

원자로 노외 중성자속 감시 시스템의 이산화 모델링

오현철* · 허섭 · 구인수 · 서용석 · 장문희
한국원자력연구소 일체형원자로 MMIS설계기술개발

Discretization of Ex-core Neutron Flux Monitoring System for Nuclear Reactor

H.C. Oh* · S. Hur · I.S. Koo · Y.S. Suh · M.H. Jang
Development of MMIS Design Technology for Integral Reactor, KAERI

Abstract - In this paper, we calculates mathematical model of ex-core neutron flux monitoring system for nuclear reactor and design the digital system using the bilinear transformations. The output pulse shape and resolving time of the system determines from the proposed method.

1. 서 론

원자력을 이용한 전력생산에 있어서 원자로의 노심출력을 알기 위해서는 중성자속(neutron flux)을 측정하고 있다. 특히, 우리나라의 원자력 발전소의 일반적인 모델인 가압경수로(pressurized-water reactor:PWR)에서는 노외 중성자속 감시계통(ex-core neutron flux monitoring system)을 이용하고 있다[1]. 노외 중성자속 감시계통은 기동채널(start-up channel), 제어채널(control channel), 안전채널(safety channel)로 구성[1-2]되어 있으며, 아날로그(analog)방식에 의하여 노심출력을 측정한다. 아날로그 방식은 측정량의 비선형성을 포함할 수 있으며 측정된 신호의 정확한 전달에서 있어서 오차가 발생하며 측정과정에서 온도나 주변환경에 의한 오차 등으로 신뢰성문제가 발생할 수 있는 문제점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 반도체 기술의 발전과 더불어 공학 전반에 이용되고 있는 마이크로 컴퓨터 기술을 이용하기 위하여 기존의 원자로 노심출력을 측정하는 아날로그 방식의 노외 중성자속 감시계통을 연속시간계에서 모델링한 후 산업현장에서 많이 쓰이고 있는 쌍선형변환(bilinear transformation : BLT)[3-4]을 이용하여 이산시간계로 변환하고 모의실험을 통하여 이를 검증함으로써 디지털 계통 구현의 타당성을 검증하고자 한다. 제안한 방법은 외란 및 노이즈에 강인하고 신호의 신뢰성을 높일 수 있으며 측정한 신호를 제어컴퓨터의 입력으로 직접 사용 가능할 뿐만 아니라 기존의 장치를 간략화 시킬 수 있어 설치공간을 현저히 줄일 수 있을 것으로 사료된다

2. 본 론

2.1 시스템의 개요

중성자속 계측기로부터 나오는 출력신호는 일반적으로 미약한 전하펄스이며, 계측기의 임피던스가 대단히 높다. 따라서 계측기와 주 증폭기 사이의 적당한 위치와 조건이 허락하면 계측기 바로결에 입력 임피던스가 높은 전치 증폭기를 설치하여 미소한 전하펄스를 전압펄스로 변환, 증폭시킨후 저출력 임피던스 회로로 신호를 보내야 한다.

따라서, 계측기, 케이블, 전치증폭기(preamplifier)를 나타내는 모델을 유도하기 위하여 계측기는 내부 캐패시턴스를 갖고 있는 전류원으로 표현가능하고 케이블은 전치증폭기와 병렬로 연결된 캐패시턴스와 동일한 입력 임피던스를 가진다고 가정하며 전치증폭기의 입력임피던스는 케이블 특성임피던스보다 크다고 가정한다. 전치증폭기의 입력 임피던스는 저항으로 나타내고 클리핑시정수(clipping time constant) τ_1 과 시간지연시정수(delay time constant) τ_2 를 가지며 출력 임피던스는 충분히 작은 것으로 가정한다. 위의 가정을 바탕으로 그림1에 계측기, 케이블, 전치증폭기의 등가회로를 나타내었다. C_0 는 계측기와 신호전달 케이블의 캐패시턴스의 합을 나타내며, R_0 는 전치증폭기의 입력저항이다. 전치증폭기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{K\omega_2 s}{(s+\omega_1)(s+\omega_2)} \quad (1)$$

여기서, K는 이득(gain), $\omega_1=1/\tau_1$, $\omega_2=1/\tau_2$

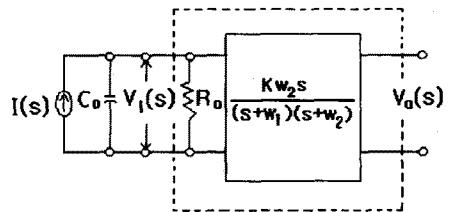


그림 1 계측기, 케이블, 전치증폭기의 등가 회로도

그림1의 등가회로로부터 전치증폭기가 없는 경우의 계측기에서 출력되는 평균전압(mean voltage)과 평균자승전압(mean-square voltage : MSV) 및 감도(sensitivity)를 유도하기 위하여 시간 $t=0$ 에서 전류 임펄스 응답에 의한 출력전압 $V_1(s)$ 는 다음과 같이 나타

낼 수 있다.

$$V_i(s) = \frac{q}{C_o(s + \omega_o)} \quad (2)$$

q : 전류파형의 전하량

τ_o : 입력 시정수 ($C_o R_o$), $\omega_o = 1/\tau_o$

따라서 식(2)에서 계측기의 전자 수집시간이 입력 시정수 τ_o 보다 충분히 작은 값으로 가정하면 campbell이론(5-6)을 이용하여 평균전압과 평균자승전압을 얻을 수 있다.

$$E_{dc} = n \bar{q} R_o \quad (3)$$

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{n R_o}{2 C_o}} \bar{q} \quad (4)$$

계측기의 전자수집시간이 τ_e 인 경우, 전류파형의 펄스 폭이 τ_e 이고, 전류파형의 최고치의 63.3%일 때 전치증폭기 입력전압은 다음과 같다.

$$V_i(s) = \frac{q(1 - e^{-s\tau_e})}{C_o \tau_e s(s + \omega_o)} \quad (5)$$

$$v_i(t) = \frac{q R_o}{\tau_o} [(1 - e^{-\omega_o t})u(t) - (1 - e^{-\omega_o(t - \tau_e)})u(t - \tau_e)] \quad (6)$$

따라서 이때의 평균전압과 평균자승전압은 다음과 같다.

$$E_{dc} = n \bar{q} R_o \quad (7)$$

$$[E_{rms}]^2 = \frac{n \bar{q}^2 R_o}{2 C_o} \left\{ \frac{2\tau_o}{\tau_e} \left[1 - \frac{\tau_o}{\tau_e} (1 - e^{-\tau_e/\tau_o}) \right] \right\} \quad (8)$$

$$\text{단, } \xi_1 \triangleq \frac{2\tau_o}{\tau_e} \left[1 - \frac{\tau_o}{\tau_e} (1 - e^{-\tau_e/\tau_o}) \right] \quad (9)$$

식(3), (4)과 식(7), (8)에서 시스템 응답을 비교하면 평균전압 E_{dc} 는 τ_e 와 전혀 관계가 없지만 평균자승전압 E_{rms} 는 τ_e 에 의하여 영향을 받는다. 그러나 $\tau_o/\tau_e = 10$ 이상이면 식(9)는 0.96이상이 된다. 따라서 입력 시정수를 적절히 선정하면 전자 수집시간에 의한 영향을 무시할 수 있다.

2.2 전치증폭기의 출력

전치증폭기는 계측기와 되도록 근접한 거리에 설치하며 고전압을 계측기에 공급하여 전하 펄스신호를 발생시키며 전하 펄스신호를 전압펄스로 변환하여 증폭시키고 주 증폭기와 계측기사이의 임피던스 매칭(impedance matching) 역할을 한다.

시간 $t=0$ 에서 단일 전류 임펄스 입력인 경우의 전치증폭기의 출력은 식(1), (2)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o(s) = \frac{qK\omega_2 s}{C_o(s + \omega_o)(s + \omega_1)(s + \omega_2)} \quad (10)$$

식(10)의 시간 응답은 다음과 같다.

$$v_o(t) = qR_o K \omega_2 \left\{ \frac{\omega_2 e^{-\omega_2 t}}{(1 - \frac{\omega_2}{\omega_o})(\omega_2 - \omega_1)} - \frac{\omega_1 e^{-\omega_1 t}}{(1 - \frac{\omega_1}{\omega_o})(\omega_2 - \omega_1)} - \frac{e^{-\omega_2 t}}{(1 - \frac{\omega_1}{\omega_o})(1 - \frac{\omega_2}{\omega_o})} \right\} \quad (11)$$

(단, $\omega_o \neq \omega_1 \neq \omega_2$)

따라서, 시스템의 평균자승전압은 다음과 같다.

$$[E_{rms}]^2 = \frac{n \bar{q}^2 R_o K^2}{2 C_o} \left\{ \frac{\omega_2^2}{\omega_o(\omega_2 - \omega_1)} \left[\frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \left(\frac{\omega_2}{(1 - \frac{\omega_2}{\omega_o})^2} + \frac{\omega_1}{(1 - \frac{\omega_1}{\omega_o})^2} - \frac{4\omega_1\omega_2}{(1 - \frac{\omega_1}{\omega_o})(1 - \frac{\omega_2}{\omega_o})(\omega_2 + \omega_1)} \right) + \frac{4}{\omega_o(1 - \frac{\omega_2}{\omega_o})(1 - \frac{\omega_1}{\omega_o})} \right] \right. \\ \left. \left[\frac{\omega_2 - \omega_1}{4(1 - \frac{\omega_2}{\omega_o})(1 - \frac{\omega_1}{\omega_o})} + \frac{\omega_1}{(1 - \frac{\omega_1}{\omega_o})(1 + \frac{\omega_1}{\omega_o})} + \frac{\omega_2}{(1 - \frac{\omega_2}{\omega_o})(1 + \frac{\omega_2}{\omega_o})} \right] \right\} \quad (12)$$

$$\triangleq \frac{n \bar{q}^2 R_o K^2}{2 C_o} \xi_2 \quad (13)$$

식(13)에서 $\omega_2 \gg \omega_o, \omega_1$ 이면 선정하면 $\xi_2 = \omega_o/(\omega_o + \omega_1)$ 이다.

2.3 감시계통의 이산화

계측기에서 출력되는 감시계통의 이산화하기 위해서 연속계에서 모델링된 식(10)을 이용한다. 연속시간계를 이산시간계로 변환하는 기법에는 쌍선형 변환기법과 matched pole-zero(MPZ) 등의 방법이 있다. 쌍선형 변환법은 산업현장에서 많이 사용되고 있는 기법(3)으로 본 논문에서는 쌍선형 변환 기법을 이용하여 이산시간계로 변환한다.

연속시간 시스템을 $G_c(s)$ 라 하고 이를 디지털 시스템으로 구현한다고 가정하면 샘플링구간 T는 샘플링 주파수

$$f_s = \frac{1}{T}, \quad \omega_s = \frac{2\pi}{T}$$

를 만족해야 한다. 그리고, 쌍선형 변환기법에서 라플라스 변환 변수 s와 Z변환 변수 z 사이의 관계는 $z = e^{sT}$ 에 의하여 변환된다. 식(10)으로부터

$$G_c(s) = \frac{K\omega_2 s}{C_o(s + \omega_o)(s + \omega_1)(s + \omega_2)} \quad (14)$$

이다. 각각의 극(pole)은 $s = \omega_o, \omega_1, \omega_2$ 이며 영점은 $s=0$ 를 갖는다. 그리고 상대차수(relative degree) $r = n - m = 2$ 이다. 따라서 BLT에 의한 이산시간 전달함수는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$G(z) = \frac{K\omega_2 \frac{2(z-1)}{T(z+1)}}{C_o \left\{ \left(\frac{2(z-1)}{T(z+1)} + \omega_o \right) \left(\frac{2(z-1)}{T(z+1)} + \omega_1 \right) \left(\frac{2(z-1)}{T(z+1)} + \omega_2 \right) \right\}} \quad (15)$$

$$G(z) = \frac{K\omega_2}{C_o} \left[\frac{T}{2}(z+1) \right]^2 \frac{(z-1)}{\left(\left(1 + \frac{\omega_1 T}{2}\right)z - \left(1 - \frac{\omega_1 T}{2}\right) \right)} \times \frac{1}{\left(\left(1 + \frac{\omega_1 T}{2}\right)z - \left(1 - \frac{\omega_1 T}{2}\right) \right) \left(\left(1 + \frac{\omega_2 T}{2}\right)z - \left(1 - \frac{\omega_2 T}{2}\right) \right)} \quad (16)$$

따라서, 식(16)은 식(10)의 시스템을 샘플링 시간 T에 의하여 이산화 하였고, 식(10)이 안정한 전달함수이면 변환된 식(16)도 또한 안정하다.

2.4 적 용 예

제안된 방법을 검증하기 위하여 시스템은 다음과 같은 계수(parameter)를 갖는다고 가정하여 모의실험을 수행하였다.

<short cable>

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 1.41 \times 10^5 \text{ rad/sec}, \quad \omega_2 = 3.14 \times 10^6 \text{ rad/sec} \\ C_o &= 327 \text{ pF}, \quad R_o = 5.1 \text{ k}\Omega, \quad K = 178 \\ \omega_o &= 6.00 \times 10^5 \text{ rad/sec} \\ \bar{q}_n &= 1.4 \times 10^{-13} \text{ Coulombs/pulse} \end{aligned}$$

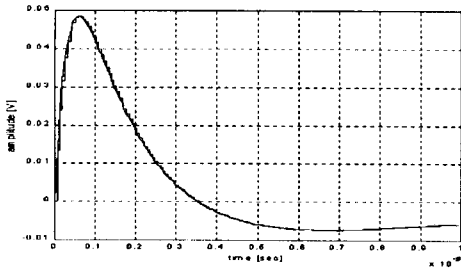


그림 2 전치 증폭기의 출력(short cable)

<long cable>

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 1.41 \times 10^5 \text{ rad/sec}, \quad \omega_2 = 3.14 \times 10^6 \text{ rad/sec} \\ C_o &= 655 \text{ pF}, \quad R_o = 5.1 \text{ k}\Omega, \quad K = 178 \\ \omega_o &= 3.00 \times 10^5 \text{ rad/sec} \\ \bar{q}_n &= 1.4 \times 10^{-13} \text{ Coulombs/pulse} \end{aligned}$$

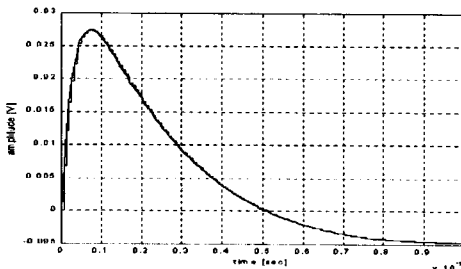


그림 3 전치증폭기의 출력(long cable)

2.2와 2.3절에서 나타난 기법을 적용하였을 경우의 전치증폭기의 출력은 그림 2, 3과 같다. 각각의 샘플링 주파수는 시스템의 가장 빠른 시정수의 1/5인 15MHz로 결정하였다[5]. 평균자승전압(MSV)을 측정하기 위해서는 고속의 A/D 변환장치가 필요하다.

3. 결 론

원자로 노외 중성자속 감시시스템을 모델링하고 이를 쌍선형 변환을 이용하여 이산화 하였으며, 이를 토대로 디지털 시스템을 구현하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험 결과에서 resolving time은 케이블의 길이에 대하여 영향이 거의 없으며 전치증폭기의 클리핑 시정수에 의하여 결정되고, MSV 감도(sensitivity)는 입력시정수에 의하여 결정됨을 알 수 있었다. 또한 전치증폭기의 출력을 측정하기 위해서는 고속의 A/D 변환장치를 필요로 한다.

본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다

(참 고 문 헌)

- [1] KAERI, "Ex-core Technical Manual I, II", 1994.
- [2] L.M. Johnson and C.H. Meijer, "A two-range system for ex-core neutron flux monitoring", IEEE Nuclear Power Systemes Symposium-San Francisco, California Oct. 29~31., pp.1~8, 1969.
- [3] Frank L. Lewis, "Applied optimal control and estimation", Prentice-hall Inc., pp.254~270, 1992.
- [4] Rolf Isermann, "Digital control system-fundamental, deterministic control", Springer-Verlag, 2nd, pp.85~94, 1989.
- [5] R.A.DuBridge, "Campbell theorem-System concepts and results", IEEE Transaction on Nuclear Science, Feb., pp.241~246, 1967.
- [6] David A. Gwinn and William M. Trenholm, "A log N and period amplifier utilizing statistical fluctuation signals from neutron detector", IEEE Transaction on Nuclear Science, April., pp.1~9, 1963.