

KALMAN FILTER를 이용한 원자로 열출력측정 방법개선에 관한 고찰

The Study of Improvement in Reactor Thermal Power Measurement Method
using KALMAN FILTER

목 차

- | | |
|----------------------|----------------------|
| 1. 서론 | 4. KALMAN FILTER의 검증 |
| 2. 원자로 열출력 측정법 | 5. 결론 |
| 3. KALMAN FILTER의 해석 | |

鄭 南 教*
Chung, Nam Kyo

Abstract

A Study of Improvement in Reactor Thermal Power Measurement Method using Kalman Filter.

The objectives of the safety analysis of nuclear power plants are to maintain the surface temperature of fuel and fuel cladding within limit value in case of Loss of Coolant accident (LOCA) so that it ensures the safety and reliability of nuclear power plants. The new technique evaluating the reactor power and improvement of existing plant system increase the safety margin of nuclear power plant operation, and

accordingly, economic effect will be anticipated.

Hereby, I would like to introduce reactor power measurement method using Kalman filter that enables to calculate the reactor power more precisely combining the parameters, for example, turbine output as the 1st stage pressure of high pressure turbine, and reactor power using energy equilibrium relation. It is expected that the new technique will enhance the accuracy of measurement of reactor power and maintain the reliability of nuclear power operation by increasing operational safety margin, and gain the economic benefit

*발송배전·원자력발전기술사, 한전 원자력연수원 교육기획부장.

I. 서론

원자력발전소 안전성 분석의 주된 목적은 사고시 핵연료 및 핵연료 피복재 표면의 온도를 제한치 이내로 유지함으로써 핵연료의 건전성을 보장하는 것이므로 설정된 안전성 관련 제변수 및 그 운전값들을 원자로 열출력과 연관시켜 안전성 측면에서 분석하여 볼 때 원자로 열출력을 정확하게 평가하는 것은 매우 중요한 것이며, 또한 열출력 측정오차가 증가한다면 안전성 관련 변수들이 그 제한치 내를 초과하지 않도록 출력을 조절하여야 하므로 경제적 손실을 동반할 수도 있다.

TMI 사고가 심각한 노심 손상을 일으킨 대형 사고로서 막대한 재정적 손실을 야기시켰으나 그로 인한 방사능 유출은 경미하였던 사실을 미루어 볼 때 사고해석의 의미는 중대한 사고의 결과를 보다 현실적으로 알 수 있게 하는데 큰 도움을 주는 것이라고 말할 수 있다. 특히 원자력분야 종사자에게 준 교훈은 작은 요소를 보다 잘 관리(운영)하므로써 큰 요소의 문제를 예방할 수 있다는 「운전과 보수」의 중요성에 직결된 원전의 안전성 확보에 기본적인 철학을 제시하였다.

이러한 배경으로 볼 때 원자력 발전소의 정확한 출력 즉, 열출력을 평가하는 새로운 기법의 도입 및 기존계통의 개선추구는 원자로 운전의 안전 여유도를 증가시키고 이에 따른 경제성 효과 또한 기대된다. 현재의 원자력발전소 열출력 측정방법은 2차측 열출력을 측정하여 원자로 열출력을 결정하고 이에 따라 열출력 계측설비(노외 핵계장)를 교정(Calibration)하여, 그 지시값을 기준으로 원자로를 운전한다.

이러한 측정법은 에너지평형 관계를 이용한 2차측 열출력 값을 제외한 원자로 열출력 관련 값(Data)를 사용하지 못함으로써 계기편차 및 운전이력에 따른 정확한 열출력 계산에 오차의 잠재성이 내포되어 있는바, 본문에서는 고압터빈 1단 압력의 함수로써의 터빈출력, 에너지 평형관계를 이용한 원자로 출력 등의 실제변수를 종합/선택하여 보다 정확한 열출력을 계산할 수 있는 Kalman Filter를 이용한 열출력 측정방법의 새로운 기술을 소개/향후 도입하여 열출력 측정의 정확도를 향상시키므로 운전여유도 증가에 따른 원전의 안전성 증대 및 경제적 이득이 확신되므로 관련기술 적용 결과를 중심으로 기술하고자 합니다.

II. 열출력 측정법

원자로 열출력은 $Q_{RX} = \dot{m}CP \Delta T$ (단, $\dot{m} = RCS$ 유량율, $CP =$ 등압비열, $T = T_{hot} - T_{cold}$)의 기본식과 관련된 1차계통변수를 정확히 측정함이 타당하나 RCS 유량율(\dot{m})과 ΔT 를 정확히 측정 할 수 있는 방안이 없어 원자로 열출력을 평가하는 현재의 방법은 1차측 열출력과 2차측 열출력이 같다는 조건하에서 2차측 열평형 원리를 적용 2차측 열출력을 측정후 이 값에 1차계통의 열손실을 가감하여 원자로 열출력을 평가한다.

1. 열출력 계산 주요과정

가. 주급수엔탈피 상기주급수 온도와 압력 측정치를 이용 증기표에서 내삼법으로 구한다.

나. 증기의 엔탈피를 현장 계기로부터 측정한 증기압력, 대기압과 배관 압력손실, 수두를 고려

하여 보정증기압력을 계산한 후 P_s 포화압력에 대한 증기엔탈피 $(H_s) = XH_G + (1-X)H_F$ 를 계산한다. (단, X : 증기의 건도)

다. 취출수(Blowdown)엔탈피는 포화수의 엔탈피 H_F 를 적용 결정한다.

라. 유량의 계산

급수 및 취출수 유량측정 계기의 노즐상수

$$\alpha = \frac{359.1d^2 C}{\sqrt{1-(d/D)^4}}$$

여기서

d = 노즐목직경

D = 노즐 출구 직경

C = 노즐 출구 계수 (유량계수)

○ 급수 및 취출수 유량

$$W = \alpha Fa \sqrt{\frac{\Delta P}{V}}$$

여기서

W = 유량

Fa = 열팽창 계수

ΔP = 노즐의 차압 (20°C)

V = 비체적

○ 각 증기발생기의 엔탈피

$$h_s = xh_g + (1-x)h_f$$

여기서

x = 증기의 질

h_g = 포화증기 엔탈피

h_f = 포화수 엔탈피

P_a = 증기발생기의 절대압력

○ 각 증기발생기의 열출력

$$Q_1 = (W-w)h_s + wh_f - Wh_w$$

여기서

W = 주급수 유량

w = 취출수 유량

h_s = 증기의 엔탈피

h_f = 증기발생기의 엔탈피

h_w = 주급수 엔탈피

○ 원자로 열출력

$$Q_T = Q_i - Q$$

여기서

Q_i = 각 증기발생기 열출력의 합

Q = 원자로 이외의 열원의 열량

$$Q_t(\%) = \frac{Q_t}{Q_{rtp}} \times 100\%$$

여기서

Q_{rtp} = 정격 열출력 (But/hr)

다. 원자로 열출력을 측정하는 일반적인 방법은, 2차측 열출력 변수를 측정하여 이 값을 이용 증기발생기 열출력을 계산하고 여기에 원자로와 증기발생기에서 열손실을 가감함으로써 원자로 열출력을 계산하는 방법이다.

(1) 측정변수의 중복성이 이뤄지질 않기 때문에 열출력 계산에 영향을 미치는 변수의 계기오차가 증가할 경우 계산값에는 현저한 오차가 발생된다.

예) 주급수 벤추리 경년열화에 따른 큰 열출력 계산 오차 발생

(2) 측정계기 각각에 대한 잡음오차, 고유편차, 측정오차를 고려치 않음으로서 오차가 발생된다.

즉 이러한 원인(인위적 문제점 배제)으로 측

정/판정된 부정확한 열출력이 원전의 운전에 미치는 영향을 간단히 고찰하여 보면

- 첫째 : 원전의 발전단 공칭전력의 신뢰성 결여
- 둘째 : 과출력 운전에 따른 원자로의 안전성 위험
- 셋째 : 노심의 안전성 확보에 대한 신뢰성 결여
- 넷째 : 핵연료 교체주기의 최적성 상실
- 다섯째 : 이용률 향상과 기저부하 운전의 비효율성 증대로 기술할 수 있다.

III. KALMAN FILTER의 해석

1. 발전계통 모델링

측정 값(data)으로부터 계통의 상태를 확인 혹은 묘사(modeling)하는 것은 발전소 전 계통의 최적상태를 묘사하기 위하여 필수적인 것이다.

계통확인(identification)은 구조 및 매개변수 추정(identification)으로 구성된다

구조 추정은 계통상태를 묘사하는 방정식의 차수(Order) 및 형태를 결정하고, 매개변수 추정은 이 방정식의 계수를 결정하는 것이다.

일반적으로 추정(estimation) 문제는 다음과 같은 항목으로 구성된다.

- (1) 추정 할 변수
- (2) 측정 값
- (3) 측정값과 변수의 연관성을 묘사하는 수학적 모델
- (4) 측정방법, 계기상태 및 모델링 과정 등에 포함된 불확실도
- (5) 최적의 추정 방법여부를 판단할 수 있는 평가 범위

즉, 추정(estimation)이란 다음과 같은 과정으로 요약할 수 있다.

계통의 상태를 나타내는 변수의 정확한 값을

알기 위하여 각 변수와 선형적 관계를 갖는 측정값을 관찰한다. 이때 보통 잡음의 영향을 받게 된다.

계통 추정을 수행한다는 것은 이러한 측정값과 계통의 상태를 결정하는 변수간의 관계 및 잡음의 영향을 밝히고 더 나아가 계통변수를 최적의 상태로 묘사할 수 있는 모델을 만드는 것이다.

본 연구에서는 직접식별(1, 2, 3, 4) 방법을 사용하므로 실측값을 이용하여 계통 구조가 결정될 때까지는 파라미터를 결정할 필요가 없는 장점이 있다.

초기값은 정상운전 변수의 입·출력으로 주어진다.

가. 계통상태 결정 및 측정 모델

계통상태 및 측정 모델은 다음과 같은 표준방정식으로 표현할 수 있다.

$$X(k+1) = \Phi \times X(k) + W(k) \tag{1}$$

$$Z(k) = H \times X(k) + V(k) \tag{2}$$

여기서 $X = n \times 1$ 상태벡터

$\Phi = n \times n$ 상태 변환 행렬

$W = n \times 1$ 공정 잡음 벡터

$Z = m \times 1$ 측정 벡터

$H = m \times n$ 측정 행렬

$V = m \times 1$ 측정 잡음 벡터

다음과 같이 가정이 성립한다.

$$E\{W(i)\} = 0$$

$$E\{V(i)\} = 0$$

$$E\{W(i)W^T(j)\} = Q\delta_{ij}$$

$$E\{V(i)V^T(j)\} = R\delta_{ij}$$

$$E\{W(i)W^T(j)\} = 0 \tag{3}$$

여기서 $E\{\cdot\}$ 는 통계기대값, δ_{ij} 는 kronecker delta 이다.

식 (1), (2)로 표현되는 계통구조 및 파라메터가 결정되려면 계통이 안정상태, 제어가능, 관측가능 하고, 통계적으로 정상상태에 도달한 후에 측정이 이루어진다는 가정이 성립해야 한다.

구조식별은 측량벡터 공분산함수, $R(\sigma) = E[Z(k+\sigma)Z^T(k)]$ 를 이용하여 다음과 같은 절차로 수행된다.

- (1) 실험값으로부터 $R(\sigma)$ 인수를 결정
- (2) 추정된 공유값으로 구성된 새로운 행렬 γ 을 결정하고, 순차적인 γ 의 차원(dimension) 변경수행 및 특이점(singularity) 유무를 판정하여 식(1), (2)의 차수 및 형태를 결정한다.
- (3) 구조 파라메터는 $\gamma^* = \gamma\phi^*$ 에서 결정한다. 여기서 ϕ^* 는 상태전이행렬의 미지의 계수를 포함한다

나. Covariance Function

정의 : $R(\sigma) = E [Z(k+\sigma)Z^T(k)]$ (4)

식(2)를 대입하면

$$R(\sigma) = E\{[H \times (k+\sigma) + V(k+\sigma)] [X^T(k) H^T + V^T(k)]\} \quad (5)$$

식(1), (2) 및 $\sigma \geq 1$ 로 가정하면

$$R(\sigma) = HE[X(k+\sigma)X^T(k)]H^T \quad (6)$$

$$E[X(k+\sigma)X^T(k)] = \phi^\sigma E[X(k)X^T(k)] \quad (7)$$

이므로

$$R(\sigma) = H\phi^\sigma E[X(k)X^T(k)]H^T \quad (8)$$

$$= H\phi^\sigma \alpha (\alpha \equiv E[X(k)X^T(k)]H^T) \quad (9)$$

$$= \begin{vmatrix} h_1 \phi^\sigma \\ h_2 \phi^\sigma \\ \vdots \\ \vdots \\ h_m \phi^\sigma \end{vmatrix} \alpha \quad (10)$$

여기서 h_i 는 측정함수 H의 i번째 열(row)이다.

다. Structure Estimation

변수(multivariable) 계통의 구조추정은 중간과정의 변수 모델링을 거치지 않고 입·출력값으로부터(ϕ, H)를 구성하는 정수 $\nu_1 \dots \nu_m$ 의 조합을 결정하면

식(10)의 측정 공분산행렬 $R(\sigma)$:

$$R(\sigma) = \begin{vmatrix} R_1(\sigma) \\ R_2(\sigma) \\ \vdots \\ R_m(\sigma) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} h_1 \phi^\sigma \\ h_2 \phi^\sigma \\ \vdots \\ h_m \phi^\sigma \end{vmatrix} = \alpha$$

$\sigma = \nu_m + \tau$ 라 하면

$$R_m(\nu_m + \tau) = h_m \phi^{\nu_m} \phi^\tau \alpha$$

여기서 R_i 는 행렬 R의 i번째 열이고 $\nu_m = \max_i(\nu_i)$ 이다

필요한 만큼의 독립벡터 선택을 위하여, 즉 계통의 완전한 구조식별을 위해서는 충분한 양의 입·출력자료가 확보되어야 한다.

본 연구에서 계통 차수에 비하여 많은 자료가 확보되어 있어 상기조건을 만족한다.

식(4), (5)로부터

$$R_m(\nu_m + \tau) = \phi_{M1,1} h_{11} \phi^{\tau \alpha} + \phi_{M1,2} h_{11} \phi^{\tau+1} \alpha + \dots + \phi_{M1,\nu_1} h_{11} \phi^{\tau+\nu_1-1} \alpha + \phi_{M2,1} h_{21} \phi^{\tau \alpha} + \phi_{M1,2} h_{22} \phi^{\tau+1} \alpha + \dots + \phi_{M2,\nu_2} h_{22} \phi^{\tau+\nu_2-1} \alpha + \dots + \phi_{Mm,1} h_{m1} \phi^{\tau \alpha} + \dots + \phi_{Mm,\nu_m} h_{m1} \phi^{\tau+\nu_m-1} \alpha \quad (11)$$

식(10)을 대입하면

$$R_m(\nu_m + \tau) = \phi_{M1,1} R_1(\tau) + \phi_{M1,2} R_1(\tau+1) + \dots + \phi_{M1,\nu_1} R_1(\tau+\nu_1-1) + \phi_{M2,1} R_2(\tau) + \dots + \phi_{M2,2} R_2(\tau+1) + \dots + \phi_{M1,\nu_2} R_2(\tau+\nu_1-1) + \dots + \phi_{Mm,1} R_m(\tau) + \phi_{Mm,\nu_m} R_m(\tau+\nu_m-1) \quad (12)$$

식(4), (12) 에서와 같이 행렬 $R(\theta)$ 의 벡터들의 연관성은 θ 에서의 벡터 선택순서와 같으므로

ν_1, \dots, ν_m 은 정준형(Canonical Form)을 만들기 위해 θ 에서 벡터를 선택한 것과 같은 순서로 식(12)로부터 독립벡터들을 선택함으로써 결정된다.

라. Parameter Estimation

$R_M = R^{\theta_M}$ 에서 행렬 θ 의 I번째 전치행(trans-posed row)만을 고려하면

$$r_i = r^{\theta_i} \quad (13)$$

식(13)에서 다음과 같이 θ_i 의 각 파라미터의 최소자승 추정치를 구한다.

$$\hat{r}_i = \tilde{r}_i + r_i \text{ 라 하면} \quad (14)$$

$$\hat{r} = r + \tilde{r} \quad (15)$$

여기서 (\sim) 는 추정오차를 표시한다.

식(14), (15)을 식(13)에 대입하면

$$\hat{r}_i = \hat{r}^{\theta_i} + E_i \quad (16)$$

$$E_i = \tilde{r}_i - \tilde{r}^{\theta_i} \quad (17)$$

식(16)로부터 최소자승법을 사용하여 θ_i 의 추정값을 구하면 이차 성능지수 $J(\hat{\theta}_i) = E[E_i^T E_i]$ 가 최소가 되고 추정치 θ_i 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\theta}_i = \hat{r}^{-1} \hat{r}_i \quad (18)$$

$\hat{\theta}_i$ 에 관한 m 개의 행렬 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\theta_1 \theta_2 \dots \theta_m] = \hat{r}^{-1} [\hat{r}_1 \hat{r}_2 \dots \hat{r}_m] \quad (19)$$

구조 추정 산법(structure estimation algorithm)에서 \hat{r} 이 특이값(singular)이 되는 것을 방지하므로 \hat{r} 값을 식(19)에 대입하면 계통 파라미터를 결정할 수 있다.

마. 원자료의 Identified Dynamic Model의 적용

원자료의 동적 모델은 앞절에서 구한 system identification algorithm과 실제 측정값을 이용하

여 원자료 열출력 (Q_{pri}), 2차측 열출력(Q_{sec}), NIS출력(Q_{core})의 관계를 구하는 것이다.

Q_{pri} , Q_{sec} 는 온도, 압력 및 유량의 비선형 함수로 주어지지만 여기에서는 직접 측정할 수 있는 값으로 취급한다.

식(19)의 결과에 따라 다음관계식을 구한다.

$$\begin{vmatrix} Q_{pri} \\ Q_{sec} \\ Q_{core} \end{vmatrix}_k = \begin{vmatrix} \hat{\phi}_{11,1} & \hat{\phi}_{12,1} & \hat{\phi}_{13,1} \\ \hat{\phi}_{21,1} & \hat{\phi}_{22,1} & \hat{\phi}_{23,1} \\ \hat{\phi}_{31,1} & \hat{\phi}_{32,1} & \hat{\phi}_{33,1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Q_{pri} \\ Q_{sec} \\ Q_{core} \end{vmatrix}_{k-1} \quad (20)$$

k 는 k 번째 time step 이다

각 출력변수 간의 동적 결속(dynamic connection)이 약할 경우 다음과 같이 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{vmatrix} Q_{pri} \\ Q_{sec} \\ Q_{core} \end{vmatrix}_k = \begin{vmatrix} \hat{\phi}_{11,1} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{\phi}_{22,1} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{\phi}_{33,1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Q_{pri} \\ Q_{sec} \\ Q_{core} \end{vmatrix}_{k-1} \quad (21)$$

실제 열출력 계산에서 Q_{pri} , Q_{sec} , Q_{core} 는 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{pri} = \dot{m}_{pri}(h_{hl}-h_{cl}) - Q_{pp} + Q_{ls} + Q_{pcc} \quad (22)$$

$$Q_{sec} = \dot{m}_{fw}(h_g - h_{fw}) + m_{bd}(h_f - h_g) - Q_{pp} + Q_{ls} + Q_{pcc}$$

$$- \frac{C}{V_F} (h_g - h_f) \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (23)$$

$Q_{core} = NI$ 기록값

* 열출력 측정 계기자료

\dot{m}_{fw} : 주급수 유량 (m^3/hr)

T_{fw} : 주급수 온도 ($^{\circ}C$)

P_{fw} : 주급수 압력 (kg/cm^2)

\dot{m}_{bd} : 취출수 유량 (m^3/hr)

P_s : 증기압력 (kg/cm^2)

C : 보정상수

ΔL : 증기발생기 수위변화 (m)

- Δt : time step size (sec)
- T_h : hot leg 온도 ($^{\circ}C$)
- T_c : cold leg 온도 ($^{\circ}C$)
- T_{amb} : 대기온도 ($^{\circ}C$)
- \dot{m}_{pcc} : 1차기 냉각계통 유량 (m^3/hr)
- T_{dl} : 원자로 냉각재 pump downstream 온도 ($^{\circ}C$)
- T_{ui} : 원자로 냉각재 pump upstream 온도 ($^{\circ}C$)
- \dot{m}_{pri} : 원자로 냉각재 유량 (m^3/hr)
- P_P : 원자로 계통 압력
- Q_{pp} : 원자로 냉각재 pump에 의한 열량(MW)
- Q_{ppc} : 1차기 냉각계통을 통한 열손실(MW)
- Q_{ls} : 원자로용기배관등을 통한 열손실(MW)

2. KALMAN FILTER의 이론전개

가. Kalman Filter의 정의

계통상태를 표시하는 변수들 중 직접 측정이 불가능한 것은 관련 값으로부터 추정해야 한다.

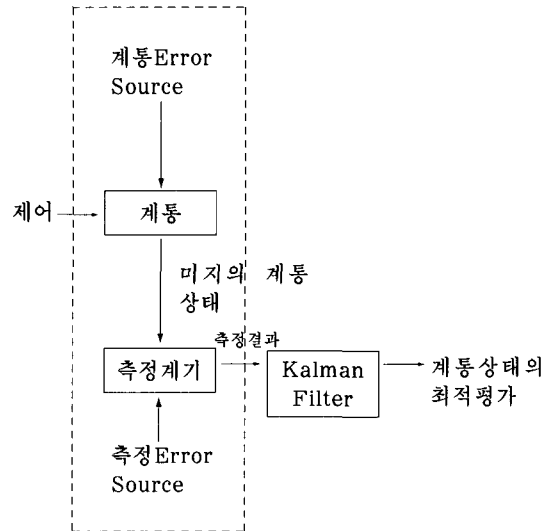
이러한 자료에는 계통의 제어방식, 계통변수와 측정 출력 사이의 불확실성이 포함되므로 계통 변수의 정확한 추정이 어려워진다. 게다가 측정계기는 잡음, 고유편차, 측정오차 등의 영향을 받으므로 불확실성이 큰 신호로부터 정확한 정보를 얻는 방법이 필요하게 된다.

Kalman Filter는 측정값과 계통 및 측정계기의 특성을 이용하여 통계적 오차가 최소화 되도록 계통변수를 추정하는 것이다.

〈그림 1〉은 Kalman Filter의 적용원리를 나타내고 있다.

본 장에서는 현재 2차측 열출력에만 의존하고 있는 열출력 측정방법을 개선하여 Kalman Filter를 이용 원자로 열출력, 2차측 열출력 및 NIS(Nuclear Instrumentation System)출력 등 3가지 자료를 결합함으로써 원자력발전소 열

출력 측정 신뢰도를 높이는 방법을 기술한다.



〈그림 1〉 Kalman Filter의 적용방식

나. Kalman Filter의 알고리즘

Filter의 상태 벡터를 X_k 라하고 이 벡터는 1차측, 2차측, NI출력 및 실제 원자로 출력의 바이어스(bias)로 구성된다.

여기서 k 는 k 번째 time step를 표시한다.

알고리즘은 다음과 같은 행렬정의 및 계산과정으로 이루어진다.

정의 :

(1) 추정된 상태 벡터 X_k 의 공분산 행렬 :

$$P_k = E[(\hat{X}_k - X_k)(\hat{X}_k - X_k)^T] \equiv COV(\hat{X}_k)$$

(2) 추정 잡음 행렬 : P_k

(3) 측정 행렬 : H

H 는 $Z_k = HX_k + V_k$ 로 정의되고 여기서 Z_k 는 측정 벡터, V_k 는 White noise term 이다

(4) Kalman gain 행렬 : K_k

K_k 는 P_k , R_k 및 H 로 정의된다.

Filter Algorithm :

(1) 초기값 \hat{X}_0 , P_0 를 설정한다.

(2) 필터 갱신전의 상태변수 전과 $\hat{X}_{k^-} = \Phi \hat{X}_{k-1}$
 (-)는 측정 갱신 직전의 상태변수 추정을 표시한다.

다음 측정시간에 대한 공분산(Covariance)

$$P_{k^-} = \Phi P_{k-1} \Phi^T + Q_{k-1}$$

(3) kalman Filter 이득 K_k 를 계산한다.

$$K_k = P_{k^-} H^T (H P_{k^-} H^T + R)^{-1} \quad (24)$$

(4) 상태변수 갱신

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k^-} + K_k (Z_k - H \hat{X}_{k^-}) \quad (25)$$

본 연구에서는 추정하는 시간대내에서 상태변수가 일정하다고 가정하므로 $\hat{X}_k = \hat{X}_{k-1}$ 이다.

(5) 공분산 갱신

$$P_k = (I - K_k H) P_{k^-} (I - K_k H)^T + K_k R K_k^T \quad (26)$$

(6) 모든 추정치가 처리될 때까지 (2) ~ (5)를 반복한다

$K \gg 1$ 이면 K_k 는 일정하게 된다. 즉 필터는 정상상태(steady state)가 된다.

다. Kalman Filter의 적용

본 연구에서 사용된 Kalman Filter 는 다음 4가지 요소를 가진 상태 벡터 및 3가지 요소를 가진 측정 벡터로 구성된다.

$$\begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{matrix} \Big|_k = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{matrix} \Big|_{k-1} \quad (27)$$

$$\begin{matrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{matrix} \Big|_k = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{matrix} \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{matrix} \Big|_k + \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{matrix} \Big|_k \quad (28)$$

- X_1 : 원자로 열출력 Q_{pri} 에 대한 바이어스
- X_2 : 2차측 열출력 Q_{sec} 에 대한 바이어스
- X_3 : NI 출력에 대한 bias

X_4 : 실제출력 level

Z_1 : 원자로 열출력 Q_{pri} 측정치

Z_2 : 2차측 열출력 Q_{sec} 측정치

Z_3 : NI 출력 측정치

V_1, V_2, V_3 : uncorrelated white measurement noise

계통의 상태변수(출력 level)들 간에는 교차결합이 약하므로 tc(correlation time) 이상의 예시시간을 주면 비상관상태(uncorrelated)로 볼 수 있고, 식(25), (26)과 같이 모델을 단순화시킬 수 있다.

계통 상태가 상수화 되므로 Q 는 4×4 의 영행렬로 주어진다.

측정 잡음 공분산 행렬 R 은 실측 자료의 공분산 분석으로 구한다.

초기 estimation error covariance P_0 은 계통 상태변수가 비상관(uncorrelated)이므로 다음과 같은 대각행렬로 표시한다.

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_4^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

σ_i 는 상태변수 X_i 의 표준편차이다.

식(27)로부터 초기상태 추정 \hat{X}_0 를 설정한다.

이렇게 하여 식(25), (26)의 계통 및 측정 모델과 통계 자료 Q, R 및 초기조건 P_0, \hat{X}_0 를 3.1절의 필터산법에 대입하여 각 출력변수를 구한다.

라. Kalman Filter 효율의 검증

본 연구에 적용된 Filter의 효율은 다음 2가지 방법으로 결정한다.

- (1) 필터를 통한 실시간(real time) 결과와 기존의 열출력 측정방법에 의한 결과를

비교

(2) 선형오차(linear error) 분석 및 표준모델 (truth model) 에 의한 분석

(가) 기존방법과의 비교

기존의 2차측 열출력 측정방법과 Kalman Filter를 이용한 열출력 결과의 표준편차를 비교하여 필터 신뢰도의 개괄적인 검증을 수행한다.

(나) 선형오차분석

필터 오차는 각 오차발생원인에 따른 오차의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\tilde{X} = E^1 + E^2 + E^3 + \dots \quad (30)$$

\tilde{X} 는 상태추정 오차이다

\tilde{X} 의 공분산도 각 오차 공분산의 합으로 표현된다.

$$\text{cov}(\tilde{X}) = \text{cov}(E^1) + \text{cov}(E^2) + \text{cov}(E^3) + \dots \quad (31)$$

filter의 중요한 오차발생원은 다음과 같다.

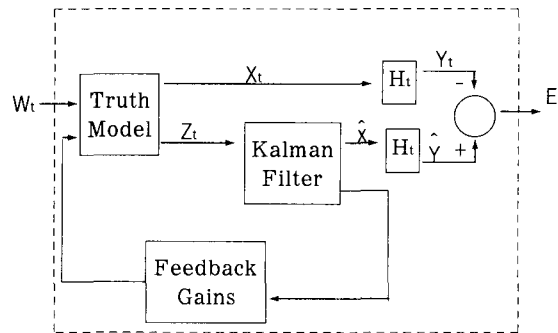
- 1) 필터 구조에 의한 오차 ; 이 오차는 모델링 오차, 수치적 오차 및 반올림 오차에 의한 것으로 잡음이 없는 완전한 자료가 입력되더라도 존재하는 오차이다. 이 오차는 정확한 결과를 알고 있는 계통의 자료를 필터에 통과시켜 구할 수 있다.
- 2) 측정계기의 바이어스에 의한 오차 ; 열출력 측정에 필요한 열전대, 압력변환기, 유량계 등에 포함된 오차이다
- 3) 측정계기의 불규칙 잡음에 의한 오차 ; 2), 3)항의 오차는 측정 자료의 표준모델을 사용하여 결정할 수 있다.

(다) 표준모델에 의한 비교

열출력 측정에 필요한 각 측정계기의 오차는 여러 가지 방식으로 필터 정밀도에 영향을 미치게 된다.

이러한 계기오차의 필터를 통한 전파방식, 상태변수 오차발생 방식을 파악하는 것은 매우 중요한 일이다.

표준모델은 <그림 2>와 같이 필터 및 계기의 신뢰도를 검증하기 위한 것으로 이 모델 개발을 위해서는 많은 자료 분석이 수행되어야 한다.



<그림 2> Kalman Filter의 표준모델 검증

W_t : white noise

Z_t : 측정 process

X_t : state process

H_t : 선형 변환 행렬

Y_t : 필터와 연결된 주요변수

Q_{pri} , Q_{sec} 의 표준모델은 식 (22), (23)로 주어진다.

IV. KALMAN FILTER의 적용

1. 원자로 열출력의 변화 요인

가. 출력 재분포에 따른 출력 분석

노심 내 핵연료 연소상태는 노심 초기에서 노심 말기로 감에 따라 핵연료 분포 형태가 달라진다.

즉, 노심 중심 연료보다 노심 외각 부분의 연료가 담당하는 출력분포가 증가하므로 중성자 누설율이 증가하게 되어 노심 외각에 설치된 노

외 핵계측 설비의 출력영역 검출기는 더욱 많은 중성자를 감지하게 됨으로써 동일 출력에서도 높은 전류치를 지시하게 된다.

특히 기존 OUT-IN 정전 모형을 배제하고 중성자 이용률 향상을 위한 저누설 장전모형(Low Leakage Loading Pattern)을 도입하여 노심 최 외각 위치에 저 농축 핵연료를 장전하게 됨에 따라 노심 초기에서 노심 말기로 연소가 진행됨에 따라 외각 연료가 상대적으로 더욱 높은 출력을 담당한다.

나. 핵연료의 연소에 따른 노심 상부 온도변화

노심 초기(BOL)에서는 노심 중앙부분 핵연료의 연소율이 노심 외각 자리보다 커서 중성자 속의 분포가 높고, 노심 가장자리는 낮다가 노심 말기(EOL)로 감에 따라 노심 중앙부분 핵연료의 연소는 초기에 많은 연소 영향으로 점점 줄어들게 되고 상대적으로 노심 가장자리 연료의 연소가 점점 증가하게 된다. 이에 따라 노심 상부의 온도분포 또한 노심 외각 부분의 연료 온도는 증가하고 노심 중앙부분의 연료 온도는 감소하는 현상을 나타낸다.

다. 변수 측정기기의 경년변화

(1) 주급수유량 측정용 벤츄리

발전소의 전기출력이 감소하는 결과가 발생했을 때 벤츄리 표면을 문질러서 닦아내고 고압 고속의 물로 세정한 후 발전소를 운전한 결과 약 2~3%의 발전소 전기 출력이 상승되고 열 소비율도 개선된다는 것은 잘 알려진 사실이다.

그러므로, 원전의 열출력 값의 가장 큰 변수로 작동되는 주급수 유량 측정용 벤츄리 관리는 응축급수 트레인 설비들의 일반적인 부식 생성물과 응축수도는 보충수 계통의 누설에 의한 것으로 보이는 구리(Copper), 철(iron)과 약간의 니

켈(Nickel)과 아연(Zinc)이 포함된 침적물 관리가 주안점이 될 것이다.

라. 중성자 측정용 계측설비

○ 측정 기기 고유로 지니고 있는 바이어스 오차 및 중성자 계측설비의 경년변화

○ 노외 핵 계장 계통의 노심상부 출력지시계측기 및 하부 출력지시계측기의 전출력시 출력 전류가 핵 계장 계통의 설계전류값에 따라 정밀도에 영향을 줌.

2. 열출력 측정의 정확성

가. 정확한 열출력의 평가가능

〈그림 3〉은 3개 (P1, P2, P3)의 독립적인 열출력 측정값이 5분간 최대 불확정(Uncertainty)인 상태로 측정될 때 Kalman Filtering에 의한 열출력 측정값을 도식화 한 것인데 큰 폭의 등락 없이 참값에 접근하고 있는 것을 볼 수 있다.

출력 값은 여기에 크게 영향을 받지 않고 참값에 가까운 값을 계산한다는 것을 볼 수 있다. 단, P1, P2, P3 는 다음의 5가지 중에서 선택적으로 취할 수 있다.

- 고압터빈 1단 압력 함수로서의 터빈출력
- 에너지 평형관계를 이용한 1차측 열출력
- 노외 핵계측기를 이용한 원자로 출력
- 노내 핵계측기를 이용한 원자로 출력
- 에너지 평형 관계를 이용한 2차측 열출력

나. 원자로 안전 제한치의 여유도 증가

열출력 측정 불확정성(Uncertainty)을 감소시키므로 약 1.5% 이상의 운전 여유도 증대 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

* C.E 사 발전소 자료임

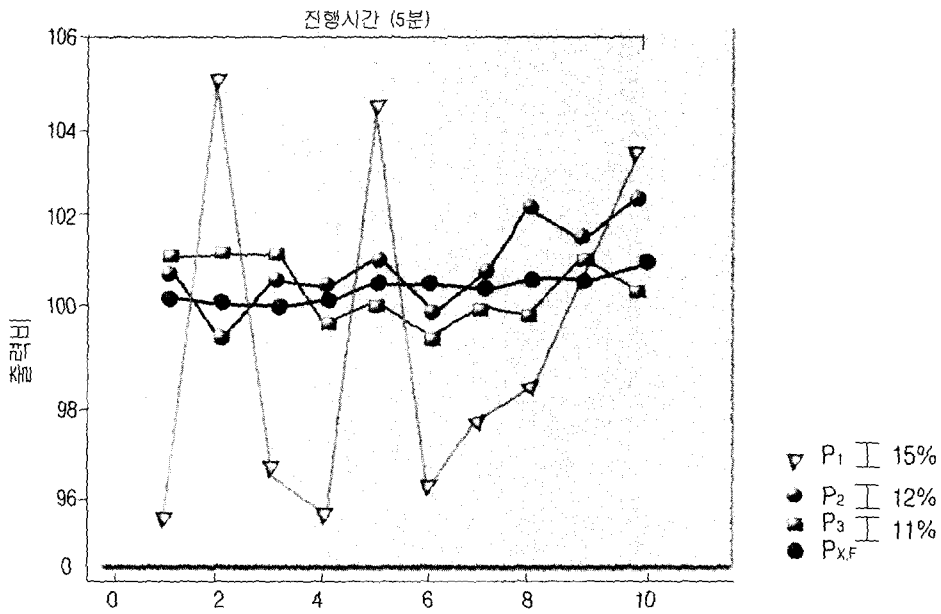
다. 계기 정확도 향상의 경제성 평가

계기명	감소
주급수 제어밸브 ΔP	0.001 MW/PA
주급수 온도	0.14 MW/℃
취출수 유량율	0.11 MW/℃
고온관 온도	0.09 MW/℃
저온관 온도	0.07 MW/℃
펌프 및 제어계통 냉각수 온도	0.05 MW/℃

* 상기자료는 50MW급 실험로(LOFT)에서 Kalman Filtering 방법을 이용하여 취득한 자료임.

동자료를 이용하여 계기 정확도 향상으로 인한 경제성을 평가해 보면 정격 열출력 3000MW를 기준으로 주급수 제어밸브 ΔP Bias는 약 55배(2775/50) 증가하여 감도가 0.06MW/PA이 된다.

ΔP Bias 오차 10% (11PA)를 감소시키는데 드는 비용은 \$500,000 소요된다고 가정하면 이로 인한 총오차감소는 $2\Delta\sigma_{POW} = \frac{2(0.06)^2(110)(11)}{(60)(0.176)} = 0.83MW$ 이다



<그림 3> Kalman Filtering 평가에 의한 열출력

(1) Filter 성능검증 실험결과

본 자료는 50MW급 실험로(LOFT)에서 검증한 결과 자료로서 기존 측정방법과 비교하면 다음의 도표와 같다.

단, 검증결과는 상호간의 열출력 차이의 표준편차가 다음과 같은 식을 만족하여 신뢰도를 확인 하였다.

$$\sigma_{DIFF} \leq \sqrt{2} \sigma_{CAL} = 2(0.22) = 0.31$$

2차측열량에 따른 필터 비교

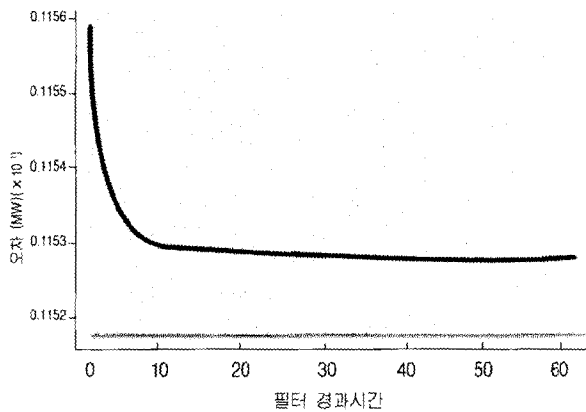
시점	시작시간	Kalman출력(MW)	2차측 측정출력(MW)	격차(MW)
L5-1	12:56:08	43.6942	43.6261	0.0701
L5-1	13:07:06	43.3456	43.3156	0.03
BY-2	11:04:46	43.9523	43.7234	0.2289
BY-2	11:14:58	44.3543	44.1533	0.201
TP	04:47:28	37.8687	37.7361	0.1326

격차합 = 3.9339MW, 평균격차 = 0.2623 MW, 표준편차 = 0.2647MW, 최고편차 = 0.6994MW

(2) 선형오차 분석결과

○ 필터구조에 의한 오차

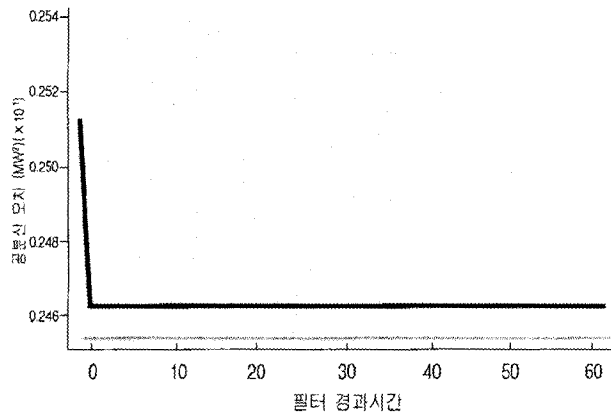
측정 자료의 입력에 따른 정상상태로 열출력을 계산하기 위해서는 약 60번의 필터를 통과해야 하는데 각 필터 통과시 소요되는 시간은 5.1초로서 총 약 5분간의 시간이 Kalman Filter 방법에서 소요되며, 필터 통과수에 대한 오차는 <그림 4>와 같다. 즉, 수개만의 필터를 통과해도 < 0.12MW보다 작은 오차를 나타내고 있다.



<그림 4> 출력평가오차곡선

○ 측정계기의 바이어스에 의한 오차

<그림 5>에서 볼 수 있듯이 몇 개만의 필터를 통과시에도 오차 공분산이 0.025MW²를 나타내고 있다.



<그림 5> 바이어스에 따른 출력오차 추정치

○ 측정계기의 불규칙 잡음에 의한 오차

<그림 6>에서 볼 수 있듯이 오차 공분산은 10개의 필터 통과시에는 0.04MW²로 나타났고 60개 필터 통과시에는 0.006MW²로 나타나는 것을 알 수 있다.

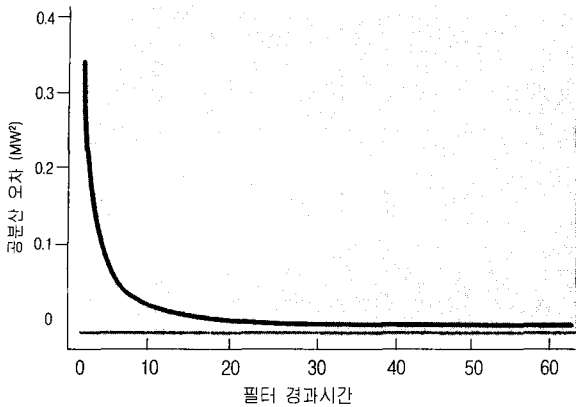
○ 합계 오차

상기 오차를 조합하여 $OCV(X) = COV(E') + COV(E^3) + \dots$

식에 대입 계산하면

$$COV(출력) \leq 0.025 + 0.006 + 0.00014 = 0.031MW^2 \text{ 또는 } \sigma_{출력} \leq 0.176MW$$

이는 5분내에 0.36MW(2σPower)의 정확도로 열출력을 취득할 수 있음을 보여줌



〈그림 6〉 잡음에 따른 출력오차 추정치

V. 결론

1. 직접 식별방법에 의한 원자로의 매개변수 추정과 그에 따른 열출력 측정방법에 Kalman Filter를 적용하고 관련 오차 및 경제성 분석 등의 기법을 적용함으로써 Kalman Filter의 얻어지는 장점과 주요특징은 다음과 같다.

가. 주요 특징

- 계통 및 기기 잡음을 제거하여 열출력 측정에 정확성을 기할 수 있다.
- 모든 측정변수에 대해 가중함수(Weighting Function)를 통계적으로 결합하여 표준 편차가 큰 측정치에 대해서는 열출력 계산시 덜 가중 적용되도록 한다.
- On-Line, 실시간(Real-Time) 및 정상상태, 과도상태하에서도 적용 할 수 있다.
- 관련된 측정변수가 많으면 많을수록 참 열출력(True Power)의 불확실한 값은 더욱더 작아진다
- Kalman Filter는 Transition 행렬의 계통 모델과 상태 벡터의 측정 모델로 구성되는

데 이들 모델은 필터 이득값과 오차 공분산을 계산함으로써 해석되어 진다. 이 모델은 열출력이 시간에 따라 변하더라도 정확한 열출력을 계산 할 수 있다.

나. 장점

- 기존의 열출력 측정방법에서는 적용되지 않는 원자로 열출력 Q_{pri} 값을 필터에 포함시켜 측정 바이어스에 의한 오차를 감소시킬 수 있다.
- Kalman Filter는 출력 자료뿐 아니라 오차가 큰 계기 및 자료 측정방법에 적용 가능하다.
- NIS 교정을 필터 결과에 따라 정확하게 할 수 있다.
- 감도분석을 수행하여 계기의 오차 발생을 줄일 수 있다.

2. Kalman Filter를 이용 열측정의 개선 :

발전소 2차측 열출력에 의존하고 있는 열출력 측정방법에 Kalman Filter를 이용 원자로 출력, 발전설비 2차측 출력 및 핵계측설비내의 원자로 출력에 대한 운전변수를 결합함으로써, 종합적 열출력을 측정법으로 개선하면서 병행되어야할 기법은 다음과 같다.

가. 연소가 진행됨에 따라 노의 핵계측기 전류치 증가는 약 1,000 MWD/MTU당 0.7%~2.1% 씩 증가하고 있으므로 가능한 현재의 열출력 방법을 개선하여 2차측 성능 저하 등을 고려, 노심 말기로 감에 따라 열출력(Calorimetric) 측정회수를 증가시켜야 한다.

나. 주급수 유량 계측용 벤츄리 교정의 의미는 직접실험을 통해 얻어지는 실제의 유량과 그 벤츄리가 지시하는 차압에 의해 계산되는 계산상의 이론 유량과의 차이를 보상해 주기 위한 배

출상수 “C” 값을 구하기 위함에 있으므로 벤츄리 교정기술을 적용 철저한 관리를 기하여야 한다.

참고문헌

1. ASME Section III Div. 1 Nuclear Power Plant Component & ANSI B31.3 Power Piping
2. W.M.YARBROUGH, “Calorimetric Determination of LOFT Reactor Power Level”, LO-08- 80-146, EG & G Idaho Internal Report(July,1980)
3. J.M.GRIFFITH, “Optimal Estimation of Nuclear Reactor Core Power : With Supporting Multivariate System Identification Methods”, EGG-EE-5342, EG & G Idaho (Mar, 1981)
4. H.J.WELLAND, “Accuracy of Reactor Power Determination Using a Secondary Calorimetric Developed for LOFT Computer”, LDR-115-3000(July, 1979)
5. PWR Power Estimation Using Kalman Filtering, Michael O, Fryer (EG & G Idaho)
6. R.E.KALMAN, “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”, J.Eng, 35 (Mar, 1960)
7. “CECOR 2.0 : General Description, Methods and Algorithms”, NPSD-103, Combustion Engineering, Inc. (1980)
(원고 접수일 1997. 9. 4)