) \\ y(k) &= C x(k) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0.4594 & 0.1011 & 0.0294 \\ 0.3779 & 0.1004 & 0.0485 \\ 1.4680 & 0.6481 & 0.5574 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -0.2123 & 0.0031 & -0.199 \\ -0.1290 & 0.0083 & -0.533 \\ -0.2625 & 0.1404 & -9.053 \end{bmatrix}$$

여기서 $x \in R^3$, $y \in R^3$, $u \in R^3$ 이며 A , B 및 C 는 각각 (3×3) 행렬이다.

3. UIO를 이용한 계통고장검출

다음 식(3.1)로 표현되는 선형시불변시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\bar{u}(k) \\ \bar{y}(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (3.1)$$

여기서 $x \in R^n$ 은 상태벡터, $\bar{u} \in R^m$ 은 제어 입력벡터이고 $y \in R^r$ 은 출력벡터, A 와 B 는 적절한차원의 상수행렬이다. 또한 (3.1)식에 UIO bank를 구성하기 위하여 다음과 같은 가정이 필요하다.

$$\text{rank } C = p, \text{ rank } B = m, p \geq m$$

그리고 (C_i, A) ($i=1, \dots, p$)는 가관측한 쌍이며, 여기서 C_i 는 i 번째 행(row)를 뺀 C 행렬이다. 그리고 UIO bank를 구성하기 위하여 (3.1)식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + b_i \bar{u}_i(k) + B_i \bar{u}_i(k) \quad i=1, 2, \dots, m \\ \bar{y}_i(k) &= C_i x(k) \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\bar{y}(k) = y(k) + s(k) \quad i=1, 2, \dots, m$$

여기서 b_i 는 B 행렬의 i 번째 열(column)이고, B_i 는 b_i 열을 뺀 나머지 B 행렬이며, \bar{y}_i 는 y_i 측정치를 뺀 나머지 측정치이다.

즉, (3.2)식에서 unknown input이 $\bar{u}_i(t)$ 와 $\bar{y}_i(t)$ 인데, \bar{u}_i 는 y_i 에 영향을 주지않고 \bar{u}_i 만이 y_i 에 영향을 주도록 구성할 수 있다.

3.1 UIO 구조

고장이 없는 시불변 시스템은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + bv(k) + Ed(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (3.3)$$

여기서 $x \in R^n$ 은 상태벡터, $v \in R^1$ 은 측정가능한 입력 $d \in R^q$ 측정불가능한 입력, $y \in R^p$ 출력벡터이다. 가정에 의하여 (3.3)식이 가관측 하며, $\text{rank } C = p$ 이고 $\text{rank } E = q$ 이다. 여기서 목적은 상태벡터 x 의 추정치를 찾아내는 것이다. C 행렬이 full row rank 이므로, (3.3)식을 다음식과 같이 변형할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y(k+1) \\ w(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(k) \\ w(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} v(k) + \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} d(k) \quad (3.4)$$

(3.4)식에서는 축소 차원 상태추정기에 의해 $\hat{w}(k)$ 를 구성할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} z(k+1) &= (A_{22} - LA_{12})z(k) + (A_{21} - LA_{11} + A_{22}L - LA_{12}L)y(k) \\ &\quad + (b_2 - Lb_1)v(k) + (E_2 - LE_1)d(k) \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\hat{w}(k) = z(k) + Ly(k)$$

$$z(k) = T\hat{x}(k)$$

$$\hat{x}(k) = \begin{bmatrix} y(k) \\ w(k) \end{bmatrix}; T = [-L, I] \quad (3.6)$$

위의 식에서 $d(k)$ 는 측정 불가능하므로, (3.5)식은 다음조건이 필요하다

$$-E_2 - LE_1 = 0$$

$$-(A_{22} - LA_{12}) \text{는 안정한 고유치(stable eigenvalue)}$$

이어야 한다.

$$(3.7)$$

또한, (3.7)을 만족하는 L 이 존재할 조건은 다음과 같다.

$$\text{rank } CE = \text{rank } E = q, p \geq q$$

여기서 " L "이 존재할 조건으로, KUVDA[8]는 $(A_{22} - LA_{12})$ 의 eigenspectrum이 다음과 같은 2가지 부분으로 분류하였다.

o (C,A,E)중 invariant zero로 고정된 부분

o 자유롭게 할당되는 부분

즉, 위의 조건에 의하여 (C,A,E)중 invariant zeros가 안정한 고유치를 가지면, 위에 조건에 의하여 " L "이 존재함을 알 수 있다. 즉 위의 조건을 증명하기 위하여 (3.8)식과 같은 error 를 정의하면 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$e(k) = z(k) - Tx(k) \quad (3.8)$$

(3.8) 식을 시간에 따라 평가하고 (3.5)식을 대입하면 아래와 같은식으로 유도된다.

$$e(k+1) = (A_{22} - LA_{12}) e(k) \quad (3.9)$$

(3.9)식으로부터 $(A_{22} - LA_{12})$ 는 위의 가정에 의하여 안정하므로, $e(k)$ 는 시간이 지남에 따라 "0"으로 접근함을 알 수 있다. 즉, $z(k)$ 는 시간이 지남에 따라 $Tx(k)$ 로 점진적(asymptotically)으로 추정됨을 알 수 있다. 위의 (3.5)식에 제시된 가정을 이용하여 다시쓰면 아래식과 같다.

$$z(k+1) = Fz(k) + Hy(k) + Tbv(k) \quad (3.10)$$

여기서

$$TA - FT = HC, TE = 0, T = [-L, I]$$

F 는 안정된 행렬

$$(3.11)$$

위의식에 의하여 제시한 조건을 만족하면 다음과 같은 결론을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} z(k) - Tx(k) &\rightarrow 0 \\ y(k) - Cx(k) &= 0 \end{aligned}$$

즉,

$$\hat{x}(k) = \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y(k) \\ z(k) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

3.2 UIO 설계

(3.3)식 으로부터, 모든 증기발생기 계속기가 고장이 없다면, $\hat{y}_i = y_i (i=1, 2, 3)$ 이다. 그리고 다음과 같은 가정이 성립하면,

- rank $C^i B = \text{rank } B = 2$
- Invariant zeros of (C^i, A, B^i) 가 안정한 고유치가 존재한다.

즉, 3개(입력의 갯수)의 UIO는 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{UIO 1 : } F^1 = [0.3775], H^1 = [0.1405 \ 0.0190] \\ T^1 = [-0.1702 \ -0.0120 \ 1]$$

$$z^1(k+1) = F^1 z^1(k) + H^1 y^1(k) + T^1 b_1 u_1(k),$$

$$\text{UIO 2 : } F^2 = [0.0145], H^2 = [0.0642 \ 0.0071] \\ T^2 = [-0.552 \ -0.0464 \ 1]$$

$$z^2(k+1) = F^2 z^2(k) + H^2 y^2(k) + T^2 b_2 u_2(k),$$

$$\text{UIO 3 : } F^3 = [-0.0966], H^3 = [0.0046 \ -2.2118] \\ T^3 = [11.1110 \ -20.2198 \ 1]$$

$$z^3(k+1) = F^3 z^3(k) + H^3 y^3(k) + T^3 b_3 u_3(k),$$

여기서, $z^i \in R^{n-p+1} (i=1, 2, 3)$ 이고, $T^i A - F^i T^i = H^i C^i, T^i B^i = 0, F^i$ 는 안정한 행렬

$$\begin{bmatrix} C^i \\ T^i \end{bmatrix} \text{는 nonsingular 한 행렬이다.} \\ T^i = \begin{bmatrix} -L^i & I \end{bmatrix}$$

그러면, \hat{y}_i 의 추정치는 아래식으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{y}_i = C_i \begin{bmatrix} C^i \\ T^i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y^i \\ z^i \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.13)$$

4. DOS를 이용한 계속기 고장검출

앞에서 UIO를 이용한 고장검출 논리에서 UIO에서 구한 편차값이 한계값보다 모두 큰경우 계속장치 고장임을 선언하고 어느 계속장치가 고장인지 알아낼 수 없으므로 DOS를 결합하여 계속장치 고장을 알아내었다. 플랜트 방정식은 마찬가지로 (2.6)식인 증기발생기 모델의 이산치시스템을 사용한다. (2.6)식에서 DOS를 구성하기 위하여 다음과 같은 가정이 필요하다. (A, B): 가제어(controllable), (A, C_i): 가관측한 쌍(observable pair) 여기서 C_i는 C 행렬의 i 번째 행이다.

4.1 DOS 구조

(2.6)식에서 C₁=[1 0 0], C₂=[0 1 0], C₃=[0 0 1]이다 여기서 C₁인 경우 우리가 원하는 형태인 [1 0 0]이지만, 2 번째 및 3번째 행렬인 경우 원하는 형태가 아니므로 변환행렬(transformation matrix(M): nonsingular matrix)를 도입한다.

$$\text{즉, } q(k) = Mx(k) \quad (4.1) \\ \text{그러면 (2.6)식은 아래식과 같이 변형된다.} \\ q(k+1) = MAM^{-1}q(k) + MBu(k) \\ y_1(k) = C_1 M^{-1} q(k) \quad (4.2)$$

이제 새로운 상태 $q(k)$ 를 추정하기 위하여 축소차원 상태추정기(관측기)를 구성하면 다음과 같다.

$$z(k+1) = (A_{22} - LA_{12})z(k) + (A_{21} - LA_{11} + A_{22}L - LA_{12}L)y_1(k) \\ + (B_2 - LB_1)u(k) \quad (4.3) \\ \hat{q}(k) = [y_1 : z(k) + Ly_1]$$

$$\hat{x}(k) = M^{-1} \hat{q}(k)$$

여기서,

$$MAM^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad MB = [B_1^T : B_2^T]$$

(4.3)식에서 관측기이득 "L"은 2*1 행렬이고, (A₂₂ - L*A₁₂)의 고유치들을 임의의 위치에 놓을 수 있다. 다시말하면 "L"을 잘 선택하여 (A₂₂ - LA₁₂)의 고유치가 z 평면의 단위원안에 원하는 위치에 놓이도록 할 수 있다.

4.2. DOS 설계

(2.6)식 으로부터, 위의 가정 (A, B)가 가제어하고, (A, C_i)가 가관측하므로 3개(출력갯수)의 DOS는 아래식과 같이 나타낼 수 있다. DOS1을 구성하기 위하여 증기발생기 모델의 상태방정식을 아래식과 같이 변형할 수 있다.

DOS 1:

$$q(k+1) = \begin{bmatrix} 0.4594 & 0.1011 & 0.0294 \\ 0.3779 & 0.1004 & 0.0485 \\ -1.4618 & 0.6481 & 0.5574 \\ 0.2123 & 0.0031 & -0.1996 \\ -0.1290 & 0.0083 & -0.5336 \\ 0.2625 & 0.1404 & -9.0531 \end{bmatrix} q(k) + \begin{bmatrix} 0.0992 \\ -12.6899 \\ 4.4391 & 0.0719 & -4.6328 \end{bmatrix} u(k)$$

$y_1(k) = [1 \ 0 \ 0]x(k)$ 에서, 첫번째 고유치를 만족하는 "L"을 구하면 L¹=[1.3290 24.6067]^T이 된다. 이 L¹값 으로부터 DOS1은 아래식과 같다.

$$z_1(k+1) = \begin{bmatrix} -0.0205 & 0.0133 \\ 1.5909 & -0.0937 \end{bmatrix} z_1(k) + \begin{bmatrix} 0.0992 \\ -12.6899 \end{bmatrix} y_1(k) \\ + \begin{bmatrix} 0.1320 & 0.0046 & -0.2749 \\ 4.4391 & 0.0719 & -4.6328 \end{bmatrix} u_1(k)$$

참고로 C₁은 원하는 형태의 행렬이므로 변환행렬인 M₁은 단위행렬이다.

$$\text{즉, } \hat{q}_1(k) = [y_1(k) : z_1 + L_1 y_1]^T \text{이며,} \\ \hat{y}_1(k) = C_1 * M_1^{-1} * \hat{q}_1(k) \text{ 이다.}$$

마찬가지 방법으로 DOS 2 & 3 를 구성할 수 있다.

DOS 2 :

$$q(k+1) = \begin{bmatrix} -0.1004 & 0.0485 & 0.3779 \\ 0.6481 & 0.5574 & 1.4618 \\ -0.1011 & 0.0294 & 0.4594 \\ -0.0083 & -0.5336 & -0.1290 \\ 0.1404 & -9.0531 & -0.2625 \\ -0.0031 & -0.1996 & -0.2123 \end{bmatrix} q(k) + \begin{bmatrix} 0.0992 \\ -12.6899 \\ 4.4391 & 0.0719 & -4.6328 \end{bmatrix} u(k)$$

$y_2(k) = [1 \ 0 \ 0]x(k)$ 에서, 두번째 고유치를 만족하는 "L"값을 구하면 L²=[54.3515 -3.1073]^T이 된다. 이 L²값 으로부터 DOS 2 아래식과 같다.

$$z_2(k+1) = \begin{bmatrix} -1.8150 & -17.023 \\ 0.1650 & 1.5612 \end{bmatrix} z_2(k) + \begin{bmatrix} -45.4404 \\ 4.2145 \end{bmatrix} y_2(k) \\ + \begin{bmatrix} -0.2656 & 17.048 & 6.0477 \\ -0.0263 & -1.691 & -0.5731 \end{bmatrix} u_2(k)$$

즉,

$$\hat{q}_2(k) = [y_2(k) : z_2 + L_2 y_2]^T \text{이며,} \\ \hat{y}_2(k) = C_2 * M_2^{-1} * \hat{q}_2(k) \text{ 이다.}$$

DOS 3 :

$$q(k+1) = \begin{bmatrix} -0.5574 & 1.4618 & 0.6481 \\ 0.0294 & 0.4594 & 0.1011 \\ 0.0485 & 0.3779 & 0.1004 \\ -9.0531 & -0.2625 & 0.1404 \\ -0.1996 & -0.2123 & 0.0031 \\ -0.5336 & -0.1290 & 0.0083 \end{bmatrix} q(k) + \begin{bmatrix} 0.0992 \\ -12.6899 \\ 4.4391 & 0.0719 & -4.6328 \end{bmatrix} u(k)$$

$y(k)=[1 \ 0 \ 0]x(k)$ 에서, 세번째 고유치를 만족하는 "L"값을 구하면 $L^3 = [0.49 \ 0.2214]^T$ 이 된다. 이 L^3 값으로부터 DOS 3는 아래와 같다.

$$z_3(k+1) = \begin{bmatrix} 0.2569 & -0.2165 \\ 0.0543 & -0.0431 \\ 4.2364 & -0.083 & -0.0657 \\ -1.4708 & -0.070 & -0.0228 \end{bmatrix} z_3(k) + \begin{bmatrix} -0.4175 \\ -0.0579 \end{bmatrix} y_3(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_3(k)$$

즉,

$$\hat{q}_3(k) = [y_3(k) : z_3 + L_3 y_3]^T \text{이며,}$$

$$\hat{y}_3(k) = C_3 * M_3^1 * \hat{q}_3(k) \text{ 이다.}$$

5. 고장논리

<그림 1>은 증기발생기 모델에 계통 및 계속장치 고장 검출의 전체구성도이다. <그림 1>에서 계통의 편차값은 다음과 같다.

$$r_i = y_i - \hat{y}_i \quad (5.1)$$

그리고 계속장치의 편차값은 다음과 같다.

$$a_i = y_i - \hat{y}_i \quad (5.2)$$

그러면 (5.1)식과 (5.2)식으로부터 다음과 같은 논리가 성립된다. 여기서 r 은 계통의 편차값을 나타내며, a 는 계속장치의 편차값을 나타낸다.

논리 1: $|r_1| > h_1, |r_2| > h_2, |r_3| < h_3$ 이고, $|a_1| > \beta_1$ (i : 출력의 갯수 = 1, 2, 3)인 경우, 1번째 및 2번째 계통고장이다.

논리 2: $|r_1| > h_1, |r_2| < h_2, |r_3| < h_3$ 이고, $|a_1| > \beta_1$ 인 경우, 1번째 계통고장이다.

논리 3: $|r_j| > h_j$ (j : 입력의 갯수 = 1, 2, 3)이고, $|a_1| > \beta_1, |a_2| < \beta_2, |a_3| < \beta_3$ 인 경우, 1번째 계속장치 고장이다.

논리 4: $|r_j| > h_j$ 이고, $|a_1| > \beta_1, |a_2| > \beta_2, |a_3| < \beta_3$ 인 경우, 1번째 및 2번째 계속장치고장이다.

참고로 h 와 β 는 각 계통 및 계속장치에 맞는 한계값을 나타내고 있다.

6. 시뮬레이션

제시된 계통 및 계속기 고장검출기법을 증기발생기 모델에 적용한 컴퓨터 시뮬레이션이 MATLAB S/W tool을 이용하여 수행되었다. 고장검출을 위한 한계영역을 정하기 위해서 정상상태중에 편차값 10개의 샘플치에 대한 평균치 조사를 행하였다. 그 결과 최대치는 다음과 같은 값으로 주어졌다.

$$\text{한계치 최대} = (0.00107, 10^{-4} * 0.9955, 0.0216)$$

이와 같은 평균치의 최대치에 대한 한계영역을 설정할 때 허위 고장 경보확률을 줄이기 위해서는 이 최대치 보다 큰값을 설정해야 한다. 그러나 한계영역을 크게 잡을 경우 발생한 고장을 미처 검출하지 못하거나 고장검출이 지연될 수 있다. 이러한점을 감안하여 설정된 계통 고장검출 한계영역은 다음과 같이 정했다.

$$\text{계통의 한계치} = (0.1, 10^{-3} * 0.1, 0.030)$$

마찬가지 방법으로 계속기 고장검출을 위한 한계영역을 다음과 같다.

$$\text{계속기 한계치} = (0.1, 0.9, 2)$$

시뮬레이션은 평균이 "0"이고, 분산이 "0.01"인 입력잡음과 측정잡음에 행해졌으며, 각각의 입력에 스텝함수 고장입력 시 그 결과를 <그림 2, 3, 4>에 보였다. 여기에서 고려한 증기발생기의 계통고장은 출구관 온도의 이상, 급수히터의 고장 주증기 제어밸브(Main Steam Control Valve)의 고장이다.

원자로 노심에서 고장이 발생하여 냉각재온도가 변화하게 되면 출구관 온도 역시 변화하게 된다. 따라서 출구관 온도의 이상을 검출하면 노심에 이상을 검출할 수 있다. 그림 2는 정상상태중 30초시점에서 출구관 온도가 갑자기 0.5 °F 만큼 증가한 경우에 편차값(편차 1)이 35초 정도에 한계값을 벗어나고 있다. 여기서 특이한점은 편차 2가 어느정도(약 10초) 과도현상이 있은후에 정상값으로 다시 돌아온다는 것이다. 이는 증기발생기 모델의 특성상 나타나는 상태변수들 간의 상호

연관으로 부터 기인된다고 볼 수 있다. 그림 3은 급수히터의 온도변화가 갑자기 0.5 °F 증가했을때 고장검출 결과를 보여주고 있다. 급수히터 고장의 원인은 대개 급수히터 내의 급수튜브에 구멍이 생겨 뜨거운 증기가 2차급수와 혼합함으로써 온도가 증가한다. 급수히터는 원자로계통의 2차측에 있으므로 증기발생기에 미치는 영향이 상대적으로 낮다. 그림 4는 주증기 제어밸브를 10% 닫히도록 동작시켰을때 밸브의 고장으로 닫히지 않는 경우에 고장검출 결과를 보여주고 있다. 이 고장의 원인은 밸브 구동기에 고장이 발생하거나 밸브시스템이 몸체에 고착등에 기인한다. 30초 시점에서 고장 발생시 편차값(편차 3)가 곧바로 한계값을 넘어가고, 상호연관에 의하여 편차 2에 과도현상이 나타남을 알 수 있다.

증기발생기 계속기에 발생할 수 있는 고장양상으로는 측정범위를 넘는 고장, 펌프형태의 외란이 들어오는 고장, 계속기 이득변화에 의한 바이어스가 존재하는 고장, 측정잡음이 갑자기 증가하는 고장등을 들 수 있다. 그림 6은 급수튜브의 온도 측정치가 지시가능 고장으로 정상치보다 0.5 °F 많은 값을 표시할때 이고, 그림 7은 증기압력 센서에 갑자기 잡음이 증가하여 측정치가 정상치보다 0.8 psig 만큼 증가한 경우 고장검출 결과를 보여주고 있다. 그림에서 나타나듯이 해당 편차값들이 1-2초 이내에 한계값을 벗어나 고장이 잘 검출됨을 알 수 있다. 반면에 노심냉각재 온도 센서 경우의 DOS를 이용하여 검출할 수 없는바, 이는 DOS의 구조상 추정치의 변환행렬이 단위행렬이므로 추정치와 측정치가 같아져 결국 편차값이 "0"으로 나타남을 알 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 증기발생기 내의 계속기 고장 뿐만 아니라 증기발생기와 관련된 계통고장을 함께 고려하였다. 제시된 고장검출기법은 UIO라는 관측기를 이용하여 계통의 고장을 검출하고, DOS라는 관측기를 이용하여 계속기 고장을 판별한다. 원리적으로 각 고장은 추정치와 측정치의 차이인 편차가 설정된 한계치를 넘게되면 발생하는 것으로 간주한다. 다만 계통의 고장검출시 급수히터 계통의 편차에 과도현상이 다소 심하게 나타나 판정시간이 느려지는 것과 계속기 고장검출시 노심냉각재 온도센서의 고장검출이 현상태로는 불가능하다는 점이 보완되어야 할 요소로 지적된다.

참고 문헌

- [1]. A. S. Willsky, "A Survey of Design Methods for Failure Detection Systems", Automatica, Vol.12, Nov. 1976.
- [2]. R. Isermann, "Process Fault Detection on Modelling and Estimation Methods - A Survey", Automatica, Vol. 20 1984.
- [3]. A. Ray and M. Desai, "Fault Detection and Isolation Methodology", in Proc. IEEE CDC, San Diego CA, Dec. 1981.
- [4]. H. W. Sorenson, Parameter Estimation, Marcel Dekker Inc., New York, 1980.
- [5]. J. L. Tylee, "A Generalized Likelihood Ratio Approach to Detecting and Identifying Failures in Pressurizer Instrumentation", Nuclear Tech., Vol. 56 Mar. 1982.
- [6]. 천희영, 박기태, 박승엽, 김인성, "PWR 가압기의 계속장치 고장진단에 관한 연구", '87년도 한국 자동제어 학술회의 논문집, 1권, pp.70~76.
- [7]. N. Viswanadham and R. Srichander, "Fault Detection using Unknown Input Observers", Control-Theory and Advanced Tech., Vol. 3., pp. 91-101, 1987.
- [8]. P. Kudva, N. Viswanadham and A. Ramakrishnan, "Observers for linear systems with unknown inputs", IEEE Trans. Automatic Control, AC-25, pp. 113-115, 1980.
- [9]. J. D. Freels, "An investigation of high order and low order dynamic modelling of a complete pressurized water reactor NPP", MS Thesis, Univ. of Tennessee 1979.
- [10]. R. N. Clark, D. C. Fosth and V. M. Walton, "Detecting instrument malfunction in control system", IEEE Trans, Aero. and Elec. Sys., AES-11, pp 465-473, 1975.

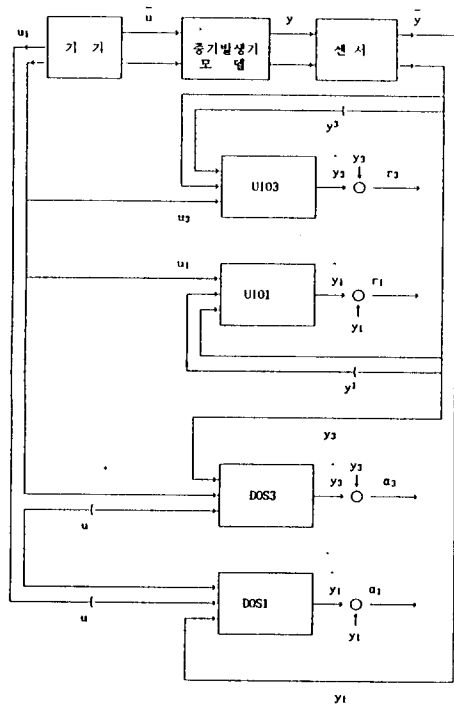


그림 1. 중기발전기 모델에 계측기 및 계통고장 검출의 전체구성도

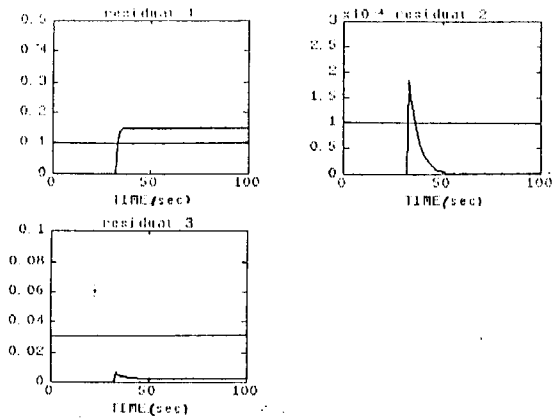


그림 2. 출구전 혼도에 0.5% 고장시 각 편차의 변화

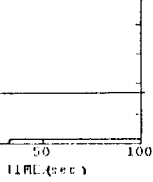
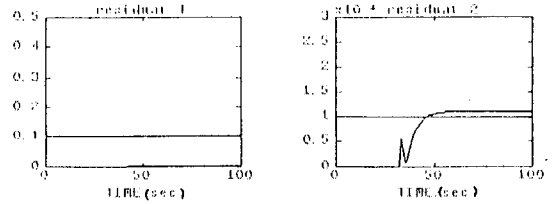


그림 3. 급수회선에 0.5% 고장시 각 편차의 변화

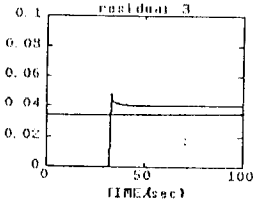
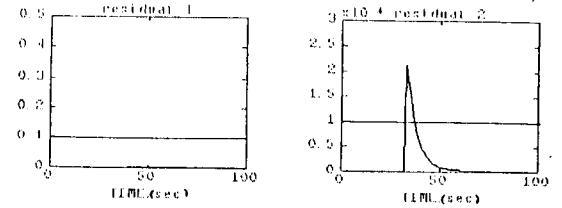


그림 4. 95KV에 10% 고장시 각 편차의 변화

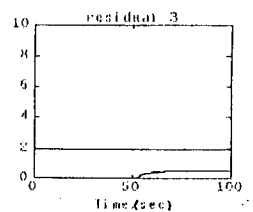
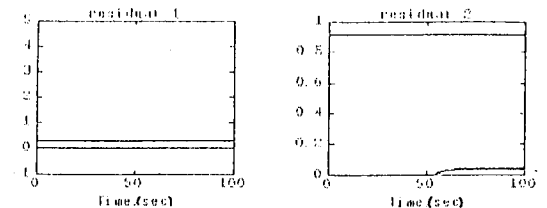


그림 5. 노상량전계 혼도 계측기에 0.5% 고장시 각 편차의 변화

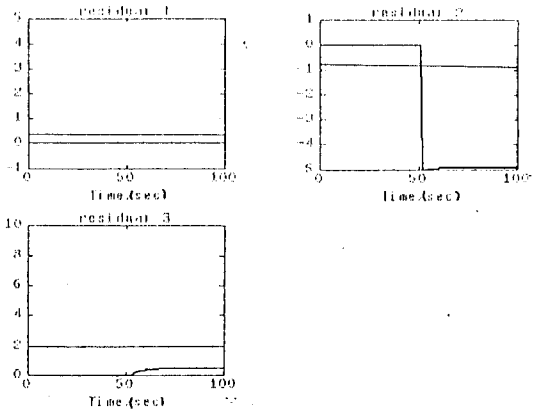


그림 6. 금속큐브의 온도 계속기에 0.5°F 교정시 21 번치의 변화

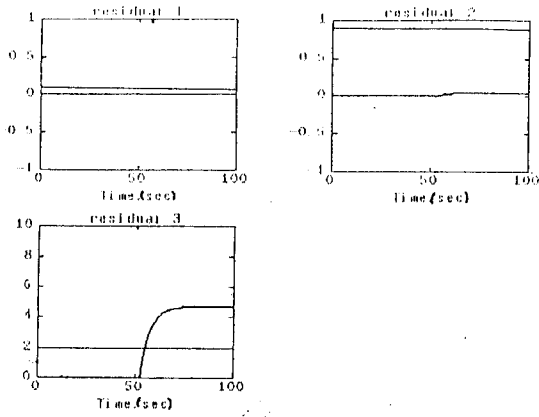


그림 7. 중기입력 계속기에 0.8 mg 교정시 21 번치의 변화